

文章编号 1004-924X(2013)03-0608-08

## 绝对光谱辐照度仪的波长定标

刘恩超\*, 郑小兵, 李 新, 张艳娜

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

**摘要:** 为了提高太阳绝对光谱辐照度仪的波长定标精度, 提出了用线阵 CCD 作为位置传感器进行波长定标的方案, 完成了 0.4~1.0  $\mu\text{m}$  波长的定标。根据仪器的安装结构和 Fèry 棱镜的参数, 描述了波长与 CCD 像元的对应关系, 制定了定标与计算方法, 并介绍了器件的选型及线阵 CCD 的时序驱动和输出信号的处理。在室内波长定标中, 利用可调谐激光器作为光源, 确定了 CCD 像元与中心波长的对应关系, 并通过光谱扫描进行了验证。在室外开展了太阳观测实验, 并与可见-短波红外光谱仪做了对比。实验结果表明, 波长定位精度优于 0.5 nm, 测量的光谱曲线吸收峰与大气典型吸收谱线吻合, 同时验证了波长定标方案的可行性与 CCD 电子学设计的合理性。

**关键词:** 绝对光谱辐照度仪; 线阵 CCD; 光谱扫描; 时序驱动; 信号处理; 光谱定标; 波长定标

**中图分类号:** TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0608

## Wavelength calibration of absolute irradiance spectra-radiometer

LIU En-chao\*, ZHENG Xiao-bing, LI Xin, ZHANG Yan-na

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

\* Corresponding author, E-mail: liuech@aiofm.ac.cn

**Abstract:** To improve the wavelength calibration accuracy of a solar absolute irradiance spectra-radiometer, a wavelength calibration scheme that a linear CCD was used as position sensor to control the wavelength was presented. The wavelength calibration was implemented from 0.4  $\mu\text{m}$  to 1.0  $\mu\text{m}$ . Based on the install configuration of the instrument and the parameters of Fèry prism, the relationship between wavelength and CCD pixels was described and the calibration and calculation methods were depicted in detail. The selection of devices, the designs of a clock driver and an output signal processor for CCD were introduced. For wavelength calibration in a lab, a tunable laser was used as source, and the relationship between CCD pixels and center wavelength was confirmed and verified by spectral scanning. Furthermore, the outdoor measurement was developed and the results were compared with that of a visible-short wave infrared spectrometer. Experimental results indicate that the precision of wavelength orientation is better than 0.5 nm, and the absorbing peak of spectral curve measured is accord with the absorbing spectra of typical atmosphere exactly. The feasibility of spectral scanning scheme and the reasonability of electronic design of CCD were demonstrated finally.

收稿日期: 2012-11-12; 修订日期: 2013-01-06.

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项经费资助项目(No. GYHY200906036)

**Key words:** absolute irradiance spectra-radiometer; linear CCD; spectral scanning; clock driver; signal processing; spectral calibration; wavelength calibration

## 1 引言

太阳辐射是影响地球大气动力学、海洋动力学和全球能量平衡的决定性因素,其中  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$  波段的辐射占据了太阳总辐射能的大约 60%,包含了大气窗口、人眼可见波段、植物光合作用波段和海水透过波段,这一波段内太阳辐射光谱本身和大气吸收都具有较多的特征吸收峰,这些光谱的精确观测对大气光学、光化学等研究具有重要意义。太阳绝对光谱辐照度仪就是在  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$  波段对地面接收到的太阳直射辐射进行高精度和连续光谱观测的仪器<sup>[1]</sup>。

在整个工作波段内进行实时和精确的波长定标是细分光谱太阳辐射观测的关键要求之一。目前常用的通道式太阳辐射计一般仅需要在实验室测量滤光片的中心波长和通道宽度,无在线光谱定标功能。连续光谱辐射计的波长定标大多采用特征光谱定标法,即使用多项式拟合得到 CCD 像元与波长的对应关系,定标过程中使用的定标光源需要知道较多的已知光谱线,且需要分布均匀<sup>[2]</sup>。在国内现有成熟技术的基础上,太阳绝对光谱辐照度仪采用光谱扫描的方式测量  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$  波段光谱辐照度,同时解决了精确波长校准的问题,实现了高精度的波长定标。不同于特征光谱定标法,该波长定标的方法使用单波长激光器进行波长的初定标,然后通过单色光定标结果和理论计算相结合得到波长与 CCD 像元的关系<sup>[3]</sup>。

