

成像光谱仪标准探测器-漫反射板定标法准确性分析

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 采用标准探测器-漫反射板法对成像光谱仪进行定标, 具有实现容易、定标精度较高的特点。针对标准探测器-漫反射板定标法, 推导出成像光谱仪探测器像元采集到的信号电子数的计算表达式, 研究了在双向反射分布函数(BRDF)影响下辐照度标准灯照射距离 H 和成像光谱仪观察角 β 对标准探测器-漫反射板法定标成像光谱仪准确性的影响。结果表明, 不管是否考虑双向反射分布函数, 双向反射分布函数对观察角度的影响比照射距离的影响大。照射距离变化 2 mm, 观察角度变化 1° , 考虑双向反射分布函数前后 H 取 0.5~1.25 m, β 取 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内绝大部分区域满足信号电子数变化小于 1%。

关键词 光谱学; 成像光谱仪; 辐射定标; 标准探测器; 漫反射板; 光谱辐射特性

中图分类号 O432 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.061101

Accuracy Analysis of Imaging Spectrometer Radiometric Calibration Using Standard Detector-Diffuser Method

Zhang Chunlei^{1,2} Xiang Yang¹

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

Abstract Using white diffuser to calibrate the imaging spectrometer has the advantages of easy realization and high calibration accuracy. For calibrating the imaging spectrometer with a white diffuser, the expression of the collected signal electron number of the imaging spectrometer detector elements is deduced to investigate the effects of the distance H of the standard lamp illuminating the white diffuser and the observation angle β of the imaging spectrometer on the accuracy of the imaging spectrometer calibration. The results indicate that bidirection reflectance distribution function (BRDF) has more influence on the observation angle than illuminating distance, whether considering BRDF or not. When H is in the range of 0.5~1.25 m, β is in the range of $0^\circ \sim 30^\circ$, and the relative electron number error is almost less than 1% whether considering BRDF or not.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; radiometric calibration; standard detector; white diffuser; spectrometric characteristic

OCIS codes 110.4234; 350.5610; 120.3940; 040.1520

1 引言

辐射定标是成像光谱仪信息量化的先决条件, 也是反演被测景物参数的基础。成像光谱仪的辐射定标主要包括实验室定标、星上定标和场地替代定标三个阶段, 其中, 实验室定标的主要作用就是确定成像光谱仪的响应并评估其不确定度。

收稿日期: 2010-12-22; 收到修改稿日期: 2011-02-26; 网络出版日期: 2011-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(0538020)资助课题。

作者简介: 张春雷(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事成像光谱仪辐射定标技术方面的研究。

E-mail: zcl_1981@126.com

导师简介: 向阳(1963—), 男, 研究员, 主要从事光谱成像技术和光学检测技术等方面的研究。

E-mail: xiangy@sklao.ac.cn(通信联系人)

目前,实验室辐射定标主要有3种方法,即:积分球法、基于太阳定标法和标准探测器-漫反射板法。积分球法是实验室进行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^[1,2],机载可见/近红外成像光谱仪(AVIRIS)^[3]、紧凑型机载光谱传感器(COMPASS)^[4]、宽视场海洋观测遥感器(SeaWiFS)^[5,6]、弱光强便携式超光谱成像仪(PHILLS)等遥感器都采用这种方法进行定标。积分球法的优点是能够提供大面积无偏振光源,可以实现对遥感器全视场、全口径的定标,缺点是设备复杂,体积庞大。为了消除标准灯与太阳色温不同和太阳夫琅禾费线引起的成像光谱仪响应差异,基于太阳定标法^[7,8]可以在野外使用太阳辐射计进行测量,也可以通过设计制造太阳反射装置把太阳光引入到实验室中进行定标^[9],这种方法的缺点是受大气的影响大,而且要精确测定大气透射率。

