

温度对某机载成像光谱仪谱线漂移的影响

贤 光^{1,2} 颜昌翔¹ 邵建兵¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了研究温度对机载成像光谱仪谱线漂移的影响,分析了机载环境下仪器温度载荷的特点、作用机理和表现形式,研究了光谱仪的谱线漂移特性。根据机载环境下温度载荷特点,利用有限元法,结合最小二乘法 and 坐标转换法,计算了光学系统各镜面在温度载荷作用下面形变化和刚体位移。对变形后的光学系统进行了光线追迹,研究了其谱线漂移特性。通过热光学实验和飞行成像期间光谱定标实验验证了理论分析。热光学实验表明,在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内,谱线在光谱方向仅发生整体平移,没有拉伸或压缩效应。在飞行期间的定标实验中,其平均谱线偏移量为 0.248 nm ,满足定标精度的 $1/3$ (定标精度为 1 nm)要求。后续成像不需要再进行光谱定标或光谱修正。

关键词 遥感;谱线漂移;温度载荷;成像光谱仪

中图分类号 TH73; O433.4; TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0428002

Thermal Effect on Spectral-Line Shift of a Airborne Imaging Spectrometer

Xian Guang^{1,2} Yan Changxiang¹ Shao Jianbing¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract In order to study the thermal effect on spectral-line shift of aerial imaging spectrometer, the characteristics, mechanism and manifestation of the instrument temperature load airbrone environment are analyzed, and the spectral-line shift characteristics of the spectrometer are studied. According to the characteristics of the temperature load in airbrone environment, the finite element method is taken to calculate the deformation and rigid body displacement of the mirror of the optical system at a temperature load, combined with the least squares method and coordinate transformation method. Ray tracing to the deformed optical system are carried out and its spectral-line shift characteristics are studied. The thermal-optical test and calibration test during flight is taken to prove the theoretical analysis. The results show that within the range of $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, there is only shifting in the spectral direction, no tension or compression effects. During the calibration test of flight, the average line offset is 0.248 nm , satisfies the need of $1/3$ of the accuracy (calibration accuracy is 1 nm). No further spectral calibration or correction is needed in the later imaging.

Key words remote sensing; spectral-line shift; temperature load; imaging spectrometer

OCIS codes 280.6780; 300.6430; 120.0280; 120.6200

1 引言

与航天成像光谱仪相比,机载成像光谱仪具有温度环境更恶劣^[1]、平台姿态稳定性差、飞行高度低、视场角大等特点。当成像光谱仪所处的环境(如温度、平台运动、震动等)发生变化时,光学系统各镜面将产生面形变化和刚体位移,导致视轴漂移和波前畸变^[2-3],造成影像模糊,最终影响成像质量。机载成像光谱仪的应

收稿日期: 2014-07-17; 收到修改稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)、中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 贤 光(1988—),女,博士研究生,主要从事航空成像质量方面的研究。E-mail: xg1004@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.an.cn

用,以量化的数据为基础,除了需要获取清晰的图像,还需要具有足够的光谱和辐射测量精度^[4]。通常,机载光谱仪飞行成像时都配有高精度姿态稳定系统、减震系统及热控装置等来控制机载环境,保证成像质量^[5-6]。但是由于条件差异,成像光谱仪光机装调、地面测试和飞行成像期间的温度环境很难一致,因此成像光谱仪将产生谱线漂移,严重影响成像光谱仪的光谱、辐射测量精度。

通常机载光谱仪没有实时光谱定标系统,飞行前、后定标需要不同工况下的谱线漂移特性的理论支持。通过研究温度载荷对成像光谱仪像面谱线漂移的影响特性,可指导仪器的定标和数据处理,进而提高仪器的光谱、辐射测量精度^[7],最终提高成像光谱仪对地物目标识别和分类的准确度。

国内郑玉权^[8]对成像光谱仪的温度漂移特性进行了一定的实验研究;张军强等^[9]研究了温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响;冯玉涛等^[10]分析了谱线弯曲对成像光谱仪辐射采集的影响。国外对成像光谱仪谱线漂移的研究也都集中在实验室光谱定标和星上定标的数据处理方面^[11]。目前,关于温度变化引起的谱线漂移尚无系统的研究。本文以某机载宽覆盖成像光谱仪中的可见近红外(VNIR)光谱仪为研究对象,通过理论分析和实验验证,探讨温度对成像光谱仪谱线漂移的影响。其光谱范围为400~1000 nm,平均光谱分辨率为5 nm,探测器尺寸为18 μm ,光谱维方向合并两个像元。

