文章编号　1004-924X(2017)08-2004-07

自校准型光谱辐亮度标准光源

李福田[1*]，李志刚[1]，王晓旭[1,2]，王俊博[1]，蔺　超[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. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：针对高精度空间光学定量遥感的需求，研制了一种采用数字微镜器件的自校准型光谱辐亮度标准光源。该光源具有两种工作模式：在窄带工作模式下，由 Gershun 管辐射计和 CAS 光谱辐射计自校准；在宽带工作模式下，作为光谱辐亮度标准光源用于地面或空间遥感仪器的光谱辐亮度响应度定标。以光谱辐照度标准光源和 Spectralon 标准漫反射板组成光谱辐亮度标准光源为 CAS 光谱辐射计定标，测得自校准光源的光谱辐亮度。又以标准探测器定标的 Gershun 管辐射计测量自校准光源，采用迭代法得到自校准光源的光谱辐亮度。窄带模式下两种不同定标方法对自校准光源的光谱辐亮度测量结果在测量不确定度允许范围内一致。不确定度分析显示：基于标准光源和基于标准探测器的自校准光源光谱辐亮度测量不确定度分别为 1.41%～2.09% 和 1.28%～1.61%。实验及不确定度分析结果表明，该光源可以满足高精度空间光学定量遥感的使用要求。

关　键　词：辐射度学；光学遥感；辐射定标；光源；数字微镜器件(DMD)
中图分类号：O432.2；V447　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172508.2004

Self-calibrated spectral radiance standard source

LI Fu-tian[1*], LI Zhi-gang[1], WANG Xiao-xu[1,2], WANG Jun-bo[1], LIN Chao[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: li_futian@aliyun.com*

Abstract: Aiming at the demand of high-precision space-based optical quantitative remote sensing, a self-calibrated spectral radiance standard source which employs Digital Micromirror Device (DMD) was developed. The light source has two working modes. In narrow-band mode, it is calibrated by CAS spectroradiometer and Gershun radiometer. In broad-band mode, it is used for calibration of the spectral radiance responsivity of ground-based or space-based remote sensing instruments. An spectral radiance standard source comprised by spectral irradiance standard lamp and Spectralon standard plaques was adopted to calibrate CAS spectroradiometer, which was used to measure the spectral radiance of the self-calibrated source. Meanwhile a Gershun radiometer calibrated by a standard detector was used to measure the self-calibrated source, thus the spectral radiance of the source was achieved by iteration. The measurement results of the two calibration methods are coincident within the meas-

收稿日期：2017-02-20；**修订日期**：2017-03-22.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 61378063)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

urement uncertainty range. The uncertainty analysis shows that the uncertainties of the spectral radiance based on standard source calibration and based on standard detector calibration are 1.41%～2.09% and 1.28%～1.61% respectively. The results of the experiments and the uncertainty analysis indicate that the self-calibrated spectral radiance standard source can meet the requirement of the space-based optical quantitative remote sensing.

Key words: radiometry; remote sensing; radiance calibration; source; Digital Micromirror Device (DMD)

1　引　言

目前，国际上光学遥感仪器在紫外至短波红外光谱波段的光谱辐亮度响应度定标主要有两种方法：一种是宽带光源法。该方法通常采用灯照积分球光源或光谱辐照度标准灯辐照漫反射板光源，积分球的光谱辐亮度或光谱辐照度标准灯的光谱辐照度由高温黑体定标；另一种是可调谐单色激光照射积分球的窄带光源法。该方法中积分球的光谱辐亮度由低温绝对辐射计传递的陷阱探测器定标，如美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standard and Technology，NIST）研制的光谱辐照度和光谱辐亮度响应度定标的均匀光源（SIRCUS）[1]。

