

文章编号: 0253-2239(2007)12-2256-6

# 星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标

王淑荣 宋克非 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 133033)

**摘要:** 星载太阳紫外光谱监视器是一种小型化、高精度紫外-真空紫外光谱辐射计, 它有两种工作模式, 即探测太阳紫外光谱辐照度的太阳模式和探测大气的太阳后向散射紫外光谱辐亮度的大气模式。对应这两种工作模式分别建立了紫外-真空紫外光谱辐照度和紫外光谱辐亮度定标装置。光谱辐照度标准灯直接辐照仪器的漫反射板进行仪器的光谱辐照度响应度定标, 光谱辐照度标准灯辐照标准漫反射板形成朗伯面光源进行仪器的光谱辐亮度响应度定标。误差分析表明: 160~250 nm 光谱辐照度绝对定标误差为 6.5%, 250~400 nm 为 4.3%; 250~400 nm 光谱辐亮度绝对定标误差为 5.9%。星载太阳紫外光谱监视器获得的地球外太阳紫外光谱辐照度与大气的太阳后向散射光谱辐亮度数据, 同国际上的观测结果相比一致性达±10%。

**关键词:** 遥感; 辐射定标; 紫外光谱; 辐照度; 辐亮度

中图分类号: TP722.3 文献标识码: A

## Radiometric Calibration on Ground of Satellite-Borne Solar Ultraviolet Spectral Monitor

Wang shurong Song Kefei Li Futian

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

**Abstract:** Solar ultraviolet (UV) spectral monitor (SUSM) is a compact, high-precision satellite-borne spectroradiometer designed to measure the solar ultraviolet-spectral irradiance and the solar backscatter ultraviolet-spectral radiance from the atmosphere under two different work modes. The calibration setup is presented. A spectral irradiance standard lamp directly illuminates the diffuser of the solar ultraviolet spectral monitor to calibrate the solar ultraviolet spectral monitor spectral irradiance responsivity and a standard diffuser illuminated by the standard lamp as Lambert surface source is used to calibrate the solar ultraviolet spectral monitor spectral radiance responsivity. The measurement error analysis shows that the 160~250 nm spectral irradiance calibration error is 6.5%, the 250~400 nm spectral irradiance calibration error is 4.3% and the 250~400 nm spectral radiance calibration error is 5.9%. The data of solar ultraviolet spectral irradiance and the solar backscatter UV spectral radiance obtained by solar ultraviolet spectral monitor agrees with the internationally published data within ±10%.

**Key words:** remote sensing; radiometric calibration; ultraviolet spectrum; irradiance; radiance

### 1 引 言

星载太阳紫外光谱监视器(SUSM)在轨运行期间探测太阳紫外光谱辐照度和太阳后向散射紫外光谱辐亮度, 并通过太阳后向散射光谱辐亮度和太阳光谱辐照度的比值来反演大气中的臭氧含量和垂直分布。太阳紫外光谱监视器是一种小型化、高精度紫外-真空紫外光谱辐射计, 无内定标光源, 需要在飞行实验前进行地面辐射定标。辐射定标分为光谱

辐照度响应度定标和光谱辐亮度响应度定标。光谱辐亮度响应度定标方法通常有积分球法和漫反射板法, 我们采用的是后一种方法。漫反射板法和积分球法在 250~340 nm 间光谱辐亮度响应度定标结果差别在 1%~2% 以内<sup>[1]</sup>。美国宇航局 Goddard 空间飞行中心研制的星载太阳后向散射紫外谱仪(SBUV)采用漫反射法定标; 欧空局 Renotte 等<sup>[2]</sup>建立了高精度双向反射分布函数(BRDF)测试装置,

作者简介: 王淑荣(1961—), 女, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学检测、紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术等方面的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2006-09-05; 收到修改稿日期: 2007-06-07

研究了 200~2400 nm 波段漫反射板的特性,并用于欧空局的星载臭氧监测仪(OMI)的辐射定标。

本实验室建立了光谱辐照度和光谱辐亮度定标装置并进行了太阳紫外光谱监视器辐射定标。定标后的太阳紫外光谱监视器于 2002 年 3 月 25 日搭载神舟三号飞船开始飞行实验并在我国首次获得了地外太阳紫外光谱和大气的太阳后向散射紫外光谱。

