

文章编号 1674-2915(2012)06-0566-12

超高分辨率光谱定标技术发展概况

刘倩倩^{1,2}, 郑玉权^{1*}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了高光谱分辨率光谱定标经常采用的几种技术手段,包括谱线灯法、单色准直光法、利用可调谐激光器和气体吸收池的方法等。通过对比几种国外高光谱分辨率大气痕量气体探测仪的光谱定标技术,阐述了不同光谱定标技术的原理、实施方法以及技术特点。针对大气痕量气体探测遥感器超高分辨率光谱定标的特点,指出定标设备的带宽应能达到0.001 nm的水平,同时还应考虑采取优化定标算法、结合多种光谱定标方法等措施来满足高光谱分辨率大气痕量气体探测仪光谱定标的要求。

关键词:痕量气体探测;高光谱分辨率;光谱定标

中图分类号:TP722.5; X831 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120506.0566

Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions

LIU Qian-qian^{1,2}, ZHENG Yu-quan^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
** Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn*

Abstract: Several kinds of spectral calibration technologies are introduced in detail, including the spectrum lamp spectral calibration, mono-chromator spectral calibration, tunable laser spectral calibration, and the gas cell spectral calibration. The experimental principle, experimental methods and technical characteristics of different spectral calibration technologies are described by analyzing and comparing foreign high spectral remote sensors for trace gases. Based on the characteristics of ultra-high resolution spectral calibration for atmospheric remote sensors, it points out that the bandwidth of calibration equipment should reach the level of 0.001 nm. It also suggests that the calibration method of improving optimization algorithm and comprehensive calibration methods should be considered to ensure the high spectral calibration accuracy of high spectral remote detectors for trace gases.

Key words: trace gas sensing; high spectral resolution; spectral calibration technology

收稿日期:2012-09-16; 修订日期:2012-11-12

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A102)

1 引言

20世纪50年代以来,随着科学、工农业技术的高速发展,二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)、氟氯烃化物(CFCS)等工农业生产以及人类生活所排放的气体量不断增加,造成全球气候变暖,温室效应日益加剧,从而生态系统受到严重破坏,甚至威胁人类的健康和生存。因此,精确监测全球温室气体的排放状况已成为全球各国气候研究的一个重要方向。欧美等航天发达国家都在积极开展温室气体探测遥感仪器的研制工作^[1],作为发展中国家的中国也正在着手发展自己的温室气体遥感系统来监测本国和世界其他国家温室气体的排放情况。

大气痕量分子光谱仪^[2](ATMOS)首次采用了高分辨率傅里叶变换型传感器监测大气痕量气体分子,使人类进入了太空观测大气的新时代。随着大面积光栅刻划技术、探测器探测能力以及图像处理水平等技术的进步,目前,温室气体探测遥感仪器的光谱分辨率越来越高,已经实现了高灵敏度、高空间分辨率温室气体探测,可精确监测大气中温室气体的含量。如美国国家航空航天局(NASA)于2009年发射失败的第一颗天基大气CO₂观测专用的轨道碳观测卫星^[3](Orbiting Carbon Observatory,OCO)及计划于2013年发射的后继星OCO-2,其CO₂测量精度均被预计为(1~2)×10⁻⁶。超高分辨率温室气体探测遥感技术利用了痕量气体诊断性光谱特征的“指纹区”—可

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

式中: E_λ 为太阳光在波长 λ 处的辐照度; β 为系统的瞬时视场; A 为系统的有效光学面积; $\rho(\lambda)$ 为地面的反射率; $\tau_a(\lambda)$ 为大气的光谱透过率; $\tau_o(\lambda)$ 为系统的光学效率; $S_s(\lambda)$ 为遥感器色散系统的传递函数; $R_d(\lambda)$ 为探测器的光谱响应率; $R_e(\lambda)$ 为电子学系统的光谱响应率; E_λ 、 $\rho(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$ 是与系统无关的量, β 和 A 为系统设计参量,而系统第 i 个通道的相对光谱响应函数表示为:

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

考虑到实际应用中的光学效率 $\tau_o(\lambda)$,遥感

见近红外和红外光谱区,通过探测器在光谱维的光谱通道展开得到高精度光谱遥感数据,进而精确反演在大气中探测到的温室气体的含量信息^[4]。

光谱辐射定标是高光谱分辨率温室气体探测遥感仪器精确量化应用的基础,其中光谱定标是辐射定标的前提和保证。光谱定标的主要任务是确定各光谱通道的中心波长位置和通过特性(半宽度和光谱响应函数),并以标准光谱信号为基准,监测仪器在轨工作状态下各通道的波长位置及光谱稳定性,校正波长偏移,并测定光谱响应函数^[5]。光谱定标可以确定遥感器系统光谱特性指标,进而为提高仪器本身可信度提供重要依据。因此为了保证超高分辨率温室气体探测遥感器能够高精度反演大气中温室气体含量及其变化,发射前和在轨时都要对仪器进行光谱定标,以监测各光谱通道的中心波长和带宽变化情况^[6]。本文论述了当前高光谱分辨率温室气体遥感器主要采用的光谱定标技术,并且在对比几种国外高光谱分辨率大气痕量气体探测仪光谱定标技术的基础上,阐述了不同光谱定标技术的原理、实施方法以及技术特点,并展望了未来超高分辨率光谱定标技术的发展。

2 超高分辨率光谱定标技术发展概况

对于具有 N 个通道的高光谱遥感器来说,第 i 个通道的输出为^[7]:

器色散系统的传递函数 $S_s(\lambda)$ 、探测器的光谱响应率 $R_e(\lambda)$ 和电子学系统的光谱响应率 $E_e(\lambda)$ 的影响,系统的光谱响应 S_i 通常可由高斯函数来表征^[7]:

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

高斯函数的半高宽 a 即为系统的光谱分辨率 $\delta\lambda$:

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

通过抽样测量第 i 个波段内数个点的光谱响

应,利用光谱定标装置的标定数据,经过数据处理就可获得超光谱成像的光谱响应度曲线。图1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,做归一化处理两端响应50%的波长差作为光谱带宽 $\delta\lambda$,拟合的高斯相对光谱响应度曲线最大值对应的位置即为谱段的中心波长 $\lambda_c(i)$ 。

