

doi:10.3788/gzxb20184708.0804002

基于积分球光源的大动态范围辐射标准 传递技术研究

刘辉^{1,2}, 陈洪耀¹, 李佳伟¹, 包诗薇^{1,2}, 杨宝云¹, 张黎明¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要:为了拓展目前实验室辐射标准的动态范围,提出了基于积分球光源的大动态范围辐射标准传递技术.即在等色温调节的前提下,结合可调光阑和基于大动态范围响应线性硅探测器的监视辐射计将辐照度标准灯-漫射板系统的光谱辐亮度工作标准传递到大动态范围可调节积分球光源各个亮度等级,从而实现辐射标准的动态范围拓展.通过研制大动态范围多级可调节光阑并分析探讨光谱匹配、硅探测器的响应线性对辐射标准传递精度的影响,最终在 400~2 500 nm 范围内,积分球光源在 6 个量级内的辐射标准不确定度有望达到 4.3%~6.1%,这对光辐射测量定量化发展具有重要的意义.

关键词:辐射定标;积分球光源;线性定标;可调光阑;不确定度

中图分类号:O432

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0804002-8

Large Dynamic Range Radiation Standard Transmission Research Based on Integrating Sphere Source

LIU Hui^{1,2}, CHEN Hong-yao¹, LI Jia-wei¹, BAO Shi-wei^{1,2}, YANG Bao-yun¹, ZHANG Li-ming¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Due to the wide spectrum range and the good performance of exit surface uniformity and angle uniformity, integrating sphere is close to the ideal Lambert uniform light source. In this paper, the principle of large dynamic range radiation standard transmission based on integrating sphere light source was proposed. That is to say, under the premise of equal color temperature adjustment, a monitoring radiometer based on a linear silicon detector with a large dynamic range response, and an adjustable aperture can transfer the spectral radiance working standards of the irradiance standard lamp-solar diffuser system to a large dynamic range adjustable integral sphere light source. Thus, the dynamic range of radiation standards can be expanded. Herein, we prepared a large dynamic adjustable aperture and further discussed the spectral matching and the impact of silicon detector nonlinearity on the accuracy of radiation standard transmission. Finally, in spectrum range of 400~2 500 nm, the uncertainty of 6 orders of magnitude radiation standard is 4.3%~6.1% in integrating sphere source. It is of great significance to the quantitative development of radiometric.

Key words: Radiometric calibration; Integrating sphere source; Linearity calibration; Adjustable aperture; Uncertainty

OCIS Codes: 040.5160; 350.4800; 250.4745

基金项目:中科院科研装备项目(No.YZ201125)和高分专项(No.GFZX0401430405)资助

第一作者:刘辉(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为光电检测、辐射标准传递等.Email:liuhui2011hello@126.com

导师(通讯作者):张黎明(1958-),男,研究员,博导,主要研究方向为光学传感器辐射定标与标准传递等.Email:lmzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期:2018-03-06;录用日期:2018-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着光电探测技术的快速发展,微光遥感和暗目标识别等已经成为一个新兴的研究方向.对微光信号探测的研究不仅可以应用在气象观测领域用以提高气象的预报时效,同时其在监测、人口数量和密度预报、社会经济发展状况分析以及能源电量消耗等领域的应用具有至关重要的作用^[1-7].光电测量数据定量化为数据赋予了物理含义,为测量数据的应用和比对提供了依据和精度保障.因此,微光测量设备的辐射定标对微光信号的应用具有重要意义.

随着电替代和光电探测技术的发展,国际标准组织和我国都已经开展了基于低温辐射计的高精度辐射定标和标准传递技术的研究.可见光波段低温辐射计测量光辐射的不确定度为 $0.005\% \sim 0.02\%$,而与之对应的探测器传递标准的不确定度也达到了 $0.01\% \sim 0.03\%$ ^[8-11].目前实验室光辐射工作标准多为辐照度标准灯-漫射板系统,其动态范围不方便调节^[12].而微光传感器需要的辐射标准动态范围在6个量级左右^[13-14];所以,要想实现微光信号探测仪器的辐射定标就需要拓展目前辐射标准的动态范围,但辐射标准动态范围的拓展需要建立相应的传递链路和辐射源.目前,虽然硅探测器响应度高、响应波段宽、线性范围大,基于它的辐射标准传递可以达到8~9个量级^[15-16],但与其相应的辐射源还没有相关研究报道.

