

基于FFT滤波高精度光声二次谐波检测技术的研究

万留杰^{1,2}, 甄超³, 邱宗甲¹, 李康¹, 马凤翔³, 韩冬^{1,2}, 张国强^{1,2*}

1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061

摘要 基于波长调制光谱(WMS)信号二次谐波分量检测的光声光谱(PAS)气体检测技术在电力、化工和医疗等行业得到了广泛应用。虽然采用二次谐波分量检测技术可以有效减小光声信号中的相关噪声,但检测信号中仍存在检测系统的非相关噪声,影响了光声检测系统对痕量气体的检测能力以及测试结果的准确度。为研究如何削弱光声光谱检测系统的非相关噪声对二次谐波信号的影响,改进检测系统的最低检测限,提高测量准确度,搭建了一套以可调谐分布反馈式(DFB)半导体激光器为激励光源的一阶纵向共振光声光谱气体检测系统,首次提出了使用快速傅里叶变换(FFT)对光声二次谐波信号进行滤波的新方法。首先根据气体光声光谱检测系统的噪声频谱对锯齿波扫描信号频率进行了优化选择,使检测系统背景噪声对光声检测信号的影响降至最小,然后使用FFT对与扫描锯齿波同频率的光声二次谐波信号的基波分量进行提取,虽然提取出的基波分量幅值小于光声信号二次谐波分量最大值,但由于光声检测系统背景噪声减小的更多,实现了改进光声检测系统最低检测限的目的。通过对102, 75.1, 50, 30.3, 15.3, 7.7, 1, 0.79, 0.57, 0.35和0.17 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体测试结果进行分析和对比,使用FFT对光声二次谐波信号进行滤波处理后,测试结果读数非常稳定,当信噪比为3时,系统的最低检测限从0.43 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低为30.6 nL $\cdot \text{L}^{-1}$,说明FFT滤波对于消除波长调制光谱信号二次谐波分量中的非相关噪声非常有效,可以提高测量准确度和改进光声光谱检测系统最低检测限。研究成果可为使用波长调制光谱信号二次谐波分量检测技术的应用提供一定参考。

关键词 光声光谱; 快速傅里叶变换; 二次谐波检测; 最低检测限; 气体检测; 非相关噪声

中图分类号: O433.5+1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)10-2996-06

引言

随着社会发展和工农业规模的不断扩大,痕量气体检测在电力、化工以及人们的日常生活中起着越来越重要的作用^[1-2]。基于红外吸收光谱原理的光声光谱和可调谐二极管吸收光谱气体检测技术因其灵敏度高、稳定性好、检测时间短、无需载气、便于在线监测等优点,特别适合于低浓度气体的在线监测^[3-4]。最低检测限(limit of detection, LOD)是衡量气体浓度检测的一个很重要的参数,代表了检测系统能够检测到的气体最低浓度,在痕量气体检测中其意义尤为重要,LOD可用式(1)表示为

$$\text{LOD} = K\sigma_b/\delta_s \quad (1)$$

式(1)中, K 为信噪比或风险系数, σ_b 为背景信号的标准偏差, δ_s 为检测系统的灵敏度。由式(1)可知,如果想要得到更低的检测限,可以增大检测系统的灵敏度,或者减小检测系统背景信号的标准偏差。

为了减小光声光谱检测系统的最低检测限,研究人员做了大量工作。文献[3]采用小波去噪技术减小了 C_2H_2 气体光声检测信号噪声,得到了0.3 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限;文献[4]采用DFB激光二极管级联掺铒光纤放大器作为大功率激发光源对 H_2S 气体进行检测,得到了15 nL $\cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限;文献[5]通过在石英音叉上添加一个5 mm的微谐振器来增强光声信号,并对 NH_3 进行检测,得到了22.6

收稿日期: 2019-09-09, 修订日期: 2020-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902500), 国家电网有限公司总部科技项目(521205190014), 国家电网公司总部科技项目(环保型管道输电关键技术)资助

作者简介: 万留杰, 1983年生, 中国科学院电工研究所博士研究生 e-mail: wanliujie@mail.iece.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: zhanggqi@mail.iece.ac.cn

