

## 基于大气吸收带的超光谱成像仪光谱定标技术研究

张春雷<sup>1,2</sup>, 向阳<sup>1</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 超光谱成像仪是谱像合一的新型光学遥感仪器, 其光谱定标的主要任务就是确定超光谱成像仪各通道中心波长和光谱带宽。利用超光谱成像仪光谱采样间隔和大气吸收带中明显的吸收峰对超光谱成像仪进行光谱定标, 并通过与定标好的光纤光谱仪结果进行比对, 结果显示利用该方法对超光谱成像仪进行光谱定标的定标精度可达 1 nm。该方法用于棱镜色散型超光谱成像仪光谱定标具有容易实现的特点, 并且可以达到较高的定标精度。

**关键词** 光谱定标; 成像光谱仪; 光谱采样间隔; 大气吸收带

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)01-0268-05

### 引 言

超光谱成像仪的光谱定标以标准光谱信号为基准, 检测成像光谱仪每个光谱通道的中心波长位置和光谱带宽<sup>[1]</sup>, 对于超光谱成像仪来说, 光谱定标是辐射定标的前提和基础, 也是超光谱成像仪使用中准确获得地物光谱的必要条件。

目前, 超光谱成像仪光谱定标的主要方法有: (1) 单色仪和平行光管产生单色平行光的定标方法; (2) 使用掺杂稀土元素的漫反射板法; (3) 气体发射光谱灯法。单色仪和平行光管产生单色平行光的定标方法是超光谱成像仪光谱定标的最常用方法, 这种方法使用单色仪在待定标波长附近扫描若干波长, 然后利用采集到的数据作高斯函数拟合, 拟合的高斯曲线最大值波长作为待定标通道的中心波长, 最大值一半的波长间隔作为光谱带宽。AVIRIS, Hyperion, TRW III, COMPASS, APEX 和 PHI<sup>[2-7]</sup> 采用这种方法进行光谱定标。这种方法中单色仪出缝处的光束均匀性对光谱定标结果有 1 nm 的影响, Hyperion 和 Compass 在单色仪出缝后分别加漫反射板和积分球进行匀光, 这样可以提高超光谱成像仪光谱定标精度, 但是对超光谱成像仪探测器响应和图像处理水平提出很高要求。掺杂稀土元素的漫反射板法<sup>[8]</sup> 是一种能快速方便进行光谱定标的方法, 它通过在超光谱成像仪视场内插入一块光谱反射比大致为 100% 的聚四氟乙烯 (PTFE) 板, 用石英卤钨灯照射该板, 使来自该板的辐射充满光谱仪的视场, 记录下光谱仪产生的图像。然后, 将 PTFE 板移开并用

一块掺有一种稀土元素如氧化钬、氧化镱、氧化钇或其他掺杂物的 PTFE 板取代。将两次相应图像进行比较, 便可实现光谱定标, MERIS 就是利用该方法进行在轨光谱定标的。气体发射光谱灯法利用在很多资料中找到的发射光谱灯的数据, 通过对比采集到数据与参考资料中数据就可以得到通道中心波长和通道数之间的关系, PHILLS 采用该方法进行光谱定标<sup>[9]</sup>。

本文利用超光谱成像仪光谱采样间隔与大气特征吸收线相结合的方法定标超光谱成像仪, 相比其他方法具有一定优势。首先, 该方法无需单色仪和平行光管等设备产生单色平行光, 利用超光谱成像仪自身光谱色散特性和已知大气吸收特性就能完成超光谱成像仪的光谱定标。其次, 该方法无需石英溴钨灯或气体发射光谱灯等光源, 利用太阳作为光源, 可以得到大功率均匀照明。除了上述容易实现的优点外, 利用此方法对超光谱成像仪定标, 通过调整超光谱成像仪探测器和波长相对位置即可达到较高定标精度。

### 1 超光谱成像仪光谱采样间隔的计算

超光谱成像仪采用复合棱镜作为色散元件, 避免了采用光栅作为色散元件各波长衍射效率存在差异和单一棱镜作为色散元件存在光谱采样间隔均匀性差的问题, 采用复合棱镜作为色散元件既可以得到较均匀的光谱透过率, 又可以对光谱采样间隔的非均匀性作一定校正。

