

doi: 10.3788/gzxb20164507.0710003

高光谱干涉图像动态追踪补偿方法研究

于涛^{1,2}, 胡炳樑¹, 高晓惠¹, 魏儒义¹, 景娟娟³, 侯晓华¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100190)

(3 中国科学院光电研究院, 北京 100049)

摘 要:结合基于位置姿态测量系统的目标动态追踪补偿校正和非等间隔快速傅里叶变换谱提取, 提出一种机载遥感的高准确度校正方法. 该方法通过位置姿态组合系统在承载平台稳定性较差的成像条件下进行实时姿态测量、主动校正、反馈补偿获取干涉图, 再对校正后的干涉图进行空间变换和非均匀性谱提取, 获得融合图像和目标光谱曲线. 机载飞行实验表明: 多谱段伪彩色融合图像效果良好, 光谱反演准确度与传统校正方法相比有大幅提升. 基于该方法的位置组合测量系统具有良好的机载环境适应性, 可应用于稳定性较差的平台以及非干涉型原理的光谱成像探测系统, 为机载高光谱图像运动误差一体化处理平台的研究提供了一条新途径.

关键词:光谱仪; 误差校正; 动态追踪补偿; 组合校正系统; 控制; 数据处理; 成像技术

中图分类号: TP752

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0710003-6

Research on Dynamic Tracking and Compensation Method for Hyperspectral Interference Imaging

YU Tao^{1,2}, HU Bing-liang¹, GAO Xiao-hui¹, WEI Ru-yi¹, JING Juan-juan³, HOU Xiao-hua¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(3 *Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Combining the compensation corrections based on target dynamic tracking with the spectra extraction based on non-uniform fast Fourier transform, a method was proposed to realize the high precision correction of airborne remote sensing. Through the way of real-time attitude measuring, active correction, feedback compensation from position and orientation system under poor imaging condition of non-stable platform, the interferogram was obtained. The fused image and the spectral curves were obtained from the corrected interferogram by the spatial transformation and data extraction of non-uniformity. The results of airborne flight experiment show that the multi-spectral fusion image has a good quality, and the precision of spectrum recovery has been improved greatly compared with the traditional methods. The attitude measuring system based on the proposed method has a good environmental adaptability of airborne, which can be used not only for the poor stability platform but also for the other spectral imaging detection system besides the principle of interference spectroscopy imaging. The proposed method provides a way for the movement error correction of airborne integration hyperspectral image processing platform.

Key words: Spectrometer; Error correction; Dynamic tracking compensation; Combination correction system; Control; Data processing; Imaging techniques

OCIS Codes: 100.4145; 110.4234; 260.3160; 280.4991; 300.6300; 330.6790

基金项目: 国家重点研究发展计划(No. 2009CB72400501)和国家自然科学基金(No. 11573058)资助

第一作者: 于涛(1980—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为光谱成像技术. Email: yutao@opt.ac.cn

导师(通讯作者): 胡炳樑(1973—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光谱成像技术、信号与信息处理. Email: hbl@opt.ac.cn

收稿日期: 2016-01-18; 录用日期: 2016-02-23

0 引言

大孔径静态干涉光谱成像仪 (Large Aperture Static interference Spectrometer, LASIS) 作为干涉光谱成像技术 (Fourier Transform Spectrometer, FTS) 的新型应用型式, 没有运动部件, 不需要运动补偿, 具有高的能量利用率, 可以实现高的分辨率和信噪比等, 已经在航天领域得到重大应用。但是, LASIS 对搭载平台的稳定度要求非常高, 如出现平台的稳定性差、高频抖动、低频大摆幅震颤等姿态变化时, 容易造成光谱图像复原的失真和谱线提取的混叠^[1]。因此, 如何将 LASIS 在平台稳定性较差的机载领域进行准确度高的可靠性应用, 是亟待解决的问题。

意大利科学家 A. Barducci 等利用自研的基于阿尔莎 (Aerospace Leap-frog Imaging Stationary Interferometer for Earth Observation, ALISEO) 的干涉光谱成像仪在佛罗伦萨 (Firenze) 地区进行了机载试验^[2-3], 获取了该地区的干涉图像, 但是对校正方法提及甚少。国内科研单位也进行了相关的研究工作^[4], 但多数是从基于图像的目标点配准进行研究的, 具有一定的被动性、不可靠性、非实时性等缺点。因此, 迫切需要探求一种能够主动、准确的平台校正方法, 来实现运动姿态变化时对目标干涉图的准确校正。