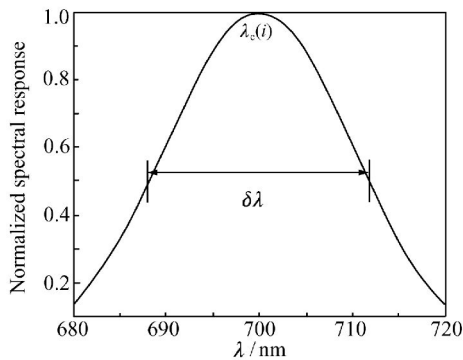


图1 光谱响应的高斯拟合曲线

Fig. 1 Gauss fitting curve of spectral response

通过光谱定标可以得到系统各通道的光谱响应曲线、中心波长以及光谱分辨率(半高宽)等参数。这些参数可以用来表征高光谱遥感器的光谱探测能力。只有在精确标定了探测器光谱特性(中心波长和半高宽等参数)的前提下,才能保证遥感器准确测量到气体分子的吸收光谱,实现气体含量的精确反演。

图2为探测器典型的相对光谱响应度曲线,其中相对光谱响应度曲线最大值对应的位置即为该谱段的中心波长 $\lambda_c(i)$,光谱取样间隔 $\Delta\lambda$ 是指相邻通道的中心波长之差,光谱分辨率即为光谱带宽 $\delta\lambda$ 。图3为光谱定标数据立方体及光谱响应曲线。

目前高光谱遥感器常用的光谱定标方法主要有谱线灯定标法、单色准直光定标法、可调谐激光器定标法和基于大气分子特征吸收谱线的气体吸收池定标法等。

2.1 采用谱线灯的光谱定标技术

元素光谱灯是指能够发出特定波长光谱的各种不同气体或金属蒸汽的蒸汽放电灯,其准确的谱线信息可以根据美国国家标准技术研究院(NIST)的元素光谱灯发射线数据库查到。根据遥感仪器的探测波段,选择在该波段内至少拥有

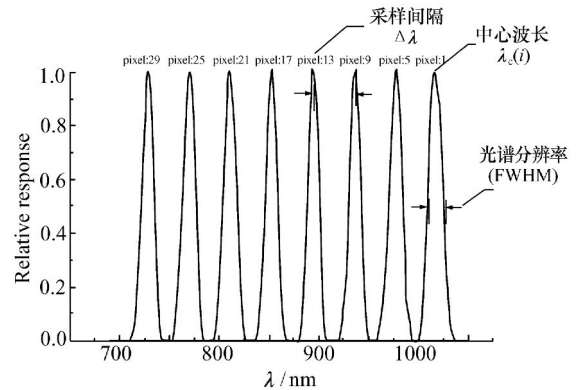


图2 光谱响应度曲线及光谱参数定义

Fig. 2 Spectral response curves and define illustration of spectral parameters

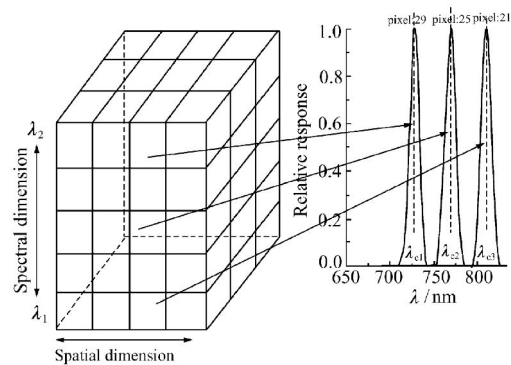


图3 光谱定标数据立方体及光谱响应曲线

Fig. 3 Data cube of spectral calibration and spectral response curves

两条以上发射谱线的元素光谱灯进行光谱定标。实验中主要用到的定标仪器包括谱线灯、漫射板(漫透射板或漫反射板)以及计算机等,如图4所

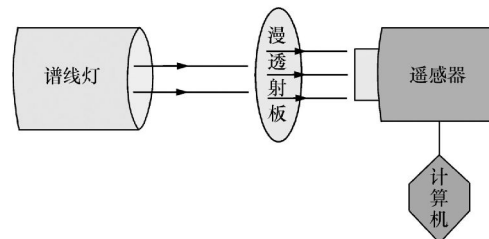


图4 谱线灯光谱定标装置图

Fig. 4 Diagram of spectrum lamp spectral calibration setup

示。实验装置中把漫透射板放在谱线灯和待标定仪器之间,以保证谱线灯发出的光能均匀地充满遥感器的入瞳。

采用光谱灯进行光谱定标时,首先点燃谱线灯使之稳定十几分钟后再进行测量。通过光谱定标灯提供的若干条已知波长的谱线照射,遥感器的 CCD 探测器会输出“像元序号—响应信号”光谱图,并通过计算机对测量数据进行记录并处理谱线灯光谱定标输出数据。数据处理主要包括数据的预处理、寻峰、峰位-波长配对以及回归分析。在对输出数据进行暗信号校正等预处理后,通过寻峰处理找到光谱灯谱线对应的 CCD 像元序号,包括峰的提取、筛选与定位,然后将峰位和波长进行配对,最后采用数理统计中的回归分析找出像元序号与波长之间合适的相关关系函数表达式,建立光谱 CCD 像元位置与其波长值关系的多项式定标函数,得到仪器的光谱定标方程^[8],从而完成像元中心波长的定标。式(5)即为用 i 阶勒让德正交多项式表示光谱 CCD 像元位置与其波长值关系的定标函数。

$$f(x) = \sum_{i=0}^n C_i f_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

式中: C_i 为第 i 阶勒让德多项式系数项; x 为 CCD 像素位置; $f_i(x)$ 是第 i 阶勒让德多项式项; $f(x)$ 对应于像素位置 x 的定标波长。

光谱定标要求所选择的谱线灯能够发射出待定标仪器波长范围内的谱线,且谱线数量足够、分布均匀;谱线的波长不确定度小,带宽小于待定标仪器的带宽的 $1/10$;谱线的强度足够,且相差不