$\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限；文献[6]基于石英增强光声光谱技术，通过在 CO 中混入一定浓度的 H_2O 提高分子的弛豫率提高检测灵敏度，得到了对 CO 气体 $21 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限；文献[7]将高灵敏度光纤法布里-珀罗悬臂传声器结合共振光声光谱技术，并使用掺铒光纤放大器对红外光源光功率进行放大，得到了对 C_2H_2 气体 $80 \text{ pL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限；文献[8]借助大功率掺铒光纤放大激光器作为激励光源，针对 H_2S 气体，使用光纤悬臂传声器对二次谐波光声信号进行了测量，最低检测限为 $33 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ；文献[9]采用石英增强光声光谱技术，将气室置于声光可调品质因数光纤激光器腔内，利用高功率可调品质因数脉冲进行声波激励，对 C_2H_2 气体最低检测限为 $507 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ；文献[10]采用 DFB 激光器级联掺铒光纤放大器和一阶纵向共振光声池，并对二次谐波信号进行小波去噪，在 $\text{SNR} = 1$ 时，得到了 $0.37 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限，通过这些研究发现，目前对于降低气体光谱技术最低检测限主要通过增大光源功率、增大吸收光程、采用二次谐波检测技术、使用高灵敏度探测装置等方法实现，也有使用小波去噪技术降低检测系统最低检测限。

光声光谱检测系统中微音器输出的信号包含了系统的噪声，系统噪声有相关噪声和非相关噪声两类，相关噪声主要包括斩波器噪声、光声池窗片和池壁吸收与光源调制同频率光发生固体光声效应产生的噪声；非相关噪声主要包括气体分子布朗运动噪声、气体流动噪声、环境噪声和检测系统的电噪声等。光声信号的相关噪声可以通过采用可调谐激光光源结合谐波检测技术进行避免，但光声信号中的非相关噪声仍然存在。

目前，将快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)滤波应用于波长调制光声信号二次谐波分量的检测，尚未有文献报道，本文尝试对光声二次谐波信号进行 FFT 滤波，仅留下二次谐波信号的基波分量，且噪声也只剩下与二次谐波信号基波同频率的分量，虽然这样的处理会使检测灵敏度降低，但光声信号噪声水平降低的更多，可以极大降低光声检测系统的最低检测限。

1 测量原理

1.1 共振式光声光谱原理

气体光声效应是由于气体分子吸收变化光能而引起周期性无辐射弛豫(热效应)，宏观上表现为气体压力的周期性变化，气体光声光谱检测正是基于光声效应的一种检测技术。光声池内的气体分子产生的声压可表示为波动方程

$$\nabla^2 p - c^{-2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = - \left[\frac{\gamma - 1}{c^2} \right] \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)中， p 为气体的声压， c 为气体中的声速； $\gamma = c_p / c_v$ ，表示气体的比热比； H 为气体吸收调制光能产生的热功率密度，若入射光光强为 I ，则 $H = \alpha I$ ， α 为气体分子的吸收系数。

在柱坐标系中，考虑气体热传导损耗和粘滞损耗，简正模式 j 下的振幅 $A_j(\omega)$ 可表示为

$$A_j(\omega) = - \frac{i\omega}{\omega_j^2} \left[\frac{\alpha(\gamma - 1)}{V_c} \right] \int p_j^* dV \quad (3)$$

式(3)中， ω_j 表示简正模式 j 下的谐振角频率； V_c 表示谐振腔体积； Q_j 表示简正模式 j 下的品质因数； p_j^* 表示简正模式 j 下声压的共轭复数。实际使用中，通常使 $\omega = \omega_j$ ，即保证光声池工作于某一简正模式下，这种情况下光声池 r_M 的声压可表示为^[11]

$$p(r_M, \omega_j) = -(\gamma - 1) \frac{Q_j}{\omega_j} \frac{L_c}{V_c} I_j p_j(r_M) \alpha P_0 \quad (4)$$

