

激光外差光谱仪的水汽柱浓度反演研究

张尚露^{1,2}, 黄印博¹, 卢兴吉^{1,2}, 曹振松¹, 戴聪明^{1*}, 刘 强¹, 高晓明¹, 饶瑞中¹, 王英俭¹

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘 要 水汽是地球大气的重要组成部分,也是平衡地气系统辐射收支的一个重要因素,对天气和气候变化有着重要的影响。常用的水汽柱浓度测量设备,如无线电探空仪、激光雷达、微波辐射计、太阳光度计、DOAS 仪器以及傅里叶变换红外光谱仪等,难以兼顾高分辨率以及便携机动等应用需求。为此,基于一种高灵敏度、高分辨率光谱探测技术,围绕水汽柱浓度的探测开展了相关研究,取得的主要成果有:(1)基于激光外差光谱技术,利用窄线宽带间级联激光器作为本振光源,与太阳跟踪仪结合,建立了一套高分辨率激光外差太阳光谱测量装置,光谱分辨率达到了 0.002 cm^{-1} 。(2)采用 Langley-plot 方法对高分辨率激光外差太阳光谱测量装置进行了现场定标,并于云南紫金山天文台观测站开展了外场测量,获得了 $2\ 831\sim 2\ 833\text{ cm}^{-1}$ 波段太阳光谱的直接测量数据。对实测的太阳光谱进行归一化处理,获得了高分辨率的整层大气透过率谱。(3)利用逐线积分辐射传输模式(line by line radiative transfer model, LBLRTM)计算了整层大气透过率谱,并与实测的透过率谱进行了非线性最小二乘拟合,实现了水汽柱浓度的反演。同时利用微波辐射计进行了水汽柱浓度的观测,将反演结果与实测结果进行了对比分析,两者的一致性相对较好,最小相对偏差为 16.59%,最大相对偏差为 21.69%。(4)反演结果与实测结果的偏差主要由反演算法误差和装置测量误差所导致。反演算法误差包括辐射传输模式的计算误差、实际大气温度的测量误差、甲烷浓度不确定性引入的误差、HDO 丰度与自然丰度的偏差,装置测量误差包括装置定标误差、波长标定误差、系统噪声影响、背景信号以及直流信号的微弱起伏引起的误差。(5)文中选取的 $2\ 831\sim 2\ 833\text{ cm}^{-1}$ 波段同时包含了水汽和甲烷的吸收,在反演水汽柱浓度的同时,同步进行了甲烷柱浓度的反演。以甲烷初始柱浓度作为参考值,发现反演后的甲烷柱浓度相对初始柱浓度的数值平均增加了 14.41%。高分辨率激光外差太阳光谱测量装置结合反演算法是一种有效的整层大气透过率以及水汽、甲烷柱浓度探测的综合设备,在多组分气体浓度探测方面具有广泛的应用前景。

关键词 激光外差; 整层大气透过率谱; 非线性最小二乘; 水汽柱浓度

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1317-06

引 言

水汽(H_2O)是地球大气的重要组成部分,在大气中的含量仅为 $0.1\%\sim 3\%$ ^[1]。研究表明,水汽的变化不仅是大部分气象事件的主要原因,而且在全球气候变化中扮演着重要的角色^[2]。由于大气中的水汽含量时空变化快,因此实时准确探测水汽浓度及其变化是十分重要的。

目前,国内外水汽浓度探测的方式主要有主动探测和被动探测。主动式观测手段有无线电探空技术^[3]、激光雷达^[4]

等;被动式观测手段有地基微波遥感^[5]、太阳光度计^[6]、差分吸收光谱^[7]和傅里叶变换红外光谱^[8]等。上述技术各有优点,但也存在不足,如应用范围有限、分辨率不高、反演方法和测量装置较为复杂等问题。近年来,激光外差光谱技术得到了快速发展,其灵敏度高、时间和空间分辨率高、结构紧凑等特点特别适用于地基或星载的地球大气成分探测。

早在 20 世纪 70 年代,国外已有利用激光外差光谱技术进行气体探测的相关报道。Tohoku 等利用可调谐二极管激光器作为本征光源建立了激光外差光谱仪,测量了 O_3 在 $9\ \mu\text{m}$ 波段的吸收光谱,并同时反演了 O_3 的混合比垂直分布廓

