文章编号 1004-924X(2014)10-2585-07

单色仪与成像光谱仪的交互光谱定标

曹海霞[1,2*],吴 娜[1],冯树龙[1],潘明忠[1],张永超[1,2],崔继承[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:为了提高成像光谱仪的光谱定标精度,降低定标过程的复杂度,本文基于单色仪扫描定标法的原理,提出了交互光谱定标的思想,设计了适用于单色仪与成像光谱仪的交互光谱定标系统。分别对单色仪与成像光谱仪进行了光谱定标实验,并对定标数据进行了处理分析。结果显示:单色仪光谱定标精度优于±0.1 nm;成像光谱仪的光谱区大于 400～800 nm,光谱分辨率优于 3 nm。该交互光谱定标系统避免了对单色仪和成像光谱仪分别定标需要两个探测器的弊端,定标过程中只需切换定标模式,简化了定标过程,能够同时保证单色仪与成像光谱仪的定标精度,具有复杂度低、通用性强、适用范围广及较高的定标精度等优点,可满足实际使用要求。

关 键 词:单色仪;成像光谱仪;交互光谱定标;定标精度
中图分类号:TP73;TH744.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142210.2585

Cross-spectral calibration for monochromator and imaging spectrometer

CAO Hai-xia[1,2*], WU Na[1], FENG Shu-long[1], PAN Ming-zhong[1], ZHANG Yong-chao[1,2], CUI Ji-cheng[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*)
* *Corresponding author, E-mail: caohaixia*132@163.*com*

Abstract: To improve the spectral calibration accuracy of an imaging spectrometer and to reduce the complicity of the calibration process, the idea of the cross-spectral calibration was proposed based on the calibration principle of monochromator scanning. Then, a cross-spectral calibration system was designed for a monochromator and an imaging spectrometer. The spectral calibration experiments for the monochromator and the imaging spectrometer were performed and the spectral calibration data were processed. The experimental results show that the accuracy of the spectral calibration for the monochromator is better than ±0.1 nm, the spectral range of the imaging spectrometer is greater than 400－800 nm and its spectral resolution is better than 3 nm. The cross-spectral calibration system overcomes the defect that the spectral calibration for the monochromator and the imaging spec-

收稿日期:2013-07-08;修订日期:2013-09-03.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108032);国家重大科研装备研制项目(No. ZDYZ2008-1);中国科学院重大科研装备研制项目(No. YZ200804);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 11YQ120023);吉林省重大科技攻关项目(No. 09ZDGG005);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20126012)

trometer requires two detectors, and the calibration is implemented by switching the calibration modes only. It offers higher calibration accuracy for both the monochromator and the imaging spectrometer, and has the merits of low complexity, versatility, wider range and high calibration accuracy.

Key words: monochromator; imaging spectrometer; cross-spectral calibration; calibration accuracy

1 引　言

成像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，成像光谱遥感技术不断发展，并在国防军事、环境检测、大气探测、食品工业、赝品识别等领域发挥了越来越重要的作用。成像光谱数据的定量化研究是成像光谱仪器行业关注的重要课题之一[1-7]，其关键是成像光谱仪的定标。光谱仪的定标包括光谱定标、几何定标和辐射定标。其中，光谱定标不仅是确定系统光谱特性指标的重要手段和提高成像光谱测量数据可信度的重要依据，还可为几何定标和辐射定标提供保证，因此成像光谱仪的光谱定标非常重要[2]。