## 2 星载太阳紫外光谱监视器及其在轨工作模式

太阳紫外光谱监视器由前置铝漫反射板、消偏器、艾勃特-法斯梯(Ebert-Fastie)型光栅双单色仪、光电倍增管探测器及电控系统组成,工作波段 160~400 nm,光谱分辨力 0.15 nm,300 nm 处光谱带宽 1.0 nm,视场角为 11°,其结构原理如图 1 所示。仪器在轨工作时,光轴指向地心。太阳-大气辐射通过消偏器、单色仪,在单色仪出射狭缝平面形成光谱带。当单色仪光栅转动时,不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝,由探测器-放大器转变为紫外光电光谱。

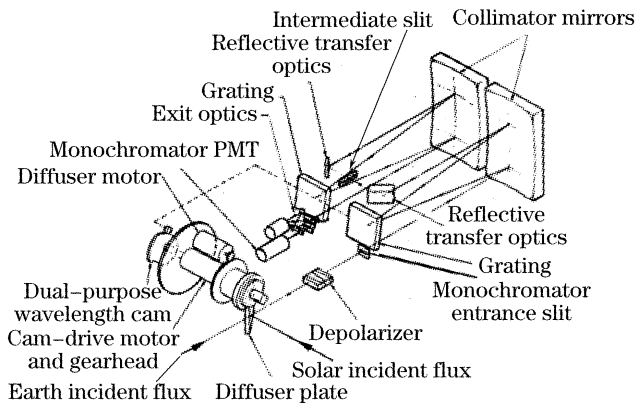


图 1 太阳紫外光谱监视器结构图

Fig. 1 Configuration of solar ultraviolet spectral monitor

太阳紫外光谱监视器在轨工作时有两种工作模式:探测太阳紫外光谱辐照度的太阳模式和探测大气的太阳后向散射紫外光谱辐亮度的大气模式。每轨道周期在星下点太阳高度角为零时,铝漫反射板移入光路,太阳辐射经过铝漫反射板进入仪器,完成一次太阳紫外光谱辐照度测量;而后铝漫反射板移出光路,部分偏振的太阳后向散射辐射经消偏器成为非偏振辐射,进入仪器,每隔 1/6 轨道周期进行一次大气的太阳后向散射紫外光谱辐亮度测量。每轨道周期共完成三次大气测量。

## 3 光谱辐照度定标

光谱辐照度定标按光谱范围分为 250~400 nm

紫外定标和 160~250 nm 紫外-真空紫外定标。紫外定标在实验室环境下进行,真空紫外定标需将标准光源和太阳紫外光谱监视器安装到真空室内在真空环境下进行。

在 250~400 nm 波段,用中国计量院的 1 kW 光谱辐照度标准石英卤钨灯直接照明太阳紫外光谱监视器铝漫反射板进行光谱辐照度定标。标准石英卤钨灯由直流稳流电源供电,电流稳定度优于 0.05%/h。太阳紫外光谱监视器光谱辐照度响应度可以表示为

$$R_E(\lambda) = \frac{V_w(\lambda)}{E_w(\lambda)}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $E_w(\lambda)$  为 250~400 nm 波段 1 kW 光谱辐照度标准石英卤钨灯的光谱辐照度值,  $V_w(\lambda)$  为太阳紫外光谱监视器对标准石英卤钨灯读出值。

由(1)式求得误差公式:

$$\frac{\Delta R_E(\lambda)}{R_E(\lambda)} = \left[ \left| \frac{\Delta V_w(\lambda)}{V_w(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E_w(\lambda)}{E_w(\lambda)} \right|^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$\Delta$  表示误差,从(2)式可知:太阳紫外光谱监视器光谱辐照度响应度定标误差由仪器读数误差和标准灯误差组成,仪器读数误差如表 1 所示。表 2 给出 250~400 nm 波段太阳紫外光谱监视器光谱辐照度响应度定标误差。

