

文章编号:1004-4213(2010)05-0902-5

空间调制干涉光谱成像仪的星上定标系统*

高静^{1,2}, 计忠瑛¹, 王忠厚¹, 崔燕^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:经计算推导和实验,研究设计了空间调制干涉光谱仪的星上定标系统,并进行了实验室光谱测试和航天元件的多种环境测试.解决了空间调制干涉光谱仪星上定标技术的关键组件定标光源、光谱滤光片、积分球组件的技术难点.实现了全孔径、部分视场的相对光谱定标,得到了星上定标光谱和干涉图.

关键词:星上定标;空间调制;积分球;光谱滤光片

中图分类号: TP731

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103905.0902

0 引言

定标是遥感信息定量化的前提,是光谱成像仪研制的一个重要的环节,定标准确度直接影响光谱图像的质量.定标根据使用阶段的不同分为:发射前定标和在轨定标,发射前定标主要是实验室定标;在轨定标包括星上定标和辐射场定标.考虑到在轨空间环境变化和光学系统、探测器在轨性能的退化,星上定标十分重要,它直接影响到仪器数据的真实性和遥感数据的辐射准确性^[1-3].

空间调制型干涉光谱成像技术除了保留了干涉型光谱成像的主要优点外,还具有可靠性和稳定性好、体积小、光谱线性度高、光谱范围宽,适合在飞机和卫星等飞行器上搭载等特点,因此近几年在航天航空领域、地矿资源的判别、减灾预报及环保、生物医学诊断、军事侦察等方面的应用发展很快^[4-5].2000 年美国发射的强力小卫星上就有 1 台空间调制干涉成像光谱仪(Fourier Transform Hyper Spectral Imager, FTHSI).但由于星上定标技术难度较大,这台仪器上没有设计星上定标系统^[6-10].

干涉型成像光谱仪探测器接收到的是目标光谱的傅里叶变换信息.本文设计的空间调制干涉光谱成像仪(Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer, SMIFTS)的星上定标是通过相对光谱定标,确定超光谱成像仪在星上运行时的变化,监测仪器长期的系统衰减,对仪器输出数据加以修正.本文通过详细的研究、实验和设计,得到一种较好的星上定标系统,并解决星上定标系统

各关键元器件的工艺、性能测试问题,保证定标系统及各元件满足航天工作的要求,提高了超光谱成像仪的光谱图像识别性能.

1 星上定标技术方案

光学遥感器实现星上全系统定标,可以全面反映系统在空间的运行状况,有利于提高星上定标准确度.干涉型超光谱成像仪要实现全系统定标,定标光源必须从系统前部引入,而且按照 SMIFTS 原理的要求,定标光必须达到全孔径,才能得到最大光程差实现定标.如果追求全视场,定标系统将无异于主系统,这是无法实现的.因此定标系统的设计只能满足部分视场,实现全系统、全孔径、部分视场的光谱定标.

对光谱成像仪来说,对其复原光谱影响最大的是干涉仪的参量,星上相对光谱定标就是用具有特征吸收谱线的光源作为定标光源,通过干涉光路产生星上定标干涉图,通过对定标干涉图的光谱复原可以确定光谱线位置的变化情况,从而确定光谱成像仪干涉参量的变化,实现光谱成像仪的星上相对光谱定标.

通过研究分析,最终确定了光谱成像仪星上定标系统的设计方案,系统如图 1.包括定标准直镜组、光谱滤光片、减光片、积分球、卤钨灯.定标光源为卤钨灯,放入积分球内.积分球的出口作为均匀面光源,其光能通过准直镜到达摆镜.摆镜从相机工作位置翻转 90°后,将定标光引入主系统进行定标.积分球出射的光经过铍谱玻璃后,其光谱曲线上会有几个吸收峰,可为整个定标系统提供带有特征谱线的定标光源.

