

文章编号: 1007-4619(2006)05-0644-07

星载紫外遥感辐射计积分球定标新方法的研究

邢 进^{1, 2, 3}, 李福田³, 顾行发^{1, 2, 4}

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101;
3. 中国科学院 长春光学精密机械研究所, 吉林 长春 130031; 4. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 在紫外波段, 使用常规手段实现高精度的辐射定标是比较困难的, 这主要是由于标准灯的定标不确定度约 4% 和漫反射板双向反射分布函数 (BRDF) 的测量不确定度 4%—6% 所致。为了提高定标精度, 本文应用积分球辐亮度定标方法^[1], 获得了接近理想的大面积辐亮度光源 (约 2%), 标定了在研的星载紫外遥感光谱辐射计的亮度响应度。文中将标准灯考虑为均匀亮度的点光源, 对辐射计的投影视场进行了照明因子修正。同时进行了常规的灯板定标方法与积分球定标新方法的比较, 得到了采用两种方法标定的辐射计亮度响应度有较好的一致性 (3%) 的结论。初步的定标数据分析比对显示, 漫反射板 BRDF 的测量不确定度和仪器投影视场内辐亮度的计算不确定度是比对中不一致主要的来源。

关键词: 光谱辐射定标; 空间紫外遥感辐射计; 积分球; 漫反射板

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

Research on the New Technology of Calibrations of Spectroradiometer for Ultraviolet Space Borne Remote Sensing Based on Integrating Sphere

XING Jin^{1, 2, 3}, LI Fu-tian³, GU Xing-fa^{1, 2, 4}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;

3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Anhui Hefei 230031, China;

4. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China)

Abstract In the ultraviolet wavelength range, the high precision radiometric calibration of spectroradiometer is quite difficult. It is mainly caused by the relatively larger uncertainty (4%) in the irradiance calibration of FEL standard lamp and uncertainty (4%—6%) in the measurements of the diffuser bidirectional reflectance distribution function (BRDF). In this article, the calibration technique of sphere integrator is used to improve the precision of calibration. The large area uniform (~2%) source of radiance close to the ideal one is achieved to acquire the radiance responsivities of the spectroradiometer under development for ultraviolet remote sensing from space. The FEL standard lamp is assumed to be a uniform point source to get a correction for the illuminating factor. In the mean time, a comparison between the conventional FEL + diffuser method and the new sphere integrator method is performed. A conclusion is drawn that the radiance responsivities using these two techniques are consistent within 3%. A preliminary analysis of calibration data points out that the

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 邢进 (1979—), 男, 目前在中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室 国家航天局航天遥感论证中心做博士后研究, 主要从事定标和遥感定量化研究。E-mail: xingjin@irsa.ac.cn

uncertainties in measurements of the diffuser BRDF and the calculation of the radiance in the FOV of spectroradiometer account for the discrepancy between the comparisons of these two techniques

Key words spectral radiometric calibration; spectroradiometer for ultraviolet remote sensing in space; integrating sphere; diffuser

1 引言

星载紫外遥感探测是人类了解自然界的一条重要途径。许多现象都可以在紫外波段观测到,如多数恒星所辐射的光谱峰值都在紫外—真空紫外波段,通过研究辐射光谱可以知道恒星的组成和发生着的物理、化学变化;通过对大气散射光、辉光和极光的探测,可以了解太阳和地球大气相互作用的机制,反演出大气中各种微量气体和气溶胶的含量,实现大气环境的实时监测。为了准确进行空间紫外光谱遥感探测必须进行高精度的辐射定标。

20世纪六七十年代,普遍使用辐照度标准灯和漫反射板产生可知亮度的大面积光源来定标遥感辐射计。为了改善平面漫反射板的亮度均匀性,人们将大口径积分球用于辐射定标,由于增加了定标环节,实际上引进了新的测量不确定度。美国标准技术研究院(NIST)曾对辐射定标中使用的 BaSO_4 涂料的双向反射分布函数(BRDF)进行了重复测量,结果显示两年内 BaSO_4 的 BRDF 值在低于 330nm 时有较大衰减^[2]。为此,NIST将漫反射板的材料换成 BRDF 值极稳定的 Spectralon。在 250—400nm 的紫外波段,辐射计辐亮度定标的精度一直徘徊在较低的水平,这主要是由于辐照度标准灯在低于 300nm 的不确定度较大和漫反射板双向反射分布函数的测量有较大的不确定度所致。

