

高光谱遥感器飞行中基于大气特征谱线的光谱定标技术

陈洪耀 张黎明 李 鑫 司孝龙 杨宝云 朱雪梅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 高光谱遥感器光谱定标是其遥感信息量化应用的基础。报道了一种基于大气特征谱线的光谱定标技术, 该定标技术通过分离与遥感器特性无关的大气和周围环境等引入的反射率, 使分离后的等效反射率与经过低通滤波的等效反射率匹配, 确定了中心波长偏移量和光谱带宽。针对某国产机载高光谱遥感器进行了飞行中光谱定标实验, 结果表明遥感器的中心波长和带宽都发生了变化。光谱定标的准确性通过两种方法验证: 一种是观察反演得到的地面典型目标光谱反射率是否存在锐利的凸起和凹陷, 另一种是观察在氧气 760 nm 吸收峰廓线测量的光谱辐亮度与辐射传输计算得到的结果是否一致。分析表明, 影响该光谱定标方法不确定度的主要因素是数据的信噪比和地面的辐射定标。

关键词 遥感; 高光谱遥感; 光谱定标; 波长定标; 定量遥感

中图分类号 TP73; O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0528003

Hyperspectral Sensor in Flight Spectral Calibration Based on Characteristic Spectra of Atmosphere

Chen Hongyao Zhang Liming Li Xin Si Xiaolong Yang Baoyun Zhu Xuemei

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Spectral calibration is the premise to realize quantitative of hyperspectral remote sensing. A spectral calibration method based on atmospheric absorption features is presented. The spectral calibration technique first separate the reflectance caused by atmosphere and surrounding, which is independent of the character of the remote sensor, and then is executed by spectral to match between the equivalent spectral reflectance and the one after low-pass filter. Using the spectral calibration method, a domestic airborne hyperspectral sensor is calibrated in flight. The result shows that both the central wavelength and the bandwidth of the sensor change. The accuracy of the spectral calibration can be verified by checking the sharp protruding in the inversion spectral reflectance or by comparing measured and radiative transfer calculated spectral radiance in the oxygen 760 nm absorption peak profiles. Analysis shows that, the main influence factors of the spectral calibration uncertainty are data signal-to-noise and sensor radiometric calibration.

Key words remote sensing; hyperspectral remote sensing; spectral calibration; wavelength calibration; quantitative remote sensing

OCIS codes 120.1880; 110.4235; 150.1488

1 引言

高光谱遥感可以获取目标精细的光谱信息, 近几年在精准农业、环境监测、大气探测、国防军事和

矿产资源勘探等领域发挥了越来越重要的作用^[1,2]。以确定高光谱遥感器光谱通道中心波长和半峰全宽(FWHM)为目的的光谱定标是其测量数

收稿日期: 2012-11-16; **收到修改稿日期**: 2013-02-25

基金项目: 国家 863 计划(2012AA12A3022)和安徽省自然科学基金(1208085QD74)资助课题。

作者简介: 陈洪耀(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学遥感器在轨定标、高精度光谱辐射测量及高光谱信息量化应用等方面的研究。E-mail: hychen@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

据量化应用的基础。实验室光谱定标一般通过单色仪扫描或特征吸收波长板光谱匹配的方法实现^[3~5],但在遥感器飞行状态下因大气压强、温度变化以及剧烈振动等原因,中心波长和带宽有可能发生变化^[6]。

大气廓线中的太阳夫琅禾费线以及氧气、二氧化碳和水汽等气体吸收线来自原子或分子的吸收光谱。Geffen 等^[7,8]利用太阳夫琅禾费线实现了 GOME、SCIAMACHY 等星载高光谱辐射计的光谱定标;Green 等^[9]以光谱辐亮度匹配的方法实现了 AVIRIS 的光谱定标;Gao 等^[10]在不需要地表实测反射率的情况下,利用光谱匹配算法得到了 Hyperion、AVIRIS 和 PHILLS 等中心波长的偏移量;Guanter 等^[11,12]利用大气吸收线通过与大气校正相结合的方法,得到了中心波长的偏移;Barry 等^[13]则通过临边观测的方法利用大气吸收线得到了遥感器在轨运行过程中的中心波长偏移;Ramon 等^[14]利用大气压强反演结合氧气 760 nm 吸收线的方法实现了 MERIS 的中心波长定标。国内学者利用 Powell 优化算法实现了 Hyperion 高光谱遥感器的光谱定标^[15]。

