

基于VMD-HT的N₂O气体TDLAS二次谐波信号解调方法的研究

李欣芮*, 李 野#, 赵 鹏

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年7月21日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年8月28日

摘 要

针对可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术中二次谐波信号的调谐与提取问题, 提出了一种基于变分模态分解(VMD)与希尔伯特变换(HT)相结合的二次谐波解调方法。相较于传统锁相放大器(LIA)方法, 该方法在无需外部参考信号, 便可有效提取TDLAS信号中的二次谐波分量。主要通过对TDLAS信号进行带通滤波, 以抑制非目标频段的干扰; 随后采用变分模态分解(VMD)将滤波后的信号分解为若干内涵模态分量(IMF); 进一步计算各IMF的包络信号, 并通过希尔伯特变换提取其瞬时特性; 最终, 从具有目标频率特征的包络分量中提取二次谐波, 实现对气体浓度信号的高效无参考解调。仿真结果对比表明, 该方法在二次谐波信号提取的准确性和特征保留方面表现优越。

关键词

TDLAS, N₂O, 变分模态分解, 希尔伯特变换, 二次谐波调谐

Study on the Demodulation Method of N₂O Gas TDLAS Second Harmonic Signal Based on VMD-HT

Xinrui Li*, Ye Li#, Peng Zhao

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Jul. 21st, 2025; accepted: Aug. 19th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

Addressing the tuning and extraction of the second harmonic signal in tunable diode laser

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李欣芮, 李野, 赵鹏. 基于 VMD-HT 的 N₂O 气体 TDLAS 二次谐波信号解调方法的研究[J]. 物理化学进展, 2025, 14(3): 560-571. DOI: 10.12677/japc.2025.143053

absorption spectroscopy (TDLAS) technology, a second harmonic demodulation method based on the combination of variational mode decomposition (VMD) and Hilbert transform (HT) is proposed. Compared with the traditional lock-in amplifier (LIA) method, this approach can effectively extract the second harmonic component in TDLAS signals without the need for an external reference signal. The method primarily performs bandpass filtering on the TDLAS signals to suppress interference from non-target frequency bands; then employs VMD to decompose the filtered signal into several intrinsic mode functions (IMFs); further calculates the envelope of each IMF and extracts their instantaneous characteristics via the Hilbert transform; finally, extracts the second harmonic from the envelope component with the target frequency feature, achieving efficient and reference-free demodulation of gas concentration signals. Simulation results demonstrate that this method outperforms in accuracy and feature preservation for second harmonic signal extraction.

Keywords

TDLAS, N₂O, Variational Mode Decomposition, Hilbert Transform, Second Harmonic Tuning

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)因其高灵敏度、高分辨率和快速响应等优势,已被广泛应用于工业过程气体分析,环境监测以及生物医学检测等领域[1]。根据解调方式的不同, TDLAS 技术大致可分为直接吸收光谱(DAS)和波长调制光谱(WMS)。其中, WMS 更适用于低浓度气体的高灵敏检测[2]。

在 WMS 中,准确提取 2f 信号并抑制调制带来的非理想因素,是提升系统性能的关键。传统 TDLAS-WMS 系统,谐波信号的提取通常采用模拟锁相或数字锁相两种方法[3]。模拟锁相技术存在温度漂移、器件老化等缺陷,导致测量精度下降且抗噪声性能较差。此外,模拟锁相技术对参考信号的相位要求极高,须与待测信号保持严格一致,增加了系统中移相电路和高精度乘法器的设计复杂度。数字锁相技术则通过数字采样、数值运算和滤波算法替代传统模拟电路,显著提升了系统的稳定性与灵活性[3][4]。然而,无论是模拟还是数字锁相方法,参考信号的生成仍是关键步骤,系统仍需根据调制频率与相位信息构建准确的参考波形。尤其在非稳态调制或环境扰动较强的场合,参考信号的不确定性仍可能影响最终的谐波提取结果。

对此, Wu J, Chen H 等人[5]提出一种双希尔伯特变换 TDLAS 二次谐波信号解调方法来获得二次谐波,相较于传统所相放大方法(LIA)无需参考信号,但希尔伯特变换本身不具备谐波选择性。若一阶谐波、多阶谐波或背景信号的幅度较大,仍存在对目标(2f)分量的干扰,难以彻底分离特定谐波。为此,我基于希尔伯特黄对此进行了改进,由于希尔伯特黄变换中 EMD 分解过程存在模态混叠和端点效应等问题,导致各阶本征模态函数之间频率混杂、尤其在信号边界处易出现失真现象[6],从而影响了二次谐波等谐波成分的准确提取和解调精度。