表 1 太阳紫外光谱监视器相对测量误差

Table 1 Relative measurement error for solar ultraviolet spectral monitor

Item	Relative error /nm	
	160~250	250~400
Drift of detector responsivity	2.9%	0.8%
Wavelength reproducibility	0.3%	
Drift of amplifier responsivity	0.4%	
Drift of high-voltage supply	0.2%	
Linearity error of detector and amplifier responsivity	0.3%	
Inter range error	0.3%	
Total	3%	1%

表 2 250~400 nm 光谱辐照度响应度定标误差

Table 2 Calibration error for 250~400 nm spectral irradiance responsivity

Item	Error
Instrument readout error	1%
Calibration error of quartz-halogen standard lamp at 250 nm	4.2%
Total	4.3%

160~250 nm 波段光谱辐照度响应度定标在真空室进行,真空室直径 800 mm,长 1200 mm,如图 2

所示。

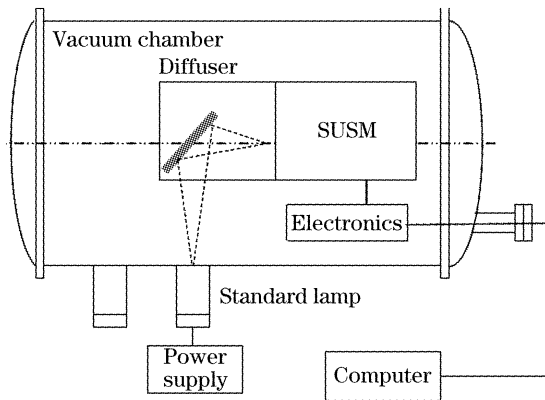


图 2 160~250 nm 辐照度定标装置

Fig. 2 160~250 nm irradiance calibration setup

SUSM: Solar ultraviolet spectral monitor

由于中国尚未建立紫外-真空紫外波段光谱辐射标准,我们采用的标准光源是英国国家物理实验室以同步辐射和壁稳氩弧作为标准光源标定的传递标准氙灯。用传递标准氙灯给太阳紫外光谱监视器定标,根据氙灯的相对光谱分布,给出仪器在 160~300 nm 的相对光谱响应度,在 300 nm 处用中国计量院 1 kW 光谱辐照度标准石英卤钨灯赋以绝对值。太阳紫外光谱监视器光谱辐照度响应度可以表示为:

$$R_E(\lambda) = \frac{V_D(\lambda)}{V_D|_{300\text{ nm}}} \cdot \frac{V_W|_{300\text{ nm}}}{E_W|_{300\text{ nm}}} \cdot \frac{1}{D(\lambda)}, \quad (3)$$

式中  $V_D(\lambda)$ , 为太阳紫外光谱监视器对传递标准氙灯的读出值,  $V_D(300\text{ nm})$  为波长 300 nm 太阳紫外光谱监视器对传递标准氙灯的读出值,  $E_W(300\text{ nm})$  为波长 300 nm 标准石英卤钨灯在太阳紫外光谱监视器漫射板处光谱辐照度值,  $V_W(300\text{ nm})$  为波长 300 nm 太阳紫外光谱监视器对标准石英卤钨灯读出值,  $D(\lambda)$  为传递标准氙灯的相对光谱分布值(在波长 300 nm 处归一化)。由(3)式求得误差公式:

$$\frac{\Delta R_E(\lambda)}{R_E(\lambda)} = \left[ \left| \frac{\Delta V_D(\lambda)}{V_D(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_D|_{300\text{ nm}}}{V_D|_{300\text{ nm}}} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_W|_{300\text{ nm}}}{V_W|_{300\text{ nm}}} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E_W|_{300\text{ nm}}}{E_W|_{300\text{ nm}}} \right|^2 + \left| \frac{\Delta D(\lambda)}{D(\lambda)} \right|^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

160~250 nm 波段光谱辐照度响应度定标误差由仪器读数误差和标准灯误差两项组成,两个标准灯误差起主要作用,其中仪器读数误差见表 1。表 3 给出太阳紫外光谱监视器 160~250 nm 波段光谱辐照度响应度定标误差。

