

空间遥感光谱辐射计紫外/真空紫外光谱辐照度定标技术

黄煜^{1,2}, 王淑荣¹, 张振铎^{1,2}, 林冠宇¹, 李福田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, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 实验证明了发散光照明模式和平行光照明模式标定的光谱辐照度响应度在定标误差范围内一致. 在此基础上构建了由 150 W 大功率氙灯、500 W 氙灯和球面反射镜组成的平行光光谱辐照度定标单元, 该单元解决了大多数光谱辐射计由于在紫外波段响应度低、信噪比小导致的定标困难, 而且其输出光谱辐照度在一定距离范围内变化很小从而减小了装调误差, 提高了定标准确度. 分两个波段标定了一台紫外光谱辐射计 160 nm~400 nm 波段光谱辐照度响应度, 其中 160 nm~250 nm 定标误差 4.6%, 250 nm~400 nm 定标误差 2.4%.

关键词: 氙灯; 光谱辐射计; 遥感; 照度定标

中图分类号: TP73

文献标识码: A

0 引言

由于大气的吸收, 太阳紫外光谱的测量只能在外层空间进行. 目前国内外发射的紫外遥感仪器均能进行 160 nm~400 nm 波段太阳直射光谱辐照度测量. 遥感仪器在发射前需进行地面辐射定标来建立进入仪器的辐射量与输出电信号之间的定量关系. 对于紫外波段光谱辐照度定标而言, 250 nm~400 nm 光谱辐照度定标光源一般选取石英卤钨灯, 它具有很好的重复性和长期稳定性. 160 nm~250 nm 中国国家绝对光谱辐照度标准尚未建立, 德国物理技术研究院 (PTB) 在同步辐射 BESSY II 上建立的真空紫外波段的光谱辐射标准被广泛接受. 目前各国通用的光谱辐射传递标准光源为英国 Cathoden 公司制造的 V03 型或 V04 型熔石英窗口或氟化镁窗口的 30 W 氙灯^[1-6]. 但是短波段仪器的响应度一般都比较低, 如果直接采用 30 W 氙灯定标, 由于氙灯本身不确定度大, 再加上信号较弱、信噪比低, 导致定标误差非常大. 此外太阳辐射是以平行光的方式照明仪器, 为了使定标条件与待观测条件相一致, 需要构建平行光定标单元来标定仪器光谱辐照度响应度. 那么传统的点光源发散光照明方式和平行光照明方式两种定标模式存在多大的差异需要进一步考察. 本文实验验证了发散光照明模式和平行光光谱照明模式标定的光谱辐照度响应度在定标误差范围内一致, 构造了平行光光谱辐照度定标单元, 并分两个波段一台紫外光谱辐射计进行了定标.

1 照明方式对光谱辐照度定标的影响

1.1 发散光照明方式

传统的光谱辐照度定标是将定标光源置于待标定仪器入瞳一定距离处进行标定, 即采用点光源发散光照明方式定标, 标定光谱辐照度响应度可表示为

$$R_E(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{\bar{E}(\lambda)} = \frac{V(\lambda)}{E_l(\lambda) \cdot \bar{\epsilon}} \quad (1)$$

式中 $V(\lambda)$ 是待标定仪器在特定波长 λ 处的输出电压 (也可是电流值); $\bar{E}(\lambda)$ 是在仪器入瞳处接收的平均光谱辐照度; $E_l(\lambda)$ 是标准光源在距离 l 处的光谱辐照度值; $\bar{\epsilon}$ 是角度加权因子, 标准光源的光谱辐照度值随角度有一定的变化, 以此来修正仪器入瞳处的光谱辐照度值, 即

$$\bar{E}(\lambda) = E_l(\lambda) \cdot \bar{\epsilon} \quad (2)$$

标准照度光源的光谱辐照度值 $E_f(\lambda)$ 是在一定距离 l_f 处被标定的, 实际使用中考虑到光源信号强度及被标定仪器灵敏度的相互制约, 为了达到较高的信噪比, 光源工作距离 l 往往不等于 l_f , 两处的照度值存在距离平方反比的关系, 即

$$\frac{E_f(\lambda)}{E_l(\lambda)} = \frac{l^2}{l_f^2} \quad (3)$$

这样式 (1) 可转化为

$$R_E(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{E_f(\lambda) \cdot \bar{\epsilon}} \cdot \frac{l^2}{l_f^2} \quad (4)$$

