

文章编号 1004-924X(2011)12-2870-07

## 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标

齐向东<sup>1\*</sup>, 撒芑芑<sup>1</sup>, 潘明忠<sup>1</sup>, 崔继承<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了对自主研发的凸面光栅成像光谱仪进行光谱定标, 基于单色准直光定标法设计了一套由单色仪和平行光管组成的光谱定标系统。采用自行研制的光谱定标数据采集软件及数据处理软件对凸面光栅成像光谱仪进行了光谱定标及定标数据分析。定标结果显示: 该定标系统结构紧凑、通用性强, 具有较高的定标精度, 其光谱范围大于 400~800 nm, 光谱分辨率优于 10 nm, 能够满足实际定标要求。

**关键词:** 成像光谱仪; 凸面光栅; 光谱定标; 单色准直光定标法

**中图分类号:** TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2870

## Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating

QI Xiang-dong<sup>1\*</sup>, HAN Peng-peng<sup>1</sup>, PAN Ming-zhong<sup>1</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1,2</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: chinagrating@263.com*

**Abstract:** A spectral calibration facility consisting of a monochromator and a collimator was established to calibrate the Offner imaging spectrometer with a convex grating designed by ourselves. The self-designed software for sampling and processing spectral data was used to calibrate the Offner imaging spectrometer and analyze obtained data. Calibrated results show that the calibration facility has a compact conformation, better commonality and high calibration precision, and its spectral range is better than 400—800 nm and spectral resolution is superior to 10 nm, which can satisfy the calibration need in practice.

**Key words:** imaging spectrometer; convex grating; spectral calibration; collimated monochromatic calibration

收稿日期: 2011-04-22; 修订日期: 2011-05-18.

基金项目: 国家创新方法工作专项项目 (No. 2008IM040700); 吉林省科技支撑计划资助项目 (No. 20106011)

## 1 引言

凸面光栅成像光谱仪采用基于 Offner 同心结构的离轴三反式凸面光栅色散结构,该结构由两个凹球面反射镜和一个凸球面光栅组成,所有光学表面均为反射球面且所有球面的球心为同一点<sup>[1]</sup>。与传统成像光谱仪相比,同心系统使凸面光栅成像光谱仪具有谱线弯曲和色畸变小、无像散、结构简单、无移动部件等优点<sup>[2-3]</sup>,这种前沿技术在军事侦察、资源勘查、自然灾害监控、环境污染评估、医学诊断治疗等诸多领域具有广阔的应用前景<sup>[4-7]</sup>。近年来,随着光栅制造技术的发展以及凸面光栅制造工艺不断提升,凸面光栅成像光谱仪已经从最初的理论研究逐渐走向实际应用<sup>[8-11]</sup>。

凸面光栅成像光谱仪的定标是确定其探测单元输出数字量与其接收到的电磁波信号间定量关系的过程。定标为不同遥感仪器在不同时间、不同地点测得的成像光谱数据提供统一的参照,是对成像光谱数据进行定量化分析的前提。凸面光栅成像光谱仪的定标包括光谱定标和辐射定标,其中光谱定标是确定系统光谱特性指标的重要手段,是系统进行辐射定标的前提,也是提高成像光谱测量数据可信度的重要依据。

常用的光谱定标方法主要有标准谱线法和单色准直光定标法。标准谱线法利用汞灯、钠灯等标准灯的发射谱线对仪器进行标定,具有结构简单、易操作的优点,但标准谱线法只能实现光谱分辨率较高且线性色散仪器的中心波长标定,不能对光谱带宽进行标定。单色准直光定标法利用连续输出的单色准直光作为定标光源对仪器的光谱响应进行标定,该方法可同时实现宽光谱范围的中心波长和光谱分辨率的标定,具有定标精度高,实用性强的优点。单色准直光定标法弥补了传统标准谱线定标法不能进行光谱带宽标定的不足,目前国内外典型的成像光谱仪如 AVIRS、MODIS、Hyperion、COMPASS、OMIS、PHI 以及 FISS 等,均采用该方法进行光谱定标<sup>[12-18]</sup>。

