

视场角和定位误差在光谱辐射亮度测量中的影响

何思捷 代彩红 程秋桐 吴志峰 李玲 王彦飞

Influence of field of view angle and positioning error on spectral radiance measurement

HE Sijie, DAI Caihong, CHENG Qiutong, WU Zhifeng, LI Ling, WANG Yanfei

引用本文:

何思捷, 代彩红, 程秋桐, 等. 视场角和定位误差在光谱辐射亮度测量中的影响[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 386–391. DOI: 10.5768/JAO202344.0203004

HE Sijie, DAI Caihong, CHENG Qiutong, et al. Influence of field of view angle and positioning error on spectral radiance measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 386–391. DOI: 10.5768/JAO202344.0203004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近紫外到近红外光谱辐射计及定标方法研究

Research on near-UV to near-IR spectroradiometer and its calibration method

应用光学. 2019, 40(3): 478–482 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303004>

大口径积分球光源绝对辐射定标技术研究

Absolute radiometric calibration technique of large aperture integrating sphere source

应用光学. 2020, 41(6): 1236–1240 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0603003>

复杂光照下QR码图像二值化算法研究及应用

Research and application of binarization algorithm of QR code image under complex illumination

应用光学. 2018, 39(5): 667–673 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0502002>

滤光辐射计测量黑体的温度

Temperature measurement of blackbody using filter radiometer

应用光学. 2018, 39(6): 862–866 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0603002>

一种单色全息平板波导显示系统的研究

Study on monochromatic holographic planar waveguide display system

应用光学. 2019, 40(2): 241–245 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201010>

分孔径探测系统通道间视场一致性度量方法

Measurement method for FOV conformity between channels of aperture-divided detection system

应用光学. 2017, 38(3): 451–455 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0303004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0386-06

视场角和定位误差在光谱辐射亮度测量中的影响

何思捷, 代彩红, 程秋桐, 吴志峰, 李玲, 王彦飞

(中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100013)

摘要: 为了减小不同光谱辐射计间瞄准区域差异带来的光谱辐射亮度不一致性, 讨论了视场角及定位对于测量准确性的影响。通过建立太阳光白板 and 卤钨灯白板系统光路下的光谱辐射亮度测量模型, 分析了不同几何光路视场区域平均辐射亮度与中心辐射亮度的差异。数值模拟表明, 太阳光白板光路修正因子仅与视场角大小有关; 卤钨灯白板光路修正因子随测量距离增大而减小, 距离 600 mm 时 8° 和 14° 视场角的修正因子分别变为 0.993 5 和 0.980 2。最后, 实验验证了卤钨灯白板系统下角度误差和位移误差对光谱辐射亮度的影响。结果表明, 修正因子对水平方向的角度误差和位移误差呈现非对称性, 两侧差异高达 2%。因此, 依据视场角和几何定位可以对测量结果进行数据修正, 有助于提升光谱辐射亮度测量不确定度水平。

关键词: 光谱辐射计; 光谱辐射亮度; 视场角; 修正因子

中图分类号: TN206; O432.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0203004

Influence of field of view angle and positioning error on spectral radiance measurement

HE Sijie, DAI Caihong, CHENG Qiutong, WU Zhifeng, LI Ling, WANG Yanfei

(Institute of Optics and Laser Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to reduce the inconsistency of spectral radiance caused by the aiming area differences between different spectroradiometers, the influence of field of view (FOV) angle and positioning on measurement accuracy was discussed. By establishing the spectral radiance measurement model of sunlight whiteboard and tungsten halogen lamp whiteboard, the differences between the average radiance and central radiance in the field of view of different geometric optical paths were analyzed. Numerical simulation shows that the correction factor of sunlight whiteboard path is only related to the size of FOV angle, while that of tungsten halogen lamp whiteboard path decreases with the increases of the measurement distance. When the distance is 600 mm, the correction factor of 8° and 14° FOV angle changes to 0.993 5 and 0.980 2, respectively. Finally, the experiment verified the influence of the angle error and displacement error on spectral radiance when using the tungsten halogen lamp whiteboard system. The results show that the correction factor presents asymmetry to the horizontal angle error and displacement error, and the difference between the two sides is as high as 2%. Therefore, the measurement results can be corrected according to the FOV angle and geometric positioning, which helps to improve the uncertainty level of spectral radiance measurement.