对于国内外的研究,高光谱遥感器飞行中光谱定标存在的问题主要有两方面:1)物理过程不明晰,缺少光谱定标不确定度的验证分析;2)大部分方法假设光谱带宽不发生变化,这与事实不符。针对上述情况,本文从高光谱遥感器获取辐射信息入手,通过分离与遥感器特性无关的大气和周围环境引入的反射率,使分离后的等效反射率与经过低通滤波的等效反射率匹配,通过查表得到遥感器的中心波长和带宽。该光谱定标方法对光谱分辨率为 10 nm 左右的高光谱遥感器而言,光谱定标精度小于 0.1 nm(FWHM 小于 0.3 nm),并且仿真计算结果表明,随着光谱分辨率的提高光谱定标精度能进一步提高。本文详细阐述了该定标技术,并针对某国产机载高光谱遥感器进行了飞行中光谱定标实验,对光谱定标结果做了精度验证与分析讨论。

2 方法原理

太阳辐射-地面-遥感器之间相互作用的示意图如图 1 所示。由此可以把遥感器入瞳处的辐亮度看成由大气程辐射、目标反射和周围背景辐射三部分组成。遥感器入瞳的辐亮度 $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 表达式为

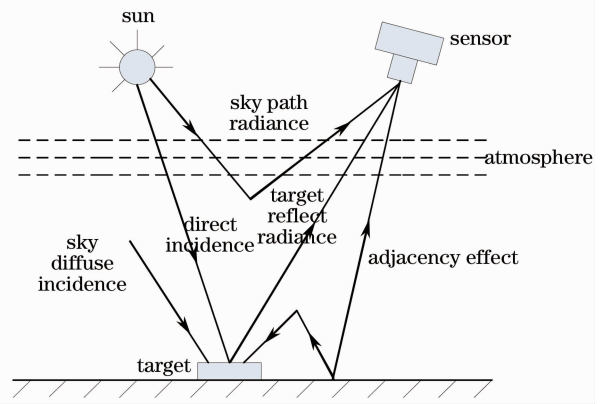


图 1 太阳辐射-地面-遥感器相互作用示意图
Fig. 1 Interaction schematic of solar radiation-ground-remote sensor

$$L_{\text{TOA}}(\lambda) = L_0(\lambda) + L_{\text{a-g}}(\lambda) + \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \rho(\lambda) T_u(\lambda), \quad (1)$$

式中 $L_0(\lambda)$ 为大气程辐射产生的光谱辐亮度; $L_{\text{a-g}}(\lambda)$ 为周围背景辐射产生的辐亮度; $E_g(\lambda)$ 为太阳入射在地球上的总辐射; $\rho(\lambda)$ 为地物的光谱反射率; $T_u(\lambda)$ 为遥感器-目标路径透射率。因此,地物反射率可表示为

$$\rho(\lambda) = \frac{L_{\text{TOA}}(\lambda)\pi}{E_g(\lambda)T_u(\lambda)} - \frac{[L_0(\lambda) + L_{\text{a-g}}(\lambda)]\pi}{E_g(\lambda)T_u(\lambda)}. \quad (2)$$

令

$$\rho^*(\lambda) = \frac{L_{\text{TOA}}(\lambda)\pi}{E_g(\lambda)T_u(\lambda)}, \rho^{\text{atm}}(\lambda) = \frac{[L_0(\lambda) + L_{\text{a-g}}(\lambda)]\pi}{E_g(\lambda)T_u(\lambda)},$$

则(2)式可表示为

$$\rho(\lambda) = \rho^*(\lambda) - \rho^{\text{atm}}(\lambda), \quad (3)$$

式中 $\rho^{\text{atm}}(\lambda)$ 仅与大气状况和周围环境有关,而与遥感器特性无关,因此在光谱定标优化计算中不考虑此项。

当遥感器的中心波长或带宽发生变化时, $\rho^*(\lambda)$ 在大气吸收波段产生锐利的凸起和凹陷。光谱定标优化算法的目标函数为

$$d_{\text{RMS}} = \chi^2(\delta_1, \delta_2) = \sum_{i=n_1}^{n_2} [\rho_i^*(\delta_1, \delta_2) - \rho_i^{\text{smooth}}], \quad (4)$$

$$\rho_i^{\text{smooth}} = \frac{1}{N} \sum_{j=i-2}^{i+2} \rho_j(\delta_1, \delta_2), \quad (5)$$

