

文章编号: 1001-3806(2012)05-0670-04

湍流对激光吸收光谱信号的影响及改善方法研究

王立明¹ 张玉钧^{1*} 李宏斌² 周毅¹ 刘文清¹

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031; 2. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 为了解决可调谐激光二极管吸收光谱气体传感器在开放光路气体测量中 激光吸收光谱信号受到大气湍流的影响, 使光谱信号幅度随大气湍流的波动而改变造成获取的气体吸收光谱信号形状发生畸变问题, 改善湍流对激光吸收光谱信号的影响, 提高信号检测灵敏度, 采用改变激光波长扫描频率的办法进行了理论分析和实验验证, 当激光波长扫描频率为 2kHz 时, 吸收光谱相邻周期间的信号均方误差小于 0.1。结果表明, 该方法可以有效地改善激光吸收光谱信号受大气湍流的影响。

关键词: 光谱学; 波长快速扫描; 湍流影响; 吸收光谱; 开放光路

中图分类号: O433.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.024

Effect of turbulence on laser absorption signal and its improvement method

WANG Li-ming¹, ZHANG Yu-jun¹, LI Hong-bin², ZHOU Yi¹, LIU Wen-qing¹

(1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

Abstract: When tunable diode laser absorption spectroscopy gas sensor is used in open optical path gas measurement, the laser absorption signal can be influenced by atmospheric turbulence. The amplitude of absorption signal varies with the fluctuation of atmospheric turbulence so that the obtained gas absorption spectrum signal is deformed and the measurement accuracy is affected. In order to improve laser absorption spectrum signal quality impacted by atmospheric turbulence and measurement sensitivity, a method, changing the scan frequency of laser wavelength, was put forward. The variance of average signal between adjacent periods of absorption spectrum was less than 0.1 when the scan frequency of laser wavelength was 2kHz. This method effectively improved the laser absorption spectrum signal quality impacted by atmospheric turbulence.

Key words: spectroscopy; wavelength quick scan; turbulence effect; absorption spectrum; open optical path

引言

可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)是最近20年发展起来的一种具有高灵敏、高分辨、快速检测特点的气体检测技术,其基本原理是利用半导体激光器窄线宽和可调谐的特点,通过控制激光器波长快速扫描检测气体的单根吸收线以获得气体的吸收光谱,实现气体浓度的快速检测,并可避免其它气体干扰。近年来,可调谐红外激光光谱学得到了快速发展,在大气化学研究和污染气体监测中得到了广泛应用^[1-3]。然而,在开放光路

激光吸收光谱气体监测中,大气湍流对激光传输的影响会导致大气分子团折射率变化,所引起的闪烁效应会使光束发生强度起伏、相位起伏、光束扩展、光束飘移和像点抖动等现象,从而导致激光接收到的信号强度和方向发生变化^[4]。造成扫描获取的气体吸收光谱形状发生畸变,严重影响了测量精度^[5]。

大气湍流频率主要集中在低频成分^[6],提高激光器波长扫描频率,可以克服低频率成分湍流对激光吸收光谱信号的影响。以开放光路大气CO₂浓度连续监测为例,通过改变激光波长扫描频率,获得湍流对不同频率激光扫描吸收光谱信号的影响规律。在此基础上,详细讨论了激光波长快速扫描电路,并利用研制的开放光路可调谐激光气体传感器进行了连续监测实验,将监测数据与用Li7500涡相关观测仪^[7]观测到的数据进行了对比分析。

作者简介: 王立明(1974-),男,博士研究生,主要从事可调谐二极管激光吸收光谱学方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yjzhang@iofin.ac.cn

