

光谱成像仪快速光谱定标方法研究

王建威^{1,2}, 李伟艳¹, 孙建颖¹, 李兵¹, 陈鑫雯¹,
谭政¹, 赵娜¹, 刘扬阳^{1,3}, 吕群波^{1,3*}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094
2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191
3. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 光谱定标是确定光谱仪器各通道中心波长的过程, 为了获取光谱辐亮度, 通常需要对光谱仪器进行辐射定标, 将光谱仪器输出的数值, 映射为物理量——辐亮度。不同的光谱仪器的光谱响应不同, 因此还需要在光谱定标过程中确定各个通道的光谱响应。光谱成像仪可以看成是多个光谱仪组成的, 需要对所有点的中心波长和光谱响应进行定标。自第一台成像光谱仪诞生以来, 其定标方法逐渐固定, 通常需要采用光谱分辨率较光谱成像仪更高的单色仪输出准单色光进行光谱定标, 其准单色光的光谱带宽远小于光谱成像仪的光谱响应带宽, 可以将准单色光抽象为脉冲函数。根据脉冲函数的特性, 改变准单色光的波长, 扫描光谱成像仪的响应波长范围, 是对光谱响应函数进行间隔采样的过程, 通过光谱定标数据可以直接得到光谱成像仪的中心波长和光谱响应函数。随着技术的发展, 探测器的灵敏度越来越高, 光谱成像仪的分辨率也越来越高, 为了完成光谱定标, 对光谱定标需要的准单色光提出了更高的要求。然而准单色光的带宽越窄, 其能量越低, 获取满足信噪比要求的数据需要更长的时间, 使定标的效率降低。从光谱定标的目的出发, 结合准单色光和光谱成像仪光谱响应近似高斯函数的特点, 通过理论分析, 提出一种利用宽带定标光进行光谱定标的方法, 可以有效减少光谱定标的步骤, 提高定标的效率, 适用于光谱成像仪的快速定标。该方法用于某星载高光谱成像仪的光谱定标, 待标定光谱成像仪采用棱镜分光, 具有色散非线性特点, 光谱分辨率在2~18 nm之间变化, 同时存在较大的谱线弯曲, 导致每个像元的中心波长都不同, 需要对每个像元进行光谱定标。为了避免分视场定标导致的相邻视场中心波长不连续现象, 将单色仪发出的准单色光的光斑照亮整个狭缝, 狭缝和单色仪之间放置柱透镜和毛玻璃, 其中柱透镜用于汇聚垂直于狭缝方向的光线, 提高能量利用率; 毛玻璃用于匀化光照, 毛玻璃的存在极大地减弱了进入光谱成像仪的能量, 结合提出的方法, 增加定标光的带宽, 提高能量, 最终完成了该光谱成像仪的快速定标, 利用汞灯的特征光谱验证该成像光谱仪的光谱定标精度为0.23 nm。

关键词 高光谱成像; 谱线弯曲; 光谱定标

中图分类号: O433.11

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2013-05

引言

高光谱成像技术可以同时获取目标的图像和光谱信息, 在农业、资源、识别和生物医学等领域被广泛应用^[1-5]。为了使高光谱成像数据能够量化应用, 需要对高光谱成像仪进行系统标定, 包括光谱定标和辐射定标。一般定标流程是在装调前先标定探测器的响应不一致性, 然后进行光谱定标,

确定各个通道的中心波长和带宽, 最后选择同一通道的空间像元进行相对辐射校正和绝对辐射校正。

光谱成像仪的光谱定标是辐射定标的基础, 得到准确的中心波长和光谱响应带宽, 才能保证相对和绝对辐射定标的准确性。目前光谱定标方法主要分为2种: 一是平行单色光扫描法^[6-9], 二是特征谱线法^[10-11]。由于后者特征谱线是非连续的, 适用于基于线性色散元件的光谱成像仪的光谱定标。而第一种方法可以提供连续的单色光, 可同时标定出中

