

文章编号: 1000-7032(2013)02-0235-05

## 高光谱遥感器的光谱定标

金 辉<sup>1,2</sup>, 姜会林<sup>1</sup>, 郑玉权<sup>2\*</sup>, 马洪涛<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

2. 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:** 高光谱遥感器光谱性能参数的准确定标是高光谱遥感器数据定量应用的基本前提。本文基于单色准直光标定法对高光谱遥感器进行了光谱性能参数定标,通过数据采集软件及数据处理软件对高光谱遥感器光谱性能参数定标数据进行了分析。分析结果显示:定标测试的重复性在1 h内小于0.2 nm,在20 h内小于0.35 nm。光谱定标结果表明:高光谱遥感器的平均光谱分辨率为4.94 nm,且各高光谱遥感器空间维光谱分辨率均小于5 nm,典型谱段的平均带宽均在6 nm左右。

**关键词:** 高光谱; 光谱性能参数; 光谱定标

中图分类号: O432.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20133402.0235

## Spectral Calibration of The Hyperspectral Optical Remote Sensor

JIN Hui<sup>1,2</sup>, JIANG Hui-lin<sup>1</sup>, ZHENG Yu-quan<sup>2\*</sup>, MA Hong-tao<sup>2</sup>

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding Author, E-mail: derek\_zheng001@hotmail.com

**Abstract:** Accurate calibration of hyperspectral optical remote sensing spectral performance parameters is the basic premise of the quantitative application of hyperspectral optical remote sensing data. Based a monochromatic collimated cursor titration hyperspectral optical remote sensor calibration of the spectral performance parameters, spectral performance parameters of high-spectral optical remote sensor calibration data were analyzed by the data acquisition software and data processing software. The analysis results show that the calibration test repeatability is less than 0.2 nm within 1 h, and less than 0.35 nm within 20 h. The spectral scaling results show that the average spectral resolution of hyperspectral optical remote sensor is 4.94 nm, and the spatial dimension of the high-spectral optical remote sensor spectral resolution is less than 5 nm, the average of the typical spectral bandwidth is about 6 nm.

**Key words:** hyperspectral; spectral performance parameters; spectral calibration

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-01-02

基金项目: 国家 863 高技术发展研究计划 (2008AA121803) 资助项目

作者简介: 金辉(1979-), 女, 吉林长春人, 主要从事航空航天光机系统设计、检测方面的研究。

E-mail: jjhh0118@hotmail.com

## 1 引 言

高光谱遥感器光谱性能参数的标定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,是对光学遥感器数据进行量化分析的前提。常用的光谱标定方法主要有标准谱线法和单色准直光定标法<sup>[1-9]</sup>。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标定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、FISS 等,均采用该方法进行光谱定标。

本文研究了高光谱遥感器光谱性能参数标定的原理及实验室定标方法,给出了实验室标定高光谱遥感器光谱性能参数的重复性和稳定性,并对定标数据进行了校验。

## 2 光谱标定原理

光学遥感器光谱定标就是确定光学遥感器各光谱通道的中心波长和光谱带宽,光学遥感器的光谱响应函数可以表示成如下形式:

$$f(\lambda - \lambda_j) = \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{\Delta\lambda^2}\right], \quad (1)$$

其中,  $\Delta\lambda$  为光谱响应函数的半峰值全宽,由于光栅的色散可近似看成线性,使用光栅作为色散元件可认为是均匀采样,各个光谱通道  $\Delta\lambda$  是一个定值;棱镜的色散是非线性的,使用棱镜作为色散元件,各个光谱通道  $\Delta\lambda$  是波长的函数,使用复合棱镜改善色散的非线性特性。实验室中使用光谱带宽小于成像光谱仪光谱带宽 1/10 的单色仪对成像光谱仪进行光谱定标,通过单色仪在待定标波长附近区域扫描波长,得到某一光谱通道对一系列单色波长的响应,将得到的数据点做高斯曲线拟合,相对最大值作归一化处理,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,光谱带宽的中间值作为谱段的中心波长。

