

文章编号: 0253-2239(2010)06-1816-06

空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究

张振铎^{1,2} 王淑荣¹ 李福田¹ 黄煜¹ 曲艺¹ 林冠宇¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了避开球面反射镜光谱反射率的测试难点,提出了间接平行光和直接发散光两种不同的定标方法标定仪器辐照度响应度。对两种方法的定标过程与其标定的响应度结果进行了比较与分析,相对偏差为1.0%。不确定度分析表明,利用250~400 nm间接平行光法的辐照度绝对定标不确定度为±2.8%,相对不确定度为±2.0%;直接发散光法对应的不确定度分别为±2.4%和±1.4%,相对偏差均小于各自的相对定标不确定度。结果表明,与间接平行光法相比,采用直接发散光法标定空间紫外遥感仪器(SURSI)辐照度响应度可以更有效地减少辐射定标不确定度。

关键词 辐射定标;定标方法比对;辐照度响应度;空间紫外遥感仪器(SURSI)

中图分类号 O434.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1816

Study on Calibration Method of Spectral Irradiance Responsivity for Space Ultraviolet Remote Sensing Instrument

Zhang Zhenduo^{1,2} Wang Shurong¹ Li Futian¹ Huang Yu¹ Qu Yi¹ Lin Guanyu¹

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

Abstract In order to avoid the difficulty of testing the reflectance of spherical mirror, two methods to establish the SURSI irradiance calibration are introduced. One is the method by using indirect parallel light and the other method is by using the direct diverging light. Detail descriptions of calibration processes of the two methods and a series of comparison and analysis of the calibration results are given. The relative deviation of calibration results between two methods is 1.0%. The absolute uncertainty budget of the 250~400 nm spectral irradiance calibration using the parallel light method is ±2.8%, and the relative uncertainty budget is ±2.0%. The budgets using the diverging light method are ±2.4% and ±1.4%, respectively. The relative deviation value is less than that of any one of the two relative calibration uncertainties. The analysis result shows that the direct diverging light method to calibrate the space ultraviolet remote sensing instrument (SURSI) is more effective to reduce the radiometric calibration uncertainty compared with the indirect parallel light method.

Key words radiometric calibration; calibration method comparison; irradiance responsivity; space ultraviolet remote sensing instrument

1 引言

空间紫外遥感仪器(SURSI)是我国第二代极轨气象卫星上的有效载荷,是一台小型化、高精度的紫

外-真空紫外光谱辐射计,但无内定功能,需要在飞行实验前进行地面辐射定标。光谱辐照度定标常用的方法有漫反射板法和基于内部照明的积分球

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(40675083)和吉林省青年科研基金(20090118)资助课题。

作者简介: 张振铎(1982—),男,博士研究生,主要从事空间紫外遥感技术与辐射定标等方面的研究。

E-mail: zhenduo69@163.com

导师简介: 王淑荣(1961—),女,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(通信联系人)

法^[1~3],根据遥感仪器在轨太阳观测方式,常采用平行光照射方法。美国同类的 SBUV 系列臭氧监测仪器光谱辐照度定标装置中,标准灯位于球面反射镜焦点,产生平行光源辐照仪器漫反射板,从而标定辐照度响应度^[4]。这种方法通过直接计算获得平行光的绝对光谱辐照度值,称为直接平行光定标法,要求准确的预先测定球面反射镜在紫外波段的光谱反射率(美国的测量不确定度约为 1%)。但对于国内现有的测量技术来讲,该项测定工作难度较大,主要原因是入射在球面反射镜表面的平行测试光束经球面镜反射后会出现聚焦现象,使得探测器表面接收到的入射光光斑的大小、位置、均匀性及入射角度都难以与无样品放置时保持一致。由于探测器区域响应的非均匀性,这种前后测试条件的不一致会为最后的测试结果引入约 5% 的测量不确定度,也使得仪器总的辐照度响应度绝对定标不确定度高达 5.6%。

为了避开上述的测试难点,提出了另外两种不同的定标方法:1)间接平行光定标法,通过辐照度标准传递和辐照度值修正间接获得平行光的绝对光谱辐照度值,从而完成仪器辐照度定标;2)直接发散光定标法,采用标准灯发散光直接照射仪器漫反射板

