

“高分五号”卫星光学遥感载荷的技术创新

范 斌, 陈 旭, 李碧岑, 赵艳华

(北京空间机电研究所 北京 100094)

摘 要: 介绍了高分五号卫星上由北京空间机电研究所研制的两台载荷的性能和技术先进性。其中, 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪具有光谱分辨率高、太阳跟踪精度高、光谱定标精度高的技术特点。全谱段光谱成像仪具有谱段范围宽、空间分辨率高、辐射定标精度高的技术特点。与国内外同类载荷相比, 两台载荷都达到了国内领先、国际先进的技术水平, 使我国在空间高光谱分辨率和高精度观测能力上有了大幅提升。对两台载荷的技术先进性进行了分析, 并给出了相关测试结果。最后, 展望了后续多种高光谱载荷的发展方向。

关键词: 高光谱; 遥感; 高分五号

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0102002

Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite

Fan Bin, Chen Xu, Li Bicen, Zhao Yanhua

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The performances and advancements of the two optical payloads, produced by Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, onboard GF-5 satellite were introduced in the paper. The atmosphere environment high-resolution infrared Fourier transform spectrometer had high-resolution, high sun tracking accuracy and high spectral calibration accuracy. Visual and infrared multispectral sensor had high spectral resolution, wide spectral range and high radiometric calibration accuracy. Compared with other similar optical payloads, they were advanced both here and abroad which greatly improved the ability of high-precision observation of China. Key parameters, system composition, key technology, advancements and test results were introduced. At the end of this paper, development direction and enlightenment of follow-up spectrometer were pointed out.

Key words: hyperspectral; remote-sensing; GF-5

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61377088); 河北省自然科学基金(F2014502098); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015XS114)

作者简介: 范斌(1972-), 女, 研究员, 硕士, 主要从事空间遥感器设计方面的研究。Email: fanb_bisme@163.com

0 引言

高分五号卫星是高分专项工程中的一颗高光谱遥感卫星,利用装载的 6 台遥感仪器,面向国家污染减排、环境质量管理、大气成分与气候变化监测、国土资源调查等重大需求,开展污染气体、温室气体、区域环境空气质量、水环境和生态环境、地矿资源调查等遥感监测。北京空间机电研究所承担其中两台遥感载荷的研制任务——大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪和全谱段光谱成像仪。

大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪是我国第一个星载超高光谱掩星探测载荷,是国内目前光谱分辨率最高的星载傅里叶变换光谱仪。该载荷可以对地球大气圈 8~100 km 内的大气成分进行高光谱分辨率、高信噪比和宽波段范围的精细光谱探测。它可以获得精细的大气成分数据,可用于气象和气候探测,满足大气环境、大气科学研究以及对气象和气候变化的监测需求。

全谱段光谱成像仪是国内第二代从可见光到热红外光谱范围的星载多光谱成像仪。该载荷以 60 km 幅宽、20/40 m 的空间分辨率的能力,获取地物在可见光到长波红外的光谱辐射信息。它可以对水体、生态环境、国土资源进行综合监测,以满足环境保护、监测、监管、应急、评价、规划和资源调查等方面的需求。

1 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪

1.1 国内外现状分析

如图 1 所示,大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪的探测谱段范围为 2.4~13.3 μm ,可以探测超过 11 万个谱段的信息。

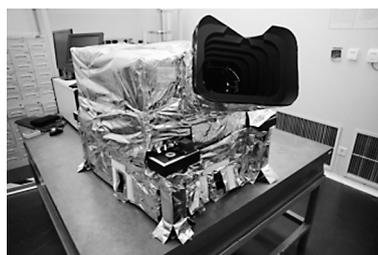


图 1 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪

Fig.1 Atmosphere environment hyperspectral infrared sounder

目前,据公开资料查询显示,国外开展大气精细成分探测类载荷研制的国家和地区主要有加拿大、德国、美国等,观测模式主要有太阳掩星探测、临边探测和天底探测。表 1 给出了目前国际上几种大气探测光谱载荷的主要性能指标。从指标上看,大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪的谱段范围为 2.4~13.3 μm ,光谱分辨率 (FWHM) 达到 0.03 cm^{-1} ,与加拿大的 ACE^[1-3]水平相当,可以探测多达 45 种气体,是国内目前可探测气体种类最多的卫星载荷。