收稿日期: 2021-03-06, **修订日期**: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61635002)资助

作者简介: 王建威, 1987年生, 中国科学院空天信息创新研究院工程师 e-mail: wjw@aoe.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: lvqunbo@aircas.ac.cn

心波长和光谱分辨率,因此一般都采用该方法进行光谱定标。为了得到各个通道的中心波长和光谱响应带宽,需要采用光谱带宽远小于高光谱成像仪光谱响应带宽的单色光对各个通道进行扫描,得到每个通道对不同波长的响应值,即光谱响应函数的离散采样数据,对采样数据进行拟合,即可得到光谱响应函数。用于光谱定标的准单色光通常使用单色仪产生,产生带宽足够窄的准单色光,出射光的能量会非常弱。随着高光谱成像仪的光谱分辨率越来越高,采用这种方式进行光谱定标的难度越来越大,成本也会越来越高。

为了降低光谱定标的难度,本文基于光谱响应函数及单色光的光谱能量分布函数可近似为高斯函数的假设,提出利用宽带定标光进行光谱定标的方法,适当增加定标光的带宽,提高进入高光谱成像仪的能量,获取较高信噪比的定标数据,在保证光谱定标精度的同时,降低对定标设备的要求。

1 实验部分

1.1 待定标光谱成像仪特性

高空间分辨率是高光谱相机的一个发展趋势,但实现高空间分辨率需要牺牲其他性能,如减小探测器像元尺寸,则牺牲信噪比;增大焦距,则由于探测器阵列规模受限,导致视场减小,同时重量、体积等参数也会增加。

为了实现高空间分辨率和大视场,本文涉及的高光谱相机采用视场拼接的方式,在保证空间分辨率的情况下,实现大视场。

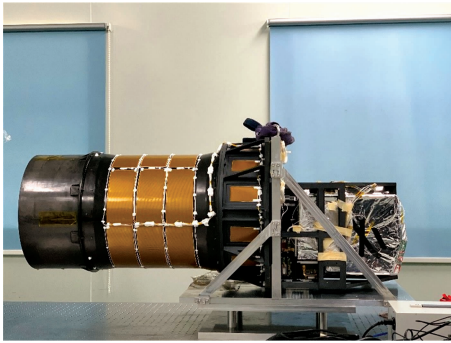


图 1 待标定高光谱成像仪

Fig. 1 To be calibrated hyperspectral image

光谱仪部分由多狭缝、包含牛角镜的 offner 结构、反射镜和双探测器组成,其中多狭缝包含 4 条单狭缝,选择其中两条狭缝可进行视场拼接。拼接后狭缝覆盖的长度大于 60 mm,对光谱仪的设计造成了很大困难,为了实现分辨率和线色散等指标,放松对 smile 的校正,最终该光谱仪具有 10 个像元的谱线弯曲,线色散长度约 90 个像元。

1.2 高光谱相机的光谱定标

由于存在严重的谱线弯曲,每个像素的中心波长都不同,通常需要对每个像元的中心波长进行标定,采用单色仪—平行光管的定标方案,光源只能照亮很小一部分狭缝,需要多次移动照明区域才能完成所有像元的光谱定标,工作

量巨大,同时会导致中心波长不连续的现象,即相同的一个像素的中心波长,移动照明区域前后得到的中心波长不一致的现象。为了实现快速定标,简化了光谱定标的方案,采用单色仪+柱透镜+毛玻璃的方式直接照明光谱仪整个狭缝,同步标定各个像素的中心波长和光谱响应带宽。

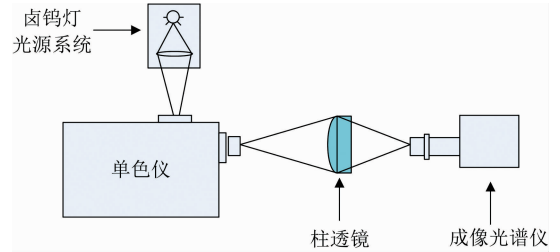


图 2 光谱定标原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of spectral calibration

