

全光纤双通道大气温室气体激光外差光谱探测技术研究

王晶晶^{1,2}, 谈图^{1*}, 王贵师¹, 朱公栋¹, 薛正跃^{1,2}, 李竣^{1,2}, 刘笑海^{1,2}, 高晓明^{1,2}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031

2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026

摘要 激光外差光谱技术是近年迅速发展的一种高光谱分辨率遥感探测技术, 其装置具有体积小、光谱分辨率高等特点, 适用于大气温室气体浓度的探测。各种观测实验已证明其是一种切实、有效的探测手段, 在地球大气探测领域具有很大的应用前景和潜力。在现有激光外差光谱仪器的基础之上, 提出了一种新型的仪器结构。采用光纤光开关对直射的太阳光进行调制与分束, 实现利用单个光纤光开关进行两个波段激光外差信号的同时探测。为全光纤激光外差光谱仪的下一步系统集成和多波段激光外差光谱仪的构建提供了新方法。从激光外差探测的原理出发, 分析了激光外差光谱探测技术的优势和关键参数, 并结合自行研制的高精度太阳跟踪仪, 搭建了一套近红外双通道全光纤式激光外差辐射计的原理样机。详细地阐述了激光外差辐射计原理样机中各功能模块的作用和参数, 着重描述了光纤光开关在其中的作用原理和功能, 详细地讨论了激光外差光谱仪的波长扫描模式和波长标定方法。在此基础上, 讨论了激光外差辐射计的相关参数设置依据和仪器函数的测量方法, 并给出了激光外差装置的仪器函数以及相应的光谱分辨率(0.0044 cm^{-1})。利用搭建的激光外差光谱仪在合肥地区(31.9°N , 117.166°E)进行了实际的大气探测, 同时在波段($6056.2\sim 6058.1\text{ cm}^{-1}$)和($6035.6\sim 6036.5\text{ cm}^{-1}$)分别获取了 CH_4 和 CO_2 分子的激光外差吸收信号, 并对吸收信号进行了波长标定和归一化, 得到了 CH_4 分子和 CO_2 分子的整层大气透过率谱, 测量光谱信号的信噪比分别为197和209, 同时也对分子吸收信号的光谱特征进行了分析。本文的测量实践表明光纤光开关可以用于激光外差光谱系统的结构优化, 实现多通道多波段的激光外差光谱同时测量, 拓展激光外差光谱仪在大气探测领域的应用。

关键词 激光外差; 整层大气透过率谱; 信噪比

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0354-06

引言

为应对全球气候变化, 加深对气候变化事实和规律的科学认识, 以及对气候变化影响的评估, 迫切需要对 CO_2 和 CH_4 等大气温室气体进行长期连续观测。目前, 国际上主要的观测网络(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, Total Carbon Column Observing Network等)都是采用高分辨率的傅里叶变换光谱仪获取太阳光谱进而反演温室气体的垂直分布^[1]。测量结果与现有的地面测量结果相结合, 将改善对温室气体表面通量的估计, 同时可用于与卫星观测数据进行相互验证。然而其体积较大, 价格昂贵, 所以导致其观测网络比较稀疏, 需要其他测量手段和方

法进行补充。激光外差辐射计(laser heterodyne radiometer, LHR)不仅体积小、成本低, 而且光谱分辨率高, 可在全球范围内建立更多的大气温室气体观测点^[2]。研究表明, 利用LHR填补已有的地面观测网络和空间观测遗留的观测地理区域, 可减少对北极和热带系统碳通量估计的不确定性^[3]。

自20世纪中叶, 激光外差辐射计就已经用于地球大气中 CO_2 和 O_3 等气体的观测。近二十年来, 随着半导体激光器和高速光电探测器的成熟, 激光外差技术又有了快速的发展。Weidmann等利用外腔量子级联激光器建立的中红外激光外差测量系统, 实现了对大气中 CH_4 , CO_2 , H_2O , O_3 , N_2O 等多种温室气体的测量^[4-5]。美国NASA Wilson等利用小型的分布反馈式(distributed feedback, DFB)激光器建立了全光纤近红外激光外差测量系统, 获取了大气中 CH_4 与

收稿日期: 2019-12-14, 修订日期: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41730103)和国家重点研发计划项目(2017YFC0209705)资助

