

可见光—短波红外光谱辐射计现场量值传递方法

程秋桐¹, 李玲¹, 代彩红¹, 吴志峰¹, 高彩霞², 何思捷¹, 王彦飞¹

1. 中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094

摘要: 外场辐射测量是光学遥感研究的重要信息来源, 为了保证外场测量数据的准确性, 外场设备必须进行量值溯源。本文旨在开展外场光谱测量设备的现场量值传递方法研究, 将外场测量设备的辐射测量水平溯源至统一基准, 以此来保证外场测量时设备获取数据精准性以及数据质量一致性。通过分析实验室和外场光源差异、测量环境差异等因素对辐射量值准确性的影响, 建立了杂散光修正模型和环境温度修正模型, 构建了完整的从实验室到外场的量值传递链路, 采用对称放置和互换测量的方法将光谱辐射量值从实验室国家基准有效传递至外场观测设备, 实现了实验室到外场 380—2400 nm 波长的光谱辐射量值传递。进一步地, 依据不确定度传播律, 分析了可见光短波红外光谱辐射计现场量值传递的不确定度, 最终实现量传光谱仪测量不确定度 1.7%—2.3% ($k=1$) 和外场观测设备定标不确定度 1.9%—2.5% ($k=1$)。本文对于量传光谱仪及现场量值传递的不确定度分析, 有助于今后不同外场测量设备间的交叉验证, 保证多场地基验证试验的测量一致性。

关键词: 现场量值传递, 杂散光修正模型, 温度修正模型, 互换测量, 不确定度

中图分类号: P2

引用格式: 程秋桐, 李玲, 代彩红, 吴志峰, 高彩霞, 何思捷, 王彦飞. 2023. 可见光—短波红外光谱辐射计现场量值传递方法. 遥感学报, 27(5): 1166–1176

Cheng Q T, Li L, Dai C H, Wu Z F, Gao C X, He S J and Wang Y F. 2023. Field dissemination of the value of the quantity method of the spectroradiometer in visible-to-shortwave infrared. National Remote Sensing Bulletin, 27(5): 1166–1176 [DOI: 10.11834/jrs.20221841]

1 引言

光谱辐射计应用范围极为广泛, 涉及航天遥感、工农业、天文观测、环境监测、色度测量等领域, 用于测量一定波长范围的光谱辐射亮(照)度或相对光谱分布(徐明明等, 2014)。为保证光谱辐射量值的准确性, 光谱辐射计使用前必须进行辐射定标。实验室通常采用卤钨灯白板系统或积分球光源进行光谱辐射计的辐射亮度定标(郑小兵, 2011)。然而, 实验室和外场在光源和测量环境条件方面存在明显差异, 当实验室定标后的光谱辐射计直接用于外场光谱辐射测量时, 这些差异会严重影响测量的准确性。

实验室定标光源的分布温度约为 3000 K, 而外场光源是太阳光谱或地表反射太阳光谱, 与 5772 K

的黑体光谱接近(Meftah等, 2018)。理论计算表明, 采用 3260 K 分布温度积分球光源和太阳光定标 500—700 nm 宽波段光学传感器时, 定标系数的差异约 2.0% (万志等, 2012)。当采用氙灯和溴钨灯定标时, 两种光源在 350 nm 的定标系数差异高于 3% (吴志峰等, 2016)。另一方面, 由于实验室和外场光源在相对光谱分布上有明显不同, 实验室光源和外场光源在部分波长的光谱辐射量值差异极大。考虑到外场场景涉及到冰川、沙地、植被、湖泊等等, 实验室和外场的光谱辐射量值差异高达 15 倍以上。因此, 在不同量值下外场光谱辐射计的光谱响应度是否恒定也必须考虑。

环境条件方面, 实验室通常是恒温恒湿条件, 而外场的温湿度不断变化。环境温度的变化可能改变光谱辐射计内部探测器的温度, 带来光谱响

收稿日期: 2022-01-06; 预印本: 2022-07-01

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504800, 2018YFB0504804)

第一作者简介: 程秋桐, 研究方向为光谱辐射度定标。E-mail: chengqt@nim.ac.cn

通信作者简介: 吴志峰, 研究方向为光谱辐射度色度定标。E-mail: wuzf@nim.ac.cn

应度、暗电流等参数的变化,从而影响仪器读取数据的准确性。对于不同类型的光谱辐射计,内部探测器温度随外界温度变化的弛豫时间明显不同,迟豫速度差异高达3—4倍;甚至部分光谱辐射计的波长也会随温度发生漂移,漂移幅度高达1 nm (Price等, 2014)。温度模拟实验发现,光谱辐射计光谱响应度随温度上升呈现明显的上升趋势 (Salim等, 2011)。基于此,必须构建数学模型来尽可能消除光谱辐射计外场测量时探测器温升带来的响应度变化 (李玲等, 2019)。

目前,外场辐射测量的领域覆盖了无人机遥感的农业监测、地理测绘、卫星遥感定标场的外场定标等 (勾志阳等, 2012)。随着光学载荷定量遥感对辐射定标精度的需求越来越高,实验室—外场差异的影响必须量化考察,测量数据的准确性必须予以评定。中国包头国家高分辨率遥感综合定标场分析了400—1000 nm波段光谱辐射计的外场测量不确定度,对于中国光学载荷高精度在轨辐射定标有重要意义 (Ma等, 2020)。另一方面,在人工现场安装仪器进行外场定标的基础上,国内外研究机构已经广泛开展了自动化定标 (Santer等, 2003; Czapla-Myers等, 2008; Meygret等, 2011; Bouvet等, 2019; 李新等, 2014; 李传荣等, 2021)。而外场自动化观测设备难以送到实验室定标,必须采用实验室—外场差异量化评价后的光谱辐射计,在外场开展现场量值传递。目前,可见光—短波红外波段光谱辐射计现场量值传递的报道在国内外少见,外场设备之间的测量一致性很难准确评价。本文通过分析实验室定标和现场辐射定标的差异,量化评价现场量值传递中各个差异对测量结果的影响,依据不确定度传播律逐项评定各个环节引入的测量不确定度,以保证外场测量设备不间断的溯源至国际单位制,实现可见光—短波红外波段实验室国家基准到外场测量设备的现场量值传递。

2 现场量值传递方法

本文开展的现场量值传递方法主要分为两部分,首先进行量传光谱辐射计 (简称量传光谱仪) 实验室至外场量值传递分析。量传光谱仪在实验室完成定标后,并不适用于外场直接测量,影响量传光谱仪外场测量准确性的因素必须定量分析。通过评价各个因素对量传光谱仪的影响和评定量

传光谱仪的外场测量不确定度,量传光谱仪实验室至外场的量值传递得以实现。然后,采用量传光谱仪对外场测量设备开展现场量值传递。本文量传光谱仪采用SVC (Spectra Vista Corporation) 公司生产的XHR1024i型号野外地物光谱仪。其中,380—990 nm采用硅阵列探测器,波长示值平均间隔约1.3 nm; 990—1890 nm采用铟镓砷阵列探测器,波长示值平均间隔约3.7 nm; 1890—2400 nm采用第二块铟镓砷阵列探测器,波长示值平均间隔约2.5 nm。