采用复合棱镜作为超光谱成像仪色散元件, 光线在棱镜

收稿日期: 2011-03-22, 修订日期: 2011-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60538020) 资助

作者简介: 张春雷, 1981 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: zchl\_1981@126.com

中传播如图 1 所示, 复色光以入射角  $i_1$  射入棱镜, 经两块棱镜色散分光各波长的光以不同入射角入射到平面反射镜上, 经平面反射镜反射后, 各波长的光以不同入射角再次射入复合棱镜, 经复合棱镜两次色散的复色光经成像镜成像在超光谱成像仪探测器上。光束第一次在复合棱镜中传播

$$n_0 \sin i_1 = n_1 \sin i'_1 \quad (1)$$

$$i'_1 + i_2 = \alpha_1 \quad (2)$$

$$n_1 \sin i_2 = n_2 \sin i'_2 \quad (3)$$

$$i'_2 + i_3 = \alpha_2 \quad (4)$$

$$n_2 \sin i_3 = n_0 \sin i'_3 \quad (5)$$

式中,  $n_0$  为空气折射率,  $n_1$  为第一个棱镜折射率,  $n_2$  为第二个棱镜折射率, 上式中对各波长都成立, 只是波长不同, 对应在棱镜中的折射率不同, 导致最后出射角  $i'_3$  不同, 对应所有波长都有

$$i'_3 + i_4 = 2(\alpha_1 + \alpha_0 - \alpha_2) \quad (6)$$

对于反射回复合棱镜的光束

$$n_0 \sin i_4 = n_2 \sin i'_4 \quad (7)$$

$$i_5 - i'_4 = \alpha_2 \quad (8)$$

$$i'_5 + i_6 = \alpha_1 \quad (9)$$

$$n_1 \sin i_6 = n_0 \sin i'_6 \quad (10)$$

只要给定超光谱成像仪复合棱镜前光线的入射角  $i'_1$ 、棱镜对各个波长的折射率  $n_1$  和  $n_2$ , 这里通过玻璃手册肖特折射率公式计算给出, 就可以得到指定波长的出射角度  $i'_6$ 。

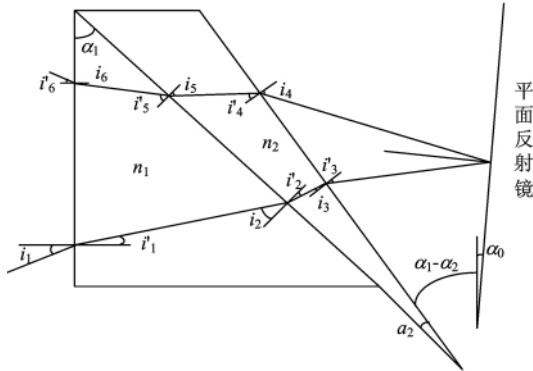


Fig 1 Layout of light path in the composite prism

根据成像镜焦距  $f$  和探测器像元尺寸  $x$  可求出每个通道边缘所对光线的出射角, 进而求得各像元对应的波长和通道光谱采样间隔。如图 2 所示。

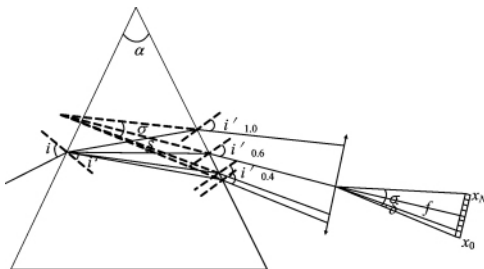


Fig 2 Relation between the wavelength and the detector pixel position

超光谱成像仪在  $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$  光谱范围内共有 60 个光

谱通道, 若取  $0.65 \mu\text{m}$  作为参考波长, 第一个像元起始端对的波长为  $0.4 \mu\text{m}$ , 则第一个像元另一端对的波长的出射角可表示为

$$i'_1 = i'_{0.65} + \arctan \left[ \tan(i'_{0.4} - i'_{0.65}) - 1 \cdot \frac{x}{f} \right] \quad (11)$$

第二个像元

$$i'_2 = i'_{0.65} + \arctan \left[ \tan(i'_{0.4} - i'_{0.65}) - 2 \cdot \frac{x}{f} \right] \quad (12)$$

第  $j$  个像元

$$i'_j = i'_{0.65} + \arctan \left[ \tan(i'_{0.4} - i'_{0.65}) - j \cdot \frac{x}{f} \right] \quad (13)$$

.....

