

# 基于小波和经验模态分解的波长调制信号降噪研究

王璟<sup>1</sup>, 张立芳<sup>1,2\*</sup>, 杨巨生<sup>1</sup>, 杨艳霞<sup>1</sup>, 赵贯甲<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>太原锅炉集团有限公司博士后工作站, 山西 太原 030024

**摘要** 基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)的波长调制(WMS)技术是一种有效的痕量气体检测技术,具有高选择性、高精度、高灵敏度、实时在线监测等优点。现场测量过程中,背景噪音和光学条纹等的影响会严重降低系统的测量精度,影响浓度测量结果。为了有效消除这些噪音给测量带来的影响,提高系统信噪比(SNR),提出一种基于小波变换结合经验模态分解(EMD)的数字滤波降噪方法。对低质量浓度的NH<sub>3</sub>进行测量,分别采用小波变换滤波、经验模态分解滤波、小波变换结合经验模态分解滤波对获得的二次谐波信号进行降噪处理。实验结果表明,小波变换结合经验模态分解滤波相对于其他两种滤波方法效果最优,且对质量浓度为11.38 mg/m<sup>3</sup>的NH<sub>3</sub>,信噪比由28.4 dB提高至446 dB,大大提高了系统测量精度。

**关键词** 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 小波变换; 经验模态分解; 降噪

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1830003

## Noise Reduction of Wavelength-Modulated Signal Based on Wavelet and Empirical Mode Decomposition

Wang Jing<sup>1</sup>, Zhang Lifang<sup>1,2\*</sup>, Yang Jusheng<sup>1</sup>, Yang Yanxia<sup>1</sup>, Zhao Guan-jia<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>The Postdoctoral Workstation of Taiyuan Boiler Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China

**Abstract** Wavelength modulation signal (WMS) based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is an effective trace gas detection technology. It offers several advantages such as high selectivity, high precision, and high sensitivity, as well as real-time online monitoring. In the field measurement process, background noise and optical fringes significantly reduce the system's measurement accuracy, affecting the concentration measurement results. To effectively eliminate the effect of these noise on the measurement and improve the signal to noise ratio (SNR) of the system, this study proposes a digital filtering denoising method based on wavelet transform combined with empirical mode decomposition (EMD). The NH<sub>3</sub> with low mass concentration was measured experimentally, and the wavelet transform filtering, EMD filtering, and wavelet transform combined with the EMD filtering were used to reduce noise in the obtained harmonic signals. The experimental results show that the wavelet transform combined with the EMD filtering has the best noise reduction effect compared to the other two methods. The SNR of the wavelet transform combined with the EMD filtering increases from 28.4 dB to 446 dB for NH<sub>3</sub> with a mass concentration of 11.38 mg/m<sup>3</sup>. Thus, the proposed method significantly improves the system's measurement accuracy.

**Key words** tunable diode laser absorption spectroscopy; wavelet transform; empirical mode decomposition; noise reduction

## 1 引言

随着社会的快速发展,来自钢铁、火力发电、化工

等行业的污染气体日趋增长<sup>[1]</sup>。这些气体给环境带来极大危害,因此实时、在线监测污染气体浓度以减少污染气体的排放对环境保护具有重要的意义。传统的气

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-07-08; 录用日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(51976132)

通信作者: \*zhanglifang@tyut.edu.cn

体检测技术有气敏检测法<sup>[2]</sup>、气相色谱法<sup>[3]</sup>等,这些方法由于离线测量、检测周期长、对被测流场存在干扰等,不适用于气体的在线监测。随着半导体技术的发展,一些新型的痕量气体检测技术如可调半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)<sup>[4-5]</sup>运用越来越广泛。中国科学院的李哲等<sup>[6]</sup>利用 TDLAS 对甲烷实现了全浓度量程的多点在线监测,测量结果准确且误差较小。束小文等<sup>[7]</sup>搭建了 TDLAS 系统,对 HCL 气体进行了测量,推出了温度补偿公式,为 TDLAS 在工业高温环境下的测量提供方法。实际测量过程中,噪音的存在会对测量结果有较大影响。常见的噪音有探测器噪音、激光器额外噪音、剩余幅度调制噪音以及环境对测量造成的影响,这些因素会降低系统测量的准确性。数字滤波技术具有操作方便、灵活等特点,同时对于噪音的消除有很好的效果,因而被广泛应用到 TDLAS 测量中,可以在不增加硬件成本的基础上对噪音进行抑制,提高系统测量信噪比。

