

基于变分模态分解算法的气体检测优化方法

梁宇^{1,2,3}, 刘铁根^{1,2,3}, 刘琨^{1,2,3*}, 江俊峰^{1,2,3}, 李亚凡^{1,2,3}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

³天津大学光纤传感研究所, 天津 300072

摘要 在可燃冰开采钻井气体环境监测中,受制于开采井的尺寸和深度条件,传统的怀特池、赫里奥特池等长光程气室难以下井,因此难以通过增加光程的方式降低仪器最低探测体积分数。从信噪比角度出发,将变分模态分解(VMD)算法与 Savitsky-Gorai(S-G)滤波算法相结合,对研制的甲烷-二氧化碳混合气体探测仪器中电子器件产生的高斯白噪声和光学器件产生的标准具噪声进行降噪处理,降低仪器最低探测体积分数。以甲烷气体为例,首先进行二次谐波仿真实验,与传统的经验模态分解(EMD)算法相比,基于 VMD 的滤波算法在信噪比提升和信号自适应等方面具有优势,在仪器最低探测体积分数方面有了较高的改善。在 40 cm 吸收光程下,系统的信噪比为 21.7 dB,线性相关系数为 0.9940,最低探测体积分数可达 6.7×10^{-6} ,为实现可燃冰海上开采气体环境实时精确监测打下了坚实的基础。

关键词 光纤光学; 可调谐二极管激光吸收光谱; 变分模态分解; 二次谐波; 降噪

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0706003

1 引言

南海神狐可燃冰试采的成功,推动中国可燃冰开采进入新时代^[1]。但是在可燃冰开采过程中,受到降压和水合物分解等因素的影响,生产管柱内的温度降低,产生甲烷(CH₄)或二氧化碳(CO₂)水合物二次形成的温度压力环境,有管柱堵塞的风险。因此对钻井中的气体浓度进行实时监测,根据气体浓度判断水合物是否开始形成,灵活选择措施,防止水合物二次形成堵塞管柱是十分重要的。基于波长调制的可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术搭建的可燃冰开采钻井气体监测设备具有响应速度快、非接触测量、抗干扰的特点^[2]。但是受制于开采井尺寸、深度等条件,常用的怀特池、赫里奥特池等长光程气体吸收池很难完成下井工作。因此在有效吸收光程受限的情况下,提高仪器的信噪比(SNR),降低气体环境监测的最低浓度,对保证可燃冰开采

的顺利进行有着十分重要的意义。

为了提高系统的信噪比,在过去的几十年里,研究者提出了许多技术。如 Webster 提出在光路中插入 Brewster 扰流板^[3], Silver 等提出在气室上增加压电振荡片^[4], Hodgkinson 等提出一种通过使用旋转电机来转动漫反射反光镜等以周期性地改变光程的方法来抑制噪声^[5],但是这些方法都需要额外增加部件,增加了系统复杂性和成本。因此,一些研究者致力于研究数字滤波技术,通过对探测到的信号进行处理,提高系统信噪比。如 Werle 等将维纳滤波^[6]、Leleux 等将卡曼滤波^[7]、Luo 等将小波变换^[8]方法应用到了 TDLAS 系统中。这些方法虽然可以提高信噪比,但更适用于线性非平稳或者非线性平稳过程。在 TDLAS 系统中,噪声有高斯噪声和标准具噪声,为非线性非平稳噪声,所以降噪效果有限。因此 Huang 等^[9]提出经验模态分解(EMD)算法,该算法对非线性非平稳噪声有良好的处理效果。Yang

收稿日期: 2020-08-11; 修回日期: 2020-09-20; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(61922061, 61775161, 61735011)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、天津市杰出青年科学基金(19JCJQJC61400)

*E-mail: beiyangkl@tju.edu.cn

等^[10]将 EMD 算法运用到 TDLAS 系统中,有效地抑制了系统的背景波动。但是由于 EMD 的模态混叠问题,仍需要求解每个模态与原始信号的相关系数,根据相关系数选择合适的模态,才能重建信号,模态混叠问题没有从根本上得以解决。

为了解决上述问题,本文将变分模态分解(VMD)算法与 Savitzky-Golay(S-G)滤波算法相结合,提出了基于 VMD 的滤波算法。VMD 算法由 Dragomiretskiy 等提出,为完全非递归模型,运算高效,可以解决 EMD 算法中的端点效应与模态混叠问题,对噪声有着更好的鲁棒性^[11]。由于分解之后的模态从低频到高频分布,而波长调制的 TDLAS 系统中有效信号为低频部分,因此只需选用第一个分解模态,无需求相关系数进行复合重建。S-G 滤波利用最小二乘拟合系数作为滤波响应函数,可以实现对噪声的完全自适应滤波,滤波形式简单,效率速率高^[12]。先在理论上介绍了所提算法的原理和步骤;然后通过仿真,以 CH₄ 气体为例,利用高斯白噪声和标准具噪声对纯净二次谐波信号染噪,比较了所提算法与 EMD 算法的性能差异;最后通过实验来评价所提算法。对所提算法、未使用 VMD 的滤波算法、基于 EMD 的滤波算法这三种处理方式进行比较,结果表明,所提算法在光谱信号处理、气体浓度监测领域都是有效的工具,可以有效降低系统最低探测浓度。

2 原理与仿真

2.1 TDLAS 检测原理

由朗伯-比尔定律可知,当光经过气体时,气体对光有着吸收作用,因此出射光强相较入射光强会有所下降。入射光强和出射光强间的关系^[13-14]可以表达为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)cL], \quad (1)$$