Key words: spectroradiometer; spectral radiance; field of view angle; correction factor

引言

光谱辐射亮度是辐射度领域国际比对的一个

重要参数^[1-3]。在航天遥感、光生物安全和医疗卫生等领域, 都涉及光源的光谱辐射亮度测量或光

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504800, 2018YFB0504804); 中国计量科学研究院基本科研业务费重点领域 (AKYZD2210)

作者简介: 何思捷 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事光谱辐射测量技术与计量研究。E-mail: hesijie@nim.ac.cn

通信作者: 吴志峰 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光谱辐射计量与光学遥感定标研究。E-mail: wuzf@nim.ac.cn

谱辐射计的辐射亮度定标^[4-6]。我国太阳反射波段的光谱辐射亮度国家基准采用高温黑体 BB3500M 作为辐射源, 光谱辐射亮度副基准采用高温黑体量传的钨带灯保存量值。然而, 钨带灯的瞄准面积约为 $0.6\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$, 仅适用于极小视场的光谱辐射亮度测量。同时, 高温黑体和钨带灯的光谱辐射亮度较实验室常用的量值水平高 3 个量级以上, 也限制了其在光谱辐射亮度校准中的使用。国内外实验室通常采用卤钨灯白板系统和积分球光源, 对光谱辐射计进行辐射亮度定标^[7-8]。1 000 W 卤钨灯的光谱辐射照度可以直接溯源至 3 000 K 高温黑体^[9-10]; 积分球光源的光谱辐射亮度直接溯源至卤钨灯白板系统。在实验室外, 太阳光白板系统或太阳光地表是常用的光谱辐射亮度源, 可以用于卫星载荷在轨辐射定标和外场辐射定标^[11-14]。

光谱辐射计测量的辐射亮度不仅与目标辐射源相关, 还与测量光路和光谱辐射计自身特性有关。温度测量领域考察了辐射源的尺寸效应, 发现辐射温度计的信号表现出和被测辐射源的尺寸相关的现象^[15-16]。辐射源尺寸效应源于辐射温度计并不满足理想的光学成像。在光谱辐射亮度测量方面, 光谱辐射计测量结果除了受辐射源尺寸效应影响, 还与不同测量方法间的光路有关。光学领域不同应用需求的光谱辐射计, 如光学遥感载荷和光谱辐射计瞄准目标尺寸完全不同, 两者的目标视场差异极大。在光学遥感相关领域, 全球气候变化研究对光谱辐射亮度的测量提出了新的要求, 即地表反射辐射亮度不确定度为 0.30% ($k=2$)^[17]。目前, 我国光谱辐射亮度国家基准装置在 $400\text{ nm} \sim 2550\text{ nm}$ 的测量不确定度为 $0.56\% \sim 0.30\%$ ($k=2$)。为了减小光谱辐射亮度的测量不确定度、满足未来气候变化研究的需求, 一方面需要进一步改进基准装置, 采用共晶点黑体替代变温黑体从而提升测量能力; 另一方面必须改进光谱辐射计性能, 并优化定标过程中的各个环节, 光学载荷或光谱辐射计的视场差异的贡献必须进行修正。本文从光谱辐射亮度测量模型出发, 分析实际光谱辐射亮度定标中不同视场角的理论修正, 并对测量过程定标精度带来的测量偏差进行分析。