本文提出了一种基于 LASIS 探测原理的高准确度机载应用模式, 即通过高准确度姿态位置测量系统 (Position and Orientation System, POS) 的硬件组合和非等间隔快速傅里叶变换 (Non-uniform Fast Fourier Transform, NUFFT) 的谱提取方法, 对机载 LASIS 光谱仪进行高准确度位置姿态测量, 主动校正, 准确图谱重构, 可有效解决当前 LASIS 高准确度机载应用的问题。

1 动态追踪补偿校正原理

基于 LASIS 原理的光谱成像技术, 其实质是采用时空联合调制型光谱成像原理, 依据其数据立方体的重构原则, 首先获取准确的带有干涉条纹的二维空间信息, 并通过逐列推扫获得目标对应的全视场信息, 即在光谱成像仪每一帧的曝光时刻对其位置姿态信息进行变化修正, 实现连续干涉图的获取。依据此成像规则, 本文提出了一种硬件上基于姿态测量系统 POS 和稳定平台组合的 LASIS 运动误差校正方案^[5-6], 图 1 为基于 POS 组合探测的单元。

组合探测系统的各单元主要由控制计算机 (Personal Computer Controller, PC Controller)、姿态测量系统 POS、稳定平台和基于 LASIS 的光谱成像仪四部分组成。控制计算机主要接收 POS 系统测量数据、反馈校正数据至稳定平台, 接收 LASIS 同步图像

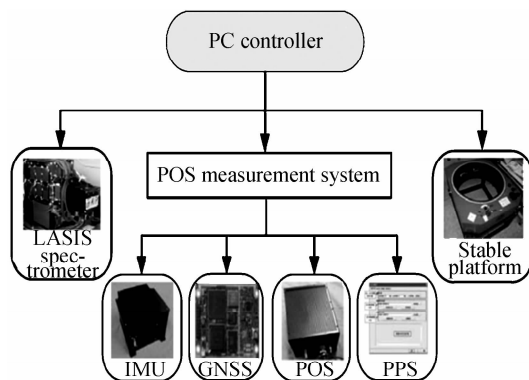


图 1 基于 POS 组合探测的单元

Fig. 1 Combined detection unit based on POS

数据并标记时间戳; POS 姿态测量系统主要由惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU)、卫星定位系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)、POS 数据控制系统 (POS Controlling System, PCS) 和后处理软件 (Post-processing Software, PPS) 组成, 主要实现探测过程中对成像装置的位置、速度、姿态和时间基准的准确获取和解析^[7-8]; 稳定平台主要实现姿态指向调节, 即在一定位置范围 (横滚、俯仰、航向) 的稳定调节, 对飞行器的剧烈位置姿态变化具有初步抑制作用; LASIS 光谱成像仪的作用是在一定光谱范围内实现对地物目标干涉图像的获取。

组合探测系统工作原理如图 2。基于 LASIS 的光谱成像仪搭载于稳定平台上, 稳定平台放置于飞行器窗口垫肩处且紧密固定, 通过成像窗口在水平方向上对准目标, POS 系统预热完成后, 校正系统开始工作, 稳定平台依据飞行器姿态, 由控制计算机实时发送反馈数据至稳定平台, 使其按照与相机帧频同步模式调整成像位置, 并指向水平方向的目标基准, 对于超出稳定平台补偿范围的姿态数据, 通过 POS 同步记录当前位置姿态数据, 再由串口发送至控制计算机, 按照帧序列标记时间戳, 进行后续二次修正。按照此工作模式, 对区域目标进行连续推扫、姿态记录和修正, 即可以实现 LASIS 光谱成像仪的高准确度姿态校正。

