

影响光谱辐亮度标定因素的分析

贾 辉 李福田

(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, 长春 130022)

摘要: 在利用漫反射板标定光谱辐亮度的实验装置中, 标准灯完全可以近似为点光源。通过对进入光谱仪的辐射通量的数值积分, 可以对应求出仪器的实测光谱辐亮度的计算公式。计算表明, 实测光谱辐亮度并不等于漫反射板表面的光谱辐亮度, 而有一个随标定条件变化的微小差值。通过计算, 对光谱仪与漫反射板的距离、光谱仪入射狭缝的光轴与漫反射板法线的夹角以及标准灯与漫反射板的距离等影响光谱仪标定的因素进行分析, 得到了最佳的标定条件。讨论了理想标定情况、光谱仪视场趋于一点的极限情况和采用实际的双向反射分布函数已知的漫反射板标定时, 实测光谱辐亮度的计算情况。

关键词: 物理光学; 定标; 光谱辐亮度; 漫反射板; 朗伯表面

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

Analysis of Factors Affecting Spectral Radiance Calibration by Applying a Diffuse Plane

Jia Hui Li Futian

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 14 October 2002; revised 9 December 2003)

Abstract: For experimental setup to calibrate spectral radiance by applying a diffuse plane, the measured spectral radiance can be obtained through integral of spectral radiation flux entering the spectrometer. Calculation shows that the measured spectral radiance by the spectrometer is not equal to the spectral radiance on diffuse plane surface, there is a deviation varying with actual calibration condition. The effect caused by variation of distance between spectrometer and diffuse plane, angle from the light axis of the spectrometer's entrance slit to the diffuse plane's normal, distance between standard lamp and diffuse plane are analysed, and optimized conditions for spectral radiance calibration are obtained. Finally, the idealized spectral radiance calibration, spectral radiance limit when the viewing area shrinks to a point, and actual spectral radiance calibration by applying a diffuse plane of known bidirectional reflectance distribution function at optimized conditions are discussed.

Key words: physical optics; calibration; spectral radiance; diffuse plane; Lambertian surface

1 引 言

光学遥感仪器的光谱辐亮度标定有多种方法, 在紫外波段可采用漫反射板来标定光谱辐亮度。如美国的 SBUV 系列星载太阳后向散射紫外光谱仪就是采用漫反射板来标定光谱仪的光谱辐亮度

的^[1]。标定装置如图 1 所示, 将一标准灯正入射照明朗伯漫反射板, 光谱仪对准漫反射板中心, 并使其视场被漫反射光充满, 则根据朗伯漫反射特性, 由已知光谱辐照度的标准灯可计算出漫反射板的光谱辐亮度 $L(\lambda)$, 再由仪器测得的读出值 $V(\lambda)$ [或 $I(\lambda)$] 即可得到光谱仪的光谱辐亮度响应度

$$R_L(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{L(\lambda)} \left[\text{或 } R_L(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{L(\lambda)} \right]. \quad (1)$$

然而在实际标定过程中,理想模型与实际情况之间总存在着一定的差异,这些差异都会影响光谱仪的标定结果。如理想情况下光源为点光源,而实际光源都有一定的线度;人们希望漫反射板上的照度均匀,而实际点光源照明又不同于均匀平行光照明;实际的漫反射板不可能是理想的朗伯漫反射板;还有,光谱仪的观测角度、光谱仪与漫反射板的距离、标准灯与漫反射板的距离以及实验中工作台的反射光的影响等等许多因素都会影响光谱辐亮度的标定。但是,在文献中只给出了标定方法,没有见到精确的光谱辐亮度的数值计算公式和详细的数值分析。