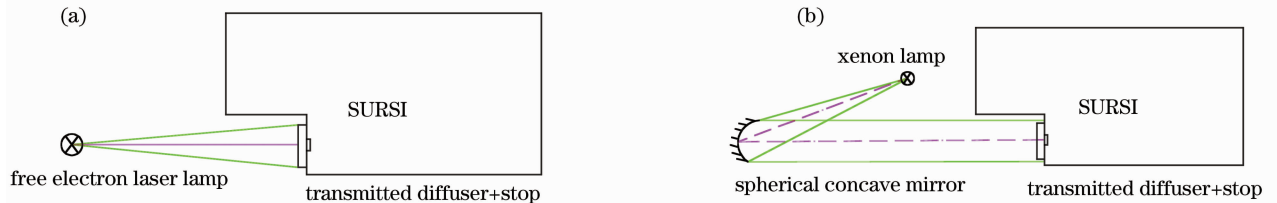


图 1 辐照度标准传递原理图

Fig. 1 Schematic diagram of irradiance standard transfer

辐照度传递时,两种光源依次照明石英透射漫射板,以光谱辐照度标准石英卤钨灯为标准,测定出平行光源中心区域的光谱辐照度值^[5]

$$E_x(\lambda) = \frac{E_w(\lambda) \cdot V_x(\lambda)}{V_w(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 $E_w(\lambda)$ 为光谱辐照度标准灯在石英透射漫射板中心处的绝对光谱辐照度值; $V_w(\lambda)$ 为标准灯照射石英透射漫射板时,仪器的读出值; $V_x(\lambda)$ 为平行光源照射石英透射漫射板时,仪器的读出值。

2.2 平行光源光谱辐照度修正

辐照度标准传递后,获得了平行光源中心区域的光谱辐照度值。在实际定标中,平行光的使用面积要大于中心区域的面积。由于氙灯空间辐照度及球面反射镜反射率的非均匀性,所以需要引入修正因子 $\epsilon_P(x, y)$, 用来修正平行光源的辐照度非均匀

的方法完成辐照度定标。介绍两种定标方法的定标过程,并将相互的定标结果进行了比较。

2 间接平行光定标法

2.1 辐照度标准传递

采用辐照度标准传递方法标定出平行光源中心区域的光谱辐照度值,传递原理如图 1 所示。主要测试装置包括紫外光谱辐射计、平行光定标单元和发散光定标单元,传递波段为 250~400 nm。其中紫外光谱辐射计由空间紫外遥感仪器(其漫反射板移出光路)、前置石英透射漫射板和直径 4 mm 的光阑组成。石英透射漫射板使仪器具有朗伯方向响应特性。 $\phi 4$ mm 光阑,用来限制所接收的发散光源的辐射立体角和仪器的接收立体角。平行光定标单元由 300 W 高稳定氙灯、氙灯电源及焦长为 500 mm、孔径为 60 mm×80 mm 的球面反射镜构成,氙灯位于反射镜焦点。发散光定标单元由中国计量院 1000 W 光谱辐照度标准石英卤钨灯和高稳定度直流稳流电源组成。光源中心到透射漫反射板距离为 500 mm(标准光源的标定距离)。

性。值得指出的是,由于仪器视场中心区域的辐照度响应大于其它区域,所以仪器所接收的辐照度不能简单看成是定标光源的空间平均辐照度,而应是对应区域上光源的辐照度与仪器视场响应函数的权重平均值。所以修正因子为

$$\epsilon_P = \sum_{(x,y)} \epsilon_P^S(x,y) \epsilon_P^F(x,y), \quad (2)$$

式中 $\epsilon_P^S(x, y)$ 为平行光源的辐照度规一化函数,表示平行光在仪器有效视场不同区域 (x, y) 处的辐照度规一化值(有效视场面与定标光源中心光线垂直,大小约为上底 40 mm,下底 48 mm,高 30 mm 的等腰梯形); $\epsilon_P^F(x, y)$ 为仪器由平行光照射时的视场响应函数,即辐照度的权重函数 $[\sum_{(x,y)} \epsilon_P^F(x, y) = 1]$ 。 $\epsilon_P^S(x, y)$ 及 $\epsilon_P^F(x, y)$ 的测试原理如图 2 所示。