表 1 国外相关载荷指标对比

Tab.1 Comparison of foreign loads index

Foreign loads	GF-5 atmosphere environment high-resolution infrared Fourier transform spectrometer	ACE (Canada)	MIPAS ^[4] (Germany)	TES ^[5] (America)	IASI ^[6] (Europe)
Observation mode	Sun	Sun	Border	Nadir, border	Nadir
Spectrum range/ μm	2.4-13.3	2.4-13.3	4.15-14.6	3.2-15.4	3.62-15.5
Spectrum resolution/ cm^{-1}	0.03	0.03	0.035	Nadir: 0.02 Border: 0.08	0.5

1.2 技术先进性分析

1.2.1 光谱分辨率高

(1) 技术难点

在 2.4~13.3 μm 谱段范围内,探测仪的光谱分辨率为 0.03 cm^{-1} ,处目前国内最高、国际先进水平。

(2) 实现手段

为达到这个技术指标,探测仪采用了大光程差、

高效率傅里叶变换干涉分光技术。

探测仪系统设计为双角镜摆臂式干涉仪,由分束器、补偿器、两个角镜和一个端镜共同组成。系统工作时,一个角镜靠近分束器,另一个角镜远离分束器,将干涉仪光路沿着光线的方向进行展开,通过干涉光路折叠,将光程放大到 8 倍,如图 2 所示。

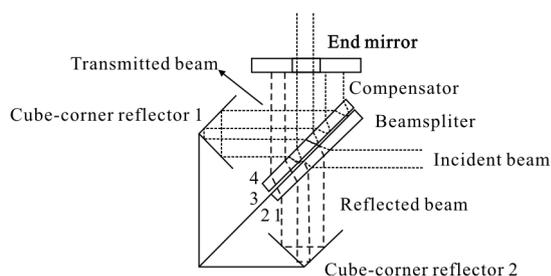


图 2 干涉仪光路设计

Fig.2 Interferometer optical design

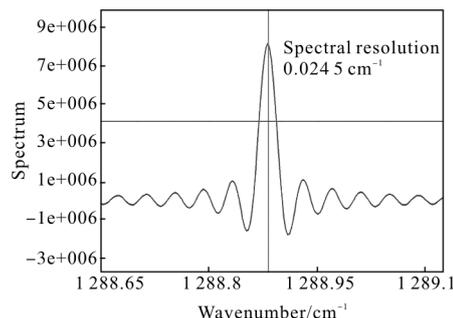


图 5 探测仪在 1288 cm⁻¹ 处光谱分辨率测试结果

Fig.5 Test result of spectrum resolution at 1288 cm⁻¹

端镜的应用,不仅提高了光程放大倍数,还补偿了角镜装调引入的剪切误差,保证了高调制效率。而且,采用了高稳定性参考激光做为频率基准。同时,针对微振动对干涉仪机构运动均匀性的影响^[7],通过采用高稳定性摆臂运动控制设计,使得摆臂速度的不稳定性优于 0.3%,如图 3 所示。

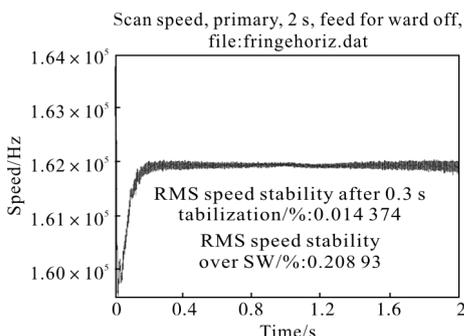


图 3 摆臂速度变化情况

Fig.3 Stability of arm scanning speed

(3) 测试结果

针对探测仪的光谱分辨率,对 InSb 通道和 MCT 通道进行了测试,结果如图 4、5 所示,其中,纵坐标为光谱响应 DN 值,横坐标单为光谱波数。可以看出:InSb 通道的光谱分辨率达到了 0.0238 cm⁻¹,MCT 通道的光谱分辨率达到了 0.0245 cm⁻¹,均优于设计指标 0.03 cm⁻¹。

