光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022120501

单透镜成像光谱设备光谱定标方法

孙玮琢[1]，吕群波[2]，何培栋[2*]

（1. 中国人民解放军 91550 部队，辽宁 大连 116023；2. 中国科学院空天信息创新研究院，北京 100094）

摘　要： 针对单透镜成像光谱仪的光谱标定展开研究，利用单色仪扫频方式标记波长与像平面的相对关系，利用汞灯特征谱线进行验证。针对选用的单透镜型号，设计定标方案及步骤，根据方案搭建实验平台，完成实验分析验证，最终结果表明该定标方法适用于单透镜成像光谱设备。

关键词： 单透镜成像；成像光谱仪；光谱定标

中图分类号： TH74　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0284－05

A Spectral Calibration Method of the Single-Lens Imaging Spectrometer

SUN Weizhuo[1], Lü Qunbo[2], HE Peidong[2]

（1. 91550 Unit of the PLA, Dalian 116023, CHN;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, CHN）

Abstract: The spectral calibration of the single-lens imaging spectrometer was studied. The relative relationship between the wavelength and the image plane was marked by the frequency sweep of the monochromator, and the characteristic spectral line of the mercury lamp was used for verification. According to the selected single lens model, the calibration scheme and steps were designed. An experimental platform was built according to the scheme, and the experimental analysis and verification were completed. The final results show that the calibration method in this paper is suitable for single-lens imaging spectral equipment.

Key words: single-lens imaging; single-lens imaging spectrometer; spectral calibration

0　引言

成像光谱技术是将成像与光谱探测集为一体的光学遥感技术，拍摄所得的数据立方体中包含了景物目标的二维空间图像和一维光谱辐射（也称为景物目标的图谱信息），能够从图谱合一的数据立方体上的任一像元获取目标的光谱曲线，同时可以提供不同波段的空间图像[1-4]。由于成像光谱数据可以对景物目标在几何形状以及光谱特征两个方面进行分析和识别，其在军事、勘探、环境监测等诸多领域中得到了广泛应用。

随着计算机技术的发展，计算能力大幅提升，通过对已有图谱信息进一步优化处理，能够再次提升图谱质量，而该种方式利用的就是计算成像技术[5-6]。计算成像技术推动了成像光谱技术的进一步发展，很多计算成像技术已经成功应用于成像光谱领域，例如编码孔径技术、计算层析技术等。单透镜成像技术是基于计算成像技术发展而来的，利用单透镜的轴向色散特性实现图谱信息的获取，利用单片透镜构成的光学系统代替传统复杂的光学系统，利用后端的算法处理替代前端的光学处理，不仅简化了光学系统复杂度，并且能够获取满足需求的图谱信息。

光谱定标是成像光谱仪实现光谱数据定量化的关键技术。光谱定标是为了确定各通道光谱中心波长位置，一般常用波长扫描法和特征光谱定标法两

收稿日期：2022－12－05.

基金项目：中国科学院战略先导项目（XDA28050401）.

* **通信作者：**何培栋　**E-mail：** hepeidong319@126.com

种。基于单透镜的成像光谱技术区别于传统成像光谱技术，需要利用计算方式实现光谱复原，无法直接完成光谱中心波长的标定，通过标定波长与像平面位置关系，利用后期算法处理复原后得到中心波长。本文针对单透镜成像光谱设备的光谱定标算法进行了研究，设计了完整的实验方案，并通过实验验证了方法的可行性。

1　单透镜成像光谱仪工作原理

轴向色差主要是由于透镜的加工材料对于不同色光具有不同的折射率导致的，不同色光经过单透镜后聚焦在不同的光轴位置，有时也称为轴向色散[7]，如图 1 所示，在不同像平面位置产生弥散斑，如图 2 所示。

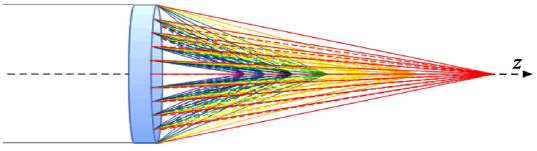


图 1　轴向色散示意图



图 2　色差形成的弥散斑

轴向色散导致不同色光的焦距不同，对于焦距的计算首先需要计算透镜材料的折射率。常用的透镜材料主要是光学玻璃[8]，可以分成两类：冕牌玻璃和火石玻璃，其中，冕牌玻璃具有低折射率以及低色散，而火石玻璃具有高折射率和高色散，分别用 K 和 F 表示。