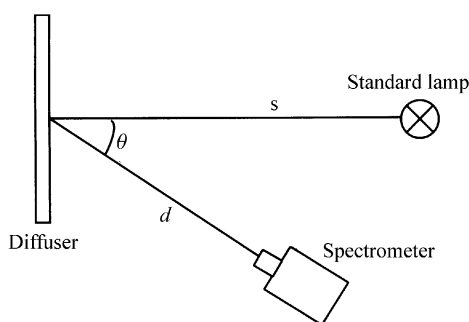


Fig. 1 Schematic diagram of spectral radiance calibration

本文依据图 1 所示的实验装置建立了实测光谱辐亮度的计算公式,通过对各种标定情况下的计算,从数值上分析了实际标定中影响标定结果的因素。

2 实测光谱辐亮度的计算公式

在紫外波段,采用光电倍增管或光电管作为探测器的光谱仪,由于探测器的探测机理是光电效应,即由光子激发出光电子,它响应的物理量是辐射通量。在实际测量过程中,虽然欲测光谱辐亮度、光谱辐照度是不同于辐射通量的物理量,但是探测器实际接收到的是入射到探测器上的辐射通量,只是实际探测的辐射通量通过一定的关系对应于所要测的物理量如光谱辐亮度、光谱辐照度等。本文中,已知光谱辐照度的光辐射正入射到漫反射板上,由于漫反射板上各点的光谱辐照度不同,在光谱仪入射狭缝处观测漫反射板上各点的距离、角度也不同,观测到的漫反射板上各点光谱辐亮度不同。漫反射板反射到光谱仪入射狭缝的辐射通量可以计算求得。

建立坐标系,将光谱仪狭缝后的光学系统等效为图 2 所示的情况,矩形 $aa'b'b$ 为入射狭缝, O' 点

为探测器, $O'O''$ 距离为 e , $AA'B'B$ 为光谱仪在漫反射板上的视场, OO' 距离为 d , x 方向视场角为 α , 为以后讨论方便, y 方向视场角定为 $\beta = \alpha/10$, 则狭缝长 $2e \cdot \tan(\alpha/2)$, 宽 $2e \cdot \tan(\beta/2)$ 。漫反射板上的视场范围为 x 轴方向 $[-(d+e) \cdot \sin(\alpha/2)/\cos(\theta-\alpha/2), (d+e) \cdot \sin(\alpha/2)/\cos(\theta+\alpha/2)]$, y 轴方向 $[-(d+e) \cdot \tan(\beta/2), (d+e) \cdot \tan(\beta/2)]$ 。

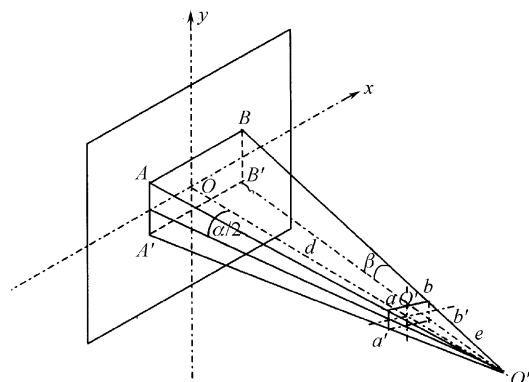


Fig. 2 Viewing area of spectrometer

设 $P_1(x, y)$ 为漫反射板上视场范围内任意一小面元 $d\sigma$ 内一点, P_2 为入射狭缝的中点, 如图 3 所示, 则

$$r^2 = |P_1P_2|^2 = d^2 \cos^2 \theta + (d \sin \theta + x)^2 + y^2,$$

$|P_1P_2|$ 与漫反射板的夹角

$$\xi = \arctan \frac{|AP_2|}{|AP_1|} = \arctan \frac{d \cos \theta}{\sqrt{y^2 + (d \sin \theta + x)^2}},$$

$|P_1P_2|$ 与入射狭缝平面的夹角

$$\eta = \arctan \frac{|BP_1|}{|BP_2|} = \arctan \frac{|d + x \sin \theta|}{\sqrt{y^2 + x^2 \cos^2 \theta}},$$

$|P_1P_2|$ 在漫反射板上的投影 P_1A 与 x 轴的夹角 ($|P_1P_2|$ 的方位角)

$$\varphi = \arctan \frac{-y}{-d \sin \theta - x} = \arctan \frac{y}{d \sin \theta + x},$$

显然光谱仪视场角中分线与狭缝平面是垂直的。

任意小面元 $d\sigma$ 的光谱辐亮度为 $L(x, y, \lambda) = E(x, y, \lambda) \cdot F_{\text{BRDF}}(0, 0; \pi/2 - \xi, \varphi; \lambda)$, 由光谱辐亮度定义, 漫反射板上面元 $d\sigma$ 反射到光谱仪入射狭缝的辐射通量 $d^2\varphi = L(x, y, \lambda) \cdot \cos(\pi/2 - \xi) \cdot d\sigma \cdot d\Omega$, 其中 $d\Omega = \sigma' \cdot \cos(\pi/2 - \eta)/r^2$ 为光谱仪入射狭缝 σ' 对面元 $d\sigma$ 内 P_1 点所张立体角的近似表示 (d 相对入射狭缝的线度较大时近似性较好)。对光谱仪视场内的所有面元积分可得进入光谱仪入射狭缝的辐射通量为