* 国家重点基础研究发展计划(2009CB724005)资助

Tel: 029-88887631

Email: gaojing@opt.ac.cn

收稿日期: 2008-12-12

修回日期: 2009-04-12

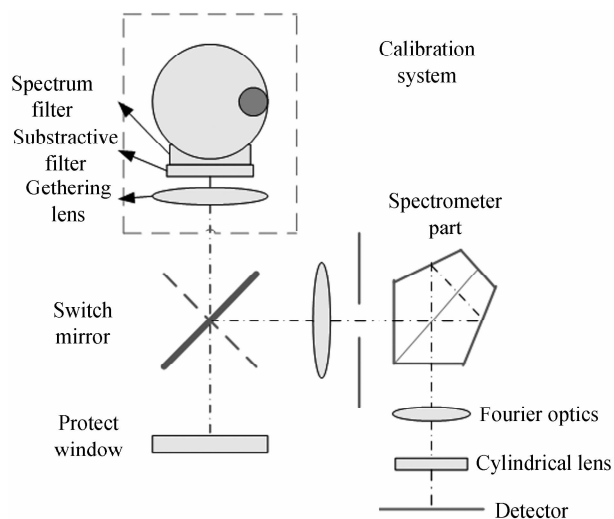


图 1 SMIFTS 的星上定标光学方案

Fig. 1 On-board calibration optical principle schematic of SMIFTS

2 星上定标关键部件的设计

为了很好地实现星上定标系统光谱定标的功能,必须解决几个关键部件(定标光源、光谱滤光片、积分球组件)的设计问题。

2.1 定标光源

卤钨灯是光谱分布从 400~2 500 nm 的光源,发出的光经过滤光片后,成为具有特征吸收峰的宽谱光源,可以实现辐射度定标,同时通过光谱复原后标定特征谱线的位置和宽度,可以分析干涉仪的变化,加以修正。

做为星上定标光源的卤钨灯,要求其有足够的光能、较高的色温、稳定的光谱和辐射输出,且需满足星上工作的环境和寿命要求。卤钨灯的能量计算方法为:

卤钨灯光源发出的可见光通量 Φ_v 已知,且

$$\Phi_v = k_m \int \varphi_{\alpha} \cdot V_{(\lambda)} d\lambda \quad (1)$$

式中 k_m 为最大光谱光效能,即 $\lambda=555$ nm 处的光谱光视效率, $k_m=683$ lm/W; φ_{α} 为光谱辐射通量; $V_{(\lambda)}$ 为明视觉函数

$$\frac{1}{k_m} \cdot \frac{d\Phi_v}{d\lambda} = \varphi_{\alpha} \cdot V_{(\lambda)} \quad (2)$$

$$\varphi_{\alpha} = \frac{d\Phi_v}{k_m d\lambda V_{(\lambda)}} \quad (3)$$

因此,根据卤钨灯的辐射光谱分布曲线,可计算出卤钨灯的光谱辐射通量 φ_{α} ,球面发光强度按平均球面发光强度计算,平均球面光谱发光强度为

$$I_{Dk} = \frac{\varphi_{\alpha}}{4\pi} \quad (4)$$

因此,卤钨灯光源的光谱辐亮度为

$$L_{Dk} = \frac{dI_{Dk}}{dA} = \frac{d\varphi_{\alpha}}{4\pi \cdot dA} \quad (5)$$

卤钨灯的功率 12 W,电压 8 V,光通量 125 lm,色温 2 700 K,经过计算,卤钨灯的能量为 23.343×103 [W/(m² · sr · μm)],可以满足星上定标系统的需求。

卤钨灯的时间稳定性测试是在室温时,连续开启卤钨灯并每隔半个小时记录其辐亮度值,经过测试得到的数据可以计算出,本文选用的卤钨灯的时间稳定性为 0.37%。

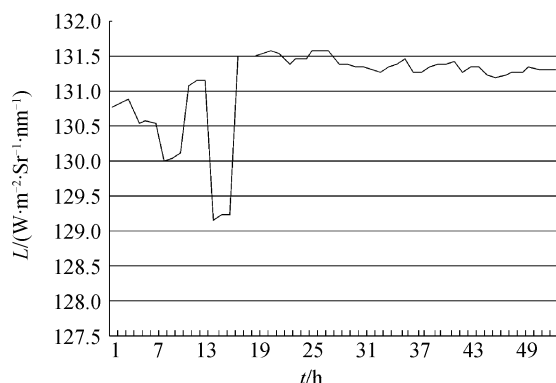


图 2 卤钨灯的时间稳定性测试曲线

Fig. 2 Time stability testing curve of tungsten lamp

卤钨灯的辐射光谱分布如图 3。SMIFTS 的光谱范围是 450~950 nm,从图 3 中可以看出,400~950 nm 范围内辐射光谱曲线平滑稳定,符合本仪器的要求。