成像光谱仪光谱定标的目的旨在确定各光谱通道的中心波长及光谱分辨率，即探测像元在光谱维方向上的光谱响应曲线[8]。目前，成像光谱仪常用的光谱定标方法主要有特征光谱定标法和单色仪波长扫描法。特征光谱定标法具有操作简单、易实现的优点，但是无法实现成像光谱仪全波段中心波长的标定及对应光谱分辨率的标定，仅适用于全波段中心波长为线性关系的光谱仪中心波长的标定，适用范围窄。而单色仪波长扫描法能够得到每个光谱通道的光谱响应曲线，通过光谱响应曲线可获得成像光谱仪每一光谱通道的中心波长及光谱分辨率，具有定标精度高、全波段定标及适用范围广等优点，故日渐成为成像光谱仪系统光谱定标的首选[9]。目前，AVIRS、MODIS、Hyperion、OMIS、PHI[10-14] 等典型的成像光谱仪都采用该方法进行光谱定标。但是，在采用单色仪波长扫描法定标时，受时间和环境等外在因素的影响，单色仪输出单色光的波长会发生漂移，不能保证单色光的准确度，也就不能保证成像光谱仪光谱定标的精度。如果在进行光谱定标前先定标单色仪，则需要额外的探测器，从而增加光谱定标的工作负担，使定标过程更复杂。鉴于此，本文综合了单色仪与成像光谱仪光谱定标的特点，提出了适用于单色仪与成像光谱仪的交互光谱定标思想，并基于该定标思想设计了相应的交互光谱定标装置。此定标装置利用一个探测器即可完成单色仪和成像光谱仪的定标，能够保证单色仪与成像光谱仪的定标精度，具有复杂度低、易于实现、操作简单及通用性强等优点。

2 交互光谱定标思想及装置

交互光谱定标思想的核心为：在对单色仪进行光谱定标时，使用待定标的成像光谱仪作为能量探测元件接收单色仪输出的光电信号；在对成像光谱仪进行光谱定标时，使用标定过的单色仪作为单色光输出系统。

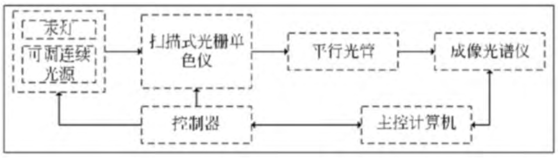


图 1　交互光谱定标系统原理框图

Fig. 1　Schematic of cross-spectral calibration system

图 1 为基于交互光谱定标思想设计的交互光谱定标装置原理图。该装置包括光源系统、扫描式光栅单色仪、控制器、平行光管、成像光谱仪及主控计算机。其中，光源系统包括汞灯光源和可调连续光源，可调连续光源采用高精度稳流控制电源供电的光源；扫描式光栅单色仪采用 Czerny-Turner 水平结构，通过控制器精确控制丝杆实现高分辨率单色光的输出。交互光谱定标装置的主要工作过程为：通过光源切换开关转换定标模式，光源系统输出的光经扫描式光栅单色仪色散后，由平行光管扩束、准直，最后由成像光谱仪接收；主控计算机通过 USB 接口与控制器进行数据通信，实现单色仪波长扫描、光源能量控制、单色仪步进数输出等功能，并通过 GigE（千兆网口）接口对成像光谱仪进行参数设置及成像光谱数据的获取，系统参数如表 1 所示。此交互光谱定标装置可大大提高光谱定标的效率及精度，降低定标系统的复杂度。

表 1　交互光谱定标系统的主要技术参数

Tab. 1　Parameters of cross-spectral calibration system

仪器主	单色仪		FPG-6C 平行光管	
要指标	光谱/nm	焦距/mm	焦距/mm	口径/mm
数值	350～900	400	500	80

3　交互光谱定标过程

3.1　光路调整

交互光谱定标的第一步是调整光路，在单色仪的入缝处放置连续光源，出缝处放置平行光管，平行光管的末端放置成像光谱仪。打开连续光源、单色仪及成像光谱仪，启动计算机应用控制程序，建立单色仪与成像光谱仪之间的通讯。调整成像光谱仪与平行光管的相对位置，当在程序界面上出现探测器接收到单色仪经平行光管出射的准直平行光时，光路调整完毕。

3.2　单色仪的光谱定标

光路调整完毕后要对单色仪进行光谱定标，此时将成像光谱仪的探测器作为探测元件接收单色仪输出的光电信号。采用具有特征光谱的汞灯作为光源，将光源切换为单色仪定标模式。图 2 为单色仪光谱定标系统的实物图。

