光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021061801

基于 BOTDA 的海缆监测系统振动信号降噪方法研究

尚秋峰[1,2,3*]，巩　彪[1]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 搭建了基于布里渊光时域分析（BOTDA）的海底电缆（海缆）振动信号监测模拟实验系统，通过实验获得了锚砸、冲刷、摩擦 3 种工况下的海缆振动信号。针对振动信号含有大量噪声，提出 TSA-VMD-MPE 降噪方法。利用被囊群算法（Tunicate Swarm Algorithm，TSA）优化变分模态分解（Variational Mode Decomposition，VMD），获取 VMD 分解层数与惩罚因子的最优值，对振动信号分解获得本征模态函数（Intrinsic Mode Functions，IMF）分量；利用 IMF 与原始信号的相关性及 IMF 的方差贡献率联合来确定 IMF 的多尺度排列熵（Multi-Scale Permutation Entropy，MPE）阈值，对振动实验信号进行降噪。实验结果表明：所提降噪算法使 3 种海缆振动信号信噪比平均提高了 12.029 6 dB；将提出的 MPE 阈值方法应用于 EEMD 与 CEEMD 算法也获得了良好的降噪效果。

关键词： 海底电缆；BOTDA；振动监测；降噪

中图分类号： TP212.9　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0760－07

Research on Noise Reduction Method of Vibration Signal in Submarine Cable Monitoring System Based on BOTDA

SHANG Qiufeng[1,2,3]，GONG Biao[1]

（1. Dept. of Electronic and Communication Engineering；2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology；
3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology，
North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN）

Abstract： A monitoring experiment system of submarine cable vibration signal was set up based on Brillouin optical time domain analysis (BOTDA). The vibration signals of submarine cable under three working conditions of anchor smashing，scouring and friction were obtained. The TSA-VMD-MPE method was proposed to reduce the noise of vibration signal. The tunicate swarm algorithm (TSA) was applied to optimize decomposition level and penalty factor of variational mode decomposition (VMD) to obtain intrinsic mode functions (IMF) components. The correlation between the IMF and original signal，and the IMF variance contribution rate were considered comprehensively to determine the multi-scale permutation entropy (MPE) threshold to reduce the noise of the vibration experimental signal. The experimental results show that the signal-to-noise ratio of the three kinds of submarine cable vibration signals is improved by 12.029 6 dB on average. The proposed MPE threshold determination method was applied to EEMD and CEEMD algorithms，and good noise reduction effect was obtained.

Key words： submarine cable；BOTDA；vibration signal monitoring；noise reduction

收稿日期：2021－06－18.
基金项目：国家自然科学基金项目(61775057)；
河北省自然科学基金项目(E2019502179).
* **通信作者：**尚秋峰

0　引言

布里渊光时域分析(BOTDA)具有超长传感距离、高空间分辨率和高精度等优点，常用于监测温度与应变[1-3]。近年来，利用 BOTDA 监测振动、声波等动态现象的研究受到关注，尤其在石油和天然气开采、地球物理学和结构健康监测等领域[4-8]。本文搭建了基于 BOTDA 的海底电缆(海缆)振动信号监测模拟实验系统，对海缆振动信号进行监测。由于 BOTDA 在发生受激布里渊散射(SBS)效应时会引入大量噪声，不利于海缆振动信号分析，故本文提出将基于被囊群算法(TSA)优化的优化变分模态分解(VMD)与多尺度排列熵(MPE)相结合来对海缆振动信号降噪。VMD 是由 Dragomiretskiy 等提出的一种自适应信号处理方法[9]，通过迭代搜寻变分模态的最优解，不断更新各模态函数及中心频率，得到若干具有一定带宽的本征模态函数(IMF)。VMD 对噪声具有很强的鲁棒性，能够有效避免 EMD，EEMD，CEEMD 的模态混叠现象，并且分解后不会产生冗余的频率成分[10]。但是 VMD 算法分解结果易受分解层数 K 与惩罚因子 α 的影响，而 K 和 α 通常依赖经验选择，不能自适应地确定[11-13]。