图1给出了现场辐射定标的示意图。采用白板漫反射的太阳光作为参考目标源,将量值从量传光谱仪传递至外场测量设备。首先,根据太阳和白板中心的连线,确认该连线在地面的投影。以该投影连线为轴,对称放置量传光谱仪和外场测量设备。量传光谱仪和外场测量设备都采用垂直放置的方式,分别瞄准白板中心两侧。待两台设备测量完毕后,立刻互换位置再次测量,用于降低太阳角度或参考目标源不均匀性的影响。根据式(1)计算外场测量设备的辐射定标系数。

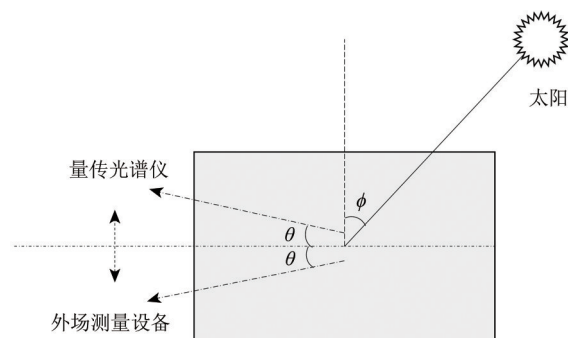


图1 现场辐射定标

Fig. 1 The field radiometric calibration

$$f = \left(\frac{U_1}{V_1} + \frac{U_2}{V_2} \right) / 2 \quad (1)$$

式中,量传光谱仪互换前后连续测量5次,测量平均值分别为 U_1 和 U_2 ,自动观测设备互换前后连续测量5次,测量平均值分别为 V_1 和 V_2 。 f 是自动观测设备的辐射定标系数。

3 实验室至外场量值传递分析

实验室定标和现场辐射定标的差异,主要体现在光源和环境条件两个方面。对于光源差异,图2给出了10月中旬包头国家高分辨率遥感综合定标场现场量值传递时参考目标源和实验室定

标光源的光谱辐射亮度。图2中可以看出,太阳—白板组成的参考目标源光谱峰值约在500 nm,而实验室定标光源光谱峰值约在950 nm。在380—500 nm,实验室定标光源和参考目标源辐射量值差异普遍在10倍以上,部分波段差异高达20倍。由于白板漫反射的光谱辐射亮度与太阳辐射照度成正比,如果选择在夏至、秋分和冬至正午测量,则白板漫反射的光谱辐射亮度比值约为0.95:0.75:0.43。与10月中旬包头场测量数据相比,6月份和12月份的光谱辐射亮度分别高约35%和低约35%。因此,在380—500 nm,不同季节外场参考目标源和实验室定标光源的最大差异高达30倍以上。而在2100—2400 nm,白板漫反射辐射亮度最小时约为实验室定标光源的0.4—0.6倍。

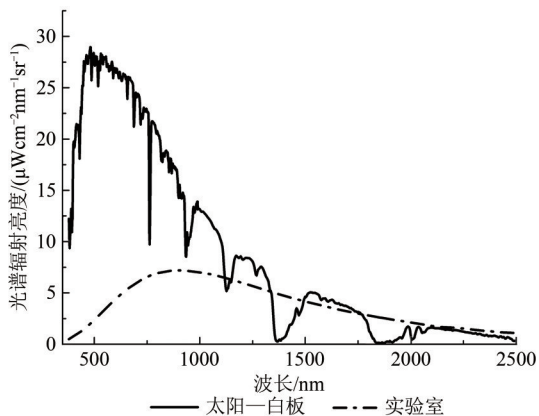


图2 实验室光源和太阳—白板光源的光谱辐射亮度
Fig. 2 Spectral radiance of lab light source and sun-white plate light source

环境条件方面,实验室条件较为恒定,而外场的温湿度受季节影响极大。因此,针对实验室外场差异对于量传光谱仪的影响,本文依次从光源相对光谱差异、光源辐射量值差异、温度差异和湿度差异4个方面的影响进行考察。

3.1 光源相对光谱差异

实验室—外场光源相对光谱差异与量传光谱仪杂散光抑制水平相关。对于理想的光谱辐射计,光源光谱差异对于测量的准确性影响可以忽略。然而便携式光谱辐射计杂散光抑制水平低,杂散光影响必须予以考虑。对于光谱辐射计的杂散光影响,国际上提出采用可调谐激光构建全波段光谱响应的方法,从而量化反演修正不同波长的杂散光贡献(Zong等,2006)。本文采用激光和滤

光片结合的方法修正杂散光贡献。针对量传光谱仪的3个波段范围,首先采用3个不同波长的单色光分析杂散光对测量准确性的影响。图3给出了3个激光波长下量传光谱仪的光谱响应和背景噪声。当采用波长为1600 nm的激光照射时,量传光谱仪仅990—1890 nm间光谱响应有明显变化,平均响应较背景噪声大1个量级以上,其他波长下的光谱响应信号和暗背景噪声水平重合。当采用波长为632.8 nm或2250 nm的激光照射时,量传光谱仪仅在硅阵列探测器或第二块锗镓砷阵列探测器覆盖波段有明显的光谱响应。因此,量传光谱仪3个探测器波段之间几乎没有联系。另一方面,虽然激光线宽近似可以忽略,但是激光波长附近50 nm内量传光谱仪有明显的光谱响应。同时,350—990 nm和990—1890 nm量传光谱仪两侧应有明显变大的趋势。显然,激光波长外的光谱响应都源于杂散光贡献。

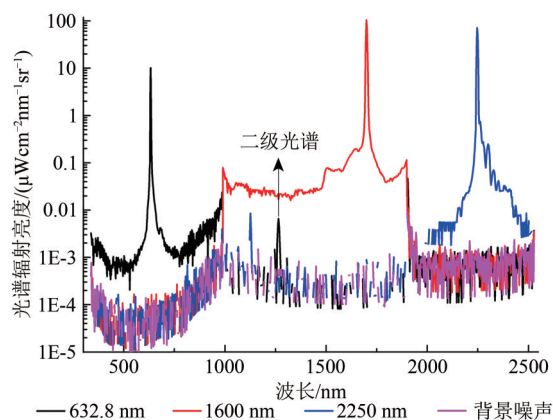


图3 不同激光下的光谱响应信号
Fig. 3 The spectral responsivity using different lasers

量传光谱仪测量实验室光源或参考目标源时,真实测量过程由式(2)描述。

$$L_{\text{lamp}}(\lambda_0) + \sum_{\lambda \neq \lambda_0} L_{\text{lamp}}(\lambda) R_{\lambda \rightarrow \lambda_0} = L'_{\text{measure}}(\lambda_0) \quad (2)$$

式中, $L'_{\text{measure}}(\lambda_0)$ 为量传光谱仪在波长 λ_0 的测量信号, $L_{\text{lamp}}(\lambda_0)$ 为被测光源在波长 λ_0 的真实值, $R_{\lambda \rightarrow \lambda_0}$ 为波长 λ 的辐射在量传光谱仪 λ_0 的贡献。

