

光学学报

面向月球环绕探测的光谱成像:研究现状与技术挑战

何志平^{1,2*}, 桂裕华^{1,2}, 李津宁^{1,2}, 吕刚^{1,2}, 徐睿^{1,2}, 王梅竹^{1**}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光谱成像仪可以精准探测月球表面物质成分与温度及其变化特性,成为新时期月球科学探测任务中重点配置的科学载荷,为进一步认知月球起源与演化历史、资源分布与环境特性提供科学数据。现有月球环绕探测光谱成像数据为人类认知月球表面物质组成、资源分布及演化历史等提供了科学参考,但面向月球资源与环境开发与应用的勘查存在空间分辨率较低且红外谱段偏少的问题。概述了国内外月球探测任务中的典型光谱成像载荷与研究热点;针对月球光谱的精准探测需求,对所面临的具体技术难题进行了讨论;就如何突破现有技术挑战,获取更高分辨率、更高灵敏度、更可信的光谱科学数据提出了针对性的具体解决思路与技术途径;最后,对面向月球环绕探测的光谱成像的发展趋势、挑战与应用进行了总结与展望。

关键词 光谱学; 月球; 环绕探测; 光谱成像; 遥感

中图分类号 P184.5+4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1730001

Spectral Imaging for Lunar Orbit Exploration: Research Status and Technical Challenges

He Zhiping^{1,2*}, Gui Yuhua^{1,2}, Li Jinning^{1,2}, Lü Gang^{1,2}, Xu Rui^{1,2}, Wang Meizhu^{1**}

¹Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

Abstract The spectral imager can accurately detect the composition and temperature of the lunar surface and their variable characteristics, becoming a key scientific payload in the new era of lunar scientific exploration missions, which provides scientific data for further cognition of the origin and evolutionary history, resource distribution, and environmental characteristics of the lunar. The existing spectral imaging data of lunar orbit exploration provide scientific reference for human cognition of lunar surface material composition, resource distribution, and evolutionary history, but there are problems of low spatial resolution and few infrared spectral bands for realizing precise exploration of lunar resources and environment development and application. The paper firstly outlines the typical spectral imaging payloads and research hotspots in lunar exploration missions at home and abroad. Secondly, the specific technical challenges faced are discussed specifically for the precise detection needs of lunar spectra. Then, specific solutions and technical approaches are proposed on how to break through the existing technical challenges and obtain higher resolution, more sensitive, and more reliable spectral scientific data. Finally, the development trend, challenges, and applications of spectral imaging for lunar orbit exploration are summarized and prospected.

Key words spectroscopy; lunar; orbital detection; spectral imaging; remote sensing

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-06-25; 录用日期: 2022-06-30

基金项目: 国家杰出青年科学基金(62125505)、上海领军人才项目、上海市优秀学术/技术带头人项目(19XD1424100)

通信作者: *hzping@mail.sitp.ac.cn; **mzhwang@mail.sitp.ac.cn

1 引言

月球作为距离地球最近的天体,其形成与演化研究、空间环境探测,以及矿物资源勘探等一直是深空探测领域研究的重要目标,月球也被认为是人类地外资源利用的第一选择。光谱成像仪具有“图谱合一”的特点,可以同时获取目标的几何、光谱和辐射特征,特别适用于表面矿物成分的无损探测及分析,成为新时期月球科学探测任务中重点配置的科学载荷^[1-2]。现有月球光谱成像探测主要包括环绕器全月宏观遥感、着陆及巡视器局部特征区域原位精细探测^[3],获取了空间分辨率从百米至毫米,光谱范围从可见光、近红外至长波红外的科学数据,为人类月球认知水平的不断提升提供了重要支撑。

月球遥感光谱成像探测主要依托于环绕器平台,实现对月球全球高覆盖率的宏观遥感探测,空间分辨率通常为数十米至千米量级。近年来国内外发射的日本“月亮女神”、中国“嫦娥一号”、印度“月船一号”、美国月球勘测轨道器和印度“月船二号”等月球环绕探测器均配置光谱成像科学载荷,不断加深人类对于月球表面形貌、物质组成、资源分布、内部构造及演化历史等的了解和认识,同时也为地外天体资源勘探与利用、太阳系及宇宙起源与演化等科学问题的研究提供了宝贵的科学数据^[4-7]。但是,对于人类面向月球资源开发与应用的勘查任务,仍存在空间分辨率较低且红外谱段偏少的问题。

光谱成像是精准探测月球表面物质成分及其变化特性,从而进一步认知月球起源与演化历史、资源分布与环境特性的关键,也是研究如岩浆洋演化历史、月球水含量及赋存状态、全月球热环境状态及变化等重大科学问题的关键。其中,可见光、近红外谱段主要用于月球主要矿物(辉石、斜长石、橄榄石等)识别、矿物元素[钙(Ca)、镁(Mg)等]分析和表面水含量识别研究,而中长波谱段特别适合月球硅酸盐矿物识别、水赋存状态确定、热环境监测研究与应用。现有的月球光谱成像探测在可见光、近红外谱段的光谱分辨率基本可满足月面物质成分勘探需求,但空间分辨率偏低;而中长波红外谱段存在空间分辨率与光谱分辨率偏低、成像谱段数偏少的局限性。一方面,空间分辨率偏低将影响月面矿物成分的精细勘查,存在复杂区域的局部物质成分特征不明显、无法识别小冷阱等问题,更不能满足月球科研站选址与航天员活动所需的高精度制图要求;另一方面,中长波红外谱段的光谱不连续、分辨率不够高,会导致月表资源赋存状态与环境变化特性不明确的问题。

总体而言,面向月球环绕探测的光谱成像的发展趋势主要为从可见光、近红外谱段向中长波红外谱段拓展的更宽谱段高光谱成像,以及空间分辨率的进一步提升。但是,宽谱段、高空间分辨率光谱成像面临一系列技术挑战,例如:月球表面暗弱目标高信噪比成像难、中长波红外背景抑制难、月表复杂环境引起的数据

量化问题。如何突破现有技术挑战,获取更高分辨率、更高灵敏度、更可信的光谱成像科学数据是该领域水平提升的关键。本文首先对国内外现有月球成像光谱探测载荷技术及应用现状开展分析;然后针对月球光谱精准探测的发展需求,讨论了所面临的技术难题;结合空间探测领域的相关技术,分析了可能的研究热点与有效技术途径;最后对发展趋势、技术挑战进行了总结与展望。