本文将基于 BOTDA 的海缆振动信号降噪过程分为两步：首先引入 TSA 优化算法，对 VMD 的参数 K 与 α 进行优化，利用 TSA-VMD 分解海缆振动信号得到 IMF 分量；然后，提出利用 IMF 与原始信号的相关性及 IMF 的方差贡献率联合确定 IMF 的 MPE 阈值的方法，实现对海缆振动信号去噪。

1　TSA-VMD-MPE 算法

1.1　TSA 原理

TSA 是 2020 年 Kaur 等提出的一种新的仿生元启发式优化算法[14]，它的灵感来自于在海洋深处生存的被囊动物的群体行为。被囊动物利用喷气推进和群体智能在海洋一定区域中找到食物的位置，TSA 就是模拟被囊动物的这两种在给定的搜索空间中寻找食物位置的行为。其优点在于操作简单、调整参数少以及跳出局部最优的能力强。TSA 的步骤如下：

1)为了避免搜索个体之间的冲突，采用向量计算新的搜索个体位置：

$$\vec{A}=\frac{c_2+c_3-2\cdot c_1}{p_{\min}+c_1\cdot p_{\max}-p_{\max}} \tag{1}$$

其中，变量 c_1,c_2,c_3 是[0,1]范围内的随机数，$p_{\min}$ 和 $p_{\max}$ 代表被囊动物初始速度范围。

2)在避免搜索冲突后，搜索个体与食物之间的距离：

$$\overrightarrow{PD}=\left|\overrightarrow{FS}-r_{\text{and}}\cdot\overrightarrow{p_p(x)}\right| \tag{2}$$

其中，$\overrightarrow{PD}$ 为食物与搜索个体之间的距离，x 为当前迭代次数。$\overrightarrow{FS}$ 为食物源的位置，即最优，$\overrightarrow{p_p(x)}$ 为当前个体位置，r_{and} 是[0,1]范围内的随机数。

3)继续向最优位置靠拢，更新个体位置，更新后个体相对于食物源的新位置为

$$\overrightarrow{p_p(x')}=\begin{cases}\overrightarrow{FS}+\vec{A}\cdot\overrightarrow{PD}, r_{\text{and}}\geqslant 0.5\\ \overrightarrow{FS}-\vec{A}\cdot\overrightarrow{PD}, r_{\text{and}}<0.5\end{cases} \tag{3}$$

1.2　VMD 算法

VMD 引入了变分问题，对于一个信号 $f(t)$，其满足的变分问题模型为

$$\begin{cases}\sum_{k=1}^{K}\left\|\partial(t)\left[\left(\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right)\times u_k(t)\right]\times \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|^2\\ s.t.\ \sum_{k=1}^{K}u_k(t)=f(t)\end{cases} \tag{4}$$

式中，$\delta(t)$ 为脉冲函数，$\partial(t)$ 为狄拉克函数，$\{u_k\}=\{u_1,u_2,\cdots,u_K\}$ 代表 VMD 分解得到的 K 个本征模态分量，$\{\omega_k\}=\{\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_K\}$ 代表 K 个本征模态分量的中心频率。

对式(1)引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日惩罚算子 λ，求解变分问题：

$$u_k^{n+1}=\frac{f(\omega)-\sum_{i\neq k}u_i^n+\frac{\lambda^n(\omega)}{2}}{1+2\alpha(\omega-\omega^k)^2} \tag{5}$$

$$\omega_k^{n+1}=\frac{\int_0^\infty\omega\mid u_k^n(\omega)\mid^2\mathrm{d}\omega}{\int_0^\infty\mid u_k^n(\omega)\mid^2\mathrm{d}\omega} \tag{6}$$

$$\lambda^{n+1}(\omega)=\lambda^n(\omega)+\tau\left(f(\omega)-\sum_{k=1}^{K}u_k^{n+1}(\omega)\right) \tag{7}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\frac{\left\|u_k^{n+1}-u_k^n\right\|^2}{\left\|u_k^n\right\|^2}<\varepsilon \tag{8}$$

式中，n 代表迭代次数，τ 表示保真系数。利用式(5)～(7)不断更新 $u_k^{n+1},\omega_k^{n+1},\lambda^{n+1}$，直至满足迭代停止条件式(8)。当满足式(8)时迭代停止，输出 VMD 分解得到的本征模态函数与中心频率，如果不满足，则返回式(5)继续迭代。

