

# 成像光谱仪星上定标技术

李晓晖, 颜昌翔

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 成像光谱仪是同时获取地物图像和光谱信息的新一代光学遥感仪器。星上定标是成像光谱仪光谱图像数据量化应用的基础。本文阐述了成像光谱仪星上定标的原理, 按照星上定标采用的参考标准对星上定标技术进行了分类, 介绍了星上辐射定标和光谱定标技术, 并展望了成像光谱仪未来发展趋势。最后指出, 绝对辐射定标已经成为成像光谱仪星上定标的基本要求, 太阳将逐步代替星上标准灯成为绝对辐射标准。基于不同参考标准的定标方法的综合应用将使星上定标精度和可靠性大大提高。随着定标精度的进一步提高, 地面光谱定标装置将逐步空间化, 基于探测器的星上辐射定标系统也将逐步得到应用。

**关键词:** 成像光谱仪; 星上定标; 辐射定标; 光谱定标

**中图分类号:** TP73      **文献标识码:** A

## Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager

LI Xiao-hui, YAN Chang-xiang

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** The Hyper-spectral Imager (HSI) is a kind of new optical remote sensor that can simultaneously capture images and spectral information of ground targets. The onboard calibration is the basis for space-borne HSI to obtain accurately quantified spectral imaging data. This paper presents the principles of onboard calibration for HSI and classifies the onboard calibration technologies according to the different calibration references. Then, it reviews the onboard radiometric and spectral calibration technologies for HSI, and presents an expectation to the development of the onboard calibration technologies in future. Finally, it summarizes that the absolute radiometric calibration has already been the basic requirement of the radiometric calibration of HSI, and solar radiance will gradually take the place of onboard lamps to be an absolute radiometric calibration reference. The calibration accuracy and reliability will be greatly enhanced by the combination of multi calibration technologies based on different calibration references. With the enhancement of the calibration accuracy, the ground spectral calibration assembly will be used in the space and the detector-based radiometric calibration system will be progressively taken into applications to the onboard radiometric calibration.

**Key words:** Hyper-spectral Imager (HSI); onboard calibration; radiometric calibration; spectral calibration

## 1 引言

成像光谱仪是同时获取地物图像和光谱信息的新一代光学遥感仪器<sup>[1]</sup>,可为农作物估产、矿物勘探、资源普查、环境监测等提供新的研究手段。按照搭载平台的不同,成像光谱仪可以分为星载成像光谱仪和机载成像光谱仪两大类,本文仅讨论星载成像光谱仪。

成像光谱仪的应用以量化的数据为基础,因此需要对其进行准确定标。成像光谱仪的定标包括辐射定标和光谱定标两方面。辐射定标的任务是利用辐射参考标准,建立成像光谱仪的数字化输出与其接收的地面景物辐亮度之间的换算关系。光谱定标的任务是确定成像光谱仪各光谱通道的光谱响应曲线及中心波长和半宽度。发射过程中以及在轨运行期间,星载成像光谱仪的光学、结构和电子学部件会发生性能改变,导致实验室辐射定标建立的数字化输出和地面景物辐亮度之间的关系发生改变,同时也会使像面上谱线位置发生改变。为了得到准确的光谱图像数据,必须对这些变化进行校正,这就要求在实验室定标的基础上对成像光谱仪进行星上定标。

## 2 成像光谱仪星上定标原理

与地面定标类似,成像光谱仪星上定标也包括辐射定标和光谱定标两方面,即利用外部参考标准或内部参考标准对成像光谱仪在轨运行期间的辐射响应关系和光谱谱线位置进行标定,对其在轨运行期间性能的稳定性做出评估,得到准确的量化的光谱图像数据。

星上辐射定标是由成像光谱仪的数字化输出  $DN$  得到与之对应的地物的绝对光谱辐亮度  $L(\lambda)$ 。假定成像光谱仪在轨运行期间,地物光谱辐亮度  $L(\lambda)$  和星上辐射定标参考标准光谱辐亮度  $L_c(\lambda)$  对应的数值输出分别为<sup>[2]</sup>:

$$DN(i, j) = C(i, j)L(\lambda) + b(i, j), \quad (1)$$

$$DN_c(i, j) = C(i, j)L_c(\lambda) + b(i, j), \quad (2)$$

式中: $C(i, j)$ 为成像光谱仪第*i*行,第*j*列探测器像元的辐射响应度; $b(i, j)$ 为成像光谱仪第*i*行,

第*j*列探测器像元的暗电流输出。

利用式(1)、(2),即可得到地物的光谱辐亮度  $L(\lambda)$ :

$$L(\lambda) = \frac{DN(i, j) - b(i, j)}{DN_c(i, j) - b(i, j)}L_c(\lambda), \quad (3)$$

