文章编号　1004-924X(2022)07-0765-08

空间探测用真空紫外光谱辐射计的校准

孙红胜[1,2*]，梁新刚[1]，马维刚[1]，王加朋[2]，林冠宇[3]

(1. 清华大学 航天航空学院，北京 100084；
2. 北京振兴计量测试研究所，北京 100074；
3. 中国科学院 长春精密光学机械与物理研究所，吉林 长春 130033)

摘要：为了实现115～200 nm的真空紫外光谱辐射计的校准，针对现有方法中校准源均匀性不高、量值传递链条长、校准波段下限不够的问题，设计了两种校准方法。基于标准漫反射板的校准方法中，研制了测量最低波段到115 nm的真空紫外双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function，BRDF)/双向透射分布函数(Bidirectional Transmittance Distribution Function，BTDF)测量标准部件；基于标准辐射计的方法中，提出了相应的真空紫外光谱辐射亮度传递标准设计方法，标准视场角为2°，在真空条件下完成了实验验证；提出了一种标准真空紫外漫透射器制备方法，对标准真空紫外漫透射器的空间分布特性进行了测量，该方法在±10°角度范围内具有良好的均匀辐射朗伯特性。建立了校准装置，分析了各自的量值传递链条和测量不确定度，表明基于标准辐射亮度计的方法中减少了BRDF测量不确定度分量，测量不确定度更优。利用校准装置对风云卫星上的载荷进行了校准，115～200 nm波段光谱辐亮度测量不确定度为12%(k=2)，载荷在轨运行良好。真空紫外光谱辐射计校准方法和装置对空间真空紫外探测技术的研究和应用具有重要的意义。

关　键　词：紫外遥感；真空紫外；光谱辐亮度；漫透射；校准；测量不确定度
中图分类号：TN23　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.37188/OPE.20223007.0765

Calibration of VUV spectroradiometers for space exploration

SUN Hongsheng[1,2*], LIANG Xingang[1], MA Weigang[1], WANG Jiapeng[2], LIN Guanyu[3]

(1. *School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*;
2. *Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing* 100074, *China*;
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: hitshs@sina.com*

Abstract: The calibration method used for spectral radiance of the vacuum ultraviolet band (115-200 nm) was studied to calibrate the radiation parameter of VUV radiometer at 115 nm. Two calibration methods were designed to solve the following problems: low uniformity of calibration source, long value transfer chain, and insufficient lower limit of calibration band. In the method based on standard diffuse reflectors, the VUV bidirectional reflectance distribution function/bidirectional transmittance distribution function (BRDF/BTDF) measurement standard component was developed to measure the lowest wave band at

收稿日期：2021-01-16；**修订日期**：2021-03-04.
基金项目：国家自然科学基金国家重大科研仪器项目(No. D41527806)；国防技术基础科研项目(No. JSJL2015204A012)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

115 nm. In the method based on standard radiometer, the standard design method of spectral radiance transfer was proposed, and the experimental verification was completed with a field angle of 2°. A new preparation method of a standard vacuum ultraviolet diffuse transmitter was proposed and its measurement was carried out, revealing good Lambert characteristics in the range of ±10°. The calibration devices were developed and the value transfer chain and measurement uncertainty were analyzed, revealing a reduced BRDF measurement uncertainty component with better measurement uncertainty. A calibration test of payload on FY satellite was carried out using the calibration device. The uncertainty of spectral radiance measurement in the range of 115-200 nm is 12%(k=2), and the payload runs well in orbit. This research on the calibration method and VUV spectroradiometer is of great significance to the research and application of VUV space exploration technology.