常用的数字滤波技术有非线性最小二乘法<sup>[8]</sup>、基于最小均方误差的自适应滤波<sup>[9]</sup>、奇异值分解<sup>[10]</sup>、Gabor 变换<sup>[11]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[12]</sup>、小波变换<sup>[13]</sup>、经验模态分解(EMD)<sup>[14]</sup>等。多位学者对此方向进行了研究,高瑞平等<sup>[8]</sup>利用非线性最小二乘法找出二次谐波信号与标准待测气体浓度的关系,该方法能够快速计算待测气体浓度,但降噪效果相对较差。吴臣等<sup>[9]</sup>对基于均方误差的自适应滤波器进行改进,将固定步长变为变步长,该方法提高了信噪比,对改正二次谐波信号的畸变有很大效果,但对其他噪音效果一般。王喆等<sup>[10]</sup>利用奇异值分解(SVD)对二次谐波信号进行降噪处理,通过相关实验证明该方法的噪音去除率很高,但降噪效果受构造矩阵方法的影响。崔海滨等<sup>[11]</sup>将 Gabor 变换应用到二次谐波信号降噪中,通过实验和仿真对 CH<sub>4</sub> 的吸收谱线进行分析,发现经过 Gabor 变换后的系统信噪比提高了大约 15 dB,且二次谐波峰值相对误差小于 3%,该方法对某些噪音的适应性较差。李红莲等<sup>[12]</sup>利用卡尔曼滤波算法对待测气体浓度进行预测,测量结果更为准确。周言文等<sup>[13]</sup>利用的小波去噪技术降低了激光甲烷遥测仪的检测下限。郭心骞等<sup>[14]</sup>利用多次 EMD 对实验测量得到的 CO<sub>2</sub> 气体的谐波信号进行降噪处理,信噪比和信号线性度均提高。EMD 将信号分解成一系列的固有模态分量(IMF),但分解后的 IMF 中仍然具有一些高频噪声,降噪效果达不到要求。本文通过研究各种方法的优缺点,提出一种降噪算法,将小波变换与 EMD 结合起来,对 TDLAS 系统采集的低浓度 NH<sub>3</sub> 的二次谐波信号进行降噪处理。

## 2 基本原理

### 2.1 小波变换

小波变换作为一种现代时频分析方法,在信号处理<sup>[15]</sup>、图像缺陷检测<sup>[16]</sup>等方面具有广泛的应用。其基

本思想是对含有噪音的原始信号在相应基函数下进行展开,按照一定尺度分解成多个不同分辨率的分量,在不失真的情况下对原信号进行重构。实际测量的原始信号多是低频的、平稳的,噪音主要集中在高频段。经过小波变换后,原始信号与噪音的分布不同,原始信号分布的小波系数比较有限,小波系数幅值较大,而噪音分布在整个小波系数上,小波系数幅值较小,通过选取合适的阈值对小波系数进行处理,可以对噪音进行消除而保存原始信号。阈值通常分为硬阈值和软阈值,硬阈值下信号的尖峰能够得到很好的保留,而软阈值下信号的连续性得以保持,使得信号更加的光滑。除了阈值的选取,对小波分解层数的选取也至关重要,层数选得太大会导致信号的失真,而选得太小会使噪音清除得不完全,因此选取合适的分解层数能够在保证信号准确的基础上更好去除各种噪音<sup>[17]</sup>。小波降噪过程主要分为三个步骤:选取合适的分解层数和阈值规则对测量信号进行小波变换处理;对低频信号进行系数保留,对高频信号进行阈值化处理,对基线信号进行系数置零;利用小波逆变换对处理后的信号进行重构,得到所需信号。

