

基于变分模态分解的相位敏感光时域反射计 信噪比提升方法

高浩天, 康杰虎, 张振, 吴斌*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 在页岩气开采过程中, 基于相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)的分布式光纤声波传感(DAS)系统是对水力压裂作业中产生的微震波进行监测的常用方案。为了提高 Φ -OTDR系统测量振动信号的信噪比, 提出了一种基于变分模态分解(VMD)和互信息(MI)的振动信号去噪方法, 对数字正交(I/Q)解调得到的相位信号进行进一步处理, VMD层数 K 通过去趋势波动分析(DFA)计算的标度指数确定, 相位信号的失真和噪声通过剔除MI法确定的非相关模态进行抑制。并搭建了相干探测 Φ -OTDR系统验证VMD-MI方法的去噪效果, 分别对500 Hz单频振动信号和500、1000、1500 Hz多频振动信号使用VMD、小波降噪(Wavelet)、经验模态分解(EMD)、自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)进行处理。实验结果表明, 所提方法对振动信号信噪比提升最为明显, 在 Φ -OTDR系统中具有良好的实用性。

关键词 相位敏感光时域反射计; 水力压裂微地震监测; 信噪比; 变分模态分解; 互信息

中图分类号 TP212 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230938

1 引言

页岩气压裂技术是页岩气开采中至关重要的一项技术, 在压裂作业过程中, 需要对新产生的裂缝发出的微震波进行感知和分析, 从而实现压裂效果的实时监测^[1]。随着分布式光纤传感技术的快速发展, 基于相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)的分布式光纤声波传感(DAS)系统被广泛应用于页岩气压裂微地震监测及其他油气勘探领域。与电学原理的检波器相比, DAS系统因使用一根连续的光纤作为传感器而具有长距离、高灵敏度、高空间分辨率、低成本、无源、抗电磁干扰等显著优势, 在页岩气压裂微地震监测领域有广阔的应用前景^[2]。

信噪比是反映 Φ -OTDR系统性能的重要参数, 获取具有良好信噪比的微震信号是后续根据模式识别理论研究微地震信号识别与可视化表征的基础^[1-2]。在 Φ -OTDR系统中, 光电探测器的热噪声和散粒噪声^[3]、激光器的相位噪声和频率漂移^[4]、声光调制器的消光比非无穷大^[5]、掺铒光纤放大器的自发辐射噪声^[3]以及环境噪声等因素均会在探测到的背向瑞利散射光中引入随机干扰, 造成系统的信噪比降低。

近年来, 研究人员提出了许多提高 Φ -OTDR系统信噪比的去噪算法。张春熹等^[6]将谱减法应用到

Φ -OTDR系统中, 在传感距离53.6 km的情况下, 降噪信号的信噪比提高了2.7 dB。谱减法虽运算简单但降噪效果有限。Wu等^[7]提出一种多尺度小波分解的方法来分离 Φ -OTDR系统的缓慢变化和其他环境干扰的影响, 检测信号的信噪比最高可达35 dB。然而, 小波基和分解层数需要靠经验选择, 缺乏自适应性。He等^[8]将二维图像自适应处理方法——双边滤波算法用于提高振动位置处的信噪比, 通过归一化加权平均来降噪, 获得了14 dB的信噪比提升。该方法需要将 Φ -OTDR系统采集到的一维瑞利后向散射信号转换成二维图像进行处理, 计算量大、过程繁琐。Qin等^[9]采用经验模态分解(EMD)将原始背向瑞利散射曲线分解为一系列本征模态函数(IMF)和残差分量, 并通过皮尔逊相关系数(PCC)有选择地保留IMF以消除高频噪声。对100 Hz和1.2 kHz振动的定位信噪比分别达到42.52 dB和39.58 dB。EMD-PCC方法克服了小波基函数无自适应性的问题, 但其数学理论基础不健全, 还存在模态混叠和端点效应的问题。熊兴隆等^[10]使用具有抗模态混叠优点的自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)提取扰动位置的高频信息, 并通过小波信息熵阈值去噪, 相比小波阈值法系统信噪比提升了3 dB。

本文提出一种变分模态分解-互信息(VMD-MI)

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-06-04; 录用日期: 2023-06-16; 网络首发日期: 2023-09-13

基金项目: 四川省科技支撑计划(2021YFSY0024)

通信作者: *wubin@tju.edu.cn

的方法对 Φ -OTDR 系统进行去噪。VMD 算法的本质是将经典的维纳滤波推广到多个自适应波段,具有坚实的理论基础,能克服 EMD 存在的模态混叠和端点效应问题,对采样噪声的鲁棒性更强^[11]。MI 用来度量 VMD 分解得到的各 IMF 分量与原始信号的相关性进而筛选相关模态,并通过剔除非相关模态实现降噪。对比 VMD-MI 方法、小波降噪 (Wavelet) 方法、EMD 方法和 CEEMDAN 方法对 500 Hz 单频振动信号和 500、1000、1500 Hz 多频振动信号的处理效果,证明了 VMD-MI 方法的有效性和优越性,为 Φ -OTDR 系统在页岩气压裂微地震监测领域应用的性能提升提供了思路。

2 基本原理

2.1 Φ -OTDR 振动测量

基于外差相干探测的 Φ -OTDR 系统结构如图 1 所示。窄线宽激光器 (NLL) 发出的连续光经光隔离器被 90:10 光耦合器分成两部分。90% 的一部分光作为探测光由具有一定宽度和重复频率的脉冲驱动的声光调制器 (AOM) 调制成光脉冲,同时探测光的频率也由声光调制器引入一个频移 (f_{AOM})。掺铒光纤放大器 (EDFA) 对脉冲光功率进行放大,带通光滤波器对放大器的自发辐射噪声进行滤除,随后探测脉冲光经环形器注入传感光纤中。根据背向瑞利散射光的一维脉冲响应模型,某一时刻得到的瑞利散射光是由脉冲内