近年来^[1],有人提出了利用积分球进行辐亮度定标的新方法,消除了漫反射板的影响,极大地降低了定标不确定度。本文应用了这一积分球定标方法,标定了在研的空间紫外遥感光谱辐射计的辐亮度响应度,并与传统的灯板定标进行了比对。初步的定标数据分析与比对显示,使用积分球作为大面积均匀亮度源来定标光谱辐射计,可以极大地降低辐亮度定标不确定度,从而实现空间紫外遥感光谱辐射计高精度辐射定标。

2 积分球定标原理及方法

2.1 定标实验设置

Heath^[2]曾用该技术标定了 SBUV-2 遥感仪器并得到了较好的结果。困于当时的技术水平,积分球的涂料是 BaSO_4 ,在内置卤钨灯的照射下反射率 $<350\text{nm}$,有着明显的衰减,使数据的重复性受到影响。而且卤钨灯照明的积分球在紫外波段很难有较高的亮度输出,给准确定标仪器带来困难。近年来,得益于技术的发展,内部涂料为高分子材料(Spectralon或聚四氟乙烯等)的积分球才实现了商业化。

本实验选择了 Spherioptics公司的 TX-20Z-UV 积分球系统。该积分球直径 20英寸(50.8cm),开口直径 8英寸(20.32cm),内部涂料为 Spectralon(Zenith)材料。300W 氙灯和 100W 卤钨灯光源经 F/1 反射镜准直照射到积分球内壁上,在 250—400nm 波段提供了极强的亮度输出和良好的均匀性。Heath^[3]对类似积分球系统的研究表明,由氙灯照明的 Zenith材料积分球,用于紫外波段光谱辐射计亮度定标不仅可行而且是更佳的选择。

所定标的星载紫外遥感辐射计为臭氧垂直分布探测仪,是根据监测全球臭氧变化的目的而研制的中国第一台该类型的遥感辐射计。该仪器拟安装在风云三号卫星平台上,通过测量 160—400nm 太阳直射光谱辐照度和 250—340nm 12个特征波长经大气后向散射的太阳光谱辐亮度,反演大气层中臭氧的垂直分布轮廓。该辐射计为 Ebert-Fastie型光栅双单色仪结构,光谱带宽 1nm,探测器为滨松公司的 R1689光电倍增管。仪器的入射狭缝距漫反射板 50cm,仪器的视场投影到漫反射板上是一个上底为 9.5cm,下底为 11.5cm,高为 16.8cm 的梯形。

利用积分球的辐亮度定标首先需要辐照度传递,就是将中国计量院的 FEL辐照度标准灯的光谱辐照度传递到积分球上来,如图 1(a)所示。由中国计量院定标的 1000W 光谱辐照度标准石英卤钨灯(FEL),在 $h=50$ 和 100cm 的距离沿线法方向照明 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 漫反射板(本文中漫反射板材料为 Spectralon)。光谱辐射计与漫反射板法线成 33° ,观测漫反射板的中心区域。利用图 1(a)中确定的光谱辐射计加漫反射板系统的照度响应度就可以得出积分球在 50 和 100cm 的照度。最后,通过积分球