2 现状与趋势

月球无疑已成为当代深空探测的重点领域,进入21世纪,中、美、日、印等国先后进行了新一轮的月球探测。日本“月亮女神”探测器于2007年9月14日成功发射,配置月球成像/光谱仪光学仪器包(LISM),对月球开展了综合性、全球性的普查探测^[8]。中国“嫦娥一号”任务于2007年10月24日成功发射,配置干涉成像光谱仪(IIM),旨在获取月球矿物组成及分布^[9]。印度“月船一号”任务于2008年11月8日成功发射,配置月球矿物测绘仪(M³),旨在绘制月球表面的三维高分辨率地形图和研究月球表面的矿物和化学元素分布,研究月球、太阳系起源与演化^[10]。美国宇航局月球勘测轨道器(LRO)于2009年6月18日成功发射,配置月球热辐射计(Diviner),主要用来探测月球表面温度分布及极区潜在冰沉积^[11]。印度“月船二号”任务于2019年7月22日成功发射,配置红外成像光谱仪(IIRS)^[12],其探测光谱范围拓宽到0.8~5 μm,实现了短中波红外月球图谱绘制能力。美国预计于2022年发射的Artemis计划,拟配置月球红外成像(LunIR)科学载荷,将对月球进行飞越红外成像^[13]。

中、美、日、印的月球环绕光谱成像探测代表了当前国际最新水准,主要光谱类科学仪器技术指标如表1所示,包括已列入近年发射计划的探测任务拟配置科学载荷的性能指标。美国预计于2025年发射的“月球开拓者”(Lunar Trailblazer)计划,拟配置高分辨率挥发物和矿物月球制图仪(HVM³)和月球热成像仪(LTM),专注于月球水赋存形态研究^[14-15]。中国预计于2025年发射的“嫦娥七号”任务,拟配置宽谱段红外光谱成像分析仪(WIRIS),其具有宽谱段(0.45~10.0 μm)、高光谱分辨率等特点,致力于月面矿物资源及热环境勘探^[2]。根据表1,月球环绕光谱成像探测载荷具有光谱范围进一步拓宽、光谱及空间分辨率进一步提高、量化水平进一步提高的整体发展趋势。表1中SNR代表信噪比,ρ代表目标反照率,NEdR代表噪声等效微分辐射度,NETD代表噪声等效温差,N/A代表此栏不适用。

2.1 典型月球环绕光谱成像载荷

“月亮女神”配置的月球成像/光谱仪光学仪器包LISM由3台高性能的光学探测单元组成,包括地形测绘相机(TC)、多波段成像仪(MI)、连续光谱测量仪(SP),总质量为54 kg。地形测绘相机和多波段成像仪均以推扫成像方式连续观测月球表面,载荷如图1

表 1 已发射及在研的月球探测主要成像光谱仪载荷性能对比

Table 1 Performance comparison of current and subsequent major imaging spectrometer payloads for lunar exploration

Payload	IIM/China/ CE-1	M ³ /India/ Chandrayaan-1	Diviner/ USA/ LRO	IIRS/India/ Chandrayaan-2	HVM ³ /USA/ Lunar Trailblazer	LTM/UK/ Lunar Trailblazer	WIRIS/ China/ CE-7
Time	2007	2008	2009	2019	~2025	~2025	~2025
Spectral range / μm	0.48-0.96	0.43-3.0	0.35-400	0.8-5.0	0.6-3.6	7.0-10.0, 6-100	0.45-10.0
Spectral resolution / nm	7.62 (at 0.48 μm), 0.48 29 (at 0.96 μm)	~15	—	20-25	~15	<0.5 (at 7-10 μm)	≤ 10 (at 0.45-3.0 μm), ≤ 0.2 (at 3.0-10 μm)
Number of spectral bands	32	256	9	160	—	—	≥ 500
Performance	SNR is ≥ 100 (60° solar elevation angle and $\rho=0.2$)	SNR is ≥ 100 (10° solar elevation angle, Apollo16 sampling area, 1.44×10^{11} m)	—	NEdR is 0.001-0.005 $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	SNR is > 100 for specific area	NETD is $\leq \pm 2$ K at 110-400 K	≥ 150 (30° solar elevation angle, $\rho=0.1, 0.45-3.0 \mu\text{m}$); NETD is $\leq \pm 0.5$ K at 200-400 K
Imaging field of view	7.3°	24°	6.7 mrad in-track, 3.4 mrad cross track	11.4°	24°	6.3°	$\geq 3.8^\circ$
Instantaneous field-of-view (IFOV) / mrad	1 (resolution is 200 m at 200 km)	0.7 (resolution is 70 m at 100 km)	—	0.4 (resolution is 40 m at 100 km)	0.7 (resolution is 70 m at 100 km)	0.25 (resolution is 25 m at 100 km)	≤ 0.2 (0.45-3 μm) ≤ 0.3 (3.0-10 μm)
Swath width / km	25.6 (at 200 km)	40 (at 100 km)	3.4 (at 50 km)	20 (at 100 km)	—	—	~2.7 (at 30 km), ~9 (at 100 km)
Scanning function	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Motion compensation

(a)所示。TC由2台线阵相机组成,为实现立体成像观测,分别对目标进行前视和后视全色(430~850 nm)成像。MI对星下点进行多波段线阵观测,通过滤光片获取415~1550 nm谱段范围内9波段的月表影像。SP是一台可见-近红外光谱仪(520~2600 nm),可获得月球表面连续光谱数据。SP内置一套在轨定标装置,包含两台卤素灯,用来实现仪器的监测与定标^[16-17]。

“嫦娥一号”配置的干涉成像光谱仪IIM的谱段覆盖480~960 nm,谱段数为32,光谱分辨率为7.62~29 nm,如图1(c)所示。IIM基于Sagnac型傅里叶变换

干涉技术实现光谱成像探测,获取覆盖月球南北纬70°范围内约84%面积的成像光谱数据,为月表多种相关元素含量测定和物质成分分布研究提供科学数据^[18-20]。

“月船一号”配置的月球矿物测绘仪M³由美国航空航天局(NASA)研制,利用光栅分光,其光谱探测范围为430~3000 nm,旨在实现获取在地质演化的背景下描述和绘制高分辨率的月表矿物组成分布情况的科学目标,实物如图1(d)所示^[10]。M³具有高信噪比、低质量、低功耗等优点,对月球进行了全方位环绕光谱成像探测,取得了月球表面矿物组成分布及羟基/水

(OH/H₂O)分布,获得月球两极区域可能存在OH或H₂O等重大科学成果^[4]。特别是OH/H₂O分布图的绘制,改变了人类对月球是一个干燥星球的认识,引起了国际轰动,使得月球水探测成为研究热点。同时,M³的红外光谱仅覆盖至3 μm,不能准确确定水合作用的性质,这引起科学界对月球水含量、分布及赋存状态的争议。进一步拓宽红外探测谱段,开展更精准的探测也不断成为领域共识。