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、钠灯发射的离散的固定谱线对光谱仪器进行定标,主要针对光谱分辨率较高而且是色散分布呈线性的光谱仪器;单色仪定标法是通过单色仪输出连续光谱曲线对光谱仪器进行定标,主要针对中低光谱分辨率的光谱仪器。本文采用的是单色仪定标方法,目的是能够得到连续的光谱测试曲线,同时可以实现宽光谱范围的波长和带宽标定。

高光谱遥感器的光谱定标是采用单色仪在高光谱遥感器工作谱段内扫描输出单色光,同时记录高光谱遥感器各光谱通道的光谱响应(DN 值),通过高斯拟合即可建立通道内像元的相对光谱响应函数,从而得到像元光谱响应的中心波长。对采集的原始图像数据进行 100 帧平均,并减去暗背景信号以降低噪声的影响,以该数据作为标定数据对单色仪输出波长和不同视场下各光谱通道的响应灰度值进行高斯拟合,进而得到高光谱遥感器在不同视场下 500 ~ 590 nm、950 ~ 1 030 nm 谱段内相应光谱通道的中心波长和带宽(半峰值宽度)。由计算的中心波长数据可建立高光谱遥感器不同视场下的色散规律,通过进一步求解相邻视场间的谱线倾斜规律即可得到高光谱遥感器各像元的中心波长数据<sup>[10-15]</sup>。

## 3 实验室光谱定标方法

高光谱遥感器实验室光谱定标装置如图 1 所示,主要由照明光源、单色仪和平行光管组成。照明光源采用溴钨灯,由高稳定度直流电源供电。单色仪的出射狭缝经导光系统成像在平行光管的焦面上,经平行光管后获得单色平行光。高光谱遥感器安装在调整架上,便于视场调节。平行光管相对孔径 1/10,工作光谱区 0.35 ~ 3  $\mu\text{m}$ ,并满足标定



图 1 高光谱遥感器实验室光谱定标示意图

Fig. 1 The spectral calibration schematic diagram of hyperspectral optical remote sensing laboratory

的全孔径要求。单色仪工作波段 0.2 ~ 3 μm,具有良好的波长准确度和波长重复性。

光谱定标过程主要包括定标设备的准备与标定和光谱定标数据的采集。在定标设备的标定中利用汞灯各特征谱线对单色仪的波长准确度进行了测试,结果表明单色仪波长准确度优于 0.12 nm。进一步取波长准确度的 5 次测试结果的最大值与最小值之差来表征波长重复性,其波长重复性小于 0.1 nm。此外,光谱定标所采用的单色光带宽应小于成像仪光谱分辨率的 1/10。利用光纤光谱仪(光谱分辨率 0.2 nm)测量了单色仪的输出带宽。通过调节单色仪入射狭缝和出射狭缝的宽度使得单色仪的输出带宽满足定标要求。

### 4 实验室光谱定标数据处理结果

#### 4.1 标定数据的拟合效果

图2为对高光谱传感器 30、31 通道在 530 ~ 560 nm 谱段内重复采集 3 次的定标数据。由图2可知,定标数据较好地符合高斯分布,因此采用高斯拟合求得响应中心波长的方法是较为合理的。高光谱传感器连续工作 1 h 的中心波长定标重复性在 0.15 nm 左右,长时间间隔的定标重复性在 0.35 nm 以内,满足定标重复性 0.5 nm 的要求。

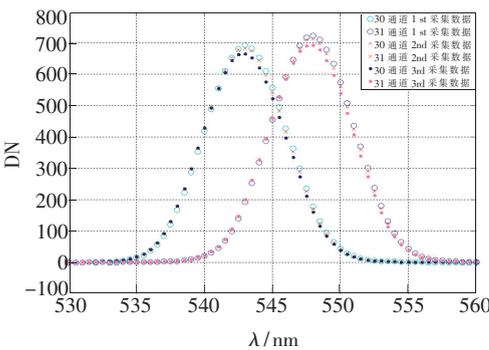


图2 30、31 通道重复 3 次采集的定标数据

Fig. 2 The calibration data collected for 30, 31 channel repeated 3 times.