收稿日期: 2011-11-07; 收到修改稿日期: 2012-01-19

1 开放光路可调谐激光吸收光谱测量系统

1.1 系统组成

图1所示的是开放光路可调谐激光吸收光谱CO₂测量系统原理框图。系统主要包括分布反馈(distributed feedback, DFB)式可调谐半导体激光器、激光器温度和电流控制器、激光电流扫描控制器、光束分束器、菲涅耳透镜、自聚焦透镜、参考吸收池、角反射器、探测器、前置放大器和信号检测与处理器等。激光器温度和电流控制器控制激光器输出中心波长为1572nm, 激光电流扫描控制器输出线性扫描信号, 控制激光输出波长在中心波长附近线性扫描, 波长的扫描范围约为0.2nm。可调谐半导体激光器具有窄线宽和可调谐的特点, 典型线宽为10MHz, 气体吸收线宽一般为几百兆赫兹。因此, 通过控制激光器波长快速扫描检测气体的单根吸收线, 可以获得气体的单根吸收谱线^[2-5]。经激光器尾纤输出的激光由分束器分为两束, 一束通过参考吸收池, 被光电探测器接收, 作为波长锁定和气体浓度反演参考。另一束经过自聚焦透镜后, 以0.2mrad的发散角出射^[8], 经对面的同轴角反射器阵列反射回来, 由直径为200mm的菲涅耳透镜接收并聚焦到探测器上。探测器信号经过前置放大后, 由信号检测电路采集并处理, 计算出气体的测量浓度。

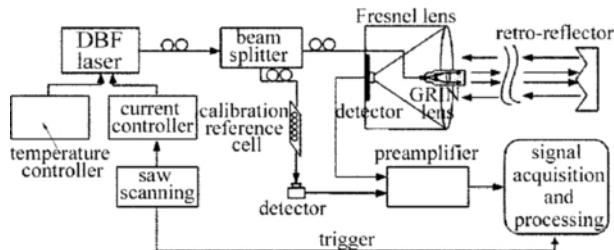


Fig. 1 Schematic diagram of monitoring CO₂ system based on the laser absorption spectroscopy

1.2 浓度反演原理及影响因素

由Beer-Lambert吸收定律, 激光通过被测气体吸收后的透过率为:

$$T = I_v / I_0 = \exp [-S(T) g(\nu - \nu_0) NL] \quad (1)$$

式中 I_v 是通过被测气体吸收长度为 L 时的光强, I_0 是初始光强, $S(T)$ 是中心频率 ν_0 处的吸收线强, $g(\nu - \nu_0)$ 是线型函数, N 是吸收分子数浓度。峰值吸收系数 $\alpha(\nu_0, T)$ 为:

$$\alpha(\nu_0, T) = S(T) g(\nu - \nu_0) N \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得被测气体的浓度为:

$$N = \frac{-\int \ln \left[\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right] d\nu}{S(T) L} \quad (3)$$

从(3)式可以看出, 吸收光谱信号决定了气体浓度反

演的精度。

在图1所示的测量系统中, 通过控制激光器波长快速扫描, 获得气体的单根吸收谱线, 如图2a所示, 图2b是拟合后的气体吸收谱线。当激光扫描气体吸收谱线受到湍流的影响时, 扫描吸收谱线发生畸变, 获得的光谱信号中不仅含有气体吸收成分, 而且存在湍流引起的波形畸变, 影响了气体浓度反演^[9-10]。因此, 研究湍流对激光大气传输信号幅度的影响规律, 采用合理的方法减弱湍流波动对扫描吸收光谱的影响, 是开放光路激光气体传感器中的重要问题之一。

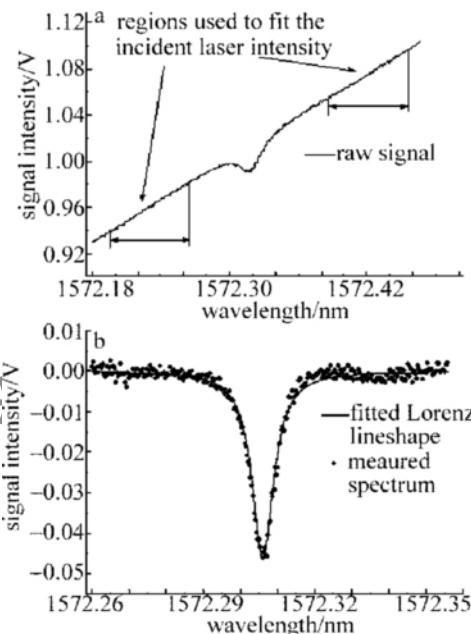


Fig. 2 Laser scan gas absorption spectrum and fitted spectrum

2 大气湍流影响激光吸收光谱测量信号分析

在开放光路实验中, 扫描信号经过内光路无吸收时测得的原始波形如图3所示。在同样条件下, 经过1424m光程对开放光路大气中CO₂测量时得到的光谱信号如图4所示。从图4中可以看出, 光谱吸收

