

基于改进 VMD-WTFD 算法的二次谐波光谱信号反演分析

王 战,涂兴华*,张瑞林

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院,南京 210023)

摘要:采用变分模态分解和小波阈值调整函数(VMD-WTFD)算法在处理噪声时,信号波形恢复往往偏离标准的谐波信号,导致反演结果出现偏差。提出了一种改进 VMD-WTFD 算法,该算法采用新型阈值函数对 VMD-WTFD 算法进行改进,然后以此改进算法对二次谐波光谱信号进行反演分析。仿真与实验结果表明:与其它几种降噪算法相比,改进 VMD-WTFD 算法在不同调制度下反演出的原始信号的峰值、峰位和峰谷值更接近原始标准二次谐波光谱信号,去噪后的信噪比为 17.545 dB,相关系数可达到 0.992 9;可以较清晰地反演出人体呼出气体中 CO₂ 的二次谐波幅值。

关键词:可调谐二极管激光吸收光谱;阈值函数;二次谐波;波形恢复;信噪比

中图分类号:TN24;O433.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)01-0085-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Second harmonic spectral signal inversion analysis based on improved VMD-WTFD algorithm

WANG Zhan, TU Xinghua*, ZHANG Ruilin

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),

Nanjing University of Post & Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: When using the variational mode decomposition and wavelet threshold adjustment function (VMD-WTFD) algorithm to deal with noise, the signal waveform recovery often deviates from the standard harmonic signal, resulting in deviations of the inversion results. An improved VMD-WTFD algorithm is proposed, which uses a new threshold function to improve the VMD-WTFD algorithm, and then uses this improved algorithm to perform inversion analysis on the second harmonic spectral signal. The simulation and experimental results show that compared with several other denoising algorithms, the improved VMD-WTFD algorithm can invert the peak, peak position, and peak valley values of the original signal under different modulation degrees more closely to the original standard second harmonic spectral signal, with a signal-to-noise ratio of 17.545 dB and a correlation coefficient of 0.992 9 after denoising. It can clearly invert the second harmonic amplitude of CO₂ in human exhaled gas.

Key words: tunable diode laser absorption spectrum, threshold function, second harmonics, waveform recovery, signal-to-noise ratio

0 引言

在可调谐激光二极管吸收光谱(TDLAS)信号的噪声消除算法中,小波算法的应用最广泛,其在光谱降

收稿日期:2023-09-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:GZ216003)资助;南京邮电大学校科研基金项目(批准号:NY217111)资助。

作者简介:王战(1996—),男,安徽亳州人,硕士研究生,现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院电子信息专业,主要研究方向为可调谐二极管吸收光谱学和信号处理。

* **通信作者:**涂兴华(1976—),男,博士,副教授,主要从事光通信技术研究工作。



噪方面性能显著^[1-7]。叶玮琳等人^[6]采用多阈值小波降噪算法对测量信号和参考信号间的差分信号进行降噪,降低了噪声对锁相放大器的二次谐波信号的影响,但未进行定性分析。陈真诚等人^[8]提出了一种集合经验模态分解(EEMD)与小波阈值(WT)相结合的降噪方法,有效地滤除了光电容积脉搏波中的噪声,但EEMD容易造成信号失真。HU H 等人^[9]提出了一种联合 WT 去噪的变分模式分解(VMD)、多方向优化器(MVO)和粒子群优化(PSO)算法,获得了相对较高的信噪比和较小的均方根误差,但算法过于复杂。潘云等人^[10]提出一种误差分配算法,采用随机化方法分析

了各个误差项对浓度测量的影响,为 TDLAS 系统的设计与误差分析提供了依据,但作者在实验中仅选取了单一浓度的 CO,并在固定的温度和压强下进行,因此其结果缺乏普适性。张瑞林等人^[11]提出变分模态分解和小波阈值调整函数(VMD-WTFD)算法,分析了 VMD 的平衡参数与噪声等级的关系,指出新型阈值函数能够在软、硬阈值函数之间切换。但是,该算法在处理噪声(尤其是信噪比较低)时,信号波形恢复往往偏离标准的谐波信号。