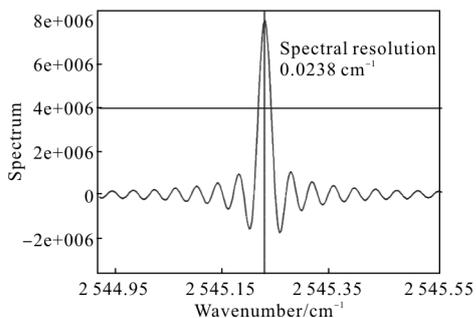


图 4 探测仪在 2545 cm⁻¹ 处光谱分辨率测试结果

Fig.4 Test result of spectrum resolution at 2545 cm⁻¹

1.2.2 太阳跟踪精度高

(1) 技术难点

探测仪对日跟踪速度约为 0.1°/s,跟踪精度达到 0.1 mrad。

(2) 实现手段

为达到这个技术指标,探测仪采用了太阳跟踪机构控制技术。

经过分析研究发现,由于指向镜在摆动过程中的速度过低,普通滚动轴承存在摩擦且容易产生爬行现象。而且,机构两轴的摆动范围小,其滚子在非整周受力工况下会严重影响寿命。因此,二维转轴同时采用了无摩擦长寿命的挠性枢轴支撑方案,其运动及锁定机构进行了精密的设计、加工和装调。该方案属国内首次应用。

为保证足够的跟踪精度,采用百万像素的高速大规模太阳跟踪相机对日进行连续拍摄,对得到的太阳辐射质心图像进行实时处理,控制指向镜跟踪质心位置。

(3) 测试结果

通过实验室模拟在轨跟踪太阳过程,得到探测仪在跟踪过程中的跟踪精度为 0.06 mrad,优于设计指标 0.1 mrad。

1.2.3 光谱定标精度高

(1) 技术特点

探测仪的光谱定标精度优于 0.005 cm⁻¹。

(2) 实现手段

选择了两个通道内的单色调谐激光器作为光源对探测仪进行光谱定标,激光器的中心波长为 4.0 μm,8.0 μm,激光器的输出激光波长通过波长计进行测试。通过积分球对激光器进行均匀扩束,再通过配套的平行光管对出射光进行准直,最后激光进入探测仪内进行光谱定标。具体的测试示意图如图 6 所示。

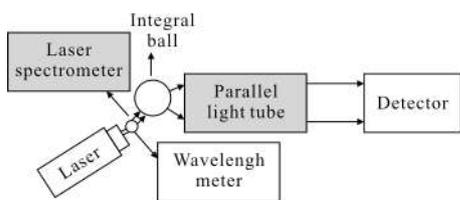


图 6 单色激光器光谱定标示意图

Fig.6 Homochromy laser spectrum calibration

通过单色激光器对探测仪进行光谱定标, 精度较高, 但是由于波长计的精度、激光器的稳定度、以及探测仪自身波长稳定度等因素影响, 会导致一定的测量误差。因此, 在光谱定标的最后一个环节, 还需要采用气体池对光谱定标进行测试验证。高精度的气体池系统能够精确控制气体池内的气体压力、温度等因素, 可实现单一气体的精细吸收峰。测试示意图如图 7 所示。

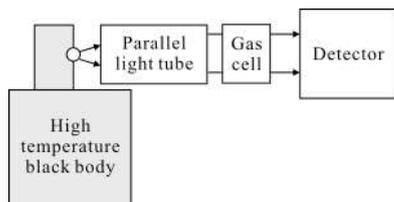


图 7 高精度气体池光谱定标测试验证示意图

Fig.7 Experiment of high precision gas cell spectrum calibration

该探测仪是目前国内光谱分辨率最高的载荷, 气体定量测量的精度要求高。因此, 研究所专门建立了全国唯一的甚高光谱定标实验室, 多个指标的测试和定标属国内首次进行, 相应的测试方法、测试设备和配套设施为国内首次采用。

(3) 测试结果

通过测试, 定标精度达到了 0.002 cm^{-1} , 得到了探测仪在 InSb 通道的 CO 吸收峰定标光谱和 MCT 通道的 NH_3 吸收峰定标光谱, 与 HITRAN 数据库进行了对比, 如图 8、9 所示。可以看出, 两种气体的吸收峰均有很好的吻合。

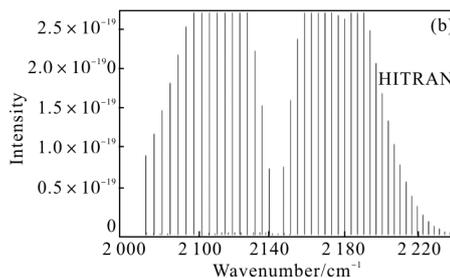
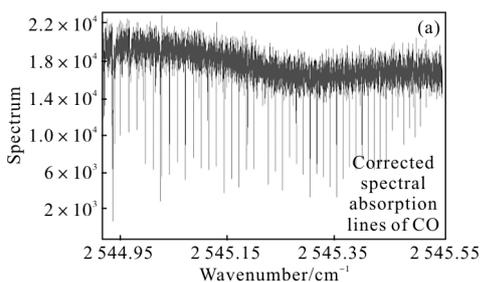


