

Gershun 管光谱辐射计设计与性能检测

王晓旭^{1,2}, 李志刚^{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 为满足地面/空间辐射定标和太阳/大气遥感测量的应用需求,开发了一种基于 Gershun 管(光阑筒式结构)的高精度光谱辐射计。介绍了 Gershun 管光谱辐射计的设计,对其探测器光谱响应度、空间响应均匀性、角度响应特性和视场内外辐射响应特性进行了测试,将基于探测器标准的 Gershun 管光谱辐射计与基于光谱辐射光源标准的 Gershun 管光谱辐射计进行了对比,并分析了其标准不确定度范围。实验表明,Gershun 管光谱辐射计的光谱响应度重复性为 0.3%,区域响应度均匀性为 0.3%,角度响应与余弦分布一致性为 0.2%,视场外辐射抑制能力为 2.1×10^{-4} ;Gershun 管光谱辐射计与光谱辐射光源标准对比的标准不确定度为 2.83%,实验测试结果与理论结果的一致性为 0.17%。所设计的 Gershun 管光谱辐射计可以满足应用需求。

关键词 测量;辐射计;辐射定标;Gershun 管光谱辐射计;不确定度

中图分类号 O432.1; TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0612002

Design and Performance Test of Gershun Tube Spectral Radiometer

Wang Xiaoxu^{1,2}, Li Zhigang¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To meet the application requirements of terrestrial/space radiometric calibration and solar/atmospheric remote sensing measurement, a high precision spectral radiometer based on Gershun tube is developed. A design for Gershun tube spectral radiometer is introduced, and the spectral responsivity, spatial response uniformity, angular response property and inside and outside field-of-view radiation response characteristic of the Gershun tube spectral radiometer are tested. The Gershun tube spectral radiometers based on detector standard and spectral irradiation source standard are compared, and the standard uncertainty range is analyzed. Experimental results show that the spectral response repeatability of the Gershun tube spectral radiometer is 0.3%, the regional responsivity uniformity is 0.3%, the consistency of angular response and expected cosine distribution is 0.2%, and the radiation suppression ability outside field-of-view is 2.1×10^{-4} . Standard uncertainty of comparison between Gershun tube radiometer and spectral irradiation source standard is 2.83%, and the consistency of experimental result and theoretical result is 0.17%. The designed Gershun tube spectral radiometer can meet application requirements.

Key words measurement; radiometer; radiation calibration; Gershun tube spectral radiometer; uncertainty

OCIS codes 120.5630; 150.1488

1 引 言

2004 年, Eppeldauer 等^[1]研制了一种光度计-三刺激值色度计,其结构由 Gershun 管(光阑筒式结构)、标准陷阱探测器和滤光片组成,该结构使仪器的光谱响应度不确定度很低。温控滤光片组合(5~8 层)用于

收稿日期: 2016-11-30; 收到修改稿日期: 2017-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61378063)

作者简介: 王晓旭(1990—),男,博士研究生,主要从事紫外光学遥感及辐射定标技术方面的研究。

E-mail: 527537439@qq.com

* 通信联系人。E-mail: lizhg@ciomp.ac.cn

使硅陷阱探测器的光谱响应与国际照明委员会(CIE)规定的色协调函数相匹配,前置放大器将探测器电流转换为电压,电压可用高精度数字电压表读取,动态范围可达 10^{11} ,不确定度低于 0.01%。Heath 等^[2]基于 Gershun 管设计了一种结构简单紧凑的滤光片光谱辐射计,该滤光片光谱辐射计作为定标传递光谱辐射计可对其他遥感仪器进行定标,或作为地基光谱遥感仪器来测量臭氧总量和气溶胶光学厚度。2011 年,Heath 等^[3]建议将天基定标传递光谱辐射计与 Mie 散射光谱反照率辐射标准相组合,用于气候绝对辐射和折射观测平台(CLARREO)任务的空间高精度辐射定标,以获得太阳反射波段载荷光谱反照率定标数据的长期变化。李孟凡等^[4]将 Gershun 管光阑筒式结构应用于星上定标装置,并得到了较好的效果。