为了对自主研制的凸面光栅成像光谱仪进行光谱定标,本文设计了由单色仪和平行光管组成

的单色准直光定标系统,利用该系统对凸面光栅成像光谱仪进行了光谱定标,并对光谱定标数据进行了分析处理。结果表明:该定标系统具有较高定标精度,能够满足实际的定标要求,检测的凸面光栅成像光谱仪的光谱分辨率、光谱范围等光谱特性指标均优于设计值要求。

## 2 系统组成及光谱定标原理

### 2.1 凸面光栅成像光谱仪的基本原理

凸面光栅成像光谱仪由前置望远光学系统和凸面光栅分光系统两部分组成,这两部分通过狭缝有机连结。图 1 所示为凸面光栅成像光谱仪进行遥感探测地物目标的原理图。太阳光经目标表面反射后进入前置望远光学系统,前置系统将目标成像在狭缝上;狭缝像经分光系统分光后在面阵探测器上形成一系列的光谱像,即一维空间信息及一维光谱信息,再经空间维推扫得到另一维空间信息,形成三维的数据立方体,数据立方体包括二维空间信息( $x, y$ )和一维光谱信息( $\lambda$ ),对于空间维中的任意一点,均能沿光谱维提取出完整的光谱曲线,用于对目标成分进行分析识别。

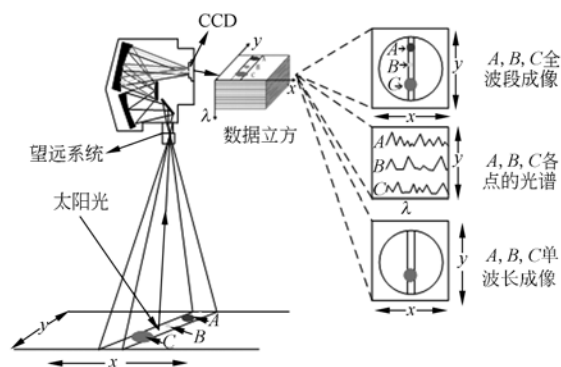


图 1 成像光谱仪基本原理图

Fig. 1 Schematic of convex grating hyperspectral imager

凸面光栅分光系统是凸面光栅成像光谱仪的核心部分,直接决定着成像光谱测量的准确度,该系统仅由 3 个光学元件组成:2 个凹球面反射镜和 1 个凸球面光栅,光栅位于 2 个反射镜之间且所有光学表面均为同心反射球面。同心结构使凸

面光栅分光系统具有成像质量好、结构简单、性能稳定、加工较易实现等优点。自主研发的凸面光栅成像光谱仪的主要参数如表 1 所示。

表 1 凸面光栅成像光谱仪的主要参数

Tab. 1 Main parameters of convex grating hyperspectral imager

系统参数	数值
光谱范围	400~800 nm
空间维像元数	1 004
波段数	>200
光谱分辨率	优于 10 nm
$F^\#$	3.5

## 2.2 光谱定标的原理

光谱定标是指确定成像光谱仪各个通道光谱响应函数的过程,即确定探测器的各个像元对于不同波长单色光的响应,进而得到各个通道的中心波长以及光谱分辨率。对于  $N$  个通道的成像光谱仪,第  $i$  个通道的输出为<sup>[19]</sup>:

$$X_i = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E_\lambda}{\pi} \beta^2 A \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) S_s(\lambda) R_d(\lambda) R_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式(1)中: $E_\lambda$ 为太阳光在波长 $\lambda$ 处的辐照度; $\beta$ 为系统的瞬时视场; $A$ 为系统的有效光学面积; $\rho(\lambda)$ 为地物的光谱反射率; $\tau_a(\lambda)$ 为大气的光谱透过率; $\tau_o(\lambda)$ 为系统的光学效率; $S_s(\lambda)$ 为光谱仪色散系统的传递函数; $R_d(\lambda)$ 为探测器的光谱响应率; $R_e(\lambda)$ 为电子学系统的光谱响应率。其中, $E_\lambda$ 、 $\rho(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$ 是与成像光谱仪系统无关的量,其它参数则取决于成像光谱仪的系统设计,因此系统第  $i$  个通道的相对光谱响应函数  $S_i(\lambda)$  可表示为:

$$S_i(\lambda) = \tau_o(\lambda) S_s(\lambda) R_d(\lambda) R_e(\lambda). \quad (2)$$