为实现高精度辐射定标, D. W. Allen 等^[10]发展了能同时用作照度和亮度标准的辐射计,使低温绝对辐射计^[11,12]和标准探测器^[13,14]能够应用在空间遥感器的辐射定标上,标准探测器-漫反射板法中辐射标准由标准探测器替代了辐照度标准灯,不确定度由3%~5%^[15]降低到0.2%^[16]。标准探测器采用陷阱探测器前加干涉滤光片的方式测量几个波长处的光谱辐亮度值,然后通过插值得到其他波长处的光谱辐亮度值。虽然辐射标准采用标准探测器,但是辐照度标准灯经严格筛选,稳定性和方向性好,还可以与标准探测器结果比对,光源仍采用辐照度标准灯。这种方法精度的提高主要依赖于标准探测器的高精度;在偏振对成像光谱仪定标结果影响不大的情况下,使用漫反射板代替大积分球作为扩展光源来标定成像光谱仪可以实现由传统的比对方式变成光谱辐亮度间的直接比对,定标过程的不确定度由原来的5%~8%降低到小于2%^[17]。本文通过建立标准探测器-漫反射板法定标成像光谱仪模型,计算了辐照度标准灯以不同距离照射,成像光谱仪以不同角度观测漫反射板时狭缝方向像元采集到的信号电子数分布,计算分析了照射距离、观察角度改变对成像光谱仪辐射定标结果的影响,并对双向反射分布函数(BRDF)的影响进行了分析。

2 原理

使用标准探测器-漫反射板法定标成像光谱仪辐射响应特性的原理如图1所示。标准灯垂直照射漫反射板,成像光谱仪入瞳取在漫反射板处,这样需要的漫反射板面积最小。辐照度标准灯发出的光经漫反射板漫反射后进入成像光谱仪入瞳,具有相同方向的光线会聚到望远物镜焦面处狭缝的某一像元上,经光谱仪色散形成与狭缝方向垂直的一列像元,平行狭缝方向形成不同中心波长的狭缝的单色像,如图2所示。

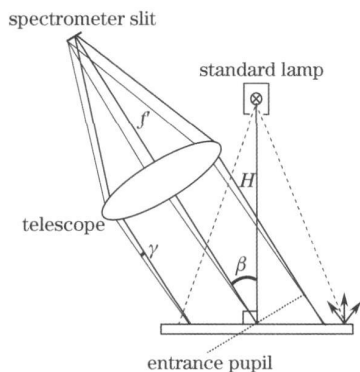


图1 漫反射板定标成像光谱仪辐射响应特性

Fig.1 Principle of calibration of imaging spectrometer using diffuser method

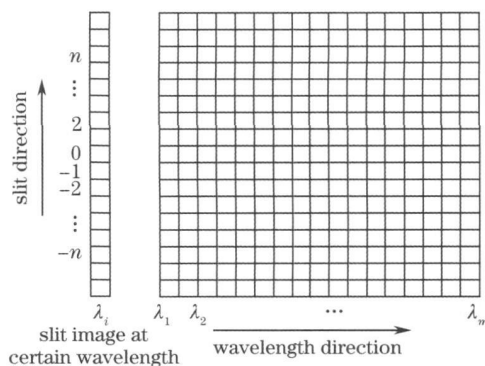


图2 成像光谱仪成像原理图

Fig.2 Principle of imaging spectrometer

对于理想漫反射板,辐照度标准灯照射在漫反射板上,漫反射板的光谱辐亮度^[15]为

$$L(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)E(\lambda)}{\pi}, \quad (1)$$

式中 $L(\lambda)$ 为光谱辐亮度, $\rho(\lambda)$ 为光谱反射率, $E(\lambda)$ 为光谱辐照度。

由于辐照度标准灯灯丝是垂直螺旋形的,漫反射板上光谱辐照度与入射角余弦的三次方成正比^[17]。由(1)式可知,漫反射板上相应点的光谱辐亮度与入射角余弦的三次方成正比,那么漫反射板上的光谱辐亮度

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

式中 $L(r', \lambda)$ 为与距离相关的光谱辐亮度, $L_{\max}(\lambda)$ 为漫反射板中心光谱辐亮度, r' 为漫反射板上与中心点的距离, H 为辐照度标准灯到漫反射板的距离。

对于成像光谱仪狭缝方向与纸面平行时,在入瞳上对光源相应亮度积分时漫反射板上极坐标位置 (r', θ') 与入瞳上对应位置 (r, θ) 的关系如图3所示, β 为成像光谱仪光轴与漫反射板法线夹角,定义为成像光谱仪的观测角。 γ 为进入入瞳光线与成像光谱仪光轴夹角,它由像

