

文章编号 2095-1531(2015)06-0942-09

## CO<sub>2</sub> 探测仪 1610 nm 通道光谱仪的精细定焦

郑成超<sup>1,2</sup>, 蔺超<sup>1</sup>, 王龙<sup>1</sup>, 纪振华<sup>1</sup>, 郑玉权<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**基于能量集中度的装调方法采用一套由可调谐激光器、积分球、平行光管和数据采集处理软件等组成的精细定焦系统,以确定 CO<sub>2</sub> 探测仪 1610 nm 通道光谱仪的最佳焦面位置并完成探测器的精确安装,以像元光谱响应曲线(IIS)的全高半宽度(FWHM)作为聚焦评价函数,通过调整探测器方位遍历搜寻该函数最小值并作为正焦的最终评价依据,进而完成光谱仪的精细定焦任务。定焦结果显示:探测器获得的光谱响应曲线平均半宽度为 0.128 1 nm,与理论值吻合良好。该系统不仅操作简单、结构紧凑且具有较高的定焦精度,也为光谱仪定标等后续工作提供了实验保障。

**关键词:**CO<sub>2</sub> 探测仪;光谱响应曲线;光谱带宽;精密装调;聚焦评价函数

**中图分类号:**TH744 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20150806.0942

## Fine optical focusing of 1610 nm channel of CO<sub>2</sub> spectrometer

ZHENG Cheng-chao<sup>1,2</sup>, LIN Chao<sup>1</sup>, WANG Long<sup>1</sup>, JI Zhen-hua<sup>1</sup>, ZHENG Yu-quan<sup>1\*</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn*

**Abstract:** In order to establish the best focal plane for the 1610nm channel of CO<sub>2</sub> spectrometer and install the HgCdTe detector accurately, the fine focusing system, which consists of tunable laser, integrating sphere, collimator and processing software, etc, is adopted in a assembly and adjusting method based on focus energy concentricity. The focusing evaluation function of the system is based on the full width at half maximum (FWHM) of instrument line shape(IIS). During the experiment, the orientation of the detector is adjusted search to the minimum value of the focusing evaluation function, and this minimum is as final evaluation basis of positive focal plane, and fine focusing works of the spectrometer is completed finally. The results show that the average value of FWHM of IIS is 0.128 1 nm, which coincides with the theoretical number. The focusing system is simple, compact and precise, which can provides experimental guarantee for the spectral calibration.

**Key words:** CO<sub>2</sub> spectrometer; IIS; FWHM; precise alignment; focus evaluation function

收稿日期:2015-06-26;修订日期:2015-07-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2010AA1221091001)

Supported by National High-tech R&D Program of China(No. 2010AA1221091001)

## 1 引言

二氧化碳等温室气体排放量的不断增加导致地球大气的温室效应加剧,引起的极端气候变化已经严重影响人类活动。美国和欧洲等国均开展了用于温室气体探测的红外星载高光谱技术的研究<sup>[1]</sup>,已有多颗温室气体探测卫星进入运行轨道并发挥作用。典型探测卫星包括 IASI、SCAM-ACHY、TANSO、OCO 及其后续星 OCO-2<sup>[2-4]</sup>。其中 NASA 于 2014 年 7 月发射的 OCO-2 代表了国际碳观测的最高水平。为了精确监测我国及全球 CO<sub>2</sub> 排放及变化状态,在国家 863 计划支持下,中国科学院长春光机所开展了高光谱与高空间分辨率 CO<sub>2</sub> 探测仪的研究工作,并计划于 2016 年实现在轨观测。

CO<sub>2</sub> 探测仪采用大气差分吸收光谱探测原理,即利用气体分子的窄带吸收光谱反演痕量气体的浓度。要保证 CO<sub>2</sub> 浓度的反演精度,就必须精确测定出温室气体的吸收谱线及其强度变化。其中接收该吸收谱线的面阵探测器的精准装调将是保证反演精度的关键。由于探测仪要应用于低温真空环境,在实验室环境下完成定焦后,需经过光学软件模拟计算真空环境下的焦面偏移量<sup>[5]</sup>,确定真空焦面位置后进行热真空实验,测得光谱响应函数,以光谱响应函数的光谱带宽对定焦结果加以验证。

