

doi:10.3788/gzxb20174606.0601003

宽波段太阳辐照度仪光谱定标方法研究

黄雄豪^{1,2}, 李新¹, 刘恩超¹, 郑小兵¹, 翟文超¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要:宽波段太阳辐照度仪采用 Fèry 棱镜分光, 利用线阵 CCD 反馈控制光谱扫描, 波长覆盖范围为 400~2 500 nm. 为实现该仪器的高准确度光谱定标, 在实验室内利用单波长激光器和 OPO 激光器分别作为光源. 通过光谱扫描, 得出定标波长与 CCD 像元的对应关系. 根据棱镜参量和光路设计参量推导出全波段内光谱定标方程, 实现全波段光谱定标. 通过与其他特征波长比较, 分析得出光谱定标合成不确定度优于 0.5 nm. 用定标好的仪器进行室外测量, 将测量结果与大气辐射传输软件 modtran4 模拟结果相比对, 可得实际测量的大气吸收峰与模拟结果一致. 将该方法在红外波长区域定标结果与传统的多项式拟合光谱定标方法对比, 显示该定标结果优于传统多项式拟合方法. 证明该定标方法的正确性和仪器设计的合理性.

关键词:太阳辐照度仪; Fèry 棱镜; 光谱扫描; 光谱定标; 大气吸收峰

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0601003-9

Spectral Calibration of Wide Band Solar Irradiance Spectrometer

HUANG Xiong-hao^{1,2}, LI Xin¹, LIU En-chao¹, ZHENG Xiao-bing¹, ZHAI Wen-chao¹

(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: Wide band solar irradiance spectrometer that the wavelength coverage is from 400 nm to 2 500 nm uses Fèry prism to disperse composite light, with linear array CCD controlling scan of spectrum. To achieve the high-precision spectral calibration of the instrument, a single-wavelength laser and an OPO laser are used as light sources in the laboratory. Through the spectral scanning, the correspondence between the calibration wavelength and the CCD pixel is obtained. According to the prism and optical design parameters, the spectral calibration equations that achieve full-band spectral calibration are derived. It is verified that the spectral calibration uncertainty is better than 0.5 nm by comparing with other characteristic wavelengths. Comparing measured results with the simulation of atmospheric radiation transmission software that is named as modtran4, the measured atmospheric absorption peaks are in agreement with the simulation results. The results of calibration in the infrared wavelength region are compared with the traditional polynomial fitting method, which shows that the calibration results are superior to the traditional polynomial fitting method. It is proved that the calibration method is correct and the instrument design is rational.

Key words: Solar irradiance spectrometer; Fèry prism; Spectral scanning; Spectral calibration; Atmospheric absorption peak

OCIS Codes: 010.1290; 010.5620; 010.5630; 040.1520

基金项目: 安徽省自然科学基金青年项目 (No. 1508085QD80) 和国家自然科学基金青年科学基金项目 (No. 61505222) 资助

第一作者: 黄雄豪 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学遥感与辐射定标. Email: huang199@mail.ustc.edu.cn

导师 (通讯作者): 郑小兵 (1969-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学遥感与辐射定标. Email: xbzhen@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2017-01-19; 录用日期: 2017-03-16

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

0 引言

作为地球能量的主要来源,太阳辐射对地球生态起着至关重要的作用. 监测太阳辐射不仅对太阳物理研究具有重大意义,而且为天气预报,地球气候变化研究提供科学依据^[1-2]. 目前国内外监测太阳总辐照度技术相对比较成熟,而监测太阳光谱辐照度还处于探索阶段. 但地球中的水,大气,陆地对太阳的吸收与发射具有光谱的选择特性,因此准确检测太阳光谱辐照度对地球的影响显得尤为重要.

太阳辐照度仪在国内外都处于热门研究阶段. 在国外,用于地面测量太阳光谱辐照度的仪器有日本 PREDE 公司研制的 PGS-100, PGS-200 和日本 EKO 公司的 MS711 等. 其中 PGS-100 光谱测量范围为 350~1 050 nm, 波长分辨率为 5 nm, 该仪器具有很高的信噪比^[3]. 在国内,多家机构积极研制宽波段太阳辐照度仪,并取得可喜成绩,其中比较有代表性的单位是安徽光机所. 该单位在2011年研制成功400~1 050 nm 连续波段太阳辐照度仪^[3]并在近期研制成功 400~2 500 nm 连续太阳光谱辐照度监测仪即宽波段太阳辐照度仪. 这两台仪器都可放置于地面来准确测量设计波段内连续太阳辐照度.