图 3 给出太阳紫外光谱监视器(Z01-1)250~

400 nm 光谱辐照度响应度曲线。

表 3 160~250 nm 光谱辐照度响应度定标误差

Table 3 Calibration error for 160~250 nm spectral irradiance responsivity

Item	Error
Readout error $V_D(\lambda)$	3%
Readout error $V_D(300\text{ nm})$	1%
Readout Error $V_W(300\text{ nm})$	1%
Calibration error of quartz-halogen standard lamp	4.2%
Calibration error of deuterium lamp	3.5%
Total	6.5%

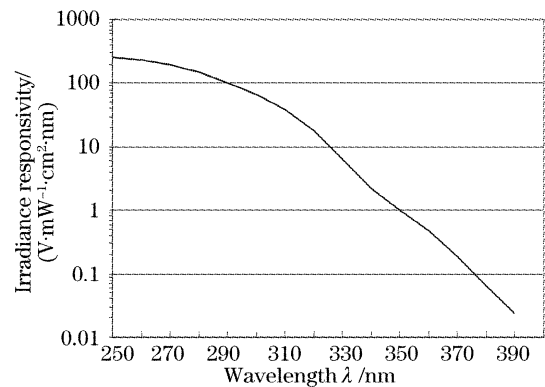


图 3 Z01-1 光谱辐照度响应度

Fig. 3 Spectral irradiance responsivity of Z01-1

太阳紫外光谱监视器在轨运行期间太阳光谱扫描测量模式下,太阳在仪器铝漫反射板上的入射角度不断变化,飞船姿态的变化也会引起太阳光在仪器铝漫反射板上的入射角度变化,因此地面定标时,应给出光辐射以不同角度入射到仪器铝漫反射板时仪器光谱辐照度响应度随角度的变化值,对在轨运行期间光谱测量结果进行修正。

太阳光在  $0^\circ$  方位角和  $45^\circ$  俯仰角入射时(相对于仪器漫反射板法线)仪器光谱辐照度响应度可表示为

$$R_E(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ, ; \lambda) = R_E(\lambda), \quad (5)$$

在  $\vartheta$  方位角、 $\varphi$  俯仰角入射时,仪器的光谱辐照度响应度为

$$R(\vartheta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ, \lambda) = R(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ, \lambda) \times F_r(\vartheta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ, \lambda) \cos \vartheta / \cos 45^\circ, \quad (6)$$

其中

$$F_r(\vartheta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ, \lambda) = \frac{F_{\text{BRD}}(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ, \lambda)}{F_{\text{BDF}}(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ, \lambda)}$$

为铝漫反射板的双向反射分布函数(BRDF)之比。

将仪器放到专门研制的二维精密转台上,以仪器的光轴和仪器漫反射板交点为中心,在标准灯照射下,改变仪器的方位角和俯仰角,得到仪器在不同

方位角和俯仰角下的光谱辐照度响应度。图 4 给出由测量结果导出的光辐射以不同角度入射到仪器漫反射板时仪器漫反射板的相对双向反射分布函数值。根据在轨运行时太阳测试模式不同方位角和俯仰角下仪器的读出值除以相应方位角和俯仰角下仪器的光谱辐照度响应度,得到在轨运行期间测量的太阳光谱辐照度,如图 5 所示。

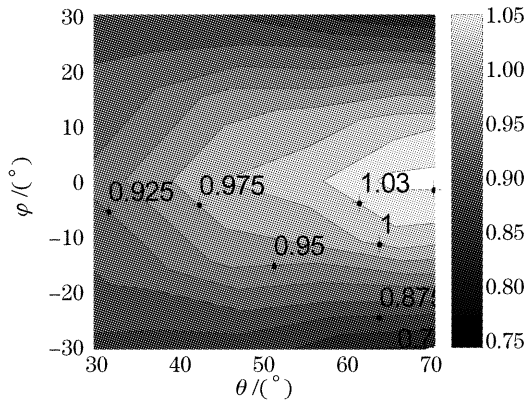


图 4 铝漫反射板的相对双向反射分布函数二维等值线  
Fig. 4 Relative bidirectional reflectance-distribution function contour of aluminum diffuser