月球勘测轨道器配置的推扫式月球热辐射计Diviner,用于绘制月球表面的热辐射和反射的太阳能量,如图1(e)所示。Diviner采用非制冷热电堆探测器阵列,由滤光片分光,覆盖谱段包括太阳反射谱段(0.35~2.8 μm)、克里斯蒂安森特征(CF)谱段(7.55~8.68 μm)与热辐射谱段(13~400 μm),能够实现月面白昼、夜间与极地的测温,测温范围可低至<43 K。除具备宽温度范围的测温能力,Diviner还可实现月表属性绘制(包括整体热属性、岩石风度与物质成分)和极地冷阱特征描述(绘制冷阱区域、确定冷阱温度和热物理特性、评估潜在的月球挥发性资源)的能力。Diviner在月球全球温度、南极冷阱、太空风化热

物理特性等研究方面贡献了大量科学数据及科学成果^[6-7,21]。

“月船二号”配置的短中波红外成像光谱仪IIRS继承M³技术,其光谱范围拓展至0.8~5.0 μm,光谱分辨率为20~25 nm,具有250个连续采样谱段,在100 km轨道高度对20 km幅宽以约80 m的空间分辨率进行推扫成像,实物如图1(f)所示。“月船一号”上的M³已经检测到并绘制了月球的羟基分布,表明月球表面存在OH或H₂O。科学界寻求使用具有扩展光谱范围的高分辨率(空间和光谱)成像仪器对月球表面进行更定量的分析。在2~5 μm光谱范围内的IIRS影像将有助于确认和量化M³的科学发现;在4~5 μm光谱范围内的成像可单独用于评估月球表面的热辐射,这将有助于校正2~3.5 μm区域内总辐射的热分量;3.5~5 μm的光谱区域将用于了解月球表面的热特性。IIRS首次以80 m空间分辨率全面表征月球上3000 nm处的水合特征,并对月球北极附近的OH和H₂O分别进行了明确的识别^[5],并首次在阿里斯塔克斯陨石坑和邻近区域发现OH^[5],这有助于更好地绘制月球水合作用并对其进行分类。

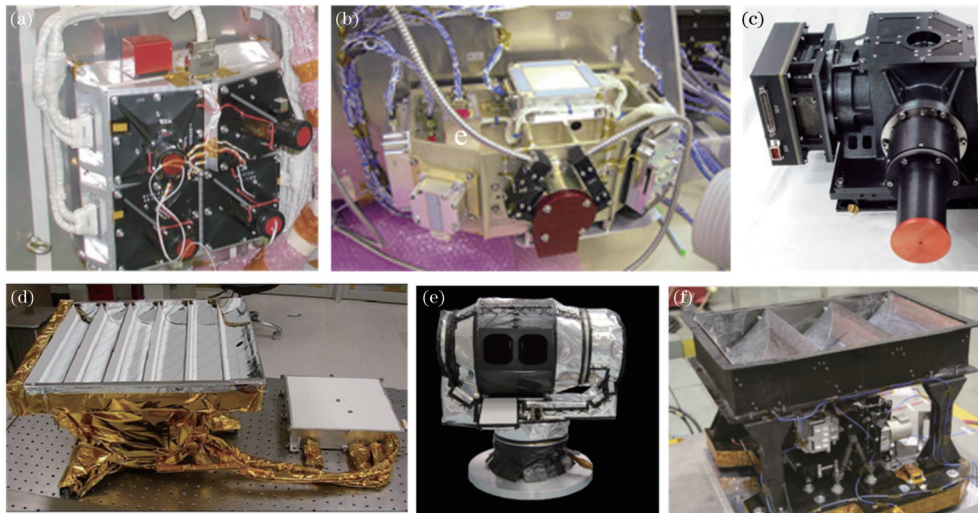


图1 典型月球环绕光谱成像载荷。(a) TC和MI^[8]; (b) SP^[8]; (c) IIM^[9]; (d) M³^[10]; (e) Diviner^[11]; (f) IIRS^[12]

Fig. 1 Typical lunar orbit spectral imaging payloads. (a) TC and MI^[8]; (b) SP^[8]; (c) IIM^[9]; (d) M³^[10]; (e) Diviner^[11]; (f) IIRS^[12]

2.2 研发中的主要载荷

如前所述,现有月球探测光谱载荷及其应用情况距离人类面向月球资源开发与应用的勘查任务,仍存在空间分辨率较低且红外谱段偏少的问题。随着月球科学研究与应用,以及光谱成像技术的进一步发展,以及星地间数传通信能力的进一步提升,迫切需要对月球表面物质成分及热环境的精细探测。技术发展上除了空间分辨率、光谱分辨率的进一步提高外,呈现出由可见光向中、长波红外谱段拓展的趋势,同时进一步促进对月球热辐射的深入研究。

美国在2019年底批准了“月球开拓者”(Lunar Trailblazer)小卫星计划,着重了解月球水的赋存形态、丰度和分布,以及月球潜在的随时间变化的水循环^[14]。Lunar Trailblazer具有4个主要的科学目标:1)确定水

的形式(OH, H₂O或冰)、丰度和局部分布与纬度分布,以及月壤成熟度和岩性的关系;2)评估月球水体在阳光照射表面上可能的时变;3)使用地形散射光确定永久阴影区域中裸露水的形式和丰度;4)了解反照率和表面温度的局部梯度如何影响冰和OH/H₂O浓度,包括潜在的、新的、小的冷阱。“月球开拓者”将配置美国喷气推进实验室(JPL)研发的高分辨率挥发物和矿物的月球制图仪(HVM³)^[15]和英国的月球热成像仪(LTM),通过对选定的关注区域进行联合测量,可以同时得到成分、温度和热物理性质。图2(a)和2(b)是HVM³和LTM的结构示意图。HVM³是M³的升级版,将光谱探测波长范围向中波红外拓展至0.6~3.6 μm,从而更适合水存在形式的探索,而其空间分辨率、光谱分辨率和信噪比与M³相当。LTM是

Diviner 的升级版,由 7.0~10.0 μm 的光谱成像及 6~100 μm 的多光谱成像组成,主要提高了 7.0~10.0 μm

的光谱和空间分辨率,从而具备 25 m/pixel 高空间分辨率的月表 CF 值探测以及温度测量能力。

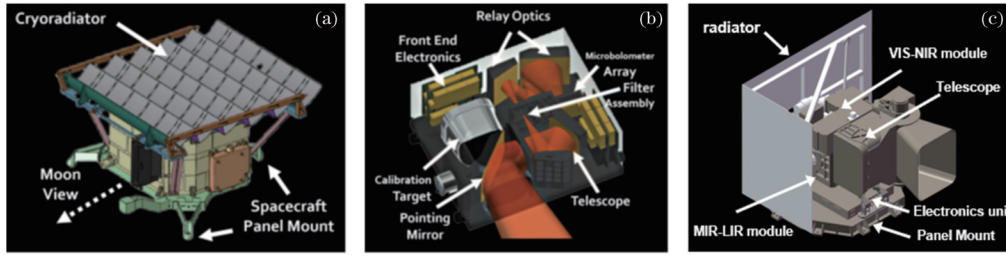


图 2 研发中的主要月球遥感成像光谱仪。(a) HVM^[14]; (b) LTM^[14]; (c) WIRIS

Fig. 2 Major lunar remote sensing imaging spectrometer under development. (a) HVM^[14]; (b) LTM^[14]; (c) WIRIS