式中: I_0 为入射光强; I 为出射光强; α 为吸收系数; ν 为气体的吸收频率; c 为气体浓度; L 为有效吸收光程。

使用低频三角波和低频正弦波对可调谐分布反

馈式(DFB)激光器进行波长调制。将经过调制之后的透射光强信号用余弦傅里叶级数展开,其各级次傅里叶展开系数,即谐波系数的表达式为

$$A_n(\nu) = \frac{2I_0}{\pi} \int_0^\pi \exp[-\alpha(\nu + b \cos \beta)cL] \cos(n\beta) d\beta, \quad (2)$$

式中: b 为受到正弦波调制的激光频率变化幅度; $\beta = 2\pi f$; f 为调制信号频率。考虑到待测气体浓度较低时,指数部分可以近似化简,从而得到化简后的谐波系数表达式为

$$A_n(\nu) = \frac{2I_0 cL}{\pi} \int_0^\pi -\alpha(\nu + b \cos \beta) \cos(n\beta) d\beta. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,谐波系数与气体浓度呈正比例关系,因此待测气体浓度值可以通过谐波系数来推得。在各次谐波中,奇数次谐波系数在吸收谱线中心频率处为 0,偶数次谐波系数在吸收谱线中心频率处最大,又考虑到随着谐波系数的提高,谐波分量是以 10 的指数倍衰减的^[15],因此在选择谐波次数时,二次谐波是最优的。但是二次谐波不可避免地会受到 TDLAS 系统中闪烁噪声、热噪声等大都处于高频段的噪声的影响,从而影响了系统的功能,因此消除此方面的影响将有效提升 TDLAS 系统的整体检测性能。

2.2 基于 VMD 的滤波算法分解原理

VMD 算法基于自适应维纳滤波器,采用非递归的模态分解,可以同时实现对不同中心频率模态的估计,既避免了包络估计中的误差累积,又克服了端点效应和模态混叠问题^[16]。VMD 算法的分解过程实质上就是求解所构建的变分问题的过程。

所提 VMD 算法和 S-G 滤波算法通过以下三个步骤进行实现。

1) 变分问题的构造

在变分问题的构造中,假设每个模态是一个有中心频率的有限带宽,这样变分问题即为寻找 K 个模态函数 $\mu_k(t)$ 。为了保证各模态带宽和最小,引入约束条件:各模态信号叠加后应与原始信号相同。得到受约束的变分问题的表达式为

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

式中: $\delta(t)$ 为狄利克雷函数; $\{\mu_k\}$ 为分解得到的 K 个模态分量; $\{\omega_k\}$ 为各模态分量的中心频率。

2)求解变分问题

引入二次惩罚因子 α 抑制高斯噪声的影响,保证信号构建的精度;引入拉格朗日算子 $\lambda(t)$,保

持约束条件的严格性。这样约束变分问题就转变为无约束变分问题,得到的扩展拉格朗日表达式为

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

接下来通过交替方向乘子方法(ADMM)解决上述问题,设定需要分解的模态数目 K ,初始化 $\{\hat{\mu}_k^1\}, \{\hat{\omega}_k^1\}, \lambda^1, n$ 为 0,不断更迭 μ_k, ω_k, λ ,得到扩展的拉格朗日表达式中的“鞍点”,即约束变分模型的最优解。 μ_k, ω_k, λ 迭代表达式分别为

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

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

$$\lambda^{n+1}(\omega) \leftarrow \lambda^n(\omega) + \tau \left[f(\omega) - \sum_k \mu_k^{n+1}(\omega) \right]. \quad (8)$$

根据预先给定的判别精度 $e > 0$,如果满足

$$\sum_k \|\hat{\mu}_k^{n+1} - \hat{\mu}_k^n\|_2^2 / \|\hat{\mu}_k^n\|_2^2 < e, \quad (9)$$

则停止迭代,否则将最新的 $\hat{\mu}_k, \hat{\omega}_k, \lambda^n$ 代入(9)式再次迭代,直到满足判别精度,得到 K 个模态。

3)S-G 滤波

使用 S-G 滤波对分解后的低频模态,即第一个

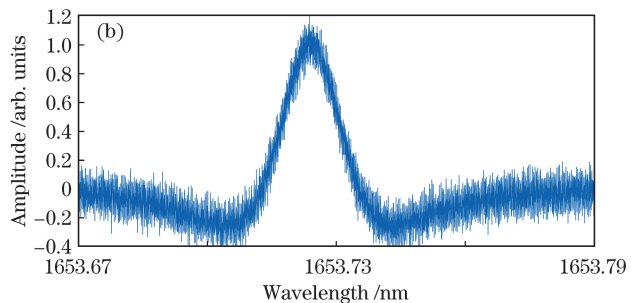
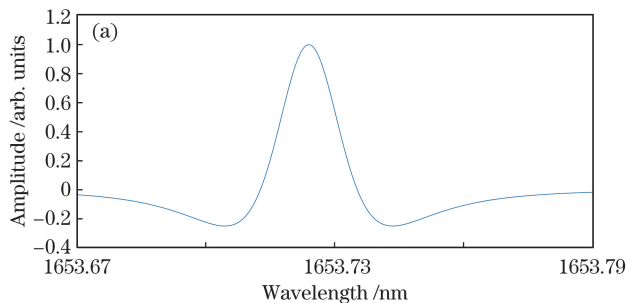


图 1 信号染噪前后对比图。(a)纯净二次谐波信号;(b)染噪二次谐波信号

Fig. 1 Comparison of signal before and after adding noise. (a) Pure second harmonic signal; (b) second harmonic signal with noise

