

激光与光电子学进展

二次谐波信号降噪方法的研究

赵安生¹, 杨絮^{1*}, 张贺², 张志龙¹¹长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 在近红外区域,利用波长调制光谱技术进行气体浓度检测时,光学元件以及电子器件的噪声会影响二次谐波信号的信噪比。为了抑制噪声,提出一种基于经验模态分解、去趋势波动分析和小波自适应阈值的复合降噪算法。该算法针对传统经验模态分解降噪算法中存在的有用信号缺失的问题,利用去趋势波动分析优化对于信息主导本征模函数的筛选,将筛选出的信息主导本征模函数进行信号重构,再用小波自适应阈值算法提高降噪精度。将提出的算法与经典的降噪算法进行对比评估,提出的算法降噪后的二次谐波信号与原二次谐波信号的互相关系数为 99.9018%,均方根误差为 0.0087%。通过对实验中实际得到的二次谐波信号进行去噪,结果表明提出的算法去噪效果明显,能够保留有用的信息点。

关键词 光谱学; 波长调制光谱技术; 二次谐波; 经验模态分解; 去趋势波动分析; 小波自适应阈值函数

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213359

Research on Noise Reduction Method of Second-Harmonic Signal

Zhao Ansheng¹, Yang Xu^{1*}, Zhang He², Zhang Zhilong¹¹School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In the near-infrared region, the noise of optical and electronic components affects the signal-to-noise ratio of the second-harmonic signal when wavelength modulation spectroscopy is used to detect gas concentration. Therefore, to suppress the noise, a compound denoising algorithm based on empirical mode decomposition, detrended fluctuation analysis, and the wavelet adaptive threshold is proposed. The algorithm, in view of the existing traditional empirical mode decomposition noise reduction algorithm, is useful for the signal loss problem. Therefore, detrend fluctuation analysis is used to optimize the information intrinsic mode function screening, and it filters out information for the intrinsic mode function for signal reconstruction. Then, the wavelet adaptive threshold algorithm is used to improve the noise reduction accuracy. The proposed algorithm is compared with the classical denoising method and evaluated. The correlation number between the proposed denoising method and the original second-harmonic signal after denoising is 99.9018%, and the root mean square error is 0.0087%. By denoising the second-harmonic signals obtained in the experiment, the results show that the proposed algorithm has a noticeable denoising effect and can retain useful information points.

Key words spectroscopy; wavelength modulation spectroscopy; second harmonic; empirical mode decomposition; detrend fluctuation analysis; wavelet adaptive threshold function

1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术具有系统简单、灵敏度高、可靠性强等优点,常被应用于工业及农业领域^[1]。波长调制技术作为气体浓度检测技

术中的一种,相较于直接吸收光谱技术有着灵敏度高的优势^[2]。然而,TDLAS系统性能会受到一些因素的影响,如光学元件和电子器件中存在的高斯白噪声^[3]、背景提取引起的误差^[4]、光学条纹等^[5]都会影响系统测量的精确度。因此,为了方便后续浓度反演,需要对

收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-01-21; 录用日期: 2022-01-26; 网络首发日期: 2022-02-13

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200403073SF)

通信作者: *lbaomi@cust.edu.cn

二次谐波信号进行预处理去噪。近几年,针对二次谐波信号降噪的问题,张瑞林等^[6]利用变分模态分解结合小波阈值函数的方法,提高了二次谐波信号的信噪比。张立芳等^[7]分别利用小波变换和 Gabor 变换法实现了二次谐波信号中多种噪声的抑制。崔海滨等^[8]利用 Gabor 变换法进行去噪处理,使信噪比提高了 15.73 dB。陈鸿雁^[9]用改进的变分模态分解(VMD)方法和小波半阈值滤波方法进行降噪,有效地抑制了噪声。梁宇等^[10]利用 VMD 法有效降低了高斯白噪声及光学器件标准具的噪声干扰。

