

文章编号 1004-924X(2012)08-1696-08

## 高精度紫外标准探测器的定标

王锐<sup>1,2\*</sup>, 王淑荣<sup>2</sup>, 郭劲<sup>1,2</sup>, 王挺峰<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**研究了紫外标准探测器定标方法,以便进一步提高紫外波段辐射定标的精度。构建了高精度紫外标准辐射计,并推导了紫外辐射计响应度标准。在定标过程中直接利用高精度标准辐射计进行标准传递,并根据替代法定标原理消除了多项影响因子,使得定标精度大幅提高。最后,利用标准光源及标准探测器定标方法对待测光源辐照度、空间遥感仪器辐照度响应度进行了标定。两种方法定标结果表明:采用标准探测器定标方法可使定标不确定度降低到1.6%,充分证明了紫外标准探测器定标方法的有效性及高精度,实现了紫外探测器定标方法的工程化应用。

**关键词:**标准探测器;紫外探测器;紫外辐射;定标;辐照度

**中图分类号:**TP73;TN23 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1696

## Calibration of high accuracy UV standard detector

WANG Rui<sup>1,2\*</sup>, WANG Shu-rong<sup>2</sup>, GUO Jin<sup>1,2</sup>, WANG Ting-feng<sup>1,2</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)  
*\* Corresponding author, E-mail: darui9999@yahoo.com.cn*

**Abstract:** A UV standard detector calibration method was researched to improve the calibration accuracy. A High Accurate UV Radiometer (HAUVR) was established, and the standard response of the UV radiometer was deduced. In calibration, the HAUVR was used to transfer standard and the substitution method was adopted to eliminate some uncertainty factors. Finally, two kinds of calibration methods, namely, standard light source and standard detector calibration methods, were taken to calibrate the irradiance of an untested light and the irradiance response of an ozone vertical detector. Calibration results show that the uncertainty of calibration has been decreased to 1.6% by standard detector calibration method, which proves the efficiency and high accuracy of the UV standard detector calibration method. It realizes the engineering applications of the UV detector calibration method.

**Key words:** standard detector; UV detector; UV radiation; calibration; irradiance

收稿日期:2011-12-30;修订日期:2012-01-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 410714126);科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

## 1 引言

近年来,人们对紫外-真空紫外波段光谱有了更进一步的认识,在这一波段内的应用研究陆续展开,空间紫外遥感已成为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-真空紫外谱段,通过研究辐射光谱可以知道恒星的组成及其发生的物理、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理,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等。

由于定量化遥感等研究领域的要求不断提高,光辐射传感器的定标成为保证遥感数据准确性的基础支撑技术。目前,光辐射定标有基于辐射源和基于探测器两种方法,它们的共同点是需要建立高精度的初级标准以及直至用户的标准传递链。标准传递链保证了各种传感器的响应可以溯源到一个共同基准<sup>[1]</sup>,所以定标过程的不确定度主要由两部分组成:标准源不确定度和传递过程中引入的不确定度。因此,通过使用不确定度较低的标准源,并减少传递过程中引入的不确定度可以有效提高定标精度。

目前,紫外波段多采用标准光源定标方法标准传递,并已实现了真正意义的工程化应用,但与标准探测器定标方法相比,其自身不确定度较高(标准光源不确定度为2%,标准探测器不确定度为1.1%),且在定标过程中引入了一些无法准确衡量的不确定因素。为了进一步提高定标精度,本文围绕紫外标准探测器定标方法展开了研究,并提出了一套更为完善的定标方案。然后,以美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)标准探测器为核心构建高精度紫外辐射计,采用标准探测器定标方法对待测光源及待测遥感仪器进行标定,实现了标准探测器定标方法工程化应用的初步探索,为紫外辐射定标精度的提高奠定了基础。

## 2 高精度紫外辐射计标准建立

以往所采用的标准探测器定标方法需要利用光谱仪作为分光系统进行标定,整套系统结构复

杂,在标准传递过程中引入的不确定度因素较多,难以实现高精度标定。为了真正实现标准探测器定标方法的工程化应用,本文以 NIST 标准探测器 S2281 为核心,加入滤光片分光系统、可变光阑、电机驱动系统及数据采集系统共同构建了一台高精度紫外标准辐射计,其结构如图 1 所示。高精度紫外标准辐射计的设计理念是以结构紧凑,内部构造简单,安装携带方便,性能稳定为主;并且不加入任何其他光学元件,可实现高精度紫外标准辐射计响应度标准的准确推导。