上述两种方法中，窄带光源定标精度高，不确定度可达 0.1%，但缺点是系统庞大复杂、不易移动且全波段逐点定标时间很长；宽带光源具有结构紧凑、便于移动和定标时间短的优点，但是定标精度相对较低。如 NIST 的光谱辐照度石英卤钨标准灯在 250～2 400 nm 的相对扩展不确定度仅有 0.6%～1.7%（$k=2$）。美国国家航空航天局地球观测系统中一项针对积分球光谱辐亮度长达 7 年的分析表明，由于衰减，积分球在可见光谱范围内的不确定度增至 2%～3%，在 1～2.5 μm 的短波红外光谱范围的不确定度增至 4%～5%[2]。这种传统的基于黑体辐射定标的光谱辐射传递标准一定程度上已不能满足一些高精度光谱定量遥感的需要，因此，有必要发展新型的光谱辐亮度标准光源。2006 年，NIST 的 Brown 等人[3-4]在概念研究基础上，基于商品化数字微镜器件（Digital Micromirror Device，DMD）光谱调谐器构建实验装置，开拓性地进行了自校准光源研究。

针对空间光学定量遥感仪器高精度辐射定标的需求和发展现状[5-8]，本文以双次色散、色散相减、Ebert-Fastie 型 DMD 光谱调谐器为切入点，采用 DMD 设计并研制了基于标准探测器的自校准型光谱辐亮度标准光源（以下简称自校准光源）。在介绍该光源结构和工作原理的基础上，讨论了自校准光源的高精度辐射定标问题。以 1 000 W光谱辐照度标准灯和 Spectralon 标准漫反射板构成光谱辐亮度标准光源定标装置，为 CAS 光谱辐射计定标，得到基于标准光源的自校准光源的光谱辐亮度。然后以标准探测器为 Gershun 管辐射计定标，测量自校准光源，运用迭代计算得到基于标准探测器的自校准光源的光谱辐亮度。最后对两种定标方法得到的自校准光源的光谱辐亮度实验结果进行了对比和不确定度分析。

2　自校准光源组成及工作原理

自校准光源由高稳定度氙灯、高效聚光镜、光谱调谐器、液体光导管、积分球、CAS 光谱辐射计和 Gershun 辐射计组成，光谱调谐器光路和自校准光源结构如图 1 所示。色散相减型 Ebert-Fastie 光谱调谐器在结构上类似于 Ebert-Fastie 型光栅光谱仪，由入射狭缝、出射狭缝、两平面光栅、两凹面反射镜和 DMD 构成。DMD 位于光谱调谐器第一次色散形成的平像场焦平面处，与入射狭缝的光谱像位置对应。出射狭缝位于液体光导管的入口处。其中，光谱调谐器的工作波段为 350～750 nm，平面光栅的刻线密度为 150 g/mm，凹面镜的曲率半径为 500 mm，F/5。CAS 光谱辐射计和 Gershun 辐射计同是自校准光源的光谱辐亮度监控设备，前者采用标准光源定标，后者采用标准探测器定标。积分球直径为 135 mm，内层为 PTFE 材料，长期稳定性很好。

DMD 在面积约为 2 cm^2 的 CMOS 基片上集成了 1 024×768 个微镜，由数字集成电路控制，

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

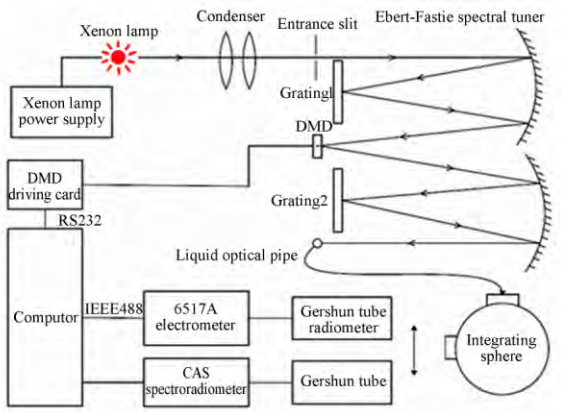

图 1 自校准光源结构

Fig. 1 Structure diagram of self-calibrated standard source

可产生+12°、−12°和 0°的偏转。DMD+12°偏转时，将入射光信号反射到检测光路中，为“On”态；−12°偏转时，将入射光信号反射到检测光路之外，为“Off”态；0°偏转时，为“Flat”态，即水平悬浮态。本文采用 DLP7000 型 DMD，微镜元数量为 1 024×768，每个镜元尺寸为 13.67 μm×13.67 μm，镜元阵列的整体尺寸为 14 mm× 10.5 mm，光谱调谐器的入射狭缝宽度小于 0.75 mm。1 024列镜元分为 32 组时，光谱带宽优于 14 nm，波长精度优于 1 nm。

