

文章编号 1004-924X(2011)12-2828-09

漫反射板法标定成像光谱仪的精度分析

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 100039)

摘要:用漫反射板法标定成像光谱仪时不仅要考虑定标仪器的精度,还要了解成像光谱仪几何参数和仪器参数对标定结果的影响。本文根据漫反射板法标定成像光谱仪原理,推导了以定标角度、距离等几何参数和成像光谱仪仪器参数为自变量的探测器沿景物像元方向采集到的信号电子数变化表达式,据此对几何参数和仪器参数对标定的影响进行了分析。结果表明, $F/\#$ 分别为 3 和 4,入瞳口径为 0.1~0.2 m,辐照度标准灯照射距离取 0.5~2 m,且其测量精度为 1 mm 时,只要照射角小于 12° ,满足 0.5° 的测量精度,都可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于 1%,从而可发挥标准探测器精度高的优势,使利用漫反射板的定标方法实现较高的精度。

关键词:成像光谱仪;漫反射板法;辐射定标;光谱辐射特性

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.2828

Accuracy analysis of calibration for imaging spectrometer by using diffuser method

ZHANG Chun-lei^{1,2*}, XIANG Yang¹

- (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 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: zcll_1981@126.com*

Abstract: The calibration of an imaging spectrometer by using the diffuser method should consider not only the accuracy of calibration instruments, but also the effects of instrument and geometric parameters from the imaging spectrometer on calibration results. According to the calibration principle of imaging spectrometer using the diffuser method, this paper deduces the expression of the collected signal electron number in each spectral channel of the imaging spectrometer by taking the parameters as self-variables, and it analyzes the effects of the incident angle of standard lamp, the distance of standard lamp to the diffuser, the slit direction and the observation incident angle of the imaging spectrometer on the electron number collected by the detector pixels. The results show that when the F number is set to be 3 and 4, the entrance pupil in 0.1–0.2 m, the standard lamp illuminating angle less than 12° and the distance of the standard lamp in 0.5–2 m, the change of the signal electron number can be

收稿日期:2011-03-08;修订日期:2011-04-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60538020)

less than 1%. It satisfies the accuracy need of the calibration by using the diffuser method.

Key words: imaging spectrometer; diffuser method; radiometric calibration; spectral and radiometric characteristics

1 引言

成像光谱仪是‘谱像合一’的新型光学遥感器,其利用狭缝将成像和光谱两类不同的光学仪器结合在一起,可同时获得物体的影像及其像元的光谱^[1-2]。成像光谱仪的辐射定标是以标准辐射源或标准探测器为基准,通过比对实验,建立成像光谱仪输出图谱数据与地面景物光谱辐亮度之间定量关系来完成的。实验室定标成像光谱仪通常采用积分球方法^[3-8],该方法利用辐照度标准灯作为辐射标准,其不确定度为 3%~5%^[9]。首先由辐照度标准灯和漫反射板组成光谱辐亮度标准,定标光谱辐射计;然后,利用光谱辐射计定标积分球;最后由积分球定标成像光谱仪,该方法定标精度为 5%~8%。漫反射板法^[10-11]使用辐照度标准灯照射漫反射板代替积分球作为大面积均匀辐亮度源,同时使用标准探测器定标辐照度标准灯在给定波长处的光谱辐照度值,再通过插值方法得到其余波长处的光谱辐照度值,标准探测器的不确定度为 0.2%^[12]。由于辐照度标准灯具有很好的稳定性和方向性,定标过程中仍使用辐照度标准灯作为光源,这种方法精度主要依赖于标准探测器精度,定标精度可达 2%^[13],与利用积分球法定标和其它方法^[14-15]相比,具有简便实用的特点,而且可以进行野外测量。

采用漫反射板法定标成像光谱仪时,由于成像光谱仪不是垂直观察漫反射板,成像光谱仪倾斜观察漫反射板的角度、狭缝方向,辐照度标准灯照射漫反射板的角度和辐照度标准灯到漫反射板距离都对探测器采集到的信号电子数产生影响;而且所定标的成像光谱仪不同,上述各几何参数对辐射定标结果的影响也不同。由于色散型成像光谱仪信噪比不高,成像光谱仪的 $F/\#$ 通常在 3~4 之间,以让更多的能量进入成像光谱仪。另外,成像光谱仪用在航天航空领域,仪器体积重量的控制至关重要,入瞳口径多根据前置望远系统

透射和反射方式的不同取在 100~200 mm 左右。本文通过建立漫反射板法定标成像光谱仪的模型,计算分析了成像光谱仪入瞳口径、 $F/\#$ 和几何参数对成像光谱仪漫反射板法定标精度的影响。

