

文章编号 1004-924X(2010)12-2642-08

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

陈洪耀, 张黎明

(1. 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: 高光谱传感器的光谱定标是实现高光谱遥感量化的关键。为了克服传统的基于单色仪扫描的光谱定标方法存在的设备昂贵、耗时等缺点, 实现色散型高光谱传感器在野外或飞行中的实时、高精度定标, 提出了一种基于特征吸收波长板的色散型高光谱传感器系统级光谱定标方法。分别对特征吸收波长板和漫反射参照体反射信号进行了比对测量, 通过优化计算得到了传感器通道的中心波长和带宽。该方法消除了待定标传感器的光谱响应和光源的光谱能量分布带来的影响, 能快速准确地实现色散型高光谱传感器的波长定位。运用该技术实现了对野外光谱辐射计 FieldSpec UV/VNIR 的光谱定标, 并对影响光谱定标精确度的因素进行了分析计算, 结果表明, 该方法实现的波长准确度 $< 0.5 \text{ nm}$, 可满足色散型高光谱传感器实时、高精度光谱定标的需要。

关键词: 高光谱遥感; 光谱定标; 波长定标; 特征吸收波长板; 高光谱传感器

中图分类号: TP73; TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2642

Spectral calibration for dispersive hyperspectral sensor based on doped reflectance standard panel

CHEN Hong-yao, ZHANG Li-ming

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

Abstract: Spectral calibration is a key to realize the quantification of hyperspectral remote sensing. Traditionally, the spectral calibration for a hyperspectral sensor is performed by a monochromator scanning method with disadvantages of expensive, time-consuming, etc., which is difficult to achieve the real-time and high-accuracy spectral calibration in the field or in-flight. In this paper, an accuracy and fast system level spectral calibration method was described for determining the center wavelengths for every spectral channel simultaneously. The reflective signals of a diffuse reflectance standard panel and a diffuse reflectance standard panel doped with a rare earth oxide were measured by the hyperspectral sensor. The ratio of two signals was optimized to remove the effects of sensor spectral response and lamp spectral output. By assuming a certain parametric model of the sensor and performing a non-linear least squares fit of the measured ratio to the expected ratio, the center wavelength and bandwidth could be derived. A field spectroradiometer, FieldSpec UV/VNIR, was calibrated by pro-

收稿日期: 2010-03-23; 修订日期: 2010-05-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121806)

posed method, and the factors that effect on the calibration accuracy were analyzed. The results show that the wavelength accuracy is less than 0.5 nm, which indicates that the technology can meet the urgent needs of high accuracy and fast spectral calibration of hyperspectral sensors.

Key words: hyperspectral remote sensing; spectral calibration; wavelength calibration; wavelength standard panel; hyperspectral sensor

1 引言

高光谱技术以其精细的光谱分辨力可以获取物体丰富的本征信息。近几年,随着高光谱遥感技术的发展,其在国防军事、国土资源调查、精准农业、环境监测、大气探测等领域发挥了越来越重要的作用^[1]。以确定高光谱传感器光谱通道中心波长和带宽为目的的光谱定标是保证测量结果有效性和进行辐射定标的前提,是高光谱遥感量化的关键。目前,色散型高光谱技术出现较早,技术比较成熟,占据实用化高光谱传感器的主要地位。该技术是利用色散元件(光栅或棱镜等)将复色光色散成序列谱线,然后再用探测器测量每一谱线元的强度。色散型高光谱传感器的实验室光谱定标一般是通过单色仪扫描实现的,但是这种光谱定标方法存在着设备昂贵、耗时等缺点。另外,在野外或飞行测量中,因大气压强、温度变化以及剧烈振动等原因,高光谱传感器的波长可能会发生偏移^[3]。在大气吸收带,很小的波长偏移会带来很大的测量误差,例如 Green 等人的计算显示,10 nm 带宽的高光谱传感器若波长偏移 1 nm,在强的水气吸收带即可引起高达±25%的辐亮度测量误差^[2]。因此,实时、高精度的光谱定标十分必要。

国外 Guanter、Gao、Green 等人用大气吸收气体吸收峰或(和)太阳夫琅和费线对 AVIRS、HYDICE、HyMap 等机载高光谱传感器进行了光谱定标^[4-6]。星载高光谱传感器是未来遥感的发展方向之一,同样可以采用大气吸收线对其进行光谱定标^[7],采用星上实时的光谱定标技术也是一种有效的途径。如美国地球轨道一号(EO-1)上的高光谱传感器 Hyperion 发射前和在轨的光谱定标采用了掺有稀土氧化物的特征吸收波长板,并取得了成功^[7-8]。我国的高光谱遥感也取得