### 2.2 经验模态分解

经验模态分解将信号分解成一系列本征模态函数(IMF)和残余信号,这些分量具有不同的特征尺度,各分量的频率由高频到低频依次排列,因为具有时间尺度的关系,各个分量之间互不影响。经验模态分解在处理非稳定、非周期信号上具有明显优势,具有自适应性和完备性。所谓完备性是指分解后的 IMF 与残余信号累加后能够得到原始信号。每个 IMF 分量需要满足 2 个条件<sup>[18]</sup>:信号的极值点的个数与零点的个数差不能大于 1;在曲线任意部分的上包络和下包络的均值为 0。

当一系列信号经过经验模态分解后产生多列 IMF,含高频信号的 IMF 中含有少量的有用信号,对含高频信号的 IMF 进行相应的小波变换降噪,再与低频 IMF 结合,可以达到比经验模态分解更好的降噪效果。

## 3 仿真分析

通过查询 HITRAN<sup>[19]</sup>2008 光谱数据库,选取 NH<sub>3</sub> 在近红外 4433.52 cm<sup>-1</sup> 的吸收谱线来进行仿真分析,该谱线段强度较大且不受其他气体谱线的干扰。在实际大气中二次谐波信号展宽以洛伦兹线型为主,其归一化公式为

$$\alpha(\nu) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)^2} \quad (1)$$

则二次谐波  $H_2(\nu, m)$  可表示为

$$H_2(\nu, m) = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \alpha(\nu + m \cos \theta) \cos 2\theta d\theta, \quad (2)$$

式中:  $\nu_0$  为谐波谱线的中心频率;  $\Delta\nu$  为谐波谱线的半峰

全宽;  $m$  为调制深度, 值为 2.2 时, 吸收谱线具有最优信噪比<sup>[20]</sup>。为了对降噪效果进行评估, 采用信噪比 (SNR)、均方根误差 (RMSE) 二种评价指标。信噪比公式为

$$R_{SN} = 10 \log_{10} \frac{\sum [f(x)_{2f}]^2}{\sum \left[ f(x)_{2f} - f(x)_{d_{denoised} - 2f} \right]^2} \quad (3)$$

均方根误差公式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\sum_{x=1}^N \left[ f(x)_{2f} - f(x)_{d_{denoised} - 2f} \right]^2 / N} \quad (4)$$

式中:  $N$  为谐波信号数据长度;  $f(x)_{d_{denoised} - 2f}$  为降噪后的二次谐波信号;  $f(x)_{2f}$  为降噪前的二次谐波信号。TDLAS 测量过程中探测器噪音等一些光学噪音主要表现为白噪声, 白噪声的功率谱为常数, 通常可以采取多次测量取平均的方法消除, 但该方法计算量大, 耗时长。利用 Matlab 仿真出理想二次谐波谱线, 利用 awgn 函数对其添加 20 dB 的高斯白噪音, 如图 1 所示。利用小波变换、EMD、小波变换结合 EMD 三种算法对含高斯白噪音的二次谐波信号进行降噪处理。小波变换滤波过程中需要选择合适的小波基及分解层数, 数值仿

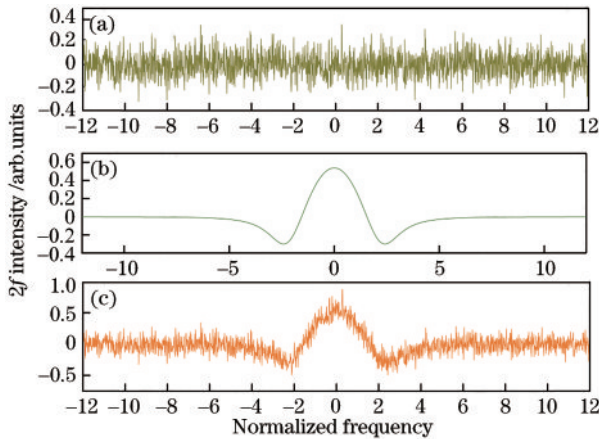


图 1 各种信号。(a)高斯白噪音;(b)理想二次谐波信号;(c)添加高斯白噪音后的二次谐波信号

Fig. 1 Various signals. (a) Gaussian white noise; (b) ideal second harmonic signal; (c) second harmonic signal after adding Gaussian white noise