对于波长 λ_0 两侧50 nm以外的杂散光,即波长 $\lambda > \lambda_0 + 50$ 或 $\lambda < \lambda_0 - 50$ 的杂散光,采用长波通滤光片或短波通滤光片进行修正。选择适当的长波通滤光片,其透过率在波长 $\lambda > \lambda_0 + 50$ 的区间接近常数,在波长 $\lambda \leq \lambda_0$ 的区间近似为0。将该长波通滤光片放置在被测光源前,则式(2)转化为式(3)。

$$\sum_{\lambda > \lambda_0 + 50} Tr_0 L_{\text{lamp}}(\lambda) R_{\lambda \rightarrow \lambda_0} = L'_{\text{filter}}(\lambda_0) \quad (3)$$

式中, Tr_0 为长波通滤光片在波长 $\lambda > \lambda_0 + 50$ 区间的透过率, $L'_{\text{filter}}(\lambda_0)$ 为采用长波通滤光片后量传光谱仪在波长 λ_0 的测量信号。

图4(a)实线给出的是实验室定标光源光谱分布, 虚线给出的是实验室定标光源通过450 nm长波通滤光片后的光谱分布。图4(b)是量传光谱仪测量实验室定标光源时, 光路移出和放置450 nm长波通滤光片测量结果的比值。由于450 nm长波通滤光片在400 nm以下波长透过率近似为0, 因此图4(a)虚线光谱几乎只存在430 nm以上分布, 在400 nm以下几乎全部截止。在测量虚线所示光源

时, 量传光谱仪在400 nm以下的响应几乎都来自于430 nm以上光辐射的杂散光贡献。采用理想的光谱辐射计测量时, 有滤光片和无滤光片的比值对应滤光片的真实透过率。而图4(b)中可以看到, 在波长小于400 nm时比值显然并不为0, 且随波长变小有变大趋势, 表明随着波长变小杂散光对测量结果贡献变大。图中380 nm处的比值约3%, 结合长波通滤光片的透过率 Tr_0 , 可以计算得到定标光源430 nm以上辐射在380 nm的杂散光贡献。定标光源380 nm波长的真实辐亮度仍需要采用激光法继续扣除330—430 nm光辐射的杂散光贡献。对于其他波长, 方法类似, 依次采用滤光片法计算光源在波长 $\lambda > \lambda_0 + 50$ 和 $\lambda < \lambda_0 - 50$ 的杂散光贡献并扣除。

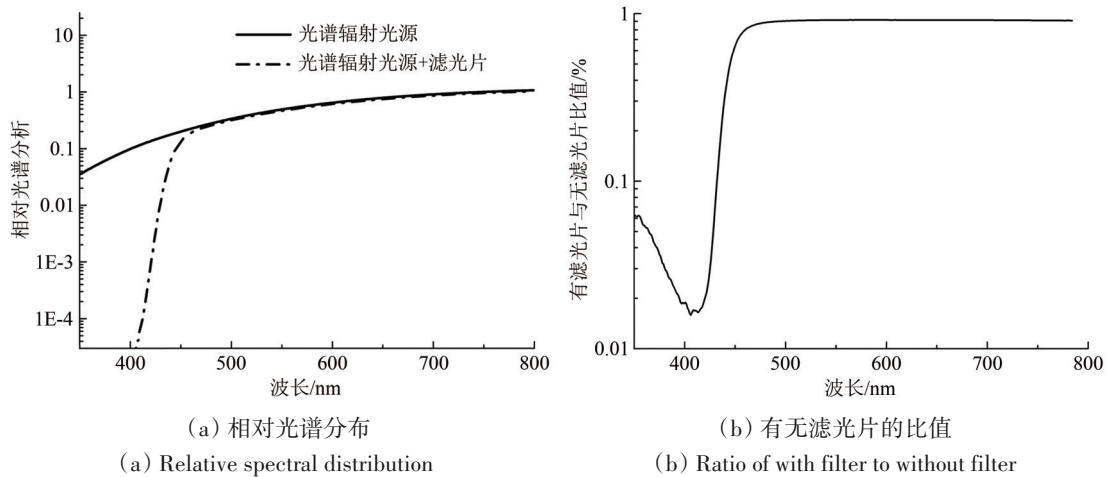


图4 采用长波通滤光片测量杂散光

Fig. 4 Stray light measured using long pass filter

对于波长两侧50 nm内的杂散光, 采用激光法构造杂散光响应矩阵进行修正。扣除滤光片法测量的杂散光贡献, 式(2)变为式(4)。

$$\begin{bmatrix} R_{\lambda_0-50 \rightarrow \lambda_0-50} & \cdots & R_{\lambda_0 \rightarrow \lambda_0-50} & \cdots & R_{\lambda_0+50 \rightarrow \lambda_0-50} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{\lambda_0-50 \rightarrow \lambda_0} & \cdots & R_{\lambda_0 \rightarrow \lambda_0} & \cdots & R_{\lambda_0+50 \rightarrow \lambda_0} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{\lambda_0-50 \rightarrow \lambda_0+50} & \cdots & R_{\lambda_0 \rightarrow \lambda_0+50} & \cdots & R_{\lambda_0+50 \rightarrow \lambda_0+50} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\text{lamp}}(\lambda_0-50) \\ \cdots \\ L_{\text{lamp}}(\lambda_0) \\ \cdots \\ L_{\text{lamp}}(\lambda_0+50) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_{\text{subtract}}(\lambda_0-50) \\ \cdots \\ L'_{\text{subtract}}(\lambda_0) \\ \cdots \\ L'_{\text{subtract}}(\lambda_0+50) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $L'_{\text{subtract}}(\lambda_0)$ 为扣除波长 $\lambda > \lambda_0 + 50$ 和 $\lambda < \lambda_0 - 50$ 杂散光后的测量值。

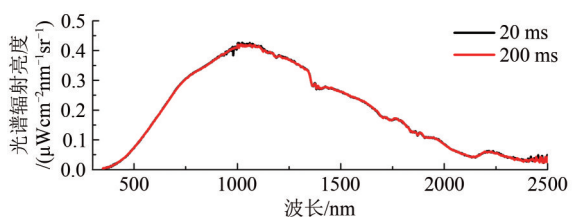
当量传光谱仪测量波长 λ_0 的激光光源时, 波

长 λ_0 光辐射在其他波长 λ 的杂散光响应 $R_{\lambda_0 \rightarrow \lambda}$ 可以测量得到。改变激光波长, 可以得到新波长光辐射在其他波长的杂散光响应。实验数据表明激光波长变化小于50 nm时, 邻近波长杂散光响应的相对分布变化较小, 即 $R_{\lambda_0 \rightarrow \lambda_0 + \Delta\lambda}$ 可近似代替 $R_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_1 + \Delta\lambda}$ 。因此, 根据目标波长激光照射下的杂散光响应, 可以构造式(4)左侧的杂散光响应矩阵, 进而反演计算目标光源光谱分布 $L_{\text{lamp}}(\lambda_0)$ 。采用滤光片和激光结合方法, 量传光谱仪测量实验室定标光源时, 380 nm处的杂散光贡献可以从3%以上降至0.8%以下。量传光谱仪测量外场参考目标源时, 同样进行杂散光修正。

