

文章编号 1004-924X(2010)11-2347-08

超光谱成像仪的精细光谱定标

郑玉权

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031)

摘要:为了精细标定棱镜色散超光谱成像仪 1024×80 光谱像元的中心波长和响应带宽,建立了一套光谱定标装置,提出了实现 1 nm 光谱定标精度的定标方法。首先,介绍了产生谱线弯曲与谱线倾斜的原因,确定了精细光谱定标的方法和数据处理算法;然后,利用光谱定标装置测定了全部光谱响应像元的离散单色光响应值,利用高斯方程拟合了相对光谱响应曲线;最后,建立了中心波长矩阵表和带宽矩阵表,采用多项式拟合算法确定了空间视场像元的色散方程和光谱通道谱线弯曲方程,实验测定了温度变化谱线漂移结果。另外,还对光谱定标精度对辐射定标精度的影响进行了分析。光谱定标结果表明:超光谱成像仪的光谱定标精度达到了 ± 1 nm,各谱段带宽平均为 8.75 nm;色散方程及谱线弯曲与设计结果相符,谱线弯曲值为 14~19 nm,平均值为 17 nm;1 nm 的定标精度对辐射定标精度的影响分别小于 1% (3000 K 黑体)和 0.25% (6000K 黑体),满足超光谱成像仪 1 nm 光谱定标精度的要求。

关键词:超光谱成像仪;光谱定标;谱线漂移

中图分类号:TP73;TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101811.2347

Precise spectral calibration for hyperspectral imager

ZHENG Yu-quan

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China*)

Abstract: In order to precisely calibrate the center wavelength and bandwidth of 1024×80 spectral pixels of a prism-dispersive hyperspectral imager, a spectral calibration facility is established, and a spectral calibration method to realize 1 nm wavelength accuracy is presented. Firstly, the spectral line bend and spectral line tilt are introduced, and the precise spectral calibration method and data processing algorithms are determined. After the discrete monochrome response values of all spectral pixels are measured with the spectral calibration facility, the relative spectral response curves are fitted with Gauss function. Finally, the center wavelength matrix and bandwidth matrix are established, the dispersive equations of different spatial pixels and the spectral line bend equations of different spectral channels are given with a polynomial fitting, and the spectral line deviation with circumstance temperature variation is experimentally measured. Furthermore, the effect of spectral calibration accuracy on the radio metric calibration accuracy is discussed. Experimental results indicate that the spectral calibration accuracy reaches 1 nm, and the average bandwidth of all pixels is 8.75 nm. The dispersive equation and the spectral line bend are coincident with design values well, in which the spectral line

收稿日期:2010-07-05;修订日期:2010-07-26.

基金项目:国家 863 高技术发展研究计划资助项目(No. 2008AA121803)

bend value is between 14 and 19 nm and the average is 17 nm. Moreover, the 1 nm center wavelength accuracy can cause less than 1% radiometric calibration deviation for a 3 000 K blackbody calibration source, and 0.25% for a 6 000 K blackbody calibration source. These results can satisfy the spectral calibration requirements of 1 nm wavelength accuracy.

Key words: hyperspectral imager; spectral calibration; spectral line deviation

1 引言

超光谱成像仪是在多光谱成像遥感仪器的基础上,从 20 世纪 80 年代初发展起来的先进的新一代光学遥感仪器^[1],1982 年,美国航空航天局(NASA)研制出了世界上首台航空成像光谱仪(Airborne Imaging Spectrometer, AIS)^[2],飞行试验获得的成像光谱数据在地矿勘探、植被分类等方面极具价值。