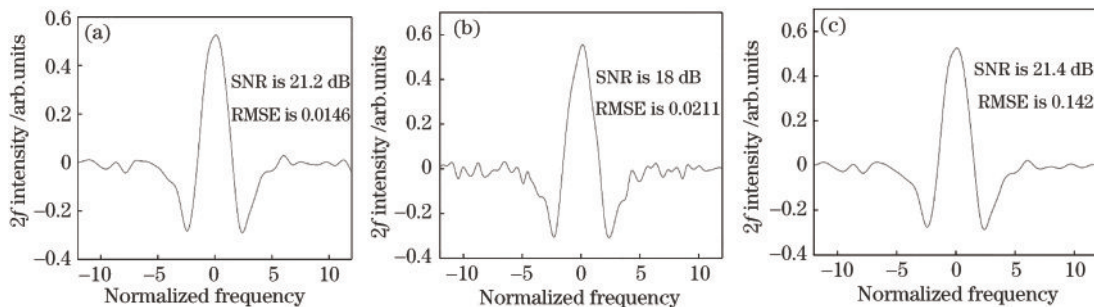


图 3 不同方法对含高斯白噪音的二次谐波信号降噪结果。(a)小波变换;(b)EMD;(c)小波变换结合 EMD

Fig. 3 Results of the second harmonic signal with Gaussian white noise denoised by different methods. (a) Wavelet transform; (b) EMD; (c) wavelet transform combined with EMD

真计算了谐波信号的 SNR 随 db 基和分解层数变化而变化的情况, 如图 2 所示。结果表明 db8 在分解层数为 6 时 SNR 最大, 故选用 db8 小波基, 分解层数为 6。对三种降噪后的二次谐波信号进行信噪比和均方根误差计算, 结果如图 3 所示。小波变换信噪比为 21.2 dB, 均方根误差为 0.0146, EMD 信噪比为 18 dB, 均方根误差为 0.0211, 小波变化结合 EMD 的信噪比为 21.4 dB, 均方根误差为 0.142。结果表明: 相对于降噪前的信噪比 4.57 dB, 三种算法都能大大提高信噪比; 对于信噪比和均方根误差, 小波变换结合 EMD 的计算结果都要优于小波变换和 EMD, 表明对于高斯白噪音, 小波变换结合 EMD 能够更好地保留原始信号特征, 具有更好的降噪效果。

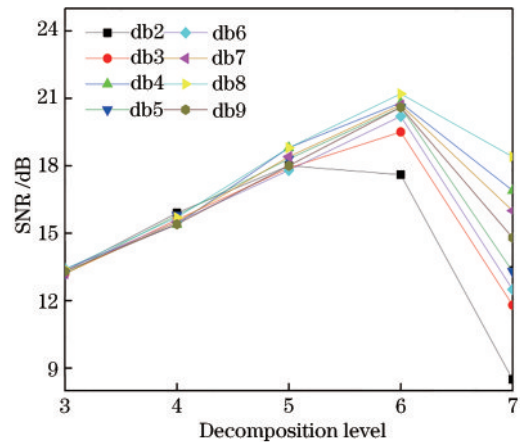


图 2 不同小波系信噪比随分解层数的变化

Fig. 2 Variation of SNR of different wavelet systems with number of decomposition layers

在 TDLAS 测量过程中, 干扰噪音除了白噪音外主要还有光学条纹, 光学条纹主要是以正弦波的形式叠加在原始谐波上的<sup>[21]</sup>。可以通过改进光学元件、抑制标准具效应等方法对光学条纹进行抑制, 但不能完全消除; 或者采用数字滤波器方法过滤, 但光学条纹为非线性、非平稳噪音, 增加了该方法的降噪难度; EMD 相对于其他滤波方法能够对周期性的干涉条纹进行分解, 降噪效果会更好。对此进行数值仿真, 得出含有光