成像光谱仪在轨运行期间,定期测量星上定标参考标准对应的电子学输出  $DN_c(i, j)$ ,由于星上定标参考标准的光谱辐亮度  $L_c(\lambda)$  已经事先精确标定,利用公式(3)即可完成对成像光谱仪的星上辐射定标。

星上光谱定标通常是利用波长已知的特征谱线(如大气吸收线)作为参考,确定成像光谱仪在轨期间各光谱通道的中心波长,进而确定其相对于实验室光谱定标结果的变化量,实现精确的光谱校准。

## 3 成像光谱仪星上定标技术

根据采用的定标参考标准不同,成像光谱仪星上定标技术可以分为利用外部参考标准和利用内部参考标准两大类。常用的外部参考标准有太阳、月亮、大气吸收线等;常用的内部参考标准有星上标准灯、星上积分球、滤光片、具有特征谱线的漫射板和具有典型光谱输出的光源(如汞灯、激光二极管)等。

### 3.1 利用外部参考标准进行星上定标

#### 3.1.1 辐射定标

##### (1) 太阳光 + 漫射板 + 比值辐射计

太阳是一个非常稳定的辐射参考标准,在日地平均距离上大气层外太阳的总辐照度的经年变化  $< 0.1\%$ <sup>[1]</sup>。利用太阳作为辐射参考标准, J. M. Palmer等<sup>[3]</sup>提出了“太阳光 + 漫射板 + 比值辐射计”的星上辐射定标方法。该方法是通过调整平台姿态,使太阳光照射到漫射板上,经漫射板反射后进入成像光谱仪,完成辐射定标。比值辐射计则用于轮流观测太阳光和被太阳光照射的漫射板,监测漫射板反射特性在轨期间的变化。这种方法在多个成像光谱仪上得到了应用,如美国的 HIRIS (High Resolution Imaging Spectrometer)<sup>[4]</sup>、MODIS<sup>[5,6]</sup> (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)、Hyperion<sup>[7,8]</sup>, 欧空局的 HRIS<sup>[9,10]</sup> (High Resolution Imaging Spectrometer) 等。图 1

所示为 MODIS 星上定标装置图,其辐射定标装置由漫射板(Solar Diffuser)和漫射板稳定性监测器

(Solar Diffuser Stability Monitor,SDSM)共同组成,这里 SDSM 采用的即为一个比值辐射计。

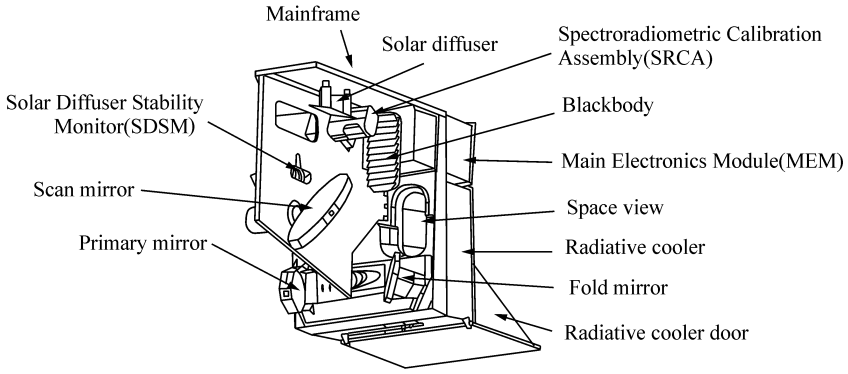


图 1 MODIS 星上定标装置图

Fig. 1 Onboard calibration assembly of MODIS

(2) 太阳光 + 漫射板组

搭载在欧空局 ENVISAT 平台上的 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) 同样采用太阳作为定标参考标准,它采用固定在选择盘上的漫射板组实现辐射定标和光谱定标<sup>[11,12]</sup>。如图 2 所示,选择盘上共有 3 个漫射板(diffuser)、一个光阑(diaphragm)和一个快门(shutter),其中漫射板 1、漫射板 2 和快门联合完成辐射定标。