1.2 平行光照明方式

以标准光源+球面镜构建了平行光光谱辐照度定标单元. 该单元由 500 W 氙灯及焦距 500 mm、口径 60 mm × 60 mm 球面反射镜构成, 镜表面镀

Al+MgF₂. 氙灯处于球面反射镜焦点, 形成 60 mm × 60 mm 准直光束. 氙灯与球面反射镜中心高度及角度装调好后固定于同一基座以保证两者相对位置不再改变. 这样该单元准直光束的光谱辐照度值可表示为

$$E_c(\lambda) = E_f(\lambda) \cdot \bar{\omega}_m(\lambda) \quad (5)$$

式中 $E_c(\lambda)$ 是准直光束的光谱辐照度; $\bar{\omega}_m(\lambda)$ 是球面反射镜的光谱反射率.

但是, 球面反射镜的光谱反射率 $\bar{\omega}_m(\lambda)$ 的准确测定是相当困难的事. 美国太阳后向散射紫外光谱辐射计 (Solar backscatter ultraviolet radiometer, SBUV) 定标时采用的方法是测量准直镜有效使用面积上 10 个采样点的光谱反射率, 每点间隔 3 cm, 每点大小约 1 cm, 以其平均值作为整个准直镜的光谱反射率. SBUV 这种光谱反射率测量方法不仅测量难度大, 而且对镀 Al+MgF₂ 膜的准直镜加工要求高, 实际应用中会存在很大测量偏差. 因此本文采用照度传递的方法来得到平行光的光谱辐照度, 避开球面镜光谱反射率的测量难点.

以 Mcpherson 2253M5 紫外-真空紫外单色仪为基础构建了光谱辐照度传递系统, 如图 1. 所用凹面光栅曲率半径为 3 m, 刻线密度 1200 lines/mm, 刻线面积 65 mm × 104 mm, 光栅在 220 nm 处闪耀, 波长准确度 ±0.01 nm, 波长重复性 0.01 nm, 探测器是美国 EMR 公司的 541-05M-13 型蓝宝石窗口光电倍增管. 单色仪狭缝前 50 mm 处安置石英透射漫射板, 用来补偿标准光源与待标定单元由于几何

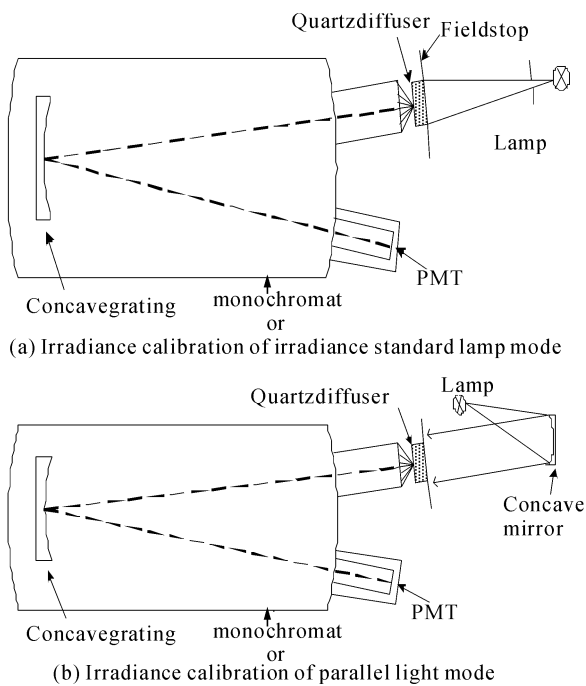


图 1 照度标准传递
Fig. 1 Transfer of irradiance standard

尺寸不同导致的照明条件差异. 石英漫射板前加 φ8 mm 视场光栏, 用来限制接收立体角. 标准光源与待标定光源均位于石英漫射板前 500 mm 处.