为了更好地削弱噪声的影响,提高检测精度,本文提出了一种经验模态分解(EMD)、去趋势波动分析(DFA)和小波自适应阈值降噪复合算法。利用 EMD 算法对于非平稳非线性信号处理的优越性,以及其对二次谐波信号较好的适用性,首先对带噪声的二次谐波信号利用 EMD,得到不同频率的本征模态分量(IMFs)^[11],并将 IMFs 按照频率高低进行降序排列,利用 DFA 法筛选信息主导的 IMFs,并将信息主导的 IMFs 加以重构得到重构信号,对重构的信号利用小波自适应阈值函数进行进一步去噪,提高精度,获得去噪后的二次谐波信号。为了进一步证明本文所提出的降噪算法的优越性,对比了 EMD 和 DFA 复合降噪算法^[12]、小波软阈值去噪算法^[13]、小波硬阈值去噪算法^[14]以及小波自适应阈值去噪算法^[15]等传统降噪方法,对降噪效果进行分析,结果表明,EMD、DFA 和小波自适应阈值降噪复合算法可以有效地抑制噪声,且能够较好地保留信号的真实性和完整性。

2 EMD、DFA 和小波自适应阈值降噪算法原理

2.1 EMD 原理

EMD^[16]可以将一个非平稳的信号分解成有限个 IMFs 和余波的形式。理论上,它适用于任何非平稳非线性信号的处理^[9]。如下式所示:

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n, \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为原始信号; c_j 为频率从高到低的信号; r_n 为残余分量。



图 1 小波阈值去噪过程

Fig. 1 Wavelet threshold denoising process

常用的阈值估计法有:无偏似然阈值估计法、极大极小阈值估计法、固定阈值估计法、启发式阈值估计法等^[19]。本文选择基于无偏似然阈值估计准则的自适应阈值选择法。具体实现方法为

传统的 EMD 去噪方法是将噪声信号看作高频成分^[17],重构低频信号,得到去噪信号,但是该去噪方法会导致有用信号的缺失,造成较大的误差。

2.2 DFA 原理

非平稳的时间序列,可能导致虚假相关,DFA 方法可以避免该虚假相关现象。其算法步骤为

1)对序列 $x(t)$ 进行积分,得到信号 $y(k)$ 为

$$y(k) = \sum_{t=1}^k [x(t) - \bar{x}], k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中: N 为时间序列 $x(t)$ 的长度; \bar{x} 为 $x(t)$ 的均值。

2)将 $y(k)$ 分为 n 个没有重叠的子序列,将这几段子序列进行拟合,设这几个子序列段的局部线性趋势为 $y_n(k)$,则其均方根波动为

$$F_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2}. \quad (3)$$

3)若 $x(t)$ 存在长程幂律相关,则有

$$F_n \propto n^\alpha, \quad (4)$$

式中: α 为标度指数; F_n 在双对坐标中可以看作 α 的函数,这里的斜率为 α 。

关于 Hurst 指数, Yang 等^[18]指出, Hurst 指数可用 α 表示, α 值越大,表示信号越平滑, α 与时间序列的相关性如表 1 所示。

表 1 α 与时间序列的相关性
Table 1 α correlation with time series

α	Signal correlation
$0 < \alpha < 0.5$	Short-range correlation
$\alpha = 0.5$	Irrelevant
$\alpha > 0.5$	Long-term correlation

从表 1 中可以看出,当 $0 < \alpha < 0.5$ 时,即当信号存在短程相关时,认为噪声为主导成分。因此,可以通过计算 α 的值来区分 IMFs 是噪声主导还是信息主导。引入 DFA 算法可以弥补 EMD 去噪算法中对于信息主导 IMFs 筛选不精确的问题。

2.3 小波自适应阈值去噪原理

小波阈值去噪大致分 3 部分:分解部分、阈值处理部分和重构部分。小波阈值去噪过程如图 1 所示。

1)对元素 s 进行预处理,得到新序列 $f(k)$ 为

$$f(k) = [\text{sort}(|s|)]^2, \quad (5)$$

式中: $k=1, 2, 3, \dots, N$; $\text{sort}(|s|)$ 表示升序排列。

2)假设 $f(k)$ 为阈值,则阈值风险向量为

$$R(k) = \left[N - 2k + \sum_{j=1}^k f(j) + (N-k)f(N-k) \right] / N. \quad (6)$$

3) $R(k)$ 取最小点时, 对应的 k_{\min} 值即为阈值。

$$\lambda_k = \sqrt{f(k_{\min})}, \quad (7)$$

式中, λ_k 为阈值。

2.4 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪方案

EMD-DFA-小波自适应阈值组合去噪过程为

1) 将含噪声的二次谐波信号进行 EMD, 得到各阶

IMFs, 并将其按照频率的高低降序排列;

2) 计算出各阶 IMFs 的 Hurst 指数值, 即 α 值;

3) 除去 $\alpha < 0.5$ 的 IMFs, 将其余的 IMFs 加以重构, 得到重构信号;