为了恢复出更标准的信号波形,本文提出一种改进 VMD-WTFD 算法,并使用一种新型阈值函数来实现软、硬阈值的选取。

1 改进 VMD-WTFD 算法

针对 VMD-WTFD 算法中软、硬阈值函数的缺陷^[12],本文提出了一种新型阈值函数,对 VMD-WTFD 算法进行改进。该函数利用调节因子在软、硬阈值函数之间变化,其表达式如式(1)所示,得到新型阈值函数对小波系数的量化图如图 1 所示。

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} uw_{j,k} + (1-u)\text{sgn}(w_{j,k}) \times \\ \left\{ |w_{j,k}| - \frac{\lambda}{\exp[t(|w_{j,k}| - \lambda)]} \right\}, |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中, λ 为阈值, $w_{j,k}$ 为信号在第 j 层子空间中第 k 处的细节小波系数; $u=1-\exp[-t(|w_{j,k}|-\lambda)^2]$, t 为调节因子, $t \geq 0$ 。

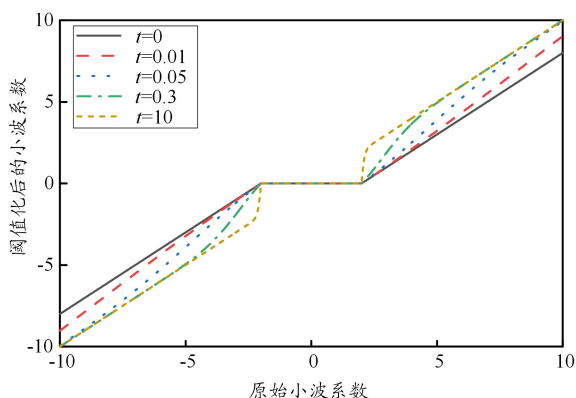


图 1 新型阈值函数对小波系数的量化图

从图 1 可以看出,当调节因子 $t=0$ 时,新型阈值函数的形式变为软阈值函数;当调节因子 $t \rightarrow 10$ 时,新型阈值函数的形式趋近于硬阈值函数。由此可见,通过调整 t 的大小可以改变阈值函数的性能,使阈值函数在阈值附近不会出现突变,而是以一种较为平滑的方式

进行过渡,从而避免了硬阈值函数的缺陷;当 $|w_{j,k}| \geq \lambda$ 时,量化后的细节小波系数更接近于原始细节小波系数,较大程度地保留了有用信号,从而避免了软阈值函数的缺陷。

本文通过 Matlab2018b 仿真平台对含噪正弦信号进行分解与单分支重建,结果如图 2 所示。可以看出,第一层至第三层分解的细节小波系数单支重构的信号绝大部分都是噪声信号,而且随着小波分解层数的递增,细节分量中的噪声在逐步降低。因此,在用阈值函数对每层细节小波系数实施量化处理时,不能选择相同的阈值,阈值应与每层的噪声含量有关^[13]。针对不同的分解层数有不同的阈值,其阈值 λ_j 的选取方式如下:

$$\lambda_j = \frac{\sigma_j \sqrt{2 \ln(N)}}{\lg(j+1)} \times (1 + \rho_j) \quad (2)$$

$$\rho_j = \frac{\tilde{y}(j)_e}{\sum_{j=1}^n \tilde{y}(j)_e} \quad (3)$$

其中, σ_j 为第 j 层细节小波系数的噪声估计, $\sigma_j = \text{Medium}(|w_{j,k}|)/0.6745$; λ_j 为阈值, N 为采样信号的长度, ρ_j 为噪声权重因子, n 为总分解层数, $\tilde{y}(j)_e$ 为单支重建后的信号能量。

