

成像光谱仪星上光谱定标的数据处理

张军强^{1,2}, 邵建兵¹, 颜昌翔¹, 吴清文¹, 陈伟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 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了提高仪器光谱定标精度,降低谱线偏移对地物反射光谱数据反演精度的影响(特别是大气吸收峰附近),根据星上光谱定标的特点,介绍了星上光谱定标数据处理的常用方法。通过对实验室光谱定标时两种典型工况的比较,实现了星上定标数据处理算法的地面仿真,验证了算法的可行性,并比较了各自的优缺点。结果表明,基于谱线匹配的标准差法、相关系数法和最小差值法计算精度较高,但计算效率较低;基于多项式拟合的极值法计算精度较低,但是计算效率较其他算法提高1个数量级。用极值法对数据进行预处理,快速确定谱线偏移量,再用谱线匹配算法在小范围内精确计算谱线偏移量,可以在不影响计算精度的前提下提高运算速度,计算精度优于1 nm,满足成像光谱仪星上光谱定标的精度要求。

关键词:成像光谱仪;星上定标;光谱定标;数据处理

中图分类号:TP73; O433 **文献标识码:**A

Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer

ZHANG Jun-qiang^{1,2}, SHAO Jian-bing¹, YAN Chang-xiang¹, WU Qing-wen¹, CHEN Wei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to improve the spectral calibration precision of a High Resolution Imaging Spectrometer (HRIS) and to reduce the influence of the spectral shift on the surface reflectance retrieving of the ground spectra, especially in those wavelengths mostly affected by gaseous absorptions, the common data processing algorithms used in the on-orbit spectral calibration are introduced. The feasibility of these different algorithms is verified and their advantages and disadvantages are emulated with two cases of the laboratory spectral calibration under a thermal vacuum environment. It is shown that the algorithm based on spectra-matching, such as standard deviation method, correlation coefficient method and the minimized difference method can offer an advantage in the processing precision, and the extreme value method based on polynomial-fitting works much better in the processing speed. If polynomial-fitting method confirms the spectral shift fleetly in the pretreatment phase firstly, the spectral bound for spectral matching processing will be narrowed. A new algorithm with

收稿日期:2010-09-11;修订日期:2010-11-15

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 05001SA050)

high processing precision and fast processing speed which combines spectra-matching and polynomial-fitting ideas was presented, it can offer the band-center wavelength accuracy better than 1 nm and can meet the need of the on-orbit spectral calibration precision of the HRIS.

Key words: High Resolution Imaging Spectrometer (HRIS); on-orbit calibration; spectral calibration; data processing

1 引言

星载成像光谱仪可在特定光谱域以高光谱分辨率同时获得连续的地物反射光谱图像,使遥感数据在光谱维展开得到高精度的光谱遥感数据,是成像技术和光谱技术的有机结合^[1]。成像光谱仪在转运、发射以及在轨运行期间,其光机结构和电子学器件性能改变导致的谱线偏移会产生光谱标定误差。光谱标定误差是系统性误差,直接影响每个波段辐射测量的不确定度,导致地物反射光谱数据反演精度的降低,这在大气吸收峰附近表现得尤为显著^[2]。所以,在实验室光谱定标的基础上对成像光谱仪进行星上光谱定标很有必要^[3]。

在星上光谱定标方面,除了美国的 MODIS^[4] (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) 采用单色仪作为星上光谱定标装置外,其他成像光谱仪的星上光谱定标都是利用波长已知的特征谱线作为参考,校准成像光谱仪在轨期间各光谱通道的中心波长^[5-13]。所以,在星上光谱定标过程中,不能像实验室定标那样利用单色仪逐个波长扫描 (MODIS 除外) 精确标定各光谱通道的中心波长,而是以已知的特征谱线作参考,通过数据处理确定在轨工作时成像光谱仪的光谱特性相对于实验室光谱定标结果的变化量,进而实现精确的光谱校准。

2 谱线偏移量计算算法

我国对高分辨率成像光谱仪的相关研究起步较晚,对其星上定标数据处理的算法研究还不够深入。国外在 90 年代初期就对机载、星载成像光谱仪的星上定标技术进行了深入研究,对数据处理算法也进行了各种尝试。其中,应用最成熟的