1 光谱辐射亮度测量模型

卤钨灯白板系统、太阳光白板或地表系统和积分球光源三种光谱辐射亮度测试系统在几何光

路中存在明显差异, 主要可以分为两种模式: 光谱辐射计光轴垂直于白板平面和非垂直于白板平面。在户外环境监测、光学遥感等领域, 朗伯特性良好的白板或地表反射太阳光, 形成均匀的面辐射源, 光谱辐射计垂直面辐射源进行测量, 这种测量方式与积分球光源测量时类似。在光学卫星载荷应用中, 太阳光照射在白板上对光学载荷进行定标, 待定标载荷光轴与白板法线通常呈 45° 角, 这种光路与实验室卤钨灯白板定标光谱辐射计亮度类似。

图 1 为光谱辐射计与白板的空间坐标示意图, 图 1(a) 中光谱辐射计光轴垂直于白板平面。白板位于 X_1Y_1 平面, 白板中心位于 O_1 点, B 点是白板上任意一点, 光谱辐射亮度计光轴与 Z_1 轴重合, 光谱辐射计入光口中心位于 Z_1 轴 A 点, 到白板距离为 d_1 ; 图 1(b) 中光谱辐射计光轴与白板法线夹角为 γ 。白板位于 X_2Y_2 平面, 白板中心位于 O_2 点, H 点是白板上任意一点, 光谱辐射计入光口中心位于 M 点, 光谱辐射计光轴沿 O_2M 方向, O_2M 距离为 d_2 , MN 垂直于 Y_2 轴。

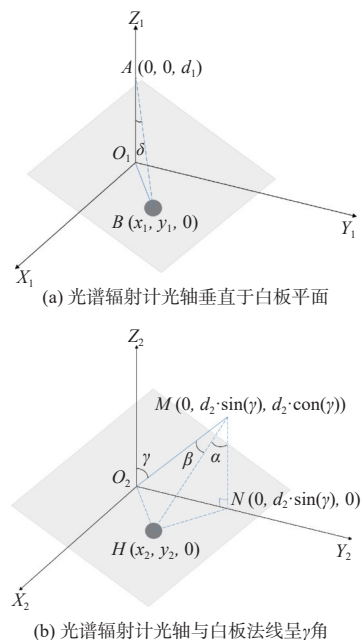


图 1 光谱辐射计与白板的空间坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial coordinates of spectroradiometer and whiteboard

假定光谱辐射计亮度测量时视场角的一半为 φ , 光谱辐射计入光口的接收面积为 S_0 , 两种模式下光谱辐射计接收的光辐射通量分别由式(1)和式(2)给出:

$$\Phi_1 = \int_{\delta \leq \varphi} S_0 \cos(\delta) \frac{L_1(x_1, y_1) \cos(\delta)}{AB^2} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \int_{\beta \leq \varphi} S_0 \cos(\beta) \frac{L_2(x_2, y_2) \cos(\alpha)}{HM^2} dx_2 dy_2 \quad (2)$$

式中: $L_1(x_1, y_1)$ 是垂直模式下白板表面 B 点的辐射亮度; δ 是 AB 与 Z_1 轴的夹角; $L_2(x_2, y_2)$ 是非垂直模式下白板表面 H 点的辐射亮度; HM 与 MN 夹角为 α ; HM 与 O_2M 夹角为 β 。当采用图 1(b) 中的卤钨灯白板系统时, 卤钨灯灯丝方向平行于 X_2Y_2 平面, 灯丝中心位于 Z_2 轴上, 光谱辐射计接收的光谱辐射通量由式(3)进行描述:

$$\Phi_3 = \int_{\beta \leq \varphi} S_0 \cos(\beta) \frac{\rho E(x_2, y_2) \cos(\alpha)}{\pi HM^2} dx_2 dy_2 \quad (3)$$