根据系统的相对光谱响应函数表达式,通过光谱定标,可以得到系统的光谱范围、各通道光谱响应与中心波长、光谱取样间隔及光谱分辨率等参数,这些参数可以用来表征成像光谱仪的光谱探测能力。其中,光谱范围是指系统能够响应的极限短波波长  $\lambda_s$  与极限长波波长  $\lambda_l$  之间的光谱区间;各通道的光谱响应是各通道探测器输出与入射波长之间的关系;中心波长是指各通道光谱响应函数的峰值波长  $\lambda_c(i)$ ;光谱取样间隔  $\Delta\lambda$  是指相邻通道的中心波长之差  $\lambda_c(i+1) - \lambda_c(i)$ ;光

谱分辨率  $\delta\lambda$  又称为通道带宽,是指各通道光谱响应函数的全波半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM),各个参数的定义如图 2 所示。

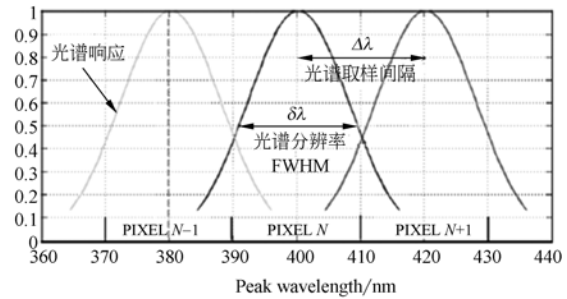


图 2 成像光谱仪光谱参数定义

Fig. 2 Define illustration of spectral parameters of imaging spectrometers

在理想情况下,假设系统各部分具有均匀的光谱响应,即: $\tau_o(\lambda)$ 、 $S_s(\lambda)$ 、 $R_d(\lambda)$ 、 $R_e(\lambda)$ 为常数,当狭缝无限窄时,系统的光谱响应为矩形函数,系统第  $i$  通道的光谱响应可表示为:

$$S_i(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda_i - \frac{1}{2} \Delta\lambda \leq \lambda \leq \lambda_i + \frac{1}{2} \Delta\lambda \\ 0, & \lambda < \lambda_i - \frac{1}{2} \Delta\lambda, \lambda > \lambda_i + \frac{1}{2} \Delta\lambda \end{cases}. \quad (3)$$

当狭缝具有一定宽度,且考虑到系统光学效率  $\tau_o(\lambda)$ 、光学系统的光谱响应率  $S_s(\lambda)$ 、探测器的光谱响应率  $R_d(\lambda)$ 、电子学系统的光谱响应率  $R_e(\lambda)$  等因素时,系统的光谱响应  $S_i(\lambda)$  通常可由高斯函数来表征<sup>[20]</sup>,即:

$$S_i(\lambda) = K \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_i}\right)^2\right]. \quad (4)$$

高斯函数的半高宽  $a$  即为系统的光谱分辨率  $\delta\lambda$ ,即:

$$\delta\lambda = a = 2\sqrt{2\ln(2)\sigma_i}. \quad (5)$$

对于实际的成像光谱仪器,系统第  $i$  波段的光谱响应曲线及其高斯拟合曲线如图 3 所示,可以看出,高斯函数可以较好地表征系统的实际光谱响应,因此通过抽样测量该波段内数个点的光谱响应,再经高斯拟合,便可以计算出该波段的实际光谱响应中心波长  $\lambda_c(i)$  及光谱分辨率  $\delta\lambda$ 。图 4 为光谱定标数据立方及光谱响应曲线。