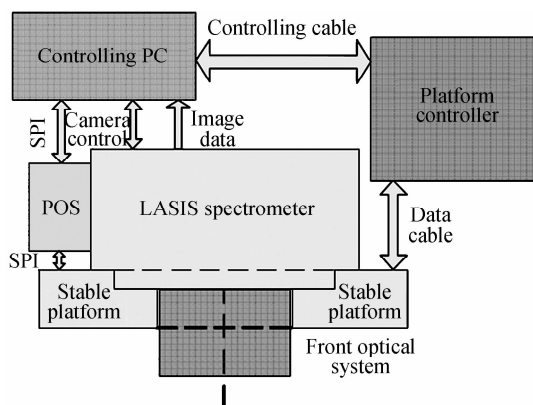


图 2 基于 POS 组合探测系统的系统框图

Fig. 2 Block diagram of detection system

2 补偿校正空间解析方法

基于 LASIS 的光谱成像仪在机载成像时,需要对 POS 的 IMU 坐标系、LASIS 成像坐标系以及校准后的匹配坐标系进行空间变换,如图 3 所示. 设 POS 的 IMU 坐标系为 B , 其中 X^B 、 Y^B 、 Z^B 分别表示飞行方向、翼展方向、对天方向; 成像坐标系为 D , 其中 X^D 、 Y^D 、 Z^D 分别对应飞行方向、垂轨方向、对地方向.

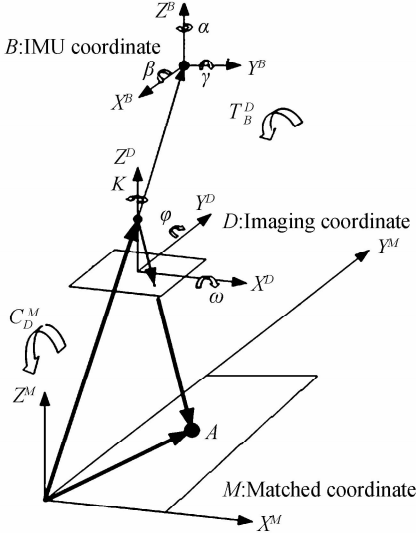


图 3 坐标转换示意图

Fig. 3 Schematic of coordinate conversion

校正后的匹配坐标系为 M , 其中 X^M 、 Y^M 、 Z^M 分别表示飞行方向、水平方向、法线方向. 基于 POS 的 IMU 坐标系 B 和成像坐标系 D 存在转换矩阵 $T_B^D(\alpha, \beta, \gamma)$, 该矩阵由 POS 系统与成像设备的安装位置关系决定, 由于 POS 是固定于 LASIS 成像光谱仪的一侧, 其 IMU 坐标系和成像坐标系的位置关系已经固定. 成像坐标系 D 和匹配坐标系 M 存在转换矩阵 $C_D^M(\varphi, \kappa, \omega)$, 它是旋转矩阵, 由 IMU 测量的姿态数据(横滚 φ 、俯仰 κ 、偏航 ω)决定. 通过对视场中某空间点进行变换, 得到匹配坐标系 M 下的表达式, 即

$$M_{(X,Y,Z)} = T_B^D(\alpha, \beta, \gamma) C_D^M(\varphi, \kappa, \omega) D_{(x,y,z)} \quad (1)$$

式中 $M_{(X,Y,Z)}$ 、 $D_{(x,y,z)}$ 分别为对应的匹配坐标系和成像坐标系下的空间点, 而 T_B^D 是由安装位置决定的固定值, 则某空间点的坐标转换关系可变换为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = T_B^D \begin{bmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ -\sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用 POS 系统来测量光谱成像系统的空间姿态和位置信息, 通过式(2)进行映射矩阵变换, 建立基于姿态数据 $(\varphi, \kappa, \omega)$ 的函数关系, 可得到成像区域空间点

在校正后匹配坐标系下的对应函数关系, 以此获取映射的灰度信息, 最终获取目标点的校正干涉像^[9-11].

3 干涉数据的重构方法

3.1 基于 LASIS 的干涉数据立方体的提取方法

基于 LASIS 的干涉图数据, 其获取方式和立方体结构如图 4.