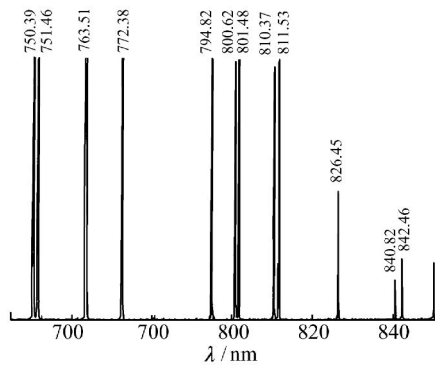


图5 氩灯发出的特征谱线

Fig. 5 Typical line output of 6030 argon lamp

大;能够通过调整仪器积分时间使探测器既不饱和,又具有较高的信噪比。图5显示了 ORIEL 提供的氩灯光谱谱线图。

大气痕量气体扫描成像光谱仪^[9] (The SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHarto-graphY, SCIAMACHY) 用于探测大气中的主要痕量气体 (H_2O 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CO) 的分布, SCIAMACHY^[10] 具有 8 个光谱通道,包括第 1~4 通道的紫外光谱区和第 5~8 通道的近红外光谱区,其中第 7 光谱通道 ($1.940 \sim 2.040 \mu m$) 的光谱分辨率可以达到 0.2 nm 。

SCIAMACHY 内置空心阴极谱线灯用于星上光谱辐射定标。发射前首先在实验室采用外置光谱灯与内置空心阴极灯对探测器像元中心波长定标结果进行比较校准^[10]。实验结果表明,内置光谱灯光谱定标时会受到仪器内部其他光路系统的遮挡,使得使用内置谱线灯标定中心波长的位置与采用外置光谱灯标定中心波长的位置偏移 0.07 nm ,通过比较两次光谱定标的谱线线形对内置光源定标结果数据表进行校正。SCIAMACHY 在轨进行谱线灯星上光谱定标时,将其作为不确定因素,并且通过 Falk^[11] 算法得到谱线的像元位置,最后根据实际与理论计算谱线位置拟合推演各谱段准确的中心波长,从而精确监测探测器中心波长的稳定性。

谱线灯定标法是采用物质标准谱线法^[12] 进行光谱定标的一种快速而方便的方法。掺杂稀土元素的特征谱线法与之类似,也是一种为多数遥感器常用的星上光谱辐射定标方法。

2000 年发射的 EO-1 上的高光谱成像仪载荷 Hyperion^[13] 就采用了掺杂漫反射板法标定探测器像元的中心波长。利用掺杂稀土元素的特征谱线进行光谱定标时,首先使光源照射到一块光谱反射比基本为 100% 的聚四氟乙烯板上,该板反射的辐射充满探测器的视场并记录下数据。然后,将该聚四氟乙烯板移开并用一块掺有一种稀土元素的聚四氟乙烯板取代,两帧数据对应的比值去除了探测器光谱响应和光源光谱输出的影响,再将测得的比值去除系统的参数模型的影响,最后与掺有稀土元素平板的光谱曲线做最小方差拟合,便可以得到探测器每个像元的中心波长值。

中光谱分辨率成像光谱仪^[14] (Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS) 也利用该方法对在轨时探测器的光谱特性进行监测校正。

谱线灯光谱定标法具有结构简单,易操作的优点。目前大部分高分辨率温室气体探测遥感器都选用谱线灯用于星上光谱辐射定标。例如便携式弱光成像光谱仪 (PHILLS)^[15]、高分辨率成像光谱仪 (HRIS)^[16]、SCIAMACHY^[17] 等仪器在轨运行中都利用了具有相应的定标灯进行光谱定标,监测探测器工作状态下光谱特性的稳定性。

利用谱线灯光谱定标会存在一些不确定的因素:例如 NIST 所给出波长的不确定度,定标灯的稳定性,采用算法的不确定度,谱峰定位的不确定度以及回归过程的不确定度等;同时定标灯谱线的带宽与当前高分辨率温室气体探测遥感器探测器的光谱带宽相比较宽。这些因素都限制了该技术在高分辨率光谱定标方面的应用。

2.2 单色仪 + 平行光管的光谱定标技术

单色准直光定标法是利用连续输出的单色准直光作为定标光源对仪器的光谱响应进行标定的光谱定标方法。该方法可同时实现宽光谱范围的中心波长和光谱分辨率的标定,具有定标精度高、实用性强的优点,而且弥补了传统标准谱线定标方法不能对光谱带宽进行准确标定的不足。

采用单色仪对遥感器进行光谱定标时,通常是将宽带光源发出的光耦合进单色仪中,经过平行光管产生单色平行光进入待标定遥感器的入瞳中,进而标定仪器每个像元的中心波长和光谱响应函数。图 6 为单色仪光谱定标的基本原理图。



图 6 单色仪光谱定标基本原理图

Fig. 6 Basic schematic diagram of monochromator spectral calibration

单色仪光谱定标步骤最早由 Grgg Vane^[18] 教授提出,并在机载可见红外成像光谱仪 (AVIRIS)^[19] 后续定标过程中对部分环节进行了改进,其定标基本步骤被中分辨率成像光谱仪 (MODIS)^[20]、紧凑型机载光谱遥感器 (COM-

PASS)^[21] 等大部分色散型光谱成像仪以及 SCIAMACHY^[10] 采用。图 7 显示了 AVIRIS 光谱定标系统框图^[19]。

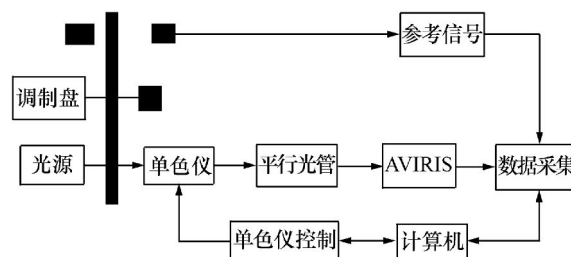


图 7 AVIRIS 单色仪光谱定标系统框图

Fig. 7 Diagram of spectral calibration system for AVIRIS monochromator

AVIRIS 光谱定标系统主要由卤钨灯光源、Jarrell-Ash 生产的 82-487 型单色仪、单色仪控制器、平行光管以及计算机组成^[18]。实验中把卤钨灯放置单色仪入口处,调整单色仪出入口尺寸并放置于平行光管的前焦面上,调节平行光管,使其充满仪器入瞳。接着通过单色仪控制器以 1 nm 为步长调节单色仪,选择数个光谱谱段,计算机采集定标数据记录下仪器特定光谱谱段的响应输出值,画出某个光谱谱段波长与响应输出值之间的关系图,从而确定段中心波长位置和半高宽度,然后画出谱段与相应中心波长值的关系图^[18]。最后用最小二乘法拟合的方法推测其他未测谱段的中心波长。AVIRIS 光谱定标的最大偏差为 2.1 nm。