由于工作光谱波段宽,出光口的辐亮度面均匀性和角度均匀性好,积分球光源是接近理想朗伯体的均匀光源,也是光学测量仪器实验室辐射定标的主要设备.通过增大其出射辐亮度的调节范围,可以作为大动态范围辐射标准.SADLER F B, LESSARD M R.等报道了FOCAL3实验室定标装置,可实现积分球辐射辐射量调节范围3个量级的调节,但是没有报道相关的工作原理和定标精度^[17].国内研制的积分球光源动态范围在2~3个量级,还不能满足微光信号辐射定标的动态范围需求^[18-20].因此,为了满足微光测量仪器的辐射定标要求,需要扩大积分球辐射源出射辐亮度的调节范围并实现连续光谱辐射标准传递.如何实现积分球出射辐亮度大动态范围的调节,及如何对低亮度积分球光源进行标定是实现辐射标准动态范围拓展的难点和关键.

本文介绍了大动态范围辐射标准传递的原理,然后介绍了辐射标准传递过程中光源光谱差异、探测器非线性标校和大动态范围可调光阑等关键技术的研究进展,最后评估了大动态范围积分球辐射源输出辐亮度的不确定度.

1 大动态范围辐射标准传递原理

为满足微光传感器辐射定标要求,需要将辐亮度标准从高端传递到低端,使辐射标准动态范围在6个量级范围内可调节,在可见光波段辐亮度动态范围在 $10^{-1} \sim 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$.为了实现6个量级的大动态范围可调和高精度辐射标准传递,积分球光源需要由积分球球体、内置光源、外置光源-可调光阑以及大动态范围响应线性监视辐射计组成.内置光源与外置光源可调光阑相匹配可以实现大动态范围的连续输出.调节过程中光谱保持一致,即等色温调节,是实现辐射标准高精度传递的前提.

大动态范围辐射标准传递的基本原理如图1.首先需要积分球光源进行单一辐亮度定标.将积分球光源出射辐亮度调至与辐照度标准灯-漫射板系统辐亮度接近 $1:1$,利用光谱辐射计在响应值小范围变化时可保持良好的线性的特点,将辐照度标准灯-漫射板系统的辐射标准传递到积分球光源.此时积分球光源出射辐亮度可通过式(1)计算得到.其中 $L_{\text{std}}(\lambda)$ 表示辐照度标准灯-漫射板系统的标准光谱辐亮度; $DN_{\text{std}}(\lambda)$ 表示光谱辐射计对辐照度标准灯-漫射板系统定标时的响应值; $DN_{\text{sphere}}(\lambda)$ 表示光谱辐射计将辐射标准传递到积分球时的响应值; $L_{\text{sphere}, p=1}(\lambda)$ 表示计算得到的积分球光源出射光谱辐亮度,其下标 $p=1$ 表示以此时辐亮度为积分球光源调

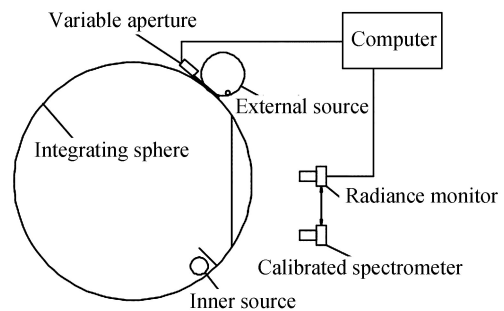


图1 大动态范围辐射标准传递示意图
Fig.1 Schematic diagram of large dynamic radiation standard transmission

节时的基点, p 为积分球光源等色温调节后辐亮度与基点辐亮度的比值.

$$L_{\text{sphere}, p=1}(\lambda) = L_{\text{std}}(\lambda) \frac{\text{DN}_{\text{sphere}}(\lambda)}{\text{DN}_{\text{std}}(\lambda)} \quad (1)$$

$$L_{\text{sphere}, p}(\lambda) = p \cdot L_{p=1}(\lambda) \quad (2)$$

在等色温条件下,通过调节 p 值,便可以实现积分球输出辐亮度的调节.通过基于大动态范围线性探测器的监视辐射计,便可以得到辐射计响应范围内积分球出射光源任意 p 值对应的光谱辐亮度,光谱辐亮度值可通过式(2)计算得到,但式(2)中 p 值需要确定.积分球上监视辐射计由宽波段响应范围的硅探测器、孔径光阑、视场光阑和带通滤光片等组成.监视辐射计在积分球各亮度等级的等效辐亮度如式(3)所示,其在基点的等效辐亮度如式(4)所示,通过比较可以得到 p 值,如式(5)所示,其中 $R(\lambda)$ 为监视辐射计的相对光谱响应函数, $L_{\text{det}, p}$ 为 p 值对应的监视辐射计的等效辐亮度.