所有瑞利散射中心的散射光的干涉结果。返回的背向瑞利散射光可表示为

$$E_R(t) = E_s(t) \cos[(\omega_c + \Delta\omega)t + \varphi_s(t)], \quad (1)$$

式中: $E_s(t)$ 是背向瑞利散射光的振幅; $\varphi_s(t)$ 是背向瑞利散射光的相位; ω_c 是窄线宽激光器的中心角频率; $\Delta\omega = 2\pi f_{AOM}$ 是声光调制器引入的频移。10% 的另一部分光作为本振光,可以表示为

$$E_L(t) = E_0(t) \cos(\omega_c t + \varphi_0), \quad (2)$$

式中: $E_0(t)$ 是本振光的振幅; φ_0 是本振光的相位。

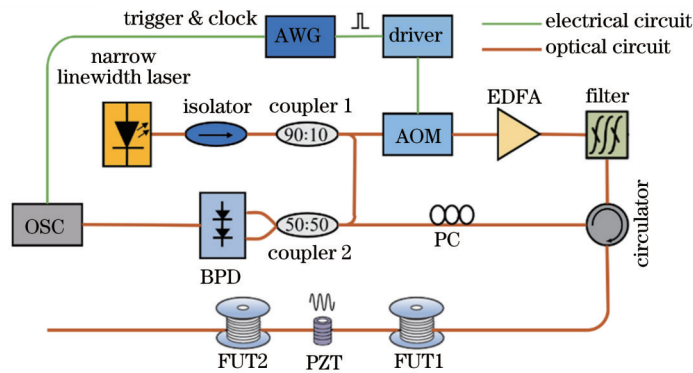
背向瑞利散射光与本振光在 3 dB 耦合器中发生拍频,之后由平衡探测器 (BPD) 进行光电转换。由于 BPD 对共模信号的抑制作用, BPD 探测到的即为交流部分,输出功率可表示为

$$P_{BPD} \propto E_s(t) E_0(t) \cos[\Delta\omega t + \varphi_s(t) - \varphi_0]. \quad (3)$$

BPD 输出的电信号由示波器 (OSC) 采集转换为数字信号, OSC 与信号发生器 (AWG) 的参考时钟相连,并由 AWG 输出的同步信号触发采集,其采样率为 f_s , 则采集到的数字信号可以表示为

$$S(n) = E_s(n) E_0(n) \cos[\Delta\Omega n + \varphi(n)], \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

式中: $\Delta\Omega = 2\pi f_{AOM}/f_s$ 表示 $\Delta\omega$ 对应的数字角频率; 相位 $\varphi(n) = \varphi_s(n) - \varphi_0$; n 为采样点序号; N 为总采样点数。OSC 完成模数转换后的数字信号被送入计算机进行下一步的信号解调处理。



OSC: oscilloscope; AWG: signal generator; AOM: acousto-optic modulator; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; BPD: balanced detector; PZT: piezoelectric ceramics; FUT: fiber under test; PC: polarization controller

图 1 外差相干探测 Φ -OTDR 系统

Fig. 1 Φ -OTDR system based on heterodyne coherent detection

为实现振动信号的定位与还原,外差相干探测 Φ -OTDR 系统通常采用数字正交 (I/Q) 解调的方法来获得与振动相关的强度、相位信息,其基本思想是将接收到的中频信号转化为两个正交分量而实现解调^[12]。I/Q 解调的处理流程如图 2 所示。

采集到的数字信号 $S(n)$ 分别与计算机产生的两个正交的同频率信号 $\cos(\Delta\Omega n)$ 和 $\sin(\Delta\Omega n)$ 相乘,产生的两路混频信号分别通过数字低通滤波器 (DLPF) 滤除其中的和频分量,得到 I 和 Q 两路信号,其表达式

分别为

$$I \propto E_s(n) E_0(n) \cos[\varphi(n)], \quad (5)$$

$$Q \propto -E_s(n) E_0(n) \sin[\varphi(n)]. \quad (6)$$

由 I 和 Q 两路信号可以计算得到 $S(n)$ 的强度信息和相位信息分别为

$$I_s = E_s(n) E_0(n) \propto \sqrt{I^2 + Q^2}, \quad (7)$$

$$\varphi(n) = -\arctan(Q/I) + 2k\pi, \quad (8)$$

式中, k 为整数。由于反正切函数的值域限制,解调得

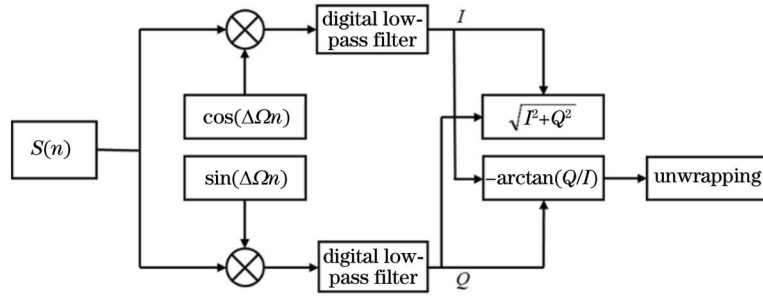


图 2 I/Q 解调流程

Fig. 2 I/Q demodulation process

到的相位还需要进行相位解卷绕处理才能提取正确的相位信息。一个完整的相位解卷绕处理包括沿传感光纤长度方向上的相位解卷绕处理(空间域上的相位解卷绕)和同一振动位置的相位随时间变化的相位解卷绕处理(时间域上的相位解卷绕)^[12]。

2.2 VMD 降噪

VMD 是 Dragomiretskiy 等^[13]于 2014 年提出的一种自适应信号分解估计方法。VMD 具有严格的数学模型和坚实的理论基础,且能够克服 EMD 中的模态混叠等问题,因其自身具有的维纳滤波特性而能实现更优的噪声滤除效果。

VMD 的整体框架是变分问题,其假设每一个 IMF 分量具有不同中心频率的有效带宽,通过转换解决变分问题使得每一个 IMF 分量的估计带宽之和最小。假设输入的原始信号经 VMD 分解为 K 个 IMF 分量 $u_k, k=1, 2, \dots, K$, 则对应的约束变分模型为

