

漫反射板法定标成像光谱仪特性研究

张春雷^{1,2}, 向阳^{1*}

- 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 采用漫反射板法定标成像光谱仪是近年来发展起来的一种辐射定标新技术,它具有实现容易、定标精度较高的特点。文章根据漫反射板定标法的原理,对于成像光谱仪狭缝平行和垂直纸面两种特殊定标状况,推导出相应的光谱辐射信号电子数采集表达式,数值分析了在此两种定标状况下成像光谱仪光谱辐射定标的特性。结果表明,成像光谱仪狭缝取向对光谱辐射定标结果有明显不同的影响,对于狭缝平行纸面情况下,不同景物像元相同光谱通道采集到的信号电子数是不同的,越靠近辐照度标准灯,采集到的信号电子数越多,反之亦然;对于狭缝垂直纸面情况下,不同景物像元相同光谱通道采集到的信号电子数是相同的。

关键词 漫反射板; 成像光谱仪; 狭缝方向; 定标特性

中图分类号: O432.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)01-0282-05

引言

成像光谱仪是新一代的谱像合一的遥感仪器,其光谱范围一般在太阳反射光谱区域(0.4~2.5 μm)^[1]。成像光谱仪实验室定标的主要作用,就是确定成像光谱仪景物像元各光谱通道的辐射响应并评估其不确定度^[2]。到目前为止,成像光谱仪实验室辐射定标方法主要有积分球法、标准探测器法和漫反射板法。积分球法是实验室辐射定标的常用方法,它首先使用标准灯定标光谱辐射计,其次使用定标好的光谱辐射计定标积分球,最后使用积分球定标成像光谱仪,AVIRIS^[3]、COMPASS^[4]、SeaWiFS^[5]、PHILLS^[6-8]等遥感器都采用这种方法进行定标。标准探测器法^[9]是对积分球法的改进,该方法使用标准探测器和成像光谱仪交替观察大积分球,通过亮度直接比对完成对成像光谱仪的定标,标准探测器的不确定度比辐照度标准灯的不确定度要小很多,辐射传递链的长度较小,所以提高了成像光谱仪的定标精度。漫反射板法^[10,11]使用漫反射板代替大积分球作为扩展光源,同时使用标准探测器与标准灯进行交叉定标,在保证定标精度的情况下,可以比较容易地实现对偏振不敏感成像光谱仪的定标。

鉴于漫反射板定标的优势,本文从理论上分析了照射距

离、观察角度和狭缝指向对漫反射板法定标成像光谱仪光谱辐射特性的影响。

1 理论推导

使用漫反射板定标成像光谱仪光谱辐射响应特性的原理如图1所示,圆圈内两种光谱仪狭缝方向分别代表狭缝平行和垂直纸面。

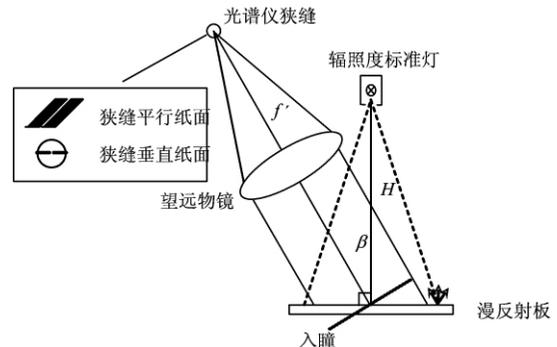


Fig 1 Layout of the imaging spectrometer calibration using diffuser method when the slit parallels and is perpendicular to the meridional plane

收稿日期: 2010-03-29, 修订日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60538020)和国家(863计划)项目(2006AA12Z143)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: zchl1981@126.com

* 通讯联系人 e-mail: xiangy@sklao.ac.cn

将漫反射板放置在成像光谱仪的入瞳处，取成像光谱仪光轴与漫反射板的交点为坐标原点 O ，使辐照度标准灯位于漫反射板上 O 点法线上，即辐照度标准灯垂直照射漫反射板。假定漫反射板是理想朗伯体，那么漫反射板的光谱辐亮度^[12]则为

$$L(r', \lambda) = L_{\max}(\lambda) \left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + r'^2}} \right)^3 \quad (1)$$

式中， $L_{\max}(\lambda)$ 为漫反射板原点的光谱辐亮度， H 为辐照度标准灯到漫反射板的距离， r' 为漫反射板上任意一点 $A'(r', \theta')$ 到坐标原点 O 的距离。

