

地物光谱仪测量中的温湿度影响

吴志峰, 李玲, 代彩虹, 王彦飞, 谢一航, 程秋桐

中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

摘要 地物光谱仪在遥感领域的应用日益重要, 可用于研究不同地物条件下可见和红外光谱辐射特性, 从而获得地表的光谱辐射亮度、光谱辐射照度或方向反射因子等信息。地物光谱特性的准确测量是光学遥感定量分析的基础, 对于航天传感器定标、遥感数据反演等具有极其重要的意义。地物光谱仪在测量前必须进行光谱辐射定标, 一方面定标过程中地物光谱仪的光谱响应特性可能发生漂移, 另一方面测量时的环境与定标环境可能差异较大, 都会影响测量的准确性。在恒温恒湿条件下, 实验采用谱线灯光源和积分球光源考察了地物光谱仪波长和光谱响应度随探测器温度的变化。数据显示当光谱仪内部硅阵列探测器温度上升时, 波长位置并未发生改变; 而光谱仪的光谱响应度随着温度上升明显增大。当硅探测器温度从 28.3 °C 升至 35.2 °C 时, 光谱仪在 380~990 nm 的光谱响应度变化达到 1.8%~7.3%; 同时近红外 1 000~1 800 nm 的平均变化约 3.0%, 2 000~2 500 nm 的变化约 1.9%。当改变环境温度和湿度时, 测量数据表明湿度影响主要在大气中水分子的吸收峰附近波长, 对其他波长影响很小; 光谱仪光谱响应度与内部探测器的温度近似存在一一对应关系, 环境温度的影响可以近似根据内部探测器温度变化予以表征。理论上当环境条件改变时, 根据光谱响应度随温度的变化和探测器的监测温度, 可以进行光谱数据修正。最后, 实验测量了一组探测器温度下对应的光谱响应度, 采用多项式拟合和最小二乘法建立了地物光谱仪光谱响应度与温度的函数关系。根据函数关系插值得到的光谱响应度修正因子和直接测量得到的数据基本一致, 全谱段的差异几乎都小于 0.2%, 表明光谱响应度与温度的对应关系可用于解决不同环境条件下的测量准确性。

关键词 地物光谱仪; 光谱响应度; 温湿度修正

中图分类号: O432.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1639-05

引言

光谱辐射计是光辐射度测量中最常见的仪器, 用于测量相对光谱分布、光谱辐射亮度或光谱辐射照度。大型的双光栅光谱仪和傅里叶光谱仪通常用于科学实验, 可以满足紫外、可见和红外光谱辐射测量。自从阵列式光电探测器 CCD 和 CMOS 普及以来, 搭载 CCD 或 CMOS 的小型化光谱仪应用日益广泛。阵列式光谱仪便携、测量速度快, 极易从实验室应用扩展到户外应用, 用于土壤、植物和水体等目标 350~2 500 nm 的光谱辐射测量^[1-2]。然而, 阵列式光谱仪的性能容易受温度、杂散光和非线性等众多因素影响^[3-4]。一方面户外环境条件并不固定, 一天内气温变化有可能超过 10 °C。另一方面, 光谱仪实验室定标环境与户外使用环境可能差异极大, 会造成光谱响应度的明显漂移。如果不进行数据修正, 精确定标的结果将无法正确应用于户外测量。20 世纪

80 年代, 国外的 Jackson 和 Robinson 较早研究了多通道辐射计的温度稳定性。硅光电探测器在 420~900 nm 受温度影响小; 硫化铅探测器受温度影响明显, 1 °C 温度的上升引起响应度减小 4%~5%^[5]。Starks 等研究了硅二极管阵列光谱仪的响应度随温度的变化, 对于波段 390~940 nm, 当环境温度从 0 °C 升至 35 °C 时响应度系数变化小于 5%; 对于 1 000 nm, 当环境温度从 0 °C 变化至 25 °C 响应度系数变化高达 25%, 而当环境温度从 25 °C 升至 35 °C 时响应度系数变化降至 5%^[6]。Salim 等采用硅胶管缠绕光谱仪的方法进行温度控制, 测量结果表明 400~700 nm 每 °C 响应度变化约为 0.13%, 700~950 nm 温度响应度系数逐渐变小, 950 nm 以后逐渐变大, 1 050 nm 增加至 0.2% °C⁻¹^[7]。Price 等测试了 6 款 CCD 光谱仪响应度随温度的变化, 测试结果表明部分光谱仪波长位置会随温度发生漂移; 同时不同型号光谱仪的热弛豫时间不同, 采用瞬时环境温度进行修正可能带来偏差^[8]。国内的温度实验研究表明当环境温度从 10 °C 升至 40