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] u_k(t) \right\|_2^2 \right\} \text{ s.t. } \sum_k u_k = f, \quad (9)$$

式中: $\delta(t)$ 为 Dirac 分布; ω_k 为各个 IMF 分量的中心频率。

为了得到这个变分约束模型的最优解,将该约束变分问题转换成非约束变分问题,引入二次惩罚因子 a 和 Lagrange 乘法算子 $\lambda(t)$, 其中二次惩罚因子可在高斯噪声存在的情况下保证信号的重构精度,拉格朗日算子使得约束条件保持严格性,得到增广 Lagrange 表达式为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = a \sum_k \left\| \partial_t \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] u_k(t) \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), x(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle. \quad (10)$$

VMD 采用乘法算子交替方向法解决以上变分问题,其具体实现过程如下:

- 1) 初始化参数 $u_k^1, \omega_k^1, \lambda^1$ 和 n 。
- 2) 令 $n = n + 1$, 更新 u_k 和 ω_k , 其中 k 从 1 开始一

直循环到 K 。 u_k 和 ω_k 的更新公式分别为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2a(\omega - \omega_k)^2}, \quad (11)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}. \quad (12)$$

3) 更新乘法算子 λ, λ 的更新公式为

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right]. \quad (13)$$

4) 给定判别精度 $e > 0$, 判断是否满足约束条件 $\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2 / \|\hat{u}_k^n\|_2^2 < e$, 若满足条件则停止迭代, 获得有限个 IMF 分量, 否则返回步骤 2)。

通过上述过程,信号被分解为 K 个 IMF 分量, 这些 IMF 分量可以精确地或在最小二乘意义上再现输入信号。在应用 VMD 进行信号处理时,分解层数 K 需要被提前设定,过小或过大的 K 值会导致 VMD 发生欠分解或过分解,均会对降噪的效果产生不良的影响。

为了确定合适的分解层数 K , 本文采用一种基于去趋势波动分析(DFA)的方法。DFA 是一种度量非平稳时间序列长程相关性的标度分析方法,能够去除不同阶外来趋势,得到序列本身的统计行为特性^[14]。DFA 计算得到的标度指数 α 可当作描述序列粗糙度的指标:数值越大,时间序列越光滑或波动越慢。Liu 等^[15]提出一种通过计算输入信号和各 IMF 分量的标度指数 α 来确定分解层数 K 的方法。分解层数 K 和标度指数 α 的关系为

$$K = \arg \max_K [\text{num}(\alpha_{1:k} \geq \theta) = J, K = 1, 2, 3, \dots],$$

$$J = \begin{cases} 1, & \alpha_0 \leq 0.8 \\ 2, & 0.8 < \alpha_0 \leq 1.0 \\ 3, & 1.0 < \alpha_0 \leq 1.5 \\ 4, & \alpha_0 > 1.5 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: K 为分解层数; α_k 为各 IMF 分量的标度指数; 阈

值 $\theta = \alpha + 0.25$, 对于高斯白噪声, α 一般取 0.5; J 为 IMF 分量的标度指数大于阈值的个数; α_0 为输入信号的标度指数。

利用 VMD 分解产生的 K 个 IMF 分量进行降噪通常采用局部重构法^[16], 即将包含信号有效成分的相关模态保留, 而将主要含噪声成分的非相关模态去除, 从而重构测量信号。相关系数法是一种常用的进行相关模态筛选的方法, 但相关系数法仅能反映变量间的线性相关程度, 而无法表述非线性关系。MI 是衡量一个变量携带另一个变量的测度, 能够定量地表示两个随机变量之间的相互依赖程度, 具有比相关系数法更高的精确度^[17], 所以本文采用 MI 法进行相关模态的筛选。MI 的计算公式为

$$f_{MI} = \sum_x \sum_y p(x, y) \lg \left[\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right], \quad (15)$$

式中: $p(x)$ 、 $p(y)$ 为两个变量的边缘概率分布; $p(x, y)$ 为两个变量的联合概率分布。 f_{MI} 的值越大, 则表示两个变量间的相关程度越大。

为筛选得到相关模态, 需要计算各 IMF 分量与原始信号之间的 MI_i , 之后进行归一化处理并求均值, 即

$$\lambda_i = \frac{MI_i}{\max(f_{MI, i})}, \quad (16)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \lambda_i, \quad (17)$$

式中: MI_i 为第 i 个 IMF 分量与原始信号的互信息; λ_i 为第 i 个 IMF 分量的归一化互信息; $\bar{\lambda}$ 为归一化互信息的平均值。若 $\lambda_i > \bar{\lambda}$, 则第 i 个 IMF 分量为相关模态, 否则为非相关模态, 予以剔除^[18]。

综上所述, 本文采用基于 VMD-MI 的方法对 I/Q 解调得到的相位曲线进行降噪处理, 从而提高 Φ -OTDR 系统振动测量的信噪比。该算法的流程如图 3 所示, 首先通过 VMD 将输入含噪声信号分解为 K 个 IMF 分量, 然后利用 DFA 估计各模态的标度指数 $\alpha_1 \sim \alpha_K$ 。需要调整 K 值, 使从实验结果中得到的标度指数大于阈值 θ 的模态总数等于 J , 且 K 取满足该条件的最大值, 参数 J 由输入含噪声信号的标度指数 α_0 的大小决定。当 K 值确定后, 计算 K 个 IMF 分量与输入含噪声信号之间的 MI, 筛选出满足相关模态判定条件的 IMF 分量, 并采用局部重构法得到降噪后的信号。

3 实验与分析

根据图 1 所示原理搭建分布式光纤微震波传感系统。系统的参数设计如表 1 所示。

考虑到页岩气水力压裂产生的微地震频率范围大部分介于 200~1500 Hz 之间, 因此通过压电陶瓷 (PZT) 对传感光纤施加此频率范围的单频振动信号和多频振动信号以模拟页岩气水力压裂产生的微震波。以对 PZT 施加幅度为 1 V、频率为 500 Hz 的正弦电压