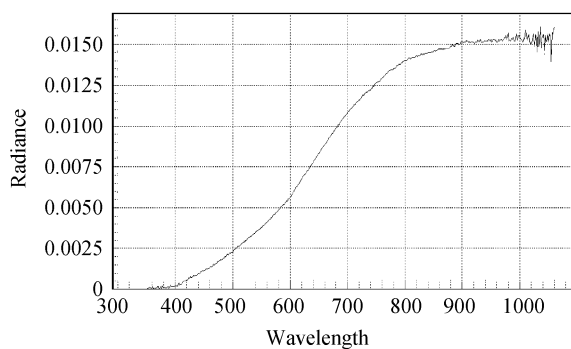


图 3 卤钨灯的辐射光谱分布曲线

Fig. 3 Radiation spectrum curve of tungsten lamp

卤钨灯的灯丝是整个超光谱仪星上定标系统最脆弱的部分。经过研究计算,对灯丝的材料结构、灯座结构都采用了特殊的工艺。按照光谱成像仪整机力学摸底振动试验时积分球部件处的响应谱,通过足够量级的力学试验(灯承受的振动试验载荷为:随机振动(10~2 000 Hz)29(GRMS),冲击(100~3 000 Hz)1 500 g。同时参加振动试验的是 5 支灯,振后 5 灯均可正常工作),证明灯丝强度可以满足要求。

2.2 光谱滤光片

在定标光路中加入一种光谱滤光片,可使定标光源显示一个或几个特征光谱,即其中心波长位置

明确,半波宽度小,波形对称的谱线,通过对其干涉图复原光谱的比对,可以确定干涉仪的变化,实现天上相对光谱定标。

在光谱滤光片的设计上针对本仪器的光谱性能要求研制出了在 450~950 nm 范围内且特征峰明显、光谱带宽窄的光谱钕玻璃,且其在常压和真空下的光谱透过率曲线经过测试没有明显变化。

本文采用的光谱滤光片为钕玻璃,其光谱透过率曲线凹凸峰较丰富,位置分布于 450~950 nm 间的各谱段,图 4 为光谱透过率曲线。

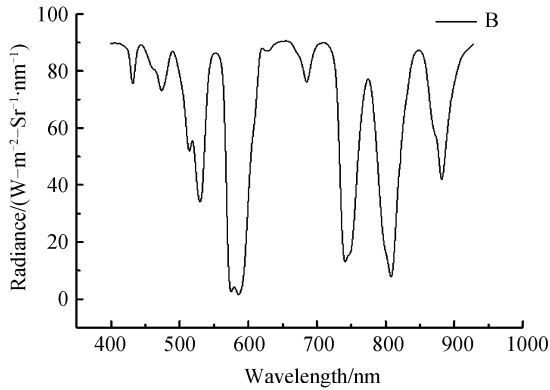


图 4 钕玻璃光谱透过率曲线

Fig. 4 Nd-glass spectrum transmittance curve

对光谱滤光片进行了光学性能测试和粒子辐照试验后,其光学性能均符合要求。

2.3 积分球组件

积分球具有光源利用率高、较高的辐射出射度和出射均匀度的特点,因此定标光源以积分球做为匀光体,卤钨灯为光源。理想的积分球可以认为球内表面任意点的照度仅是球的几何尺寸、涂层的漫反射比及进入球的辐通量的函数,而与位置无关,所以卤钨灯的放置位置以满足仪器的能量需求为准。内置卤钨灯的光辐射在出口处形成接近于理想朗伯体的光辐射源,经测试,积分球出口不均匀度 $\leq 0.32\%$ 。为减少积分球定标系统的功耗、体积、重量,在保证出射均匀性的前提下,尽量缩小积分球体积。

积分球出口处光谱辐射亮度为

$$L_s = \frac{\varphi_{\alpha}}{\pi \cdot A_s} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (6)$$

式中, $f = (A_i + A_e) / A_s$

ρ 为积分球内表面漫反射率, $\rho = 0.97$; A_s 为入口面积; A_e —出口面积; A_i 为球内表面积

积分球组件的设计中对积分球外壳及球体的材料工艺设计都有特殊的要求,尤其是灯座的装夹工艺是一项关键创新技术。经过航天级加速度试验、正弦、随机、冲击力学试验,热真空、热循环试验等试验证明,本文采用的设计满足了航天要求。

积分球体由内部为空心半圆球形的两部分对合而成,外形为正方形。积分球体采用聚四氟乙烯为主要材料,是目前已知材料中朗伯性最好、漫反射比最高的材料。积分球外壳将积分球包裹于其内,并与其紧密配合,既增强了积分球体抵抗外力的能力,又可以散热。球壳与球体形成整体,使得受震动冲击时的扭力、剪切力由高强度的金属外壳承担,从而提高积分球的抗冲击震动能力。经积分球部件振动试验后,壳体、球体均完好。积分球外壳和灯座采用铝合金材料,其导热系数、比热容均优于钛合金,有利于定标灯热量的传导,可以降低该部位的温度。

