

## 基于场景的热红外高光谱数据光谱定标

谢 锋, 刘成玉, 邵红兰, 张长兴, 杨 贵, 王建宇

(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:** 传感器每个波段的中心波长和半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)随成像环境变化会发生较大的系统性漂移。这种漂移最终会影响发射率和温度的反演精度, 尤其是在大气吸收波段附近的发射率反演精度。选择水汽在 11.73  $\mu\text{m}$  处的吸收通道作为参考波段, 提出了适用于热红外高光谱数据的光谱定标技术流程。模拟实验表明: 光谱分辨率为 50 nm, 中心波长偏移在 -50~50 nm、FWHM 变化在 -25~25 nm 时, 大气水汽含量对光谱定标误差的影响最大。同时, 对误差分布曲面进行拟合得到描述误差分布模型, 用于误差的估计。当大气水汽含量足够大时, 光谱中心波长偏移估算误差可达到 1 nm 以内。最后, 将所提方法应用于机载热红外高光谱数据光谱定标。结果显示, 热红外高光谱成像仪中心波长偏移为 28.4 nm, FWHM 变化为 -18.5 nm。

**关键词:** 热红外高光谱数据; 光谱定标; 中心波长偏移; FWHM 变化

**中图分类号:** TP751.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0138001

## Scene-based spectral calibration for thermal infrared hyperspectral data

Xie Feng, Liu Chengyu, Shao Honglan, Zhang Changxing, Yang Gui, Wang Jianyu

(Key Lab of Spatial Active Opto-Electronic Techniques, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Compared with a given laboratory calibration, systematic shifts on the center wavelength and the Full Width at Half Maximum (FWHM) of each band of a hyperspectral sensor, will emerge as the imagery environment changes. The center wavelength shift and the FWHM variation have influence on the inversion precision of the emissivity and temperature, especially near the atmospheric absorption bands. A technical process of spectral calibration for thermal infrared hyperspectral data was proposed, which was verified through a simulation experiment with the water vapor absorption band at 11.73  $\mu\text{m}$  selected as the reference band. The experiment shows when the spectral resolution is 50 nm, the center wavelength shift ranges from -50 nm to 50 nm and the FWHM variation ranges from -25 nm to 25 nm, atmospheric water vapor content has the most influence on the error of the estimated wavelength shift and the FWHM variation. Meanwhile, the error distribution were also fitted using different surface functions, and the

收稿日期: 2016-08-10; 修订日期: 2016-09-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA121103)

作者简介: 谢锋(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事成像光谱数据处理与应用方面的研究。Email: xf@mail.sitp.ac.cn

通讯作者: 刘成玉(1985-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事资源环境遥感方面的研究。Email: chengyuliu@vip.qq.com

error distribution models used to estimate the errors were obtained. When the atmospheric water vapor content was high enough, the estimation error of the spectral center wavelength shift was able to reach within 1 nm. Finally, the proposed approach was applied to spectral calibration of the airborne thermal infrared hyperspectral data obtained by a push-broom hyperspectral thermal-infrared imager. The results show that the center wavelength shift of the thermal infrared hyperspectral imager is 28.4 nm and the FWHM variation of the imager is -18.5 nm.

**Key words:** thermal infrared hyperspectral data; spectral calibration; center wavelength shift; FWHM variation

## 0 引言

传感器成像环境变化所导致的光电器件变形、机械振动所导致的光电元件错位以及光电元件本身的日久老化使得传感器每个波段的中心波长和半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM) 随成像环境变化会发生较大的系统性漂移, 实验室光谱定标所获取的中心波长和半高全宽并不能完全代表航空遥感数据获取时传感器的中心波长和半高全宽<sup>[1]</sup>。严重影响发射率和温度的反演精度, 尤其是在大气吸收波段附近的发射率反演精度, 很容易受到中心波长偏移的影响。