作者简介: 王晶晶, 女, 1992年生, 中国科学技术大学博士研究生 e-mail: wangjingjing_aio@163.com

* 通讯作者 e-mail: tantu@aiofm.ac.cn

CO₂ 的吸收光谱同时对装置进行了集成化设计^[6-7]。Alexander 等利用平衡探测器建立激光外差测量系统获取了大气中 CH₄ 与 CO₂ 的吸收光谱^[8]。国内,安徽光机所也开展了以外腔量子级联激光器与带间级联激光器为本振光源的自由空间结构激光外差光谱技术的研究^[9],得到了 CH₄ 与 H₂O 的吸收光谱,分辨率达到 0.003 3 cm⁻¹。近年来成本低的 DFB 激光器、光纤技术及其应用产品的发展使得 1.5 μm 附近光谱区域的气体传感器^[10-11]得到开发与应用,这非常适合于近红外波段激光外差装置的系统集成。在目前工作的基础上,利用光纤光开关对信号光能量进行了分割和调制,实现了双波段激光外差光谱的同时测量,弥补了 DFB 激光器工作波长范围窄的限制,为构建多分子、多波段激光外差光谱同时测量的紧凑型系统提供了思路。

1 激光外差探测基本原理

激光外差探测原理在文献[12]中已有详细描述,简而言之就是两束振幅与频率分别为 A_s 与 ν_s, A_{LO} 与 ν_{LO} 且在空间上偏振状态完全重合的两束单色光,同时照射到高速光电探测器表面,探测器中所产生的总光电流理论值可表示为

$$i = \kappa \left[\frac{1}{2} A_s^2 + \frac{1}{2} A_{LO}^2 + A_s A_{LO} \cos 2\pi(\nu_{LO} - \nu_s)t \right] \quad (1)$$

其中 κ 为探测器响应的比例常数。式中前两项表示直流分量 i_{DC}, 最后一项表示差频分量 i_{IF}, 利用直流分量将差频分量表示为

$$i_{IF} = \frac{2A_s A_{LO} \cos[2\pi(\nu_{LO} - \nu_s)t]}{A_s^2 + A_{LO}^2} i_{dc} \quad (2)$$

当本振光强度远远大于信号光强度时,差频分量可以重新表

示为

$$i_{IF} = 2 \frac{A_s}{A_{LO}} i_{DC} \cos(2\pi\nu_{IF}t) \quad (3)$$

其中,ν_{IF} 为两激光的差频,差频分量即拍频信号经过功率检波后,其功率可以表示为

$$\langle i_{IF}^2 \rangle = 2\kappa^2 P_s P_{LO} \quad (4)$$

其中 P_s, P_{LO} 分别是信号光与本振光的辐射功率。从式(4)可以看出,拍频信号的功率与此频率上的本振光功率与信号光功率成正比,在信号光功率较弱时其携带的光强信息可以通过本振光进行放大。当激光外差系统用于实际大气探测时,信号光是携带与大气相互作用信息的非相干宽带热辐射(太阳光),则太阳光与本振光的拍频信号可看作由无数个不同状态的单色光与本振光拍频信号的叠加。拍频信号在时域上表现为随机信号,功率谱密度与信号光的光谱信息直接相关。实际测量时由拍频信号的功率谱反推出信号光的光谱信息,实现光谱检测。

2 实验部分

高光谱分辨率双通道近红外激光外差辐射计原理图如图 1 所示。实验中,使用两个蝶形封装的 DFB 激光器(中心波长分别为 1 650.9 和 1 603.6 nm)作为本振光源,分别用于对大气中 CH₄ 和 CO₂ 吸收光谱的测量。激光的波长由计算机通过激光二极管控制器(laser diode driver, LDC3724)进行步进扫描,同时由光纤分束器(fiber splitter, FS1, FS2)分出部分激光,利用波长计(wavelength meter, Bristol 621b)同步记录波长实际值。