是基于谱线匹配思想的标准差法、相关系数法、最小差值法,以及基于曲线拟合思想的极值法。

2.1 标准差法

2001 年, Gao 等人^[14] 提出了标准差法,通过比较光谱仪实际响应谱线 (即有波长偏移的待求解谱线) 与参考谱线 (如 0.82, 0.94, 1.14 μm 处的水汽吸收线; 0.76 μm 处的 O_2 吸收线以及 1.58, 2.06 μm 处的 CO_2 吸收线等) 的匹配程度, 确定待求解谱线相对于参考谱线的偏移量, 进而提高星上光谱定标的精度。

标准差法的算法如下: 假设待求解谱线的偏移量由 -5 nm 以 0.01 nm 的步长变化到 +5 nm, 对于每一个偏移量, 计算偏移后的谱线与参考谱线的标准差, 标准偏差值最小时的偏移量即为中心波长实际偏移量的最佳估计值。

Gao 等人利用标准差法对 AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer) 的星上光谱定标数据进行了处理, 结果表明, 标准差法的谱线位置标定精度较高, 优于实验室 ± 1 nm 的标定精度。在对 PHILLS (Portable Hyperspectral Imager for Low Light Spectroscopy) 和 Hyperion 的数据处理中, 标准差法也显示出了足够的精度。

2.2 相关系数法

相关系数法是 Neville 等人^[15] 在检测成像光谱仪谱线弯曲时提出的一种计算谱线偏移的方法, 该方法和标准差法类似, 也是通过比较光谱仪实际响应谱线 (待求解谱线) 与参考谱线的匹配程度来计算谱线的偏移量。

标准差法计算偏移后谱线与参考谱线的标准偏差, 标准偏差值最小时的偏移量即为中心波长实际偏移量的最佳估计值; 相关系数法则计算偏移后谱线与参考谱线的相关系数, 相关系数最大时的偏移量即为中心波长偏移量的最佳估计值。

已有研究表明, 相关系数法的谱线位置标定精度和标准差法相当, 优于 ± 1 nm。

在国内,宋炳超等人^[16]在解决 DOAS 谱线波长配准问题时使用的协相关法,也是使用相关系数法求解谱线偏移问题的一个实例。

2.3 最小差值法

Guanter 等人^[17]利用大气吸收特征谱线对超光谱成像仪进行光谱定标时,采用了最小差值法求解谱线的偏移量:

$$\chi^2(\delta) = \sum_{i=1}^{N_c} [\rho_i^{\text{orbit}}(\delta) - \rho_i^{\text{ground}}]^2, \quad (1)$$

式中, $\rho_{\text{orbit } i}(\delta)$ 为第*i*通道在轨实际光谱响应偏移 δ 后的待求解谱线数据; $\rho_{\text{ground } i}$ 为第*i*通道的参考谱线数据; N_c 为光谱仪的光谱通道数; $\chi^2(\delta)$ 为两者的差值, $\chi^2(\delta)$ 最小值时的 δ 即为谱线偏移量。

已有研究表明,最小差值法求解的谱线位移误差与位移量成正比关系:位移量为 2.0 nm 时,计算值与实际值的偏差为 ± 0.2 nm;位移量为 5.0 nm 时,计算值与实际值的偏差达到 ± 1.0 nm。

2.4 极值法

Barry 等人^[9]比较了 Hyperion 在轨成像时大气特征谱线的实际观测数据与参考数据之间的关系,利用特征谱线的极值位置(波峰、波谷)确定了可见-近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)光谱仪每个像元的中心波长相对于地面定标^[18]的偏离量。

极值法的算法如下:对待求解谱线和参考谱

线的同一特征位置,用三阶样条曲线拟合响应值得到响应拟合曲线,计算响应拟合曲线的极值(波峰、波谷)位置,待求解谱线和参考谱线同一特征位置的波长差值,即为该特征位置的波长偏移量;求解同一视场内多个特征位置的波长偏移量,并用低阶多项式对结果进行拟合,通过插值即可求解每个像元中心波长的偏移量。

极值法采用了三次样条拟合求解极值位置,带来的误差大约为 ± 1 nm,谱线位置标定精度低于标准差法和相关系数法的标定精度。

以上算法都是针对小偏移量谱线移动而言的,谱线偏移量一般不大于 ± 10 nm,这样才能保证待求解谱线和参考谱线具有高度的相似性;若两者相关性不够高,则将大大降低谱线偏移量的求解精度。

3 实验

为了使实验环境尽量和在轨工作时一致,降低温度、空气以及湿度对光谱定标的影响^[10],在模拟的热真空环境^[19]中对利用钨钨玻璃特征光谱进行星上定标的某高分辨率成像光谱仪(HRIS)进行了实验室光谱定标,如图1所示。单色仪与平行光管组合使用,产生充满光谱仪全视场的平行光。