收稿日期: 2018-03-05, 修订日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205021), 中国科学院青年创新促进会项目(2015264)资助

作者简介: 张尚露, 1993 年生, 中国科学技术大学硕士研究生 e-mail: 2289408527@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: cmdai@aiofm.ac.cn

线^[9]。Koide 等使用二极管激光器为本振光源建立的激光外差系统,测量了整层大气 CH₄ 高分辨率吸收光谱,并反演获得了其垂直分布廓线^[10]。Weidmann 以量子级联激光器外差式辐射计为实验装置,测量了 1 120~1 238 cm⁻¹ 的整层大气太阳吸收光谱,获取了高分辨率的整层大气分子吸收光谱透过率,并反演了 O₃, N₂O, CH₄ 和 H₂O 等的垂直分布廓线^[11]。Wilson 利用分布式反馈半导体激光器建立了小型近红外激光外差光谱仪,利用 1 573.6 nm 处的太阳吸收光谱探测了大气中 CO₂ 的柱浓度^[12]。

在国内,谈图等(2015 年)首次报道了以窄线宽的 4.4 μm 外腔量子级联激光器作为本振光源、黑体作为辐射光源的激光外差光谱实验装置。该装置能实现 CO₂, CO 和 N₂O 等大气分子的同时测量,具有较高的瞬态信噪比以及光谱分辨率。吴庆川等(见本刊 2017, 36(6): 1678)利用激光外差光谱测量技术结合太阳跟踪仪,建立了一套高分辨率整层大气透过率测量系统,系统分辨率达到了 0.006 cm⁻¹,实测整层大气透过率与 MODTRAN 5.0 模式计算结果的一致性较好,且具有更高的光谱分辨率、性能稳定可靠,展示了激光外差技术在测量高分辨率整层大气透过率方面的优势。在此基础上,实验室进一步拓展高分辨率激光外差技术的应用范围,利用该技术进一步开展了新的探测波长 3.53 μm 波段高分辨率太阳光谱的实时测量,并基于逐线积分辐射传输模式的光谱反演算法,将测量的整层大气透过率谱与 LBLRTM 模式计算的透过率谱进行了非线性最小二乘拟合,实现了水汽、甲烷柱浓度的同步反演,并对反演结果的误差进行了讨论与分析。

1 水汽柱浓度反演原理

应用 LBLRTM 模式计算整层大气透过率谱,需根据测量时刻及测量位置(经纬度)计算太阳天顶角,并利用近地面的实时温度、相对湿度、压强对当地大气参数廓线模式中的温度、压强和水汽浓度廓线进行修正。以分子吸收光谱参数 HITRAN(High resolution TRANsmission)2012 年版本数据库中的分子吸收谱线参数为基础,使用美国标准大气模式中

的 CH₄ 浓度作为初始浓度,计算太阳直射方向上的整层大气透过率谱。LBLRTM 模式计算的透过率谱是合成的校准谱,也是水汽浓度标定的基础。

将实测的整层大气透过率谱与 LBLRTM 模式计算的整层大气透过率谱进行非线性最小二乘拟合,以水汽浓度为自变量进行迭代拟合,使得测量透过率谱与模式计算透过率谱的均方根误差 RMS 最小^[13]。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - fit_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式中, n 为光谱点数, m_i 是测量透过率值, fit_i 是模拟计算透过率值。

水汽柱浓度定义为该气体在单位面积上从地表到大气层顶柱体内所含的分子数。通过迭代获得最小 RMS 时对应的水汽浓度值,则水汽柱浓度(Column_H₂O)可表示为

$$\text{Column_H}_2\text{O} = \int_0^{120} \omega(l) n(l) dl \quad (2)$$

式中, $\omega(l)$ 为水汽在高度 l 处的体积百分比, $n(l)$ 为高度 l 处的分子数密度,整个大气层的范围为 0~120 km,其中 $n(l)$ 可由理想气体状态方程得到。