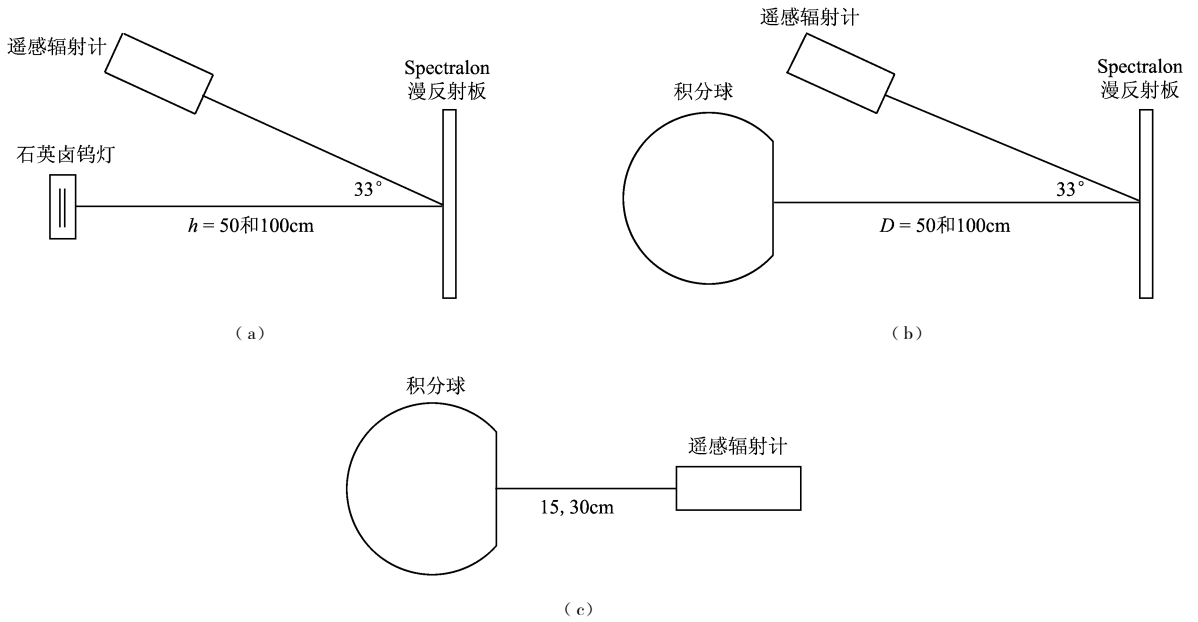


图 1 利用积分球 + Spectralon 漫反射板进行仪器辐亮度定标

(a) FEL 照度定标; (b) 积分球照度定标; (c) 仪器亮度定标

Fig 1 Spectral radiance calibration of instrument using integrating sphere + spectralon diffuser

(a) FEL lamp irradiance calibration; (b) Sphere irradiance calibration; (c) radiance calibration of instrument

开口的朗伯特特性, 利用得到的辐照度和几何因子计算出积分球开口的光谱辐亮度, 进行仪器辐亮度定标, 如图 1(c)所示。应注意, 仪器和漫反射板实际上组成了新的光谱辐射计系统, 用于将 FEL 标准灯的照度传递到积分球的开口上来, 漫反射板 BRDF 的影响就被完全的消除了。

2.2 光谱辐亮度计算

据图 1(a), 相对于 30 cm × 30 cm 的漫反射板尺寸和 h = 50 和 100 cm 的灯板距离, FEL 标准灯光源尺寸较小, 在将标准灯看作均匀亮度源的情况下, 光谱辐射计观测视场所接收的平均辐照度可以表示为^[4]:

$$E_{\text{diffuser}}(\lambda) = E_1(\lambda) \cdot \frac{1}{h^2 + r^2} \quad (1)$$

式中, h 是标准灯与 Spectralon 漫反射板之间的距离; $E_1(\lambda)$ 是标准灯在距离 l 处由计量机构标定的光谱辐照度; r 是将光谱辐射计在漫反射板上的投影视场等效为相同面积的圆的半径 (在本文中为 7.5 cm)。

根据图 1(a) 得到辐射计加漫反射板系统的照度响应度, 就可以确定出在距离积分球开口 D 处的辐照度。积分球开口的辐亮度可以通过与辐照度的几何关系计算出来:

考虑圆盘 A₁ 对与它平行的直角三角形 A₂ 的角系数 [图 2(a)], 该圆盘的轴线通过该直角形

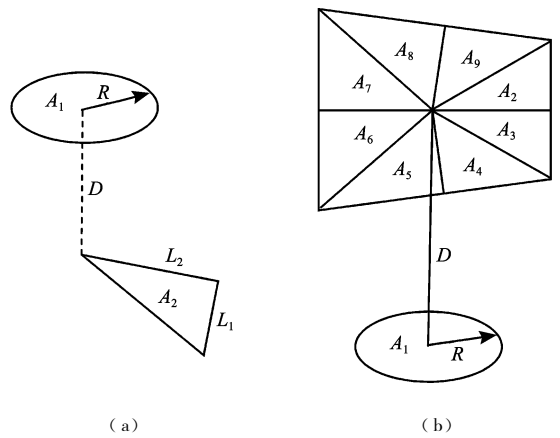


图 2 积分球对仪器梯形投影视场的角系数计算

(a) 圆盘对直角三角形; (b) 圆盘对仪器的梯形投影视场

Fig 2 Calculation of radiation heat transfer goniometric factor for the ladder shape projected FOV of instrument

