

激光与光电子学进展

基于波长调制的数字滤波技术的降噪研究

张立芳^{1*}, 王飞², 蔚昊¹, 王璟¹, 崔海滨², 赵贯甲¹

¹太原理工大学电气与动力工程学院热能工程系, 山西 太原 030024;

²浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 基于吸收光谱的波长调制技术在气体检测方面已被广泛应用。波长调制技术测量得到的二次谐波信号会受到背景噪声及光学条纹等的影响, 导致浓度测量下限较高。为了降低噪声的干扰, 提高系统的信噪比, 本文选取 2.25 μm 处的吸收谱线对 NH_3 进行理论分析和实验测量, 采用小波变换和 Gabor 变换对二次谐波信号进行降噪处理。结果表明: Gabor 变换和小波变换都能有效地去除二次谐波信号中多种噪声的影响, 同时保留信号的真实性; 对于主要含有白噪声和光学条纹的谐波信号, 小波变换的降噪能力要优于 Gabor 变换, 小波变换降噪后信号的信噪比明显提高, 且曲线更加平滑; 经过降噪后, 低浓度 NH_3 的测量下限由 0.36 mg/m^3 降低至 34.45 $\times 10^{-3}$ mg/m^3 。

关键词 光谱学; 激光吸收光谱技术; 小波变换; Gabor 变换

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0730001

Denoising of Digital Filtering Based on Wavelength Modulation Spectroscopy

Zhang Lifang^{1*}, Wang Fei², Wei Hao¹, Wang Jing¹, Cui Haibin², Zhao Guan-jia¹

¹Department of Thermal Engineering, College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Due to its lower concentration limit, wavelength modulation spectroscopy has been widely used for gas concentration detection based on laser absorption spectroscopy. Various background noises and optical fringes can decrease the accuracy of concentration measurement and increase the lower limit of concentration measurement. To reduce the background noise and improve the signal-to-noise ratio of the measurement system, the absorption spectral lines at 2.25 μm were used to measure the NH_3 concentration in the experiment and theoretically analyze. In signal processing, wavelet and Gabor transform techniques were used to reduce the noise in harmonic signal. The results show that Gabor and wavelet transforms can effectively remove the influence of various noises while preserving the integrity of the harmonic signal with the optimal control parameters. Wavelet transform has better denoising ability than the Gabor transform for harmonic signals mainly containing white noise and optical fringes, and can improve the signal-to-noise ratio and the smoothness of the signal curve. The lower limit of NH_3 concentration after denoising is reduced from 0.36 mg/m^3 to 34.45 $\times 10^{-3}$ mg/m^3 .

Key words spectroscopy; laser absorption spectroscopy; wavelet transform; Gabor transform

OCIS codes 300.6360; 300.1030; 280.1120

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-10; 录用日期: 2020-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51976132)

*E-mail: 21227023@zju.edu.cn

1 引言

激光吸收光谱(TDLAS)技术以其特有的高选择性、高灵敏度、非接触性、测量迅速和环境适应性强等优点,在气体检测、环境监测等领域得到了广泛应用。在恶劣的测量环境下,利用硬件设备优化测量信号耗资巨大,而且效果有限。如何在已有硬件条件下,通过软件处理手段改善信号质量,一直是人们关注的焦点。在实际测量过程中,人们通常采用多次测量取平均值的方法来降低白噪声,但这也降低信号的时间分辨率。对于有严格时间分辨率要求的测量来说,采用数字滤波技术对光谱信号进行处理是一个很好的选择^[1]。