式中: ρ 是白板的反射率; $E(x_2, y_2)$ 是卤钨灯在 H 点的辐射照度。由于光谱辐射计视场的立体角为 $2\pi(1 - \cos(\varphi))$, 光谱辐射计瞄准区域的平均辐射亮度由式(4)进行描述:

$$\bar{L} = \frac{\Phi}{S_0 2\pi(1 - \cos(\varphi))} \quad (4)$$

式中: Φ 是光谱辐射计接收的光辐射通量。

2 数值模拟与分析

当采用太阳光白板系统时, 太阳光近似平行光, 在白板各处的辐射照度都相同; 当卤钨灯和白板的距离在 500 mm 或以上时, 卤钨灯可以近似为点光源, 其光谱辐射照度遵从平方反比分布。假定白板是理想的朗伯体且表面均匀, 太阳光白板系统和卤钨灯白板系统不同视场角下的平均辐射亮度可以通过数值计算得到。光谱辐射计测量的平均辐射亮度与白板中心辐射亮度的比值记为修正因子。图 2 给出了不同视场角下修正因子随光谱辐射计到白板间距离 d_1 的变化趋势。对于图 2(a) 中的太阳光白板系统, 修正因子仅与光谱辐射计的视场角有关, 与光谱辐射计到白板间距离无关。同时, 由于白板各处的辐射亮度都相同, 改变光谱辐射计距离和白板距离并不能改变不同视场角大小的平均辐射亮度修正因子。

对于太阳光白板系统辐射亮度定标, 当光谱辐射计竖直朝下正对白板测量时, 式(1)中的 $L_1(x_1, y_1)$ 近似为常数, 结合式(1)和式(4)可得式(5):

$$\frac{\bar{L}}{L_0} = \frac{1 - \cos(2\varphi)}{4(1 - \cos(\varphi))} \quad (5)$$

式中: L_0 是白板中心辐射亮度。式(5)表明光谱辐射计测量的平均辐射亮度与视场角有关, 目前市

面上常见的光谱辐射计视场角覆盖了从 0.1° 到 1° 、 4° 甚至 14° 。当视场角变化至 14° 时, 修正因子与 1° 的差异达到 0.37%。

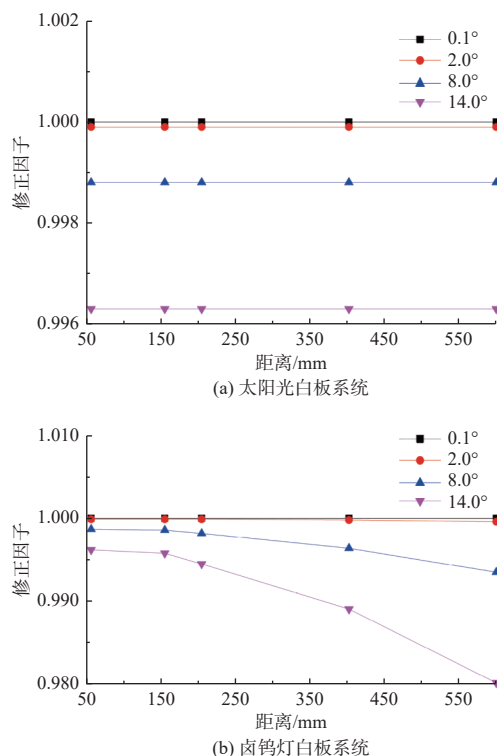


图 2 不同视场角的修正因子

Fig. 2 Correction factors of different angles of field of view

当光谱辐射亮度测量不确定度在百分之几的水平时, 视场角的影响几乎可以忽略, 白板中心的辐射亮度近似等于光谱辐射计视场内的平均辐射亮度。然而, 光学遥感对于辐射定标不确定度的要求已经达到 1.0% 甚至更高的水平, 光谱辐射亮度测量必须考虑视场角的影响。另一方面, 非垂直模式下, 理论计算表明太阳光白板系统不同视场角的修正因子与 γ 角大小无关, 与图 2(a) 垂直模式完全相同。当非垂直模式下 $\gamma=0^\circ$, 即为垂直模式。因此, 非垂直模式下, 光谱辐射计视场角的影响也可由式(5)进行描述。实际上, 两种模式下瞄准的白板位置并不一致, 当白板均匀性必须考察时, 两种模式下修正因子会存在一定差异。