在发射前,为了保证 SCIAMACHY 仪器本身的可靠性,利用单色准直光在真空罐中对探测器的光谱特性进行标定。其中针对 SCIAMACHY^[13] 探测器的谱段范围选择 240 ~ 700 nm 氙气灯和 400 ~ 2 400 nm 卤素灯作为光源;单色仪的光谱为 240 ~ 2 400 nm,在 $\lambda = 300$ nm 带宽, $\Delta\lambda \geq 1$ nm,在 $\lambda = 600$ nm 带宽, $\Delta\lambda \geq 10$ nm (单色仪已校准,内部杂散光影响可以忽略);采用类似 AVIRIS 光谱定标方案及数据处理方法完成对探测器各光谱谱段的中心波长和半高宽的标定^[14]。由于 SCIAMACHY 三个分光光栅对入射光的偏振态非常灵敏,所以同时利用单色仪发出具有一定极化方向的单色偏振准直光对仪器进行偏振态修正^[22]。

单色准直光光谱定标法可以实现同时高精度

标定宽光谱范围的中心波长和光谱分辨率。但是由于单色仪出缝造成出射单色平行光不均匀会对定标结果产生 1 nm 的影响。继 AVIRIS 之后,很多高光谱分辨率遥感器在采用单色准直进行光谱定标时均采取一定措施对单色仪出射光进行匀光,例如 COMPASS^[23] 在单色仪之后采用积分球进行匀光。但是经过匀光后的信号会变弱,而目前的大面阵探测器谱响应度和探测器图像处理水平有限,这些因素都会对高分辨率光谱定标造成一定困难。

在采用单色准直光对探测器进行光谱定标时,要求单色仪的波长准确度达到 $\delta\lambda/10$ ($\delta\lambda$ 为探测器的光谱分辨率),标定单色仪的带宽要低于 $\delta\lambda/10$ 。随着大气温室气体空间探测遥感技术的发展,对于光谱分辨率高达 0.04 nm 的温室气体探测仪器来说,光谱定标是一个关键。若要实现对高光谱分辨率温室气体探测器相对光谱响应度的标定,所采用的标定单色仪波长准确度要达 0.004 nm 以上,带宽要低于 0.004 nm。而目前定标单色仪的波长准确度在 ± 0.05 nm^[24],美国 MODEL2062 2-m 单色仪配备 2 400 lp/mm 的光栅能提高至 0.003 nm 的光谱分辨率。因此,采用单色仪不能精确标定高光谱分辨率温室气体探测器的中心波长,但是可以对探测器带宽定标。

利用单色仪对高光谱分辨率遥感器带宽定标时,定标装置输出单色准直光,如图 6 所示。分别用已知相对光谱响应度的光谱辐射计和待标定遥感器对单色准直光观测,根据二者的输出信号比值和光谱辐射计的相对光谱响应度就可以确定出探测器每个谱段的相对光谱响应度曲线。

标定时,通过单色仪的扫描,读出遥感器的输出信号 $V_s(\lambda)$,然后用一个已知相对光谱响应度 $S(\lambda)$ 的参考探测器取代待标定遥感器,重复上述操作,获得参考探测器的输出 $V(\lambda)$,则待标定遥感探测器相对光谱响应度 $S_s(\lambda)$ 可用下式计算:

$$S_s(\lambda) = S(\lambda) \cdot \frac{V_s(\lambda)}{V(\lambda)}. \quad (6)$$

再对 $S_s(\lambda)$ 作归一化处理,可以得出相对光谱响应度曲线,从而得到探测器的半宽度、中心波长等参数。

2.3 可调谐激光器的光谱定标技术

随着与波长调制技术相结合的可调谐激光器技术的发展,可调谐激光器在高分辨率光谱定标领域得到了广泛应用。可调谐激光器具有在连续调谐范围内进行窄线宽扫描的特点^[25],例如目前市面可以买到绝对波长精度 < 5 pm,波长分辨率为 1 pm 的可调谐激光光源。光谱定标时,使可调谐激光器在一定范围内连续改变输出激光的波长,根据探测器在特定光谱谱段的响应输出值,利用相应数据处理算法对定标数据进行分析处理,完成光谱定标工作。

采用可调谐激光器进行超高分辨率光谱定标时主要用到的实验仪器有可调谐激光器、波长计、平行光管以及积分球等。在保证仪器系统参数不变的情况,针对系统带宽把激光器的波长调谐到待标仪器波长范围内的特定波长,等待激光器发出的激光达到稳定状态,然后调节激光器输出不同波长值,最后通过采集多幅光谱图完成光谱定标。

NASA 的第一颗天基大气 CO₂ 观测专用卫星 OCO^[26] 主要由 3 个通道光栅光谱仪组成: 0.757 ~ 0.772 μm (O₂ 的吸收波段); 1.590 ~ 1.621 μm (CO₂ 的弱吸收波段) 和 2.041 ~ 2.082 μm (CO₂ 的强吸收波段)。在 O₂ 的吸收波段光谱分辨率可以达到 0.04 nm,CO₂ 气体理论监测精度可以达 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ ^[27]。

实验室对 OCO 的光谱特性进行标定时选择采用对应光谱通道的 3 个瞬时线宽均小于 1 mHz 可调谐二极管激光器,并在激光器后放置旋转的毛玻璃消除激光散斑影响。激光器发出的激光经过光纤传输一部分进入波长计用来实时监测激光的波长,而其余部分的光则照射在位于平行光管前焦距上的积分球上,经过积分球进行匀光之后的激光经过平行光管均匀地充满真空罐内探测器的入瞳。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。OCO 采用的可调谐激光器定标装置,如图 8 所示。