VMD 算法重新定义 IMF 为一个调幅调频信

号，比 EMD 的 IMF 定义适应面宽，且 VMD 可以有效克服 EMD 存在的模态混叠现象[13]，但 VMD 分解效果受参数 K 与 α 的影响。

利用 TSA 对 VMD 的 K 和 α 进行寻优，当达到最大迭代次数时寻优停止。具体流程如图 1。

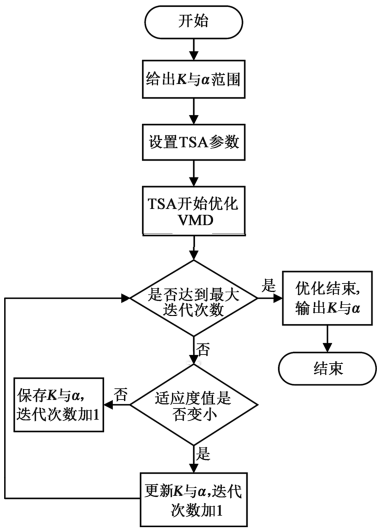


图 1 TSA-VMD 流程图

1.3 多尺度排列熵(MPE)

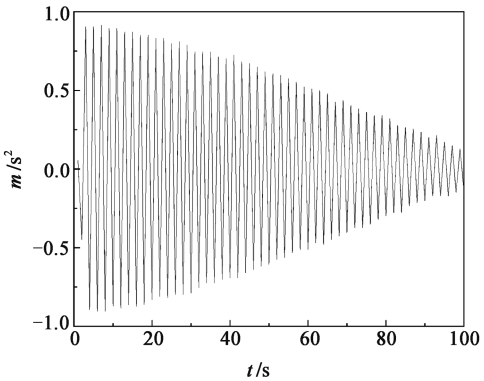
MPE 是在 2005 年由 Aziz 等[15]提出，可以衡量时间序列在不同尺度下的复杂性和随机性，克服了排列熵只能在单一尺度上描述信号复杂程度的缺点，比排列熵的抗噪能力更好。

MPE 降噪阈值通常根据经验进行确定，一般取 0.55～0.60[16]，不能针对不同振动信号进行灵活选取，且并不适合所有振动信号。本文利用各个 IMF 与原始信号的相关性、各个 IMF 的方差贡献率，可以判断出哪些 IMF 分量对原始信号影响大，为了避免噪声影响，选择影响较大的分量中 MPE 最小的熵值作为阈值。大于阈值的判定为噪声，小于阈值的判定为有用信号。

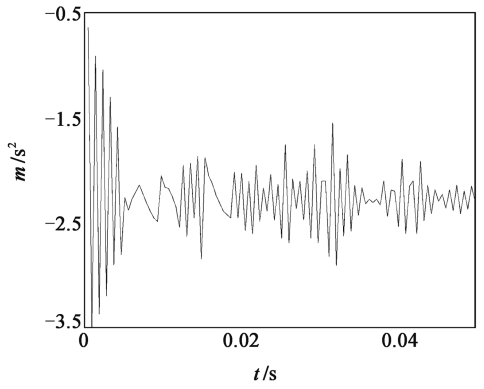
2 模拟实验验证

2.1 海缆典型工况下的振动信号

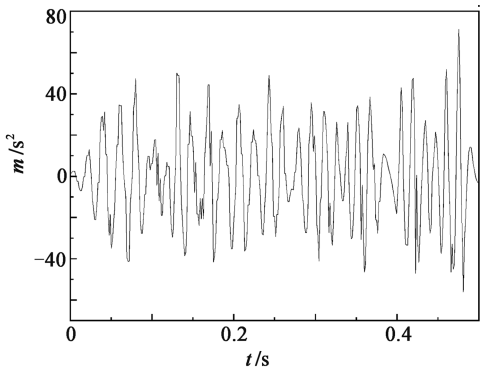
通过查阅文献[17-18]获取了海浪冲刷、海缆摩擦工况下的振动信号。通过 ANSYS 仿真获取锚砸故障振动信号：利用 ANASYS 建立锚砸海缆模型，建立了 500 kV 单芯光纤复合海缆受 156 kg 小型船锚的锚砸作用下的三维模型，获得了船锚作用于海缆 5×10^{-2} s 内光单元的振动信号数据[19]。各振动信号如图 2 所示。