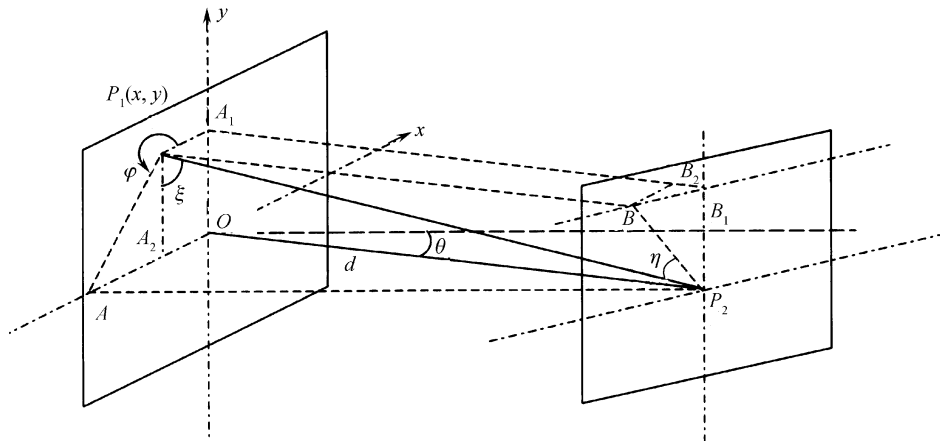


Fig. 3 Diagram of spectral radiance calculation

$$\begin{aligned} \phi(\lambda) &= \iint d^2\phi = \iint L(x, y, \lambda) \cos(\pi/2 - \xi) \cdot d\sigma \cdot d\Omega = \\ &= \iint \frac{E(x, y, \lambda) F_{\text{BRDF}}(0, 0; \pi/2 - \xi, \varphi; \lambda) \cos(\pi/2 - \xi) \cdot \cos(\pi/2 - \eta) \cdot \sigma'}{d^2 \cdot \cos^2\theta + (d \cdot \sin\theta + x)^2 + y^2} dx dy, \end{aligned} \quad (2)$$

因为光电倍增管是作为单值探测的探测器,光谱仪的整个视场应作为一点 M 来考虑,把进入光谱仪的光通量作为 M 点的光谱辐亮度值,其光谱辐亮度为

$$L'(\lambda) = \phi(\lambda) / (d\Omega' \cdot \sigma \cdot \cos\theta'), \quad (3)$$

其中 σ 为视场面积, θ' 为 MP_2 和漫反射板法线的夹角, $d\Omega'$ 为光谱仪入射狭缝 σ' 对 M 点所张立体角。取 O 点作为 M 点,假定漫反射板为朗伯漫反射板,其半球反射率为 $\rho(\lambda)$,则漫反射板的光谱辐亮度为 $\rho(\lambda) \cdot E(\lambda) / \pi$,代入公式(3)中则

$$L'(\lambda) = \frac{d^2 \cdot \phi(\lambda)}{\sigma \cdot \sigma' \cdot \cos\theta} = \frac{\rho(\lambda)}{\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta} \iint \frac{E(x, y, \lambda) \cdot \cos(\pi/2 - \xi) \cdot \cos(\pi/2 - \eta)}{d^2 \cdot \cos^2\theta + (d \cdot \sin\theta + x)^2 + y^2} dx dy, \quad (4)$$

3 影响光谱仪标定因素的分析

3.1 光源的影响

在光谱辐亮度标定过程中,光源近似为点光源。但实际的光源总有一定的几何尺寸。根据光能的叠加原理,所求表面上某面元的光谱辐照度,实际上是该有限尺寸光源上每一面元对接收面光谱辐照度贡献之和。如图4所示,假定发光表面光谱辐亮度为 $L(\lambda)$,半径为 R ,则其垂线上距离 s 点上的光谱辐照度为 $E(\lambda) = L(\lambda) \cdot R^2 / (R^2 + s^2)^{[1]}$,只有当 $s \gg R$ 时,距离 s 处的光谱辐照度才可以用平方反比定律 $E(\lambda) = \pi L(\lambda) \cdot R^2 / s^2$ 近似表示,面光源才可以近似看成点光源,而这个条件就是 $2R/s < 1/15$ 。一般光源尺寸都较小,线度约为 10 mm,而距离 s 约为 1 m, $2R/s = 1/100$,远远满足精度要求,所以完全可以近似看作点光源。