在此基础上,我引入新的改进分解方法。提出一种基于变分模态分解(VMD)与希尔伯特变换(HT)相结合的二次谐波提取方法。该方法无需依赖参考信号,仅以调制频率为参考设置滤波器通带,然后通过变分模态分解自适应分解信号,提取包含目标谐波成分的本征模态函数(IMF);利用希尔伯特变换分析 IMF 的瞬时特性,最终实现对二次谐波信号的准确提取和解调。该方法有效避免了对外部参考信号的依

赖,同时克服了传统希尔伯特黄变换中模态混叠和端点效应导致的信号失真问题,提高了谐波提取的鲁棒性和精度。

2. TDLAS 技术理论

TDLAS 技术是一种基于分子光谱学原理的高灵敏度、高选择性气体检测技术,其核心在于利用气体分子对特定波长激光的选择性吸收特性,通过调谐激光波长扫描吸收谱线,并结合 Beer-Lambert 定律,实现气体浓度、吸收系数等关键参数的定量反演[7]。

2.1. 气体吸收光谱基本理论

气体分子的光谱吸收特性源于其内部的量子化能级结构,其中分子的总能量通常可分解为电子能量、振动能量与转动能量三部分的叠加。这种能级结构决定了其对特定波长的选择性吸收特性[8]。

当激光辐射的频率与分子某一特定能级间的能量差相匹配时,分子将吸收该频率的光子,发生由低能态向高能态的跃迁,即所谓的吸收过程[9]。该能量跃迁关系可表示为公式(1):

$$E' - E'' = (E'_e - E''_e) + (E'_v - E''_v) + (E'_r - E''_r) \quad (1)$$

其中, E' 和 E'' 分别表示高能态和低能态的能量, E_e 、 E_v 和 E_r 分别为电子能量、振动能量和转动能量。

根据光子能量与频率的关系,可得跃迁频率 ν 与能量差的表达式为公式(2):

$$E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

式中, h 表示普朗克常数($h = 6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s)。

2.2. Beer-Lambert 定律

当激光光束穿过含有待测气体分子的介质时,若光的频率与分子的某一吸收跃迁频率相匹配,将导致该频率下的光强衰减。该吸收过程遵循朗伯-比尔定律[10],其数学表达式为公式(3):

$$I_t(\nu) = I(\nu) \cdot \exp(-S \cdot g(\nu) \cdot P \cdot C \cdot L) \quad (3)$$

式中, I 和 I_t 分别表示入射光强和透射光强; S 表示待测气体吸收谱线的强度(cm²atm⁻¹); $g(\nu)$ 表示待测气体吸收谱线的归一化线型函数(cm); P 表示压强(atm); C 表示待测气体浓度; L 表示有效光程(cm)。

3. 基于 VMD-HT 的 TDLAS 二次谐波解调原理

3.1. 变分模态分解

VMD (Variational Mode Decomposition) [11] 是一种先进的自适应信号处理方法旨在将复杂信号分解为一组具有特定带宽和中心频率的有限个本征模态函数(IMFs)。数学优化模型如下:

(1) 构建变分模型为公式(4)

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(t)$: 原始输入信号; $u_k(t)$: 第 k 个本征模态函数(IMF); $\delta(t)$: 冲击函数; ω_k : 第 k 个模态分量的中心频率; S.t.: 约束条件。

(2) 引入约束的拉格朗日乘子与惩罚项表达式为公式(5)

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (5)$$

式中: α : 惩罚因子; 拉姆达 t : 拉格朗日乘子函数。

(3) 转到频域进行迭代优化

为简化卷积和微分操作, 将变量变换到频域, 在频域上进行迭代优化, 设置 u_k , ω_k , λ 的初始值, 令 $n=0$, 其数学表达式为公式(6)~(8)。

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (6)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (7)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (8)$$

(4) 判断收敛性

满足条件或达到最大迭代次数则停止迭代, 表达式为公式(9)。

$$\sum_k \frac{\|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \varepsilon \quad (9)$$

利用该方法对透射光强信号进行分解得到 IMF, 精准提取与目标谐波频率(如 2f)对应的 IMF; 提高后续希尔伯特变换或包络分析的准确性。

3.2. 希尔伯特变换

希尔伯特变换是一类线性时不变系统, 对一个实信号 $x(t)$ 进行变换, 得到一个新的函数 $\hat{x}(t)$ [12], 对于实信号 $x(t)$ 它的希尔伯特变换定义为公式(10):

$$\hat{x}(t) = \mathcal{H}[x(t)] = \frac{1}{\pi} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

这是一个奇函数卷积核与 $x(t)$ 的卷积。该积分是柯西主值积分(P.V.), 用于避免奇点 $t = \tau$ 。

希尔伯特变换的主要目的是构造解析信号 $z(t)$, 表达式为公式(11):