定标采用的定标光是由溴钨灯发出的复色光经过光栅衍射和狭缝滤波后得到的,溴钨灯的功率、耦合效率、光栅的衍射效率和单色光的带宽共同决定了单色光的强度。经过毛玻璃的散射,到达光谱仪狭缝的定标光能量大幅衰减,为了获得信噪比较高的定标数据,提高定标精度,需要提升进入光谱仪狭缝的定标光能量。在定标设备不变的情况下,只能通过调整单色光的带宽来提高定标光的强度,假设定标光的光谱强度分布为 $G_m(\lambda)$,光谱仪某像元的光谱响应函数为 $G_s(\lambda)$,均近似为高斯函数

$$G(\lambda, b, \sigma) = A e^{-\frac{(\lambda-b)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

利用不同的单色光扫描某个像素的光谱响应函数,得到的测试曲线可用式(2)表示

$$R(\lambda_r) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_s(\lambda, b, \sigma_1) G_m(\lambda - \delta\lambda, b, \sigma_2) \quad (2)$$

式(2)中, b 是某像元的光谱响应中心波长, $\delta\lambda$ 是定标光中心波长与光谱仪像元中心波长之差, $\lambda_r = b + \delta\lambda$ 表示定标光的中心波长。所以 $R(\lambda_r)$ 是两个高斯函数的卷积,容易证明两个高斯函数的卷积仍然是高斯函数,其方差是两个卷积函数的方差之和

$$\sigma_3^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (3)$$

高斯函数的标准差 σ 和带宽之间是线性关系,因此根据方差之间的关系,确定单色光的带宽,并计算出 $R(\lambda_r)$ 的带宽,即可得出该像元的真实光谱响应带宽(FWHM)。

$$FWHM = 2\sigma \sqrt{2\log(2)} \quad (4)$$

因为定标光的带宽比较宽,单色仪输出定标光的波长间隔可以适当增加,也能保证扫描获得的曲线具有足够多的采样数据,根据本文涉及的高光谱成像仪的光谱分辨率,设置单色仪输出波长如表 1 所示。

相比标准光谱定标方法,本文采用的光谱定标方法只需要每个像元保证能有三个以上的响应数据即可完成光谱定标,一次波长扫描即可完成所有像元的光谱定标,工作量大大减少,同时由于定标光的带宽不要求比高光谱成像仪的带宽小,对定标设备的要求也大大降低。

表 1 单色仪输出波长 (nm)

Table 1 Monochromator output wavelength (nm)

波长/nm										
416	436	456	476	499	539	579	622	682	766	879
417	437	457	477	501	541	581	625	686	771	885
418	438	458	478	503	543	583	628	690	776	891
419	439	459	479	505	545	585	631	694	781	897
420	440	460	480	507	547	587	634	698	786	903
421	441	461	481	509	549	589	637	702	791	909
422	442	462	482	511	551	591	640	706	796	915
423	443	463	483	513	553	593	643	710	801	
424	444	464	484	515	555	595	646	714	807	
425	445	465	485	517	557	597	649	718	813	
426	446	466	486	519	559	599	652	722	819	
427	447	467	487	521	561	601	655	726	825	
428	448	468	488	523	563	603	658	730	831	
429	449	469	489	525	565	605	661	734	837	
430	450	470	490	527	567	607	664	738	843	
431	451	471	491	529	569	609	667	742	849	
432	452	472	492	531	571	611	670	746	855	
433	453	473	493	533	573	613	673	751	861	
434	454	474	495	535	575	616	676	756	867	
435	455	475	497	537	577	619	679	761	873	