自校准光源工作时，氙灯光源发出的光经高效聚光镜汇聚于第一台光谱调谐器的入射狭缝，经第一凹面镜准直为平行光，经第一平面光栅色散，再经第一凹面镜将入射狭缝光谱像形成于 DMD 表面。光谱调谐器第一次色散的平像场像面尺寸为 14 mm×10.5 mm，与 DMD 1024×768 个微镜元的总尺寸匹配。经过 DMD 的反射光，再经第二凹面镜准直及第二块平面光栅消色散，由第二凹面镜将消色散后的光聚焦于出射狭缝。经液体光导管引入积分球，成为均匀光谱辐亮度光源。自校准光源具有窄带模式和宽带模式两种工作模式。将 DMD 的 1 024 个镜元分为 M 组，即 M 个光谱通道。窄带模式下，当 DMD 中对应于某一光谱通道的一列或几列微镜处于“On”态时，与之对应的某一波长准单色光进入积分球，积分球出射准单色光。宽带模式下，DMD 全部微镜处于“On”态，与之对应的全波段白光进入积分球，积分球出射白光。图 3 给出自校准光源积分球在宽带与窄带模式下的 17 种光谱辐亮度曲线。1 024 镜元列与光谱色散方向对应，768 镜元行与光谱强度方向对应。通过计算机对 DMD 进行编程控制，调节 768 镜元行中参与工作的镜元数目，从而实现光谱调谐器系统的光谱辐亮度控制[9]。

所研制的自校准光源 DMD 光谱调谐器由于采用双次色散、色散相减的 Ebert-Fastie 型光谱分光系统，并使用全息光栅、零级光陷阱和消杂光光阑等元件，系统的光谱杂光抑制能力达 10^{-6} 量级，光谱杂光得到了有效抑制，从而保证了自校准光源窄带模式下的光谱纯度。

窄带模式下使用 Gershun 辐射计和 CAS 光谱辐射计定标，给出窄带模式下积分球准单色光的光谱辐亮度分布，经叠加给出宽带模式下积分球的白光光谱辐亮度分布。由于自校准光源在窄带模式下采用标准探测器型 Gershun 辐射计监测各光谱通道准单色光的光谱辐亮度变化，并通过 DMD 修正这一变化，从而保证叠加后宽带模式下积分球白光的光谱辐亮度分布恒定，能够自行修正光源使用过程中的老化、衰减，因此称为基于标准探测器的自校准光源。

3 自校准光源的辐射定标

3.1 标准光源测量

这里采用 CAS 光谱辐射计测量自校准光源的光谱辐亮度。该辐射计由 CAS-140CT-152 紫外-可见阵列光谱仪和 Gershun 管构成，工作波段为 200～800 nm，光谱分辨率为 3 nm，光谱杂光为 5×10^{-4}，通过改变 CCD 积分时间和更换准中性滤光片可使 600 nm 处的动态范围达 1×10^{10}。光纤探头前端安装一个 Gershun 管，将视场限制为 5.5°。

为得到自校准光源的绝对光谱辐射亮度，用 NIST 定标的 1 000 W 光谱辐照度石英卤钨标准灯和 LabSphere 公司定标半球反射率的 Spectralon 标准漫反射板构成光谱辐亮度标准光源，进行 CAS 光谱辐射计的光谱辐亮度响应度定标。光谱辐照度标准灯在漫反射板的法线方向入射照射漫反射板，CAS 光谱辐射计 Gershun 管光轴在与漫反射板法线成 30°角的方向接收光线[10-11]。CAS 光谱辐射计的光谱辐亮度响应度表示为：

$$R_{\mathrm{CAS}}(\lambda)=L_{\mathrm{b}}(\lambda)/S_{\mathrm{b}}(\lambda)=E_{\mathrm{b}}(\lambda)f(\lambda)/\pi S_{\mathrm{b}}(\lambda), \tag{1}$$