目前, 对于高光谱遥感数据的光谱定标研究主要集中于基于场景的可见光、近红外和短波红外波段的高光谱遥感数据光谱定标。基于场景的光谱定标原理主要是假设传感器的光谱响应函数(Spectral Response Function, SRF)为高斯函数, 比较模拟数据与原始数据在氧气吸收波段(760 nm)、水汽吸收波段(940 nm, 1 140 nm)和二氧化碳吸收波段(2 060 nm)及其附近光谱的差异, 并调整模拟数据的中心波长和 FWHM, 直至二者差异最小, 最终得到准确的中心波长和 FWHM。按照最终的目标不同, 这些光谱定标方法可以分为三类: 一是在对比过程中, 假设 SRF 和 FWHM 不变(使用实验室定标结果), 只求正确的中心波长<sup>[2-8]</sup>; 二是假设 SRF 为高斯函数, 同时改变中心波长和 FWHM, 最终求得正确的中心波长和 FWHM<sup>[9-15]</sup>; 三是假设中心波长和 FWHM 改变很小, 选择不同类型的 SRF 得到模拟光谱, 并与原始数据比较, 最终求得最优的 SRF<sup>[16]</sup>。除了直接比较模拟数据与原始数据之外, 也有学者提出通过调整中心波长和 FWHM, 计算大气辐射传输方程中的参数, 并反演反射率, 直至所反演的反射率曲线中尖峰消失, 得到正确的中心波长和 FWHM<sup>[17-18]</sup>。对于热红外高

光谱遥感数据的光谱定标的研究相对较少。Kaiser<sup>[1]</sup> 尝试分别用 8~13  $\mu\text{m}$  内 21 个水汽吸收波段对空间增强宽波段阵列光谱仪系统(SEBASS) 热红外(7.3~13.6  $\mu\text{m}$ , 128 波段) 高光谱成像仪获取的航空热红外高光谱遥感数据进行了光谱定标, 光谱定标所用大气模拟程序为 FASCODE。光谱定标结果显示, 采用基于场景的光谱定标方法对中心波长的变化更敏感, 对 FWHM 的变化相对不敏感, SEBASS 数据的中心波长偏移在  $\pm 0.5$  个波段宽度内。

文中以中国科学院上海技术物理研究所研制的推扫式热红外高光谱成像仪(8~12.5  $\mu\text{m}$ ) 为例, 对基于场景的热红外高光谱数据光谱定标进行了系统研究。通过模拟实验探讨所提出的基于场景的热红外高光谱数据光谱定标方法的可行性, 得出了误差分布状况及适用范围。并用该方法对所获取的航空热红外高光谱数据进行光谱定标。

## 1 方法

基于场景的热红外高光谱数据光谱定标主要包括: 超高分辨率(1 nm)入瞳辐射亮度光谱模拟、入瞳辐射亮度光谱模拟和最优化过程, 如图 1 所示。首先, 将数据获取时的大气参数、成像参数输入 MODTRAN 大气辐射传输模拟软件得到模拟的超高分辨率入瞳辐射亮度光谱(1 nm 分辨率)。然后, 按调整后的中心波长( $\lambda_i + \delta\lambda_i$ )和 FWHM( $\Delta\lambda_i + \delta\Delta\lambda_i$ )对超高分辨率入瞳辐射亮度光谱进行卷积运算, 得到模拟的入瞳辐射亮度光谱。选择模拟的大气吸收波段及其附近入瞳辐射亮度光谱与测量的辐射亮度光谱进行比较, 通过最优化算法得到最优的  $\delta\lambda_i$  和  $\delta\Delta\lambda_i$ 。

图 2 为光谱分辨率为 50 nm 左右、采样间隔为 25 nm 左右时的模拟光谱。位于 11.73  $\mu\text{m}$  附近的大气水汽吸收波段的峰或谷特征比较明显。其余由大