超光谱成像数据的应用价值,推动了星载超光谱成像仪的研制与应用,目前已经有多个超光谱成像卫星在轨运行,包括美国的 HSI(Hyperspectral Imager)^[3],欧空局的 ESA-HRIS(High Resolution Imaging Spectrometer)^[4]和 PRISM(Process Research by An Imaging Space Mission)^[5],美国海军 NEMO 计划中的 COIS(Coastal Ocean Imaging Spectrometer)^[6],美国强力星(MightySat)II 号上的 FTESI(Fourier Transfer Hyperspectral Imager)^[7],欧洲 PROBA 小卫星上的 CHRIS(Compact High Resolution Imaging Spectrometer)^[8]和美国 EO-1 卫星上的 HYPERION 成像仪^[9]等,这些高光谱成像仪提供的丰富高光谱数据已经在多个应用领域发挥了重要作用。

超光谱成像仪的光谱通道数较多,达 100 个以上,每个通道的带宽只有 10~20 nm,带宽和中心波长的定标精度不仅影响辐射定标的精度,还直接影响超光谱图像数据的应用,因此在超光谱成像仪发射前和在轨运行过程中都要监测各光谱通道的中心波长和带宽变化情况,以保证光谱定标的精度^[10-11],在一些特殊光谱波段还需要对探测器直接进行定标^[12-13]。

在实验室内实现超光谱成像仪精确光谱标定

仍然采用单色准直光的方法,即利用单色仪获得单色光,然后利用平行光管将单色光转换成光谱定标所需的单色准直光,AVIRIS^[14]、MODIS^[15]、Hyperion^[16]、COMPASS^[17]等超光谱成像仪均采用了该定标方法。Hyperion 还采用了漫反射板比值法^[18],针对机载超光谱成像仪建立了一些小口径光谱定标设备^[19]。此外,为了监视超光谱成像仪在轨工作时光谱定标数据的变化,超光谱成像仪一般还采用在轨光谱定标与辐射定标,在轨辐射定标一般用星上定标源^[20]、太阳和漫反射板定标^[21-23]。

在轨运行的多台超光谱成像仪都采用了不同的在轨光谱定标方法,MODIS 采用了 3 种方法进行在轨定标^[24-25],MERIS^[26]、Hyperion^[27]和 CHRIS^[28]采用大气吸收谱的方法进行在轨光谱定标,多种在轨光谱定标方法的综合运用可以有效提高光谱定标精度。

本文针对一台棱镜色散型超光谱成像仪的光谱定标,概述了超光谱成像仪的精细光谱定标原理,探讨了超光谱成像仪的谱线弯曲与校正问题,实验测试了超光谱成像仪随温度变化谱线漂移的情况,对超光谱成像仪在轨光谱校正提供了技术依据。本文还对光谱定标精度对辐射定标精度的影响进行了分析,并给出了星上光谱定标的实现方法。

2 超光谱成像仪的定标原理

棱镜色散型光谱仪与光栅相比能量利用率高,缺点是谱线弯曲(Smile 效应)比较大^[29],由于光学系统装调误差的存在,面阵探测器亦不能完全实现谱线弯曲的对称接收成像。

图 1 为棱镜超光谱成像仪光谱成像系统的结

构原理图,由两块非球面反射镜、一块复合棱镜和一块面阵探测器组成,复合棱镜用于校正光谱色散的非线性,两块非球面反射镜工作在离轴状态,棱镜的背面镀银反射膜,形成棱镜内反射,棱镜色散的固有问题是色散非线性和谱线弯曲,采用复合棱镜后色散特性已经接近线性。

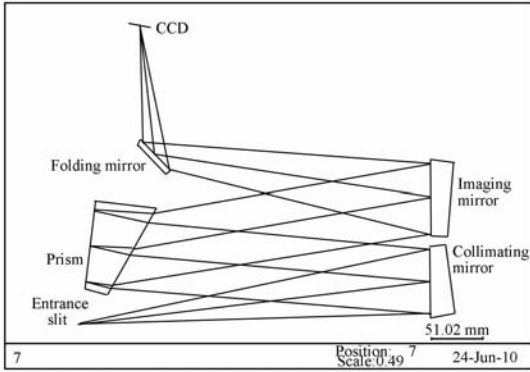
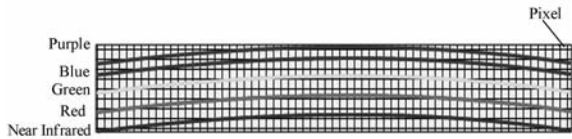