对于不同波长的折射率求解，可以应用柯西色散公式[9]：

$$n_\lambda = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \tag{1}$$

上式中的系数可以通过玻璃目录中给定的特定波长折射率求解得到。

利用柯西色散公式进行折射率计算，然后代入透镜焦距公式得到：

$$f_\lambda = \frac{n_\lambda r_1 r_2}{(n_\lambda - 1)[n_\lambda (r_2 - r_1) + (n_\lambda - 1)d]} \tag{2}$$

式中，f_λ 表示不同色光的透镜焦距，n_λ 表示透镜材料对于不同色光的折射率，r_1 和 r_2 分别表示透镜的曲率半径，d 表示透镜的光学厚度。

利用透镜的轴向色差特性建立一个图谱获取模型，当光经过透镜后，会受到透镜的调制，发生衍射现象。不同的单色光经过透镜后会聚焦到不同的位置，并且光强分布也存在差异性，在透镜位置建立坐标系 xy，在成像位置建立坐标系 $x_j y_j$，光轴沿 z 轴方向，如图 3 所示[10]。

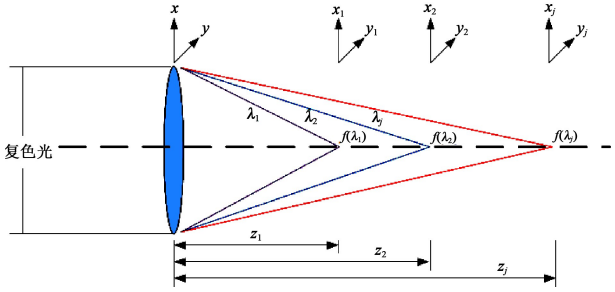


图 3　单透镜成像图谱获取模型

该模型利用了单透镜的轴向色散特性，沿光轴方向移动探测器，在特定位置采集数据，数据包含了不同波段的图像信息，称为混合图谱，通过计算方式实现图谱复原。

2　光谱定标方案设计

本文装置通过扫描方式以及后期的数据重构来获取光谱信息，无法直接标定光谱中心波长的位置。本文的光谱定标主要解决准焦波长与像平面的相对关系问题[11]。定标装置包括单色仪、平行光管、单透镜、CCD 以及二维位移平台，如图 4 所示。

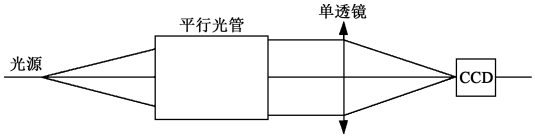


图 4　光谱标定方案示意图

透镜参数为：直径 50.8 mm，焦距 200 mm@587.6 nm，材质为 K9 玻璃；分别选取 0.520，0.530，0.540，0.550，0.560，0.570，0.580，0.590 μm 波长进行标定，计算各波长的实际焦距值、焦距间差值以及与设计焦距的相对位移大小，如表 1 所示。

根据表 1 可以发现，焦距间差值随着波长增加

而减小，标定前需要确定采集位置，并设定采样间隔，但是采集位置很难确定，并且焦距差值在微米级别，进一步增加了定位的难度，因此，为了降低难度，首先进行粗调，将焦距距离设定为大约 199 mm 左右位置，然后通过位移平台进行移动采样，采样间隔 50 μm。

表 1 计算结果表

波长/μm	焦距/mm	差值/mm	相对位移/mm
0.520	198.715 2	—	−1.284 8
0.530	198.934 1	0.218 9	−1.065 9
0.540	199.141 7	0.207 6	−0.858 3
0.550	199.338 9	0.197 2	−0.661 1
0.560	199.526 6	0.187 7	−0.473 4
0.570	199.705 2	0.178 5	−0.294 8
0.580	199.875 7	0.170 5	−0.124 3
0.590	200.038 4	0.162 7	0.038 4