2 激光外差太阳光谱测量装置

高分辨率激光外差太阳光谱测量装置及整体结构与文献[10]相似,如图 1 所示。该装置主要由两大模块组成:太阳跟踪模块和外差测量模块。在太阳跟踪模块中,使用 Lab-View 程序对高精度太阳跟踪仪进行控制,实现对太阳的精确跟踪并将收集到的太阳光导入外差测量模块。外差测量模块实现了对外差信号的测量,其核心部分主要为激光器及其扫描控制部分、光学混频器与射频信号处理部分、调制解调与数据采集部分。装置使用了窄线宽可调谐的分布反馈式带间级联激光器作为本振光源,波长调谐范围是 2 830.5~2 835.0 cm⁻¹,在 1 s 的积分时间内线宽优于 10 MHz。装置所使用的光学混频器件为 VIGO 公司 PV-2TE 型二级压电制冷快速响应探测器,可将光敏面温度控制在 230 K 以有效减

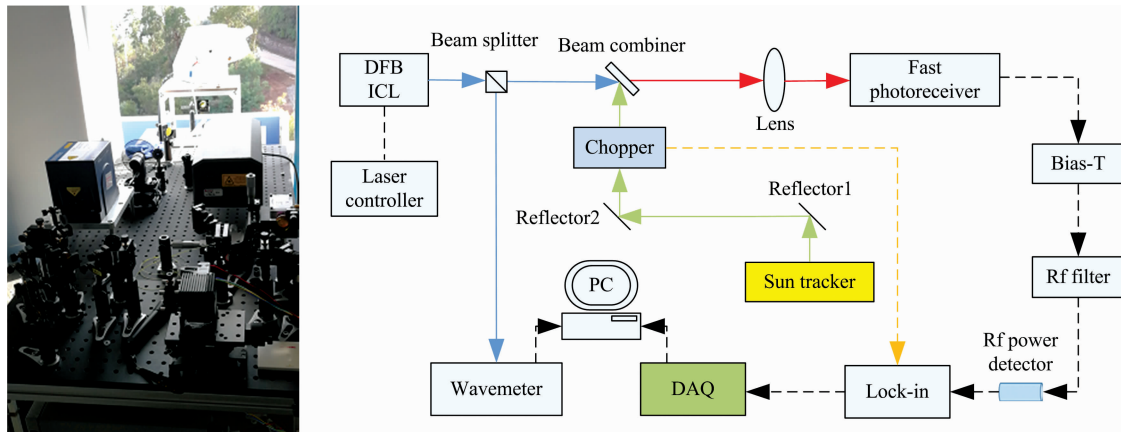


图 1 激光外差太阳光谱测量装置(左)、整体结构图(右)

Fig. 1 Experimental set-up of laser heterodyne instrument (left), the integrated layout of system (right)

小热噪声,其量子效率约为 0.6。探测器将外差光信号转化为可以测量并记录的电信号,经射频滤波器进行高频滤波后,其功率大小由零偏置肖特基二极管检波器转换成电压来检测。装置中使用了 MC2000-MC1F30 型光学斩波器和数字锁相放大器 DSP-SR830 作为调制解调部分,在放大信号的同时极大地提高了系统的信噪比,其中锁相放大器可用来设定系统积分时间。

包含水汽吸收信息的入射太阳光通过太阳跟踪仪(Sun tracker)的光收集镜头及两个 45°的反射镜(Reflector1 和 Reflector2)导入激光外差部分,经过斩波器(Chopper)斩波,与本振激光在合束镜(Beam Combiner)上合束,经会聚透镜(Lens)聚焦到高速平方率光电探测器(Fast photoreceiver)上进行混频产生外差信号,经过射频滤波器(Rf filter)和射频功率探测器(Rf power detector)后进入锁相放大器进行解调,由数据采集卡记录数据并输入 PC 端,从而得到包含水汽吸收信息的外差信号,实现对太阳光谱的高分辨率测量。