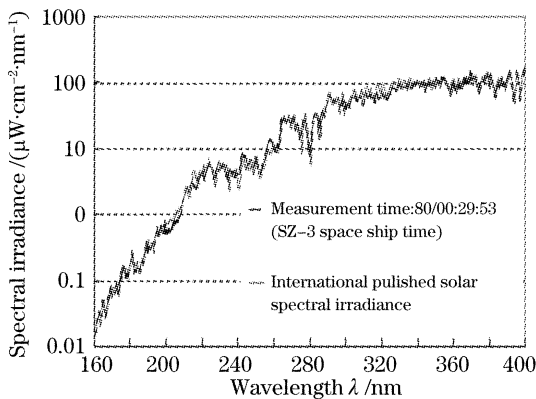


图 5 大气层外太阳紫外光谱辐照度  
Fig. 5 Solar ultraviolet spectral irradiance outside the atmosphere

#### 4 光谱辐亮度定标

太阳紫外光谱监视器光谱辐亮度响应度定标装置原理如图 6 所示。中国计量院 1 kW 光谱辐照度标准石英卤钨灯,在 500 mm 的距离处沿法线方向照明 300 mm×300 mm Spectrolon 标准漫反射板,构成大面积光谱辐亮度标准光源。太阳紫外光谱监视器光轴与漫反射板法线成 33°角,观测漫反射板的中心区域,仪器的入射狭缝距漫反射板 510 mm,仪器入瞳在漫反射板上的投影为梯形。Spectrolon 漫反射板经光谱辐照度标准灯照明后,在仪器观测方向的平均光谱辐亮度  $L(\lambda)$  可由下式沿仪器视场

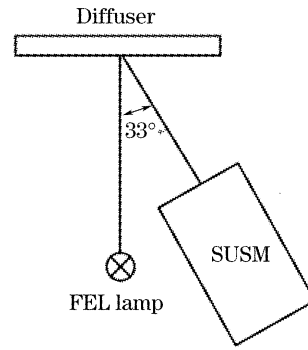


图 6 太阳紫外光谱监视器光谱辐亮度定标装置  
Fig. 6 Spectral radiance calibration setup of solar ultraviolet spectral monitor

积分给出:

$$L(\lambda) = E(\lambda) \cdot \cos \theta \cdot \bar{F}_{BRD} \cdot \omega(x, y) \cdot f(x, y), \quad (7)$$

式中  $E(\lambda)$  为标准灯的光谱辐照度,  $\theta$  为漫射板照明方向相对法线的夹角,  $\omega(x, y)$  为离轴照明的校正因子,  $f(x, y)$  为仪器视场投影面积上标准灯光谱辐照度随角度的变化,  $\bar{F}_{BRD}$  为漫反射板双向反射分布函数在仪器视场内的平均值。

可用一简单方法求出(7)式中各校正因子积值。将标准灯分别放置到 0.5 m 和 1 m(或更远)的距离,照明漫反射板,同时用仪器进行观测。设 1 m 处各校正因子积值为 1,取测量信号的比值并除以距离的平方,可得到(7)式中 0.5 m 处  $\omega(x, y) \cdot f(x, y) \cos \theta$  的积值。Heath<sup>[3]</sup>进行过计算验证,所得校正因子的积值比用此办法测得的校正因子的积值大 0.8%。在高精度定标应用中,可以将通过计算得到的 0.8% 的差异作为修正系数引入,这样可能仅引入 0.2% 误差。

我们也曾选用硫酸钡漫反射板标定仪器的光谱辐亮度响应度。表面喷涂硫酸钡的漫反射板,表现出很好的朗伯特特性。但在长期使用中,硫酸钡漫反射板正入射时的方向-半球反射比有显著衰减,1 年下降约 3%,两年下降约 7%(如图 7),Fowler 等<sup>[4]</sup>也观察到这一结果。聚四氟乙烯漫反射板朗伯特特性虽比硫酸钡漫反射板稍差,但性能稳定<sup>[5]</sup>,我们采用聚四氟乙烯漫反射板作为标准来考察硫酸钡漫反射板反射比长期稳定性。