波长调制光谱(WMS)^[2-3]技术对微弱的吸收信号具有较高的灵敏度,其与信号处理技术相结合能够有效降低测量系统中的噪声干扰,因而被广泛应用于微弱信号的检测中。目前主要的降噪技术有数字平均滤波^[4-5]、非线性最小二乘法^[5-6]、经验模态分解^[7]、Allan 方差^[8]、卡尔曼滤波法^[1,9]、小波变换^[1,4,10]、Gabor 变换^[11]和 Savitzky-Golay 滤波^[12]等。Werle 等^[8]利用信号平均滤波法对大气中痕量气体的浓度进行了测量,该方法相对简单,但却可以有效提高信号的稳定性和测量灵敏度。Li 等^[1]指出,在保证时域响应的前提下,小波数字滤波能够获得较高的测量精度和检测灵敏度。与其他滤波技术(如卡尔曼滤波、维纳滤波等)相比,无论是在光谱信号处理上还是在痕量气体浓度测量中,小波滤波技术都是较好的选择。卡尔曼滤波是一种自适应宽带滤波方法,在吸收光谱测量过程中能够提高测量痕量气体浓度的灵敏度和精度,但该方法也有一定的局限性,即原始光谱数据要经过算法处理后才能使用卡尔曼滤波作进一步处理^[1,9]。郭心骞等^[7]利用经验模态分解法对多光程吸收光谱信号进行了降噪处理,结果发现,该方法可以有效滤除光谱信号中的干涉噪声和随机噪声。浙江大学的张立芳等^[10]采用小波分析法对痕量气体浓度测量下限进行了研究,他们在实验中采用长光程吸收池来保证较长的吸收光程,并在此基础上采用互相关分析技术来提高二次谐波信号的信噪比。崔海滨^[11]等利用 Gabor 变换对二次谐波信号进行了降噪分析,并采用数字仿真和实验进行了验证,结果表明,Gabor 变换不仅可以显著提高系统的信噪比,而且能够提高系统的检测精度和稳定性。鲁一冰等^[12]

利用自适应分层 Savitzky-Golay 平滑滤波对汽车尾气中 CO 浓度的测量信号进行处理,结果显示:该方法在降低噪声的同时,可以很好地保留光谱信号中携带的浓度信号;经该方法处理后,信号的信噪比明显提高。综上所述,在 TDLAS 测量过程中采用各种数字滤波技术对光谱信号进行降噪处理,都能得到较高的信噪比。

TDLAS 气体在线检测系统的噪声来源主要有:1)系统的应用环境带来的各种外界干扰;2)系统内部噪声,主要包括探测器噪声、激光额外噪声和随机剩余幅度调制引起的偏移噪声等,还包括由激光的相干性在光学系统中产生的干涉条纹等。本文基于 TDLAS 测量过程中的二次谐波信号,针对各种噪声的特点,采用两种常用的降噪技术(小波变换和 Gabor 变换)对测量信号进行处理,研究不同方法对谐波信号的降噪能力,以提高信噪比以及系统的测量精度和稳定性。

2 基本原理

吸收光谱技术测量得到的原始信号 $S(x)$ 包括测量信号 $a(x)$ 和测量噪声 $d(x)$ 两部分,即

$$S(x) = d(x) + a(x). \quad (1)$$

不同的降噪技术通过对原始信号进行分析,找出测量信号与测量噪声之间的不同之处,采用不同的处理方法,将原始信号中的测量噪声进行去除或降低,进而得到比较纯净的测量信号。

2.1 小波变换原理

小波变换的基本思想是对测量信号进行加窗,然后对窗内的信号进行傅里叶变换,进而反映测量信号各种不同频率成分的局部特性。根据测量信号与背景信号的小波系数在不同尺度上的不同特性,剔除由背景噪声产生的小波系数,保留吸收信号的小波系数,最后采用小波重构最大限度地还原无背景噪声的原始信号^[13-15]。

将原始信号进行分解得到低频粗略部分 $H_1(x)$ 和 高频细节部分 $G_0(x)$,之后对低频部分作进一步分解,而对高频部分则不作处理。TDLAS 系统中的二次谐波信号利用小波分析的 N 层分解与重构处理获得,具体表达式为

