

基于正交锁相放大器与分段快速傅里叶变换的 红外乙炔传感器

苗澍茁^{1,2}, 姚丹^{1,2}, 钟国强^{1,2}, 董明^{1,2}, 郑传涛^{1,2*}, 王一丁^{1,2}

¹ 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012;

² 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 吉林 长春 130012

摘要 针对可调谐激光二极管吸收光谱技术, 提出用于对气体吸收信号进行分段快速傅里叶变换提取二次谐波信号的方法, 将该方法与传统正交锁相放大器的谐波信号处理方法进行对比; 利用 MATLAB 软件模拟产生乙炔气体吸收信号, 分别验证正交锁相放大器和分段快速傅里叶变换算法的功能; 设计基于 LabVIEW 软件的正交锁相放大器与快速傅里叶变换传感器信号处理平台, 结合近红外 1.533 μm 的分布反馈激光器以及自主研发的 Herriot 气室, 建立近红外乙炔气体传感系统; 利用配制的乙炔气体样品开展传感器的标定实验和 Allan 标准差测试实验。结果表明: 两种方法都具有较好的线性拟合优度, 并呈现出相似的稳定性。

关键词 光谱学; 气体传感器; 分段快速傅里叶变换; 正交锁相放大器

中图分类号 TN21

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0911014

Infrared Acetylene Sensor Based on Orthogonal Lock-In Amplifier and Segmental Fast Fourier Transformation

Miao Shuzhuo^{1,2}, Yao Dan^{1,2}, Zhong Guoqiang^{1,2}, Dong Ming^{1,2},
Zheng Chuantao^{1,2*}, Wang Yiding^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

² Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract For tunable diode laser absorption spectroscopy, we propose a method of extracting the second harmonic ($2f$) signal by cutting off the absorption signal for segmental fast Fourier transformation, and the proposed method is compared with the harmonic signal processing method of traditional orthogonal lock-in amplifier. C_2H_2 absorption signal is generated based on MATLAB software, and functions of orthogonal lock-in amplifier and segmental fast Fourier transformation are verified, respectively. A sensing signal processing platform is realized for orthogonal lock-in amplifier and segmental fast Fourier transformation based on LabVIEW software. A near-infrared C_2H_2 sensor system is established by combining the 1.533 μm distributed feedback near-infrared laser and a developed Herriot gas cell. The sensor calibration and Allan standard deviation measurements are carried out with the prepared C_2H_2 gas samples. The results show that both methods possess a good goodness of linear fitting and reveal a similar stability.

Key words spectroscopy; gas sensor; segmental fast Fourier transformation; orthogonal lock-in amplifier

OCIS codes 300.6340; 300.6360; 040.3060

1 引言

可调谐激光二极管吸收光谱技术 (TDLAS) 是

一种采用激光测量吸收光谱的光学和光谱学方法。TDLAS 气体检测技术包括直接吸收光谱技术 (DAS) 和波长调制光谱技术 (WMS)^[1-8]。相比较而

收稿日期: 2018-04-22; 修回日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0405300, 2016YFD0700101, 2016YFC0303902)、国家自然科学基金 (61775079, 61627823)、吉林省重点科技研发计划项目 (20180201046GX)、吉林省省级产业创新专项资金 (2017C027)

* E-mail: zhengchunatao@jlu.edu.cn

言,WMS 因具有更强的抗噪声能力而应用得更加广泛。目前,国内外研究人员在使用 WMS 时,通常利用正交锁相放大器(OLIA)技术,通过对吸收信号进行乘法运算、低通滤波和幅值提取来提取二次谐波信号,用其峰值表征气体浓度^[9-13]。

与传统的 OLIA 方法不同,本文提出利用分段快速傅里叶变换(SFFT)提取二次谐波信号的方法,即对采集得到的吸收光谱信号进行分段处理,采用傅里叶变换提取每段信号的二倍频分量的幅度,再在一个周期内形成一个完整的二次谐波信号波形。利用 MATLAB 软件分别对 2 种方法进行建模及功能验证。运用 LabVIEW 软件分别设计基于 2 种方法的乙炔气体传感信号处理平台,将其应用于近红外激光乙炔气体传感系统^[14-15]。通过开展乙炔气体检测实验,对比 2 种方法的性能。