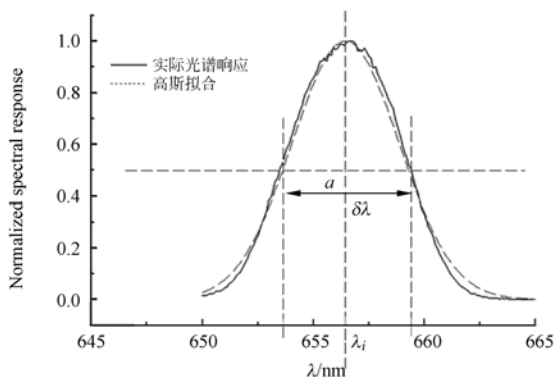


图 3 系统实际光谱响应及其高斯拟合曲线

Fig. 3 Practical spectral response and its Gauss fitting curve

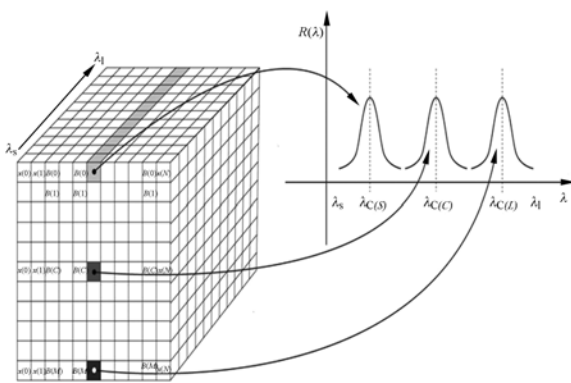


图 4 光谱定标数据立方体及光谱响应曲线

Fig. 4 Data cube of spectral calibration and spectral response curves

### 3 光谱定标系统

#### 3.1 光谱定标系统硬件组成

根据成像光谱仪光谱定标原理,本文研制了一套适用于凸面光栅成像光谱仪的光谱定标系统,其原理如图 5 所示。系统由光源、单色仪、单色仪控制器、平行光管以及计算机组成。其中光源、单色仪及单色仪控制器用来步进输出定标所需的单色光源;平行光管将单色仪输出的单色光源扩束、准直;计算机用来采集凸面光栅成像光谱仪的光谱定标数据。

单色仪控制器控制单色仪以步进方式进行波长扫描,单色仪每步进一次,经延时待单色仪输出稳定后,计算机中的光谱定标软件通过 Camera LinkTM 接口同步记录成像光谱数据,当波长全扫描完成后,完成光谱定标过程。凸面光栅成像光谱仪光谱定标系统的主要技术指标如表 2 所示。

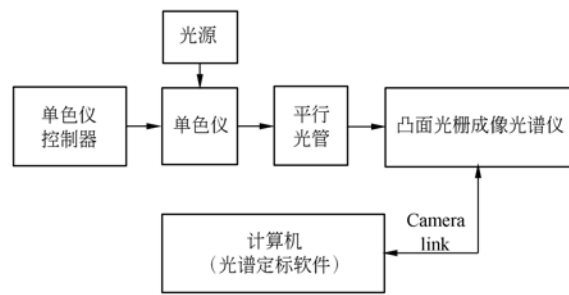


图 5 光谱定标系统原理框图

Fig. 5 Schematic of spectral calibration system

表 2 光谱定标系统主要技术参数

Tab. 2 Parameters of spectral calibration system

仪器	主要指标	数值
单色仪	光谱范围	350~900 nm
	波长准确度	±1 nm
	最小步进	1 nm
	波长重复性	±0.5 nm
平行光管	焦距	300 mm
	口径	50 mm

凸面光栅成像光谱仪的光谱分辨率指标设计值优于 10 nm,对照表 2 中所列的定标系统技术指标,可以看出,本文设计的光谱定标系统完全能够满足凸面光栅成像光谱仪的定标需要,凸面光栅成像光谱仪光谱定标系统的实物图如图 6 所示。

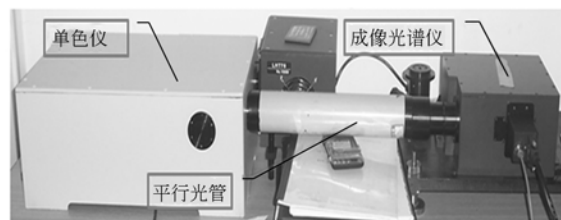


图 6 凸面光栅成像光谱仪定标系统实物

Fig. 6 Photo of spectral calibration system

#### 3.2 光谱定标系统软件

凸面光栅成像光谱仪光谱定标软件基于图形化的编程语言 LabVIEW 进行设计开发,包括光谱定标数据采集软件以及光谱定标数据处理软件。图 7 所示为光谱定标数据采集软件的界面,光谱定标操作过程中,可通过该软件监视凸面光栅成像光谱仪 CCD 像面的实时图像(界面右上)、监视正在定标波段的光谱响应曲线(界面左上)、

