

光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标方法研究

马亮 危峻 黄小仙 崔毅 张晓

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 为了实现光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标,采用 1243×576 光敏元的背照减薄型 CCD 面阵探测器,设计了一套光谱定标装置,实现了光谱定位精度 ± 1 nm 的光谱定标方法。该方法多方考量了对光谱定标产生影响的因素,包括光源光谱分布、光栅分光效率、单色仪光谱带宽、谱线弯曲和 Fringes 现象。针对这些因素,提出了用于光谱波长定位校正的数学模型。光谱定标的结果表明:实验室光谱定标各像元平均光谱带宽为 2.20 nm,谱线弯曲最大值为 0.925 nm,弯曲方向符合理论方向。用汞灯等线谱光源进行复测,光谱定位误差最大值为 0.6 nm,符合预定的定标精度要求。

关键词 光谱学;光谱定标;成像光谱仪;单色仪;谱线弯曲

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.023001

Laboratory Spectral Calibration Method of Grating Dispersive Imaging Spectrometer

Ma Liang Wei Jun Huang Xiaoxian Cui Yi Zhang Xiao

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract In order to obtain spectral response curve of grating dispersive imaging spectrometer for laboratory calibration by back illuminated thinned 1243×576 detector array, a set of spectral calibration device which implements a spectral calibration method with the accuracy of ± 1 nm is designed. Factors influencing spectral response including the light source spectral distribution, the grating efficiency, spectral bandwidth of the monochromator, the spectral-line bending and fringes phenomenon are evaluated, and for these confounding factors we propose a mathematical model for calibration. The spectral calibration results show that: the pixel average spectral bandwidth is 2.20 nm, the maximum value of spectral-line bending is 0.925 nm and the bending direction is in line with the theoretical direction. Repeating the test with the mercury lamp, the spectral uncertainty is less than 0.6 nm.

Key words spectroscopy; spectral calibration; imaging spectrometer; monochromator; spectral-line bending

OCIS codes 300.6320; 300.6190; 120.4140

1 引言

高光谱遥感技术是从 20 世纪 80 年代开始发展起来的一种新的遥感技术,其特点在于在成像的同时能够获得目标连续的高分辨率光谱信息,这为精确识别地物提供了强有力的探测手段^[1],所得到的高光谱图像包含了观测场景中的光谱信息和空间信息,具有“图谱合一”的特性^[2],在地物识别,矿物探测、精准农业和火灾预警等方面具有很大的应用潜力^[3,4]。

成像光谱仪的光谱分辨率通常小于 10 nm,光谱通道数能达到数十乃至数百个,这使得其每个光谱通道的带宽很窄,通常只有 10~20 nm,这就对带宽和中心波长的定标精度提出了很高的要求^[5]。因此,成像光谱仪发射前和在轨运行期间都需要进行严格的定标,以建立进入仪器的辐射量与输出电信号之间的定量关系^[6]。

收稿日期: 2012-08-07; 收到修改稿日期: 2012-09-29; 网络出版日期: 2013-01-11

作者简介: 马亮(1988—),男,博士研究生,主要从事定标技术、系统性能检测和图像处理等方面的研究。

E-mail: ma325liang@126.com

导师简介: 危峻(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事卫星(或飞船)载光学对地观测遥感仪器总体方案设计和整机研制工作。E-mail: weijun87@yahoo.com

目前实验室光谱定标的主要方法为单色准直光法,即利用单色仪等标准分光器件作为单色光源,通过平行光管获得定标所需的单色准直光。目前已知有 AVIRIS^[7]、COMPASS^[8]、MODIS^[9] 和 Hyperion^[10] 等成像光谱仪都采用这种定标方法。

本文针对一台采用光栅色散的多模块宽波段成像光谱仪的光谱定标需求,从基本原理和技术细节等方面讨论了实验室自动化光谱定标方法,针对实验条件提出了一套新的校正算法,并对实验结果进行了验证。