从机载光谱仪光机结构设计的工程实际需求出发,分析了温度变化对机载成像光谱仪谱线漂移的影响。采用有限元软件计算不同温度工况下的镜面面形变化和刚体位移;利用Zemax软件分析镜面面形变化和刚体位移对光谱仪像面谱线漂移;通过热光学实验和飞行定标实验检验理论分析的正确性,完成温度载荷下光谱仪光学性能的定量评价,为光谱仪光谱定标、飞行成像提供理论依据。

2 机载温度载荷的特点分析

2.1 机载光谱仪结构热设计

机载成像光谱仪采用大视场、离轴非球面、推扫式光谱成像系统,具有复杂结构。光机结构设计重点考虑了刚度和热稳定性。VNIR光谱仪系统采用钛合金箱式结构的主框架,狭缝组件、准直镜组件、凸面光栅组件、成像镜组件和焦面组件,通过螺钉连接安装在主框架上。其中,准直镜、成像镜采用背部芯轴支撑,使用光学环氧胶完成芯轴与反射镜的粘接,利用三脚架柔性结构提高热稳定性。各镜支撑采用线膨胀系数与镜子材料匹配的殷钢材料,使镜面面形变化和刚体位移较小。图1为光机结构示意图。

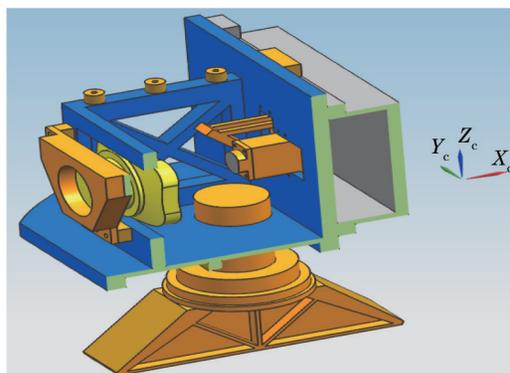


图1 光谱仪系统光学结构图

Fig.1 Optical construction of the spectrometer system

在热控方面,光谱仪主体对外隔热安装,减小安装平台的影响;主框架内表面喷涂ERB-2B黑漆,表面发射率 $\varepsilon_n \geq 0.85$;各反射镜组件、调焦组件、光栅组件、焦面组件等与主框架导热安装,提高整机温度均匀性;机上电箱与主体隔热安装,降低电子元器件工作温升对主体的影响;同时,采用主控加热补偿的方式,满足恒温、无温度梯度的要求。

由于环境温度变化和机上电子学工作温升的影响,光谱仪在实验室光谱定标和飞行成像阶段,温度环境必然不一致。对于成像光谱仪这样一个复杂的光机系统,完全实现无热化设计几乎是不可能的。所以,必须深入研究温度变化导致的谱线漂移,进而指导实验室光谱定标和飞行成像,提高光谱、辐射测量精度。

2.2 光谱仪样机外场飞行实验

为了采集高光谱成像仪飞行成像期间的力、热环境,高光谱成像仪样机于2013年12月利用中国国土资源航空物探遥感中心PAV30平台和POS系统在湖南衡阳开展了飞行成像实验,获取了一批高光谱图像数据,验证了仪器设计的正确性和对飞行环境的适应能力。如图2所示,飞行当天有薄雾。温度测量采用15个测温点,从7:25飞机起飞至9:58飞机着陆为止。实验结果表明,从起飞到着陆整个过程中最大温变不超过10℃,飞行高度为2 km时最大温变不超过5℃。以VNIR焦面组件的测温点为例,在整个测试过程中的温度变化曲线如图3所示。其中7:41~8:15、9:15~9:35之间,飞行高度为2 km。



图2 飞行成像实验当天的天气情况
Fig.2 Weather of the day on light imaging test

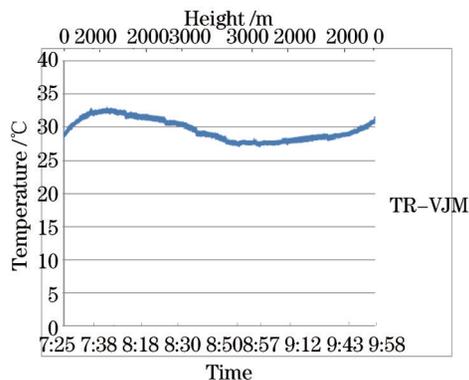


图3 VNIR焦面组件测温点的温度曲线
Fig.3 Temperature curve of temperature measure points on VNIR focal plane module