$$S(x) = d_1(x) + d_2(x) + \dots + d_N(x) + a_N(x). \quad (2)$$

其中,测量得到的原始信号 $S(x)$ 是高频信号 $d_i(x)$ 和低频信号 $a_N(x)$ 的线性叠加。小波变换对信号的

分解过程如图 1 所示。

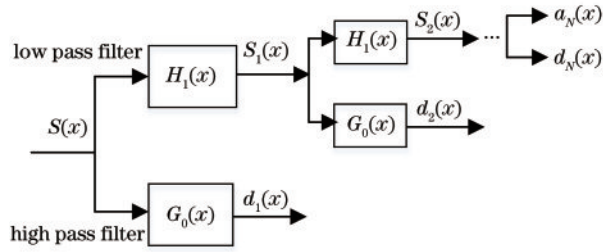


图 1 小波变换分解流程图

Fig. 1 Wavelet transform decomposition flow chart

2.2 Gabor 变换原理

Gabor 变换的基本思想是:把待处理信号划分成若干个小的时间间隔,用傅里叶变换对每一个较小的时间间隔进行分析,将信号从时域变换到频域,同时确定在每一段时间间隔内的频率特性,得到其随时间的变化特性,最后进行逆变换,将信号从频域变换到时域,进行信号的重建。Gabor 变换降噪原理如图 2 所示^[11]。



图 2 Gabor 变换降噪的原理

Fig. 2 Principle of Gabor transform for signal denoising

Gabor 变换降噪的目的是从原始信号 $S(x)$ 中提取测量信号 $a(x)$ 。首先,对含有噪声的原始信号 $S(x)$ 进行离散 Gabor 变换,计算 $S(x)$ 、 $a(x)$ 和 $d(x)$ 对应的 Gabor 系数;然后,选取合适的阈值对 $a(x)$ 和 $d(x)$ 在时-频域上的幅值进行修正;最后,根据修正的 Gabor 系数对 $S(x)$ 进行展开来重构测量信号 $a(x)$ 。

3 TDLAS 仿真与实验分析

3.1 测量原理

根据 Beer-Lambert 定律,一束单色激光穿越被测气体介质,激光经气体介质吸收后,其透射光强与原始激光强度满足

$$\frac{I_1}{I_0} \Big|_v = \tau(v) = \exp[-S_i(T)PX\phi_v L], \quad (3)$$

式中: I_0 为无气体吸收时的参考激光强度; I_1 为穿过被测气体衰减后的激光强度; $\tau(v)$ 为激光透射率; S 为被测气体特征谱线的线强; P 为气体介质的总压; X 为被测气体的质量浓度; ϕ_v 为线型函数; L 为激光

在气体中传播的距离。

在低浓度 NH_3 的测量过程中,由探测器测量得到的吸收信号十分微弱。波长调制技术对目标信号进行高频调制时,采用锁相放大器对输入的原始谐波信号进行调制解调,产生二次谐波信号,而非目标信号由于没有经过调制解调,在后续信号处理过程中会被去除,从而降低了外部背景信号的干扰。经过解调后的谐波信号,其中心波长处的气体浓度 X 与二次谐波信号峰值 P_{2f} 之间的关系为

$$X \propto \frac{\Delta\nu \times \pi \times P_{2f}}{I_0 \times S(T) \times L} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[\frac{2+m^2}{(1+m^2)^{1/2}} - 2 \right] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

式中: $\Delta\nu$ 为碰撞线宽; $S(T)$ 为被测气体谱线强度; m 为调制系数。

从(4)式可以看出,从锁相放大器得到的二次谐波信号峰值正比于气体浓度,因此,可以采用二次谐波信号峰值来测量浓度信号^[16]。

3.2 仿真计算

为了对小波变换和 Gabor 变换的降噪能力进行评估,本文先利用 MATLAB 仿真技术拟合得到了 4433.5 cm^{-1} 处 NH_3 的二次谐波信号,然后通过添加白噪声来模拟谐波信号测量过程中的噪声。拟合得到的原始二次谐波信号和加入噪声的二次谐波信号如图 3 所示。

此外,为了对比降噪效果,本文选取信噪比分析重建信号的质量,选取均方根误差(RMSE)表征降噪后信号偏离原始信号的程度。信噪比(SNR)的定义为

$$\beta_{\text{SNR}} = 10 \cdot \lg \frac{\text{sum} \left\{ \left[S_{\text{signal}}(x)_{2f} \right]^2 \right\}}{\text{sum} \left\{ \left[S_{\text{signal}}(x)_{2f} - S_{\text{signal}}(x)_{\text{denoised-2f}} \right]^2 \right\}}, \quad (5)$$

式中: β_{SNR} 为信噪比; $S_{\text{signal}}(x)_{2f}$ 为原始二次谐波信号; $S_{\text{signal}}(x)_{\text{denoised-2f}}$ 为降噪后的二次谐波信号。