针对太阳绝对光谱辐照度仪的波长精确定标要求,本文采用 CCD 组件实现了独立的实时定标功能。CCD 具有高分辨率、高灵敏度、像素定位准确等优点,输出信号中包含光强和空间信息,可以作为位置传感器进行工作<sup>[4]</sup>。为了达到对所研制辐照仪精确光谱扫描的要求,对  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$  波段内波长-像元关系进行了定标,并利用可调谐激光器作为光源,通过光谱扫描对定标精度进行了验证。最后开展室外太阳观测实验,并与可见-短波红外光谱仪进行了对比<sup>[5]</sup>,完成了辐照度仪关于波长定标结果与光谱扫描功能的验证。

## 2 太阳光谱辐照度仪介绍

太阳绝对光谱辐照度仪采用 Fèry 棱镜分光,陷阱式单元探测器测量光谱辐射通量。Fèry 棱镜前后表面均为曲面并在后表面镀反射膜,集色散、会聚功能为一体。通过入射狭缝的太阳光经过棱镜色散后在焦平面处(入射狭缝、出射狭缝均在此平面上)形成连续的会聚光谱。使用陷阱探测器测量通过出射狭缝的辐射通量,测量时需要转动棱镜来实现连续光谱扫描。为了实时和精确定位测量波长,设计了线阵 CCD 反馈控制棱镜转动的光谱扫描方案,其测量原理如图 1 所示。太阳光同时通过 2 个人射狭缝形成 2 路入射光,其中入射光束 1 经过 Fèry 棱镜色散、反射会聚于成像面;入射光束 2 照射到凹面反射镜上,反射会聚于焦平面线阵 CCD 上(凹面反射镜的焦平面与棱镜的焦平面重合),该凹面反射镜与棱镜固定在一起同轴转动,成像光斑随之沿线阵 CCD 移动,保证了通过出射狭缝的光谱中心波长与 CCD 像元具有固定的对应关系,测量时根据 CCD 像元位置反馈控制棱镜转动实现光谱扫描<sup>[6]</sup>。

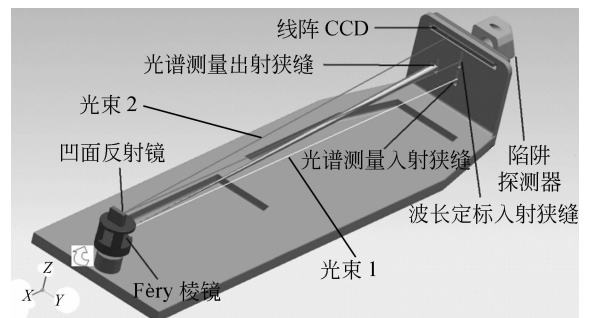


图 1 光谱扫描示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral scanning

## 3 波长定标原理

波长定标是仪器的辐射定标、确定仪器光谱范围和检测光谱分辨力等性能指标的前提,通过波长定标将波长信息转化为 CCD 的像元信息。针对太阳光谱辐照度仪的光谱扫描要求,波长定

标采用单色光定标与计算相结合的方法,确定波长-CCD 像元的对应关系。根据仪器的设计思路,使用单波长光束同时通过光谱测量和波长定标入射狭缝,经过 Fèry 棱镜和凹面反射镜的光斑分别在陷阱探测器和线阵 CCD 上成像。改变线阵 CCD 上的光斑的位置,使陷阱探测器的输出电压信号达到最大值,通过拟合得出 CCD 上光斑的质心位置,得到一组单波长光与 CCD 像元的对应关系。