在 400~2 500 nm 宽波段太阳辐照度仪研制过程中,需对仪器进行定标,仪器定标包括光谱定标和辐射定标,在辐射定标之前需对仪器进行光谱定标. 准确、高准确度的光谱定标是保证宽波段太阳辐照度仪对太阳辐射进行高准确度、定量化和连续光谱观测的关键. 目前宽波段太阳辐照度仪光谱定标大多采用传统的特征光谱定标法,即采用观测设备直接观测具有特征谱线的光源,得出 CCD 像元和相应特征谱线的关系,然后通过多项式拟合得出整个仪器设计波长范围内波长和像元之间的关系^[4]. 传统的特征光谱定标方法需要待定标仪器在设计波长范围内观测多组特征谱线以提高拟合准确度. 该仪器波长范围特别宽,只采用传统的特征光谱定标法效率低. 故本仪器采用特征光谱与光谱定标方程相结合的定标方法得出 CCD 像元与全部仪器设计波长之间的关系. 该方法是采用单波长激光器和 OPO 激光器作为光源,分别得出可见与红外三组波长与 CCD 像元的关系,然后通过这三组关系带入光谱定标方程得出仪器所有波长与像元关系. 实践证明该方法可以大大节省时间,精确性高.

1 原理

1.1 仪器原理

宽波段太阳辐照度仪设计有两条光路组成,仪器光路如图 1 所示. 主光路主要用于太阳光谱辐照度测量,参考光路主要用于标定光谱信息. 两条光路上下布置,两条光路的谱平面位于同一竖直平面,且该竖直平面为 fery 棱镜焦平面.

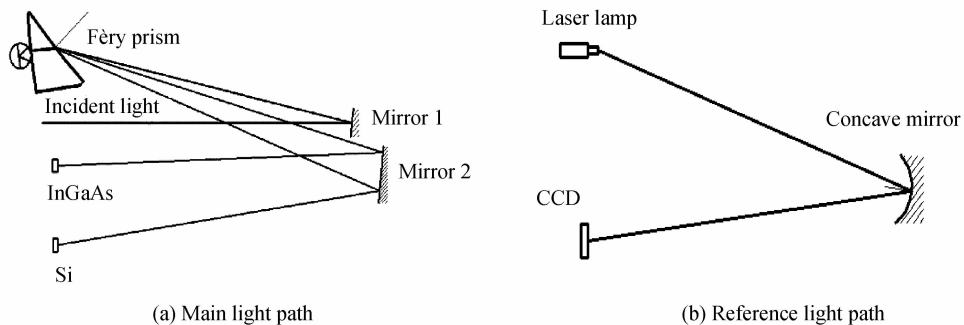


图 1 光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram

主光路采用 fery 棱镜^[5-6]分光和会聚,音圈电机^[7]带动反射镜 2 实现光谱的连续扫描. 棱镜所在焦平面用两个单元探测器采集光谱信息. 两个探测器分别是 Si 单元探测器,用来探测可见光及部分近红外光谱响应. InGaAs 单元探测器探测红外光谱响应. 参考光路用 650 nm 激光点光源,该光源中心到凹面镜中心的角度等于棱镜入射光中心到反射镜 2 中心连线角度. 参考光路凹面反射镜与反射镜 2 上下排布,且共旋转轴. 凹面反射镜焦平面上采用 CCD 线阵探测器探测点光源光斑的移动. 因为反射镜 2 与凹面反射镜共轴,所以仪器扫描机构带动主光路反射镜 2 所在轴旋转的同时保证参考光路中的凹面反射镜同时旋转,且 CCD 探测

器和单元探测器共面上下排布,该结构保证 CCD 像元和波长有相应的固定关系,由 zemax 模拟该仪器波长范围内光经过棱镜后在焦平面上光谱成像距离,可得间距约为 48 mm. 为保证单元探测器能够全部采集到光信号,两个单元探测器在同一个高度相距 24 mm 排布. 且音圈电机带动反射镜在焦平面上的扫描范围大于 24 mm,方能全方位测量光谱范围内响应,该设计保证了仪器的宽波段响应. 仪器部分关键设计参量如表 1 所示.

表 1 仪器关键设计参量
Table 1 Specific parameters used in the design of instrument

Wavelength range	Prism focal	calibration precision	Prism material	F number	Field-of-vie ω	Entrance slit size
400 nm to 2 500 nm	500 mm	Better than 1nm	JGS1	115	1.6°	0.2 mm×7 mm

1.2 光谱定标原理

在扫描过程中,音圈电机,CCD 探测器,反射镜 2 和凹面反射镜组成一个闭环控制系统. 当单元探测器采集光谱信息时,参考光通过旋转的凹面镜——对应聚焦到 CCD 光谱面上,CCD 采集参考光斑,反馈像元信息. 通过该方式将光谱信息转化为 CCD 像元信息,即确定波长对应像元序号. 该仪器采用特征光谱与光谱定标方程相结合的方法,得出 400~2 500 nm 全波长与 CCD 像元信息. 光谱定标方程是根据仪器的结构原理和棱镜色散原理. 棱镜的折射率随波长的不同而不同,石英(SiO₂)棱镜在温度为 20℃,波长在 0.21~3.71 μm 内棱镜折射率与波长的关系为^[8]

$$n_{\lambda}^2 = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (1)$$

单色光在 fèry 棱镜内示意图如图 2 所示. 宽波段太阳辐照度仪 fèry 棱镜前后表面结构根据光学设计确定,前表面半径为 560 mm,后表面半径为 569 mm. 因为 fèry 棱镜光学特性,由折射率关系可得光线经过棱镜后入射角和出射角之间的关系为

$$\eta_2 = \gamma - \varphi = \arcsin \left[n \times \sin \left(2\theta_p - \sin \left(\frac{\sin(\gamma)}{n} \right) \right) \right] \quad (2)$$