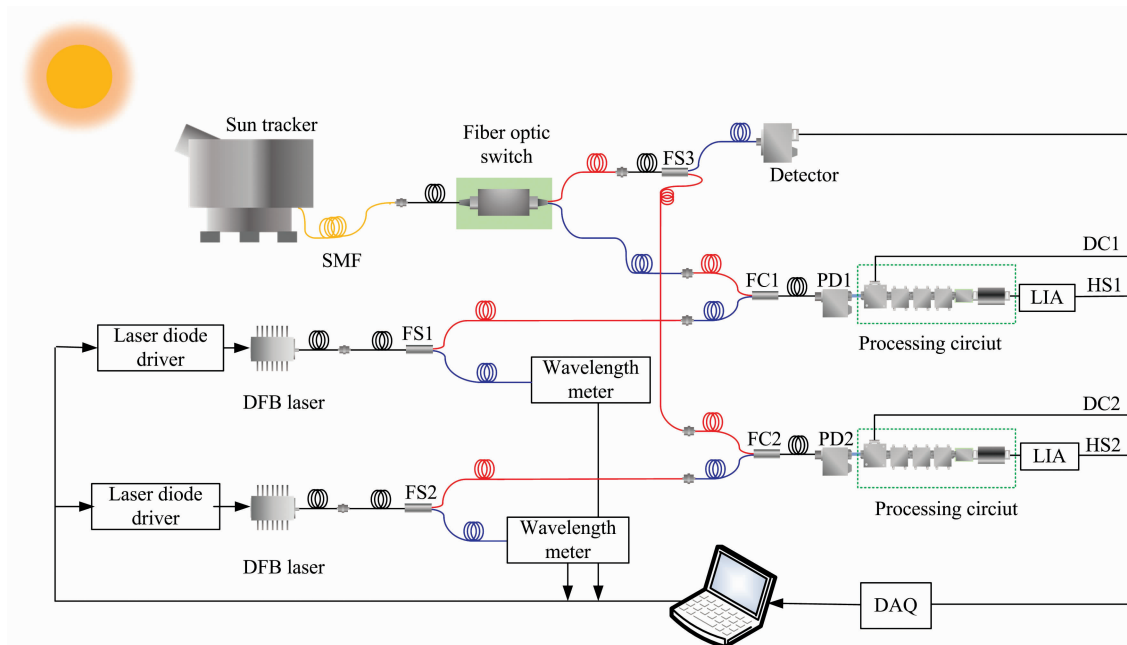


图 1 双通道近红外激光外差辐射计原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-channel near-infrared LHR

用于大气吸收光谱实际测量的信号光由自制的太阳跟踪仪(Sun tracker)获取,太阳跟踪仪采用视日轨迹跟踪和光电成像跟踪相结合的方法将收光镜头(F810 FC/APC)指向太阳,收集直射的太阳光,如图 2(a)所示。收集到的太阳光通过单模光纤(single mode fiber, SMF, 5 m)连接到 1×2 的光纤光开关(fiber optic switch)如图 2(b)所示,信号光经过光纤光开关后被分为两束时序上互斥的调制信号[如图 2(c)所示],两通道输出的光强度相近,信号调制比可以达到 90%以上。信号的调制频率和占空比可以通过光纤光开关驱动电路进行调节,本文中调制频率为 125 Hz,占空比为

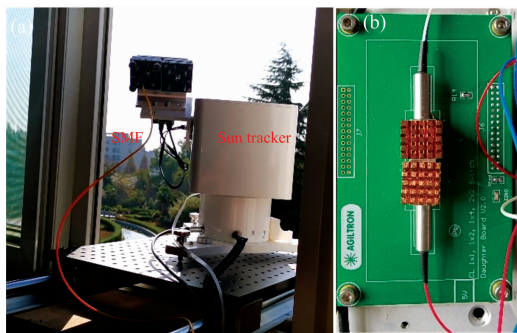


图 2 (a)太阳跟踪仪; (b)光纤光开关; (c)光开关输出信号

Fig. 2 (a) Sun tracker; (b) Fiber optic switch; (c) Optical switch output signal

光电流信号输入到自制的处理电路(processing circuit)中进行处理,处理电路的功能主要包括阻抗匹配、电流电压转换、放大、滤波、功率检测等,最终输出一系列与拍频信号功率成比例与太阳光调制信号频率相同、相位同步的电压信号(矩形波序列)。因此电压信号可以利用锁相放大器(lock in amplifier-SR830, LIA)进行解调,解调参考信号来源于太阳光调制信号。测量时,程序等间隔地扫描激光二极管的注入电流,同时通过数据采集卡(DAQ: NI-usb6366)采集太阳光相对强度的监测信号、两路直流信号(DC1, DC2)与两路解调得到的激光外差信号(heterodyne signal, HS1, HS2),并通过波长计记录相应的波数。当激光的波长扫描覆盖目标分子的特征吸收峰后,则得到相应的吸收光谱。