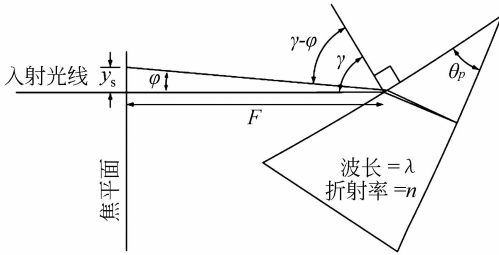


图 2 Fèry 棱镜的散射结构与变量的定义

Fig. 2 Dispersion geometry of the Fèry prism and its variable definitions

$$\gamma = \arcsin \left( \sqrt{\frac{\cos(\varphi) \sin^2(2\theta_p) + X \cos(2\theta_p) \sin^2(\varphi) + Y \sin(\varphi) \sin(2\theta_p)}{2X(\cos(2\theta_p) + \cos(\varphi))}} \right), \quad (3)$$

其中:

$$X = \frac{1}{n^2}, \quad (4)$$

$$Y = \sqrt{(\cos(2\theta_p) + x \cos(\varphi))^2 - (1 - X)^2}. \quad (5)$$

(4)对于不同波长的入射光,当 Fèry 棱镜的折射角度  $\varphi$  相同时,棱镜的入射角不同,对应棱镜转角不同。当进行不同波长的光谱测量时,根据每次棱镜转角差,可以得出不同波长在 CCD 上的像元差,依式(6)可推算出待计算的单波长光对应的 CCD 像元值:

$$P_n = P_0 - 2F \tan(\gamma - \gamma_0) / C_L, \quad (6)$$

其中: $P_n$  为待计算波长光对应的像元值, $P_0$  为定标单波长光对应的像元位置, $\gamma_0$  为定标单波长光对应的棱镜入射角, $C_L$  为 CCD 的像元尺寸。

## 4 波长定标的器件选型与设计

太阳绝对光谱辐照度仪的波长定标是通过入

根据已知的单波长光-CCD 像元的对应关系,结合图 2 中的 Fèry 棱镜的光路结构与变量的定义,通过以下流程计算 0.4~1.0  $\mu\text{m}$  的波长-CCD 像元关系,完成波长定标<sup>[3]</sup>。

(1)由 Fèry 棱镜的参数,得到 Fèry 棱镜的折射率如式(1)所示:

$$n_\lambda^2 = 1 + \frac{0.696\ 166\ 3\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684\ 043^2} + \frac{0.407\ 942\ 6\lambda^2}{\lambda^2 - 0.116\ 241\ 4^2} + \frac{0.897\ 479\ 4\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896\ 161^2}, \quad (1)$$

式中: $n_\lambda$  为不同波长下的棱镜折射率, $\lambda$  为入射光的波长。

(2)由 Fèry 棱镜成像焦距  $F$  和光谱测量入射狭缝与出射狭缝的距离  $y_s$ ,计算入射光在棱镜上的折射角度  $\varphi$ :

$$\varphi = \arctan(y_s/F). \quad (2)$$

(3)根据不同波长的棱镜折射率  $n_\lambda$ 、Fèry 棱镜的设计夹角  $\theta_p$  和折射角度  $\varphi$ ,得到单波长光的棱镜入射角  $\gamma$ ,如式(3)所示:

射狭缝、凹面反射镜和线阵 CCD 来实现的。入射光通过波长定标入射狭缝投射到凹面反射镜上,经过凹面反射镜成像后投射到线阵 CCD 上,根据 CCD 像元信息可以拟合出成像质心位置,图 3 所示为波长定标光路图。