RMSE 的定义为

$$\alpha_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{N'} \left[S_{\text{signal}}(x)_{2f} - S_{\text{signal}}(x)_{\text{denoised-2f}} \right]^2}{N'}}, \quad (6)$$

式中: α_{RMSE} 为均方根误差; N' 为信号长度。

对于小波变换滤波,不同的小波基和分解深度都会对信号处理产生影响,本文的仿真实验基于 Daubechies (db) 小波基分析不同的小波系和分解深度对二次谐波信号的降噪性能。而对于 Gabor 变

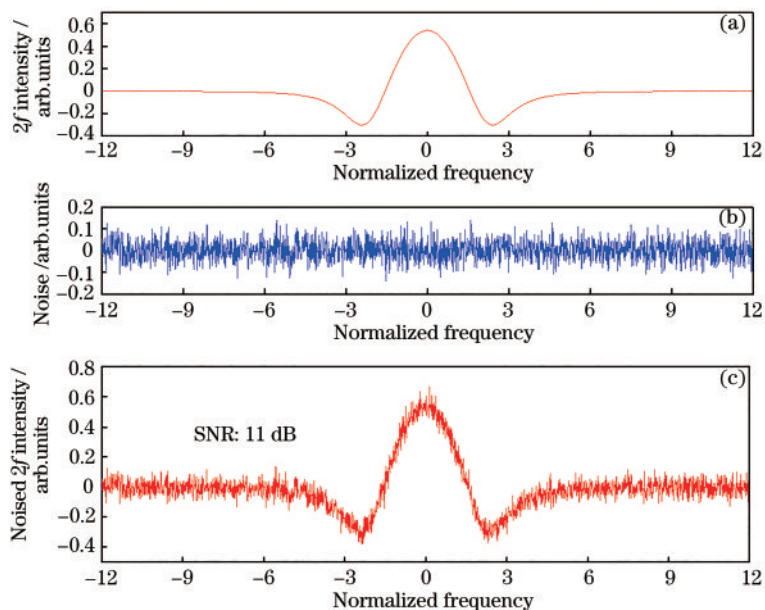


图 3 模拟得到的 NH₃ 的光谱信号。(a)原始二次谐波信号;(b)高斯白噪声;(c)加入噪声的二次谐波信号
Fig. 3 Simulated NH₃ spectral signal. (a)Original second harmonic (2f) signal;(b)Gaussian noise;(c)noised second harmonic signal

换,高斯窗口参数和阈值的选取非常重要,尤其是阈值的选取。本文通过仿真计算分析了高斯窗口

参数不变的情况下,阈值大小对二次谐波信号重建结果的影响,结果如图 4、5 所示。

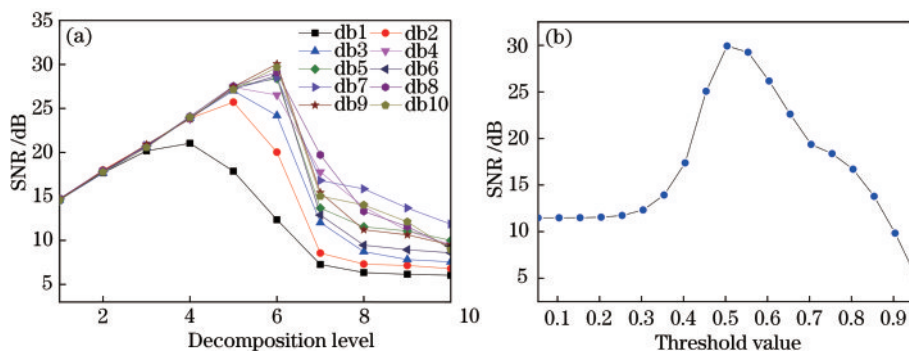


图 4 不同方法下信噪比随参数的变化情况。(a)不同小波系信噪比随分解深度的变化;(b)Gabor 变换中信噪比随阈值的变化
Fig. 4 SNR as a function of parameters in different methods. (a) SNR as a function of decomposition level in wavelet transform; (b) SNR as a function of threshold value in Gabor transform