式中 ρ_i^{smooth} 为第 i 个波段经过低通滤波后的 $\rho^*(\lambda)$, δ_1, δ_2 分别为中心波长和带宽的偏移量, n_1, n_2 为选取的气体吸收波段附近的光谱波段号, N 为选取的波段个数。

光谱定标流程图如图 2 所示。首先将高光谱遥感器飞行中的水汽含量、光学厚度和观测几何因子等

参数输入到驱动辐射传输计算软件 MODTRAN 中，计算得到地面为理想朗伯体时，目标反射引入的超高光谱分辨率辐亮度的光谱分辨率约为 0.01 nm；然后将卷积采样间隔为 0.01 nm 的不同光谱分辨率的光谱辐亮度作为索引文件；最后，通过查找匹配

计算得到中心波长的偏移和带宽的变化。图 3 为光谱定标计算过程，为突出显示，取 $\lg(1/d_{RMS})$ 为 z 轴，其中 RMS 为优化算法的目标函数，中心波长的偏移为 x 轴，带宽的变化为 y 轴。

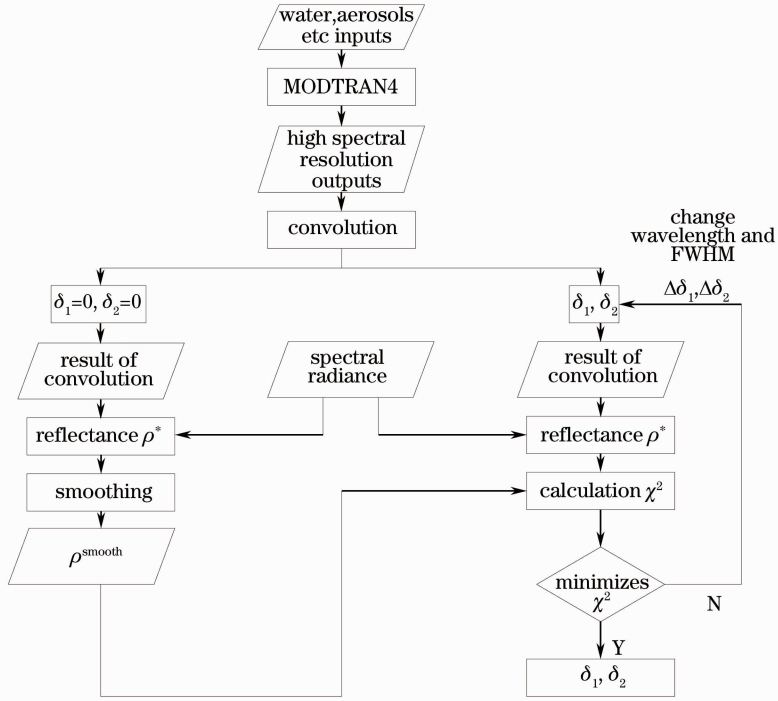


图 2 光谱定标计算流程图

Fig. 2 Calculation flowchart of spectral calibration

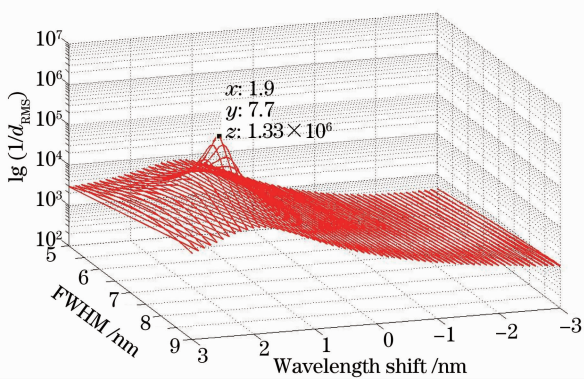


图 3 光谱定标算法的查找过程

Fig. 3 Look up process of spectral calibration algorithm

3 飞行中光谱定标实验

利用上述定标技术对某国产机载色散型高光谱遥感器进行了飞行中光谱定标实验，被测高光谱遥感器的性能参数如表 1 所示，其中 FOV 为视场角，SNR 为信噪比。

表 1 高光谱遥感器的基本性能参数

Table 1 Basic performance parameters of the hyperspectral imager

Spectral range / nm	Spectral sampling interval / nm	FWHM / nm	FOV / (°)	Band number	SNR
400~1000	5	~7	11.5	128	>100