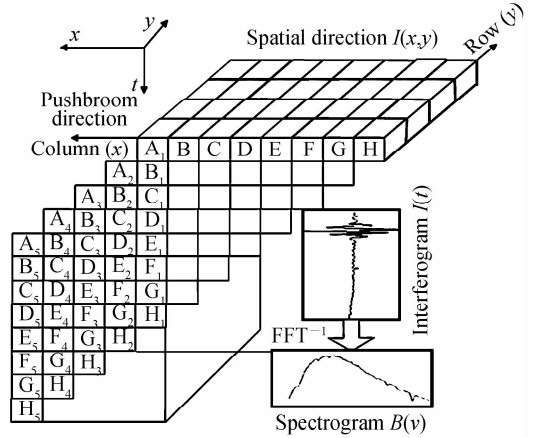


图 4 LASIS 干涉数据提取示意图

Fig. 4 Schematic of LASIS Interference Data Extraction

飞行方向为 x , 空间幅宽方向为 y , 沿飞行方向按照速高比设定的同步空间帧频进行连续推扫, A_1 、 A_2 、 $A_3 \dots$ 表示在每帧曝光时间内覆盖的一行地物目标, 在数据立方体垂直方向序列, A_1 、 B_1 、 $C_1 \dots$ 表示同一行地物在不同光程差处的灰度值, 通过对垂直方向序列提取干涉图, 进行复原, 便可得到这一点地物目标的光谱图.

3.2 校正干涉图光谱重构方法

在进行目标点光谱反演时, 由于机载平台的姿态稳定性较差, 导致干涉图光程差和时间序列存在非线性关系, 使传统上的等间隔采样的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)无法适应高精度光谱复原, 因此, 需要进行非等间隔采样的干涉图完成光谱曲线的反演, 即 NUFFT 非等间隔快速傅里叶变换算法^[12].

对于非等间隔采样的干涉图数据输入信号 $I_r(x)$, $j \in [0, N-1]$, x_j 为采样点, $x_j = 2\pi j \omega_j / N$, $\omega_j \in [-1/2, 1/2]$, 窗函数为 $t_r(x)$, 则通过干涉图输入信号和窗函数信号卷积, 产生新的信号, 即

$$I_r(x) = I(x) * t_r(x) = \int_0^{2\pi} I(y) t_r(x-y) dy \quad (3)$$

满足干涉图等间隔过采样要求后, 其采样点数为 M , 过采样率为 $R = M/N$, 采样点为 $x_m = 2\pi m/M$, 离散化处理变为新的表达式为

$$I_r(2\pi m/M) = \sum_{j=0}^{N-1} I_j t_r(2\pi m/M - x_j) \quad (4)$$

对式(4)进行 FFT 变换, 使该信号的频谱变为

$$B_r(k) = \sum_{m=0}^{M-1} I_r(2\pi m/M) e^{-i2\pi km/M} \quad (5)$$

再在频域去窗函数 $T_r(k)$, 可得到原始干涉输入信号的复原频谱, 即

$$B(k) = \frac{B_r(k)}{T_r(k)} = \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} e^{k^2 \tau} B_r(k) \quad (6)$$

对于窗函数 $T_r(k)$ 的选择, 考虑到仪器的光谱分辨能力和仪器函数旁瓣衰减速度, 选择高斯函数作为窗函数; 在干涉图像谱变换的关键环节, 采用本文提出的 NUFFT 变换方法替换传统 FFT 谱提取变换, 该法可以有效改进承载平台姿态稳定性较差的缺点。

图 5 是干涉图光谱复原过程的其他环节和流程, 即对校正后的干涉图进行暗电平去除, 滤波去除基线, 选择合适切趾函数修正振荡, 再进行小双边采样的相位校正, 之后对干涉图各列进行 NUFFT, 得到相应目标点光谱曲线, 提取各单谱段图像, 得到融合后的伪彩色图像^[13-14]。

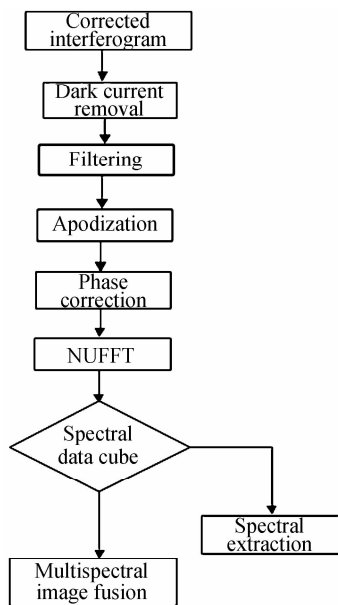


图 5 校正后干涉数据光谱复原流程
Fig. 5 Diagram of spectra recovery

4 校正方法的机载试验验证

为了验证基于 POS 组合校正的机载 LASIS 干涉图提取及复原重构方法的有效性, 在山东威海文登地区进行了机载飞行试验验证, 参试设备有自研的 LASIS 高光谱成像仪、北京航空航天大学研制的高准确度 POS 测量系统 TX-R610、三轴稳定平台 BH-HAP2, 试验载机选择了民用运 12 飞机. 基于 POS 组合校正的机载一体化试验系统, 其典型工作参数如表 1.

