

面阵凝视声光光谱成像技术及其轻小型无人机载应用探讨

何志平, 秦侠格, 徐映宇

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

摘要:近年来,轻小型无人机载光谱成像技术因航线自由,使用成本低等诸多优势在光谱遥感技术领域成为研究热点并得到广泛重视。基于面阵凝视的新型声光光谱成像技术的成熟运用为轻小型无人机遥感技术注入了新的活力。首先介绍了面阵凝视光谱成像技术途径,然后结合月球探测应用对声光光谱成像技术进行了论述。无人机载样机研制完成后开展无人机载应用试验,对试验数据进行分析 and 评价。最后,对基于声光光谱凝视成像技术的轻小型无人机载应用进行探讨及展望。

关键词:光谱成像技术; 轻小型无人机; 声光可调滤光器; 面阵凝视成像

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0203001

Staring acousto-optic spectral imaging technology with area FPA and discussion on its application of unmanned aerial vehicle (UAV) platforms

He Zhiping, Qin Xiage, Xu Yingyu

(Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, CAS, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In recent years, light-weight unmanned airborne spectral imaging technology has become hotspot research and attracted much attention in the field of spectral remote sensing technology at home and abroad owing to its plenty of advantages, such as free route, low cost. The mature application of staring acousto-optic spectral imaging technology with area FPA injects new momentum into light-weight unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing area. Firstly, the technical approach of staring spectral imaging technology was introduced, and then acousto-optic spectral imaging technology was discussed combined with lunar exploration application. After the completion of developing the UAV payload prototype, the application experiment had been carried out, and the test data was analyzed and evaluated. Finally, the application of light-weight UAV payload based on acousto-optic spectral imaging technology was also discussed and looked ahead in the paper.

Key words: spectral imaging technology; light-weight UAV; AOTF; staring imaging with area FPA

收稿日期:2016-01-10; 修订日期:2016-01-23

基金项目:国家自然科学基金(21105109)

作者简介:何志平(1977-),男,研究员,博士,主要研究方向为空间光学及光谱探测技术。Email:hziping@mail.sitp.ac.cn

0 引言

成像光谱仪是 20 世纪七八十年代发展起来的一种先进光电遥感仪器,能够同时获取目标地物的几何及光谱特性,在矿物勘探、农林资源调查、环境监控以及城市规划等诸多领域应用广泛^[1-6]。成像光谱仪首先基于机载平台进行开发,目前已全面应用于航空、航天、地面、深空探测等诸多领域。轻小型无人机与其他遥感平台相比,具备适应性好、成本低、实时性好、航线自由等优点,世界各国正持续开发适应轻小型无人机的光谱成像配套载荷^[7]。声光谱成像技术因面阵凝视画幅式成像、声光快速电控光谱选择的技术特点^[8-10],即可适应无人机平台对数据获取及实时处理的要求,也具备体积小、质量轻、力热适应性强的特性,受到国内外广泛重视。

1 面阵凝视声光光谱成像技术

1.1 凝视光谱成像技术

成像光谱仪是成像技术和光谱技术的有机结合,其技术途径主要包括成像方式及分光方式两方面。成像光谱仪的成像方式主要有光机扫描式、推扫式、凝视型三种。分光方式是成像光谱仪系统中的关键技术,直接影响成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、质量和体积等方面。成像光谱仪的成像方式与分光方式各有其优点及局限性,成像光谱仪设计时,其成像及分光方式的方案选择,是技术指标、平台约束、数据应用、探测器等多方面综合权衡比较的结果。凝视型成像光谱仪同时获取目标某单波长通道的二维图像,其光谱信息通常由时间序列分时探测不同波长通道图像实现,如图 1 所示。

适应凝视光谱成像的分光方式主要有滤光片轮、声光可调滤光器 (Acusto-Optic Tunable Filter, AOTF)、液晶可调滤光器 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)等方式。LCTF 基于液晶的场致双折射效应,具有光调制、偏转和滤光等功能。滤光片轮将多个不同透过波长的滤光片安装在旋转轮上,通过旋转滤光片轮从而得到不同波长的图像信息。