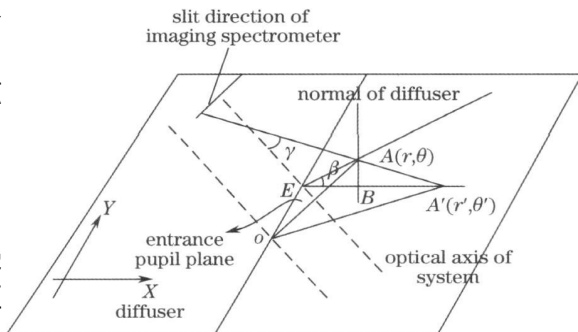


图3 狭缝方向垂直纸面时漫反射板上坐标与入瞳面上坐标的关系

Fig. 3 Relationship between the coordinates of diffuser and entrance pupil

元尺寸和望远系统焦距决定, $\gamma = \arctan\left(\frac{dn}{f}\right)$, 成像光谱仪光轴与狭缝中心的像元中心相交,沿狭缝方向定义为 x 方向,垂直狭缝方向定义为 y 方向,漫反射板上沿 OE 方向定义为 Y 方向,沿 EA' 方向定义为 X 方向, n 为像元数, d 为探测器的像元尺寸, f' 为成像光谱仪望远系统的焦距。由图中几何关系有

$$OE = r \sin \theta = r' \sin \theta'. \quad (3)$$

在 $\triangle AA'E$ 中, $\angle EAA' = 90^\circ + \gamma$, $\angle EA'A = 180 - (90^\circ + \gamma + \beta) = 90^\circ - \beta - \gamma$, $AE = r \cos \theta$, $A'E = r' \cos \theta'$, 由三角形正弦定理得

$$\sin(90^\circ + \beta + \gamma) / (r \cos \theta) = \sin(90^\circ + \gamma) / (r' \cos \theta'). \quad (4)$$

经化简可得到漫反射板上坐标与入瞳相应坐标关系式

$$r' = r \sin \theta \sqrt{1 + \left[\frac{\cos \gamma}{\cos(\gamma + \beta) \tan \theta} \right]^2}. \quad (5)$$

成像光谱仪中心波长为 λ 通道内第 n 个像元上的照度表达式为

$$dE(\lambda, n) = L(\lambda) \tau_0 f(\lambda - \lambda) \cos \phi d\lambda d\Omega \quad (6)$$

式中 $dE(\lambda, n)$ 为中心波长为 λ 通道内第 n 个像元上的照度微元, $L(\lambda)$ 为入瞳前的光谱辐亮度, τ_0 为光学系统的透射率, $f(\lambda - \lambda)$ 为光谱响应函数, ϕ 为像面上一点与入瞳上微元连线和像面法线方向夹角, $\cos \phi = \frac{f'}{\sqrt{r^2 + f'^2}}$

$d\Omega$ 为入瞳上微元对像面上某一像元所张的立体角, $d\Omega = \cos \phi dr d\theta / f'$, 如图4所示。

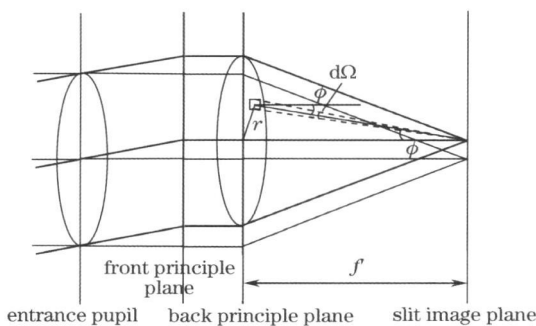


图4 光谱辐照度微元计算示意图

Fig. 4 Parameters to calculate the irradiance

3 计算分析

(6)式中的光谱辐照度微元乘以探测器像元面积 A_{det} 得到单位时间内采集到的光通量,乘以积分时间 t_{int} 得到积分时间内的光辐射能量,除以 $h\nu = hc/\lambda$ 得到积分时间内采集到的光子数,与探测器量子效率 η 相乘得到探测器采集到的信号电子数微元。再对得到的信号电子数微元积分及得到中心波长为 λ 通道第 n 个像元产生的电子数为

$$N_s(\lambda, n) = \frac{\eta(\lambda) A_{\text{det}} t_{\text{int}}}{hc} \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \int_{r-\Delta r/2}^{r+\Delta r/2} L_{\max}(\lambda) \left[\frac{H}{\sqrt{H^2 + r'^2}} \right]^3 \tau_0 \mathcal{Y}(\lambda - \lambda) r f'^2 (r^2 + f'^2)^2 d\lambda dr d\theta \quad (7)$$