式中 γ 为光线进入棱镜的入射角, φ 为光线经过棱镜后入射角与出射角角度之差, n 为棱镜对应波长下的折射率, θ_p 为 fèry 棱镜前后曲面法线之间夹角,因弧 AC 与 AB 相对于曲率半径小,故 θ_p 可近似为 AC 面与 AB 面之间的夹角, η_2 为光线经过棱镜后出射角,精确求出 φ 对后续计算非常关键.

同一入射角复合光经过 fèry 棱镜分光 and 会聚后任意两波长在焦平面上的距离为

$$L = F \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3)$$

式中 L 为两波长单色光在焦平面上成像距离, φ_1, φ_2 分别表示两波长单色光经过棱镜后入射角与出射角

之差, F 为棱镜的焦距. 利用实验室装置测定几组单色光通过棱镜会聚到焦平面之间的距离带入式(2),即可得出因机械加工准确度带来的未知量 θ_p . 因为根据日地距离可得太阳的观测角约为 0.5°^[9],故仪器视场小,式中的入射角度值可以用 zemax 仿真设计值. 求得未知量 θ_p 后,选择任一单色光对应的像元作为基准,可以确定 400~2 500 nm 波长范围内波长与像元之间的关系. 因主光路有两个单元探测器,且波长范围从可见一直到红外. 为保证定标的准确性,需在两个单元探测器光谱响应范围内,各选取一组单色光对应的 CCD 像元结果作为基准. 得出整个仪器设计波长范围内 CCD 像元与波长的关系为

$$P_n = P + \frac{L_1}{C_x} \quad (4)$$

$$L_1 = F \times (\tan \varphi_3 - \tan \varphi_4) \quad (5)$$

式中 P_n 为待测单色光对应像元序号, P 为已知单色光对应像元序号, L_1 为待测波长与已知单波长焦平面对应距离. C_x 为选择的 CCD 探测器单个像元尺寸,本仪器中选择的 CCD 像元尺寸为 7 μm×7 μm. φ_3 表示为待测单色光经过棱镜后入射角与出射角之差, φ_4 表示已知波长单色光经过棱镜后入射角与出射角之差.

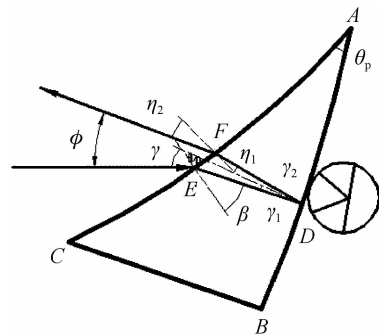


图 2 单色光经过 fèry 棱镜示意图
Fig. 2 Schematic diagram of monochromatic light passing through prism

2 光谱定标实验与数据分析

2.1 光谱定标实验方案设计

为提高实验的准确性,需要分别搭建可见和红外光谱定标测试装置.可见光谱定标装置包括可见波段单波长激光器,扩束镜.激光器发出可见光用来进行 Si 单元探测器响应波长范围内光谱定标,扩束镜将单波长激光器发出的光进行准直和扩束,使得光斑面积可以覆盖仪器入射狭缝.

红外光谱定标装置示意图如图 3 所示,其光谱定标装置主要包括 OPO 激光器,孔径光阑,1 064 nm 滤光片,波长计,可见单波长激光器,小积分球. OPO 激光器可以在 1 350~2 000 nm,2 300~4 800 nm 范围内连续调整入射光波长.但是该仪器在上述波长范围内都掺杂 1 064 nm 近红外波长,为避免该波长对实验结果的影响,用 1 064 nm 滤光片将该光滤掉.在调节红外波长光对准仪器时,因红外光不易肉眼观测,为增加光路调节的准确度,在光路中加入积分球.积分球内部空心,内壁涂有多层聚四氟乙烯,具有高的反射率.并且积分球可以将导入的激光进行匀光处理,在出口处形成均匀的郎伯光源.利用积分球特性,在观测前用可见单波长激光器发出可见光进入积分球,然后利用从积分球出射的光调整仪器位置.调整好仪器位置后,用 OPO 激光器发出红外光进行光谱定标.使用波长计来实时监测波长变化.