标定步骤如下所示：

(1)确定装置焦距大小，设定初始位置；

(2)打开单色仪，设定波长；

(3)照射装置，以一定的采样间隔移动 CCD，记录各采集位置并进行编号；

(4)对数据进行拟合处理，获取谱线最大值位置，记录位置编号；

(5)调整波长，重复上述步骤。

3 光谱定标实验

根据设计方案搭建实验装置，如图 5 所示。实验中 CCD 依然选用 Baumer 的 SXG10，设定曝光时间为 4.73 ms，增益为 1；单色仪型号为 IHR320，波长范围 0.150～40 μm，分辨率为 0.06 nm。



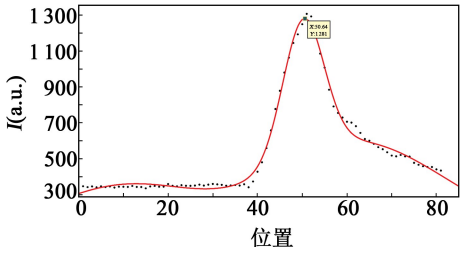
图 5 实验装置图

首先将单透镜与位移平台固定在导轨上，固定透镜与 CCD 的绝对位置，如图 6 所示。然后利用位移平台进行相对位置移动，为了确保位移平台具有足够的移动范围，将位移平台初始位置设在 10 mm 处，数据采集初始点设为 7 mm，终止点为 11 mm，间隔 50 μm，对采集数据进行数据处理，分别得到每个波长与像面的对应位置，如图 7 所示，图(a)～(h)分别为 0.520～0.590 μm 波长对应的标定图。

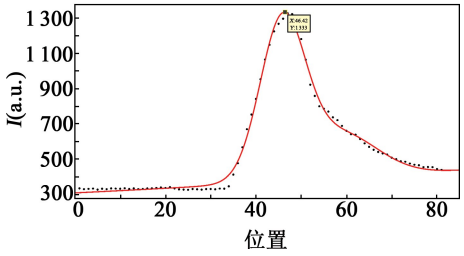


图 6 透镜及 CCD 的绝对距离

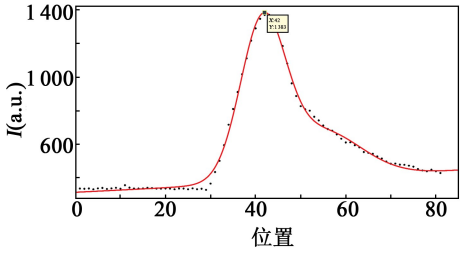
从图 7(a)中可以看出，其峰值位置在 50.64，对其取近似 50，该位置对应 0.520 μm 波长的像面位置。从图 7(b)中可以看出，其峰值位置在 46.42，对其取近似 46，该位置对应 0.530 μm 波长的像面位置。从图 7(c)中可以看出，其峰值位置在 42，该位置对应 0.540 μm 波长的像面位置。从图 7(d)中可以看出，其峰值位置在 38，该位置对应 0.550 μm 波长的像面位置。从图 7(e)中可以看出，其峰值位置在 34.37，对其取近似34，该位置对应 0.560 μm波



