

高光谱传感器光谱性能参数反演与反射率恢复

王天星, 阎广建*, 任华忠, 穆西晗

北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

摘要 在轨高光谱传感器光谱性能参数的准确定标是数据定量应用的基本前提。文章在前人基础上, 综合优化算法, 实现了在不需要实测地表反射率的情况下, 同时反演高光谱传感器中心波长与半值波宽(full width at half maximum, $FWHM$)。基于模拟数据的研究结果显示, 该方法在光谱性能参数偏移 5 nm 时, 中心波长反演误差小于 0.1 nm, $FWHM$ 误差小于 0.7 nm。将该方法应用于 Hyperion 数据, 结果显示, Hyperion 在 VNIR 谱段存在明显的 smile 效应, 在整个 CCD 阵列范围内, 其中心波长的偏移量在 -2~2 nm 之间, $FWHM$ 偏移在 -0.2~0.5 nm 之间; 在 SWIR 谱段 smile 效应不明显, 其中心波长偏移 3 nm 左右, $FWHM$ 偏移在 -2~-3 nm 之间。最后在光谱重定标基础上, 对 Hyperion 进行了大气校正, 反演了不受大气及定标参数影响的地表反射率。经光谱重定标, 在大气吸收波段周围由光谱定标参数变化导致的反射率突变得到了抑制。

关键词 光谱定标; 中心波长; 半值波宽 ($FWHM$); MODTRAN; Powell 算法; Hyperion

中图分类号: TP79 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)10-2714-05

引言

成像光谱技术在获取地物图像的同时可以获得象元连续的光谱数据, 具有从光谱维和图像维识别地物的能力。由于其波段比较多, 可以识别传统多光谱数据难以分辨的地物。随着高光谱研究的不断深入, 其在地质找矿、目标探测、农业估产、林种识别、水体污染、环境评价及城市研究等领域得到了广泛应用^[1-5], 已成为遥感研究的重要分支之一。

众所周知, 大气成分的散射与吸收严重影响传感器接受的地物反射及辐射信息, 除了大气影响, 传感器辐射及光谱定标参数(中心波长与 $FWHM$)的变化也会扭曲传感器接受的信号^[6]。传感器平台(星载或空载)的抖动、仪器老化及周围环境的变化, 使传感器辐射及光谱定标参数较实验室测量值会发生变化, 辐射定标参数的确定相对比较成熟, 而对光谱性能参数的确定仍处于不断探索和发展阶段。高光谱传感器由于波段宽度较窄, 对中心波长与半值波宽的变化比较敏感, 尤其在大气吸收波段周围, 光谱性能参数的变化会在光谱辐射亮度中明显体现出来, 这为利用吸收波段反演高光谱性能参数提供了可能^[6,7]。Green 以实测的地表反射率及大气参数为输入数据, 驱动 MODTRAN 生成模拟数据, 并采

用光谱匹配方法得到了 Hyperion 的中心波长及 $FWHM$ 的偏移情况^[8]。Felde 等对测量光谱和模拟光谱进行归一化光学厚度导数变换(normalized optical depth derivative, NODD), 并综合光谱匹配算法得到了 Hyperion 中心波长的偏移量^[9], 该算法已集成到了 FLAASH 大气校正模块。Gao 等在不需地表实测反射率的情况下, 利用光谱匹配算法对比表观反射率与透过率得到了 Hyperion, AVIRIS, PHILLS 等传感器在大气吸收波段中心波长的偏移量^[10]。Guanter 等同样不需要地表实测反射率, 将模型首次计算的反射率做低通滤波处理并作为后续分析的参考光谱, 发展了另外一种中心波长的定标方法, 并对 ROSIS, CHRIS, Hymap, AVIRIS 等传感器进行了实验, 研究显示, 当偏移量小于 5 nm 时, 该算法误差小于 1 nm^[11]。