2 原理

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,其它狭缝方向未在图中画出。

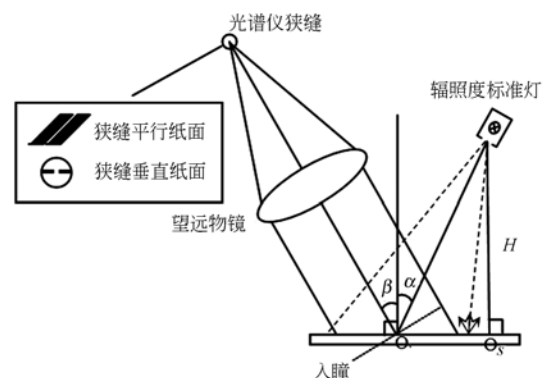


图 1 狭缝平行和垂直纸面时,漫反射板定标成像光谱仪的辐射响应原理

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

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 ,辐照度标准灯灯丝中心和 O 点连线与漫反射板法线的夹角为 α ,定义其为辐照度标准灯的照射角。辐照度标准灯的灯丝是垂直螺旋形的,漫反射板上的光谱辐照度与辐照度标准灯发出的光线入射角余弦的三次方成正比。假定漫反射板是理想朗伯体,则漫反射板的光谱辐亮度:

$$L(r', \lambda) = L_{O_s}(\lambda) \left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + (r' \cos \theta' - H \tan \alpha)^2 + (r' \sin \theta')^2}} \right)^3, \quad (1)$$

式中, $L_{O_s}(\lambda)$ 为漫反射板 O_s 点的光谱辐亮度, H 为辐照度标准灯到漫反射板上 C 点的距离, 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:

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

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。如图 2 所示, f' 为成像光谱仪望远系统的焦距, 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, $\cos \phi = \frac{f'}{\sqrt{r^2 + f'^2}}$, $d\Omega$ 为后主面上微元对像面上像元 m 所张的立体角, $d\Omega = \cos \phi r dr d\theta / f'$ 。

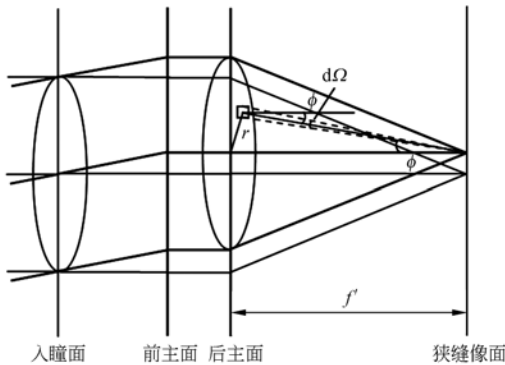


图 2 光谱辐照度微元计算示意图

Fig. 2 Parameters used in calculating spectral irradiance

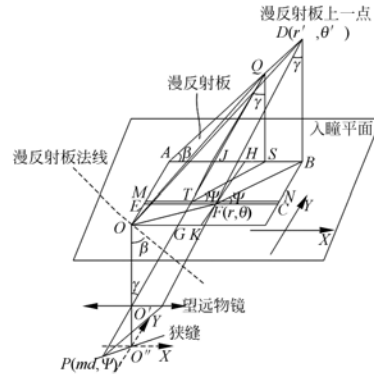


图 3 漫反射板坐标系 $D(r', \theta')$ 与入瞳坐标系 $F(r, \theta)$ 对应关系

Fig. 3 Relation of $D(r', \theta')$ on the diffuser and $F(r, \theta)$ on the entrance pupil

在成像光谱仪狭缝取不同方向的情况下, 漫反射板(平面 OAD)上极坐标位置 $D(r', \theta')$ 与其在入瞳平面(平面 OAB)上的映射点 $F(r, \theta)$ 间的映射关系随着入射光线角度 γ 不同而不同, 如图 3 所示。 OA 为入瞳平面与漫反射板的交线, QS 和 DB 为过 Q 和 D 垂直于入瞳平面的垂线, β 为漫反射板与入瞳平面的夹角, 定义为成像光谱仪的观察角。 T, F 为过 Q, D 点以 γ 角入射的光线与入瞳平面的夹角, 由于 QT 和 DF 是具有相同方向的光线, 所以 $\angle STN = \angle BFC = \phi$, 由几何关系可知狭缝与 x 轴的夹角也为 ϕ 。由 $AO = OE + AE = OE + HF$ 和 $AB = AH + HB = EF + FC$ 可得:

$$r \sin \theta + r' \cos \theta' \sin \beta \tan \gamma \sin \phi = r' \cos \theta', \quad (3)$$

$$r \cos \theta + r' \cos \theta' \sin \beta \tan \gamma \cos \phi = r' \cos \theta' \cos \beta. \quad (4)$$