图 2(b) 给出了当 $\gamma=45^\circ$ 和卤钨灯距离白板 500 mm 时, 卤钨灯白板系统下光谱辐射计不同视场角的修正因子, 横坐标为光谱辐射计入光口中心与白板中心距离 d_2 。图中可以看出, 修正因子不仅随光谱辐射计的视场角变化, 与光谱辐射计白板间距离也相关。当光谱辐射计距白板越近时, 不同视场角之间的差异越小。理论计算表明当距离

$d_2=50\text{ mm}$ 时, 不同视场角修正因子与太阳光白板系统的差异约为万分之一。随着距离 d_2 增大, 0.1° 和 2° 小视场角的修正因子变化缓慢, 而 8° 和 14° 大视场角的修正因子呈现剧烈的下降趋势。当距离 d_2 增大为 600 mm 时, 8° 和 14° 视场角瞄准区域的平均辐射照度降至白板中心辐射照度的 99.46% 和 98.3% , 修正因子降为 $0.993\ 5$ 和 $0.980\ 2$ 。与白板中心相比, 8° 和 14° 视场的平均辐射亮度分别降低了 0.65% 和 1.98% 。而当光谱辐射计白板距离控制在 150 mm 以内时, 相应差异可以减小至 0.14% 和 0.42% , 大幅降低视场角差异带来的测量偏差。

3 实验结果与分析

实际上, 市面许多光谱辐射计厂家标称视场角与真实视场角存在差异, 且视场角在竖直方向和水平方向成像视场也不一致。当瞄准区域难以精确定位时, 测量偏差很难精确判定。对于 1° 小视场角的光谱辐射计, 即使光路成像并不是严格圆周对称, 采集的平均辐射亮度与白板中心辐射亮度差异也几乎可以忽略。如卤钨灯距离白板 600 mm 时, 0.5° 和 1.5° 视场角修正因子的差异小于万分之二。因此, 为了减小视场角对测量的影响, 本文采用带目镜瞄准功能 1° 视场的光谱辐射计开展相关测试, 用以验证灯板系统中视场瞄准区域差异对光谱辐射亮度的影响。图 3 给出了卤钨灯白板系统测量的俯视图示意图。卤钨灯和漫反射白板都竖直朝下放置, 灯丝平面与漫反射白板平面平行, 距离为 L_2 ; 光谱辐射计光学主轴与白板平面夹角 $\theta=45^\circ$, 光谱辐射计入光口中心到白板中心距离为 L_1 。 1° 视场的光谱辐射计安装在多维光学平台上, 具有水平平移、垂直升降和角度旋转功能。

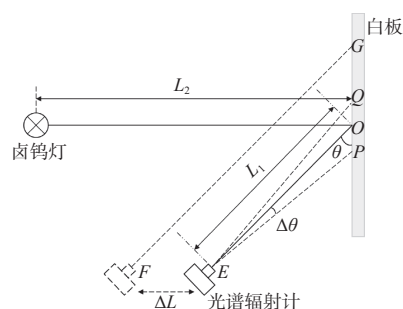


图 3 卤钨灯白板系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tungsten halogen lamp white-board system

实验首先考察了角度定位精度对测量的影响。以白板中心为圆心, 旋转光谱辐射计, 仅改变

角度 θ 的大小, 即光谱辐射计始终瞄准白板中心且 L_1 距离保持不变。图 4 给出了测量结果随角度 θ 的变化, 以 $\theta=45^\circ$ 进行归一化处理。测量结果随角度的变化反映了白板反射率随角度的变化。白板反射率随 θ 角的增大呈现明显的变大趋势。当角度 θ 每增大 1° 时, 反射率平均增大 0.21% 。