$$L_{\text{det}, p} = p \frac{\int L(\lambda)_{p=1} R(\lambda) d\lambda}{\int R(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

$$L_{\text{det}, p=1} = \frac{\int L(\lambda)_{p=1} R(\lambda) d\lambda}{\int R(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

$$p = \frac{L_{\text{det}, p}}{L_{\text{det}, p=1}} \quad (5)$$

通过以上分析可以看出,通过积分球光源实现高精度大动态辐射标准传递,有三个关键点:等色温调节、硅探测器的线性以及 p 值的调节范围.等色温调节是前提条件,只有保持在整个调节范围内的光谱一致性,通过监视辐射计计算得到的 p 值才有意义.等色温调节可通过积分球内光源的严格筛选和外置光源-可调光阑机构来实现.硅探测器具有良好的响应动态范围和响应线性,在 6 个量级内响应非线性引入的误差有多大,需要通过线性检测进行分析.要实现积分球光源出射辐亮度,即 p 值在 6 个量级范围内的调节,必须研制能使外置光源进入积分球内光通量在 5 个量级范围内调节的可调光阑.

2 卤钨灯的光谱匹配

积分球光源以卤钨灯为照明光源,在调节过程中为了保持等色温,需要对灯泡进行筛选.积分球通常采用内置光源加外置光源的方式.外置光源通过可调节光阑控制进入积分球内的光通量,实现积分球出射辐亮度的调节,在调节过程中光谱保持不变,只需要使外置光源与内置卤钨灯光谱一致即可.通过内置灯泡数量进行辐亮度调节时,相同型号的灯泡,即使同一批次,由于灯丝长度等差异,在相同工作电流时,光谱也不可能完全一致,在使用前需要对灯泡进行光谱匹配,以确定每个灯泡的工作电流.

在实验室搭建了如图 2 所示实验装置,对欧司朗 400W 卤钨灯进行光谱匹配.实验装置由配备水冷装置的积分球、高精度稳流电源和光谱辐射计组成.在实验过程中,确保外界恒温、恒湿的条件下,首先通过光谱辐射计测量任意一个灯泡 80% 额定功率工作时的光谱作为参考光谱.然后更换灯泡,将另外一个灯泡开至相同功率,稳定 30 min 后,通过光谱辐射计测量积分球出射光谱,比较匹配灯泡相对光谱与参照灯泡相对光谱的相对偏差.当相对偏差超过 0.5% 时,调整电流值,调整次数超过 3 次无法满足要求更换灯泡.

通过在 80% 额定功率附近微调卤钨灯的工作电流,匹配了五个卤钨灯的光谱,灯泡在 400~2 500 nm 波段的光谱差异优于 0.4%,各波段光谱的相对偏差如

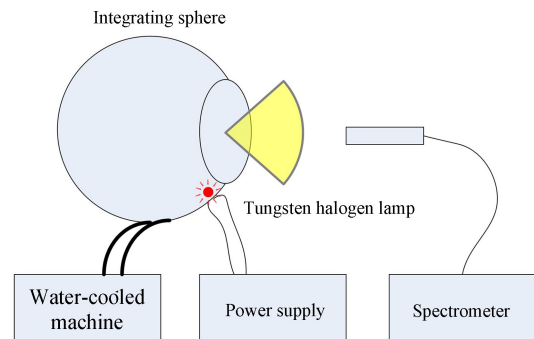


图 2 光谱匹配实验装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of spectral matching experiment device

图 3 所示,各个灯泡匹配后的参数如表 1 所示.