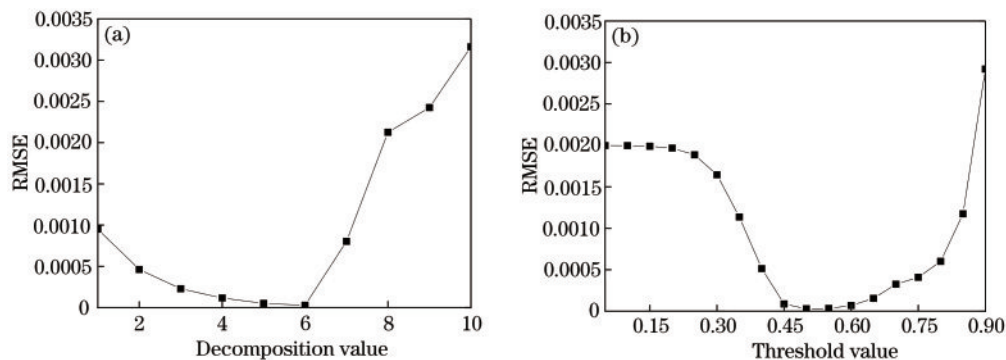


图 5 降噪后的 RMSE。(a)小波变换降噪;(b)Gabor 变换降噪
Fig. 5 RMSE after denoising. (a) Wavelet transform denoising; (b) Gabor transform denoising

由图4可知:小波系不变时,信噪比随着分解深度的增大而先升高后降低,不同小波系的最优信噪比在 20 dB~30 dB 之间;采用 db9 小波对原始信号进行 6 层分解重构时, RMSE 降到最小值 (2.77×10^{-5}), 二次谐波信号的信噪比上升到最大值 (30.1 dB)。由图5可知,在阈值为 0.5 时, RMSE 降到最小值 (2.85×10^{-5}), 二次谐波信号的信噪比上升到最大值 (29.9 dB)。对比后可知小波变换的最优

信噪比稍高于 Gabor 变换的最优信噪比。

图6为小波变换和 Gabor 变换在最优信噪比下降噪后的二次谐波信号。由图6可知,小波变换和 Gabor 变换都能够较好地降低二次谐波信号中的白噪声,而且经过小波降噪后的曲线明显比 Gabor 降噪后的曲线光滑,降噪后的信号更接近原始信号。为了进一步分析小波变换和 Gabor 变换的降噪能力,接下来对 TDLAS 系统测得的 NH_3 的二次谐波信号进行分析。

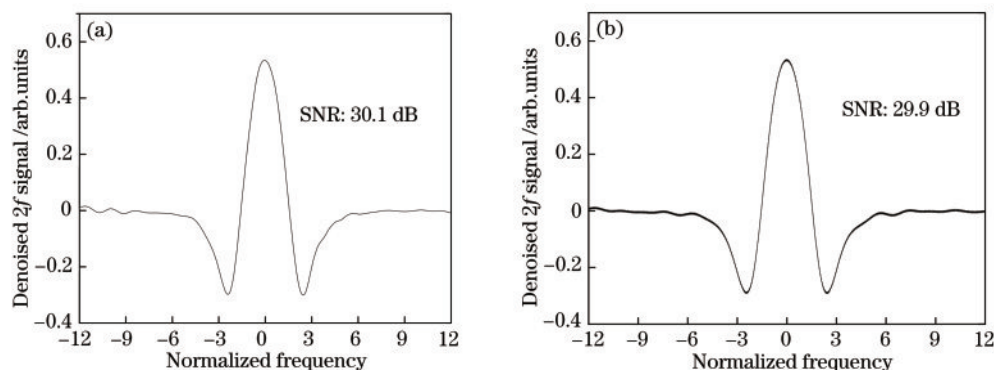


图6 降噪后的二次谐波信号。(a)小波变换降噪;(b)Gabor变换降噪

Fig. 6 Second harmonic ($2f$) signal after denoising. (a) Wavelet transformation denoising; (b) Gabor transformation denoising

3.3 实验系统

本文选用 $2.25 \mu\text{m}$ (4433.5 cm^{-1} , 即 $\nu_2 + \nu_3$ 组合波段) 处的 NH_3 半导体激光器 (Nanoplus), 利用波长调制技术结合 Herriott 池对较低浓度的 NH_3 进行测量, 测量系统如图7所示。