常把式(4)中 P_0 表示光源功率； $I_j = \frac{1}{P_0 c} \int P_j^* I dV$ ， c 为气体的浓度； $-(\gamma - 1) \frac{Q_j}{\omega_j} \frac{L_c}{V_c} I_j p_j(r_M)$ 称为光声池常数，记为 C_{cell} ，它是只与光声池的结构、材料和尺寸有关的一个参数。

微音器的灵敏度记为 M_s ，则光声信号 S_{pas} 可表示为

$$S_{\text{pas}} = M_s C_{\text{cell}} \alpha P_0 \quad (5)$$

由式(5)可知，当 M_s ， C_{cell} ， α 和 P_0 一定时，光声信号与待测气体浓度成正比，即光声检测的理论依据。

1.2 快速傅里叶变换(FFT)

FFT 是离散傅里叶变换(discrete Fourier transformation, DFT)的有效实现，可以对时域信号进行频谱分析，将时域信号变换为频域信号，DFT 的基本公式为

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

使用 FFT 对原始光声信号二次谐波分量进行傅里叶变换，提取其基波分量，过滤其他频率的噪声，达到利用 FFT 滤波来实现去噪的目的。

2 实验部分

本研究根据气体光声光谱技术基本原理，搭建了一套气体光声光谱检测系统，该检测系统示意图如图 1 所示。光源采用中心波长为 1531.58 nm 的单模可调谐 DFB 激光器(LD-PD INC, PL-DFB-1532-A-1-SA-14BF)，功率 14 mW ，边模抑制比为 40 dB ，发射线宽小于 2 MHz ，可以认为是单色光源。激光控制器为 THORLAB 公司的 ITC4002QCL。由于 ITC4002QCL 的调制信号中没有锯齿波，使用 SP-F05 型数字合成函数信号发生器提供扫描锯齿波信号。光声池谐振

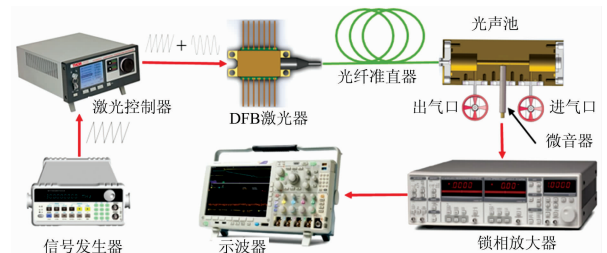


图 1 光声检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoacoustic detection system

腔长度和半径分别为 100 和 5 mm; 缓冲室长度和半径分别为 50 和 17.5 mm。麦克风为北京声望声电技术有限公司的 MPA416, 直径 1/4 英寸, 自带前置放大器, 响应频率 20~20 kHz, 灵敏度 $50 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。锁相放大器型号 SR830。数据记录采用美国泰克公司的 MSO3034 型示波器。

实验中采用可调谐 DFB 激光二极管作为激励光源, 结合波长调制和二次谐波检测技术对 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体进行检测。

3 结果与讨论

3.1 光声池的共振频率和品质因数

光声池是气体光声光谱检测中的关键部件, 气体分子对光的吸收和声音信号的产生都发生在其中。通常光声池的共振频率越高, 其对环境及电噪声的抗干扰能力越强^[1]。实验前使用 Comsol 软件对光声池进行频域仿真, 仿真结果如图 2 所示, 光声池的一阶纵向共振频率为 1 667.9 Hz。通过测量光声池的共振频率, 可以得到光声池的品质因数。实验中光声池内充入 $102 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体, 将激光器的波长锁定在 1 531.58 nm, 调制频率从 800 Hz 调节到 875 Hz, 光声池的频率响应如图 3 所示, 当调制频率为 836 Hz 时, 光声二次谐波信号有最大值, 说明光声池的谐振频率为