由式(1)可知, 只要解出 $r' \cos \theta', r' \sin \theta'$ 和 r, θ 的关系就可以代入式(1)和式(2)中计算探测器像元采集到的信号电子数, 由式(3)和式(4)可得:

$$r' \cos \theta' = r \cos \theta / (\cos \beta - \sin \beta \tan \gamma \cos \phi), \quad (5)$$

$$r' \sin \theta' = r \sin \theta + r \cos \theta \sin \beta \tan \gamma \sin \phi / (\cos \beta - \sin \beta \tan \gamma \cos \phi). \quad (6)$$

由式(1)和式(2), 对 r 和 θ 在整个入瞳面上积分得到景物像元 m 光谱通道 n 采集到的信号

电子数如式(7)所示:

$$N_s(m, n) = \frac{\eta(\lambda_n) A_d t_{int}}{hc} \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_{\lambda_n - \Delta\lambda_n/2}^{\lambda_n + \Delta\lambda_n/2} \frac{L_{O_s}(\lambda) \left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + (r' \cos \theta' - H \tan \alpha)^2 + (r' \sin \theta')^2}} \right)^3 \tau_0 \lambda f(\lambda_n - \lambda) r f'^2}{(r^2 + f'^2)^2} d\lambda dr d\theta, \quad (7)$$

式中, $r' \cos \theta'$ 和 $r' \sin \theta'$ 表达式如式(5)和式(6)所示, 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, 入射光线与成像光谱仪光轴的夹角可表示为 $\gamma \arctan(\frac{dm}{f})$, d 为探测器像元尺寸, m 为像元数。

3 计算分析

为了得到各定标参数的精度对结果的影响,

利用式(7)对各量求偏微分后再除以式(7), 就得到各定标参数的变化量引起探测器采集到的信号电子数变化的表达式, 如式(8)所示。

$$\frac{\Delta N_s}{N_s} = \frac{\partial N_s}{\partial H} \frac{\Delta H}{N_s} + \frac{\partial N_s}{\partial \beta} \frac{\Delta \beta}{N_s} + \frac{\partial N_s}{\partial \alpha} \frac{\Delta \alpha}{N_s} + \frac{\partial N_s}{\partial \psi} \frac{\Delta \psi}{N_s}, \quad (8)$$

式中, $\frac{\partial N_s}{\partial H} \frac{1}{N_s}$ 、 $\frac{\partial N_s}{\partial \beta} \frac{1}{N_s}$ 、 $\frac{\partial N_s}{\partial \alpha} \frac{1}{N_s}$ 和 $\frac{\partial N_s}{\partial \psi} \frac{1}{N_s}$ 的表达式没有解析解, 所以用积分形式表示, 分别如式(9)、(10)、(11)和(12)所示。

$$\frac{\partial N_s}{\partial H} \frac{1}{N_s} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R 1/A r^{1.5} / (r^2 + f'^2)^2 dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\left\{ \frac{H}{\sqrt{A}} \right\}^3 r}{H^2 (r^2 + f'^2)^2} dr d\theta} - \frac{1.5 \int_0^{2\pi} \int_0^R H/A^{2.5} r / (r^2 + f'^2)^2 [2H - 2C \tan \alpha] dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\left\{ \frac{H}{\sqrt{A}} \right\}^3 r}{H^2 (r^2 + f'^2)^2} dr d\theta}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial N_s}{\partial \beta} \frac{1}{N_s} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R -1.5 H^6 / A^{2.5} r / (r^2 + f'^2)^2 \{-2(r' \cos \theta' - H \tan \alpha) \cos \theta / B^2 D + 2(r' \sin \theta') [r' \cos \theta' \cos \beta \tan \gamma \sin \psi - r \cos \psi E / B^2 D]\} dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\left\{ \frac{H}{\sqrt{A}} \right\}^3 r}{(r^2 + f'^2)^2} dr d\theta}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial N_s}{\partial \alpha} \frac{1}{N_s} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R 3 H^4 / A^{2.5} r / (r^2 + f'^2)^2 C (1 + \tan^2 \alpha) dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\left\{ \frac{H}{\sqrt{A}} \right\}^3 r}{(r^2 + f'^2)^2} dr d\theta}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial N_s}{\partial \psi} \frac{1}{N_s} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R -1.5 H^6 / A^{2.5} r / (r^2 + f'^2)^2 \{-2C r \cos \theta / B^2 E + 2(r' \sin \theta') [r' \cos \theta' \sin \beta \tan \gamma \cos \psi - r' \cos \theta' E^2 / B]\} dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\left\{ \frac{H}{\sqrt{A}} \right\}^3 r}{(r^2 + f'^2)^2} dr d\theta}. \quad (12)$$