2 近红外激光乙炔气体传感系统

2.1 系统组成

近红外激光乙炔气体传感系统结构如图 1 所示,主要由电学系统、光学系统以及配气系统组成。电学系统包括具有宽带波长可调谐、线宽窄、功率稳

定等特点的分布式反馈(DFB)激光器^[16]($1.533\ \mu\text{m}$)、数据采集卡(DAQ,NI 公司,USB6211 型)、电流驱动与温控集成模块(Wavelength 公司,LDTC 0520 型)。使用 LabVIEW 软件产生 5 Hz 三角波信号并叠加 5 kHz 正弦波信号控制数据采集卡产生激光器的扫描信号和驱动信号。光电探测器(Thorlabs 公司,PDA10 型)的输出信号通过数据采集卡采集数据后送入 LabVIEW,LabVIEW 分别使用 OLIA 和 SFFT 提取二次谐波信号,并存储二次谐波信号峰值。在光学系统中,激光器输出的激光通过准直透镜(L_1)后与 635 nm 的准直光束合束,合束后的激光通过反射镜(M_2 、 M_4)反射进入 Herriot 气室,经气体吸收后的出射光信号通过反射镜(M_3)以及聚光透镜(L_2)聚焦到光电探测器。采用纯氮气与标准浓度的乙炔气体样品(体积分数为 2×10^{-3})进行混合得到实验所需浓度的乙炔气体样品。将配制的气体样品通过导气管导入气室中开展实验,提取谐波信号,测量传感器的性能。图 1 中采用多个反射镜的目的是增加光束调整的维度,使从同一位置入射和出射的光束都能以正确的角度进入气室和到达探测器。

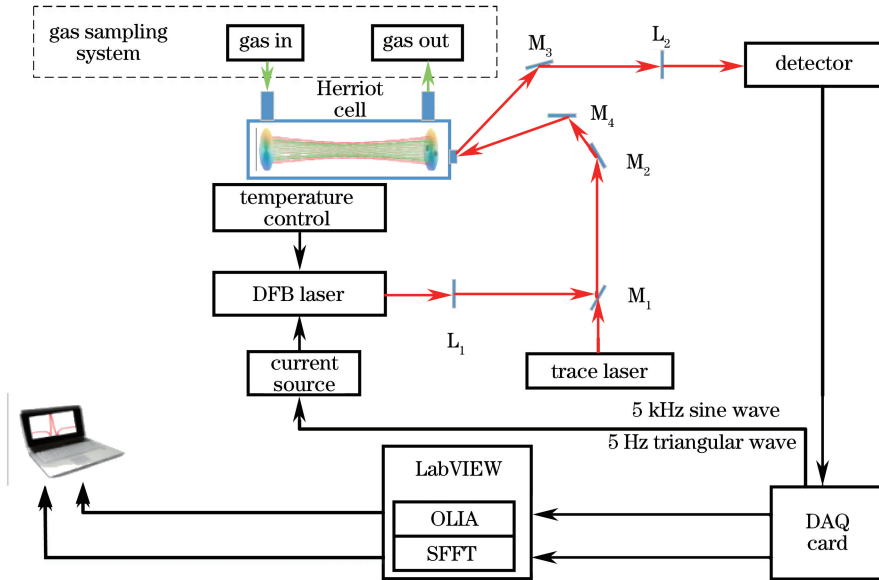


图 1 基于 OLIA 与 SFFT 的近红外激光乙炔气体传感系统结构

Fig. 1 Schematic of near infrared laser C_2H_2 sensor system based on OLIA and SFFT

2.2 基于 OLIA 的谐波信号处理方法

基于 OLIA 的二次谐波信号处理方法如图 2(a)所示,被测信号分别与两路相位差为 90° 且信号频率为调制信号频率 2 倍的参考信号相乘,通过乘法器输出的信号经过低通滤波处理后即可得到同相谐波分量 x_1 与正交谐波分量 x_2 ,对这两个分

量的平方求和后再求均方根,即可得到二次谐波信号。采用 OLIA 时,根据正交谐波幅值和同相谐波幅值即可计算被测信号的幅值及其与参考信号之间的相位差。与传统的 OLIA 相比,该 OLIA 不需要精确的移相即可得到谐波信号。在实际应用中,为了降低采样过程中量化噪声的影响并节省存储空