图 8 InSb 通道 CO 吸收峰的探测仪光谱定标后光谱与 HITRAN 数据库对比

Fig.8 Comparison of corrected InSb channel CO absorption lines and HITRAN

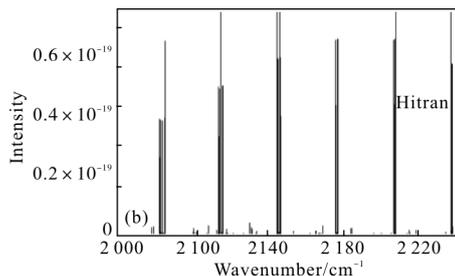
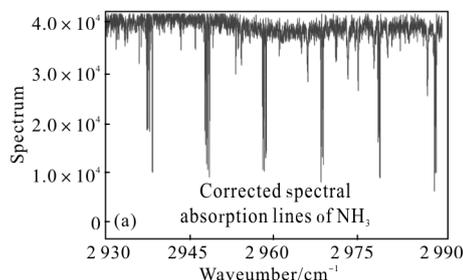


图 9 MCT 通道 NH_3 吸收峰的探测仪光谱定标后光谱与 HITRAN 数据库对比

Fig.9 Comparison of corrected MCT channel NH_3 absorption lines and HITRAN

1.3 应用方向

大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪可以应用于以下几个方面:

(1) 大气精细成分分布特征及变化研究, 分析其对天气和气候变化的影响, 提高天气预报和气候预测的准确率, 同时为我国气候外交谈判和国家安全服务;

(2) 大气中各种运动和物理化学过程的基本规律及其与周围环境的相互作用研究, 完善气候系统和环境系统的理论体系及遥感观测体系, 发展新的探测和试验手段, 为天气、气候和环境的监测、预测和控制提供理论和方法。

(3) 监测环境污染气体及其生命周期特性, 指导减轻和规避环境污染问题。

2 全谱段光谱成像仪

2.1 国内外现状分析

全谱段光谱成像仪(图 10)的探测谱段范围为 0.45~12.5 μm , 空间分辨率在可见多光谱和短波红外谱段为 20 m, 在中长波红外谱段为 40 m。

目前, 据公开资料查询显示, 国内外已发射的谱段到 12.5 μm 的光谱成像仪主要有美国的 Landsat-7 的 ETM+、Landsat-8 的 OLI 和国内的资源一号 04 星红外相机。谱段数目最多的是美国的 Landsat-8, 共 9 个谱段, 而高分五号全谱段成像仪



图 10 全谱段光谱成像仪

Fig.10 Visual and infrared multispectral sensor

共 12 个谱段。如表 2 所示, 全谱段成像仪的主要技术指标与国际先进载荷水平相当, 部分指标超过国际的同类载荷。

表 2 国内外相关载荷技术指标

Tab.2 Technology parameters of related loads

Loads	GF-5 Visual and infrared multispectral sensor	Landsat-8 OLI ^[8] (America)	Landsat-7 ETM+ ^[9] (American)	ZY-1 04 Infrared camera
Spectrum range/ μm	0.45-12.5 μm 12 ranges	0.433-12.5 μm 11 ranges	0.45-12.5 μm 8 ranges	0.50-12.5 μm 4 ranges
Resolution	Visual multispectral and short infrared 20 m, medium and long infrared 40 m	Visible 15 m, Visual short infrared and short infrared 30 m, long infrared 40 m	Visible 13 m \times 15 m, Visual short infrared and short infrared 30 m, long infrared 60 m	Visual and short infrared 40 m, long infrared 80 m
Absolute calibration accuracy	Visual near infrared, short infrared: 5%, long infrared: 1K@300 K	Less than 5%	Less than 5%	Less than 5%

2.2 技术先进性分析

2.2.1 谱段范围宽、空间分辨率高

(1) 技术特点

全谱段光谱成像仪覆盖 0.4~12.5 μm 共 12 个谱段, 是国内谱段最多的多光谱成像仪, 可见多光谱和短波红外谱段空间分辨率达到 20 m, 中长波红外谱段空间分辨率达到 40 m, 为目前国内最高。