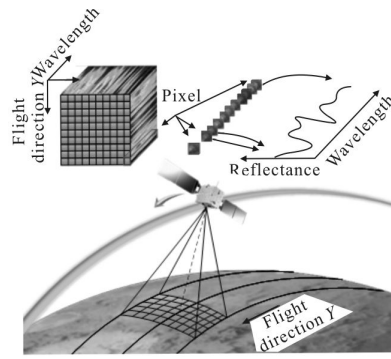


图 1 凝视型成像光谱仪探测原理

Fig.1 Detecting schematic diagram of staring imaging spectrometer

1.2 声光可调滤光器

AOTF 首先用作航天光谱探测的分光器件,被认为是 20 世纪 90 年代光谱仪最突出的进展,也常被称作第五代分光技术^[9-10]。AOTF 是一种电光调制分光器件,采用固态晶体材料,基于声光效应的原理,利用声波在各向异性介质中传播时对入射到传播介质中的光的布拉格衍射实现波长选择。实用化 AOTF 晶体二氧化碲 (TeO_2) 的工作光谱范围从可见光至红外谱段 ($0.35\sim 5.5\ \mu\text{m}$)。如图 2 所示,声光可调谐滤光器基于声光效应的原理,当一束复色光通过一个高频振动的具有光学弹性的晶体时,某一波长的单色光将会在晶体内部产生衍射,以一定角度从晶体中透射出来。当晶体振动频率改变时,可透射单色光的波长也相应改变,从而每次获取的图像信息为特定波长的信息,通过扫描频率,获得一组不同波长的图像信息及图像立方体^[10]。

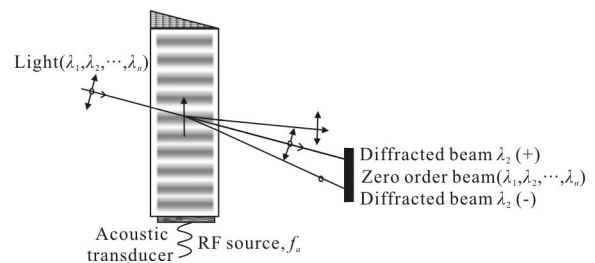


图 2 非共线性 AOTF 分光示意图

Fig.2 Schematic diagram of non-collinear AOTF light splitting

2 CE-3 红外成像光谱仪

CE-3 红外成像光谱仪^[8-9](Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer, VNIS)是一台典型的声光光谱成像仪器。该光谱仪是嫦娥三号巡视器主要有效载荷之一,用于巡视区月表红外光谱分析和成像探测,为巡视区月表矿物组成和分布分析以及巡视区能源和矿产资源的综合研究提供科学数据。见图 3。

红外成像光谱仪具备可见近红外(0.45~0.95 μm)谱

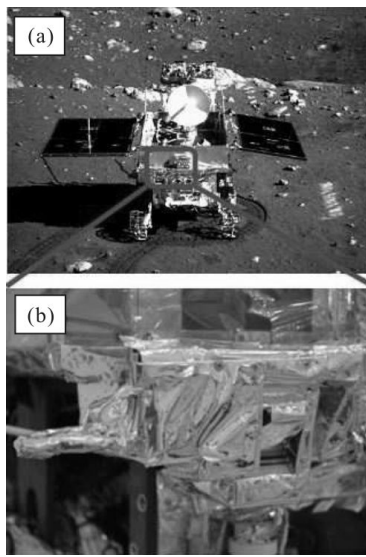


图 3 巡视器及红外成像光谱仪
Fig.3 Rover and VNIS

段的光谱成像及短波红外(0.9~2.4 μm)谱段的光谱探测功能,它基于月球巡视器静止平台,在巡视器停止时在 0.69 m 的高度以 45°视角对巡视区月表目标进行就位光谱成像探测。

红外成像光谱仪主要指标如表 1 所示,系统框图如图 4 所示,由可见近红外的成像光谱仪、短波红外光谱仪及定标防尘隔热一体化组件高度集成而成,包括声光调制分光光学系统、超声驱动定标防尘隔热一体化组件、轻型复合结构、数据获取及处理模块、主控系统等。

表 1 红外成像光谱仪主要技术指标
Tab.1 Key technical parameters of VNIS

No.	Parameters	Spectra	
		VNIR	SWIR
1	Spectral range/nm	450-950	900-2400
2	Resolution	2-7	3-12
3	FOV/(°)	8.5×8.5	Φ3.6
4	SNR/dB	≥31@9% solar reflectance	
5	Power consumption/W	19.8	
6	Weight/kg	4.675(probe); -0.7(electronics)	