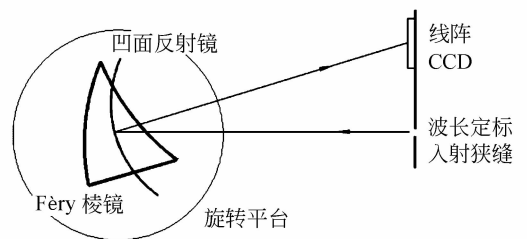


图 3 波长定标光路图

Fig. 3 Schematic of optical path of wavelength calibration

### 4.1 元件的选型及参数

利用 CCD 反馈控制波长实现太阳光谱扫描测量,要求线阵长度满足光谱的扫描范围并能够实现

CCD 像元的快速扫描,且光斑定位精度满足光谱的扫描精度。如图 3 所示,波长定标的关键是选择入射狭缝的大小、凹面反射镜的设计参数和线阵 CCD。

从仪器的设计考虑,辐照度仪选取的波长定标入射狭缝为  $5\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ ,凹面反射镜为 1:1 成像,成像焦距与 Fèry 棱镜的相同。根据入射狭缝的大小和凹面反射镜的参数,选取的线阵 CCD 的像元宽度要小于  $100\text{ }\mu\text{m}$ 。在计算波长-CCD 像元关系时,根据 Fèry 棱镜设计的出射棱镜夹角和覆盖的波长范围,选取的线阵 CCD 的像元数要大于 4 000 个,另外需要考虑为其他应用预留出 2 000 以上的像元。结合以上几方面的要求和使用的可靠性及经济性,选用线阵 CCD TCD1703C,它具有 7 500 个像元,有效像元长度为  $52.5\text{ mm}$ ,其他主要性能参数见表 1<sup>[7]</sup>。

表 1 TCD1703C 的性能参数

Tab. 1 Performance indexes of TCD1703C

性能参数	典型值
像元尺寸/ $\mu\text{m}$	$7 \times 7$
时钟最高频率/MHz	20
响应度/ $(\text{V} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	15
最大直流输出电压/V	7
暗信号电压/mV	1.2
随机噪声/mV	1.0
总转换效率/%	98

#### 4.2 CCD 驱动设计

CCD TCD1703C 需要 15 路驱动时钟信号供电荷产生、转移和读出,所需要的驱动时序脉冲包括垂直转移时钟 (SH)、水平转移时钟 ( $\phi 1E, O, \phi 2E, O, \phi 2B$ )、复位时钟 (RS) 和钳位电平控制时钟 (CP),各驱动脉冲必须严格满足相位时序要求才能保证 CCD 正常工作。每发送一个垂直转移时钟,代表线阵 CCD 像元积累的电荷向外发送一组。每发送一个水平转移时钟,水平移位寄存器中的电荷向输出端转移一次,被转移的电荷送至输出放大器,把电荷转换成电压的形式在相应的 OS 管脚上输出。复位时钟用来清除水平移位寄存器中的残

余电荷,而钳位电平控制时钟决定了在工作前像元复位到钳位的电平。

采用 CPLD 时序产生模块生成线阵 CCD TCD1703C 工作所需要的驱动时序。CPLD 选用 MAX II 系列 EPM1270T144T,通过对该逻辑器件的编程,能够实现 CCD 工作对时序信号种类和数量的要求,且调试方便,只使用一片集成电路和外围器件,可靠性高。图 4 所示为 CPLD 产生的驱动时序图,在时序驱动下 CCD 的输出信号如图 5 所示。

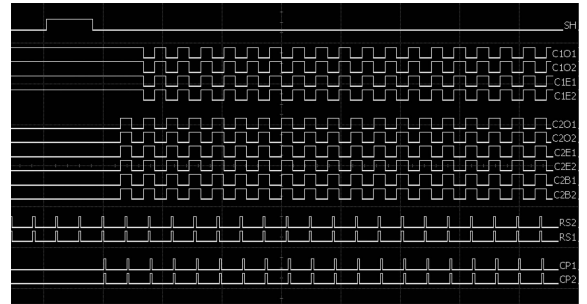


图 4 CCD 驱动时序图

Fig. 4 Driving clocks of CCD

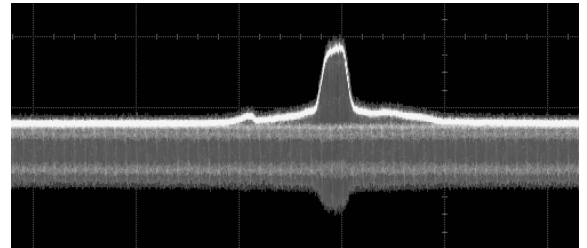


图 5 CCD 输出图形

Fig. 5 Output waveform of CCD

#### 4.3 CCD 信号处理设计

CCD 输出信号处理电路由 A/D 转换电路、FIFO 缓存、SRAM 存储和时序与逻辑电路几部分组成。CCD 输出为奇偶像元两路输出,输出信号先经过 A/D 器件的相关双采样,将得到的数字信号经过 FIFO 缓存,最后存入 SRAM 中,实现 CCD 数据的采集与存储<sup>[8]</sup>。当工作需要 CCD 的像元值时,直接从 SRAM 中提取存储值,图 6 给出了 CCD 输出数字波形图,与图 5 进行对比,可以看出,经过数字化后的 CCD 信号同样具有波形相似的尖峰输出,可以用来拟合质心。