式中探测器的量子效率 η 取为 0.7, 积分时间 t_{in} 取为 4.16 ms, 光学系统的透射率 τ_0 取为 0.3, ρ 取为 1, 像元尺寸 d 取 18 μm , 即 A_{det} 取为 $18 \times 18 \mu\text{m}^2$, 望远物镜焦距取为 0.72 m, r' 由 (4) 式给出, 光谱响应函数 $f(\lambda - \lambda)$ 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, R 为入瞳半径, 计算中取为 90 mm。

景物中心像元各光谱通道采集到的相对信号电子数分布与波长 λ 的关系由 (7) 式计算。由于假定了各波长的量子效率相同且都为 0.7, 所以探测器沿光谱方向采集到的信号电子数分布基本与色温 3000 K 黑体光谱辐射分布相同。

辐照度标准灯到漫反射板距离对狭缝方向电子数分布的影响, 当辐照度标准灯到漫反射板的距离 H 分别取为 0.5, 0.75, 1, 1.25 m 时, 由 (7) 式算得的归一化到 0.5 m 最大值处的电子数分布如图 5 所示。计算结果表明, 辐照度标准灯到漫反射板距离相同时, 随着像元数的增加, 探测器像元采集到的信号电子数逐渐减少, 这是由于从入瞳进入、不同方向的辐亮度对应漫反射上的不同位置造成的, 但减少幅度不大。随着距离的增加, 各像元采集到的信号电子数都减小, 不同像元间采集到的电子数差异变小, 这是由于漫反射板上的辐照度随着辐照度标准灯距漫反射板的距离增大更均匀, 距离不同时, 电子数基本按距离平方反比规律变化。

观察角度也对采集到的信号电子数分布有一定程度影响, H 取 0.5 m, 观测角 β 以 15° 为间隔从 15° 取到 60° 时, 经计算得到图 6。计算结果表明, 角度一定时, 随着像元数的增大, 各像元采集到的信号电子数逐渐减少; 随着观测角度的增大, 像元数大的像元采集到的信号电子数减少得更多, 30° 时最大的衰减 0.012%, 60° 时最大的衰减可达 0.11%。成像光谱仪定标时既要考虑到电子数随像元数的变化情况, 还要使成像光谱仪不挡住辐照度标准灯的照明, 故 β 取 $20^\circ \sim 30^\circ$ 为宜。

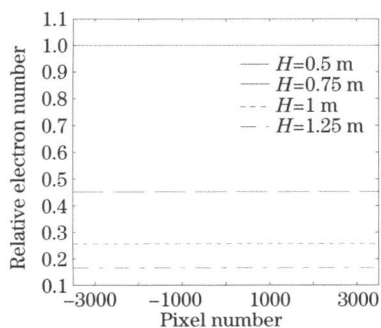


图 5 归一化到 0.5 m 时最大值各像元采集的电子数分布图 ($\beta = 30^\circ, H = 0.5 \sim 1.25$ m)

Fig. 5 Relative electron numbers normalized to maximum of 0.5 m ($\beta = 30^\circ, H = 0.5 \sim 1.25$ m)

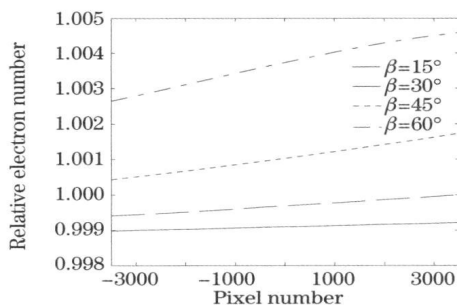


图 6 归一化到 30° 时最大值处各像元采集的电子数分布图 ($H = 0.5$ m, $\beta = 15^\circ \sim 60^\circ$)

Fig. 6 Relative electron numbers normalized to maximum of 30° ($H = 0.5$ m, $\beta = 15^\circ \sim 60^\circ$)