分别以 NIST 光谱辐照度标准灯 (F582) 和平行光光谱辐照度定标单元照明单色仪狭缝前石英透射漫射板, 得到整个传递系统的照度响应度

$$R_t(\lambda) = \frac{E_f(\lambda)}{V_f(\lambda)} = \frac{E_c(\lambda)}{V_c(\lambda)} \quad (6)$$

式中 $E_f(\lambda)$ 和 $E_c(\lambda)$ 分别是标准光源和平行光定标单元在石英透射漫射板处的照度值; $V_f(\lambda)$ 和 $V_c(\lambda)$ 分别是照度传递系统在两种照明方式下对应波长处的读出值. 由式 (6) 即可得出此定标单元光谱辐照度值

$$E_c(\lambda) = \frac{E_f(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{V_f(\lambda)} \quad (7)$$

1.3 两种照明方式比对定标

用来标定的仪器是一台 Ebert-Fastie 型结构的双光栅光谱辐射计, 工作波段 160 nm ~ 400 nm, 光谱分辨率 0.15 nm. 光谱辐射计狭缝入口处安装一可旋入旋出的铝制漫反射板, 铝漫反射板法线与仪器光轴成 45° 角. 光谱辐照度观测时, 铝漫反射板移入光路, 入射辐射经过铝漫反射板进入仪器的入射狭缝完成紫外光谱辐照度测量. 标准光源选用 NIST 光谱辐照度标准灯 (F582).

用两种照明方式分别标定这台仪器 250 nm ~ 400 nm 波段光谱辐照度响应度的装置如图 2. 标

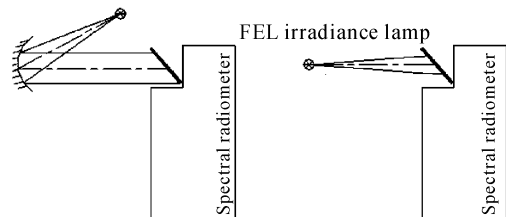


图 2 光谱辐照度定标
Fig. 2 Spectral irradiance calibration

准光源 F582 的光谱辐照度值 $E_f(\lambda)$ 由美国国家标准局 (NIST) 给出, 因此发散光照明方式标定仪器的光谱辐照度响应度可由式 (4) 直接获得. 对式 (4) 求导可得误差公式

$$\frac{\Delta R_E(\lambda)}{R_E(\lambda)} = \left[\left| \frac{\Delta V(\lambda)}{V(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E_f(\lambda)}{E_f(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{2\Delta l}{l} \right|^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

在照度测量中, 距离 l 的测量误差为 ~3 mm, 由式 (8) 计算可知由此导致的定标误差为 1.2%. 由于标准灯稳定性、仪器线性、换挡比等引起的读数误差小于 1%. 发散光照明方式总的定标误差为 2.2%, 见表 1.

表 1 发散光照明方式光谱辐照度定标误差

项 目	误差百分比
仪器读数误差 $V(\lambda)$	1%
距离 l 的测量误差	1.2%
标准光源光谱辐照度定标误差 (含电源不稳定性)	1.6%
总计(平方相加再开方)	2.2%

将图 1 中 Mcpherson 2253M5 紫外—真空紫外单色仪的位置由待标定光谱辐射计代替即可进行平行光照明方式光谱辐照度响应度定标,见表 2. 这样

表 2 平行光照明方式光谱辐照度定标误差

项目	误差百分比
仪器读数误差 $V_c(\lambda)$	1%
仪器读数误差 $V_c'(\lambda)$	1%
仪器读数误差 $V_f(\lambda)$	1%
标准光源光谱辐照度定标误差 (含电源不稳定性)	1.6%
总计(平方相加再开方)	2.4%

仪器的光谱辐照度响应度可表示为

$$R_p(\lambda) = \frac{E_c(\lambda)}{V_c'(\lambda)} = \frac{E_f(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{V_f(\lambda) \cdot V_c'(\lambda)} \quad (9)$$

式中 $V_c'(\lambda)$ 是光谱辐射计对应波长处的读出值. 误差为

$$\frac{\Delta R_p(\lambda)}{R_p(\lambda)} = \left[\left| \frac{\Delta V_f(\lambda)}{V_f(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c(\lambda)}{V_c(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c'(\lambda)}{V_c'(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E_f(\lambda)}{E_f(\lambda)} \right|^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

平行光照明方式总的定标误差为 2.4%

表 3 给出两种照明方式光谱辐照度定标结果对比,最大偏差 2%,可见在定标误差范围内,可以认为两种方法在 250 nm~400 nm 波段定标结果是一致的.