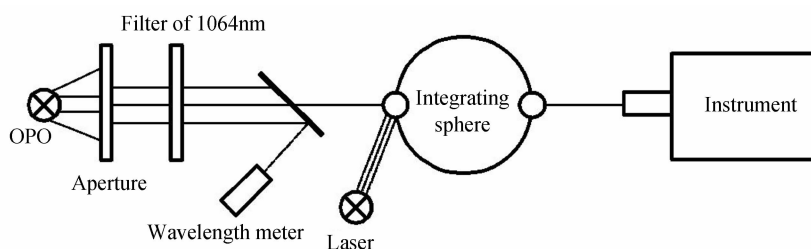


图 3 红外光谱定标装置
Fig. 3 Schematic diagram of infrared spectral calibration device

2.2 定标数据分析

利用上述实验方案,在可见光区域分别用 488nm 单波长激光与 632.8nm 单波长激光照射仪器,控制音圈电机带动反射镜 2 精密转动,完成反射镜 2 全程扫描.记录两种波长情况下 CCD 每个像元序号对应单元探测器信号值.采集完毕后采用重心拟合法分别准确获得两种波长对应的 CCD 像元序号.重心拟合法相对于传统的峰值法,其优势在于受覆盖像元的限制小,不会像峰值法带来半个像元宽度的不确定度,且具有较高准确度,重心拟合法为^[10-11]

$$x_{\text{ccd}} = \frac{\sum_{i=1}^n i \times V}{\sum_{i=1}^n V} \quad (6)$$

式中 i 为像元序号, x_{ccd} 为拟合后像元序号, V 为 CCD 像元序号对应的 DN 值.同理利用上述方法调节 OPO 激光器发出红外波段单色光,用重心法拟合获得 CCD 像元序号.在定标过程中,调节 OPO 激光器显示其发出的红外波长值为 1 509.04 nm,获得该波长下对应的像元序号.三种波长下实验观测结果如图 4 所示.

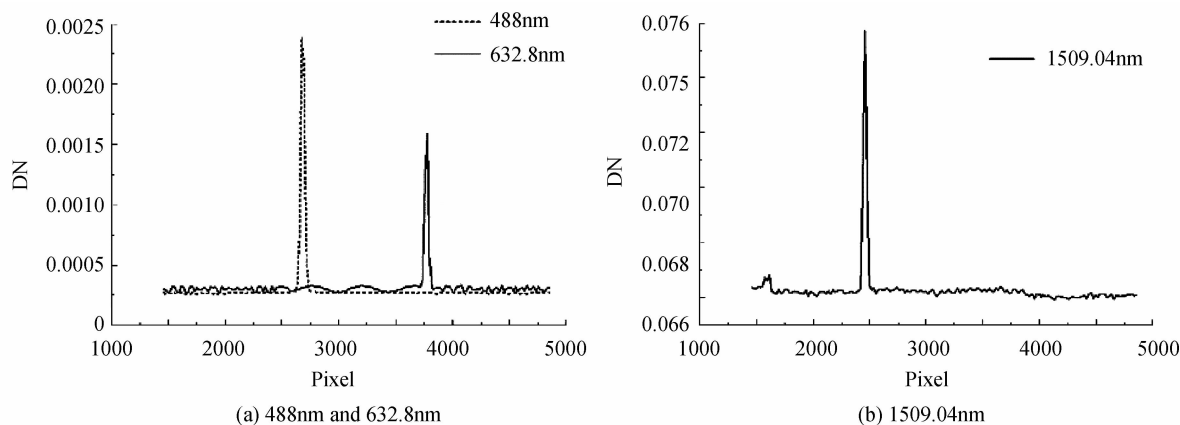


图 4 波长与像元关系实验结果
Fig. 4 Experimental results of wavelength and pixel

根据实验结果采用重心法拟合得出波长对应的像元序号如表 2 所示。

表 2 波长对应的像元
Table 2 Wavelength corresponding to the pixel

Wavelength/nm	Pixel
488.00	2 685.24
632.80	3 762.14
1 509.04	2 455.00

利用 488 nm 与 632.8 nm 单波长光测得像元序号带入式(1)、(2)、(3)求出需要的未知量即棱镜顶角 θ_p 为 35.76° 。在可见波段内利用 488 nm 对应像元序号作为基准,带入式(4)可以计算得 Si 单元探测器在反射镜 2 扫描范围内波长与像元对应的关系,同理 InGaAs 单元探测器在反射镜 2 扫描范围内波长与像元的关系可以利用前面求得的 θ_p 角度,只需将像元基准更换即可。因为在红外波段实验得出 1 509.04 nm 波长对应像元序号的关系,因此可以将该波长对应的像元作为基准带入式(4),求得 InGaAs 单元探测器探测范围内波长对应的像元值。根据式(4)描述的波长与像元关系,两个单元探测器响应波长对应的 CCD 像元值计算结果如图 5 所示。其中横坐标表示 CCD 像元,纵坐标表示对应像元所表示的波长。