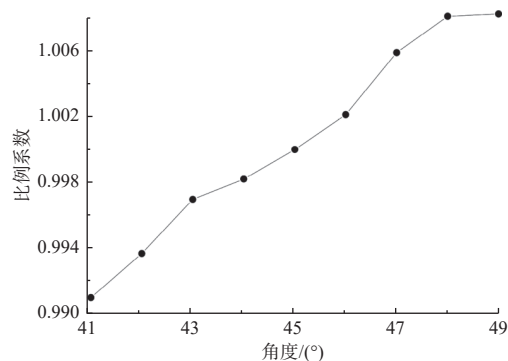


图 4 不同角度的测量结果

Fig. 4 Measurement results at different angles

接着, 本文考察了距离定位精度对于测量的影响。卤钨灯白板之间距离不变, 固定为 $\theta=45^\circ$, 仅改变距离 L_1 。由于实验采用的光谱辐射计最小成像距离为 350 mm , 实验仅测试了 $L_1 \geq 400\text{ mm}$ 时距离变化带来的影响。图 5 给出了测量结果随距离的变化, 以 $L_1=400\text{ mm}$ 进行归一化处理。图 5 中实验测量和理论计算表现出了相似的变化趋势, 但实验测量变化趋势更为明显, 两者差异与实际测量中卤钨灯尺寸、白板均匀性和光谱辐射计自身性能有关。另一方面, 当距离从 400 mm 变化至 800 mm 时, 实际测量结果的变化小于 0.08% 。在实际测量过程中, 距离的测量不确定度优于 0.5 mm , 对定位精度的影响几乎可以忽略。

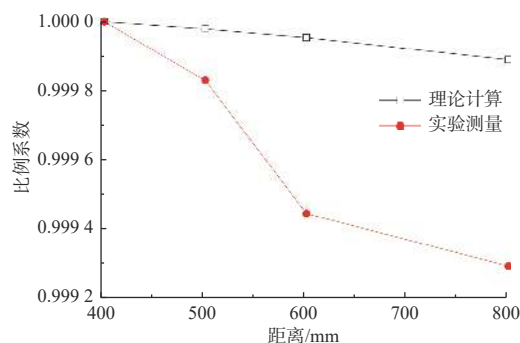


图 5 不同距离的测量结果

Fig. 5 Measurement results at different distances

然后, 实验考察了水平方向角度定位精度对于测量的影响。当 $L_1=400\text{ mm}$ 、 $L_2=500\text{ mm}$ 时, 旋转光谱辐射计, 使得角度误差 $\Delta\theta$ 从 4.35° 变到 -3.78°

(即 θ 从 49.35° 变化至 41.22°)。在正角度误差瞄准区域中心从 O 点移动到 P 点,而负角度误差下从 O 点移动到 Q 点。图6给出了修正因子随角度误差的变化,修正因子随角度误差呈现显著的非对称性。除了 -1.96° 角度,理论计算和实验测量的差异都在 0.5% 以内。考虑到卤钨灯并非理想点光源,且白板并不是理想朗伯体,理论计算和实验测量整体符合较好。

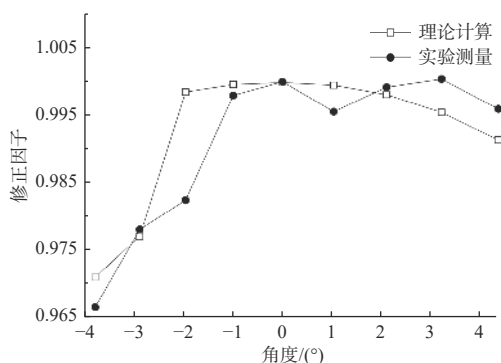


图6 不同角度误差的修正因子

Fig. 6 Correction factors of different angle errors

对于正角度误差,修正因子随角度变化缓慢,整体浮动小于 1% ,实际测量值在 4.35° 时较理论计算偏高。理论计算和实验测量的差异与白板反射率的面均匀性和角度特性有关,理论计算时白板各处的反射率采用同一量值计算,实际上白板并不是理想的朗伯体,其反射率随 $\Delta\theta$ 变化。图4中角度测量结果表明,正角度误差时白板反射率较大,因此修正因子下降幅度较理论结果更为缓慢。对于负角度误差,理论上当 $\Delta\theta$ 从 0° 变到 -3.78° 时,光谱辐射计目标区域的平均辐射照度较 0° 时下降约 0.9% 。而辐射亮度修正因子变化幅度高达 3% 。显然,修正因子的大幅变化与光谱辐射计入光口中心和瞄准区域中心的距离、角度变化有关。同时负角度误差时,白板的反射率较 0° 时的反射率更低,实际测量结果较理论计算下降趋势更为明显。