4) 将重构后的信号进行小波自适应阈值降噪, 得到去噪后的二次谐波信号。

EMD-DFA-小波自适应阈值组合去噪流程如图 2 所示。

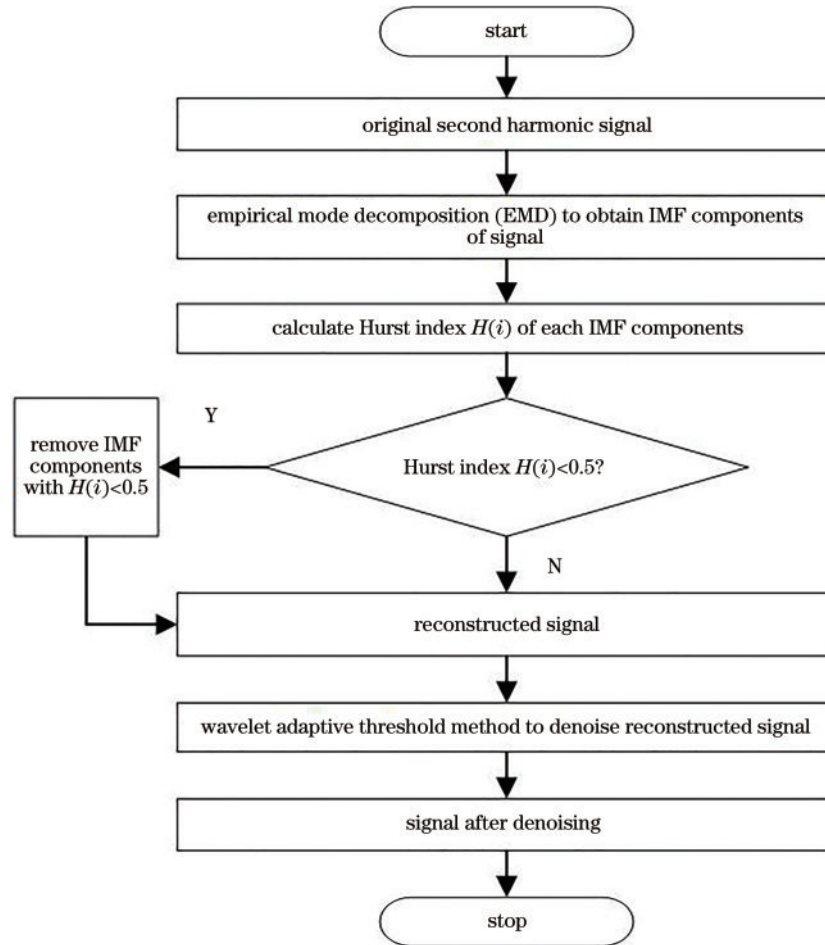


图 2 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪方法流程图

Fig. 2 Flow chart of EMD-DFA-wavelet adaptive threshold denoising method

3 EMD-DFA-小波自适应阈值组合去噪分析

3.1 二次谐波信号

本文使用 Matlab2016b 平台对二次谐波信号进行仿真, 得到理想的二次谐波信号如图 3(a) 所示, 利用 Awgn 函数将高斯白噪声信号加入理想二次谐波信号中, 得到带噪声的二次谐波信号, 如图 3(b) 所示。

3.2 EMD-DFA 筛选噪声主导分量

将带噪声的二次谐波信号进行 EMD, 求出分解得到的各个 IMFs 所对应的 Hurst 指数, 计算得到的 Hurst 指数值如表 2 所示, 由表 2 可知 Hurst 指数值小于 0.5 的 IMFs 为前四阶, 将 4 个 Hurst 指数小于 0.5 的带噪声信

号的 IMFs 筛选出来, 如图 4 所示, 图 4(a)~4(d) 中曲线分别为带噪声信号的 IMF1、IMF2、IMF3、IMF4。

3.3 EMD-DFA-小波自适应阈值降噪

将 DFA 法筛选出来的信息主导的 IMFs 进行重构, 对重构后的信号进行小波自适应阈值降噪处理, 最终得到的去噪信号如图 5 所示, 从图 5 中可以看出经 EMD-DFA-小波自适应阈值降噪处理后的二次谐波信号曲线平滑, 峰值点处的去噪效果更明显, 较好地保留了有用的信息点。

3.4 EMD-DFA-小波自适应阈值组合去噪性能分析

为了对去噪效果进行更精确的评估, 利用均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、信噪比 (SNR)、峰值信噪比 (PSNR) 以及互相关系数 (CC) 这 5 个参数