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} a(t) = [x^2(t) + \hat{x}^2(t)]^{1/2} \\ \theta(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \\ \omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

解析信号的模值即为信号的瞬时幅值又称为包络, 表达式为公式(13):

$$A(t) = |z(t)| = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (13)$$

$A(t)$ 为解析信号的包络,而这个包络中就包含了调制频率或其谐波频率的信息。其形状随吸收线变化,可用于吸收谱分析和浓度反演。通过对 VMD 得到的目标 IMF 分量进行希尔伯特变换,提取二次谐波信号的包络作为解调结果。

3.3. VMD-HT 二次谐波解调

- (1) 获取待处理的原始信号——透射光强信号。
- (2) 对透射光强进行带通滤波,抑制非目标频段干扰。
- (3) 对滤波后的信号进行变分模态分解(VMD),将其分解为若干个本征模态函数(IMF)分量。
- (4) 根据频率特性,选择包含主频(1f)或 2f(二次谐波)成分的模式分量(IMF)作为目标频率分量。
- (5) 对目标频率分量进行希尔伯特(HT)变换获取其解析信号,并计算解析信号的包络,该包络反映了周期信号幅值的变化,能提取二次谐波分量的幅度信息。
- (6) 解调与后处理,进一步对包络信号进行滤波,去除噪声,最终输出为二次谐波分量包络。VMD-HT 二次谐波解调流程图如图 1 所示。

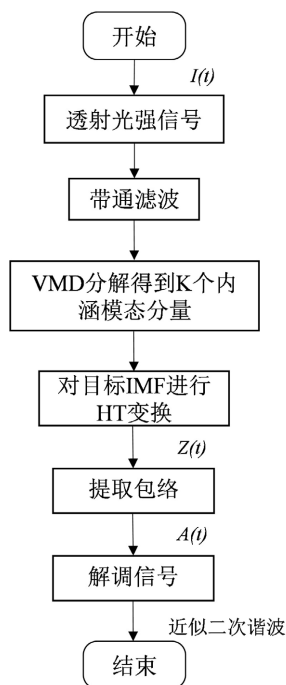


Figure 1. VMD-HT second harmonic demodulation process
图 1. VMD-HT 二次谐波解流程

4. 仿真对比分析

4.1. TDLAS 系统仿真设置

本仿真基于 N_2O 在波数 2192.93 cm^{-1} (对应波长约 4560 nm) 处的强吸收谱线,采用调制指数 $m = \Delta\nu/\gamma$ 设为 2.2,使二次谐波的振幅最大化。激光驱动电流由低频锯齿波与高频正弦微扰叠加构成,形成扫描型调制电流。并基于 HITRAN 数据库中该吸收线的参数建立洛伦兹吸收模型,结合朗伯-比尔定律计算透射光强。模拟中设定气体浓度为 400 ppm ,光路长度为 1.1 m ,得到随时间变化的透射光强信号,便于后

续 VMD-HT 二次谐波解调。

洛伦兹吸收线函数^[13]表达式为公式(14):

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi \left[(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2} \right)^2 \right]} \quad (14)$$