Key words: ultraviolet remote sensing; vacuum ultraviolet; spectral radiance; diffuse transmission; calibration; uncertainty of measurement

1 引　言

自然界中的许多现象反映在真空紫外谱段，如电离层扰动信息、太阳物理构成及其变化规律、地球的大气气辉和极光等[1-2]。空间遥感领域，真空紫外光学遥感是除可见、红外和微波遥感以外的一个具有突出优势的技术。真空紫外光谱辐射计是获取大气环境第一手资料的重要载荷，通过测量各波段经大气散射的光谱辐亮度和太阳直射的光谱辐照度，反演计算出大气中各种微量气体和气溶胶的含量，以获取电离层扰动信息，监测全球温室效应、臭氧层厚度变化和各种有害气体的排放等[3]，对国家安全、环境监测、军事探测等具有重要意义。发射前对真空紫外光谱辐射计进行校准是一个关键步骤，相应地对校准精度有着更高的要求[4-5]。

真空紫外波段的辐射校准难度较大，难点在于要产生均匀且量值可溯源的真空紫外光谱辐射。国际上真空紫外光谱辐射标准的建立已较为完善，在美国SURF和德国BESSYⅡ上，均建立了基于同步辐射和低温辐射计的真空紫外光谱辐射计校准实验站[6-7]，该装置投资巨大，较为复杂。我国国家计量院的紫外校准最低波段到200 nm[8]。真空紫外载荷研制单位主要利用经过溯源的标准探测器开展相应的校准工作，方法主要包括两种[9-10]：一是单色准直光经过紫外漫反射器形成空间均匀朗伯辐射后，通过测量出漫反射器各个方向的双向反射分布函数(Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF)，开展光谱辐亮度校准，存在的问题是BRDF测量波段下限不够、量值传递链条长，测量不确定度较大，校准光路的对准误差较大；二是真空紫外单色光直接准直后对真空紫外光谱辐射计进行校准，标准辐亮度值由光束的辐照度值经过立体角换算后得出，存在的问题是光束辐亮度均匀性难以保证。

本文提出了改进的真空紫外光谱辐射计校准方法，研制了真空紫外光谱辐射亮度传递标准、新型透射式标准漫射器及BRDF测量部件，并搭建了相应的校准装置，建立了测量不确定度评价模型，分析比较了两种校准方法的测量不确定度，对典型的真空紫外光谱辐射计进行了校准实验，得到了校准结果的测量不确定度。

2 原　理

2.1 基于标准漫反射器的校准原理

基于标准漫反射器的真空紫外光谱辐射计校准原理如图1所示。

标准探测器的绝对光谱响应度为$\varphi(\lambda)$，经过德国联邦物理技术研究院(PTB)溯源可得；光敏面面积为ΔA，通过几何量精密测量方法可得。校准前，先将标准探测器旋转到漫反射板位置，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

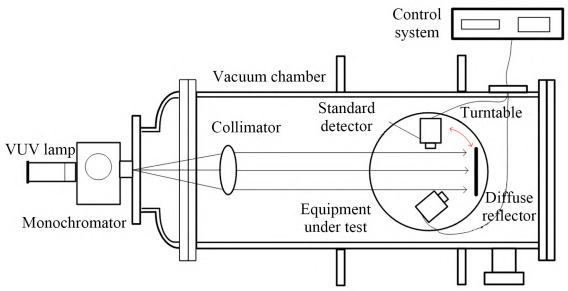

图 1　基于标准漫反射器的校准原理

Fig. 1　Schematic of calibration devices based on standard diffuse reflector

测量得到信号值 S_E，光线垂直入射后经反射与漫反射板法线成 θ_0 角（待校真空紫外光谱辐射计接收辐射的方向），设标准漫反射板的 BRDF 为 $F_{BRD}(0,\theta_0)$，则待校真空紫外光谱辐射计接收到的标准光谱辐亮度为：

$$L(\lambda)=S_E\cdot F_{BRD}(0,\theta_0)/[\varphi(\lambda)\Delta A]. \tag{1}$$

此时待校真空紫外光谱辐射计的输出信号值为 S_0，光谱辐射亮度响应度为：

$$R(\lambda)=\frac{S_0}{L(\lambda)}=\frac{S_0\varphi(\lambda)\Delta A}{S_E\cdot F_{BRD}(0,\theta_0)}. \tag{2}$$