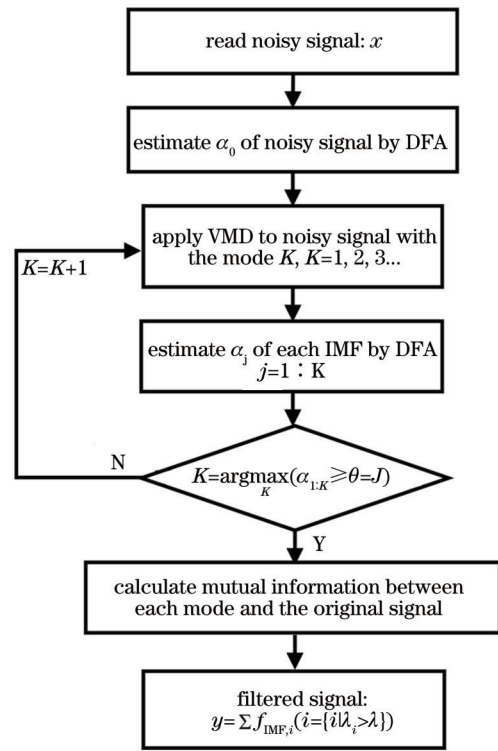


图 3 VMD-MI 降噪算法流程

Fig. 3 Flow chart of denoising algorithm based on VMD-MI

表 1 实验系统参数

Table 2 System parameters used in experiments

System component	Value
Laser wavelength /nm	1550
Laser source power /mW	12
Laser linewidth /kHz	3
AOM frequency shift /MHz	80
Fiber refractive index	1.5
Pulse repetition frequency (PRF) /kHz	20
Pulse duration /ns	100
Length of sensing fiber /km	4.2
Vibration location (PZT) /km	2.3
Sampling frequency of OSC / $(10^6 \cdot s^{-1})$	500

为例, 使用示波器采集连续的 200 条拍频信号曲线进行处理, 其波形如图 4 所示。

对原始拍频信号进行 I/Q 解调可以得到光纤各位置上背向瑞利散射的幅值和相位。通过对解调得到的幅值曲线进行移动平均和移动差分处理, 可以定位到振动信号在光纤上所处的位置, 定位曲线如图 5 所示。定位结果与 PZT 实际施加振动的位置相符, 证明了 I/Q 解调幅值信息的准确性。

提取振动位置处两次解卷绕后的相位曲线, 其波形和频谱如图 6 所示。可以看到, 信号在频谱的 500 Hz 位置处有明显的峰值, 与 PZT 所加信号频率相同, 证明了 I/Q 解调相位信息的准确性。同时原始相位信号中混有一定的噪声, 其频率分布主要体现为直流和高次

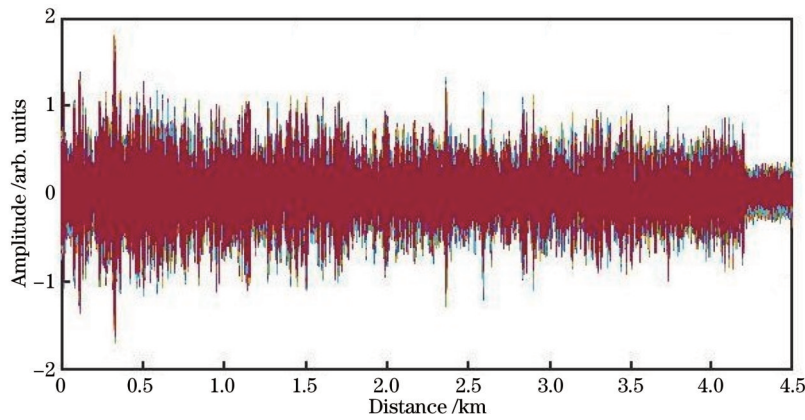


图 4 原始拍频信号波形图

Fig. 4 Waveform of original beat signal

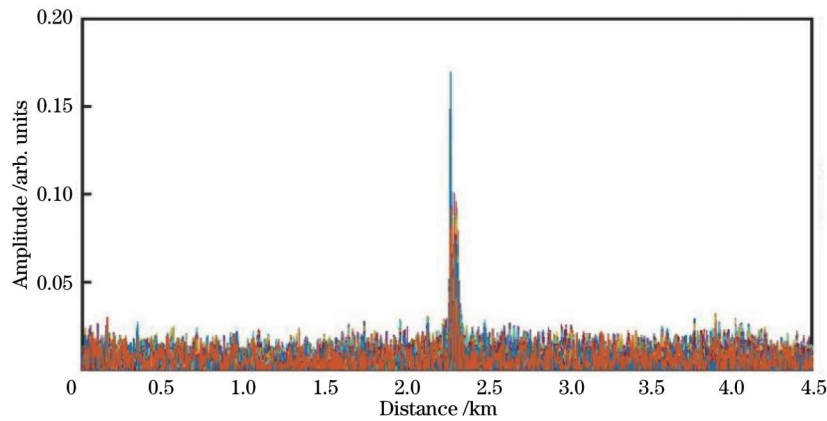


图 5 振动定位结果

Fig. 5 Vibration positioning results

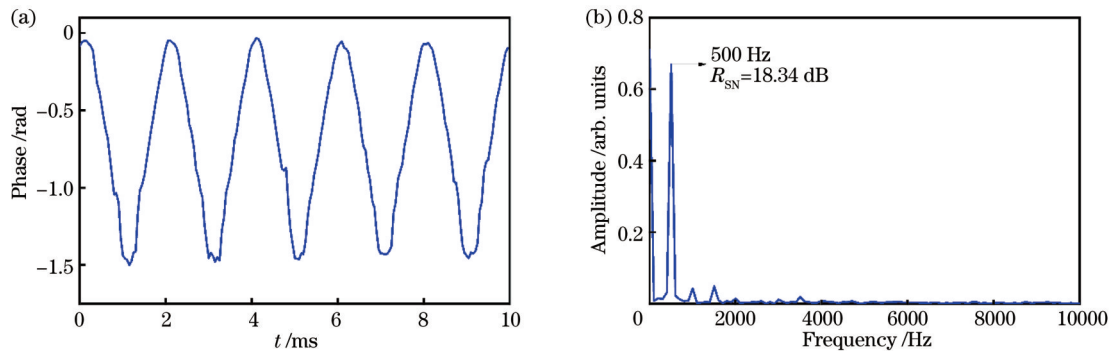


图 6 500 Hz 振动 I/Q 解调相位信号的时域波形及频谱

Fig. 6 Time domain diagram and spectrum diagram of phase signal of 500 Hz vibration demodulated by I/Q