正常成像状态下,由于采取了合理的热控策略和有效的热控措施,光谱仪整机温度均匀性较好。地面验证实验和飞行测试数据表明,整机温度梯度小于1.4℃,VNIR光谱仪的温度梯度小于0.5℃,温度水平变化范围小于±10℃。因此温度梯度对光机结构的影响基本可以忽略,主要考虑温度水平变化对仪器光学性能的影响。

3 温度对机载成像光谱仪谱线漂移的影响

当温度水平变化时,光机结构将发生热弹性变形,导致系统镜面发生面形变化和刚体位移,造成像面上各波长主光线成像位置发生变化,产生谱线漂移。由于在结构设计和材料选择上采取了多种措施,机载成像光谱仪的镜面面形变化和刚体位移都较小,几纳米至几十纳米的镜面面形变化导致的谱线漂移可以忽略^[12],影响谱线漂移的主要原因是镜面的刚体位移。

外场实验表明,成像光谱仪温度水平变化范围小于±10℃。热光学实验中,成像光谱仪在该温度范围内获取了清晰的图像数据,满足系统成像质量要求。以下分析温度水平变化引起光学元件和机械结构的弹性变形,进而研究其引起的刚体位移对谱线漂移的影响。

3.1 刚体位移求解

利用Patran、Nasrtan软件进行热弹性分析,获取光学元器件的面形变化和刚体位移。有限元分析软件输出结果为各节点在特定载荷下的结构变形值,需要通过曲面拟合得到镜面的面形误差和刚体位移,以便代入Zemax等光学软件进行光学性能分析。

有些文献采用一维搜索法、下山法等算法来处理镜面面形误差,并在工程实践中得到了很好的应用^[13]。它们的基本思想是通过多次迭代找到满足标准差最小的逼近方程,算法较繁琐,求解效率不高。而基于齐次坐标变换法建立镜面变形前后各节点的对应关系,构建六元一次方程组,利用最小二乘法可以求解镜面刚体位移的精确解析解。

假设在镜面发生刚体位移前的局部坐标系 C_0 内,节点原始位置为 (x_0, y_0, z_0) ,变形后的节点位置为 (x_m, y_m, z_m) ,而在镜面发生刚体位移后的局部坐标系 C_1 内,变形后的节点位置仍为 (x_0, y_0, z_0) 。假设镜面的刚体位移为 $(T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z)$,则 (x_m, y_m, z_m) 的解析解 (x'_m, y'_m, z'_m) 可通过齐次坐标变换法求解:

$$\begin{cases} x'_m = x_m \cos R_Y \cos R_Z - y_m \cos R_Y \sin R_Z + z_m \sin R_Y + T_X \\ y'_m = x_m (\sin R_X \sin R_Y \cos R_Z + \cos R_X \sin R_Z) - y_m (\sin R_X \sin R_Y \sin R_Z - \cos R_X \cos R_Z) - z_m \sin R_X \cos R_Y + T_Y \\ z'_m = x_m (-\cos R_X \sin R_Y \cos R_Z + \sin R_X \sin R_Z) + y_m (\cos R_X \sin R_Y \sin R_Z - \sin R_X \cos R_Z) + z_m \cos R_X \cos R_Y + T_Z \end{cases} \quad (1)$$

由于各镜面转动位移(R_X, R_Y, R_Z)较小, (1)式可简化为

$$\begin{cases} x'_m = x_m - y_m R_Z + z_m R_Y + T_X \\ y'_m = x_m R_Z + y_m - z_m R_X + T_Y \\ z'_m = -x_m R_Y + y_m R_X + z_m + T_Z \end{cases} \quad (2)$$

将(x_m, y_m, z_m)与(2)式计算的解析解之差定义为误差 E , 则:

$$E = \sum_m [(x'_m - x_m)^2 + (y'_m - y_m)^2 + (z'_m - z_m)^2] \quad (3)$$

可以对 E 的 6 个刚体位移分量求解偏导数并置零, 由此可以得到六元一次方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial T_X} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial T_Y} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial T_Z} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial R_X} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial R_Y} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial R_Z} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求解(4)式即可得到镜面刚体位移的最小二乘解。该算法与镜面的形状无关, 比较稳定, 实现简单, 求解效率高。