激光的光强可以通过探测器在任何时间内的采样叠加得到,并通过对采集到的信号在采样时间内进行平均,从而消除激光信号浮动对采集信号的影响,提高了仪器的信噪比。实验中可以通过激光扫描得到部分像元的光谱响应函数,然后

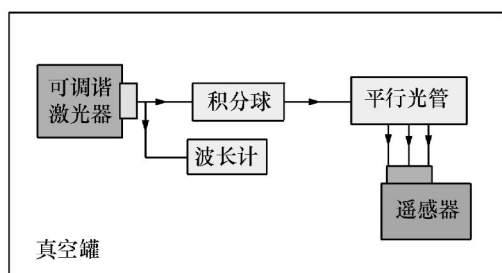


图8 可调谐激光器光谱定标装置图

Fig. 8 Diagram of tunable laser spectral calibration setup

根据各像元之间光谱响应函数的规律性变化确定所有像元的光谱特征参数^[28]。

可调谐二极管激光器通过把扫描激光的中心波长的半高宽又分成 19 小段(19 小段扫描波长又分 30、60、90 甚至更小段),然后对 OCO 探测器的某个波段进行扫描^[29]。激光器每次扫描时,探测器都会有几十个像元得到完整的响应函数曲线(记录了每个像元响应函数中 30、60 或 90 个波长点的信息)。在处理定标数据时,首先假设这一系列响应像元的平均光谱响应代表这一系列中间响应像元的光谱响应;其次假设可以用一个合适的多项式曲线描述各个像元光谱响应之间的关系。这样可以确定每次扫描时中间响应像元的光谱响应函数,然后对其光谱响应函数进行高斯拟合便可以确定中间响应像元的中心波长。实验结果表明,每次扫描时响应的这几十个像元的中心波长与像元序号近似成线性关系,所以可以通过中间像元的中心波长值以及简单的多项式线性关系描述其他响应像元的中心波长。通过高斯拟合得到的每个像元的中心波长能够简单地说明仪器在光谱维的光谱响应特性。

图 9 表明某一次扫描时响应像元中心波长的三次拟合关系使残差最小。

确定 OCO 探测器中间响应像元的光谱响应函数曲线时,首先在中间响应像元左右取 160 个 $\Delta\lambda$ 分段点进行采样,图 10(b)中垂直线代表某个波段预先设定好的 $\Delta\lambda$ 分段点。通过在每个预先设定好的 $\Delta\lambda$ 插入合适的光谱响应函数,建立一个查找表描述 $\Delta\lambda$ 采样点的光谱响应函数;然后用一个合适的三次多项式对 $\Delta\lambda$ 分段采样点处的

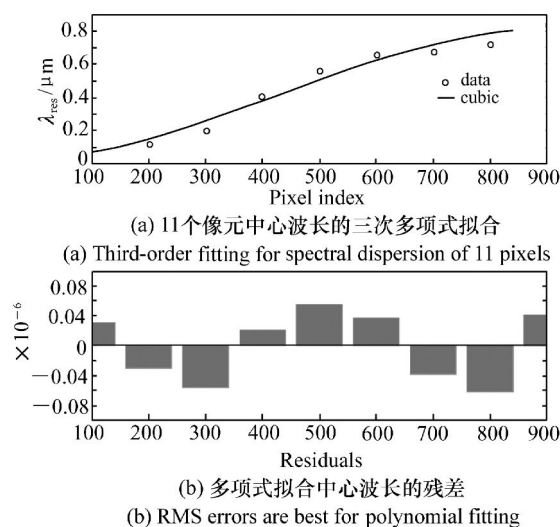


图9 像元中心波长的多项式拟合过程

Fig. 9 Polynomial fitting process of spectral dispersion

光谱响应函数进行拟合,归一化得到扫描时响应像元的光谱响应函数轮廓表;最后通过对响应像元的光谱响应函数平均归一化得到每次扫描时中间像元光谱响应函数曲线。通过对激光器的 19 次依次扫描重复以上处理过程,就得到每次扫描过程中所有中间像元的光谱响应函数曲线。

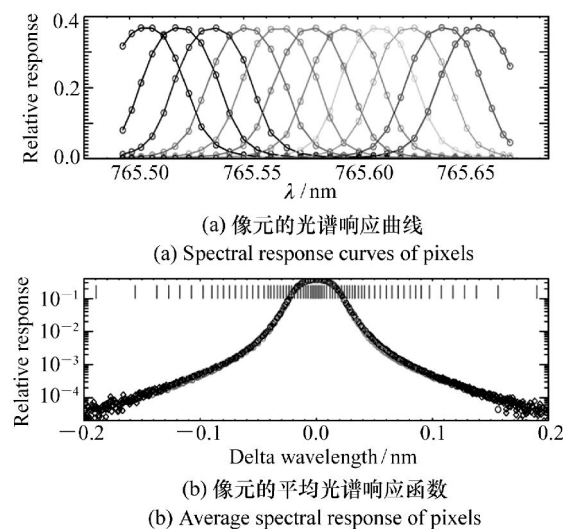


图10 一次扫描过程中 11 个像元的光谱响应曲线和函数

Fig. 10 Spectral response curves and functions of 11 pixels in scanning

为了确定 OCO 探测器所有像元的光谱响应函数,通过分别找到一个多项式描述预先设置好

的 160 个 $\Delta\lambda$ 分段点作为像元的序列号函数。由于扫描过程中可能不包含光谱谱段边缘处的像元光谱响应变化信息,因此在波段边缘处像元的光谱响应函数不能用光滑多项式拟合。所有 $\Delta\lambda$ 分段点用多项式拟合后,再次对每个像元光谱响应函数进行归一化,就得到每个像元以 $\Delta\lambda$ 分段点的光谱响应函数曲线。图 11 显示某次扫描时边缘像元和中间像元的光谱响应曲线,实验结果表明边缘像元的光谱响应曲线可能不是所希望的对称线形。