在成像光谱仪的入瞳上，具有相同方向的漫反射光会聚到望远物镜后焦面上狭缝的一点(对应景物的一个像元)，不同方向的漫反射光在望远物镜后焦面狭缝上形成景物的一维像。经过狭缝进入成像光谱仪的入射光经过光谱分光系统准直、色散和会聚后，在成像光谱仪面阵探测器像元 (m, n) 上，形成景物像元 m 、中心波长 λ_n 、带宽 $\Delta\lambda_n$ 的光谱辐照度为

$$dE(m, n) = L(r', \lambda) \tau_0 f(\lambda_n - \lambda) \cos\phi d\lambda d\Omega \quad (2)$$

式中， $L(r', \lambda)$ 为入射的光谱辐亮度， τ_0 为整个光学系统的透过率， $f(\lambda_n - \lambda)$ 为系统的光谱响应函数。其余各量含义如图 2 所示， ϕ 为狭缝像面上一点与后主面上微元连线和像面

法线方向夹角， $\cos\phi = \frac{f'}{\sqrt{r^2 + f'^2}}$ ， f' 为成像光谱仪望远系统的焦距， $d\Omega$ 为后主面上微元对像面上像元 m 所张的立体角， $d\Omega = \cos\phi r dr d\theta / f'$ 。像元 m 编号规则如下，光轴上像元编号为 0，向光轴两侧分别为 $\pm m$ 。

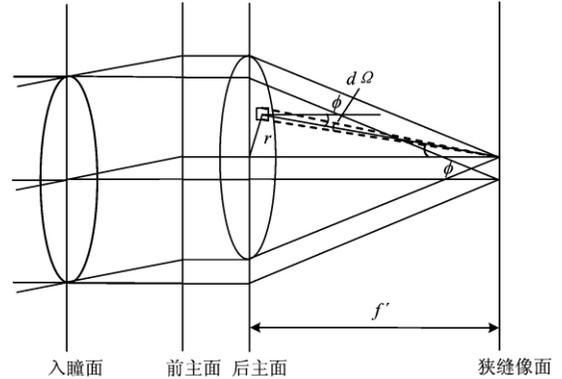


Fig 2 Parameters used in calculating the spectral irradiance

由式(1)和式(2)，可得景物像元 m 光谱通道 n 采集到的信号电子数为

$$N_s(m, n) = \frac{\eta(\lambda_n) A_d t_{\text{int}}}{hc} \int_0^{2\pi R^{\lambda_n + \Delta\lambda_n/2}} \int_0^{\Delta\lambda_n/2} L_{\max}(\lambda) \left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + r'^2}} \right)^3 \tau_0 \lambda f(\lambda_n - \lambda) r f'^2 \frac{d\lambda dr d\theta}{(r^2 + f'^2)^2} \quad (3)$$

式中， η 为探测器的量子效率， t_{int} 为积分时间， A_d 为探测器像元面积， R 为望远系统的入瞳半径。

对于成像光谱仪狭缝方向平行和垂直纸面两种状况，漫反射板上极坐标位置 $A'(r', \theta')$ 与其在入瞳上的映射点 $A(r, \theta)$ 间的映射关系不同。

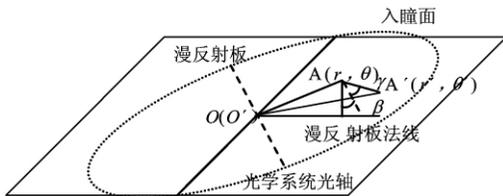


Fig 3 Relation of the ordinates between the diffuser and the entrance pupil plane

(1) 成像光谱仪狭缝方向平行纸面状况

$A'(r', \theta')$ 与 $A(r, \theta)$ 的关系如式(4)所示

$$r' = r \sin\theta \sqrt{1 + (\cos\gamma / (\cos(\gamma + \beta) \tan\theta))^2} \quad (4)$$

式中， $\gamma = \arctan\left(\frac{dm}{f'}\right)$ 为入射光线与成像光谱仪光轴的夹角， β 为成像光谱仪光轴与漫反射板法线的夹角，称之为成

像光谱仪的观测角。

(2) 成像光谱仪狭缝方向与纸面垂直的情况

$A'(r', \theta')$ 与 $A(r, \theta)$ 的关系如式(5)所示

$$r' = r \sqrt{\cos^2\theta / \cos^2\beta + (\sin\theta + \cos\theta \tan\beta \tan\gamma)^2} \quad (5)$$