学条纹的二次谐波信号,如图 4 所示。添加噪音后的信噪比为 21.47 dB,对添加噪音后的光学条纹采用三种降噪算法进行降噪,结果如图 5 所示,EMD 算法降噪后,信噪比提升至 54.8 dB,小波变换降噪后信噪比提升至 53.2 dB,小波变换结合 EMD 降噪后信噪比提升至 53.6 dB。结果表明,EMD 降噪信噪比为三种算法中最高,均方根误差也最小,其次是小波变换结合 EMD,最后是小波变换。这是由于经 EMD 的低频 IMF 所含真实信号太小,小波变换无法很好降噪。可见对于光学条纹,三种算法的降噪效果与高斯白噪音截然不同,EMD 相对于小波变换降噪效果更好。

TDLAS 现场测量过程中包含多种噪音成分,既有探测器白噪音又有标准具效应引起的周期性光学条纹,还受外界环境的影响,为了进一步研究三种降噪方法的降噪效果,对相关实验进行分析。实验中,通常采用一组“零气”作为对照组,即激光通过无任何气体的

吸收池,可以消除掉一部分光学条纹和剩余幅度调制和背景环境引起的噪音。

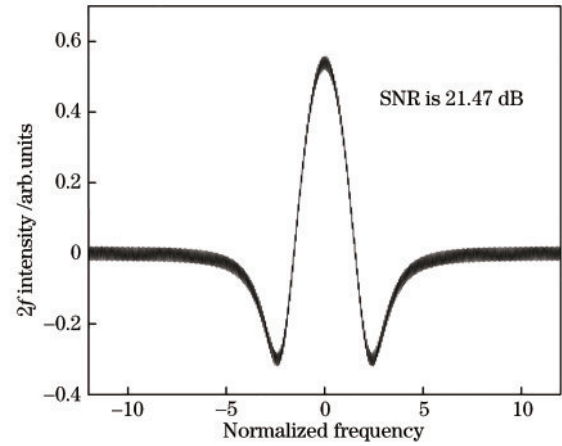


图 4 含光学条纹的二次谐波

Fig. 4 Second harmonics with optical fringes

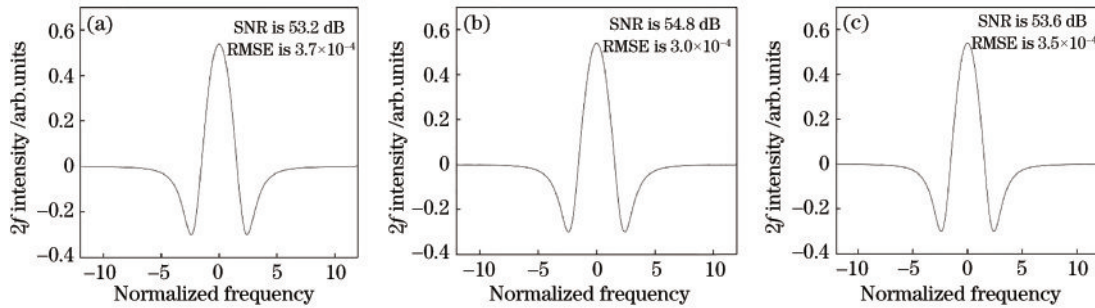


图 5 不同方法对含光学条纹的二次谐波信号降噪结果。(a)小波变换;(b)EMD;(c)小波变换结合 EMD

Fig. 5 Results of the second harmonic signal with optical fringes denoised by different methods. (a) Wavelet transform; (b) EMD; (c) wavelet transform combined with EMD

## 4 实验分析

### 4.1 实验装置

实验选取的  $\text{NH}_3$  吸收谱线为  $4433.5 \text{ cm}^{-1}$ ,且中心波长为  $2255.521 \text{ nm}$ 。采用波长调制技术(WMS)对低浓度  $\text{NH}_3$  进行测量,即将信号发生器产生  $200 \text{ Hz}$  的低频锯齿波和来自锁相放大器的  $15 \text{ kHz}$  正弦信号叠加,通过激光控制器来控制输出信号的波长。激光通过准直器校正后,进入光程为  $10.13 \text{ m}$  的 Herriott 池中进行多次反射,池中温度范围为  $350 \sim 650 \text{ K}$ ;之后经低浓度  $\text{NH}_3$  吸收后信号强度发生衰减,之后由探测器将光信号转换为电信号;产生的电信号经过数据采集卡传递给计算机,计算机进行处理和分析。具体测量原理及实验设备见文献[22]。本文采用波长调制技术,经探测器的谐波信号经过锁相放大器后会得到解调,非目标信号会在此消除,且此时气体浓度与二次谐波峰值  $P_{2f}$  满足:

$$X \propto \frac{\Delta\nu\pi P_{2f}}{I_0 S(T)L} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[ \frac{2+m^2}{(1+m^2)^{1/2}} - 2 \right] \right\}^{-1}, \quad (5)$$

式中: $I_0$ 为入射光强; $S$ 为待测气体介质谱线的线强; $X$ 为待测气体质量浓度; $L$ 为激光在气体中的总路程长度。

通过配气仪配制了质量浓度为  $1.52 \sim 11.38 \text{ mg/m}^3$  的  $\text{NH}_3$ ,系统测量结果如图 6 所示。分别采用小波变换、EMD、小波变换结合 EMD 对实验获得的含噪二次谐波信号进行降噪处理,结果如图 7 所示。

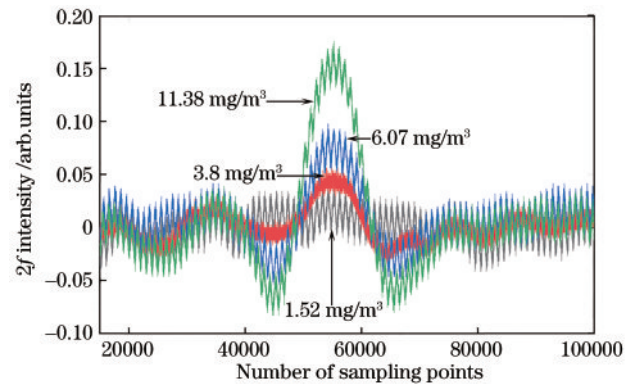


图 6 实验测得的二次谐波信号

Fig. 6 Measured the second harmonic signal experimentally

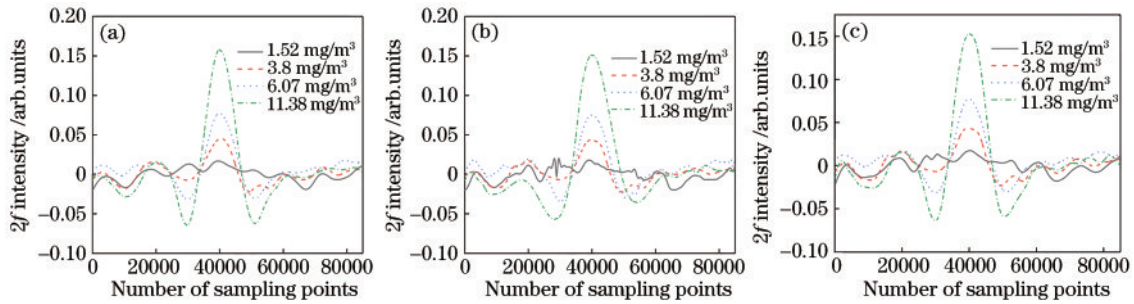


图7 不同方法对二次谐波信号降噪的结果。(a)小波变换;(b) EMD;(c)小波变换结合EMD

Fig. 7 Results of the second harmonic signal denoised by different methods. (a) Wavelet transform; (b) EMD; (c) wavelet transform combined with EMD

## 4.2 处理与分析

由图7可看出,EMD降噪后的谐波信号明显比其他粗糙,含噪量大于小波降噪和小波变换结合EMD降噪。以信噪比来进一步对比三种方法的降噪效果,由于不能获取理想的二次谐波信号,定义峰峰值与一段噪音标准差的比值为信噪比,计算结果如表1所示。从表1可以看出,各种质量浓度下,小波变换结合