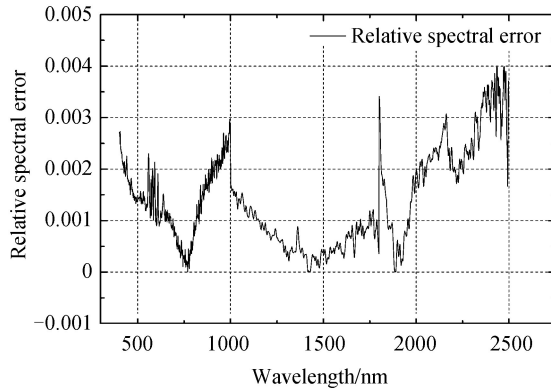


图 3 光谱匹配后各灯泡之间的光谱相对偏差
Fig.3 Relative spectral error after spectral matching

表 1 光谱匹配后个灯泡的工作电流

Table 1 Lamp work current afterspectral matching

Lamp number	400-01	400-02	400-03	400-04	400-05
Work current/A	10.70	10.67	10.73	10.8	10.68

3 硅探测器大动态范围内响应非线性检测

硅探测器是光电探测领域使用最多的光电器件,其响应非线性的研究也有很长时间的的发展,本课题组也在硅探测器大动态范围响应非线性方面做了相关研究^[16].在实验室通过如图 4 所示的实验装置,基于光通量叠加法,通过时间逻辑控制 LED(峰值波长 632 nm,带宽 20 nm)点亮、熄灭和采集数据,在 LED 的注入电

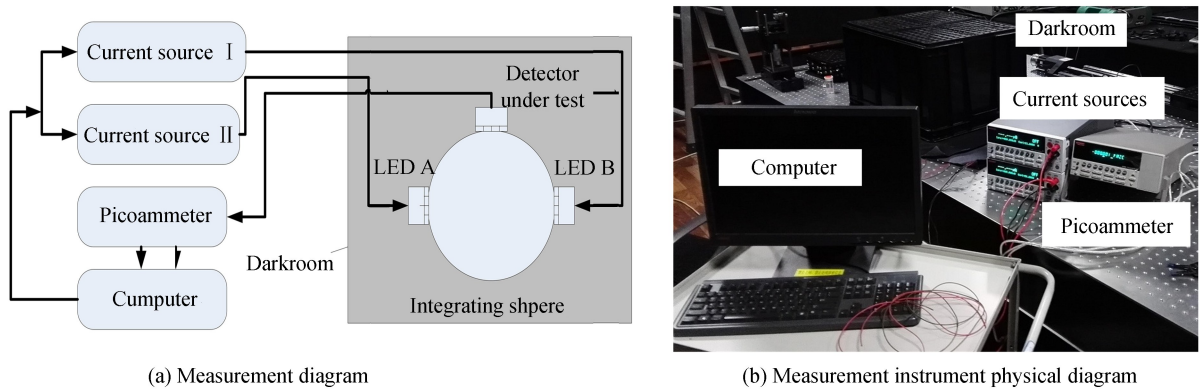


图 4 硅探测器线性测量装置
Fig.4 The Si detectors linearity measurement instrument

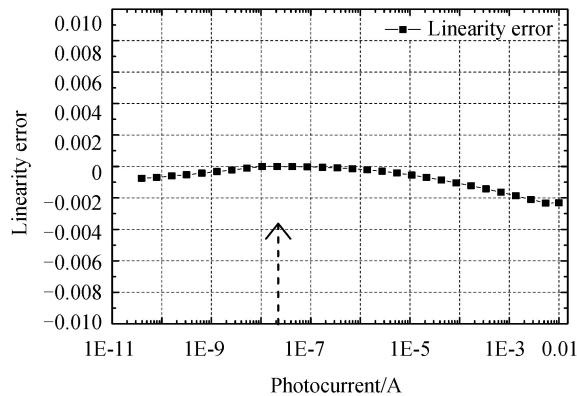


图 5 硅探测器的线性误差
Fig.5 Linearity error of silicon detector

流 $2.2 \times 10^{-6} \sim 0.57$ A调节范围内,测量了硅探测器 S2281 响应电流从 $3.92 \times 10^{-11} \sim 10^{-2}$ A 范围内近 9 个量级的线性.实验结果表明,硅探测器在 9 个量级的动态范围内探测器引入的非线性误差为 0.23%,如图 5 所示,证明了硅探测器良好的响应线性.