2 结果与讨论

光谱定标数据是由类似图 3 所示的多个图像组成，每一幅图中都有一条亮线，波长不同，亮线的位置也不同，且具有明显的谱线弯曲。



图 3 光谱定标数据
Fig. 3 Spectral calibration data

从数据中提取某一像元对各个波长的响应数值作为纵坐标，波长作为横坐标，曲线如图 4 所示，由于采用了带宽较宽的定标光，扫描的数据信噪比较高，截取 560~620 nm 之间的数据进行高斯拟合，具有非常高的拟合精度，拟合 R-

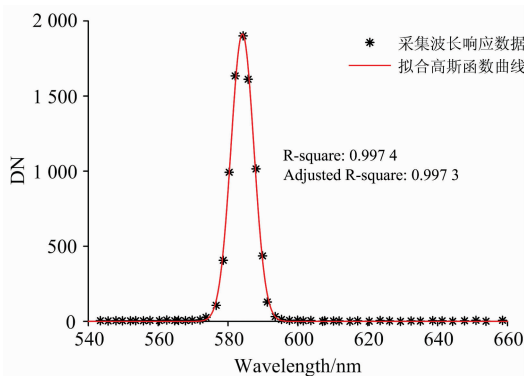


图 4 实测光谱响应
Fig. 4 Measured spectral response

square 为 0.997 4, AdjustedR-square 为 0.997 3。选择高斯曲线最大值的位置为该像元响应最大的波长，为该像元的中心波长。利用该方法，可以获得探测器上中间列像元位置和中心波长的关系如图 5。

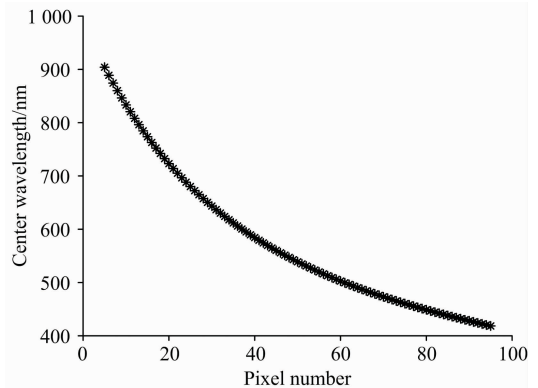


图 5 波长-像元位置关系
Fig. 5 Wavelength-pixel position relationship

利用高斯拟合参数计算光谱分辨率，结果如表 2 和图 6 中所示。

表 2 光谱分辨率计算
Table 2 Spectral resolution calculation

波长/nm	421	895
标准光谱仪测量单色光带宽 $\sqrt{d_2^2 - 1.5^2}$ /nm	4.43	3.04
光谱成像仪输出光谱带宽 d_2 /nm	5.06	17.69
光谱成像仪光谱分辨率 d_3 /nm	2.45	17.43

表 2 中, $d_3 = \sqrt{d_2^2 - d_1^2 + 1.5^2}$, 根据表 2 中结果, 成像光谱仪的光谱分辨率在 2~18 nm 之间, 与设计结果一致。其中标准光谱仪测量定标光带宽已经扣除标准光谱仪响应带宽(1.5 nm)。

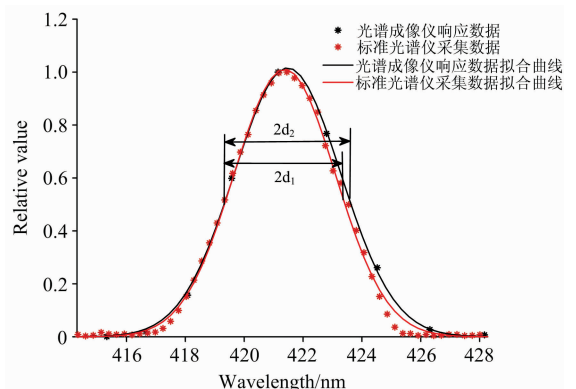


图 6 标准光谱仪与光谱成像仪采集数据及拟合曲线
Fig. 6 Standard spectrometer and spectral imager collect data and fit curves