2 光谱定标原理

光谱定标的目的就是要确定仪器的光谱响应与光谱分辨率^[11],公式为

$$V_r(\lambda) = K_r P(\lambda) R_r(\lambda), \quad (1)$$

式中 K_r 为测量系统参考通道的总增益, $P(\lambda)$ 为光源的光谱功率分布、单色仪光栅效率与传递光路的效率的联合分布函数, $R_r(\lambda)$ 为光谱仪的光谱响应函数,下标 r 为探测器上的像元序号。在实际测量中, $R_r(\lambda)$ 在额定范围内变化较小,则主要需用 $P(\lambda)$ 以对直接测量得到的 $V_r(\lambda)$ 进行修正,才能获得准确的光谱定标参数^[12]。

传统光谱定标往往针对数个光谱通道,即在光谱维上选取连续的多行像元作为一个通道,测量通道内像元的平均值并绘出光谱曲线以求得中心波长、前后截止波长等光谱性能参数,这种方法适用于普通的空间相机光谱定标。对于成像光谱仪,因为其对光谱分辨率有更高的要求,所以选取的通道带宽要求更窄。对于窄带光谱定标,光谱弯曲和 Fringes 现象带来的干扰会更加严重,这就使得基于单个像元分析光谱性能很有必要。

定标原理为采用稳定连续谱的光源,经单色仪分光后通过匀光器进入准直系统,再射入成像光谱仪中。在实验过程中控制单色仪进行光谱扫描,同时控制成像光谱仪同步采集数据,得到二维空间一维光谱的光谱扫描矩阵,对该矩阵逐像元分析光谱带宽、中心波长、前后截止波长等参数,即完成光谱定标的主要步骤。本文中的成像光谱仪采用光栅分光,和棱镜分光相比,其色散线性度更为良好。光谱仪光谱范围 450~1000 nm,采用 1243×576 光敏元的背照减薄型 CCD 面阵探测器,在空间维选取 1024 点光谱维选取 576 点作为有效像元,像元平均间距 2.2 nm,定标精度要求控制在 ±1 nm。图 1 为基本原理图。

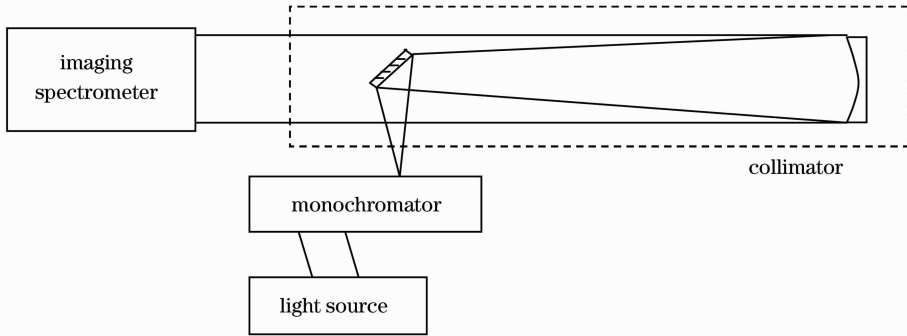


图 1 光谱定标基本原理图

Fig. 1 Schematic of basic principle of spectral calibration

3 光谱定标校正

3.1 校正函数计算

直接测量得到的 $V_r(\lambda)$ 需要通过校正函数 $P(\lambda)$ 进行校正,其主要由两部分组成:光源的光谱功率分布和单色仪及其光路的光学效率。在实验中,光源采用低驱动电压高照明效率的卤素灯,其主要参数如下:24 V/10.90 A,色温 3000 K。其在可见光波段的光谱曲线可用 3000 K 的黑体近似计算,根据普朗克辐射定律,

$$W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}), \quad (2)$$

式中 $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$ 为第一辐射常数, $c_2 = \frac{hc}{k} = 1.438769 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数。

将 3000 K 色温代入算得对应光谱曲线,如图 2 所示,其中峰值波长按维恩位移定律 $\lambda_m T = 2897.8 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 可算得 $\lambda_m = 965.67 \text{ nm}$ 。

