第34卷，第8期
2014年8月

光 谱 学 与 光 谱 分 析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 34, No. 8, pp2289-2292
August, 2014

PGP成像光谱仪的全视场自动化光谱定标方法

孙 慈[1,2]，巴音贺希格[1*]，崔继承[1]，潘明忠[1]，李晓天[1]，唐玉国[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. 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 为了对PGP成像光谱仪所获得的光谱数据进行定量化分析，需对PGP成像光谱仪进行光谱定标，以获得各光谱通道的中心波长、光谱分辨率及成像光谱仪的光谱弯曲等光谱特性信息。采用单色准直光法设计了一套全视场自动化的光谱定标系统，系统中引入球面镜为待测的成像光谱仪光谱定标提供准直光，通过可自动控制的折转镜改变定标入射光线的入射角，以此实现待测成像光谱仪空间维不同视场的自动化光谱定标。运用该定标系统对PGP成像光谱仪进行光谱定标实验，得到该成像光谱仪的光谱性能参数，并结合定标系统的结构特点，对实验的结果进行了精度分析。实验分析结果表明该系统对PGP成像光谱仪的中心波长定标精度达到0.1 nm，光谱分辨率定标精度达到1.3%。该研究设计的全视场自动化光谱定标系统具有结构新颖紧凑、通用性较强、光谱定标精度较高等特点，且由于自动化的控制，避免了由于人为参与定标过程所带来的额外误差。该系统可用于实现PGP成像光谱仪及其他同类型成像光谱仪的光谱定标。

关键词 全视场光谱定标；PGP成像光谱仪；单色准直光法；光谱分辨率；谱线弯曲

中图分类号：TH744.1 **文献标识码**：A **DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2014)08-2289-04

引 言

PGP成像光谱仪(以下简称为成像光谱仪)可以获得探测目标的图像信息及其光谱信息，它基于棱镜-光栅-棱镜组合的分光结构，综合了棱镜及光栅色散的优点，已被应用于航空航天光谱成像遥感、高速集成实时光谱探测等方面[1]。为了采用成像光谱仪实现对探测目标光谱信息的定量化分析，需要对成像光谱仪进行光谱定标。

光谱定标是确定成像光谱仪系统光谱特性指标的重要手段，通过光谱定标可以得到系统的光谱响应函数、光谱范围、各光谱通道的中心波长及光谱分辨率、谱线弯曲(smile)等性能指标。成像光谱仪光谱定标方法主要有单色准直光定标方法、掺杂稀土元素漫反射板法和气体发射光谱灯法[2-4]，其中单色准直光法因精确度较高而倍受青睐，具有代表性的机载可见-红外成像光谱仪AVIRIS[5]、超光谱成像仪COMPASS[6]、机载推扫式成像光谱仪APEX[7]等均采用单色准直光法进行光谱定标。目前国内基于单色准直光方法的成像光谱仪光谱定标系统主要采用单色仪和平行光管的组合方式[8-11]，该组合方式具有快速定标的优势，但是只能对成像光谱仪的单个视场进行定标，而且无法获得待测成像光谱仪谱线弯曲信息。鉴于此，为了采用单色准直光法实现对PGP成像光谱仪的全视场光谱定标，本文利用球面镜提供准直光，引入自动化控制的平面镜折转光路，设计了一套小型化全视场光谱定标系统，此定标系统具有小型化、结构紧凑通用性强等特点。最后，运用此定标系统对PGP成像光谱仪进行了光谱定标实验，并对定标精度进行了分析。

1 PGP成像光谱仪成像原理

PGP成像光谱仪由前置望远系统、狭缝、准直镜、PGP分光元件、成像镜和接收系统组成，棱镜-光栅-棱镜的分光结构保证了光线直进直出，具结构紧凑、小巧便携性的优点，PGP成像光谱仪光学结构如图1所示。

PGP成像光谱仪以推扫成像方式扫描目标，成像光谱仪

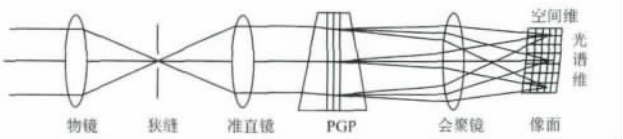


Fig. 1 Schematic diagram of PGP imaging spectrometer

收稿日期：2013-08-21，**修订日期**：2013-11-20

基金项目：国家自然科学基金项目(61108032)，吉林省科技发展计划(20126012)资助

作者简介：孙 慈，女，1988年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生 e-mail：sunci1822@163.com