表 3 两种照明方式照度定标对比

波长(nm)	光谱辐照度响应度		偏差
	$V \cdot \mu W^{-1} \cdot cm^2 \cdot nm$		
	发散光	平行光	发散/平行
250	72.159	72.000	1.00
260	71.485	70.468	1.01
270	68.172	67.342	1.01
280	58.485	59.036	0.99
290	52.542	51.778	1.01
300	50.954	50.136	1.02
310	48.250	48.996	0.98
320	39.393	39.004	1.01
330	30.027	29.887	1.00
340	36.012	35.482	1.01
350	51.262	50.643	1.01
360	55.436	54.887	1.01
370	46.231	45.894	1.01
380	28.600	28.112	1.02
390	21.939	21.788	1.01
400	39.783	39.669	1.00

2 真空紫外波段光谱辐照度定标

2.1 真空紫外波段平行光光谱辐照度定标单元

160 nm~250 nm 波段目前各国通用的光谱辐射传递标准光源为英国 Cathoden 公司制造的 V03 型或 V04 型熔石英窗口或氟化镁窗口的 30 W 氙灯. 在此波段由于光学元件反射率和透过率的影响,仪器响应度普遍不高,直接采用 30 W 标准灯发散光照明方式定标由于信噪比低,读数误差大,很难获得理想结果. 此外由于大气的吸收,该波段光谱辐照度响应度定标必须在一定真空度条件下狭小的真空室内进行,装调误差较大.

为解决上述两方面困难,本文以大功率氙灯和球面反射镜组合构建了真空紫外波段平行光光谱辐照度定标单元.

为了提高真空紫外波段定标信噪比,选用日本 HAMAMATSU 生产的 150 W 高稳定性水冷氙灯 L1835, MgF_2 窗口,工作波段 115 nm~400 nm,预热 30 min 后,稳定性可优于 $0.3\% h^{-1}$.

球面反射镜焦长 500 mm、口径 60 mm×60 mm,镜表面镀 Al+ MgF_2 . 氙灯处于反射镜焦点,形成 60 mm×60 mm 准直光束. 氙灯与反射镜中心高度及角度装调好后固定于同一基座.

在此定标单元中,由于氙灯与反射镜之间夹角的存在,轻微的像散会被引入到准直光束中,从而导致接收面上照度不均匀. 理论上两者夹角越小越好,可是由于氙灯本身有一定的尺寸,角度太小会挡光,实际使用中夹角为 15° . 为了考察此定标单元输出的均匀性,以硅探测器和峰值波长为 254 nm 的滤光片所构成的辐射计实测了准直光束中心 $\phi 40$ mm 光斑面积内 8 个采样点的相对照度值,测量结果表明其照度均匀性优于 0.3%,因此像散的影响可以忽略不计.

考虑到氙灯与球面反射镜焦点的距离 D 装调误差(± 2 mm),利用 ZEMAX 软件分别计算了 $D=498$ mm、500 mm、502 mm,距球面反射镜 $L=690$ mm、700 mm 和 710 mm 处准直光束弥散斑的 RMS 半径,均为 22 mm,可见在装调误差范围内,此定标单元输出对距离不敏感. 实际测量值也证明了这一点,在 20 mm 的变化范围内,照度一致性优于 0.5%.

该平行光光谱辐照度定标单元的输出光谱辐照度值同样采用照度传递的方式获得如图 1,整个传递系统真空度维持在 6×10^{-4} Pa. 30 W 标准氙灯经过德国物理技术研究院(PTB)在同步辐射 BESSY II 上标定了光谱辐亮度和辐强度^[7],它在石英透射漫射板处的照度值

$$E_f(\lambda) = \frac{I_D(\lambda)}{l^2} \tag{11}$$

式中 $I_D(\lambda)$ 是标准氙灯的光谱辐强度; l 是标准氙灯距离石英透射漫射板距离.