(a) 海缆冲刷原始信号



(b) 海缆锚砸原始信号



(c) 海缆摩擦原始信号

图 2 海缆振动信号图

2.2 实验模拟

实验设置如图 3 所示。虚线框内为搭建的 BOTDA 系统，包含激光器(DFB-LB)：产生连续的偏振光；电光调制器(EOM)：配合微波源使得探测光的频率发生偏移；声光调制器(AOM)：将泵浦光调制成脉冲光，并使泵浦光的频率偏移 200 MHz；光纤放大器(EDFA)：分别对泵浦光(EDFA2)和探测光(EDFA1)进行放大；可调衰减器：通过调节可调衰减器，可以改变探测器的光功率；光隔离器：使光只能单方向传输；光电检测器：将光信号转换成电信号，并将电信号送至采集卡。

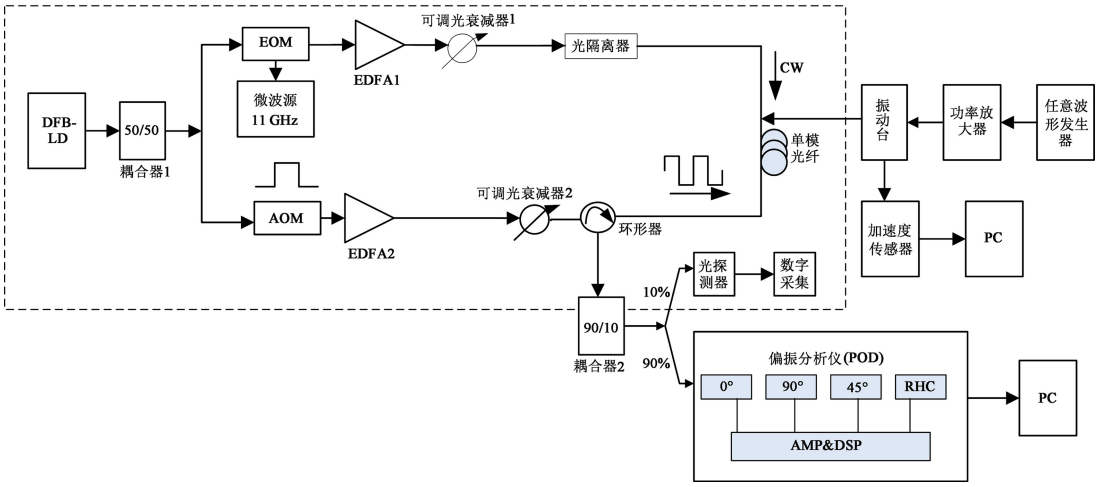
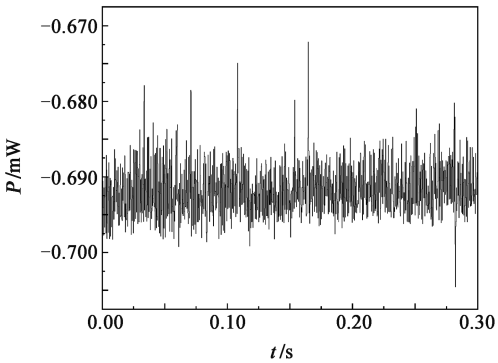


图 3　BOTDA 振动监测系统实验设置

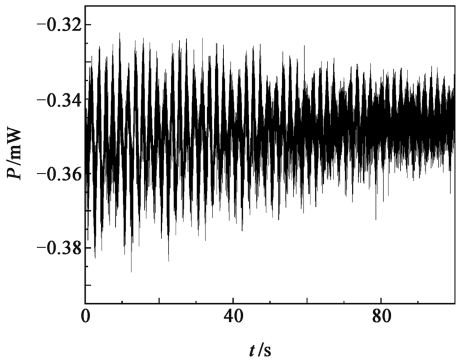
BOTDA 运行时可调谐激光器输出连续光，分为两束，一束经 AOM 调制为泵浦脉冲光，另一束在 EOM 被微波源调制后作为连续光输入，两束光在单模光纤上发生 SBS 效应，使用光时域反射原理确定布里渊频移在光纤中的位置，利用布里渊频移与待测量的关系，得到待测量的信息。振动台输入的振动信号调制光纤中的偏振态，由偏振分析仪检测偏振态的变化。