于 2002 年发射成功后,星上定标系统在轨工作正常<sup>[13]</sup>,顺利地完成了任务。MERIS 的研制者 AL-CATEL-SPACE 公司正在考虑借鉴 MERIS 星上定标系统的成功经验,在其后续的成像光谱仪 SPECTRA(Surface Processes and Ecosystems Changes through Response Analysis)中采用同样的方案<sup>[14]</sup>。

(3) 太阳光 + 漫透射板

搭载在俄罗斯空间站 MIR 的遥感舱 PRIRODA 上的 MOS (Modular Optoelectronic Scanner) 采

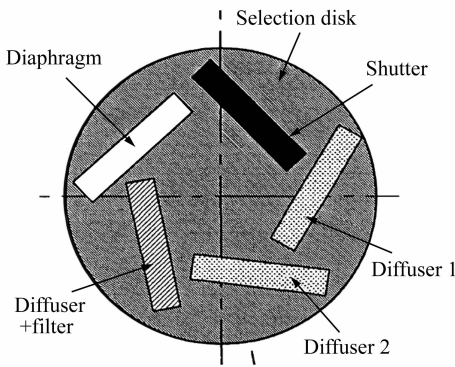


图 2 MERIS 星上定标装置图

Fig. 2 Onboard calibration assembly of MERIS

漫射板 1 使用频繁,用于辐射定标的实施,漫射板 2 则较少使用,用于监测漫射板 1 在轨期间反射特性的改变,这也正是 MERIS 辐射定标方法与“太阳光 + 漫射板 + 比值辐射计”方法的区别所在。当选择盘调至快门时,地物辐射和太阳光均被挡掉,用于定标 MERIS 的暗电流输出。MERIS

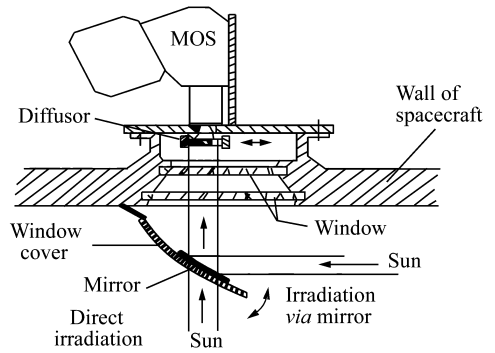


图 3 MOS 星上辐射定标原理图

Fig. 3 Schematic of onboard radiometric calibration of MOS

用直射太阳光和漫透射板完成星上辐射定标。定标时,空间舱直接对准太阳,漫透射板则在空间舱窗口后面移入光路<sup>[15]</sup>,如图 3 所示。

#### (4) 太阳光 + 反射棱镜

欧空局 PROBA (Project for On-board Autonomy) 平台上的 CHRIS (Compact High-resolution Imaging Spectrometer) 利用反射棱镜将太阳光引入其入瞳, 作为星上辐射定标的亮目标<sup>[16]</sup>, 而暗电流输出则利用人工设定的地面暗目标来定标。

#### (5) 月亮

月球表面具有十分稳定的反射率, 同样是一种理想的外部辐射参考标准。因此, 可以在轨道的适当位置将成像光谱仪对准满月时的月球, 实现辐射定标。MODIS<sup>[17]</sup>、SeaWiFS<sup>[18]</sup> (Sea-viewing Wide Field of View Sensor)、Hyperion<sup>[7]</sup> 都利用月亮进行了星上辐射定标。

#### 3.1.2 光谱定标

成像光谱仪星上光谱定标的外部参考标准通常为大气吸收线和太阳谱线, 如 760 nm 处的 O<sub>2</sub> 吸收线<sup>[16]</sup>, 484 nm、863 nm 处的夫琅和费线<sup>[13]</sup> 等。

### 3.2 利用内部参考标准进行星上定标

#### 3.2.1 辐射定标

辐射定标内部参考标准即星上定标光源, 多数采用光谱辐射特性已经标定好的宽谱灯或宽谱灯照明的积分球。MOS、HRIS 等成像光谱仪都配备有微型定标灯用于相对辐射定标。图 4 所示为