收稿日期: 2020-04-16, 修订日期: 2020-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0504800, 2018YFB0504804), 中国计量科学研究院项目(AKY1513)资助

作者简介: 吴志峰, 1984 年生, 中国计量科学研究院光学与激光计量研究所副研究员 e-mail: wuzf@nim.ac.cn

℃时,部分地物光谱仪 700~1 050 nm 的响应度变化可能高达 15%以上,采用温度修正后可以降至 1%左右^[9]。

地物光谱仪光谱响应度的漂移不仅与外界条件有关,而且实验室条件下长时间工作发热也可能带来光谱响应度的变化。本文对比了一款地物光谱仪不同条件下的光谱响应度变化,实验结果表明环境条件变化带来的影响可以通过监测地物光谱仪内部探测器的温度变化获得。通过建立的光谱响应度与探测器温度的对应关系,可以进行数据修正解决外界环境条件不同带来的影响,保证测量的准确性。

1 实验部分

地物光谱仪探测器组分别由硅阵列探测器和两块钢镓砷阵列探测器组成。硅阵列探测器波长范围 350~990 nm,未采用制冷控制,探测器芯片的温度可以实时监测,通过软件显示其温度。两块钢镓砷阵列探测器都采用制冷控制,软件仅显示目标制冷温度。第一块钢镓砷探测器波长范围 1 000~1 890 nm,第二块钢镓砷探测器波长范围 1 890~2 500 nm。实验首先采用汞氙灯校准地物光谱仪的波长,持续测量 2 h,同时监测硅阵列探测器的温度。然后采用积分球光源校准地物光谱仪光谱辐射亮度,并采用一个硅光电二极管实时监测积分球光源的信号变化。当不采集信号时,在地物光谱仪和硅光电二极管前放置挡屏避免光直接照射带来的升温。硅光电二极管处于实验室恒温环境,响应度漂移几

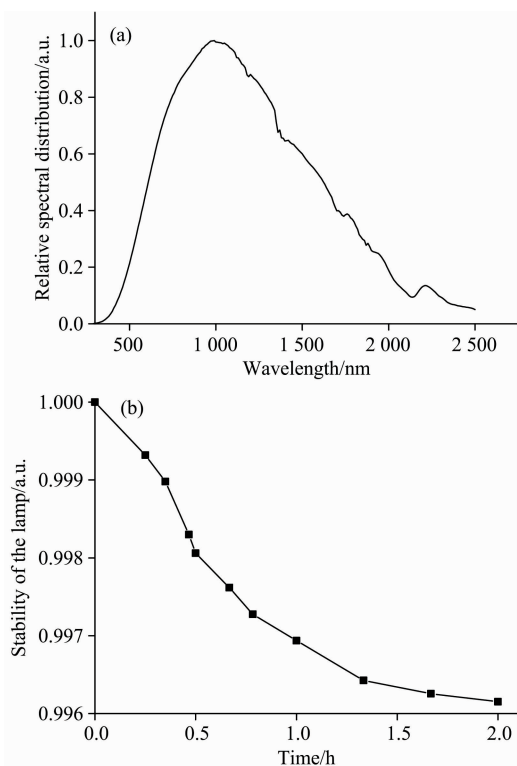


图 1 (a) 积分球光源相对光谱分布;
(b) 积分球光源信号随时间变化

Fig. 1 (a) Relative spectra of integrating sphere lamp;
(b) Signal variation with time