3 高分辨率太阳光谱

高分辨率激光外差太阳光谱测量装置的光路布局图如图 2 所示。通过光纤指示灯以及光阑的准直作用调试光路,使太阳光和本振激光很好的共线,以实现高灵敏度外差探测。首先让本振激光垂直入射到光电探测器光敏面上,再加上光阑 3、光阑 4 和光纤指示灯,光纤指示灯发出的可见光经过光阑 4、光阑 3、合束镜、光阑 2 和光阑 1 到达反射镜 2、反射镜 1,由于光路可逆,太阳光跟踪仪采集的太阳光也会传输至光电探测器上。大气中水汽浓度的变化引起外差信号幅度的微小变化,通过 NI 采集卡进行信号采集,可高保真度地再现外差信号。本振激光经过分光镜分束一部分输入波长计(Bristol 621A),在测量外差信号的同时实现了对本振激光波长的实时测量。测量过程中可实时观测本振激光的中心波长有无漂移,若发生漂移,后续数据处理时需对波长进行修正。实验时,射频滤波器带宽选择为 5~35 MHz,根据双边探测原理^[14],该滤波器带宽对应的激光外差光谱分辨率约为 60 MHz,即 0.002 cm^{-1} 。

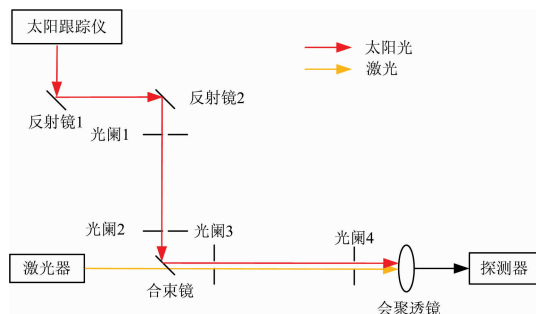


图 2 光路布局图

Fig. 2 The layout of optical train

4 测量结果及讨论

测量地点位于云南紫金山天文台观测站(以下简称观测

站),经、纬度分别为 101.18°E, 25.53°N, 海拔高度为 2.0 km。高分辨率激光外差太阳光谱测量装置参数设置如下:探测器灵敏度 50 μV ,锁相放大器的增益为 1,积分时间为 30 ms,激光器注入电流为 26~34 mA,扫描周期为 8 s,激光控制器的温度为 14.02 $^{\circ}\text{C}$,扫描平均次数为 30。测量装置中本振激光器的波长调谐范围是 2 830.5~2 835.0 cm^{-1} ,此波段内水汽吸收较强,通过查询 HITRAN2012 数据库发现 2 831.841 210 和 2 831.919 949 cm^{-1} 处有水汽同位素(H₂O)和甲烷的吸收线,线强分别为 2.003×10^{24} 和 $2.977 \times 10^{21} \text{cm}^{-1} \cdot (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$,水汽吸收线较为适宜用作水汽柱浓度反演,对实测的太阳光谱进行归一化处理,获得高分辨率整层大气透过率谱,如图 3 所示。

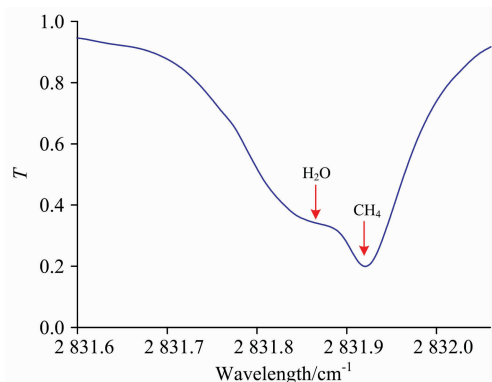


图 3 位于 2 831.60~2 832.06 cm^{-1} 波段内实测的高分辨率整层大气透过率谱

Fig. 3 Total atmospheric spectral transmittance measured by high resolution laser heterodyne instrument between 2 831.60 and 2 832.06 cm^{-1}

选择大气环境稳定、晴朗无云、气溶胶含量相对较低的天气条件,利用 Langley-plot 方法对激光外差太阳光谱测量装置进行现场定标,经波长标定及初步信号处理后得到太阳光谱。

为了判断在波数 2 831.841 210 cm^{-1} 处水汽与甲烷吸收的相对大小,利用 LBLRTM 辐射传输模式分别计算了仅有水汽、甲烷单种成分吸收的透过率谱,计算结果如图 4 所示。在波数 2 831.841 210 cm^{-1} 处水汽吸收所占比重更大,为此拟在此波段进行水汽柱浓度的反演。