常用的定焦方法包括切光瞳法<sup>[6]</sup>、自准直检焦法<sup>[7]</sup>及基于图像对比度的调焦法<sup>[8]</sup>。美国 OCO 探测仪采用切光瞳法来确定最佳焦平面,于光谱仪狭缝位置前设置一入瞳罩,罩上开一狭缝与光谱仪狭缝平行,通过移动入瞳罩使罩狭缝步进。若离焦,光斑将会随着入瞳罩移动,反之则不动。像移动的方向决定离焦的方向,移动的速率决定离焦的量度。自准直检焦法利用物像共轭原理,在焦平面处放置光栅,利用光源将光栅照亮,光栅经光学系统到达自准直反射镜返回,再经光学系统回到像面,使光栅在焦面附近成像。物像共面说明焦面准确,反之则需调焦。基于图像对比度的调焦法是建立在搜寻过程的调焦方法,对

采集到的多幅图像选择某一评价函数判断哪一幅处于最佳正焦位置。上述两种方法需用专用的调焦组件,结构较为复杂,本文综合考虑采用第三种方法,结合 CO<sub>2</sub> 探测仪光谱仪的成像特点,提出一种新的聚焦评价准则和一套适用的定焦系统。光源选择方面由于传统单色仪的波长准确度在  $\pm 0.05$  nm 左右<sup>[9]</sup>,精度较低且能量不够,该系统以可调谐激光器<sup>[10]</sup>作为光源,可同时提高精度和能量。系统以探测器接收到的狭缝像作质量评估<sup>[11]</sup>,对像质进行实时评价,具有操作灵活、结构简单、定焦精度高等特点。

## 2 原理及影响定焦精度因素分析

### 2.1 CO<sub>2</sub> 探测仪系统组成及工作原理

CO<sub>2</sub> 探测仪系统由指向反射镜、共用望远系统和 0.76、1.61、2.06  $\mu\text{m}$  三个通道光栅光谱仪组成。前置系统采用带有中间像面的无焦全反射式系统,光束经过该系统后口径缩小,再经分束器分光,穿过窄带滤波片获得波长范围的窄带平行光,由聚光镜聚焦在光谱仪狭缝上,经过狭缝的光由准直镜准直照射平面衍射光栅,一级衍射光经成像镜成像在探测器上,从而获得大气精细吸收光谱信息<sup>[12]</sup>。

分光系统是 CO<sub>2</sub> 探测仪的核心部分,直接决定着所得大气吸收光谱的准确度。与 OCO-2 光学系统结构类似,CO<sub>2</sub> 弱吸收红外波段 1 610 nm 通道光谱仪同样采用大面积衍射光栅分光,光学系统结构如图 1 所示。

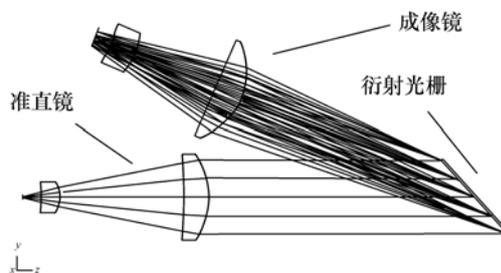


图 1 1 610 nm 通道光谱仪光学系统结构图

Fig. 1 Optical layout of 1 610 nm spectrometer

光谱仪由准直镜、平面闪耀光栅和成像镜组

成,共包括4块熔石英非球面透镜。探测器采用近红外 HgCdTe 面阵探测器,安装在成像系统焦平面上。该通道波段为 1.594 ~ 1.624  $\mu\text{m}$ ,光谱采样分辨率为 0.06 nm,光谱分辨率为 0.12 ~ 0.138 nm,色散谱面长度为 15 mm,空间方向为 7.2 mm。入射光轴与出射光轴的夹角为 23°。