采用基于 VMD 的滤波算法,先对含有污染的信号进行处理。在采用 VMD 算法时首先要确定模态数 K ,模态数的取值对迭代时间和迭代精度都会有很大的影响。图 2、3 分别为 $K=3,4$ 时的分解图。从

模态进行滤波处理。将残留在低频模态的高频信号和 TDLAS 系统中自身的少量低频噪声滤除,得到处理后信号,即完成所有步骤。

2.3 仿真实验

以 CH_4 在 1653.72 nm 处的吸收线为例。由于 22 dB 高斯噪声和幅值为 0.001 的正弦周期信号与实际 TDLAS 系统中信号噪声最为相近,所以将上述信号与纯净二次谐波叠加,得到仿真的解调二次谐波信号。 CH_4 在温度为 296 K 的吸收谱线的相关参数从 HITRAN 光谱数据库获得。 CH_4 在 1653.72 nm 处的吸收线宽为 $66.875 \text{ cm}^{-1}/\text{kPa}$,吸收线强度为 $1.369 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$,温度依赖系数为 0.73,压强取 101.33 kPa。在上述压强和温度的情况下, CH_4 气体的吸收谱线可以用高斯线型描述。选择 CH_4 的体积分数为 200×10^{-6} ,气体吸收光程为 40 cm,对二次谐波信号进行归一化处理,仿真的纯净二次谐波信号如图 1(a)所示。为了对基于 VMD 的滤波算法的有效性进行估算,将高斯白噪声和标准具条纹噪声加入到纯净信号中,得到污染后的仿真二次谐波信号,如图 1(b)所示。

图 3 圈中可以看出,当 $K=4$ 时,模态 3 和 4 发生了混叠,产生了过分解现象。而 $K=3$ 时该现象没有发生,因此选用 $K=3$ 作为分解模态数。在波长调制的 TDLAS 系统中,作为有效信号的二次谐波为低频、窄