其中：$L_{\mathrm{b}}(\lambda)$为漫反射板的光谱辐亮度；$E_b(\lambda)$为光

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

谱辐照度标准灯在漫反射板处的光谱辐照度；$f(\lambda)$为漫反射板的半球反射率；$S_b(\lambda)$为 CAS 光谱辐射计对漫反射板的读数。根据式(1)可以得到 CAS 光谱辐射计的光谱辐亮度响应度曲线，如图 2 所示。

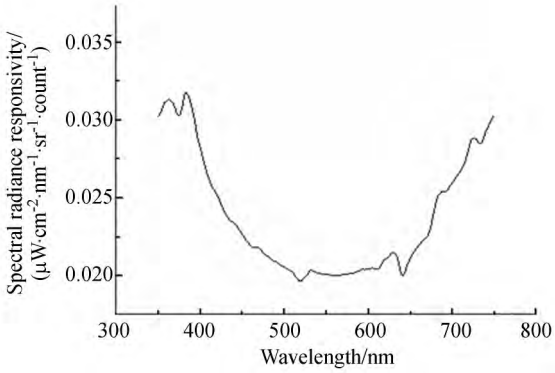

图 2　CAS 光谱辐射计的光谱辐亮度响应度曲线

Fig. 2　Spectral radiance responsivity curve of CAS spectroradiometer

将 DMD 的 1 024 列微镜分为 M 组，由式(2)和式(3)可得出自校准光源的绝对光谱辐亮度 $L_{mx}(\lambda)$和 $L_{0x}(\lambda)$，即：

$$L_{mx}(\lambda)=R_{\mathrm{CAS}}(\lambda)\cdot S_{mx}(\lambda), \tag{2}$$

$$L_{\alpha x}(\lambda)=R_{\mathrm{CAS}}(\lambda)\cdot S_{\alpha x}(\lambda), \tag{3}$$

其中 $S_{mx}(\lambda)$和 $S_{\alpha x}(\lambda)$为 DMD 1～M 组微镜列分别“On”时及 1 024 列微镜列全“On”时 CAS 光谱辐射计的读出值；m为镜列组序数，$m=1,2,3,\cdots\cdots M$，$M=16$。自校准光源积分球的绝对光谱辐亮度 $L_{mx}(\lambda)$如图 3 所示，光谱通道为 1～16。

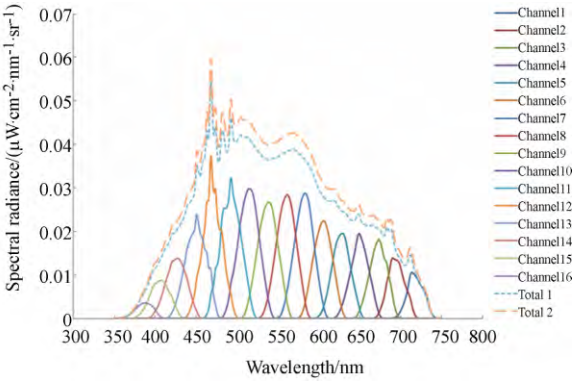

图 3　自校准光源在两种模式下的光谱辐亮度曲线及经标准探测器校准后的光谱辐亮度曲线(Total 2)

Fig. 3　Spectral radiance curves of self-calibrated source at two working modes and corrected spectral radiance curve (Total 2) based on standard detector

根据式(2)，将窄带模式下 M 个光谱通道的绝对光谱辐亮度叠加求和，可计算出 1 024 微镜列全“On”时的宽带模式自校准光源的绝对光谱辐亮度分布：

$$L_{\alpha x}'(\lambda)=\sum\nolimits_1^M L_{mx}(\lambda)=\sum\nolimits_1^M R_{\mathrm{CAS}}(\lambda)\cdot S_{mx}(\lambda). \tag{4}$$