探测器工作时,HgCdTe 面阵探测器记录光谱分布信息的方向记为光谱维;记录空间分布信息的方向记为空间维<sup>[13]</sup>。面阵探测器由一系列像元组成,像元输出信号由对应光谱内所有光信号强度累加所得,从而实现光电转换。由于大气二氧化碳含量变化在空间尺度变化缓慢,同时为了提高仪器信噪比,将探测器空间维采用12像元合并方法合并为20像元,如图2所示。调焦时以最终成像为检测对象并对像质进行实时评价。通过调整探测器的光谱维、空间维、俯仰、偏摆和离焦方向,进而确定最佳焦面位置。

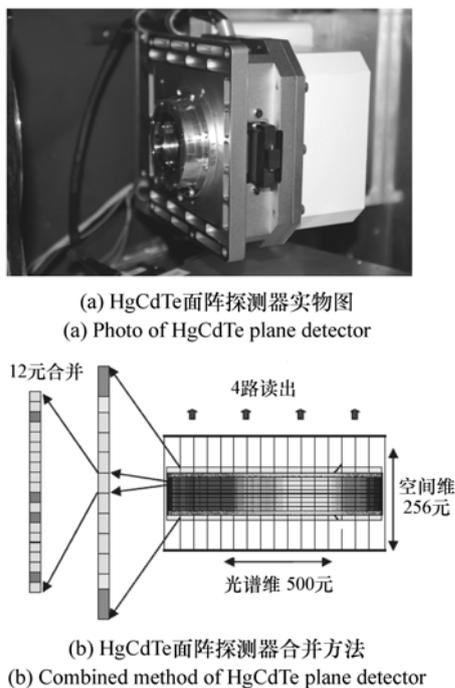


图2 HgCdTe 面阵探测器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of HgCdTe plane detector

## 2.2 光谱仪定焦原理

光谱仪的定焦是令面阵探测器的靶面与光谱仪的最佳色散焦平面重合,保证探测器接收到高质量的光谱响应信息。各通道的光谱响应信息是

各通道探测器输出与入射波长之间的关系<sup>[14]</sup>。光谱仪在第  $i$  个通道的输出信号可表示为:

$$X_i = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E_\lambda}{\pi} A \beta^2 \rho(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) S_s(\lambda) R_d(\lambda) R_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中,  $E_\lambda$  为太阳光在波长为  $\lambda$  处的辐照度;  $A$  为系统有效光学面积;  $\beta$  为系统的瞬时视场;  $\rho(\lambda)$  为地物光谱反射率;  $\tau_o(\lambda)$  为系统的光学系统透过率;  $\tau_a(\lambda)$  为大气光谱透过率;  $S_s(\lambda)$  为光谱仪色散系统的传递函数;  $R_d(\lambda)$  为探测器的光谱响应率;  $R_e(\lambda)$  为电子学系统增益。其中,  $E_\lambda$ 、 $\rho(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$  为与光谱仪系统无关的量,其它参数则是由系统决定,因此系统第  $i$  个通道的相对光谱响应函数  $S_i(\lambda)$  可表示为:

$$S_i(\lambda) = \tau_o(\lambda) S_s(\lambda) R_d(\lambda) R_e(\lambda). \quad (2)$$

单色光对系统的作用正比于狭缝单色像在探测器光敏面上所占的面积。狭缝宽度不同,系统接受的能量和光谱覆盖范围也不同。如探测器光敏面线度为  $a$ ,狭缝像宽度为  $l$ ,其  $S_s(\lambda)$  如图3所示。