针对选取波段,按光谱分辨率 0.000 5 cm^{-1} 进行插值,得到插值后的计算透过率谱和实测值比较。通过非线性最小二乘法与迭代相结合的方法,调整水汽与甲烷的浓度,使计算的透过率谱和实测值的均方根误差 RMS 最小。如图 5 所示,以 11 点 10 分时的观测数据为例,进行了水汽柱浓度的反演,图中给出了谱线拟合前后的计算透过率谱和实测值的对比。

在谱线峰谷处,迭代后的透过率谱和实测透过率谱的相对差别较大。这是由于激光外差太阳光谱测量装置带宽相对偏大,实测透过率谱的峰谷被平滑了。如果恢复实测透过率谱在峰谷处的精细结构,则和迭代后计算透过率谱十分接近。根据柱浓度计算公式,得到水汽柱浓度反演结果如表 1 所示。

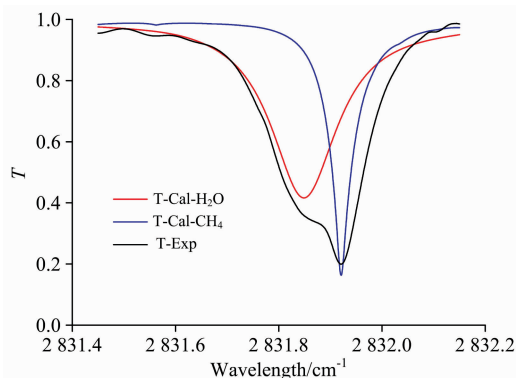


图 4 仅有水汽或甲烷吸收的计算透过率谱和实测的透过率谱对比

Fig. 4 Spectral transmittance calculated by LBLRTM only with water vapor and methane absorptions respectively and measured spectral transmittance

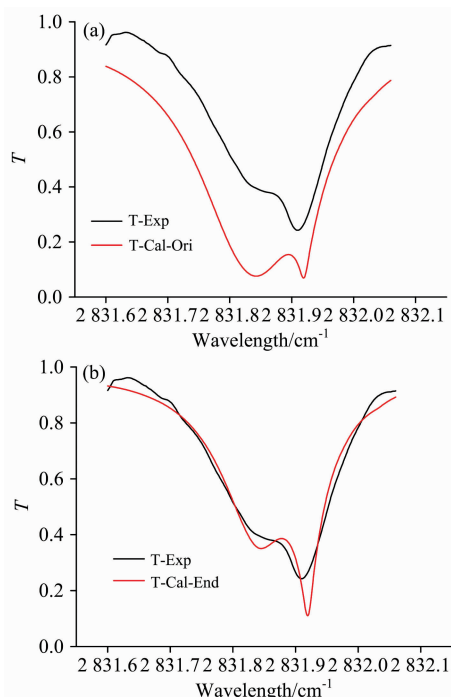


图 5 初始计算透过率谱和实测透过率谱 (a)、迭代后计算透过率谱和实测透过率谱 (b)

Fig. 5 Calculated spectral transmittance (a) and using iteration or not (b), compared with measured spectral transmittance

表 1 水汽柱浓度反演结果

Table 1 Inversion results of water vapor column concentration

序号	测量时刻 (hh:mm)	水汽柱浓度反演结果/(g·cm ⁻²)
1	10:40	1.113
2	10:50	1.106
3	10:57	1.124
4	11:10	1.163

测量实验时,利用微波辐射计同步进行水汽浓度观测。在表 1 四个时刻下,微波辐射计测量的水汽柱浓度分别为 1.416, 1.412, 1.364 和 1.394 g·cm⁻²,并与激光外差太阳光谱测量装置反演的水汽柱浓度进行比较,如图 6 所示。图中显示,两者的一致性相对较好,最小相对偏差为 16.59%,最大相对偏差为 21.69%。