将式(11)代入式(9)可得 160 nm~250 nm 波段照度响应度为

$$R_p(\lambda) = \frac{E_c(\lambda)}{V_c'(\lambda)} = \frac{I_D(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{l^2 \cdot V_f(\lambda) \cdot V_c'(\lambda)} \tag{12}$$

误差公式

$$\frac{\Delta R(\lambda)}{R(\lambda)} = \left(\left| \frac{\Delta V_f(\lambda)}{V_f(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c(\lambda)}{V_c(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c'(\lambda)}{V_c'(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I_d(\lambda)}{I_d(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{2\Delta l}{l} \right|^2 \right) \tag{13}$$

160 nm~250 nm 波段 $V_c(\lambda)$ 和 $V_c'(\lambda)$ 引入的读数误差只有 1%, 这是由于 150 W 氙灯 L1835 信号强、信噪比高; $V_d(\lambda)$ 由于信噪比低, 所以引入的读数误差约 2.5%; l 定标距离偏差~2 mm 引入的误差计算为 0.8%; 30 W 标准氙灯光谱辐强度的标定误差为 3.5%; 总的定标误差为 4.6%, 见表 4. 图 3 给出了这台扫描式光谱辐射计 160 nm~300 nm 波段(真空环境)和 250 nm~400 nm 波段(大气环境)的光谱辐照度响应度曲线(间隔 10 nm). 两次标定在 250 nm~300 nm 波段有重叠部分. 重叠部分响应度最大偏差 3%.

表 4 160 nm~250 nm 光谱辐照度定标误差

项目	误差百分比
光谱辐强度 $I(\lambda)$ 标定误差	3.5%
距离误差 l	0.8%
仪器读数误差 $V_c(\lambda)$	1%
仪器读数误差 $V_c'(\lambda)$	1%
仪器读数误差 $V_f(\lambda)$	2.5%
总计(平方相加开平方)	4.6%

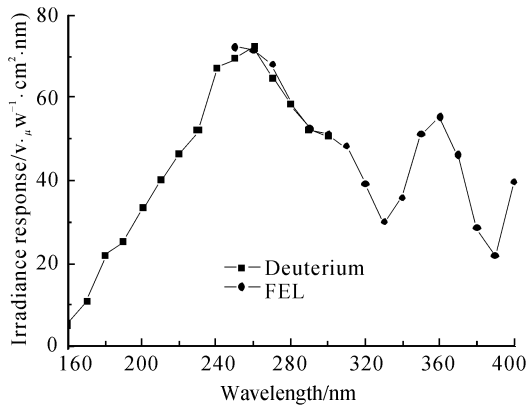


图 3 160 nm~400 nm 光谱辐照度响应度曲线
Fig. 3 The curve of spectral irradiance response in range from 160nm to 400nm

2.2 真空定标装置

最初的真空定标装置由 $\Phi 800 \times 1200$ 真空室及真空系统组成, 真空系统由 1500 L/min 涡轮分子泵抽真空, 前级为 16 L/s 机械泵, 真空度达 1.3×10^{-3} Pa. 但在实际使用中发现该套装置存在残余油蒸汽污染问题, 由于光学元件受到残余油蒸汽的污染, 紫外波段整机响应度在真空定标前后衰减约 4%, 严重影响了紫外波段仪器光谱辐照度响应度定标准确度.

为了消除油污染, 建立了无油真空定标装置. 该装置由真空室、无油真空机组、调温系统及电控系统组成. 内空间净尺寸 $\Phi 1200 \times 1100$ mm, 材料为不锈钢, 备有内径为 $\Phi 400$ 窗口法兰、真空法兰及真空接线法兰. 无油真空机组由法国 ALCTEL 公司 11 升 ACP40 干式泵、美 PHPK 公司 4000 升 TM250 低温泵及超高真空插板阀等阀门组成. 调温系统由复叠式制冷机、200 升自调节液氮罐及加热器组成. 电控系统由控制台, 温度控制显示智能仪表、真空度测量显示仪表、流程显示仪表及控制电源显示仪表等. 有断电、断水、超温保护与报警装置. 极限真空度 $< 6.5 \times 10^{-5}$ Pa, 温度范围: $-100^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$.