其中 ν 为激光频率(波数 cm^{-1}); ν_0 (单位: cm^{-1}) 为中心波数, $d\nu$ 为自然展宽线宽。

对 TDLAS 系统进行仿真, 图 2 显示了气体吸收特定频率光后的透射光强信号, 为后续进行二次谐波调制处理提供了依据。

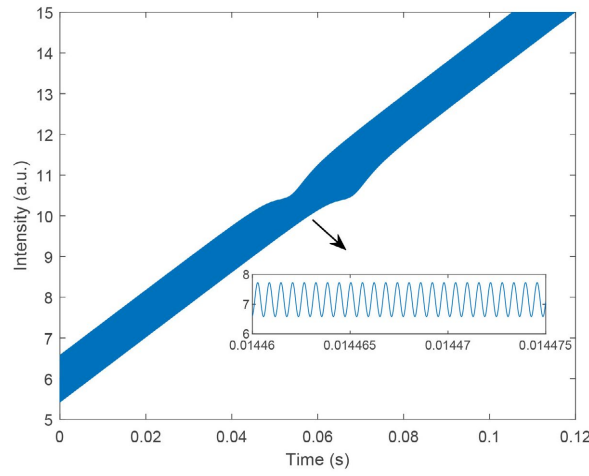


Figure 2. Transmitted light intensity signal
图 2. 透射光强信号

4.2. VMD-HT 二次谐波提取

首先采用 VMD 方法对带通滤波后的透射光强信号进行分解, 获得一组具有不同频率特征的本征模态函数(IMFs), 如图 3 所示。

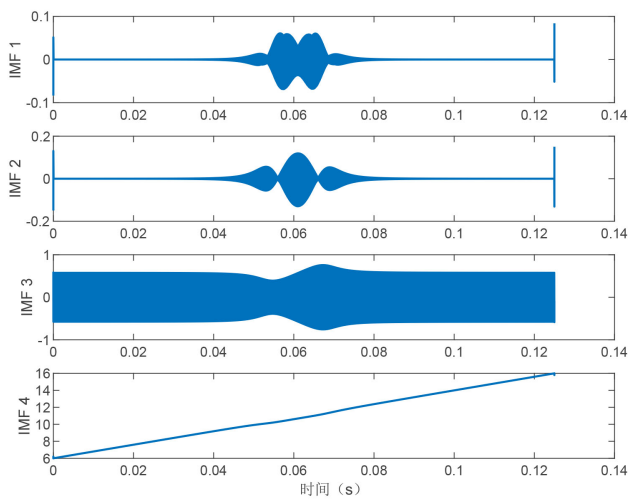


Figure 3. Intrinsic mode functions (IMFs)
图 3. 本征模态函数(IMFs)