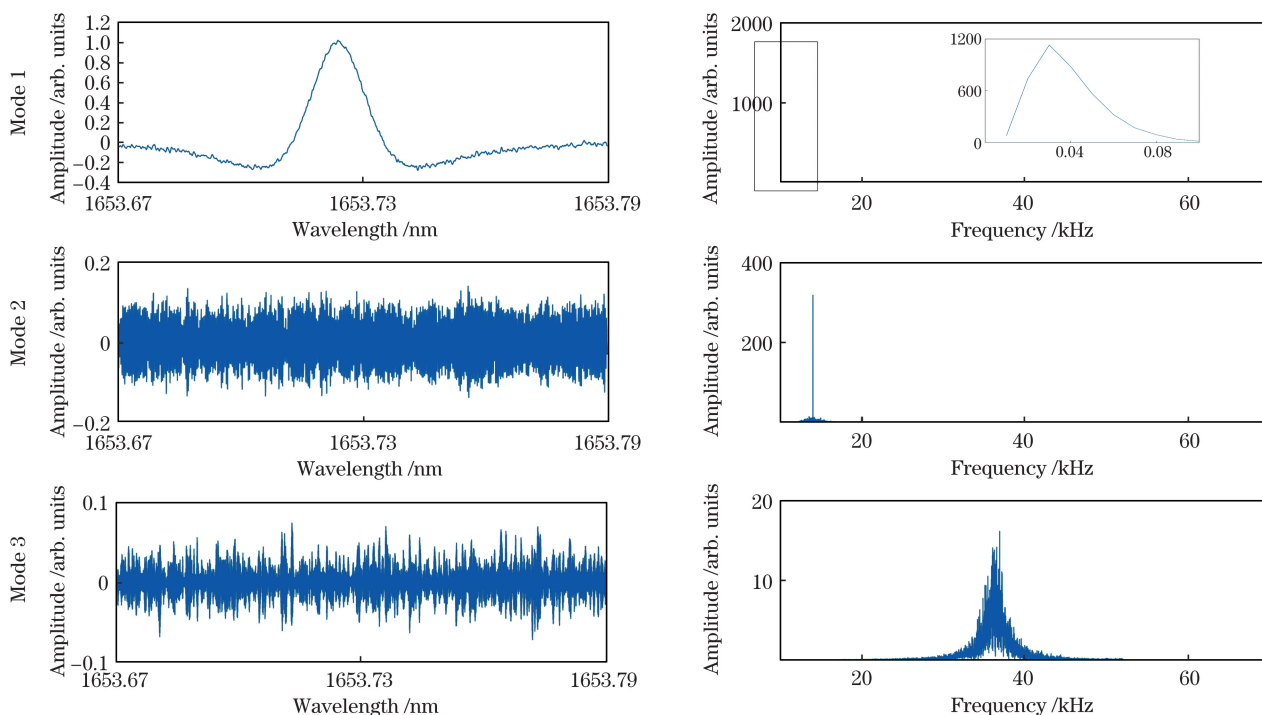


图 2 $K=3$ 时 VMD 模式

Fig. 2 VMD mode with $K=3$

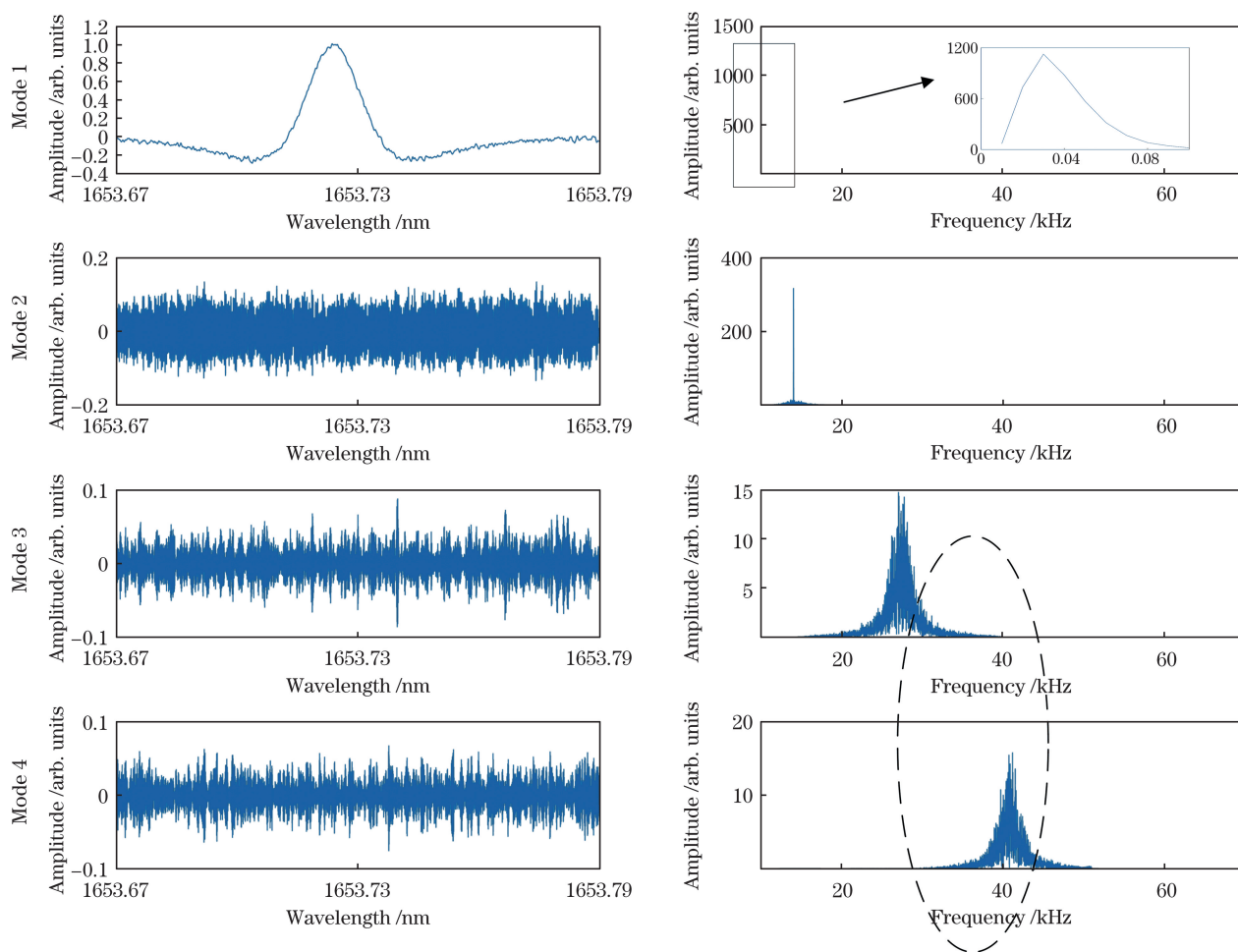


图 3 $K=4$ 时 VMD 模式

Fig. 3 VMD mode with $K=4$

带宽信号,因此中心频率、带宽的初值均从 0 开始。在 VMD 分解结果中,可以计算各个模态与原始信号的 Pearson 相关系数,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出:模态 2、3 与原始信号的 Pearson 相关系数小于 0.3,为弱相关;模态 1 与原始信号的 Pearson 相关系数大于 0.8,为强相关。因此在使用 VMD 滤波算法处理气体信号时,只需选取低频模态 1 即可代表真实信号,这也证明了 VMD 算法能很好地进行模态的分解,说明 VMD 算法对噪声有

表 1 VMD 算法处理后各模态与原始信号的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient between each mode and original signal after VMD algorithm processing

Mode	1	2	3
Pearson correlation	0.9555	0.1966	0.1102

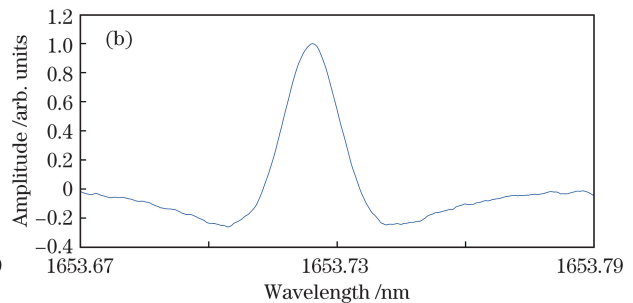
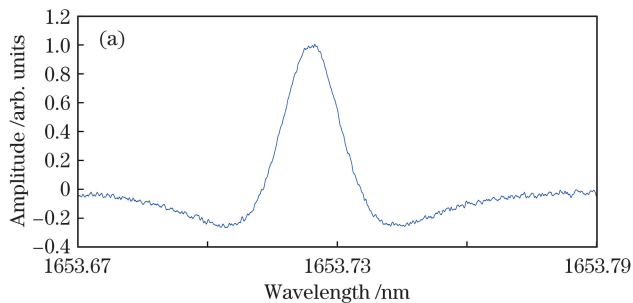