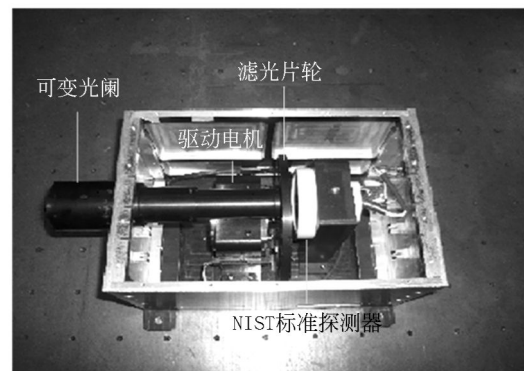


图1 高精度紫外标准辐射计

Fig.1 High accuracy UV radiometer

作为高精度辐射计内部核心元件的 NIST 标准探测器 S2281,其光谱响应度由 NIST 标定,但其标定结果为光谱辐通量响应度。而在实际应用中需要利用高精度辐射计进行辐照度响应度及辐亮度响应度的定标,因此,需要经过理论推导并加入滤光片及探测器均匀性修正系数,才能得到高精度紫外标准辐射计的辐照度响应度及辐亮度响应度标准。

### 2.1 辐照度响应度及辐亮度响应度推导

根据辐射度学原理<sup>[2]</sup>,推导出辐通量响应度与辐照度响应度及辐亮度响应度的关系为:

$$R_E = R_\phi \cdot A, \quad (1)$$

$$R_L = R_\phi \cdot \Omega \cdot A \cdot \cos \theta. \quad (2)$$

其中: $R_\phi$ 代表辐通量响应度, $R_E$ 代表辐照度响应度, $R_L$ 代表辐亮度响应度; $A$ 代表辐射面面积, $\Omega$ 代表辐射立体角; $\theta$ 为入射光与探测器接收面法线的夹角。由于在实际辐射定标中,入射光多正入射在探测器接收面上,因此取 $\theta=0$ 。

## 2.2 滤光片窄带宽内辐射能量透过比例系数推导

由于辐射计内装有离子镀干涉滤光片,其带宽及峰值透过率均会影响到辐射计光谱响应度<sup>[3]</sup>,因此,在推导过程中需要加入滤光片修正因子。

所采用滤光片的带宽分别为 25.5, 10.6, 10.1, 11.4 nm, 而 NIST 标准探测器定标数据经过插值运算后,带宽为 1 nm。这就需要对滤光片带宽进行修正,给出其在窄带宽内辐射能量透过比例系数。

首先,利用 Lamda950 分光光度计对各滤光片进行透过率测试,波长间隔为 0.5 nm。滤光片各波段通过率为  $T_{(\lambda)}$ ,入射光辐射强度为  $I_{(\lambda)}$ ,探测器响应度为  $R_{(\lambda)}$ 。则探测器接收到带宽内的光辐射强度为:

$$I_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{(\lambda)} \cdot T_{(\lambda)} \cdot R_{(\lambda)} \cdot d\lambda \quad (3)$$

探测器信号值可表示为:

$$S_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{(\lambda)} \cdot T_{(\lambda)} \cdot R_{(\lambda)} \cdot d\lambda \quad (4)$$

对于所需要的中心波长,其信号值可表示为:

$$S_m = I_{(\lambda_m)} \cdot T_{(\lambda_m)} \cdot R_{(\lambda_m)} \quad (5)$$

则滤光片窄带宽内辐射能量透过比例系数为:

$$f = \frac{S_m}{S_d} = \frac{I_{(\lambda_m)} \cdot T_{(\lambda_m)} \cdot R_{(\lambda_m)}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{(\lambda)} \cdot T_{(\lambda)} \cdot R_{(\lambda)} \cdot d\lambda} \quad (6)$$

## 2.3 探测器接收面均匀性修正系数推导

作为光辐射接收装置,探测器接收面均匀性将直接影响到高精度辐射计的测量精度。因此,在使用 NIST 标准探测器定标数据时,需要加入探测器接收面均匀性修正系数。

根据探测器接收面均匀性的测试结果,得到 NIST 标准探测器表面各点相对于中心点的非均匀性归一化值  $B_i$ ,非均匀性修正系数可表示为:

$$\gamma = \frac{(B_1 + B_2 + \dots + B_i)R}{mR} = \frac{(B_1 + B_2 + \dots + B_i)}{m} \quad (7)$$