EMD方法降噪后的二次谐波信号的信噪比最高,当 $\text{NH}_3$ 的质量浓度为 $11.38 \text{ mg/m}^3$ 时,信噪比由 $28.4 \text{ dB}$ 提高至 $446 \text{ dB}$ 。图8显示了不同质量浓度下的降噪后谐波最大峰值与气体质量浓度的线性拟合关系,可以看出小波变换结合EMD的线性拟合度为 $0.9983$ ,高于小波变换和EMD,证实了小波变换结合EMD具有更好的降噪效果。

表1 三种方法的降噪结果

Table 1 Results of noise reduction of three methods

Mass concentration / ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	SNR / dB			
	Original signal	Wavelet transform	EMD	Wavelet transform combined with EMD
1.52	11.95	74	57	96
3.8	26.14	122	116	128
6.07	16.54	213	111	310
11.38	28.4	317	307	446

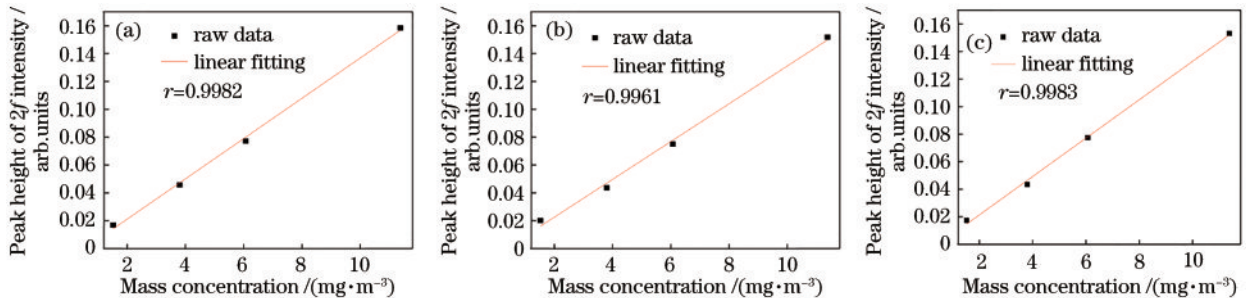


图8 二次谐波信号最大峰值与 $\text{NH}_3$ 的质量浓度的拟合。(a)小波变换;(b) EMD;(c)小波变换结合EMD

Fig. 8 Fitting between biggest peak height of the second harmonic signal and mass concentration of  $\text{NH}_3$ . (a) Wavelet transform; (b) EMD; (c) wavelet transform combined with EMD

## 5 结论

数字滤波对TDLAS系统降噪来说具有灵活、方便的特点,且对硬件设备要求低。先对TDLAS获得的 $\text{NH}_3$ 谱线段的二次谐波信号进行仿真模拟,分别采取小波变换、EMD、小波变换结合EMD对信号进行降噪处理。对于不同类型的噪音,三种方法的降噪效果不同,对于白噪音,小波变换结合EMD方法效果最好,而对于光学条纹,EMD效果最优。利用小波变换结合EMD数字滤波方法对实验获取的二次谐波信号

进行降噪处理,与小波变换和EMD方法相比,结果表明小波变换结合EMD方法对噪声的抑制更好,能够最大限度地提高系统测量的信噪比。数字滤波技术与TDLAS相结合,为TDLAS技术在线测量痕量污染物气体浓度提供数据支撑。

## 参考文献

- [1] 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业大气环境影响[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 2981-2994.  
Tang L, Xue X D, Bo X, et al. Contribution of