图 4 S-G 滤波效果对比图。(a)S-G 滤波前;(b)S-G 滤波后

Fig. 4 Chart of S-G filtering effect comparison. (a) Before S-G filtering; (b) after S-G filtering

对含有污染的信号进行 EMD 处理,分解产生 9 个模态,因为有效信号为低频信号,所以仅选取频率

着更好的鲁棒性,也能更好地解决模态混叠问题。

从低频模态 1 图像中可以看出,仍有残余噪声信号,因此使用 S-G 滤波对低频模态 1 进行滤波处理,对未被 VMD 的少量高频噪声和 TDLAS 系统中自带的少量低频噪声进行滤除,处理前后的信号分别如图 4(a)、(b)所示。引入信噪比量化 S-G 滤波的效果,在波长调制的 TDLAS 系统中,通常采用二次谐波幅值与浓度的关系进行标定测量,因此使用二次谐波幅值作为有效信号计算信噪比,计算公式为

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

式中: S 为有效信号,即二次谐波信号幅值; N 为噪声信号。根据(10)式,S-G 滤波算法将信噪比由 15.4 dB 提升到 20.1 dB,有效地过滤了 VMD 后的残余高频噪声和仪器自带的少量低频噪声。

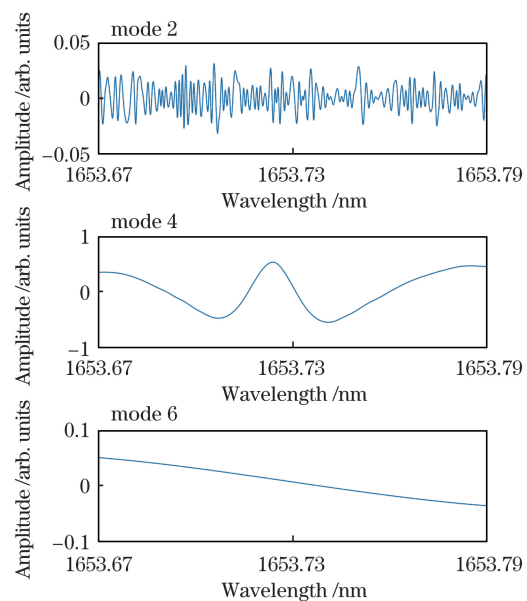
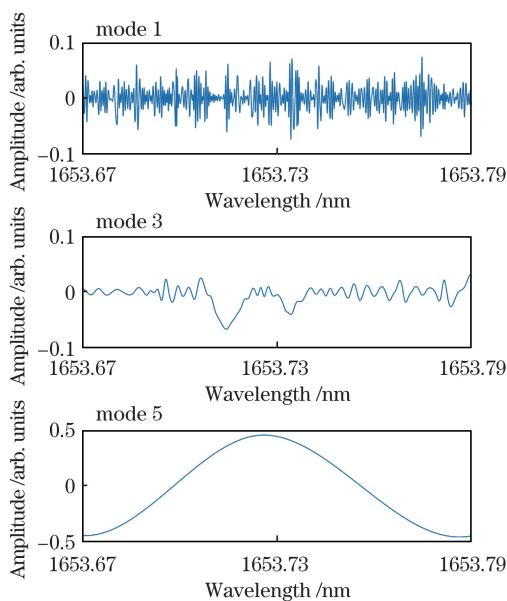


图 5 EMD 后的 6 个模态

Fig. 5 Six modes after EMD

重建,重建结果如图 6(b)所示。

图 6(a)、(b)分别为基于 VMD 的滤波算法与 EMD 算法处理的结果,可以看出:经基于 VMD 的滤波算法降噪之后,二次谐波信号与理论数据吻合;染噪信号经 EMD 算法降噪之后,信噪比由 7.0 dB 提升到 14.4 dB,残差平方和为 0.5925 V^2 ,运行时

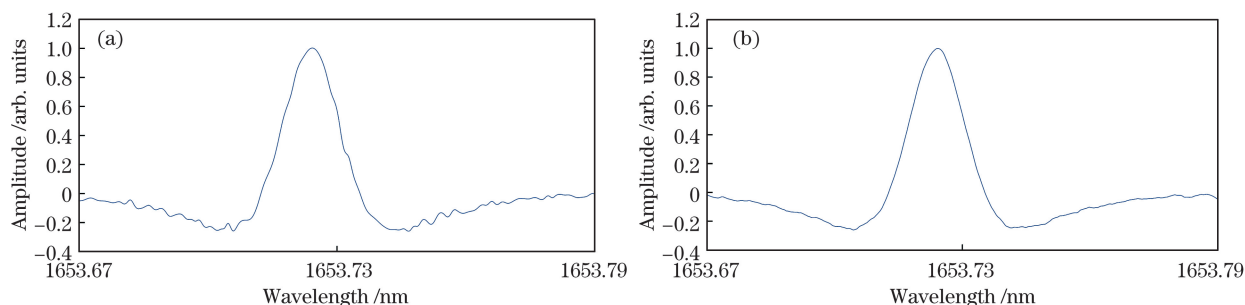


图 6 EMD 和基于 VMD 滤波算法效果对比图。(a)EMD 重建结果;(b)基于 VMD 的滤波算法的结果

Fig. 6 Chart of EMD and filtering algorithm based on VMD effect comparison. (a) Reconstruction result of EMD; (b) result of filtering algorithm based on VMD

3 实验与讨论

为了验证所提算法的实际性能,将其应用于搭建的用于可燃冰开采井的 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 混合气体探测仪器中,以 CH_4 气体为例进行实验。仪器结构示意图、实物图分别如图 7、8 所示。首先将体积分数为 500×10^{-6} 的 CH_4 气体注入有效吸收光程为 40 cm 的气室里;随后使用 LabVIEW 程序串口控制信号