3.1 光谱定标区域

在地面勘查及地面光谱反射率测量基础上结合高光谱遥感器图像，选择一块地势平坦、植被主要为野草的区域为光谱定标区，其中光谱定标场地面植被如图 4 所示。地面平均光谱反射率如图 5 所示。由图 4、图 5 可知，植被的光谱反射率连续光滑，无凸起和凹陷。

3.2 高光谱遥感图像预处理

高光谱遥感图像的预处理包括均匀场的列统计平均、暗电流去除和辐射定标等，其中列统计平均的目的是为了减小随机噪声的影响，提高数据信噪比。辐射定标一方面是为了消除探测器单元之间响应度



图 4 光谱定标区地面植被图

Fig. 4 Photo of vegetation on spectral calibration area

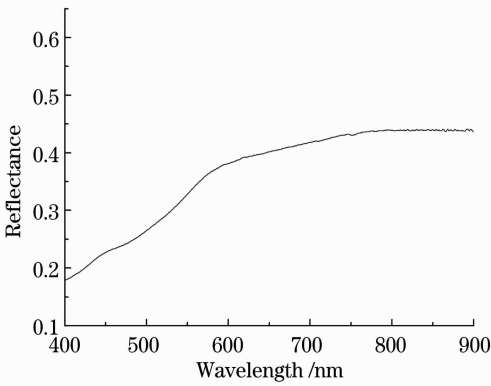


图 5 光谱定标区地面平均光谱反射率

Fig. 5 Average spectral reflectance of the spectral calibration area

差异,另一方面是为了把图像的灰度值转化为光谱辐亮度。根据实验室辐射定标系数得到的光谱辐亮度曲线如图 6 所示。

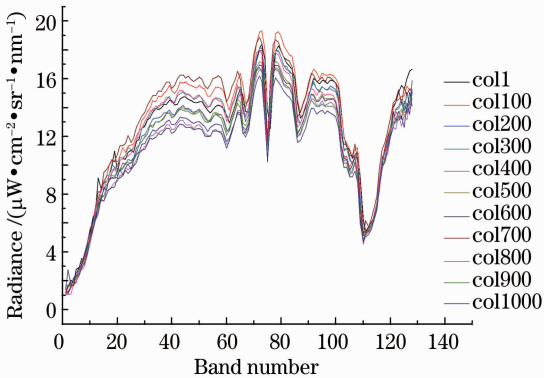


图 6 光谱辐亮度曲线(col 指不同纵列像元)

Fig. 6 Curves of spectral radiance of the pixel (col-abbreviation of column)

3.3 超精细光谱辐亮度的获取

由上述的光谱定标原理方法可知,为完成优化计算需要获取传感器过顶前后地面总光谱照度

$E_g(\lambda)$ 与地面-遥感器路径大气透射率 $T_u(\lambda)$ 。由辐射传输计算得到地面为理想朗伯体时,地面反射的信号引起遥感器入瞳的超高光谱分辨率辐亮度(光谱分辨率约为 0.01 nm),即 $E_g(\lambda) * T_u(\lambda)$,如图 7 所示。

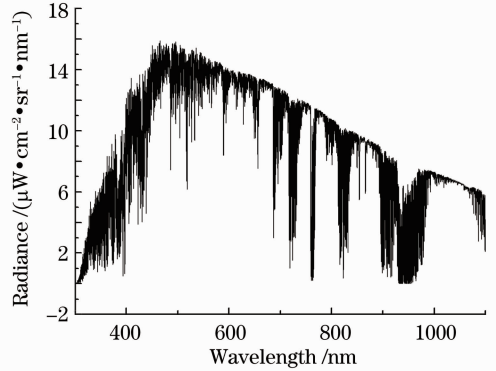


图 7 地面反射信号引起的遥感器入瞳光谱辐亮度($\rho=1$)

Fig. 7 Remote sensor entrance pupil radiance caused by ground reflected signal ($\rho=1$)