谐波两种形式。经计算原始相位信号的信噪比为 18.34 dB, 信噪比定义为 $R_{SN} = 20 \lg(A_{\text{signal}}/A_{\text{noise}})$, 为了方便起见, 这里在频域上计算信噪比。 A_{signal} 为振动信号频率对应的谱线幅度, A_{noise} 为其他频率上谱线幅度的均方根。

对 I/Q 解调得到的 500 Hz 振动原始相位信号应用 VMD-MI 算法进行降噪。经 DFA 计算得原始相位信号的标度指数 α_0 小于 0.8, 由式(14)可知此时 $J=1$, 各 IMF 分量的标度指数满足 $\text{num}(\alpha_{1,K} \geq \theta) = 1$ 条件

时 K 的最大值为 4, 因此将分解层数 K 设置为 4。原始相位信号被 VMD 分解为 4 个模态分量 IMF1~IMF4 和一个残差分量 (RES)。取各分量的归一化 MI 的均值作为阈值, 只有当某个分量的归一化 MI 大于此阈值时, 该分量才会被保留, 否则该分量将被剔除。原始相位信号与其经 VMD 分解产生的各分量之间的归一化 MI 如图 7 所示。IMF3 的 MI 值大于阈值, 被判定为相关模态分量予以保留, 而 IMF1、IMF2、IMF4、RES 分量的 MI 值小于阈值, 被判定为非相关模态分量予以剔

除进而实现降噪。

将 VMD-MI 方法对 500 Hz 振动 I/Q 解调相位曲线的降噪处理结果与 Wavelet、EMD、CEEMDAN 三

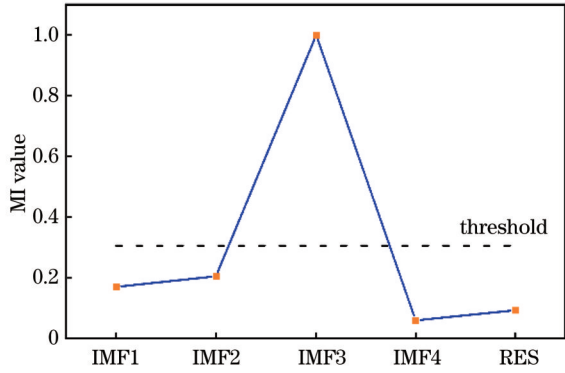


图 7 单频振动信号 VMD 分解所得各分量的 MI 值

Fig. 7 MI values of components processed by VMD of single-frequency vibration signal

种方法进行对比,结果如图 8 所示。Wavelet 方法采用 4 层 sym6 小波软阈值去噪,对原始相位信号的毛刺有一定平滑作用,但从频谱可以看出其对直流和高次谐波形式的噪声抑制作用均有限。EMD 方法对直流噪声起到了抑制作用,但对高次谐波形式的噪声抑制作用有限。同时在振动频率附近产生了新的噪声分量,使得降噪后的信号波形出现了一定程度的失真,这是由于 EMD 方法原理上存在的模态混叠问题导致的。CEEMDAN 作为 EMD 的改进方法,有效克服了 EMD 存在的模态混叠问题,取得了良好的降噪效果,但降噪后的信号中仍残存少量高次谐波形式的噪声。相比以上三种方法,本文所提的 VMD-MI 方法具有最高的信噪比,可达 41.45 dB,处理后的信号噪声去除效果明显,直流和高次谐波形式的噪声均被有效抑制。实验结果表明,VMD-MI 方法可以显著提高单频振动信号的信噪比。