通过分析各模态的中心频率, 选取包含二次谐波特征的目标分量, 并对其施加希尔伯特变换以提取瞬时包络, 如图 4 所示。

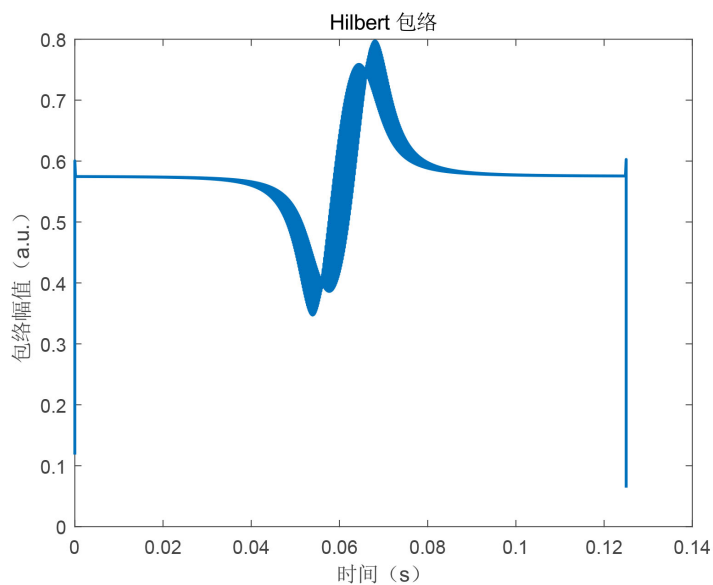


Figure 4. Instantaneous envelope
图 4. 瞬时包络

该包络有效表征了调制频率及其倍频成分的幅度变化。随后对该包络信号进行逆调制处理, 重构得到最终的二次谐波信号, 结果如图 5 所示。

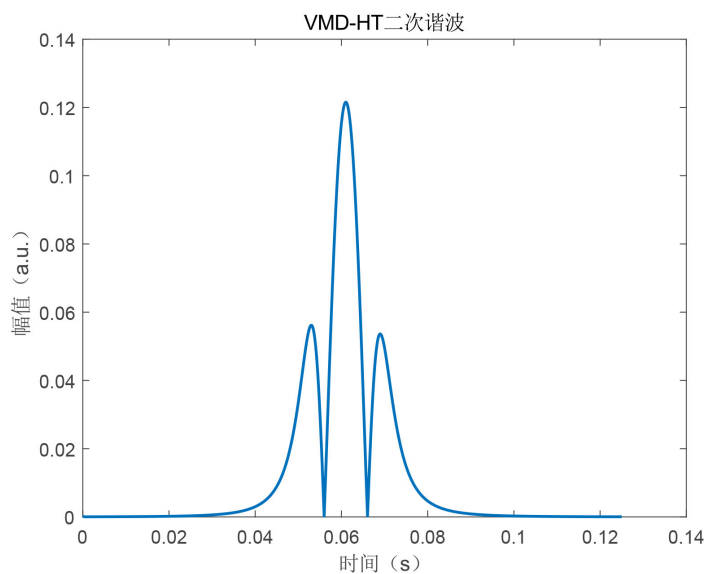


Figure 5. VMD-HT tuning second harmonic signal
图 5. VMD-HT 调谐二次谐波信号

4.3. 仿真对比分析

本文对比分析了锁相放大方法、双希尔伯特变换法、希尔伯特 - 黄变换方法, 以及本文提出的基于

VMD-HT 方法的二次谐波提取方法。如下图所示。

图 6 展示了采用锁相放大法提取得到的二次谐波信号；图 7 则展示了基于双希尔伯特方法获得的二次谐波。

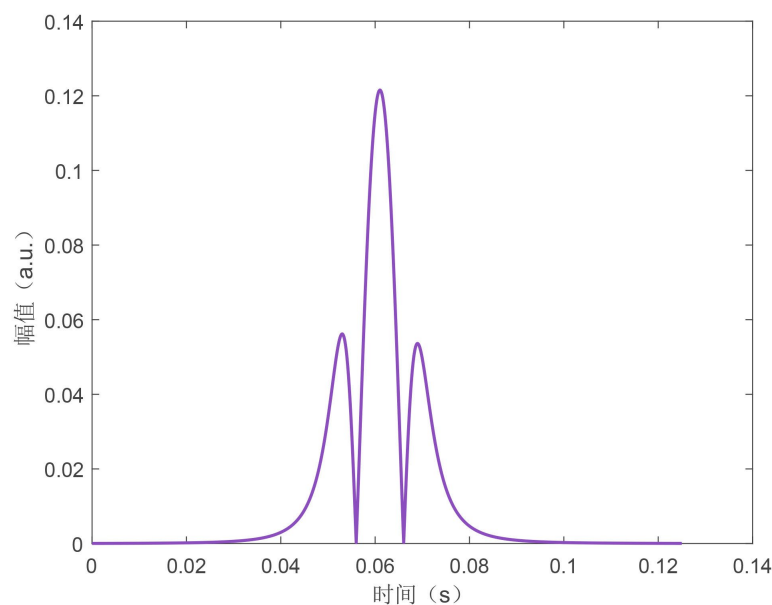


Figure 6. LIA tuning second harmonic

图 6. LIA 调谐二次谐波

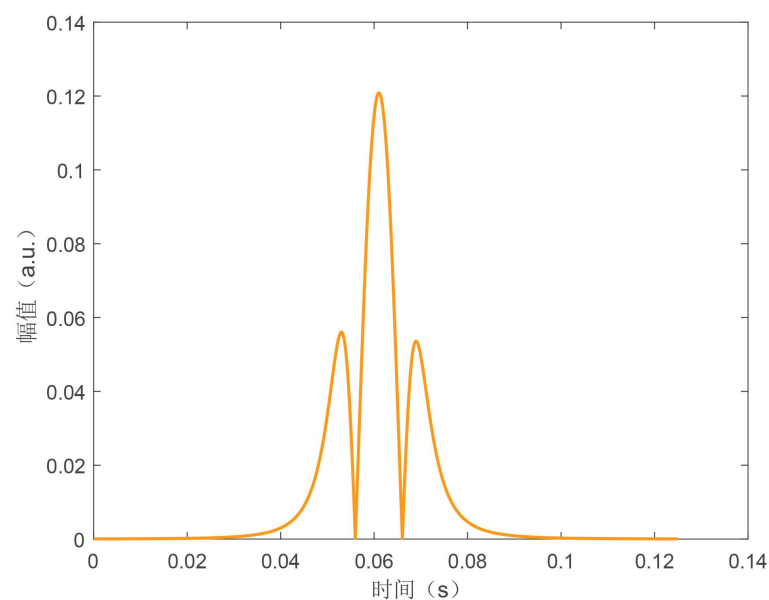


Figure 7. Dual Hilbert tuning second harmonic

图 7. 双希尔伯特调谐二次谐波

这两种方法均能够有效提取出二次谐波成分，并较好地保留了谐波信号的基本形貌与特征信息，在一定程度上反映了气体吸收特征。