性<sup>[19]</sup>。

#### 3.2.2 光谱定标

除大气吸收线、太阳谱线等外部光谱参考标准外, 多数成像光谱仪都配备有内部光谱参考标准用于星上光谱定标。MOS 和 HRIS 均采用具有特征吸收峰的滤光片进行星上光谱定标<sup>[9,15]</sup>。MERIS 和 SPECTRA 则采用掺杂铒、钬、镝等稀土元素氧化物的漫射板作为星上光谱定标装置, 即图 2 中的漫射板 + 滤波器 (diffuser + filter), 利用这些氧化物的特征反射光谱作为光谱定标参考标准, 如图 5 所示。Hyperion 也利用其盖板涂料的特征反射光谱作为 SWIR 波段光谱定标的参考标准之一<sup>[20]</sup>。另外, 还有一些成像光谱仪利用发射特征谱线的光源进行光谱定标, 如利用激光二极管<sup>[9]</sup> 的 HRIS 和利用 Pt-Cr/Ne 空心阴极灯<sup>[19]</sup> 的 SCIAMACHY 等。

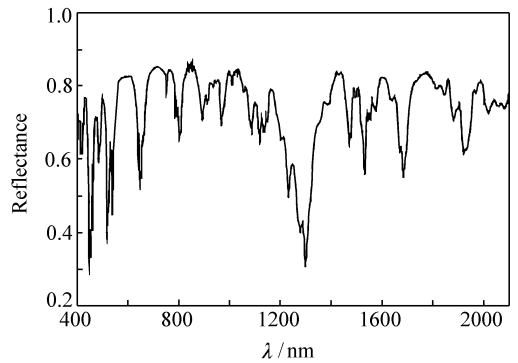


图5 MERIS 漫射板(铒、钬、镝掺杂)反射率曲线  
Fig.5 Reflectance of diffuser(doped by erbium, holmium, dysprosium) for MERIS spectral calibration

MODIS 的星上光谱定标比较有特色, 它利用光谱-辐射定标装置 SRCA 的光谱定标模式完成星上光谱定标<sup>[21]</sup>, SRCA 在 MODIS 上的空间位置如图 1 所示。在光谱定标模式下, 星上积分球发出的光辐射经单色仪分光后进入准直器, 经准直扩束后进入 MODIS, 完成星上光谱定标, 如图 6 所示。该装置一个重要特点是具有光谱自定标功能, 在单色仪出射狭缝旁边放置硅光电二极管 (Si-PD), 并在 Si-PD 前放置钨镧玻璃滤光片, 利用钨镧玻璃滤光片的典型吸收峰和 Si-PD 输出信号的极小值, 即可建立单色仪光栅转动编码器码

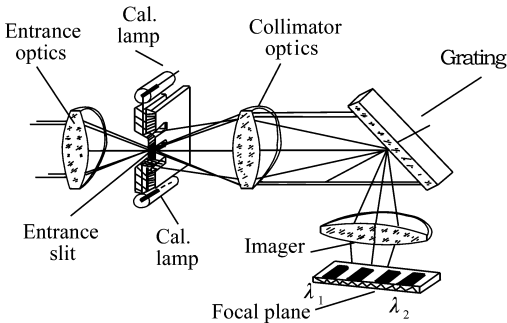


图4 MOS 星上定标灯原理图

Fig.4 Schematic of onboard calibration lamps for MOS

MOS 星上定标灯示意图<sup>[15]</sup>, 在光谱仪的狭缝处, 用微型光学系统引入光, 监视光谱仪和焦平面探测器的稳定性, 实现相对辐射定标。搭载在 ENVISAT 上的 SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography) 则利用石英卤钨灯监测 CCD 像元响应的不均匀

值与输出波长之间的关系,完成光谱自定标。同时,准直器次镜中心附近也放置有一个 Si-PD,以该 Si-PD 输出的信号作为参考,可以消除定标光源光谱辐射分布对定标的影响。利用 SRCA,MODIS 可在在轨飞行期间直接测出其各光谱通道的

响应曲线,如图 7 所示。由于采用了通常在地面定标中使用的单色仪作为星上光谱定标装置,MODIS 达到了很高的光谱定标精度,在  $< 1 \mu\text{m}$  的光谱波段,其光谱定标精度为  $\pm 1 \text{ nm}$ <sup>[22]</sup>。