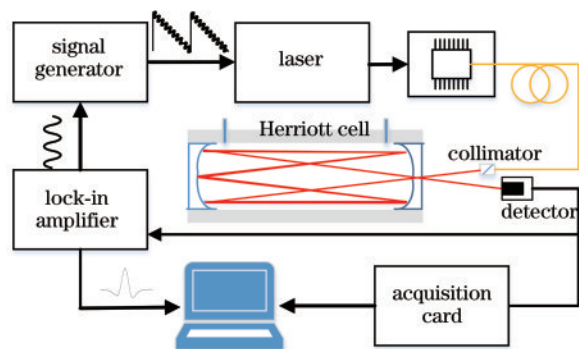


图7 测量低浓度 NH_3 气体的系统示意图

Fig. 7 System for measuring low concentration NH_3

首先,将信号发生器 (AFG3102) 产生的 200 Hz 的锯齿波和锁相放大器 (SR830) 产生的 15 kHz 的高频正弦信号进行叠加,并加载到激光控制器 (LDC3900) 的输入端,从而控制输出波长的扫描范围并实现对信号的调制。利用准直器 (Thorlabs CFC-8XC) 对光纤输出的激光束进行准直,准直后的光束进入光程为 10.13 m 的含有低浓度 NH_3 的

Herriott 池中,激光经 NH_3 吸收衰减后由探测器 (Thorlabs PDA10PT-EC) 接收并转换为电信号;数据采集卡 (NI PCI-6133, 14 位,各通道的采样速率为 2.5 MSa/s) 采集电信号并进行模数转换。

本次实验对 $3.50 \sim 17.50 \text{ mg/m}^3$ 的低浓度 NH_3 进行测量。不同浓度的被测气体由配气仪配制得到,采用两个高精度质量流量控制器 (CS200) 分别控制 NH_3 和 N_2 的流量。 NH_3 和 N_2 在预混池中充分混合之后通入到 Herriott 池中,通过调节质量流量计的开度得到 NH_3 浓度不同的混合气体。每个工况下都需要对吸收池进行长时间吹扫,以保证测量工况下 NH_3 浓度的稳定性。

3.4 降噪处理与分析

在测量过程中,背景辐射信号的存在会直接影响激光强度的相对变化。采用波长调制技术在特定的调制频率下进行测量,通过检测二次谐波信号的峰值高度来得到气体浓度,而背景辐射信号未经调制,可在后续数据处理过程中加以去除。对于波长调制技术,由于无法得到不含噪声的理想二次谐波信号,因此本文以二次谐波信号的峰峰值与噪声幅值标准差的比值来定义信噪比。区别于仿真信号, TDLAS 系统中的激光信号由于经过了 Herriott 池 (发生多次反射), 测量得到的二次谐波信号除了

激光器的额外噪声、探测器的散粒噪声以及探测器的 $1/f$ 噪声外,还包括由测量系统中光学部件的反射和散射引起的光学条纹。系统测量得到了扣除背景信号后的 $3.50 \sim 17.50 \text{ mg/m}^3 \text{ NH}_3$ 的二次谐波信号,具体如图 8 所示。

为了能够有效地降低噪声,本文在数据处理过程中采用小波变换、Gabor 滤波对原始信号进行滤波处理,降噪后的二次谐波信号如图 9 所示。对比图 9(a)和图 9(b)可以发现,Gabor 变换和小波变换都能够降低谐波信号中的光学条纹,同时改善谐波信号的信噪比。当 NH_3 的质量浓度为 17.50 mg/m^3 时,其原始二次谐波信号的信噪比为 47.8 dB ,经过小波变换滤波后,二次谐波信号的峰值为 0.256 ,其信噪比提高至 508 dB ,且降噪后曲线的光滑程度要高于 Gabor 变换降噪的;经过 Gabor 变换降噪后,二次谐波信号的峰值为 0.257 ,其信噪比升高为