根据以上各修正因子的推导结果,最终得到高精度紫外标准辐射计辐照度及辐亮度响应度的推导结果。

高精度紫外标准辐射计辐照度响应度为:

$$R_E = \frac{R_\phi \cdot \gamma \cdot A \cdot \tau}{f} \quad (8)$$

高精度紫外标准辐射计辐亮度响应度为:

$$R_L = \frac{R_\phi \cdot \Omega \cdot \gamma \cdot A \cdot \tau}{f} \quad (9)$$

## 2.4 高精度紫外标准辐射计自身不确定度

根据式(8)及(9)得到高精度紫外标准辐射计自身不确定度<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\Delta R_{\phi}(\lambda)}{R_{\phi}(\lambda)} = \left\{ \left| \frac{\Delta R_{\phi}(\lambda)}{R_{\phi}(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\gamma(\lambda)}{\gamma(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{f(\lambda)}{f(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\tau(\lambda)}{\tau(\lambda)} \right|^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

具体不确定度来源见表 1。

表 1 高精度紫外标准辐射计不确定度

Tab.1 Uncertainty of High Accuracy

UV-radiometer(HAUVR) (%)

不确定度来源	不确定度百分比
NIST 标准探测器不确定度	1.1
修正因子 $\gamma$ 测量及计算误差	0.5
修正因子 $f$ 测量及计算误差	0.5
滤光片透过率 $\tau$ 测量误差	0.5
杂散光干扰	0.3
总计(平方相加开平方)	1.3

NIST 标准探测器的不确定度由 NIST 定标结果给出,为 1.1%。

探测器接收面灵敏度均匀性修正因子  $\gamma$  测量及计算不确定度主要来源于测量点多少的选择及测量装置精度,其误差在 0.3% 左右。

滤光片窄带宽内辐射能量透过比例系数  $f$  测量及计算误差主要来源于 Lamda950 测试结果及比例系数计算过程中波段选择及波段内节点数的选择。通过适当增加计算波段内节点数,得到其误差为 0.3%。

滤光片透过率  $\tau$  测量误差,主要来源于 Lamda950 测试精度,约为 0.5%。

杂散光的影响是定标过程中不可忽视的因素,为了保证定标精度,采取以下措施:以标准灯为中心 50 cm 的范围没有任何障碍物遮挡或反射光线;利用黑布覆盖光学平台上可能反射光线到高精度紫外辐射计处,高精度辐射计表面做了发黑处理,表面发射率约为 0.8%;同时采用适当的黑布遮光处理,将杂散光的影响最小化约为 0.3%。

经过以上的推导和计算,建立了高精度紫外辐射计的响应度标准。

### 3 待测光源辐照度标定

#### 3.1 利用标准探测器定标方法定标待测光源辐照度

在精度紫外辐射计响应度标准建立的基础上,可以利用高精度紫外辐射计(即探测器标准)对待测光源进行辐照度标定。中科院长春光机所作为国内紫外辐射定标的主要单位,目前拥有国内外多种标准光源。例如,早期使用的紫外标准灯是 1998 年中国计量院标定的石英卤钨灯 82040#, 标定光谱为 250~1 000 nm。由于定标数据间隔时间较长,灯的光谱分布及辐照度值不可避免地要有所变化<sup>[5]</sup>,而重新标定程序复杂且费用较高。为了解决以上问题采用高精度辐射计为标准,对石英卤钨灯 82040# 进行辐照度定标,并利用 NIST 标准光源 F528 对石英卤钨灯 82040# 进行辐照度标准传递,两种方法对比以确定其辐照度值的变化量。