中国“嫦娥七号”任务计划于 2025 年开展月球极区环境与资源勘查,拟配置的宽波段红外光谱成像分析仪 WIRIS [图 2(c)] 将覆盖 0.45~10.0 μm 谱段,可以全面获取高空间分辨率(优于 30 m/pixel)的月球基础性的、用于物质成分分析的光谱成像数据,光谱仪还将实现中长波红外高光谱成像,用于探测月面热环境及其变化,为月面矿物资源及热环境勘探提供有效的科学数据,服务于月球关键科学问题、“嫦娥七号”就位探测器的预选着陆区详查、月球科研站初选地址及其附近区域的详查探测和定点监测,完成目标区域矿物、水等资源勘探及温度环境等调查任务。如表 1 所示,相比于“月球开拓者”任务载荷,WIRIS 在光谱范围上覆盖 HVM³ 与 LTM 的热红外谱段,光谱分辨率及空间分辨率等关键性能指标与 HVM³ 与 LTM 相比更优,具备强大的月表矿物、水、丰度的测量能力,特别可针对月球南极等重点区域实现更高精度的成像光谱测量。同时,WIRIS 也具备精细研究月球水循环,确定水的丰

度、局部分布和形式的的能力,从而为未来人类和机器人月面活动地点遴选、月球及其资源的精细勘探与开发利用提供全方位的资源与热环境勘探科学数据支撑。

3 难题与挑战

获取更高分辨率、更高灵敏度、更可信的光谱成像科学数据是月球环绕光谱成像技术领域的不断追求,其中关键在于中长波红外谱段的高光谱成像,以及空间分辨率的进一步提升。特别是在对月球极区暗弱光照区域进行环境与资源勘查时,面临很大的技术与挑战,如图 3 所示,具体包括:1)近月轨道因空间分辨率提高带来探测帧频过高、图像信噪比降低的问题;2)在进行中长波红外波段光谱高分辨率成像时,光机背景辐射影响更大,长积分成像时暗电流大幅增大;3)成分分析与科学解译水平提升的前提是获得精准量化目标辐亮度,科学数据量化的稳定性、准确性的要求高、难度大。

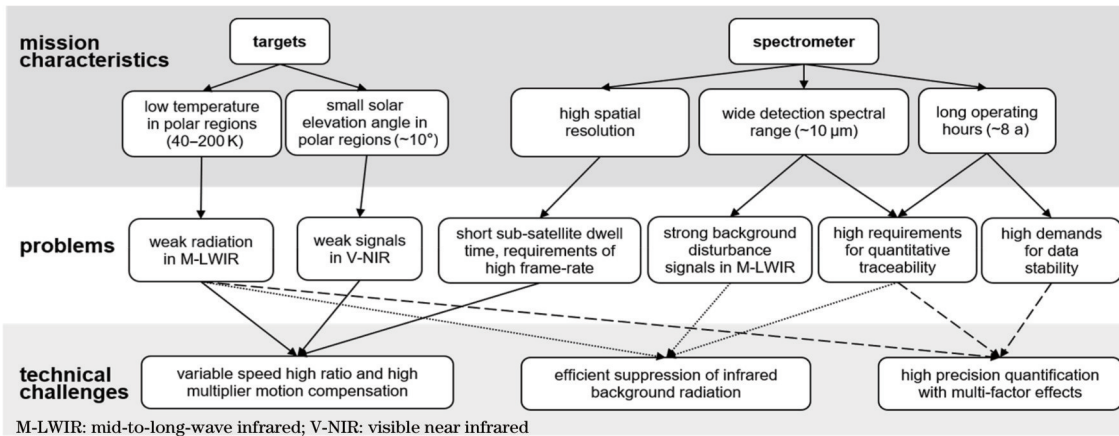


图 3 月球极区暗弱目标成像光谱探测难题

Fig. 3 Challenges in imaging spectral detection of faint targets in lunar polar region

当光谱成像的空间分辨率进一步提升时,所成像的目标信号强度将进一步降低,特别是对月表极区暗弱目标光谱成像的信噪比将显著下降。月球极区主要覆盖南北纬 80° 以上区域,太阳高度角小($\sim 10^\circ$),温度较低(日照区约 200 K,弱光照区约 100 K,永久阴影区更低至约 40 K),目标能量很弱。因此,只有解决暗弱

目标高信噪比探测、高效红外背景辐射抑制、高精度数据量化等多项关键问题,才能有望实现分辨率、信噪比与灵敏度的同步提升。

3.1 变速高比、高倍率运动补偿

运动补偿技术通过降低目标与探测器的相对运动速度、降低探测帧频并延长载荷星下点驻留时间,来提

升仪器探测信噪比和灵敏度。特别是当空间分辨率进一步提升、轨道速高比(速度/高度之比)无法满足驻留时间需求时,运动补偿技术尤其关键。月球环绕卫星通常采用近月点数十 km 量级的椭圆轨道探测,近月点飞行速度及变化快,此时,采用运动补偿技术实现长积分时间以获取高速高比、低照度区域的高质量数据,需要的补偿倍率(补偿后与未补偿的星下点驻留时间之比)很高,对机构稳定性的要求也很高。例如:月球

南极的沙克尔顿撞击坑(129.78°E,89.67°S)内部可能存在水冰,是月球科学探测的重要目标,然而地形数据显示该撞击坑边缘-坑底存在高至 4 km 的高度差,如图 4 所示。这对数十 km 近月点光谱成像的运动补偿成像探测的影响非常大,往往还会出现高地区域漏扫、凹陷区域扫描效率降低的问题;同时,月球南极光照的季节性变化^[22]也是影响仪器探测信噪比的重要因素。

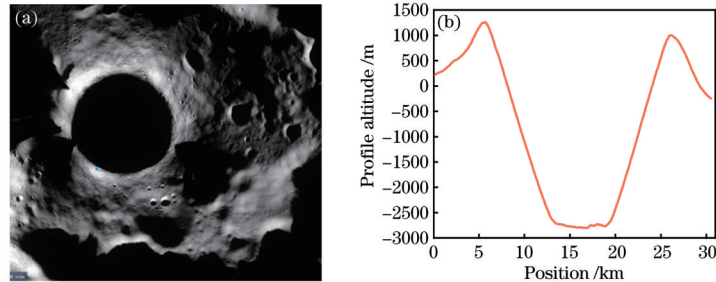


图 4 月球南极撞击坑及其地形图。(a)沙克尔顿(Shackleton)撞击坑;(b) LOLA 测高仪获取的撞击坑剖面高程图

Fig. 4 Diagram of impact crater at the lunar south pole and its topography. (a) Shackleton impact crater; (b) elevation map of impact crater profile acquired by LOLA altimeter