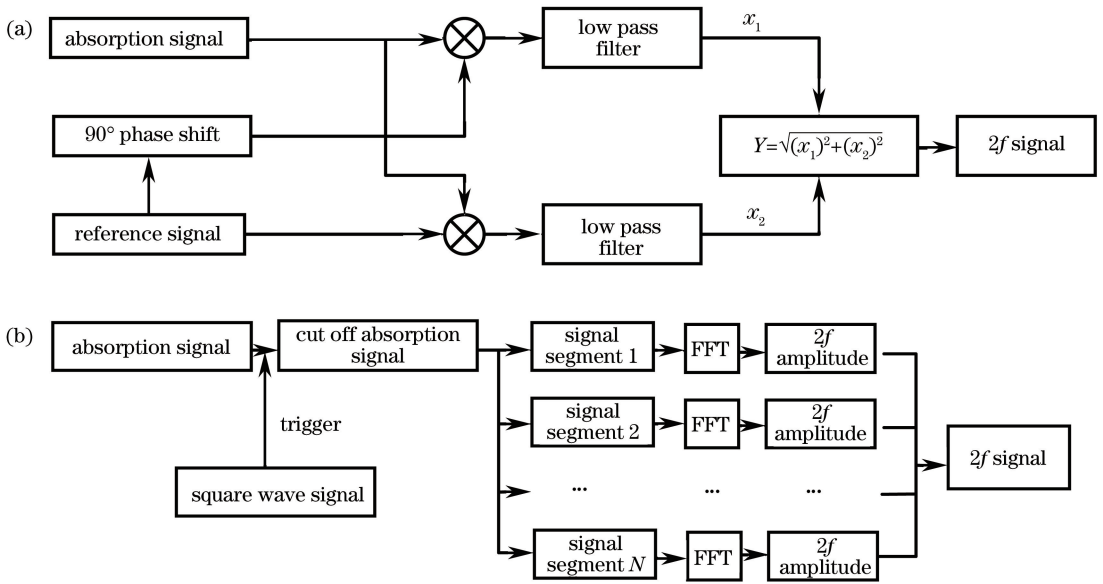


图 2 基于(a) OLIA 与(b) SFFT 的二次谐波信号提取流程图

Fig. 2 Flow charts of extracting $2f$ signal based on (a) OLIA and (b) SFFT

间,通常选用方波信号代替正弦波信号作为参考信号,目的是提高谐波信号的精度。

2.3 基于 SFFT 的谐波信号处理方法

基于 SFFT 的二次谐波信号处理流程如图 2 (b)所示。参考信号为与驱动激光器的三角波信号同频、同相的方波信号。当控制器捕获到方波信号的上升沿后,即开始采样吸收信号,采样完成后,对被测信号进行截断处理,平均分段后,对每段的吸收信号进行快速傅里叶变换(FFT),然后求取小段信号内二倍频信号的幅度,处理整个周期的信号后,即可得到完整的二次谐波信号。

FFT 分为时间抽选基-2 算法(库利-图基算法, DIT-FFT)和频率抽选基-2 算法(桑德-图基算法, DIF-FFT)^[17-18]。本研究主要基于 DIT-FFT 算法,采用蝶形运算对输入信号进行频谱分析,通过 FFT 运算得到吸收信号各频率分量的幅度变化。需要注意的是,二次谐波信号的精度与分段数有关,采用的分段数越多,二次谐波的精度越高,但系统的处理时间也越长。

3 算法建模与仿真

为了验证算法的功能,采用 MATLAB 软件对乙炔传感信号的处理过程进行建模与仿真。首先,合成乙炔模拟吸收信号,其中心波长为 $1.533 \mu\text{m}$,中心电流为 69.5 mA 。激光器的驱动信号为 5 Hz 三角波叠加 5 kHz 正弦波电压信号,通过转换系数为 20 mA/V 的压控恒流源电路后产生激光器驱动