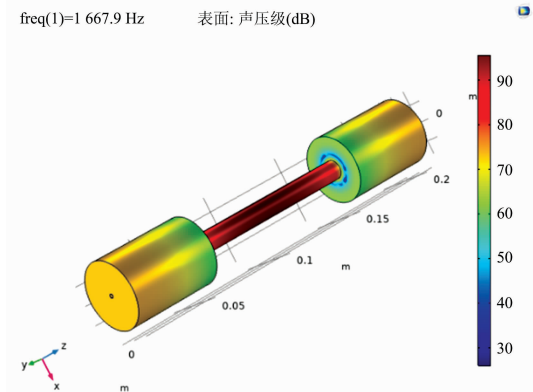


图 2 光声池的频域仿真

Fig. 2 Frequency domain simulation of photoacoustic cell

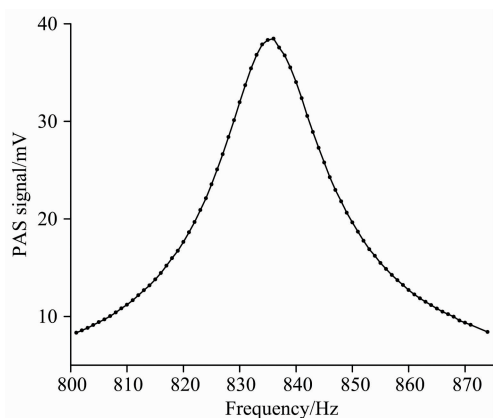


图 3 光声池的频率响应曲线

Fig. 3 Frequency response curve of optoacoustic cell

1 672 Hz, 这与使用 COMSOL 软件的仿真结果基本一致。当光声信号为最大值的 $1/\sqrt{2}$ 时, 对应的上下限频率差值为 16.5 Hz, 故光声池实际的品质因数为 50.6。

3.2 调制深度的优化

为得到最强光声二次谐波信号, 提高系统的检测灵敏度, 需要确定最佳调制深度。对光声池充入 $102 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体, 调节激光器的偏置电压, 正弦调制信号峰的峰值从 20 mV 增大到 70 mV, 测得光声信号如图 4 所示。图 4 表明, 当 DFB 激光器的正弦调制信号峰峰值为 60 mV 时, 光声信号最强。本实验中, 正弦调制信号峰的峰值设置为 60 mV。

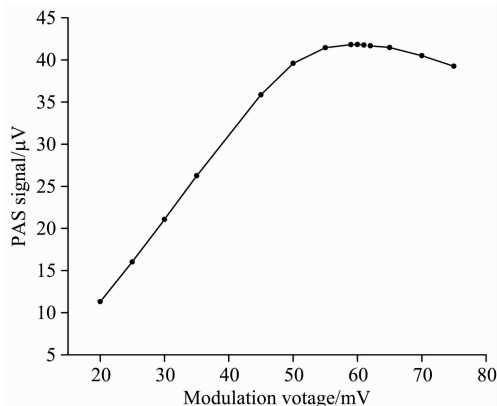


图 4 不同调制电压下的光声信号值

Fig. 4 Signal value under different modulation voltage

3.3 微量 C_2H_2 气体的测量

利用搭建的共振型光声光谱检测系统, 在实验室中对油浸式电力变压器的故障特征气体 C_2H_2 进行模拟测量, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体的标气有 102, 50, 303 和 $1 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 为增加测量点数, 使用纯 N_2 稀释标气, 配置出 75, 15, 7.5 和 $0.17 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体。为减小环境噪声干扰, 测试过程中关闭进出气阀门, 实验中光声池中的气体压力为 1 atm。

锁相放大器的积分时间常数设置为 3 s, 测试时间 400 s, 采用 0.01 Hz 锯齿波扫描和 836 Hz 正弦波调制方式驱动 DFB 激光器, 噪声标准差由纯 N_2 情况下测得的信号确定。测得的各浓度气体的光声信号二次谐波分量如图 5(a) 所示, 由图可知, 在 $0.17 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时已无法将有效信号和噪声区分开。使用寻峰算法确定光声信号二次谐波分量的最大值 ($A_{2\text{max}}$) 见表 1, 对表 1 数据进行线性拟合, 结果如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可知, 检测灵敏度为 $0.3 \mu\text{V} \cdot (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$, 纯 N_2 的光声信号标准偏差为 $0.043 \mu\text{V}$, 根据式(1)可计算出在 $\text{SNR}=3$ 时, 检测系统的最低检测限为 $0.43 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3.4 FFT 滤波在光声二次谐波检测技术中的应用