(a) Disc to right angled triangle; (b) Disc to ladder shape projected FOV

的一个锐角顶点。根据辐射换热角系数^[5]的定义可得 A₁ 对 A₂ 的角系数 F_{1-2} :

$$F_{1-2} = \frac{1}{4\pi X^2} \cdot \left[\frac{1}{YZ} + (1 + X^2) \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{Z}{Y} \right) - \int_0^{\text{tg}^{-1} \left(\frac{Z}{Y} \right)} \frac{1}{Z^2} \sqrt{(Z^2 + X^2 Z^2 + \sec^2 \Phi)^2 - 4X^2 Z^2 \sec^2 \Phi} d\Phi \right] \quad (2)$$

式中, $X = \frac{R}{D}$, $Y = \frac{D}{L_1}$, $Z = \frac{D}{L_2}$ 。

根据角系数的可加性, 将仪器的梯形投影视场分解成 8 个直角三角形: $A_2 - A_9$ [图 2(b)], 积分球开口 A_1 对仪器梯形投影面积的辐射换热角系数可表示为:

$$F_{A_1-ladder} = F_{1-2} + F_{1-3} + F_{1-4} + F_{1-5} + F_{1-6} + F_{1-7} + F_{1-8} + F_{1-9} \quad (3)$$

根据朗伯表面的性质, 有:

$$E_{ladder} = F_{A_1-ladder} \cdot \pi \cdot \frac{A_1}{A_{ladder}} \cdot L_1 \quad (4)$$

因此, 通过测量距离积分球开口 D 处的光谱辐照度 E_{ladder} 就可以计算出 A_1 的光谱辐亮度 L_1 。

(4)式计算起来还是很繁琐的, 若能与 NIST 的 Walker 等人的公式 [2] 联系起来, 必将为分析计算与后续的数据处理和定标不确定度分析提供方便。简化公式:

$$E_D(\lambda) = \left[\frac{\pi R_1^2}{(D^2 + R_1^2 + R_2^2)} \right] \cdot L(\lambda) = G(D, R_1, R_2) \cdot L(\lambda) \quad (5)$$

式中, $E_D(\lambda)$ 为距离积分球开口 D 处的光谱辐照度; $L(\lambda)$ 为积分球开口处的光谱辐亮度; R_1 是积分球开口半径; R_2 是辐射计接收面的半径, 在本文中指一个面积等于仪器梯形投影视场面积的圆的半径。

可以用两式的比值 $\sigma = E_{ladder} / E_D$ 来表示使用公式 (5) 代替公式 (4) 的比例系数。利用 Matlab 软件可以方便地计算出比例系数 σ 随距离 D 的变化曲线 (图 3)。从图 3 可以看出, 在本文的情况下, 比例系数曲线比较平滑, 接近于常数, D 从 500mm 变化到 1500mm, 比例系数只变化了不到 0.3%。

因此, 可在分析计算中使用下面的公式:

$$E_{ladder} = \sigma \cdot E_D = \sigma \cdot \frac{\pi R_1^2}{(D^2 + R_1^2 + R_2^2)} \cdot L_1 \quad (6)$$

正确使用 Walker 的积分球定标方法的前提是积分球开口为朗伯辐射体, 因此, 实验考察积分球系统的亮度均匀性和角度辐射特性是非常必要的。由硅探测器和中心波长为 350nm 的滤光片所组成的辐射计测量了出射孔径的相对亮度。由光阑和石英透镜限制的辐射计视场约为 2° , 在积分球孔径上的投影为直径 3cm 的圆。测量在与出射孔径相垂直的方向进行, 直径 20.32cm 的开口上共测量了 20 个位置的相对亮度, 最大的偏差出现在左上角, 为 2.5% (图 4)。考察积分球的角度辐射特性, 也就是考察在一定的角度范围内, 开口处的辐亮度变化。