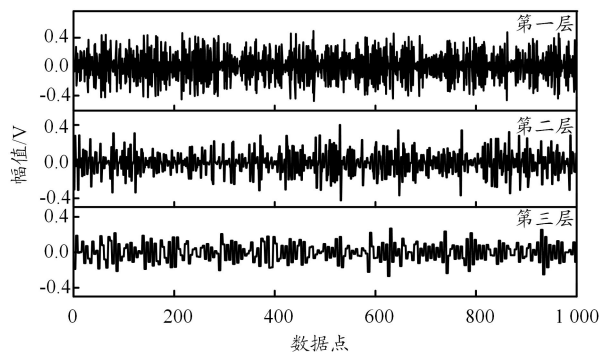


图 2 含噪正弦信号的分解与单分支重建结果

2 二次谐波光谱信号反演分析

本文采用改进 VMD-WTFD 算法对二次谐波光谱信号进行反演分析。

2.1 二次谐波光谱信号的仿真

本文基于 Arndt 的理论基础和 Reid 的实验论证结果,得到了洛伦兹线型下的二次谐波光谱表达式^[14-15],并在 Matlab2018b 平台上进行了仿真实验。本文利用伪随机函数模拟激光强度噪声,并将激光强度噪声和随机高斯白噪声一起叠加到原始信号 f 之中,使含噪

信号的信噪比达到-3.402 dB,得到含噪二次谐波光谱线图如图 3 所示。

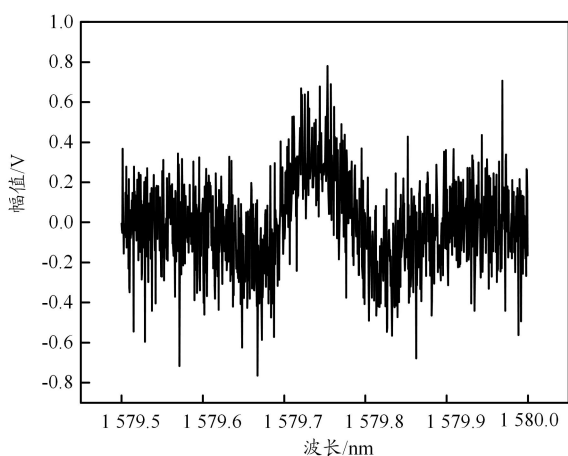


图 3 含噪二次谐波光谱线图

2.2 微弱信号下的算法反演质量仿真

与文献[11]相比,本文选用二次谐波光谱的特征位置(峰值、峰位)和峰谷值作为降噪效果的判断标准,可以更好地反映信号反演质量。本文基于 VMD 的平衡参数与噪声等级的关系,针对不同的小波分解层数,根据式(2)和式(3)选取相应阈值。在调制度为 2.2 时,采用改进 VMD-WTFD 算法对图 3 中的含噪信号进行降噪处理,得到的信号如图 4 所示。可以看出,去噪后的信号几乎与原始信号重叠,表明该算法拥有较强的降噪能力,可以实现对微弱信号的检测。经计算,降噪后的信号信噪比为 17.545 dB,与原始信号的相关系数为 0.992 9。