本文介绍了所研制的基于探测器标准的 Gershun 管型高精度光谱辐射计的设计和结构,对其性能进行了测试,并将其与光谱辐照度光源标准进行比对,得到了测试结果。

2 高精度光谱辐射计原理及性能

2.1 Gershun 管光谱辐射计结构及原理

Gershun 管光谱辐射计由 Gershun 管和已知光谱辐通量响应度的探测器组成,硅(Si)光电二极管与 Gershun 管光谱辐射计的结构示意图如图 1 所示。探测器采用硅光电二极管(S2281,滨松),硅光电二极管的直径为 10 mm,信号由静电计(Keithley 6517A 型号, Tektronix 公司,美国)读取,将数据经 IEEE488 接口送入计算机,利用计算机对数据进行处理。

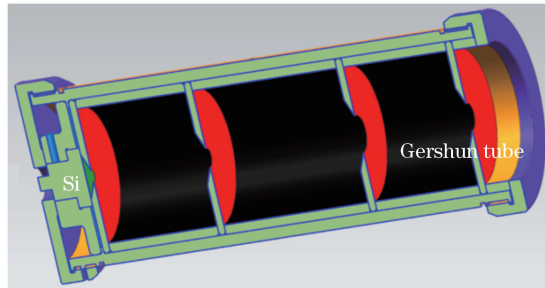


图 1 硅光电二极管与 Gershun 管光谱辐射计的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of Si photodiode and Gershun tube spectral radiometer

在光谱辐亮度测量模式下 Gershun 管光谱辐射计的电流信号 S 可表示为

$$S = \int R(\lambda) L(\lambda) \theta A d\lambda = \theta A \int R(\lambda) L(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 $R(\lambda)$ 为 Gershun 管光谱辐射计的探测器绝对光谱辐射通量响应度,单位为 A/W ; $L(\lambda)$ 为目标光源光谱辐亮度,单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$; $\theta = 2\pi [1 - \cos(\alpha/2)]$ 为 Gershun 管光谱辐射计对目标光源所张立体角,其中 $\alpha = 2\arctan(D/2h)$, D 为 Gershun 管前光阑直径, h 为 Gershun 管前光阑与探测器前光阑的距离; A 为探测器通光面积, $A = \pi d^2/4$, 其中 d 为探测器前光阑直径; λ 为波长,单位为 nm 。当探测器通光面积 A 比较小时,可由名义视场角(FOV) α 较准确地确定 θ , Gershun 管光谱辐射计 FOV 设计示意图如图 2 所示。设计中, $d = 5 \text{ mm}$, $D = 11.6 \text{ mm}$, $h = 169.6 \text{ mm}$, 经计算可得 $\alpha = 3.92^\circ$, $\theta = 0.00367 \text{ sr}$ 。根据测得的电信号、探测器光谱辐通量响应度、Gershun 管几何量及光谱辐亮度光谱分布轮廓并结合(1)式,可得到目标面的光谱辐亮度。

为得到足够高的信噪比,探测器通光面积 A 不能无限小,因此直径分别为 D 和 d 的两个光阑在目标平面圈定的圆面积内的径向光谱辐亮度分布为梯形,而不是矩形,即在目标平面圈定的面积边缘表现为渐晕。Gershun 管光谱辐亮度测量的无晕影 FOV(β)和全 FOV(γ)分别为

$$\beta = 2\arctan \frac{D-d}{2h}, \quad (2)$$

$$\gamma = 2\arctan \frac{D+d}{2h}. \quad (3)$$

由(2)式可得,在给定的设计条件下, $\beta = 2.23^\circ$, $\gamma = 5.60^\circ$, 小于探测器近似余弦特性的 $\pm 6^\circ$ FOV, 符合要求。