3.4 特征光谱波段选取

用于光谱定标计算的大气气体特征吸收线主要有氧气、水汽和二氧化碳吸收峰廓线等。通过对光谱定标区统计数据发现,经过辐射定标后的光谱辐亮度曲线明显的特征谱线主要为氧气 760 nm 附近吸收峰廓线以及水汽 940 nm 吸收峰廓线,而太阳夫琅禾费线不明显。由于水汽 940 nm 吸收峰廓线受温度和压强的影响比较明显,虽然进行了大量统计,其光谱特征依然比较分散且信噪比较低。而氧气 760 nm 吸收峰廓线受温度和压强的影响较小,因此可见近红外波段光谱定标计算选取氧气 760 nm 吸收峰廓线为标准参照光谱。

3.5 光谱定标结果

根据上述的光谱定标原理方法,进行了飞行中光谱定标,检测出该高光谱遥感器中心波长和带宽都发生了变化。图 8 为光谱定标前后,氧气 760 nm 吸收峰附近波段的等效光谱反射率。由图 8 可知光谱定标前有明显的尖峰,经过光谱定标突变得得到抑制。

假设飞行中分光元件的色散规律保持不变,即相同空间像元的各个光谱通道中心波长偏移量相同,因此在某一个波长位置(光谱定标中为氧吸收的 760 nm 附近波段)检测出了偏移量即可对所有光谱通道的中心波长进行校正。

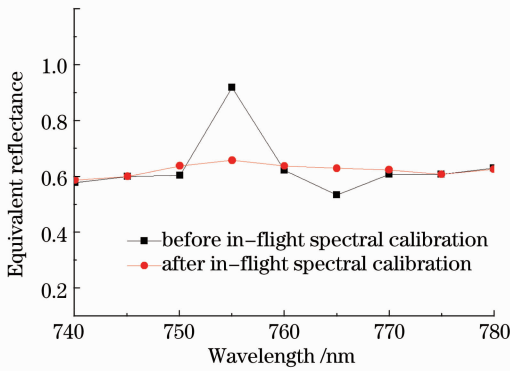


图 8 飞行中光谱定标前后氧气 760 nm 吸收峰附近波段等效反射率

Fig. 8 Equivalent reflectance near 760 nm atmospheric absorption before and after in-flight spectral calibration

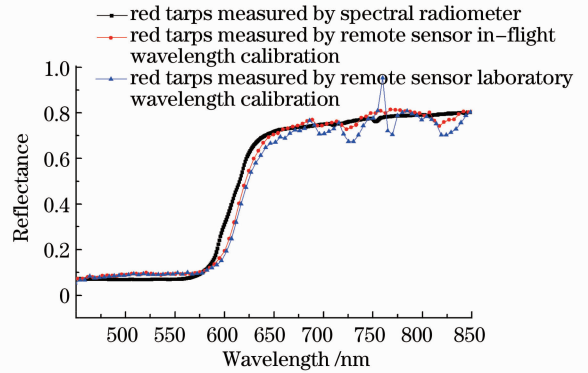


图 9 红色光谱靶标光谱定标前后反演得到的光谱反射率

Fig. 9 Retrieved spectral reflectance of red spectral tarps before and after spectral calibration

4 分析讨论

4.1 光谱定标结果的验证

为验证飞行中光谱定标结果的准确性,分别采用了两种验证方法:1)观察从遥感图像反演的地面光谱反射率是否存在尖的凸起和凹陷;2)观察在氧气 760 nm 吸收峰廓线测量的光谱辐亮度与辐射传输计算得到的廓线是否一致。

4.1.1 地面光谱反射率的比较

由光谱定标的原理方法可知,当光谱定标不准确时反演得到的光谱反射率在大气吸收波段会产生尖的凸起和凹陷。因此利用布设的靶标,分别按照实验室光谱定标文件及飞行中光谱定标文件进行地面光谱反射率反演,从而验证光谱定标结果。

飞行中光谱定标前后反演得到的光谱反射率和地面用 ASD FieldSpec[®] UV/VNIR 型野外光谱辐射计实测光谱反射率的比较如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可知红色、黄色靶标光谱定标前有尖的凸起和凹陷,经过飞行中光谱定标该现象基本消失。由此证明了飞行中光谱定标的正确性。