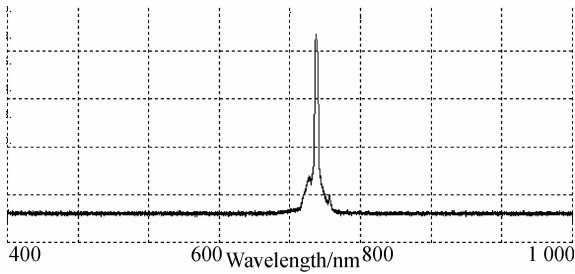


图 6 数字化后的 CCD 输出波形

Fig. 6 Digital output waveform of CCD

## 5 测量实验与结果分析

图 7 所示为激光器的波长定标及验证系统,可调谐激光通过聚焦透镜、起偏棱镜后进入激光功率控制器,经过稳定后的激光到达分束镜上,一束光经过扩束镜,形成均匀的平行光束,面积可以覆盖太阳光谱辐照度仪的波长定标和光谱测量入射狭缝;另外一部分光则照射到波长计或监测探测器上,波长计用于随时观测测量的波长大小,监测探测器用于测量工作过程中激光功率的变化,其中监视探测器安装在一维平台上,当需要时将其移动到光路上。

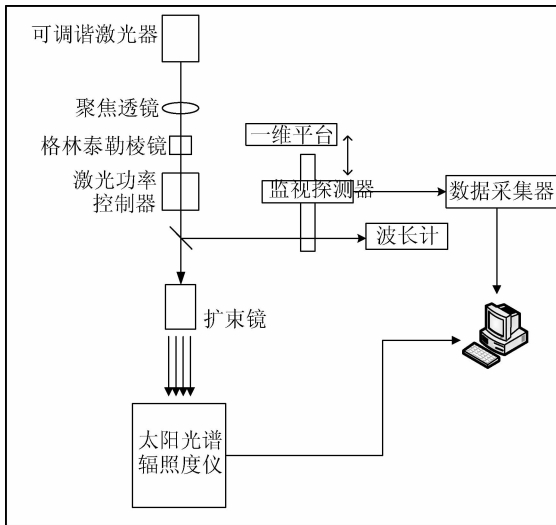


图 7 基于可调谐激光器的波长定标及验证系统

Fig. 7 Tunable laser-based facility for wavelength calibration and validation system

### 5.1 波长定标与计算结果

波长定标是在稳定的单波长激光下进行的,当调整好激光的波长后,将监视探测器移动到光路

中,直接观测激光的稳定程度。经过扩束镜的光束进入太阳辐照度仪,在上位机的控制下辐照度仪进行光谱扫描,当陷阱探测器采集到最大的输出电压值时,利用重心法拟合出线阵 CCD 上的成像光斑的质心<sup>[9]</sup>,如式(7)所示,从而可实现单波长光的波长定标:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (7)$$

式中: $x_c$  为所求的目标像元的质心位置, $V_i$  为转化后的电压值。

当完成单波长光的定标之后,结合棱镜色散方程,通过理论计算的得出  $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$  的波长-像元对应关系。在实验室中使用  $762 \text{ nm}$  的单波长激光器对 CCD 像元位置进行定标,根据得到的像元质心值和波长-CCD 像元的计算关系式,得出其他波长对应的 CCD 像元值,完成波长定标,波长定标结果如图 8 所示。