3.2 温度对像面谱线漂移的影响

谱线漂移是指由于外界干扰引起光谱仪焦面上谱线产生几何位移, 导致电荷耦合器件(CCD)像元的相对采样位置发生变化, 表现为光谱仪探测器每个像元对应的中心波长发生变化。通常, 谱线漂移量的大小可用波长偏移量或通道偏移量来定量描述。用通道偏移量描述谱线漂移量更能揭示光谱仪器的本质特性, 而不受色散函数非线性的影响。谱线漂移量的定量描述为

$$\Delta P = \frac{\Delta S_{m,n} - \Delta \bar{S}_n}{a} \quad (5)$$

式中 ΔP 为相对谱线漂移量, $\Delta S_{m,n}$ 为 m 视场 n 波长像元对应的谱线漂移量, $\Delta \bar{S}_n$ 为 n 波长漂移量均值, a 为像元尺寸。

为了研究温度载荷作用下像面谱线漂移的特性, 在仪器正常工作的温度范围内, 以 20 °C 作为理想工作温度, 设置了 -10 °C、-5 °C、0 °C、+5 °C、+10 °C 共 5 种温升载荷工况, 计算其刚体位移, 然后用 Zemax 软件对变形后的光学系统进行了光线追迹, 求解了上述 5 个工况下的镜面刚体位移导致的谱线位置变化。

表 1 给出了 +5 °C 温升载荷下光谱维的谱线漂移量, 从表中分析可以得出:

- 1) 同一视场、不同波长间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 0.3 μm , 小于 0.01 pixel。
- 2) 同一波长、不同视场间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 0.2 μm , 小于 0.01 pixel。
- 3) 不同视场、不同波长间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 0.3 μm , 小于 0.01 pixel。

所以温度载荷作用下谱线位置在光谱维上将发生整体平移, 拉伸和压缩效应可以忽略。

图 4 给出了 +10 °C 温升载荷工况下的谱线漂移量。而温降载荷下的谱线漂移量, 与温升载荷下的漂移量相比方向相反, 数值上非常接近, 由于篇幅限制, 不予列出。从图中可以看出, 温度水平变化不大于 10 °C 时, 可看做 CCD 像面上谱线, 在光谱方向仅发生整体平移, 拉伸量很小, 基本可以忽略。这说明谱线漂移(尽管很小)随温度线性变化, 以特征谱线作为参考实现成像光谱仪星上定标的方法是可行的^[14]。

表 1 +5 °C 温升载荷下,光谱维上的谱线漂移量

Table 1 Spectral line-shift on the spectral dimension at +5 °C temperature load

λ /nm	$\Delta S_{m,n} / \mu\text{m}$											$\Delta \bar{S}_o / \mu\text{m}$
	Field of view / (°)											
	-45°	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	45°	
1000	-49.6	-49.6	-49.6	-49.6	-49.5	-49.5	-49.5	-49.5	-49.4	-49.4	-49.4	-49.51
800	-49.6	-49.6	-49.6	-49.5	-49.4	-49.5	-49.5	-49.3	-49.3	-49.3	-49.3	-49.45
600	-49.5	-49.4	-49.4	-49.4	-49.4	-49.4	-49.4	-49.3	-49.2	-49.2	-49.2	-49.35
400	-49.5	-49.4	-49.3	-49.3	-49.3	-49.3	-49.3	-49.2	-49.2	-49.1	-49.1	-49.27

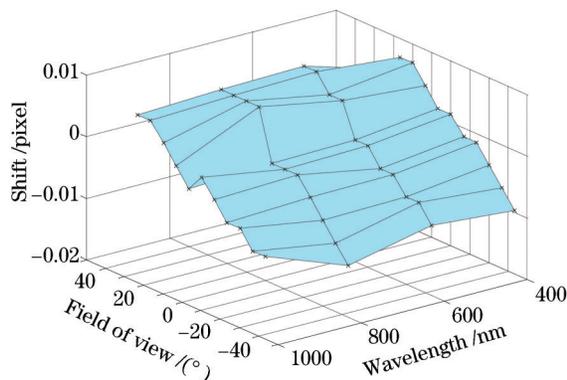


图 4 +10 °C 温升载荷的谱线漂移量

Fig.4 Spectral line-shift at +10 °C temperature load

4 实 验

为了考察成像光谱仪在不同温度状态下的谱线漂移量,进行了热光学实验,以检验理论分析。在模拟的热真空环境中,设置了 15 °C、20 °C、25 °C、30 °C、35 °C 共 5 种工况,利用成像光谱仪内置的星上定标完成不同工况下的谱线漂移量检测,图 5 为热光学实验示意图。