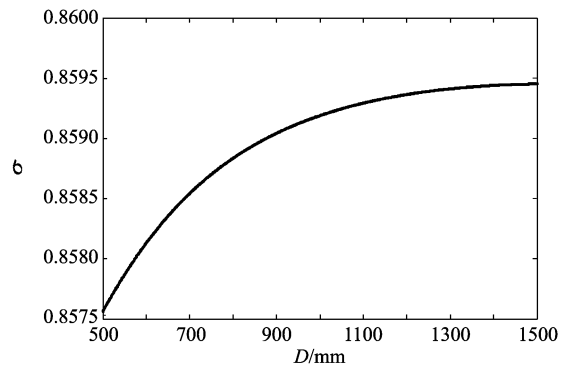


图 3 比例系数 σ 随距离 D 的变化曲线

Fig 3 Curve of proportion factor σ varying with distance D

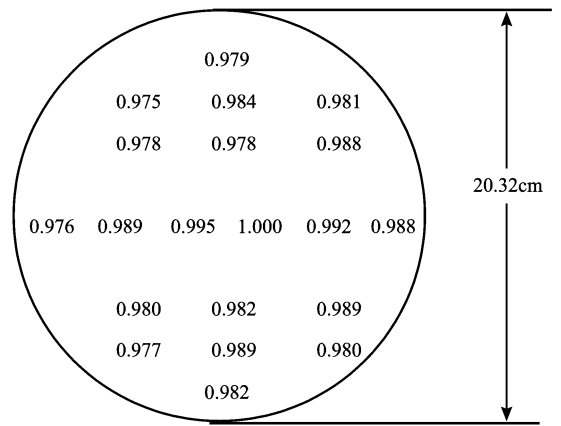


图 4 在 350nm 处积分球出射孔径的均匀性 (300W 氙灯照明)

Fig 4 Uniformity of the integrating sphere exit aperture plane at 350nm (illuminated by one 300W xenon lamp)

由视场角为 2° 的辐射计观测积分球开口, 测量范围: 水平方向 $\pm 40^\circ$ 角。单独由氙灯照明的亮度随角度变化之特性的测量结果见图 5。从 $-20^\circ - +20^\circ$ 的范围, 亮度变化小于 1%, 在整个 $\pm 40^\circ$ 角的范围内变化约 3%。可见, TX-20Z-UV 积分球辐射源朗伯特特性很好, 适合用作紫外波段辐射标准光源。

3 积分球定标不确定度分析

使用积分球进行仪器光谱辐亮度定标实际上采用的是比较法, 很多参数的不确定度, 如漫反射板 BRDF 测量的不确定度, 实验设置中的位置重复性等都由于采用了比较法而消除了 (表 1)。根据 (1) 和 (6) 式可得:

$$\frac{\Delta R_L(\lambda)}{R_L(\lambda)} = \sqrt{\left| \frac{\Delta \sigma}{\sigma} \right|^2 + 3 \left| \frac{\Delta V(\lambda)}{V(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E_1(\lambda)}{E_1(\lambda)} \right|^2}$$

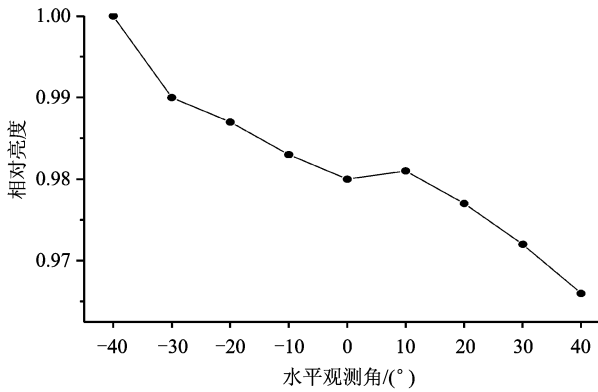


图 5 积分球辐射源角度辐射特性 (300W 氙灯照明)