4 可调光阑的研制

常规彩虹光阑由于机械结构的限制,通光口径不能完全关闭,能实现的动态范围在 2~3 个量级左右.为了实现大动态范围的调节,可调光阑调节范围需要在 4 个量级以上,设计了基于指数型滑动叶片、滚珠丝杆和闭环步进电机的可调光阑,可调光阑的模型图如图 6 所示.

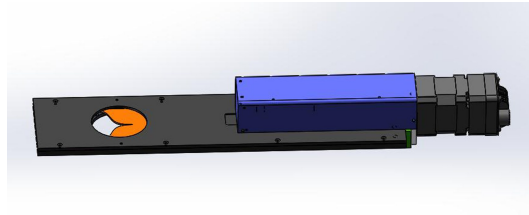


图 6 可调光阑模型图

Fig.6 Model diagram of adjustable aperture

可调光阑的调节范围和调节重复性是维持积分球光源动态范围和调节精度的重要因素.为了验证可调光阑设计的性能,在实验室对其调节范围和调节重复性进行测试.在实验室搭建了如图 7 所示的性能测试装置,该装置由积分球光源、消杂散光光阑、匀光积分球和监视辐射计等组成.其中监视辐射计同样由宽动态响应范围的硅探测器、孔径光阑、视场光阑和带通滤光片等组成.将可调光阑安装在匀光积分球口并用积分球光源提供稳定输入信号.测量方式与可调光阑工作时使用方式相同,从而避免了测量通光面积,可以直接得到可调光阑调节积分球辐亮度的调节范围,使实验装置简化.

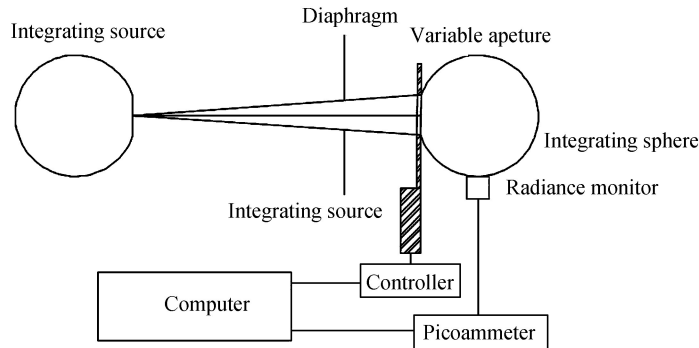


图 7 可调光阑动态范围实验室测量装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of adjustable aperture dynamic range laboratory measurement device

可调光阑在测试过程中,首先将积分球光源稳定 1 h,然后将可调光阑关闭,监视辐射计测量暗电流,采集器每次采集 5 条数据取平均值;滑动叶片每次步进 0.1 mm,且每步进一次监视辐射计采集一次电流值;采集完一次后如果可调光阑口没有完全打开则重复上一步,如果完全打开则采集电流后,将可调光阑调节至关闭状态,并再次采集暗电流.根据式(6),可以计算出步进距离对应的调节范围,计算结果如图 8 所示.其中 $t_{s,l}$ 表示移动 l 距离时可调光阑的通光比, $\overline{I_l}$ 、 $\overline{I_{l_{\max}}}$ 表示移动距离 l 和可调光阑完全打时监视辐射计测得的电流平均值, $\overline{I_{\text{dark}}}$ 为可调光阑完全关闭时监视辐射计测得暗电流平均值.重复以上测试流程,并统计每个步进位置处透过率数据相对标准偏差,来表示可调光阑的非重复性,测试结果如图 9 所示.

$$t_{s,l} = \frac{\overline{I_l} - \overline{I_{\text{dark}}}}{\overline{I_{l_{\max}}} - \overline{I_{\text{dark}}}} \quad (6)$$