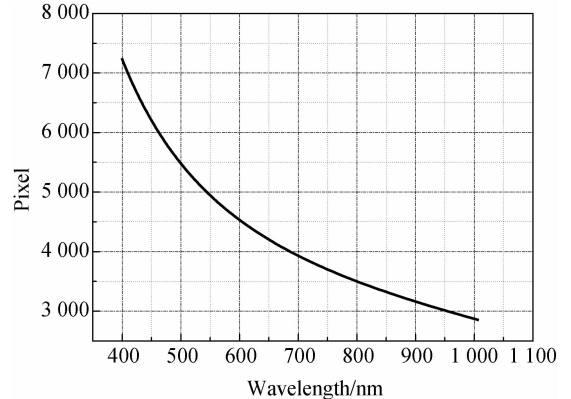


图 8 波长与像元对应关系曲线

Fig. 8 Relationship between wavelength and pixels

### 5.2 实验验证与分析

在得到波长-CCD 像元的对应关系后,利用光谱扫描的方法对定标精度进行了验证。开启太阳绝对光谱辐照度仪,改变波长定标入射狭缝在 CCD 上的成像位置,使当前成像位置拟合出的质心与某个波长对应的 CCD 像元值相同。将仪器固定在当前状态,调整可调谐激光器,使出射光的中心波长与选取的波长值相等,以  $1 \text{ nm}$  间隔进行光谱扫描,每个波长点记录陷阱探测器输出值和监视探测器的采集值,最终用于进行处理拟合探测器响

应输出最大时的波长点。

实验中调整可调谐激光器,分别对 720、762、790、820、870 和 940 nm 的单波长光进行光谱扫描,然后对比理论波长与实际波长的误差范围,得出定标精度。

根据不同波长得到的陷阱探测器输出值,计算出不同波长下的光谱辐照度响应值,如图 9 所示,利用式(8)拟合出实际的中心波长值<sup>[10]</sup>:

$$\lambda_c = \frac{\int \lambda R(\lambda) d\lambda}{\int R(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

其中: $\lambda_c$  为拟合出的中心波长值, $\lambda$  为扫描的每个波长值, $R(\lambda)$  为不同波长对应的光谱辐照度响应值。