宽带模式下自校准光源积分球的绝对光谱辐亮度迭加曲线如图 3 中的 Total 1 曲线所示。

3.2　标准探测器测量

本文还以 Gershun 辐射计测量了自校准光源。Gershun 辐射计由 Gershun 管和紫外-可见-近红外硅光电二极管探测器组成，如图 4 所示。Gershun 管前、后精密光阑的直径分别为 $D=11.8$ mm和 $d=6$ mm，间距 $s=181.2$ mm，用于限制视场。NIST 定标的紫外-可见-近红外硅光电二极管标准探测器[12]的光谱功率响应度如图 5 所示，该探测器具有较强的光谱选择性。Gershun 辐射计硅光电二极管的输出由 Keithley 6517A 静电计测量，经 IEEE488 接口传送至计算机进行数据采集处理。

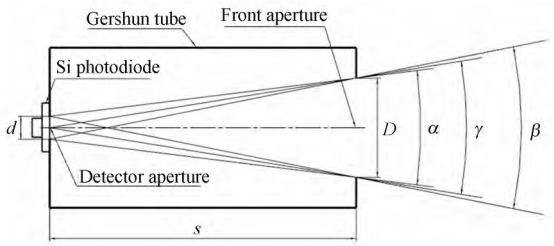

图 4　Gershun 管辐射计结构

Fig. 4　Structure of Gershun tube radiometer

窄带模式下以 Gershun 辐射计相继测量自校准光源各光谱通道的光谱辐亮度($m=1\sim M$)，其输出表示为[13]：

$$\Delta S'_{\mathrm{dm}}(\lambda)=R_{\mathrm{db}}(\lambda)\cdot L_{mx}(\lambda)\cdot\omega_{\mathrm{d}}\cdot A_{\mathrm{d}}, \tag{5}$$

其中：$R_{\mathrm{db}}(\lambda)$为紫外-可见-近红外硅光电二极管的绝对光谱功率响应度；$L_{mx}(\lambda)$为窄带模式下 CAS 光谱辐射计测得的自校准光源第 m 光谱通道的光谱辐亮度；ω_{d} 为 Gershun 辐射计的观测立体角，$\omega_{\mathrm{d}}=2\pi(1-\cos\gamma/2)$；$A_{\mathrm{d}}$ 为 Gershun 辐射计后有效光阑面积，$A_{\mathrm{d}}=\pi d^2/4$。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式(5)积分后，以 Gershun 辐射计测量窄带模式下自校准光源第 m 光谱通道的总输出为：

$$S'_{\mathrm{dm}} = \int_{350\ \mathrm{nm}}^{750\ \mathrm{nm}} R_{\mathrm{db}}(\lambda) L_{mx}(\lambda) \bar{\omega}_{\mathrm{d}} A_{\mathrm{d}} \mathrm{d}\lambda. \qquad (6)$$

积分改为求和，$n=1,2,3,\cdots,N$，$N=400$，$\Delta\lambda=1$ nm，即有：

$$S'_{\mathrm{dm}} = \sum_1^N R_{\mathrm{db}}(\lambda_n) L_{mx}(\lambda_n) \bar{\omega}_{\mathrm{d}} A_{\mathrm{d}} \Delta\lambda\ ,$$

$$S_{\mathrm{dm}} = \eta_{\mathrm{m}} \cdot S'_{\mathrm{dm}}\ , \qquad (7)$$

其中：S_{dm} 为 Gershun 辐射计输出的实测值，S'_{dm} 为 Gershun 辐射计输出的迭代值，η_{m} 为比值，如图 6 所示。图 7 表示 Gershun 辐射计测量自校准光源窄带模式下 16 个光谱通道的实测值与迭代值之比的多项式拟合值，其均方根起伏在 0.48% 以内。