了飞速发展,因而传感器的高精度实时光谱定标成为亟待解决的问题。20 世纪 90 年代中国科学院安徽光机所的王先华、张黎明等人成功研制了类似 Hyperion 采用的特征吸收波长板,并对其反射率和稳定性进行了研究^[9],但该光谱定标技术如何运用到高光谱传感器以及影响定标精度的因素分析未见报道。笔者在实验室用人工光源和光谱辐射计 FieldSpec UV/VNIR 对光谱定标方法进行了研究,分析了影响定标精度的因素,通过和单色仪扫描方法的比较,验证了该定标方法的准确性。

2 方法原理

基于特征吸收波长板的光谱定标方法的实现流程如图 1 所示。其中漫反射参照体是反射率几乎不随波长变化的具有接近理想朗伯特特性的聚四氟乙烯,特征吸收波长板是在漫反射参照体材料中掺杂稀土氧化物材料经特殊工艺制成。

色散型高光谱传感器通道光谱响应模型可以表示为如下的归一化高斯函数形式^[6]:

$$R(\lambda - \lambda_c) = \frac{\exp(-(\frac{\lambda - \lambda_c}{\sqrt{2}\sigma})^2)}{\sqrt{2\pi}\sigma}, \quad (1)$$

其中, λ_c 是通道的中心波长; $2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ 是通道的半高全宽(FWHM)。

由于色散型高光谱传感器采用棱镜或光栅作为分光元件,色散模型可用二次或三次多项式表示^[9],所以传感器第 i 个通道的中心波长可表示为(由于 FieldSpec UV/VNIR 采用光栅分光,这里选用二次):

$$\lambda_c = \lambda_0 + a \cdot i + b \cdot i^2, \quad (2)$$

设 $V(i)$ 为第 i 个通道特征吸收波长板与漫反射参照体高光谱分辨率反射信号比值与待定标传感器通道响应模型的卷积, $M(i)$ 为待定标高光谱传

感器第 i 个通道实际测量的比值,优化两个模型的参数可得下式:

$$\Delta = \sum_{i=0}^N (V(i) - M(i))^2, \quad (3)$$

取最小值即可得到高光谱传感器各个通道的中心波长和带宽。

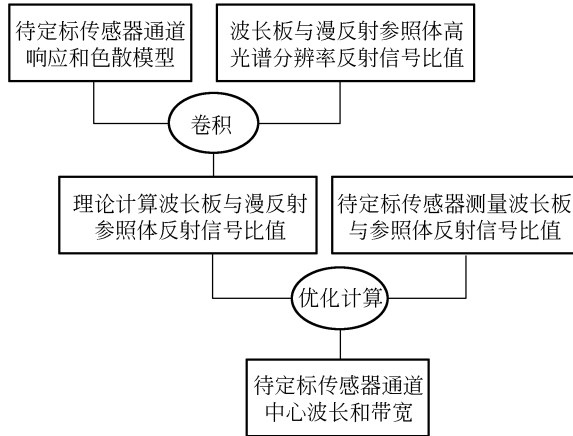


图 1 基于特征吸收波长板的光谱定标实现流程图

Fig. 1 Flow chart of spectral calibration based on reflectance standard panel

3 实验

为实现该光谱定标方法并对定标准确性进行验证,分别进行了特征吸收波长板与漫反射参照体高光谱分辨率的比对测量(以下简称高分辨光谱反射率)、待标定高光谱传感器对特征吸收波长板与漫反射参照体反射信号的比对测量(以下简称光谱反射率)以及单色仪扫描方法对待定标仪器的光谱定标。

3.1 波长板的高分辨光谱反射率测量

特征吸收波长板的高分辨光谱反射率采用高精度、高光谱分辨率的分光光度计 U-4100 测量,测量系统采用积分球双光路法^[11],其光路如图 2 所示:波长板样品和漫反射参照体分别放置在积分球侧面的样品和标准位置,反射镜 1 水平放置时,单色光按实线所示光路垂直照射波长板样品;反射镜 1 切换至 45°位置时,单色光经虚线所示光路垂直照射漫反射参照体标准;探测器从积分球顶部观测波长板样品和漫反射参照体反射在半球空间内的均匀亮度 $L_w(\lambda)$ 和 $L_s(\lambda)$ 。波长板与漫