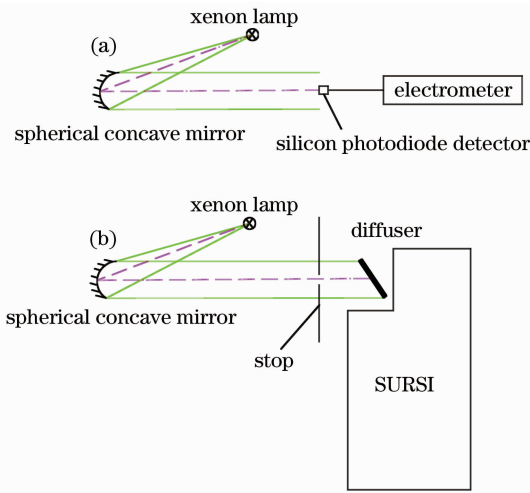


图2 平行光辐照度均匀性及仪器视场响应函数测试原理

Fig. 2 Measurement theory of irradiance uniformity of parallel light and field responsivity function of SURSI

利用滨松公司 $\phi 4$ mm 硅光电二极管探测器、美国 KEITHLEY 公司 6517A 型静电计和中心波长 365 nm 窄带滤光片(光谱带宽 20 nm)组合构成一个滤光片型光谱辐射计,扫描测量平行光源辐照面的均匀性。将不同区域的测得值向中心做规一化,得到不同 (x, y) 处的 $\epsilon_P^S(x, y)$ 值,结果如图 3(a)所示。用 $\phi 4$ mm 圆孔光阑取代硅光电二极管(保证同一位置的入射照度不变),放置在仪器漫反射板前端,通过移动光阑位置,实现空间紫外遥感仪器对有效视场内不同区域的辐照度响应度测量。利用辐照面均匀性测试结果修正响应度结果,再将不同区域的响应度值分别除以整个区域的响应度和值,即可得到不同 (x, y) 处 $\epsilon_P^F(x, y)$ 的大小,结果如图 4(a)所示。将 $\epsilon_P^S(x, y)$ 和 $\epsilon_P^F(x, y)$ 的值在对应区域处相乘再相加,即得到平行光源辐照度修正因子 ϵ_P 。经计算, ϵ_P 约为 0.992。