乎可以忽略。地物光谱仪和积分球光源开机预热 20 min 后正式测量。测量过程中,硅光电二极管的示值用于修正积分球光源的信号变化,硅光电二极管前安装中心波长 550 nm、带宽 40 nm 滤光片,用于监控特定波长下的积分球信号变化。由于积分球光源是宽谱段光源,测量时同时记录积分球光源的相对色温变化。实验数据表明相对色温在 2 h 内变化很小,光源的相对光谱分布可以近似认为不变,硅光电二极管的信号变化可以用于表征积分球光源的稳定性。图 1 中给出了积分球光源的相对光谱分布和信号随时间的变化。可以看出,积分球光源信号随着时间呈现下降趋势,每小时信号变小约 0.2%。当光源稳定 0.5 h 后,光源信号下降变得更为平缓。

式(1)用于计算 t 时刻地物光谱仪的光谱响应度。其中, $S_0(\lambda)$ 是预热 20 min 后地物光谱仪测量的波长 λ 处的数据, $S_t(\lambda)$ 是 t 时刻地物光谱仪测量的波长 λ 的数据, I_0 是预热 20 min 后硅光电二极管测量的信号, I_t 是 t 时刻硅光电二极管测量的信号, $R_0(\lambda)$ 是预热 20 min 后地物光谱仪波长 λ 处的响应度。

$$R_t(\lambda) = \frac{S_t(\lambda)}{S_0(\lambda)} \frac{I_0}{I_t} R_0(\lambda) \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 温度变化曲线

图 2 给出了实验室温度 (22 ± 1) ℃、相对湿度 43% ± 2% 时,地物光谱仪在波长和光谱辐射亮度测量时硅阵列探测器的温度变化。测量过程中地物光谱仪采用水平放置,表面未采用风机散热。前 20 min 温度上升迅速,变化大于 5 ℃,之后温度曲线上升趋于平缓。2 h 内硅阵列探测器的温升大于 12 ℃。在波长测量和光谱辐射亮度测量过程中温度上升趋势几乎一致,表明光谱辐射亮度测量时积分球光源发热带来的影响基本可以忽略,温度上升主要与使用过程中的仪器发热有关。

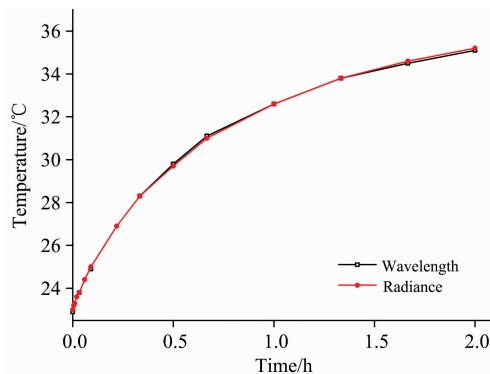


图 2 探测器温度变化曲线

Fig. 2 Temperature drift of the detector

2.2 光谱响应度随温度的漂移

实验室采用积分球光源考察地物光谱仪的光谱响应度变化。对于波长测量,当硅阵列探测器从 23 ℃ 升至 35 ℃,谱

线灯峰值对应的波长位置并未改变。地物光谱仪临近波长的相对光谱响应接近, 随温度的变化趋势也近似一致, 因此温度变化并未带来峰值波长的变化。对于光谱辐射亮度测量, 图 3 给出了 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$, $43\% \pm 2\% \text{RH}$ 时光谱辐射亮度随硅阵列探测器温度的变化。

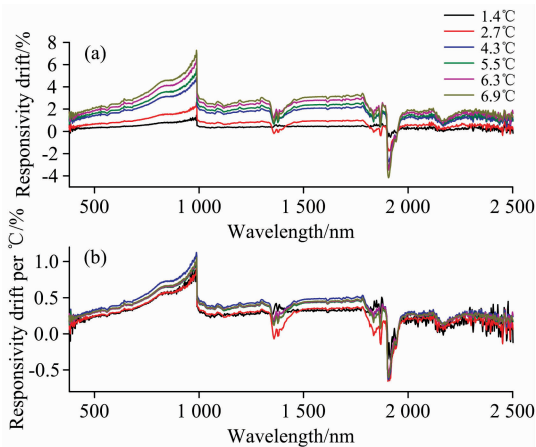


图 3 温度变化带来的光谱响应度变化
Fig. 3 Spectral responsivity variation due to temperature change