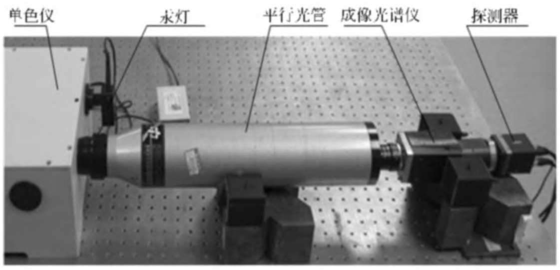


图 2　单色仪光谱定标系统实物

Fig. 2　Picture of spectral calibration system for monochromator

主控计算机通过控制器调控步进电机驱动正弦机构的丝杆使光栅以一定步长进行扫描。如图 2 所示，单色仪输出的单色光通过平行光管成像于成像光谱仪的入射狭缝处，准直后由成像光谱仪分光，成像于探测器的感光面上，探测器通过 GigE 连接到主控计算机上。随着电机的步进，光电信号强度 DN 数据及对应的步进数 N 实时保存在.xls 文件中。通过调用已保存数据，绘制出汞灯的特征光谱曲线，如图 3 所示。该曲线以扫描步进数 N 为横轴，以光电信号强度 DN 为纵轴。对汞灯的特征谱线及谱线峰值对应的扫描步进数进行数据拟合，得到单色仪输出波长 λ 与扫描步进数 N 之间的关系，如图 3(c)所示。图中 X 轴为成像光谱仪的空间维。

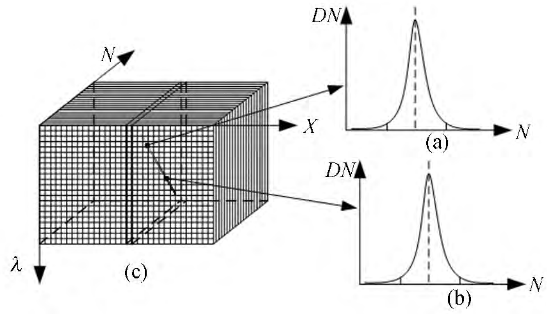


图 3　汞灯光谱曲线(a 和 b)及其拟合结果(c)

Fig. 3　Spectral curves of mercury lamp and their fitting results

3.3　成像光谱仪光谱定标

3.3.1　成像光谱仪的基本原理

成像光谱仪是集成像仪、光谱仪于一体的新型光谱仪器，可同时获得观测目标的空间信息及光谱信息。成像光谱仪获得的数据包括二维空间信息及一维光谱信息，通常称为三维数据立方体。针对待测目标空间维中的任一点，提取其对应的光谱响应，可实现对观测目标的分析和判断。

3.3.2　光谱定标原理

成像光谱仪系统的光谱响应 $S_i(\lambda)$ 表示为[15,17]：

$$S_i(\lambda)=\tau_o(\lambda)S_s(\lambda)R_d(\lambda)R_e(\lambda)\ ,\tag{1}$$

其中：$\tau_o(\lambda)$ 为系统的光学效率，$S_s(\lambda)$ 为色散系统的传递函数，$R_d(\lambda)$ 为探测器的光谱响应率，$R_e(\lambda)$ 为电子学系统的光谱响应率。

理想情况下，成像光谱仪系统各部分均具有均匀的光谱响应，因此 $\tau_o(\lambda)$，$S_s(\lambda)$，$R_d(\lambda)$，$R_e(\lambda)$ 均为常数。当狭缝无限窄时，系统的光谱响应可用矩形函数表示，则成像光谱仪系统光谱维第 i 波段的光谱响应可表示为：

$$S_i(\lambda)=\begin{cases}1,\lambda_1-\frac{1}{2}\Delta\lambda\leqslant\lambda\leqslant\lambda_i+\frac{1}{2}\Delta\lambda\\0,\lambda<\lambda_i-\frac{1}{2}\Delta\lambda,\lambda>\lambda_i+\frac{1}{2}\Delta\lambda\end{cases}.\tag{2}$$

不过，实际成像光谱仪的狭缝具有一定的宽度，系统的光谱响应 $S_i(\lambda)$ 通过高斯函数来表

征[16-17]，即：

$$S_i(\lambda)=K\cdot\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\lambda_i}{\sigma_i}\right)^2\right], \qquad (3)$$