2.2　基于标准真空紫外辐射亮度计的校准原理

基于标准真空紫外辐射亮度计和漫透射器的真空紫外光谱辐射计校准原理如图 2 所示。

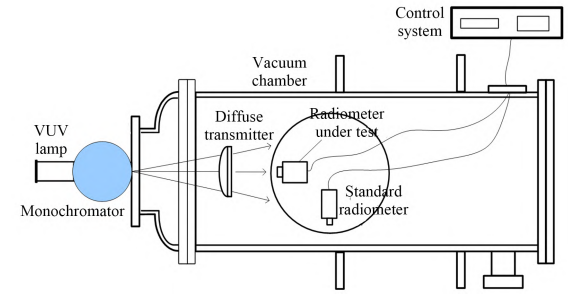

图 2　基于标准真空紫外辐射亮度计的校准原理

Fig. 2　Schematic of calibration devices based on VUV standard radiometer

真空紫外单色光照射到漫透射板上，在一定角度范围内形成均匀的朗伯均匀辐射，通过切换标准真空紫外辐射亮度计和待校真空紫外光谱辐射计的方法完成校准。设标准真空紫外辐射亮度计接收漫透射板辐射的信号输出值为 S_L，标准真空紫外辐射亮度计的光谱辐射亮度响应度为 $R_0(\lambda)$，待校真空紫外光谱辐射计的输出信号值为 S_0'，则待校真空紫外光谱辐射计的光谱辐射亮度响应度为：

$$R'(\lambda)=\frac{S_0'R_0(\lambda)}{S_L}. \tag{3}$$

3　实　验

3.1　标准真空紫外辐射亮度计

真空紫外辐射亮度校准的关键是要具备一个真空紫外辐射亮度的标准。本文设计了一种无光学系统的标准真空紫外辐射亮度计，其标准视场角为 2°，作为真空紫外辐射亮度校准的传递标准。其原理如图 3 所示。

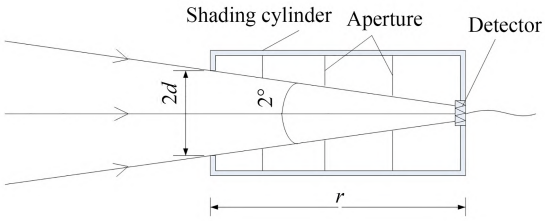

图 3　标准真空紫外辐射亮度计原理

Fig. 3　Schematic of VUV standard radiometer

标准真空紫外辐射亮度计中，探测器采用硅光电二极管，经过 PTB 校准的光谱响应度 $\varphi(\lambda)$ 如图 4 所示；光阑立体角为 ω_0，$\omega_0=\pi\cdot d^2/r^2$，面积为 ΔA，经过精密测量计算可得，则标准真空紫外辐射亮度计的光谱辐亮度响应度为：

$$R_0(\lambda)=\varphi(\lambda)\Delta A\omega_0. \tag{4}$$

在真空条件下对标准真空紫外辐射亮度计进行了原理验证。理想积分球出口的辐射出射度和辐射亮度值具有 $E=\pi\times L$ 关系，通过在积分球出口分别测量其辐射照度值和辐射亮度值，验证标准真空紫外辐射亮度计的测量原理和数据是否准确，测试现场如图 5 所示。其中，氘灯的稳定度为 0.5%（10 min），验证的数据表见表 1。由测试数据可知，利用标准真空紫外辐射亮度计测得的辐射亮度值与积分球出口处的辐射照度值符合 π 的比例关系，标准真空紫外辐射亮度计的原理正确。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