图 8 展示了希尔伯特 - 图 9 黄变换包络提取，展示其二次谐波信号提取。

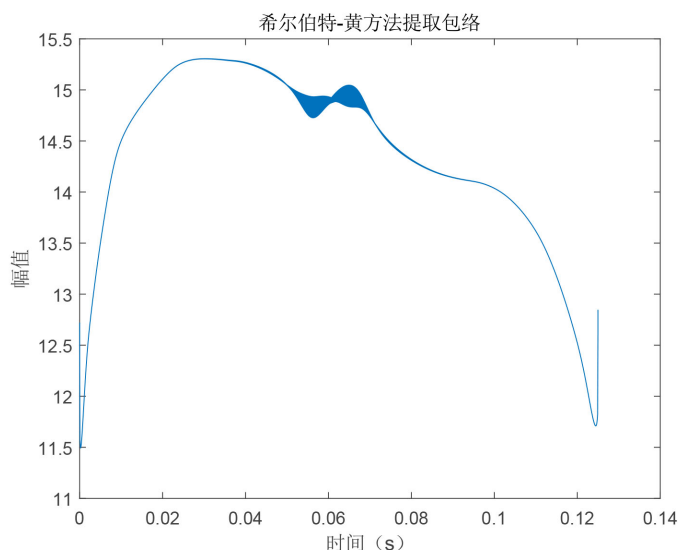


Figure 8. Hilbert-Huang transform method envelope extraction

图 8. 希尔伯特 - 黄变换方法包络提取

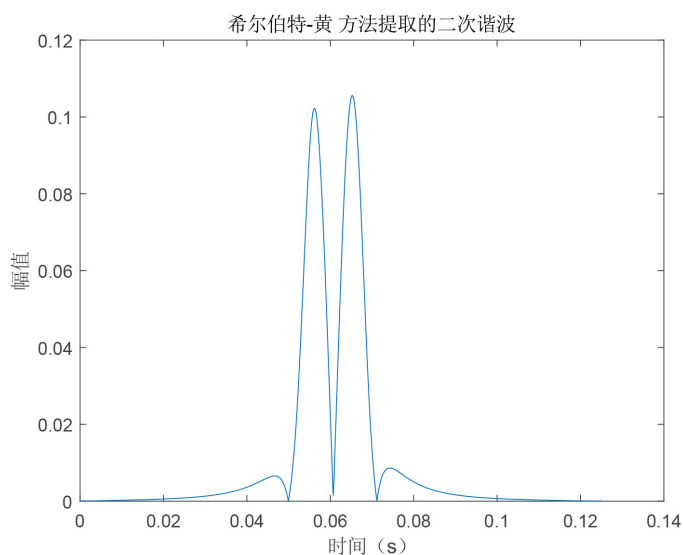


Figure 9. Hilbert-Huang transform method second harmonic extraction

图 9. 希尔伯特 - 黄变换方法二次谐波提取

对比分析发现, 希尔伯特 - 黄变换在应用于二次谐波提取时存在一定局限性。由于其依赖的经验模态分解(EMD)方法本身易出现模态混叠与端点效应, 导致分解结果中各固有模态分量间频率成分混杂, 包络线构建不准确, 从而影响希尔伯特谱的计算精度。这一缺陷直接导致提取出的二次谐波信号失真, 难以准确反映原始信号的吸收特征与频率结构。不适用于二次谐波信号提取。

接下进一步对比分析了锁相放大法、双希尔伯特变换法与 VMD-HT 方法在二次谐波峰值提取方面的表现, 以评估各方法对谐波特征的保留能力和信号响应的敏感性。如下图所示。

图 10 展示了锁相放大法与双希尔伯特变换法在二次谐波提取结果上的对比情况。可以看出, 两者在波形形貌上整体契合良好, 但在峰值幅度上存在一定差异, 双希尔伯特法在部分区域存在幅度衰减。图 11 进一步比较了锁相放大法与 VMD-HT 方法的谐波提取效果。结果表明, VMD-HT 在波形拟合度、峰