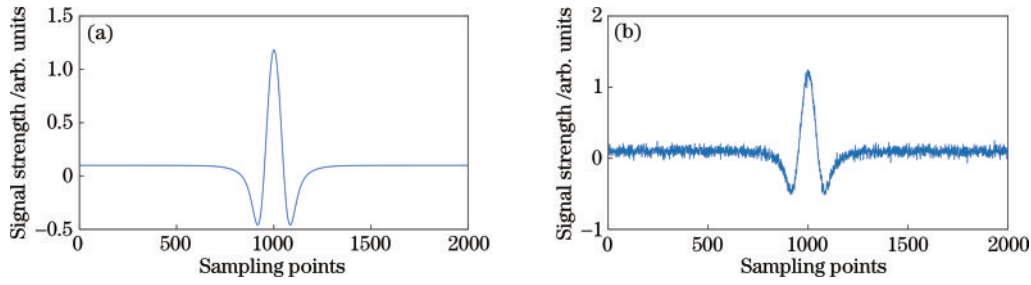


图 3 二次谐波信号。(a)原始二次谐波信号；(b)带噪声二次谐波信号

Fig. 3 Second harmonic signals. (a) Original second harmonic signal; (b) second harmonic signal with noise

表 2 二次谐波信号各阶 IMF 的标度指数

Table 2 Scale index of each order IMF's of second harmonic signal

Portion	α
1	0.4055
2	0.2557
3	0.2968
4	0.3262
5	0.7660
6	0.8120
7	0.8321
8	0.8966
9	0.9304
10	0.9779
11	0.9907
12	1.0092

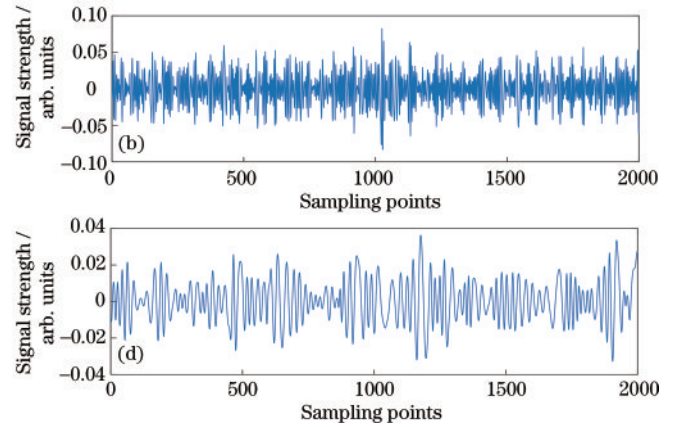
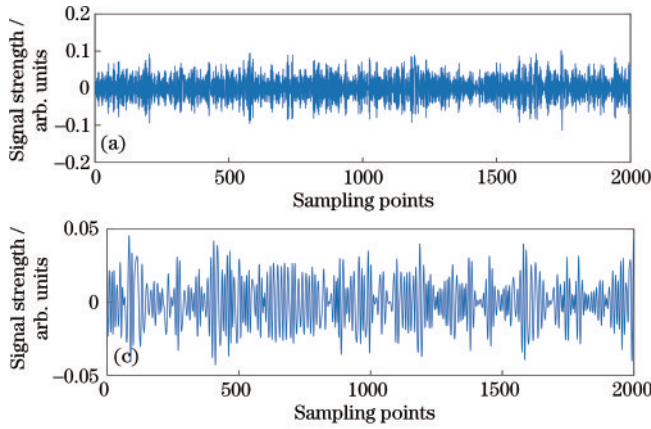


图 4 带噪声信号的 IMFs。(a)IMF1；(b)IMF2；(c)IMF3；(d)IMF4

Fig. 4 IMFs of signals with noise. (a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4

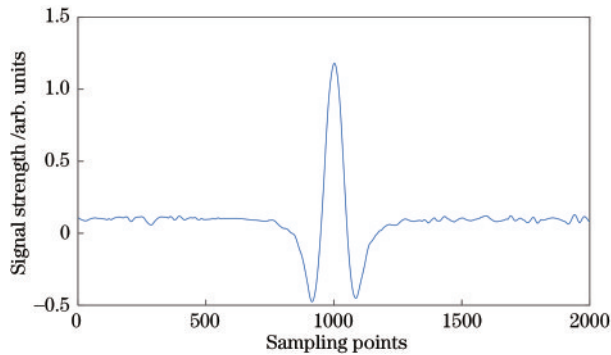


图 5 EMD-DFA-小波自适应阈值降噪

Fig. 5 EMD-DFA-wavelet adaptive threshold noise reduction

来进行评估。

这里 RMSE 表征曲线之间的拟合程度,其值越小表示测量精度越高。RMSE 可表示为

$$\beta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n [S(x)_{2f} - S(x)_{\text{denoised}-2f}]^2}{n}}, \quad (8)$$