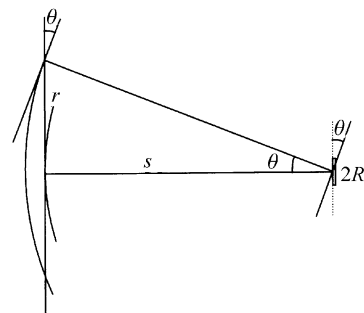


Fig. 4 Spectral irradiance on diffuser lit by standard

理想情况下入射到漫反射板表面上的光辐射为平面波,而实际装置中使用的是近似点光源的面光源,发出的光辐射近似球面波,因此投射到漫反射板上不同位置的光谱辐照度值不同,引起漫反射板的光谱辐照度不均匀。假定光源距漫反射板的距离为 s ,光源在漫反射板的垂点的光谱辐照度为 $E_0(\lambda)$,由点光源的平方反比定律得点光源在漫反射板上距垂点

r 处的光谱辐照度为 $E(\lambda) = E_0(\lambda) \cdot s^2 / (s^2 + r^2)$ 。考虑到 r 处辐射光线与漫反射板有一夹角 θ , 为精确计算, 光源也设为小的朗伯面光源 (通常标准灯灯丝排列非常整齐均匀, 而且面积较小, 在垂直发光面的方向可近似为朗伯光源), 其出射光辐射也和光源表面有一夹角 θ , 则投射到 r 处的光谱辐照度为 $E'(\lambda) = E(\lambda) \cdot \cos^2 \theta = E_0(\lambda) \cdot s^4 / (s^2 + r^2)^2$ 。

为考察实测光谱辐亮度随光源到漫反射板距离 s 的变化情况, 在 (4) 式中取 $\theta = 30^\circ, d = 400 \text{ mm}$, s 取 $10 \sim 1100 \text{ mm}$ 计算作图如图 5 所示。当 s 小于 200 mm 时, $L'(\lambda)$ 随着 s 的增大迅速增大, 当 s 大于 200 mm 时, $L'(\lambda)$ 随着 s 的增大变化缓慢, 当 s 大于 500 mm 时, $L'(\lambda)$ 随着 s 的增大趋于稳定, s 继续增大, $L'(\lambda)$ 逐渐趋近于 $\rho(\lambda) \cdot E(\lambda) / \pi$, 极限值约为 $0.99\rho(\lambda) \cdot E(\lambda) / \pi$ 。

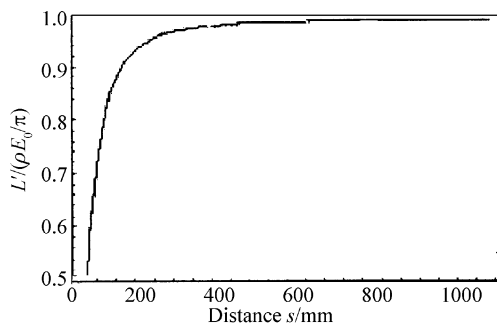


Fig. 5 Measured spectral radiance L' versus s

3.2 光谱仪与漫反射板的位置关系的影响

在 (4) 式中取 $s = 1100 \text{ mm}$ (标准灯的标准值距离), θ 取 $5^\circ \sim 85^\circ$, d 取 $10 \sim 800 \text{ mm}$ 计算作图如图 6 所示。从图中可以看出在 d 大于 300 mm , θ 小于 40° 时, 光谱辐亮度值变化很小, 比较平稳, 因此这一区间可选作标定的条件参量取值区间。 d 越大, θ 越小, 光谱辐亮度越接近于 1, 但实际情况是 d 不可能太大, d 太大会使光谱仪视场超出漫反射板, 而 $\theta = 0^\circ$ 或很小光谱仪会挡住标准光源, 而且实际漫反射板的