反射参照体反射率的比值为:

$$\frac{\rho(\lambda)}{r(\lambda)} = b(\lambda) \cdot \frac{L_w(\lambda)}{L_s(\lambda)}. \quad (4)$$

其中 $b(\lambda)$ 为双光路校正系数。

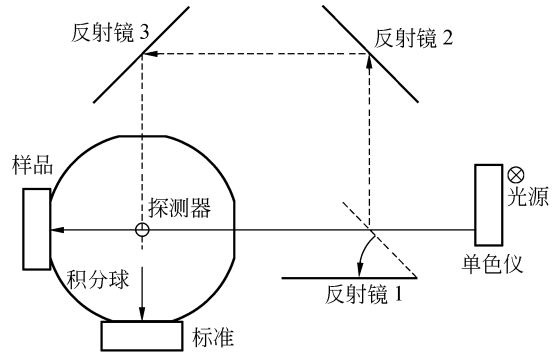


图 2 特征吸收波长板高光谱反射率测量系统

Fig. 2 Measurement system for high spectral resolution reflectance of wavelength panel

特征吸收波长板的高分辨率光谱反射率的测量结果如图 3 所示:

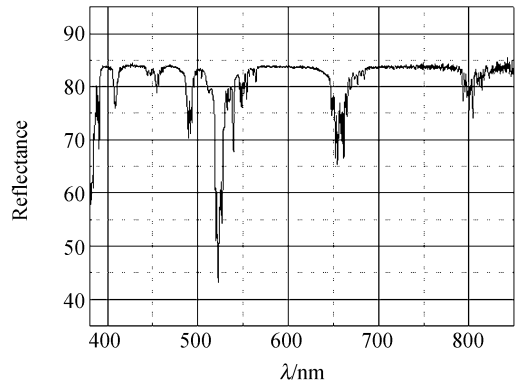


图 3 特征吸收波长板高分辨率光谱反射率测量结果

Fig. 3 High spectral resolution reflectance of wavelength panel

3.2 待标定仪器对波长板的光谱反射率测量

用光谱辐射计 FieldSpec UV/VNIR 对特征吸收波长板的光谱反射率测量如图 4 所示,1 kW 的石英卤素灯用精度为 0.05% 的恒流源供电,光源距测试样品板(特征吸收波长板或漫反射参照体)的距离为 1.7 m,光谱辐射计测光轴与样品板法线之间的夹角为 45°。其中,光谱辐射计 FieldSpec UV/VNIR 光谱波段是 350~1 050 nm,光谱分辨率为 3 nm,光谱采样间隔为 1.4 nm,共 512 个通道。为了减少测量过程

中杂散光的影响,试验在暗室中进行,光源和样品板之间增加消杂散光光阑,比对测量按下式计算:

$$M(i) = \frac{DN_w(i)}{DN_s(i)}, \quad (5)$$

其中, $DN_w(i)$ 为光谱辐射计测特征吸收波长板时的数字输出值; $DN_s(i)$ 为光谱辐射计测漫反射参照体时的数字输出值。测量得到的两者的比值如图 5 所示。

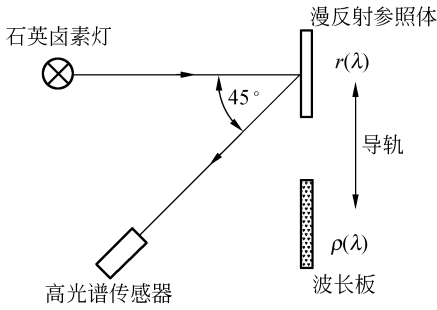


图 4 FieldSpec UV/VNIR 对特征吸收波长板与漫反射参照体反射信号的比对测量

Fig. 4 Contrast measurements of wavelength panel and diffuse reflectance standard with FieldSpec UV/VNIR