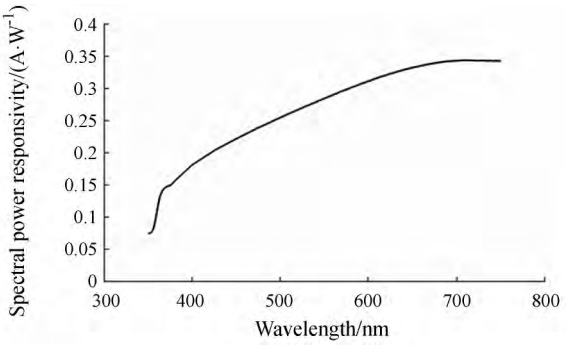

图 5 紫外-可见硅光电二极管标准探测器的光谱功率响应度(31100)

Fig. 5 Spectral power responsivity of UV-VIS Si photodiode standard detector(31100)

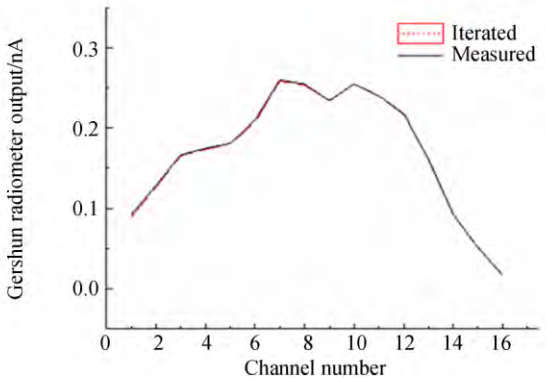

图 6 Gershun 辐射计的迭代值与实测值

Fig. 6 Iterated and measured values for Gershun radiometer

Gershun 辐射计是光谱功率计，如果不知道待测光源的光谱分布形状，将无法仅根据 Gershun 辐射计输出通过式(6)给出待测光源的光谱辐亮度分布，拟采用迭代法求解。首先将 3.1 节 CAS 光谱辐射计测得的自校准光源第 m 光谱通道的光谱辐亮度代入式(6)，计算出 Gershun 辐射计输出的迭代值 S'_{dm}；然后根据 Gershun 辐射计输出的实测值，由式(7)计算出修正值 η_{m}；进一步以 $\eta_{\mathrm{m}}=S_{\mathrm{dm}}/S'_{\mathrm{dm}}$ 的拟合值来修正 3.1 节由光谱辐亮度标准光源定标给出的自校准光源的光谱辐亮度。经迭代，最终得到基于标准探测器的自校准光源的光谱辐亮度为：

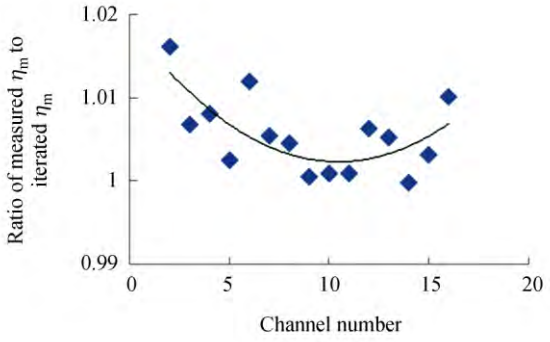

图 7 Gershun 辐射计的实测值与迭代值之比

Fig. 7 Ratio of measured values to iterated values for Gershun radiometer

$$L''_{ax}(\lambda) = \sum_1^M \eta_{\mathrm{m}} \cdot L_{mx}(\lambda). \qquad (8)$$

如图 3 中的 Total 2 曲线所示，修正前如图 3 中的 Total 1 曲线所示。

根据两种定标模式下自校准光源的光谱辐亮度表达式(1)、(4)和(5)，表 1～表 5 给出了各项测量的综合不确定度分析结果。

表 1 Gershun 辐射计的不确定度

Tab. 1 Uncertainty of Gershun radiometer

Uncertainty sources	Uncertainty ($k=1$)
Spectral power responsivity of NIST Si detector	1%～0.2%
Long term stability and reading of NIST Si detector	0.3%
The diameters and the distance of Gershun radiometer apertures	0.5%
Combined standard uncertainty	1.16%～0.62%