图 1 光谱成像系统结构图

Fig. 1 Construction of spectral imaging system

图 2 为理想状态和实际装调状态下谱线弯曲与面阵探测器的配准关系,由于实际工作中只能保证谱线两端与一行探测器像元对齐,且谱线弯曲并不能调整到完全对称,因此对成像区域为 1 024(空间维)×80(光谱维)的超光谱成像仪,需要确定每个像元的工作中心波长和光谱辐射响应带宽,提供工作状态的波长矩阵表,即进行所谓的光谱定标。



(a) 理想状态对称谱线弯曲

(a) Perfect symmetrical spectral line bend



(b) 实际装调后的谱线弯曲

(b) Real nonsymmetrical spectral line bend after adjusting

图 2 理想和实际装调状态下的谱线弯曲

Fig. 2 Contrast between perfect and real spectral line bends

光谱仪器的光谱定标主要有谱线灯方法和单色仪方法,谱线灯方法利用汞灯、钠灯的发射谱线,只能实现光谱分辨率较高、线性色散仪器的波长标定,实现不了光谱带宽标定;而单色仪方法连续输出单色准直光,可同时实现宽光谱范围的波长和带宽标定。

超光谱成像仪的光谱定标要求为:中心波长定标精度±1 nm,带宽定标精度±1 nm。本文根据光谱定标要求建立了一套光谱定标装置,它由 3 部分组成(图 3):无中心遮拦平行光管、单色仪和光源。该光谱定标装置的技术指标如下:

- 光束口径 D :300 mm
- 光谱区:0.35~3 μm
- 单色准直光带宽 $\Delta\lambda$:1 nm
- 波长准确度:±0.2 nm
- 波长重复性:±0.1 nm
- 输出单色光波长间隔:1 nm

单色仪的出射狭缝放置在平行光管的焦面上,通过控制单色仪光栅的转动和狭缝的宽度可以选择不同的波长和光谱带宽。单色仪的出射光经平行光管后获得单色准直光,高亮度光源可保证该仪器具有足够高的单色准直光能量输出。控制单色仪的狭缝宽度为 100 μm 时,会输出带宽为 1 nm 的单色准直光;若狭缝宽度为 10 μm ,则输出带宽为 0.1 nm 的单色准直光。超光谱成像仪的带宽在 10 nm 左右,采用 1 nm 带宽的单色准直光即可。

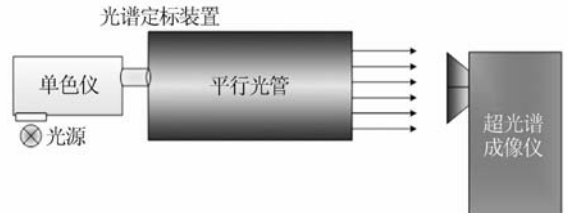


图 3 超光谱成像仪的定标示意图

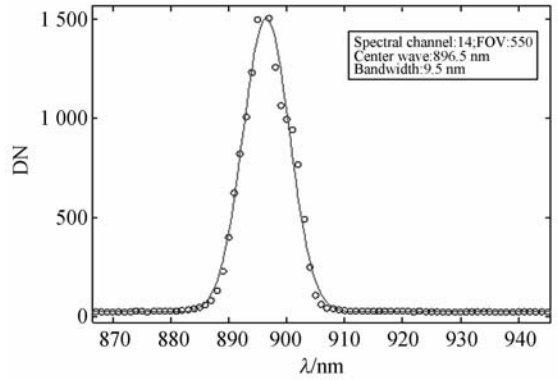
Fig. 3 Sketch of spectral calibration for hyperspectral imager