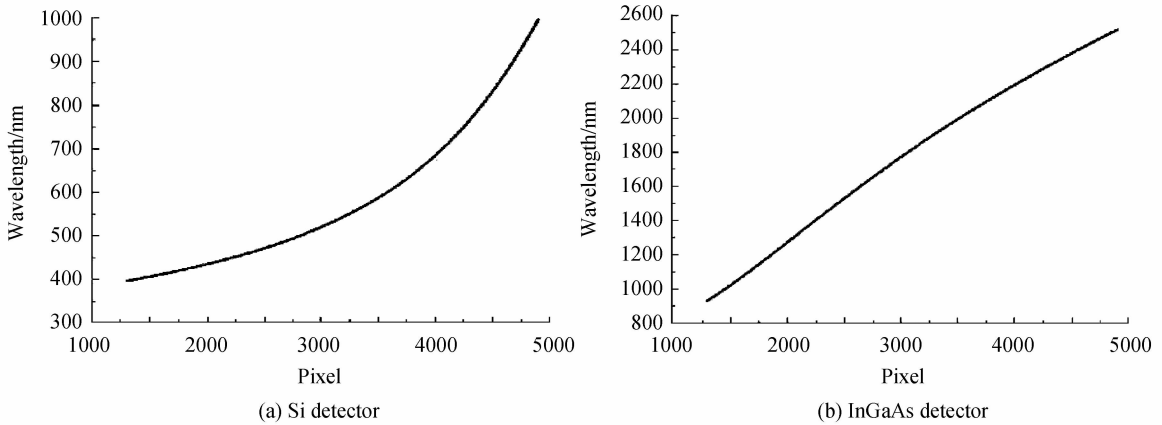
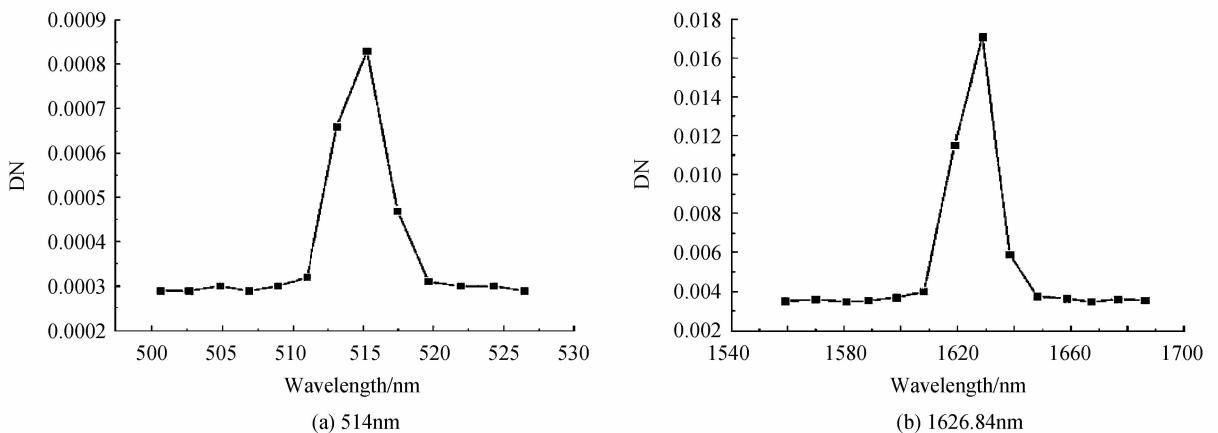


图 5 单元探测器探测范围内波长与像元之间的关系
Fig. 5 The relationship between the wavelength and the pixel in the detector range

3 光谱定标结果验证

3.1 典型波长验证

为验证定标结果能否满足光谱定标的要求,采用棱镜扫描法^[12]。在可见与红外波段分别用 514 nm, 1 626.84 nm, 1 743.5 nm 单色光进行光谱扫描,扫描完毕,采用重心法拟合出三个单波长光实验结果,即各个波长所对应的像元序号。通过比对光谱定标方程得出相应像元序号,通过计算差值,反应光谱定标准确度,得出定标结果的准确性。棱镜扫描法不同于传统光谱扫描法,传统的光谱扫描法是预先得到某个波长对应的



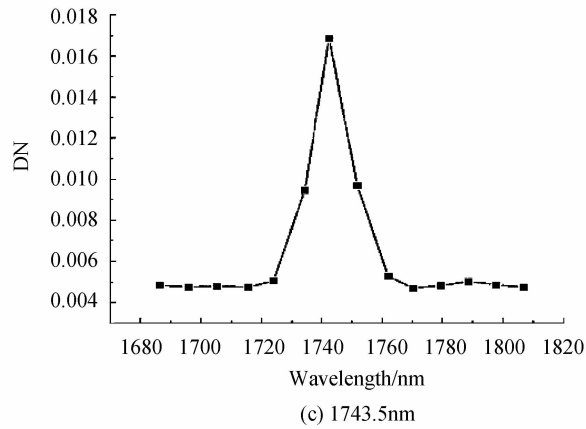


图6 三组波长验证结果

Fig. 6 Experimental results of three groups of wavelengths

像元序号,然后调整激光器的波长,例如以 0.5 nm 为间隔进行扫描,记录单元探测器在该像元的响应值.通过拟合得出波长值,对比激光器发出的单波长值,得出定标准准确度.而棱镜扫描法即是将激光器发出的单色光固定,利用棱镜旋转扫描,通过前面已经计算得出的每个单元探测器响应范围内波长与像元之间的映射关系,将实际扫描过程中像元坐标转化为波长坐标,然后通过拟合出的波长与激光器发出的单波长光对比,得出定标误差.该方法相对于传统光谱扫描法而言,不仅不受因多次调整激光器而有激光器本身带来准确度和重复性影响,而且不存在棱镜固定位置误差的影响,实现简单,准确度高,方便观测定标准准确度,光谱分辨率也直观显示.对三波长进行棱镜扫描法得出实验结果如图 6 所示,其中横坐标用转化后的波长结果表示.