为了得到观察角、照射距离定位精确程度对探测器像元采集到的信号电子数分布的影响, 电子数对成像光谱仪观察角 β 、照射距离 H 作偏微分, 两边分别除以 N_s , 得到电子数的相对变化, 即

$$\frac{\Delta N_s}{N_s} = \frac{\partial N_s}{\partial \beta} \frac{\Delta \beta}{N_s} + \frac{\partial N_s}{\partial H} \frac{\Delta H}{N_s} = \frac{\iint 3H^3(-r^2 \sin^2 \theta + A^2) \tan(\beta + \gamma) r / (H^2 + A^2)^{2.5} / (r^2 + f'^2)^4 dr d\theta}{\iint H / \sqrt{H^2 + A^2}^3 r / (r^2 + f'^2)^2 dr d\theta} \Delta \beta + \frac{\iint [1 - 3H^2 / (H^2 + A^2)] r / (H^2 + A^2)^{1.5} / (r^2 + f'^2)^2 dr d\theta}{\iint H / \sqrt{H^2 + A^2}^3 r / [H^2 (r^2 + f'^2)^2] dr d\theta} \Delta H. \quad (8)$$

式中 $A = r \cos \theta \sqrt{\cos^2 \gamma + [\cos(\beta + \gamma) \tan \theta]^2 / \cos(\beta + \gamma)}$ 。

H 取 0.5 m, β 取 30° , 不考虑 β 的变化, 即 $\Delta \beta = 0$, 照明距离 H 的改变量 ΔH 分别取 -0.5, -1, 0.5, 1 mm 时, 可得到如图 7 所示的结果。计算结果表明, 照射距离 H 变化 1 mm, 狭缝方向像元最大电子数相对变化为 0.3884%, 随着 ΔH 的绝对值增加, 电子数的变化幅度增加。 H 取 0.5 m, β 取 30° , 不考虑 H 的变

化, 即 $\Delta H = 0$, 观察角度的改变量 $\Delta\beta$ 分别取 -0.5° , -0.25° , 0.25° , 0.5° 时, 可得到如图 8 所示的结果, 计算结果表明, 角度变化 0.5° , 狭缝方向像元最大电子数相对变化为 0.0209% , 随着 $\Delta\beta$ 的绝对值增加, 电子数的变化幅度增加。由以上结论可以得出照射距离变化 1 mm 引起的信号电子数变化对结果的影响比观察角变化 0.5° 时大一个数量级, 因此在不考虑 BRDF 定标时要更精确地控制距离的定位精度。为凸显标准探测器代替辐照度标准灯作为辐射标准的优势, 应使由漫反射板作为扩展源引起的探测器采集信号电子数变化小于 1% 。角度在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 距离取在 $0.5 \sim 1.25\text{ m}$ 范围内, 取探测器一个像元重新计算, 距离改变 2 mm , 角度改变 1° , 结果如图 9 所示, 图中平面对应电子数变化值为 1% , 图 9 表明探测器采集到的信号电子数在上述距离角度范围内变化相应距离角度后都不大于 1% 。

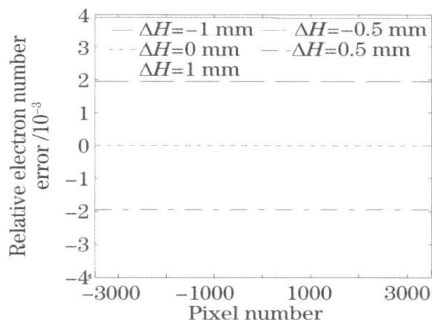


图 7 改变不同照射距离时电子数相对改变图($H = 0.5\text{ m}, \beta = 30^\circ$)

Fig. 7 Relative electron number errors versus pixel number at different distances ($H = 0.5\text{ m}, \beta = 30^\circ$)

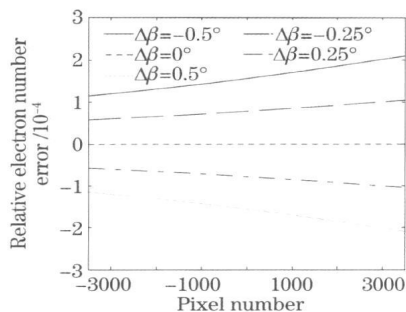


图 8 改变不同角度时电子数相对改变图($H = 0.5\text{ m}, \beta = 30^\circ$)

Fig. 8 Relative electron number errors versus pixel number at different angles ($H = 0.5\text{ m}, \beta = 30^\circ$)