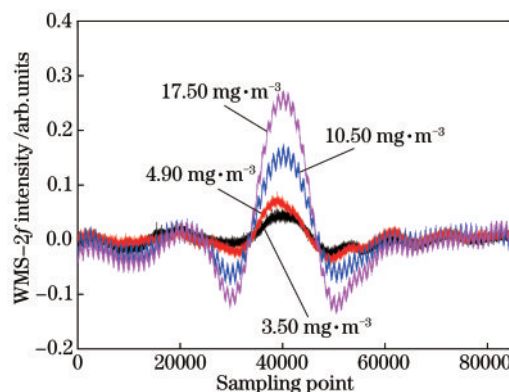


图 8 含噪声的二次谐波信号

Fig. 8 Noisy second harmonic signals

389 dB ,其值要小于小波变换的信噪比。 17.50 mg/m^3 的低浓度 NH_3 谐波信号经过小波降噪后,在信噪比为 1 dB 时,测量下限由降噪前的 0.36 mg/m^3 降低至 $34.45 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$ 。

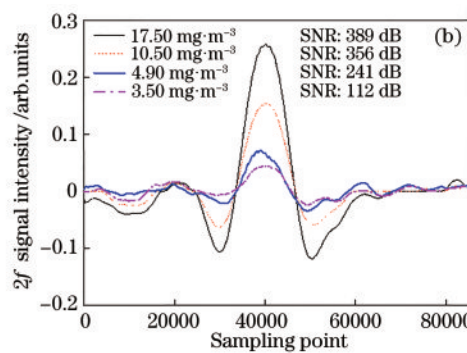
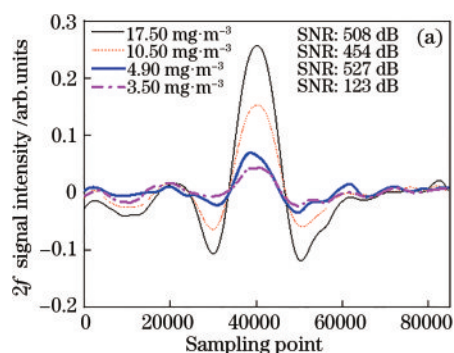


图 9 不同浓度 NH_3 降噪后的二次谐波信号。(a)小波变换降噪;(b) Gabor 变换降噪

Fig. 9 Second harmonic signals of different concentrations of NH_3 after denoising. (a) Wavelet transform denoising; (b) Gabor transform denoising

图 10 为 NH_3 质量浓度 ($3.50 \sim 17.50 \text{ mg/m}^3$) 与对应的二次谐波信号峰值之间的线性拟合结果。从图中

可以看出,小波变换和 Gabor 变换的线性拟合结果都非常好,选取最优控制参数时线性拟合度 r 均为 0.998 。

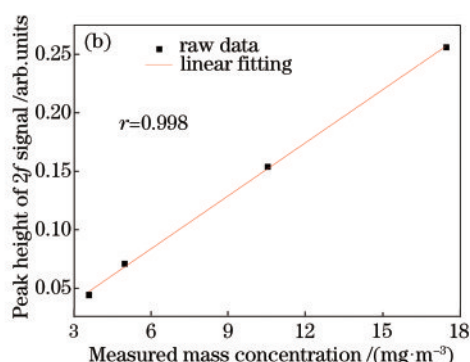
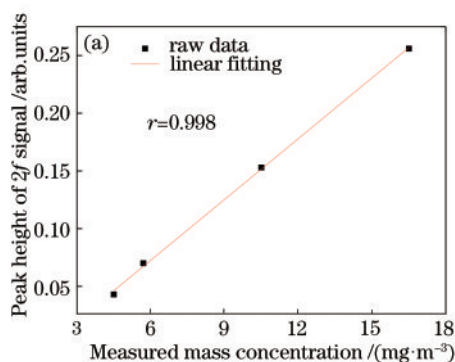


图 10 不同浓度 NH_3 的二次谐波信号峰值与测量浓度的线性关系。(a)小波变换;(b)Gabor 变换;

Fig. 10 Linear relationship between peak height of second harmonic signal of different concentrations of NH_3 and measured concentration. (a) Wavelet transform; (b) Gabor transform

4 结 论

本文基于 TDLAS 浓度测量系统,对比了 Gabor 变换和小波变换在二次谐波信号降噪过程中的优劣;通过理论和实验对比可知,Gabor 变换和小波变化在选取最优控制参数及窗口尺度时,都能很好地去除二次谐波信号中的背景噪声。对于噪声主要是白噪声和光学条纹噪声的信号,小波变换在提高信噪比、曲线光滑度等方面要优于 Gabor 变换。