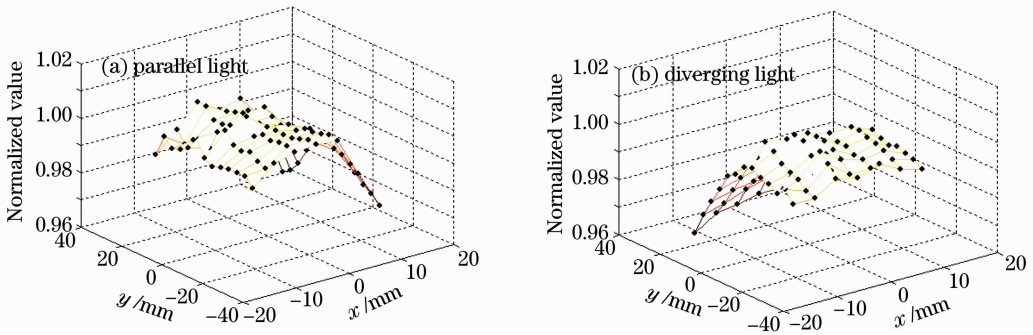


图3 两种光源辐照面均匀性的规一化结果

Fig. 3 Normalized results of irradiance uniformity of two different lights

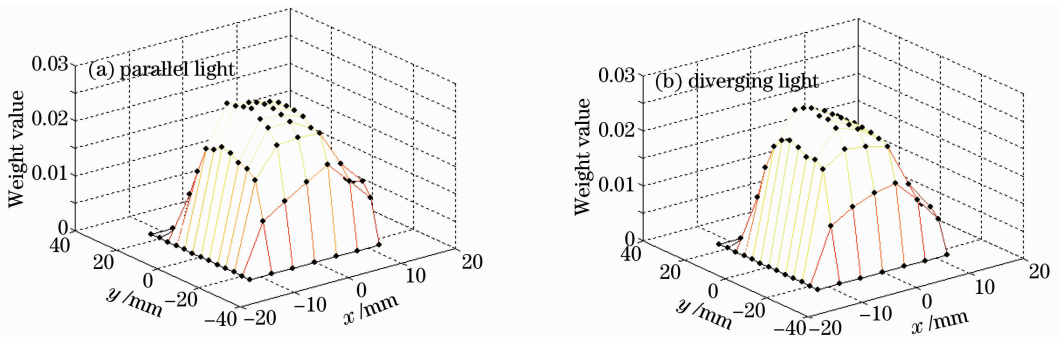


图4 SURSI 视场响应函数测试结果

Fig. 4 Measurement results fo field responsivity function of SURSI

2.3 平行光辐照度响应度定标

在获得平行光的绝对光谱辐照度值后,如图 5 所示,对空间紫外遥感仪器进行光谱辐照度响应度定标,波段为 250~400 nm,辐照度响应度为

$$R_P(\lambda) = \frac{E_P(\lambda)}{V_P(\lambda)}, \quad (3)$$

式中 $E_P(\lambda)$ 为修正后的平行光源光谱辐照度值,

$V_P(\lambda)$ 为仪器相应的读出值。将(1)式和(2)式代入(3)式中,仪器响应度为

$$R_P(\lambda) = \frac{E_P(\lambda)}{V_P(\lambda)} = \frac{E_X(\lambda)\epsilon_P}{V_P(\lambda)} = \frac{E_W(\lambda)V_X(\lambda) \sum_{(x,y)} \epsilon_P^S(x,y)\epsilon_P^F(x,y)}{V_P(\lambda)V_W(\lambda)}. \quad (4)$$

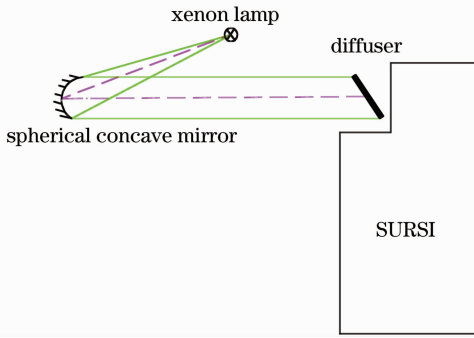


图 5 平行光法辐照度定标示意图

Fig. 5 Irradiance calibration setup using parallel light method

由(4)式求得不确定度 $[\Delta R_P(\lambda)/R_P(\lambda)]$ 的计算公式

$$\frac{\Delta R_P(\lambda)}{R_P(\lambda)} = \left[\left| \frac{\Delta E_W(\lambda)}{E_W(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_X(\lambda)}{V_X(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_P(\lambda)}{V_P(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_W(\lambda)}{V_W(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta \epsilon_P}{\epsilon_P} \right|^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 $\Delta z/z$ 表示不确定度,由(5)式可知:空间紫外遥感仪器的光谱辐照度响应度绝对定标不确定度由仪器读数不确定度、标准灯标定不确定度及修正因子测量不确定度组成。由文献[6]可知,仪器在250~400 nm波段的读数不确定度为 $\pm 1\%$ 。由于仪器的有效视场较小,氙灯光源辐射对球面反射镜的张角较小且较均匀,所以 ϵ_P 值通常接近100%,预计带来的测量不确定度小于 $\pm 1\%$ 。表1给出了采用间接平行光法定标时,250~400 nm波段空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度的绝对及相对定标不确定度。

表 1 平行光法光谱辐照度定标不确定度

Table 1 Irradiance calibration uncertainty budget using parallel light method

Source of uncertainty	Absolute uncertainty /%	Relative uncertainty /%
Calibration of quartz-halogen standard lamp $E_W(\lambda)$	± 2	/
Instrument measurement repeatability $V_X(\lambda)$	± 1	± 1
Instrument measurement repeatability $V_W(\lambda)$	± 1	± 1
Instrument measurement repeatability $V_P(\lambda)$	± 1	± 1
Measurement repeatability ϵ_P	± 1	± 1
Overall uncertainty	± 2.8	± 2.0

3 直接发散光定标法

利用表1中绝对定标不确定度的前三项因子可计算得到,通过辐照度标准传递获得的平行光绝对光谱辐照度值的不确定度约为 $\pm 2.4\%$ 。为了尽量减小定标光源所引入的附加不确定度,拟采用标准灯发散光直接照射仪器漫反射板的方法完成辐照度定标。