预热 20 min 后的光谱响应度作为参考值, 对应的硅阵列探测器温度 28.3°C 。图中用于对比的温度分别是 30.1 , 31.0 , 32.6 , 33.8 , 34.6 和 35.2°C 。图 3(a) 给出了相应温度变化下的光谱响应度变化, 图 3(b) 给出了每摄氏度温度变化带来的光谱响应度变化, 即光谱响应度变化与温度变化之比。图 3(b) 中, 硅阵列式探测器每摄氏度温度变化对应的响应度漂移并不相同, 响应度随温度的变化趋势与温度相关, 每摄氏度响应度的变化呈现先增大后变小的趋势。图 3(a) 中, 当硅探测器温度上升 6.9°C 时, 在波长 $380 \sim 990 \text{ nm}$ 光谱响应度变化高达 $1.8\% \sim 7.3\%$, 光谱响应度呈现与波长相关的特性, 随着波长变大光谱响应度变化更为剧烈; 在波长 $990 \sim 1800 \text{ nm}$, 光谱响应度变化较为平坦, 平均变化约 3.0% ; 在波长 $2000 \sim 2500 \text{ nm}$, 光谱响应度变化约 1.9% 。尽管两个钢镓砷阵列探测器都采用制冷控制, 测量结果表明红外光谱响应度仍然有一定漂移。图中, 990 nm 附近响应度的陡降和 1900 nm 两侧响应度变化的不同都与探测器更换有关。而 1350 , 1900 和 2160 nm 附近呈现凹陷结构, 其中 1350 和 1900 nm 对应空气中水分子的吸收峰, 可能源于积分球光源内部或出光口到地物光谱仪光路中的水蒸气含量变化, 从而影响到 1350 和 1900 nm 附近的光谱响应度; 波长 2160 nm 与积分球光源相对光谱 2140 nm 处的凹陷接近, 可能源自于氢氧基的吸收带。图 4 给出了采用卤钨灯和漫反射板测量时的光谱响应度变化, 温度变化约 6°C 。与图 3 对比, 波长 $380 \sim 2000 \text{ nm}$ 光谱响应度变化趋势接近, 而波长 $2000 \sim 2500 \text{ nm}$ 光谱响应度变化更为平坦, 并未出现凹陷, 表明图 3 中 2160 nm 处的凹陷与积分球光源加热过程中的变化有关。

作为对比, 实验室还考察了环境条件 30°C , $43\% \text{RH}$ 时

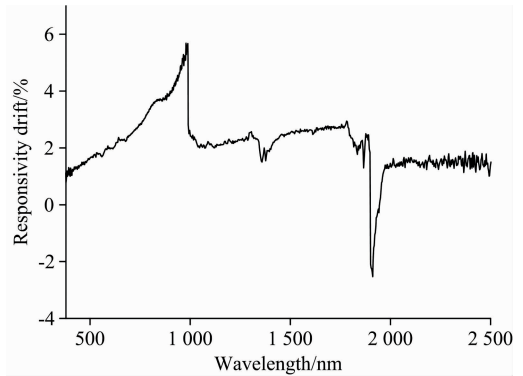


图 4 卤钨灯漫反射板测量时光谱响应度变化
Fig. 4 Spectral responsivity variation using standard lamp and diffuse plate