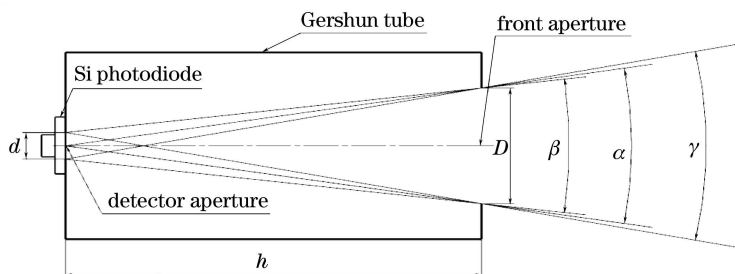


图 2 Gershun 管光谱辐射计 FOV 设计示意图

Fig. 2 Diagram of FOV design of Gershun tube radiometer

为将杂散光的影响最小化且排除光源在视场外的辐射,在 Gershun 管内设置杂散光遮挡光阑,设计图如图 3 所示。挡板 B1 的中心圆直径应较小,且距离探测器孔径光阑不应过远,从而可以在遮挡小角度入射杂散光的同时避免视场减小。挡板 B2 的中心圆直径较大,用于吸收在大入射角下进入前孔径光阑的光。

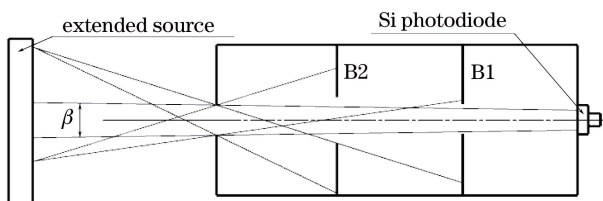


图 3 Gershun 管中杂散光遮挡光阑设计

Fig. 3 Design of baffles for keeping out stray light in Gershun tube

2.2 Gershun 管光谱辐射计性能测试

基于 Gershun 管光谱辐射计的探测器采用未定标的滨松 S2281 硅光电二极管探测器。将美国国家标准技术局(NIST)定标的标准硅光电二极管作为传递标准来对光谱辐通量响应度进行定标,以避免硅光电二极管的传递标准精度在长期使用后变小。定标装置将滨松 300 W 超静氙灯作为光源,光源经平面镜和凹面镜成像于单色仪(McPherson 209)入射狭缝,单色仪出射的单色光经凹面镜和平面镜后会聚于探测器表面,两探测器同时安装在一个电控三维平移台上,以实现比对测量。Gershun 管光谱辐射计探测器的光谱辐射通量响应度定标装置示意图如图 4 所示。

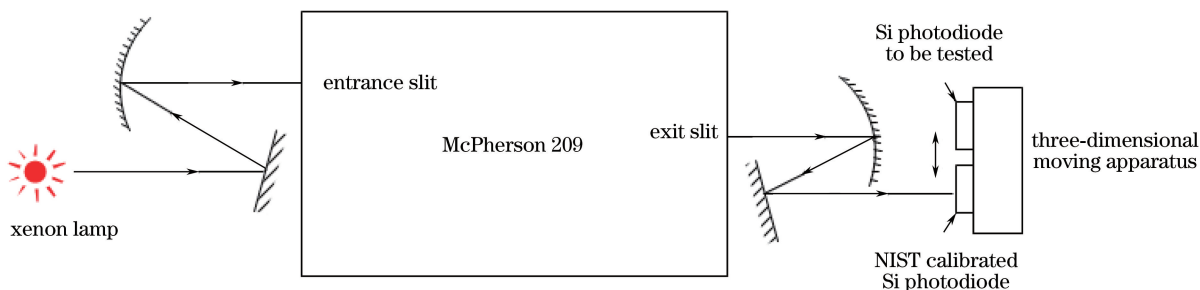


图 4 Gershun 管光谱辐射计探测器的光谱辐射通量响应度定标装置示意图

Fig. 4 Schematic of spectral radiance flux responsivity calibration device of Gershun tube radiometer detector

图 5(a)为待测硅光电二极管光谱辐射通量响应度定标结果(250~1100 nm);图 5(b)为三次定标结果对比图(250~400 nm),计算得到定标结果的重复性优于±0.4%。

为减小 Gershun 管光谱辐射计辐射通量测量模式下的测量不确定度,要求探测器具有较好的区域响应度均匀性。探测器区域响应度均匀性是指探测器光敏面上不同位置对入射光的响应与整个光敏面对入射光响应平均值的偏差。将滨松 300 W 超静氙灯作为光源,单色仪出射的光束经反射镜组聚焦于电控三维平移台上的探测器灵敏面上,逐行扫描灵敏面,测量区域响应度均匀性。光点直径为 1 mm,波长为 500 nm,扫描步长为 1 mm。图 6 为硅光电二极管有效区域辐射通量响应度的归一化分布,可以看出,该探测器有效区域