电流。根据 HITRAN 数据库得到乙炔气体在 300 K 、 101.325 kPa 、 15 m 光程条件下的吸收系数,对得到的吸收系数随波数变化的曲线以及波数随时间变化的曲线进行插值拟合,可得到吸收系数随扫描时间的变化曲线。根据 Lambert-Beer 定律得到被气体吸收后的光功率,设定光电传感器的转换系数为 1 A/W 、探测器的偏置电阻为 $0.5 \text{ k}\Omega$,最终可以得到气体的吸收信号波形。当乙炔气体的体积分数为 10^{-4} 时,产生的模拟吸收信号如图 3(a)所示。采用 MATLAB 中的 Simulink 平台建立 OLIA 模型,对其功能进行仿真。该模型通过连接 MATLAB 工作区间以及设置模型参数,导入上文合成的输入信号,将其分别与两个相位差为 90° 的参考方波信号相乘。当乙炔的体积分数为 10^{-4} 时,提取到的二次谐波信号如图 3(b)所示。通过调用 MATLAB 的 $Y = \text{fft}(x, n)$ 函数对输入信号进行 SFFT 变换处理(其中 x 为输入信号, n 为每一小段总点数, Y 为此段频谱幅度值序列),再循环得到每段信号在 10 kHz 频率点处的幅值,就可以得到二次谐波信号波形。图 3(c)所示为当乙炔气体体积分数为 10^{-4} 时提取到的二次谐波信号。由图 3 可知,利用这两种方法均可提取出二次谐波信号,从而证实了算法的合理性。

4 乙炔气体检测实验

实验系统如图 4 所示。设置 DFB 激光器的温度为 $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$,采用 Envirionics 公司的 Series 4000 型

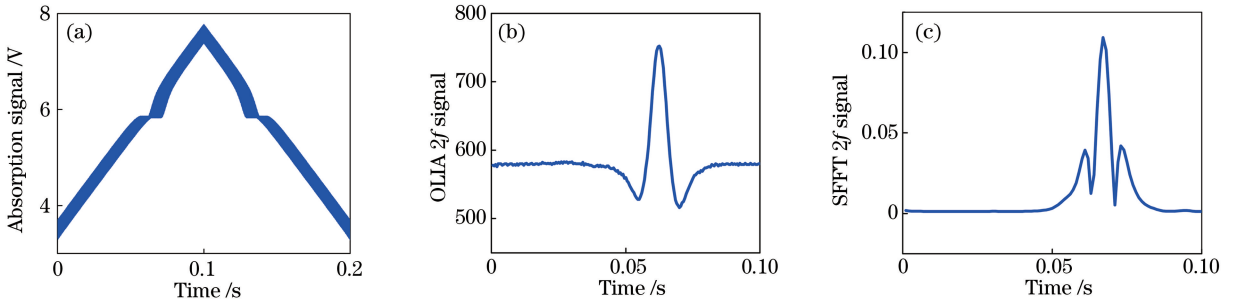


图 3 乙炔体积分数为 10^{-4} 时, (a) 模拟产生的吸收信号以及采用 (b) OLIA 与 (c) SFFT 得到的二次谐波信号

Fig. 3 (a) Simulated absorption signal as well as output $2f$ signals from (b) OLIA and

(c) SFFT with C_2H_2 volume fraction of 10^{-4}

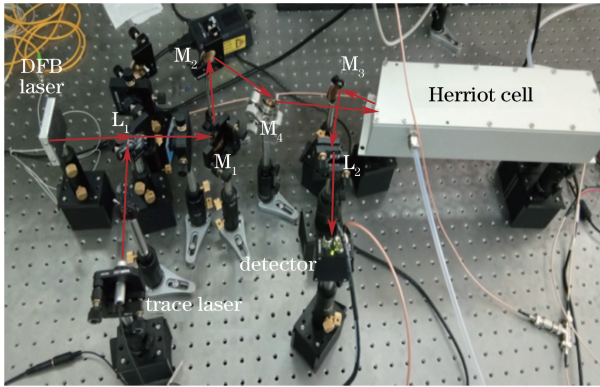


图 4 近红外激光乙炔传感系统照片

Fig. 4 Photograph of near-infrared laser C_2H_2 sensor system

气体混合系统, 通过软件调节氮气与乙炔气体的流量, 得到实验所需浓度的乙炔气体样品。将配制好的气体通过导气管导入 Herriot 气室中, 吸收光程为 15 m; 探测器的输出信号通过数据采集卡采集数据后分别送入基于 OLIA 和 SFFT 的 LabVIEW 传感信号处理平台, 提取二次谐波信号并存储其幅度。