定标装置如图 2 所示,首先,以高精度辐射计为基准,对石英卤钨灯 82040# 进行辐照度定标,定标距离为 650 mm(与石英卤钨灯 82040# 中国计量院定标数据所提供的距离相同),由于高精度辐射计入射光阑到探测器接收面的距离为 196 mm,因此定标过程中设定灯中心到辐射计入射光阑的距离为 454 mm。石英卤钨灯 82040# 预热时间为 40 min,高精度辐射计进行 3 次信号采集取平均值。在精度紫外辐射计照度响应度值已知的情况下,计算石英卤钨灯 82040# 的辐照度为:

$$E_x = \frac{S_s}{R_E}, \quad (11)$$

其中: $E_x$  代表待测光源辐照度, $S_s$  代表高精度标准辐射计信号值, $R_E$  代表高精度标准辐射计辐照度响应度。

根据式(11)还可计算出定标过程中的相对不确定度。

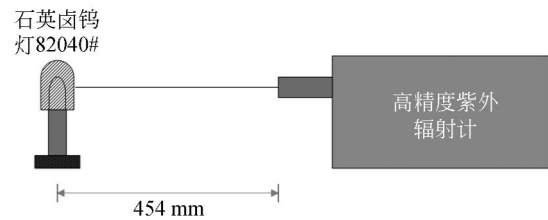


图 2 高精度辐射计定标待测光源辐照度

Fig. 2 Calibration of untested light irradiance using HAUVR

表 2 高精度辐射计定标待测光源辐照度不确定度

Tab. 2 Calibration of uncertainty of untested light irradiance using HAUVR (%)

不确定度来源	不确定度百分比
高精度辐射计自身不确定度	1.3
光源位置精度	0.5
杂散光干扰	0.3
总计(平方相加开平方)	1.4

高精度辐射计自身不确定度如前文所述为 1.3%。

实验过程中,为了得到准确的光辐射输出,应保证光源中心与辐射计入射光阑中心同轴,测量误差为 1 mm,根据式(11)可得出它对于定标精度的影响为 0.5%。

杂散光的影响如高精度辐射计不确定度分析所述,为 0.3%。

#### 3.2 利用标准光源定标法定标待测光源辐照度

定标装置如图 3 所示,严格按照 NIST 标准灯定标报告中所描述的光学系统配置构建了定标装置(包括单色仪分辨率,标准灯与单色仪间距离等),并且利用该定标装置,对 NIST 标准灯的辐照度响应度进行了复现,所得到的标准灯响应度与 NIST 所提供的定标数据的标准偏差在 0.3% 以内,符合使用要求。首先,将 NIST 标准光源 F528 移入光路,利用探测器进行信号采集后,将待测光源石英卤钨灯 82040# 移入光路,通过这种方法将 NIST 标准光源 F528 的辐照度标准传递给石英卤钨灯 82040#, 它们的关系为:

$$E_x = \frac{S_s \cdot E_s}{S_s'}, \quad (12)$$

其中: $E_s$  代表标准光源 F528 的辐照度, $S_s'$  代表

光谱仪对待测光源信号值,  $S_s'$  代表光谱仪对标准光源信号值。

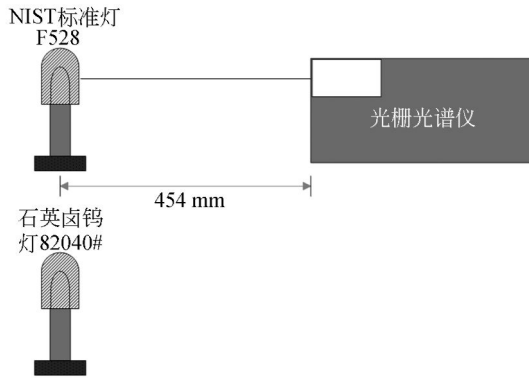


图 3 标准光源定标待测光源辐照度

Fig. 3 Calibration of untested light irradiance using standard light

同样根据式(12)对标准光源定标方法进行不确定度分析。

表 3 标准光源定标待测光源辐照度不确定度

Tab. 3 Calibration of uncertainty of untested light irradiance using standard light (%)

不确定度来源	不确定度百分比
标准光源不确定度	2
光栅光谱仪信号重复性	1
光源位置精度	0.5
杂散光干扰	0.3
总计(平方相加开平方)	2.3

标准光源不确定度由 NIST 定标结果给出, 为 2%。综合以上因素, 标准光源定标待测光源辐照度的不确定度为 2.3%。

### 3.3 两种定标方法比较

根据以上两种定标方法的不确定度分析可以看出, 标准探测器定标方法较标准光源定标方法的不确定度提高近 1%, 采用标准探测器定标方法一方面降低了标准源的不确定度; 另一方面经过标准推导过程使高精度紫外辐射计具备了自身标准, 可直接对待测光源进行标准传递, 而标准光源定标方法则需要一个光栅光谱仪作为接收探测器进行标准传递, 引入了光谱仪的信号重复性不确定度, 从而降低了定标精度。