对于发散光来说,由于标准灯本身的空间辐射非均匀性,需要引入光谱辐照度修正因子

$$\epsilon_f = \sum_{(x,y)} \epsilon_f^S(x,y) \epsilon_f^F(x,y).$$

式中 $\epsilon_f^S(x,y)$ 和 $\epsilon_f^F(x,y)$ 分别为发散光源的辐照度归一化函数和发散光照射时仪器的视场响应函数。 $\epsilon_f^S(x,y)$ 和 $\epsilon_f^F(x,y)$ 的测试原理与平行光相同,结果分别如图3(b)和4(b)所示。最后测得发散光辐照度修正因子约为0.994。

如图6所示,采用直接发散光法定标的仪器辐照度响应度 $R_f(\lambda)$ 可表示为

$$R_f(\lambda) = \frac{E_f(\lambda)}{V_f(\lambda)} = \frac{E_W(\lambda) \epsilon_f}{V_f(\lambda)} = \frac{E_W(\lambda) \sum_{(x,y)} \epsilon_f^S(x,y) \epsilon_f^F(x,y)}{V_f(\lambda)}, \quad (6)$$

式中 $E_f(\lambda)$ 为修正后的发散光源光谱辐照度值, $E_W(\lambda)$ 为光谱辐照度标准石英卤钨灯的标定光谱辐照度值, $V_f(\lambda)$ 为仪器对发散光的读出值。

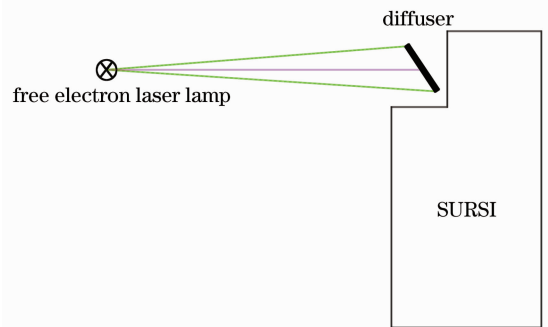


图 6 发散光法辐照度定标示意图

Fig. 6 Irradiance calibration setup using diverging light method

由(6)式求得不确定度公式

$$\frac{\Delta R_f(\lambda)}{R_f(\lambda)} = \left[\left| \frac{\Delta E_W(\lambda)}{E_W(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_f(\lambda)}{V_f(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta \epsilon_f}{\epsilon_f} \right|^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

从(7)式可知,空间紫外遥感仪器的光谱辐照度响应度绝对定标不确定度由仪器读数不确定度、标准

灯标定不确定度及修正因子测量不确定度组成。表 2 给出了采用直接发散光法定标时, 250~400 nm 波

段空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度的绝对及相对定标不确定度。

表 2 发散光法定标光谱辐照度定标不确定度

Table 2 Irradiance calibration uncertainty budget using diverging light method

Source of uncertainty	Absolute uncertainty / %	Relative uncertainty / %
Calibration of quartz-halogen standard lamp $E_w(\lambda)$	± 2	/
Instrument measurement repeatability $V_f(\lambda)$	± 1	± 1
Measurement repeatability ϵ_f	± 1	± 1
Overall uncertainty	± 2.4	± 1.4

4 定标结果比较

4.1 两种方法标定的仪器辐照度响应度结果的比较

为了对发散光定标方法进行评估, 将两种方法标定的仪器辐照度响应度结果进行了比较。定标结果和比对结果分别如图 7 和图 8 所示。由图 8 可知, 比较结果几乎不随波长的变化而改变, 在 250~400 nm 整个波段内, 两种方法定标结果的相对偏差约为 1%。均小于各自的相对定标不确定度。