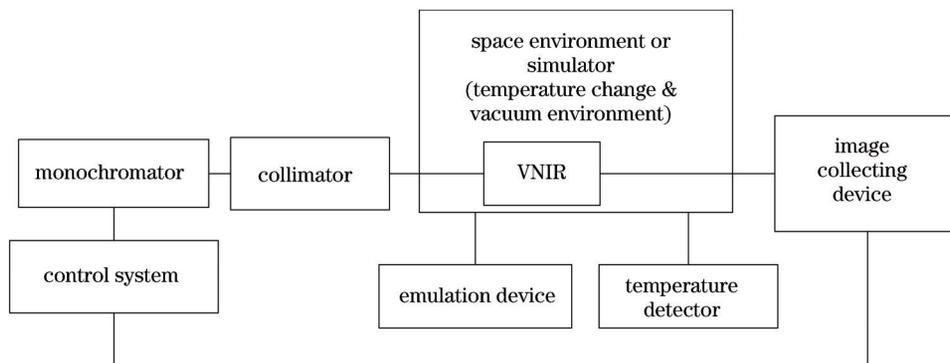


图 5 成像光谱仪热光学实验示意图

Fig.5 Schematic diagram of thermal optical test for imaging spectrometer

以中心视场星上定标参考谱线 (CCD 响应值) 随温度变化漂移结果为例,表 2 列出了不同温度下参考谱线吸收峰之间的间距 (选取 528.7、684.6、741.6、808、879.4 nm 处的吸收峰作为参考),表 3 为不同温度下参考谱线相对 25 °C 时的漂移量。

由表 2 可知,在 15 °C~35 °C 范围内,钎玻璃特征谱线吸收峰间的间距随温度变化的极值在 0.28 pixel,吸收峰间每个像元平均偏差小于 0.02 pixel。所以,可以认为谱线在光谱方向仅发生整体平移,没有拉伸或压缩效应,偏移量与温度变化量近似呈线性关系。

由表 3 可知,热光学实验中谱线漂移量实测值与模型计算值吻合较好,验证了理论模型的正确性。误差

主要来源于有限元分析精度、温度测量精度和实验的外部干扰。

表2 不同温度下参考谱线吸收峰间的间距

Table 2 Space between the absorption peak of the reference spectral line at different temperature

T /°C	Space between different reference spectral lines/pixel			
	Δ_{1-2}	Δ_{2-3}	Δ_{3-4}	Δ_{4-5}
15	30.97	11.31	12.16	14.30
20	31.02	11.40	12.20	14.48
25	30.96	11.39	12.18	14.46
30	31.05	11.41	12.34	14.53
35	31.18	11.59	12.42	14.55
Mean	31.04	11.42	12.26	14.46
Extreme difference	0.22	0.28	0.26	0.25
Average deviation of each pixel	0.01	0.02	0.02	0.01

表3 不同工况下参考谱线的相对漂移量

Table 3 Relative shift of reference spectral line in different conditions

$\Delta T / ^\circ\text{C}$	Spectral line shift/ μm		Relative error /%	Absolute error/pixel
	Measured value	Calculated value		
-10	107.0	98.6	7.9	0.22
-5	52.5	49.4	6.0	0.16
5	-52.8	-49.5	6.2	0.17
10	-107.6	-98.9	8.1	0.23

在飞行成像实验中进行在轨定标验证了光谱中心波长,测得波长偏移量。为了计算方便,将各个波段的波长偏移量转换为波段偏移量(波段为5 nm)。如图6所示,飞行成像在22 °C平时,其平均相对偏移量为0.0496,故其平均波段偏移量为0.248 nm,满足定标精度的1/3(定标精度为1 nm)要求,后续成像不需要再进行光谱定标和光谱修正。