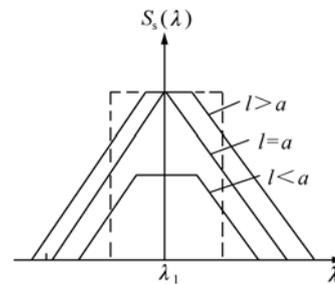


图3 不同狭缝像宽度下的光谱响应曲线

Fig. 3 Spectral response curve under different width of slit image

考虑到狭缝具有一定的宽度和  $\tau_o(\lambda)$ 、 $S_s(\lambda)$ 、 $R_d(\lambda)$ 、 $R_e(\lambda)$  等因素时,系统的光谱响应  $S_i(\lambda)$  通常可由高斯函数来模拟,即:

$$S_i(\lambda) = K \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_i}\right)^2\right], \quad (3)$$

该模拟高斯函数的全高半高宽即为系统的光谱分辨率  $\delta\lambda$ , 即:

$$\delta\lambda = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma_i, \quad (4)$$

式(3)、(4)中,  $K$  为常数;  $\lambda_i$  为该波段的中心波

长; $\sigma_i$  为高斯曲线的均方差。图 4 可以较好地表征系统第  $i$  波段的实际光谱响应的高斯拟合曲线,对其做归一化处理后两端响应 50% 的波长差作为光谱带宽  $\delta\lambda$ 。

探测器处于任何位置都有与之相对应的光谱带宽。当探测器处于焦平面位置时,光谱响应的半宽度存在最小值,以此可作为探测器是否正焦的依据。因此,选用像元光谱响应曲线的全高半宽度(FWHM)作为聚焦评价函数,其符合聚焦评价函数无偏性、单峰性、灵敏度高、较高信噪比、计算量小等 5 个特点。通过实时调整探测器方位,寻找该单峰评价函数的极小值,进而完成焦平面的确定。

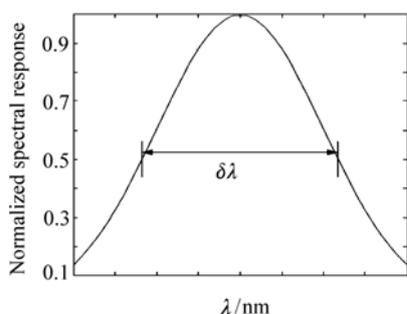


图 4 光谱响应的高斯拟合曲线

Fig. 4 Gauss fitting curve of spectral response

### 2.3 影响光谱仪定焦精度的因素

要保证 CO<sub>2</sub> 浓度 1 ~ 4 ppm 的反演精度,1 610 nm 通道的光谱分辨率要达到 0.12 ~ 0.138 nm 的指标。光谱仪的定焦精度可由光谱响应的光谱分辨率反映。其影响因素包括光源带宽、面阵探测器像元尺寸、闪耀光栅的参数与位置和色散系统的像差等。

对探测器进行标定时,要求标定光源的带宽要低于  $\delta\lambda/10$ ,该系统采用的 New Focus TLB-6700 可调谐激光器带宽可达 0.001 nm,完全满足定焦精度要求。

减小探测器像元尺寸可提高光谱分辨率,但制造工艺难度也增大。CO<sub>2</sub> 探测仪采用 HgCdTe 面阵红外探测器,像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$  × 30  $\mu\text{m}$ ,可保证分辨率精度要求。

光栅的入射角度和光栅刻线数都会对光谱分辨率产生影响,在符合分辨率指标前提下,设计光

栅入射角为 41.106°,光栅刻线密度为 969 g/mm。

光谱仪色散系统的像差(主要为离焦)同样会影响系统的光谱分辨率。假设由像差引起的弥散斑在波长坐标中的半径为  $\sigma_d$ ,则光学系统其点扩散函数可以由高斯曲线近似表示成:

$$h(\lambda) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_d}\right)^2\right]. \quad (5)$$

实际上系统的光谱响应函数为无像差时的响应函数与点扩散函数的卷积:

$$S(\lambda) = K \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_i}\right)^2\right] * \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_d}\right)^2\right]. \quad (6)$$

即

$$S(\lambda) = K \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma}\right)^2\right], \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \sigma_i^2 + \sigma_d^2. \quad (8)$$