表 1 试验系统工作参数选取值

Table 1 Selected parameters for experiment system

Parameter	Parameter value
Working height/m	2 800
Cruising speed/(km · h ⁻¹)	260
Spectrum range/nm	900~2 500
Frame rate	Synchronous mode
Attitude accuracy	0.005 (σ)
Range for roll & pitch/(°)	-5~5
Range for voyage/(°)	-25~25

试验场地铺设了 4 块不同反射率靶标, 在机载 LASIS 试验系统经过其上方时采集图像数据和 POS 测量数据. 为了获取标准参考光谱以验证本校正系统光谱复原方法的有效性, 在飞机飞过靶标区域后, 由地面测试人员立即用 ASD 公司的 FieldSpec FR 型光谱辐射度计(光谱分辨率 1.4 nm@350~1 000 nm, 2 nm@1 000~2 500 nm), 对地面靶标进行光谱数据采集比对. 同时, 也为了验证 POS 测量系统对 LASIS 校正的效果, 在飞机经过靶标上空的不同圈次, 选择关闭或开启 POS 测量系统, 来比较和评估不同条件下获取的光谱曲线差异。

图 6 为试验系统各组件在机舱内的安装位置。

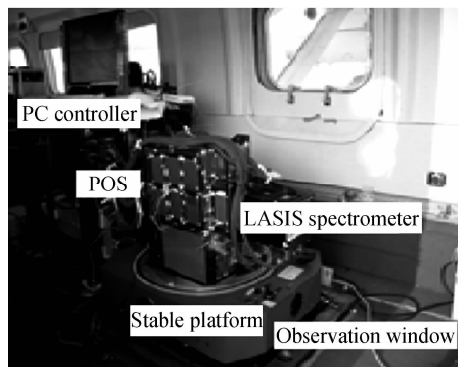


图 6 试验系统安装状态

Fig. 6 Diagram of spectra recovery

图 7 为机载 LASIS 获取的叠加了干涉条纹的单帧灰度值图像, 在方框区域内是人为铺设的对应不同反射率材料的 1#~4# 靶标。

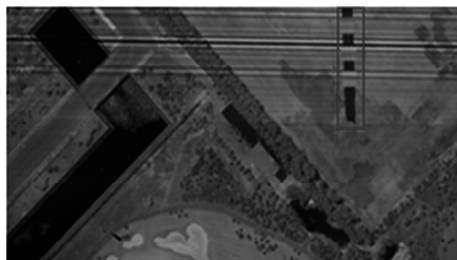


图 7 LASIS 获取的干涉图

Fig. 7 Interferogram obtained by airborne LASIS

对连续推扫后的校正干涉图,按照图 5 所示的数据复原流程进行光谱复原,得到的多谱段伪彩色融合图像如图 8.

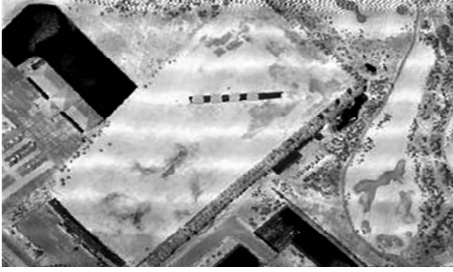


图 8 LASIS 的多谱段融合图

Fig. 8 Multi-spectral fusion image of LASIS

对视野内的 4 号靶标,采用不同方法获取的归一化后光谱曲线,其对比情况如图 9.