光谱响应度随时间的变化。地物光谱仪放置在温湿度控制箱中, 通过侧壁开口瞄准箱体外部的积分球光源^[9]。与室温条件相比, 环境温度 30°C 时地物光谱仪硅阵列探测器的温度上升更为迅速。当硅阵列探测器升至 28.3°C 时, 光谱仪采集的信号与室温 22°C 下硅阵列探测器升至 28.3°C 时采集的信号接近, 差异在 0.1% 的水平。实验还对比了环境温度 30°C 和室温 22°C 时当硅阵列探测器温度从 28.3°C 升至 35.2°C 时对应的光谱响应度变化, 见图 5。尽管环境温度不同, 两种条件下相同的温度变化对应的光谱响应度变化非常接近, 整体偏差在 0.2% 以内。由于实验仪以硅阵列探测器作为参考, 钢镓砷阵列探测器的光谱响应度变化略有不同。波长 $380 \sim 990 \text{ nm}$, 30°C 的光谱响应度变化较 22°C 略大; $990 \sim 1800 \text{ nm}$, 30°C 的光谱响应度变化较 22°C 略小。环境温度的变化除了影响探测器温度的变化, 也可能对内部电子元件和其他光学元件有一定影响, 而测量结果表明其他器件温度的变化对于光谱响应度变化的贡献较小。总体来看, 光谱仪响应度与内部探测器的温度近似存在一一对应, 环境温度的不同不影响光谱响应度的变化趋势。当在户外不同温度条件下进行辐射亮度测量时, 并不需要记录外界环境的温度, 光谱响应度的变化可以根据内部探测器的温度变化进行修正, 得到近似准确的结果。

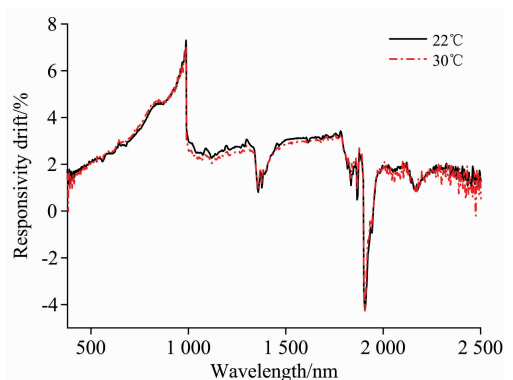


图 5 环境温度 22 和 30°C 时的光谱响应度变化
Fig. 5 Spectral responsivity variation at 22 and 30°C environment temperature

2.3 环境气流和湿度对响应度的影响

户外测量时空气气流和湿度并不固定,可能对光谱响应度的变化产生影响。实验考察了采用风机散热和低湿度下的光谱响应度变化。采用温湿度控制箱将环境温度控制在 22 °C,相对湿度控制在 6%,并进行风机散热。空气气流和湿度的变化对于波长位置几乎没有影响。图 6(a)给出了硅阵列探测器的温度上升曲线,前 30 min 上升曲线与图 2 相近,后半段趋势则很快趋于平坦,50 min 后温度几乎不变。图 6(b)给出了硅阵列探测器 28.3 °C 时的光谱响应度与图 3 中 28.3 °C 时的光谱响应度差异。除去水的吸收峰附近,全谱段的差异几乎都位于 $\pm 0.2\%$ 以内。考虑到测量的重复性,两种模式下的光谱响应度接近相同。测量数据表明外部空气流动和湿度变化对于光谱响应度的贡献可以忽略。同时,波长 990 nm 两侧的趋势略有不同,表明钢镱阵探测器阵列探测器的变化存在差异,理论上应该通过监测两个钢镱阵探测器的温度变化来描述 990~2 500 nm 的光谱响应度变化。

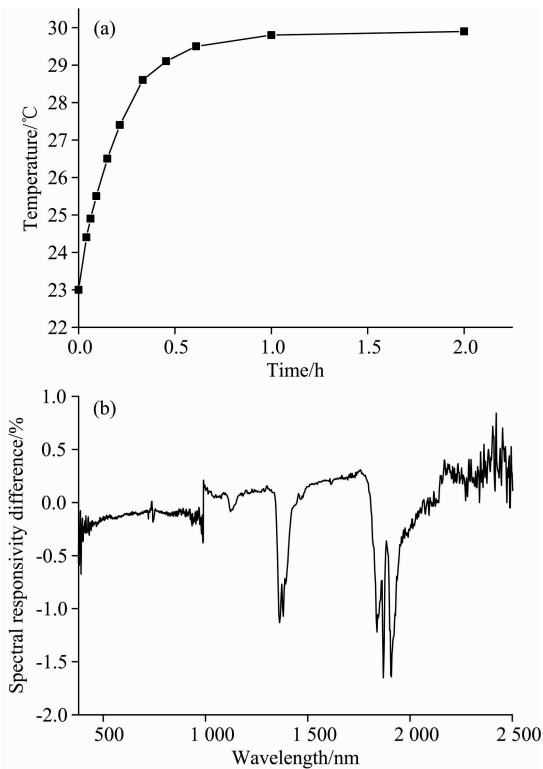


图 6 (a) 探测器温度变化曲线; (b) 两种模式下的光谱响应度差异

Fig. 6 (a) Temperature drift of the detector; (b) Spectral responsivity difference between two modes