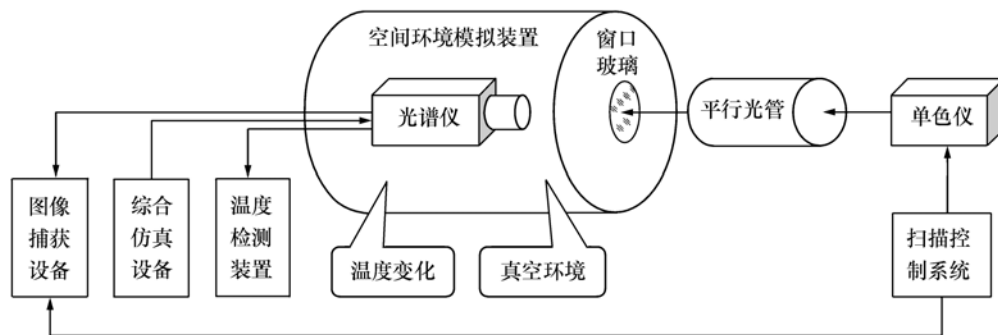


图1 成像光谱仪光谱定标系统示意图

Fig. 1 Spectral calibration system of HRIS

由于在轨星上定标相对于实验室定标本质上是两种工况下的光谱标定,所以通过实验室光谱定标不同工况间谱线偏移计算,可以验证在轨星

上定标谱线偏移量计算算法的精度。

为此,通过比较实验室热真空环境下16℃和18℃两种工况的光谱定标数据,实现了在轨谱线

偏移量计算的地面仿真,定标流程如图2所示。

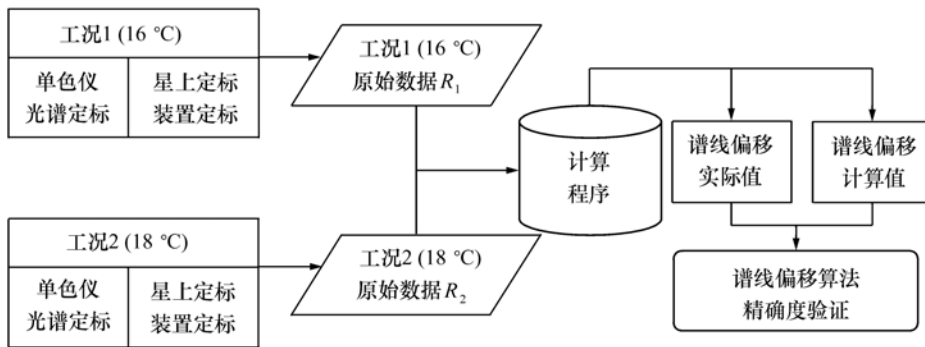


图2 星上光谱定标模拟流程

Fig.2 Simulation flow chart of on-orbit spectral calibration of HRIS

4 处理结果

使用前述4种算法对图2所示实验流程获取的原始数据 R_1 、 R_2 进行了处理,以数据 R_1 为参考谱线, R_2 为待求解谱线,用单色仪光谱定标得到谱线偏移量作为谱线偏移实际值,以各算法计算得到的谱线偏移为计算值,穿轨方向各视场的数据处理结果基本类似,以下仅对某一视场的数据处理结果进行说明。