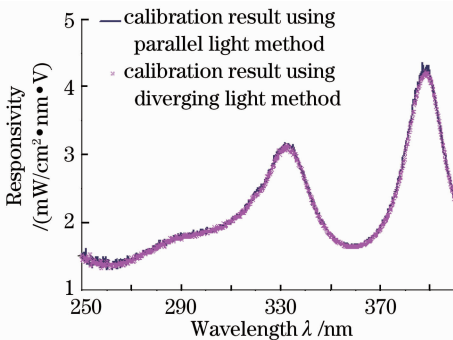


图 7 两种定标方法的定标结果

Fig. 7 Calibration results using two calibration methods

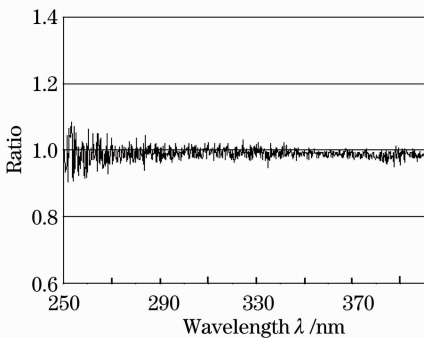


图 8 两种定标方法标定仪器响应度结果的比对

Fig. 8 Ratio of calibration results measured using two calibration methods

4.2 比较结果分析

对比较结果进行了简单的分析。根据(3)式及(6)式, 相对偏差可表示为

$$\delta = \left| \frac{R_f(\lambda) - R_p(\lambda)}{R_p(\lambda)} \right| = \left| \frac{E_w(\lambda)\epsilon_f V_p(\lambda)}{E_x(\lambda)\epsilon_p V_f(\lambda)} - 1 \right| = \left| \frac{E_w(\lambda) \sum_{(x,y)} \epsilon_f^S(x,y) \epsilon_f^F(x,y)}{E_x(\lambda) \sum_{(x,y)} \epsilon_p^S(x,y) \epsilon_p^F(x,y)} \frac{V_p(\lambda)}{V_f(\lambda)} - 1 \right|, \quad (8)$$

式中 $V_p(\lambda)$ 和 $V_f(\lambda)$ 又可分别具体表示为

$$V_p(\lambda) = \sum_{(x,y)} \frac{E_x(\lambda) \epsilon_p^S(x,y)}{r_p^F(x,y)}, \quad (9)$$

$$V_f(\lambda) = \sum_{(x,y)} \frac{E_w(\lambda) \epsilon_f^S(x,y)}{r_f^F(x,y)}, \quad (10)$$

式中 $r_p^F(x,y)$ 和 $r_f^F(x,y)$ 分别表示平行光和发散光照射时, 仪器有效视场内不同区域的辐照度响应度, 由于照射方式的不同, 对于同一区域两者的大小也不同。将(9)式和(10)式代入(8)式

$$\delta = \left| \frac{R_f(\lambda) - R_p(\lambda)}{R_p(\lambda)} \right| = \left| \frac{\sum_{(x,y)} \epsilon_f^S(x,y) \epsilon_f^F(x,y) \sum_{(x,y)} \frac{\epsilon_p^S(x,y)}{r_p^F(x,y)}}{\sum_{(x,y)} \epsilon_p^S(x,y) \epsilon_p^F(x,y) \sum_{(x,y)} \frac{\epsilon_f^S(x,y)}{r_f^F(x,y)}} - 1 \right|. \quad (11)$$

由于空间紫外遥感仪器的有效视场相对较小, 平行光源和发散光源在有效视场内的绝大部分区域是均匀的(如图 3 所示), 所以可近似认为 $\epsilon_p^S(x,y) \approx \epsilon_f^S(x,y) \approx 1$ 。这样(11)式可简化为

$$\delta = \left| \frac{R_f(\lambda) - R_p(\lambda)}{R_p(\lambda)} \right| = \left| \frac{\sum_{(x,y)} r_f^F(x,y)}{\sum_{(x,y)} r_p^F(x,y)} - 1 \right|. \quad (12)$$

根据(12)式分析, 在定标光源均匀的前提下, 两种方法定标结果的相对偏差大小主要取决于仪器有效视场内区域响应度值的偏离程度。为了验证这一点, 对 δ 值进行估算。在平行光和发散光定标过程中, 已经测得两种照射方式下, 仪器不同区域的响应度结果。为了将响应度值统一到相同的标准, 将测得的数据点都向各自的中心做归一化, 结果如图 9 所示, 使各自中心处的响应度值为 1 (由于两种