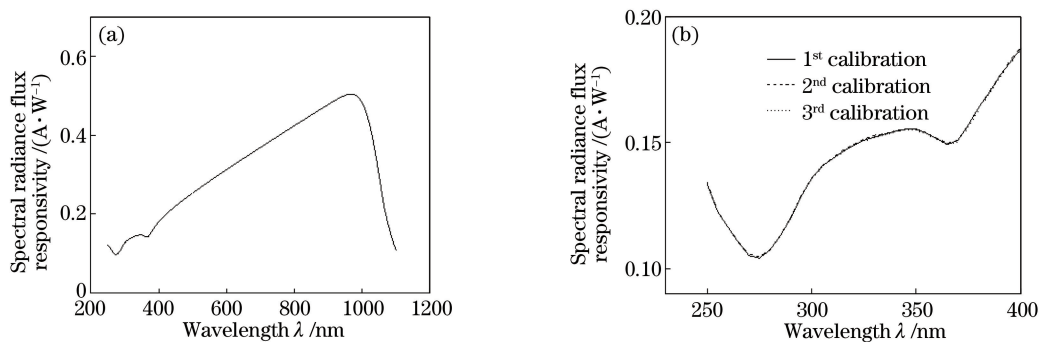


图 5 (a)待测硅光电二极管光谱辐射通量响应度定标结果; (b)定标结果对比图

Fig. 5 (a) Calibration result of spectral radiance flux responsivity of measured Si photodiode; (b) comparison of calibration results

辐射通量响应度非均匀性在±0.3%以内。

为得到硅光电二极管的角度响应特性,将一个白炽灯光源置于探测器表面法线方向 1.5 m 处,并将探测器置于电控二维转台上,使探测器围绕通过探测器前光阑表面的垂直轴在±8°范围转动,测量探测器的归一化角度响应。接着,将探测器绕其表面法线方向转动 90°,以同样方式进行扫描测量。图 7 为硅光电二极管的角度响应度在 0°及 90°位置的归一化角度响应度偏差及其理论余弦曲线,可以看出在±6° FOV 内角度响应度偏差在±0.2%内。

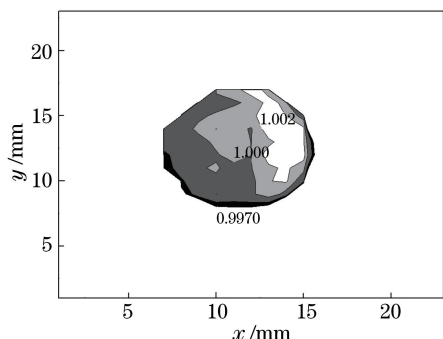


图 6 硅光电二极管有效区域光谱辐射通量响应度的归一化分布

Fig. 6 Normalized distribution of spectral radiation flux responsivity in valid region of Si photodiode

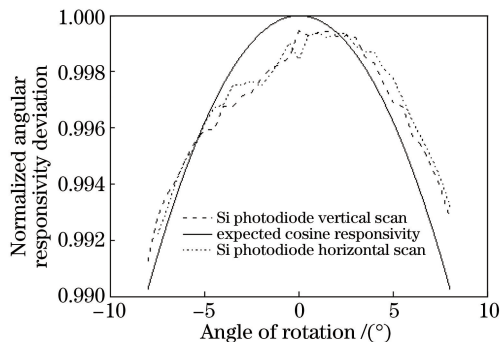


图 7 硅光电二极管在旋转角度为 0°和 90°时的归一化角度响应度偏差及其理论余弦曲线

Fig. 7 Normalized angular responsibility deviation and theoretical cosine curves of Si photodiode when rotation angles are 0° and 90°