通过以上两种方法确定石英卤钨灯 82040 # 的辐照度值, 并与 1998 的标定结果相比对。

石英卤钨灯定标结果见图 4, 具体数据见表 4。石英卤钨灯 82040 # 在使用了 10 年之后, 光谱辐照度呈上升状态, 并随波长变化, 其上升幅度递增。两种定标方法的不确定度分别为 1.4% 及 2.3%, 两种定标结果的偏差为 2%, 因此, 在误差允许范围内可以认定两种定标方法的有效性, 并以标准探测器定标方法的结果确定了光源 82040 # 光谱辐照度的变化量。82040 # 仍将作为日常定标使用的标准灯, 为了定标的准确性, 该灯的标定值要定期进行复查。

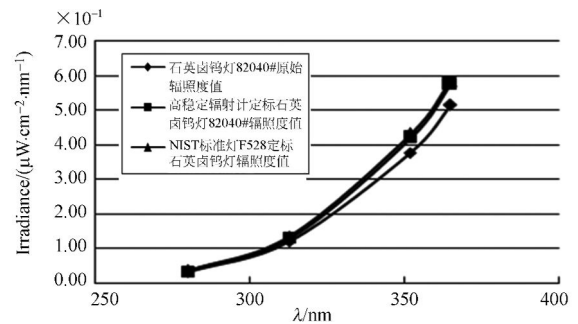


图 4 高精度辐射计及标准光源两种定标方法比对  
Fig. 4 Comparison of calibration results between HAUVR and standard light methods

表 4 两种定标方法比对结果

Tab. 4 Comparison of two methods

波长/nm	辐照度值源于 F-582(NIST) / $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	辐照度值源于高精度辐射计(NIST) / $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	源于不同标准的标准偏差 NIST/NIM	原始辐照度标 定值(源于 NIM) / $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	82040 # 辐 照度变化(%)
280	$3.68 \times 10^{-2}$	$3.58 \times 10^{-2}$	0.019	$3.32 \times 10^{-2}$	0.08
313	$1.36 \times 10^{-1}$	$1.32 \times 10^{-1}$	0.021	$1.21 \times 10^{-1}$	0.09
352	$4.31 \times 10^{-1}$	$4.19 \times 10^{-1}$	0.020	$3.77 \times 10^{-1}$	0.11
365	$5.84 \times 10^{-1}$	$5.74 \times 10^{-1}$	0.021	$5.14 \times 10^{-1}$	0.12

#### 4 利用标准探测器定标方法定标遥感仪器辐照度响应度

本课题组承担臭氧垂直探测仪系统研制及辐射定标工作,以往所采用的定标方法是标准光源定标法<sup>[6]</sup>,但在定标过程中引入了一些不确定因素。为了对其定标结果的准确性做进一步验证,提出利用以 NIST 标准探测器为核心元件构建的高精度辐射计(标准探测器定标法)对空间遥感仪器进行辐照度及辐亮度响应度标定,并与标准光源定标法相对比,以验证两种定标方法的有效性。

##### 4.1 标准探测器定标臭氧垂直探测仪辐照度响应度

根据臭氧垂直探测仪的工作特性<sup>[7]</sup>,其定标装置如图 5 所示。采用性能稳定的石英卤钨灯 F08 作为光源,将高精度紫外辐射计及臭氧垂直探测仪放置在水平实验台上,高精度辐射计距离石英卤钨灯光源为 454 mm,光源中心与辐射计入射光阑中心在同一水平线上。预热 40 min 后进行信号采集,测量波段为 280, 313, 352, 365 nm。采集 3 次信号取平均值,以消除随机误差。然后将臭氧垂直探测仪移入光路,漫反射板中心距离光源中心为 650 mm<sup>[8]</sup>,同样在以上 4 个波段进行定点信号采集。同时在光路中加入监视探测器,来消除光源稳定性对于定标精度的影响。