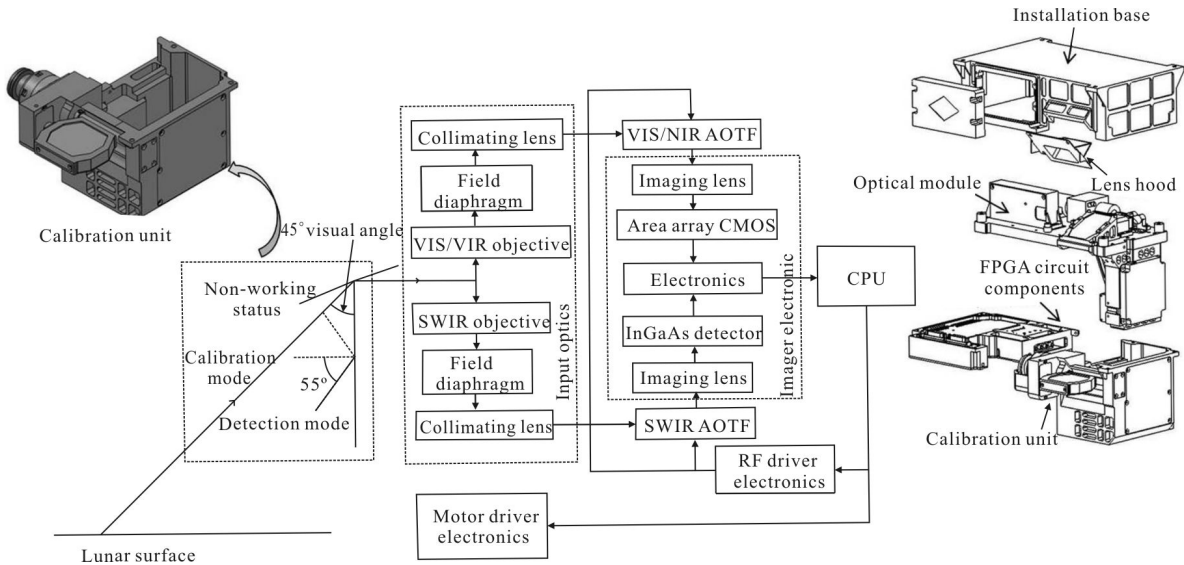
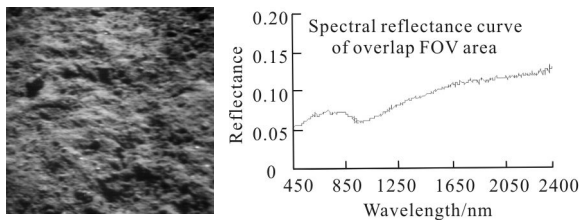


图 4 红外成像光谱仪系统框图
Fig.4 Block diagram of VNIS

红外成像光谱仪采用轻型超声电机实现定标、防尘、隔热功能,满足仪器在月面的昼、夜生存,防尘等环境适应性以及轻小型化要求。月面定标漫反射板使用聚四氟乙稀为材料,安装于红外成像光谱仪入光口处的定标防尘板内部,采用轻型超声电机驱动实现月面定标、防尘、探测等功能的切换;当红外成像光谱仪不工作时定标板闭合,防止月尘及其他污染物进入光谱仪内部,同时具有隔热作用。

红外成像光谱仪于北京时间 2013 年 12 月 23 日上午 10 点 10 分首次开机,已获取了多组不同探测点的月壤光谱图像及光谱数据。红外成像光谱仪月面获取的探测及定标图像及光谱数据为原始的光响应信号,经过数据处理后供科学应用,包括数据预处理及科学数据处理。图 5 为红外成像光谱仪获取的月壤初步探测结果,经初步分析其光谱具有辉石与橄榄石矿物月壤的典型吸收峰特征。红外成像光谱仪在国际上首次获得就位的月表光谱图像及光谱数据,为月表成分分析提供了宝贵的资料,同时也为进一步的月球探测及科学应用提供重要参考。



(a) 月面目标伪彩色图像 (b) 光谱反射率曲线
(a) Pseudo-color image on lunar surface target (b) Curve of spectral reflectance