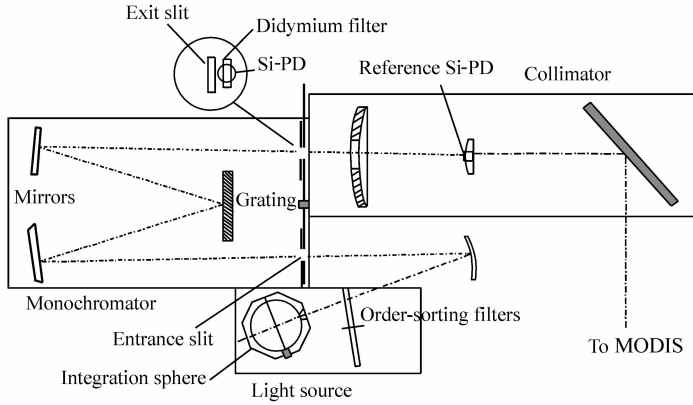


图 6 MODIS 光谱定标示意图

Fig. 6 Schematic of spectral calibration of MODIS

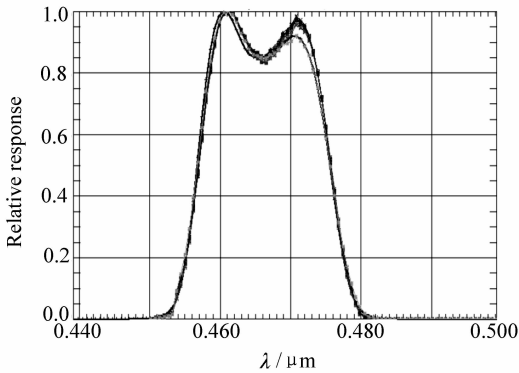


图 7 SRCA 测得的 MODIS 第 3 光谱通道的相对光谱响应曲线

Fig. 7 MODIS' relative spectral response for band 3 measured by SRCA

## 4 成像光谱仪星上定标技术发展趋势

### 4.1 多种定标方法综合应用

随着对定标精度和可靠性要求的提高,成像光谱仪将综合应用基于不同参考标准的定标方法。大气吸收线等外部参考标准和滤光片等内部参考标准综合应用将是多数成像光谱仪星上光谱

定标的基本策略。星上辐射定标方面也出现了内部参考标准和外部参考标准综合使用的趋势,如 EO-1 平台上的 Hyperion 就综合应用了太阳定标、月亮定标和星上标准灯定标等方法。综合应用多种定标方法,不同定标结果可以相互比对,从而提高定标精度,同时,多种定标方法互为冗余,提高了系统的可靠性。

### 4.2 太阳将逐步取代内部参考标准成为绝对辐射标准

随着科学应用需求的提高,绝对辐射定标将是未来成像光谱仪星上定标的基本要求。由于内部参考标准定标光路只能从成像光谱仪成像光路中间某个部位切入,不能进行全光路定标,因此无法实现绝对定标,只能对切入点之后的光路进行相对定标。如果在整个光路的最前方放置漫射体,利用太阳作为定标参考标准,采用可展开收起的机械结构就可以实现全光路定标,进而实现绝对辐射定标。另外,标准灯在轨期间自身性能会出现下降,同时也难以满足成像光谱仪辐射定标所需的信噪比要求。因此,可以预见,太阳将逐步取代内部参考标准成为星上定标的绝对辐射标准。

### 4.3 地面光谱定标装置空间化

随着科学的发展,成像光谱仪光谱定标精度也将越来越高。目前,多数成像光谱仪星上光谱定标是通过测定像面上若干特征谱线的位置,然后利用插值等数学方法计算得到各光谱通道的中心波长。这种定标方法必然存在误差,对于提高光谱定标精度非常不利,尤其是当参考标准特征谱线宽度小于成像光谱仪光谱分辨率的时候。如果将地面光谱定标常用的单色仪和平行光管空间化(如 MODIS),则可以扫描得到成像光谱仪各光谱通道的响应函数。由于单色仪的光谱分辨率远高于成像光谱仪的光谱分辨率,这将大大提高星上光谱定标的精度,减小定标误差。这种定标方法的缺点是系统复杂、可靠性不高,但随着技术的进步,相信这种定标方法将会得到越来越多的应用。

### 4.4 基于探测器的定标方法将逐步得到应用

虽然利用太阳和漫射板实现了绝对辐射定标,但是由于外太空强烈紫外照射和航天器排出物的污染,漫射板的反射特性会发生变化,带来辐射定标的误差,这种误差是基于辐射源的定标方法本身无法消除的。基于探测器的星上定标系统仍然以太阳作为定标光源,但不以其作为绝对辐

射标准,而是以星上标准辐亮度计为绝对辐射标准,不但能够实现全光路定标,而且精度较高、在空间环境下比较稳定,解决了漫射板反射率变化的难题。这种定标方法已经在 Hyperion<sup>[8]</sup>等成像光谱仪的地面定标中得到了应用。随着辐射定标精度要求的提高,基于探测器的定标方法将逐步在星上定标系统中得到应用。