式中: β_{RMSE} 为均方根误差; $S(x)_{\text{denoised}-2f}$ 是二次谐波信号去噪后的曲线值; $S(x)_{2f}$ 是原始二次谐波信号的曲线值; n 为观测次数。

MAE 表示去噪后信号的曲线值和原始信号的曲线值之间绝对误差的平均值。MAE 可表示为

$$\alpha_{\text{MAE}} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |S(x)_{2f} - S(x)_{\text{denoised}-2f}|. \quad (9)$$

SNR 用来衡量去噪效果,可表示为

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \left(\frac{S}{N} \right), \quad (10)$$

式中: R_{SN} 为信噪比; S 为有用信号; N 为噪声信号。

PSNR 表征原信号与去噪后信号之间的均方误差相对于 $(2^n - 1)^2$ 的对数值,可表示为

$$\delta_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \left[\frac{(2^n - 1)^2}{\epsilon_{\text{MSE}}} \right], \quad (11)$$

式中: δ_{PSNR} 为峰值信噪比; ϵ_{MSE} 是原信号与去噪后信号之间的均方误差; n 为每个采样值的比特数。

CC 衡量去噪后的二次谐波信号与原始二次谐波信号之间的关联程度。

EMD-DFA-小波自适应阈值组合去噪波形与原始二次谐波信号的对比图如图 6 所示,二者之间的 RMSE 为 0.0087%, MAE 为 0.7513%, SNR 为 27.6711 dB,

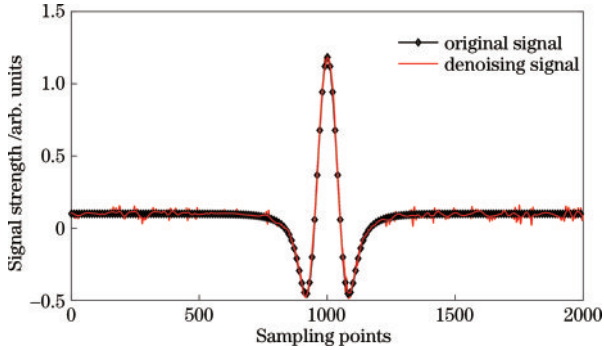


图 6 原始信号与 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪信号对比
Fig. 6 Comparison of original signal and EMD-DFA-wavelet adaptive threshold denoising signals