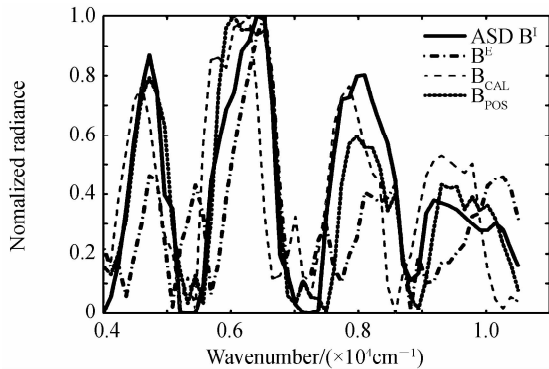


图 9 不同方法重构的光谱曲线对比

Fig. 9 Spectrum curves obtained by airborne LASIS

表 2 飞行数据 1 号~4 号靶标复原准确度评价

Table 2 Recovery accuracy of flight data (NO: #1~#4)

Target label	Uncorrected spectrum	SA		Uncorrected spectrum	RQE	
		Corrected spectrum			Corrected spectrum	
		Image registration	POS correction		Image registration	POS correction
#1	0.630 9	0.311 2	0.254 8	0.909 5	0.507 8	0.451 8
#2	0.641 0	0.727 5	0.314 1	0.918 1	1.020 4	0.474 0
#3	0.636 4	0.969 5	0.293 4	0.914 8	1.260 8	0.442 3
#4	0.653 2	0.890 9	0.302 7	0.939 0	1.208 2	0.459 8

4 结论

本文提出一种基于 POS 的目标动态追踪补偿校正和非等间隔快速傅里叶变换的谱提取相结合的方法,取得了良好的机载遥感高准确度校正效果.将 POS 校正和 NUFFT 组合方法获取的光谱曲线,与传统处理方法所获取的光谱曲线,进行关键指标对比,可知其 SA 和 RQE 指标大幅提升,能够满足平台稳定性较差的机载遥感需求.同时,该方法具有相当的通用性,能够解决制约高分辨率多维信息航空探测的技术瓶颈,满足综合对地遥感的战略需求.但该一体化组合校正系统仍需在实时性和智能化程度方面做相关改进,一旦具有真正意义的快速智能实时处理系统实现,将具

有重大的战略意义.

采用 ASD 获取的标准参考曲线为 B^I 、未采用任何校正措施的传统 FFT 方法获取的光谱曲线为 B^E 、基于图像配准的软处理和传统 FFT 方法获取的光谱曲线是 B_{CAL} 、基于 POS 组合校正方法并采用 NUFFT 方法获取的光谱曲线为 B_{POS} .

从图 9 可以看出,基于 POS 和 NUFFT 组合校正法可以较好的提高机载 LASIS 光谱复原准确度,且适应性好.取一组飞行数据,采用光谱相似角 (Spectral Angle, SA) 和光谱相对均方误差 (Relative spectral Quadratic Error, RQE)^[15-17] 对 1 号~4 号靶标飞行数据进行量化分析^[18],结果如表 2.

表 2 表明:基于 POS 和 NUFFT 组合校正法不仅可以实现对连续快速推扫成像探测系统主动同步姿态校正,也可以对主动校正后的残差部分进行实时姿态的测量,具有实现 100Hz 主动姿态校正、400Hz 姿态残差数据测量的能力,定位校正准确度达到 0.03m,姿态测量准确度达到 0.005°;在谱提取算法实现方面,改变传统的等间隔 FFT 法为非等间隔的 NUFFT 法,可以获得高准确度的多谱段融合图像,SA 和 RQE 指标也有非常大的提升,相比于未校正的光谱和被动式图像配准方法,SA 指标最大提高了约 59.6%,RQE 指标最高提升了约 50.3%,且鲁棒性好,同时具有良好的环境适应性.

有重大的战略意义.

参考文献

- [1] XIANG-LI Bin, YUAN Yan. Measurement of the SNR of Fourier transform spectrometers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1110-1114.
相里斌,袁艳. Fourier 变换光谱仪信噪比测量方法研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1110-1114.
- [2] JING Juan-juan, XIANG-LI Bin, LV Qun-bo, et al. Advance in interferogram data processing technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(4): 865-870.
景娟娟,相里斌,吕群波,等. 干涉光谱数据处理新进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(4): 865-870.
- [3] ALESSANDRO B, FRANCESCO C, et al. ALISEO on MIOSAT: An Aerospace imaging interferometer for earth observation[C]. Cape Town: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009: 464-467.