表 2 中给出定标的单波长光的理论波长、定标波长和偏差,结果显示,波长定标的精度优于 0.5 nm。

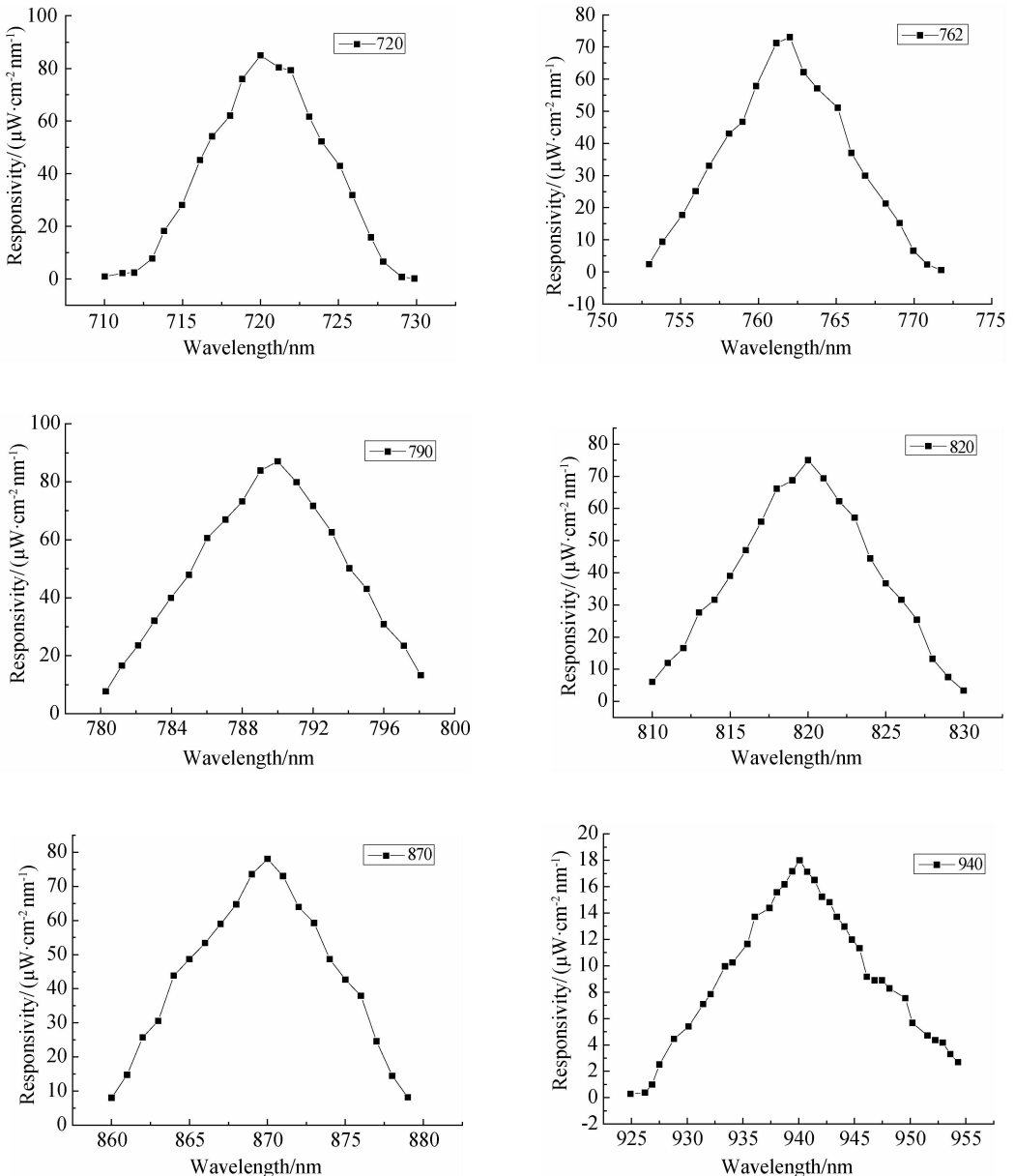


图 9 不同波长的光谱辐照度响应值

Fig. 9 Responsivity values of different wavelengths

表 2 不同波长的理论与实际对比

Tab. 2 Comparison between theoretical and real wavelengths (nm)

理论波长	拟合波长	误差
720	720.40	0.40
762	761.83	-0.17
790	789.51	-0.49
820	819.85	-0.15
870	869.60	-0.4
940	940.40	0.4

### 5.3 室外实验验证与对比

根据得到的波长-CCD 像元的对应关系,在室外开展太阳观测实验,并与经过验证的可见-短波红外光谱仪进行对比<sup>[5]</sup>。扫描测量太阳光谱辐射通量,即得到 0.4~1.0  $\mu\text{m}$  内的太阳光谱辐照度输出电压,经过对数据的处理后,可以推算出不同波长下的地面太阳辐照度,如图 10 所示。由图中看出,在水汽吸收峰 940、820 和 720 nm 和氧气吸收峰 760 和 690 nm 上,测量电压值明显减小,大气典型吸收谱线的观测结果与理论分析相一致。与可见-短波红外光谱仪对比的结果显示,测量的辐照度绝对值上存在差别,尤其在 400~650 nm 波段更加明显。考虑到两个仪器进行辐照度定标的时间不同,并且所使用的标准灯已进行更换,可见-短波红外光谱仪没有重新进行辐照度的定标,在辐照度绝对值上存在误差。但是根据对比的结果,两个光谱仪在地面测量的每个波长点的太阳辐照度趋势一致,验证了文中所述的定标方法与原理的正

确性,说明了 CCD 作为位置传感器反馈控制扫描波长方案的可行性<sup>[11]</sup>。

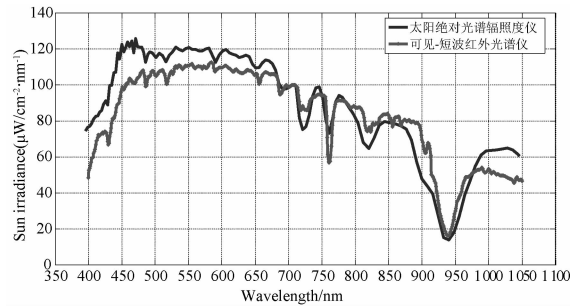


图 10 太阳辐照度测量曲线图

Fig. 10 Measure curves of sun irradiance

## 6 结论

采用线阵 CCD 反馈控制波长扫描的方法,完成 0.4~1.0  $\mu\text{m}$  波长范围内的波长定标,实现了对太阳光谱的扫描测量。根据太阳绝对光谱辐照度仪的结构和 Fèry 棱镜参数,介绍了波长-CCD 像元定标与计算方法。合理选用波长定标元件,实现了光路设计,并完成 CCD 的驱动和信号处理设计,实现了 CCD 快速数据采集。室内定标与理论计算得到波长-CCD 像元的关系后,选取 6 个波长点进行光谱扫描,得出波长定位的精度优于 0.5 nm。在室外开展太阳观测实验,实验结果表明,大气典型吸收谱线的观测结果与理论分析相一致,验证了利用 CCD 作为位置传感器反馈控制扫描波长方案的可行性。