3 结果与讨论

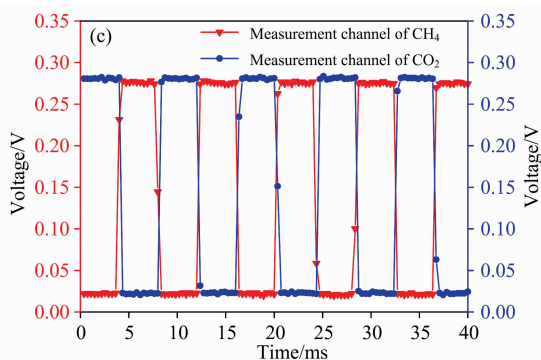
3.1 仪器函数

获取装置测量的原始外差信号后,由于检测系统的仪器函数会对大气中气体真实吸收光谱的测量产生影响,因此需要分析该系统的仪器函数用于下一步的数据分析。实验中,本振光的波长扫描采用逐点步进的方式,所以系统的仪器函数主要由系统各部分的电子信号响应带宽决定。当利用太阳光作为信号光进行激光外差实验时,产生的拍频电信号是一个宽带信号,在探测器的整个电子带宽($0 \sim 2$ GHz)范围内都有近似均匀的能量分布。在实际测量中,由于电子噪声的存在与测量光谱分辨率的要求,需要用射频电子滤波器设定一个合适的探测频段。

使用频谱分析仪(Agilent Technologies CXA Signal

50%)。

利用光纤分束器(fiber splitter, FS3)对光纤光开关的其中一路输出进行分束,分束后的一束太阳光由光电探测器(detector, PDA20CS2)进行实时监测太阳光强度的相对变化,用于后续的数据处理。光纤光开关输出的太阳光与两本振激光分别在两个光纤合束器(fiber combiner, FC1, FC2)中实现合束,光纤合束器的输出分别由两个高速光电探测器(photodetector-DET08CFC/M; PD1, PD2)检测,进而产生光电流信号。



Analyzer N900A)分析了系统的电子噪声特性。对其中一个通道的射频信号功率的测量结果如图 3(a)所示。图中曲线 1 是高速光电探测器在无任何光信号输入情况下的功率谱;曲线 2 与 3 是分别只输入太阳光或激光情况下对应的功率谱;曲线 4 是向高速光电探测器中同时输入激光与太阳光对应的功率谱。通过比较曲线 1, 2, 3 和 4 可以看出,系统的噪声主要由激光引起,分布在 $0 \sim 200$ MHz 频段。曲线 4 上有些区域存在的较大尖峰是由激光器的驱动电路或者环境干扰引起,外差检测时需要避开这些噪声较大的区域。曲线 5 是利用滤波器限定了探测频段($330 \sim 375$ MHz)后的结果,选择了噪声较低的区域。

根据激光外差原理与功率谱响应函数得到了本装置的两个测量通道的仪器函数如图 3(b)所示,实测双边带带宽为 132.6 MHz。可以看出两通道的仪器函数基本一致,由此得到测量对应的光谱分辨率都为 0.00442 cm^{-1} 。

3.2 吸收光谱波长标定

利用双通道激光外差测量装置在合肥地区进行了实际测量,得到如图 4(a)和(b)所示的 CH_4 与 CO_2 的外差吸收信号。图中外差信号的获取分为两段,第一段($0 \sim 20$ mA)记录了激光在出光过程中的外差信号,包含了探测系统的背景,第二段($30 \sim 110$ 和 $60 \sim 100$ mA)在激光输出稳定情况下,记录激光波长扫描覆盖气体吸收线及其附近区域的吸收信号。第二段中,在得到每一个外差信号时,同时记录对应的激光波数,利用实时的测量数据对检测到的外差信号进行波长标定。激光器二极管注入电流的步进间隔是 0.1 mA ,对应的波数变化小于 0.004 cm^{-1} 。两激光波数与注入电流的关系曲线如图 4(c)和(d)所示。对 CH_4 分子检测的激光波数扫