另一方面,受限于运载能力,深空探测载荷需要采用轻量化设计,这使得探月卫星多采用椭圆轨道,且轨姿控制能力相对较弱,卫星平台稳定性受限。当卫星采用偏心率很大的椭圆轨道时,卫星速高比变化剧烈,然而同一运动补偿模式适应的速高比范围极为有限,不合理的补偿参数会使光谱成像载荷在较短的补偿周期内出现漏扫、数据过密等问题,影响观测效率与数据质量,目前尚未见载荷实现高偏心率椭圆轨道下的运动补偿的参考文献报道。同时卫星的轨道误差会使光谱成像载荷的实际工作高度与设计值存在差异,而运动补偿模式参数设计很大一部分取决于载荷至目标的相对距离。因此,卫星平台的误差会引入数据漏扫、覆盖率低的问题。

上述问题说明,高补偿倍率、速高比变化剧烈、月面地形、轨道误差等增加了月球高空间分辨率光谱遥感数据的获取难度,合理的补偿参数设置需要综合考虑实时的轨道高度、卫星速度、目标高度、目标光照等,对载荷、卫星平台、地面控制等要求较高。因此,变速高比、高倍率运动补偿是月球高分辨率光谱探测的主要技术挑战之一,如何突破轨道高度与成像参数耦合效应、实现轨高效运动补偿是获取高质量数据的关键。

3.2 红外背景辐射高效抑制

随着红外成像光谱载荷探测谱段逐渐向中长波方向扩展,仪器自身热辐射的影响也不断提升,特别是实现高光谱分辨率、高空间分辨率成像时尤为突出。一方面,红外光谱成像载荷光谱通道数增多,必然导致有效的光谱信号相对下降,需要更长的积分时间来获取有效的光谱图像;而仪器温度引起的红外背景辐射是全谱段辐射信号,成为探测器单位时间内接收光通量的主要组成部分,限制探测器的有效积分时间的增加,

从而降低对有效信号的探测能力。另一方面,背景辐射强度波动变化也进一步增加了对微弱目标有效光谱信号的检测难度。因此,开展针对性的红外背景抑制研究与方案设计、抑制仪器自身红外背景辐射的影响,成为仪器成功获取有效红外光谱数据的关键之一,其能力与水平将直接影响热红外光谱数据定量化水平。

红外背景抑制技术主要包括低温制冷抑制仪器热辐射和构建辐射传输模型进行热辐射校正等,涉及低温制冷、光机消热化设计、真空保持、算法模型与仿真验证等多方面的技术难点。低温制冷通常依靠被动辐射制冷或主动液氮、机械制冷等,面向月球成像光谱探测,制冷机工作可靠性至关重要。制冷机出现长时间工作制冷温度不稳定或无法启动等情况,都将对数据定量化带来巨大压力,严重影响数据精度,甚至造成载荷无法工作等严重后果。因此,提高低温光机系统在深空复杂环境下的高可靠性是关键之一;对于低温制冷后残余的热辐射影响,还需要构建辐射传输模型进行进一步校正,这是另一关键。总之,月球环绕红外光谱成像追求高分辨率、高信噪比、高稳定性探测,需要整体权衡考虑光学系统结构、探测器、功耗、体积、重量等,建立模型对制冷温度、温区、制冷手段、仪器结构等进行仿真优化,最终实现红外背景的高效抑制。

3.3 多因素效应高精度定量化

高精度定量化的光谱图像数据是准确反演矿物成分及含量以及月球演化等系列科学研究的基础,随着月球科学研究对宽谱段、高分辨率、高精度红外成像数据的新需求,未来光谱成像载荷的数据定量化难度也显著增加。光谱图像数据的定量与校正主要包括几何、光谱、辐射等方面,特别是对于高分辨率环月探测而言,在多因素效应耦合下,几何与辐射数据的定量化难度很大。一方面,高空间分辨率的运动补偿探测在

提升系统信噪比的同时,增加了几何定位的难度,引起定位准确度下降,这主要体现在:1)运动补偿机构(如反射镜)的稳定度与安装精度低,使光谱仪视场偏离理论区域,尤其在高补偿倍率下,补偿机构的角度测量误差就有可能带来像素级偏差,而对于线阵区域的几何定位,由于无明显纹理特征,几何偏差纠正的难度更大;2)由于卫星的轻量化需求,其对轨道稳定性与轨道高度的实时测量能力有限,使运动补偿的适配性差,出现漏扫或过密的情况,轨道误差测量精度不够还会造成较大区域的几何定位偏差,后期校正较困难;3)变速高比、高倍率的运动补偿,其参数变化较多,地面很难提供验证场景,因此基于复杂运动补偿机制的地面几何定标方法较难实现。上述几何定位的问题提高了前期地面验证与后期数据处理工作的难度,需要进一步开展研究来解决。

此外,目标光照及温度引起的辐射特性变化、红外背景辐射抑制后的残余以及定标方式影响的综合作用,导致光谱数据量化精度提升难。由于月面的特殊环境,环绕探测的光谱载荷绕月一周会经历强光照强辐射(月面赤道地区)到弱光照弱辐射(月球极区)的大跨度变化,需要在动态范围控制载荷才可获取高质量的图像,特别是在弱光照弱辐射地区,目标信号可能会低于背景噪声信号,即使可以实现红外背景辐射高效抑制,残余的背景辐射依旧会对信号造成较大影响,在强弱目标信号变化的情况下实现高精度量化的科学数据处理是需要解决的一项难题。另外,光谱载荷的定标精度也是高精度数据量化的重要保证,不同于地球上有着诸多的定标参考区域,月面可参考的均匀定标区域较少,因此需要依赖星载的定标器进行辐射定标,星载定标器的精度还受地面实验室对其的标定精度以及定标器的稳定性影响,定标的传递误

差以及发射过程中的震动、环境等变化,光学以及器件老化导致的效率下降都会影响定标器件的精度。提升仪器的在轨定标精度、设计合理的高精度复合定标方案是数据量化精度提升的另一项难题。

4 技术途径与研究难点

如前所述,随着科技进步与月球探测的进展,宽谱段、高空间分辨、高光谱分辨是月球光谱探测的发展趋势,但面临月球表面暗弱目标高信噪比成像难、中长波红外背景抑制难、月表复杂环境引起的数据量化难等技术挑战。因此,需要研究其他航天探测任务中光谱成像载荷相关技术,作为解决月球环绕光谱成像技术挑战的参考,在此基础上形成研究思路与技术途径,以期后续月球环绕探测任务载荷配置规划、科学数据获取与处理提供科学依据。