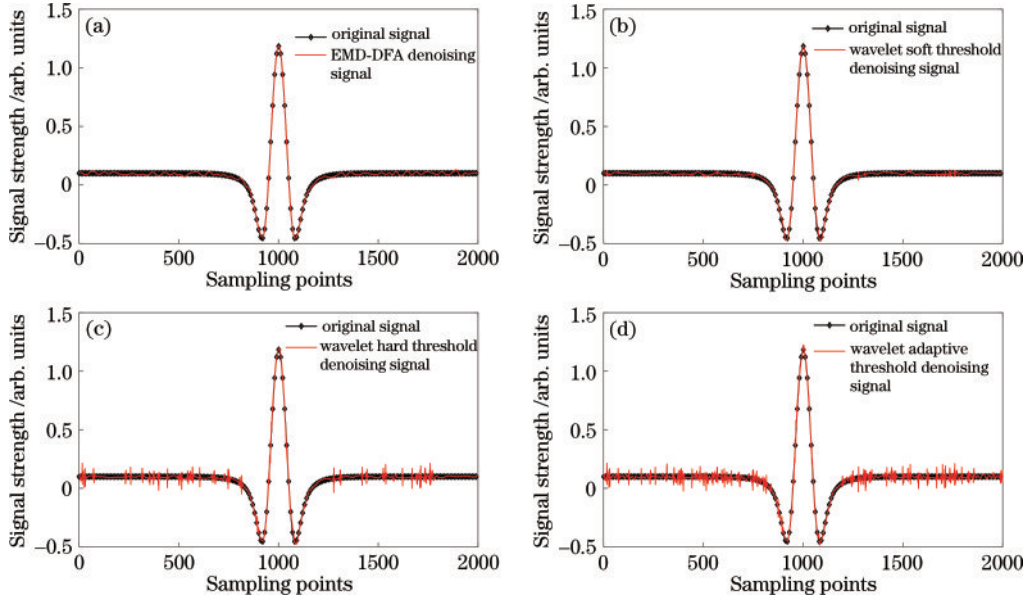


图 7 不同算法的降噪效果图。(a)使用 EMD-DFA 降噪;(b)使用小波软阈值降噪;(c)使用小波硬阈值降噪;
(d)使用小波自适应阈值降噪

Fig. 7 Noise reduction effect diagram of different algorithms. (a) Use EMD-DFA to reduce noise; (b) use wavelet soft threshold to reduce noise; (c) use wavelet hard threshold to reduce noise; (d) use wavelet adaptive threshold to reduce noise

表 3 各种去噪方法效果对比

Table 3 Comparison of effects of various denoising methods

Denoising method	RMSE / %	MAE / %	SNR / dB	PSNR / dB	CC / %
EMD-DFA	0.0267	1.2990	22.7862	37.1903	99.6916
Wavelet soft threshold	0.0133	0.9306	25.8106	40.2147	99.8499
Wavelet hard threshold	0.0253	1.0046	23.0231	37.4272	99.7067
Wavelet adaptive threshold	0.0314	1.2198	22.0871	36.4912	99.6366
EMD-DFA-wavelet adaptive threshold	0.0087	0.7513	27.6711	42.0752	99.9018

5 实际测量二次谐波信号的 EMD-DFA-小波自适应阈值降噪

为了验证本文提出的降噪算法在实际应用中的可

PSNR 为 42.0752 dB, CC 为 99.9018%。

4 与其他降噪方法的比较

为了进一步验证 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪算法的优越性,这里与传统的几种降噪算法进行对比分析,即 EMD-DFA 降噪、小波软阈值降噪、小波硬阈值降噪和小波自适应阈值函数降噪等 4 种降噪方法。将降噪后的二次谐波信号与原始二次谐波信号曲线进行对比,不同算法的降噪结果如图 7 所示。且各种算法去噪效果对比得到的参数如表 3 所示,由表 3 可知,相较于其他 4 种降噪方法,经过 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪得到的二次谐波曲线的 RMSE 明显降低,为 0.0087%, SNR 明显增大,为 27.6711 dB,相关性明显增强,CC 为 99.9018%。因此,利用 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪方法处理后的二次谐波曲线更逼近于原始曲线。该方法降噪优势明显,且能够很好地还原二次谐波信号的峰值位置,保留信号的真实性和

靠性,选取不同体积分数的 CO₂ 气体作为被测气体,提取其对应的二次谐波信号进行可靠性验证。系统由信号发生器、中心波长在 1572.3 nm 处的分布式反馈 (DFB) 激光器、激光控制器、光程为 14.5 m 的气室、准

直器、光电探测器、锁相放大器、数据采集(DAQ)卡及计算机构成。系统结构如图 8 所示。正弦波调制信号频率为 30 kHz, 锯齿波扫描信号频率为 10 Hz, 激光器的调幅系数为 0.05。将由信号发生器产生的正弦波信号与锯齿波信号叠加后输入到激光控制器, 激光器产生的激光经过体积分数分别为 30%、20%、18%、15%、12%、10% 的 CO₂ 气体的气室后进行吸收, 光电探测器将接收到的光信号转化为电信号, 由锁相放大器解调得到二次谐波信号, 二次谐波信号的幅值与 CO₂ 体积分数之间的关系如图 9 所示。由图 9 可以看

到, 经解调得到的二次谐波信号整体不平滑, 二次谐波信号的幅值点不够明确, 误差较大。经过 EMD-DFA-小波自适应阈值降噪处理后的二次谐波信号与 CO₂ 体积分数的关系如图 10 所示, 可以看到去噪后的二次谐波信号整体平滑, 对于有用的信息点的降噪处理效果明显。二次谐波信号的幅值与 CO₂ 体积分数的关系的线性拟合如图 11 所示, 由图 11 可以看出, 二次谐波信号的幅值与 CO₂ 的体积分数大小成正比, 且线性拟合度为 99.93%, 拟合效果优良, 可以为后续的体积分数反演做准备。