*通讯联系人 e-mail：bayin888@sina.com

面阵探测器可获得探测目标的二维信息，一维是空间的成像(即空间维)，另一维是探测目标的光谱曲线(即光谱维)。待测 PGP 成像光谱仪的主要系统参数如表 1 所示。

Table 1 Main parameters of PGP imaging spectrometer

系统参数	数值
光谱范围/nm	400～1 000
光谱分辨率/nm	优于 5
焦距/mm	30
视场/(°)	20×0.5
系统 F#	3.5

2 成像光谱仪光谱定标系统理论模型及自动化控制方法

2.1 定标系统理论模型

光谱定标系统是基于单色准直光法进行设计的，光源发出的光经过单色仪后出射某一波长的单色光，采用探测器对单色光的光谱响应值进行实时记录，便可测得探测器各像元(即光谱通道)的光谱曲线。通过变换单色光光线的入射角度，可以对成像光谱仪不同视场的像元进行定标。记录探测器的响应值，经过拟合后，就可以测定系统的光谱响应函数，完成对待测成像光谱仪的全视场的光谱定标。但是，由于单色仪出射单色光的光谱分布会使待测成像光谱仪的光谱分辨率变大，成像光谱仪实测光谱曲线可表达为

$$R(\lambda) = S_i(\lambda) * \phi'(\lambda) \tag{1}$$

式中，$*$ 代表卷积，$S_i(\lambda)$ 为理想光谱响应函数，$\phi'(\lambda)$ 为单色仪出射单色光的光谱分布函数。单色仪出射单色光的光谱分布可用高斯分布表示。

系统的光谱响应函数 $S_i(\lambda)$ 通常可由高斯函数来表征[12]，即

$$S_i(\lambda) = K\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda_i}{\sigma_i}\right)^2\right] \tag{2}$$

高斯函数的半高宽即为系统的光谱分辨率 $\delta\lambda$，即

$$\delta\lambda = \alpha = 2\sqrt{2\ln 2\sigma_i^2} \tag{3}$$

其中，K 是常数，λ_i 是第 i 波段的中心波长，σ_i 是高斯曲线的标准差，α 是高斯曲线的半宽度。但是，单色仪出射单色光的光谱分布会使待测成像光谱仪的光谱分辨率变大，单色仪出射单色光的光谱分布可用高斯分布表示，即

$$\phi'(\lambda) = K'\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{\sigma'}\right)^2\right] \tag{4}$$

其中，K' 是常数，σ' 是高斯曲线的标准差，其出射光谱宽度为

$$\delta\lambda_{\text{mono}} = 2\sqrt{2\ln 2\sigma'^2} \tag{5}$$

将式(2)和式(4)带入式(1)中可得

$$R(\lambda) = KK'\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda_i}{\sqrt{\sigma_i^2+\sigma'^2}}\right)^2\right] \tag{6}$$

则实际半高宽为

$$\delta\lambda' = 2\sqrt{2\ln 2(\sigma_i+\sigma')^2} \tag{7}$$

但是由于同一波长光线的入射角度不同，因此引起光谱分布不在同一行像元上，这种误差被称为谱线弯曲(smile 效应，如图 2 所示)。

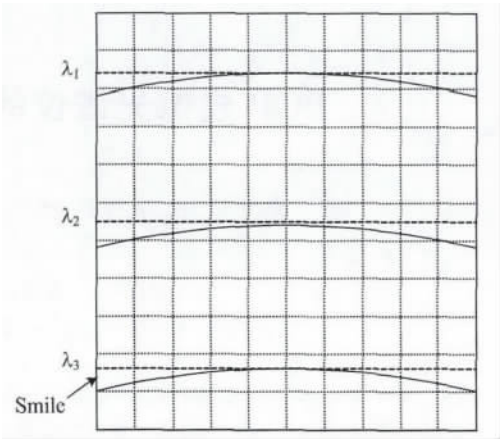


Fig. 2 Schematic of spectrum bending

2.2 定标系统主要结构及自动化控制方法

成像光谱仪光谱定标系统(见图 3)主要由光源系统、单色仪、准直系统和扫描系统组成。光源系统为定标系统提供照明，在图 3 中，L_1 和 L_2 为放光源的位置。当对成像光谱仪进行光谱定标时，选择连续光源作为系统光源(L_1)；当调整光路或对单色仪进行光谱标定时，在选择激光器或汞灯作为系统光源(L_2)。这样在定标过程中，可以免去连续光源的更换麻烦，具有很大的灵活性。PGP 成像光谱仪的波长范围为 400～1 000 nm，选择钨灯作为连续光源可以覆盖成像光谱仪的光谱范围，选取汞灯用来对单色仪定标。