其中：K 为常数，λ 为波长，λ_i 为系统第 i 波段的中心波长，σ_i 为系统第 i 波段出射光斑的半径。

高斯函数的半高宽 a 即为系统的光谱分辨率 $\Delta\lambda$，即：

$$\Delta\lambda=a=2\sqrt{2\ln(2\sigma_i)}. \qquad (4)$$

系统第 i 波段的实际光谱响应离散值及高斯拟合曲线如图 4 所示。由图可以看出，高斯函数可以很好地表征成像光谱仪系统的实际光谱响应，因此通过测量第 i 波段的多个特征点的光谱响应值再进行高斯拟合，拟合后的峰值及半高宽即为该波段的实际光谱响应的中心波长 λ_i 及光谱分辨率 $\Delta\lambda$。

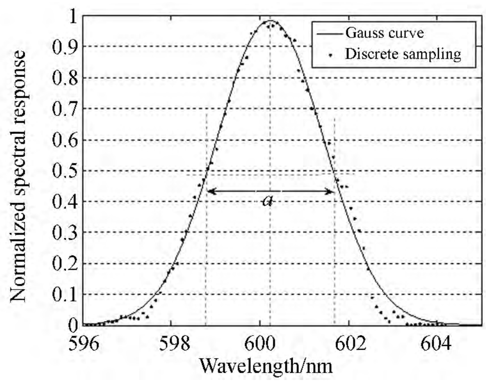


图 4　系统实际光谱响应及高斯拟合曲线

Fig. 4　Practical spectral response and its Gauss fitting curve

3.3.3　成像光谱仪光谱定标过程

单色仪光谱定标完成之后，单色仪输出单色光波长 λ 与步进电机扫描步进数 N 之间的对应关系就已确定，第三步即是使用标定过的单色仪作为单色光输出系统对成像光谱仪进行定标。切换光源进入成像光谱仪的定标模式。图 5 为成像光谱仪光谱定标系统的实物图。

调整成像光谱仪与平行光管之间的相对位置，令空间维定标像素点 P_1 接收光电信号；对单色仪及成像光谱仪进行参数设置，包括定标区间、步进波长 $\Delta\lambda$、探测器的积分时间及帧频等。设钨灯的电源电压为 U，探测器的积分时间为 t_f，探测器的量化位数为 12 bit，因此探测器输出 DN 的最大值为 4 096。为了保证成像光谱仪获取的数据具有较好的信噪比且不饱和，设置探测阈值为 2 500～3 500。用前置单色仪进行波长扫描，成像光谱仪的探测器接收单色光。对于特定的 U_1，t_{f1}，在波长 $\lambda_0\sim\lambda_1$，探测器的输出应在 2 500～3 500；当探测器的输出不在 2 500～3 500 时，记录此时的 λ_0，λ_1，U_1，t_{f1}，调整 U 及 t_f 将探测器的输出调整在2 500～3 500，重复上述过程。当前置单色仪在 400～800 nm 扫描完成之后，得到电压、积分时间关于波长扫描范围的一组对应关系表，即$(U,t_f)\rightarrow\lambda_i\sim\lambda_{i+1}$。根据对应关系表对成像光谱仪进行自动光谱定标，相邻定标子区间存在一定的光谱重叠，其对应流程图如图 6 所示。根据对应关系表在定标子区间内设置对应的光源辐射亮度与探测器的积分时间，探测器的积分时间在定标子区间内不会发生变化，所以对