图 5 红外成像光谱仪初步探测结果
Fig.5 Preliminary detecting result of VNIS

3 轻小型无人机载应用样机研制

成像光谱仪样机基于嫦娥三号红外成像光谱仪的可见近红外光谱成像通道(0.45~0.95 μm)完成设计及研制,并开展无人机载应用试验。

3.1 成像光谱仪样机及其性能

成像光谱仪样机主要性能指标如表 2 所示,其系统框图如图 6 所示。

红外成像光谱仪中的成像镜采用商业变焦镜头

表 2 地物成像光谱仪主要技术指标

Tab.2 Key technical parameters of the ground object imaging

No.	Item	Main parameters and performance
1	Spectral range/nm	400–1000(adjustable at given range)
2	Sample interval/nm	5(adjustable)
3	Resolution/nm	2–8
4	FOV/(°)	4×4(variable)
5	Effective pixels	640×480
6	Quantized value/bit	12
7	SNR/dB	≥30
8	MTF	>0.2
9	Detectable distance/m	0.01 m– +∞ (decided by the camera lens)
10	Weight/kg	≤1.5

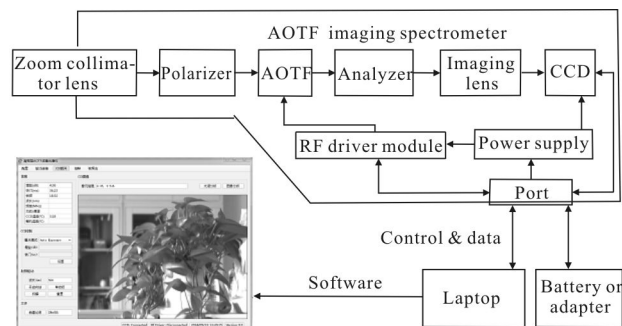


图 6 成像光谱仪样机系统框图

Fig.6 Block diagram of imaging spectrometer prototype system

(照相镜头或显微镜头),通过 C-mount 卡口完成与光谱成像模块的对接;光谱成像模块中的光路由准直镜、正交偏振消光组件、AOTF 分光组件、会聚镜组件、平面反射镜以及探测器组件组成。成像光谱仪样机电子学子系统主要由电源、MCU、DDS、射频放大电路、温度传感器等部分组成。其中 MCU 通过 USB 转串口接受上位机的命令并执行,然后将频率、通道状态、温度等反馈信息回传至上位机;电源全部采用高效率开关电源设计,支持 18~36 V 的宽电压输入。研制完成的成像光谱仪样机及其在室外太阳定标如图 7 所示。

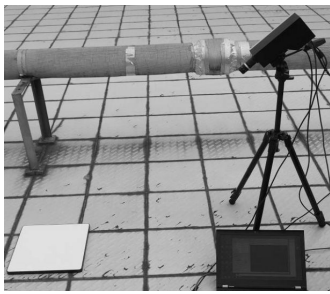


图 7 成像光谱仪样机及其室外太阳定标示意图
Fig.7 Prototype of the imaging spectrometer and schematic diagram of outdoor solar irradiance calibration

3.2 无人机载试验改造

为适应无人机载试验应用，对成像光谱仪样机进行改造，如图 8 所示，分成无人机机载遥感成像系统和地面监视遥测系统，二者通过无线数据链路通信^[11]。其中无人机机载遥感成像系统由电源管理系统、成像光谱仪样机、采集存储系统以及监视遥测系统组成，需搭载在无人机平台上，考虑到无人机平台载重有限，且各不相同，系统设计主要考虑轻量化、小型化、模块化以及低功耗。

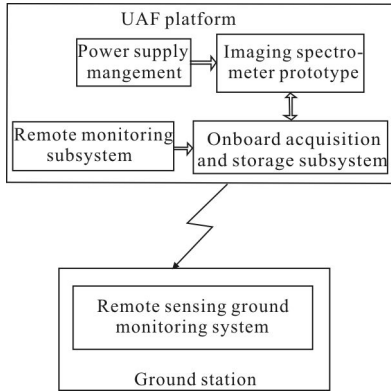


图 8 无人机载试验验证系统示意图
Fig.8 System diagram of unmanned airborne experimental verification

图 9 所示为改造后试验系统，由成像光谱仪样机和相配套的数据采集、电源、存储和无线传输等部分组成，质量为 4.5 kg^[11]。

试验系统中的电源使用高容量的锂离子电池，经过降压模块分别送给成像光谱仪样机，数据采集存储系统和无线图传系统。采集存储及控制系统采用 Camera Link 接口的图像采集卡完成光谱图像数