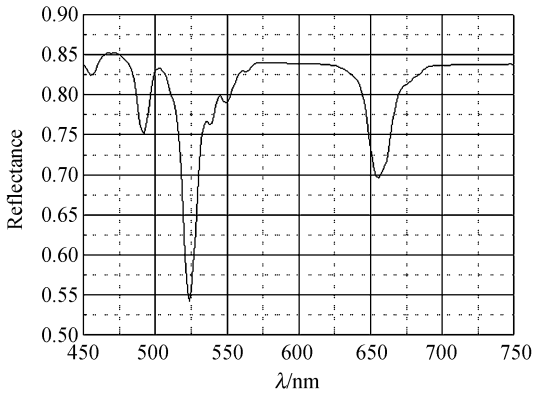


图 5 FieldSpec UV/VNIR 对特征吸收波长板与漫反射参照体反射信号比对测量的结果

Fig. 5 Measurement results of wavelength panel and diffuse reflectance standard with FieldSpec UV/VNIR

3.3 单色仪扫描方法对光谱辐射计的定标

用 DK242 双单色仪在 485 nm 和 547 nm 附近以 0.1 nm 的步距对待定标的光谱辐射计的几个光谱通道进行扫描,用通道输出值最大时的波长位置作为该通道的中心波长。测量结果如图 6,7 所示。其中单色仪的波长准确性为 ± 0.3

nm, 波长重复性为 0.01 nm。

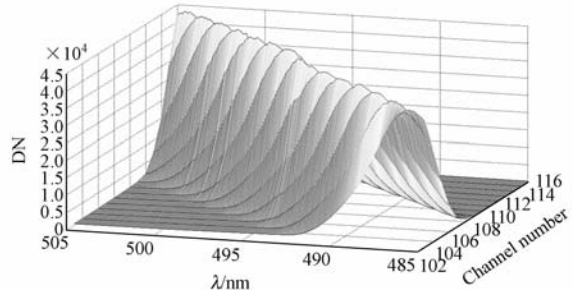


图 6 485 nm 附近通道扫描的结果

Fig. 6 Scanning results of FieldSpec UV/VNIR in 485 nm vicinity

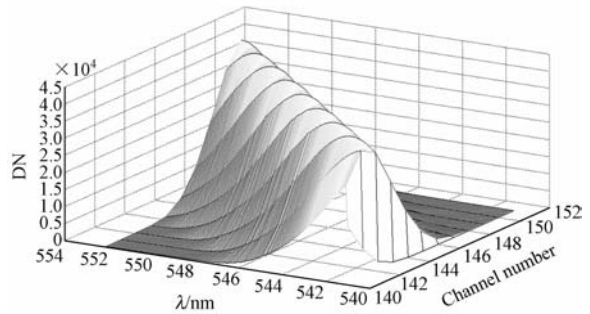


图 7 547 nm 附近通道扫描的结果

Fig. 7 Scanning results of FieldSpec UV/VNIR in 547 nm vicinity

3.4 计算结果

通过优化计算得到的实际测量光谱曲线与理论计算光谱曲线如图 8 所示,两者的相对差别如图 9 所示(为了研究的方便,只在 420~570 nm 进行了优化计算,因为这个波段对中心波长偏移最敏感)。基于特征吸收波长板的定标结果与单色仪扫描方法的定标结果如表 2 所示。计算得到待定标光谱辐射计的 FWHM 为 5.25 nm。

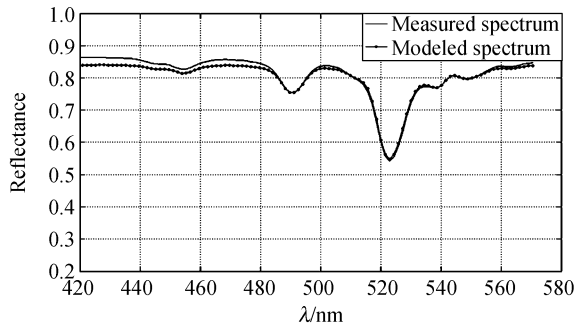


图 8 理论计算的光谱曲线与实际测量光谱曲线
Fig. 8 Calculated and measured spectral reflectances

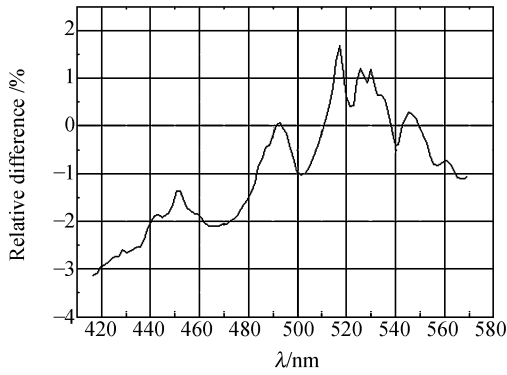


图9 理论计算和实际测量之间的相对差别

Fig. 9 Relative difference between calculated and measured results

表2 FieldSpec UV/VNIR 基于特征吸收波长板的定标结果与单色仪扫描法定标结果的比较

Tab. 2 Comparison of spectral calibration results of FieldSpec UV/VNIR using doped reflectance standard panel and monochromator scanning method