2.4 光谱响应度的温度修正

实验将温湿度控制箱设置在 10~30 °C 间的几个温度,采用地物光谱仪测量积分球光源信号,得到一组硅阵列探测器温度下对应的光谱响应度。当温湿度控制箱设定工作温度为 10 和 30 °C 时,地物光谱仪开机约 1 h 的硅阵列探测器温度约为 16 和 37 °C。地物光谱仪光谱响应度选用硅阵列探测

器 28 °C 的信号作为参考,其他温度下测量的光谱信号与 28 °C 的信号比值记作光谱比例系数。图 7 给出了不同温度对应的的光谱比例系数。随着温度升高,光谱响应度整体呈现增大趋势。波长 450~950 nm 范围,光谱响应度变化随温度变化呈现接近线性的趋势。波长 1 050~2 300 nm 范围,光谱响应度变化在 16~28 °C 范围变化更为平缓。这可能由于温度升高时,光谱仪内部散热对两个钢镱阵探测器的制冷效果有一定影响,而温度较低时对制冷效果的影响偏小。

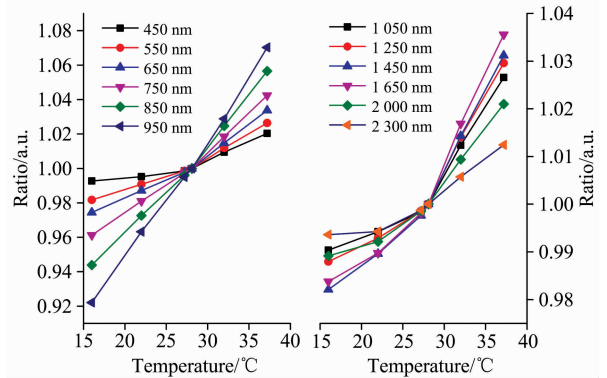


图 7 不同温度对应的的光谱比例系数

Fig. 7 Spectral ratios at different temperature

为了得到其他温度点的比例系数,可以对图 7 中的光谱比例系数进行多项式拟合,根据拟合曲线计算 16~37 °C 间其他温度的比例系数。这里采用最小二乘法,根据式(2)进行二次曲线拟合。

$$S(T) = a(T - T_0)^2 + b(T - T_0) + c \quad (2)$$

其中, $S(T)$ 是光谱仪温度 T 时的比例系数, T_0 对应温度 28 °C, a , b 和 c 是二次曲线的系数。图 8 给出了计算得到的 35 °C 时的光谱响应度和直接测量得到的 35 °C 时的响应度差异,整体差异几乎都在 0.2% 以内。因此,通过监测探测器的工作温度和数数据插值可以得到对应的光谱响应度,用于解决环境条件不同带来的光谱响应度变化。

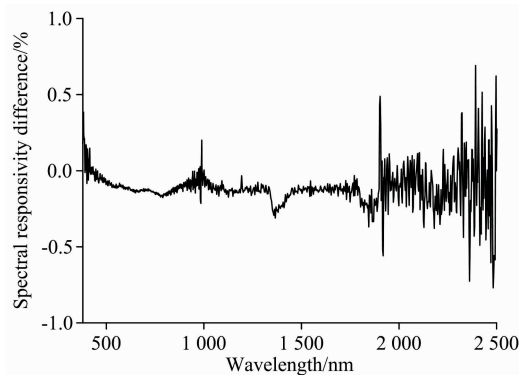


图 8 计算和测量得到的光谱响应度差异

Fig. 8 Spectral responsivity difference between calculation and measurement

3 结 论

考察了一款地物光谱仪光谱响应特性与外界环境条件的关系, 测量结果表明光谱响应度的变化主要取决于内部探测器的温度变化, 对于湿度和气流的影响并不敏感。在两种环境温度 22 和 30 °C 下, 当地物光谱仪内部探测器的温度或温