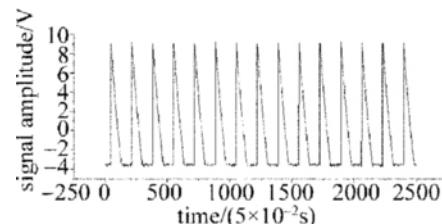


Fig. 3 Original waveform of scan signal

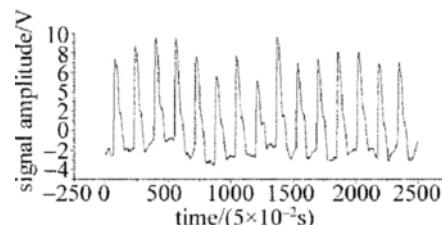


Fig. 4 Waveform of spectrum signal impacted by atmospheric turbulence

信号受到湍流严重影响,甚至在不出光的锯齿信号底部也发生了较大的起伏,严重影响了测量结果。

图5a~图5c分别是频率为40Hz,1000Hz和2000Hz时扫描时对应的接收信号波形。图5a是扫描频率为40Hz时,接收到的锯齿波形中间的吸收信号变形严重,不出光的锯齿底部起伏较大;图5b是扫描频率为1000Hz时,接收到的锯齿波形中间的吸收信

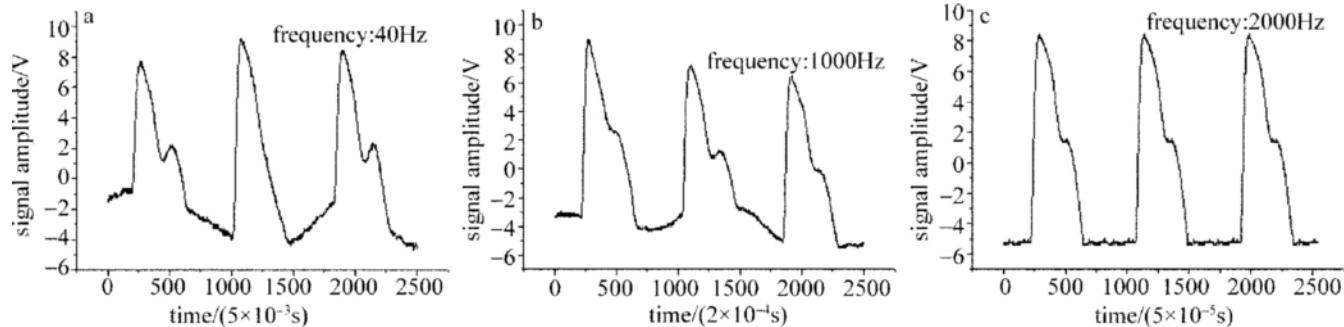


Fig. 5 Signal waveforms at different scan frequencies for open optical path

表1中给出了在湍流大气中传输时气体吸收光谱相邻周期间的信号均方误差随扫描频率的变化关系。从表1中可以看出,其它条件一定时,频率越高,相邻周期间的信号均方误差衰减越快,即受大气湍流的影响越小,当扫描频率大于2kHz时,受大气湍流的波动影响很小,相邻周期间的信号均方误差小于0.1。验证了大气湍流频率主要集中在低频成分。

Table 1 Dependence of variance of mean square error on frequency

scan frequency/Hz	40	100	400	1000	2000	4000	10000
mean square error	0.8313	0.7951	0.6512	0.2832	0.0924	0.0836	0.0819

3 激光波长快速扫描电路

由上述分析可知,提高激光波长扫描频率可以显著地改善湍流对激光扫描吸收光谱信号的影响,因此,高性能、频率可变的激光波长快速扫描电路成为开放光路激光气体传感器中的关键。