纵观前人的研究, 目前在轨高光谱传感器的光谱定标方法主要有两大类: 一是, 需要实测地表反射率, 然后利用 MODTRAN 模拟入瞳辐亮度, 通过与实测光谱对比来确定光谱性能参数^[6,9]; 二是, 在不需地表反射率并假定 $FWHM$ 不变的情况下, 通过大气及地表反射率特征发展相对的定标方法, 实现中心波长的在轨定标^[10,11]。一方面, 实测地表反射率一般不易操作, 从而限制了该类方法的应用; 另一方面, 光谱性能参数的变化是中心波长和 $FWHM$ 二者

收稿日期: 2009-11-02, 修订日期: 2010-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871164), 国家(973计划)项目(2007CB714402)和欧盟 FP7 计划项目(212921)资助

作者简介: 王天星, 1982年生, 北京师范大学地理学与遥感科学学院博士研究生 e-mail: watixi@163.com

* 通讯联系人 e-mail: gjyan@bnu.edu.cn

变化的综合效应, $FWHM$ 不变的假设并非总是成立, 因此如何发展既不需要实测反射率又能同时获得中心波长和 $FWHM$ 变化的算法非常必要, 本文在前人研究基础上, 利用 Powell 优化算法^[12] 扩展了现有方法, 不需要地表实测反射率, 并能同时反演中心波长和 $FWHM$ 。该算法的另一好处是可以将光谱定标与大气校正耦合在一起, 得到不受大气及光谱参数影响的地表反射率。最后利用该方法对 Hyperion 数据进行了实验分析。

1 光谱性能参数反演

1.1 基于模拟数据的光谱性能参数反演

在假设地表均一、朗伯的前提下, 大气辐射传输方程可以表示为^[13]

$$L(\mu_v) = L_p(\mu_v) + \frac{E_0 \rho}{\pi(1 - \rho S)} \tau(\mu) \tau(\mu_v) \quad (1)$$

进而表现反射率可以用(2)式表示

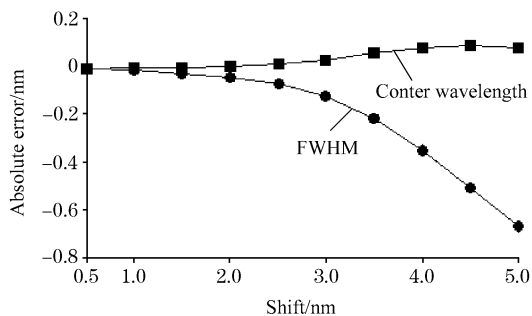
$$\rho_{app} = \frac{\pi L(\mu_v)}{E_0} = \frac{\pi L_p(\mu_v)}{E_0} + \frac{\rho}{1 - \rho S} \tau(\mu) \tau(\mu_v) \quad (2)$$

$$\rho^* = \frac{\pi(L(\mu_v) - L_p(\mu_v))}{E_0} = \frac{\rho}{1 - \rho S} \tau(\mu) \tau(\mu_v) \quad (3)$$

其中, $L(\mu_v)$ 为传感器接受的辐亮度; $L_p(\mu_v)$ 为大气程辐射; E_0 为大气层顶太阳辐照度; ρ 为地表反射率; S 为大气半球反照率; $\tau(\mu_v)$ 为地表到传感器的路径总透过率; $\tau(\mu)$ 为太阳到地表的总透过率; ρ_{app} 为表现反射率, 以上各量均是波长的函数; μ_v 代表传感器观测天顶角余弦; μ 为太阳天顶角余弦值。