(2) 实现手段

针对谱段宽、谱段多、中等焦距、大相对孔径、传函要求高、可见红外共光路等难点, 采用二次成像三镜消像散全反射式结构型式的共光路设计(图 11), 利用离轴孔径消除次镜和三镜的中心遮拦, 通过折镜将可见光进行视场分离成像在双色 CCD 上, 用分色片半反半透特性将短中波、长波分别成像在两个长线阵红外探测器上, 大大提高系统集成度。

为解决 60 km 幅宽问题, 短中波、长波均采用长线列碲镉汞 TDI 型红外探测器, 受探测器芯片尺寸

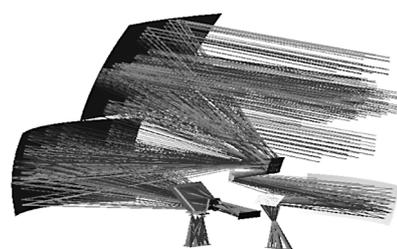


图 11 共光路设计

Fig.11 Optical design

限制, 采用三模块拼接形式实现短波 3072 元 \ 中长波 1 536 元。

为满足窄带滤光片的透射率高、截止范围宽、陡度要求高等要求, 充分利用长波通+短波通膜系、多半波膜系等的特点, 通过全局优化和局部优化相结合, 实现各窄带膜系的优化设计。

(3) 测试结果

通过测试, 得到了全谱段光谱成像仪实际参数, 如表 3 所示, 达到了载荷的设计要求。

表 3 全谱段光谱成像仪相关测试参数

Tab.3 Parameters of visual and infrared multispectral sensor

Test parameters	Parameters
Spectrum range	B1:440-510nm; B2:510-580nm; B3:620-680nm; B4:760-870nm; B5:1.54-1.7 μ m; B6:2.06-2.35 μ m; B7:3.45-3.90 μ m; B8:4.76-4.96 μ m; B9:8.05-8.45 μ m; B10:8.57-8.93 μ m; B11:10.5-11.3 μ m; B12:11.4-12.5 μ m
Space resolution	B1-B4: <20 m; B5-B6: <20 m; B7-B12: <20 m
Width	B1-B4: >60 km; B5-B12: >60 km

2.2.2 辐射定标精度高

(1) 技术特点

全谱段光谱成像仪面向定量应用, 可见短波绝对辐射定标精度达到 5%, 中长波达到 1 K@300 K。

(2) 实现手段

如果仅依靠地面校正场对多个谱段进行辐射定标, 效率低, 且影响因素多。因此, 设计了星上辐射定标装置, 在较短时间就能实现在轨定标。

在可见近红外、短波谱段, 采用星上漫反射板全光路全口径辐射定标。同时, 用比辐射计监测漫反射板在轨性能变化^[10]。图 12 为可见短波谱段在实验室进行辐射定标试验。



图 12 可见短波谱段辐射定标试验

Fig.12 Experiment of visible light calibration

在中长波红外谱段采用星上变温黑体实现部分光路全口径定标, 如图 13 所示。在发射前, 进行实验室真空辐射定标, 获得辐亮度与 DN 值的定量关系。

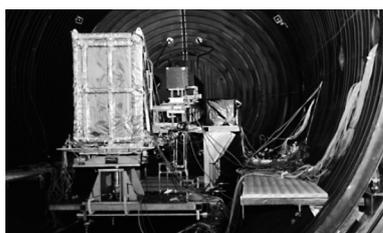


图 13 红外谱段真空辐射定标试验

Fig.13 Experiment of infrared vacuum calibration

(3) 测试结果

通过测试, 得到了全谱段光谱成像仪定标精度的实际参数, 如表 4 所示, 达到了可见短波优于 5%、中长波优于 1 K 的指标要求。

表 4 全谱段光谱成像仪辐射定标精度

Tab.4 Calibration accuracy of visual and infrared multispectral sensor

Test parameter	Parameters
Calibration accuracy	B1-B4 absolute calibration accuracy: 4.81%
	B5-B6 absolute calibration accuracy: 4.93%
	B1-B6 absolute calibration accuracy: 1.56%
	B7-B12 absolute calibration accuracy: 0.80 K