监视单色仪当前输出单色光的光谱曲线(界面下方)、同时记录光谱定标数据。



图 7 光谱定标数据采集软件

Fig. 7 Data sample interface of spectral calibration system

图 8 所示为光谱定标数据处理软件的界面,光谱定标完成后,通过该软件对光谱定标数据进行查看,同时软件基于自动处理技术,可在定标光谱范围内自动提取各个波段的离散光谱响应,分别对其进行高斯拟合后,计算出中心波长及全波半高宽,并对测量结果进行存储。

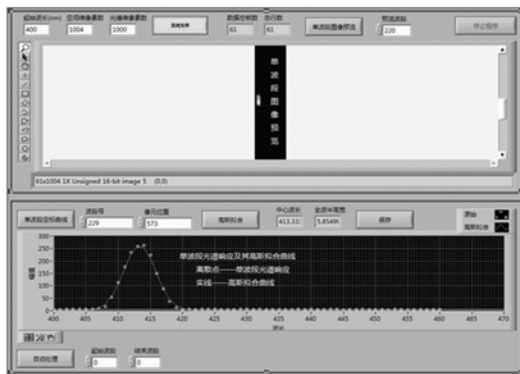


图 8 光谱定标数据处理软件

Fig. 8 Data process interface of spectral calibration system

#### 4 光谱定标结果

利用本文设计的光谱定标系统对凸面光栅成像光谱仪进行了光谱定标,经光谱定标数据处理软件分析后,得到空间维中心像素点的光谱定标结果,如表 3 所示。根据系统的光谱定标结果,可知系统的光谱范围大于设计指标要求的 400~800 nm,考虑二级光谱的影响,对中心波长为 800

nm 以后的成像光谱数据做了舍弃处理。通过表 4 所示的各波段中心波长线性拟合误差统计分析结果可以看出,系统各波段的中心波长具有很高的线性度,反映了凸面光栅成像光谱仪优良的线性特性。

表 3 部分波段光谱定标结果

Tab. 3 Results of spectral calibration of several bands

波段	中心波长/nm	光谱分辨率/nm
208	400.0	5.7
250	426.7	5.7
300	458.8	5.5
350	490.3	5.3
400	522.5	5.1
450	554.9	5.0
500	587.1	4.9
550	619.2	4.8
600	651.4	4.4
650	683.9	4.4
700	716.3	4.2
750	749.1	4.3
800	780.8	3.8
831	800.6	3.8
850	813.3	3.6

表 4 中心波长线性拟合误差统计分析结果

Tab. 4 Error statistical analysis results of the linear fitting of center wavelength (nm)

统计项	数值
标准偏差	0.35
最大值	0.87
最小值	-0.46

对系统各通道的光谱分辨率进行分析,如图 10 所示,得到的统计分析结果如表 5 所示,可见系统的光谱分辨率满足设计值要求的优于 10 nm。

表 5 光谱分辨率统计分析结果

Tab. 5 Statistical analysis result of spectral resolution (nm)