式中各参数含义同上。

2 计算分析

以下分别就狭缝方向平行纸面和垂直纸面两种情况，数值分析不同景物像元同一光谱通道采集到的信号电子数比随照射距离 H 、观测角 β 和不同狭缝取向的变化。计算中，取 $\eta = 0.7$ ， $t_{\text{int}} = 4.16 \text{ ms}$ ， $\tau_0 = 0.3$ ， $\rho(\lambda_n) = 1$ ， $d = 18 \mu\text{m}$ (则 $A_{\text{det}} = 18 \times 18 \mu\text{m}^2$)， $f' = 0.72 \text{ m}$ ， $R = 0.09 \text{ m}$ ， r' 根据狭缝取向不同由上面式(4)和式(5)给出， $f(\lambda_n - \lambda)$ 取为高斯函数形式，光谱带宽取为 10 nm ，辐照度标准灯的色温近似为 3000 K ， $L_{\max}(\lambda)$ 分布取为 3000 K 黑体的光谱分布， $m = -3500, \dots, 3500$ 。

2.1 狭缝平行纸面情况

由式(3)和(4)，轴外景物像元 m 与轴上景物像元 O 同一光谱通道采集到的信号电子数比为

$$\frac{N_{sp}(m, n)}{N_{sp}(0, n)} = \frac{\int_0^{2\pi R} \left\{ \frac{H}{\sqrt{H^2 + (r \sin\theta)^2 [1 + (\cos\gamma / (\cos(\gamma + \beta) \tan\theta))^2]} \right\}^3 r dr d\theta}{\int_0^{2\pi R} \left\{ \frac{H}{\sqrt{H^2 + (r \sin\theta)^2 [1 + (1/\cos\beta \tan\theta)^2]} \right\}^3 r dr d\theta} \quad (6)$$

式中, $N_{sp}(m, n)$ 为景物像元 m 第 n 光谱通道采集到的信号电子数, $N_{sp}(0, n)$ 为中心景物像元第 n 光谱通道采集到的信号电子数。

对于 $H=0.75$ m, 观测角 β 以 10° 为间隔从 10° 取到 50° 时, 经计算得到图 4, 不同景物像元同一光谱通道采集到的信号电子数是不同的, 离辐照度标准灯越远的像元采集到信号电子数越少。对于观测角 $\beta=30^\circ$, 辐照度标准灯照射漫反

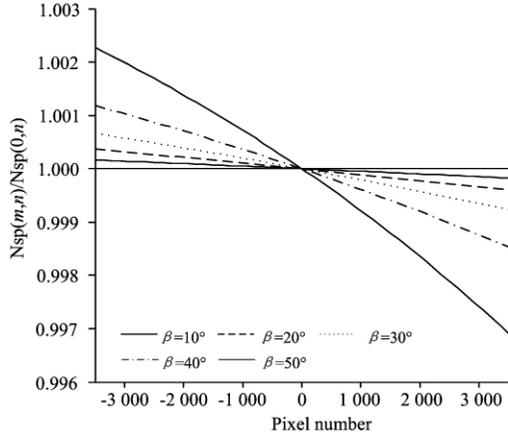


Fig 4 Electron number ratio in the same spectral channel with β different

$$\frac{N_{sv}(m, n)}{N_{sv}(0, n)} = \frac{\int_0^{2\pi R} \left[\frac{H}{\sqrt{H^2 + r^2 \cos^2 \theta / \cos^2 \beta + (r \sin \theta + r \cos \theta \tan \beta \tan \gamma)^2}} \right]^3 r d\theta}{\int_0^{2\pi R} \left[\frac{H}{\sqrt{H^2 + r^2 \cos^2 \theta / \cos^2 \beta + (r \sin \theta)^2}} \right]^3 r d\theta} \quad (7)$$

式中, $N_{sv}(m, n)$ 为景物像元 m 第 n 光谱通道采集到的信号电子数, $N_{sv}(0, n)$ 为中心景物像元第 n 光谱通道采集到的信号电子数。

对于 $H=0.75$ m, 观测角 β 以 10° 为间隔从 10° 取到 50° 时, 经计算得到图 6, 不同景物像元同一光谱通道采集到的信号电子数与景物像元的位置无关, 是相同的。观测角 β 取 30° , 辐照度标准灯照射漫反射板的距离 H 分别取为 0.5,