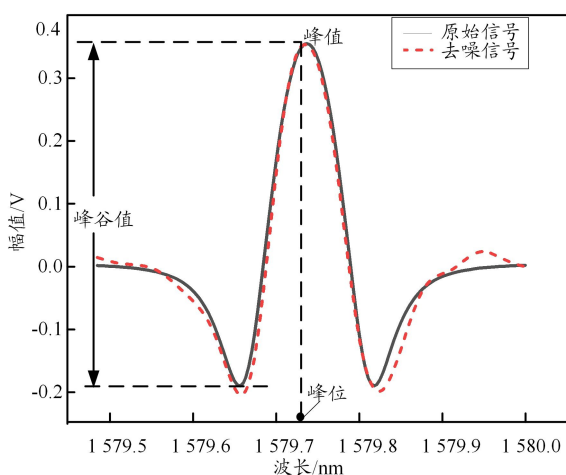


图 4 改进 VMD-WTFD 算法反演效果图

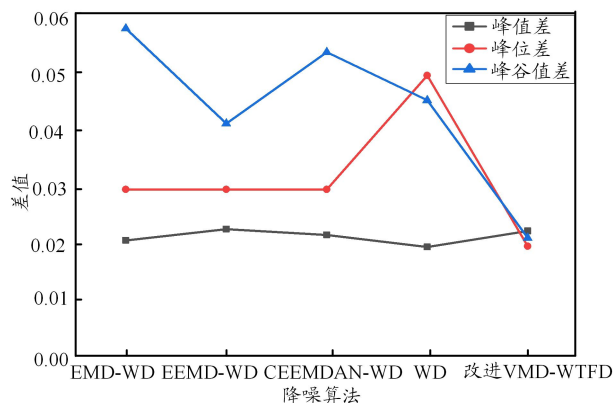
为了更清晰地显示不同降噪算法对峰值、峰位和峰谷值的影响,本文计算了不同降噪信号的峰值、峰位和峰谷值与标准二次谐波光谱信号的差值(取绝对

值),以此显示它们之间的误差。不同算法在不同调制度下对原始信号及各种降噪信号的峰值、峰位和峰谷值的差值如图 5 所示。其中,EMD-WD、EEMD-WD、CEEMDAN-WD、WD 分别为经验模态分解-小波阈值函数降噪、集合经验模态分解-小波阈值函数降噪、自适应噪声的完备模态分解-小波阈值函数降噪、未改进的小波阈值函数降噪等算法。可以看出,在不同的调制度下,经过改进 VMD-WTFD 算法降噪后的二次谐波光谱信号在峰值、峰位和峰谷值方面与标准二次谐波光谱信号最接近。这表明该算法能更好地恢复标准二次谐波光谱信号的峰值、峰位和峰谷值,具有更强的降噪能力,更有利于对微弱信号的检测。

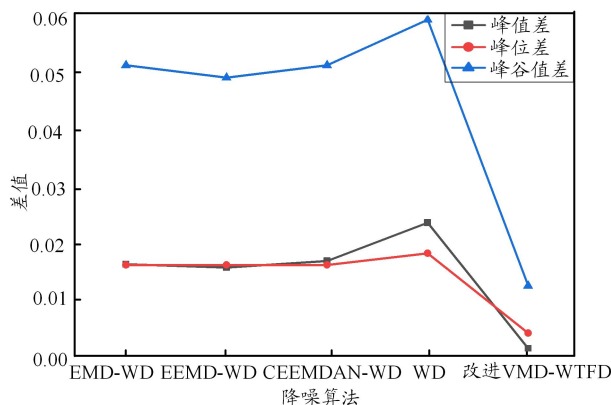
2.3 对 CO₂ 二次谐波光谱信号的降噪分析

本文选择空气中的主要气体 CO₂ 作为检测目标,并在实验中对人体呼出的 CO₂ 二次谐波光谱信号进行了测量。实验光路示意图如图 6 所示。在室外,激光的光程大约为 7.2 m。

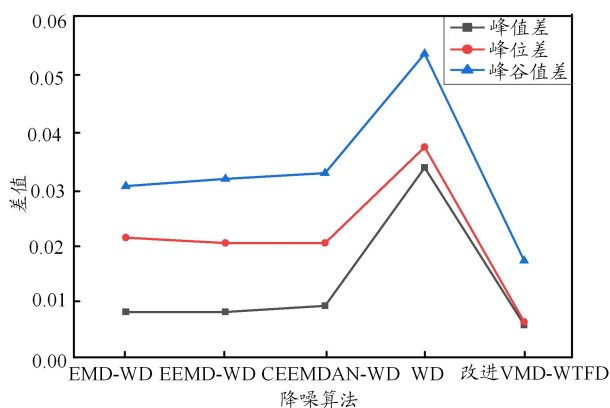
在测量人体呼出的 CO₂ 气体的二次谐波光谱幅值时,本文对激光传播路径进行了吹气处理,得到了吹气前后的二次谐波光谱信号如图 7 所示。由于气体扩散相对激光传播速度较慢,因此可以认为此时激光