第  $N$  个像元

$$i'_N = i'_{0.65} + \arctan \left[ \tan(i'_{0.4} - i'_{0.65}) - N \cdot \frac{x}{f} \right] = i'_{1.0} \quad (14)$$

利用式 (13) 可以求得每个光谱通道所对应波长光线的出射角  $i'_j$ , 利用式 (1) — (10), 和肖特玻璃公式即可反解出求  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N, \lambda_0 = 0.4 \mu\text{m}, \lambda_N = 1.0 \mu\text{m}$ 。用这些数据就可以求出  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_N$ 。利用入射角  $i'_1 = 30^\circ$  和超光谱成像仪相关数据, 经计算得到超光谱成像仪光谱采样间隔如图 3 所示。

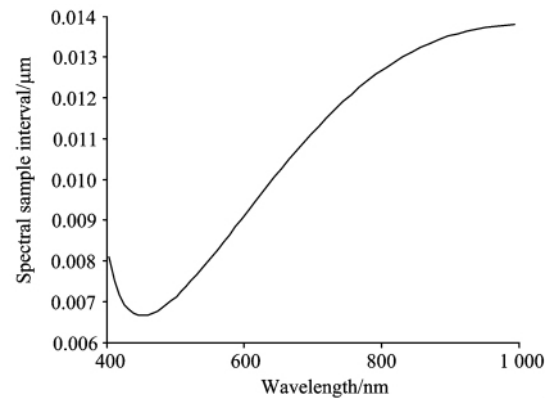


Fig 3 Spectral sampling interval of the hyperspectral imager

## 2 超光谱成像仪光谱定标实验及实验结果

利用大气传输模拟软件得到有大气吸收的均匀地物光谱辐亮度如图 4 所示, 通过上述光谱采样间隔和模拟得到的光谱辐亮度, 得到在上述光谱采样条件下 60 个探测器像元接收的能量如图 5 所示, 考虑到超光谱成像仪 CCD 的光谱响应函数得到与 CCD 光谱响应函数相关的光谱曲线, 如图 6 所示。从图 5 和图 6 中可以明显看出氧原子吸收带在超光谱成像仪光谱采样间隔下相应中心波长为  $0.7738 \mu\text{m}$ , 与之相对应的是 60 个光谱通道中的第 43 个, 向左侧两个峰值分别为第 39 和 36 个光谱通道。

利用超光谱成像仪对太阳光照射下的均匀白板成像, 不考虑谱线弯曲的影响, 任取其中一个像元, 得到其光谱如图 7 所示, 很明显第 53 个光谱通道对应氧原子吸收带, 与其邻近的第 49、46 两个光谱通道也与图 6 中第 39 和 36 两个光谱通道一一对应, 所以可以确定超光谱成像仪第 53 个光谱通