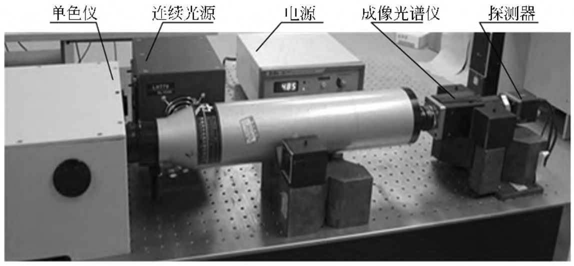


图 5　成像光谱仪光谱定标系统实物

Fig. 5　Picture of spectral calibration system for imaging spectrometer

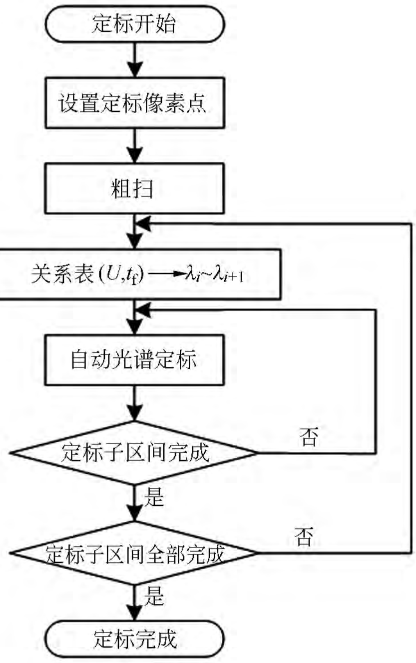


图 6　成像光谱仪定标流程图

Fig. 6　Flow chart of spectral calibration for imaging spectrometer

成像光谱仪的光谱定标结果不会产生影响。

记录定标数据，设置波段通道数，即可查看定标像素点 P_1 任意有效波段的光谱响应曲线。实际得到的光谱曲线存在一定的噪声，需要对测试得到的光谱响应曲线进行数字滤波和高斯拟合，再分析得到各波段的中心波长、全波半高宽、光谱取样间隔等参数。调整成像光谱仪与平行光管的相对位置，令空间维的其他定标像素点接收单色仪输出单色光的光电信号；重复上述工作，直到得到空间维所有有效像素在有效光谱波段的光谱响应曲线。本文仅对成像光谱仪的中心视场进行了光谱定标，计算了对应的中心波长及光谱分辨率。

4　交互光谱定标结果及分析

采用本文设计的交互光谱定标方法对单色仪进行光谱定标时，将汞灯作为光源，汞灯的特征光谱定标数据如表 2 所示。对单色仪的光谱定标数据进行拟合，得到单色仪的定标表达式为：

$$\lambda=0.025\ 19N+605.837\ 8\ . \tag{5}$$

表 2　单色仪光谱定标数据

Tab. 2　Data of spectral calibration for monochromator

特征光谱/nm	扫描步进数
579.1	−1 062
546.1	−2 370
435.8	−6 749
404.7	−7 985

对单色仪的光谱定标结果进行残差分析，分析结果如图7所示。由图可知，单色仪的光谱定标精度优于±0.1 nm，且单色仪的步进当量约为 0.025 19 nm/step，完全满足成像光谱仪光谱定标的要求。

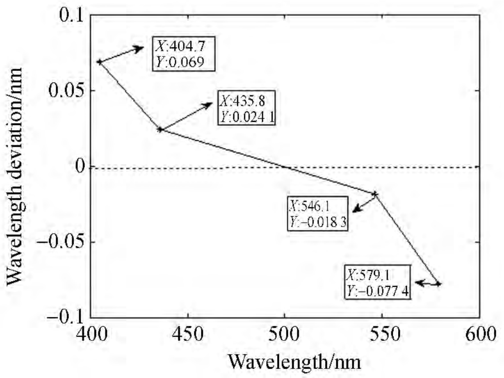


图 7　单色仪光谱定标的波长精度曲线

Fig. 7　Curve of wavelength precision for monochromator calibration

本文使用经高精度光谱定标的单色仪为成像光谱仪提供单色光，对成像光谱仪进行光谱定标。成像光谱仪中心视场部分波段的定标结果如表 3 所示。

表 3　成像光谱仪部分波段光谱定标结果

Tab. 3　Results of spectral calibration of several bands for imaging spectrometer　(nm)

波段	中心波长	光谱分辨率	波段	中心波长	光谱分辨率
27	401.24	2.94	110	634.31	2.58
40	430.28	2.70	120	662.60	2.66
50	461.67	2.86	130	690.88	2.28
60	490.07	2.73	140	719.47	2.80
70	519.00	2.81	150	748.76	2.69
80	548.09	2.69	160	779.30	2.57
90	577.08	2.58	167	801.72	2.34
100	605.84	2.53			