气吸收造成的峰和谷容易与噪声混杂在一起。因此,选择 11.73 μm 的吸收谷作为大气吸收特征波段,用于光谱定标。

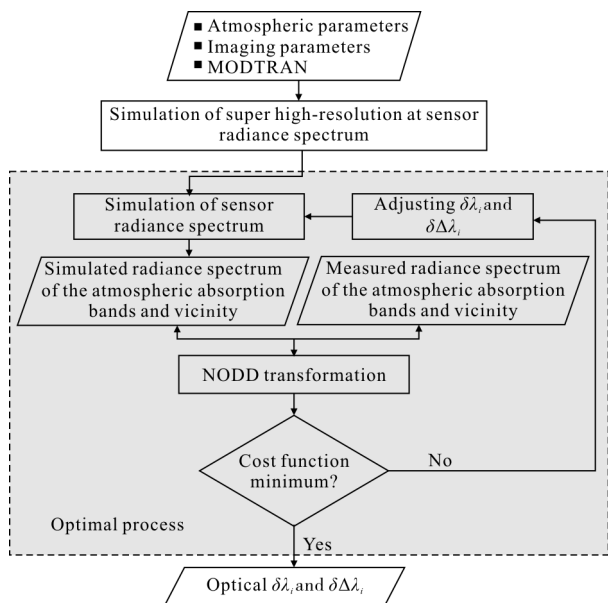


图 1 基于场景的热红外高光谱数据光谱定标技术流程

Fig.1 Flowchart of the scene-based spectral calibration for thermal infrared hyperspectral data

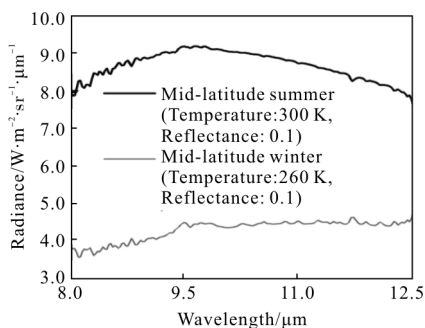


图 2 模拟的热红外波段入瞳辐射亮度光谱

Fig.2 Simulated spectral of the entrance pupil radiance of the thermal infrared bands

最优化过程中,先对模拟入瞳辐射亮度光谱与测量辐射亮度光谱进行归一化学厚度微分(NODD)变换,再行比较。NODD 变换主要包括<sup>[9]</sup>:(1) 对辐射亮度光谱(测量和模拟入瞳)取负对数;(2) 计算取负对数光谱后的求导,得到微分光谱;(3) 对微分光谱做标准正太分布变换,得到所谓的归一化光学厚度微分光谱(NODD 光谱)。最优解用 Powell 算法进行搜索<sup>[10]</sup>,代价函数为:

$$f=(1-\gamma)SD+\gamma SA \quad (1)$$

$$SD=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i-R_i^o)^2 \quad (2)$$

$$SA=\frac{1}{\pi} \arccos \left[ \frac{\sum_{i=1}^n R_i R_i^o}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i)^2 \sum_{i=1}^n (R_i^o)^2}} \right] \quad (3)$$

式中: $f$ 为代价函数; $R_i$ 为模拟数据变换得到的 NODD 光谱; $R_i^o$ 为测量数据变换得到的 NODD 光谱; $SD$  (Spectral distance) 为  $R_i$  与  $R_i^o$  的欧氏距离; $SA$  为  $R_i$  与  $R_i^o$  之间的光谱角。

## 2 模拟实验

### 2.1 模式实验方案

为了验证所提方法的有效性和鲁棒性,进行了模拟实验。模拟实验所使用大气辐射传输软件为 MODTRAN5.3.2,具体的模拟实验设置见表 1。

表 1 模拟实验设置

Tab.1 Settings of simulated experiment

Variable	Set value	Description
MODEL	2, 3	Atmospheric model, Mid-latitude summer(2) or Mid-latitude winter(3)
TPTEMP	260 K, 300 K	Surface temperature, 260 K in winter, 300 K in summer
SURREF	0.1	Reflectance
H <sub>2</sub> OSTR	For H <sub>2</sub> OSTR from 0.1 to 1.0 step 0.1	Scaling factor for the vertical water vapor column
GNDALT	0.003 km	Surface elevation
HIALT	2.003 km	Sensor height
DELTA_LAMBDA	-50,-25,-12.5,-5.0,-2.5,2.5,5.0,12.5,25,50 nm	Center wavelength shift
DELTA_FWHM	-25,-20,-15,-10,-5,5,10,15,20,25 nm	FWHM variation
NETD	0.3 K	Noise equivalent temperature difference
NS	320	Number of samples (pixels) per line for each band
NL	100	Number of lines for each band
NB	256	Number of bands of the simulated hyperspectral data