单色仪及相关光路部分,需将匀光器置于平行光管的焦平面上,复合光经单色仪分光后再经过匀光器均化,最后通过平行光管可获得单色准直光。

单色仪出射光光谱带宽与多种因素有关,其公式为

$$\Delta_{\text{FWHM}} = \sqrt{d\lambda_s^2 + d\lambda_r^2}, \quad (3)$$

式中 $d\lambda_r$ 为系统相差和衍射效应等决定的极限带宽, $d\lambda_s$ 为单色仪狭缝决定的带宽,通常情况下, $d\lambda_s$ 在两者间起决定性作用,而对于 $d\lambda_s$,其对谱线扩展的影响如图 3 所示。

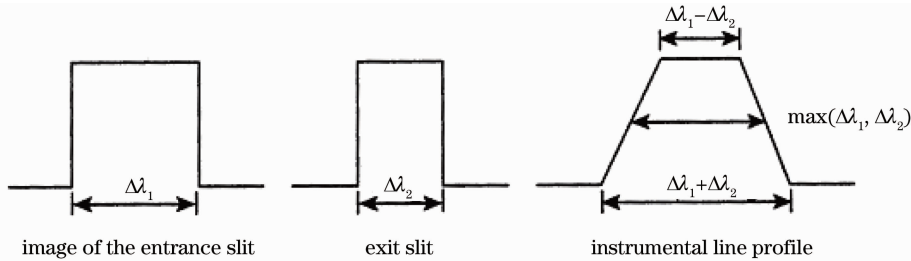


图 3 狭缝宽度对光谱带宽影响示意图

Fig. 3 Influence of the slit width on spectral bandwidth

图 3 中, $\Delta\lambda_1 = W_{\text{ent}} d\lambda/dl$, $\Delta\lambda_2 = W_{\text{ex}} d\lambda/dl$, W_{ent} 和 W_{ex} 分别为单色仪入射和出射狭缝宽度, $d\lambda/dl$ 为光栅线色散率。查单色仪手册可得对应于所采用的 1200 groove/mm 的闪耀光栅,其线色散率 $d\lambda/dl = 1.37 \text{ nm/mm}$,按公式计算可得到峰值能量一半处的光谱带宽为 $\Delta_{\text{FWHM}}^{[13]}$ 。

定标光谱仪光谱范围 450~1000 nm,当狭缝固定时在该范围内时可忽略波长 λ 对 $d\lambda_s$ 曲线的影响。设 $T_r(\lambda)$ 为单色仪输入光谱曲线, $d(\lambda)$ 为单谱单色仪出射光谱带宽函数,则输出曲线为 $d\lambda_s$ 和 $T_r(\lambda)$ 的卷积:

$$T_r(\lambda) * d(\lambda) = \int_{450}^{1000} T_r(\lambda) d(\lambda_0 - \lambda) d\lambda. \quad (4)$$

对于单色仪输入光谱曲线,其值应为光源光谱分布曲线 $P(\lambda)$ 和单色仪光栅效率曲线 $T_0(\lambda)$ 的乘积。光栅效率曲线与光栅本身制作的参数和反射面材质有关,本文光谱定标系统采用的光栅效率曲线如图 4 所示。

最终进入平行光管的光谱响应函数应为

$$P(\lambda) = [W(\lambda) T(\lambda)] * d(\lambda). \quad (5)$$

3.2 谱线弯曲和 Fringes 现象校正

单色准直光射入成像光谱仪后,会发生谱线弯曲(Smile 效应)。本文测试系统采用光栅分光,经实测其光谱弯曲最大值小于 0.5 pixel,为了简化定标模型,采用分段线性拟合的方法,在探测器空间维上按固定间隔选取数列进行光谱定标,之后对这些列相同行的点进行分段线性拟合,即完成整个探测器面的工作中心波长和光谱辐射响应带宽标定。