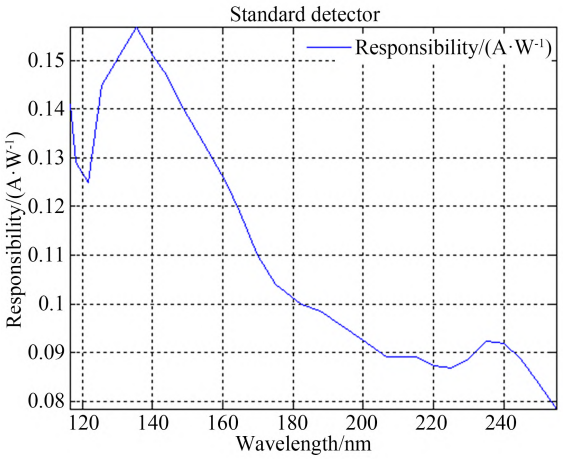

图 4　探测器的光谱响应度

Fig. 4　Spectral response of detector

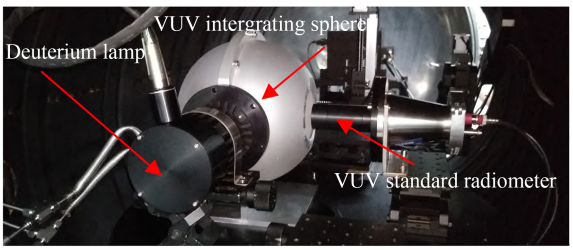

图 5　标准真空紫外辐射亮度计测试现场

Fig. 5　Test field of standard radiometer verification test using VUV integrating sphere

表 1　标准真空紫外辐射亮度计验证数据

Tab. 1　Standard radiometer verification data

Number	Irradiance E/(W·mm^{-2})	Radiance L (W·mm^{-2}·sr^{-1})	E/L	Deviation from π/%
1	0.008 792	0.002 77	3.163 55	0.75
2	0.008 786	0.002 75	3.186 09	1.5
3	0.008 795	0.002 73	3.214 47	2.4
4	0.008 779	0.002 78	3.146 68	0.2
5	0.008 795	0.002 76	3.176 94	1.2
6	0.008 781	0.002 75	3.184 28	1.4
7	0.008 793	0.002 78	3.151 69	0.4
8	0.008 791	0.002 76	3.175 50	1.1
9	0.008 786	0.002 76	3.173 69	1.1
10	0.008 778	0.002 78	3.146 32	0.2

3.2　标准漫反射器及漫透射器

在真空紫外波段，性能稳定的漫反射涂层材料难以制备。比如可反射真空紫外波段的铝涂层，长期在空气中会出现氧化现象，氧化后其真空紫外波段的反射率会大幅下降。通过在基底材料上喷涂铝粉，并在表面蒸镀氟化镁保护层，防止铝粉的氧化，减少对真空紫外辐射的吸收。该方法可保证漫反射器的工作波段及反射率满足使用要求，其设计形式及实物如图 6 所示。

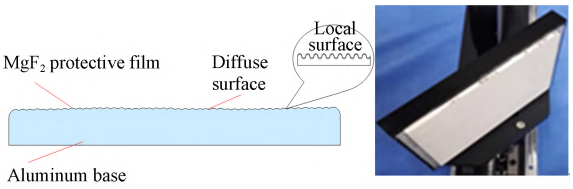

图 6　标准漫反射器设计及实物

Fig. 6　Design and object of standard diffuse reflector

真空紫外漫透射器采用氟化镁作为基底材料，第一面为球面，第二面为漫透射面，表面磨砂处理，制备口径 Φ 约为 100 mm。真空紫外漫透射器的设计及实物如图 7 所示。为掌握真空紫外漫透射器的空间方向辐射特性，利用标准真空紫外辐射亮度计对漫透射器光源方向的辐射特性相对分布进行了测量，结果如图 8 所示。由图 8

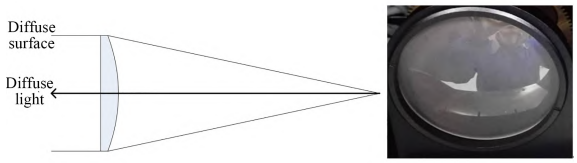

图 7　标准漫透射器设计及实物

Fig. 7　Design and object of standard diffuse transmitter

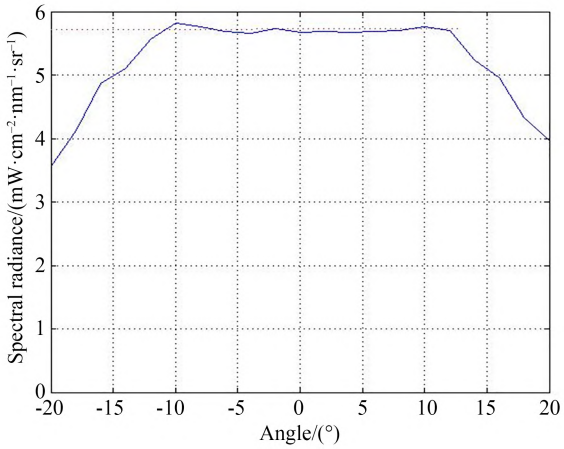

图 8　真空紫外漫透射器方向辐射特性

Fig. 8　Directional radiation characteristics of VUV diffuse transmitter

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可知，真空紫外漫透射器在±10°的范围内具有良好的朗伯特性，满足大部分真空紫外光谱辐射计的校准需求。