虽然在本实验中采用了二次谐波检测技术避免相关噪声, 并使在实验过程中对光声池进行温度控制以消除温度漂移造成的非相关噪声, 但其他的非相关噪声成分仍然会存在于光声二次谐波信号中, 导致最低检测限无法继续降低。本研究尝试将 FFT 滤波应用于光声二次谐波检测中, 即使用

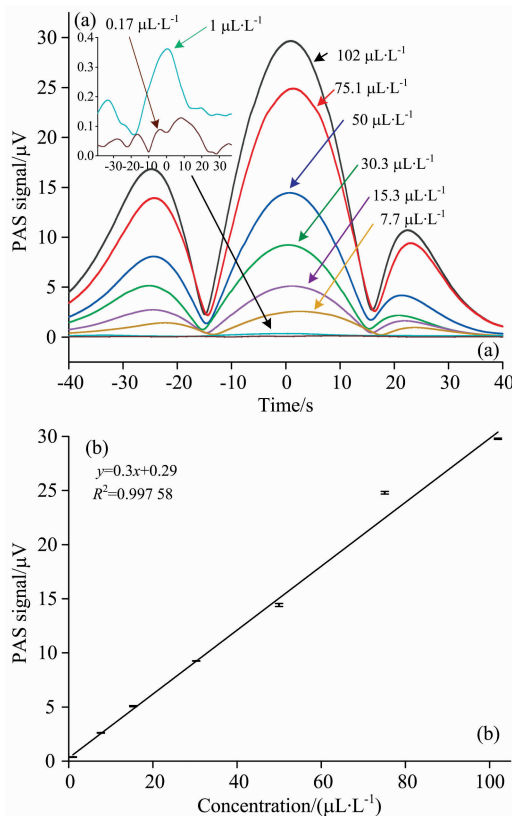


图 5 不同浓度 C_2H_2/N_2 混合气体的光声二次谐波信号及其响应曲线
(a): 二次谐波信号; (b): 响应曲线

Fig. 5 Second harmonic signals and responses curves of mixed gases with different concentrations of C_2H_2/N_2
(a): Second harmonic signals; (b): Response curves

表 1 不同 C_2H_2/N_2 混合气体浓度下光声二次谐波信号最大值及其标准偏差

Table 1 The maximum value and standard deviation of photoacoustic second harmonic signals at different concentrations of C_2H_2/N_2

浓度 / ($\mu L \cdot L^{-1}$)	$A_{2max} / \mu V$	标准偏差 / μV
1	0.38	0.030
7.7	2.62	0.026
15.3	5.08	0.051
30.3	9.25	0.019
50	14.43	0.142
75.1	24.79	0.119
102	29.78	0.066

FFT 提取原始光声二次谐波信号频谱, 然后对光声二次谐波信号进行频域滤波, 提取其基波分量, 即与扫描锯齿波频率相等的正弦分量。因光声二次谐波信号的基波分量幅值 ($A_{2(1m)}$) 与二次谐波最大值成正比, 即基波分量幅值与气体浓度成正比, 这就是本文使用光声二次谐波基波分量进行气体光声检测的理论基础。具体过程是先测量纯 N_2 情况下的光声二次谐波信号, 即检测系统的背景噪声信号, 使用 FFT