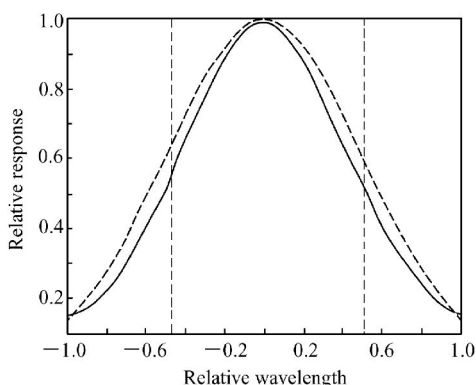


图 11 像元的响应函数(实线代表扫描中间像元的响应,虚线代表边缘像元的响应)^[28]

Fig. 11 Pixel response profiles derived from the tunable diode-laser data (the core pixel (solid), the wing pixel (dash))

为了确保 OCO 探测器光谱定标的准确度,OCO 还采用已经标定的超高光谱分辨率地面凝视型 FTS 进行交叉定标,通过比对两者对太阳光谱的响应曲线,对可调谐激光器光谱定标结果进行优化,提高了仪器的定标精度。

可调谐激光器可以窄线宽扫描,所以与单色准直光相比可调谐激光器光谱定标法可以实现更高精度中心波长和更高光谱分辨率的标定,但是采用可调谐激光器进行光谱定标时,在探测器的光谱范围内不能同时得到多条谱线、一次性完成定标工作,另外激光器波长不稳定等随机因素也会对定标结果造成一定的影响。

2.4 气体吸收池的光谱定标技术

气体吸收池法作为目前超高分辨率温室气体探测遥感器经常采用的光谱定标方法之一,它是基于大气分子特征吸收谱线,具有高精度的一种

超高分辨率光谱定标方法。由于气体分子吸收线极其狭窄,远小于探测器的光谱分辨率,而且气体分子吸收光谱资料很容易通过有关数据库获取,利用气体分子吸收光谱数据库中相关气体吸收谱线信息可以精确标定探测器各个谱段的中心波长。温室气体探测器 TANSO-FTS (Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation)^[30] 采用气体吸收池法实现精确标定探测器的光谱特性。

气体吸收池光谱定标法需要采用的定标装置包括光源、平行光管和气体池等。光谱定标过程中,光源发出的光经过平行光管准直为一束平行光,然后平行光从入射光口耦合进入气体吸收池中,光经过具有一定光程吸收池内部气体的吸收,最后从气体池出射光口出射的光变为带有定标气体特征吸收谱线的平行光。出射平行光被探测器所接收得到一个光谱响应曲线,然后根据已知的气体分子吸收库的数据(例如 HITRAN 数据库等),通过模拟计算出吸收谱线。把通过模拟计算出吸收谱线与实际测量得到的光谱曲线进行匹配,确定探测器的中心波长,实现超高分辨率光谱定标。气体吸收池光谱定标法的实验装置如图 12

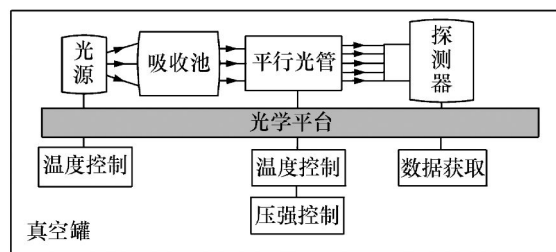


图 12 气体池光谱定标装置图

Fig. 12 Diagram of gas cell spectral calibration setup

所示,图 13 为模拟计算的吸收谱线与实验测量光谱曲线进行匹配实现对象像中心波长的精确标定。

实验过程中须测量同样外界条件下充气 and 真空状态的仪器的光谱响应曲线(或者测量同样外界条件下入气口和出气口的仪器的光谱响应曲线),最后将气体(出气口)实验的结果除以真空(入气口)实验的结果,即为气体本身的吸收光谱,如图 14 所示。根据定标气体吸收线在仪器探测谱段内吸收强度以及仪器本身的信噪比、环境影响等因素,选择吸收池的光程对实现探测器高

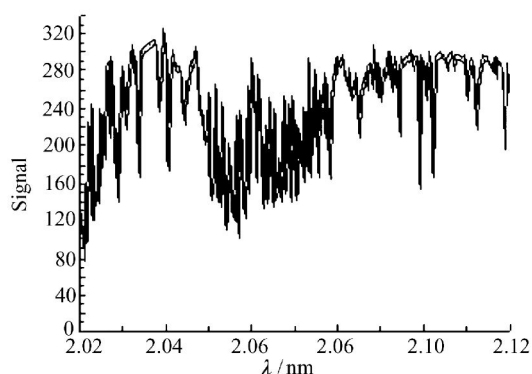


图 13 模拟计算吸收谱线与实验测量光谱曲线的匹配

Fig. 13 Match of simulated spectral absorption lines with experimental curve

分辨率光谱定标,减小定标误差尤为重要。采用气体吸收池光谱定标方法所能达到的理论定标精度很高,实验中通过采取降低气体分压比、稳定定标环境(特别是气流影响)、严格控制温度等措施可以提高实际定标精度^[31]。

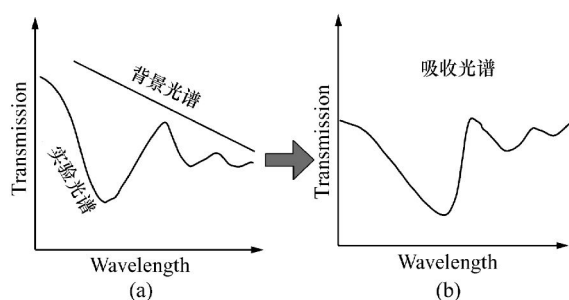


图 14 获得的气体吸收谱线

Fig. 14 Acquired gas absorption lines

TANSO-FTS 用于精确监测大气中 CO_2 和 CH_4 含量,由 4 个傅里叶型光谱仪组成。4 个光谱仪的光谱分别为: $0.758 \sim 0.775 \mu\text{m}$ (O_2 的吸收波段), $1.562 \sim 1.724 \mu\text{m}$ (CO_2 、 CH_4 的吸收波段); $1.923 \sim 2.083 \mu\text{m}$ (CO_2 强的吸收波段); $5.556 \sim 14.286 \mu\text{m}$ (CO_2 、 CH_4 、 O_3 的吸收波段),其中 O_2 吸收谱段的光谱分辨率高达 0.04 nm ^[32]。