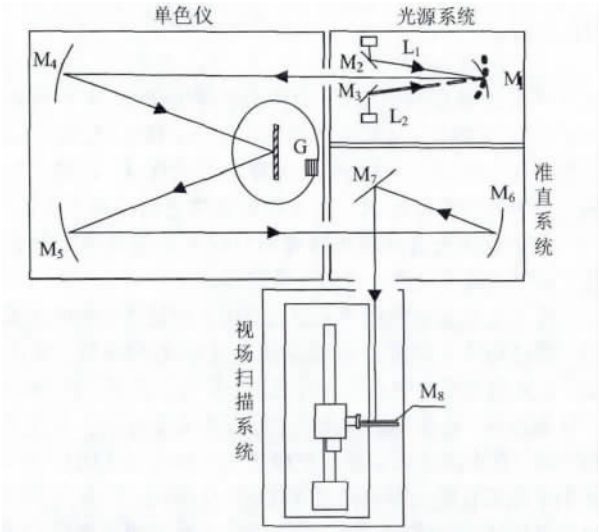


Fig. 3 Schematic diagram of the calibration system

M_1，M_4，M_5，M_6 为球面镜；M_2，M_3，M_7，M_8 为平面镜；G 为光栅；L_1，L_2 为光源

单色仪是光谱定标系统的核心，定标系统采用自主研制的单色仪，此单色仪是扫描型非对称 CT 结构。在非对称 CT 结构中，由于准直镜与聚焦镜分开，使准直镜和聚焦镜的曲率半径和反射角不相等，因此可避免二次衍射与多次衍射，同时有助于校正慧差和像散。单色仪参数如表 2 所示。

单色光准直系统由球面镜和平面反射镜组成，采用球面镜和平面镜组合的方式不仅可以提供平行光，还可以消除色

Table 2　Main parameters of monochromator system

系统参数	数值
光谱范围/nm	400～1 100
光谱带宽/nm	0.5
焦距/mm	400
扫描步长/nm	0.025
波长准确度/nm	±0.1

差对定标的影响。球面镜焦距为 120 mm，可以提供光束口径为 20 mm 的平行光，待测成像光谱仪的焦距为 30 mm，相当于相对孔径为 2/3，大于待测成像光谱仪的相对孔径，可以充满待测成像光谱仪的视场光阑，满足定标需求。

为了对 PGP 成像光谱仪进行不同视场的定标，全视场光谱定标系统设计引入了折转镜作为视场扫描系统(如图 3 中 M_8)。折转镜可以在直线电机的带动下在线性滑轨上自由转动和滑动。线性滑轨的长度为 130 mm，镜子的大小为 25 mm×25 mm，转动的最大视场角范围为±20°，从而为 PGP 成像光谱仪提供不同视场的平行光。由于折转镜的转动和滑动采用计算机进行闭环控制，因此对成像光谱仪实现自动化全视场光谱定标。

3　结果与讨论

3.1　PGP 光谱定标结果

利用本文设计的光谱定标系统对 PGP 成像光谱仪进行了全视场光谱定标，可获得成像光谱仪各个光谱通道的中心波长、光谱分辨率和谱线弯曲等性能指标。由式(6)可知，该定标系统的理想光谱曲线应服从高斯分布，因此将每个通道测出的光谱实验曲线进行高斯拟合，拟合结果如图 4 所示。

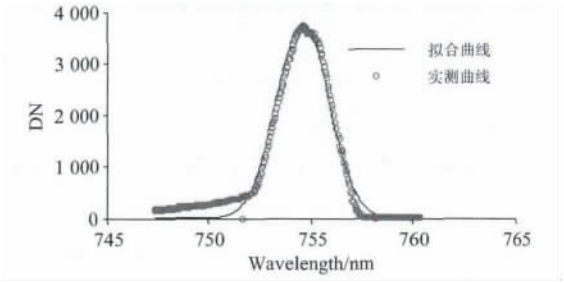


Fig. 4　Spectral response curves of 150th channel

再对高斯拟合后的光谱实验曲线进行数据分析可得每个通道的中心波长如图 5 所示(高斯曲线峰值对应的波长为中心波长)。由图 5 可知，PGP 成像光谱仪的光谱范围为 400～1 000 nm，几乎看不出谱线弯曲。