3 天上定标测试结果

天上定标系统完成后,用美国 ASD 公司生产的经过标定的光谱辐射度计对其进行了测试,得到了天上定标系统光谱图和天上定标发射前干涉图,测试结果如图 5 和图 6。

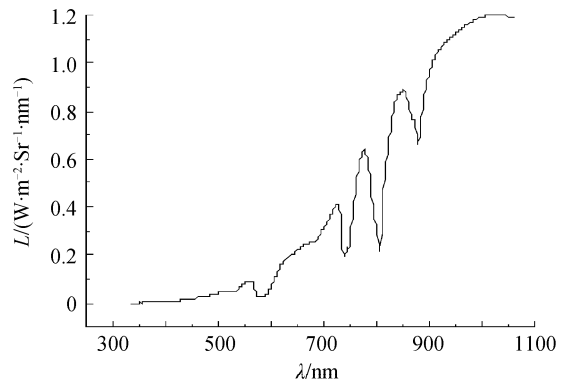


图 5 天上定标系统光谱

Fig. 5 Spectrum curve of on-board calibration system

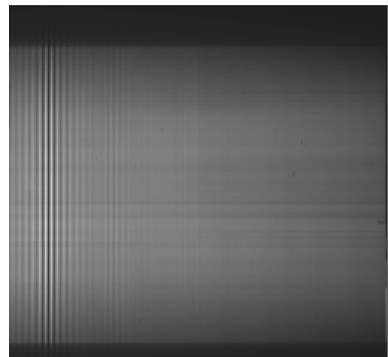


图 6 天上定标发射前干涉图

Fig. 6 Before-launch Interferogram of on-board calibration system

仪器的光谱分辨率由 Rayleigh 法则确定,即

$$\delta\nu = 1/2L \quad (7)$$

式中 $\delta\nu$ 表示波数分辨间隔, L 表示最大光程差

$$L = \text{DOPD} \cdot I = (d/f) \cdot s \cdot I \quad (8)$$

式中: d 表示干涉仪剪切量; s 表示光谱方向的像元尺寸; f 表示付氏镜的焦距; I 为仪器面阵探测器的

光谱方向的总像元数;一个像元对应的光程差为 DOPD.

在获得发射后星上定标干涉图之后,用地面实验室光谱定标时得到的干涉仪参量,即剪切量与傅氏镜焦距的比值 d/f 进行光谱复原.若干涉仪发生变化, d/f 就会变化,复原后的星上定标光谱图也会发生变化,特征光谱吸收峰的位置相对于发射前会有所偏差.因此,通过星上光谱定标,就可以发现干涉仪参量 d/f 的变化,从而在数据复原处理中进行修正.

图 7 是光谱成像仪进行热真空试验时采集星上定标干涉图的复原光谱结果,可以看出在常温常压、室温常压、高温真空、低温真空、常温真空的不同条件下,星上定标复原光谱的两个典型吸收峰位置不变,一个吸收峰是 807.49 nm,另一个吸收峰是 741.91 nm,证明星上定标系统的性能是可靠的.

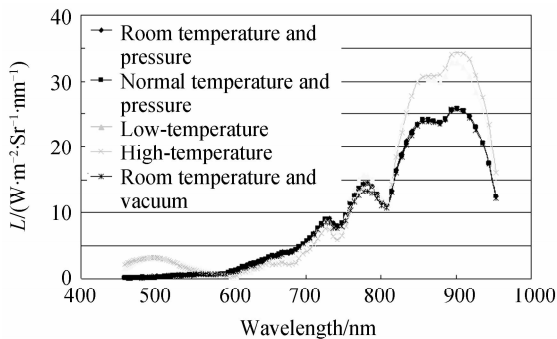


图 7 星上定标复原光谱比较曲线

Fig. 7 Reconstruction spectrum compare curve of on-board calibration system

测量不确定度表示测量结果的可信程度,标准不确定度 u (standard uncertainty) 用标准偏差表示测量结果的不确定度^[12].当被测量 X 的标准不确定度 $u(x)$ 不是由重复测量得到时,采用标准不确定度的 B 类评定.因此星上定标的不确定度要采用标准不确定度的 B 类评定.由分析可知,影响光谱定标标准不确定度的主要因子为:光谱复原的计算误差.