由于表现反射率[(2)式]包含了程辐射, 而程辐射本身既为波长的函数, 又独立于地表特征和大气透过率, 从而增强了其与透过率之间的非线性效应, 影响最终的反演结果, 为此本文利用(3)式来表示表现反射率(不含大气程辐射), 这样在 $S \ll 1$ 的情况下, 表现反射率可以看为地表真实反射率与大气透过率之间的乘积, 在真实反射率变化不大时, 表现反射率与透过率的波谱形状更为相似, 为更准确反演光谱参数提供了可能。假设高光谱传感器光谱响应函数为高斯函数^[6-11] [(4)式], 其中 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta FWHM$ 即为最终要反演的结果, 优化算法的代价函数用(5)式表示

$$S_i = \exp - \left(\frac{\lambda - (\lambda_{(i)} + \Delta\lambda)}{(F_{(i)} + \Delta FWHM) / (2 \sqrt{\ln(2)})} \right)^2 \quad (4)$$



$$f = \sum_{i=1}^n (\rho_i - T_i)^2 \quad (5)$$

其中, $\lambda_{(i)}$ 和 $F_{(i)}$ 为实验室测得的第 i 波段中心波长与 $FWHM$; $\Delta\lambda$ 和 $\Delta FWHM$ 为中心波长和 $FWHM$ 相对实验室测量值的偏移量; f 为代价函数值; n 为大气吸收波段周围选用的波段数; ρ_i 和 T_i 为经包络线去除后的第 i 波段表现反射率与透过率。具体反演流程图见图 1。

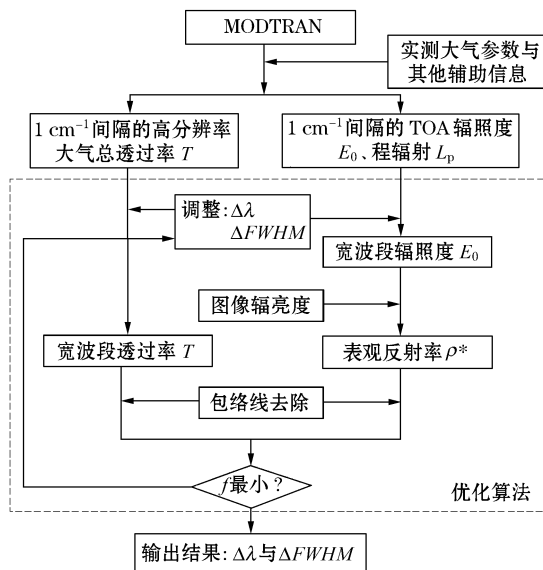


Fig 1 Flow chart of spectral parameters (central wavelength and $FWHM$) retrieval

为了验证该方法的反演精度, 以典型的氧气(760 nm)和二氧化碳波段(2 010~2 060 nm 的光谱段)为参考吸收波段, 利用 MODTRAN 和 ENVI 波谱库中的标准地物光谱(土壤)模拟了 Hyperion 传感器入瞳处辐亮度及相应的大气参数, 并利用 Powell 算法进行了反演实验, 反演结果如图 2 所示。MODTRAN 主要参数设置见表 1。

图 2 显示, 随着光谱定标参数偏移量的增加反演误差逐渐增大, 而且 $FWHM$ 的反演精度相对低于中心波长。但总体上, 在中心波长偏移为 5 nm 的时候(比较极端的情况), 该算法的反演误差均小于 0.1 nm; $FWHM$ 偏移小于 3 nm 的时候, 误差小于 0.2 nm, 当偏移量为 5 nm 时, 氧气波段误差小于 0.7 nm, 二氧化碳波段误差小于 0.5 nm。

Fig 2 Retrieval errors of central wavelength and $FWHM$ with simulated Hyperion data

(a): Oxygen absorption bands; (b): Carbon dioxide absorption band

Table 1 Main parameter settings for MODTRAN in the simulation(All of the others were set at the default values)

主要参数	对应变量值	描述
大气廓线(MODEL)	2	中纬度夏季
大气路径类型(TIYPE)	3	从某一海拔高度到空间的垂直或倾斜路径
运行模式(IEM SCT)	2	计算辐亮度
多次散射(IMULT)	1	考虑目标处多次散射
CO ₂ 体积混合比(CO ₂ MX)	390 ppm	CO ₂ 含量
响应函数		Hyperion
气溶胶(IHAZE)	2	乡村气溶胶模式, VIS= 23 km
海拔高度(GNDALT)	1.7 km	黑河实验荒漠样地平均海拔
传感器高度(H1)	100 km	传感器高度
传感器观测角度(ANGLE)	180°	垂直向下观测
计算起始、终止波长($\lambda_1 \sim \lambda_2$)	300~ 2 600 nm	
计算步长(D λ)	1 cm ⁻¹	生成的大气参数分辨率
太阳天顶角、方位角(PARM1、PARM2)	45°, 100°	