超光谱成像仪的光谱定标需测定出每个响应谱段的相对光谱响应度。连续改变单色仪的输出波长,记录超光谱成像仪的输出数据和单色仪的数据,利用光谱定标装置的标定数据,经过数据处理就可获得超光谱成像的光谱响应度,做归一化处理,两端响应最大值的 1% 作为波段的响应

带宽,两端响应 50% 的波长差作为光谱带宽,拟合的高斯相对光谱响应度最大值对应的位置即为谱段的中心波长。

3 超光谱成像仪光谱定标结果

利用建立的超光谱成像仪光谱辐射定标装置测定了 $1\ 024(\text{空间}) \times 80(\text{光谱})$ 阵列像元的中心波长和带宽,建立了 $1\ 024 \times 80$ 的中心波长矩阵表和光谱带宽矩阵表,并拟合了不同空间像元位置的多项式色散方程。图 4 为中部视场点(550 空间像元)不同通道的相对光谱响应曲线,均近似满足 Gauss 分布。图 5 为拟合得到的光谱色散曲线与拟合多项式。图 6 为 3 个不同位置的光谱响应带宽曲线,全波段平均响应带宽为 8.75 nm。图 7 为测得的全部光谱响应像元的谱线弯曲(Smile 效应),72 通道前弯曲最大接近 19 nm,最小在 14 nm 左右,平均在 17 nm,弯曲跨度基本在两个光谱探测像元以内。



(c) CH=14,FOV=550($\lambda=896.5\text{ nm}$)

图 4 3 个视场点不同光谱通道的相对光谱响应度曲线

Fig. 4 Relative spectral response curves for several different channels on three spatial positions

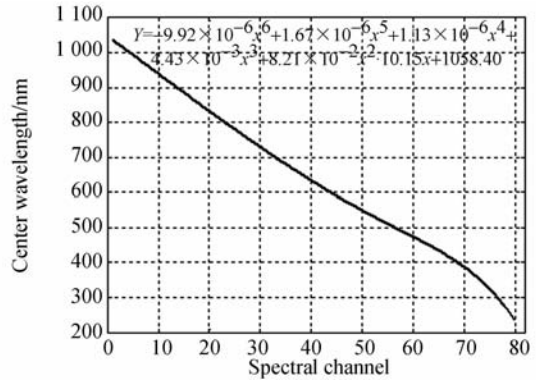
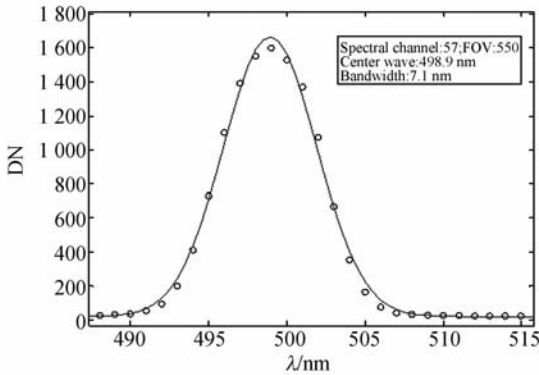
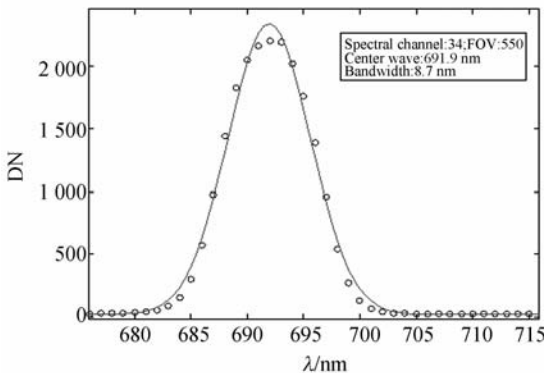