3.2 光源辐射量值差异

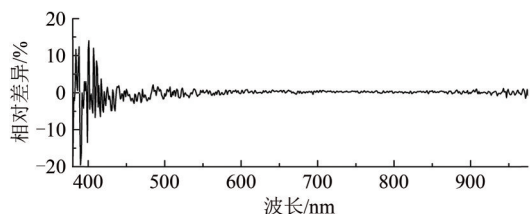
现场辐射定标时, 光谱辐射量值变化带来的影响与量传光谱仪的非线性有关。非线性主要体

现在积分时间非线性和量值测量非线性。量传光谱仪探测器采用阵列式 CCD 元器件，其内部积分时间根据辐射量值大小调节。由于 380—980 nm 光谱辐射量值差异较大，实验室和外场测量时的积分时间分别为 200 ms 和 20 ms。为了评估积分时间非线性的影响，本文对比了两个积分时间 20 ms 和 200 ms 的光谱辐射亮度测量结果，见图 5。由于实验室和外场测量时，980—2400 nm 的积分时间并未发生变化，图 5 下图仅给出了 380—980 nm 的相对差异。受限于信噪比，380—500 nm 测量差异呈现明显的震荡。在 500—950 nm 波段，两个积分时间测量结果的平均差异约 0.11%。当提升实验室光源光谱辐射亮度水平时，不同积分时间下 380—500 nm 的相对差异得到明显改善。因此，该波段积分时间非线性的贡献采用 500—950 nm 近似处理。



(a) 不同积分时间测量的光谱辐射亮度

(a) Spectral radiance measured at different integration time



(b) 不同积分时间测量的光谱辐射亮度相对差异

(b) Relative difference of the spectral radiance measured at different integration time

图 5 不同积分时间的光谱辐射测量结果

Fig. 5 Spectral radiances at different integration time

国际上通常采用叠加法进行探测器的非线性测量 (Thompson 和 Chen, 1994)，测量光源是宽波段光源或激光单色光源 (Kübarssepp 等, 1998)。本文采用双积分球叠加法开展测量。将两个相近的小积分球光源光辐射导入大积分球，采用大积分球标定量传光谱仪的非线性。首先，两个小积分球光源轮流打开，量传光谱仪依次进行测量；然后两个小积分球光源同时打开，量传光谱仪再次测量。根据式(5)计算 2 倍光谱辐射亮度变化下的非线性修正系数：

$$r_{\text{ratio}} = \frac{I_{1+2}}{I_1 + I_2} \quad (5)$$

式中， I_1 和 I_2 是两个小积分球光源轮流打开时量传光谱仪采集的信号， I_{1+2} 是两个小积分球光源同时打开时量传光谱仪采集的信号。

图 6 给出了 2 倍量值变化下的非线性修正系数。除了探测器拼接处和水的吸收峰附近，400—1800 nm 非线性系数几乎都位于 $\pm 0.2\%$ 内。受限于信噪比，1900—2400 nm 的震荡从 0.4% 增加至约 $\pm 1.0\%$ 。

由于实验室—外场光源的光谱辐射亮度在 380—500 nm 变化可能高达 30 倍以上，实验室将单路光辐射信号依次增加为 $2I_1$, $4I_1$, $8I_1$ 和 $16I_1$ ，测量该量值下的非线性修正系数。信号变化 32 倍的非线性修正系数由式(6)给出 (Shin 等, 2014)

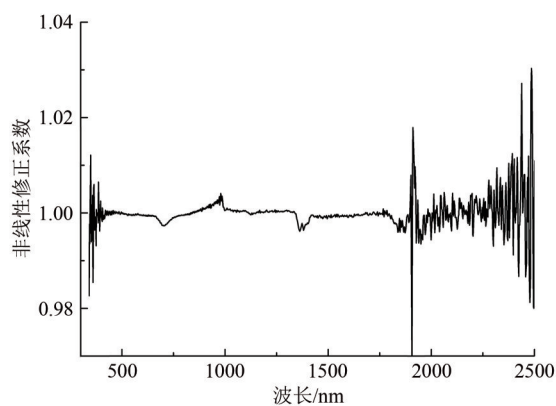


图 6 非线性修正系数

Fig. 6 The nonlinearity correction coefficients

$$I_{\text{correct}} = r_{\text{ratio}}^{(1)} r_{\text{ratio}}^{(2)} r_{\text{ratio}}^{(3)} r_{\text{ratio}}^{(4)} r_{\text{ratio}}^{(5)} \quad (6)$$

式中， $r_{\text{ratio}}^{(1)}$ ， $r_{\text{ratio}}^{(2)}$ ， $r_{\text{ratio}}^{(3)}$ ， $r_{\text{ratio}}^{(4)}$ 和 $r_{\text{ratio}}^{(5)}$ 分别是单路光信号 I_1 ， $2I_1$ ， $4I_1$ ， $8I_1$ 和 $16I_1$ 时的非线性修正系数。

3.3 实验室—外场温度差异

现场量值传递的环境温度与实验室温度差异极大，量传光谱仪量值传递的准确性依赖于外场温度下光谱响应度的测量准确性。为了分析光谱响应度随温度的变化，本文采用温湿度控制箱来模拟外场实验条件，首先考察了光谱响应度与量传光谱仪探测器温度是否存在一一对应的关系。实验过程中，量传光谱仪始终放置在温湿度控制箱内部，定标光源放置在温湿度控制箱外部。当量传光谱仪探测器温度上升到 30 °C 后，开启温湿度控制箱进行温度调节。为与现场量值传递时量传光谱仪所处环境温度一致，温湿度控制箱温度分别设置为 5 °C 和 10 °C，量传光谱仪在温湿度控

制箱内稳定后探测器最终温度为 11 °C 和 16 °C。图 7 给出了两种温度设置下, 量传光谱仪探测器到达相同温度时的光谱响应度差异。当量传光谱仪探测器温度分别为 20.9 °C 和 16.9 °C 时, 除了水汽吸收峰附近, 两种环境温度下的光谱响应度一致性几乎都优于 0.5%。

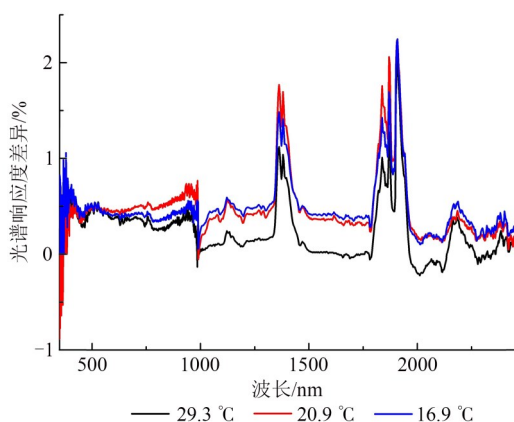


图 7 相同探测器温度下的光谱响应度差异

Fig. 7 Spectral responsivity difference at the same detector temperature

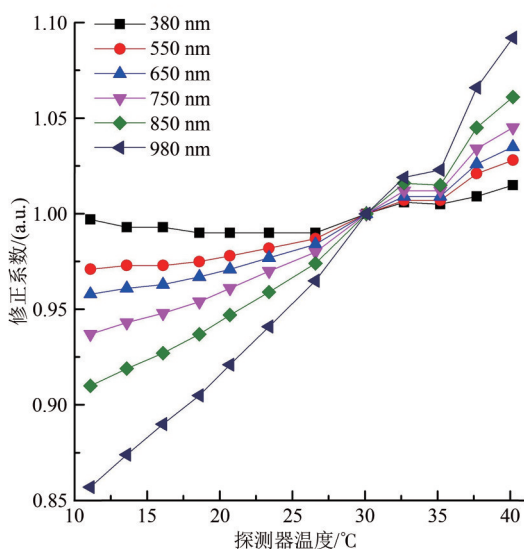
对于分析量传光谱仪光谱响应度随探测器温度的变化, 本文选择特定温度 T_0 的光谱响应度作