由于 PGP 成像光谱仪的光谱线性度很好，为确定中心视场的每个通道的中心波长和分辨率，可对每个通道的中心波长进行线性拟合，拟合结果见图 6 所示，其中图 6(a)为拟合曲线，图 6(b)为相应通道的光谱分辨率，中心波长的拟合值偏离实际值的标准差为 1.43 nm(最大偏离为 2.48 nm)，光谱分辨率优于 3.1 nm(标准差为 0.06 nm)。

为了便于对谱线弯曲量进行考察，图 7 中给出了 31 通道、81 通道、130 通道、176 通道、229 通道的谱线弯曲量。由图 7 可知谱线弯曲方向为两段弯向短波方向，且弯曲的大小随视场的偏离中心视场变大而增大，短波的弯曲比较严重，但所有波长的弯曲量均小于 9%像元。

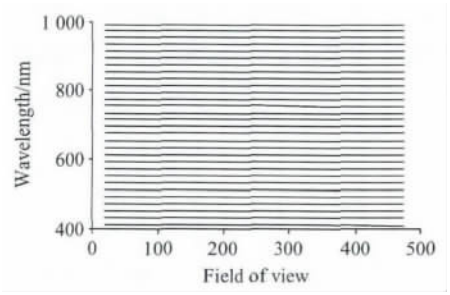


Fig. 5　Results of spectral calibration

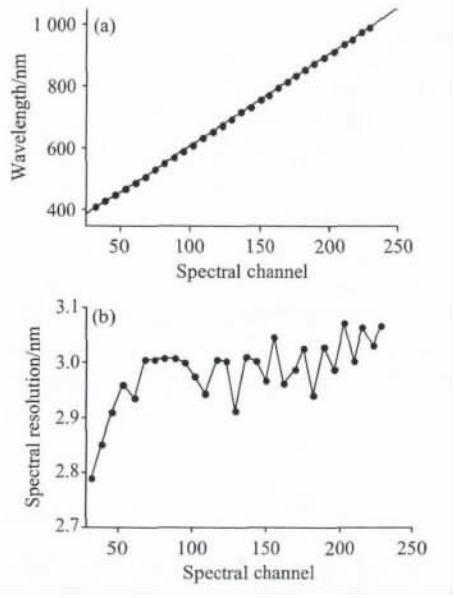


Fig. 6　Results of spectral calibration for medium spatial positions

(a): The center wavelength and fitting curves;
(b): Spectral resolution for different channels

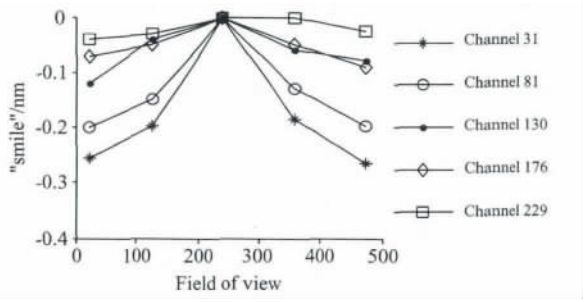


Fig. 7　Spectrum bending for part of spectral channels

3.2　PGP 光谱定标精度分析

在光谱定标的过程中，存在一些对定标结果有影响的不确定因素，其中单色仪的精度为最主要的不确定度来源，单色仪的出射单色光波长如果定位不准，那么峰值波长(即中心波长)也会有相应的偏差，则中心波长定标精度与单色仪的准确度相等为 0.1 nm。

单色仪出射单色光的光谱分布会使待测成像光谱仪的光谱分辨率变大，由式(3)，式(5)和式(7)可知单色仪造成对待测成像光谱仪测得的光谱分辨率结果相对误差为

$$\frac{\Delta\delta\lambda}{\delta\lambda}=\frac{\delta\lambda'-\delta\lambda}{\delta\lambda}=\sqrt{\frac{\delta\lambda_{\text{mono}}^2}{\delta\lambda^2}+1}-1 \tag{8}$$