实验室在标定 TANSO-FTS 中心波长时首先采用了 $1.31 \mu\text{m}$ 激光器^[33],但考虑到激光器波长不稳定等随机因素对定标结果的影响,同时采用气体吸收池光谱定标法对激光器标定的 TANSO-FTS 各谱段中心波长的结果进行校准。采用气体

池对 TANSO-FTS 进行光谱定标实验中选用孔径为 130 mm ,池体长为 1 m ,光学路径长为 3 m 的气体池。通过流量计控制池内的压力稳定在标准气压下,把气体池放置于热辐射光源和 TANSO-FTS 探测器之间,利用气体池模拟大气吸收过程进行测试^[34],如图 15 所示。



图 15 TANSO-FTS 采用气体池模拟大气吸收过程^[33]

Fig. 15 Simulation of atmospheric absorption process using gas cell^[35] for TANSO-FTS

图 16 显示利用模拟气体池模拟大气吸收过

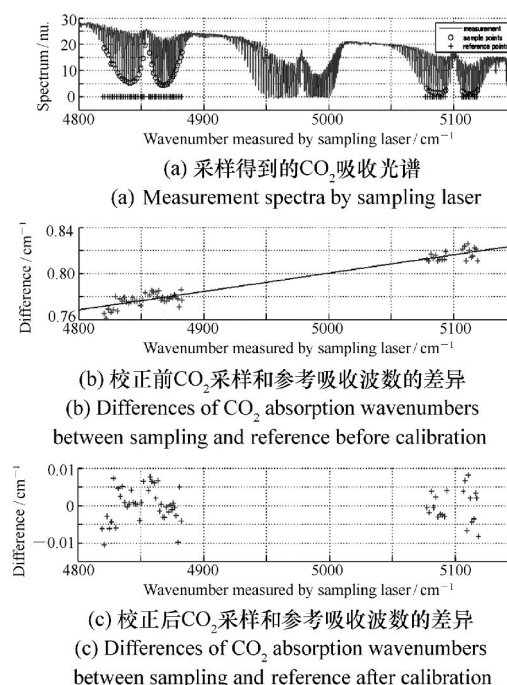


图 16 CO_2 吸收池方法的光谱定标结果^[33]

Fig. 16 Spectral calibration by CO_2 cell measurement

程对 TANSO-FTS 探测器进行光谱定标的实验结果。实验中通过选择气体池内气体的至少 50 条

吸收线计算出 CO_2 采样吸收波数和参考吸收波数的差异,准确标定出激光器发出激光的波长。通过气体吸收池实验校正后,对 TANSO-FTS 探测器光谱定标结果精度达到已标定激光光谱采样 (0.2 cm^{-1}) 的 2%^[35]。同时利用吸收池质量流量调整控制阀控制吸收池内 CO_2 的浓度在 0% ~ 100% 内变化,可以测定仪器响应与浓度变化的线性关系。

SCIAMACHY 探测器进行光谱特性标定时,第 7 通道采集到的双线信息会妨碍定标有效性,而第 8 通道坏像元则造成全通道中心波长位置偏移从而影响定标结果准确性。实验中单独针对这两个特殊通道采用气体吸收池模拟大气吸收过程进行光谱定标^[36]。光谱定标数据表明 SCIAMACHY 波长稳定性达 0.003 nm ^[15]。

3 超高分辨率光谱定标技术发展趋势

物质特征谱线光谱定标法在中心波长和光谱带宽确定上不如采用单色准直光的光谱定标方法准确,但比较容易实现;单色准直光定标法虽然可以实现宽光谱范围高精度的定标,但是受到单色仪本身标定准确度以及实验中其他不确定因素的影响,限制了定标精度的进一步提高;而可调谐激光器发出的激光不稳定性也成为基于可调谐激光

器的高分辨率光谱定标的瓶颈;采用气体池实现超高分辨率光谱定标的方法虽然理论上可以达到很高的精度,但是对定标环境的要求比较高,气流、温度等因素都可能对定标精度造成显著影响。

目前国际上的主要大气探测遥感器 SCIAMACHY、温室气体观测卫星 (GOSAT)、OCO 都采用多种定标技术相互结合互补的方法对遥感仪器的光谱特性以及在轨稳定性进行标定。从当前的技术发展来看,未来超高分辨率光谱定标主要向以下几个方面发展:(1) 采取提高单色仪的波长准确度、分辨率或者提高激光扫描波长稳定性等措施实现定标仪器本身可靠性;(2) 综合月亮、太阳星上定标结果,加强对仪器光谱特性的在轨监测;(3) 优化光谱定标数据处理算法;(4) 综合应用多种光谱定标方法等。针对大气痕量气体探测高光谱分辨率、高精度反演的特点,可选择在实验室采用传统单色准直光标定仪器带宽的基础上,采用可调谐激光器或者气体吸收池精确标定探测器的中心波长,同时采取交叉定标对实验室光谱定标结果进行优化,以提高温室气体探测遥感器光谱特性的标定准确度,确保仪器可信度,从而保证仪器对大气中温室气体含量的反演精度。

国外超高分辨率温室气体探测遥感器光谱定标的成功经验也为我国近期开展的温室气体探测任务的顺利实施提供了借鉴。

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): 449-560.
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 449-560. (in Chinese)
- [2] PERSKY M J. A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometer for remote sensing[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995(66): 4763-4797.
- [3] POLLOCK R, HARING R E, HOLDEN J R, et al. . 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.
- [4] 杨宜. 成像光谱仪光谱定标技术[J]. 红外(月刊), 2006, 27(8): 24-26.
YANG Y. Spectral calibration of hyperspectral imager[J]. *Infrared*, 2006, 27(8): 24-26. (in Chinese)
- [5] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 822-828.
LI Y P, YU B Y, WANG Y P, et al. . Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)
- [6] 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): 2347-2354.
ZHENG Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2347-2354.