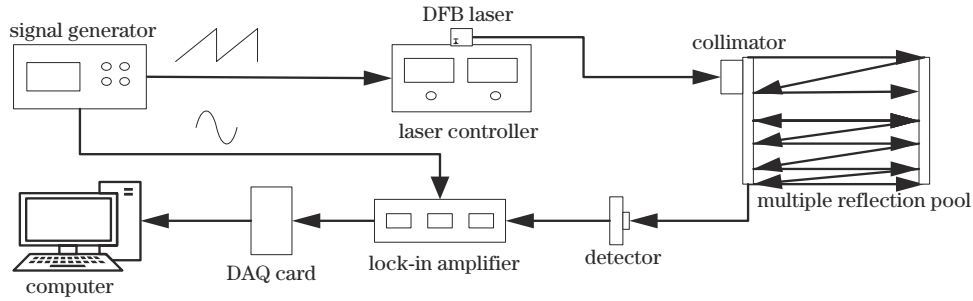


图 8 系统结构图

Fig. 8 System structure diagram

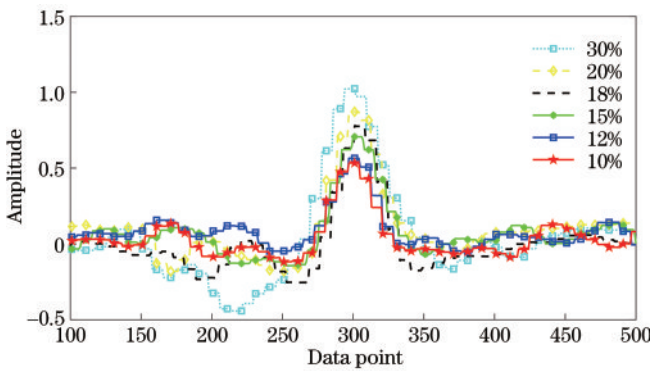


图 9 去噪前二次谐波幅度与 CO₂ 体积分数的关系

Fig. 9 Relationship between second harmonic amplitude and CO₂ concentration before denoising

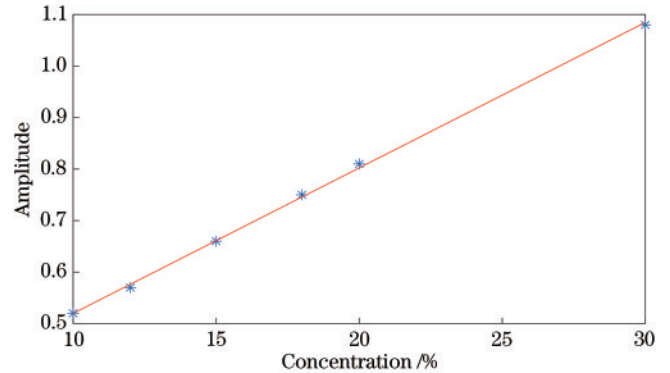


图 11 二次谐波幅值与 CO₂ 体积分数的线性拟合

Fig. 11 Linear fitting of relationship between amplitude of second harmonic and concentration of CO₂

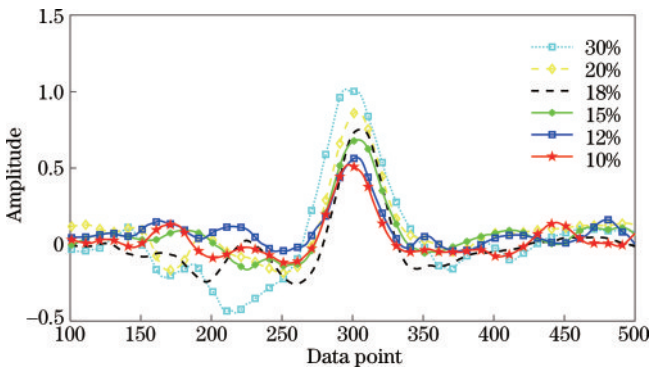


图 10 EMD-DFA-小波自适应阈值降噪处理后的二次谐波信号与 CO₂ 体积分数的关系

Fig. 10 Relationship between second harmonic signal and CO₂ concentration after EMD-DFA-wavelet adaptive threshold noise reduction processing