3.3　真空紫外 BRDF 测量标准部件

标准漫反射器的 BRDF 特性是影响校准准确度的关键因素，目前一般的 BRDF 测量精度只能到 140 nm。这里研制了一套基于光电倍增管的真空紫外漫反器 BRDF 测量标准部件，最低可测波长为 115 nm，测量角度范围为±60°，如图 9 所示。标准部件包括测量模块和采集控制模块，测量模块用于被测目标反射信号的探测，控制模块用于实现运动控制，由真空仓壁上的真空法兰实现二者的联通。

垂直入射时 BRDF 测量的数学模型为：

$$F_{\mathrm{BRD}}(0,\theta_0)=\frac{L(\theta_0)}{E_0}. \tag{5}$$

对标准漫反射器在典型波长点入射角度为 0°时的 BRDF 进行了测量，反射角为(θ,φ)，结果如表 2 和图 10 所示。从图中可以看出，入射角为 0°时，一定立体角区域内的反射朗伯特性较好，反射率与其平均值的最大偏差不超过 2%，可作为校准区域。

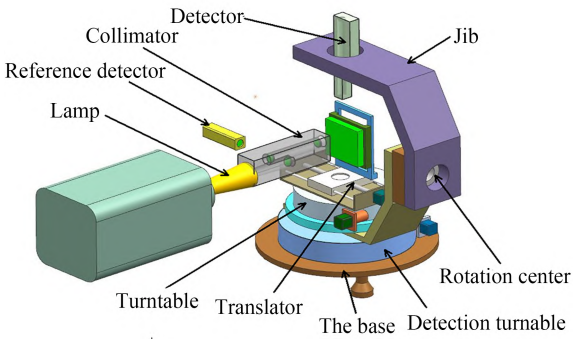

图 9　真空紫外 BRDF 测量标准部件

Fig. 9　Standard components for vacuum ultraviolet BRDF measurement

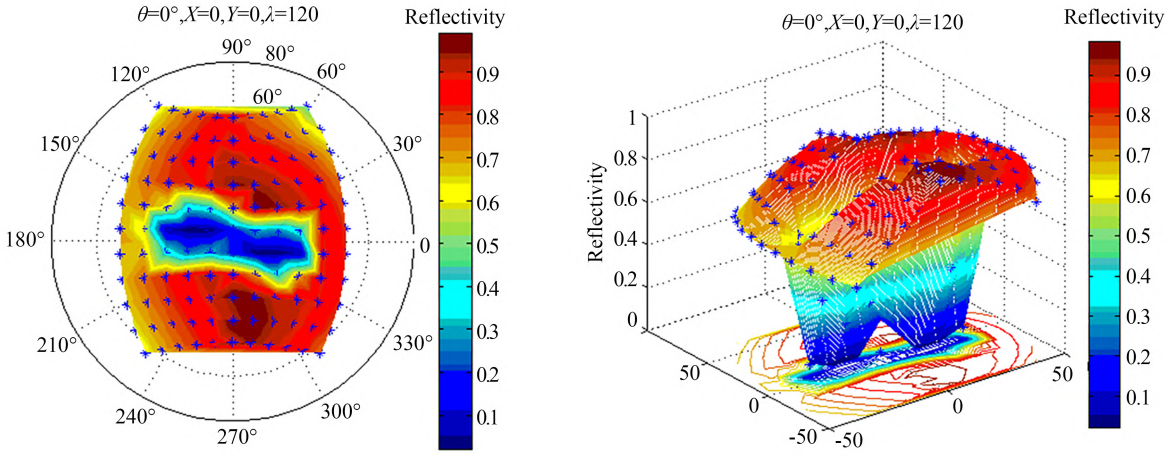

图 10　标准漫反射器 BRDF 的测试结果

Fig. 10　Test result of BRDF of standard diffuse reflector

表 2　标准漫反射器 BRDF 的测试数据

Tab. 2　Test data of BRDF of standard diffuse reflector

φ/(°)	θ			
	30°	35°	40°	45°
315	0.785	0.778	0.776	0.769
320	0.786	0.781	0.772	0.763