在辐亮度模式下,测量 Gershun 管光谱辐射计视场,以确定用于光谱辐亮度测量时的 FOV 和 FOV 外目标遮拦情况。将水平尺寸 m 为 3 mm 的白炽灯作为光源,并将白炽灯安装在 Gershun 管光谱辐射计的光轴方向,白炽灯与 Gershun 管光谱辐射计前光阑的距离 L 为 994 mm,光轴穿过灯丝中心。将 Gershun 管光谱辐射计安装在电控二维转动-平移台上,在垂直于 Gershun 管光谱辐射计光轴的平面内移动±90 mm,测量 Gershun 管光谱辐射计的输出信号。图 8 为 Gershun 管光谱辐射计视场内辐射响应曲线的对数和线性坐标测量结果。当 Gershun 管光谱辐射计在垂直光轴上的位移 n 为 55 mm 时,归一化输出信号强度下降为 2.1×10^{-4} 。此时,FOV 可表示为

$$\theta_{\text{FOV}} = 2\arctan\left\{\frac{[(n-D)/2] - (m/2)}{L}\right\} \quad (4)$$

由(4)式可得,Gershun 管光谱辐射计的全 FOV 约为 5.50°,此时视场外辐射抑制能力大于 2.1×10^{-4} 。

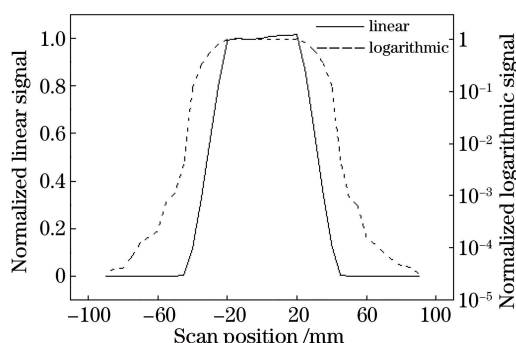


图 8 Gershun 管光谱辐射计视场内外辐射响应曲线(线性及对数坐标)

Fig. 8 Radiation response curves of Gershun tube spectral radiometer inside and outside field-of-view (linear and logarithmic coordinates)

3 与光谱辐射光源标准的比对

目前,在光辐射计量领域有基于光源的辐射标准(源于高温黑体和同步辐射源)与基于探测器的辐射标准(源于低温绝对辐射计)两类标准。低温辐射计技术始于 19 世纪末^[5],目前该技术已可实现光辐射测量的最低不确定度和较宽的光谱范围^[6],成为辐射源和辐射探测器的共同起源,是影响整个光辐射计量技术发展的核心技术^[7]。通过将滤光片辐射计与低温辐射计相结合,可提高黑体辐射源的复现精度。

Gershun 管光谱辐射计所用的硅光电二极管定标技术源于低温绝对辐射计,测量标准传递链路较短,可以获得较低的测量不确定度。为验证 Gershun 管辐射计光谱辐射通量响应度的准确性,将其与基于高温黑体标准的光谱辐射标准光源进行对比测试。图 9 为基于光源的金点黑体法光谱辐照度标准测量传递链路与基于探测器标准的 Gershun 管光谱辐射计传递链路的对比,图 9(a)为基于光源的金点黑体法光谱辐照度标准测量传递链路^[8-10],图 9(b)为基于探测器标准的 Gershun 管光谱辐射计传递链路。用于对比的光谱辐射标准光源是 NIST 定标的 1000 W 光谱辐照度标准石英卤钨灯,其在 500 mm 处的光谱辐照度以变温黑体为标准定标给出,变温黑体的温度通过金点黑体定标给出,在 250~1100 nm 波长范围内的定标不确定度范围为 1.5%~4.2%。石英卤钨灯的电流为 8.5 A,由高精度直流稳流电源供电。