对其进行频谱分析, 确定最弱噪声谐波分量对应的频率, 并将此频率作为扫描锯齿波的频率。

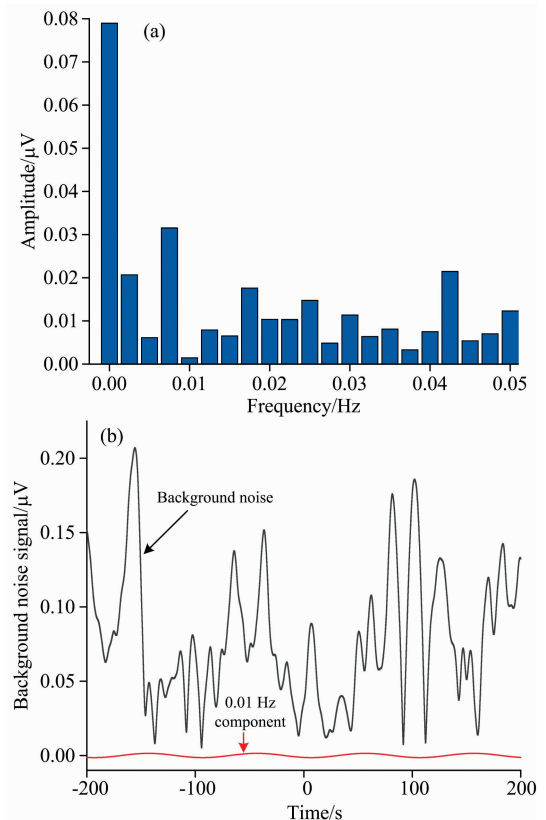


图 6 光声检测系统背景噪声频谱分析及波形图
(a): 背景噪声频谱;
(b): 背景噪声及其 0.01 Hz 分量波形图

Fig. 6 Spectrum analysis and waveform of background noise in photoacoustic detection system

(a): Background noise spectrum;
(b): Waveforms of background noise and its 0.01 Hz component

锁相放大器积分时间常数设置为 3 s, 可有效过滤 0.05 Hz 以上的频率信号, 为防止待测气体的光声二次谐波信号被锁相无区别过滤, 扫描锯齿波频率只能在 0.05 Hz 以下范围内寻找, 使用 MATLAB 的 FFT 分析提取到纯 N_2 情况下的光声二次谐波信号的频域信息, 如图 6(a) 所示, 由图可知, 在 0.01 Hz 噪声分量幅值最小, 故本实验中的扫描锯齿波频率就定为 0.01 Hz, 图 6(b) 为背景噪声原始信号及其 0.01 Hz 谐波分量信号的波形, 由图 6(b) 可知, 使用 FFT 滤波后, 噪声信号中只剩下幅值为 $0.00144 \mu V$ 的 0.01 Hz 噪声信号, 这也是该方法为什么能够实现降低 LOD 的原因所在。为验证该方法的有效性, 使用 $1 \mu L \cdot L^{-1}$ 的 C_2H_2/N_2 混合标准气体配出 0.35, 0.57 和 0.79 $\mu L \cdot L^{-1}$ 的浓度, 利用搭建的气体光声检测系统进行了检测。使用 FFT 对不同浓度气体的光声二次谐波检测结果进行滤波, 提取其中的 0.01 Hz 频率分量, 如图 7(a) 所示, 可以看出, 即使在痕量的浓度下, 信号仍然具有明显的辨识度。使用寻峰算法提取光声二次谐波信号基波的幅值见表 2, 对表 2 数据进行线性拟合,

结果如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可知, 检测灵敏度为 $0.1 \mu\text{V} \cdot (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$, 相对于滤波前降低了 $1/3$ 。纯 N_2 情况下光声信号 0.01 Hz 分量的标准偏差为 $0.00102 \mu\text{V}$, 根据式 (1) 可计算出在 $\text{SNR}=3$ 时, 最低检测限为 $30.6 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对于滤波前降低了 93% , 在未增加硬件设备的情况下使最低检测限降低了一个数量级。可见, 使用 FFT 滤波虽然降低了检测灵敏度, 但由于有效消除了光声二次谐波信号中的非相关噪声, 极大的提高了信噪比和降低了最低检测限。表 1 中列出了未使用 FFT 滤波时的测试结果标准偏差, 而使用 FFT 滤波后得到光声二次谐波信号的基波幅值恒定, 故标准偏差为 0, 图 8 为 FFT 滤波前后测试结果的标准偏差对比图, 可见使用 FFT 滤波对光声二次信号进行处理, 也增强了

检测结果的稳定性。

表 2 不同 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体下光声二次谐波信号基波幅值 ($A_{2(1\text{m})}$)

Table 2 The fundamental amplitude of photoacoustic second harmonic signals at different concentrations of $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$