式中 $A = H^2 + (r' \cos \theta' - H \tan \alpha)^2 + (r' \sin \theta')^2$, $B = \cos \beta - \sin \beta \tan \gamma \cos \psi$, $C = r' \cos \theta' - H \tan \alpha$, $D = -\sin \beta - \cos \beta \tan \gamma \cos \psi$, $E = \sin \beta \tan \gamma \sin \psi$ 。

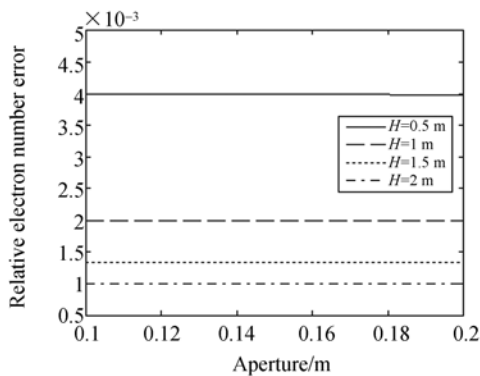
以下分别数值分析定标的成像光谱仪在不同入瞳口径和 $F/\#$ 情况下, 不同景物像元在同一光谱通道采集到的信号电子数随狭缝方向、照射距

离变化量 ΔH 、辐照度标准灯的照射角的变化量 $\Delta \alpha$ 、观测角的变化量 $\Delta \beta$ 和狭缝取向的变化量 $\Delta \psi$ 的变化。计算中, 取 $\eta = 0.7$, $t_{int} = 4.16 \text{ ms}$, $\tau_0 = 0.3$, $\rho(\lambda_n) = 1$, $d = 18 \text{ }\mu\text{m}$ ($A_{det} = 18 \text{ }\mu\text{m} \times 18 \text{ }\mu\text{m}$), $r' \cos \theta'$ 和 $r' \sin \theta'$ 根据狭缝取向不同由上面式(5)和式(6)给出, $f(\lambda_n - \lambda)$ 取为高斯函数形式,

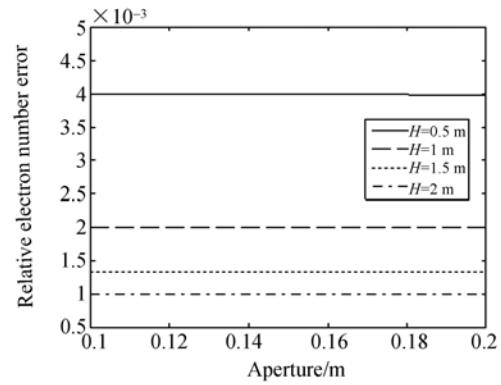
光谱带宽取为 10 nm, 辐照度标准灯的色温近似为 3 000 K, $L_{Q_s}(\lambda)$ 分布取为 3 000 K 黑体的光谱分布, $m = -3\ 500, -3\ 499, -3\ 498, \dots, 3\ 498, 3\ 499, 3500$, 与波长相关的参数在计算中将被约掉。

成像光谱仪望远系统的 $F/\#$ 定义为望远系统焦距 f' 和入瞳口径 $2R$ 的比值, 这里 $2R$ 在 100~200 mm 取 20 个值, $F/\#$ 分别取为 3 和 4, 由于工作在 0.4~2.5 μm 的辐照度标准灯通常使用石英溴钨灯, 工作时作为点源使用, 标准计量机构标定其在 0.5 m 处 31 个波长的光谱辐照度值, 最短距离只能取为 0.5 m, 更远距离处通过平方反比定律得到, 而其它波长处的光谱辐照度值通过插值公式给出^[16]。辐照度标准灯照射距离在 0.5~2.0 m 取 4 个值, 成像光谱仪观察角 $\beta = 30^\circ$, 辐照度标准灯的照射角 $\alpha = 30^\circ$, 成像光谱仪狭缝与 x 轴的夹角 ψ 取 0° , 单独考虑照射距离变化的影响, 即 $\Delta\beta = \Delta\alpha = \Delta\psi = 0$, ΔH 取为 1 mm, 经计算得到图 4(a) 和 (b), 其表明探测器采集到信号电子数相对变化随照射距离的增大而减少, 在 0.5 m 处接近 0.4%, 2 m 处接近 0.1%, 入瞳口径和 $F/\#$ 的改变对信号电子数相对变化没有影响。