此外,薄型 CCD 器件在近红外波段会存在经典的 Fringes 现象,即明暗相间的干涉条纹,通常这被认为是系统噪声。其产生原因为:在可见近红外波段,硅对入射光子的吸收深度随波长的增加而增加,蓝紫光在硅表面即被吸收,而红光光子可直接穿透器件,或在硅层内部来回反射而形成干涉条纹,当光谱带宽很窄时,干

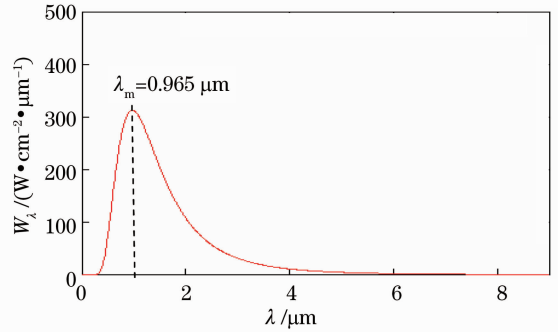


图 2 3000 K 黑体光谱曲线

Fig. 2 3000 K blackbody spectral curve

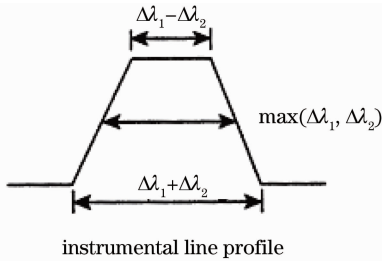


图 3 狭缝宽度对光谱带宽影响示意图

Fig. 3 Influence of the slit width on spectral bandwidth

图 3 中, $\Delta\lambda_1 = W_{\text{ent}} d\lambda/dl$, $\Delta\lambda_2 = W_{\text{ex}} d\lambda/dl$, W_{ent} 和 W_{ex} 分别为单色仪入射和出射狭缝宽度, $d\lambda/dl$ 为光栅线色散率。查单色仪手册可得对应于所采用的 1200 groove/mm 的闪耀光栅,其线色散率 $d\lambda/dl = 1.37 \text{ nm/mm}$,按公式计算可得到峰值能量一半处的光谱带宽为 $\Delta_{\text{FWHM}}^{[13]}$ 。

定标光谱仪光谱范围 450~1000 nm,当狭缝固定时在该范围内时可忽略波长 λ 对 $d\lambda_s$ 曲线的影响。设 $T_r(\lambda)$ 为单色仪输入光谱曲线, $d(\lambda)$ 为单谱单色仪出射光谱带宽函数,则输出曲线为 $d\lambda_s$ 和 $T_r(\lambda)$ 的卷积:

$$T_r(\lambda) * d(\lambda) = \int_{450}^{1000} T_r(\lambda) d(\lambda_0 - \lambda) d\lambda. \quad (4)$$

对于单色仪输入光谱曲线,其值应为光源光谱分布曲线 $P(\lambda)$ 和单色仪光栅效率曲线 $T_0(\lambda)$ 的乘积。光栅效率曲线与光栅本身制作的参数和反射面材质有关,本文光谱定标系统采用的光栅效率曲线如图 4 所示。

最终进入平行光管的光谱响应函数应为

$$P(\lambda) = [W(\lambda) T(\lambda)] * d(\lambda). \quad (5)$$

3.2 谱线弯曲和 Fringes 现象校正

单色准直光射入成像光谱仪后,会发生谱线弯曲(Smile 效应)。本文测试系统采用光栅分光,经实测其光谱弯曲最大值小于 0.5 pixel,为了简化定标模型,采用分段线性拟合的方法,在探测器空间维上按固定间隔选取数列进行光谱定标,之后对这些列相同行的点进行分段线性拟合,即完成整个探测器面的工作中心波长和光谱辐射响应带宽标定。

此外,薄型 CCD 器件在近红外波段会存在经典的 Fringes 现象,即明暗相间的干涉条纹,通常这被认为是系统噪声。其产生原因为:在可见近红外波段,硅对入射光子的吸收深度随波长的增加而增加,蓝紫光在硅表面即被吸收,而红光光子可直接穿透器件,或在硅层内部来回反射而形成干涉条纹,当光谱带宽很窄时,干