浓度 / ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	$A_{2(1\text{m})} /$ μV	浓度 / ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	$A_{2(1\text{m})} /$ μV
0.17	0.009 8	15.3	1.157
0.35	0.022 6	30.3	3.123
0.57	0.041 8	50	4.876
0.79	0.051 5	75.1	8.092
1	0.074 4	102	9.702
7.7	0.854 8		

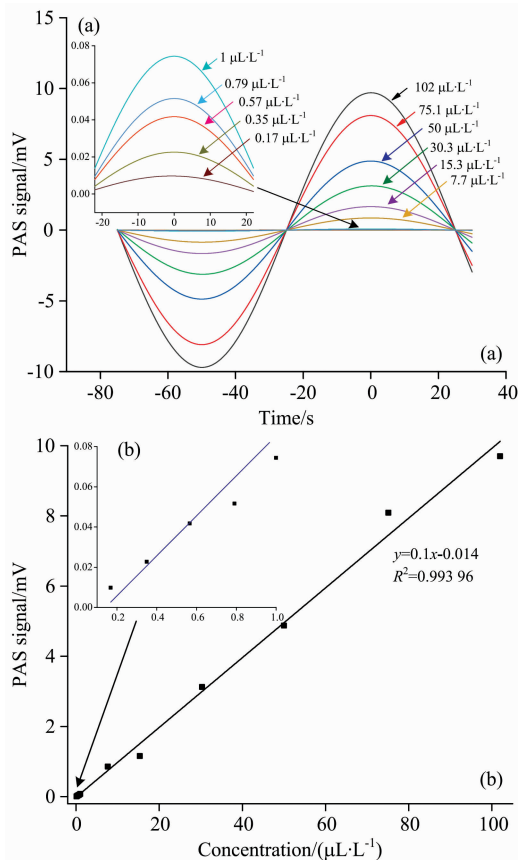


图 7 不同浓度 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体的光声二次谐波信号基波分量波形图及其响应曲线

(a): 基波分量波形图; (b): 响应曲线

Fig. 7 Waveforms and response curves of fundamental wave components of second harmonic signals of mixed gases with different concentrations of $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$

(a): Waveforms of the fundamental components;

(b): Response curves

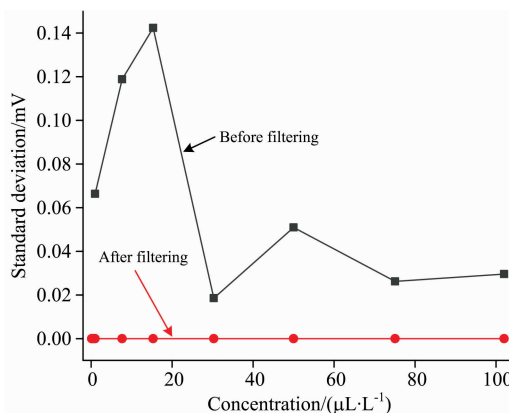


图 8 FFT 滤波前后光声信号标准差

Fig. 8 Standard deviations of photoacoustic signals before and after FFT filtering

4 结 论

建立了一套采用 DFB 激光器为激励光源的共振型气体光声光谱检测系统, 通过对不同浓度的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体的检测结果进行分析, 得到了 $0.43 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限。虽然使用二次谐波检测已经将相关噪声进行过滤, 但含有各种频率成分的非相关噪声仍存在, 所以本文对光声二次谐波信号进一步实施 FFT 滤波, 过滤掉其中的非相关噪声, 虽然滤波之后信号的幅值减小了, 但噪声减小程度更大, 可以将微弱的光声二次谐波信号基波分量与背景噪声区分开来, 得到了对 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体 $30.6 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低检测限。在不增加其他硬件的前提下, 使气体光声检测系统的最低检测限降低了一个数量级, 提高了信噪比, 可以实现对痕量气体的检测, 这可为使用波长调制光谱信号二次谐波分量检测技术的应用提供一定的参考。

References

- [1] ZHANG Xiao-xing, LI Xin, LIU Heng, et al(张晓星, 李新, 刘恒, 等). Transactions of China Electrotechnical Society(电工技术学报), 2016, 31(15): 187.