分析单色仪进行的光谱定标数据可得,2种工况下的色散函数(Dispersion Function, DF)如图3所示,谱线位移量随通道的变化如图4所示。

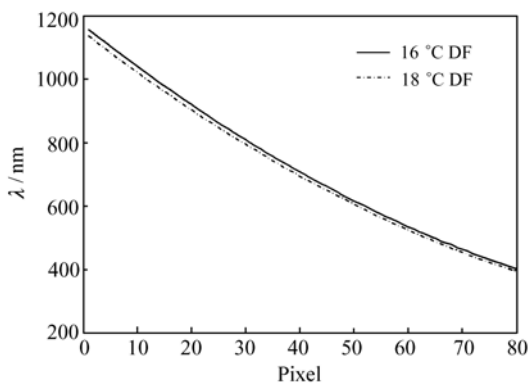


图3 不同工况下光谱定标 DF 的变化

Fig.3 Shift of DF under two conditions

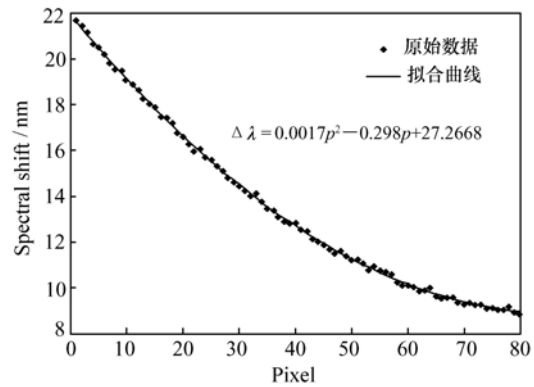


图4 谱线位移量随通道的变化

Fig.4 Spectral shift under two conditions as a function of pixel

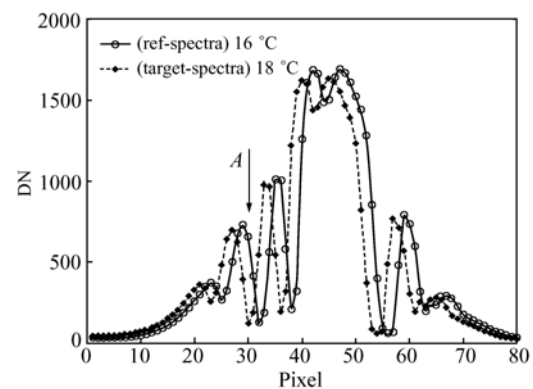


图5 2种工况下星上定标谱线的 DN 值

Fig.5 DN values of on-orbit assembly under two conditions

2种工况下星上光谱定标的DN值如图5所示,对A位置的谱线偏移计算结果如下:

参考谱线与待求解谱线之间的标准差随谱线偏移量的变化如图6所示;

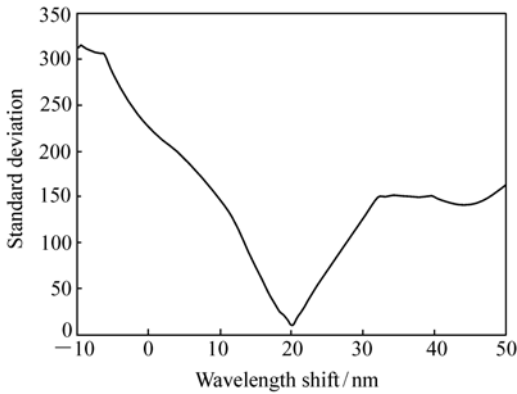


图6 参考谱线与待求解谱线之间标准差随谱线偏移量变化

Fig. 6 Standard deviation between reference spectra and target spectra as a function of wavelength shift

参考谱线与待求解谱线之间的相关系数随谱线偏移量的变化如图7所示;

参考谱线与待求解谱线之间的差值随谱线偏移量的变化如图8所示;

不同算法求解的谱线偏移量与光谱定标确定的实际偏移量之间的关系如表1所示。

由图3所示色散曲线可知,热真空环境下当温度从16℃变化到18℃的时,各像元中心波长向短波方向发生了光谱偏移,光谱偏移量能用二次函数描述,如图4所示。

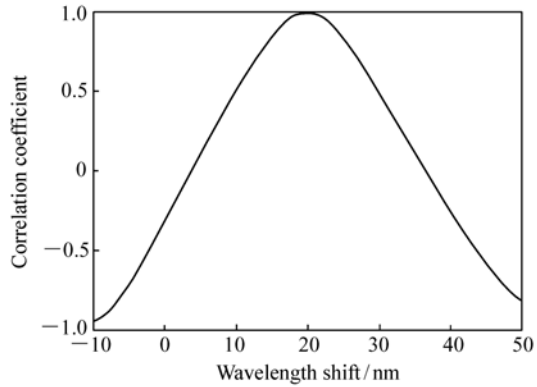


图7 参考谱线与待求解谱线之间相关系数随谱线偏移量变化

Fig. 7 Correlation coefficient between reference spectra and target spectra as a function of wavelength shift