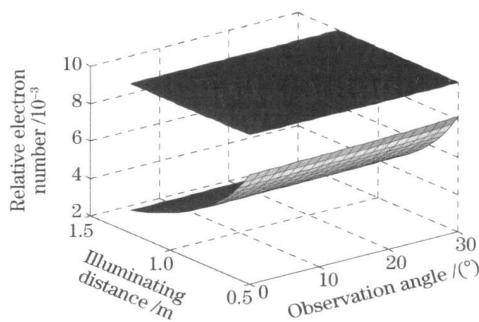


图 9 不同距离角度小距离角度小量改变对信号电子数的影响

Fig. 9 Relationship between relative electron number errors and illuminating distances and observation angle

漫反射板 BRDF 定义为指定方向上单位面积单位立体角内的光谱辐通量与某一方向上入射到漫反射板上相应位置的单位面积上接收的光谱辐通量的比值, 它比通常的反射比和反射率更能精确描述物体表面反射的方向特性。当漫反射板不是理想朗伯体时, 通过使用 BRDF 就能得到漫反射板各个方向的光谱辐亮度不一致对不同景物像元同一光谱通道采集到的信号电子数的影响。由 BRDF 定义使用平行光照射漫反射板, 入射角相同, 可以方便得到漫反射板 BRDF 影响下信号电子数的变化, 如图 10 所示, 漫反射板上照度分布仍按未使用平行光照射的照度分布计算, 这样可以直接比较 BRDF 前后对探测器采集到的信号电子数的影响。

考虑 BRDF 后的探测器信号电子数计算式为

$$N_s(\lambda, n) = \frac{\eta(\lambda) A_{\text{det}} t_{\text{int}}}{hc} \int_0^{2\pi R_{\lambda}^+ + \Delta\lambda/2} \int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} f_r(n, \lambda) E_{\text{max}}(\lambda) \left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + r'^2}} \right)^3 \frac{\tau_0 \mathcal{F}(\lambda - \lambda) r'^2}{(r^2 + f'^2)^2} d\lambda dr d\theta \quad (9)$$

式中 $f_r(n, \lambda)$ 为漫反射板的双向反射分布函数, $E_{\text{max}}(\lambda)$ 为漫反射板中心的光谱辐照度。对于垂直入射, 在同一平面内入射角 α 为 0° , 反射角为以 10° 为间隔从 10° 取到 50° 时的 BRDF 由文献 [18] 中给出, 如表 1 所示, 利用多项式插值方法构造一个过该 5 点的多项式, 其余角度处的 BRDF 值为

$$f_r(\gamma) = -0.2694\gamma^4 + 0.4702\gamma^3 - 0.2872\gamma^2 + 0.0487\gamma + 0.3400 \quad (10)$$

式中 γ 为用弧度表示的角度值, $f(\gamma)$ 为相应角度处的 BRDF 值。经计算得到狭缝方向采集到的信号电子数随照射距离和观察角度变化的关系如图 11 和 12 所示。计算结果表明, 考虑 BRDF 后, 距离改变基本不改变电子数分布形状, 角度改变后, 电子数相对分布有很大变化, 未考虑 BRDF 时相对 30° 时变化不到 0.1% , 考

考虑 BRDF 后变化到 22%。

表 1 漫反射板以 10° 为间隔从 10° ~ 50° 的 BRDF 值

Table 1 BRDF of the diffuser from 10° to 50°

Angle / (°)	10	20	30	40	50
BRDF / sr ⁻¹	0.342	0.338	0.334	0.330	0.320

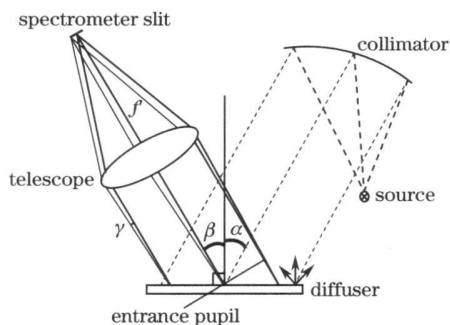


图 10 狭缝平行纸面时, 考虑 BRDF 后漫反射板定标成像光谱仪辐射响应特性原理图

Fig. 10 Principle of calibrating the imaging spectrometer using diffuser method after considering BRDF when slit parallels to the paper

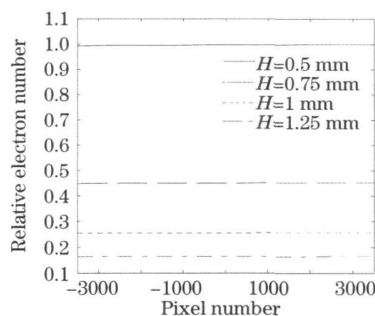


图 11 考虑 BRDF 后改变不同照射距离时电子数相对改变图(β= 30°)