图 5 中部空间视场点色散曲线与拟合方程

Fig. 5 Dispersive curves and fit equation for medium spatial positions



(a) CH=57,FOV=550 ($\lambda=498.9\text{ nm}$)



(b) CH=34,FOV=550 ($\lambda=691.9\text{ nm}$)

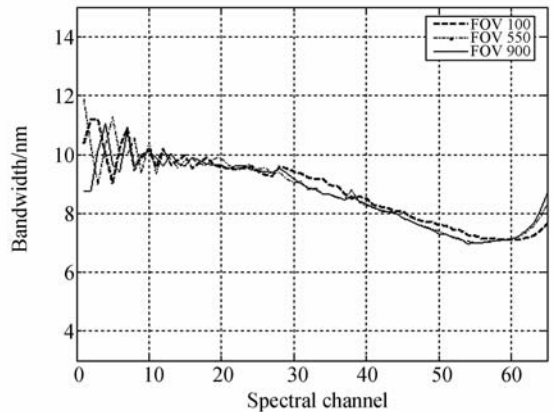


图 6 3 个空间视场点各光谱通道带宽

Fig. 6 Bandwidths of different spectral channels for three spatial positions

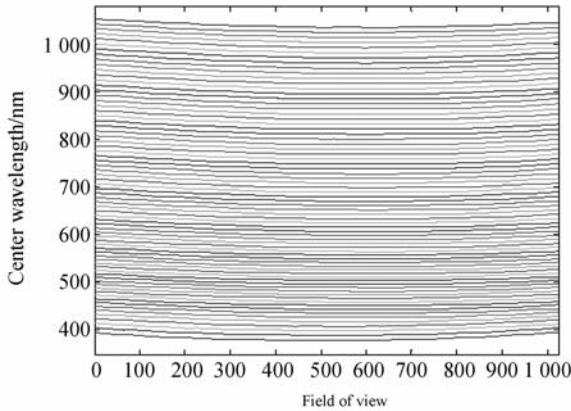


图 7 全视场谱线弯曲 (Smile 效应)

Fig. 7 Spectral line bend (Smile) for total field of view

4 超光谱成像仪的温度谱线漂移

超光谱成像仪安装在卫星上,工作于真空状态,且温度变化范围较大。由于仪器的结构材料选用的是铝合金,膨胀系数较大,温度变化会导致光谱成像系统产生离焦。图 1 中像面附近的平面折转反射镜兼作调焦反射镜,通过前后移动可补偿温度变化产生的像面离焦,保证系统获得清晰的光谱图像。另外,调焦时也会在 CCD 光敏面上产生谱线移动,因此需要测定出不同温度时的谱线漂移量。

为了考查超光谱成像仪在不同温度下的谱线漂移量,本文进行了热光学实验,确定了光谱仪谱线位置随温度的变化关系,为在轨调焦和谱线校正提供了初始光谱定标依据。

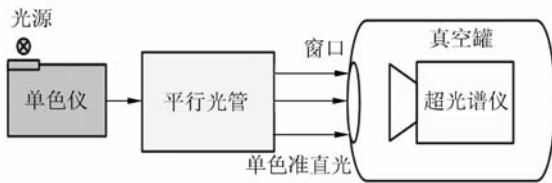


图 8 超光谱成像仪热光学实验示意图

Fig. 8 Diagram of thermal optical experiment for hyperspectral imager

图 8 为超光谱成像仪热光学实验原理图,光谱定标仍采用图 1 所示的单色平行光管进行。超光谱成像仪放置在真空罐中,单色平行光经窗口进入超光谱成像仪,控制及数据采集软件实现单色光波长切换、图像采集和存储。