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　CAS 光谱辐射计的不确定度

Tab. 2　Uncertainty of CAS spectroradiometer

Uncertainty sources	Uncertainty (k=1)
Spectral irradiance for 1 000 W spectral irradiance standard FEL lamp	1.7% ～ 0.7%
Hemispherical reflectance of Spectralon plaque	1%
Reading of CAS spectroradiometer	0.5%
Narrow band to broad band algorithm	0.5%
Combined standard uncertainty	2.09%～1.41%

表 3　Gershun 辐射计与 CAS 光谱辐射计的合成标准不确定度

Tab. 3　Combined standard uncertainty of Gershun radiometer and CAS spectroradometer

Uncertainty sources	Uncertainty (k=1)
Gershun radiometer	1.16%～0.62%
CAS spectroradometer	2.09%～1.41%
Combined standard uncertainty	2.39%～1.54%

表 4　CAS 光谱辐射计相对光谱辐亮度的不确定度

Tab. 4　Uncertainty of relative spectral radiance of CAS spectroradiometer

Uncertainty sources	Uncertainty (k=1)
Relative spectral irradiance for 1 000 W spectral irradiance standard FEL lamp	0.5%
Relative hemispherical reflectance of spectralon plaque	0.6%
Reading of CAS spectroradiometer	0.4%
Narrow band to broad band algorithm	0.5%
Combined standard uncertainty	1.01%

表 5　基于标准探测器的光谱辐亮度不确定度

Tab. 5　Uncertainty of spectral radiance based on standar ddetector

Uncertainty sources	Uncertainty (k=1)
Uncertainty of Gershun radiometer	1.16%～0.62%
η_m	0.48%
Uncertainty of relative spectral radiance of CAS spectroradiometer	1.01%
Combined standard uncertainty	1.61%～1.28%

综合不确定度分析结果如下：

(1)由图 6 和图 7 给出的 Gershun 辐射计输出的实测值、迭代值及其比值可知，Gershun 辐射计自校准光源窄带模式下 16 个光谱通道输出实测值与迭代值的相对偏差，即标准光源法和标准探测器法测量的自校准光源光谱辐亮度的相对偏差为 0.2%～1.4%。由表 1～表 3 给出的采用标准探测器测量和标准光源测量的合成标准不确定度为 1.54%～2.39%，表明基于标准光源和基于标准探测器的两种定标方法测得的自校准光源的光谱辐亮度在不确定度理论分析允许范围内一致。

(2)基于标准探测器的自校准光源的光谱辐亮度不确定度最终由 Gershun 辐射计测量不确定度(表 1)、CAS 光谱辐射计相对光谱辐亮度测量不确定度(表 4)及 η_m 值的标准不确定度共同决定，其值为 1.28% ～ 1.61%(表 5)。

4　结　论

本文采用 DMD 研制了基于标准探测器的自校准型光谱辐亮度标准光源。该光源具有宽带与窄带两种工作模式，窄带模式下采用标准探测器定标；宽带模式下作为光谱辐亮度标准光源，用于空间或地面遥感仪器定标。根据需要定制光谱分布形状，该光源可自行校正老化衰减，保证长期稳定。研究了基于标准探测器和基于标准光源的自校准光源的光谱辐亮度定标方法，得到在目前使用的光谱辐亮度标准光源和标准探测器下 350～750 nm 两种定标方法测得的自校准光源光谱辐亮度差别为 0.2%～1.4%；与标准探测器法相比，标准光源法偏低一些。基于标准探测器的自校准光源的光谱辐射亮度测量不确定度为 1.28%～1.61%，与基于灯照漫反射板光谱辐亮度标准光源的结果(1.41%～2.09%)相比有所改善。由此表明，采用标准探测器型 Gershun 管辐射计定标有利于提高自校准光源的光谱辐亮度测量精度，特别是由于结构简单、稳定，采用 Gershun 管辐射计监控自校准光源有利于保证自校准光源的长期稳定运行。实验及不确定度分析结果表明，该光源可以满足高精度空间光学定量遥感的使用要求。

下一步拟从采用超连续光纤激光器和改进光谱调谐器的光学效率入手，提高自校准光源的光谱辐亮度及其定标精度，将其工作波段拓展至紫外和近红外波段。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] BROWN S W, EPPELDAUER G P, RICE J P, *et al*.. Spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources (SIRCUS) facility at NIST[J]. *SPIE*, 2004, 5542: 363-374.