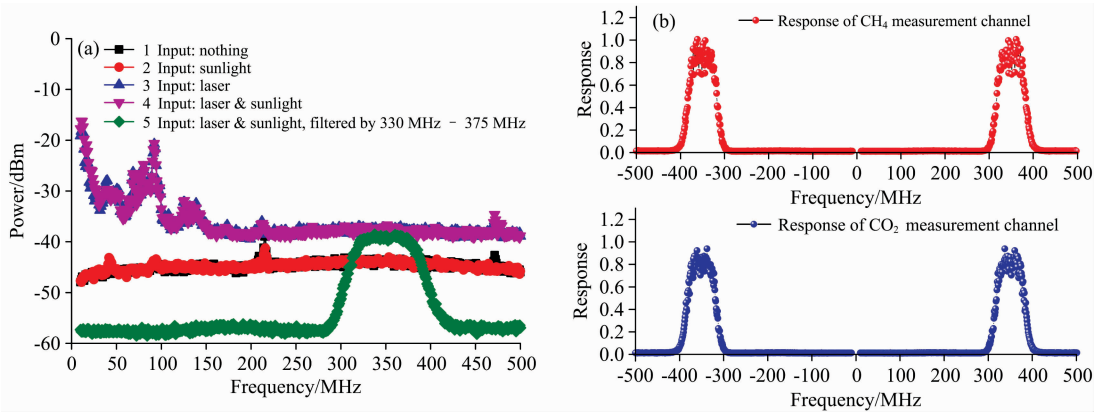


图 3 (a) 射频信号功率谱; (b) 仪器函数

Fig. 3 (a) RF signal power spectrum; (b) Instrument functions

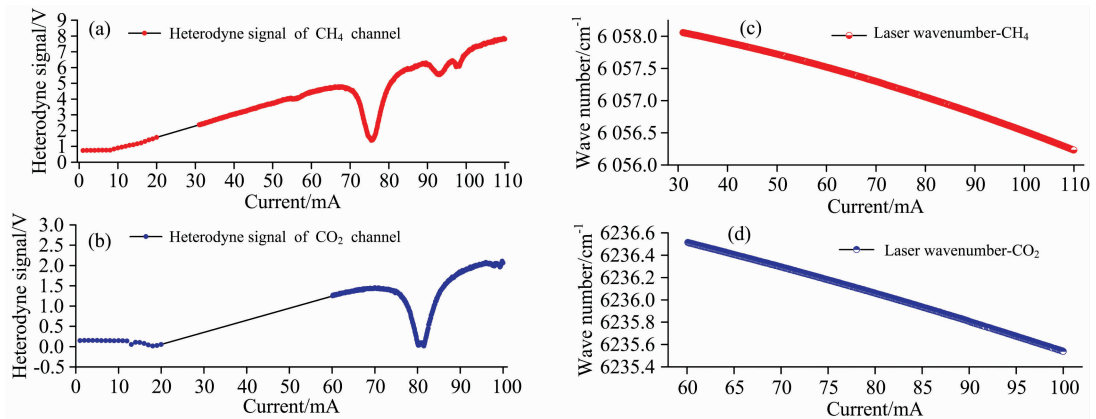


图 4 (a) CH₄ 吸收的外差信号; (b) CO₂ 吸收的外差信号; (c) CH₄ 测量激光波数与注入电流关系曲线; (d) CO₂ 测量激光波数与注入电流关系曲线

Fig. 4 (a) Heterodyne signal absorbed by CH₄; (b) Heterodyne signal absorbed by CO₂; (c) Relation curve between laser wavenumber and injection current for CH₄ measurement; (d) Relation curve between laser wavenumber and injection current for CO₂ measurement

描范围是 1.83 cm^{-1} , 对 CO₂ 分子检测的激光波数扫描范围是 0.97 cm^{-1} , 分别覆盖了 CH₄ @ $6\ 057.079\ 5 \text{ cm}^{-1}$ 和 CO₂ @ $6\ 236.036\ 9 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰。

3.3 大气透过率光谱

实验过程中, 积云对太阳光的遮挡会使外差信号减小甚至减小到零, 因此需要监测太阳光强度的变化, 以降低云的干扰。以一次光谱采集过程中太阳光强度波动不超过其平均强度的 10% 为标准来筛选出有效的外差信号。从图 4(a) 和 (b) 看出, 测量信号存在不同的背景值, 因此需要将背景值扣除之后利用一次多项式拟合吸收光谱基线, 再做归一化处理。对两吸收光谱进行波长标定后, 得到如图 5(a) 和 (b) 所示的大气中 CH₄ 与 CO₂ 的整层大气透过率谱, 气体吸收峰位置与 Hitran 数据库中的吸收线位置相一致。