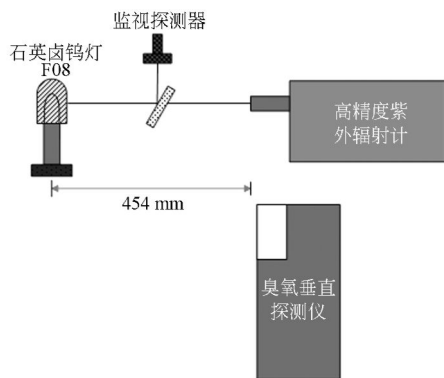


图 5 高精度辐射计定标臭氧垂直探测仪辐照度响应度

Fig. 5 Calibration of irradiance response for ozone vertical detector using HAUVR

由于臭氧垂直探测仪及高精度辐射计接收到的光谱辐照度来自同一光源,在光源相同距离处并且光源稳定的情况下可得到式(13)。由式中可以看出,由于采用替代法,加入监视探测器很好地消除了光源稳定性及仪器位置重复性对于定标精度的影响<sup>[9]</sup>。

$S_{MES}$ ,  $S_{MED}$  分别代表高精度标准辐射计和臭氧垂直探测仪进行信号采集时监视探测器的信号值。 $S_{ES}$ ,  $S_{ED}$  分别代表高精度辐射计及臭氧垂直探测仪的信号值,  $R_{ES}$ ,  $R_{ED}$  分别代表高精度辐射计及臭氧垂直探测仪的辐照度响应度。

$$R_{ED} = \frac{B_{ED}}{B_{ES}} \cdot R_{ES} = \frac{S_{MED}}{S_{MES}} \cdot R_{ES} \cdot \frac{S_{ED}}{S_{ES}} \quad (13)$$

将采集到的信号值代入上式,即可得到臭氧垂直探测仪相应波段的辐照度响应度。

根据式(13)可得:

$$\frac{\Delta R_{ED}(\lambda)}{R_{ED}(\lambda)} = \left[ \left| \frac{\Delta S_{ED}(\lambda)}{S_{ED}(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta R_{ES}(\lambda)}{R_{ES}(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta R_M(\lambda)}{R_M(\lambda)} \right|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

具体的不确定度分析见表 5。

表 5 高精度辐射计定标臭氧垂直探测仪光谱辐照度响应度不确定度

Tab. 5 Calibration of uncertainty of irradiance response for ozone vertical detector using HAUVR (%)

不确定度来源	不确定度百分比
高精度辐射计自身辐照度响应度不确定度	1.3
监视探测器信号重复性	0.5
仪器波长精度和重复性	0.6
探测系统漂移、线性和重复性	0.5
杂散光干扰	0.3
总计(平方相加开平方)	1.6

由表 5 可知,利用韦恩近似可得波长精度对辐射定标的影响约为 0.6%。250~400 nm 光源辐照度变化两个量级,为了准确标定仪器的响应度,放大器需要换档。高压电源的稳定性,放大器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 0.5%。由于采取了有效的杂散光抑制措施,杂散光干扰估计约为 0.3%。

综合考虑以上因素,高精度紫外辐射计定标臭氧垂直探测仪辐照度响应度不确定度为 1.6%。

#### 4.2 标准光源定标臭氧垂直探测仪辐照度响应度

在此基础上,又利用 NIST 标准光源 F528 对臭氧垂直探测仪进行辐照度响应度定标。

利用标准光源直接照射臭氧垂直探测仪漫反板中心,臭氧垂直探测仪进行 3 次信号采集,在标准光源辐照度值已知的情况下,即可得到相应的辐照度响应度,如式(15),其中  $E_{F528}$  代表标准光源 F528 的辐照度。

$$R_{ED} = \frac{S_{ED}}{E_{F528}} \quad (15)$$

根据式(15)可得:

$$\frac{\Delta R_E(\lambda)}{R_E(\lambda)} = \left[ \left| \frac{\Delta V_w(\lambda)}{V_w(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E_1(\lambda)}{E_1(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{2\Delta h}{h} \right|^2 \right] \quad (16)$$

具体的不确定度来源见表 6。由表可知,光源与仪器前置漫反板中心距离  $h$  的测量误差在  $\pm 3$  mm,它对定标精度的影响为 1.2%。仪器摆放位置的偏差将会引起仪器漫反射板与标准光源间角度发生变化,进而导致双向反射率的变化<sup>[10]</sup>,这对定标精度的影响估计为 0.6%,其它不确定度来源的确定与标准探测器定标方法相同。