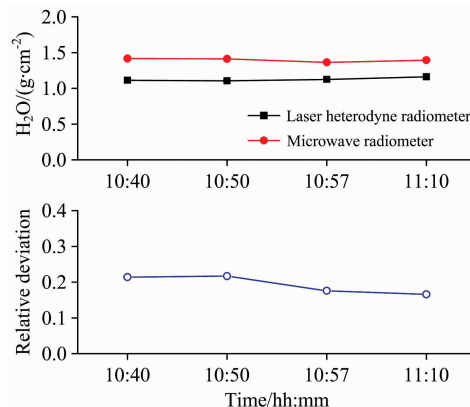


图 6 水汽柱浓度反演结果与微波辐射计的观测结果对比

Fig. 6 Comparison of the inversion results of water vapor column concentration and observation results of microwave radiometer

反演的水汽柱浓度与实测结果的偏差主要是由反演算法误差和装置测量误差所导致的。详细分析发现,反演算法误差主要包括:①辐射传输模式的计算误差;②实际大气温度的测量误差;③反演过程中由于甲烷浓度的不确定性引入的误差;④由于实际大气中的 HDO 丰度和自然丰度存在一定的差异,因此产生偏差^[15]。

装置测量误差包括:①利用 Langley-plot 法对装置进行定时存在误差;②波长标定过程中的误差导致测量信号存在波长漂移;③由于测量过程中系统噪声的影响,包括激光器引起的散粒噪声、激光强度相关噪声和探测器噪声,使得测量的外差信号存在一定误差;④从外差信号得到太阳光谱信号时,由于背景信号及直流信号存在微弱起伏,使得太阳光谱存在一定偏差。

由于该波段内同时包含水汽和甲烷的吸收,在反演水汽柱浓度的同时,对甲烷柱浓度也进行了反演。甲烷柱浓度的反演方法与水汽柱浓度的反演方法类似。在表 1 四个时刻下反演的甲烷柱浓度分别为 3.227×10^{19} , 3.264×10^{19} , 3.332×10^{19} 和 2.995×10^{19} molecules·cm⁻²。由于测量站点缺乏甲烷浓度的实测数据,文中以甲烷初始柱浓度作为参考值 (2.801×10^{19} molecules·cm⁻²),发现反演的甲烷柱浓度相对初始柱浓度的数值平均增加了 14.41%。

5 结论

在云南紫金山天文台观测站,利用实验室自行建立的高分辨率激光外差太阳光谱测量装置,获得了 3.53 μm 波段的高分辨率太阳光谱,并基于逐线积分辐射传输模式,采用非

线性最小二乘法和迭代相结合的方法实现了实际大气整层水汽和甲烷柱浓度的综合反演,反演的水汽柱浓度与微波辐射计实测结果的一致性较好。研究表明,激光外差太阳光谱测量装置结合反演算法是一种有效的整层大气透过率及水汽、

甲烷柱浓度的综合探测设备,在多组分气体浓度探测方面具有广泛的应用。后续将对反演算法进行优化完善,并对激光外差太阳光谱测量装置进行降噪处理,以期实现多组分气体浓度高度分布廓线的反演。

References

- [1] SHI Guang-yu(石广玉). Atmospheric Radiology(大气辐射学). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2007. 7.
- [2] RAO Rui-zhong(饶瑞中). Modern Atmospheric optics(现代大气光学). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2012. 68.
- [3] CAO Yu-jing, LIU Jing-miao, LIANG Hong, et al(曹玉静,刘晶淼,梁宏,等). Journal of Natural Resources(自然资源学报), 2011, 26(9): 1603.
- [4] WANG Hong-wei, HUA Deng-xin, WANG Yu-feng, et al(王红伟,华灯鑫,王玉峰,等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2013, 62(12): 120701.
- [5] QIU Yu-bao, SHI Li-juan, SHI Jian-cheng, et al(邱玉宝,石利娟,施建成,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(2): 310.
- [6] LI Jian-yu, XU Wen-qing, QIE Li-li, et al(李建玉,徐文清,伽丽丽,等). Optical Technique(光学技术), 2012, 38(1): 30.
- [7] SUN You-wen, LIU Wen-qing, XIE Pin-hua, et al(孙友文,刘文清,谢品华,等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2012, 61(14): 114.
- [8] CHENG Si-yang, GAO Min-guang, XU Liang, et al(程巳阳,高闽光,徐亮,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, 33(10): 1001001.
- [9] Okano S, Taguchi M, Fukunishi H, et al. Geophysical Research Letters, 2013, 16(6): 551.
- [10] Koide M, Taguchi M, Fukunishi H, et al. Geophysical Research Letters, 2013, 22(4): 401.
- [11] Tsai T R, Rose R A, Weidmann D, et al. Applied Optics, 2012, 51(36): 8779.
- [12] Wilson E L, McInden M L, Miller J H, et al. Applied Physics B, 2014, 114(3): 385.
- [13] YE Han-han, WANG Xian-hua, WU Jun, et al(叶函函,王先华,吴军,等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2011, 6(3): 208.
- [14] Weidmann D, Reburn W J, Smith K M. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(7): 073107.
- [15] Frankenberg C, Wunch D, Toon G, et al. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(2): 263.