通道号	波长板算法	单色仪扫描法	两者差别
102	485.53	485.90	-0.37
103	486.98	487.40	-0.42
104	488.42	488.90	-0.48
105	489.86	490.00	-0.14
106	491.31	491.60	-0.29
107	492.75	493.00	-0.25
108	494.19	494.60	-0.41
109	495.63	495.80	-0.17
110	497.07	497.50	-0.43
111	498.51	499.00	-0.49
112	499.95	500.20	-0.25
113	501.39	501.60	-0.21
114	502.82	503.10	-0.28
115	504.26	504.60	-0.34
141	541.31	542.20	-0.89
142	542.72	543.70	-0.98
143	544.14	545.00	-0.86
144	545.55	546.50	-0.95
145	546.96	547.90	-0.94
146	548.37	549.30	-0.93

4 分析讨论

4.1 中心波长和 FWHM 计算的敏感性

为了定量分析待定标传感器中心波长的偏移

和 FWHM 的变化对优化计算的敏感性,进行了如下的仿真计算,设待定标传感各通道中心波长与通道 i 之间的关系(色散模型)为:

$$\lambda_c^i = 415 + 1.43 \cdot (i-1). \quad (6)$$

FWHM 为 3.525 nm。计算了:

(1)在 FWHM 不变,中心波长偏移 0.1,0.2 和 0.5 nm 情况下,仪器与特征吸收波长板高分辨光谱反射率的卷积和中心波长未发生变化时卷积结果的相对差别;

(2)在中心波长未发生变化,FWHM 分别变化 0.235,0.47,0.705 nm 情况下,仪器与特征吸收波长板高分辨光谱反射率的卷积和 FWHM 未发生变化时卷积结果的相对差别。

用相对差别的大小表示中心波长偏移和 FWHM 变化对优化计算的敏感性。结果如图 10,11 所示。

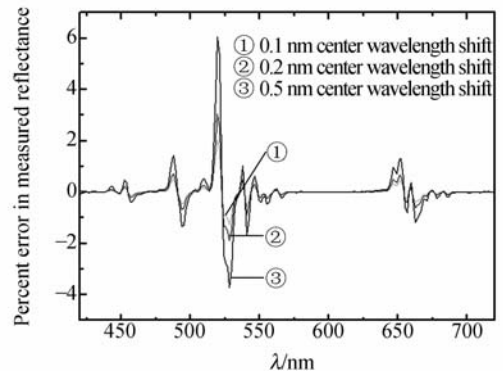


图10 FWHM 为 3.525 nm 时的波长偏移敏感性

Fig. 10 Sensitivity of wavelength shift with FWHM of 3.525 nm

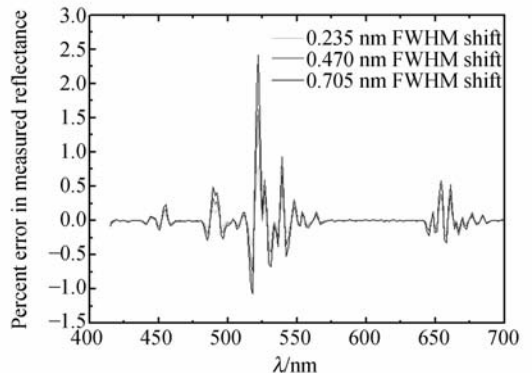


图11 名义 FWHM 为 3.525 nm 时的变化敏感性

Fig. 11 Sensitivity of FWHM shift with normal FWHM of 3.525 nm

从上面的结果可以看出,在吸收峰位置附近,中心位置和 FWHM 的变化对卷积得到的反射率变化十分明显。在 FWHM 不变的情况下,随着中心波长偏移的增加,卷积得到的反射率与准确位置的差别在不断加大,当中心波长偏移 0.5 nm 时,在 520 nm 强的吸收峰位置附近的相对变化达 6%;在中心波长不变的情况下,随着 FWHM 变化的增大,卷积得到的反射率与准确位置的差别也在不断增大,但增加的速度没有中心偏移时的明显,在 FWHM 改变 0.705 nm 时,在 520 nm 强吸收峰位置附近相对变化达 2.5%。