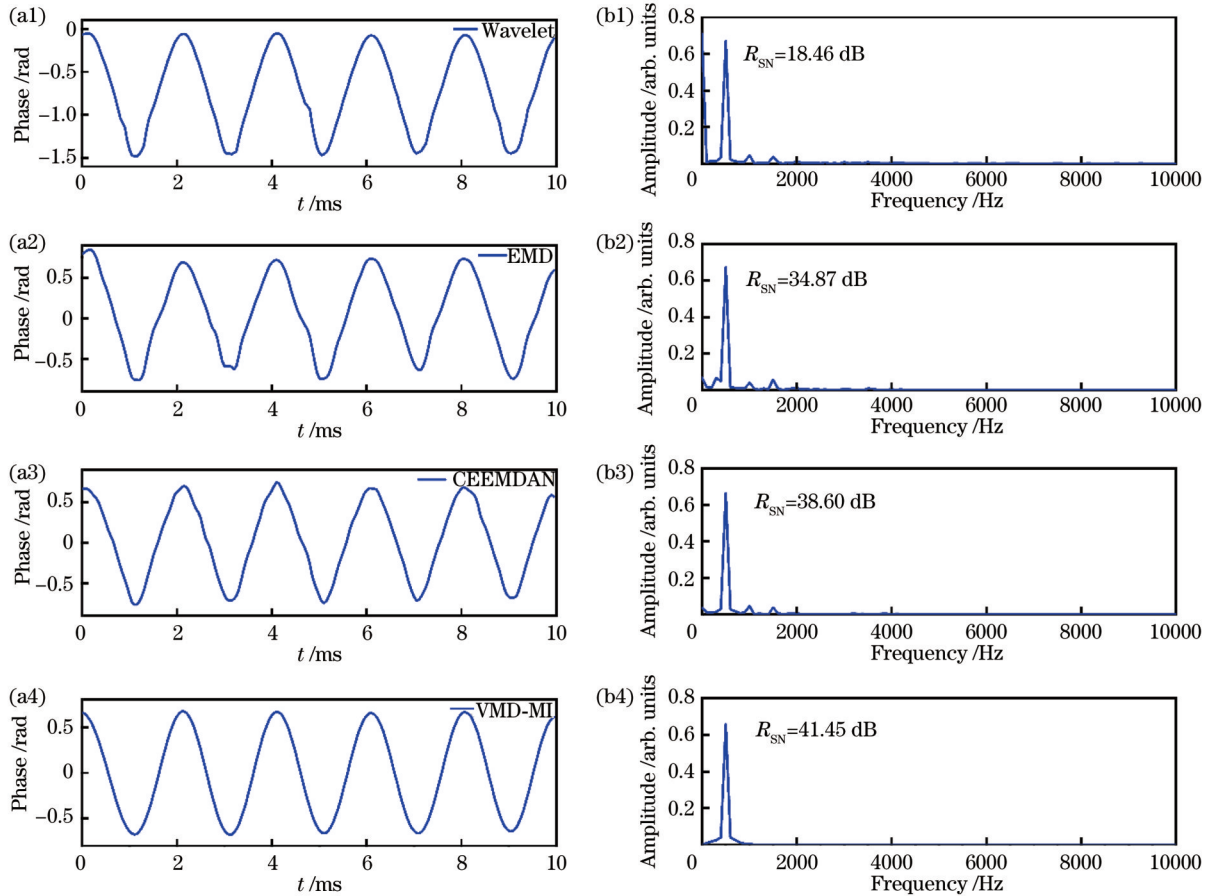


图 8 不同方法对 500 Hz 单频振动信号的降噪效果。(a1)(b1)Wavelet;(a2)(b2)EMD;(a3)(b3)CEEMDAN;(a4)(b4)VMD-MI
Fig. 8 Denoising effects of different methods on 500 Hz single-frequency vibration signal. (a1) (b1) Wavelet; (a2) (b2) EMD; (a3) (b3) CEEMDAN; (a4) (b4) VMD-MI

为进一步验证 VMD-MI 方法对多频复杂信号的适应性,向 PZT 施加频率分别为 500、1000、1500 Hz,幅度均为 0.75 V 的正弦电压的叠加信号。经 DFA 计算得 I/Q 解调后的原始相位信号的标度指数 α_0 介于 0.8 和 1 之间,由式(14)可知此时 $J=2$,各 IMF 分量的

标度指数满足 $\text{num}(\alpha_{1,K} \geq \theta) = 2$ 条件时 K 的最大值为 7,因此将分解层数 K 设置为 7。VMD 分解产生的各分量与原始相位信号之间的 MI 如图 9 所示。其中 MI 值大于阈值的分量 IMF3、IMF4、IMF5、IMF6 予以保留,其余分量被判定为含噪的非相关模态予以

剔除。

多频振动原始相位信号及不同方法的处理结果如

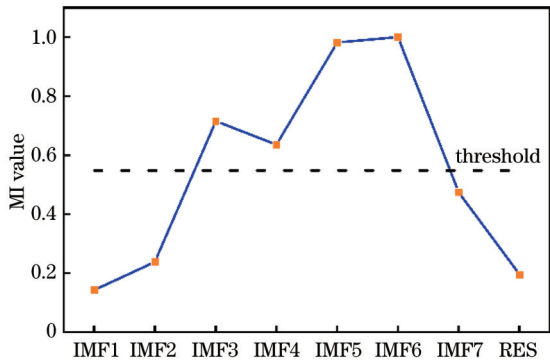


图 9 多频振动信号 VMD 分解所得各分量的 MI 值

Fig. 9 MI values of components processed by VMD of multi-frequency vibration signal

图 10 所示。原始相位信号受到噪声干扰产生明显的失真, 500、1000、1500 Hz 振动信号信噪比分别为 18.82、20.38、17.41 dB。比较不同方法的降噪效果, Wavelet 方法采用 4 层 sym6 小波软阈值去噪, 降噪信号存在过度平滑的现象, 造成原始信号高频有效信息的损失, 使得降噪效果不理想。可以通过改变分解层数和阈值函数来改善 Wavelet 降噪效果, 但该方法对不同信号缺乏自适应性。EMD 方法和 CEEMDAN 方法的处理效果较好, 原始相位信号中的有用频率分量被保留, 直流和低频噪声被大幅抑制, 但在 500、1000 Hz 附近产生了新的噪声分量, 影响了降噪信号的信噪比。相比之下, VMD-MI 方法的处理效果最好, 多频振动信号的有用信息被精准地恢复, 直流和低频噪声得到充分抑制, 也没有新的噪声分量产生, 三个振动频率的信噪比分别达到 32.28、33.77、30.68 dB。