4　测量不确定度评价模型与分析

4.1　标准真空紫外辐射亮度计测量不确定度

根据式(4)，标准真空紫外辐射亮度计辐射亮度响应度测量不确定度评价的数学模型为：

$$u_{R_0(\lambda)}=\sqrt{u_{\varphi(\lambda)}^2+u_{\Delta A}^2+u_{\omega_0}^2+u_4^2}, \tag{6}$$

式中：$u_{\varphi(\lambda)}$为标准真空紫外辐射亮度计中的探测器溯源引入的不确定度分量(由计量证书确定)，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$u_{\Delta A}$为探测器光敏面面积测量引入的不确定度分量(由计量证书确定),u_{ω_0}为标准真空紫外辐射亮度计中的光阑立体角测量引入的不确定度分量(由计量证书确定),u_4为测量重复性引入的不确定度分量(由前期数据确定),其具体数值见表3。

表3　标准真空紫外辐射亮度计的测量不确定度及分量

Tab. 3　Uncertainty and subscale of standard VUV radiometer　(%)

Sources of uncertainty	Symbol	Wavelength/nm	
		115～130	130～200
Uncertainty introduced by traceability of detector responsivity	$u_{\varphi(\lambda)}$	4.5	1.0
Uncertainty introduced by measurement of photosensitive surface area of detector	$u_{\Delta A}$	0.2	0.2
Uncertainty introduced by measurement of solid angle of aperture	u_{ω_0}	0.3	0.3
Uncertainty introduced by measurement repeatability	u_4	1.5	1.0
Relative combined standard uncertainty	$u_{R_0(\lambda)}$	4.8	1.5

4.2　标准漫反射器BRDF测量不确定度

根据计量证书以及前期实验数据可得,标准漫反射器BRDF测量不确定度的主要来源由式(5)计算得到,见表4。

表4　标准漫反射器BRDF测量不确定度分量

Tab. 4　Uncertainty subscale of standard diffuser BRDF　(%)

Sources of uncertainty	Symbol	Wavelengh/nm	
		115～130	130～200
Uncertainty introduced by radiance measurement of reflection	$u_{L(\theta_0)}$	5.0	2.0
Uncertainty introduced by irradiance measurement of incidence	u_{E_0}	4.5	1.5
Uncertainty introduced by optical alignment	u_3	3.0	3.0
Measurement uncertainty introduced by system repeatability	u_4	2.0	2.0

由于反射辐射亮度和入射辐射照度用同一探测器测量,则$u_{L(\theta_0)}$与u_{E_0}具有相关性,估计其相关系数为0.8,则BRDF测量不确定度评价的数学模型为:

$$u_{\mathrm{BRDF}(0,\theta)}=\sqrt{u_{L(\theta)}^2+u_{E_0}^2-1.6u_{L(\theta)}u_{E_0}+u_3^2+u_4^2}. \quad (7)$$

经计算,在115～130 nm,$u_{\mathrm{BRDF}(0,\theta)}=4.8\%$;在130～200 nm,$u_{\mathrm{BRDF}(0,\theta)}=3.9\%$。

4.3　系统测量不确定度评价模型

根据式(2),基于标准漫反射器的真空紫外光谱辐射计校准结果的测量不确定度评价数学模型为:

$$u_{R(\lambda)}=\sqrt{u_{\phi(\lambda)}^2+u_{\Delta A}^2+u_{s_0}^2+u_{s_E}^2+u_{\mathrm{BRDF}}^2+u_6^2}, \quad (8)$$

式中:$u_{\phi(\lambda)}$为标准真空紫外辐射亮度计中探测器溯源引入的不确定度分量,$u_{\Delta A}$为探测器光敏面面积测量引入的不确定度分量,u_{S_0}为待校真空紫外光谱辐射计中输出信号测量引入的不确定度分量,u_{S_E}为入射辐射照度测量时探测器输出信号测量引入的不确定度分量,u_{BRDF}为标准漫反射器BRDF系数测量引入的不确定度分量,u_6为测量重复性引入的不确定度分量。