可见像差的存在会使得光谱波段带宽变大,当  $\sigma_d = 1/3\sigma_i$  时, $\sigma$  增加 5.4%。只有保证上述各因素在合适范围内,才能使定焦精度达到 0.12 ~ 0.138 nm 指标。

## 3 CO<sub>2</sub>探测仪光谱仪定焦实验

根据 CO<sub>2</sub> 探测光谱仪的成像特点及定焦原理,本文研制了一套适用于 CO<sub>2</sub> 探测光谱仪的定焦系统。其原理如图 5 所示<sup>[15]</sup>。由于光谱仪定焦精度要求高,放置探测器主框架的大理石平台在进行实验之前需经过经纬仪水平标定,实验中成像镜位置与连接工装的六维调整架也需经纬仪监测微小晃动量。另外,实验前还需进行各镜组的定心装调和空气间隔检测、狭缝的研磨(为校正谱线弯曲,狭缝为弯曲狭缝)与安装以及平面闪耀光栅的精准装调。

系统由可调谐激光器、波长计、分束光纤、积分球、平行光管以及计算机组成。选用瞬时线宽极窄(<200 kHz)的可调谐激光器可提供良好的单色光源,在激光器后放置旋转毛玻璃消除激光散斑的影响。激光器发出的激光经过分束光纤传输一部分进入波长计,用来实时监测激光功率及波长的稳定性;而其余部分的光则照射在位于平

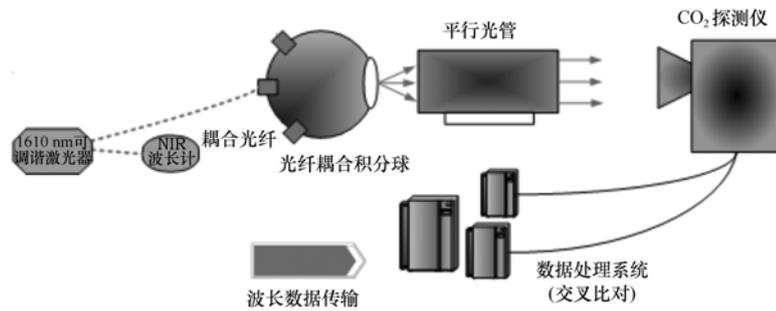


图 5 光谱仪定焦系统原理图

Fig. 5 Schematic of system establishing best focal plane of spectrometer

行光管前焦距上的积分球上,经积分球匀光后进入平行光管,然后经平行光管的扩束和准直使其均匀地充满探测器的入瞳。经过可调谐激光器每次扫描,探测器得到相应的光谱响应曲线。计算机用来进行数据的采集和处理。光谱仪定焦系统主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光谱仪定焦系统主要技术参数

Tab. 1 Parameters of system for establishing best focal plane of spectrometer

仪器	主要指标	数值
可调谐激光器	波长范围/nm	1 550 ~ 1 630
	波长调整精度/nm	0.01
	线宽/kHz	< 200
波长计	准确度/ppm	0.75
平行光管	焦距/mm	250
	口径/mm	100

基于 CO<sub>2</sub> 探测器光谱仪的工作原理和成像特点,自主设计开发了适用于该光谱仪的数据采集处理软件。图 6 为光谱仪定焦系统软件界面。在对光谱仪进行定焦的过程中,可以通过该软件观察不同波长的狭缝像实时图像(界面左上)、选择不同视场的输入界面(界面左下)、像元离散采样曲线(界面右下)。该软件对面阵探测器原始感光数据存储成 RAW 格式的二进制文件,利用 MATLAB 编程对该数据进行处理,得到拟合高斯光谱响应函数,进而计算得到准确的光谱分辨率。由全高半宽度信息反馈焦面调整方位并作为正焦的最终评价依据。

根据光谱仪定焦原理图搭建实验设备并调试

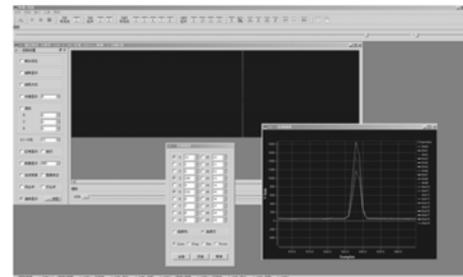


图 6 光谱仪定焦系统软件界面

Fig. 6 Data interface of system for establishing best focal plane for spectrometer