间为 2.3257 s;染噪信号经基于 VMD 的滤波算法降噪之后,信噪比由 7.0 dB 提升到 20.1 dB,残差平方和为 0.1728 V^2 ,运行时间为 0.8463 s。因此,使用基于 VMD 的滤波算法降噪后,信噪比更高,残差平方和更小,最接近真实的纯净信号,所需运行时间也更短。

发生模块产生 10 Hz 低频三角波和 20 kHz 高频正弦波,叠加后输送到激光驱动器,驱动 DFB 激光器产生调制激光信号;激光经波分复用器、环形器、气室后,经反射镜返回再次经过气室,通过环形器、波分复用器进入自行设计制作的光电探测板;光电探测板将光信号转变为电信号传输到锁相放大模块,提取待测气体的二次谐波;随后利用 16 位的高速数据采集卡(DAQ)采集二次谐波信号,上位机对信号

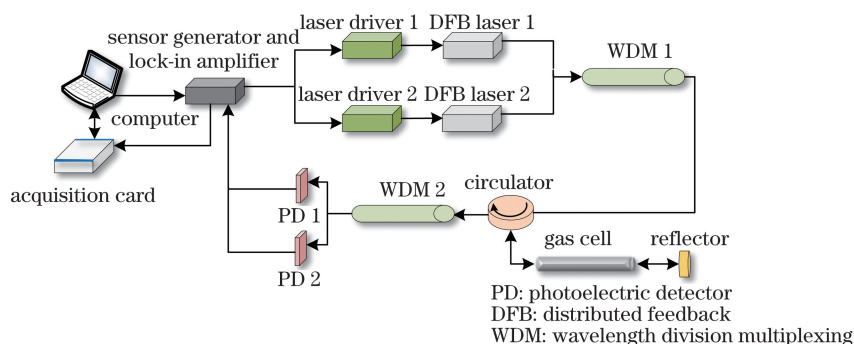


图 7 系统结构示意图

Fig. 7 Diagram of system structure



图 8 仪器实物图

Fig. 8 Instrument picture

进行处理显示。提取的二次谐波图像如图 9(a) 所示。

从图 9(a) 中不难看出, 噪声覆盖在提取的二次谐波信号上, 这就导致系统的检测下限降低, 影响了系统性能。因此利用基于 VMD 的滤波算法对所得到的二次谐波信号进行处理, 降噪结果如图 9(b) 所

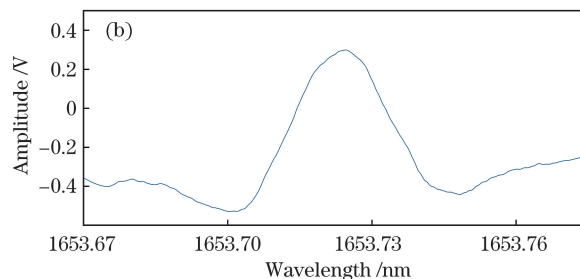
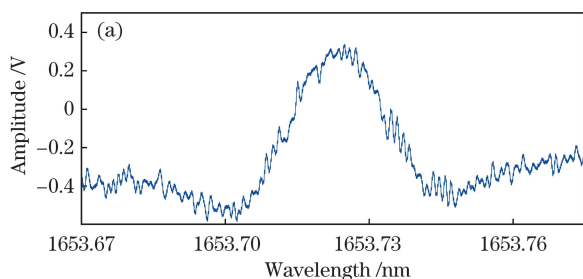


图 9 降噪实验对比图。(a) 降噪前的二次谐波; (b) 降噪后的二次谐波

Fig. 9 Chart of noise reduction experiment comparison. (a) Second harmonic before noise reduction; (b) second harmonic after noise reduction

表 2 系统性能比较

Table 2 Comparison of system performance

Algorithm	SNR/dB	Detected minimum volume fraction / 10^{-6}	R^2	Sum of squares of residuals / V^2	Time / s
Original signal	8.5	85.2	0.9633		
EMD algorithm	15.9	26.6	0.9882	0.5925	2.3257
Proposed algorithm	21.7	6.7	0.9940	0.1728	0.8463

为了进一步验证所提算法的性能, 选取体积分数为 $200 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 的气体进行检测, 间隔为 50×10^{-6} , 得到的二次谐波幅值如图 10 所示。可以看出, 二次谐波信号与气体体积分数呈线性关系。使用基于 VMD 的滤波算法前后的线性相关系数分别为 0.9633 和 0.9940。另利用 EMD 算法对气体信号进行处理, 得到的气体体积分数与二次谐波幅值关系如图 11 所示, 线性相关系数为 0.9882。

根据二次谐波信号与气体体积分数的关系, 系

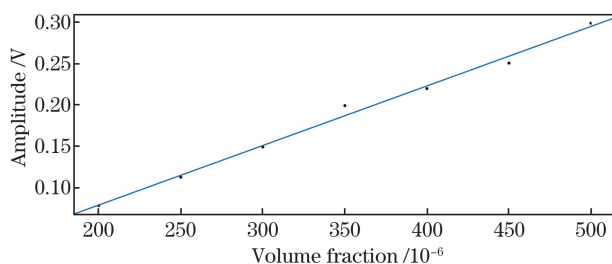


图 10 基于 VMD 的滤波算法处理下的二次谐波信号与气体体积分数的关系

Fig. 10 Relationship between second harmonic signal and gas volume fraction under VMD filtering algorithm