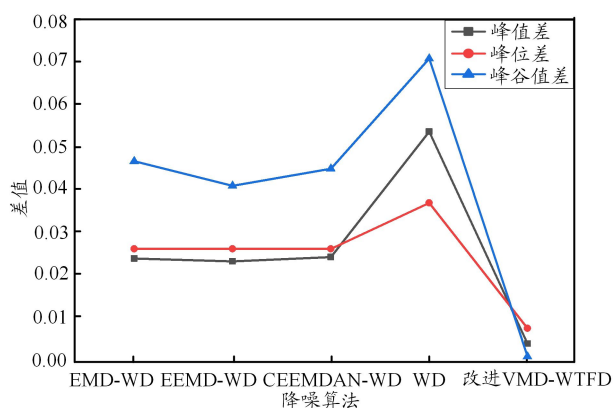
(a) 调制度为 1.0



(b) 调制度为 2.2



(c) 调制度为 3.0



(d) 调制度为 4.0

图 5 不同调制度下降噪信号与原始信号的峰值、峰位和峰谷值的差值

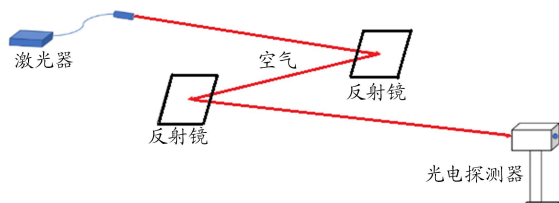


图 6 实验光路示意图

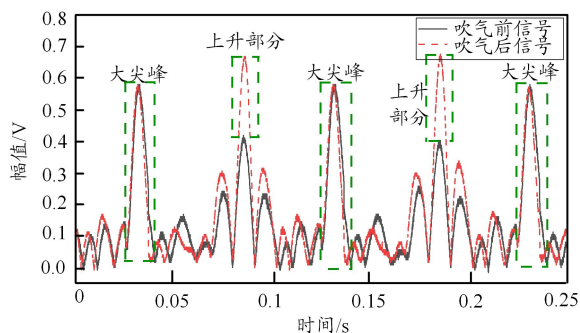


图 7 吹气前后的二次谐波光谱信号

穿越该气体的路径(吸收路径)较短。可以看出,当人体呼出气体时,检测到的 CO_2 的二次谐波光谱幅值出现升高,而且随着气体的进一步扩散,该信号迅速降

低并恢复到空气中 CO_2 的二次谐波光谱信号检测水平。吹气之后,除了 CO_2 的二次谐波光谱部分的幅值变大,其余信号部分并未因为吹气的缘故导致幅值变大。

将吹气前后的二次谐波光谱相减,得到的曲线如图 8 所示。可以看出,除了原始图上的“大尖峰”被削减之外,其余的背景噪声仍然存在。这主要是因为吹气时产生的气体湍流改变了信号的波动位置,导致波动没有被完全消除。图 9 是基于改进 VMD-WTFD 算法的二次谐波光谱信号反演后的结果。可以看出,采用改进 VMD-WTFD 算法可以清晰地反演出呼出气体中 CO_2 的二次谐波幅值,这对医学检测人体呼出 CO_2 含量时有一定参考意义。