成像光谱仪入瞳口径 $2R$ 在 100~200 mm 取 20 个值, $F/\#$ 分别取为 3 和 4, 成像光谱仪观察角 β 在 $0 \sim 45^\circ$ 取 4 个值, 辐照度标准灯照射距离取为 0.5 m, 辐照度标准灯的照射角 $\alpha = 30^\circ$, 成像光谱仪狭缝与 x 轴的夹角 ψ 取 0° 。单独考虑观察角度变化的影响, 即 $\Delta H = \Delta\alpha = \Delta\psi = 0$, $\Delta\beta$ 取 0.5° , 经计算得到图 5(a) 和 (b), 其表明探测器采集到信号电子数相对变化随着入瞳口径的增大而增大, 信号电子数相对变化的量级在 10^{-5} , $F/\#$



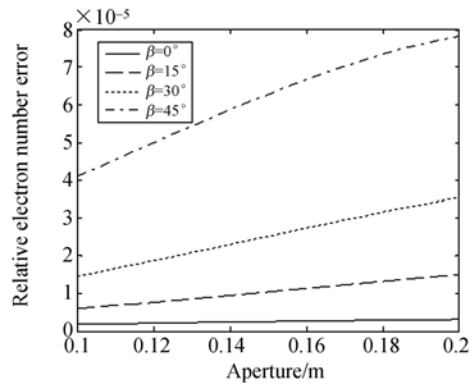
(a) $F/\# = 4$



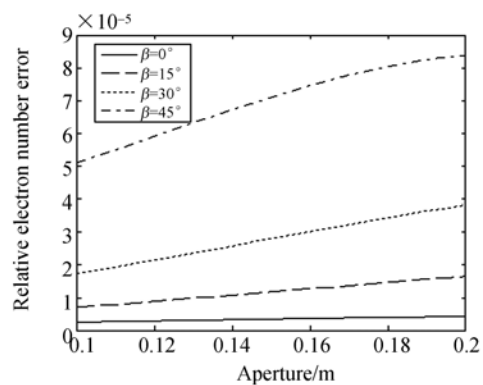
(b) $F/\# = 3$

图 4 入瞳口径和 $F/\#$ 在不同距离下对探测器采集信号电子数的影响

Fig. 4 Effect of entrance pupil and F number on electron number error at different distances



(a) $F/\# = 4$



(b) $F/\# = 3$

图 5 入瞳口径和 $F/\#$ 在不同观察角度下对探测器采集信号电子数的影响

Fig. 5 Effects of entrance pupil and F number on electron number error at different observation angles

越小,信号电子数相对变化越大。成像光谱仪入瞳口径 $2R$ 在 $100\sim 200$ mm 取 20 个值, $F/\#$ 分别取为 3 和 4,辐照度标准灯照射距离取为 0.5 m,成像光谱仪观察角 $\beta=30^\circ$,辐照度标准灯的照射角 α 在 $0\sim 45^\circ$ 取 4 个值,成像光谱仪狭缝与 x 轴的夹角 ψ 取 0° ,单独考虑照射角度变化的影响,即 $\Delta H=\Delta\beta=\Delta\psi=0$, $\Delta\alpha$ 取 0.5° ,经计算得到图 6 (a)和(b),其表明探测器采集到信号电子数相对变化随照射角度的增大而增大,信号电子数最大相对变化为 2.6%,入瞳口径和 $F/\#$ 的改变对信号电子数相对变化没有影响。

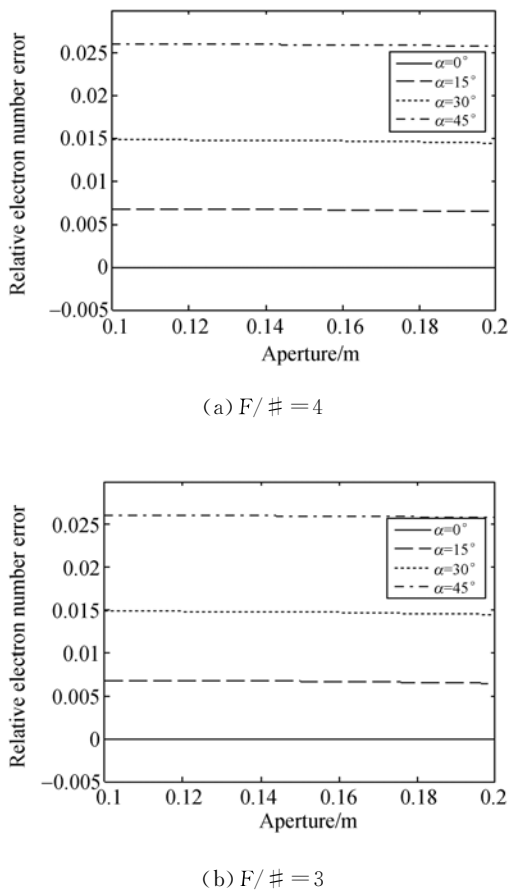


图 6 入瞳口径和 $F/\#$ 在不同照射角度下对探测器采集信号电子数的影响

Fig. 6 Effects of entrance pupil and F number on electron number error at different illuminating angles