示, CH_4 气体的二次谐波信号并不对称, 这是剩余振幅调制和强度调制影响的结果^[17]。图 9(a) 中二次谐波幅值为 0.3380 V, 图 9(b) 中二次谐波幅值为 0.2960 V, 降噪前后噪声幅值分别为 0.0470 V 和 0.00196 V, 计算得降噪前后信噪比分别为 8.5 dB 与 21.7 dB, 如表 2 所示。

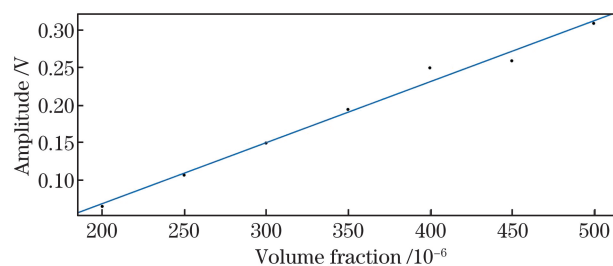


图 11 EMD 算法处理下的二次谐波信号与气体体积分数的关系

Fig. 11 Relationship between second harmonic signal and gas volume fraction under EMD algorithm

统的最低探测体积分数计算公式^[18]为

$$M = \frac{1}{k} \times 2A_{\text{noise}}, \quad (11)$$

式中: A_{noise} 为噪声的振幅; k 为拟合直线的斜率。从(11)式可以得出, 经 EMD 算法降噪后, 仪器的最低探测体积分数由 85.2×10^{-6} 下降到 26.6×10^{-6} , 经基于 VMD 的滤波算法降噪后, 仪器的最低探测体积分数由 85.2×10^{-6} 下降到 6.7×10^{-6} 。

4 结 论

将基于 VMD 的滤波算法引入到可燃冰开采钻

井气体环境监测仪器中。以 1653.72 nm 处的 CH₄ 气体的吸收谱线为例,将高斯白噪声和标准具噪声加入到纯净的二次谐波号中,模拟了染噪的二次谐波信号。将 EMD 算法和基于 VMD 的滤波算法都用于染噪信号的降噪。基于 VMD 的滤波算法在信噪比、残差平方、运行时间方面与 EMD 算法相比有着明显优势,可以获得更高的信噪比和更接近纯净二次谐波的曲线。利用基于 VMD 的滤波算法,系统信噪比由 8.5 dB 提升到 21.7 dB,运行时间为 0.8463 s,残差平方和为 0.1728 V²。随后,在可燃冰开采井气体环境监测仪器上进行了一系列实验,从实验角度评价基于 VMD 的滤波算法的性能。测量使用、未使用 VMD 的滤波算法和使用 EMD 算法的线性相关系数和探测下限,发现经基于 VMD 的滤波算法去噪后,原始信号的线性相关系数由 0.9633 提升到 0.9940,最低探测体积分数由 85.2×10^{-6} 下降到 6.7×10^{-6} ,而使用 EMD 算法线性相关系数为 0.9882,最低探测体积分数为 26.6×10^{-6} 。结果证明,所提基于 VMD 的滤波算法可以在更短的时间内有效降低噪声,提升仪器信噪比,并降低了仪器最低探测体积分数,为可燃冰海上开采钻井下气体环境实时监测打下了坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] Xue S. Application prospect of laser spectrum technology in combustible ice drilling equipment application[J]. Chinese and Foreign Energy, 2020, 25(1): 56-60.
薛帅. 激光光谱技术在可燃冰钻探设备的应用前景[J]. 中外能源, 2020, 25(1): 56-60.
- [2] Wang X, Jing C R, Hou K X, et al. Online detection of human-exhaled end-tidal carbon dioxide using tunable semiconductor absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0311002.
王鑫, 荆聪蕊, 侯凯旋, 等. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO₂ 在线检测[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0311002.
- [3] Webster C R. Brewster-plate spoiler: a novel method for reducing the amplitude of interference fringes that limit tunable-laser absorption sensitivities[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1985, 2(9): 1464-1470.
- [4] Silver J A, Stanton A C. Optical interference fringe reduction in laser absorption experiments[J]. Applied Optics, 1988, 27(10): 1914-1916.
- [5] Hodgkinson J, Masiyano D, Tatam R P. Gas cells for tunable diode laser absorption spectroscopy employing optical diffusers. Part 1: single and dual pass cells[J]. Applied Physics B, 2010, 100(2): 291-302.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Luo Q W, Song C, Yang C H, et al. Headspace oxygen concentration measurement for pharmaceutical glass bottles in open-path optical environment using TDLAS/WMS [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(8): 5828-5842.
- [9] Huang N E, Shen Z, Steven R L, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1): 903-995.
- [10] 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.
- [11] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [12] Xu J C, Jiang H Y, Xu L S, et al. Pulse wave processing and analysis based on smoothing filter [C]//The 9th National Information Gathering and Processing Meeting, August 6-8, 2011, Dandong, Liaoning. Beijing: China Instrument and Control Society, 2011: 338-341.
徐佳璨, 姜慧研, 徐礼胜, 等. 基于 S-G 平滑滤波器的脉搏信号的分析与研究[C]//第九届全国信息获取与处理学术会议, 8月6日-8日, 2011, 丹东, 辽宁. 北京: 中国仪器仪表学会, 2011: 338-341.
- [13] Jia L Q, Qi H N, Hu W J, et al. Rapid nondestructive grading detection of maize seed vigor using TDLAS technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0911002.
贾良权, 祁亨年, 胡文军, 等. 采用 TDLAS 技术的玉米种子活力快速无损分级检测[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0911002.
- [14] Zhang Z R, Pang T, Sun P S, et al. Measurement of carbon isotope of methane and analysis of its genesis

type using laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1211001.