Fig. 11 Relative electron number errors versus pixel numbers at different distances after considering BRDF (β= 30°)

照射距离和观测角度改变小量时, 由于式中 $f_r(n, \lambda)$ 对 H 和 β 微分后结果不是解析形式, 所以照射距离和观测角度引起的信号电子数的改变量分别为

$$\frac{\Delta N_s(H, \beta, \Delta H)}{N_s} = \frac{N_s(H + \Delta H) - N_s(H)}{N_s}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta N_s(H, \beta, \Delta \beta)}{N_s} = \frac{N_s(\beta + \Delta \beta) - N_s(\beta)}{N_s}. \quad (12)$$

探测器像元采集到的信号电子数改变如图 13 和 14 所示。图 13 和 14 表明, 距离改变量小时探测器像元接收的信号电子数改变与未考虑 BRDF 时一样, 角度改变时, 信号电子数的改变是未考虑 BRDF 时的 3.5 倍。尽管如此, 照射距离 1 mm 的变化对结果的影响比观测角变化 0.5° 大 4.7 倍, 因此在考虑 BRDF 定标时也要更精确地控制距离的定位精度。H 取 0.5~ 1.25 m, β 取 0°~ 30°, 距离变化 2 mm, 角度变化 1°, 重新计算得到电子数变化最大的探测器第 3500 个像元电子数变化如图 15 所示, 图中平面对应电子数变化值为 1%, 图 15 表明只有角度和距离的坐标位置在 (0°, 0.5 m), (0°, 0.8375 m), (4.5°, 0.5 m) 围成的近似三角形区域内信号电子数变化才超过 1%。

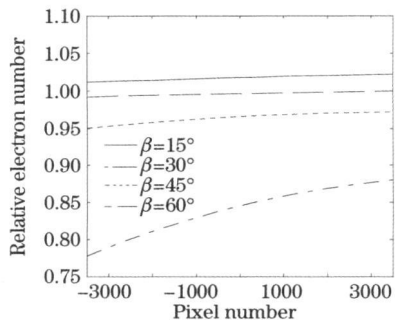


图 12 考虑 BRDF 后改变不同观测角时电子数相对改变图(H = 0.5 m)

Fig. 12 Relative electron number errors versus pixel numbers at different angles after considering BRDF (H = 0.5 m)

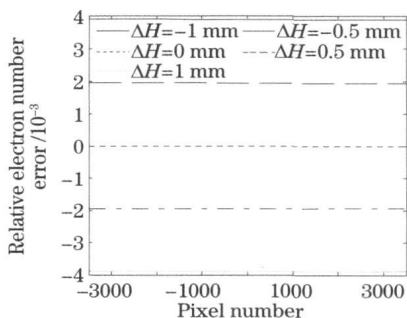


图 13 改变不同照射距离时电子数相对改变图 (H = 0.75 m, β= 30°)

Fig. 13 Relative electron numbers errors versus pixel number at different ΔH after considering BRDF (H = 0.75 m, β= 30°)

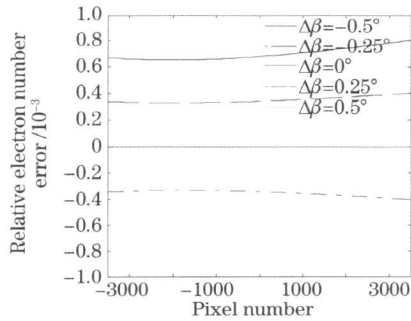


图 14 改变不同角度时电子数相对改变图

($H = 0.75 \text{ m}, \beta = 30^\circ$)

Fig. 14 Relative electron number errors versus pixel numbers at different $\Delta\beta$ after considering BRDF
($H = 0.75 \text{ m}, \beta = 30^\circ$)

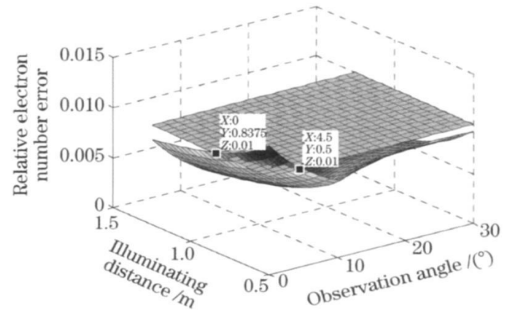


图 15 考虑 BRDF 后不同照射距离和观测角度对信号电子数的影响

Fig. 15 Relative electron number errors versus illuminating distances and observation angles after considering BRDF