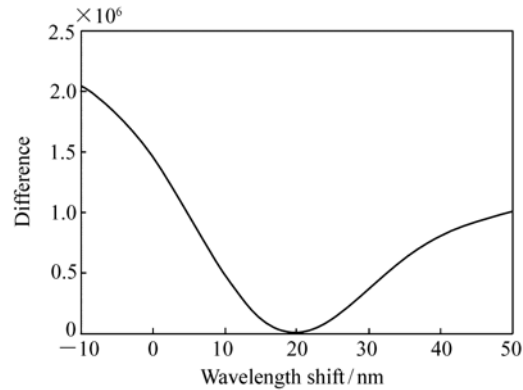


图8 参考谱线与待求解谱线之间的差值随谱线偏移量变化

Fig. 8 Difference between reference spectra and target spectra as a function of wavelength shift

表1 不同算法的数据处理结果比较

Tab. 1 Comparison of results with different arithmetics

算法	谱线偏移/nm		耗时/s(步长0.01 nm)		偏差/nm
	计算值	实际值	-10 nm ~ +50 nm	+15 nm ~ +25 nm	
准差法	20.09	20.05	33.6	5.4	0.04
相关系数法	19.91		35.9	5.9	-0.14
最小差值法	19.72		32.5	5.4	-0.33
极值法	21.20		2.56	2.56	1.15

注:(1) 耗时为每10个空间视场的计算耗时总和;(2) 偏差为计算值与实际值的差值。

由图6至图8可知,基于匹配思想的标准差、相关系数法和最小差值法在匹配过程中都能

很好地收敛,极值位置明显。

由表1数据可知:

(1)标准差法、相关系数法和最小差值法的计算精度优于 $\pm 1\text{ nm}$,满足星上定标精度要求,但计算速度较慢;极值法的计算精度较低,但计算速度较其他算法快近10倍。

(2)在步长不变的情况下,计算结果不变,但计算耗时与匹配范围成正比。因此,可以用极值法粗略确定谱线偏移量,减小匹配算法的匹配范围,进而提高运算速度,这对于大视场成像光谱仪谱线偏移运算可节约可观的计算时间。

求解同一视场内多个特征位置的波长偏移量,并用二阶多项式对结果进行拟合,通过插值即可求解该视场内每个像元中心波长的偏移量,而根据实验室光谱定标的结果和像元中心波长的偏移量即可得到在轨期间各光谱通道的中心波长。

需要指出的是,本文研究的成像光谱仪在温度变化 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,谱线偏移高达 20 nm 左右,这似乎与其他文献资料报道的数据相差很大,这主要是由光谱仪系统调焦运动引起的谱线机械位移所致。因为对光谱仪探测器进行了校正^[10],所以谱线偏移只使谱线发生整体平移,并不显著改变定标谱线的整体形状,对参考谱线和待求解谱线之间的相关性也影响甚小(如图5所示),所以针对小偏移量谱线移动算法仍然适用。

5 结 论

星上光谱定标数据处理的算法直接关系到光谱标定精度,影响着后续的辐射定标和大气修正精度,进而影响光谱数据量化的准确性。为了满

足成像光谱仪星上定标数据处理的需求,介绍了谱线偏移量计算的常用方法,通过实验室热真空环境下的模拟实验,验证了常见算法的可行性,比较了各自的优缺点,结论如下:

(1)成像光谱仪在轨运行时相对于实验室定标的谱线偏移,本质上是两种工况间的谱线偏移,所以通过比较实验室光谱定标的不同工况,可以验证在轨星上定标谱线偏移量计算算法的性能。

(2)基于匹配原理的谱线偏移算法,在求解过程中能很好地收敛,极值位置明显,计算精度较高,满足 $\pm 1\text{ nm}$ 的星上定标精度要求。

(3)基于匹配原理的谱线偏移算法,求解的是实际谱线与参考谱线间的相对偏移,无需求解特征光谱的实际值,可以根据光谱仪对特征光谱的响应DN值直接求解谱线偏移量。

(4)极值法虽然计算精度较低,但是速度较快。在匹配算法前,用极值法对数据进行预处理,快速、粗略地确定谱线偏移量,可以减小匹配算法的匹配范围,在不影响数据处理精度的前提下提高运算速度。这对于大视场成像光谱仪谱线偏移运算可节约可观的计算时间。

(5)对于有调焦机构的光谱仪系统,调焦运动引起的谱线机械位移仅使谱线发生整体平移,并不显著改变星上定标谱线的DN值曲线形状,仍可用小偏移量谱线移动的算法求解,计算精度优于 $\pm 1\text{ nm}$ 。所以,没有必要单独求解调焦对谱线偏移的影响,可通过对星上定标数据的处理,求解调焦、温度、压强、重力、元器件老化等因素综合影响下的谱线偏移量。

参考文献:

- [1] 于斌,曹召良,禹秉熙.二元光学透镜在超光谱成像仪中的应用[J].光学精密工程,2003,2(11):157-161.
YU B, CAO ZH L, YU B X. Application of binary optical lens in hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 2(11):157-161. (in Chinese)
- [2] GREEN R O. Spectral calibration requirement for earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(4):683-690.
- [3] 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.
LI X H, YAN CH X. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager[J]. *Chinese J. Opt. and Appl. Opt.*, 2009, 2(4):309-315. (in Chinese)
- [4] XIONG X, CHIANG K, ESPOSITO J, et al.. MODIS on-orbit calibration and characterization[J]. *Metrologia*, 2003, 40: 89-92.
- [5] IMMERMANN G, NEUMANN A, SHIMNICH H, et al.. MOS/PRIROD-an imaging VIS/NIR spectrometer for ocean remote

- sensing[J]. *SPIE*,1993,1937:201-206.
- [6] BLECHINGER F, CHARLTON D E, DAVANCENS R, *et al.*. High resolution imaging spectrometer(HRIS):optics, focal plane and calibration[J]. *SPIE*,1993,1937:207-224.
- [7] BAUDIN G, MATTHEWS S, BESSUDO R, *et al.*. Medium Resolution Imaging Spectrometer(MERIS) calibration sequence [J]. *SPIE*,1996,2819:141-240.
- [8] LABANDIBAR J Y, BAUDIN G, BAILLION Y. ALCATEL-SPACE in hyper/multispectral earth observation programs, from MERIS to SPECTRA[J]. *SPIE*,2004,5234:232-242.
- [9] BARRY P S, SHEPANSKI J, SEGAL C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system[J]. *SPIE*,2002,4480:231-235.
- [10] WERIJ H, KRUIZINGA B, OLIJ C, *et al.*. Calibration aspects of remote sensing spaceborne spectrometers[J]. *SPIE*, 1996,2820:126-137.
- [11] CUTTER M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.*. Integration & testing of the Compact High-Resolution Imaging Spectrometer(CHRS)[J]. *SPIE*,1999,3753:180-191.
- [12] DELWART S, HUOT J P, BOURG L. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT[J]. *SPIE*,2003,4881:337-344.
- [13] FOLKMAN M, PEARLAMAN J, LIAO L, *et al.*. EO-1/hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[J]. *SPIE*,2001,4151:45-51.
- [14] GAO B C, MONTES M J, DAVIS C O. A curve-fitting technique to improve wavelength calibrations of Imaging Spectrometer[EB/OL]. (2005-04-01)[2010-09-11]. <ftp://popo.jpl.nasa.gov/docs/workshops/02-docs/toc.html>.
- [15] NEVILLE R A, SUN L, STAENZ K. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data[J]. *SPIE*,2003, 5093:144-154.
- [16] 宋炳超,刘文清,张玉钧,等. DOAS 谱线波长配准存在的问题及解决方法[J]. 量子电子学报,2003,17(6):680-684.
- SONG B CH, LIU W Q, ZHANG Y J, *et al.*. A method for resolving the spectra shift and squeeze in differential optical absorption spectroscopy[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*,2003,17(6):680-684. (in Chinese)
- [17] GUANTER L, RICHTER R, MORENO J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features[J]. *Appl. Opt.*,2006,45(10):2360-2370.
- [18] LIAO L, JARECKE P, GLEICHAUF D, *et al.*. Performance characterization of the hyperion imaging spectrometer instrument[J]. *SPIE*,2000,4135:254-263.
- [19] 卢镔,颜昌翔,吴清文,等.空间光学遥感器环境适应性设计与实验研究[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(5):364-376.
- LU E, YAN CH X, WU Q W, *et al.*. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese J. Opt. and Appl. Opt.*,2009,2(5):364-376. (in Chinese)

作者简介:张军强(1981—),男,江苏泰州人,助理研究员,博士研究生,主要从事空间光学遥感仪器研制方面的研究。

E-mail:zjq1981_81@163.com

邵建兵(1984—),男,浙江金华人,研究实习员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail:sjjq10111@163.com

颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士后,研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail:yanx@ciomp.ac.cn

吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士生导师,研究员,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 研究和空间光学遥感器热控技术方面的研究。E-mail:wuqw@ciomp.ac.cn

陈伟(1963—),女,浙江宁波人,工程师,主要从事航天遥感器研制相关的文档管理工作。