成像光谱仪入瞳口径 $2R$ 在 $100\sim 200$ mm 取 20 个值, $F/\#$ 分别取为 3 和 4,辐照度标准灯照射距离取为 0.5 m,成像光谱仪观察角 $\beta=30^\circ$,辐照度标准灯的照射角 $\alpha=30^\circ$,成像光谱仪狭缝与 x 轴的夹角 ψ 在 $0\sim 90^\circ$ 取 4 个值,单独考虑狭缝

方向变化的影响,即 $\Delta H=\Delta\beta=\Delta\alpha=0$, $\Delta\psi$ 取 0.5° ,经计算得到图 7(a)和(b),其表明探测器采集到信号电子数相对变化随狭缝方向与 x 轴夹角的增大而增大,入瞳口径越大,信号电子数相对变化越大,信号电子数最大相对变化随 $F/\#$ 的增大而增大。

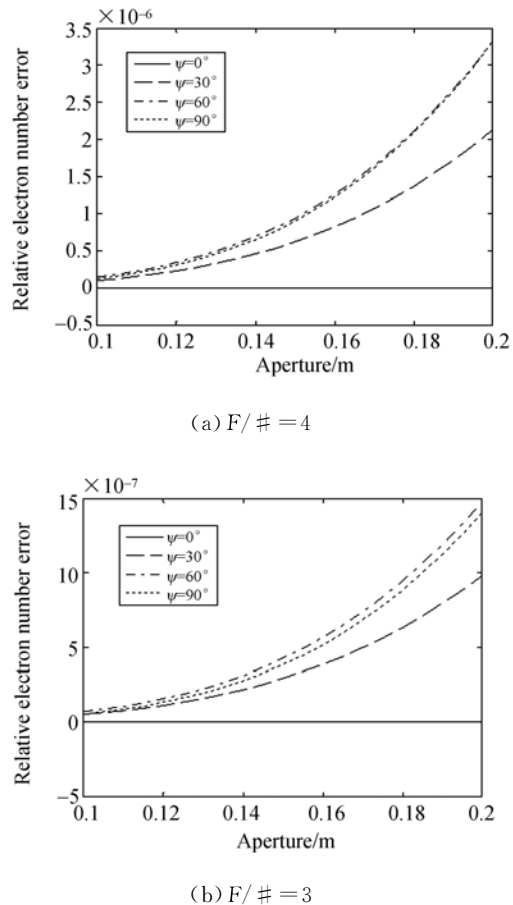


图 7 入瞳口径和 $F/\#$ 在不同狭缝方向下对探测器采集信号电子数的影响

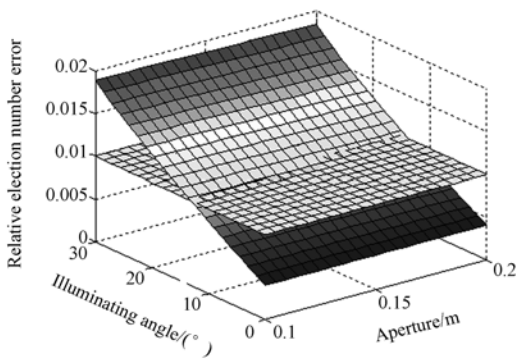
Fig. 7 Effects of entrance pupil and F number on electron number error at different slit directions

由上面的计算可知,对成像光谱仪探测器采集到的信号电子数影响较大的是辐照度标准灯的照射距离和照射角度,由于二者引起的探测器采集到的信号电子数变化约 3%。为了发挥利用漫反射板和标准探测器定标成像光谱仪的优势,由各几何参数测量误差引起的的探测器采集到的信号电子数变化应控制在 1% 以内。这里进一步对辐照度标准灯的照射距离和照射角度两个量的影响进行分析,以将信号电子数的相对变化控制在