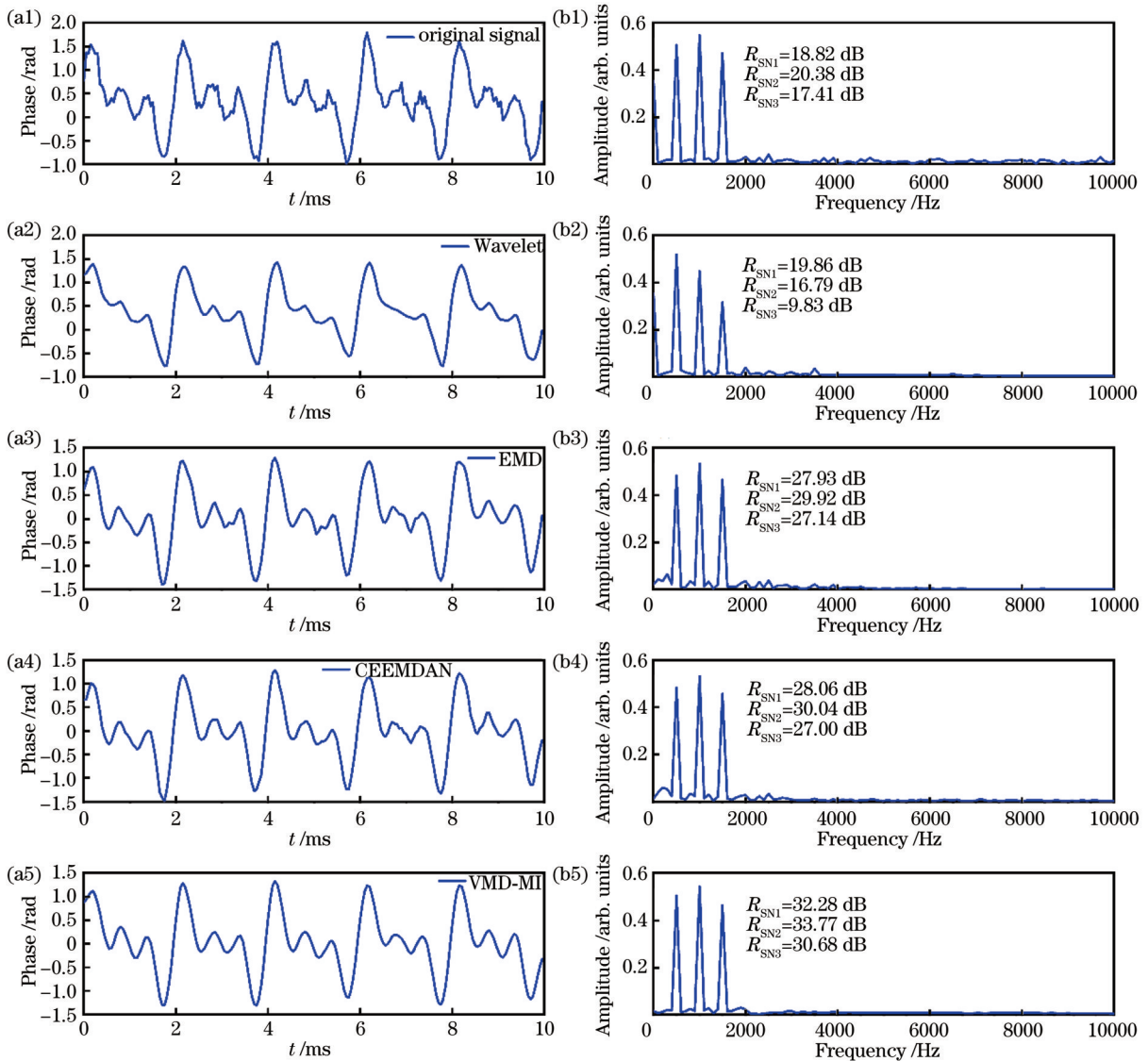


图 10 不同方法对多频振动信号的降噪效果。(a1)(b1)原始信号;(a2)(b2)Wavelet;(a3)(b3)EMD;(a4)(b4)CEEMDAN;(a5)(b5)VMD-MI

Fig. 10 Denoising effects of different methods on multi-frequency vibration signal. (a1)(b1) Original signal; (a2)(b2) Wavelet; (a3)(b3) EMD; (a4)(b4) CEEMDAN; (a5)(b5) VMD-MI

实验结果证明了 VMD-MI 方法对多频振动信号信噪比提升的有效性和优越性。

4 结 论

基于 Φ -OTDR 原理的 DAS 系统是页岩气压裂微地震监测领域极具发展潜力的探测设备。信噪比是评价探测信号质量的重要标准,提升信噪比对改良 DAS 系统整体传感性能具有重要的意义。本文提出一种基于 VMD 的 Φ -OTDR 信噪比提升方法,通过 DFA 法确定合适的分解层数 K ,通过计算 VMD 分解得到的各分量与原始相位信号的 MI 来筛选相关模态,进而实现去除噪声的效果。对信噪比为 18.34 dB 的 500 Hz 单频振动信号和信噪比分别为 18.82、20.38、17.41 dB 的 500、1000、1500 Hz 多频振动信号,VMD-MI 方法将信噪比分别提升为 41.45 dB 和 32.28、33.77、30.68 dB,明显优于 Wavelet、EMD、CEEMDAN 等方法。实验结果表明,VMD-MI 算法可以有效提升 Φ -OTDR 系统测量的信噪比,有助于在页岩气微地震监测中实现高保真度的微地震信息采集。

参 考 文 献

- [1] 倪家升,刘铁根,尚盈,等.用于石油物探的分布式光纤声波地震检波器[J].激光与光电子学进展,2022,59(3):0306006.
Ni J S, Liu T G, Shang Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic seismic geophone for petroleum geology exploration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0306006.
- [2] 吴慧娟,刘欣雨,饶云江.基于 Φ -OTDR 的光纤分布式传感信号处理及应用[J].激光与光电子学进展,2021,58(13):1306003.
Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ -OTDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306003.
- [3] Lu X, Krebber K. Characterizing detection noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 18791-18806.
- [4] Zhong X A, Zhang C X, Li L J, et al. Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor[J]. Applied Optics, 2014, 53(21): 4645-4650.
- [5] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等.相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J].光学学报,2021,41(1):0106004.
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [6] 张春熹,邓卓,王夏霄,等.谱减降噪法在相位敏感 OTDR 扰动传感系统中的应用[J].激光杂志,2019,40(3):16-19.