## 5 结束语

成像光谱仪的星上定标是光谱图像数据量化应用的基础。绝对辐射定标已经成为成像光谱仪星上定标的基本要求,太阳将逐步代替星上标准灯成为绝对辐射标准。基于不同参考标准的定标方法的综合应用将使星上定标精度和可靠性大大提高。随着定标精度的进一步提高,地面光谱定标装置将逐步空间化,基于探测器的星上辐射定标系统也将逐步得到应用。应该指出的是,对于星载成像光谱仪来说,星上定标方案应根据定标精度要求以及平台提供的资源合理选用,过分复杂的定标系统不仅是对资源的浪费,而且会导致系统可靠性降低,甚至整个任务的失败。

### 参考文献:

- [1] 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 Technol. Appl.*, 1996, 11(3): 56-64. (in Chinese)
- [2] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 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)
- [3] PALMER J M, SLATER P N. A ratioing radiometer for use with a solar diffuser[J]. *SPIE*, 1991, 1493: 106-117.
- [4] ROCKEY D E. High Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS): a major advance in imaging spectrometry[J]. *SPIE*, 1990, 1298: 93-104.
- [5] XIONG X, CHIANG K, ESPOSITO J, *et al.*. MODIS on-orbit calibration and characterization[J]. *Metrologia*, 2003, 40: 89-92.
- [6] XIONG X, SUNA J, ESPOSITO J, *et al.*. MODIS reflective solar band calibration algorithm and on-orbit performance [J]. *SPIE*, 2002, 4891: 95-104.
- [7] BARRY P, SEGAL C, PEARLMAN J, *et al.*. Hyperion data collection: performance assessment and science application [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, California, USA, 2002.
- [8] JARECKE P, YOKOYAMA K, BARRY P. On-orbit solar radiometric calibration of the Hyperion instrument[J]. *SPIE*, 2002, 4480: 225-230.

- [9] BLECHINGER F, CHARLTON D E, DAVANCENS R, *et al.*. High resolution imaging spectrometer “HRIS” optics, focal plane and calibration[J]. *SPIE*, 1993, 1937: 207-224.
- [10] HARNISCH B, KUNKEL B, SAINT-PE O, *et al.*. HRIS technology development results and their implementation in future hyperspectral imagers[J]. *SPIE*, 1997, 3221, 396-411.
- [11] BAUDIN G, MATTHEWS S, BESSUDO R, *et al.*. Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) calibration sequence[J]. *SPIE*, 1996, 2819: 141-240.
- [12] OLIJ C, SCHAARSBERG J G, WERIJ H, *et al.*. Spectralon diffuser calibration for MERIS[J]. *SPIE*, 1997, 3221: 63-74.
- [13] DELWART S, HUOT J P, BOURG L. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT[J]. *SPIE*, 2003, 4881: 337-344.
- [14] LABANDIBAR J Y, BAUDIN G, BAILLION Y. ALCATEL-SPACE in hyper/multispectral earth observation programmes, from MERIS to SPECTRA[J]. *SPIE*, 2004, 5234: 232-242.
- [15] IMMERMANN G, NEUMANN A, SHMICH H, *et al.*. MOS/PRIROD-an imaging VIS/NIR spectrometer for ocean remote sensing[J]. *SPIE*, 1993, 1937: 201-206.
- [16] 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.
- [17] XIONG X, SUN J, BARNES W. MODIS on-orbit characterization using the moon[J]. *SPIE*, 2002, 4881: 299-307.
- [18] QU J J, BAO W, KAFATOS M, *et al.*. *Earth Science Satellite Remote Sensing, Volume 2*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [18] WERIJ H, KRUIZINGA B, OLIJ C, *et al.*. Calibration aspects of remote sensing spaceborne spectrometers[J]. *SPIE*, 1996, 2820: 126-137.
- [20] BARRY P S, SHEPANSKI J, SEGAL C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system[J]. *SPIE*, 2002, 4480: 231-235.
- [21] 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: 63610S.
- [22] THOMPSON L L. Moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) for the NASA earth observing system (EOS)[J]. *SPIE*, 1990, 1298: 105-113.

作者简介: 李晓晖(1983—), 男, 山西文水人, 研究实习员, 硕士研究生, 主要从事成像光谱仪定标的研究。

E-mail: lixiaohuihit@163.com