4.1 气体标定实验

利用 Environics 气体混合系统配制体积分数为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 、步进为 10^{-4} 的乙炔气体样品, 并将其分别导入气室中, 分别利用 OLIA 与 SFFT 算法对光电探测器输出的信号进行处理, 提取二次谐波信号的幅度。每种浓度气体样品的实验时间为 5 min, 两种方法的测试结果如图 5 所示。

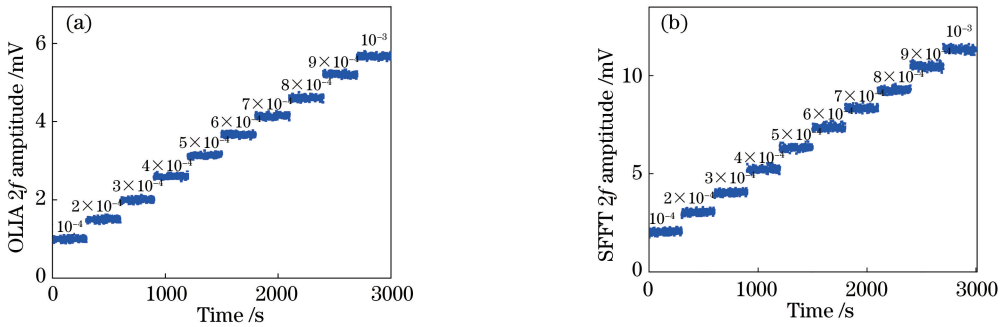


图 5 利用 (a) OLIA 与 (b) SFFT 方法得到的乙炔传感器实验标定结果

Fig. 5 C_2H_2 sensor calibration results obtained by (a) OLIA and (b) SFFT

为了比较两种方法的线性拟合优度, 对每种浓度气体样品的二次谐波信号幅度进行平均, 得到的二次谐波信号幅度 $A(2f)$ 和气体体积分数 C 的关系如图 6 所示。根据图 6(a) 得到的拟合关系式为

$$C = 192.2214A(2f) - 95.00481, \quad (1)$$

根据图 6(b) 得到的拟合关系式为

$$C = 97.74554A(2f) - 116.66024. \quad (2)$$

采用 OLIA 得到的曲线的拟合优度为 0.99931, 采用

SFFT 得到的拟合优度为 0.99901。从拟合优度的比较结果看, OLIA 方法的拟合优度更好。

4.2 Allan 方差及检测下限

为了进一步对比测试 OLIA 与 SFFT 方法的性能, 向气室中通入体积分数为 0 的乙炔气体样品, 设定采样时间为 0.4 s, 分别采用两种方法连续测量提取到的二次谐波信号的幅度, 总测试时间为 2000 s。将连续测得的幅值通过(1)式和(2)式的标定结果换

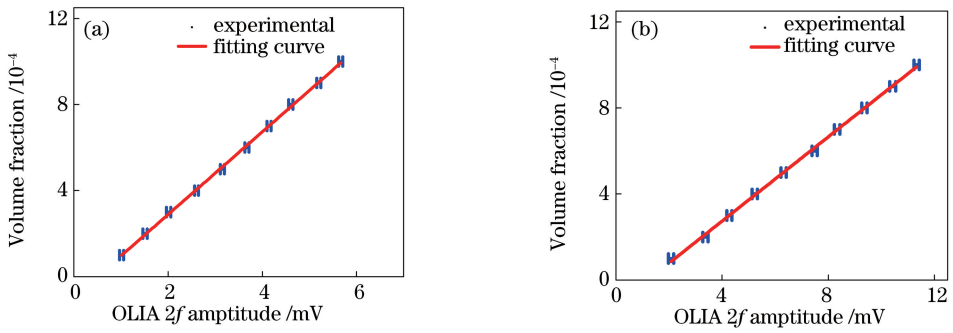


图 6 二次谐波信号幅度与乙炔气体浓度的关系曲线。(a) OLIA;(b) SFFT

Fig. 6 Fitting curves of $2f$ amplitude versus C_2H_2 concentration. (a) OLIA; (b) SFFT