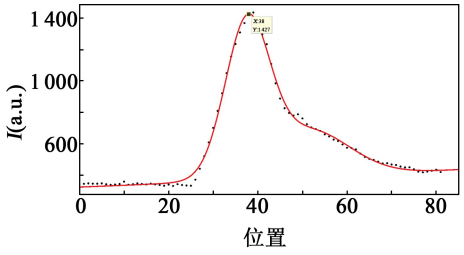
(a) 0.520 μm 标定



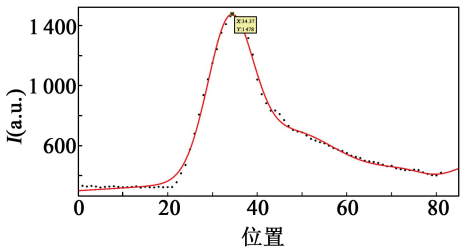
(b) 0.530 μm 标定



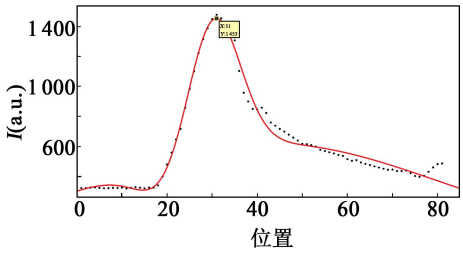
(c) 0.540 μm 标定



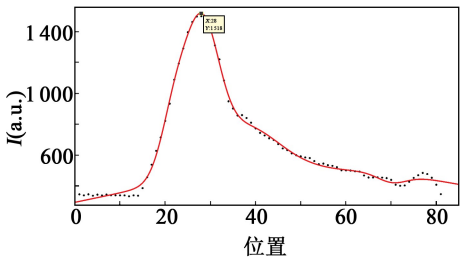
(d) 0.550 μm 标定



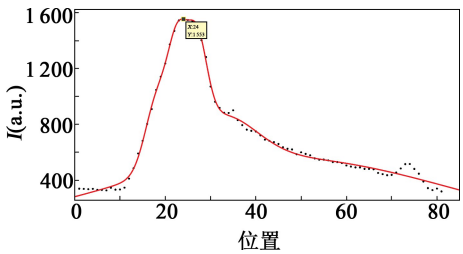
(e) 0.560 μm 标定



(f) 0.570 μm 标定



(g) 0.580 μm 标定



(h) 0.590 μm 标定

图 7　不同波长位置标定结构

长的像面位置。从图 7(f)中可以看出，其峰值位置在 31，该位置对应 0.570 μm 波长的像面位置。从图 7(g)中可以看出，其峰值位置在 28，该位置对应 0.580 μm 波长的像面位置。从图 7(h)中可以看出，其峰值位置在 24，该位置对应 0.590 μm 波长的像面位置。

根据上图可以得出不同波长与位置的对应关系，编号值进行四舍五入处理，如表 2 所示。

根据表 2 中数据，对位置与波长关系进行拟合，得到拟合方程为：

$$p = 0.001\,2\lambda^2 - 1.697\,6\lambda + 611.607\,1 \quad (3)$$

式中，波长单位为 nm。

表 2　波长与位置对应关系

波长/nm	520	530	540	550	560	570	580	590
位置编号	51	46	42	38	34	31	28	24

位置编号越小，表示 CCD 与透镜间距越大，即像距越大，实验中输入为平行光，此时像距与焦距相等，标定结果与透镜焦距变化规律相一致。

由于汞灯具有离散谱线，能够利用其特征谱进行对比验证，并对实验及拟合结果进行精度分析。

实验步骤为：

(1)利用标定的光谱设备采集汞灯数据，获取汞灯谱线；

(2)利用汞灯照射装置，以一定的采样间隔移动 CCD，记录各采集位置并进行编号；

(3)对数据进行拟合处理，与汞灯谱线进行对应，确定准焦波长与像平面关系。

利用海洋光学光谱仪对汞灯进行数据采集，得到汞灯光谱图，如图 8 所示，汞灯的五个特征峰分别位于 404.8，435.8，546.1，577.1 以及 579.2 nm 处。