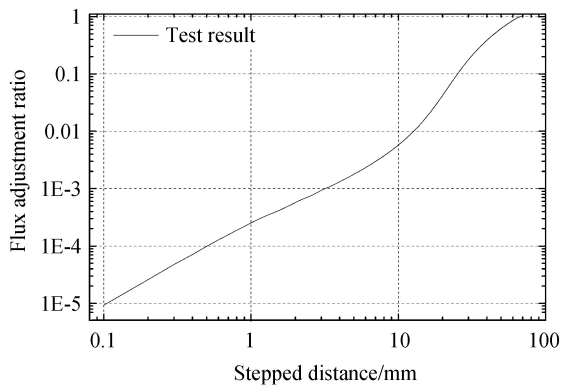


图8 可调光阑调节范围测试结果

Fig.8 The test results of adjustable aperture range

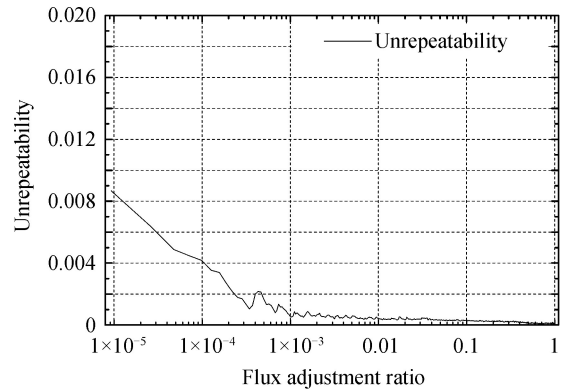


图9 可调光阑非重复性

Fig.9 Non-repeatability of the adjustable aperture

在实验室测量了可调光阑从完全关闭状态到完全打开状态对匀光积分球辐亮度的调节动态范围,测得的可调光阑可实现通光比调节范围 $9.33 \times 10^{-6} \sim 1.0$,通过拟合步进距离与通光比之间的关系可以实现可调光阑的自动化控制.在此范围内非重复性在 1% 以内,在 $4.7 \times 10^{-5} \sim 1.0$ 范围内非重复性优于 0.5%,在此范围内可以满足等色温调节对可调光阑四个量级调节范围需求.闭环步进电机和滚珠丝杆有很高的精度,可调光阑的重复性在通光比 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 范围内相对较差,主要是由于滑动叶片与光阑之间的间隙导致.在此范围内可调光阑开口非常小,滑动叶片有一定的厚度,在测试过程中滑动叶片移动到相同步进位置时在间隙内与上次测量位置的偏差导致通光比的差异.

5 分析与讨论

根据研制的大动态范围可调光阑的性能,积分球光源通过内置光源与外置光源-可调光阑相互配合,可以实现 6 个量级输出辐亮度的等色温多级调节.基于硅探测器的监视辐射计通过视场光阑、孔径光阑等参数的设计,使硅探测器在积分球光源输出辐亮度调节范围内的响应值与非线性检测的响应值范围相匹配,可以实现将定标基点的辐射标准高精度的传递到各个亮度等级的出射辐亮度,从而实现大动态范围的辐射标准传递.

积分球光源的出光口辐亮度从辐照度标准灯-漫射板系统传递过来,其中辐照度标准灯溯源于中国计量科学研究院,由定标检测报告可知在 $400 \sim 2500$ nm 范围内光谱辐照度的不确定度分别为 $2.4\% \sim 4.8\%$ ($K=2$),其中 K 为置信因子, $K=2$ 表示所测结果的置信度为 95%,以下不确定度分析默认 $K=2$.实验室建立了高精度 BRDF 绝对测量装置,漫反射板双向反射分布函数引入不确定度为 1.0% ^[21-22],同时辐照度标准灯-漫射板系统在定标过程中还受到室内杂散光、灯板距离等因素的影响,其引入不确定度为 1%.

光谱辐射计为国内外遥感领域广泛使用的 ASD (Analytical Spectral Devices) 光谱辐射计,如图 10 所示,其在响应值小范围内具有良好的线性,故其将辐射标准传递到积分球光源出射辐亮度参考点引入的不确



图10 ASD 光谱辐射计实物图

Fig.10 The physical diagram of ASD spectro radiometer

定度可以忽略.光谱仪引入不确定度主要有定标时信噪比引起,根据实验室光谱仪定标时信噪比分析,在不同波长处信噪比不同,引入不确定度为 0.1%~1.0%.积分球光源通常采用卤钨灯,卤钨灯通过高精度电源供电时其具有很好的稳定性,其非稳定性可优于 0.2%.相同型号的灯泡,即使同一批次,光谱也不可能完全一致,在使用前需要在允许的误差范围内对灯泡进行筛选,这里匹配后光源之间光谱差异引入不确定度取 0.8%.