根据式(3),基于标准漫透射器和标准真空紫外辐射亮度计的真空紫外光谱辐射计校准结果的测量不确定度评价数学模型为:

$$u_{R'(\lambda)}=\sqrt{u_{R_0(\lambda)}^2+u_{S'_0}^2+u_{S_L}^2+u'^2_4}, \quad (9)$$

式中:$u_{R_0(\lambda)}$为标准真空紫外辐射亮度计辐射亮度响应度引入的不确定度分量,$u_{S'_0}$为待校真空紫外光谱辐射计中输出信号测量引入的不确定度分量,u_{S_L}为标准真空紫外辐射亮度计输出信号测量引入的不确定度分量,u'_4为测量重复性引入的不确定度分量。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.4　比较分析

由 4.1，4.2 节可知，标准真空紫外辐射亮度计和标准探测器引入的测量不确定度相差不大，而 BRDF 测量引入的测量不确定度值较大。由 4.3 节可知，基于标准漫透射器和标准真空紫外辐射亮度计的校准，与基于标准漫反射器的校准相比，系统的测量不确定度评价模型中减少了 BRDF 测量引入的不确定度分量（3.9%～4.8%），量值传递链条较短，测量不确定度更优。对视场角在±10°以内的真空紫外光谱辐射计，基于标准真空紫外辐射亮度计的校准方法能获得更优的校准结果，同时校准时的光路对准更方便，操作过程更简单。

5　真空紫外光谱辐射计校准实验

实验搭建了一套真空紫外光谱辐射计校准装置，如图 11 所示。基于标准真空紫外辐射亮度计，利用转台对标准真空紫外辐射亮度计和待测真空紫外光谱辐射计同位互换，对风云卫星上的空间探测用真空紫外光谱辐射计（真空紫外电离层光度计）进行了校准，校准结果见图 12。