### 2.2 模拟实验结果分析

从图 3 可以看出,波长偏移估算误差为 0.5~

47.7 nm, 中纬度夏季的误差为 0.5~47.7 nm, 中纬度冬季为 1.5~8.9 nm。对于中纬度夏季来说, 误差最大值位于(0.34, -50)和(0.34, 50)附近, 即水汽含量比例因子为 0.34, 中心波长偏移分别为-50 和 50。从(0.34, -50)和(0.34, 50)向周围, 误差值迅速减小。与中纬度夏季不同, 中纬度冬季的误差动态范围要比中纬度夏季的误差动态范围小很多。中纬度冬季的波长偏移估算误差与中心波长偏移相关性较小, 与水汽含量比例因子关系更加密切, 中心波长偏移估算误差基本随水汽比例因子减小而增大。

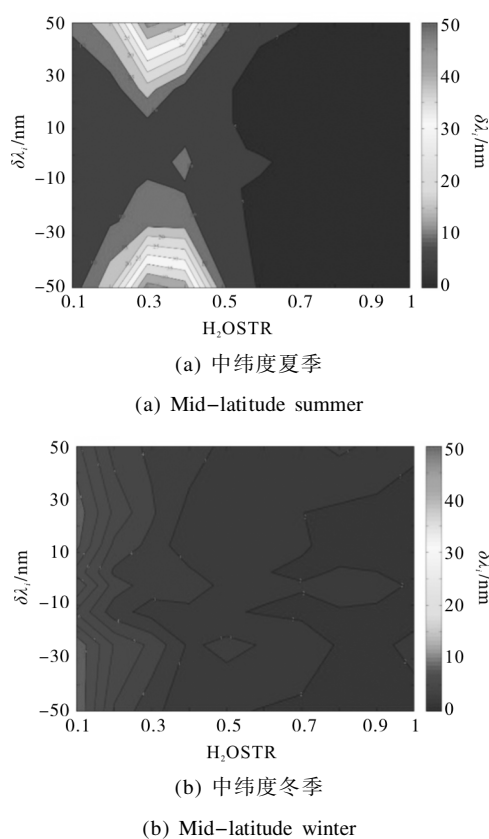


图 3 不同水汽含量比例因子下的中心波长偏移估算误差

Fig.3 Estimation errors of center wavelength shifts with different water vapor content scale factors

从图 4 可以看出, FWHM 变化估算误差为 0.8~39.0 nm, 中纬度夏季的误差为 0.8~39.0 nm, 中纬度冬季为 1.5~38.0 nm。对于中纬度夏季来说, 误差最大值位于左上角, 从左上角至右下角逐渐减小, 直至在右下角达到最小值。FWHM 变化负值时的误差要小于为正值时的误差。中纬度冬季与中纬度夏季的误差分布状况类似, 不过其误差从左上角至右下角下降速度要快于中纬度夏季。

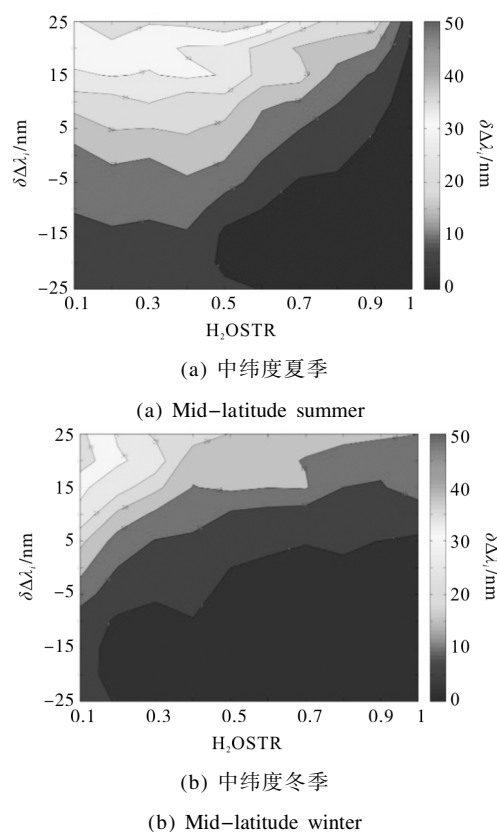


图 4 不同水汽含量比例因子下的 FWHM 变化估算误差

Fig.4 Estimation errors of the FWHM variations with different water vapor content scale factors