4.1 基于运动补偿的高分辨红外光谱成像

高分辨率遥感载荷当面临轨道设计速高比变化剧烈、星下点驻留时间短且变化明显等难题时,常通过指向镜补偿或整星补偿等方式降低帧频、延长驻留时间,从而达到提升信噪比和灵敏度的目的。我国“天宫一号”短波红外超光谱相机、高分五号可见短波红外高光谱相机等均利用运动补偿机构实现对地高分辨率地质调查。高分五号可见短波红外高光谱相机利用像移补偿技术实现 2~6 倍正常驻留时间的曝光时间,提升了重点区域数据的信噪比。NASA 与 ESA 已经在 Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)^[23]、Jupiter ICy moons Explorer (JUICE)^[24]、特洛伊小行星探测任务 Lucy 号^[25]等多个深空探测任务中采用推扫式成像光谱仪结合运动补偿的探测方式,以满足低照度条件下长驻留时间的高分辨率光谱成像需求。表 2 是具备运动补偿功能的成像光谱仪载荷性能对比。

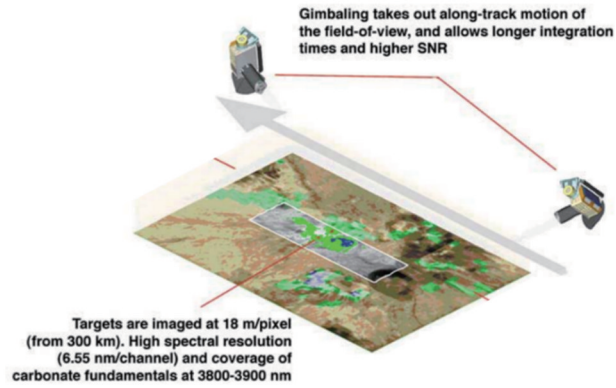
表 2 基于运动补偿的高分辨光谱成像载荷相关性对比

Table 2 Performance comparison of high-resolution imaging spectrometer payloads based on motion compensation

Payload	AHSI/China/GF-5	CRISM/USA/MRO	MARJIS/Europe/JUICE	LEISA of L'Ralph/USA/Lucy
Time	2018	2005	~2022 (launch)	2021 (launch)
Observation target	Earth	Mars	Jupiter's icy moons	A main belt asteroid and seven Trojans
Spectral range / μm	0.39-2.51	0.36-3.92	0.4-5.7	1.0-3.8
IFOV /mrad	0.04	0.0615	0.125	0.08
Orbit	705 km (quasi-circular)	255 km/320 km (quasi-circular)	-	-
Motion compensation implementation	Reflective mirror scanning	Spectrometer scanning (with gimbal)	Reflective mirror scanning	Reflective mirror scanning

JUICE 和 Lucy 两项任务需要探测多个天体,针对不同天体采用不同的探测模式,轨道包括环绕式与飞越式,这两项任务中的成像光谱仪的前置反射镜除实现运动补偿功能外还具备扫描的功能,目前这两项任务均为实现目标的补偿观测。已实现目标补偿观测的典型载荷包括 AHSI^[26-27]、CRISM^[23]等,运行轨道为近圆形轨

道,星下点驻留时间稳定,补偿参数是恒定可选的。以 AHSI 为例,其补偿倍数(积分时间/星下点驻留时间)为 4 倍或 6 倍,依据不同的探测需求选择对应的补偿倍数。图 5 为 CRISM 运动补偿示意图,从它的探测积分时间与轨道参数可推导出,CRISM 运动补偿倍数约为 45 倍,补偿倍数越高,对补偿机构稳定度要求越高。

图 5 CRISM 运动补偿模式示意图^[23]Fig. 5 Schematic diagram of CRISM motion compensation mode^[23]

未来,为实现月球南北极高空间分辨率的光谱成像观测,需要采用近月点低于 50 km 的南北极上空的椭圆轨道,高信噪比的光谱成像探测需要补偿倍率大于 10,对运动补偿机构的稳定度要求很高;同时,为节省卫星重量资源,月球探测通常采用高偏心率的椭圆轨道探测。该轨道具有速高比变化剧烈、星下点驻留时间差异大的特点,对高分辨率成像光谱仪运动补偿探测增加了难度。

因此,根据任务的科学需求,基于探测轨道高度、卫星速度、目标光照等信息,结合月面地形数据(数字高程模型 DEM)与卫星预测轨道误差参数,针对不同探测区域设计相应的运动补偿模式,是实现月面高空间分辨率、高信噪比探测的必要手段;另一方面,针对较高的补偿倍率,提升运动机构的稳定性、降低机构的运行误差,是获取高质量的运动补偿光谱数据的关键环节。

4.2 基于背景抑制的高灵敏中长波红外成像光谱仪

相对于可见光和短波红外谱段,中长波及甚长波是低温物体热辐射能量集中的谱段,具有低温目标测温和多矿物反演等能力,是低温目标光谱探测的重要谱段。除 Diviner、LTM 等对月探测的红外多光谱成像仪外,深空探测中典型的热红外成像光谱仪还包括:NASA 的火星探测奥德赛(Odyssey)任务搭载的热发射成像系统(THEMIS)^[28]、水星探测(BepiColombo)任务搭载的水星辐射计和热红外光谱仪(MERTIS)^[29]。THEMIS 和 MERTIS 均采用了非制冷微测热探测器,THEMIS 是多光谱探测,研究火星的表面矿物学和物理性质,谱段覆盖 6.8~14.9 μm ,整机质量为 11.2 kg,功耗为 14 W;MERTIS 于 2018 年发射,由推扫式红外光谱仪(TIS)和辐射计(TIR)组成,分别在 7~14 μm 和 7~40 μm 的波长范围内工作, MERTIS-TIS 是非制冷光栅光谱仪,具备 78 个光谱通道,其科学目标是探测水星表面物质成分、鉴定成岩矿物、绘制地表矿物分布、研究表面温度变化和热惯性等, MERTIS 整机质量为 3.4 kg,功耗为 8~13 W。非制冷探测器的优势是不需要制冷机,能够降低整机功耗、质量与体积,这对重量资源紧缺的深空探测任务来

讲是十分重要的。然而,非制冷探测器不适用于快速、高灵敏度的探测。

为实现快速、高灵敏度的红外探测,多项任务中采用了光子探测器。如何突破高效中长波红外背景抑制技术是红外成像光谱仪高质量数据获取的关键,现有航天及航空红外光谱成像载荷通常利用低温制冷和热辐射校正方式抑制红外背景辐射。典型的深空探测光谱载荷 CRISM 通过复杂热控设计,利用辐射制冷实现内部多温区温控[图 6(a)],进而实现火星表面 170~300 K 低温目标高灵敏度探测。CRISM 红外谱段范围覆盖 980~3960 nm,探测器采用碲镉汞焦平面阵列(HgCdTe FPA),将其制冷至 110 K 以降低暗电流,同时,采用 28 mm 长的冷防护罩减少背景热辐射^[23]。中国科学院上海技术物理研究所在国家高技术研究发展计划的重点支持下,于 2016 年成功研制机载热红外成像光谱仪原理样机^[30]。光谱仪样机包括主望远镜和低温光谱仪,如图 6(b)所示。主望远镜工作于室温,低温光谱仪采用机械制冷方式制冷至 100 K 以抑制红外背景,谱段范围为 8~12.5 μm ,波段数为 140。