4.1.2 入瞳光谱辐亮度的比较

为进一步验证飞行中光谱定标的正确性,用辐射传输计算的光谱辐亮度和遥感器飞行中测量光谱辐亮度进行比较。由于辐射定标的误差,信号采取了归一化处理。图 11 为氧气 760 nm 吸收峰位置处光谱定标前光谱辐亮度测量与辐射传输计算结果的比较,比对结果表明飞行状态下高光谱相机的光谱通道特性发生了变化。图 12 为光谱定标后测量与辐射传输计算光谱辐亮度在氧气 760 nm 吸收峰位置的比较,比对结果表明经过飞行中光谱定标的光

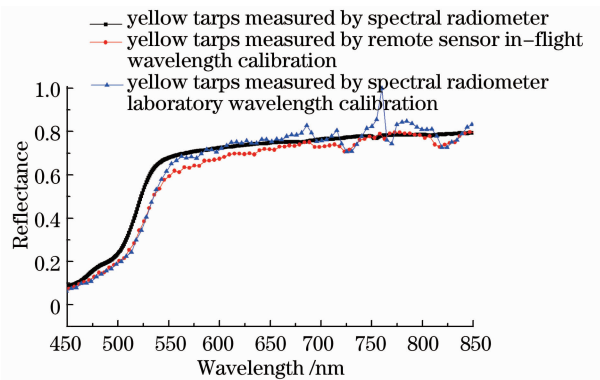


图 10 黄色光谱靶标光谱定标前后反演得到的光谱反射率

Fig. 10 Retrieved spectral reflectance of yellow spectral tarps before and after spectral calibration

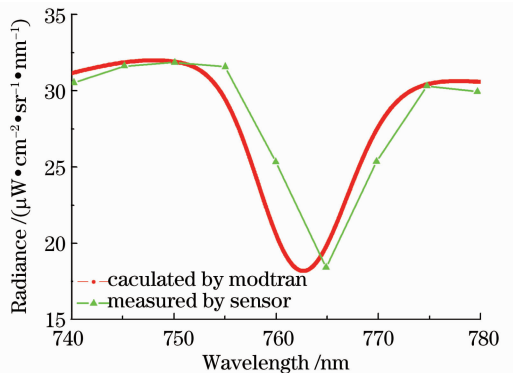


图 11 光谱定标前结果测量光谱辐亮度与辐射传输计算在氧气 760 nm 吸收峰的比较

Fig. 11 Comparison of the measured spectral radiance before the spectral calibration and the radiative transfer calculated one in the oxygen 760 nm absorption region

谱辐亮度廓形和辐射传输计算的相吻合,从而验证了定标结果的准确性。

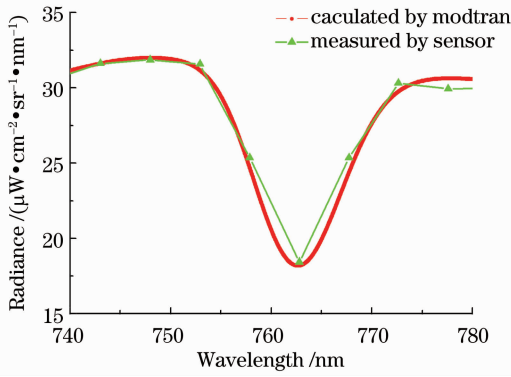


图 12 光谱定标后光谱辐亮度的测量结果和辐射传输计算结果在氧气 760 nm 吸收峰的比较

Fig. 12 Comparison of the measured spectral radiance after the spectral calibration and the radiative transfer calculated one in the oxygen 760 nm absorption region

4.2 影响光谱定标的不确定度因素分析

由光谱定标原理方法可知,影响光谱定标不确定度的因素主要有:图像数据的信噪比、辐射定标以及辐射传输计算过程中的输入参数等。

4.2.1 图像数据信噪比

为定量评估图像数据信噪比对光谱定标的影响,对仿真的光谱数据加入信噪比为 100~2000 的高斯噪声,分别在 FWHM 为 5 nm 和 10 nm,中心波长偏移为 1 nm 和 3 nm 情况下优化计算得到的结果与实际的差别如图 13、图 14 所示。

由仿真计算可知,在信噪比小于 500 的情况下,中心波长和带宽的计算值和真实值差别较大。当数据的信噪比达到 1000 以上,在 FWHM 为 5 nm 时,即使在极端的偏移为 3 nm 的情况下,中心波长的计算误差小于 0.1 nm,带宽的计算误差小于 0.1 nm。在 FWHM 为 10 nm 时,中心波长的计算误差小于 0.1 nm,带宽的计算误差小于 0.3 nm。