[2] BUTLER J J, JOHNSON B C, RICE J P, *et al*.. Validation of radiometric standards for the laboratory calibration of reflected-solar Earth-observing satellite instruments[J]. *SPIE*, 2007, 6677: 667707.

[3] BROWN S W, SAUNDERS R D, LI Z G, *et al*.. An absolute detector-based spectral radiance source [J]. *SPIE*, 2010, 7807: 78070A.

[4] **李志刚. 基于探测器标准的高精度光谱辐射标准光源[J]. 中国光学**, 2015, 8(6): 909-918.
LI ZH G. High accuracy spectroradiometric standard light source based on detector standard [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 909-918. (in Chinese)

[5] **夏志伟，王凯，方伟，等. 基于航天单色仪的在轨辐射定标应用与发展[J]. 光学 精密工程**, 2015, 23(7): 1880-1891.
XIA ZH W, WANG K, FANG W, *et al*.. Applications and development of radiation calibration in orbit based on space monochromator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1880-1891. (in Chinese)

[6] **何玲平，陈波，张宏吉，等. 极紫外波段空间相机的辐射定标[J]. 光学 精密工程**, 2016, 24(5): 1036-1041.
HE L P, CHEN B, ZHANG H J, *et al*.. Radiation calibration of EUV space cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1036-1041. (in Chinese)

[7] **王玉鹏，胡秀清，王红睿，等. 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. 光学 精密工程**, 2015, 23(7): 1807-1812.
WANG Y P, HU X Q, WANG H R, *et al*.. Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1807-1812. (in Chinese)

[8] **孙景旭，刘洪兴，许艳军，等. 4 m 直径均匀扩展定标光源[J]. 中国光学**, 2015, 8(5): 823-831.
SUN J X, LIU H X, XU Y J, *et al*.. 4 m extended uniform source for radiometric calibration[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 823-831. (in Chinese)

[9] **李志刚. 基于数字微镜器件的光谱可调谐光源[J]. 发光学报**, 2014, 35(9): 1120-1123.
LI ZH G. Spectrally tunable light source based on digital micromirror device[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(9): 1120-1123. (in Chinese)

[10] YOON H W, GIBSON C E, BARNES P Y. Realization of the national institute of standards and technology detector-based spectral irradiance scale [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(28): 5879-5890.

[11] HEATH D F, WEI Z Y, FOWLER W K, *et al*.. Comparisons of UV spectral radiance calibrations of SBUV/2 type ozone monitoring instruments and traceability to NIST[J]. *SPIE*, 1994, 2282: 313-323.

[12] **陈健，王伟国，高慧斌，等. 紫外探测器的辐射定标及标准传递[J]. 中国光学**, 2012, 5(4): 423-429.
CHEN J, WANG W G, GAO H B, *et al*.. Radiation calibration for UV detectors and standard transferring[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 423-429. (in Chinese)

[13] EPPELDAUER G P, RACZ M. Design and characterization of a photometer-colorimeter standard [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2621-2631.

作者简介：

李福田(1941－)，**男，天津人，研究员**，1964 **年毕业于南开大学**，1980 **年**-1982 **年英国国家物理实验室**(NPL)**访问学者，主要从事空间光学遥感技术、紫外-真空紫外短波段光学及辐射度学方面的研究**。E-il: li_futian@aliyun.com

李志刚(1972－)，**男，吉林长春人，研究员，主要从事空间光学遥感技术及辐射定标方面的研究**。E-mail: lizhg@ciomp.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net