实验记录了 12~25 °C 时,中心视场第 26、40 和 64 光谱通道的中心波长变化值,表 1 列出了数据结果,图 9 绘出了中心波长随温度变化的趋势。由表 1 和图 9 可以看出,中心波长随着温度的升高向短波方向移动,但偏移量与温度变化量并不成线性关系。该数据结果可以指导超光谱成像仪在不同环境温度工作时,根据定标状态的波长矩阵表生成工作状态波长矩阵表。

表 1 温度谱线漂移数据

Tab. 1 Data of spectral line deviation with temperature

t/°C	中心波长/nm		
	谱段 26	谱段 40	谱段 64
12	858.75	714.58	510.31
14	858.03	713.84	509.65
16	852.73	708.29	505.46
18	837.65	695.3	495.51
20	836.71	693.5	494.34
25	802.28	664.92	473.01

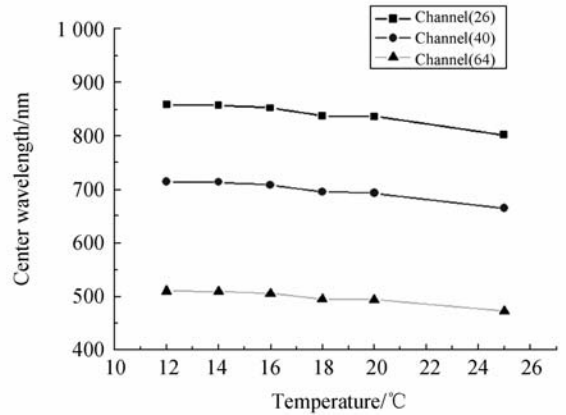


图 9 中心波长随温度变化漂移结果

Fig. 9 Center wavelength deviation with temperature

5 光谱定标精度对辐射定标的影响

光谱定标的精度直接影响辐射定标的精度^[30],二者的关系主要体现在二者的一一对应性上。进行辐射定标数据处理时必须准确地知道 CCD 探测器每个探测像元的响应波长,否则无法确定赋予该探测像元哪一个波长的光谱辐射亮度数据。所以,光谱定标的精度对辐射定标的精度会产生影响。

假设光谱定标时,测定探测器像元的中心波

长为 λ , 与真实中心波长的偏差为 $\Delta\lambda$, 那么该探测像元的真实中心波长应为 $\lambda + \Delta\lambda$, 进行辐射定标数据处理时, 会将波长为 λ 的光谱辐射亮度值赋予该像元以计算辐射响应系数, 而理论上应该赋予该探测像元 $\lambda + \Delta\lambda$ 的光谱辐射亮度值, 这样二者即会产生一定的偏差。实验室内定标一般采用溴钨灯光源, 它是辐射特性接近 3 000 K 的黑体辐射源。根据普朗克函数, 计算了 3 000 K 黑体在波长 500, 700, 900 nm, 波长偏差 $\Delta\lambda = 1, 2, \text{nm}$ 时, 光谱辐射亮度的相对变化量, 如表 2 所示。

表 2 3 000 K 黑体波长偏移产生的相对光谱辐射亮度变化

Tab. 2 Relative spectral radiance change with wavelength error for 3 000 K blackbody

波长偏移 $\Delta\lambda/\text{nm}$	中心波长 λ/nm	亮度变化量 /%
1	500	0.988
	700	0.299
	900	0.0595
2	500	1.979
	700	0.598
	900	0.118
4	500	3.974
	700	1.191
	900	0.234

太阳可以看作 6 000 K 的黑体, 超光谱仪对地观测时, 主要接收地气系统反射的太阳光, 因此本文亦针对同样的波长和波长偏差计算了 6 000 K 黑体的相对光谱辐射亮度输出偏差, 如表 3 所示。

表 3 6 000 K 黑体波长偏移产生的相对光谱辐射亮度变化

Tab. 3 Relative spectral radiance change with wavelength error for 6 000 K blackbody