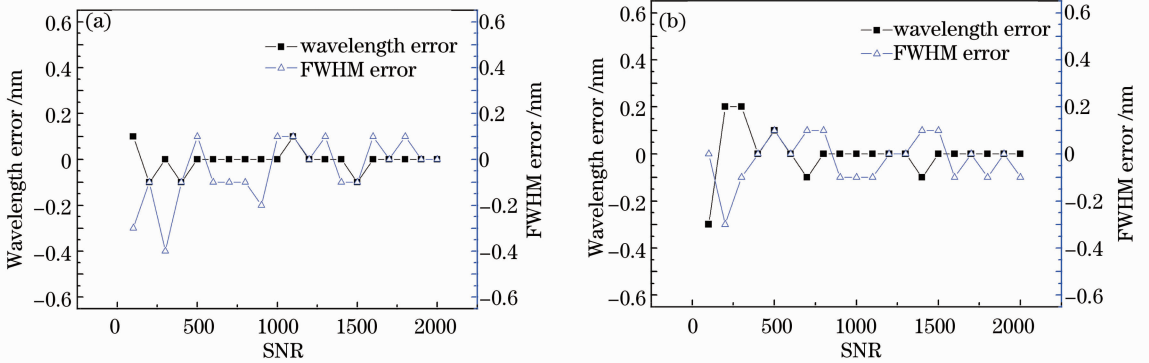


图 13 FWHM 为 5 nm 时波长误差与 FWHM 误差随数据信噪比的变化。(a)中心偏移为 3 nm;
(b)中心偏移为 1 nm

Fig. 13 Wavelength error and FWHM error change with SNR (FWHM is 5 nm). (a) Center offset is 3 nm;
(b) center offset is 1 nm

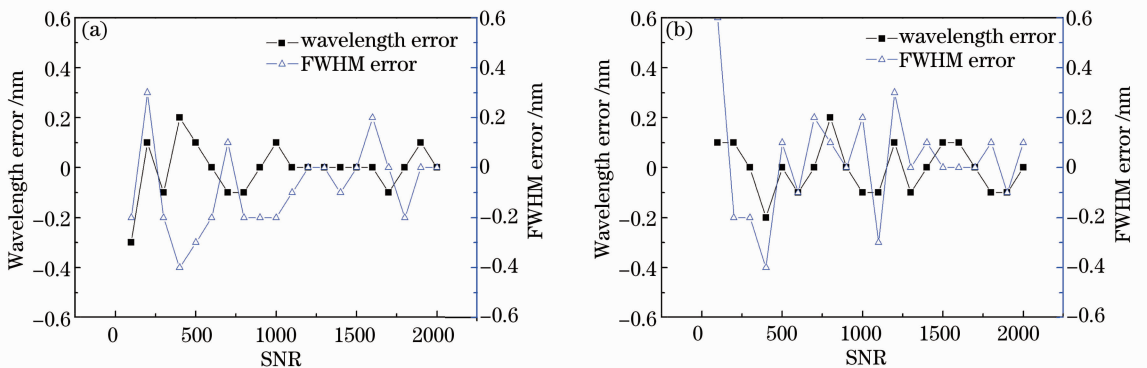


图 14 FWHM 为 10 nm 时波长误差与 FWHM 误差随数据信噪比的变化。(a)中心偏移为 3 nm;
(b)中心偏移为 1 nm

Fig. 14 Wavelength error and FWHM error change with SNR (FWHM is 10 nm). (a) Center offset is 3 nm;
(b) center offset is 1 nm

以上仿真计算一方面验证了光谱定标算法的准确性,另一方面说明,为实现高光谱相机飞行中高精度光谱定标,必须选择大面积均匀场对测量的数据进行统计分析以提高数据的信噪比。

4.2.2 辐射定标

为定量评估高光谱传感器辐射定标对光谱定标的影响,分别对经过辐射定标的辐亮度数据和未经辐射定标的数字量(DN)值进行了光谱定标计算。计算的结果表明,辐射定标前后中心波长的计算结果差别在 0.1 nm 左右,FWHM 的差别在 0.2 nm 左右。因此,辐射定标的不确定度会对光谱定标带来一定的影响。为减小其影响,需用机(星)载无吸收峰的光源进行辐射定标或采用比对测量的方法消除探测器的光谱响应。