ICL8038^[11]是一种具有多种波形输出的精密振荡集成电路,能产生从0.001Hz~300kHz的低失真正弦波、三角波、矩形波等信号,输出频率随温度漂移小于 $250 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,三角波输出线性度优于0.1%。图6所示的是基于ICL8038设计的激光波长扫描电路,电位器W₁的作用是调整信号占空比,可以将三角波信号调整为锯齿波,电位器W₂的作用是调整三角波信

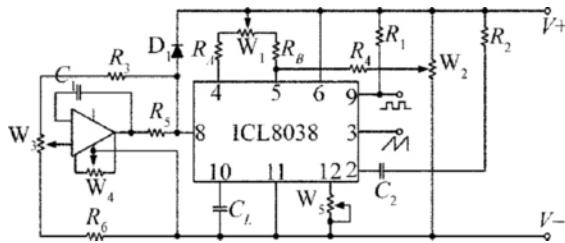
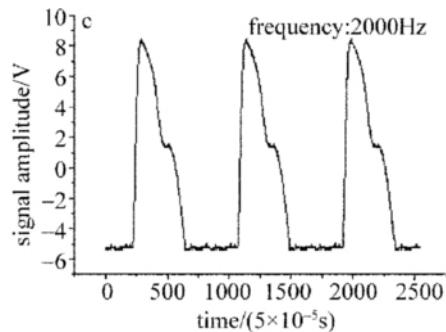


Fig. 6 Schematic diagram of circuit for laser wavelength scan

号变形减小,不出光的锯齿底部起伏变小;图5c是扫描频率为2000Hz时,接收到的锯齿中间的吸收信号变形情况已不明显,不出光的锯齿底部变得平坦。通过计算利用不同扫描频率得到的气体反演浓度值也相差较大,扫描频率低时测得的浓度变化范围较大,而扫描频率高时测得的浓度变化范围小,与真实环境中CO₂浓度值更加吻合。



号幅度的对称性,通过调整电位器W₃可以实现3脚输出的锯齿波信号在不同的频率变化。锯齿波信号通过运放射随后作为激光器的电流控制扫描信号,9脚输出的方波信号作为采集触发信号。

信号波形主要由电阻R_A,R_B及振荡电容C_L决定,R_A和R_B通常选取几千欧,当R_A=R_B=R时,f=0.33/ RC_L ,为此要产生1kHz振荡频率,选取R_A=R_B=4kΩ时,C_L=82.5nF。通过调整电位器W₃阻值,实现几十赫兹到10kHz的波长扫描频率。

4 实验结果与数据分析

2010年6月,在中国科学院山东省禹城市生态站

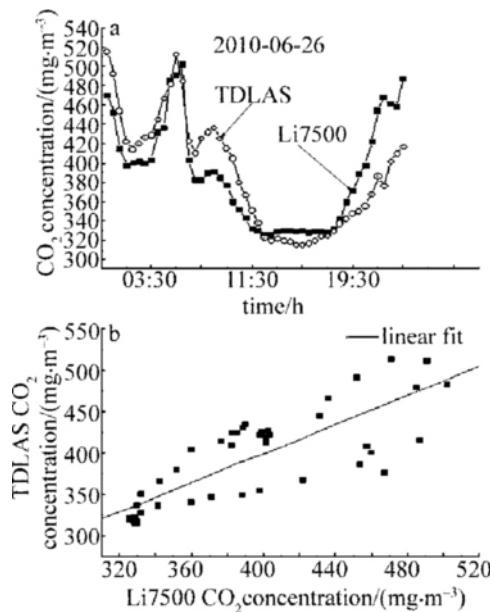


Fig. 7 Comparison of monitoring results at Shandong Yucheng Ecological Station of CAS in June, 2010

进行了观测实验,利用激光气体传感器系统对开放光路CO₂浓度进行连续监测,采用的激光波长扫描频率为40Hz。CO₂浓度的连续测量结果与Li7500仪器的数据进行了对比,结果如图7所示,两种仪器测量结果相关性为0.82。

2011年4月,在中国科学院山东省禹城市生态站进行了观测实验,利用激光扫描频率为4kHz的激光气体传感器系统对开放光路CO₂浓度进行连续监测,并将监测数据与Li7500仪器的数据进行了对比,结果如图8所示,两种仪器测量结果相关性达到了0.95以上。