光谱定标精度可以利用汞灯的特征谱线进行验证。波长定标偏差计算过程如下：

对光谱成像仪输出汞灯的光谱,进行 3 峰高斯拟合,获得 3 个高斯峰的中心位置,与汞灯谱线的标准值(如表 3)对比获得波长偏差,因存在谱线弯曲,选择不同视场中若干列(分别为 400 列、900 列、1 200 列、1 600 列、1 800 列,列方向为色散方向)的标定结果进行验证,汞灯三个峰的波长位置偏差如表 4 所示,汞灯数据如图 7 所示。

表 3 低压汞灯谱线

Table 3 Low-pressure mercury lamp spectrum

编号	波长/nm	编号	波长/nm
1	253.65	7	504.66
2	296.73	8	407.78
3	302.15	9	435.84
4	313.16	10	546.07
5	334.15	11	576.96
6	365.01	12	579.06

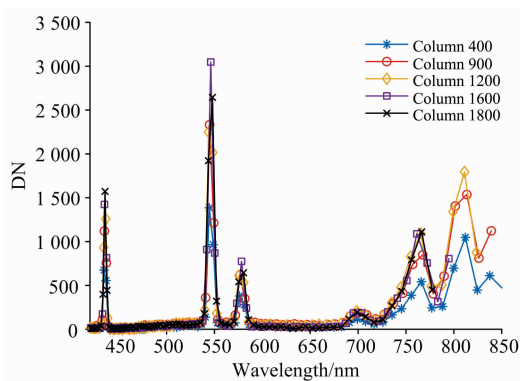


图 7 高光谱成像仪获取汞灯光谱数据

Fig. 7 Hyperspectral imager acquires mercury lamp spectral data

在光谱成像仪工作波长范围内,汞灯有 4 条特征谱线可用,435.84, 546.07, 576.96 和 579.06 nm, 但特征谱线 11 和 12 的波长间隔小于光谱分辨率,测试中以其波长均值 578.01 nm 为标准。图 7 为表 4 中相应列中提取的汞灯光谱数据。

表 4 高光谱成像仪波长偏差

Table 4 Wavelength deviation of hyperspectral imager

列数	波长 9 偏差/nm	波长 10 偏差/nm	波长 11、12 偏差/nm
400	-0.333 9	-0.096 7	-0.091 4
900	-0.278 6	-0.239 8	-0.257 2
1 200	-0.171 6	-0.032 1	-0.120 4
1 600	-0.123 9	0.163 8	0.288 1
1 800	-0.051 2	0.246 4	0.181 5

以上 5 列数据的波长偏差的均方根误差约为 0.23 nm。

3 结 论

光谱定标是保障光谱成像系统精确辐射定标的前提,但随着高光谱成像仪逐渐向大视场、高分辨率方向发展,需要定标的像元数越来越多,采用传统方法可以进行精细的光谱定标,但需要更高的光谱分辨率和输出能量,对定标设备的要求很高,并且定标的效率比较低,不适用于快速应用任务。本文基于单色光光谱曲线和光谱仪光谱响应曲线近似为高斯函数的假设,提出的采用宽波长光谱定标方法,可以有效降低工作量,提高进入系统的光通量。定标结果显示,采用该方法,采集汞灯特征光谱峰值位置的均方根误差为 0.23 nm,对于光谱定标精度要求不高的情况,可采用该方法实现快速标定。

References

- [1] Lu G, Fei B. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(1): 010901.
- [2] Halicek M, Lu G, Little J, et al. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22(6): 060503.
- [3] Sahoo S K, Tang D Y, Dang C. Optica, 2017, 4(10): 1209.
- [4] Khan M J, Khan H S, Yousaf A, et al. IEEE Access, 2018, 6: 14118.
- [5] Bodner G, Nakhforoosh A, Arnold T, et al. Plant Methods, 2018, 14(1): 84.
- [6] Zhang F, Chen C, Liu J, et al. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(2): 023112.
- [7] CHI Ming-bo, HAN Xin-xin, XU Yang, et al(迟明波, 韩欣欣, 徐阳, 等). Chinese Optics(中国光学), 2020, 13(2): 249.
- [8] XIE Chen-yu, ZHAI Wen-chao, LI Jian-jun, et al(谢臣瑜, 翟文超, 李健军, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2020, 49(2): 0205005.
- [9] Zhang H, Zheng Y, Lin C, et al. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(13): 3800.
- [10] CUI Ji-cheng, ZHU Ji-wei, CUI Hong, et al(崔继承, 朱继伟, 崔弘, 等). Laser and Infrared(激光与红外), 2019, 49(5): 584.
- [11] Liu H, Zhang D, Wang Y. Sensors, 2019, 19(10): 2259.