4.2 影响光谱定标方法不确定度的因素

使用比对测量法,基于特征吸收波长板的光谱定标方法消除了仪器的光谱响应和光源的光谱能量分布带来的影响,所有通道可同时进行优化计算,具有快速准确的特点。其中影响定标不确定度的因素主要有:分光光度计的波长准确性、反射率比对测量的准确性(包括分光光度计和待定标传感器的线性和重复性、杂散光、反射率测量几何位置关系等)、待定标传感器光谱响应和色散模型的准确性等。下面分别予以分析讨论。

分光光度计采用单色仪分光,样品测量前用具有稳定特征吸收峰的氧化钬玻璃滤光片进行了波长校对,氧化钬玻璃滤光片标准波长和仪器标称波长如表 3 所示:

表 3 氧化钬玻璃滤光片标准波长和
分光光度计标称波长

Tab. 3 Comparison of standard wavelength of Holmium oxide and nominal wavelength of spectrophotometer (nm)

氧化钬玻璃标准波长	分光光度计波长	两者差别
385.8	385.7	0.1
418.5	418.5	0
453.4	453.2	0.2
459.9	460.0	-0.1
536.4	536.2	0.2
637.5	637.2	0.3

可以看出分光光度计的波长准确度在标称的 0.3 nm 范围之内,但除 418.5 nm 和 460.0 nm 外,其它 4 个特征波长都比氧化钬玻璃滤光片标准波长偏低,这也与表 2 中波长板计算出来的定标结果整体比单色仪扫描方法偏低相一致。

特征吸收波长板的高分辨率光谱反射率测量

采用双光路积分球方法,反射率测量的几何位置关系为方向-半球,即光源方向入射样品,探测器半球空间内接收反射信号。待定标传感器对特征吸收波长板的光谱反射率测量中,反射率的几何位置关系为方向-方向,两者之间存在着差别。假定特征吸收波长板和基底材料聚四氟乙烯一样反射率基本不随方位角变化,则根据 Hsia 和 Weidner 的理论^[12],双向反射比因子 $R(0^\circ, 45^\circ, \lambda)$ 与方向半球反射比因子 $R(0^\circ, h, \lambda)$ 之比为常数。因此,纯粹的 BRF 和 DHRF 之间的转化不会受计算的影响,但在野外环境下,由于太阳直射和天空漫射的复杂性,实际测量到的是二者的结合体,需要考虑 BRF 修正^[13]。

分光光度计和待定标传感器的性能(主要包括线性、重复性等)以及测量时的杂散光影响着两次光谱反射率测量的一致性,因此也影响着光谱定标的准确性。特征吸收波长板和漫反射参照体的反射率之比小于 1:2,在这样小的动态范围内,仪器的线性容易得到保证。在对特征吸收波长板的高分辨光谱反射率测量中,反射信号能量比较小,因此需要较高能量的光源入射,同时探测器本身应具有低的噪声。测量过程中,要严格控制杂散光的影响,图 9 中 410~500 nm 波段拟合的误差偏大,初步分析可能为杂散光的影响。

通道的光谱响应模型和色散模型的正确与否直接影响着定标结果的准确性,对 10 nm 左右带宽的高光谱传感器来说,用高斯函数模型是准确的,主要是通过单色仪扫描和文献报道证明的^[5]。色散型高光谱传感器主要采用光栅或棱镜分光,根据其色散公式,前者可以在整个光谱范围提供线性色散,后者则是非线性的,但一般在光学设计中用消色差棱镜使非线性色散线性化到一定程度,因此,可以采用两次或三次多项式拟合各个通道的中心波长^[10]。

综上所述,采用该方法对高光谱传感器 ASD-VNIR 的光谱定标准确性小于 0.5 nm。至于后面 6 个通道的差别偏大的原因还有待进一步研究分析。

5 结论

用人工光源在实验室运用基于特征吸收波长板的光谱定标方法实现了色散型高光谱辐射计

FieldSpec UV/VNIR 的光谱定标,通过和单色仪扫描方法的比较证明了该光谱定标的准确性优于 0.5 nm。两次比对测量的方法可消除光源光谱能量分布与待定标传感器光谱响应分布对光谱定标影响,能快速准确地实现高光谱传感器的光谱定标。影响基于特征吸收波长板光谱定标方法不确定度的因素主要有:分光光度计的波长准确性、反射率测量准确性、待定标传感器通道响应和色散模型的准确性等。