因定标不确定度的影响,由图中可以看出理论结果与计算结果存在偏差,表 3 给出理论波长结果和计算结果的具体差值.

表 3 理论波长与计算波长值之差

Theoretical wavelength/nm	Calculated wavelength/nm	Difference/nm
514.00	514.70	0.70
1 626.84	1 626.01	0.83
1 743.50	1 743.07	0.43

结合三组典型波长结果,分析可知光谱定标不确定因素的来源有光源、仪器内部光学系统、光谱定标算法与采样间隔等方面.现按照 B 类不确定度评价标准对光谱定标标准不确定度进行评价^[13],其表达式为

$$u = \frac{a}{k} \quad (7)$$

式中 a 为被测量可能值的半宽度, k 为置信因子.对于定标光源的波长重复性采用波长计测量光谱定标前后波长变化.波长计是经过中国计量科学研院校准,给出的扩展不确定度为 0.000 3 nm,其包含因子为 3,故其标准不确定度为 0.000 1 nm.用波长计测量上述三组单色光在定标前后波长变化分别为 0.01 nm、0.005 nm、0.004 nm, a 取值为 0.01 nm,考虑采用均匀分布置信概率为 100%,则置信因子为 3.对于光谱定标算法即由重心法带来绝对偏差根据文献[11]可知优于 0.1 个像元即为一个像元的 10%.并考虑光谱采样间隔的影响,根据石英棱镜的色散非线性即在红外区域线色散率小和扫描采样间隔为 20 个像元,可知 CCD 探测器光谱采样间隔不大于 8.6 nm,棱镜的线色散率倒数为

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}}{2 \times \sin \frac{\theta}{2}} \times \frac{1}{f \times \frac{dn}{d\lambda}} \quad (8)$$

式中 θ 为棱镜夹角, f 为棱镜焦距, n 为折射率, λ 为波长,折射率对波长的微分可用式(1)求导得出.故整个光谱扫描范围内由重心法和光谱采样间隔导致的绝对偏差在 ± 0.86 nm 内,故 a 为 0.86 nm,取置信概率 95%的正态分布,置信因子为 1.96.内部光学系统的影响因素根据前面光谱定标方程式(2)可知,影响因素有棱镜入射角 γ ,因温度的变化而导致的棱镜折射率的变化等.由于对棱镜进行温控,其温度变化导致的影

响因素可以忽略,对于入射角的因素,通过实验可知将单色光照射第一个反射镜中心与边缘,结果相差不到半个像元,故 a 为 0.215 nm ,服从置信概率 99% 的正态分布,置信因子为 2.576 . 上述各不确定度之间并不关联. 故在整个波长范围内带来合成不确定度可按照算式计算得出.

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2} \quad (9)$$

式中 U 为合成不确定度, U_1 为波长计的标准不确定度其值为 0.0001 nm , U_2 为光源导致的标准不确定度其值约为 0.006 nm , U_3 为重心法和采样间隔带来的标准不确定度值约为 0.44 nm , U_4 为仪器内部光学系统带来的标准不确定度其值约为 0.08 nm , 因此合成不确定度约为 0.45 nm .

3.2 传统光谱定标方法对比验证

传统方法采用测量多组波长与像元的对应关系,通过对测量结果进行多项式拟合^[14],得出仪器设计波长范围内波长对应的像元序号. 为验证本文光谱定标方法的合理性,对比两种方法下 InGaAs 单元探测器响应波长范围内定标准准确度. 图 7 为 OPO 激光器发出的六组单波长光对应的 CCD 像元序号实验结果.

在进行多项式拟合时一般根据最小二乘法原则,选择合适的次数. 选择次数时并不是越高越好,次数越高可能出现震荡现象,导致拟合准确度降低^[15]. 将上述实验结果带入 matlab 拟合工具箱进行多项式拟合,可以得出四次拟合效果更好. 拟合标准差为 0.3143 . 拟合公式为

$$p = 0.3237 \times \left(\frac{\lambda - 1689}{191.6}\right)^4 + 1.512 \times \left(\frac{\lambda - 1689}{191.6}\right)^3 + 13.55 \times \left(\frac{\lambda - 1689}{191.6}\right)^2 + 401.3 \times \left(\frac{\lambda - 1689}{191.6}\right) + 2821 \quad (10)$$

式中 λ 表示波长, p 表示 CCD 像元序号. 为对比两种光谱定标方法,表 4 列出两种光谱定标方式下波长对应 CCD 像元结果.