- emissions from the iron and steel industry to air quality in China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 2981-2994.
- [2] 信丰鑫. 基于 TDLAS 的大气 CO<sub>2</sub> 监测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 2-15.  
Xin F X. Study on monitoring technology of atmospheric carbon dioxide concentration based on TDLAS[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 2-15.
- [3] 刘永超. 气相色谱法环境大气 VOCs 监测技术及数据处理方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 3-20.  
Liu Y C. Research on monitoring technology and data processing method of VOCs based on gas chromatography [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 3-20.
- [4] 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境监测领域中光谱学技术进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0500001.  
Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, et al. Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0500001.
- [5] 卢伟业, 朱晓睿, 李越胜, 等. TDLAS 直接吸收法和波长调制法在线测量 CO<sub>2</sub> 的比较[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7): 0717002.  
Lu W Y, Zhu X R, Li Y S, et al. Comparison of direct absorption and wavelength modulation methods for online measurement of CO<sub>2</sub> by TDLAS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0717002.
- [6] 李哲, 张志荣, 孙鹏帅, 等. 利用 TDLAS 技术的多点甲烷气体全量程监测[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0917009.  
Li Z, Zhang Z R, Sun P S, et al. Multi-point full range monitoring of methane based on TDLAS technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917009.
- [7] 束小文, 张玉钧, 阚瑞峰, 等. 基于 TDLAS 技术的 HCl 气体在线探测温度补偿方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(5): 1352-1356.  
Shu X W, Zhang Y J, Kan R F, et al. An investigation of temperature compensation of HCL gas online monitoring based on TDLAS method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(5): 1352-1356.
- [8] 高瑞平, 杨特育. 基于 TDLAS 的一氧化碳浓度检测的研究[J]. *合肥学院学报(自然科学版)*, 2011, 21(3): 73-77.  
Gao R P, Yang T Y. Study of carbon monoxide concentrations' detection based on TDLAS[J]. *Journal of Hefei University (Natural Sciences)*, 2011, 21(3): 73-77.
- [9] 吴臣, 武斌, 陈志, 等. 相关变步长自适应算法在 TDLAS 系统中的应用[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(12): 92-97, 102.  
Wu C, Wu B, Chen Z, et al. Application of correlated-variable step size adaptive algorithm in TDLAS system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(12): 92-97, 102.
- [10] 王喆, 汪曦, 张锐, 等. 奇异值分解用于可调谐二极管激光吸收光谱技术去除系统噪声[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3369-3376.  
Wang Z, Wang Y, Zhang R, et al. A singular value decomposition method for tunable diode laser absorption spectroscopy system to remove systematic noises[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3369-3376.
- [11] 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.  
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.
- [12] 李红莲, 吴建伟. 基于卡尔曼滤波的激光光谱 CO<sub>2</sub> 监测算法研究[J]. *激光杂志*, 2013, 34(1): 41-42.  
Li H L, Wu J W. Inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy to determine CO<sub>2</sub> concentration based on Kalman filter algorithm[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(1): 41-42.
- [13] 周言文, 苗澍苗, 姚丹, 等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0611001.  
Zhou Y W, Miao S Z, Yao D, et al. Laser methane remote sensor system based on wavelength modulation spectroscopy and wavelet denoising[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0611001.
- [14] 郭心骞, 邱选兵, 季文海, 等. 基于经验模态分解的可调谐半导体激光吸收光谱中干涉条纹的抑制[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 113001.  
Guo X Q, Qiu X B, Ji W H, et al. Minimization of interference fringes in tunable diode laser absorption spectrum based on empirical mode decomposition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 113001.
- [15] 丁朋, 黄俊斌, 汪云云, 等. 采用小波变换提取弱反射光纤布拉格光栅干涉信号[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190603.  
Ding P, Huang J B, Wang Y Y, et al. Extraction of interference signal of weak reflection fiber Bragg grating by wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190603.
- [16] 范程华, 王群京, 曹欣远, 等. 基于信号突变点校正的太阳能电池片缺陷检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 061101.  
Fan C H, Wang Q J, Cao X Y, et al. Defect detection method for solar cell based on signal catastrophe-points correction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 061101.
- [17] 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.
- [18] 付晓波. 经验模态分解法理论研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2013: 3-25.  
Fu X B. Research on empirical mode decomposition theory and its application[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013: 3-25.
- [19] 朱晓睿. 基于 TDLAS 的燃煤电厂温室气体排放检测技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 18-25.  
Zhu X R. Study of carbon emission detection of flue gas based on TDLAS[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 18-25.

- [20] 刘兴立. 基于 TDLAS 的数字信号处理与分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 16-28.  
Liu X L. The digital signal processing and analysis based on TDLAS[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 16-28.
- [21] 熊博. TLAS 系统中光学条纹干扰的机理、特性及消除方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 1-7.  
Xiong B. Research on the mechanism, characteristics and suppression of the optical fringes in TLAS system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 1-7.
- [22] 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.  
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.