图 5(a) 中, 由于甲烷最强吸收线右侧存在另外三条较强的甲烷吸收线(间隔约 0.01 cm^{-1}), 因此甲烷吸收峰不对称, 最强吸收偏左。透过率谱中同时记录的 CO₂ 吸收峰 ($6\ 056.508 \text{ cm}^{-1}$) 表现出双峰现象, 太阳发射光谱^[13] 位置

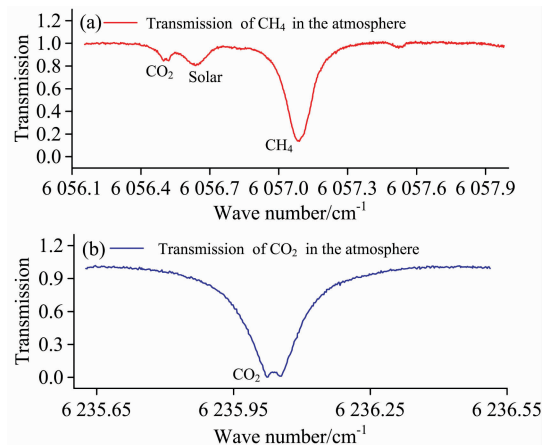


图 5 (a) 大气中 CH₄ 的透过率谱; (b) 大气中 CO₂ 的透过率谱

Fig. 5 (a) Transmission of CH₄ in the atmosphere; (b) Transmission of CO₂ in the atmosphere

($6\ 056.636\ \text{cm}^{-1}$)与 FTIR 测量数据中的位置相同。甲烷气体对太阳光波数在 $6\ 057.079\ 5\ \text{cm}^{-1}$ 处测量的吸收信号的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)为 197, 二氧化碳弱吸收线处吸收光谱的 SNR 为 35, 太阳谱检测的 SNR 为 44。图 5(b)中的大气 CO_2 透过率谱也呈现出双峰现象, 二氧化碳强吸收线 $6\ 236.036\ 9\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收光谱的 SNR 为 209。

由于平流层的大气压力低, 因此大气中二氧化碳对太阳光吸收的真实吸收光谱线宽较窄。实验中利用的窄带滤波器提高了仪器的光谱分辨率, 因此当大气中的气体吸收线宽窄于带通滤波器的带宽且小于带通滤波器的低频截止频率时, 根据激光外差原理, 测量光谱中将出现双峰现象^[14], 如两个二氧化碳的强吸收线与弱吸收线处的透过率谱。带通区间的中心相距为 705 MHz, 则产生外差信号的两段太阳光频率中心间隔为 $0.023\ 5\ \text{cm}^{-1}$, 测量谱中双峰间距为 $0.027\ 5\ \text{cm}^{-1}$, 而理论上两者应该相等, 但计算得出两者相差 $0.004\ \text{cm}^{-1}$ 。将此误差与测量系统的光谱分辨率($0.004\ 4\ \text{cm}^{-1}$)比较可以得出, 此误差在测量系统的允许误差范围内, 因此双峰间距的测量值与理论值可以基本吻合。由于 CH_4 的吸收包含了四条强度相近的吸收线, 且四条吸收线位置分布范围有 $0.047\ 4\ \text{cm}^{-1}$, 大于由测量带宽引起的双峰间距, 因此四

条谱线的吸收重叠造成双峰现象没有出现在 CH_4 的测量光谱中。

4 结 论

以中心波长为 1 651 与 1 603 nm 的 DFB 激光器作为本振光源, 采用光纤光开关取代机械斩波器, 建立了一套可同时测量整层大气中 CH_4 与 CO_2 的紧凑型全光纤近红外激光外差探测装置。光纤光开关的使用不仅起到两个测量通道的切换作用, 提高太阳光的利用率; 而且通过设置合适的切换频率, 可以对太阳光进行振幅调制。利用光谱分辨率为 $0.004\ 4\ \text{cm}^{-1}$ 的双通道激光外差装置对实际大气中的 CH_4 和 CO_2 的透过率光谱测量得到的信号的 SNR 可分别达到 197 与 209。高分辨率全光纤大气温室气体近红外激光外差光谱测量仪器为实现大气温室气体(CH_4 , CO_2 等)的同时遥感探测, 建立大气温室气体监测网络提供了有效的测量手段。下一步将对测量系统的噪声、仪器函数和光谱标定进一步优化, 以提高测量光谱信号的信噪比, 同时达到更高的光谱分辨率。