表 4 两种光谱定标方法结果对比

Table 4 Comparison of two spectral calibration methods

Wavelength/nm	Actual pixel	Calculated pixel	Pixel of polynomial fit
1 457.97	2 354.62	2 354.80	2 354.80
1 509.04	2 455.00	2 455.00	2 455.00
1 626.84	2 691.80	2 691.84	2 692.20
1 743.50	2 936.21	2 936.11	2 936.30
1 863.77	3 199.30	3 199.65	3 199.70
1 934.80	3 361.90	3 362.00	3 362.20

由对比结果可以看出,两种光谱定标方法都比较精确,但根据光谱定标方程得出的结果要比多项式拟合的结果准确度更高,证明实验室定标与计算相结合的方法对于该仪器设计波段范围内光谱定标更有效.

3.3 室外观测特征光谱验证

用光谱定标和基于标准灯辐照度定标^[16-17]完成后的仪器进行室外观测,在 12 月 29 日正午观测合肥地区辐照度结果如图 8 所示.

利用 modtran4 大气辐射传输软件反演当天正午合肥地区(117.15°E , 31.9°N , 海拔 0.0298 km) 在 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 波长范围内太阳光谱辐照度, modtran4 中基本参量设置如表 5 所示.

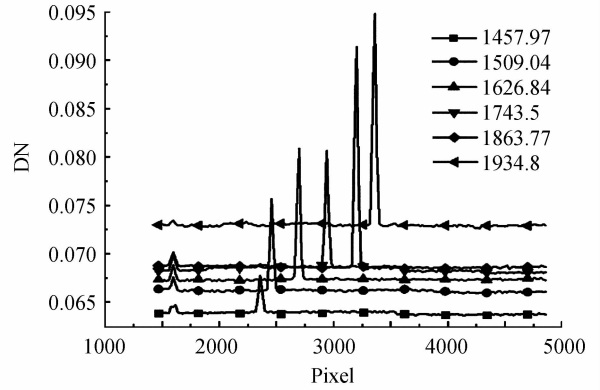


图 7 六组波长实验结果

Fig. 7 Experimental results of six groups of wavelengths

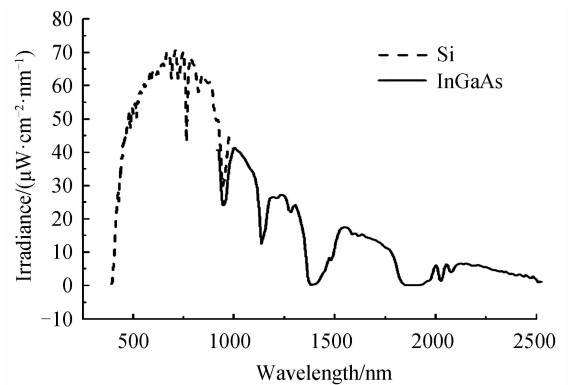


图 8 合肥地区太阳光谱辐照度

Fig. 8 The solar spectral irradiance in Hefei

表 5 Modtran4 参量设置
Table 5 Parameter setting in modtran4

Input of modtran4	December 29 th in Hefei
Model atmosphere	Mid latitude winter model
Aerosol model used	Rural-VIS=23 km
Mode of execution	Direct solar irradiance
Altitude of observer	0.03 km
Solar zenith angle	34.6°
Day of year	363

将上述参量带入 modtran4 中反演, 比对结果如图 9 所示. 从图中可以看出实际测量结果与 modtran4 模拟比较一致. 因 modtran4 模拟理想大气环境下趋势, 采用默认水汽柱含量和臭氧柱含量, 与仪器测量实际环境有所区别, 影响测量幅值, 但不会影响大气吸收峰所在波长区域位置. 实际测量结果在 764 nm, 823 nm, 942 nm, 2 005 nm 太阳辐照度明显下降. 查阅相关资料^[18], 显示大气在 760 nm 附近有明显的 O₂ 吸收峰, 在 820 nm, 940 nm 附近有明显的 H₂O 吸收峰, 在红外波段 2 000 nm 附近有明显的 CO₂ 吸收峰. 把吸收峰波长与模拟结果相比较, 可以发现实际测量吸收峰波长在 modtran4 模拟结果范围内. 通过室外观测并与 modtran4 模拟比对, 可以验证设计和计算波长结果的准确性.