1.2 Hyperion 光谱性能参数反演

Hyperion 为推扫式传感器, 由于各探测单元光谱响应及灵敏度存在差异, 其 smile 效应和条带噪声较明显^[1, 14]。本文选取 2008 年 5 月 20 日黑河流域 Hyperion L1 产品为实验数据, 研究区位于张掖市西南方向 256 × 502 个象元的荒漠

样地(中心经度: 100.305°, 纬度: 38.754°)。利用实验当天 CE318 太阳辐射计获取的大气参数驱动 MODTRAN, 并结合 1.1 节描述的方法迭代反演 Hyperion 各探测单元所对应的中心波长和 *FWHM*, 结果如图 3 所示。

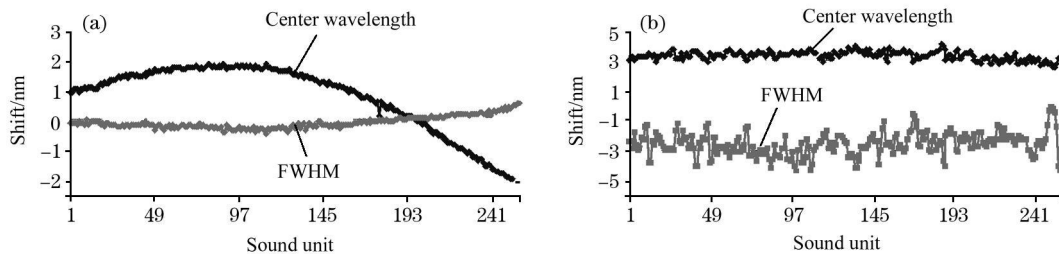


Fig 3 Shifts of center wavelengths and *FWHM* values of Hyperion around O₂ (a) and CO₂ (b) absorption bands

图 3 显示, 在氧气吸收波段周围 Hyperion 的 smile 效应比较明显, 在整个 CCD 阵列范围内, 其中心波长的偏移量在 -2~2 nm 之间, 最左侧探测单元与最右侧单元中心波长偏移相差 3 nm。在二氧化碳波段周围, 其 smile 效应并不明显, 中心波长偏移在 3 nm 左右。该结果与文献[8, 9]的研究结果基本一致, 但该方法无需实测反射率, 同时采用了优化算法, 匹配过程不受步长的限制, 提高了计算效率; 另外, 在氧气吸收波段周围, *FWHM* 的偏移量在 -0.2~0.5 nm 之间, 并且探测单元位置越靠近右侧, 其偏移量越大, 这与文献[8]的研究结果相当, 同样地, 在二氧化碳吸收波段周围, *FWHM* 的偏移量与探测单元位置密切相关, 而且其偏移量较氧气波段明显增大, 大约在 -2~-3 nm 之间。

2 光谱重定标与反射率恢复

由于受到噪声等因素的影响, 光谱参数的反演结果存在波动, 本文利用三次多项式对反演结果进行了拟合, 并将氧气波段反演结果应用于整个 VNIR 光谱段, 将二氧化碳波段的反演结果用于 SWIR 光谱段^[8, 10], 从而实现了 Hyperion 的 smile 及 *FWHM* 校正。

为了得到可靠的反射率, 将 MODTRAN 模拟的高分辨率大气参数(大气层顶太阳辐照度、大气半球反照率、透过率等)与校正后的 Hyperion 响应函数进行卷积, 并利用(1)式分别计算了光谱校正前后的荒漠地表、植被(玉米地)的反射率(以中间探测单元(128)为例)。如图 4 所示。