统计项	数值
平均值	4.8
标准偏差	0.56
最小值	3.7
最大值	6.3

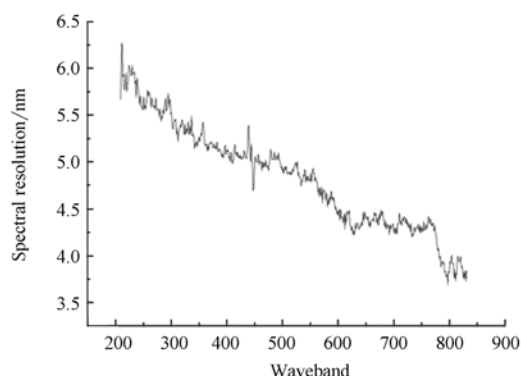


图 9 各波段光谱分辨率曲线

Fig. 9 Spectral resolution curve of every band

## 参考文献:

- [1] OFFNER A. New concepts in projection mask aligners [J]. *Opt. Eng.*, 1975, 14:130-132.
- [2] REININGER F. VIRTIS: visible infrared thermal imaging spectrometer for the Rosetta mission [J]. *SPIE*, 1996, 2819:66-77.
- [3] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics [J]. *SPIE*, 1997, 3118:339-347.
- [4] BROWN T J, CORBETT F J, SPERA T J, *et al.*. Thermal infrared pushbroom imagery acquisition and processing [J]. *SPIE*, 1981, 304:37-56.
- [5] DINER D J, BRUEGGE C J, MARTONCHIK J V, *et al.*. MISR: a multiangle imaging spectroradiometer for geophysical and climatological research [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1989, 27:200-214.
- [6] SAINTPE O, DONNADIEU O, DAVANCENS R, *et al.*. Development of a 2-D array for 1 to 2.35 mm hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 1997, 2816:138-149.
- [7] 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2629-2637.
- ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of systems for spaceborne hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2629-2637. (in Chinese)
- [8] DAVIS C O, KAPPUS M E, BOWLES J H, *et al.*. Calibration, characterization, and first results with the Ocean PHILIS hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 1999, 3753:160-168.
- [9] FOLKMAN M A, PEARI M J, LIAO I B, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151:40-51.
- [10] WILSON T H, DAVIS C O. Hyperspectral remote sensing technology (HRST) program and the Naval Earth Map Observer (NEM) satellite [J]. *SPIE*, 1998, 3437:2-11.
- [11] FIETCHER P A. Image acquisition planning for the CHRIS sensor onboard PROBA [J]. *SPIE*, 2004, 5546:141-150.
- [12] 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.
- [13] AMOLD G T, FITZGERALD M F, GRANT P S, *et al.*. MODIS airborne simulator radiometric calibration [J]. *SPIE*, 1996, 2820:56-66.
- [14] LUSHALAN L, PETER J, DARREL G, *et al.*. Performance characterization of the hyperion imaging spectrometer instrument [J]. *SPIE*, 2004, 4135:264-275.
- [15] JERRY Z, DANIEL G, ROBERT M, *et al.*. Cal-

## 5 结 论

本文基于单色准直光定标法设计了一套适用于凸面光栅成像光谱仪的光谱定标系统,采用自行研制的光谱定标数据采集软件及光谱定标数据处理软件对凸面光栅成像光谱仪进行了光谱定标及定标数据分析。结果表明:凸面光栅成像光谱仪的光谱分辨率、光谱范围等光谱特性指标均优于设计值。所研制的光谱定标系统具有结构紧凑、定标简单以及通用性强等优点,对凸面光栅成像光谱仪及其他类型的色散型成像光谱仪光谱定标具有一定的指导意义。

- ibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 2004, 5425:182-188.
- [16] 杨宜. 成像光谱仪光谱定标技术[J]. *红外*, 2006, 27(8):24-26.  
YANG Y. Spectral calibration of hyperspectral imager[J]. *Infrared*, 2006, 27(8):24-26. (in Chinese)
- [17] SHU R, XUE Y Q, YANG Y D. Calibration and application of airborne pushbroom Hyperspectral imager(PHI)[J]. *SPIE*, 2004, 5234:668-675.
- [18] 潘明忠, 亓洪兴, 肖功海, 等. 便携式地面成像光谱辐射计的设计[J]. *红外*, 2010, 31(1):1-7.  
PAN M ZH, QI X Y, XIAO G H, Design of the compact ground radiometer[J]. *Infrared*, 2010, 31(1):1-7. (in Chinese)
- [19] 王建宇. 成像光谱仪的光谱响应函数及光谱分辨能力[J]. *成像光谱技术*, 1991:44-50.  
WANG J Y. Spectral response and spectral resolution of hyperspectral imager[J]. *Imaging spectrum*, 1991:44-50. (in Chinese)
- [20] 王建宇. 成像光谱仪光谱分辨率的分析[J]. *红外*, 1990, 9(4):277-286.  
WANG J Y. Analysis of the spectral resolution of hyperspectral imager[J]. *Infrared*, 1990, 9(4):277-286. (in Chinese)

#### 作者简介:



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱仪器研发等方面的研究。Email:chinagrating@263.net



潘明忠(1982—),男,吉林辽源人,博士,助理研究员,主要从事成像光谱技术的研究工作。E-mail:mzpan@foxmail.com



崔继承(1976—),男,吉林长春人,博士研究生,副研究员,主要从事光学设计、光谱仪器设计开发、光谱理论等方面的研究。E-mail:jicheng\_cui@yahoo.com.cn



崔继承(1976—),男,吉林长春人,博士研究生,副研究员,主要从事光学设计、光谱仪器设计开发、光谱理论等方面的研究。E-mail:jicheng\_cui@yahoo.com.cn