算为气体体积分数后计算传感器的 Allan 标准差,结果如图 7 所示。由图 7 可知:随着积分时间 t 增加,OLIA 与 SFFT 这两种方法得到的 Allan 标准差几乎呈现相同的变化趋势;当积分时间为 0.4 s

时,利用 OLIA 得到的检测下限为 7.2×10^{-6} ,在 101.325 kPa、300 K、15 m 光程条件下,对应的吸收系数为 0.0047;利用 SFFT 得到的 1σ 检测下限为 5.6×10^{-6} ,对应的吸收系数为 0.0037。

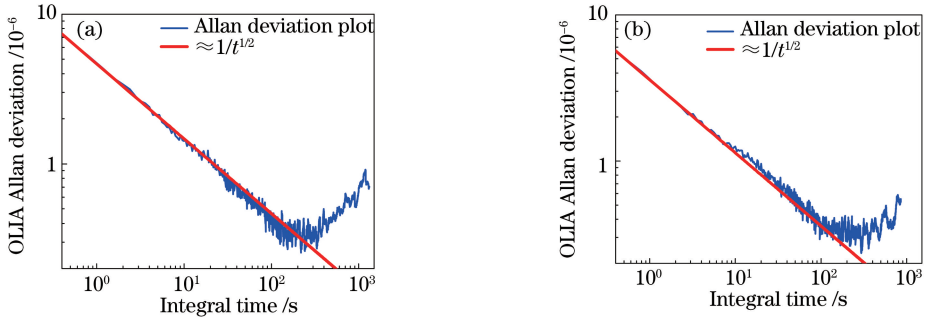


图 7 近红外乙炔气体传感器的 Allan 标准差曲线。(a) OLIA;(b) SFFT

Fig. 7 Allan deviation curves of near-infrared C_2H_2 sensor system. (a) OLIA; (b) SFFT

5 分析与讨论

OLIA 和 SFFT 所得实验结果的对比如表 1 所示。由表 1 可知,两种方法都具有较好的拟合优度,且 OLIA 稍好;两种方法在 1 个二次谐波周期内的峰值均与气体浓度呈线性关系。Allan 方差结果显示,两种方法具有相似的检测下限和稳定的变化趋势。在原理方面,OLIA 利用了信号和噪声统计特性的差异,通过互相关运算可以将被测信号的二次谐波信号解调出来,屏蔽掉其他频率成分的噪声信号。SFFT

法则直接对被测信号进行 FFT 变换,提取分段信号的二倍频分量。鉴于检测二次谐波信号对测量痕量气体具有重要意义,因此在不影响检测精度的情况下,可使用 SFFT 代替传统的 OLIA 提取二次谐波,以省去参考信号产生、移相等环节,简化传感系统的结构。在研制基于 FFT 的红外气体传感器系统时,可进一步采用擅长浮点数运算的数字信号处理器(DSP)以及现场可编程门阵列(FPGA)作为核心算法的执行部件,再结合数模转换器件,研制面向 TDLAS 气体检测的专用型 SFFT 信号分析仪。

表 1 OLIA 与 SFFT 所得实验结果的对比

Table 1 Comparison of experimental results obtained by OLIA and SFFT

| Method | Linear fitting degree | Detection limit / 10^{-6} | Principle | Portable use |
|--------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------|
| OLIA | 0.99931 | 7.2 | Correlation calculation | DSP/FPGA |
| SFFT | 0.99901 | 5.6 | Frequency-domain analysis | DSP/FPGA |

6 结 论

本研究提出了在 TDLAS 气体检测实验中运用 SFFT 提取二次谐波的方法,并验证了该方法的可行

性。利用 MATLAB 合成乙炔气体的模拟吸收信号建立 OLIA 模型,并编写了 SFFT 频谱分析程序,利用两种方法仿真得到了二次谐波信号。为了验证所提方法的实用性能,采用 LabVIEW 作为算法的

运行平台,建立近红外乙炔检测系统,配制不同浓度的乙炔气体样品,开展乙炔检测实验。比较结果表明,两种方法都具有较好的线性拟合优度,并呈现出相似的稳定性。仿真结果和气体检测实验结果为进一步研制面向 TDLAS 气体检测的专用型分段快速傅里叶频谱仪提供了依据。