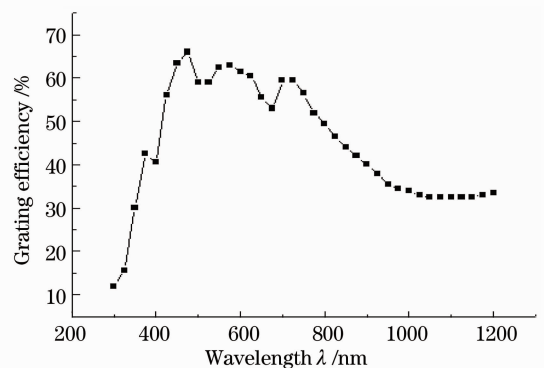


图 4 1200 groove/mm 500 nm 闪耀光栅效率曲线

Fig. 4 Efficiency curve of blazed grating of 1200 groove/mm at 500 nm

涉条纹尤其明显。这就使得在近红外波段,定标光谱间隔会呈锯齿状上下波动,影响光谱定标精度,如图5所示,图中横坐标为波长,纵坐标是相邻点间的光谱差值,在大约800 nm以后的波段,谱段中心波长差值波动较大。但是,Fringes现象不会带来谱段的整体漂移,因此考虑对近红外波段的光谱响应做分段线性拟合,实际中在800~1000 nm每相隔10点拟合一条直线,每像元光谱响应按拟合后的直线取值,这样就可以减少Fringes现象带来的影响。

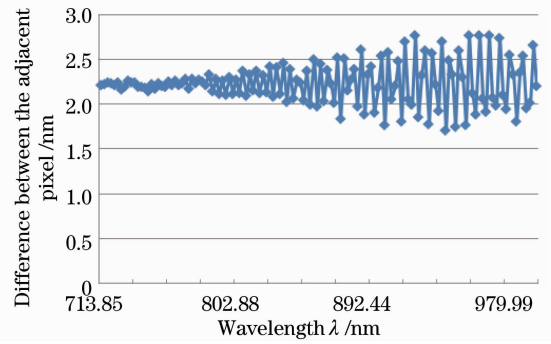


图5 相邻像元光谱差值对Fringes现象的体现

Fig. 5 Reflection of fringes phenomenon by difference between the adjacent pixel

4 实验结果分析

图6和图7分别为视场中心和视场边缘的两列像元的光谱定标曲线,横坐标为探测器上的像元序号,有效像元为第181元至第450元,纵坐标为像元对应的光谱中心波长,其中750 nm以上部分进行了分段线性拟合以矫正Fringes现象。经比对,边缘像元较中心像元的谱段中心波长向短波方向偏移0.925 nm,即光谱曲线向长波方向弯曲0.925 nm,和理论上光栅分光产生的Smile现象相符。

为验证光谱定标精度,采用汞灯和氦氖激光器谱线(546.07, 576.96, 632.8 nm)进行光谱定标检测,在图6和图7中进行标记,实验结果中心波长最大偏差0.6 nm。