### 参考文献:

- [1] 孔德新. 太阳绝对光谱辐照度仪的跟踪与定位系统的研制[D]. 合肥: 中科院合肥物质科学研究院, 2010.
- [2] 张运杰, 李正强, 乔延利, 等. 测量太阳辐射连续谱的方法研究[J]. 光电子技术与信息, 2005, 18(2): 98-100.
- [3] KONG D X. *Development of Tracking and Orientation System in the Solar Absolute Irradiance Spectra-radiometer*[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)

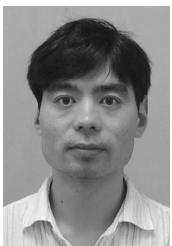
- [4] ZHANG Y J, LI ZH Q, QIAO Y L, *et al.*. High Resolution Solar Radiometer [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, 18(2): 98-100 (in Chinese).
- [5] HARDER J W, FONTENLA J, LAWRENCE G, *et al.*. The spectral irradiance monitor: Measurement equations and calibration [J]. *Solar Physics*, 2005, 230(1-2): 169-204.
- [6] 马庆军, 宋克非, 曲艺, 等. 紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1538-1545.
- [7] MA Q J, SONG K F, QU Y, *et al.*. Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging

- spectrometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011,19(7):1538-1545. (in Chinese)
- [5] 张国伟. 可见-短波红外光谱仪的多探测器驱动及模拟前端电路设计[D]. 合肥:中科院合肥物质科学研究院,2008.  
ZHANG G W. *Design of Sensors' Driver and Analog Front End of Visible-Short Wave Infrared Spectrometer*[D]. Hefei:Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [6] HARDER J, LAWRENCE G, FONTENLA J, et al.. The spectral irradiance monitor: Scientific requirements, instrument design, and operation modes[J]. *Solar Physics*, 2005, 230(1-2): 141-167.
- [7] TOSHIBA. CCD Linear Image Sensor TCD1703C [EB/OL]. www.datasheetcatalog.com,2001.
- [8] 李国宁,刘妍妍,金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 558-564.  
LI G N, LIU Y Y, JIN L X. Area CCD imaging system used in moving target tracking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 558-564. (in Chinese)
- [9] 闻路红,童卫旗,陈桂林. 重心算法确定 CCD 像点位置的硬件实现[J]. *仪表技术与传感器*, 2004, 5: 42-43.  
WEN L H, TONG W Q, CHEN G L. Way to locate image point on CCD with centroid algorithm [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2004,5:42-43. (in Chinese)
- [10] 徐秋云. 光谱辐亮度和辐照度响应度系统级定标方法研究[D]. 合肥:中科院合肥物质科学研究院,2010.  
XU Q Y. *Research of system-level method for spectral radiance and irradiance responsivity calibrations* [D]. Hefei:Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [11] 詹杰,郭瑞鹏,饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气透过率的测量[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(3): 179-183.  
ZHAN J, GUO R P, RAO R ZH. Measurement of atmospheric transmittance in the visible and near-infrared[J]. *Jouranal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3):179-183. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘恩超(1985—),男,山东菏泽人,博士研究生,2008年于山东建筑大学获得学士学位,主要从事光谱辐照度计和辐射定标方面的研究。E-mail: liuech@aiofm. ac. cn



李新(1975—),男,安徽合肥人,博士,副研究员,主要从事光学遥感、精密仪器和辐射定标方面的研究。E-mail: xli@aiofm. ac. cn



张艳娜(1987—),女,河南平顶山人,博士研究生,主要从事数字电路设计和电机控制方面的研究。E-mail: zynbao@mail. ustc. edu. cn

#### 导师简介:



郑小兵(1969—)男,安徽合肥人,博士,研究员,博士生导师,1990年于浙江大学获得学士学位,1994年、1998年于中国科学院安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm. ac. cn