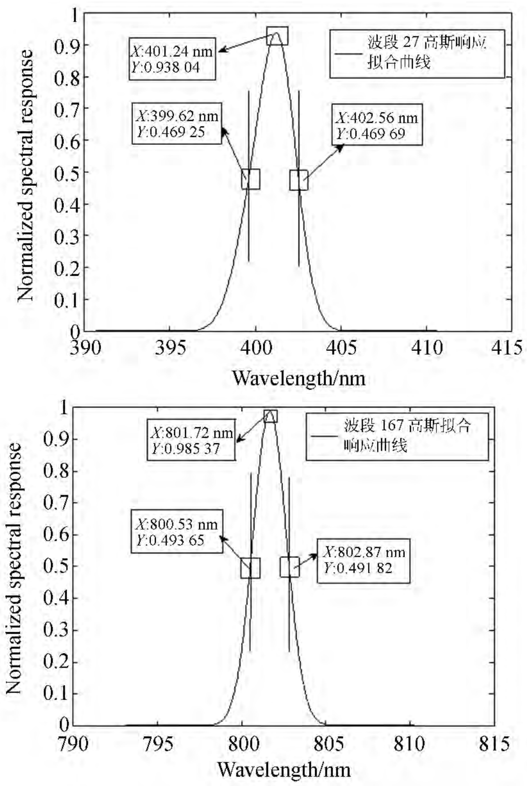


图 8　成像光谱仪的光谱范围

Fig. 8　Spectral range for imaging spectrometer

根据成像光谱仪光谱定标数据的处理结果，系统第26波段之前的波段对光谱的响应比较微弱，考虑到二级光谱的影响，舍弃了800 nm以后的波段。第27波段及第167波段高斯拟合后的光谱响应曲线如图8所示，两波段的中心波长分别为401.24及801.72 nm，光谱分辨率分别为2.94及2.34 nm，因此系统的光谱为399.77～802.89 nm，满足系统设计的400～800 nm的指标要求。图9为视场中心像素点各波段的中心波长及其多项式拟合曲线。

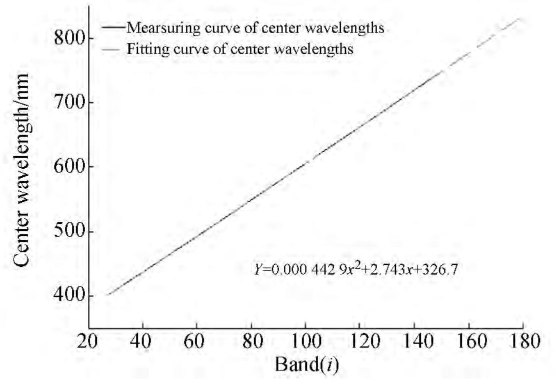


图9 成像光谱仪中心视场各波段中心波长及拟合曲线

Fig. 9 Center wavelength and fitting curve for every channel of medium spatial positions

对成像光谱仪各波段的中心波长进行二次多项式拟合并进行统计分析，分析结果如表4所示。从表中可以看出，二次多项式拟合方法能够很好地反应成像光谱仪各波段中心波长的变化趋势，因此只选择数个波段进行光谱定标，再进行二次多项式拟合，也可以比较精确地得到各波段的中心波长。统计分析成像光谱仪探测器像面全部光谱波段的光谱分辨率，结果见表4。经数值分析得到，光谱分辨率的平均值为2.66 nm，标准偏差为0.19 nm，优于3 nm，满足设计要求；且全波段内光谱分辨率均匀，满足实际使用要求。

表4 数据统计分析结果

Tab. 4 Result of statistical analysis (nm)

统计分析	标准偏差	最小值	最大值	平均值
中心波长拟合误差	0.40	0.51	0.52	—
光谱分辨率	0.19	2.28	2.94	2.66

5 结 论

为了提高成像光谱仪的光谱定标精度，降低光谱定标系统的复杂度，本文提出了交互光谱定标的思想并设计了相应的交互光谱定标系统。定标结果表明，单色仪的光谱定标精度优于±0.1 nm，成像光谱仪的光谱分辨率优于3 nm。这种交互光谱定标方法的优势在于：(1)在成像光谱仪光谱定标前对单色仪进行光谱定标，避免外在因素对单色仪输出波长的影响，保证了单色仪输出单色光的准确性，从而进一步保证了成像光谱仪光谱定标的定标精度；(2)同一光路系统中同时实现单色仪与成像光谱仪的光谱定标，简化了光路调整过程；(3)光路调整完毕后，定标过程中只需切换定标模式，简化了定标过程，避免了过多人工干预所带来的额外误差。

参考文献：

[1] 杨晋，唐玉国，巴音贺希格，等. Dyson同心光学系统的消色差Féry棱镜高光谱成像仪的设计[J]. 光学学报，2012. 32(11)：113003.