3 结论

分别以 500 W 氙灯、150 W 氙灯和球面反射镜构建了紫外/真空紫外波段光谱辐照度定标单元, 并给出它们各自的定标误差. 实验结果显示: 在 250 nm~400 nm 紫外波段, 点光源发散光照明方式与平行光照明方式标定的光谱辐照度响应度在定标误差范围内一致. 在 160 nm~250 nm 真空紫外波段, 基于大功率氙灯构建的平行光光谱辐照度定标单元显示出巨大的优势, 与点光源发散光照明方式相比, 它不仅提高了信噪比, 而且其输出光谱辐照度在一定距离范围内变化很小从而减小了装调误差, 提高了定标准确度.

该定标单元采用照度传递的方式来获得输出光谱辐照度标准值, 避开了球面反射镜光谱反射率的测量难点. 分两个波段标定了一台空间遥感紫外光谱辐射计初样机 160 nm~400 nm 光谱辐照度响应度. 其中 160 nm~250 nm 定标误差 4.6%, 250 nm~400 nm 定标误差 2.4%.

参考文献

- [1] TANG Yu-guo, Li Fu-tian. Spectral irradiance absolute calibration of deuterium lamp in range from 200nm to 350nm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1996, 16(4): 7-10.
唐玉国, 李福田. 200~350nm 石英窗口氙灯光谱辐照度的绝对定标[J]. *光谱学与光谱分析*, 1996, 16(4): 7-10.

- [2] LIU Jin-yuan, XUAN Feng-yi. Spectral irradiance standard for the ultraviolet and vacuum ultraviolet: the deuterium lamp [J]. *Measurement Technique*, 2002, (3): 19-21.
刘金元, 薛凤仪. 紫外和真空紫外光谱辐射标准灯—氘灯[J]. 计量技术, 2002, (3): 19-21.
- [3] XING Jin, WANG Shu-rong, LI Fu-tian. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 373-379.
刑进, 王淑荣, 李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 373-379.
- [4] WANG Guang-ming, ZHAO Bao-sheng, WEI Pei-yong. The research of WSZ extreme ultraviolet detector and the data acquisition circuits [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(12): 1823-1826.
王光明, 赵宝升, 魏培永, 等. WSZ极紫外探测器及其信号采集电路的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1823-1826.
- [5] PIOTR W K, JOSEPH J M, JERRY L B, *et al.* Comparison of spectral irradiance standards used to calibrate shortwave radiometers and spectral radiometers [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2432-2439.
- [6] SPERFELE P, STOCK K D, RAATZ K-H, *et al.* Characterization and use of deuterium lamps as transfer standards of spectral irradiance [J]. *Metrologia*, 2003, 40: 111-114.
- [7] PIOTR W K, JOSEPH J M, JERRY L B, *et al.* Comparison of spectral irradiance standards used to calibrate shortwave radiometers and spectral radiometers [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2432-2439.
- [8] RICHTER M, HOLLANDT J, KROTH U. Source and detector calibration in the UV and VUV at BESSY II [J]. *Metrologia*, 2003, 40: 107-110.

Spectral Irradiance Calibration of Space Remote Sensing Spectral Radiometer in Range of UV and VUV

HUANG Yu^{1,2}, WANG Shu-rong¹, ZHANG Zhen-duo^{1,2},
LIN Guan-yu¹, LI Fu-tian¹

(1 State Key Lab 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)

Received data: 2007-4-29

Abstract: Experiments show that the influence of illuminated modes on spectral irradiance response calibration was little. Based on the conclusion, a spectral irradiance calibration unit using parallel light was established, it was composed of a 150W deuterium lamp, a 500 W xenon lamp and a spherical mirror. This method of irradiance calibration overcame the troubles caused by the weak response of most spectral radiometer in ultraviolet band and poor ratio of signal to noise, and the output spectral irradiance of the unite had little change within some distance, thus the assembly error was reduced and irradiance calibration accuracy was improved. The unite calibrated a ultraviolet spectral radiometer in range from 160 nm to 400 nm. The error of spectral irradiance calibration is 4.6% from 160nm to 250nm, and 2.4% from 250 nm~400 nm.

Key words: Deuterium lamp; Spectral radiometer; Remote sensing; Irradiance calibration



HUANG Yu was born in Shanxi province in 1979. At present, he is a doctoral student at State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, and engaged in research on the space sensing technology and radiation calibration.