参 考 文 献

- [1] He Q X, Zheng C T, Liu H F, *et al.* Performance improvement of a near-infrared acetylene sensor system by reducing residual amplitude modulation [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(5): 055702.
- [2] Li C G, Dong L, Zheng C T, *et al.* Compact TDLAS based optical sensor for ppb-level ethane detection by use of a 3.34 μm room-temperature CW interband cascade laser[J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 232: 188-194.
- [3] Wang Y, Zhang R. Photo detector characteristics effect on TDLAS gas detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0230002.
王燕, 张锐. 光电探测器特性在 TDLAS 气体检测中的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0230002.
- [4] Dong M, Zheng C T, Miao S Z, *et al.* A mid-infrared carbon monoxide sensor system using wideband absorption spectroscopy and a single-reflection spherical optical chamber [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 450-456.
- [5] Dong M, Zheng C T, Miao S Z, *et al.* Development and measurements of a mid-infrared multi-gas sensor system for CO, CO₂ and CH₄ detection[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2221.
- [6] Yao L, Liu W Q, Liu J G, *et al.* Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0215003.
姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.
- [7] Qu S M, Wang M, Li N. Mid-infrared trace CH₄ detector based on TDLAS-WMS [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3174-3178.
曲世敏, 王明, 李楠. 基于 TDLAS-WMS 的中红外痕量 CH₄ 检测仪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3174-3178.
- [8] Cai Y, Wu S Q, Wu A, *et al.* Study on calculation method of detection limit based on wavelength modulation spectroscopy [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 390-393, 397.
蔡彦, 吴尚谦, 伍昂, 等. 波长调制光谱检测下限计算方法的研究 [J]. *激光技术*, 2012, 36(3): 390-393, 397.
- [9] Liu H F, Li B, He Q X, *et al.* Development of a digital orthogonal lock-in amplifier and its application in methane detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 0423004.
刘慧芳, 李彬, 何启欣, 等. 数字正交锁相放大器的研制及其在甲烷检测中的应用 [J]. *光子学报*, 2016, 45(4): 0423004.
- [10] Dong L, Ma W G, Yin W B, *et al.* Experimental study on harmonic detection of methane by use of a digital lock-in amplifier [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(3): 473-476.
董磊, 马维光, 尹王保, 等. 利用数字锁相放大器对甲烷气体进行谐波探测的实验研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(3): 473-476.
- [11] Xia H, Wu B, Zhang Z R, *et al.* Stability study on high sensitive CO monitoring in near-infrared [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214208.
夏滑, 吴边, 张志荣, 等. 近红外波段 CO 高灵敏检测的稳定性研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214208.
- [12] Wang F P, Chang J, Wang Q, *et al.* TDLAS gas sensing system utilizing fiber reflector based round-trip structure: double absorption path-length, residual amplitude modulation removal [J]. *Sensors and Actuators A*, 2017, 259: 152-159.
- [13] Li H, Liu J G, He Y B, *et al.* Simulation and analysis of second-harmonic signal based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(4): 881-885.
李晗, 刘建国, 何亚柏, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱二次谐波信号的模拟与分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(4): 881-885.
- [14] He Q X, Zheng C T, Liu H F, *et al.* A near-infrared acetylene detection system based on a 1.534 μm tunable diode laser and a miniature gas chamber [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 75: 93-99.
- [15] Ding Z Q, Bao J L, Zhao H X, *et al.* Acetylene gas concentration on-line monitoring using TDLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1015-1019.
丁志群, 鲍吉龙, 赵洪霞, 等. 乙炔气体浓度的 TDLAS 在线监测 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 1015-1019.
- [16] Wang Q, Guo J J, Chen W, *et al.* Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101004.
王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0101004.

- [17] Wu X K. Portable frequency spectrum monitoring equipment based on FFT [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 1-57.
吴向葵. 基于 FFT 的便携式频谱监测仪的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 1-57.
- [18] Li F. Algorithm design and realization of the Fourier spectrum analyzer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 1-70.
李飞. 傅里叶频谱分析仪的算法研究与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 1-70.