- Zhang C X, Deng Z, Wang X X, et al. Application of spectral subtraction method in phase sensitive OTDR disturbance sensing system[J]. Laser Journal, 2019, 40(3): 16-19.
- [7] Wu H J, Xiao S K, Li X Y, et al. Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(15): 3156-3162.
- [8] He H J, Shao L Y, Li H C, et al. SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 6802610.
- [9] Qin Z G, Chen H, Chang J. Signal-to-noise ratio enhancement based on empirical mode decomposition in phase-sensitive optical time domain reflectometry systems[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1870.
- [10] 熊兴隆,魏永兴,张琬童,等.基于自适应噪声完备经验模态分解的 Φ -OTDR 信号去噪算法[J].半导体光电,2018,39(4):600-606.
Xiong X L, Wei Y X, Zhang W T, et al. De-noising algorithm of Φ -OTDR signal based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(4): 600-606.
- [11] Mao B N, Bu Z H, Xu B, et al. Denoising method based on VMD-PCC in Φ -OTDR system[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 74: 103081.
- [12] 王旭,刘珉含,于森,等.相位敏感光时域反射系统数字正交解调算法分析及改进研究[J].中国激光,2017,44(12):1210002.
Wang X, Liu M H, Yu M, et al. Analysis and improvement for digital quadrature demodulation algorithm on phase-sensitive optical time-domain reflectometric system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1210002.
- [13] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [14] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides[J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1685-1689.
- [15] Liu Y Y, Yang G L, Li M, et al. Variational mode decomposition denoising combined the detrended fluctuation analysis[J]. Signal Processing, 2016, 125: 349-364.
- [16] An X L, Yang J J. Denoising of hydropower unit vibration signal based on variational mode decomposition and approximate entropy[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(3): 282-292.
- [17] 王祺,王小鹏,王博辉.基于优化变分模态分解算法的回波信号去噪[J].激光与光电子学进展,2021,58(20):2007001.
Wang Q, Wang X P, Wang B H. Echo signal denoising based on optimized variational mode decomposition algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2007001.
- [18] 刘美,纽春萍,姬忠校,等.基于变分模态分解的光纤电流传感器小波去噪方法[J].电气技术,2021,22(4):7-11.
Liu M, Niu C P, Ji Z X, et al. Wavelet de-noising method of all-fiber optical current transformer based on variational mode decomposition[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(4): 7-11.

Enhancement of Signal-to-Noise Ratio Based on Variational Mode Decomposition for Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry

Gao Haotian, Kang Jiehu, Zhang Zhen, Wu Bin*

National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective During shale gas exploitation, a distributed optical fiber acoustic sensing system (DAS) based on phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) is a commonly employed solution for monitoring microseismic waves generated during hydraulic fracturing operations. Signal-to-noise ratio (SNR) is an important parameter reflecting the performance of the Φ -OTDR system, and obtaining microseismic signals with good SNR is the basis for monitoring the fracturing effect of shale gas. However, due to the thermal noise and scattering noise of the photodetector, the phase noise and frequency drift of the laser, and the environmental noise, the SNR of the Φ -OTDR system will deteriorate, resulting in difficult vibration localization and distorted phase signal obtained by demodulation. The solution to this problem is essential for broad applications of Φ -OTDR systems in the engineering field.

Methods To improve the SNR of vibration signals measured by Φ -OTDR systems, we propose a vibration signal denoising method based on variational mode decomposition (VMD) and mutual information (MI). The in-phase orthogonality (I/Q) demodulated phase signal is further processed, and the number of VMD layers K is determined by the scaling index calculated by detrended fluctuation analysis (DFA). The process of the DFA method is as follows. First, the input noisy signal is decomposed into K ($K=1, 2, 3, \dots$) IMF components by VMD, and then the scaling index of each mode is estimated by DFA. The relationship between the number of decomposition layers K and the scaling index is $K = \arg \max_K [\text{num}(\alpha_{1,K} \geq \theta) = J, K = 1, 2, 3, \dots]$, where the parameter J is determined by the scaling index of the input noisy signal. When the value of K is determined, the MI between the IMF components generated by the K -layer VMD and the input noisy signal is calculated. The mean value of the normalized MI of each component and the input signal is taken as the threshold value. Additionally, when the normalized MI of a component and the input signal is greater than this threshold value, the component is considered to be a correlated mode, otherwise it is a non-correlated one. The distortion and noise of the phase signal are suppressed by discarding the non-correlated modes determined by the MI method.

Results and Discussions A coherent detection Φ -OTDR system is set up to verify the denoising effect of the VMD-MI method. The 500 Hz single-frequency vibration signal (Fig. 6) and the 500, 1000, and 1500 Hz multi-frequency vibration signals (Fig. 10) are processed by VMD, wavelet denoising (Wavelet), empirical mode decomposition (EMD), and complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN). For the 500 Hz single-frequency vibration signal, the number of decomposition layers K is determined as 4 by the DFA method, and the MI between each component and the original phase signal is calculated (Fig. 7) to determine IMF3 as the correlated mode to be retained, and the remaining components are discarded as non-correlated modes. For the original phase signal with the SNR of 18.34 dB (Fig. 6), the proposed method improves the SNR to 41.45 dB, which is significantly better than the 18.46, 34.87, and 38.60 dB of the Wavelet, EMD, and CEEMDAN methods, respectively (Fig. 8). For the multi-frequency vibration signals of 500, 1000, and 1500 Hz, the number of decomposition layers K is determined to be 7 by the DFA method, and the IMF3, IMF4, IMF5, and IMF6 are determined to be correlated modes and the remaining components are non-correlated modes by the MI method (Fig. 9). Meanwhile, the noise reduction is reduced by discarding the non-correlated modes. For the original phase signal with SNR of 18.82, 20.38, and 17.41 dB, the proposed method improves the SNR to 32.28, 33.77, and 30.68 dB respectively, significantly better than Wavelet, EMD, and CEEMDAN methods (Fig. 10).

Conclusions The DAS system based on Φ -OTDR is a promising detection device in the microseismic monitoring of shale gas fractures. The SNR is an important criterion to evaluate the quality of the detection signal, and enhancing the SNR is significant to improve the overall sensing performance of the DAS system. We propose a method to improve the SNR of Φ -OTDR based on VMD. The DFA method is adopted to determine the appropriate number of decomposition layers, and the correlated modes are selected and retained by calculating the MI between the components obtained from VMD and the

original phase signal to achieve noise removal. The experimental results show that the VMD-MI algorithm is significantly better than Wavelet, EMD, and CEEMDAN in improving the SNR of 500 Hz single-frequency vibration signal, and 500, 1000, and 1500 Hz multi-frequency vibration signals. This proves the effectiveness and superiority of the proposed method in improving the measurement performance of the Φ -OTDR system. Meanwhile, this method can help acquire high-fidelity microseismic information in microseismic monitoring of shale gas.

Key words phase-sensitive optical time domain reflectometry; microseismic monitoring of hydraulic fracturing; signal-to-noise ratio; variational mode decomposition; mutual information