为参考, 对其他温度下的光谱响应度进行数值修正。修正系数由式(7)描述

$$m(T, \lambda) = \frac{R(T_1, \lambda)}{R(T_0, \lambda)} \quad (7)$$

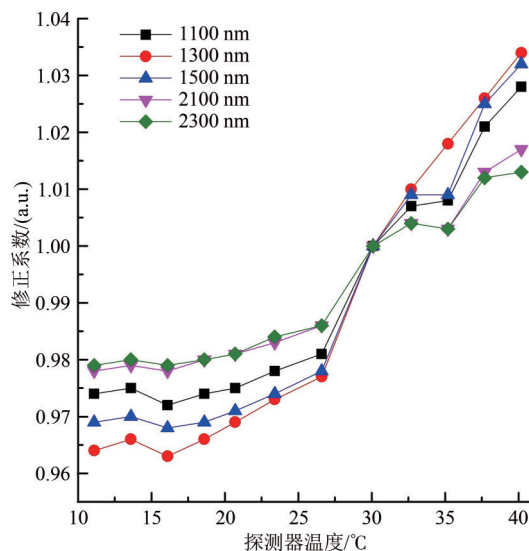
式中, $R(T_1, \lambda)$ 和 $R(T_0, \lambda)$ 是量传光谱仪探测器在温度 T_1 和 T_0 时在波长 λ 的光谱响应度。

图 8 给出了量传光谱仪光谱响应度的温度修正系数, 其中 $T_0=30.1$ °C。图 8 中看到, 在波长 380—980 nm 区间, 380 nm 的光谱响应度受温度影响几乎可以忽略, 其他波长光谱响应度呈现出随温度上升变大、随温度降低减小的趋势, 且波长越大温度对光谱响应度的影响越明显; 在波长 1100—2300 nm 区间, 光谱响应度在温度降低时趋于平坦, 温度升高时表现出上升趋势。对图 8 中的曲线进行数值拟合, 得到量传光谱仪 11 °C—40 °C 间任意温度的光谱响应度修正系数。结合量传光谱仪现场量值传递时的探测器温度, 可以对现场测量数据进行温度修正。图 8 中当探测器温度从 30 °C 降低至 11 °C 时, 量传光谱仪在 980 nm 的响应度变化高达 14% 以上, 温度修正后响应度变化的影响可以降至 1% 以内。



(a) Si 探测器通道温度修正系数

(a) Temperature correction coefficients of Si detector channel



(b) InGaAs 探测器通道温度修正系数

(b) Temperature correction coefficients of InGaAs detector channel

图 8 光谱响应度温度修正系数

Fig. 8 Temperature correction coefficients of spectral responsivity

3.4 实验室—外场湿度差异

湿度对量传光谱仪的影响极为特殊, 主要集中在水汽的吸收峰 1350 nm 和 1900 nm 附近。图 9

给出了实验室条件下, 量传光谱仪不同时刻的光谱响应度变化。图 9 中除了水的吸收峰附近, 其他波长光谱响应度的变化几乎都小于 0.1%。尽管实

实验室条件下温度和湿度近似恒定, 水的吸收峰附近仍然有0.5%—1.0%的明显变化。显然, 水汽通过别的途径仍可能对测量结果有影响。比如, 量传光谱仪内部小空间尺度下的湿度可能存在一定的变化, 从而影响了水汽的吸收。

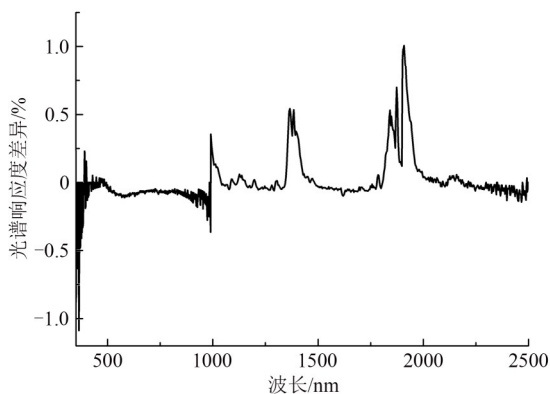


图9 水汽带来的光谱响应度变化

Fig. 9 The variation of the spectral responsivity due to vapor

对于现场量值传递, 一方面环境湿度并非恒定, 环境湿度的不同会严重影响水分子吸收峰附近的测量结果; 另一方面, 量传光谱仪的温度一直处于变化状态, 而不同温度下的饱和蒸汽压并不相同, 仪器内部小空间尺寸下的湿度可能会受到一定影响。外场实验数据表明, 水汽吸收峰附近不同时刻光谱响应度的变化高达5%以上, 而湿度对于其他波长的影响近似可忽略。

4 不确定度评定

与常规实验室定标相比, 现场量值传递时量传光谱仪的不确定度评价需要多考虑4项不确定度来源。第一项与量传光谱仪的波长测量不确定度有关; 第二项与量传光谱仪的杂散光修正有关; 第三项与量传光谱仪的非线性修正有关; 第四项与量传光谱仪的温度修正有关。其中, 第三项主要由非线性测量过程中光源的稳定性和量传光谱仪的测量重复性组成。

4.1 波长引入的不确定度

量传光谱仪波长引入的光谱辐射量值测量不确定度与测量光源的光谱分布相关。当测量光源光谱分布变化越缓慢, 波长引入的测量不确定度越小; 当测量光源光谱分布变化越剧烈, 波长引入的测量不确定度就越大。图10给出了波长与辐射测量准确性的关系。光谱辐射测量的准确性与

光源光谱随波长的相对变化 $dE/d\lambda$ 成正比。而外场参考目标源与实验室定标光源的相对光谱分布差异极大, 波长引入的不确定度必须考虑。式(8)描述了现场量值传递时, 量传光谱仪测量准确性与波长测量不确定度之间的关系。

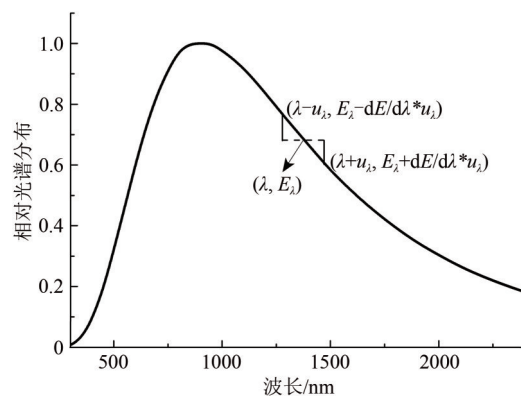


图10 波长与辐射测量的关系

Fig. 10 Relationship between wavelength and radiometric measurement

$$u_{\lambda} = \left| \frac{dE_1}{d\lambda} - \frac{dE_2}{d\lambda} \right| u_{\lambda} \quad (8)$$