在月球南极地区低照度条件下对月表成分进行识别,以及对其进行热环境测量,需要红外光谱成像载荷具备在低照度情况下实现高灵敏度探测的能力。而对于红外波段,尤其是偏长波红外段,仪器自身的红外背景辐射是影响探测灵敏度的主要因素之一,因此必须进行红外背景抑制;另一方面,进一步提升探测器能力也是实现高灵敏度探测器的必要手段。

4.3 基于复合定标的高精度量化

在轨进行辐射定标和光谱定标是提升空间光谱载荷量化水平的关键一环,在轨定标最常采用的方式是采用器上参考定标装置进行标定,如携带积分球或者黑体进行标定。对地成像光谱探测载荷的在轨定标技术应用较为成熟。以高分五号为例,其搭载可见短波红外高光谱相机 AHSI,光谱范围为 0.4~2.5 μm ,谱段数为 330,是一台兼顾高分辨率(可见光、近红外光谱分辨率为 5 nm,短波红外光谱分辨率为 10 nm,空间分辨率为 30 m)和大幅宽(60 km)的高光谱成像遥感仪器^[26]。AHSI 通过星上 LED 定标组件成像和掩星

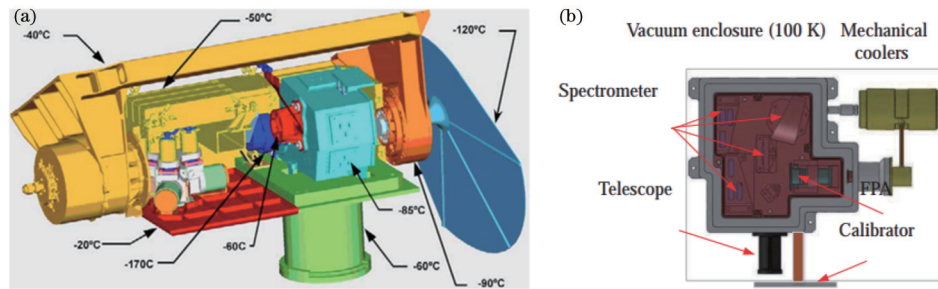


图 6 典型中长波红外背景抑制光谱仪实例。(a) CRISM 多温区低温辐射温控^[23]; (b) 机载热红外成像光谱仪结构示意图^[30]
Fig. 6 Example of a typical mid- and long-wave infrared background suppression spectrometer. (a) CRISM multi-temperature zone low temperature and spoke cooling temperature control^[23]; (b) structural diagram of airborne thermal infrared hyperspectral imager^[30]

观测大气轮廓实现在轨光谱定标,通过星上漫反射板和漫反射板监视器进行在轨辐射定标。AHSI星上绝对辐射定标精度误差在可见光、近红外通道小于 2.59%,短波红外通道小于 2.68%;光谱定标精度在可见光、近红外通道为 0.32 nm,短波红外通道为 0.55 nm^[27]。

对于月球环绕探测,由于其在轨温度、辐射等一系列环境影响相对于对地探测更为恶劣,以及资源受到限制,搭载在载荷上的参考定标装置的自身衰减影响可能更大,因此需要进一步研发可以在空间复杂环境下长寿命且稳定的在轨定标装置,以有效保障数据的定量化精度。以“天问一号”火星矿物光谱分析仪(MMS)为例,将其作为深空探测光谱仪器,其采用对日定标、积分球定标和冷空间成像相结合的复合式在轨定标方案提高数据的定量化水平^[31]。

除了采用高精度、高稳定性的在轨定标装置外,通过选取辐射特性稳定的均匀定标场地作为辐射参考也是一种保证数据定量化精度的方法,如采用 Apollo-16 的着陆点作为场地定标源^[32],采用着陆点返回月壤在地面的光度特性校正正在轨的仪器,但是返回的月壤受到过扰动,可能与月表表层月壤的特征存在差异^[33],因此如果可以在月表选择多处均匀的场地作为定标场地,同时在月表定标场地放置原位光谱设备,在不扰动月壤的情况下监测月壤的特性,将有助于提升遥感仪器获取的数据定量化精度。另外,当建立了月面的标准定标场地,还可以通过不同遥感仪器进行交叉校正,提升仪器的定量化精度。

5 结 论

依托于月球环绕器平台的光谱成像探测,实现对月球全球空间分辨率数十米至 km 量级、高覆盖率的宏观遥感探测,但人类面向月球资源开发与应用的勘查任务仍存在空间分辨率较低且红外谱段偏少的问题。突破变速高比高倍率运动补偿、红外背景辐射高效抑制、多因素效应影响下的高精度数据定量等技术挑战,获取更高分辨率、更高灵敏度、更可信的红外光谱科学数据成为该领域水平提升的关键。面向月球环绕探测的光谱成像需要针对性地开展运动补偿、红外背景抑制、数据定量化等核心技术攻关,以期实现月球

成像光谱探测的又一次技术革新。同时,未来光电信息领域的技术突破也有望进一步提升遥感光谱成像载荷的性能,例如:1)采用基于先验知识的数字孪生技术,揭示月表复杂环境下暗弱目标辐射特性与变化规律;2)利用人工微纳结构实现精密光电调控,进一步提升分光器件、探测器性能,推动工程化应用;3)运用计算光学手段,促进月球自适应智能化成像光谱探测。这些科技发展与创新将有望为月球矿物资源分布和利用、热环境特性和月球科考站选址等提供技术支撑和科学依据,促进月球原创性科学发现的研究进展,进一步刷新人类对月球的认知。

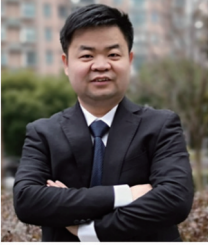
参 考 文 献

- [1] Li J N, Gui Y H, Xu R, et al. Applications of AOTF spectrometers in *in situ* lunar measurements[J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3454.
- [2] 桂裕华, 李津宁, 王梅竹, 等. 月球及火星探测任务中光谱技术研究与应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(1): 74-84.
Gui Y H, Li J N, Wang M Z, et al. Research and application of spectroscopic techniques in lunar and Mars exploration missions[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(1): 74-84.
- [3] 何志平, 李春来, 吕刚, 等. 月球表面原位光谱探测技术研究与应用(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(5): 20201006.
He Z P, Li C L, Lü G, et al. Research and applications of *in-situ* lunar surface spectral detection technology (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20201006.
- [4] Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 568-572.
- [5] Verma P A, Chauhan M, Chauhan P. Lunar surface temperature estimation and thermal emission correction using Chandrayaan-2 imaging infrared spectrometer data for H₂O & OH detection using 3 μm hydration feature[J]. *Icarus*, 2022, 383: 115075.
- [6] Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, et al. The global surface temperatures of the moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment[J]. *ICARUS*,