图 7 光谱仪定焦系统实物

Fig. 7 Photo of system for establishing best focal plane for spectrometer

系统至最佳工作状态,如图 7 所示。通过观察狭缝像在面阵探测器像面位置调整光谱维(上下端距离边界像元个数)与空间维(左右像元位置),以相同波长的不同视场(FOV)曲线位置调整俯仰方位,以不同波长(1 597、1 609、1 621 nm)的相同视场位置调整偏摆方位,以像元离散采样曲线全高半宽度为聚焦评价函数调整离焦方位。微调

六维调整架,通过千分表示数与离散采样曲线半宽度建立位移表搜寻最佳位置。对定焦结果进行数据处理,得到光谱响应曲线,通过 ILS 对定焦结果复核,反馈调整量,逐轮精调至最佳焦平面位置,经过人工修垫、打销固定后完成探测器的精密装调。

#### 4 CO<sub>2</sub>探测器光谱仪定焦实验结果

通过搭建实验平台以及软件处理,得到不同

波段的狭缝像以及像元 ILS 曲线。探测器空间维采用 12 像元合并方法合并为 20 像元,取 FOV = 3、10、17 三个视场方向。光谱维采样通道为 49、252、449,波长范围分别为 1 596.8 ~ 1 597.2 nm、1 609.3 ~ 1 609.7 nm、1 620.8 ~ 1 621.2 nm 三个波段。图 8 给出了 FOV = 10 时,三波段的狭缝像(对应中心波长)与 ILS 数据处理结果。具体定焦结果见表 2。