对图 3 和图 4 中误差分布曲面进行拟合得到描述误差估算模型。表 2 为用于估算误差的模型列表。其中,  $e_1$  为纬度夏季波长偏移估算误差;  $\gamma$  为大气水汽含量比例因子。

表 2 误差估算模型

Tab.2 Error estimation models

	Error estimation model	RMSE/nm
Center wavelength shift in mid-latitude summer	$e_1 = 0.0743(1 \delta\lambda_i )^{1.65} - \frac{(\gamma-0.34)^2}{0.0143} + 6.5\gamma + 7$	0.4
Center wavelength shift in mid-latitude winter	$e_2 = -0.0510\gamma^2\delta\lambda_i - 26.85\gamma^3 + 0.0731\gamma\delta\lambda_i + 57.22\gamma^2 - 0.0177\delta\lambda_i - 40.04\gamma + 11.35$	0.6
FWHM variation in mid-latitude summer	$e_3 = -0.0001\delta\lambda_i^3 - 0.0023\gamma\delta\lambda_i^2 - 1.356\gamma^2\delta\lambda_i + 33.5\gamma^3 + 0.011\delta\lambda_i^2 + 0.9142\gamma\delta\lambda_i - 80.83\gamma^2 + 0.5646\delta\lambda_i + 35.65\gamma + 12.11$	2.0
FWHM variation in mid-latitude winter	$e_4 = 0.0111\delta\lambda_i^2 - 0.4534\gamma\delta\lambda_i + 17.05\gamma^2 + 0.6336\delta\lambda_i - 30.34\gamma + 16.79$	1.1

### 3 应用

用所提出的方法对航空热红外高光谱数据进行了光谱定标。光谱范围为 8.0~12.5  $\mu\text{m}$ , 181 个波段, FWHM 为 50 nm, 空间分辨率为 2 m, 飞行高度为 2 000 m, 见图 5。成像时间为 2015 年 6 月 6 日, 地点位于浙江省舟山市。

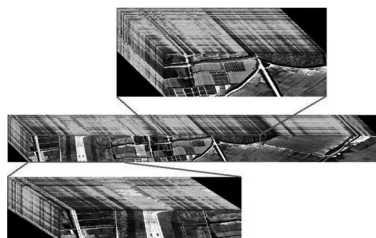


图 5 热红外高光谱数据立方体

Fig.5 Thermal infrared hyperspectral datacube

图 6 为航空热红外高光谱数据中心波长偏移和 FWHM 变化估算结果。曲线无明显变化趋势, 热红外高光谱成像仪不存在光谱弯曲现象。经计算, 热红外高光谱成像仪中心波长偏移 28.4 nm, FWHM 变化-18.5 nm。图 7 为光谱定标前后辐射亮度曲线,

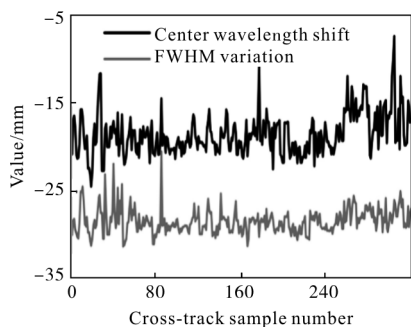


图 6 航空热红外高光谱数据中心波长偏移  
Fig.6 Center wavelength shift of the airborne thermal infrared hyperspectral data

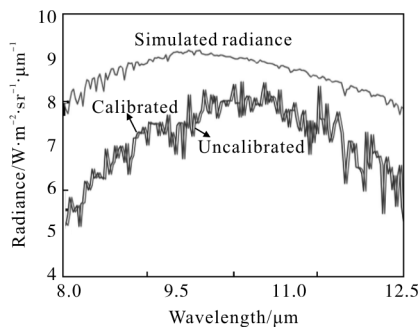


图 7 光谱定标前后辐射亮度曲线

Fig.7 Radiance curves before and after spectral calibration

定标后的数据的主要峰和谷与模拟数据峰和谷位置基本吻合。

### 4 结论

文中对基于场景的热红外高光谱数据光谱定标进行了系统研究, 并开展了模拟实验。通过分析得出以下结论: (1) 相比地表温度、波长偏移量、FWHM 变化量, 水汽含量对光谱定标误差影响最大; (2) 在中心波长偏移在 -50~50 nm、FWHM 变化在 -25~25 nm、大气水汽含量足够大时, 光谱中心波长偏移估算误差可达到 1 nm 以内。在此基础上, 对误差分布曲面拟合得到误差分布模型。将所提方法用于航空热红外高光谱数据。结果显示: 热红外高光谱成像仪中心波长偏移为 28.4 nm, FWHM 变化为 -18.5 nm。文中对 50 nm 分辨率进行了分析, 对于更高分辨率的热红外高光谱数据的光谱定标误差还需要进一步开展实验研究。