据的存储。监视遥测系统选取 COMMELL 公司的 LS37B 单板计算机作为机上控制核心模块，结合机上软件对试验系统进行监视、控制以及与地面站进行地面通讯。

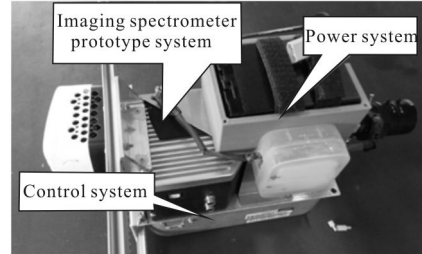


图 9 无人机载试验验证系统机上设备示意图
Fig.9 Onboard instrument diagram of unmanned airborne experimental verification

4 无人机载成像试验

凝视型声光光谱成像无人机载成像试验如图 10 所示，成像光谱仪搭载在无人机上，每一时刻均可以获取一幅图像，当所需光谱图像均完成获取时，将系列光谱图像采用基于特征匹配的方式进行处理，得到遥感目标的光谱特征^[11]。

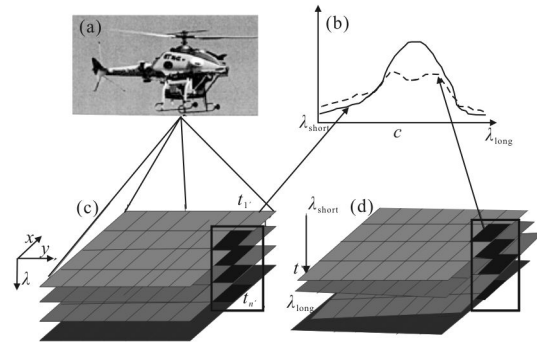


图 10 无人机载试验系统光谱成像数据获取原理
Fig.10 Schematic diagram of spectral imaging data acquisition based on unmanned airborne experimental verification system

试验选用台湾亚拓的 TREX800 型电动无人直升机进行，该无人机自重约 4.1 kg，最大起飞质量 12 kg，最大载重 5 kg，飞行时间 15 min。仪器挂载在无人机的头部，图 11 为 2015 年 4 月在烟台进行了飞行实验时的仪器示意图^[11-12]。



图 11 无人机载试验系统及试验地物目标

Fig.11 Unmanned airborne experimental verification system and object target

将所获波段的图像通过提取 SURF 特征点后匹配的方式进行波段配准,如图 12 所示。配准完成后取 720 nm,620 nm,520 nm 进行伪彩色合成,如图 13 所示,可以看出通过图像配准不同波段的图像得到很好的匹配,图像局部放大后评价表明实现了像元级匹配。试验获取的烟台体育馆地面目标及光谱如图 14 所示,尽管未进行辐射校正,但可看出近似目标 (Point1 和 Point3) 光谱相似性及不同目标(Point2 和 Point3)的光谱差异性明显。

上述试验及所获取数据验证了轻小型无人机载凝视光谱成像可在无 POS 系统的条件下实现光谱

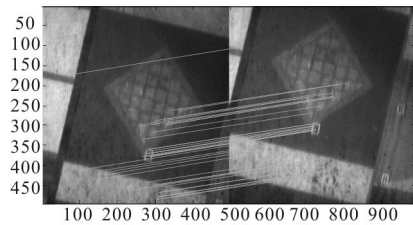


图 12 光谱图像特征匹配波段配准示意图

Fig.12 Spectral image feature matching and band registering result

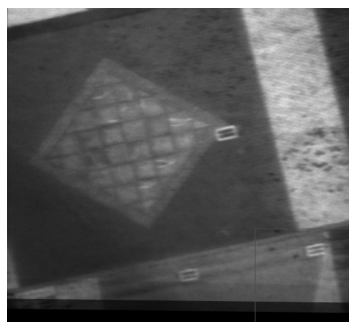


图 13 地物目标伪彩色图像

Fig.13 Pseudo color image of object target

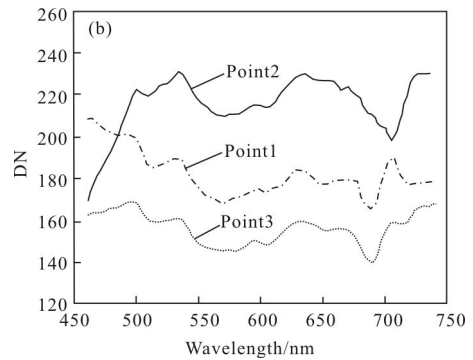
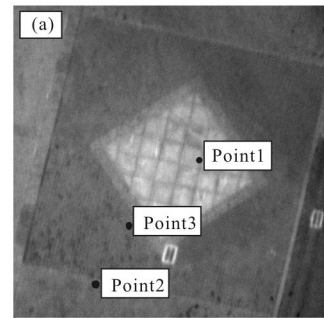