虽然硫酸钡漫反射板具有良好的朗伯特特性,但与理想朗伯表面还有微小差别,使用前,测量了硫酸钡漫反射板的漫反射特性。取硫酸钡漫反射板的样品在本实验室 Mcpherson2253M5 紫外-真空紫外反射比测试装置上测量与余弦特性的偏差,又以中

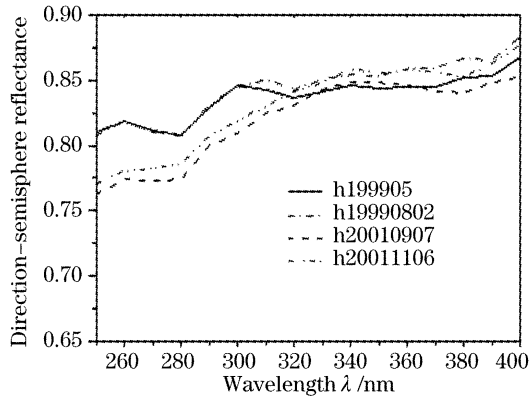


图7 硫酸钡漫反射板方向-半球反射比的稳定性  
Fig. 7 Direction-hemisphere reflectance stability  
for BaSO<sub>4</sub> diffusers

国计量院提供的已知方向-半球反射比的聚四氟乙烯漫反射板为标准,用比对法在 Lambda-9 紫外-可见-近红外分光光度计上测得硫酸钡漫反射板样品在 250~400 nm 的正入射时的方向-半球反射比,如图 7 所示。而后除以  $\pi$ ,得到硫酸钡漫反射板在正入射条件下双向反射分布函数。比对测试结果表明,250~400 nm 硫酸钡漫反射板与美 Labsphere 公司提供的 Spectralon 漫反射板双向反射分布函数一致性优于 1%~2%。

表 4 光谱辐亮度响应度定标误差

Table 4 Calibration error for spectral radiance responsivity

Item	Error
Readout error	1%
Calibration error of quartz-halogen standard lamp at 250 nm	4.2%
BRDF error for diffuser	4%
Correction factors error	0.2%
Total	5.9%

仪器光谱辐亮度响应度  $R_L(\lambda)$  可表示为

$$R_L(\lambda) = V(\lambda)/L(\lambda), \quad (8)$$

其中  $V(\lambda)$  为仪器的输出电压,  $L(\lambda)$  是漫反射板在仪器观测方向的平均光谱辐亮度。

根据(7)式和(8)式可以得到太阳紫外光谱监视器光谱辐亮度响应度定标误差:

$$\frac{\Delta R_L(\lambda)}{R_L(\lambda)} = \left[ \left| \frac{\Delta V(\lambda)}{V(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E(\lambda)}{E(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta \overline{F}_{\text{BRD}}}{\overline{F}_{\text{BRD}}} \right|^2 + \left| \frac{\Delta [\cos \theta \cdot w(x,y) \cdot f(x,y)]}{\cos \theta \cdot w(x,y) \cdot f(x,y)} \right|^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

由(9)式可知,误差主要来自:仪器读数误差、标准石英卤钨灯光谱辐照度定标误差、漫反射板双向反射分布函数测定误差及各校正因子积值的误差。

Spectralon 漫反射板双向反射分布函数值的不确定度较小,约为 4%。中国计量院的光谱辐照度

标准卤钨灯不确定度在 250 nm 为 4.2%。由(9)式,误差分析表明:用 Spectralon 漫反射板进行仪器光谱辐亮度响应度定标的误差为 5.9%,详见表 4。

图 8 给出太阳紫外光谱监视器 Z01-1 光谱辐亮度响应度曲线例。根据在轨运行时大气测量模式下仪器的读出值除以仪器的光谱辐亮度响应度,得到大气的太阳后向散射光谱辐亮度,如图 9 所示。