- [2] CHEN Ying, GAO Guang-zhen, CAI Ting-dong, et al(陈 颖, 高光珍, 蔡廷栋, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2017, 44 (5): 0511001.
- [3] ZHA Shen-long, LIU Kun, ZHU Gong-dong, et al(查申龙, 刘 锰, 朱公栋, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(9): 2673.
- [4] CHEN Ke, YUAN Shuai, GONG Zhen-feng(陈 珂, 袁 帅, 宫振峰, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2018, 45(9): 0911012.
- [5] Dang Hongtao, Ma Yufei, Liu Fuhua, et al. Journal of Russian Laser Research, 2019, 40 (3): 265.
- [6] He Ying, Ma Yufei, Tong Yao, et al. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 129.
- [7] Chen Ke, Yu Qingxu, Gong Zhenfeng, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 268: 205.
- [8] Chen Ke, Zhang Bo, Liu Shuai, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 283: 1.
- [9] Zhang Qinduan, Chang Jun, Cong Zhenhua, et al. Optics and Laser Technology, 2019, 120: 105751.
- [10] Chen Ke, Gong Zhenfeng, Yu Qingxu. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 274: 184.
- [11] Wynn C M, Palmacci S, Clark M L, et al. Optical Engineering, 2014, 53(2): 021103.

Research of High Precision Photoacoustic Second Harmonic Detection Technology Based on FFT Filter

WAN Liu-jie^{1,2}, ZHEN Chao³, QIU Zong-jia¹, LI Kang¹, MA Feng-xiang³, HAN Dong^{1,2}, ZHANG Guo-qiang^{1,2*}

1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Power Science Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China

Abstract Photoacoustic spectrum (PAS) gas detection technology based on wavelength modulated spectrum signal second harmonic component detection has been widely used in electric power, chemical and medical industry. Although the second harmonic component detection technology can effectively reduce the related noise in the photoacoustic signal, there is still non-correlation noise in the second harmonic signal, which affects the detection ability of the detection system to trace gas and the accuracy of the test results. In order to study how to weaken the influence of the non-correlated noise of the photoacoustic spectrum detection system on the second harmonic signal, improve the detection system of the limit of detection, improve the measurement accuracy, this paper built a set of with tunable distributed feedback (DFB) semiconductor laser is first longitudinal resonant photoacoustic spectrum of excitation light source gas detection system, first put forward using fast Fourier transform (FFT) to light the second harmonic signal filtering of the new method. Firstly, the sawtooth scanning signal frequency is optimized according to the noise spectrum of the gas photoacoustic spectrum detection system, so as to minimize the influence of background noise of the detection system on the optical acoustic detection signal. Then, the FFT filter is used to extract the fundamental wave component of the optical acoustic second harmonic signal of the same frequency as the scanning sawtooth wave. Although the amplitude of the extracted fundamental wave component is smaller than the maximum of the second harmonic component of the photoacoustic signal, the background noise of the photoacoustic detection system decreases more, so the purpose of improving the minimum detection limit of the photoacoustic detection system is realized. By analyzing and comparing the test results of C₂H₂/N₂ mixed gas with the concentrations of 102, 75.1, 50, 30.3, 15.3, 7.7, 1, 0.79, 0.57, 0.35 and 0.17 μL · L⁻¹, the test results are very stable after FFT is used to filter the photoacoustic second harmonic signal. When the SNR was 3, the minimum detection limit of the system was reduced from 0.43 μL · L⁻¹ to 0.030 6 μL · L⁻¹. This shows that FFT filtering is very effective in eliminating the non-correlated noise in the second harmonic component of wavelength modulated spectral signal, which can improve the measurement accuracy and improve the minimum detection limit of the photoacoustic spectrum detection system. The research results in this paper can provide some references for the application of wavelength modulated spectrum signal second harmonic component detection technology.

Keywords Photoacoustic spectroscopy; Fast Fourier transform; Second harmonic detection; Limit of detection; Gas detection; Non-correlation noise