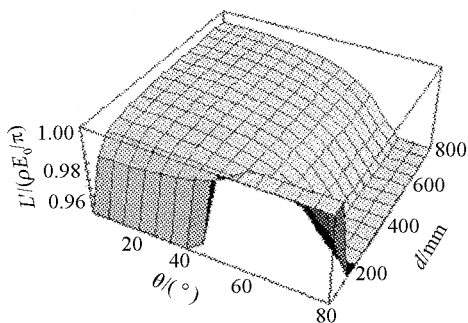


Fig. 6 Measured spectral radiance L' versus θ and d

镜反射也会影响标定。图 7 为光谱仪视场水平方向范围随 d, θ 变化的情况。

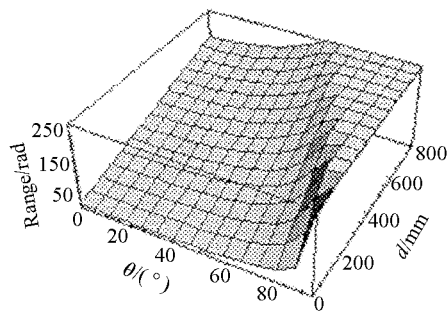


Fig. 7 Horizontal range of viewing area varying with θ and d

3.3 标准灯和光谱仪与漫反射板距离的影响

显然, 标定中, 标准灯与漫反射板的距离很近, 而光谱仪与漫反射板的距离很远, 或者相反都是不行的。那么, 两者应该取什么样的相互关系? 在 (4) 式中取 $\theta = 30^\circ, s$ 取 $10 \sim 2000 \text{ mm}$, d 取 $10 \sim 2000 \text{ mm}$ 计算作图如图 8 所示。在 s 大于 500 mm , d 取 400 mm 左右时, 光谱辐亮度值比较平稳, 且接近理想值, d 大于 400 mm , 光谱辐亮度缓慢下降。

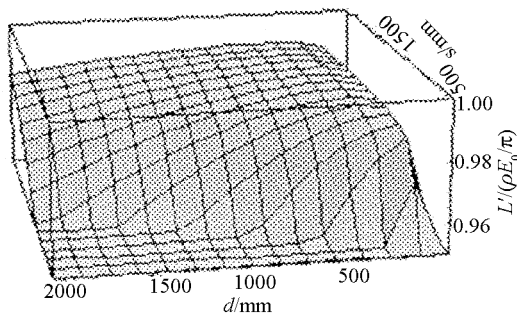


Fig. 8 Measured spectral radiance L' versus s and d

选择最佳标定参量时, 既要使实测光谱辐亮度值接近理想值, 又要使测量位置处于光谱辐亮度平稳变化的区间, 既不能使标准灯和光谱仪相互遮挡, 又不能使光谱仪视场超出漫反射板, 还不能使实际漫反射板的镜反射影响标定。参照国际上常用的漫反射板尺寸大小, 若漫反射板为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, 综合考虑各标定参量, 标定时 $s \geq 500 \text{ mm}$, d 取 $400 \sim 500 \text{ mm}$, θ 取 $20^\circ \sim 40^\circ$ 为宜。其它尺寸的漫反射板可按相同方法讨论、确定标定参量。

4 讨 论

为获得光谱辐亮度不变的光源, 漫反射板应为朗伯漫反射板。由于漫反射板是反射入射光辐射, 因此, 照射到漫反射板上的光谱辐照度, 应各处都相

等,为此,入射光辐射应为均匀平行光入射,如图 9 所示,凹面镜将点光源的球面波变成平行光束。设入射光的光谱辐照度为 $E(\lambda)$,漫反射板的反射比为 $\rho(\lambda)$,光谱仪的读出值为 $y(\lambda)$,则该光谱仪在理想情况下的光谱辐亮度响应度为

$$R_L(\lambda) = \frac{y(\lambda)}{L(\lambda)} = \frac{y(\lambda)}{\rho(\lambda)E(\lambda)\cos\delta/\pi} = \frac{\pi y(\lambda)}{\rho(\lambda)E(\lambda)\cos\delta}$$