Fig 5 Angular radiant characteristic of sphere integrator illuminated by 300W xenon arc lamp

$$\left| \frac{2h \cdot \Delta h + 2R_2 \cdot \Delta R_2}{h^2 + R_2^2} \right|^2 + \left| \frac{2D \cdot \Delta D + 2R_1 \cdot \Delta R_1 + 2R_2 \cdot \Delta R_2}{D^2 + R_1^2 + R_2^2} \right|^2 + \left| \frac{2R_1 \cdot \Delta R_1}{R_1^2} \right|^2 \quad (7)$$

表 1 使用积分球进行仪器光谱辐亮度定标不确定度 ($k=1$)Table 1 The Uncertainties of spectral radiance calibration utilizing sphere integrator ($k=1$)

不确定度来源	相对不确定度 /%
石英卤钨灯光谱辐照度定标 相对不确定度 (含电源不稳定性)	1.8% 在 250nm
探测系统的线性、换档比及响应度漂移等	1.2
积分球光谱辐亮度的短期稳定性	0.5
应用 Walker 的技术产生的误差	1
杂散光	0.3
h, D, R_1 的测量不确定度与 R_2 的计算不确定度	1.2
比例系数 σ 的计算不确定度	0.3
仪器波长精度和重复性	0.6
总计 (平方和开方)	2.8

为了精确定标仪器,需要合理设置探测器(倍增管)的高压,以改善信噪比。经实测高压电源的稳定性为 $0.02\% \text{ h}^{-1}$,倍增管十级倍增,对探测信号的影响为 $0.2\% \text{ h}^{-1}$ 。在大气 12 个波长 5 次测试高压换档比结果为 9.340 (平均值),标准偏差为 0.18%。高压电源的稳定性,高压换档比的准确性以及探测系统的线性等对读出信号带来的不确定度估计为 0.7%。本实验分别进行了照度传递和亮度

标定,故式(7)中有 3 倍的关系。

积分球亮度输出应保持相当的稳定性,才不会给辐射标定结果带来影响,经对积分球开口亮度的实际监测发现,亮度输出会有轻微的衰减,约 $0.5\% \text{ h}^{-1}$,将积分球冷却到室温再打开氙灯照明,亮度会恢复到原来的数值。这应该是氙灯系统本身的不稳定性和由氙灯的强紫外辐射形成的臭氧吸收所造成的。由于标定过程所耗费的时间较短,约 30min,故积分球亮度输出的稳定性对定标带来的不确定度约为 0.5%。

FEL 标准灯与积分球的不同照明方式是不可忽视的不确定度来源。在本文中,采用了几何因子来校正两种光源的不同照明方式。对于 FEL 标准灯要假设为均匀亮度的点光源,忽略修正因子带来的不确定度(约 0.5%)。因此应用 Walker 的技术产生的误差估计为 1%。

为了尽可能的减小杂光干扰,光学平台上可能反射光线到漫反射板的地方都铺置了黑绒布,以减小反射;漫反射板的侧面和仪器上都进行了表面发黑处理,表面发射率约 0.8%,同时采用了适当的黑布遮光处理,将杂光的影响最小化约 0.3%。

测量 h 和 D 的不确定度为 2mm, R_2 的不确定度为 3mm, R_1 是用游标卡尺测量得到的故不确定度较小,为 0.02mm。通过公式(7)后三项的计算可知,距离测量不确定度对辐亮度定标带来的不确定度为 1.2%。由于距离的不确定度而导致比例系数 σ 的计算产生误差,为估计该误差本文考虑了几种极限情况:仪器的投影视场上下左右各平移 10mm 和视场成比例的增大与缩小。经计算在这几种情况下比例系数 σ 的变化均小于 0.3% (图 6)。

波长精度,尤其在紫外波段,是一个很重要的不确定度来源。由于 FEL 标准灯的光谱形状与 3000K 的黑体接近,利用黑体的韦恩公式可以导出波长精度对定标的影响:

$$\frac{dL}{L} = \left[\frac{c}{\lambda T} - 5 \right] \cdot \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (8)$$