6 结 论

针对近红外区域波长调制技术进行气体浓度检测时, 二次谐波信号存在的噪声干扰问题, 提出一种针对二次谐波信号的 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪算法。该方法利用 DFA 算法实现对于信息主导的 IMF_s 的筛选, 弥补 EMD 去噪算法对于信息主导本征模函数筛选的不足, 利用小波自适应阈值去噪提高降噪精度, 从而获得更好的降噪效果。通过对比实验, 将 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪算法与其他 4 种传统降噪方法进行对比分析, 结果表明该方法在处理二次谐波信号的降噪方面误差较小, RMSE 为 0.0087%, 去噪后的信号与原始二次谐波信号的相关性更强, CC 为 99.9018%。利用 EMD-DFA-小波自适应阈值去噪

算法对实验得到的二次谐波信号进行去噪处理,处理后的二次谐波信号整体平滑,保留了有用的信息点,达到了良好的噪声抑制效果,在实验中及实际应用中都有一定的价值。

参 考 文 献

- [1] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911001.
Nie W, Kan R F, Yang C G, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911001.
- [2] 宋芳. 中红外激光甲烷传感技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 31-44.
Song F. Research of mid-infrared laser methane sensing technique[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 31-44.
- [3] Meng Y X, Liu T G, Liu K, et al. A modified empirical mode decomposition algorithm in TDLAS for gas detection [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 6803209.
- [4] Yang R D, Bi Y F, Zhou Q, et al. A background reduction method based on empirical mode decomposition for tunable diode laser absorption spectroscopy system[J]. Optik, 2018, 158: 416-423.
- [5] Du Z H, Li J Y, Cao X H, et al. High-sensitive carbon disulfide sensor using wavelength modulation spectroscopy in the mid-infrared fingerprint region[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 247: 384-391.
- [6] 张瑞林, 涂兴华. 二次谐波的变分模态分解和小波阈值函数降噪[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0210001.
Zhang R L, Tu X H. Variational mode decomposition and wavelet threshold function de-noising for second harmonics [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0210001.
- [7] 张立芳, 王飞, 蔚昊, 等. 基于波长调制的数字滤波技术的降噪研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0730001.
Zhang L F, Wang F, Wei H, et al. Denoising of digital filtering based on wavelength modulation spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0730001.
- [8] 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.
- [9] 陈鸿雁. 激光法气体浓度测量中信号降噪方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 26-46.
Chen H Y. Study on signal denoising method in gas concentration measurement by laser[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 26-46.
- [10] 梁宇, 刘铁根, 刘琨, 等. 基于变分模态分解算法的气体检测优化方法[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706003.
Liang Y, Liu T G, Liu K, et al. Optimized gas detection method based on variational mode-decomposition algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706003.
- [11] Zhang T Y, Kang J W, Meng D Z, et al. Mathematical methods and algorithms for improving near-infrared tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4295.
- [12] 程知, 何枫, 张巳龙, 等. 趋势项调制的小波-EDM联合方法用于大气相干长度廓线去噪[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1201002.
Cheng Z, He F, Zhang S L, et al. Combination method of wavelet and empirical mode decomposition with trend modulation used for atmospheric coherent length profile denoising[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1201002.
- [13] 郑国梁, 朱红求, 李勇刚. 改进LMS的光谱信号去噪算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 643-649.
Zheng G L, Zhu H Q, Li Y G. Spectral signal denoising algorithm based on improved LMS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 643-649.
- [14] Yu B B. An improved infrared image processing method based on adaptive threshold denoising[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019, 2019(1): 5.
- [15] 王玉峰, 曹小明, 张晶, 等. 基于小波去噪算法的全天候大气水汽拉曼激光雷达探测与分析[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0201001.
Wang Y F, Cao X M, Zhang J, et al. Detection and analysis of all-day atmospheric water vapor Raman lidar based on wavelet denoising algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0201001.
- [16] Singh P, Shahnawazuddin S, Pradhan G. An efficient ECG denoising technique based on non-local means estimation and modified empirical mode decomposition [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2018, 37(10): 4527-4547.
- [17] Niu Y J, Fei J Y, Li Y Y, et al. A novel fault diagnosis method based on EMD, cyclostationary, SK and TPTSR [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(5): 1925-1935.
- [18] 杨璐, 李醒飞, 纪越, 等. 基于EMD-DFA-NLM的电涡流传感器信号去噪方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(9): 1318-1323.
Yang L, Li X F, Ji Y, et al. Eddy based on EMD-DFA-NLM signal denoising method of flow sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(9): 1318-1323.
- [19] 刘让雷, 张达, 姚静, 等. 基于小波阈值消噪的激光多普勒速度信号处理[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120701.
Liu R L, Zhang D, Yao J, et al. Processing of laser Doppler velocity signal based on wavelet threshold denoising[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 120701.