式中, $\frac{dE_1}{d\lambda}$ 和 $\frac{dE_2}{d\lambda}$ 分别是实验室定标光源和外场参考目标源光谱分布对波长的导数, u_{λ} 是量传光谱仪的波长测量不确定度。

量传光谱仪的波长测量不确定度有4个来源, 波长定标光源、波长测量准确性、波长测量重复性和波长示值分辨力。波长定标采用汞氙灯和可调谐激光。汞氙灯定标量传光谱仪380—1700 nm波段, 可调谐激光定标1700—2400 nm波段。汞氙灯的波长测量不确定度可以忽略; 激光波长采用波长标定后的双光栅光谱仪OL750D测量, 波长测量不确定度优于0.14 nm。对于波长测量准确性和测量重复性, 连续测量10次, 采用10次测量结果的平均值作为最终的波长定标结果。由于量传光谱仪的波长间隔较大, 采用数值计算将测量结果插值成0.1 nm, 然后计算峰值半高宽波长的平均值。量传光谱仪10次数据的一致性表明测量重复性带来的不确定度为0。

波长测量准确性的结果见表1。表中波长标准值是汞氙灯的特征谱线数值和激光波长, 波长测量值是插值计算后的谱峰波长, 波长偏差是波长测量值与波长标准值的差。从表中可以看出, 当波长小于966 nm时, 量传光谱仪的波长偏差都位于

± 0.40 nm 以内; 当波长大于 1013 nm 时, 波长表现出明显的负偏差, 对 1013.98—1850 nm 和 1950—2400 nm 波段分别进行 1.95 nm 和 1.5 nm 的修正, 则修正后的偏差分别位于 ± 0.48 nm 和 ± 0.40 nm 以内。由于波长偏差随波长的变化并无规律, 根据量传光谱仪 3 个探测器各自波段的最大偏差和均匀分布计算测量准确性带来的不确定度。测量准确性的不确定度在 380—990 nm、990—1890 nm 和 1890—2400 nm 分别为 0.23 nm、0.28 nm 和 0.23 nm。量传光谱仪波长示值分辨力带来的测量不确定度按照均匀分布进行评定, 是波长示值间隔的 $1/2\sqrt{3}$ 倍, 在 3 个探测器波段分别是 0.38 nm, 1.07 nm 和 0.72 nm。由于波长测量过程中, 波长准确性受到波长示值分辨力的影响。根照测量不确定度评定规则, 选取波长准确性和波长示值分辨力带来不确定度的大值作为最终的测量不确定度 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2016)。因此, 量传光谱仪在 3 个波段范围的波长测量不确定度为 0.38 nm, 1.07 nm 和 0.72 nm。

表 1 波长定标结果

Table 1 The wavelength calibration results

波长标准值/nm	波长测量值/nm	波长偏差/nm
365.02	365.3	0.28
404.66	404.7	0.04
435.84	436.2	0.36
546.07	546.45	0.38
696.54	696.45	-0.09
763.51	763.9	0.39
912.30	911.9	-0.40
965.78	965.75	-0.03
1013.98	1012.5	-1.48
1367.35	1365.05	-2.30
1529.58	1527.15	-2.43
1694.06	1691.9	-2.16
1850	1848.0	-2.0
1950	1948.2	-1.8
2250	2248.6	-1.4
2400	2399.0	-1.0

4.2 杂散光修正的不确定度

当采用激光和滤光片结合的方法对杂散光贡献进行修正后, 测量引入的不确定度主要来源于激光波长 50 nm 内的相对光谱分布和滤光片的透过率。激光波长 50 nm 内的相对光谱分布取决于量传光谱仪自身性能 (Zong, 2010)。当改变激光功率

或多次重复测量时, 相对光谱分布的响应曲线会存在一定发散性。该发散性引起的测量不确定度由式(9)给出。

$$u_2 = \left| \frac{\sum_{\lambda_0-50}^{\lambda_0+50} L'_{\text{lamp}}(\lambda) R^1_{\lambda \rightarrow \lambda_0} - \sum_{\lambda_0-50}^{\lambda_0+50} L'_{\text{lamp}}(\lambda) R^2_{\lambda \rightarrow \lambda_0}}{C \cdot L'_{\text{lamp}}(\lambda_0)} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中, $L'_{\text{lamp}}(\lambda)$ 和 $L'_{\text{lamp}}(\lambda_0)$ 是杂散光修正后光源在波长 λ 和 λ_0 的结果, $R^1_{\lambda \rightarrow \lambda_0}$ 和 $R^2_{\lambda \rightarrow \lambda_0}$ 是量传光谱仪杂散光响应分布多次测量的两个极值, C 是极差法的极差系数。

滤光片透过率引起的测量不确定度由式(10)描述。

$$u_3 = \left| \frac{\sum_{\lambda_1 < \lambda_0 - 50} u^S_{Tr}(\lambda_1) L'_{\text{lamp}}(\lambda_1) R_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_0} + \sum_{\lambda_2 > \lambda_0 + 50} u^L_{Tr}(\lambda_2) L'_{\text{lamp}}(\lambda_2) R_{\lambda_2 \rightarrow \lambda_0}}{L'_{\text{lamp}}(\lambda_0)} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中, $u^S_{Tr}(\lambda_1)$ 和 $u^L_{Tr}(\lambda_2)$ 是短波通滤光片和长波通滤光片在波长 λ_1 和 λ_2 的测量不确定度, $L'_{\text{lamp}}(\lambda_1)$ 和 $L'_{\text{lamp}}(\lambda_2)$ 是杂散光修正后光源在波长 λ_1 和 λ_2 的结果, $R_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_0}$ 是波长 λ_1 的辐射在量传光谱仪波长 λ_0 的贡献, $R_{\lambda_2 \rightarrow \lambda_0}$ 是波长 λ_2 的辐射在量传光谱仪波长 λ_0 的贡献。

4.3 温度修正的不确定度

当量传光谱仪进行光谱响应度的修正时, 对于相同探测器温度下的光谱响应度测试存在一定的发散性。在不同实验条件下测量 3—5 次, 按照极差法计算相关测量不确定度, 测量不确定度由式(11)描述。

$$u_4 = \left| \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{C' \cdot \bar{L}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中, L_{max} 是量传光谱仪测量的最大值, L_{min} 是量传光谱仪测量的最小值, \bar{L} 是量传光谱仪测量结果的平均值, C' 是极差法的极差系数。

4.4 现场量值传递的不确定度

2021 年 10 月 15 日至 16 日, 在包头国家高分辨率遥感综合定标场, 采用现场辐射定标的方法对沙地的外场自动观测设备和便携式地物光谱仪进行定标。现场量值传递实验持续时间约 5 min, 太阳角度或者气象条件变化的影响可以忽略。除