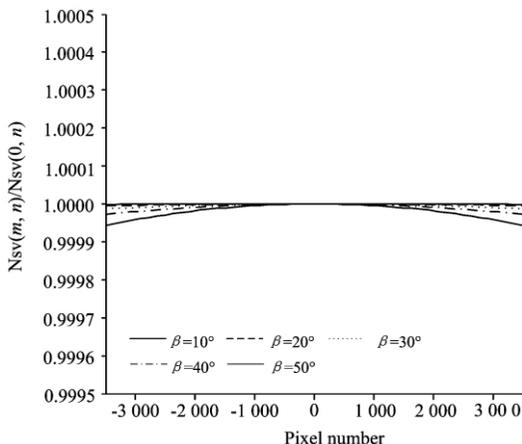


Fig 6 Electron number ratio in the same spectral channel with β different

射板的距离 H 分别取为 0.5, 0.75, 1 和 1.25 m 时, 经计算得到图 5, 离辐照度标准灯越远的像元采集到的信号电子数越少。

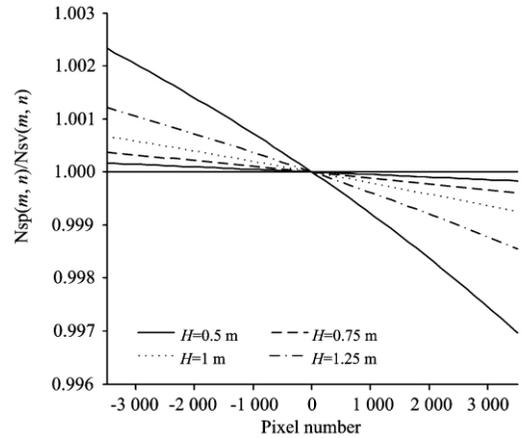


Fig 5 Electron number ratio in the same spectral channel with H different

2.2 狭缝垂直纸面情况

由式(3)和(5), 轴外景物像元 m 与轴上景物像元 O 同一光谱通道采集到的信号电子数比为

0.75, 1 和 1.25 m 时, 经计算得到图 7, 表明不同景物像元同一光谱通道采集到的信号电子数是相同的。

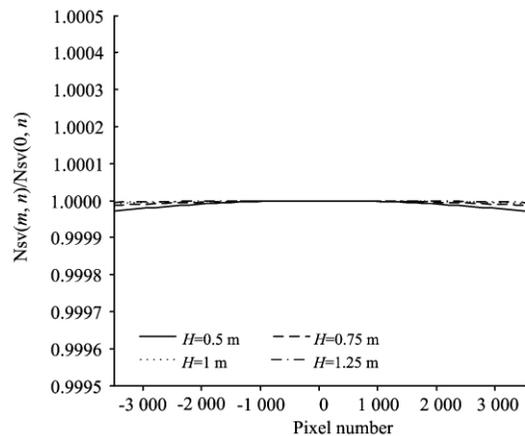


Fig 7 Electron number ratio in the same spectral channel with H different

2.3 狭缝指向对同一光谱通道景物像元采集到的信号电子数影响

由式(3), (4)和(5), 狭缝方向平行和垂直纸面情况下, 轴外景物像元 m 同一光谱通道采集到的信号电子数比为

$$\frac{N_{sp}(m, n)}{N_{sv}(m, n)} = \frac{\int_0^{2\pi R} \left\{ \frac{H}{\sqrt{H^2 + (r \sin \theta)^2} [1 + (\cos \gamma / \cos(\gamma + \beta) \tan \theta)^2]} \right\}^3 r}{\int_0^{2\pi R} \left[\frac{H}{\sqrt{H^2 + r^2 \cos^2 \theta / \cos^2 \beta + (r \sin \theta + r \cos \theta \tan \beta \tan \gamma)^2}} \right]^3 r} dr d\theta \quad (8)$$

式中, $N_{sp}(m, n)$ 和 $N_{sv}(m, n)$ 分别为狭缝平行和垂直纸面时, 景物像元 m 第 n 光谱通道采集到的信号电子数。

当取 0.75 m, 观测角 β 以 10° 为间隔从 10° 取到 50° 时, 经计算得到图 8, 表明在轴上像元处, 狭缝平行和垂直纸面两种状况的差异为零, 越偏离光轴二者差异越大, 且该差异随着 β 的增大而增大。观测角 β 取 30° , 辐照度标准灯照射漫反射板的距离 H 分别取为 0.5, 0.75, 1 和 1.25 m 时, 经计算得到图 9, 表明在轴上像元处, 狭缝平行和垂直纸面两种状况的差异为零, 越偏离光轴二者差异越大, 且该差异随着