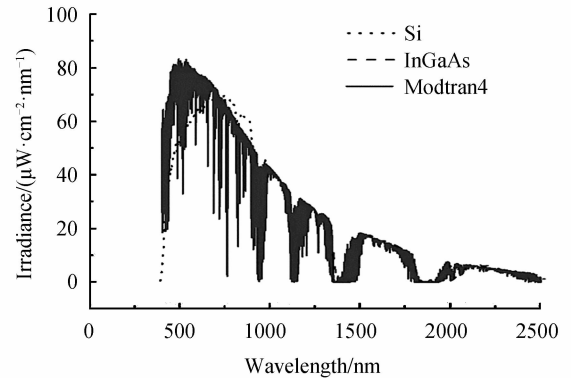


图 9 与 modtran4 比对结果
Fig. 9 Comparison of results with modtran4

4 结论

光谱定标采用 CCD 像元反馈波长信息. 根据 fèry 棱镜结构, 利用主光路和参考光路之间的关系, 并采用实验室特征光谱定标, 成功实现 400~2 500 nm 宽光谱范围内仪器的光谱定标. 采用棱镜扫描法, 选取三个波长点进行结果验证, 分析光谱定标合成不确定度优于 0.5 nm. 与传统多项式拟合光谱定标对比, 可以发现该定标方法不仅节省时间, 并且准确度也优于传统的多项式拟合方法. 把仪器放于室外运行, 仪器探测到的几个主要的吸收峰波长与 modtran4 模拟结果比较符合. 证明根据特征光谱与光谱定标方程相结合的定标方法对该波段范围内光谱定标不仅高效而且准确.

参考文献

- [1] LIU En-chao, ZHENG Xiao-bing, LI Xin, *et al.* Wavelength calibration of absolute spectral irradiance instrument[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3): 608-609.
刘恩超, 郑小兵, 李新, 等. 绝对光谱辐照度仪的光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(3): 608-609.
- [2] BÉLAND S, HARDER J, WOODS T. 10 years of degradation trends of the SORCE SIM instrument[J]. *Solar Physics and Space Weather Instrumentation*, 2013, **88**(20): 15-16.
- [3] 刘恩超. 太阳直射光谱辐照度仪的研制[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2013: 21-62.
- [4] CUI Dun-jie. Calibration of imaging spectrometer[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1996, **11**(3): 57-59.
崔敦杰. 成像光谱仪的定标[J]. *遥感技术与应用*, 1996, **11**(3): 57-59.
- [5] HARDER J, LAWRENCE J, ROTTMAN G, *et al.* Solar spectral irradiance monitor[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 415-416.
- [6] FÈRY C. A prism with curved faces, for spectrograph or spectroscope[J]. *American Astronomical Society*, 1911, **34**(79): 82-85.
- [7] HARDER J, LAWRENCE G, ROTTMAN G, *et al.* The spectral irradiance monitor (SIM) for the SORCE mission [C]. SPIE, 2000, **41**(35): 207-208.
- [8] MALITSON I. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Optical Society of America*, 1965, **55**(10): 1-3.
- [9] LIU En-chao, WU Hao-yu, ZOU Peng. Deviation analysis of solar tracking based on four quadrant detector[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, **07**(2): 141-142.

- 刘恩超, 吴浩宇, 邹鹏. 基于四象限探测器进行太阳跟踪的偏差分析[J]. 大气与环境光学学报, 2012, **07**(2): 141-142.
- [10] SULLIVAN J, QUIMBY B. Characterization of a computerized photodiode array spectrometer for gas chromatography-atomic emission spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 1990, **62**(10): 1305-1306.
- [11] LI Xin, ZHANG Guo-wei, Xun li-na, *et al.* Wavelength calibration of shortwave infrared flat spectroradiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 903-904.
李新, 张国伟, 寻丽娜, 等. 短波红外平场光谱仪的光谱定标[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 903-904.
- [12] GAO Zhen-yu, FANG Wei, WANG Yu-peng, *et al.* Spectral calibration of solar spectrometer based on prism scanning method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(6): 1930-1935.
高震宇, 方伟, 王玉鹏, 等. 基于棱镜扫描法的太阳光谱仪光谱定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(6): 1930-1935.
- [13] JJF 1059.1-2012, 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.
- [14] ZHENG Yu-quan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2349-2350.
郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(11): 2349-2350.
- [15] SI Shao-ling, GUAN Yong. Determination of optimal power of data fitting to characteristic curve of trigonometric function[J]. *Computer Engineering and Design*, 2006, **27**(24): 4660-4662.
司少玲, 关永. 三角函数曲线数据拟合最佳次数的确定[J]. 计算机工程与设计, 2006, **27**(24): 4660-4662.
- [16] ZHANG Yan-na, LIU En-chao, LI Xin, *et al.* Calibration method of VNIR solar irradiance spectroradiometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, **35**(1): 13-14.
张艳娜, 刘恩超, 李新, 等. 可见近红外波段太阳光谱辐照度仪的辐射定标方法研究[J]. 应用光学, 2014, **35**(1): 13-14.
- [17] HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, *et al.* Spectral irradiance calibration of space remote sensing spectral radiometer in range of UV and VUV[J], *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S): 187-188.
黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 空间遥感光谱辐射计紫外/真空紫外光谱辐照度定标技术[J]. 光子学报, 2007, **36**(S): 187-188.
- [18] LIOU K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. GUO Cai-li, ZHOU Shi-jian Transl. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 86-91.
廖国男. 大气辐射导论[M]. 郭彩丽, 周诗健译. 北京: 气象出版社, 2004: 86-91.