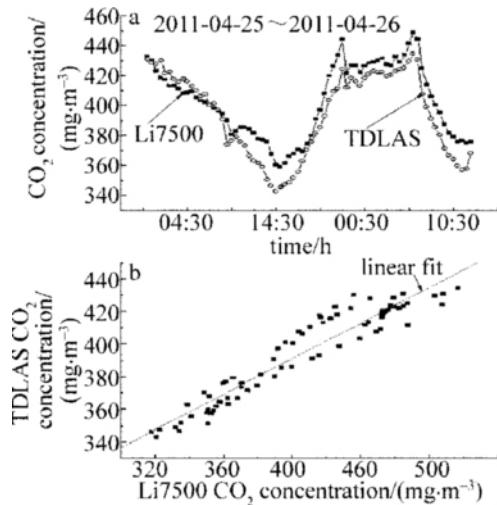


Fig. 8 Comparison of monitoring results at Shandong Yucheng Ecological Station of CAS in April, 2011

图7b和图8b的线性拟合参数如表2所示。

Table 2 Concentration line fitted parameters on different laser scan frequency

$Y = A + B \cdot X$	fiting coefficient A	fiting coefficient B	relevance R
40Hz scan frequency	47.972	0.879	0.818
4kHz scan frequency	-45.723	1.092	0.953

5 结 论

对开放光路大气CO₂浓度连续监测,分析了大气湍流对可调谐激光气体传感吸收光谱单次测量的影响。设计了频率可变的激光波长快速扫描电路,实验研究了开放光路激光气体传感器信号波形特性与激光波长扫描频率的关系,当激光波长扫描频率为2kHz时,吸收光谱相邻周期间的信号均方误差小于0.1。

分别选择不同的激光波长扫描频率进行了外场CO₂浓度连续监测实验,将测量结果与用Li7500涡相关观测仪的结果进行了对比,结果表明,当激光波长扫描频率为4kHz时,监测数据与Li7500涡相关观测仪的数据相关性达到了0.95,有效地改善了光谱吸收信号受大气湍流的影响,提高了系统检测灵敏度。该研究对激光吸收光谱开放光路监测及相关领域具有一定的实用价值^[10,12]。

参 考 文 献

- NELSON D D, ZAHNISER M S, McMANUS J B, et al. A tunable diode laser system for the remote sensing of on-road vehicle emissions [J]. Applied Physics, 1998, 67(4): 433-441.
- WERLE P, SLEMR F, MAURER K, et al. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37(2/3): 101-114.
- DESJARDINS R L, DENMEAD O T, HARPER L, et al. Evaluation of a micrometeorological mass balance method employing an open-path laser for measuring methane emissions [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(39): 6855-6866.
- RAO R ZH. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005: 150-153 (in Chinese).
- WANG M, ZHANG Y J, LIU J G, et al. Applications of a tunable diode laser absorption spectrometer in monitoring greenhouse gases [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(6): 363-365.
- ENG R S, MANTZ A W, TODD T R. Improved sensitivity of tunable-diode-laser open-path trace gas monitoring systems [J]. Applied Optics, 1979, 18(20): 3438-3442.
- LI-COR. LI-7500 open path CO₂/H₂O analyzer [EB/OL]. [2005-12-31]. <http://www.kohsieh.com.tw/PDF-Files/LICOR/LI7500.pdf>.
- TARSITANO C G, WEBSTER C R. Multilaser herriott cell for planetary tunable laser spectrometers [J]. Applied Optics, 2007, 46(28): 6923-6935.
- DURRY G, POUCHET I, AMAROCHE N, et al. Shot-noise-limited dual-beam detector for atmospheric trace-gas monitoring with near-infrared diode lasers [J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5609-5619.
- ZHANG W T, ZHU B H. Research on the laser beam through turbulence atmosphere channel [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(4): 784-787 (in Chinese).
- INTERSIL. ICL8038 datasheet [EB/OL]. [2001-04-12]. <http://www.soiseek.cn/pdf/INERSIL/ICL8038.pdf>.
- GUO Zh H, XU D H, WANG Sh P, et al. Effect of atmospheric turbulence on laser beam propagation [J]. Laser Technology, 1992, 16(2): 65-72 (in Chinese).