可调光阑在积分球光源中的作用是调节辐亮度,监视辐射计的作用是辐射标准传递.可调光阑的非重复性影响的是辐射标准的复现性,其引入不确定度为 1%.根据课题组对硅探测器 S2281 非线性的研究进展,在 632 nm 处非线性引入不确定度为 0.4%.加拿大国家研究委员会(NRC)通过对该系列硅探测器的非线性研究,表明该系列硅探测器的线性对波长不敏感^[23].考虑到目前没有试验验证,所以这里监视辐射计非线性引入不确定度取 1.0%.通过视场光阑、孔径光阑等参数设置可使监视辐射计在积分球光源出射辐亮度调节范围内的有较高的信噪比,监视辐射计响应值引入的不确定度取 0.2%.

积分球光源通过控制开口比和内置光源的布局,可实现出光口辐亮度优于 2%的面非均匀性和角度非均匀性.据此分析,在等色温调节的前提下,基于可调光阑和大动态范围线性硅探测器的辐射传递方法,积分球光源在 400~2 500 nm 范围内 6 个量级的辐射标准传递不确定为 4.3%~6.1%,分析结果如表 2 所示.

表 2 大动态范围可调积分球光源输出辐亮度不确定度分析
Table 2 Radiance uncertainty of large dynamic range adjustable integrating sphere

Sources	Uncertainty(K=2)
Irradiance of standard lamp	2.4%~4.8%
BRDF measurement	1.0%
Stray light	1.0%
Spectrometer SNR	0.1%~1.0%
Spectral error	0.8%
Source stability	0.2%
Repeatability of adjustable aperture	1.0%
Detector nonlinearity	1.0%
Detector SNR	0.2%
Planar uniformity of integrating sphere	2.0%
Angular uniformity of integrating sphere	2.0%
Combined uncertainty	4.3%~6.1%

6 结论

本文介绍了基于积分球光源的大动态范围辐射标准传递原理,并指出了辐射标准大范围高精度传递的关键环节.通过实验分析了光谱匹配差异和硅探测器的响应线性,并研制了大动态范围多级可调光阑.在实验室辐照度标准灯-漫射板系统的基础上,通过控制传递过程中的误差源,给出了实现 6 个量级辐射标准的传递技术;并对积分球光源输出辐射标准的不确定度进行了评估,其不确定度有望达到 4.3%~6.1%.这不仅实现了辐射标准大动态范围拓展,而且对光辐射测量定量化发展具有重要的意义.

参考文献

- [1] ZHANG Peng, YANG Lei, GU Song-yan, *et al.* Meteorological requirements for the early-morning-orbit satellite[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2015, **5**(2): 6-12.
张鹏,杨磊,谷松岩,等.晨昏轨道卫星的气象应用需求分析[J].气象科技进展,2015,**5**(2):6-12.
- [2] YANG Mei, WANG Shi-xin, ZHOU Yi, *et al.* Review on applications of DMSP/OLS night-time emissions data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, **26**(1): 45-51.
杨眉,王世新,周艺,等. DMSP/OLS 夜间灯光数据应用研究综述[J].遥感技术与应用,2011,**26**(1):45-51.
- [3] WANG He-rao, ZHANG Xin-qi, YUAN Tao. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Progress in Geography*, 2012, **31**(1): 11-19.
王鹤饶,郑新奇,袁涛. DMSP/OLS 数据应用研究综述[J].地理科学进展,2012,**31**(1):11-19.
- [4] CAO Chang-yong, SHAO Xi, UPRETY S. Detecting light outages after severe storms using the S-NNP/VIIRS Day/Night band radiances[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(6): 1582-1586.
- [5] WU Jian-sheng, NIU Yan, PEN Jian, *et al.* Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in china based on DMSP/OLS nighttime light[J]. *Geographical Research*, 2014, **33**(4): 625-634.