### 参考文献:

- [1] Kaiser R D. Wavelength calibration and instrument line shape estimation of a LWIR hyperspectral sensor from in-scene data [C]//AeroSense 2000, International Society for Optics and Photonics, 2000: 284-287.
- [2] Goetz A, Heidebrecht K, Chrien T. High accuracy in-flight wavelength calibration of imaging spectrometry data [C]// Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 1995.
- [3] Barry P S, Shepanski J, Segal C. On-orbit spectral calibration verification of Hyperion [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 6: 2535-2537.
- [4] Gao B C, Montes M J, Davis C O. A curve-fitting technique to improve wavelength calibrations of imaging spectrometer data [C]// JPL Airborne Earth Sci, 2002: 99-105.
- [5] Felde G W, Anderson G P, Cooley T W, et al. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 1: 90-92.
- [6] Gao B C, Montes M J, Davis C O. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 424-433.
- [7] Delwart S, Preusker R, Bourg L, et al. MERIS in-flight spectral calibration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007,

- 28(3-4): 479-496.
- [8] Dadon A, Ben-dor E, Karnieli A. Use of derivative calculations and minimum noise fraction transform for detecting and correcting the spectral curvature effect (smile) in Hyperion images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2603-2612.
- [9] Green R O, Pavri B E, Chrien T G. On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 Hyperion derived with an underflight of AVIRIS and in situ measurements at Salar de Arizaro, Argentina [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, 41(6): 1194-1203.
- [10] Wang Tianxing, Yan Guang, Ren Huazhong, et al. Improved methods for spectral calibration of on-orbit imaging spectrometers [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2010, 48(11): 3924-3931.
- [11] Yan Lei, Gou Zhiyang, Zhao Hongying, et al. In-flight spectral calibration of UAV hyperspectral imager based on Radiance Matching [J]. *Journal of Infrared Millim.Waves*, 2013, 31(6): 517-522. (in Chinese)  
晏磊, 勾志阳, 赵红颖, 等. 基于辐亮度匹配的无人机载成像光谱仪外场光谱定标研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 31(6): 517-522.
- [12] Liu Yaokai, Wang Tianxing, Ma Lingling, et al. Spectral calibration of hyperspectral data observed from a hyperspectrometer loaded on an unmanned aerial vehicle platform [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(6): 2630-2638.
- [13] Zhang Chunlei, Xiang Yang. Spectral calibration of the hyperspectral imager based on atmosphere absorption [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(1): 268-272. (in Chinese)  
张春雷, 向阳. 基于大气吸收带的超光谱成像仪光谱定标技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(1): 268-272.
- [14] Chen Hongyao, Zhang Liming, Li Xin, et al. Hyperspectral sensor in flight spectral calibration based on characteristic spectra of atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 287-293. (in Chinese)  
陈洪耀, 张黎明, 李鑫, 等. 高光谱遥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): 287-293.
- [15] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. In-flight spectral calibration of oxygen absorption channels of hyperspectral sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 58-65. (in Chinese)  
高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 氧气吸收通道的高光谱传感器在轨光谱定标 [J]. *光子学报*, 2014, 43(10): 58-65.
- [16] Brazile J, Neville R A, Staenz K, et al. Toward scene-based retrieval of spectral response functions for hyperspectral imagers using Fraunhofer features [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34(S1): 43-58.
- [17] Guanter L, Richter R, Moreno J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2360-2370.
- [18] Guanter L, Segl K, Sang B, et al. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11594-11606.
- [19] Seiler M C, Seiler F A. Numerical recipes in C: the art of scientific computing [J]. *Risk Analysis*, 1989, 9(3): 415-416.