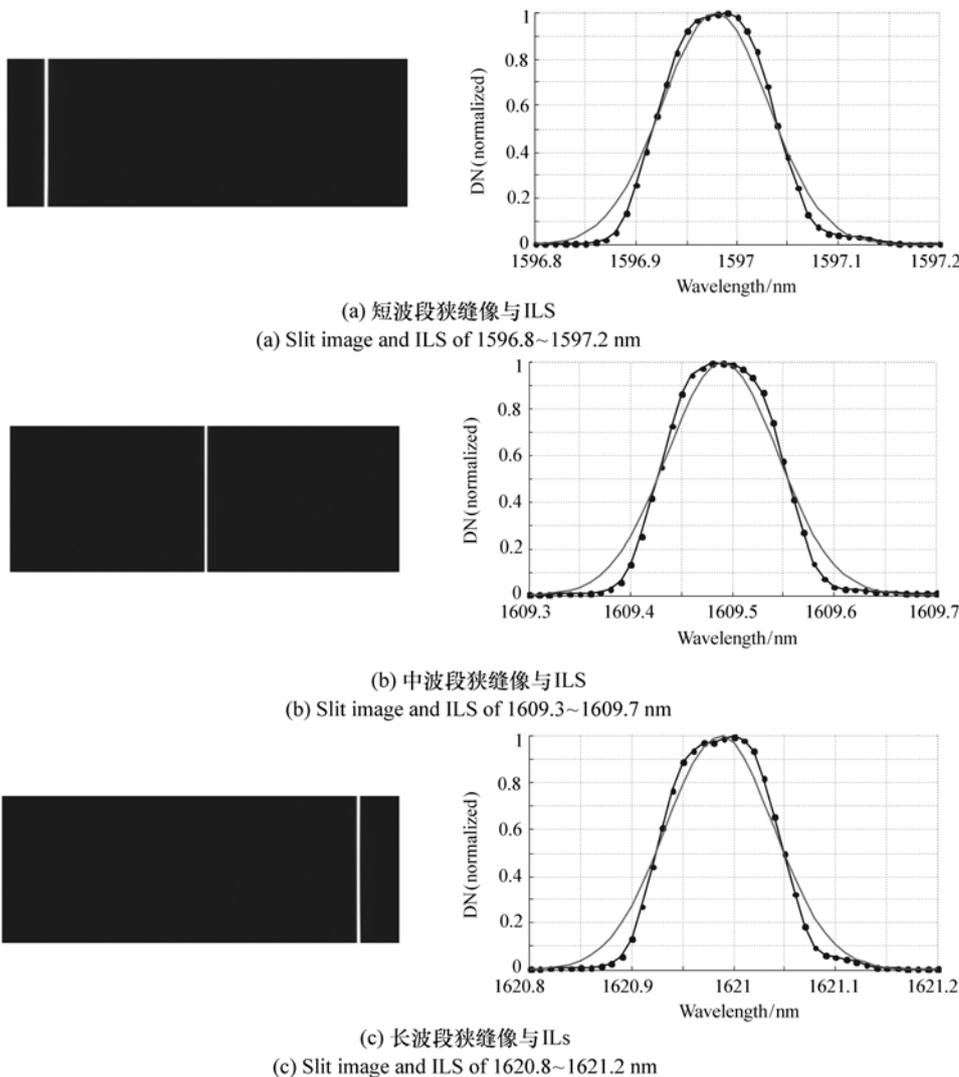


图 8 各波段狭缝像与 ILS 测量结果

Fig. 8 Slit image and ILS measurement of different wavebands

根据图 8 及表 2 可分析得出,通过狭缝像具体位置说明已修正平移与旋转方向。相同视场情

况下三波段线型与波段带宽基本一致,说明偏摆方向得以修正。相同波段下不同视场 FWHM 偏

差在 0.003 ~ 0.005 nm 左右,俯仰方向得以修正。围之内,平均半高宽 0.128 1 nm 与理论最小值相  
全波段全视场线型半高宽在 0.124 6 ~ 0.133 3 范 吻合,说明已修正离焦方向。

表 2 CO<sub>2</sub>探测光谱仪定焦结果Tab.2 Results of optical focusing of CO<sub>2</sub> spectrometer

波长范围/nm	视场	FWHM/nm	中心波长/nm	采样通道
1596.8 ~ 1597.2	FOV3	0.129 8	1 596.964	49
	FOV10	0.126 2	1 596.969	
	FOV17	0.124 6	1 596.979	
	偏差	0.005 2	0.015	
1609.3 ~ 1609.7	FOV3	0.133 3	1 609.486	252
	FOV10	0.129 9	1 609.489	
	FOV17	0.128 4	1 609.490	
	偏差	0.004 9	0.004	
1620.8 ~ 1621.2	FOV3	0.128 9	1 620.985	449
	FOV10	0.126 5	1 620.987	
	FOV17	0.125 6	1 620.981	
	偏差	0.003 3	0.006	

## 5 结 论

本文根据 CO<sub>2</sub>探测仪成像特点及工作原理设计了一套适用于 1 610 nm 通道光谱仪的定焦系统。实验结果表明:定焦后采集的光谱响应曲线平均半高宽为 0.128 1 nm,与预期理论值指标相吻合。系统以线宽极窄的可调谐激光器作为光

源,波长调整精度达到 0.01 nm。与传统单色仪相比,可调谐激光器具有较高的波长调整精度、能量集中度以及极窄的光谱带宽。但激光器波长不稳定和激光散斑的存在,使得该系统需增加消除散斑装置和激光能量监视器,导致该方法具有一定的局限性。综合比较该方法具有操作简单、结构紧凑且定焦精度高等优点,对其他类型的成像光谱仪的定焦装调具有一定指导借鉴意义。