道中心波长为  $0.7738 \mu\text{m}$ , 这样就确定了超光谱成像仪各通道的中心波长, 光谱带宽亦可由相应波长求得。

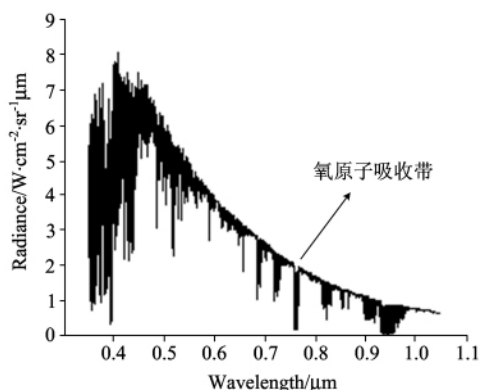


Fig 4 Spectral radiance of scene simulated by the software

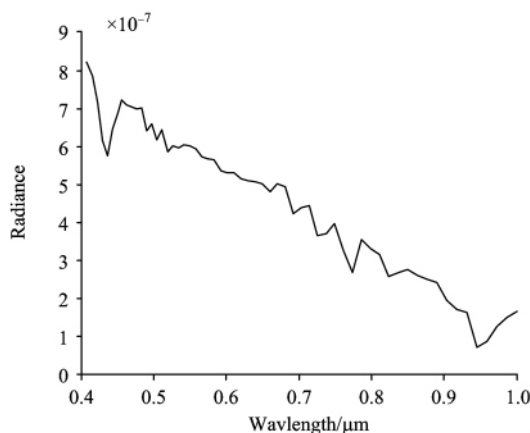


Fig 5 Spectral curve simulated using the spectral sampling interval

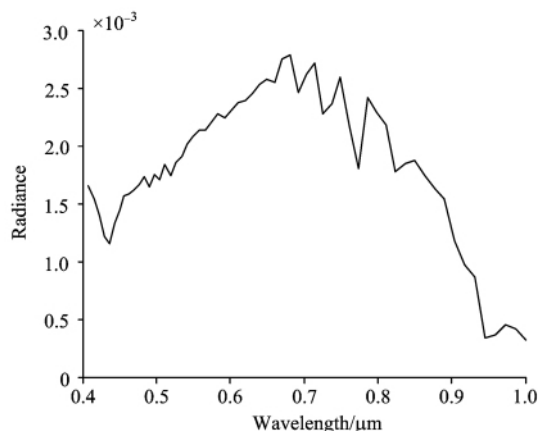


Fig 6 Relative output of the hyperspectral imager considering the QE

### 3 实验结果验证

利用进行过光谱定标的光纤光谱仪对实验结果进行验证, 使用光纤光谱仪和超光谱成像仪分别对准具有连续光谱

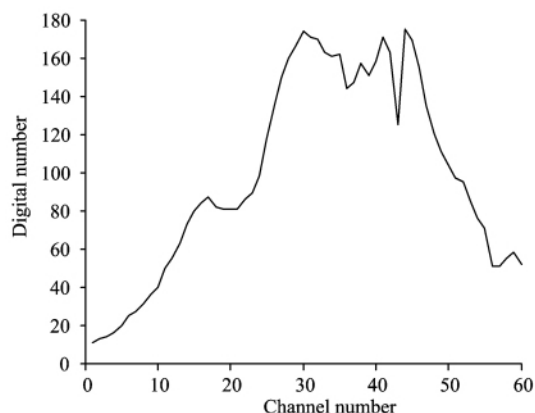


Fig 7 Spectral curve collected by the hyperspectral imager

和线光谱的日光灯, 采集到的谱线如图 8 和图 9 所示, 光纤光谱仪的光谱分辨率介于超光谱成像仪和大气传输模拟软件光谱分辨率之间, 所以要对光纤光谱仪的光谱以超光谱成像仪的采样间隔计算得到相应宽光谱的接收能量。对比二者谱线峰值, 光纤光谱仪的谱线峰值分别在第 25, 21, 5 个光谱通道, 而超光谱成像仪采集到的谱线峰值在第 25, 21, 6 个光谱通道, 这种现象说明入射辐射的短波一端  $0.4 \mu\text{m}$  不是严格对应于探测器相应像元的一端, 所以通过微调探测器像