- 吴建生,牛妍,彭建,等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995-2009 年中国地级市能源消费动态,2014,**33**(4):625-634.
- [6] CAO Chang-yong, BAI Yan. Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**: 11915-11935.
- [7] STRAKA W C., SEAMAN C J., BAUGH K, *et al.* Utilization of the suomi national polar-orbiting partnership(NNP) visible infrared imaging radiometer suite(VIIRS) Day/Night band for arctic ship tracking and fisheries management[J]. *Remote Sensing*, 2017, **7**: 971-989.
- [8] HOYT C, FOUKAL P V. Cryogenic radiometer and their application to metrology[J]. *Metrologia*, 1991, **28**: 163-167.
- [9] GENTILE T R, HOUSTON J M, HARDI JE S, *et al.* National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(7): 1056-1068.
- [10] ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, ZHANG Jun-ping, *et al.* High precision optical radiation calibration and standard transfer method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(12): 1341-1344.
郑小兵,吴浩宇,张俊平,等. 高精度光辐射定标和标准传递方法[J]. 科学通报,2000,**45**(12):1341-1344.
- [11] LI Jian-jun, ZHENG Xiao-bing, LU Yun-jun, *et al.* Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350nm and 1064nm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6273-6278.
李建军,郑小兵,卢云君,等. 硅陷阱探测器在 350-1064nm 波段的绝对光谱响应度定标[J]. 物理学报,2009,**58**(9): 6273-6278.
- [12] CHEN Hong-yao, ZHANG Li-ming, ZOU Peng, *et al.* 400~900 nm spectral irradiance of cryogenic radiometer based irradiance standard lamp using system level calibration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3349-3353.
陈洪耀,张黎明,邹鹏,等. 系统级定标方法实现基于低温辐射计的标准灯 400~900nm 波段光谱辐照度[J]. 光学学报, 2010,**30**(11):3349-3353.
- [13] LIAO L B, STEPHANIE W, STEVE M, *et al.* Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**: 12705-12718.
- [14] LEE Shih-yan, SUN Cheng-bo, CHIANG V, *et al.* An overview of NASA VCST SNPP VIIRS day-night band on-orbit calibration methodology[C]. SPIE, 2014, **9218**: 0801-0815.
- [15] AMBLER T, CHEN How-more. Beamcon III, a linearity measurement instrument for optical detectors[J].*Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1994, **99**(6): 751-755.
- [16] LIU Hui, CHEN Hong-yao, SI Xiao-long, *et al.* Linear calibration of wide dynamic range response of silicon detectors based on double LEDs light source integrating sphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(9): 0904001.
刘辉,陈洪耀,司孝龙,等. 基于双 LED 光源积分球的硅探测器宽动态范围响应线性定标[J]. 光学学报,2017,**37**(9): 0904001.
- [17] SADLER F B, LESSARD M R, COGGERL L. Facility for optical calibration at low level light (FOCAL3) [C]. Proceedings of 33rd Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, 2008, 292: 87-91.
- [18] LI Bao-yong, REN Jian-wei, WAN Zhi. Research of large aperture integrating sphere used in the radiative calibration for space remote sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, **24**(3): 464-469.
李葆勇,任建伟,万志,等. 一种空间相机辐射定标用大面积辐射光源的研制[J]. 光电子·激光,2013,**24**(3):464-469.
- [19] YUAN Yin-lin, XU Jun, ZHAI Wen-chao, *et al.* Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0712004.
袁银麟,徐俊,翟文超,等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报,2013,**33**(7):0712004.
- [20] SUN Jing-xu, LIU Hong-xing, XU Yan-jun, *et al.* 4 m extended uniform source for radiometric calibration[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(5): 823-832.
孙景旭,刘洪兴,许艳军,等. 4m 直径均匀扩展定标光源[J]. 中国光学,2015,**8**(5):823-832.
- [21] CHEN Hong-yao, ZHANG Li-ming, SHI Jia-ding, *et al.* High accuracy gonireflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 72-80.
陈洪耀,张黎明,施家定,等. 高精度星上定标漫射板双向反射分布函数绝对测量系统研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014,**9**(1):72-80.
- [22] LI Jun-lin, ZHANG Li-ming, CHEN Hong-yao, *et al.* Development of BRDF absolute measuring device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 0528002.
李俊麟,张黎明,陈洪耀,等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报,2014,**34**(5):0528002.
- [23] BOIVIN L P. Automated absolute and relative spectral linearity measurements on photovoltaic detectors [J]. *Metrologia*, 1993, **30**: 355-360.

Foundation item: Chinese Academy of Sciences Research Equipment Project(No. YZ201125), Major Projects of High-resolution Earth Observation System(No. GFZX0401430405)

引用格式: LIU Hui, CHEN Hong-yao, LI Jia-wei, *et al.* Large Dynamic Range Radiation Standard Transmission Research Based on Integrating Sphere Source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0804002

刘辉,陈洪耀,李佳伟,等. 基于积分球光源的大动态范围辐射标准传递技术研究[J]. 光子学报,2018,**47**(8):0804002