式中, c 是第二辐射常数,为 1.4388 cmK, T 是温度, λ 是波长。根据低压汞灯在紫外波段的多条谱线,检测出臭氧垂直探测仪的波长精度和重复性小于 $\pm 0.1 \text{ nm}$ 。由(8)式计算出波长精度对辐亮度定标的影响,在 250nm 为 0.58%。

综合各项不确定度的贡献,使用积分球定标技术进行光谱辐亮度定标的总不确定度为 2.8%。

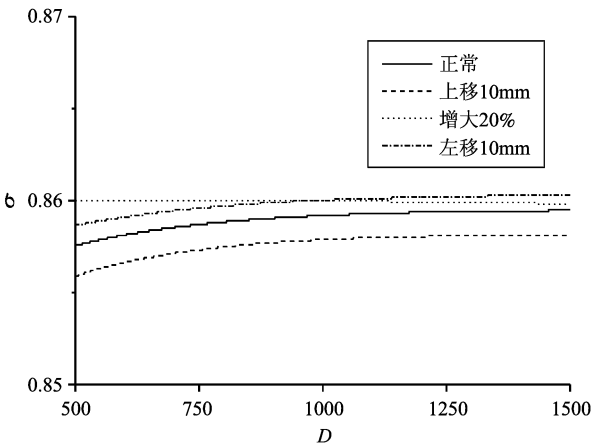


图 6 几种情况下修正系数 σ 的曲线 (积分球照明)

Fig 6 Curves of correction factor σ under certain circumstances

4 定标结果及两种光谱辐亮度定标技术的对比

常规的平面漫反射板辐亮度定标实验设置与图 1(a)完全相同,根据(1)式, Spectralon 漫反射板经辐照度标准灯照明,在仪器观测方向的平均辐亮度可以写为:

$$L_{\text{ladder}} = E_1(\lambda) \cdot \frac{I^2}{h^2 + r^2} \cdot \overline{\text{BRDF}} \quad (9)$$

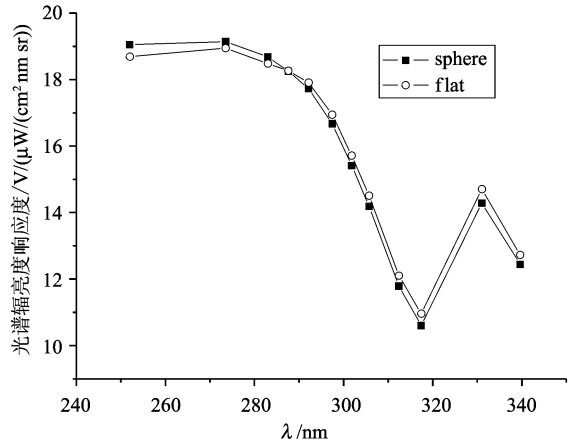
辐亮度定标中,不确定度主要来源于标准石英卤钨灯在 250nm 的定标不确定度和 Spectralon 漫反射板 BRDF 值的测量不确定度。

漫反射板 BRDF 值测量的不确定度较大是因为它无法直接的测量,它与入射角、反射角、入射方位角和反射方位角都相关,如果要完整地测量一块漫反射板的 BRDF 值,所测量的次数将是天文数字。一般有两种方法可以导出漫反板的 BRDF 值^[4]:一种是在漫反射材料的朗伯余弦特性比较好时,测量漫反射材料的正入射半球反射率,再利用朗伯反射体的特性——双向反射分布函数(BRDF 值)等于半球反射率 $/\pi$,从而得到漫反射材料的 BRDF 值。另一种是通过测量漫反射板的 BRF(双向反射比因子),进行朗伯特特性修正后再导出 BRDF 值。

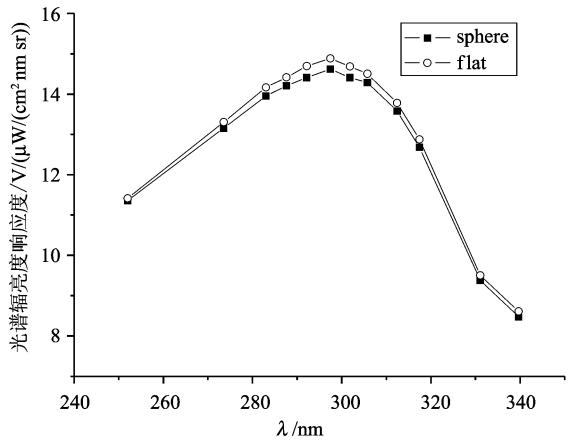
本实验所使用的 Spectralon 漫反射板是 Labsphere 公司的产品,半球反射率(同一批次)也是该公司提供的,由此导出的 BRDF 值的相对不确定度约为 4%。