度变化相同, 对应的光谱响应度或光谱响应度变化在全谱段非常接近, 差异小于 0.2%。测量结果表明外界环境条件对地物光谱仪光谱响应度的影响可以近似采用内部探测器的温度变化描述。根据光谱响应度与探测器温度的函数曲线关系和探测器的实时温度, 可以对地物光谱仪环境影响进行数据修正, 从而实现准确测量。

References

- [1] Schaeppman M E, Dangel S. *Applied Optics*, 2000, 39: 3754.
- [2] DENG Ru-ru, TIAN Guo-liang, SUN Quan(邓孺孺, 田国良, 孙 荃, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2003, 7(4): 321.
- [3] Zong Yuqin, Steven W Brown, B Carol Johnson, et al. *Applied Optics*, 2006, 45: 1111.
- [4] Salim Saber G R, Fox N P, Hartree W S, et al. *Applied Optics*, 2011, 50: 5130.
- [5] Jackson R D, Robinson B F. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17: 103.
- [6] Starks P J, Walter-shea E A, Schiebe F R, et al. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 385.
- [7] Saber G R Salim, Nigel P Fox, Evangelos Theocharous, et al. *Applied Optics*, 2011, 50: 866.
- [8] Price L L A, Hooke R J, Marina Khazova. *Journal of Radiological Protection*, 2014, 34: 655.
- [9] LI Ling, DAI Cai-hong, WU Zhi-feng, et al(李 玲, 代彩红, 吴志峰, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(6): 1965.

Temperature and Humidity Influence in Field Spectroradiometer Measurement

WU Zhi-feng, LI Ling, DAI Cai-hong, WANG Yan-fei, XIE Yi-hang, CHENG Qiu-tong

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

Abstract Field spectroradiometer is becoming more and more important in the remote sensing area. It is used to investigate the spectral radiometric characteristics of different geographic environment, such as spectral radiance, spectral irradiance or spectral directional reflectance factor from visible to infrared wavelengths. The accuracy of the spectral measurements plays an important role in space sensor calibration and remote sensing data inversion. It is the basis of quantitative analysis in optical remote sensing. Field spectroradiometer must be calibrated before use. On the one hand, the spectral responsivity may change during the calibration process. On the other hand, the field measurement environment may be totally different from the calibration conditions. The measurement accuracy cannot be guaranteed. The experiment is designed to investigate the influence of the environmental conditions on spectral responsivity. At constant temperature and humidity, spectral line lamp, and integrating sphere lamp are used to test whether the wavelength and spectral responsivity change or not when the silicon array detector's temperature is changed. Results show that the wavelength is nearly unchanged when the silicon array detector's temperature rises. However, the spectral responsivity rises as the temperature rises. When the silicon array detector's temperature rises from 28.3 to 35.2 °C, the spectral responsivity increases by 1.8% to 7.3% from 380 to 990 nm, 3.0% from 1 000 to 1 800 nm and 1.9% from 2 000 to 2 500 nm. When the environment humidity and temperature are changed, results show that humidity only affects the spectral responsivity near the water molecules' absorption peaks. Also, results show that the spectral responsivity has nearly one to one correspondence with detector temperature. The influence of environment temperature can be nearly characterized according to the detector temperature change. When a group of detector temperature and corresponding spectral responsivity is measured, the relationship between the detector temperature and spectral responsivity can be obtained using the least square method. The spectral responsivity at other temperature can be calculated by interpolation. The measurement data at different environmental conditions can be corrected as long as the detector temperature is measured. The spectral responsivity difference between the calculated and measured results is less than 0.2% when the detector is 35 °C, which show that the relationship between the detector temperature and spectral responsivity can be used to solve the environment problem.

Keywords Field spectroradiometer; Spectral responsivity; Temperature and humidity correction

(Received Apr. 16, 2020; accepted Aug. 19, 2020)