4 结论

在实际设计中,根据光学系统、结构总体的实现可能性,选择了积分球定标系统的方案.根据种种计算、实验和测试,确定了 SMIFTS 星上定标系统中的主要部件,对星上定标系统进行了实验室光谱测试和多种航天元件的环境测试,得到了大量详实的数据资料,并应用本系统首次得到了 SMIFTS 的星上定标光谱和干涉图.针对星上定标测试结果提出了星上定标的数据处理方法,通过星上光谱定标可以发现干涉仪参量 d/f 的变化,并分析了影响星上定标不确定度的主要因子.该定标系统体积小,重量

轻,可靠性好,准确度高.空间调制干涉型超成像光谱仪首次成功应用于航天载荷并具有星上定标装置,使得 SMIFTS 的数据应用更加可靠,填补了国内空白,促进了定标技术的发展.

参考文献

- [1] YARBROUGH S, OTTEN L J, MIGHTYSAT I. Hyperspectral imager summary of on-orbit performance[C]. *SPIE*, 2002, **4480**: 186-197.
- [2] NIEKE J, ASANUMA I, TANAKA K, *et al*. Global Imager's on-board calibration(VNISR-SWIR)[C]. *SPIE*, 2001, **4483**: 231-241.
- [3] SCHWARZER H, SUMNICH K, NEUMANN A, *et al*. Comparison of vicarious and in-orbit calibrations of the imagingspectrometer MOS[C]. *SPIE*, 2001, **4483**: 242-247.
- [4] XIANG-LI Bin, ZHAO Bao-chang, XUE Ming-qiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18-22.
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18-22.
- [5] XIANG-LI Bin, JI Zhong-ying, HUANG Min, *et al*. On the calibration of the spatially imaging fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **33**(7): 850-853.
相里斌, 计忠瑛, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 850-853.
- [6] MONGAIN E O, DANAHER S, BUCKTON D, *et al*. Definition of the calibration requirements for an imaging spectrometer system[C]. *SPIE*, 1993, **1938**: 88-99.
- [7] GRANGER E M. A calibration method for radiometric and wavelength calibration of a spectrometer[C]. *SPIE*, 1998, **3648**: 237-241.
- [8] STROBL P, MUELLER A, SCHLAEPFER D, *et al*. Laboratory calibration and in-flight validation of the digital airborne imaging spectrometer DAIS 7915[C]. *SPIE*, 1997, **3071**: 225-236.
- [9] VANE G, CHRIEN T G, MILLER E A, *et al*. Spectral and radiometric calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer[C]. *SPIE*, 1987, **834**: 91-105.
- [10] HUANG Min, XIANG-LI Bin, YUAN Yan, *et al*. Research of the on-board calibration of fourier transform imaging spectrometer [J]. *Remote Sensing Technology And Application*, 2004, **19**(3): 214-216.
黄旻, 相里斌, 袁艳, 等. 干涉型超光谱成像仪星上定标方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2004, **19**(3): 214-216.
- [11] JI Zhong-ying, XIANG-LI Bin, WANG zhong-hou, *et al*. Research of calibration technology of interference hyperspectral imager on secondary planet[J]. *Remote Sensing Technology And Application*, 2004, **19**(4): 280-283.
计忠瑛, 相里斌, 王忠厚, 等. 干涉型超光谱成像仪的星上定标技术研究[J]. *遥感技术与应用*, 2004, **19**(4): 280-283.
- [12] QIAN Shao-sheng. Uncertainty in easurement[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 1.
钱绍圣. 测量不确定度[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1.

On-Board Calibration System of Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer

GAO Jing^{1,2}, JI Zhong-ying¹, WANG Zhong-hou¹, CUI Yan^{1,2}

(Key Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By calculation and experimentation, on-board calibration of SMIFTS is analyzed, and spaceflight environment characteristic of on-board calibration is tested. The key parts difficulty of on-board calibration of SMIFTS: lamp-house, spectrum filter, integrating sphere are solved. The whole-aperture, part-field comparatively wavelength calibration are achieved, and spectrum curve and Before-launch Interferogram is obtained.

Key words: On-board calibration; SMIFTS; integrating sphere; Spectrum filter



GAO Jing was born in 1973. Now she is a Ph. D. degree candidate, and her research interests focus on space optics.



WANG Zhong-hou graduated from Tsinghua University in 1967. Now he is a professor and chief designer of the Key Laboratory of Spectral Imaging Technology. His research interests focus on spectral imaging, underwater photography and range optical measurement technology.