- [4] YUAN Jin-sha, ZHAO Zhen-bing, GAO Qiang, *et al.* Review and prospect on infrared/visible image registration[J]. *Laser and Infrared*, 2009, **39**(7):693-699.
苑津莎, 赵振兵, 高强, 等. 红外与可见光图像配准研究现状与展望[J]. 激光与红外, 2009, **39**(7):693-699.
- [5] YU Tao, HU Bing-liang, GAO Xiao-hui, *et al.* Design and implementation of real-time processing platform for movement error correction of hyperspectral imaging[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(8):2275-2279.
于涛, 胡炳梁, 高晓惠, 等. 高光谱运动误差校正实时处理平台设计与研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(8):2275-2279.
- [6] YIN Shi-min, XIANG-LI Bin, ZHOU Jin-song, *et al.* Real-time data processing of interferential imaging spectrometer based on FPGA[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(4):274-278.
殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 基于FPGA的干涉式成像光谱仪实时数据处理系统研究[J]. 红外与毫米波, 2007, **26**(4):274-278.
- [7] LI Han-zhou, PAN Quan, WANG Xiao-xu, *et al.* LINS initial alignment algorithm based on the attitude tracking approach for a rocking base[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5):0512001
李汉舟, 潘泉, 王小旭, 等. 基于姿态跟踪的LINS晃动基座初始对准[J]. 光子学报, 2015, **44**(5):0512001.
- [8] FANG Jian-cheng, YANG Sheng. Study on innovation adaptive EKF for in-flight alignment of airborne POS[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2011, **60**(4):1378-1388.
- [9] SU Li-juan, YUAN Yan, XIANG-LI Bin. Spectrum reconstruction method for airborne temporally-spatially modulated fourier transform imaging spectrometers[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2013, **52**(6):3720-3728.
- [10] XIN Meng, LIN Jiang-xin, LIU De-fang, *et al.* Fourier transform imaging spectro-polarimeter using simultaneous polarization modulation [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(5):778-781.
- [11] ZHANG Bo-wen, WANG Xiao-yong, HU Yong-li. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(2):60-66.
张博文, 王小勇, 胡永力. 微振动对高分辨率空间相机成像影响的集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(2):60-66.
- [12] YAO Tao, LV Qun-bo, XIANG-LI Bin, *et al.* Research on spectral data recovery adopting Non-uniform sampling interference technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(5):1430-1433.
姚涛, 吕群波, 相里斌, 等. 非均匀采样干涉数据光谱复原技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(5):1430-1433.
- [13] GAO Zhi-fan, ZHANG Hong-ping, WU Qiong-shui, *et al.* Calibration and characterization of an AOTF-based hyperspectral imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7):0711001.
高志帆, 张红平, 吴琼水, 等. AOTF高光谱成像系统的标定及性能测试[J]. 光子学报, 2015, **44**(7):0711001.
- [14] ZHAO Chun-hui, TIAN Ming-hua, QI Bin. Hyperspectral endmember extraction based on maximum N-dimensional solid spectral angle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1):0110001.
赵春晖, 田明华, 齐滨. 基于最大化N维立体光谱角的高光谱端元提取[J]. 光子学报, 2016, **45**(1):0110001.
- [15] GARCIA-ALLEDDE P B, CONDE O M, MIRAPEIX J, *et al.* Data processing method applying principal component analysis and spectral angle mapper for imaging spectroscopic sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7):1310-1316.
- [16] YUAN Zhi-lin, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang. Study of SNR of a novel polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11):6413-6419.
袁志林, 张淳民, 赵葆常. 新型偏振干涉成像光谱仪信噪比研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(11):6413-6419.
- [17] WANG Shuang, XIANG-LI Bin, LI Li-bo, *et al.* Research of spectrum signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(3):851-856.
王爽, 相里斌, 李立波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪光谱信噪比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(3):851-856.
- [18] ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, XUE Bing, *et al.* Calibration of Chang'e E-1 satellite interference imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5):769-775.
赵葆常, 杨建峰, 薛彬, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪的定标[J]. 光子学报, 2010, **39**(5):769-775.