## 参考文献:

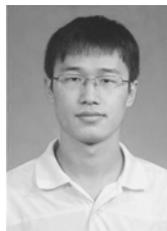
- [1] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 546-559.  
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-559. (in Chinese)
- [2] HENRI G C, CARINA O, ANNE E Z, *et al.*. SCIAMACHY the completion of a new-generation instrument for studying the atmosphere[J]. *SPIE*, 2011, 2957: 20-30.
- [3] KUZE A, URABE T, SUTO H, *et al.*. The instrument and the BBM test results of thermal and near infrared sensor for carbon observation(TANSO) on GOSAT. Infrared Space borne Remote Sensing[J]. *SPIE*, 2006, 6297: 62970K-1.
- [4] POLLOCK R, HARING R E, HOLDEN J R. The orbiting carbon observatory instrument: performance of the OCO instrument and plans for the OCO-2 instrument. sensors, systems and next-generation satellites XIV[J]. *SPIE*, 2010, 7826: 78260W.
- [5] 陈伟, 丁亚林, 惠守文, 等. 推扫式航空遥感器像面调焦机构设计[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 30-34.  
CHENG W, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Design of image plane focusing structure for push-scan aerial remote sensing instrument[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 30-34. (in Chinese)
- [6] CARL C L, RANDY P, BRETT H, *et al.*. System for establishing best focus for the Orbiting Carbon Observatory instrument

- [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(7):073605-4.
- [7] 张继超. 边缘视场检焦在航空遥感器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4):1038-1043.  
ZHANG J CH. Application of auto-focusing with margin field for airborne remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4):1038-1043. (in Chinese)
- [8] 黄厚田, 王德江, 沈宏海, 等. 航空成像系统检焦技术分析展望[J]. 中国光学, 2014, 7(4):543-551.  
HUANG H T, WANG D J, SHEN H H, *et al.*. Analysis and prospect of auto-focusing technique for the aerial camera[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4):543-551. (in Chinese)
- [9] 刘倩倩, 郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. 中国光学, 2012, 5(6):566-577.  
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):566-577. (in Chinese)
- [10] 高明辉, 郑玉权. CO<sub>2</sub>探测仪单通道光学系统设计验证方法[J]. 中国光学, 2014, 7(6):949-955.  
GAO M H, ZHENG Y Q. Validation method of single-channel optical system design of CO<sub>2</sub> detector[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6):949-955. (in Chinese)
- [11] 刘玉娟, 巴音贺希格, 崔继承, 等. 凸面光栅成像光谱仪的干涉法装调[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1736-1741.  
LIU Y J, BAYANHESHIG, CUI J CH, *et al.*. Interferometric alignment of imaging spectrometers with convex gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1736-1741. (in Chinese)
- [12] 郑玉权, 高志良. CO<sub>2</sub>探测仪光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12):2645-2652.  
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO<sub>2</sub> sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12):2645-2652. (in Chinese)
- [13] 赵敏杰, 司福祺, 江宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3):567-573.  
ZHAO M J, SI F Q, JIANG Y, *et al.*. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):567-573. (in Chinese)
- [14] 齐向东, 撒芄芄, 潘明忠, 等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12):2870-2875.  
QI X D, HAN P P, PAN M ZH, *et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2870-2875. (in Chinese)
- [15] JASON O D, CHRISTOPHER W O, RANDY P, *et al.*. Preflight spectral calibration of the orbiting carbon observatory [J]. *IEEE*, 2011, 49(7):2973-2801.

#### 作者简介:



郑成超(1989—),男,山东聊城人,硕士研究生,2013年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事高光谱遥感器光谱仪装调方面的研究。E-mail: h31179557@163.com



纪振华(1986—),男,黑龙江双鸭山人,硕士,研究实习员,主要从事空间遥感器设计、光谱辐射定标方面的研究。E-mail: jizhenhua001@126.com



蔺超(1984—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,助理研究员,主要从事光谱仪器结构设计及光谱定标方面的研究。E-mail: linchao@ciomp.ac.cn



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射测量与定标等方面的研究。E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn



王 龙(1985—),男,吉林磐石人,硕士,研究实习员,主要从事光谱仪器结构设计及光谱定标方面的研究。E-mail:wanglong\_jixie@163.com

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

**主要栏目:**微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址:<http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址:[chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn); [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061      传      真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)