Retrieval of Atmospheric H₂O Column Concentration Based on Mid-Infrared Inter-Band Cascade Laser Heterodyne Radiometer

ZHANG Shang-lu^{1,2}, HUANG Yin-bo¹, LU Xing-ji^{1,2}, CAO Zhen-song¹, DAI Cong-ming^{1*}, LIU Qiang¹, GAO Xiao-ming¹, RAO Rui-zhong¹, WANG Ying-jian¹

1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract Water vapor is an important component of the atmosphere. It is also an important factor to balance the radiation budget of the atmosphere system, which has an important influence on weather and climate change. The commonly used equipment for measuring the concentration of water vapor column, such as Radiosonde, Lidar, Microwave Radiometer, Solar Photometer, DOAS instrument and Fourier Transform Infrared Spectrometer are difficult to meet the requirements of high-resolution and portable mobility. Based on a high-sensitivity and high-resolution spectral detection technology, related researches have been carried out around the detection of water vapor column concentration. The main achievements are as follows: (1) Based on the laser heterodyne spectroscopy technology, a set of high-resolution laser heterodyne solar spectrum measuring devices with a narrow-line broadband inter-cascade laser as the local oscillator and the sun tracker is established, with a spectral resolution of 0.002 cm^{-1} . (2) The Langley-plot method is used to calibrate the high-resolution heterodyne solar spectrum measuring device. The field measurement is carried out at the Purple Mountain Observatory in Yunnan, and the direct measurement data of the $2\ 831\sim 2\ 833\text{ cm}^{-1}$ band solar spectrum are obtained. The high-resolution total atmospheric spectral transmittance is also obtained. (3) The Line by Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) is used to calculate the total atmospheric spectral transmittance, and the nonlinear least square fitting is carried out with the measured spectral transmittance. The inversion of water vapor column con-

centration is realized. The concentration of water vapor column is also observed by the Microwave Radiometer. The consistency between the inversion results and the measured results is relatively good, where the minimum relative deviation is 16.59%, and the maximum relative deviation is 21.69%. (4) The error of the inversion results and the measured results is mainly caused by the error of the inversion algorithm and the measurement error of the device. Inversion algorithm errors include the calculation error of the radiative transfer model, the actual temperature measurement error, the methane concentration uncertainty into the error, the deviation of HDO abundance and the natural abundance. The device measurement error includes the calibration error of device, the wavelength calibration error, the noise influence, the error caused by the weak fluctuation of the background signal and the DC signal. (5) The $2\ 831\sim 2\ 833\ \text{cm}^{-1}$ band selected contains the absorption of water vapor and methane, and the concentration of methane column is also retrieved. With the initial column concentration of methane as the reference value, it is found that the numerical average of the concentration of the methane column after the inversion is 14.41% higher than the initial column concentration. The high-resolution laser heterodyne solar spectrum measurement device combined with its inversion algorithm is an effective integrated equipment for detecting the whole atmospheric transmittance and the concentration of water vapor and methane column. It has a wide application prospect in the detection of multi-component gas concentration.

Keywords Laser heterodyne; Total atmospheric spectral transmittance; Nonlinear least squares; Water vapor column concentration

(Received Mar. 5, 2018; accepted Jul. 30, 2018)

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社