为了直观对比光谱校正前后反射率的变化, 图 4 中反射率没有进行平滑处理, 因此反射率在视觉上存在跳跃现象, 另外, 由于在 1 380 和 1 880 nm 水汽吸收波段大气吸收强烈, 图像信噪比较低, 该区域的反射率未计算。由图 4 不难发现, 即使经过大气校正, 但若光谱定标参数发生变化, 所得的土壤及植被反射率在大气吸收波段周围(940, 1 140, 1 580及 2 010~2 060 nm 左右)仍然存在明显的跳动, 而经过光谱重定标以后, 所得地物反射率明显比较平滑, 更趋向于地物光谱的真实形状。需要说明的是经光谱重新定标后植被反射率在 940 nm 附近仍存在明显的波动, 主要是因为该光谱区域光谱定标参数来自于二氧化碳波段的反演结果, 这与 940 nm 附近的实际光谱性能参数可能不符, 因此该波段反射率并未得到有效恢复。这也说明了将典型波段反演的中心波长与 *FWHM* 的偏移情况应用于整个探测器阵列的局限性, 因此今后如何进一步利用更多的吸收波段或其他手段获

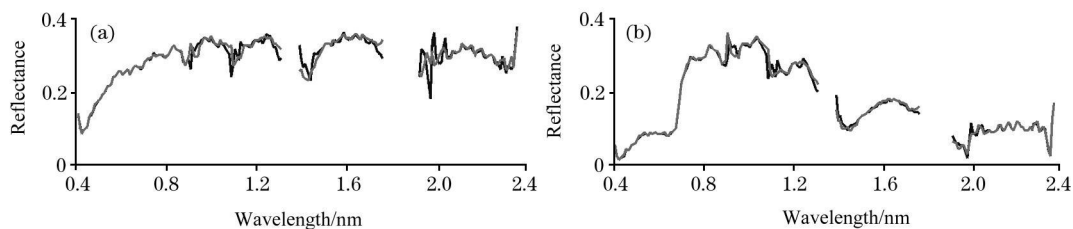


Fig 4 Retrieved reflectance of desert (a) and vegetation (b) before and after spectral recalibration

—: Before recalibration; ...: After recalibration

取覆盖整个光谱波段范围的光谱性能参数尤为必要。

3 结论与讨论

如何准确的获取地表反射率数据是光学高光谱数据应用的基础,而反射率的恢复主要受到大气条件以及光谱性能参数的影响,而对于大气校正,已有很多学者进行了大量研究^[15, 16],并发展了 FLAASH^[17]、HATCI 等软件包,而对光谱性能参数的研究尚不多见。现有研究方法要么需要实测地表反射率,要么仅能给出中心波长的偏移,本文在前人研究基础上,利用优化算法扩展了现有方法,不需要地表实测反射率,并能同时反演中心波长和 $FWHM$ 。模拟实验表明该方法可以取得较好结果:在氧气和二氧化碳吸收波段,当光谱定标参数偏移 5 nm 时,中心波长反演误差小于 0.1 nm,

$FWHM$ 最大误差小于 0.7 nm。利用该方法反演所得 Hyperion 光谱性能参数与前人研究结果相当,但该方法计算效率高,而且易操作(无需实测反射率数据)。经光谱重定标,地表反射率在大气吸收波段周围的突变特征基本被消除了,得到了接近实际的光谱反射率曲线。当然,在实际用中,Hyperion 数据还需要剔除坏线、垂直条带去除、噪声去除等一系列预处理工作,这些工作将与本文研究一起为高光谱数据的定量应用提供保障。

在大气参数比较准确的情况下,该方法可以将光谱定标与大气校正耦合在一起,最终得到不受光谱和大气影响的地表反射率。需要说明的是,本文所用方法仅对典型的氧气、二氧化碳波段能取得较好效果,而对其他吸收波段,如 940 和 1140 nm 等,需要进一步考虑;另外,该算法暂时没有考虑数据噪声的影响。