References

- [1] Deutscher N M, Griffith D W T, Bryant G W, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(4): 947.
- [2] Clarke G B, Wilson E L, Miller J H, et al. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 055204.
- [3] Palmer P I, Wilson E L, Villanueva G L, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(4): 2579.
- [4] Weidmann D, Tsai T R, Macleod N A, et al. *Optics Letters*, 2011, 36 (12): 1951.
- [5] Tsai T R, Rose R A, Weidmann D, et al. *Applied Optics*, 2012, 51(36): 8779.
- [6] Wilson E L, McLinden M L, Miller J H, et al. *Applied Physic B*, 2013, 114(3): 385.
- [7] Wilson E L, DiGregorio A J, Villanueva G, et al. *Applied Physics B*, 2019, 125(11): 211.
- [8] Rodin A, Klimchuk A, Nadezhdinskiy A, et al. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13825.
- [9] Wang J, Wang G, Tan T, et al. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9610.
- [10] Guo X Q, Zheng F, Li C L, et al. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115(1): 243.
- [11] Li C L, Shao L G, Meng H Y, et al. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29330.
- [12] Parvitte B, Zéninari V, Thiébeaux C, et al. *Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2004, 60(5): 1193.
- [13] Thuillier G, Hersé M, Labs D, et al. *Solar Physics*, 2003, 214(1): 1.
- [14] Hoffmann A, Macleod N A, Huebner M, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(12): 5975.

Research on All-Fiber Dual-Channel Atmospheric Greenhouse Gases Laser Heterodyne Detection Technology

WANG Jing-jing^{1, 2}, TAN Tu^{1*}, WANG Gui-shi¹, ZHU Gong-dong¹, XUE Zheng-yue^{1, 2}, LI Jun^{1, 2}, LIU Xiao-hai^{1, 2}, GAO Xiao-ming^{1, 2}

1. 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 Laser heterodyne spectroscopy is a high-resolution remote sensing detection technology developed rapidly in recent years. Its device has the characteristics of small size, high spectral resolution, and is suitable for the detection of the concentration of atmospheric greenhouse gases. At present, it has been proved to be a practical and effective detection method in various observation experiments and has great application prospects and potentials in the field of earth atmosphere detection. Based on the existing laser heterodyne spectroscopy instruments, a new instrument structure is proposed in this paper. A fiber optic switch was used to modulate and split the direct sunlight, and realize the simultaneous detection of two-band laser heterodyne signals. It provides a new method for the next system integration of all-fiber laser heterodyne radiometer (LHR) and the construction of multi-band LHR. Based on the principle of laser heterodyne detection, this paper analyzes the advantages and key parameters of laser heterodyne spectrum detection technology. Combined with a self-developed high-precision solar tracker, a set of principle prototypes of a near-infrared dual-channel all-fiber LHR was built. The functions and parameters of the functional modules in LHR are elaborated in detail. The function principle and function of fiber optic switch are emphasized. The wavelength scanning mode and wavelength calibration method of the LHR are discussed. Based on this, the setting basis of related parameters and measurement method of the instrument function is discussed, and the instrument functions and the corresponding spectral resolution (0.0044 cm^{-1}) of the LHR described in this paper are given. Using the built LHR to conduct actual atmospheric surveys in the Hefei area (31.9°N , 117.166°E), the laser heterodyne signals of CH_4 and CO_2 in the band of ($6056.2\sim 6058.1\text{ cm}^{-1}$) and ($6035.6\sim 6036.5\text{ cm}^{-1}$) were obtained simultaneously. The wavelength calibration and normalization of the absorption signals were performed to obtain the entire atmospheric transmittance spectrum of CH_4 and CO_2 molecules in the atmosphere. The signal-to-noise ratios of the measured spectral signals are 197 and 209, respectively and the spectral characteristics of molecular absorption signals are analyzed. The measurement practice in this paper shows that the fiber optical switch can be used to optimize the structure of laser heterodyne spectroscopy system, achieve the simultaneous measurement of multi-channel and multi-band LHR, and expand the application of LHR in the field of atmospheric detection.

Keywords Laser heterodyne; Total atmospheric spectral transmittance; Signal-to-noise ratio

(Received Dec. 14, 2019; accepted Apr. 11, 2020)

* Corresponding author