2.3 应用方向

全谱段光谱成像仪可以应用于以下几个方面。

(1) 生态环境领域: 自然生态遥感监测、大型工程开发环境破坏监测、城市生态环境监测、农村生态环境监测、生物多样性监测;

(2) 国土资源领域: 土地资源调查、矿产资源勘查评价;

(3) 林业领域: 荒漠化监测、林火监测、湿地资源监测;

(4) 水利领域: 水资源管理调度和生态保护、江河湖水环境监测和治理;

(5) 农业领域: 农业资源调查、农作物长势及产量监测;

(6) 防灾减灾领域: 洪涝灾害监测、干旱灾害监测。

3 后续光谱载荷发展方向

后续, 北京空间机电研究所将研制一系列光谱仪, 如图 14 所示, 在物质的化学元素组成分析、植被的碳

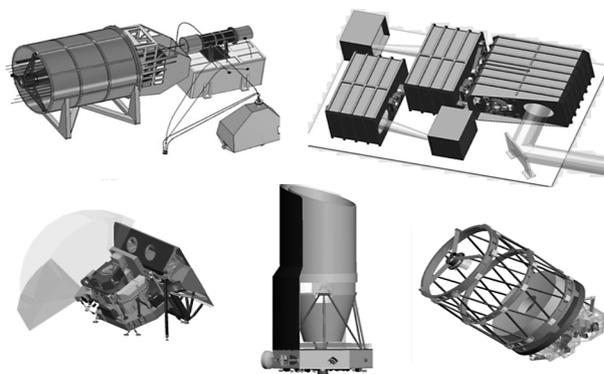


图 14 后续拟发展载荷

Fig.14 Loads planned to develop

吸收能力和农作物的生长情况评估、污染与温室气体的全球三维分布数据获取等方面发挥重要作用。

4 结 论

高分五号卫星大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪和全谱段光谱成像仪的成功研制,使国内在空间高光谱分辨率和高精度观测能力上有了大幅度的提升。特别是大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪,填补了国内在大气精细化探测领域的空白。

高光谱探测是空间遥感的重要手段,也是光电技术应用领域的一个重要发展方向。它的研究将会极大提升国内空间遥感观测能力的技术水平,同时带动空间光学领域技术的迅速发展。

参考文献:

- [1] Marc -An dre Soucy, Francois Chateaneuf, Christophe Deutsch, et al. ACE -FTS instrument detailed design [C]// SPIE, 2002: 4814: 12-16.
- [2] Bernath Peter F. Atmospheric chemistry experiment (ACE): Mission overview[C]//SPIE, 2004: 5542: 25-32.
- [3] Louis Moreau, Marc -André Soucy, Henry Buijs, et al. ACE -FTS instrument: after five years on -orbit [C]//SPIE, 2008: 7082: 95-101.
- [4] Roland Gessner, Smith David J. Manfred Kolm, et al. MIPAS onboard ENVISAT: flight model performance, calibration and characterization[C]//SPIE, 2001: 4169: 118-122.
- [5] Reinhard Beer, Glavich Thomas A, Rider David M, Tropospheric emission spectrometer for the Earth Observing System's Aura satellite [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 116-121.
- [6] Blumstein D, Chalon G, Carlier T, et al. IASI instrument: technical overview and measured performances [C]//SPIE, 2004, 5543: 56-60.
- [7] Duan Pengfei, Li Ming, Xu Pengmei. Effect of tiny vibration to interferometer[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 34(6): 88-92. (in Chinese)
段鹏飞, 李明, 徐彭梅. 微振动对干涉仪运动机构均匀性的影响分析[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(6): 88-92.
- [8] Frequently Asked Questions About the Landsat Missions, [EB/OL]. (2013-05-30). http://landsat.usgs.gov/band-designations_landsat-satellites.php, 2013, 5: 30.
- [9] Feng Zhongkui, Ye Xiaoduan. Landsat7 quick format data products [J]. *Remote Sensing Technology and Applications*, 2000, 15(4): 270-272. (in Chinese)
冯钟葵, 叶晓端. Landsat7. 卫星快速格式数据产品 [J]. *遥感技术与应用*, 2000, 15(4): 270-272.
- [10] Zhao Yanhua, Dong Jianting, Zhang Xiuqian, et al. Diffuse reflection board full view radiation calibration technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37 (2): 92-99. (in Chinese)
赵艳华, 董建婷, 张秀茜, 等. 漫反射板全光路全视场全口径在轨辐射定标技术研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37 (2): 92-99.