#### 4.2 高光谱遥感器的色散规律、光谱分辨率及带宽

图3为通过线性拟合得到的高光谱传感器色散规律,各视场下的拟合残差均在 0.25 nm 左右,说明高光谱传感器色散较好地符合线性规律,拟合方程的斜率表明高光谱传感器的平均光谱分辨率为 4.94 nm,均满足 5 nm 的光谱分辨率要求。

进一步统计高光谱光学遥感器在典型视场、

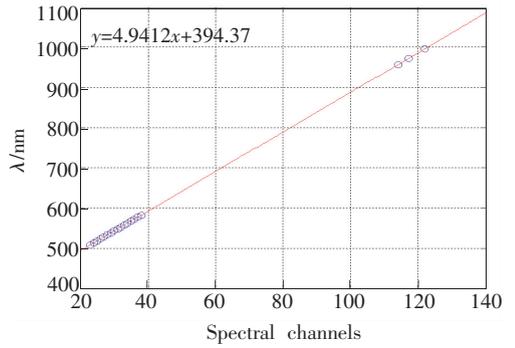


图3 线性色散规律

Fig. 3 Linear dispersion law

典型谱段内的平均带宽,如表 1 所示。由表 1 可知,高光谱传感器典型视场、典型谱段的带宽基本在 6 nm 左右,满足设计指标要求。

表 1 平均带宽统计表

Table 1 The average bandwidth

Bandwidth/ nm	FOV-93/ nm	FOV-541/ nm	FOV-931/ nm	Average bandwidth/ nm
500 ~ 590	6.6	6.1	6.3	6.33
900 ~ 1 030	5.7	5.2	5.5	5.46

#### 4.3 谱线倾斜规律

依据求解的高光谱传感器色散规律即可确定高光谱传感器中心和边缘视场下各像元的中心波长,如图 4 所示。可以看出,由于高光谱传感器采用了光栅分光,因此避免了棱镜分光产生的谱线弯曲;但由于焦面组件在安装时难以做到十分精确的配准,因此导致同一通道内各像元的中心波长稍有倾斜。进一步的计算结果表明各通道两侧边缘视场的中心波长差值均在 2.5 nm 左右,说明空间维上的谱线倾斜程度小于半个像元,满足应

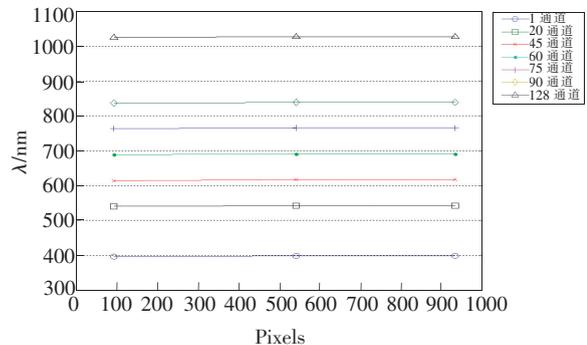


图4 高光谱传感器典型光谱通道中心波长

Fig. 4 The typical central wavelength spectral channels of hyperspectral remote sensor

用要求。

依据图 4 所示的各通道典型视场下的中心波长数据,进一步应用插值法计算即可得到各通道视场下的中心波长,从而完成高光谱遥感器光谱定标的数据处理。

#### 4.4 定标数据的校验

高光谱遥感器光谱定标数据的校验采用由汞灯直接照明定标系统中的平行光管焦面,采集高光谱遥感器输出的图像数据,并对比实测值与理论发射光谱的特征波长重合性的方法。图 5 为汞灯测试时高光谱遥感器不同光谱通道的光谱响应。