波长偏移 $\Delta\lambda/\text{nm}$	中心波长 λ/nm	亮度变化量 /%
1	500	0.0394
	700	0.211
	900	0.239
2	500	0.0805
	700	0.422
	900	0.476
4	500	0.168
	700	0.844
	900	0.951

由表 2 和表 3 的计算结果可知, 波长偏差对辐射定标精度具有一定的影响。对于 3 000 K 的黑体, 波长偏差对辐射定标精度影响较大, 尤其在短波长区, $\lambda = 500 \text{ nm}$ 时, $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$, 会有 1% 的定标精度误差, $\Delta\lambda = 4 \text{ nm}$ 时, 会有 4% 的辐射定标偏差; 相对来看, 6000 K 的计算结果与 3000 K 的计算结果正好相反, 波长偏差引起的光谱辐射亮度偏差较小, $\lambda = 900 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 4 \text{ nm}$ 时, 最大光谱辐射输出变化为 0.951%, 不超过 1%。由此可以看出, 光谱定标精度对辐射定标精度的影响还是相当可观的。可采取的主要措施一方面是提高光谱定标精度, 控制光谱定标精度在 1 nm, 由此可大大降低光谱定标精度对辐射定标精度的影响; 另一方面是规避光谱定标精度对辐射定标精度的影响, 如果定标光源的光谱辐射输出是均匀的(不随波长而变化), 那么光谱定标精度将不会对辐射定标产生影响。当然, 实际上这样的光源并不存在, 因此在辐射定标过程中, 应尽量提高光源的色温, 这样将有效地降低光谱定标精度对辐射定标精度的影响。

6 结 论

利用光谱定标装置实现了棱镜色散超光谱成像仪的精细光谱定标, 定标精度达到 1 nm。建立了中心波长矩阵表和带宽矩阵表, 确定了超光谱成像仪的色散方程系数和谱线弯曲, 通过热光学实验确定了谱线的温度漂移系数。超光谱成像仪在轨工作时, 基于测量的工作环境温度, 通过数据计算可以得到工作状态的中心波长矩阵表, 为进一步利用星上光谱定标方法实现在轨光谱定标提供了数据基础。

对超光谱成像仪的光谱定标来说, 实验室内的光谱定标仅仅提供了基础数据, 在轨工作状态的光谱定标仍然需要星上光谱定标设备和方法来提供精确的光谱定标点数据, 然后利用实验室内测定的中心波长矩阵表得到工作状态的精确中心波长矩阵表, 实现超光谱成像仪的高精度在轨光谱辐射测量。超光谱成像仪的在轨光谱定标方法较多, 有大气吸收法、积分球方法、太阳+漫反射板方法、单色光源法等, 对于本文的棱镜色散超光谱成像仪, 还需要进一步研究星上光谱定标的实现方法和精度。

参考文献:

- [1] GOETZ A F H, VANE G, SOLOMON J E, *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985,228:1147-1153.
- [2] LABAW C. Airborne Imaging Spectrometer; an advanced concept instrument[J]. *SPIE*, 1983,430:68-73.
- [3] MARMO J,FOLKMAN M A,KUWAHARA C Y, *et al.*. Lewis hyperspectral imager payload development[J]. *SPIE*, 1996,2819:80-90.
- [4] BLECHINGER F,CHARLTON D E, *et al.*. High resolution imaging spectrometer (HRIS)- optics, focal plane and calibration[J]. *SPIE*, 1993,1937:207-224.
- [5] KUNKEL B. PRISM (processes research by an imaging spaceborne mission)-high resolution hyperspectral imager for scientific land processes monitoring applications[J]. *SPIE*,1995,2585:283-286.
- [6] WILSON T L, DAVIS C O. Hyperspectral remote sensing technology (HRST) program and the Naval EarthMap Observer (NEMO) satellite[J]. *SPIE*, 1998,3437:2-11.
- [7] OTTEN L J, MEIGS A D. MightySat II. 1: An optical design and performance update [J]. *SPIE*, 1996,2957:390-398.
- [8] FLETCHER P A. Image acquisition planning for the CHRIS sensor onboard PROBA[J]. *SPIE*, 2004, 5546:141-150.
- [9] FOLKMAN M A, PEARLMAN J, LIAO L B, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[J]. *SPIE*, 2001, 4151:40-51.
- [10] 崔敦杰. 成像光谱仪的定标[J]. *遥感技术与应用*, 1996,11(3):56-64.
CUI D J. Calibration of imaging spectrometer[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1996,11(3):56-64. (in Chinese)
- [11] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006,14(5):822-828.
Li Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):822-828. (in Chinese)
- [12] 赵玉环, 闫丰, 周跃, 等. 紫外 ICCD 的辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2008,16(9):1572-1576.
ZHAO Y H, YAN F, ZHOU Y, *et al.*. Radiometric calibration of ultraviolet ICCD detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1572-1576.
- [13] 王锐, 宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统 [J]. *光学精密工程*, 2009,17(3):469-474.
WANG R, SONG K F. High accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):469-474.
- [14] 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.
- [15] AMOLD G T, FITZGERALD M F, GRANT P S, *et al.*. MODIS Airborne Simulator Radiometric Calibration[J]. *SPIE*,1996,2820:56-66.
- [16] LUSHALAN L, PETER J, DARREL G, *et al.*. Performance characterization of the hyperion imaging spectrometer instrument [J]. *SPIE*, 2004, 4135:264-275.
- [17] JERRY Z, DANIEL G, ROBERT M, *et al.*. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 2004, 5425:182-188.
- [18] Hyperspectral imaging spectrometer spectral calibration[P]. United State Patent:6111640, August 29,2000.
- [19] BIRGIT S, PETER G, JENS N, *et al.*. Calibration facility for airborne imaging spectrometers [J]. *SPIE*, 2005,5978,223-228.
- [20] 任建伟, 麦阵强, 万志, 等. 星上 LED 定标光源的可行性研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3):398-405.
REN J W, MAI ZH Q, WAN ZH, *et al.*. Feasibility of LED light source in spaceborne calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):398-405.
- [21] 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.
- [22] 李博, 林冠宇, 张明宇, 等. 紫外-真空紫外空间遥

- 感仪器漫反射板的制备[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 475-481.
- LI B, LIN G Y, ZHANG M Y, *et al.*. Fabrication of diffuser in UV-VUV space remote sensing instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 475-481.
- [23] 张振铎, 王淑荣, 李福田, 等. 空间紫外遥感仪器漫反射板的真空紫外辐照特性[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2055-2059.
- ZHANG ZH D, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Vacuum ultraviolet radiatio characteristics of dif-fuser in space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2055-2059.
- [24] XIONG X, CHE N, XIE Y, *et al.*. Four-years on-orbit spectral characterization results for Aqua MODIS reflective solar bands[J]. *SPIE*, 2006, 6361: 63-69.
- [25] XIONG X, SUNA J, ESPOSITOA J, *et al.*. MO-DIS reflective solar band calibration algorithm and on-orbit performance [J]. *SPIE*, 2002, 4891: 95-104.
- [26] BARRY P S, SHEPANSKI J, SEGAL C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines andan on-board system[J]. *SPIE*, 2002, 4480: 231-235.
- [27] DELWART S, HUOT J P, BOURG L. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT [J]. *SPIE*, 2003, 4881: 337-344.
- [28] CUTTER M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.*. Integration & testing of the compact high resolution imaging spectrometer (CHRIS) [J]. *SPIE*, 1999, 3753: 180-191.
- [29] 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-80.
- ZHENG Y Q, YU B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1): 75-80. (in Chinese)
- [30] 陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学传感器定标精度的影响[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
- CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)

作者简介:



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,1993年、1996年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,1999年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn; derek_zheng001@hotmail.com