H 的增大而增大。

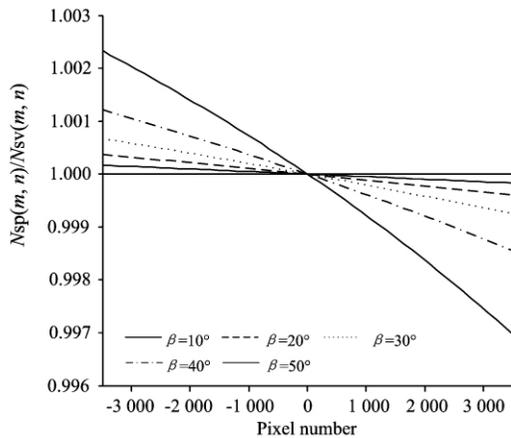


Fig 8 Electron number ratio when the slit parallels and is perpendicular to the meridional plane with β different

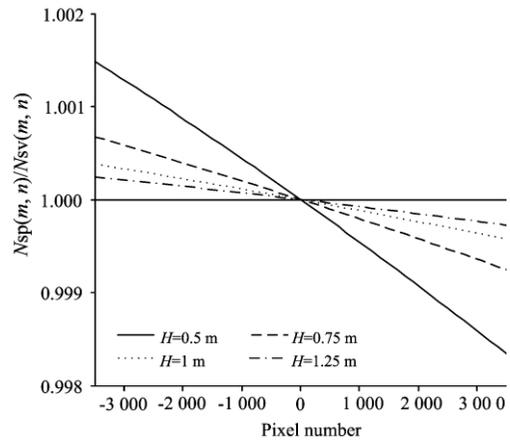


Fig 9 Electron number ratio when the slit parallels and is perpendicular to the meridional plane with H different

3 结论

对于狭缝方向平行纸面状况下, 不同景物像元相同光谱通道采集到的信号电子数是不同的, 越靠近辐照度标准灯, 采集到的信号电子数越多, 反之亦然; 对于狭缝垂直纸面状况下, 不同位置的景物像元相同光谱通道采集到的信号电子数是相同的。

References

[1] CUI Dun-jie(崔敦杰). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 1996, 11(3): 56.
 [2] LI Zhao-zhou, ZHENG Xiao-bing, TANG Ling-li(李照洲, 郑晓兵, 唐伶俐). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2007, 11(4): 581.
 [3] Chrien T G, Green R O, Eastwood M L. SPIE, 1990, 1298: 37.
 [4] Zadnika J, Guerina D, Moss R, et al. SPIE, 2001, 5425: 182.
 [5] Barnes R A, Eplee R E, Schmidt M, et al. Applied Optics, 2001, 40(36): 6682.
 [6] Davis C O, Kappus M, Bowles J, et al. SPIE, 1999, 3753: 160.
 [7] Davis C O, Bowles J, Leathers R A, et al. Optics Express, 2002, 10(4): 210.
 [8] Zhou Jiankang, Ji Yiqun, Chen Yuheng, et al. SPIE, 2009, 7506: M1.
 [9] YANG Hua-yuan, CUI Dun-jie, REN Jian-wei(杨华元, 崔敦杰, 任建伟). Acta Metrologica Sinica(计量学报), 1998, 19(2): 123.
 [10] Folkman M, Peariman J, Liao L et al. SPIE, 2001, 4151: 40.
 [11] LI Tong-ji, CHEN Qing-lian(李铜基, 陈清莲). Ocean Technology(海洋技术), 2001, 20(4): 26.
 [12] Jarecke P, Yokoyama K. SPIE, 2004, 4135: 254.

Study on the Characteristics of the Imaging Spectrometer Calibration Using Diffuser Method

ZHANG Chun-lei^{1,2}, XIANG Yang^{1*}

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 Using a white diffuser to calibrate the imaging spectrometer has been a new technology developed to calibrate the imaging spectrometer recently. It has characteristics of easy realization and higher calibration accuracy. The expression of the collected signal electron number in each spectral channel of the imaging spectrometer detector pixels was deduced with the slit parallel and perpendicular to the meridional plane according to the principal of the calibration of imaging spectrometer using diffuser method in the present paper. The spectral radiometric calibration characteristics of the imaging spectrometer was numerically analyzed under the two special slit directions. The results indicate that the slit direction has significant effect on the spectral radiometric calibration of the imaging spectrometer. The signal electron number of the same spectral channel collected by the different scene pixels is different when the slit parallels to the meridional plane, and when the pixel is closer to the standard lamp, it collects more signal electrons; the signal electron number of the same spectral channel collected by the different scene pixels doesn't change with the scene pixel position when the slit is perpendicular to the meridional plane.

Keywords White diffuser; Imaging spectrometer; Slit direction; Calibration characteristics

(Received Mar. 29, 2010; accepted Jun. 20, 2010)

* Corresponding author