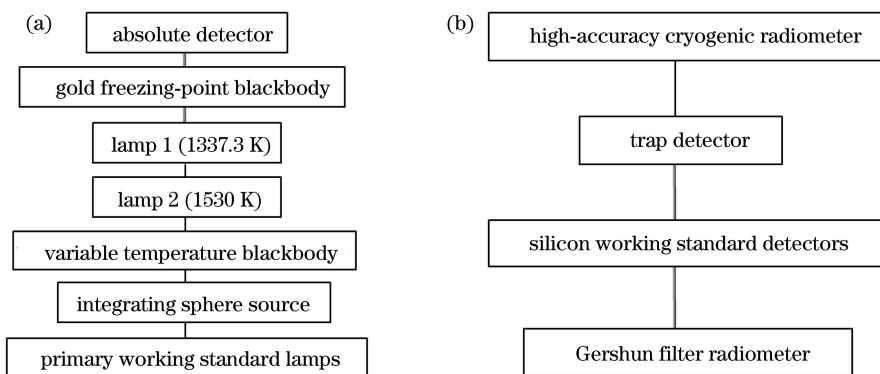


图 9 基于光源的金点黑体法光谱辐照度标准测量传递链路与基于探测器标准的 Gershun 管光谱辐射计传递链路的对比

Fig. 9 Comparison between transfer chains of spectral irradiance standard measurement with light source based on gold freezing-point blackbody and Gershun tube spectral radiometer based on detector standard

Gershun 滤光片光谱辐射计中滤光片的透过率曲线如图 10 所示,峰值透过率为 44.86%。以石英卤钨灯为标准辐照度光源,Gershun 滤光片光谱辐射计的理论输出信号值为

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} AB(\lambda)\tau(\lambda)R(\lambda)d\lambda, \quad (5)$$

式中 $B(\lambda)$ 为波长为 λ 时石英卤钨灯在 500 mm 处的光谱辐照度值; $\tau(\lambda)$ 为 Gershun 滤光片光谱辐射计中滤光片的光谱透过率; $R(\lambda)$ 为滤光片辐射计探测器的光谱辐通量响应度; λ_1 为积分下限, $\lambda_1 = 250 \text{ nm}$; λ_2 为

积分上限, $\lambda_2 = 1100 \text{ nm}$ 。为了计算信号值, 可将(5)式近似表示为

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} AB(\lambda) \tau(\lambda) R(\lambda) d\lambda = A \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda_i) \tau(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda, \quad (6)$$

式中 λ_i 为积分区间内各离散波长, λ_i 的波长范围为 $250 \sim 1100 \text{ nm}$ (此范围外探测器响应度较小且未进行定标), 波长间隔为 1 nm 。根据设计值, 代入各项数据可得探测器理论输出电流应为 95.5 nA , 而实验测得探测器的输出电流为 95.7 nA , 二者相差 0.21% 。考虑到忽略 $250 \sim 1100 \text{ nm}$ 光谱范围外探测器的光谱响应会造成一定的系统误差, 利用 Origin 软件的外插法得到 $250 \sim 1100 \text{ nm}$ 范围外滤光片透过率、探测器光谱响应度及标准光源辐照度值, 估算忽略的信号值, 对实验结果与理论结果的偏差进行修正, 最终可确定实验结果与理论结果的偏差应为 0.17% 。

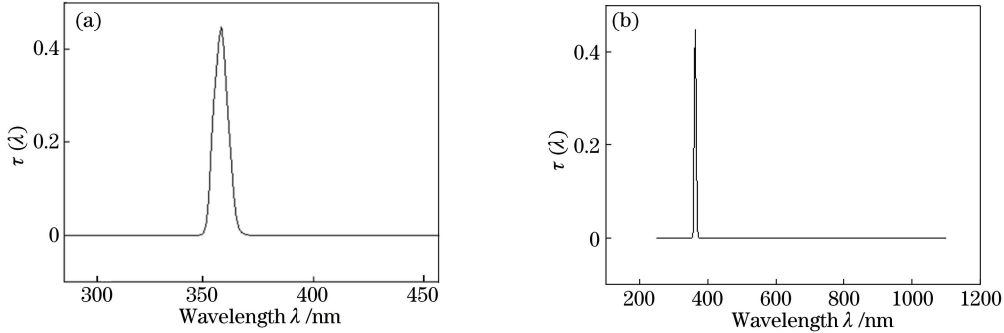


图 10 Gershun 滤光片光谱辐射计中滤光片的透过率曲线。(a) $300 \sim 450 \text{ nm}$; (b) $250 \sim 1100 \text{ nm}$

Fig. 10 Transmittance of filter in Gershun filter spectral radiometer. (a) $300 \sim 450 \text{ nm}$; (b) $250 \sim 1100 \text{ nm}$