正入射情况对应于 $\delta = 0^\circ$ 。

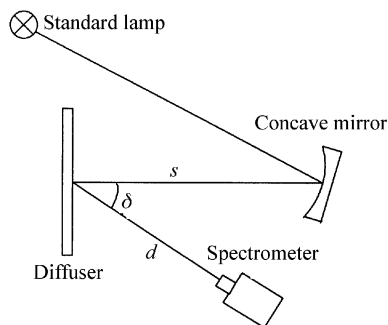


Fig. 9 Diagram of idealized spectral radiance calibration

从前边计算可知,实测光谱辐亮度在 d 大于 300 mm、 θ 小于 40° 区间接近于 $\rho(\lambda) \cdot E(\lambda)/\pi$,但没有达到 $\rho(\lambda) \cdot E(\lambda)/\pi$ 。无论 θ 、 d 和 s 如何变化,都不能使实测光谱辐亮度的值趋向于 $\rho(\lambda) \cdot E(\lambda)/\pi$,而对光谱辐亮度的测量条件参量的选择就是要使实测光谱辐亮度等于漫反射板上的光谱辐亮度,根据实际情况推知,必有一种极限情况可使实测光谱辐亮度值趋向于漫反射板上的光谱辐亮度,考虑视场角 α 、 β 无限缩小的情况,即 α 趋向于 0° 、 β 趋向于 0° ,如图 10 所示。当 α 、 β 趋向于 0° 时,即视场无限缩小时,实测光谱辐亮度与漫反射板上的光谱辐亮度相等。但在实际标定中,光谱仪的狭缝不能无限小,视场也不能无限小。因此,标定的光谱辐亮度与漫反射板上的光谱辐亮度总有一个微小的差值,光谱仪的狭缝越小,视场越小,差值越小。通常对于确定的

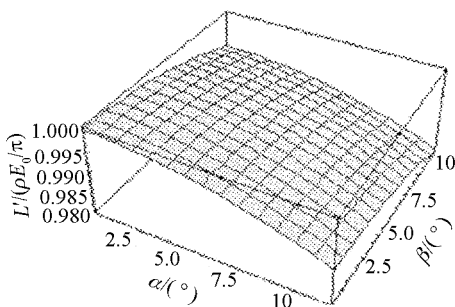


Fig. 10 Measured spectral radiance L' versus α and β

光谱仪,其狭缝和视场大小基本确定,根据视场角的大小即可计算这一差值。

以上讨论都是假定漫反射板为理想漫反射板,在实际标定中,漫反射板的漫反射特性由双向反射分布函数 $F_{\text{BRDF}}(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda)$ 表示,计算实测光谱辐亮度时,还与漫反射板的双向反射分布函数有关。在已知漫反射板的双向反射分布函数的情况下,选择最佳标定条件,由(2)式计算实测辐射通量,再求出实测光谱辐亮度,然后进行标定。

结论 综合文中的分析和讨论,在采用光电倍增管(光辐射通量探测器)作为探测器的光谱仪的光谱辐亮度标定中,如图 1 所示,若漫反射板为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,标准灯与漫反射板的距离应大于 500 mm;光谱仪与漫反射板的距离 d 取 400 mm 为宜,光谱仪光轴与漫反射板法线的夹角取 $20^\circ \sim 40^\circ$ 为宜。在最佳标定条件下计算获得的所测光谱辐亮度与理想标定情况下的光谱辐亮度有一微小的差值,约为 1%,在已知实际漫反射板的双向反射分布函数的情况下,可由(2)式计算光谱辐射通量,进而求得实测光谱辐亮度值,并标定光谱仪。

参 考 文 献

- 1 Li Nianzeng, Yan Dayuan. *Radiometry and Photometry* (辐射度学和光度学). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 18~25 (in Chinese)
- 2 Xue Jun'ao, Li Zaiqing, Piao Dazhi *et al.*. *Principle and Methods in Light Radiation Measurements* (光辐射测量原理和方法). Beijing: Metrological Press, 1980. 48~50 (in Chinese)
- 3 Xun Fei. *Mathematica* 4. Beijing: China Electric Power Press, 2000. 172~216
- 4 Fegley A A, Flower V K. Radiometric calibration of SBUV/2 instruments: Retrospective improvements. *Metrologia*, 1991, **28**(3):297~300
- 5 Young E R, Clark K C, Bennett R B *et al.*. Measurements and parameterization of the bi-directional reflectance factor of BaSO_4 paint. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20):3500~3505
- 6 Heath D F, Wei Zhongying, Flower W K *et al.*. Comparison of spectral radiance calibrations of SBUV-2 satellite ozone monitoring instruments using integrating sphere and flat-plate diffuser techniques. *Metrologia*, 1993, **30**(2):259~264
- 7 Heath D F, Wei Zhongying, Flower W K *et al.*. Comparability of spectral radiance calibrations of large aperture earth observing instruments based upon diffuse reflective pannels and internally illuminated spherical integrator techniques. *Proc. SPIE*, 1994, **2209**:148~159
- 8 Heath D F, Wei Zhongying, Flower W K *et al.*. Comparisons of UV radiance calibrations of SBUV-2 type ozone monitoring instruments and traceability to NIST. *Proc. SPIE*, 1994, **2282**:313~323
- 9 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(3):371~375 (in Chinese)