Fast Spectral Calibration Method of Spectral Imager

WANG Jian-wei^{1,2}, LI Wei-yan¹, SUN Jian-ying¹, LI Bing¹, CHEN Xin-wen¹, TAN Zheng¹, ZHAO Na¹, LIU Yang-yang^{1,3}, LÜ Qun-bo^{1,3*}

1. The Key Laboratory of Computational Optic Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
3. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Spectral calibration is determining the central wavelength of each channel of a spectrometer. To obtain the spectral radiance, it is usually necessary to calibrate the spectrometer and map the output value of the spectrometer to a physical quantity radiance. Different spectrometers, The spectral response is different, so it is necessary to determine the spectral response of each channel during the spectral calibration process. The spectral imager can be regarded as a composition of multiple spectrometers, and the center wavelength and spectral response of all points need to be calibrated. Since the birth of the first imaging spectrometer, its calibration method has been gradually fixed. A monochromator with the higher spectral resolution is required, and its spectral bandwidth is much smaller than the spectral response bandwidth of the spectral imager so that quasi-monochromatic light can be considered a pulse function. According to the characteristics of the pulse function, changing the wavelength of the quasi-monochromatic light and scanning the response wavelength range of the spectral imager is a process of sampling the spectral response function at intervals. . Therefore, the spectral imager's central wavelength and spectral response function can be directly obtained from the spectral calibration data. With the development of technology, the sensitivity of the detector is getting higher and higher, and the resolution of the spectral imager is getting higher and higher. Higher requirements are put forward for the quasi-monochromatic light required for the spectrum calibration. However, the narrower the bandwidth of the quasi-monochromatic light, the lower its energy, and it takes longer to obtain data that meets the signal-to-noise ratio, which reduces the efficiency of calibration. In this paper, we combined the characteristics of quasi-monochromatic light's spectral line type and spectral response function approximating to Gaussian function. Through theoretical analysis, a method of spectral calibration using wide-band quasi-monochromatic light is proposed, which can effectively reduce the calibration step of spectral calibration improves the efficiency of calibration and is suitable for the rapid calibration of spectral imagers. This method is used for the spectral calibration of a space-borne hyperspectral imager. The spectral imager uses a prism to split light and has the characteristics of non-linear dispersion. The spectral resolution varies from 2 to 18 nm, and there is a large curve of spectral lines. As a result, the center wavelength of each pixel is different, and spectral calibration is required for each pixel. To avoid the discontinuity of the central wavelength of the adjacent field of view caused by the calibration of the separate field of view, the quasi-monochromatic light spot emitted by the monochromator illuminates the entire slit, and a cylindrical lens and ground glass are placed between the slit and the monochromator. The cylindrical lens is used to converge the light perpendicular to the slit direction to improve the energy utilization; the ground glass is used to homogenize the light, and the presence of ground glass greatly reduces the energy entering the spectral imager. Combining the method proposed in this paper increases of the accuracy the bandwidth of monochromatic light, and the increase of energy have finally completed the rapid calibration of the spectral imager. The mercury lamp verifies that the spectral calibration accuracy is 0.23 nm.

Keywords Hyperspectral imaging; Spectral line bending; Spectral calibration

(Received Mar. 6, 2021; accepted Jan. 9, 2022)

* Corresponding author