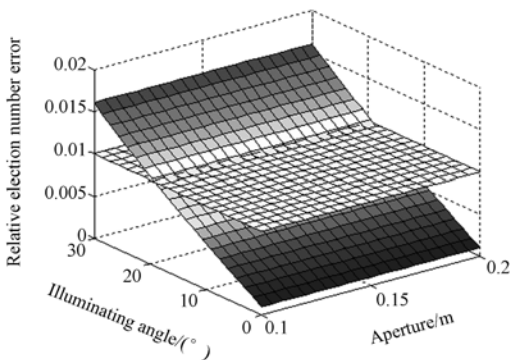
1%以内。 $F/\#$ 取为4,分别取 H 为0.5 m和2 m,成像光谱仪观察角 $\beta=30^\circ$,辐照度标准灯的照射角 $\alpha=30^\circ$,成像光谱仪狭缝与 x 轴的夹角 ψ 取 0° , $\Delta\psi=\Delta\beta=\Delta\alpha=0.5^\circ$, $\Delta H=1$ mm,利用式(9)、(10)、(11)和(12)计算照射角度和入瞳口径对探测器信号电子数变化的影响,如图8所示。从图8可见,当 H 取0.5 m,入瞳口径为0.1 m,照射角小于 12° 时,可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于1%;入瞳口径为0.2 m,照射角小于 13.5° 时,可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于1%。当 H 取为2 m时,入瞳口径取为0.1 m和0.2 m,当照射角小于 18° 可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于1%。 $F/\#$ 取为3时与4时基本相同,在此就不给出相应结果。总之,距离测量精度为1 mm,角度测量

精度为 0.5° 情况下,成像光谱仪入瞳口径在0.1~0.2 m, H 取值为0.5~2 m时,当照射角小于 12° ,都可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于1%。

漫反射板双向反射分布函数(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入射到漫反射板上相应位置单位面积上接收的光谱辐通量的比值。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定义可知,使用平行光照射漫反射板,入射角相同时,可以方便得到漫反射板BRDF的影响,文献中给出的漫反射板的BRDF值是平行光垂直照射漫反射板时,不同反射角度下的测量值,以 10° 为间隔从 10° 到 50° 的BRDF值^[17-18]如表1所示,这里通过对以上5个测量值进行五点四次插值得到其余反射角度处的BRDF值,所以这里照射角 α 取为 0° 。为达到对比效果,漫反射板上照度分布仍按余弦三次方规律计算,平行光的均匀性对定标结果的影响,是通过的平行光均匀性测量得到的。



(a) $H=0.5$ m



(b) $H=2$ m

图8 成像光谱仪入瞳口径和照射角对探测器采集信号电子数的影响

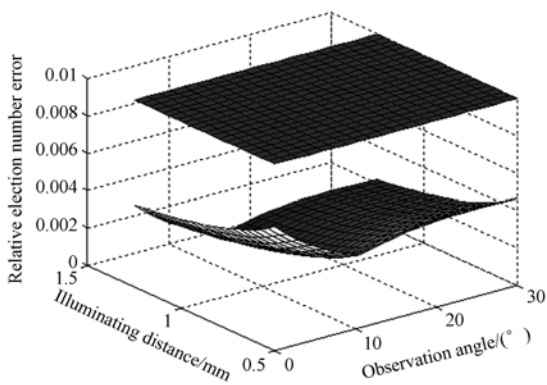
Fig.8 Effects of entrance pupil and illuminating angle on electron number error at different distances

表1 漫反射板以 10° 为间隔从 10° 到 50° 的BRDF值

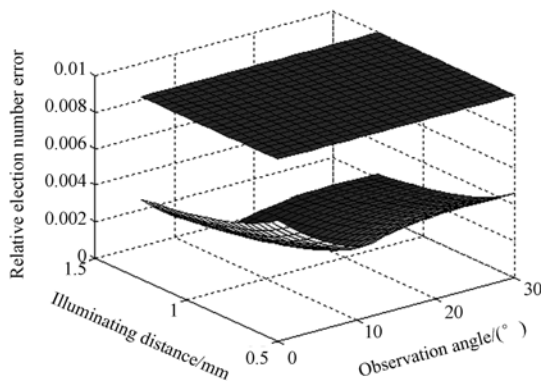
Tab.1 BRDF of diffuser from 10° to 50° (interval in 10°)

角度/ $^\circ$	BRDF/(sr^{-1})
10	0.342
20	0.338
30	0.334
40	0.330
50	0.320

这里综合考虑结果影响较大的照射距离和观测角度,照射距离变化1 mm,观察角度变化 0.5° ,距离在0.5~1.25 m变化,角度 $0\sim 30^\circ$,经计算得到图9(a)和(b),其表明在只考虑照射距离和观测角度情况下,距离变化1 mm,角度变化 0.5° 产生的信号电子数相对变化都小于1%。所以在考虑BRDF后,距离和角度在上述范围内,距离1 mm和角度 0.5° 的改变不会使电子数相对变化大于0.5%。