参 考 文 献

- [1] Davis C O, Bowles J, Leathers R A, et al. Optics Express, 2002, 10: 210.
- [2] Mouroulis P, Green R O, Chrien T G. Applied Optics, 2000, 39: 2210.
- [3] ZHANG Xi-feng, Pazner Micha(张显峰, Pazner Micha). Journal of Image and Graphics(中国图形图像学报), 2007, 12(6): 981.
- [4] ZENG Yuan, Michael E S, WU Bing-fang, et al(曾源, Michael E S, 吴炳方, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2007, 11(5): 648.
- [5] SUN De-yong, LI Yur-mei, WANG Qiao, et al(孙德勇, 李云梅, 王桥, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2009, 28(2): 123.
- [6] Green R O. Applied Optics, 1998, 37(4): 683.
- [7] Green R O. JPL Publication, Jet Prop. Lab., 1995, 1: 71.
- [8] Green R O. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1194.
- [9] Felde G W, Anderson G P, Cooley T W, et al. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 41(1): 90.
- [10] Gao B C, Montes M J, Davis Curtiss O. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 424.
- [11] Guanter L, Richter R, Moreno Jos. Applied Optics, 2006, 45(10): 2360.
- [12] Liang S, Fang H, Chen M. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2001, 39(11): 2490.
- [13] Datt B, McVicar T R, Van Niel T G, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1246.
- [14] Qu Z, Goetz A F H, Heidebrecht K B. SPIE, 2000, 1: 373.
- [15] Gao B C, Montes M J, Ahmad Z, et al. Applied Optics, 2000, 39: 887.
- [16] Adler-Golden S M, Matthew M W, et al. SPIE, 1999, 3: 61.
- [17] Qu Zheng, Kindel Bruce C, Goetz Alexander F H. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1223.

Retrieval of Spectral Characteristics of Hyperspectral Sensor and Retrieval of Reflectance Spectra

WANG Tian xing, YAN Guang jian^{*}, REN Hua zhong, MU Xi han

State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract On orbit spectral calibration of hyperspectral imaging data is a key step for quantitatively analyzing them. Like the atmospheric correction, accurate spectral calibration is very necessary for improved studies of land or ocean surface properties. Based on the previous literatures, a new method which coupled an optimization algorithm was developed to simultaneously retrieve the central wavelength and the full width at half maximum (*FWHM*) of the hyperspectral sensor without needing the in situ reflectance spectra. Firstly, the Hyperion data set simulated using MODTRAN4 with the Hyperion spectral specification was used to test the new method, and the results indicated that the maximum error was less than 0.1 and 0.7 nm for central wavelength and *FWHM* respectively when the spectral shift is 5 nm. Then the algorithm was applied to the Hyperion data acquired on May 20, 2008 over Heihe River Basin and it was iteratively performed for each detector of the two spectrometers of Hyperion. The results showed that the VNIR of Hyperion had a pronounced smile effect, and the shift in on orbit calibration with respect to the laboratory was from -2 to +2 nm, while the SWIR has essentially no smile effect, the wavelength correction was relatively flat over all sample with an approximately constant value of 3 nm. The *FWHM* in VNIR could range from -0.2 to 0.5 nm as a function of sample number of the spectrometer, and in SWIR it ranged from -2 to -3 nm. So for both the VNIR and SWIR, the original spectral calibration should be updated. These results showed good agreement with previous research findings, and which also proved the feasibility of the new method. Finally, with the updated spectral calibration characteristics, the sample reflectances of desert and vegetation target in our study site were reconstructed by applying a further atmospheric correction, and as expected, the strong spikes around the typical atmospheric absorption were almost disappeared.

Keywords Spectral calibration; Center wavelength; Full width at half maximum (*FWHM*); MODTRAN; Powell algorithm; Hyperion

(Received Nov. 2, 2009; accepted Feb. 6, 2010)

* Corresponding author