YANG J，TANG Y G，BAYANHESHIG，*et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Fery prism[J]. *Acta Optica Sinica*.，2012，32(11)：113003. (in Chinese)

[2] 齐向东，撖芃芃，潘明忠，等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. 光学 精密工程，2011，19(12)：2871-2876.

QI X D，HAN P P，PAN M ZH，*et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Opt. Precision Eng.*，2011，19(12)：2871-2876. (in Chinese)

[3] 潘明忠，亓洪兴，肖功海，等. 便携式地面成像光谱辐射计的设计[J]. 红外，2010，31(1)：1-7.

PAN M ZH，QI H X，XIAO G H，*et al.*. Design of the compact ground radiometer[J]. *Infrared*，2010，31(1)：1-7. (in Chinese)

[4] BROWN T J，CORBETT F J，SPERA T J，*et al.*. Thermal infrared push broom imagery acquisition and processing[J]. *SPIE*，1981，304：37-56.

[5] DINER D J，BRUEGGE C J，MARTONCHIK J V，*et al.*. MISR：a multiangle imaging spectroradi-

ometer for geophysical and climatological research [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1989, 27: 200-214.

[6] SAINTPE O, DONNADIEU O, DAVANCENS R, *et al.*. Development of a 2-D array for 1 to 2.35 mm hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 1997, 2816: 138-149.

[7] 郑玉权,王慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学 精密工程,2009,17(11):2629-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of systems for spaceborne hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese)

[8] 王加鹏,王淑荣,徐领娣,等. 紫外辐射计的波长定标及不确定度分析[J]. 光电工程,2008,35(6):42-47.
WANG J P, WANG SH R, XU L D, *et al.*. Wavelength calibration for ultraviolet spectroradiometer and analysis of its uncertainty[J]. *Opto-electronic Engineering*., 2008, 35(6): 42-47. (in Chinese)

[9] 董宁宁,李敏,刘震,等. 极紫外单色仪波长标定[J]. 光学 精密工程,2008,16(9):1660-1665.
DONG N N, LI M, LIU ZH, *et al.*. Wavelength calibration of extreme ultraviolet monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1660-1665. (in Chinese)

[10] 郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. 光学 精密工程,2010,18(11):2347-2354.
ZHENG Y Q. Precise spectral calibration for hypespectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2347-2354. (in Chinese)

[11] THOMAS G C, ROBERT O G, MICHAEL L. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *SPIE*, 1990, 1298: 37-49.

[12] AMOLD G T, FITZGERALD M F, GRANT P S, *et al.*. MODIS airborne simulator radiometric calibration [J]. *SPIE*, 1996, 2820: 56-66.

[13] LUSHALAN L, PETER J, DARREL G, *et al.*. Performance characterization of the hyperion imaging spectrometer instrument [J]. *SPIE*, 2004, 4135: 264-275.

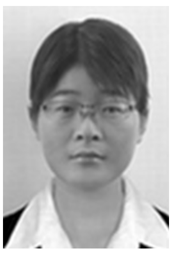
[14] JERRY Z, DANIEL G, ROBERT M. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 2004, 5425: 182-188.

[15] 王建宇. 成像光谱仪的光谱响应函数及光谱分辨能力[J]. 成像光谱技术,1991,10:44-50.
WANG J Y. Spectral response and spectral resolution of hyperspectral imager[J]. *Imaging Spectrum*., 1991, 10: 40-50. (in Chinese)

[16] 王建宇. 成像光谱仪光谱分辨率的分析[J]. 红外研究,1990,9(4):277-286.
WANG J Y. Analysis of the resolution of hyperspectral imager[J]. *Infrared*, 1990, 9(4): 277-286. (in Chinese)

[17] 刘玉娟. 基于同心光学系统的新型成像光谱仪研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2012:93-107.
LIU Y J. *The Study on Newly Imaging Spectrometers Based on Concentric Optics*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012: 93-107. (in Chinese)

作者简介:



曹海霞(1986—),女,山东聊城人,博士研究生,2009 年于聊城大学获得学士学位,主要从事光栅检验及光谱仪器研发方面的研究。E-mail:caohaixia132@163.com