值还原度方面均优于双希尔伯特方法，展现出更强的谐波提取能力和对气体吸收特征的敏感性。

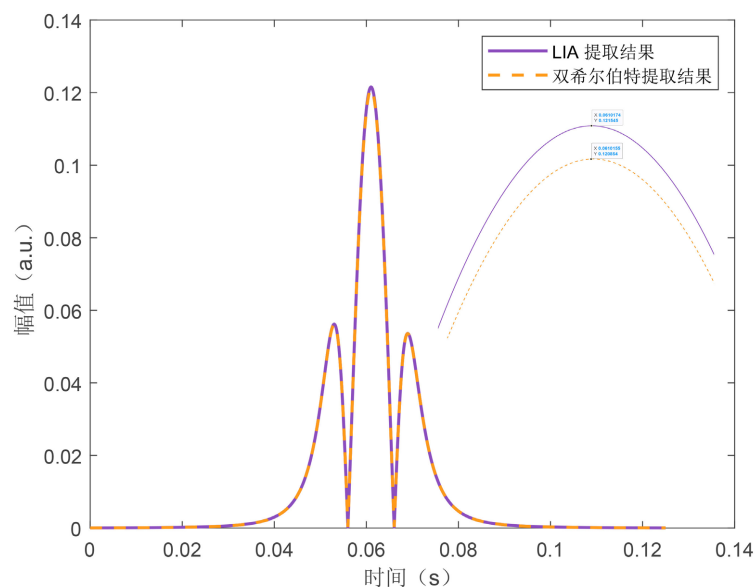


Figure 10. Peak comparison between dual Hilbert and LIA methods

图 10. 双希尔伯特与 LIA 法峰值对比

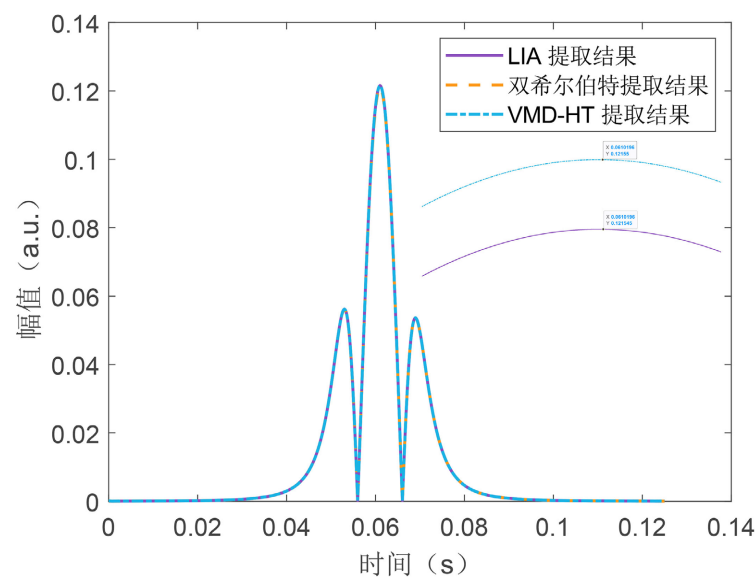


Figure 11. Peak comparison between VMD-HT and LIA methods

图 11. VMD-HT 与 LIA 法峰值对比

对峰值误差计算分析可得，图 12 显示了锁相放大方法与双希尔伯特方法峰误差对比，结果显示两者峰值的相对误差为 0.5680%；图 13 显示了锁相放大方法与 VMD-HT 方法对比。结果显示两者峰值的相对误差仅为 0.0039%；VMD-HT 峰值误差明显小于双希尔伯特方法。

综上所述，VMD-HT 提取的二次谐波信号轮廓清晰，具有良好的平滑性与局部细节保持能力，能够更加准确地反映气体的吸收特征参数，峰值特征提取优于双希尔伯特方法。同时该方法有效克服了传统希尔伯特-黄变换中因经验模态分解(EMD)带来的模态混叠和端点效应问题，提升了分解结果的稳定性。

与物理可解释性,从而增强了对微弱吸收信号的识别与谐波特征的提取能力。

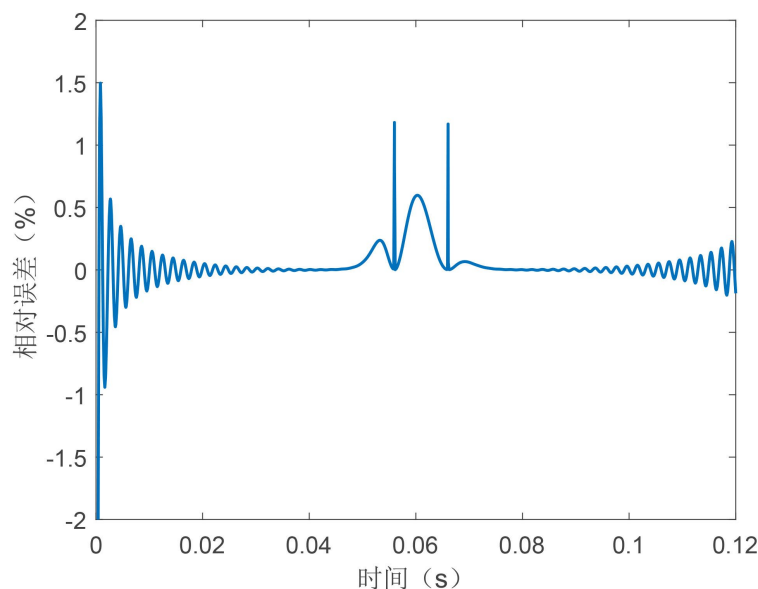


Figure 12. Relative error of peak values between dual Hilbert and LIA methods
图 12. 双希尔伯特与 LIA 法峰值相对误差

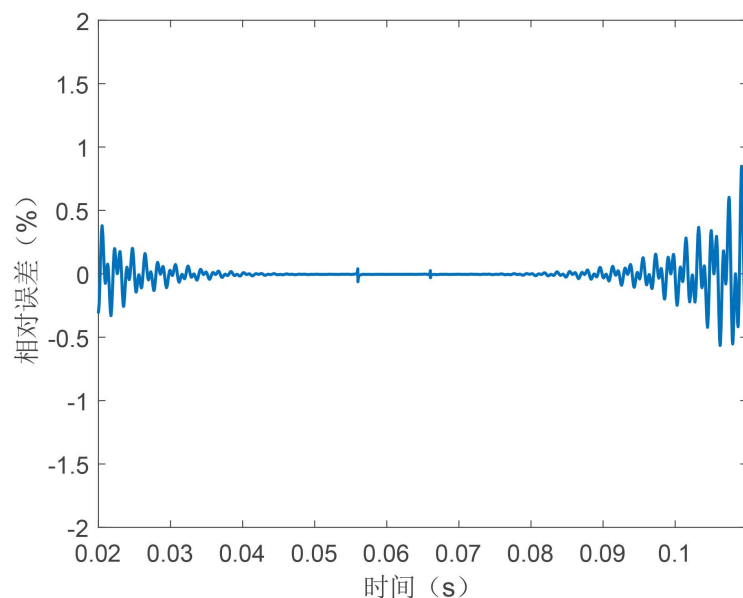


Figure 13. Relative error of peak values between VMD-HT and LIA methods
图 13. VMD-HT 与 LIA 法峰值相对误差