4.2.3 辐射传输计算输入参数的影响

辐射传输计算时,需要输入水汽含量、飞行高度、海拔高度、观测方向和气溶胶模型等参数,其中前四项影响着大气吸收透射率的计算,可能会影响光谱定标的精度。而气溶胶主要是分子散射,其随波长的变化比较缓慢,不会影响光谱定标精度。为定量评估输入参数的影响,通过改变其中一个参数,而其他参数保持不变,辐射传输计算得到超高光谱辐亮度,再通过优化计算可得到光谱定标的结果。结果表明,辐射传输计算中输入参数在适度范围内的变化对光谱定标结果不产生显著影响,因此本光谱定标方法对辐射传输的输入参数不敏感。

5 结 论

详细介绍了高光谱遥感飞行中基于大气特征谱线的光谱定标技术的方法原理,并进行了定标不确定度分析。分析结果表明,图像数据的信噪比和遥感器的辐射定标是主要的不确定度因素。为提高光谱定标的准确度,一方面需要统计平均以提高信噪比,另一方面需要利用机(星)载无吸收峰的光源进行辐射定标或采用比对测量的方法消除探测器光谱响应的影响。

利用该光谱定标技术可以准确得到大气吸收波段的中心波长偏移和带宽变化,非吸收波段则可以在假设色散规律不变的基础上推导出来。虽然非吸收波段光谱的偏移对测量影响不大,但为进一步提高光谱定标精度,还需要进行高光谱遥感飞行中色散规律的探索。

参 考 文 献

1 Shu Jiong, Wang Qiang, Sun Juan. Applications of hyperspectral

- remote sensing [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2006, **2006**(4): 1~10
- 束 炯, 王 强, 孙 娟. 高光谱遥感的应用研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2006, **2006**(4): 1~10
- 2 Chen Quansheng, Zhang Yanhua, Wan Xinmin *et al.*. Study on detection of pork tenderness using hyperspectral imaging technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2602~2607
- 陈全胜, 张燕华, 万新民等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2602~2607
- 3 Ma Liang, Wei Jun, Huang Xiaoxian *et al.*. Laboratory spectral calibration method of grating dispersive imaging spectrometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(2): 023001
- 马 亮, 危 峻, 黄小仙等. 光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(2): 023001
- 4 Chen Hongyao, Zhang Liming. Spectral calibration for dispersive hyperspectral sensor based on doped reflectance standard panel [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(12): 2642~2649
- 陈洪耀, 张黎明. 基于特征吸收波长板的色散型高光谱传感器光谱定标技术[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(12): 2642~2649
- 5 Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2347~2354
- 郑玉权. 超高光谱成像仪的精细光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(11): 2347~2354
- 6 O. G. Robert. Spectral calibration requirement for Earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(4): 683~690
- 7 J. H. G. M. van Geffen. Wavelength calibration of spectra measured by the global ozone monitoring experiment: variations along orbits and in time [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(3): 695~706
- 8 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu *et al.*. Research on high-accuracy in-flight spectral calibration of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 0228002
- 李占峰, 王淑荣, 黄 煜等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(2): 0228002
- 9 R. O. Green, J. E. Conel, J. S. Margolis *et al.*. In-flight validation and calibration of spectral and radiometric characteristics of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer [C]. *SPIE*, 1990, **1298**: 18~36
- 10 B. C. Gao, M. J. Montes, C. O. Davis. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2004, **90**(4): 424~433
- 11 L. Guanter, R. Richter, J. Moreno. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(10): 2360~2370
- 12 L. Guanter, K. Segl, B. Sang *et al.*. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11594~11606
- 13 P. S. Barry, J. Shepanski, C. Segal *et al.*. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system [C]. *SPIE*, 2002, **4480**: 231~235
- 14 D. Ramon, R. P. Santer, P. Dubuisson. MERIS in-flight spectral calibration in O₂ absorption using surface pressure retrieval [C]. *SPIE*, 2003, **4891**: 505~514
- 15 Wang Tianxing, Yan Guangjian, Ren Huazhong *et al.*. Retrieval of spectral characteristics of hyperspectral sensor and retrieval of reflectance spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(10): 2714~2718
- 王天星, 阎广建, 任华忠等. 高光谱传感器光谱性能参数反演与反射率恢复[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(10): 2714~2718