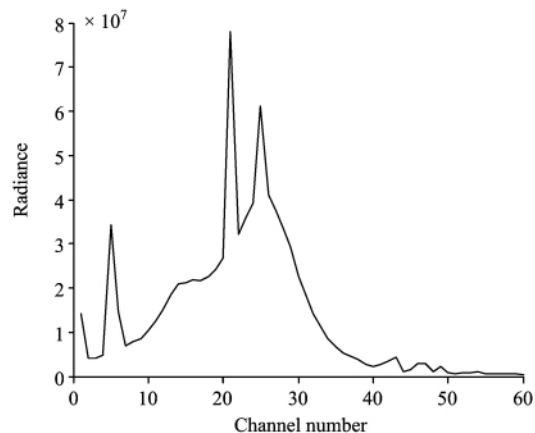


Fig 8 Spectral curve of daylight lamp produced by the spectrometer

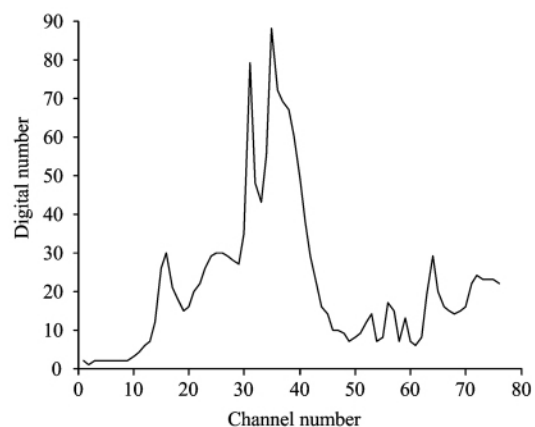


Fig 9 Spectral curve of daylight lamp produced by the imaging spectrometer

元和参考波长相对位置, 分别移动 $\pm 1$ 和 $2\text{ nm}$ , 对大气传输软件得到的光谱曲线以新的采样间隔重新计算得到图 10, 探测器像元和参考波长相对位置, 分别移动 $\pm 1\text{ nm}$ 时, 还能保证各软件模拟吸收峰相对位置不动, 以新的光谱采样间隔处理光纤光谱仪采集到的数据, 得到数据如图 11 所示, 可以从图中看出, 当探测器像元和参考波长相对位置移动 $-1\text{ nm}$ 时, 超光谱成像仪和光纤光谱仪得到的光谱曲线峰值相匹配, 三个峰值位置分别位于第 25, 21, 6 个光谱通道, 以此光谱采样间隔下得到的中心波长和光谱带宽为超光谱成像光谱仪的中心波长和光谱带宽, 由上面计算分析可知以此种方法对超光谱成像仪进行光谱定标, 没移动探测器像元和参考波长相对位置时, 超光谱成像仪采集到的数据与光纤光谱仪

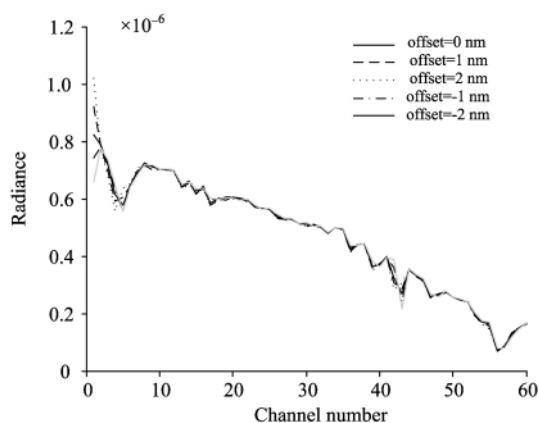


Fig 10 Spectral curve simulated at different offset

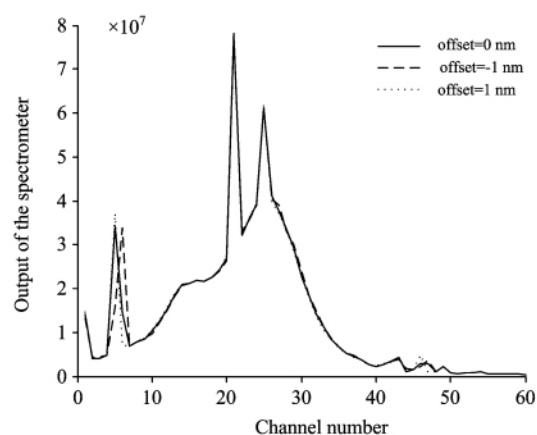


Fig 11 Spectral curve produced by the spectrometer at different offset

采集的数据不匹配, 移动 $1\text{ nm}$ , 可以相互匹配, 移动 $2\text{ nm}$ , 超光谱成像仪采集到的数据与光纤光谱仪采集的数据再次不匹配, 可见光谱定标精度可达 $1\text{ nm}$ , 超光谱 60 个光谱通道的中心波长和光谱带宽如图 12 和图 13 所示。