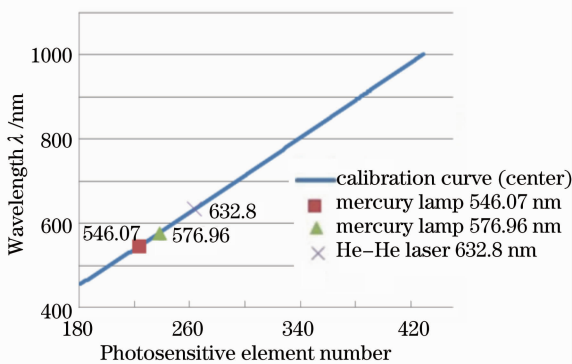


图6 视场中心的光谱定标曲线

Fig. 6 Spectral calibration curve in the center of the field of view

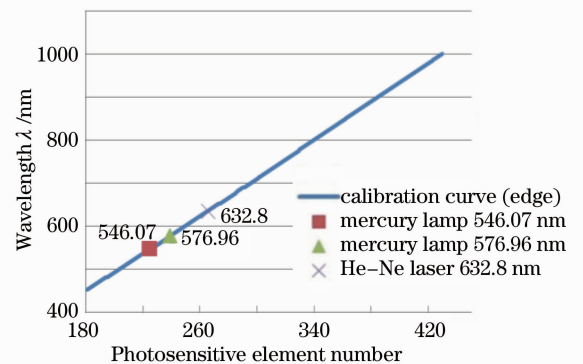


图7 视场边缘的光谱定标曲线

Fig. 7 Spectral calibration curve at the edge of the field of view

为验证光谱定标重复性并验证校正算法效果,选取中心视场附近不同列的像元,在不同时间进行了7次重复定标测试,并对校正前后的定标曲线进行统计分析,结果如表1所示。

表1 光谱定标重复测试分析

Table 1 Repeatability test of spectral calibration

	450~1000 nm full band		800~1000 nm near-infrared bands	
	Average uncertainty	Largest deviation of absolute value /nm	Average uncertainty	Largest deviation of absolute value /nm
Before correction	0.227	0.589	0.352	0.589
After correction	0.166	0.335	0.166	0.335

由表1得出,校正算法可有效提高光谱定标精度并减少测量的不确定度,尤其对800 nm以上近红外波段有较好的改善效果,采用校正过的光谱定标曲线,中心波长最大误差小于0.335 nm,满足±1 nm的精度要求。

5 结论

对光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标提出了一种定标方法,对理论上存在的系统误差提出了一

套校正方案,通过计算机软件自动控制,该测试方法简单易行。直接用已知光谱检测实验结果,最大误差0.6 nm,重复测试最大偏差0.335 nm,满足 ± 1 nm的设计精度要求。

参 考 文 献

- 1 Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. Hyperspectral Remote Sensing: Principle, Technique and Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 1~2
童庆禧, 张 兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 1~2
- 2 Wu Chao, Wu Yiquan. Target detection in hyperspectral image using projection pursuit based on chaotic particle swarm optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1211003
吴 超, 吴一全. 基于混沌粒子群优化投影寻踪的高光谱图像目标检测[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1211003
- 3 Zhao Chunhui, Qi Bin, Zhang Yi. Hyperspectral image classification based on variational relevance vector machine[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0828004
赵春晖, 齐 滨, 张 燚. 基于改进型相关向量机的高光谱图像分类[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0828004
- 4 Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao *et al.*. System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3545~3550
杨本永, 张黎明, 陈洪耀 等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3545~3550
- 5 Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 2347~2354
郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. 光学精密工程, 2010, 2347~2354
- 6 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Hongzhuang *et al.*. Study on calibration environment of spectral responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0312001
张振铎, 王淑荣, 李宏壮 等. 空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0312001
- 7 G. C. Thomas, O. G. Robert, L. Michael. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[C]. *SPIE*, 1990, **1298**: 37~49
- 8 G. T. Arnold, M. F. Fitzgerald, P. S. Grant *et al.*. MODIS airborne simulator radiometric calibration[C]. *SPIE*, 1996, **2820**: 56~66
- 9 L. Lushalan, J. Peter, G. Darrel *et al.*. Performance characterization of the hyperion imaging spectrometer instrument[C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 264~275
- 10 Z. Jerry, G. Daniel, M. Robert *et al.*. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 2004, **5425**: 182~188
- 11 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0528002
施海亮, 方勇华, 吴 军 等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0528002
- 12 Chen Shiping, Yang Bingxin, Wang Huaiyi. Space Camera Design and Experiment [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. 326~328
陈世平, 杨秉新, 王怀义. 空间相机设计与实验[M]. 北京: 宇航出版社, 2003. 326~328
- 13 J. M. Lerner, A. Thevenon. The Optics of Spectroscopy[M]. Edison: J-Y Optical Systems/Instruments AS, Inc., 1988. 22~293