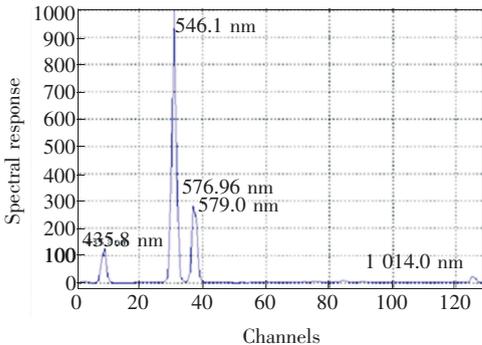


图 5 汞灯测试时高光谱遥感器不同光谱通道的光谱响应

Fig. 5 The spectral response of different spectral channels of hyperspectral optical remote sensor tested by mercury lamp

比对的结果表明汞灯各特征谱线所对应的光谱通道均与光谱定标的结果相吻合,验证了定标结果的准确性。标定实验表明:高光谱遥感器的

平均光谱分辨率为 4.94 nm,且各空间维光谱分辨率均小于 5 nm,典型谱段的平均带宽均在 6 nm 左右。

将高光谱遥感器搭载在无人机平台上进行外场试验。经过飞行试验验证,高光谱遥感器系统性能及工作状态良好,对地成像效果清晰,并提供了 0.4 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  波长范围内 120 个谱段的高光谱图像,光谱数据准确、稳定。

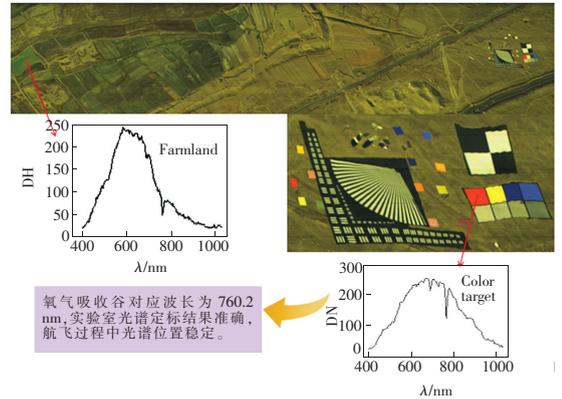


图 6 飞行试验获取图像数据

Fig. 6 Flight tests to obtain image data

## 5 结 论

采用单色仪、平行光管光谱定标系统对高光谱遥感器进行了光谱定标,定标测试的重复性在 1 h 内小于 0.2 nm,在 20 h 内小于 0.35 nm。光谱定标结果表明:高光谱遥感器的平均光谱分辨率为 4.94 nm,典型谱段的平均带宽均在 6 nm 左右。通过对高光谱遥感器进行的飞行实验得到了实际应用的工作参数,满足设计要求。

## 参 考 文 献:

- [1] Labaw C. Airborne imaging spectrometer: An advanced concept instrument [J]. *SPIE*, 1983, 430:68-73.
- [2] Macenka S A, Chrisp M P. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *SPIE*, 1987, 834:32-43.
- [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, Kunkel B P, Charlton D E, et al. High resolution imaging spectrometer (HRIS)-optics, focal plane and calibration [J]. *SPIE*, 1993, 1937:207-224.
- [5] Kunkel B P, Blechinger F, Lutz R, et al. 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 earth map observer (NEMO) satellite [J]. *SPIE*, 1998, 3437:2-11.
- [7] Otten L J, Meigs A D, Portigal F P, et al. 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] Xiu J H, Huang P, Li J, *et al.* Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2012, 20(6):1365-1373 (in Chinese) .
- [11] Wang Z, Wu G D. Calibration of transition matrix on cubic prisms in mapping camera and star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2012, 20(1):96-101 (in Chinese).
- [12] Zheng Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2010, 18(11):2347-2354 (in Chinese) .
- [13] Qi X D, Han P P, Pan M Z, *et al.* Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(12):2870-2876.
- [14] Liu Q Q, Zheng Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions [J]. *Chinese Optics* (中国光学), 2012, 5(6):566-577 (in Chinese) .
- [15] Zhang J Q, Shao J B, Yan C X, *et al.* Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics* (中国光学), 2011, 4(2):175-181 (in Chinese) .