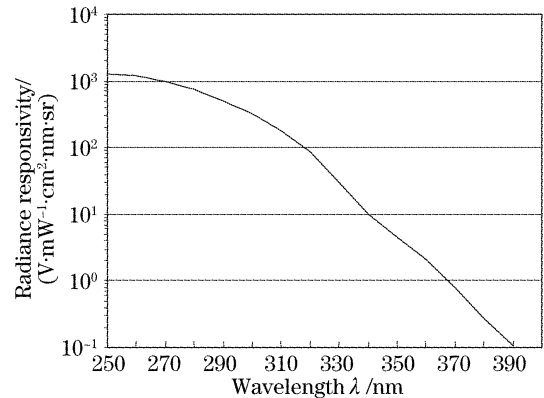


图 8 Z01-1 光谱辐亮度响应度

Fig. 8 Spectral radiance responsivity of Z01-1

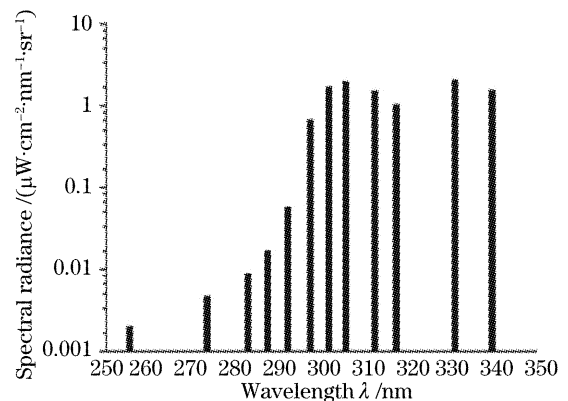


图 9 太阳后向散射紫外光谱辐亮度(12 个特征波长)

Fig. 9 Solar backscatter ultraviolet spectral radiance at 12 characteristic wavelengths

## 5 结 论

建立了光谱辐照度和光谱辐亮度定标装置并完成太阳紫外光谱监视器地面辐射定标及定标误差分析。误差分析表明,160~250 nm 光谱辐照度绝对定标误差为 6.5%,250~400 nm 为 4.3%;250~400 nm 光谱辐亮度绝对定标误差为 5.9%。星载太阳紫外光谱监视器下行数据处理获得的地外太阳紫外光谱辐照度与大气的太阳后向散射光谱辐亮度如图 5 和图 9 所示(测量时间为 5 日 0 时 29 分 53 秒,自主段船上时,第 80 圈)同国际上的观测数据<sup>[6]</sup>相比一致性达 ±10%。

## 参 考 文 献

- 1 Donald F. Heath. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4891**: 335~342
- 2 E. Renotte, A. Novi, D. Labate *et al.*. Solar diffuser pre-flight calibration set-up [C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2957**: 355~373
- 3 D. F. Heath, Zhongying Wei, W. K. Fowler *et al.*. Comparison of spectral radiance calibration of SBUV-2 satellite ozone monitoring instruments using integrating sphere and flat-plate diffuser techniques [J]. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 259~264
- 4 W. K. Fowler, V. W. Nelson. Performance of various diffuser materials in the absolute radiometric calibration of the SBUV/2 [J]. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 255~257
- 5 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 371~375 (in Chinese)
- 刘 颖, 李福田. 若干材料紫外-真空紫外漫反射特性的研究 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 371~375
- 6 T. N. Woods, D. K. Prinz, G. J. Rottman *et al.*. Validation of the UARS solar ultraviolet irradiance: Comparison with the ATLAS 1 and 2 measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D6): 9541~9569

## · 广 告 ·

## 最佳全球供应商



LBO 专利号: 4,026,283 美国专利号  
88 1 02084.2 中国专利号  
2023845 日本专利号



我司提供以下类型晶体:

- 非线性光学晶体
- 激光晶体
- 声光及电光晶体
- 双折射晶体
- 光折变晶体
- 晶体组件
- X-射线晶体
- 光学件



**BBO**



**BIBO**



**KTP**



**Nd:YVO<sub>4</sub>**



声光晶体



压电晶体



光学组件



光折变晶体

**福建福晶科技股份有限公司**  
**FUJIAN CASTECH CRYSTALS, INC.**

地址: 福建省福州市杨桥西路155号 邮编: 350002  
TEL: 86-591-83710533 FAX: 86-591-83711593  
http://www.castech.com E-mail: sales@castech.com