下面进行不确定度分析, 按照 NIST 的 TN1297 综合不确定度公式^[11]合成所有不确定度, 可得

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i, x_j), \quad (7)$$

式中 $u_c(y)$ 为合成标准不确定度, $u(x_i)$ 为各不确定度分量, $u(x_i, x_j)$ 为不确定度分量的相关系数。若各不确定度来源不相关, (7)式可表示为

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i). \quad (8)$$

分析不确定度来源, 主要包括: 1) 离散量 $A \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda_i) \tau(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda$ 代替连续量

$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} AB(\lambda) \tau(\lambda) R(\lambda) d\lambda$ 引入的不确定度; 2) 标准光源辐照度不确定度; 3) 滤光片透过率测量不确定度; 4) 硅光电二极管响应度不确定度; 5) Gershun 管光阑加工尺寸公差引入的不确定度; 6) 杂散光及电子采集系统不确定度; 7) 离散化不确定度, 包括将光源辐照度、滤光片透过率及探测器响应度数据离散引入的不确定度。

鉴于以上三组数据曲线相对较平滑, 可将其导入 Origin 软件进行小光谱间隔样条插值(如间隔为 0.02 nm 的插值), 将所得数据(不确定度相对小得多, 可作为相对准确值使用)与原数据比较, 进行不确定度估计。

NIST 石英卤钨灯辐照度的不确定度 ϵ 包括光谱辐照度 NIST 定标不确定度为 ϵ_1 , 不同波长处的 ϵ_1 值如表 1 所示。设石英卤钨灯定位偏差 ($\pm 1 \text{ mm}$) 产生的辐照度不确定度为 ϵ_2 , 根据平方反比定律可得到 $\epsilon_2 = 0.4\%$; 离散化不确定度 ϵ_3 的估计值约为 1.07% 。除 NIST 石英卤钨灯辐照度的不确定度之外, 光阑加工尺寸公差会引入小于 0.4% 的通光面积 A 的不确定度; 滤光片透过率测量不确定度 δ 包括 Lambda950 分光光度计测量滤光片透过率不确定度 δ_1 和估计离散化不确定度 δ_2 , $\delta_1 \approx 0.2\%$, $\delta_2 \approx 0.68\%$ 。硅光电二极管响应度不确定度 σ 包括作为传递标准的 NIST 定标硅光电二极管不确定度 σ_1 、Gershun 管光谱辐射计硅光电二极管定标不确定度 σ_2 和离散化不确定度 σ_3 。NIST 硅光电二极管定标相对不确定度如图 11 所示, 可以看出 σ_1 的范围为 $0.2\% \sim 1.7\%$ (扩展不确定度包含因子 $k=1$)。Gershun 管光谱辐射计硅光电二极管定标不确定度 σ_2 约为 0.5% (包括实验中定标光源稳定性不确定度 0.4% 与单色仪波长扫描精度 0.3%), 离散化不

确定度 σ_3 约为 0.41%。根据杂散光引入的不确定度及上文内容,可以得到 Gershun 管光谱辐射计视场外杂散辐射引入的不确定度小于 0.021%;采用实验平台染黑和实验环境黑布遮挡等手段,可将视场内杂散辐射影响降低至 0.2%。采用防干扰高频线及 Keithley6517A 静电计,得到 18~28 °C 时电子系统的不确定度小于 0.1%。

表 1 NIST 辐照度标准灯定标不确定度($k=1$)

Table 1 Calibration uncertainty of NIST irradiance standard lamp ($k=1$)

Wavelength /nm	250	300	350	400	500	600	700	800	1000
$\epsilon_1/\%$	4.2	3.3	2.3	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

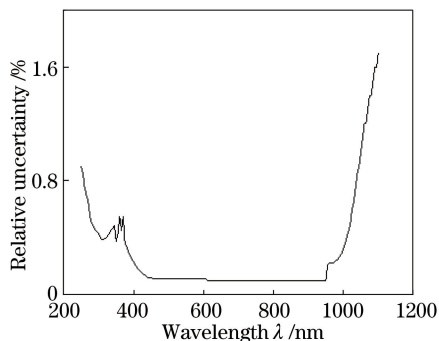


图 11 NIST 硅光电二极管定标相对不确定度($k=1$)