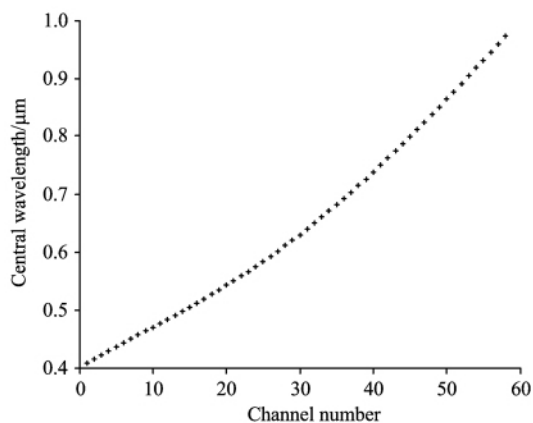


Fig 12 Central wavelength of the imaging spectrometer

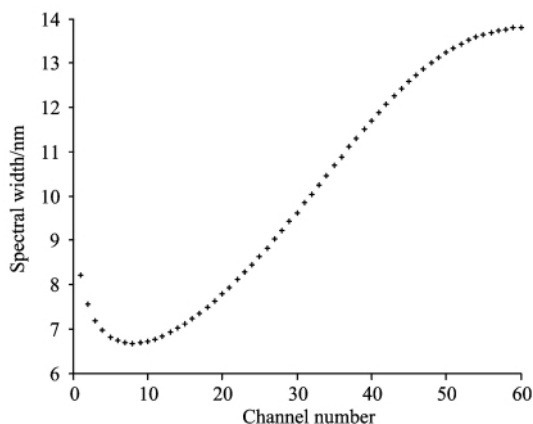


Fig 13 Spectral width of the imaging spectrometer

## 4 结 论

利用复合棱镜色散特性获得超光谱成像仪光谱采样间隔, 结合大气吸收特征对超光谱成像仪进行光谱定标, 并通过日光灯的特征谱线对结果进行验证和改进, 并给出了光谱定标结果, 结果表明, 此方法切实可行, 光谱定标精度可达 $1\text{ nm}$ 。

## References

- [1] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(11): 2347.
- [2] Chrien T G, Green R O, Eastwood M L, et al. SPIE, 1990, 1298: 37.
- [3] Liao L, Jareche P, Gleichauf D, et al. SPIE, 2004, 4135: 264.
- [4] Folkman M A, Sandor S, Thordarson S, et al. SPIE, 1997, 3118: 142.
- [5] Zadnik J, Guerin D, Moss R, et al. SPIE, 2004, 5425: 182.
- [6] Suhr B, Frise J, Gege P, et al. SPIE, 2006, 6361: 636110.
- [7] SHU Rong, XUE Yong-qi, YANG Yi-de. SPIE, 2004, 5234: 668.

- [8] Hedman T R, Beach R, Jarecke P J, et al. U S Patent, 2000, 6, 111, 640.  
[9] Davis O C, Bowles J, Leathers A R, et al. Optics Express, 2002, 10(4): 210.

## Spectral Calibration of the Hyperspectral Imager Based on Atmosphere Absorption

ZHANG Chun-lei<sup>1,2</sup>, XIANG Yang<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The hyperspectral imager is a new type remote sensor which can collect both the image and the spectral information of the scene. The objective of the spectral calibration of the hyperspectral imager is to determine the central wavelength and spectral width of each channel. The spectral sampling interval of the hyperspectral imager calculated and the atmosphere absorption of the atmosphere were used to calibrate the central wavelength and spectral width of the channels of the hyperspectral imager in the present article. Comparison was made between the spectral calibration result and a spectrometer which has high spectral resolution and the results were improved. The results indicate that the spectral calibration of this method can achieve precision of 1 nm.

**Keywords** Spectral calibration; Imaging spectrometer; Spectral sample interval; Atmosphere absorption

(Received Mar. 22, 2011; accepted Jul. 5, 2011)