4 结 论

通过计算分析了辐照度标准灯以不同距离垂直照射漫反射板,成像光谱仪以不同角度观察漫反射板时,成像光谱仪探测器狭缝方向各像元产生的电子数分布。通过计算分析表明,考虑 BRDF 后,距离对狭缝方向电子数分布的影响与未考虑 BRDF 相同,角度对狭缝方向电子数分布的影响与未考虑 BRDF 时有明显不同,未考虑 BRDF 时相对 30° 时最大值变化不到 0.1%,考虑 BRDF 后变化到 22%,角度变化 0.5° ,信号电子数的改变是未考虑 BRDF 时的 3.5 倍。不管考不考 BRDF,定标过程中对照射距离精度的控制比观察角度精度控制要更严格。照射距离变化 2 mm,观察角度变化 1° ,考虑 BRDF 前后 H 取 0.5~1.25 m, β 取 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内绝大部分区域满足信号电子数变化小于 1%,可以凸显利用标准探测器-漫反射板法定标的优势。

参 考 文 献

- 1 Chrien T. G., Green R. O.. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible infrared imaging spectrometer AVIRIS[C]. *SPIE*, 1990, **1298**: 37~ 49
- 2 Chrien T. G., Kopp G.. Improvements to the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) calibration system [C]. *IEEE*, 1994, **4**: 2293~ 2294
- 3 Zadnik J., Guerin D.. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager[C]. *SPIE*, 2004, **5425**: 182~ 188
- 4 Barnes R. A., Eplee R. E.. Calibration of SeaWiFS. I. direct techniques[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(36): 6682~ 6700
- 5 Davis C. O., Kappus M.. Calibration, characterization and first results with the ocean PHILLS hyperspectral imager[C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 160~ 168
- 6 Davis C. O., Bowles J.. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(4): 210~ 221
- 7 Thome K., Czaplá M. J.. Accuracy assessment for the radiometric calibration of imaging sensors using preflight techniques relying on the sun as a source[C]. *SPIE*, 2008, **7081**: 708118
- 8 Anderson N., Biggar S.. Solar radiation-based calibration of laboratory grade radiometers[C]. *SPIE*, 2007, **6677**: 66770X
- 9 Michele A. K., Czaplá M. J.. Development of a heliostat facility for solar radiation-based calibration of earth observing sensors[C]. *SPIE*, 2008, **7081**: 708119
- 10 Allen D. W., Eppeldauer G. P.. Calibration and character of trap detector filter radiometers [C]. *SPIE*, 2003, **5151**: 471~ 479
- 11 Li Shuang, Wang Ji. Highly accurate optical radiation calibration of InGaAs trap based on cryogenic radiometer[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(8): 64~ 66
- 12 Eppeldauer G. P., Zeng J.. Development and calibration of pyroelectric radiometer standards at NIST [C]. *SPIE*, 2006, **6201**: 620119

- 13 Nigel P. F., Christopher J. C.. High accuracy characterisation and applications of filter radiometers[C]. *SPIE*, 1996, **2815**: 32~ 41
- 14 Yao Hejun, L Zheng, Lin Yandong *et al.*. Characterizations of trap detector and its measurements[J]. *Modern Metrology Test*, 2000, **8**(2): 3~ 7
姚和军, 吕 正, 林延东 等. 陷阱式探测器的特性及其测量[J]. 现代计量测试, 2000, **8**(2): 3~ 7
- 15 Li Youping, Yu Bingxi, Wang Yupeng *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 822~ 828
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
- 16 Yang Huayuan, Cui Dunjie, Ren Jianwei *et al.*. Detector based radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1998, **19**(2): 123~ 128
杨华元, 崔敦杰, 任建伟 等. 基于探测器的成像光谱仪绝对辐射定标方法[J]. 计量学报, 1998, **19**(2): 123~ 128
- 17 Jarek P., Yokoyama K.. Radiometric calibration transfer chain from primary standards to the end-to-end hyperion sensor [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 254~ 263
- 18 Barnes P. Y., Edward A. E.. Diffuse reflectance of sintered and pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) [C]. *SPIE*, 1998, **3426**: 190~ 194