- (in Chinese)
- [7] 王建宇. 成像光谱仪的光谱响应函数及光谱分辨能力[J]. 成像光谱技术, 1991;44-50.
WANG J Y. Spectral response and spectral resolution of hyperspectral imaging[J]. *Imaging Spectrum*, 1991;44-50. (in Chinese)
- [8] 李聪, 王咏梅. 用 PtNe 灯对大气紫外成像光谱仪进行光谱定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12):3302-3305.
LI C, WANG Y M. Spectral calibration of the atmosphere ultraviolet imaging spectrograph using a PtNe lamp[J]. *Spe. Spe. Anal.*, 2010, 30(12):3302-3305. (in Chinese)
- [9] BOVENSMANN H, BURROWS J P, BUCHWITZ M, et al. . SCIAMACHY-mission objectives and measurement modes[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, 56(2):127-150.
- [10] HOOGEVEEN R W M, SPRUIJT H J, BROERS B, et al. . Near-infrared focal-plane arrays for SCIAMACHY[J]. *SPIE*, 1995, 2583:459-470.
- [11] KRUIZINGA B, SMORENBURG C, VISSER H. Calibration concept of SCIAMACHY[J]. *SPIE*, 1994, 2209:196-209.
- [12] 余典, 李笑, 杨成龙, 等. 光电直读光谱仪标定方法的研究[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(4):88-91.
YU D, LI X, YANG CH L, et al. Study on the calibration method of direct-reading spectrometer[J]. *Opt. Opt. Tech.*, 2011, 9(4):88-91.
- [13] MICHAEL B, HEINRICH B, MAXIMILIAN R, et al. . Passive satellite remote sensing of carbon dioxide and methane: SCIAMACHY, GOSAT, CarbonSat[J]. *Geophys Res Abstracts*, 2011, 13:6556.
- [14] DELWART S, HUOT J-P, BOURG L. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT[J]. *SPIE*, 2003, 4881:337-342.
- [15] CURTISS D O, JEFFREY B, ROBERT L A. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, 10(4):210-221.
- [16] BARRY P S, SHEPANSKI J, SEGAL C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system[J]. *SPIE*, 2002, 4480:231-235.
- [17] MAGER R, FRICKE W, BURROWS J P. SCIAMACHY a new-generation of hyperspectral remote sensing instrument[J]. *SPIE*, 1997, 3106:84-94.
- [18] CHRIEN T G, GREEN R O, et al. . Accuracy of the spectral and radiometric calibration of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectroscopy of the terrestrial environment[J]. *SPIE*, 1990, 1298:37-49.
- [19] VANE G, CHRIEN T G, MILLER E A, et al. . Spectral and radiometric calibration of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer[J]. *SPIE*, 1987, 834:91-101.
- [20] AMOLD G T, FITZGERALD M F, GRANT P S, et al. . MODIS airborne simulator radiometric calibration[J]. *SPIE*, 1996, 2820:56-66.
- [21] JERRY Z, DANIEL G, ROBERT M, et al. . Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 2004, 5425:182-188.
- [22] SCHYMANSKI E L, MEINER T C, MERINGER M, et al. . Result of a new straylight correction for SCIAMACHY[C]. Proc. of the Envisat Symposium, Montreux, Switzerland, April 23-27, 2007:SP-636.
- [23] ZADNIK J, GUERIN D, MOSS R. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 2004, 5425:182-188.
- [24] 黄曙江. 单色仪测波长中的不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(8):12-13.
HUANG SH J. Analyse two method that the single-color survey the wavelength[J]. *Metr. Mea. Thec.*, 2006, 33(8):12-13.
- [25] ANDERSON V E, FOX N P, NETTLETON D H, et al. . Highly stable, monochromatic and tunable optical radiation source and its application to high accuracy spectrophotometry[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31:536-545.
- [26] CRIPS D, JOHNSON C. The orbiting carbon observatory mission[J]. *Acta Astronaut*, 2005, 56:193-197.
- [27] CRISP D, DECOLA P L. NASA Orbiting Carbon Observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space[J]. *J. Appl. Remote Sensing*, 2008, 2(1):2-6.

- [28] DAY J O, O'DELL C W, POLLOCK R, *et al.*. Preflight spectral calibration of the orbiting carbon observatory[J]. *IEEE T Geosci Remote*, 2011, 49(7):2793-2801.
- [29] HARING R, POLLOCK R, SUTIN B. Current development status of the orbiting carbon observatory instrument optical design. Infrared Spaceborne Remote Sensing[J]. *SPIE*, 2005, 5883:58830C.
- [30] HAMAZAKI T, KUZE A, KONDO K. Sensor system for Greenhouse Gas Observing Satellite(GOSAT)[J]. *SPIE*, 2004, 5543:275-283.
- [31] GENEST J, TREMBLAY P. Instrument line shape of Fourier transform spectrometers; analytic solutions for nonuniformly illuminated off-axis detectors[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(25):5438.
- [32] KAMEYAMA S, IMAKI M. Development of 1.6 m continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing[J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(10):1513-1515.
- [33] SHIOMI K, KAWAKAMI S, KINA T, *et al.*. Calibration plan of GOSAT sensors[J]. *SPIE*, 2010, 6744:67440G.
- [34] SAKAIZAWA D, KAWAKAMI S, NAKAJIMA M, *et al.*. Path-averaged atmospheric CO₂ measurement using a 1.57 μm active remote sensor compared with multi-positioned in situ sensors[J]. *SPIE*, 2009, 7460:7460061.
- [35] SHIOMI K, SUTO H, KAWAKAMI S, *et al.*. Calibration plan of GOSAT TANSO[C]. Conference in Fourier Transform Spectroscopy(FTS), Sante Fe, New Mexico, Feb 11, 2007.
- [36] NOEL S, BOVENSMANN H, BURROWS J P, *et al.*. SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1[J]. *SPIE*, 1998, 3498:99-104.

作者简介:刘倩倩(1987—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事高光谱遥感器光谱定标等方面的研究。

E-mail:qianqian_1023@126.com

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、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail:zhengyq@sklao.ac.cn