方法在视场中心处的辐照度响应度不受照射方式影响,是相同的)。为了便于比较,图 10 给出了两者区域辐照度响应度的比较结果,可以看出,差异大小随

着有效视场内区域的不同而改变。将处理后的数据代入(12)式中,估算出 δ 值约为 0.8%,与实测结果基本一致。

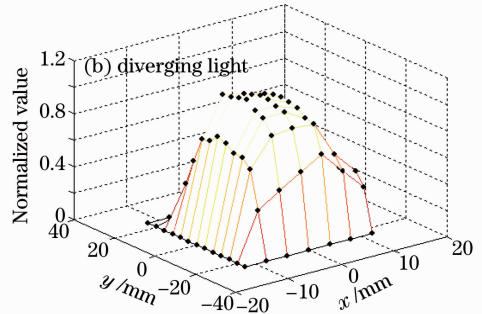
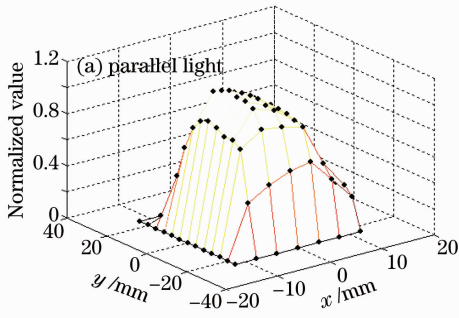


图 9 两种照射方式 SURSI 有效视场内区域辐照度响应度归一化结果

Fig. 9 Normalized results of irradiance responsivity at different locations in SURSI active area with two kinds of lights illuminating

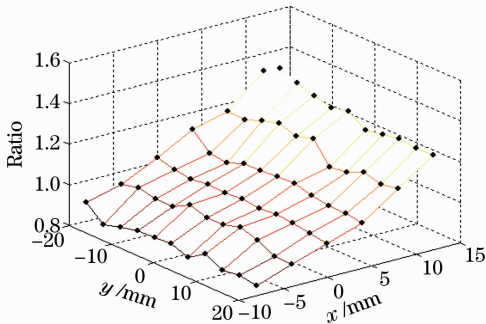


图 10 两种照射方式 SURSI 有效视场内区域辐照度响应度比较结果

Fig. 10 Ratio of irradiance responsivity at different locations in SURSI active area with two kinds of light illuminating

5 结 论

为了减小空间紫外遥感仪器地面辐照度响应度绝对定标的不确定度,分别提出了间接平行光定标法和直接发散光定标法。前者通过辐照度标准传递和辐照度值修正间接获得平行光的绝对光谱辐照度值,完成仪器辐照度定标;后者采用标准灯发散光直接照射仪器漫反射板的方法完成辐照度定标,可以尽量减小定标光源所引入的附加不确定度。对两种方法标定的响应度结果进行了比较,相对偏差为 1.0%。理论分析表明,相对偏差大小主要取决于各自仪器有效视场内区域响应度和数值的偏离程度。对两种定标方法的不确定度进行了分析,分析表明,利用 250~400 nm 间接平行光法的辐照度定标绝对不确定度为 $\pm 2.8\%$,相对不确定度为 $\pm 2.0\%$;直接发散光法对应的不确定度分别为 $\pm 2.4\%$ 和 $\pm 1.4\%$ 。相对偏差均小于各自的相对定标不确定度,可以认

为两种定标方法是一致的。由于直接发散光法较间接平行光法具有更小的定标不确定度,可优先使用直接发散光法标定空间紫外遥感仪器的光谱辐照度响应度。与美国 NASA 所采用的直接平行光定标法相比,间接平行光法在获得定标单元的绝对光谱辐照度值方面所引入的不确定度略大;直接发散光法由于其具有定标元件少的特点,获得定标单元绝对光谱辐照度值时引入的不确定度小于直接平行光法。但同时需要指出的是,由于两者照射方式的不同,可能会为最后的定标结果引入其它不确定度,其精确值受间接平行光法及直接发散光法的相对定标不确定度限制。

参 考 文 献

- 1 D. F. Heath. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments [C]. *SPIE*, 2003, **4891**: 335~342
- 2 D. F. Heath, Z. Wei. Comparability of spectral radiance calibrations of large aperture earth observing instruments based upon diffuse reflective panels and internally illuminated spherical integrator techniques [C]. *SPIE*, 1994, **2209**: 148~159
- 3 Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 185~190
邢进,王淑荣,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 185~190
- 4 Wei Zongying, Kevin Kelly, Jamie Prall-Kalisher. Specification compliance and calibration data book for SBUV/2 flight unit # 8 (S/N 009) [R]. Greenbelt, Maryland, NASA, 2001
- 5 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometry, Luminosity, Colourometry and Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 222~223
金伟其,胡威捷. 辐射度、光度与色度及其测量 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006. 222~223
- 6 Wang Shurong, Song Kefei, Li Futian. Radiometric calibration on ground of satellite-borne solar ultraviolet spectral monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2256~2261
王淑荣,宋克非,李福田. 星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2256~2261