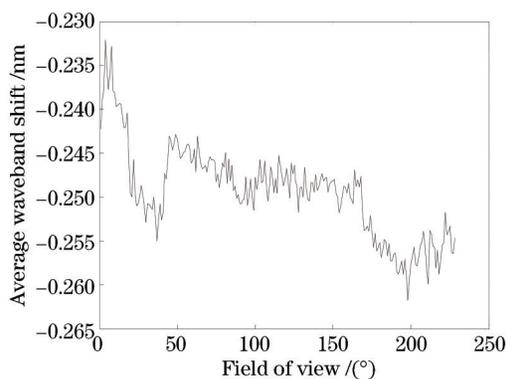


图6 飞行期间定标谱段偏差

Fig.6 Calibration spectrum deviation during flight

5 结 论

探讨了温度对成像光谱仪谱线漂移的影响。分析了机载环境下仪器温度载荷的特点,阐述了温度载荷的作用机理和表现形式,研究了谱线漂移特性并进行了热光学实验和飞行成像定标实验验证理论分析。结果表明:

- 1) ± 10 °C温度变化范围内,谱线漂移量不大于0.3 nm,满足光谱定标精度要求的1/3(定标精度为1 nm)要求,不需要再进行光谱定标和光谱修正。
- 2) 谱线漂移量随温度近似线性变化,光栅分光光谱仪的谱线漂移与温度变化量有线性关系。
- 3) 为后续实现成像光谱仪高精度光谱辐射定标,提供了有效的基础数据。

- 1 Guo Liang, Wu Qingwen, Yan Changxiang. Thermal design of space spectral imaging apparatus and its analysis and verification [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1272–1280.
郭 亮, 吴清文, 颜昌翔. 空间光谱成像仪热设计及其分析与验证 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1272–1280.
- 2 Chen Hongyao, Zhang Liming. Hyperspectral sensor in flight spectral calibration based on characteristic spectra of atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0528003.
陈洪耀, 张黎明. 高光谱传感器飞行中基于大气特征谱线的光谱定标技术 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528003.
- 3 Zhang Junqiang, Dong Deyi, Wu Qingwen, *et al.*. Treatment of surface figure error and rigid body motion for mirror/lens in optical remote sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32: 242–247.
张军强, 董德义, 吴清文, 等. 光学传感器镜面面形误差及刚体位移处理方法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32: 242–247.
- 4 Li Xiaohui, Yan Changxiang. Onboard calibration technologies for Hyper-spectral imager [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 309–315.
李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 309–315.
- 5 P S Barry, J Shepanski, C Segal. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system [C]. SPIE, 2002, 4480: 231–235.
- 6 S Delwart, J P Huot, L Bourg. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT [C]. SPIE, 2003, 4881: 337–344.
- 7 Zhang Junqiang, Yan Changxiang. Effect of spectral-line shift on radiometric measurement accuracy of space-borne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0212001.
张军强, 颜昌翔. 谱线漂移对星载成像光谱仪辐射测量精度的影响 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0212001.
- 8 Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyper-spectral imager [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2348–2354.
郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(11): 2348–2354.
- 9 Zhang Junqiang, Yan Changxiang. Thermal effect on spectral-line shift of space-borne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528001.
张军强, 颜昌翔. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528001.
- 10 Feng Yutao, Xiang Yang. Effects of spectral position offset on radiance measurement of imaging spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 1083–1086.
冯玉涛, 向 阳. 光谱移位对成像光谱仪辐射测量的影响 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1083–1086.
- 11 B C Gao, M J Montes, C O Davis. A curve-fitting technique to improve wavelength calibrations of imaging spectrometer data [C]. Proceedings of the 11th JPL Airborne Earth Science Workshop, 2002, 3: 4.
- 12 Zhang Junqiang, Shao Jianbing, Yan Changxiang, *et al.*. Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. Chinese Optics, 2011, 4(2): 175–181.
张军强, 邵建兵, 颜昌翔, 等. 成像光谱仪星上定标的数据处理 [J]. 中国光学, 2011, 4(2): 175–181.
- 13 Gong Dun. The Thermal Effect on Image Quality of the Remote Sensor Optical System [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2010.
巩 盾. 温度对遥感器光学系统成像质量的影响 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- 14 Qi Xiangdong, Han Pengpeng, Pan Mingzhong, *et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2871–2876.
齐向东, 撒芑芑, 潘明忠, 等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 2871–2876.

栏目编辑: 苏 岑