- 2017, 283: 300-325.
- [7] Lucey P G, Greenhagen B T, Song E, et al. Space weathering effects in Diviner Lunar Radiometer multispectral infrared measurements of the lunar Christiansen Feature: characteristics and mitigation[J]. ICARUS, 2017, 283: 343-351.
- [8] Haruyama J, Matsunaga T, Ohtake M, et al. Global lunar-surface mapping experiment using the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE[J]. Earth, Planets and Space, 2008, 60(4): 243-255.
- [9] 赵葆常, 杨建峰, 常凌颖, 等. 嫦娥一号卫星成像光谱仪光学系统设计与在轨评估[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 479-483.
- Zhao B C, Yang J F, Chang L Y, et al. Optical design and on-orbit performance evaluation of the imaging spectrometer for Chang'e-1 lunar satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 479-483.
- [10] Green R O, Pieters C, Mouroulis P, et al. The Moon Mineralogy Mapper (M³) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2011, 116: E10.
- [11] Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1): 125-160.
- [12] Chowdhury A R, Banerjee A, Joshi S R, et al. Imaging infrared spectrometer onboard chandrayaan-2 orbiter[J]. Current Science, 2020, 118(3): 368.
- [13] NASA[EB/OL]. [2021-05-04]. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=LUNIR>.
- [14] Ehlmann B, Klima R, Bennett C. Lunar Trailblazer: a pioneering smallsat for lunar water and lunar geology[EB/OL]. [2021-08-09]. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1740.pdf>.
- [15] Thompson D, Green R. The high-resolution volatiles and minerals moon mapper (HVM³) on the lunar trailblazer mission[EB/OL]. [2021-08-09]. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2052.pdf>.
- [16] Yamamoto S, Matsunaga T, Ogawa Y, et al. Preflight and in-flight calibration of the spectral profiler on board SELENE (kaguya)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4660-4676.
- [17] Yamamoto S, Matsunaga T, Ogawa Y, et al. Calibration of NIR 2 of spectral profiler onboard kaguya/SELENE[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(11): 6882-6898.
- [18] 凌宗成, 刘建忠, 张江, 等. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海—冷海地区(LQ-4)为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 107-120.
- Ling Z C, Liu J Z, Zhang J, et al. The lunar rock types as determined by Chang'E-1 IIM data: a case study of Mare Imbrium-Mare Frigoris region(LQ-4) [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 107-120.
- [19] Yan B K, Xiong S Q, Wu Y Z, et al. Mapping Lunar global chemical composition from Chang'E-1 IIM data [J]. Planetary and Space Science, 2012, 67(1): 119-129.
- [20] Wu Y Z, Xue B, Zhao B C, et al. Global estimates of lunar iron and titanium contents from the Chang'E-1 IIM data[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117(E2): E02001.
- [21] Vasavada A R, Bandfield J L, Greenhagen B T, et al. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment[J]. Journal of Geophysical Research. Planets, 2012, 117: E00H18.
- [22] Liu N T, Jin Y Q. A real-time model of the seasonal temperature of lunar polar region and data validation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(3): 1892-1903.
- [23] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) [J]. Journal of Geophysical Research. Planets, 2007, 112(E5): E05S03.
- [24] Langevin Y, Piccioni G. MAJIS (Moons and Jupiter imaging spectrometer) for JUICE: objectives for the Galilean satellites[EB/OL]. [2021-05-08]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2013/EPSC2013-548-1.pdf>.
- [25] Olkin C B, Levison H F, Vincent M, et al. Lucy mission to the Trojan asteroids: instrumentation and encounter concept of operations[J]. The Planetary Science Journal, 2021, 2(5): 172.
- [26] 刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制[J]. 遥感学报, 2020, 24(4): 333-344.
- Liu Y N, Sun D X, Hu X N, et al. Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(4): 333-344.
- [27] Liu Y N, Sun D X, Hu X N, et al. The advanced hyperspectral imager: aboard China's GaoFen-5 satellite [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2019, 7(4): 23-32.
- [28] CHRISTENSEN P, Jakosky B, KIEFFER H H, et al. The thermal emission imaging system (THEMIS) for the Mars 2001 odyssey mission [review][J]. Space Science Reviews, 2004, 110(1/2): 85-130.
- [29] Hiesinger H, Helbert J, Alemanno G, et al. Studying the composition and mineralogy of the hermean surface with the mercury radiometer and thermal infrared spectrometer (MERTIS) for the BepiColombo mission: an update[J]. Space Science Reviews, 2020, 216(6): 110.
- [30] 李春来, 吕刚, 袁立银, 等. 机载热红外高光谱成像仪的光谱性能测试与初步应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 20190117.
- Li C L, Lü G, Yuan L Y, et al. Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager(ATHIS) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 20190117.
- [31] He Z P, Xu R, Li C L, et al. Mars mineralogical spectrometer (MMS) on the Tianwen-1 mission[J]. Space Science Reviews, 2021, 217(2): 27.

- [32] Daydou Y H, Pinet P C, Chevrel S, et al. A systematic intercalibration tool between multiband imaging and spot spectra datasets[J]. *Planetary and Space Science*, 2003, 51(4/5): 309-317.
- [33] Wu Y Z, Wang Z C, Cai W, et al. The absolute reflectance and new calibration site of the moon[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(5): 213.

约稿专家简介:



何志平(1977—), 博士, 研究员/博士生导师, 中国科学院上海技术物理研究所第二研究室主任, 上海市光谱信息感知工程研究中心主任。国家杰出青年科学基金获得者, 上海领军人才及上海市优秀学术带头人。2003年获浙江大学光电信息工程学系光学工程专业硕士学位。长期从事空间光电技术与系统研究, 聚焦面向月球与深空探测应用的光谱探测与成像以及空间主被动光电技术前沿与交叉应用。主持我国嫦娥工程及天问工程等空间任务多型科学载荷研发, 其中嫦娥三号、嫦娥四号及嫦娥五号任务应用在国际上率先实现了月球表面原位光谱探测, 天问一号应用为我国首次火星探测提供了新型科学仪器。获国家技术发明二等奖、上海技术发明一等奖、中国科学院杰出成就奖等奖项。近5年以通信作者在 *Science Advances*、*Space Science Review*、*Optics Express* 等期刊发表文章逾20篇, 授权发明专利50项。E-mail: hziping@mail.sitp.ac.cn。