目前,多种数字信号处理方法对设备硬件要求不高,且操作简单,已在 TDLAS 技术中得到了广泛应用。可以预见,数字滤波技术在实验或现场环境的在线测量方面具有很大潜力。

参 考 文 献

- [1] Li J S, Parchatka U, Fischer H. Applications of wavelet transform to quantum cascade laser spectrometer for atmospheric trace gas measurements [J]. *Applied Physics B*, 2012, 108(4): 951-963.
- [2] Ma S, Wu T, Sun C L, et al. Real-time exhaled CO₂ gas measurement using a mid-infrared hollow waveguide fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1130001.
马帅, 吴涛, 孙城林, 等. 基于中红外中空波导光纤的呼吸气体 CO₂ 实时测量 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1130001.
- [3] Zhang B Q, Xu Z Y, Liu J G, et al. Absorption model of wavelength modulation spectroscopy in combustion flow field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0711001.
张步强, 许振宇, 刘建国, 等. 燃烧流场波长调制光谱吸收模型的研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0711001.
- [4] Zou D B, Chen W L, Du Z H, et al. Selection of digital filtering in the escaping ammonia monitoring with TDLAS [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(9): 2322-2326.
邹得宝, 陈文亮, 杜振辉, 等. 数字滤波方法在 TDLAS 逃逸氨检测中的选用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2322-2326.
- [5] Zhang Z R, Dong F Z, Tu G J, et al. Selection of digital filtering techniques in trace gas concentration detection with a tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(11): 1672-1676.
张志荣, 董凤忠, 涂郭结, 等. 可调谐激光痕量气体检测中的数字滤波技术的优选 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(11): 1672-1676.
- [6] Shao J, Gao X M, Yuan Y Q, et al. Experimental research on the sensitivity of wavelength modulation by signal processing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(10): 4638-4642.
邵杰, 高晓明, 袁恽谦, 等. 信号处理改善波长调制光谱灵敏度的实验研究 [J]. *物理学报*, 2005, 54(10): 4638-4642.
- [7] Guo X Q, Qiu X B, Ji W H, et al. Minimization of optical fringes in TDLAS by an empirical mode decomposition algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 113001.
郭心骞, 邱选兵, 季文海, 等. 基于经验模态分解法 TDLAS 干涉条纹抑制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 113001.
- [8] Werle P W, Scheumann B, Schandl J. Real-time signal-processing concepts for trace-gas analysis by diode-laser spectroscopy [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(9): 3093-3105.
- [9] Leleux D P, Claps R, Chen W, et al. Applications of Kalman filtering to real-time trace gas concentration measurements [J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): 85-93.
- [10] Zhang L F, Wang F, Yu L B, et al. The experimental research on reducing the minimum measurable limit of tunable diode laser absorption spectroscopy with wavelet analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1794-1798.
张立芳, 王飞, 俞李斌, 等. 采用小波分析方法降低可调谐半导体激光吸收光谱技术测量下限的实验研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1794-1798.
- [11] Cui H B, Yang K, Zhang L, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) detection signal denoising based on Gabor transform [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(9): 2997-3002.
崔海滨, 杨柯, 张龙, 等. 基于 Gabor 变换的 TDLAS 检测信号的降噪研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(9): 2997-3002.
- [12] Lu Y B, Liu W Q, Zhang Y J, et al. An adaptive hierarchical Savitzky-Golay spectral filtering algorithm and its application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(9): 2657-2663.
鲁一冰, 刘文清, 张玉钧, 等. 一种自适应层进式 Savitzky-Golay 光谱滤波算法及其应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(9): 2657-2663.
- [13] Xia H, Dong F Z, Zhang Z R, et al. Signal

- analytical processing based on wavelet transform for tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7853: 785311.
- [14] Zhou Wei. MATLAB wavelet analysis advanced technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006.
周伟. MATLAB小波分析高级技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [15] Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4): 332-344.
- [16] Li N. Research on gas detection and 2D distribution reconstruction by tunable diode laser absorption spectroscopy technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 16-29.
李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 16-29.