(a)狭缝方向平行纸面
(a) Slit is parallel to plane



(b)狭缝垂直纸面
(b) Slit is perpendicular to plane

图 9 考虑 BRDF 后狭缝方向平行和垂直纸面时,照射距离和观测角度同时对信号电子数的影响

Fig. 9 Effects of illuminating distance and observation angle on electron number error by considering BRDF

参考文献:

- [1] GOETZ F H A. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985,228:1147.
- [2] 季轶群,官广彪,朱善兵,等. 微型集成超光谱成像系统[J]. *光学精密工程*, 2009,17(4):727-731.
JI Y Q, GONG G B, ZHU SH B, *et al.*. Minimal integrated hyperspectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):727-731.
- [3] CHRIEN G T, GREEN O R, EASTWOOD L M. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible infrared imaging spectrometer AVIRIS [J]. *SPIE*, 1990, 1298:37-49.

4 结 论

漫反射板法定标成像光谱仪具有容易实现,定标精度较高的特点。本文建立了漫反射板法定标成像光谱仪模型,对辐照度标准灯照射距离、照射角度、成像光谱仪观察角度等几何参数、成像光谱仪口径和成像光谱仪 F 数对定标结果的影响进行了计算分析。结果表明,成像光谱仪口径、 F 数、狭缝方向和成像光谱仪观察方向对信号电子数相对变化影响很小,辐照度标准灯照射距离和照射角度对相对电子数变化影响较大。 $F/\#$ 分别取为 3 和 4,入瞳口径在 0.1~0.2 m 时,辐照度标准灯照射距离取 0.5~2 m,只要照射角小于 12° 都可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于 1%,可以发挥标准探测器精度高的优势,使利用漫反射板的定标方法达到较高的精度。考虑 BRDF 后,距离在 0.5~1.25 m 变化,角度在 $0 \sim 30^\circ$ 变化,当距离变化为 1 mm,角度变化为 0.5° 时,产生的信号电子数相对变化小于 1%。

- [4] CHRIEN G T, KOPP G, GREEN O R, *et al.*. Improvements to the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) calibration system [J]. *IEEE*, 1994:2293-2294.
- [5] ZADNIKA J, GUERIN D, MOSS R, *et al.*. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 5425:182-188.
- [6] DAVIS O C, KAPPUS M, BOWLES J, *et al.*. Calibration, characterization and first results with the ocean PHILLS hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 1999, 3753:160-168.
- [7] DAVIS O C, BOWLES J, LEATHERS A R, *et al.*. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design,

- characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, 10(4):210-221.
- [8] 任建伟,刘则沟,万志,等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1491-1497.
- REN J W, LIU Z X, WAN ZH, *et al.*. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1491-1497.
- [9] 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.
- LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)
- [10] FOLKMAN A M, SANDOR S, THORDARSON S, *et al.*. Updated results from performance characterization and calibration of the TRWIS III hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 1997, 3118:142-153.
- [11] FOLKMAN M, PEARIMAN J, LIAO L, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151:40-51.
- [12] 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.
- YANG H Y, CUI D J, REN J W, *et al.*. Detector based radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1998, 19(2):123-128. (in Chinese)
- [13] JARECKE P, YOKOYAMA K. Radiometric calibration transfer chain from primary standards to the end-to-end hyperion sensor[J]. *SPIE*, 2004, 4135:254-263.
- [14] KUESTER A M, THOME J K, BIGGAR F S, *et al.*. Solar radiation based calibration of an airborne radiometer for vicarious calibration of earth observing sensors [J]. *SPIE*, 2002, 4483:85-92.
- [15] KUESTER A M, CZAPLA M J, KAPTCHEN P, *et al.*. Development of a heliostat facility for solar-radiation-based calibration of earth observing sensors [J]. *SPIE*, 2008, 7081:708119.
- [16] WALKER H J, SAUNDERS D R, JACKSON K J, *et al.*. Platinum resistance thermometer calibration[J]. *NBS Special Publication 250-20*, 1981: 47-50.
- [17] BARNES P Y, EARLY A E. Diffuse reflectance of sintered and pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) [J]. *SPIE*, 1998, 3426:190-194.
- [18] 盛建军,张黎明. 标准漫反射板绝对反射比因子测量装置[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1498-1503.
- SHENG J J, ZHANG L M. Reflectometer for absolute reflectance factor of standard diffuse panel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1498-1503. (in Chinese)

作者简介:



张春雷(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,2005年于北京交通大学获得学士学位,主要从事成像光谱仪辐射定标方面的研究。E-mail: zcll_1981@126.com

导师简介:



向阳(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1988年于东北师范大学获硕士学位,1998年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事成像光谱遥感方面的研究。E-mail: xiangy@sklao.an.cn