最后,实验考察了坐标定位对光谱辐射计测量结果的影响。当图3中光谱辐射计入光口中心从 E 点平移至 F 点或垂直纸面上下平移时,修正因子也呈现明显的变化。图7给出了修正因子随水平方向位移误差 ΔL 的变化, ΔL 向右移动为正。当 $L_1=400\text{ mm}$ 、 $L_2=500\text{ mm}$ 时,实验数据表明修正因子呈现非对称分布,负位移误差修正因子下降约 2.1% ,而正位移误差修正因子变化小于 0.13% 。尽

管光谱辐射计平移时角度 θ 并没有变化,但卤钨灯到光谱辐射计视场区域的连线与光谱辐射计主轴夹角发生变化。与实验测量相比,理论计算在负位移误差时的差异小于 0.25% ,在正位移误差时的差异小于 0.36% 。考虑到理论计算中忽略了白板反射率随角度的变化,理论计算和实验测量的一致性非常好。

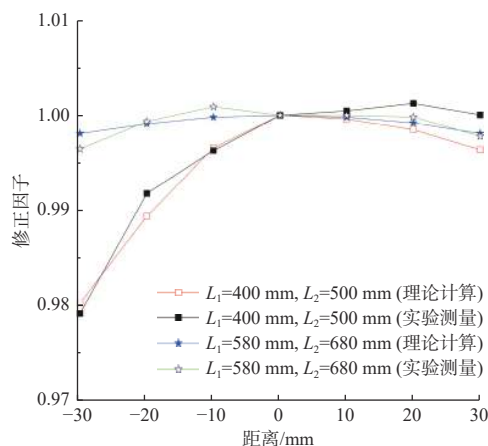


图7 不同位移误差的修正因子

Fig. 7 Correction factors of different displacement errors

还计算了修正因子随 L_1 和 L_2 距离的变化。随着 L_1 和 L_2 的增大,修正因子的变化会逐渐呈现出近似左右对称性,同时平移距离对修正因子的影响会进一步降低。当 $L_1=580\text{ mm}$ 、 $L_2=680\text{ mm}$ 时,实验测量结果和计算结果接近一致,两者差异整体都小于 0.2% 。因此,对于小视场角的光谱辐射计,当无法精确定位时,增大光谱辐射计与白板的距离可以减小定位精度带来的影响,从而提高测量不确定度。

4 结论

本文建立了平均辐射亮度计算模型,计算分析了不同几何光路下的辐射亮度修正因子。数值模拟表明,卤钨灯白板系统修正因子明显依赖于视场区域大小。当光谱辐射计距离白板 50 mm 时,不同视场角的修正因子与太阳光白板系统相当, 14° 视场角修正因子为 0.9962 ;当光谱辐射计距离白板 600 mm 时, 14° 视场角修正因子变为 0.9802 。减小光谱辐射计与白板的距离, 14° 视场角时的平均辐射亮度测量结果可以提升 1.5% 以上。同时,理论计算和实验测量了 1° 视场角光谱辐射计水平方向角度误差和位移误差下修正因子的变化。结果的一致性表明,对光谱辐射计测量的平均辐射

亮度进行数值修正后,视场角和定位的影响可以减小至0.5%以内。因此,为了实现高精度的光谱辐射亮度测量,光谱辐射计目标视场的平均光谱辐射亮度必须考虑视场角和定位精度的贡献。同时,在实际测量中应选择 $\Delta\theta>0$ 的正角度误差和 $\Delta L>0$ 的正位移误差,以减小定位精度的影响,从而保证不同光谱辐射计测量数据的一致性,进一步提高光谱辐射亮度的测量不确定度。

参考文献:

- [1] KHLEVNOY B, SAPRITSKY V, ROUGIE B, et al. CCPR-S1 Supplementary comparison for spectral radiance in the range of 220 nm to 2 500 nm[J]. *Metrologia*, 2009, 46(4): S174-S180.
- [2] SHIN D J, PARK S, LEE D H, et al. Report on the AP-MP. PR-S6: 2012-2013 supplementary comparison of spectral radiance from 250 nm to 2500 nm[J]. *Metrologia*, 2020, 57(1A): 02001.
- [3] 代彩红, 王彦飞, 吴志峰, 等. 光谱辐射亮度国际比对与结果分析[J]. *计量学报*, 2020, 41(2): 147-152.
DAI Caihong, WANG Yanfei, WU Zhifeng, et al. International comparison and result analysis of spectral radiance[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(2): 147-152.
- [4] ROLT S, CLARK P, SCHMOLL J, et al. Xenon arc lamp spectral radiance modelling for satellite instrument calibration[J]. *SPIE*, 2016, 9904: 1558-1568.
- [5] 刘艳珍, 孟祥峰, 王浩, 等. 医用LED设备光谱辐射亮度的测量方法研究[J]. *北京生物医学工程*, 2016, 35(5): 533-537.
LIU Yanzhen, MENG Xiangfeng, WANG Hao, et al. Research of spectral radiance measurement methods for medical LED equipment[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2016, 35(5): 533-537.
- [6] 李福田, 李志刚, 王晓旭, 等. 自校准型光谱辐射亮度标准光源[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2004-2010.
LI Futian, LI Zhigang, WANG Xiaoxu, et al. Self-calibrated spectral radiance standard source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2004-2010.
- [7] 杨本永, 张黎明, 陈洪耀, 等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3545-3550.
YANG Benyong, ZHANG Liming, CHEN Hongyao, et al. System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3545-3550.
- [8] MA L L, ZHAO Y G, WOOLLIAMS E R, et al. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1696.
- [9] DAI C H, KHLEVNOY B, WU Z F, et al. Bilateral comparison of spectral irradiance between NIM and VNIIOFI from 250 to 2 500 nm[J]. *MAPAN*, 2017, 32(3): 243-250.
- [10] WOOLLIAMS E R, FOX N P, COX M G, et al. The CCPR K1-a key comparison of spectral irradiance from 250 nm to 2 500 nm: measurements, analysis and results[J]. *Metrologia*, 2006, 43(2): 98-104.
- [11] 庞博, 马灵玲, 刘耀开, 等. 陆地卫星光学载荷地基自动辐射定标与验证分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 146-154.
PANG Bo, MA Lingling, LIU Yaokai, et al. Ground-based automatic radiometric calibration of land observation satellite optical sensors and cross validation analysis[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(1): 146-154.
- [12] 王敏, 周树道, 何明元, 等. 国内外卫星遥感器辐射定标场地特性比较分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(7): 24-27.
WANG Min, ZHOU Shudao, HE Mingyuan, et al. Characterization and calibration method of satellite sensor radiometric calibration site[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(7): 24-27.
- [13] LEI N, XIONG X X. Impacts of the angular dependence of the solar diffuser BRDF degradation factor on the SNPP VIIRS reflective solar band on-orbit radiometric calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(3): 1537-1543.
- [14] XU H Y, ZHANG L M, HUANG W X, et al. Onboard absolute radiometric calibration and validation of the satellite calibration spectrometer on HY-1C[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30015-30034.
- [15] YOON H W, ALLEN D W, SAUNDERS R D. Methods to reduce the size-of-source effect in radiometers[J]. *Metrologia*, 2005, 42(2): 89-96.
- [16] 原遵东. 红外辐射温度计的辐射源尺寸效应修正[J]. *计量学报*, 2014, 35(1): 5-9.
YUAN Zundong. Size-of-source effect correction for infrared radiation thermometer[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2014, 35(1): 5-9.
- [17] OHRING G, TANSOCK J, EMERY W, et al. Achieving satellite instrument calibration for climate change[J]. *Eos*, 2007, 88(11): 136.