表 6 标准光源定标臭氧垂直探测仪辐照度响应度不确定度

Tab.6 Calibration of uncertainty of irradiance response for ozone vertical detector using standard light (%)

不确定度来源	不确定度百分比
标准光源自身不确定度	2
光源与仪器前置漫反射板的距离 $h$ 的测量不确定度	1.2
由仪器位置偏差带来的不确定度	0.5
仪器波长精度和重复性	0.6
探测系统漂移、线性和重复性	0.5
杂散光干扰	0.3
总计(平方相加开平方)	2.6

#### 4.3 两种定标方法比较

分析两种定标方法的不确定度可知,标准探测器定标方法在降低了标准源自身不确定度的同时,采用替代法消除了多项不确定度因素,大幅提高了定标精度。表 7 是两种方法定标结果的对比。两种方法定标结果的偏差为 2.2%,而标准光源定标法及标准探测器定标法的不确定度分别 2.6%和 1.6%,在误差允许范围内可以认为两种方法定标结果一致,从而验证了标准探测器定标法的准确性。

表 7 两种方法定标臭氧垂直探测仪光谱辐照度结果对比

Tab.7 Comparison of irradiance response results of ozone vertical detector calibrated by using two methods

波长 /nm	臭氧垂直探测仪辐照度响应度/ $(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$		两种定标方法对比结果 标准偏差
	高精度辐射计定标结果	标准光源定标结果	
280	6.18	6.08	0.022 1
313	4.80	4.73	0.021 5
352	5.67	5.58	0.022 6
365	5.82	5.72	0.023 8

## 5 结 论

本文围绕紫外标准探测器定标方法展开研究,为了满足实际应用需要,构建了高精度紫外标准辐射计,并推导出了高精度标准辐射计的响应度标准及不确定度;因此,在定标过程中可直接利用高精度标准辐射计进行标准传递,由于巧妙的

采用替代法定标原理很好地消除了多项影响因子。在此基础上,采用高精度标准辐射计,利用标准探测器定标方法对待测光源辐照度及待测遥感仪器辐照度响应度进行了标定,并与标准光源定标方法相比对,证明了标准探测器定标方法的有效性和高精度。标准探测器定标方法的研究对于提高定标精度,加快探测器定标方法的工程化应用有着重要意义。

## 参考文献:

- [1] 王锐,王淑荣,李福田. 真空紫外探测器辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4):1026-1030.  
WANG R, WANG SH R, LI F T. Investigation on the radiation calibration system of vacuum ultraviolet detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1027-1030. (in Chinese)
- [2] 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,1990:68-75.  
CHE N Z, YAN D Y. *Radiometry and Photometry* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990:68-69. (in Chinese)
- [3] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江:浙江大学出版社,2007:102-115.  
TANG J F, GU P F, LIN X, et al.. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2007:102-115. (in Chinese)
- [4] 费业泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:47-50.  
FEI Y T. *Theory of Error and Precision and Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:47-50. (in Chinese)
- [5] 邢进,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.  
XING J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):373-379.
- [6] 张振铎,王淑荣,李福田. 空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6):1816-1821.  
ZHANG ZH D, WANG SH R, LI F T. Study on calibration method of spectral irradiance responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1816-1821. (in Chinese)
- [7] HEATH O F, WEI Z. Calibration and characterization of remote sensing instruments using ultra stable interference filters[J]. *SPIE*, 1997, 3221:300-308.
- [8] RENOTRE E, NOVI A, LABATE D, et al.. Solar diffuser pre-flight calibration set-up [J]. *SPIE*, 1997, 2957:355-371.
- [9] 王锐,宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3):470-474.  
WANG R, SONG K F. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):470-474. (in Chinese)
- [10] BAIS A F. Absolute spectral measurements of direct solar ultraviolet irradiance with a Brewer spectrophotometer [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(21): 5199-5204.

## 作者简介:



王 锐(1982—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事紫外辐射定标方面的研究。E-mail: darui9999@yahoo.com.cn



郭 劲(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗技术与装备研制。E-mail: guojin\_1964@126.com



王淑荣(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间紫外光学遥感技术及光学检测、紫外辐射计量测试方法的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn



王挺峰(1977—),男,山东文登人,博士,副研究员、硕士生导师,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光应用研究工作。E-mail: wtfeng@sina.com