图 14 试验 620 nm 光谱图像及光谱曲线

Fig.14 620 nm spectral image and spectral curves

图像数据几何校正和拼接,可适应轻小型无人机载应用需求。

5 结束语

凝视型声光光谱成像无人机载成像试验尽管由于当时天气多云以及试验样机 F 数偏大,导致积分时间较短时图像信噪比偏低,但还是达到了验证无人机载无 POS 监测系统的目的。

目前,应用较广、技术成熟的推扫式高光谱成像仪可以同一时刻获取光谱信息和一维穿轨空间维信息,另一维空间信息由平台运动来完成^[3]。轻小型无人机平台相对卫星以及有人机而言,其不稳定性容易引起图像数据发生几何形变,且不太可能采用 POS 系统解决。面阵凝视声光光谱成像技术可以同时获取两维空间信息,分时获取光谱信息,再对光谱图像信息进行波段配准,可以在无 POS 系统的条件下对目标开展光谱成像数据获取。其中无人机平台不稳定性带来的几何畸变问题,可以应用电子稳像技术以及采用小 F 数镜头缩短积分时间进行进一步缓解。另外,声光可滤光器分光的成像光谱仪容易实现轻量化、小型化,能够适应轻小型无人机对

轻小型、高可靠载荷的需求。可以预计,声光光谱成像技术其面阵凝视画幅式成像、声光快速电控光谱选择的技术特点,即可适应无人机平台对数据获取及实时处理的要求,也具备体积小、质量轻、力热适应性强的特性,在轻小型无人机遥感应用上具备很好的应用前景。

参考文献:

- [1] He Zhiping. Research on key technique of geometry and spectral calibration of pushbroom hyperspectral imager [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
何志平. 推帚式成像光谱仪几何及光谱定标关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2009.
- [2] Nieke J, Schwqrzer H, Neumann A, et al. Imaging spaceborne and airborne sensor systems in the beginning of the next century[C]// SPIE, 1997, 3221: 22-26.
- [3] Barnsley M J, Settle J J, Cutter M A, et al. The PROBA/CHRIS mission: a low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2004, 42(7): 1512-1520.
- [4] Liu Shuqin, Wang Binyong, Xu Rui, et al. Broad-spectral-range AOTF performance analysis system based on multi-band acquisition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1343-1348. (in Chinese)
刘书勤, 王斌永, 徐睿, 等. 基于多谱段集成检测的宽光谱 AOTF 性能测试系统[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1343-1348.
- [5] Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese)
郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2629-2637.
- [6] Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayan Heshig, et al. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese)
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 52-57.
- [7] Anderson K, Gaston K J. Light weight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(3): 138-146.
- [8] He Zhiping, Wang Binyong, Lv Gang, et al. Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer (VNIS) and its preliminary results from the Chang'E 3 Project [J]. *Rev Sci Instrum*, 2014, 86: 8.
- [9] He Zhiping, Wang Binyong, Lv Gang, et al. Operating principles and detection characteristics of Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer (VNIS) in Chang'e 3 [J]. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14(12): 1567.
- [10] He Zhiping, Shu Rong, Wang Jianyu. Imaging spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration application[C]// SPIE, 2011, 8196: 819625.
- [11] Ge Mingfeng. Hyperspectral imagery remote sensing technology based on lightweight unmanned aerial vehicle [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
葛明锋. 基于轻小型无人机的高光谱成像系统研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [12] Ge Mingfeng, Qi Hongxing. Hyperspectral imaging remote sensing technology based on light weight unmanned helicopter platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3402-3407. (in Chinese)
葛明锋, 齐洪兴. 基于轻小型无人直升机平台的高光谱遥感成像系统 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3402-3407.
- [13] Xian Guang, Yan Changxiang. Analysis of attitude change impact on aerial push-broom imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2478-2483. (in Chinese)
贤光, 颜昌翔. 姿态变化对航空推扫式成像的影响分析 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2478-2483.