了量传光谱仪的测量不确定度外，现场量值传递的测量不确定度还需考虑量传光谱仪的稳定性、外场测量设备的测量重复性、外场测量设备的温湿度影响和白板均匀性。其中，外场设备的温湿度影响参照同类型仪器实验室测量结果。依照不确定度传播律模型，本文分析和修正了现场量值传递时各个影响因素的贡献，评价了现场量值传递时量传光谱仪的测量不确定度，最终通过现场辐射定标实现对外场测量设备的现场校验。表2给出了外场测量设备现场辐射定标的不确定度。

表2 外场地物光谱仪定标不确定度

Table 2 The uncertainty of field spectroradiometer

不确定度来源	测量不确定度/%		
	550 nm	1100 nm	2200 nm
量传光谱仪	1.74	1.81	1.84
量传光谱仪稳定性	0.22	0.29	0.20
现场设备重复性	0.20	0.15	0.40
外场设备温湿度	0.81	0.40	0.40
白板均匀性	0.30	0.30	0.30
合成不确定度($k=1$)	2.0	1.9	2.0

图11给出了量传光谱仪和外场测量设备380—2400 nm的测量不确定度（水汽吸收峰波长除外）。除了1000 nm附近和水的吸收峰附近，量传光谱仪的不确定度为1.7%—2.3% ($k=1$)，外场测量设备的不确定度为1.9%—2.5% ($k=1$)。量传光谱仪在1000 nm测量不确定度较其他波长明显偏大，主要是由量传光谱仪的稳定性引起的。1000 nm位于硅阵列式探测器和钢镓砷阵列探测器的波长重叠区域，涉及两个探测器的数值匹配，现场量值传递实验前后该波长光谱响应度存在较明显的发散性。

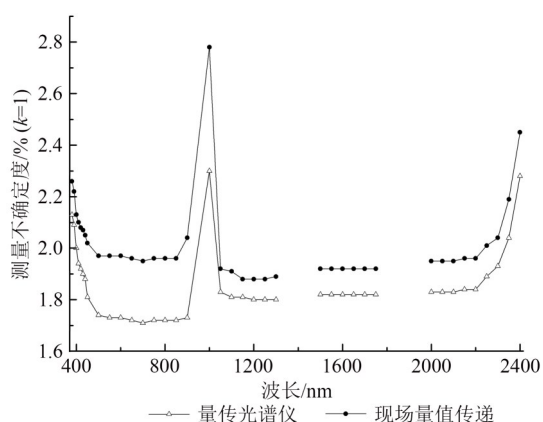


图11 现场辐射量值传递不确定度

Fig. 11 Uncertainty of field dissemination of the value of the quantity

5 结论

不同场地光源辐射光谱差异、动态范围变化及测量环境条件等因素均严重影响着外场测量设备的数据准确性。本文提出了现场辐射量值传递方法将光谱辐射量值传递给外场测量设备，以期保证外场测量设备的辐射测量水平溯源至统一基准。首先，分析了实验室—外场差异对量传光谱仪测量准确性的影响。采用激光和滤光片结合的杂散光修正方法解决了光源光谱差异的影响，杂散光的贡献从3%降至0.8%以下；评价了380—950 nm积分时间产生的非线性，非线性的平均贡献约0.11%，采用双积分球叠加法解决了380—500 nm光源量值变化32倍时的影响；证实量传光谱仪光谱响应度与内部探测器温度存在一一对应关系，并建立温度修正模型解决了环境温度的影响，环境温度对测量准确性的影响降至1%以内。然后对量传光谱仪实验室至外场量值传递进行分析，评价了量传光谱仪的外场测量不确定度，380—2400 nm的不确定度为1.7%—2.3% ($k=1$)；最后通过量传光谱仪的现场量值传递，完成了外场测量设备的测量不确定度评价，实现了外场测试设备380—2400 nm测量不确定度1.9%—2.5% ($k=1$)，保障了从实验室到外场全链路的量值传递。现场量值传递方法有利于保证场地测量设备间数据的一致性，有利于中国可见光—短波红外波段光学载荷高精度在轨辐射定标研究。

目前，量传光谱仪性能较实验室大型双光栅光谱辐射计仍有一定差距，因此量传光谱仪定标过程中杂散光、非线性和温度效应等带来的测量不确定度必须予以考虑。随着科技的进步，未来量传光谱仪的性能会进一步提升，实验室—外场测量差异对量传光谱仪测量准确性的影响会明显降低，现场辐射量值传递的精度会进一步提升。

参考文献 (References)

- Bouvet M, Thome K, Berthelot B, Bialek A, Czaplak-Myers J, Fox N P, Goryl P, Henry P, Ma L L, Marcq S, Meygret A, Wenny B N and Woolliams E R. 2019. RadCalNet: a radiometric calibration network for earth observing imagers operating in the visible to short-wave infrared spectral range. *Remote Sensing*, 11(20): 2401 [DOI: 10.3390/rs11202401]
- Czaplak-Myers J S, Thome K J, Cocilovo B R, McCorkel J T and Bu-