将本文中单色仪的光谱带宽值和成像光谱仪的光谱带宽值带入到式(8)中，可得光谱分辨率定标精度为

$$\frac{\Delta\delta\lambda}{\delta\lambda}=\sqrt{\frac{0.5^2}{3.1^2}+1}-1\approx 1.3\%$$

4 结 论

基于单色准直光定标法设计了一种全视场自动化光谱定标系统。该定标系统的主要特点为：第一，在单色光准直系统中，用球面镜代替平行光管提供平行光，大大缩小定标系统的体积；第二，在视场扫描系统中，采用折转镜来控制光线入射的角度，可实现各种与 PGP 成像光谱仪同类型的成像光谱仪全视场光谱定标的工作；第三，在全视场光谱定标过程中可对整个定标系统进行自动化控制，即可节省人力，也可避免人工参与带来的额外误差。光谱定标实验结果表明：待测的 PGP 成像光谱仪具有良好的线性度，光谱分辨率优于 3.1 nm，光谱弯曲量小于 9%像元；该定标系统对 PGP 成像光谱仪的中心波长定标精度优于 0.1 nm，光谱分辨率定标精度优于 1.3%。该成像光谱仪全视场自动化光谱定标系统具有结构紧凑、通用性强、光谱定标精度较高等特点，可用于实现 PGP 成像光谱仪及其他同类型成像光谱仪的光谱定标。

References

[1] Zhu S B, Tang M X, Ji Y Q, et al. Proc. of SPIE, 2009, 7156: 71560L1.

[2] Hedman T R, Beach R, Jarecke J P. U. S. Patent, 2009, 6111640.

[3] Didier R, Richard S, Philippe D. Proceedings of SPIE, 2003, 4891: 505.

[4] Curtiss D O, Jeffrey B, Robert L A, et al. Optics Express, 2002, 10(4): 210.

[5] Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Remote Sens. Environ., 1998, 65: 227.

[6] Jerry Z, Daniel G, Robert M, et al. Proceedings of SPIE, 2004, 5425: 182.

[7] Brigit S, Jochen F, Peter G, et al. Proc. of SPIE, 2006, 636110: 1.

[8] Zhang L F, Huang C P, Wu T X, et al. Sensors, 2011, 11: 2408.

[9] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(11): 2347.

[10] HE Zhi-ping, LIU Qiang, XU Wei-ming, et al(何志平，刘 强，徐卫明，等). Infrared and Laser Engineering (红外与激光工程), 2008, 37: 531.

[11] QI Xiang-dong, HAN Peng-peng, PAN Ming-zhong, et al(齐向东，撖芃芃，潘明忠，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2011, 19(12): 2870.

[12] WANG Jian-yu(王建宇). Infrared(红外), 1990, 9(4): 277.

Full-Field and Automatic Methodology of Spectral Calibration for PGP Imaging Spectrometer

SUN Ci[1,2], Bayanheshig[1]*, CUI Ji-cheng[1], PAN Ming-zhong[1], LI Xiao-tian[1], TANG Yu-guo[1]

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to analyze spectral data quantitatively which is obtained by prism-grating-prism imaging spectrometer, spectral calibration is required in order to determine spectral characteristics of PGP imaging spectrometer, such as the center wavelength of every spectral channel, spectral resolution and spectral bending. A spectral calibration system of full field based on collimated monochromatic light method is designed. Spherical mirror is used to provide collimated light, and a freely sliding and rotating folding mirror is adopted to change the angle of incident light in order to realize full-field and automatic calibration of imaging spectrometer. Experiments of spectral calibration have been done for PGP imaging spectrometer to obtain parameters of spectral performance, and accuracy analysis combined with the structural features of the entire spectral calibration system have been done. Analysis results indicate that spectral calibration accuracy of the calibration system reaches 0.1 nm, and the bandwidth accuracy reaches 1.3%. The calibration system has merits of small size, better commonality, high precision and so on, and because of adopting the control of automation, the additional errors which are caused by human are avoided. The calibration system can be used for spectral calibration of other imaging spectrometers whose structures are similar to PGP.

Keywords Full-field spectral calibration; PGP Imaging Spectrometer; Monochromatic light method; Spectral bandwidth; Spectral bending

* Corresponding author

(Received Aug. 21, 2013; accepted Nov. 20, 2013)