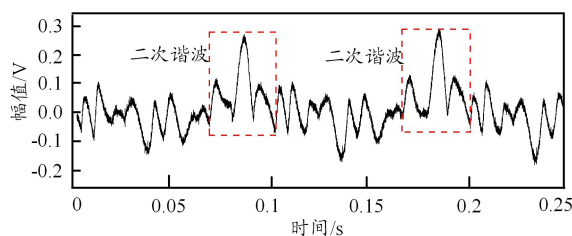


图 8 吹气前后的二次谐波光谱信号相减后的曲线

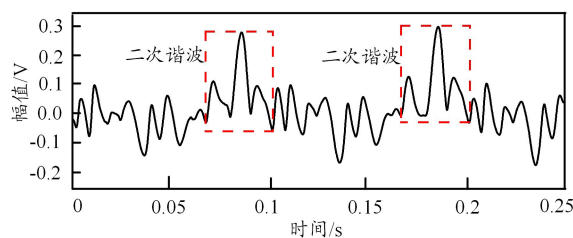


图 9 基于改进 VMD-WTFD 算法的二次谐波光谱信号反演结果

3 结束语

本文提出了一种改进 VMD-WTFD 算法,通过仿真验证了该算法的二次谐波光谱信号反演质量。与其它 4 种降噪算法相比,本文提出的算法在恢复原始信号的峰值、峰位、峰谷值方面表现最优。同时,对人体呼出的 CO_2 二次谐波光谱信号进行了测量,为医学检测人体呼出 CO_2 的含量提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] 夏滑,董凤忠,张志荣,等. 基于小波变换的 TDLAS 信号检测的改进[C]// 中国光学学会. 2010 年光学大会论文集. 天津: 中国光学学会, 2010:3259-3265.
- [2] MAPPE-FOGAING I, JOLY L, DURRY G, et al. Wavelet denoising for infrared laser spectroscopy and gas detection[J]. Applied Spectroscopy, 2012, 66(6): 700-710.

- [3] SHABANI Z, SABOURI S G, KHORSANDI A. Performance of discrete wavelet technique in the de-noising of noisy spectrum in the mid-infrared region near 4.5micron[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(12): 1-16.
- [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] HE J, SONG C, LUO Q, et al. EWT-ASG: empirical wavelet transform with adaptive savitzky-golay filtering for TDLAS [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 7800712-1-7800712-13.
- [6] 叶玮琳,郑传涛,王一丁. 基于 TDLAS 的红外湿度检测中的小波去噪实验研究[J]. 光电子激光,2013,24(1):104-111.
- [7] 张志荣,孙鹏帅,庞涛,等. 激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J]. 光学精密工程,2018,26(8):1925-1937.
- [8] 陈真诚,吴贤亮,赵飞骏. EEMD 结合小波阈值的光电容积脉搏波信号降噪[J]. 光学精密工程,2019,27(6):1327-1334.
- [9] HU H, AO Y, YAN H, et al. Signal denoising based on wavelet threshold denoising and optimized variational mode decomposition[J]. Journal of Sensors, 2021(4): 5599096-1-5599096-23.
- [10] 潘云,李颐,颜昌翔. TDLAS 一氧化碳浓度检测系统误差分配[J]. 光学精密工程,2021,29(7):1539-1548.
- [11] 张瑞林,涂兴华. 二次谐波光谱的变分模态分解和小波阈值函数降噪[J]. 光学学报,2022,42:0210001-1-0210001-8.
- [12] 周风波,李长庚,朱红求. 基于提升小波变换的阈值改进去噪算法在紫外可见光谱中的研究 [J]. 光谱学与光谱分析,2018,38 (2):506-510.
- [13] 高迎东,王宏力,由四海,等. 基于双参数阈值函数和多层阈值的 X 射线脉冲星信号消噪[J]. 光学学报,2019,39(12):18-27.
- [14] ARNDT R. Analytical line shapes for lorentzian signals broadened by modulation [J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(8): 2522-2524.
- [15] REID J. Second-harmonic detection with tunable diode lasers - comparison of experiment and theory[J]. Applied Physics, 1981, B(26): 203-210.