在野外环境下,由于太阳直射和天空漫射的复杂性,反射率测量需要进行 BRDF 修正,并且由

此会带来误差。作者正从事的研究认为,采用一台高可靠性、高光谱分辨率、经过波长校准的辐射计比对测量可能会解决这个问题。在太空环境下,由于没有大气的影 响,会避免 BRDF 修正的困难,但是恶劣的太空环境对特征吸收板的稳定性是严峻考验,需要通过监视和对其特性进行更深入的研究。

致谢:感谢通用光学定标与表征技术重点实验室的杨宝云实验员、李建军博士和徐伟伟同学在试验中的协助,感谢安徽大学陶筱琳老师提供了分光光度计的波长定标数据。

参考文献:

- [1] 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(4):1-10.
SHU J, WANG Q, SUN J. Applications of hyperspectral remote sensing [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2006(4): 1-10. (in Chinese)
- [2] ROBERT O G. Spectral calibration requirement for Earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37: 683-690.
- [3] 徐中民,禹秉熙. 对 PC2000-PC/104 型光谱仪的波长定标[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(1):11-14.
XU ZH M, YU B X. Wavelength calibration for PC2000-PC/104 spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 11-14. (in Chinese)
- [4] LUIS G, RUDOLF R, JOSÉ M. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45:2360-2370.
- [5] GAO B C, MONTES M J, DAVIS C O. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique[J]. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 90:424-433.
- [6] LUIS G, KARL S, BERNHARD S, et al.. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers[J]. *Opt. Express*, 2009, 17:11594-11606.
- [7] PAMELA B, JOHN S, CAROL S. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system [J]. *SPIE*, 2002, 4480:231-235.
- [8] HEDMAN T R, JARECKE P J, LIAO L B. Hyperspectral imaging spectrometer spectral calibration [P]. *United State*: 6, 111, 640. 2000-08-29.
- [9] 王先华,张黎明,乔延利. 光谱辐射计波长定标新方法的研究[J]. 量子电子学报, 1999, 16(5):442-447.
WANG X H, ZHANG L M, QIAO Y L. Study of new wavelength calibration way for spectrometer [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, 16(5):442-447. (in Chinese)
- [10] JUNGHWAN C, PAUL J, GEMPERLINE, et al.. Wavelength calibration method for a CCD detector and multichannel fiber-optic probes[J]. *Appl. Spectrosc.* 1995, 49:1841-1845.
- [11] 杨本永,张黎明,沈政国,等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8):1851-1858.
YANG B Y, ZHANG L M, SHEN ZH G, et al.. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17, 8:1851-1858 (in Chinese)
- [12] JACK J H, VICTOR R W. NBS 45°/normal reflectometer for absolute reflectance factors [J]. *Metrologia*, 1981(17):97-102.
- [13] JOHN H L. *Diffuse light correction for field reflectance measurements* [D]. Tucson:University of Arizona, 2002.

作者简介:



陈洪耀(1980—),男,河南漯河人,博士研究生,主要从事高光谱传感器的光谱与辐射定标和漫反射标准绝对测量方面的研究。E-mail: hyaochen@mail.ustc.edu.cn

导师简介:

张黎明(1958—),男,浙江杭州人,博士生导师,研究员,1982年于中国科学技术大学获学士学位,主要从事光学遥感器辐射定标与辐射标准传递方面的研究。Email: lmzhang@aiofm.ac.cn

● 下期预告

单站车载光电跟踪设备卫星轨道预测误差修正研究

张沛露^{1,2,3},郭立红¹,王建军¹,于国权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;3. 吉林建筑工程学院,吉林 长春 130021)

车载跟瞄设备对低轨卫星进行跟踪时,通常利用卫星轨道的双行根数,采用卫星跟踪软件对卫星轨道进行预报,在低仰角时进行目标搜索捕获,转入自动跟踪,跟踪过程中遇到云雾遮蔽或天顶跟踪盲区等问题时,采用数引方式保证目标捕获。本文利用车载跟瞄设备获得的实测数据,采用改进拉普拉斯轨道预测方法对卫星轨道进行预测,通过插值方法对预测偏差进行误差修正,获得更高精度的引导值。实验数据表明,外推 7 s 轨道数据方位和俯仰预测精度由双行根数预报 3 分左右提高到 10 角秒量级。