Fig. 11 Calibration relative uncertainty of NIST Si photodiode ($k=1$)

将以上各个不确定度数据代入(7)式,Gershun 管光谱辐射计辐射定标测试各项不确定度及总合成标准不确定度如表 2 所示。

表 2 Gershun 管光谱辐射计辐射定标测试得到的各项相对不确定度及合成标准不确定度($k=1$)

Table 2 Relative uncertainty and combined standard uncertainty of Gershun tube spectral radiometer radiation calibration ($k=1$)

Source	Relative uncertainty /%
Irradiance uncertainty of NIST lamp	2.57
Responsivity uncertainty of Si photodiode	0.82
Measurement uncertainty of filter transmittance	0.71
Uncertainty of detector aperture area	0.40
Stray light and scattered light	0.20
Uncertainty of electronic reading system	0.10
Overall uncertainty	2.83

综合以上分析,并代入已定系统误差修正,得到 Gershun 管滤光片辐射计与辐射光源标准比对理论非一致性应小于 2.83%;实验测得二者的一致性为 0.17%,符合理论预期。

4 结 论

基于 Gershun 管、带通滤光片和已知光谱辐射通量响应度的硅光电二极管探测器设计并搭建了 Gershun 管滤光片光谱辐射计。测试得到探测器响应度重复性优于 0.3%,区域响应度均匀性优于 $\pm 0.3\%$,角度响应与余弦分布的一致性为 0.2%,视场外辐射抑制能力大于 2.1×10^{-4} 。为验证 Gershun 管光谱辐射计光谱辐射通量响应的准确性,将基于低温辐射计的 Gershun 管光谱辐射计与基于高温黑体的光谱辐射光源进行比对测试,得到二者的一致性为 0.17%。分析得到 Gershun 管辐射定标综合不确定度为 2.83%,实验结果符合不确定度的理论预期。

Gershun 管滤光片光谱辐射计的设计考虑了空间应用环境,可作为传递标准辐射计用于地面/空间辐射定标和太阳/大气遥感测量。

参 考 文 献

- [1] Eppeldauer G P, Rácz M. Design and characterization of a photometer-colorimeter standard[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2621-2631.
- [2] Heath D F, Ahmad Z. Multipurpose spectroradiometer for satellite instrument calibration and zenith sky remote sensing measurements[C]. *SPIE*, 2001, 4150: 115-123.
- [3] Heath D F, Georgiev G. Characteristics of a new type of Mie scattering volume diffuser and its use as a spectral albedo calibration standard for the solar reflective wavelength region[C]. *SPIE*, 2011, 8153: 81530V.
- [4] Li Mengfan, Xu Weiwei, Zou Peng, *et al.* Response characteristic of the ratioing radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212005.
李孟凡, 徐伟伟, 邹 鹏, 等. 比值辐射计响应特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212005.
- [5] Parr A C, Datla R U, Gardener J L. *Optical radiometry*, vol 41. *Experimental methods in the physical sciences*[M]. Ireland: Elsevier Inc, 2005: 35-96.
- [6] Martin J E, Fox N P, Key P J. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements[J]. *Metrologia*, 1985, 21(3): 147-155.
- [7] Bai Shan. Research on the measurement techniques of detector spectral response based on cryogenic radiometer[D]. Beijing: National Institute of Metrology, China, 2012: 1-4.
白 山. 基于低温辐射计的探测器光谱响应度相关测量技术研究[D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2012: 1-4.
- [8] Mielenz K D, Robert D, Saunders A C P. The 1990 NIST scales of thermal radiometry[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1990, 95(6): 621-629.
- [9] Walker J H. *Spectral irradiance calibrations* [M]. Washington: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1987.
- [10] Kostkowski H J, Erminy D E, Hattenburg A T. High-accuracy spectral radiance calibration of tungsten-strip lamps [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1970, 41: 111-127.
- [11] Zhou Lei, Zheng Xiaobing. High-accuracy spectrometer for measurement of spectral transmissivity[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(12): 32-38.
周 磊, 郑小兵. 高精度分光光度计测量光谱透过率[J]. *光电工程*, 2006, 33(12): 32-38.