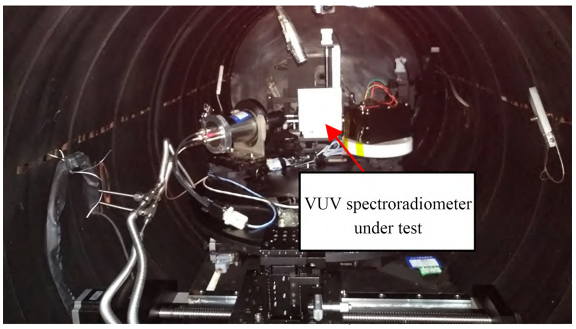

图 11　真空紫外光谱辐射计载荷校准现场

Fig. 11　Load calibration site of VUV spectroradiometer

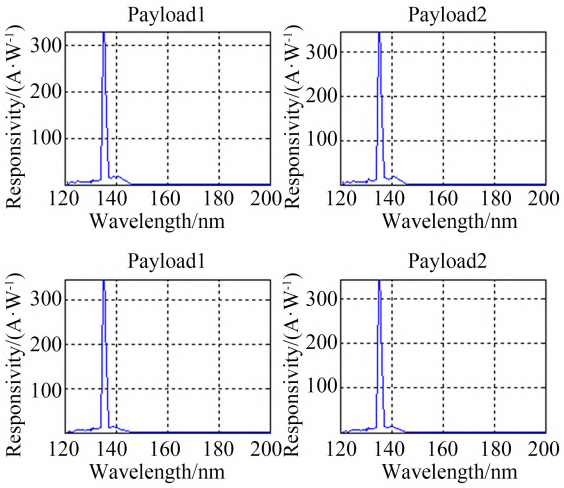

图 12　真空紫外光谱辐射计校准结果

Fig. 12　Calibration results of VUV spectroradiometers

6　结　论

本文提出了一种校准光束均匀、量值传递链条短的校准方法，校准方法中去掉了 BRDF 测量引入的不确定度分量，研建了相应的校准装置，波长最低到 115 nm，校准光束在±10°以内具有很好的朗伯均匀辐射特性；对测量不确定度评价模型进行了分析，结果表明基于标准真空紫外辐射亮度计和漫透射器的校准方法的测量不确定度更优。对风云卫星上的真空紫外光谱辐射计开展了校准实验，得到了它在典型波长点的光谱辐射亮度响应度值，最终的校准结果不确定度为 12%，目前真空紫外光谱辐射计在轨运行良好。研制的真空紫外光谱辐射计校准装置填补了国内的空白，在空间探测领域具有广泛的应用推广价值。后续拟利用国内的同步辐射实验室，扩展同步辐射光束线的最小波长到 10 nm，实现 10～200 nm 波段真空紫外光谱辐射计的校准。

参考文献：

[1] 谢春，姚倩霞，余越，等. 真空紫外－极紫外反射率计控制与数据采集系统[J]. 光学仪器，2020，42(3)：71-80.
XIE CH，YAO Q X，YU Y，*et al*. Control and data acquisition system for VUV-EUV reflectometer [J]. *Optical Instruments*，2020，42(3)：71-80. (in Chinese)

[2] 彭吉敏，仲佳勇，梁贵云，等. 基于电子束离子阱的天体X射线和极紫外辐射研究进展[J]. 天文学进展，2017，35(4)：417-428.
PENG J M，ZHONG J Y，LIANG G Y，*et al*. Progress in the field of research in region of X-ray

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and EUV on electron beam ion trap[J]. *Progress in Astronomy*, 2017, 35(4): 417-428. (in Chinese)

[3] 韩官, 林冠宇, 李博, 等. 星上定标漫射板远紫外BRDF测量方法[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 0912005.
HAN G, LIN G Y, LI B, *et al*. Measurement of far-ultraviolet BRDF for solar diffuser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 0912005. (in Chinese)

[4] 王龙, 蔺超, 纪振华, 等. 碳卫星CO_2探测仪发射前的漫反射板定标[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(8): 1967-1976.
WANG L, LIN CH, JI ZH H, *et al*. Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of TanSat[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1967-1976. (in Chinese)

[5] 漆成莉, 周方, 吴春强, 等. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(4):747-755.
QI CH L, ZHOU F, WU CH Q, *et al*. Spectral calibration of Fengyun-3 satellite high-spectral resolution infrared sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4):747-755. (in Chinese)

[6] 陆其峰, 周方, 漆成莉, 等. FY-3D星红外高光谱大气探测仪的在轨光谱精度评估[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(10): 2105-2115.
LU Q F, ZHOU F, QI CH L, *et al*. Spectral performance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2105-2115. (in Chinese)

[7] 张卓, 王维和, 王后茂, 等. FY-3C卫星紫外臭氧总量探测仪的在轨替代定标[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(2): 326-333.
ZHANG ZH, WANG W H, WANG H M, *et al*. On-board vicarious calibration of FY-3C UV total ozone unit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 326-333. (in Chinese)

[8] 王风丽, 张壮壮, 王占山, 等. 真空紫外波段Al膜保护层MgF_2的光学常数[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(11): 2823-2828.
WANG F L, ZHANG ZH ZH, WANG ZH SH, *et al*. Optical constant of MgF_2 coatings for Al/MgF_2 mirror in vacuum ultraviolet region[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2823-2828. (in Chinese)

[9] 余辉, 张扬, 付利平, 等. 基于传递标准探测器的远紫外电离层光度计定标技术研究[J]. 光学技术, 2020, 46(5): 540-544.
YU H, ZHANG Y, FU L P, *et al*. Study on calibration technology of far ultraviolet ionospheric photometer based on transfer standard detector[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(5): 540-544. (in Chinese)

[10] 李炳强, 曹佃生, 林冠宇, 等. 真空远紫外波段铝基漫反射板BRDF特性研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(9): 1138-1144.
LI B Q, CAO D SH, LIN G Y, *et al*. BRDF characteristics research on aluminum-based diffuser in vacuum and far ultraviolet waveband[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(9): 1138-1144. (in Chinese)

作者简介:

孙红胜(1980—),男,安徽巢湖人,研究员,2004年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现为清华大学航天航空学院博士,主要从事光学计量测试技术方面的研究。E-mail: hitshs@sina.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net