张志荣, 庞涛, 孙鹏帅, 等. 基于激光吸收光谱技术的甲烷碳同位素测量及其成因类型分析[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1211001.

[15] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. Applied Physics B, 1981, 26(3): 203-210.

[16] Feng Z P, Zhang D, Zuo M J. Adaptive mode decomposition methods and their applications in signal analysis for machinery fault diagnosis: a review with examples[J]. IEEE Access, 2017, 5: 24301-

24331.

[17] Stewart G, Johnstone B W, et al. Recovery of absolute gas absorption line shapes using tunable diode laser spectroscopy with wavelength modulation. Part I: theoretical analysis[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(6): 811-821.

[18] Meng Y X. Research on mixing fiber gas sensing key techniques based on tunable diode laser absorption spectroscopy of software lock-in demodulation technique[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

孟云霞. 基于软件锁相的 TDLAS 光纤混合式气体传感关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

Optimized Gas Detection Method Based on Variational Mode-Decomposition Algorithm

Liang Yu^{1,2,3}, Liu Tiegeng^{1,2,3}, Liu Kun^{1,2,3*}, Jiang Junfeng^{1,2,3}, Li Yafan^{1,2,3}

¹ School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

³ Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective In the process of exploiting combustible ice, the temperature in the production string can decrease due to the influence of depressurization and hydrate decomposition. This can produce a temperature and pressure environment conducive to the secondary formation of methane or carbon dioxide hydrate, which results in the risk of string blockage. Therefore, it is very important to monitor the gas concentration in real time during drilling in order to determine from the gas concentration whether a secondary hydrate is starting to form and to select measures flexibly to prevent this from blocking the pipe string. However, due to the sizes and depths of the wells, it is difficult to complete downhole work for long-optical-path gas-absorption pools, such as a White pool or a Herriot pool. For an optical path with limited effective absorption, it is important to ensure the smooth progress of combustible ice mining by using digital-filtering methods to improve the signal-to-noise ratio of the system and reduce the minimum concentration necessary for environmental gas monitoring. Traditional denoising methods, such as the Kalman filter, wavelet transform, and empirical mode decomposition, are of limited utility because of the problems of mode aliasing and endpoint effects. In the present study, we have combined a variational mode-decomposition (VMD) algorithm with the Savitsky-Gorai (S-G) filtering algorithm to produce a VMD-based filtering algorithm that effectively solves the modal-aliasing problem and removes system noise. We expect that our basic strategy and findings will be useful for the constant monitoring of gas concentrations during drilling in combustible ice mining.

Methods This paper proposes a VMD-based filtering algorithm based on the VMD algorithm and the S-G filtering. First, it is necessary to determine the number of decomposed modes. We choose different numbers of modes for decomposing the gas signal using VMD. We then apply the fast Fourier transform (FFT) to the decomposed modes, and we determine the optimal number of decomposed modes according to the amount of mode overlap. By calculating the Pearce correlation coefficient between each decomposition mode and the original signal, it is possible to judge whether the effective signal is a low-frequency mode. After decomposition a low-frequency mode is selected for S-G filtering, and the residual high-frequency noise after VMD filtering and the low-frequency system noise are filtered out. In addition, we calculate the system signal-to-noise ratio, linear correlation coefficient, and minimum detection volume fraction to evaluate the performance of the algorithm.

Results and Discussions In our simulation experiment, the absorption line of CH₄ at 1653.72 nm is taken as an example, and the pure signal and the dye-noise signal are obtained (Fig. 1). The dye-noise signal is processed using

the VMD-based filtering algorithm to yield the filtered signal [Fig. 4(b)]. The noise in the contaminated signal is thus effectively filtered out, and the signal-to-noise ratio increases from 7 dB to 20.1 dB. Then we applied the VMD-based filtering algorithm to the actual gas-monitoring instrument used in drilling to mine combustible ice in order to obtain the gas signal before and after noise reduction (Fig. 9). The signal-to-noise ratio of the gas signal increases from 8.5 dB to 21.7 dB. Gases with volume fraction ranging from 200×10^{-6} to 500×10^{-6} at intervals of 50×10^{-6} were selected for detection in order to determine the relationship between the second-harmonic amplitude and the volume fraction (Fig. 10). The linear correlation coefficient of the instrument is increased from 0.9633 to 0.9940 by using the VMD-based filtering algorithm, and the minimum detectable volume fraction decreases from 85.2×10^{-6} to 6.7×10^{-6} .

Conclusions In this study, we have proposed a VMD-based filtering algorithm to improve the signal-to-noise ratio for gas detection by combining the VMD algorithm with the S-G filtering algorithm. The problem of modal aliasing and end effects in previous gas-noise reduction algorithms is well solved with this approach, and the effective signal is separated from the noise signal. We applied the VMD-based filtering algorithm to the actual gas-monitoring instrument used during drilling to mine combustible ice, and the experimental results show the new algorithm produces substantial improvement. Our research has thus shown that this VMD-based filtering algorithm effectively improves the signal-to-noise ratio and decreases the minimum gas volume fraction detectable with the instrument, making this method an effective tool for the field of spectral signal processing and gas-concentration monitoring.

Key words fiber optics; tunable diode laser absorption spectrum; variational mode-decomposition; second-order harmonic; denoising

OCIS codes 060.2370; 060.2630; 120.2440