- chanan J H. 2008. Temporal, spectral, and spatial study of the automated vicarious calibration test site at Railroad Valley, Nevada// Proceedings of SPIE 7081, Earth Observing Systems XIII. San Diego: SPIE: 70810I [DOI: 10.1117/12.795551]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2016. JJF 1033-2016 Rule for the examination of measurement standards. Beijing: China Quality Inspection Press (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2016. JJF 1033-2016 计量标准考核规范. 北京: 中国质检出版社)
- Gou Z Y, Yan L, Chen W, Jing X, Yin Z Y and Duan Y N. 2012. In-flight absolute radiometric calibration of UAV hyperspectral camera and its validation analysis. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(2): 430-434 (勾志阳, 晏磊, 陈伟, 景欣, 尹中义, 段依妮. 2012. 无人机高光谱成像仪场地绝对辐射定标及验证分析. *光谱学与光谱分析*, 32(2): 430-434) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)02-0430-05]
- Kübarsepp T, Haapalinna A, Kärhä P and Ikonen E. 1998. Nonlinearity measurements of silicon photodetectors. *Applied Optics*, 37(13): 2716-2722 [DOI: 10.1364/AO.37.002716].
- Li C R, Ma L L, Tang L L, Gao C X, Qian Y G, Wang N and Wang X H. 2021. A comprehensive calibration site for high resolution remote sensors dedicated to quantitative remote sensing and its applications. *Journal of Remote Sensing*, 25(1): 198-219 (李传荣, 马灵玲, 唐伶俐, 高彩霞, 钱永刚, 王宁, 王新鸿. 2021. 面向定量遥感的高分辨遥感综合定标场及其应用. *遥感学报*, 25(1): 198-219) [DOI: 10.11834/jrs.20210326]
- Li L, Dai C H, Wu Z F and Wang Y F. 2019. Laboratory calibration and temperature research of spectral radiometric instruments. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(6): 1965-1969 (李玲, 代彩红, 吴志峰, 王彦飞. 2019. 光谱辐射测量仪器温度修正方法的研究及验证. *光谱学与光谱分析*, 39(6): 1965-1969) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1965-05]
- Li X, Zheng X B and Yin Y P. 2014. Progress in automated site vicarious calibration technologies. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 9(1): 17-21 (李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 2014. 场地自动化定标技术进展. *大气与环境光学学报*, 9(1): 17-21) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2014.01.003]
- Ma L L, Zhao Y G, Woolliams E R, Dai C H, Wang N, Liu Y K, Li L, Wang X H, Gao C X, Li C R and Tang L L. 2020. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples. *Remote Sensing*, 12(11): 1696 [DOI: 10.3390/rs12111696]
- Meflah M, Damé L, Bolsée D, Hauchecorne A, Pereira N, Sluse D, Cessateur G, Irbah A, Bureau J, Weber M, Bramstedt K, Hilbig T, Thiéblemont R, Marchand M, Lefèvre F, Sarkissian A and Bekki S. 2018. SOLAR-ISS: a new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations. *Astronomy and Astrophysics*, 611: A1 [DOI: 10.1051/0004-6361/201731316]
- Meygret A, Santer R P, and Berthelot B. 2011. ROSAS: a robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration//Proceedings of SPIE 8153, Earth Observing Systems XVI. San Diego: SPIE: 815311 [DOI: 10.1117/12.892759]
- Price L L A, Hooke R J and Khazova M. 2014. Effects of ambient temperature on the performance of CCD array spectroradiometers and practical implications for field measurements. *Journal of Radiological Protection*, 34(3): 655-673 [DOI: 10.1088/0952-4746/34/3/655]
- Salim S G R, Fox N P, Theocharous E, Sun T and Grattan K T V. 2011. Temperature and nonlinearity corrections for a photodiode array spectrometer used in the field. *Applied Optics*, 50(6): 866-875 [DOI: 10.1364/AO.50.000866]
- Santer R P, Six C and Buis J P. 2003. Vicarious calibration on land site using automatic ground-based optical measurements: applications to SPOT-HRV//Proceedings of SPIE 4891, Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III. Hangzhou: SPIE: 524-534 [DOI: 10.1117/12.467562]
- Shin D J, Park S, Jeong K L, Park S N and Lee D H. 2014. High-accuracy measurement of linearity of optical detectors based on flux addition of LEDs in an integrating sphere. *Metrologia*, 51(1): 25-32 [DOI: 10.1088/0026-1394/51/1/25]
- Thompson A and Chen H M. 1994. Beamcon III, a linearity measurement instrument for optical detectors. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 99(6): 751-755 [DOI: 10.6028/jres.099.067].
- Wan Z, Li B Y, Li X S, Liu Z X, Liu H X and Ye Z. 2012. Influence of integrating sphere source's distribution temperature on broadband optical remote sensor's absolute radiometric calibration and correcting methods. *Chinese Journal of Luminescence*, 33(8): 863-868 (万志, 李葆勇, 李宪圣, 刘则洵, 刘洪兴, 叶钊. 2012. 积分球光源分布温度对宽波段光学遥感器绝对辐射定标的影响及其校正. *发光学报*, 33(8): 863-868) [DOI: 10.3788/fjxb20123308.0863]
- Wu Z F, Dai C H, Wang Y F and Zou J H. 2016. Measurement of optical parameters for array spectroradiometers. *Optics and Precision Engineering*, 24(8): 1902-1907 (吴志峰, 代彩红, 王彦飞, 邹巨洪. 2016. 阵列式光谱辐射计光学参数测量. *光学精密工程*, 24(8): 1902-1907) [DOI: 10.3788/OPE.20162408.1902]
- Xu M M, Jiang Q W, Liu W Q, Zhang Y C, Chen J X and Zeng Y. 2014. An improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer. *Infrared and Laser Engineering*, 43(1): 184-189 (徐明明, 江庆五, 刘文清, 张寅超, 陈结祥, 曾议. 2014. 一种新型双光栅光谱仪光学系统设计与优化. *红外与激光工程*, 43(1): 184-189) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2014.01.033]
- Zheng X B. 2011. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 32(5): 36-43 (郑小兵. 2011. 高精度卫星光学遥感器辐射定标技术. *航天返回与遥感*, 32(5): 36-43) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2011.05.009]
- Zong Y Q. 2010. Uncertainty analysis of stray-light correction//Proceedings of 2010 CIE Expert Symposium on Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry. [s.l.]: [s.n.]
- Zong Y Q, Brown S W, Johnson B C, Lykke K R and Ohno Yoshi. 2006. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers. *Applied Optics*, 45(6): 1111-1119 [DOI: 10.1364/AO.45.001111]

Field dissemination of the value of the quantity method of the spectroradiometer in visible-to-shortwave infrared

CHENG Qiutong¹, LI Ling¹, DAI Caihong¹, WU Zhifeng¹, GAO Caixia², HE Sijie¹, WANG Yanfei¹

1. Division of Metrology in Optics and Laser, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Field spectroradiometers need to be traced back to a unified benchmark, namely, the international system (SI) of units, to ensure the accuracy and consistency of different field spectroradiometers. Considering that reports focusing on the accuracy of field radiometric calibration of spectroradiometers are lacking, this study investigates the field dissemination of the value of the quantity method.

The field dissemination of the value of the quantity method can be divided into two parts: calibration of a transfer spectroradiometer and field radiometric calibration. The influencing factors must be considered when a transfer spectroradiometer is used to calibrate the field spectroradiometer because of the differences between the laboratory and the actual site, such as relative spectral, radiation level, and temperature and humidity differences. Mathematical models are established to quantify the influence of various parameters on the spectral measurement accuracy, and a stray light correction model is built using the laser and filter method to correct the stray light caused by the relative spectral difference. The integrating sphere light source addition method is used to evaluate the nonlinearity at different radiation levels. In addition, whether spectral responsivity and detector temperature have a one-to-one correspondence is analyzed, and a temperature correction model is built according to the variation trend of spectral responsivity. After measuring and correcting the influence of the difference between the laboratory and actual site, the transfer spectroradiometer is utilized to transfer the radiometric quantity to the field spectroradiometer by using the symmetrical placement and exchange measurement method.

Uncertainty evaluation methods, such as the model of the relationship between wavelength and spectral radiance, the stray light correction model, and the temperature correction model, are provided for the transfer spectroradiometer. Then, the radiometric quantity is transferred from the laboratory measurement standard to the transfer spectroradiometer and then to the field instruments. By analyzing the uncertainty components in the whole process, a laboratory-field dissemination method of the value of the quantity chain is established, and the field spectroradiometer is traced to the SI unit uninterruptedly. In accordance with the uncertainty propagation law, the uncertainties of the transfer spectroradiometer and field spectroradiometer are obtained. Experimental results show that the uncertainty of the transfer spectroradiometer is 1.7%—2.3% ($k = 1$) from 380 nm to 2400 nm, and the uncertainty of the field spectroradiometer is 1.9%—2.5% ($k = 1$) from 380 nm to 2400 nm.

The paper systematically introduces the method of field dissemination of the value of the quantity method. During the field calibration process, the uncertainty and characteristics of the standard transfer spectroradiometer are investigated. By analyzing the field calibration uncertainty in the whole process, the field spectroradiometer can be traced back to the international equivalent primary standard in the laboratory. The method is helpful for the cross verification of different types of field instruments at different sites and ensures the consistency of multiple field verification tests. It can also be used to calibrate satellite optical loads with high accuracy in the future.

Key words: field dissemination of the value of quantity, stray light correction model, temperature correction model, exchange measurement, uncertainty

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB0504800 ,2018YFB0504804)