本文应用积分球和漫反射板定标方法分别标定了臭氧垂直探测仪模型样机和工程样机,两台仪器

的辐亮度响应度如图 7 所示。



(a)



(b)

图 7 使用两种定标技术得到的臭氧垂直探测仪 (a)模型样机; (b)工程样机辐亮度响应度

Fig 7 Spectral radiance responsivities of Ozone Vertical distribution sensor

(a) Prototype model (b) Engineering model by using these two calibration technology

臭氧垂直探测仪模型样机和工程样机的辐亮度响应度曲线有较大不同(图 7),主要是因为使用的探测器——光电倍增管的型号不同所致。可以看出,两台仪器采用积分球和 Spectralon 漫反射板定标方法所获得的辐亮度响应度都是在 3% 以内相一致的;为了便于比较,在相同的操作条件下使用了同一支 FEL 标准灯,显而易见,该偏差主要是由于漫反射板双向反射率(BRDF)的测量不确定度引起的。由于积分球定标摒弃了漫反射板 BRDF 的使用,从而相对不确定度更小,也更倾向于准确。

在积分球辐亮度定标中,最大的不确定度来源是 FEL 标准灯光谱辐照度的相对不确定度。这是

应用积分球定标方法无法消除的,若要实现空间紫外光谱辐射计的高精度辐射定标(1%—2%),就必须使用不确定度较小的光谱辐照度标准灯(比如美国标准技术研究院 NIST 的光谱辐照度标准石英卤钨灯在 250nm 标定不确定度为 0.8%, $k=1$)。另外,几何因子 $G(D, R_1, R_2)$ 在积分球定标中是至关重要的参数,因此距离的测量精度必须提高。本实验距离测量不确定度约为 0.4%,若要求距离测量的影响在辐射定标中可以忽略,该不确定度必须达到约 0.05%。

5 结 论

本文应用 Walker 的积分球定标方法标定了星载紫外遥感辐射计 250—340nm 的辐亮度响应度,并与常规的标准灯加漫反射板辐亮度定标方法进行了对比,得到了采用两种方法标定的亮度响应度在 3% 以内相一致的结论。初步尝试分析了积分球定标的相对不确定度,指出漫反射板双向反射分布函数(BRDF)的测量不确定度和仪器投影视场内辐亮度的

计算不确定度是这两种方法不一致的主要来源。

参 考 文 献 (References)

- [1] James H Walker, Chris L Cromer. A Technique for Improving the Calibration of Large-area Sphere Sources [J]. SPIE, 1991, **1493**: 224—230.
- [2] Heath D F, Wei Z Y. Comparison of Spectral Radiance Calibrations of SBUV-2 Satellite Ozone Monitoring Instruments Using Integrating Sphere and Flatplate Diffuser Techniques [J]. Metrologia, 1993, **30**: 259—264.
- [3] Donald F Heath. Large Aperture Spectral Radiance Calibration Source for Ultraviolet Remote Sensing Instruments [J]. SPIE, 2003, **4891**: 335—342.
- [4] Xing J, Wang S R, Li F T. Comparison of Spectral Radiance Calibrations of Spectroradiometer for Ultraviolet Space Remote Sensing Using Three Calibration Techniques [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, **33**(3): 509—515. [邢进,王淑荣,李福田.空间紫外遥感光谱辐射计光谱辐亮度定标三种方法的比较 [J]. 中国激光, 2006, **33**(3): 509—515.]
- [5] Che N Z, Yan D Y. Radiometry and Photometry [M]. Beijing: The Publishing Board of Beijing University of Science and Technology, 1990. [车念曾,闫达远.辐射度学与光度学 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1990.]