5. 结论

本文针对可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术在氧化亚氮(N_2O)气体检测中的应用,提出了一种基于变分模态分解-希尔伯特变换(VMD-HT)的二次谐波信号提取方法。该方法不仅有效提取了二次谐波信号,还能更好地保留其关键特征信息。

通过对比传统锁相放大方法(LIA)、双希尔伯特变换法、希尔伯特-黄变换方法表明:VMD-HT 方法

在谐波峰值提取精度上具有明显优势。仿真实验显示, VMD-HT 法的峰值相对误差显著低于双希尔伯特方法, 验证了其在二次谐波提取中的有效性与优越性, 为 TDLAS 信号高精度处理提供了一种更具鲁棒性的信号调谐方案。

相较于传统的二次谐波提取方法, VMD-HT 在谐波信号的准确提取与抗噪性能方面表现优异, 能够更有效地保留气体吸收特征。然而, VMD 方法仍存在一定的局限性, 例如对参数设置(如模态数与惩罚因子)较为敏感, 且分解过程中计算复杂度较高。未来可通过引入自适应参数优化策略、融合深度学习或智能优化算法, 以及提升分解算法的计算效率等手段, 以进一步提升 VMD 在实时性与自适应能力方面的性能表现, 从而实现更高精度、更强鲁棒性的二次谐波信号调谐。

参考文献

- [1] Zhao, P., Ding, D., Li, K., Li, Y. and Jin, G. (2024) A Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) Signal Denoising Method Based on LSTM-DAE. *Optics Communications*, **567**, Article ID: 130327. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130327>
- [2] Sun, J., Chang, J., Wang, C. and Shao, J. (2024) Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Detection of Multi-Component Gas: A Review. *Applied Spectroscopy Reviews*, **59**, 1086-1107. <https://doi.org/10.1080/05704928.2024.2302608>
- [3] Jiang, C., Liu, Y., Yu, B., Yin, S. and Chen, P. (2018) TDLAS-WMS Second Harmonic Detection Based on Spectral Analysis. *Review of Scientific Instruments*, **89**, Article ID: 083106. <https://doi.org/10.1063/1.5031683>
- [4] 张雷雷, 曹振松, 钟磬, 等. FPGA 主控型数字锁相放大器设计及光谱测量[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(10): 135-146.
- [5] Wu, J., Chen, H., Kang, G. and Li, X. (2022) TDLAS Second Harmonic Demodulation Based on Hilbert Transform. *PLOS ONE*, **17**, e0278724. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278724>
- [6] 戴婷, 张榆锋, 章克信, 等. 经验模态分解及其模态混叠消除的研究进展[J]. 电子技术应用, 2019, 45(3): 7-12.
- [7] 张永平, 高嵩, 张文斌, 等. TDLAS 激光气体检测关键技术分析[C]//中国城市燃气协会标准工作委员会. 2025 中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨标准引领燃气安全运营和智慧建设研讨会论文集. 大连: 华夏天信传感科技(大连)有限公司, 2025: 99-104.
- [8] Zhang, J. and Gao, J. (2025) TDLAS-Based Rapid and Accurate Measurement of Near-Ambient Temperature Using Near-Infrared Vibrational Water Vapor Transitions. *Sensors*, **25**, Article 2839. <https://doi.org/10.3390/s25092839>
- [9] Stewart, G. (2021) Absorption Spectroscopy of Gases. In: Stewart, G., Ed., *Laser and Fiber Optic Gas Absorption Spectroscopy*, Cambridge University Press, 1-20.
- [10] Mayerhöfer, T.G., Pahlow, S. and Popp, J. (2020) The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure. *ChemPhysChem*, **21**, 2025-2025. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000743>
- [11] Dragomiretskiy, K. and Zosso, D. (2014) Variational Mode Decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **62**, 531-544. <https://doi.org/10.1109/tsp.2013.2288675>
- [12] 王雨宁, 王汉陆, 冯艺聪, 等. 基于希尔伯特变换的激光自混合信号处理方法[J]. 光学学报, 2024, 44(19): 220-229
- [13] 高楠, 于永波, 杜振辉, 等. 基于高斯/洛伦兹线型拟合比的谐波检测压强反演研究(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 167-174.