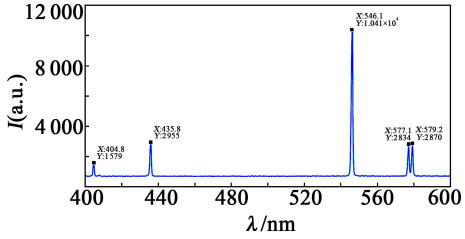


图 8　汞灯标准光谱

采集初始点设为 5 mm，终止点为 18 mm，间隔为 50 μm，其余系统参数保持一致，实验装置如图 9 所示。

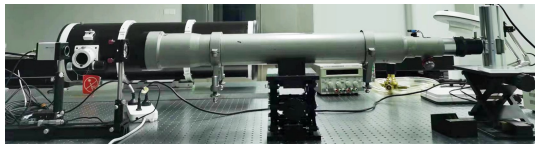


图 9　汞灯标定实验装置图

对采集数据进行处理拟合，得到如图 10 所示曲线，图中横坐标是位置编号，纵坐标表示光强。

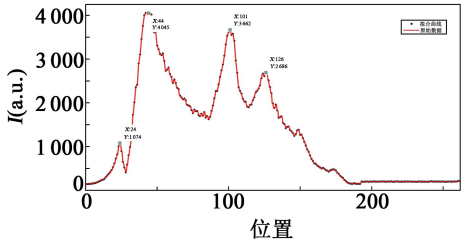


图 10　汞灯不同位置的强度曲线

汞灯的特征谱线为5条，但本文实际采集得到4条，原因是577.1与579.2 nm谱线间隔在2.1 nm左右，根据之前提出的光谱分辨率计算公式[12]可知，当前系统光谱分辨率为3.2 nm@588 nm，此时无法分辨出两个特征峰。

根据拟合公式，当 p 分别为28，41，100，121时，计算得到波长值分别为578.3，542.5，432.6，402.7 nm；利用拟合公式求解标准汞灯谱线对应位置为：27，28，40，98，119，对比标定结果如表3所示。

表3 标定结果对比表(波长单位：nm)

汞灯波长	577.1	579.2	546.1	435.8	404.8
拟合波长	578.3	578.3	542.5	432.6	402.7
差值	1.2	−0.9	−3.5	−3.2	−2.1
实际位置	28	28	41	100	121
拟合位置	27	28	40	98	119
差值	1	0	1	2	2

4 总结

本文完成了单透镜成像光谱设备的光谱定标方法的设计及实验验证，针对单透镜成像系统特性，利用单色仪完成系统标定，通过汞灯的独立谱线进行验证。通过对实验采集数据进行处理分析，拟合得到位置与波长关系表达式，利用该表达式计算汞灯的谱线位置，并与实验数据进行对比，结果误差在1～2之间，整体表明，本文设计的定标方法能够实现单透镜成像光谱设备的光谱定标，并具备可行性及适用性。

参考文献：

[1] Boardman J W. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition[C]// 12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989: 2069-2072.

[2] Curran P J. Imaging spectrometry[J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18(2): 247-266.

[3] Nascimento J M P, Dias J M B. Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 898-910.

[4] Winter M E. N-FINDR: An algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data[J]. Proc. SPIE, 1999, 3753: 266-276.

[5] Saghafi S, Becker K, Hahn C, et al. Recent development in light ultramicroscopy using aspherical optical elements[C]// Optical Systems Design 2012. Inter. Society for Optics and Photonics, 2012, 8550: 85500K.

[6] 王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报, 2015(1): 321-329.
Wang Xiaokun. Optical design of a high resolution space camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015(1): 321-329.

[7] 李晓彤，芩兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 第3版. 杭州：浙江大学出版社，2014.
Li Xiaotong, Qin Zhaofeng. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design[M]. 3rd Edition. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014.

[8] 王耀祥. 光学玻璃的发展及其应用[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 61-66.
Wang Yaoxiang. Development and applications of optical glasses[J]. J. of Applied Optics, 2005, 26(5): 61-66.

[9] 赵建林. 高等光学[M]. 北京：国防工业出版社，2002.
Zhao Jianlin. Gaodeng Guangxue [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

[10] He P, Su L, Yuan Y, et al. Spectral acquisition method based on axial chromatic and spherical aberrations of lens[J]. Opt. Express, 2019, 27(15): 21116-21129.

[11] 杨 宜. 成像光谱仪光谱定标技术[J]. 红外, 2006, 27(8): 24-26.
Yang Yi. Spectral calibration technology for imaging spectrometer[J]. Infrared, 2006, 27(8): 24-26.

[12] He P, Yuan Y, Lv Q, et al. Method for evaluating spectral resolution based on a single-lens spectrometer[J]. Appl. Opt., 2021, 60(25): 7834-7843.

作者简介：

孙玮琢(1982—)，男，博士研究生，工程师，主要研究方向为测控总体技术、试验总体技术；

何培栋(1989—)，男，毕业于北京航空航天大学，博士，光学工程专业，目前从事计算机光谱成像技术研究，包括傅里叶光谱、单透镜成像等。