其他仪器分别为：Tektronix 公司生产的 AFG3052C 任意波形发生器，扬州英迈克公司生产的 LA-500 功率放大器，配套该公司的 VT-300 振动台与 YMC211A01/Z 型加速度传感器，振动台最大振幅为 ±7.5 mm，连接功放最大额定功率为 500 W。General Photonics 公司生产的在线偏振分析仪(POD-201)。

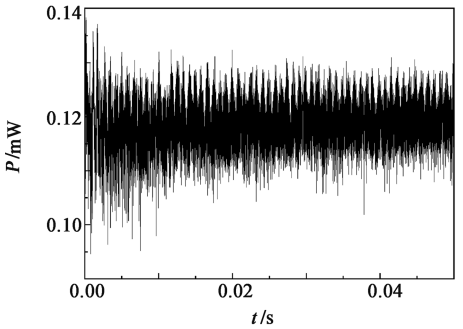
实验时，将模拟的海缆振动信号输入任意波形发生器中生成波形，经功率放大器放大后控制振动台振动。振动台连接的加速度传感器用来监测振动台产生的波形，振动信号调制 BOTDA 中 25 km 的



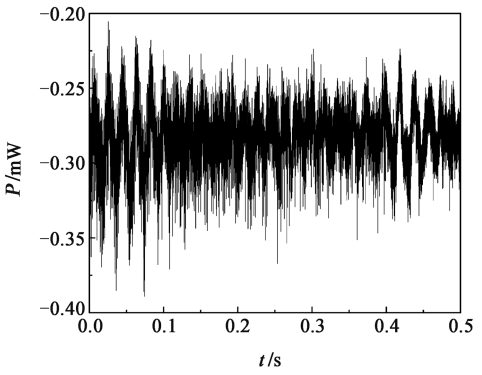
(a)　BOTDA 振动监测系统无外加振动信号



(b)　海缆冲刷振动信号



(c)　海缆锚砸振动信号



(d)　海缆摩擦振动信号

图 4　BOTDA 振动信号

单模光纤的偏振态。光纤耦合器 2 的 10%光功率输入光探测器，90%光功率输入 POD。POD 软件 PolaView 实时显示振动信号波形。实验获取了 BOTDA 海缆振动监测系统无外加振动与外加海缆锚砸、摩擦、冲刷 3 种工况下的振动信号波形。图 4 为实验所得振动信号波形，由于 BOTDA 在发生 SBS 时会引入大量噪声，不利于振动信号分析，故需要对其降噪。

2.3 BOTDA 振动监测系统振动信号降噪

2.3.1 VMD 分解 K 与 α 的选取

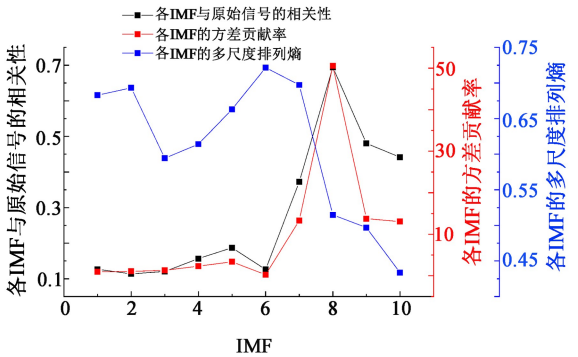
利用 TSA 优化 VMD 参数 K 与 α。TSA 的参数设置为：种群数 30，最大迭代次数 10，K 的范围为[2,10]，α 的范围[1 000,3 000]，维度为 2。表 1 为 K 与 α 的选取结果。

表 1 K 与 α 选取结果

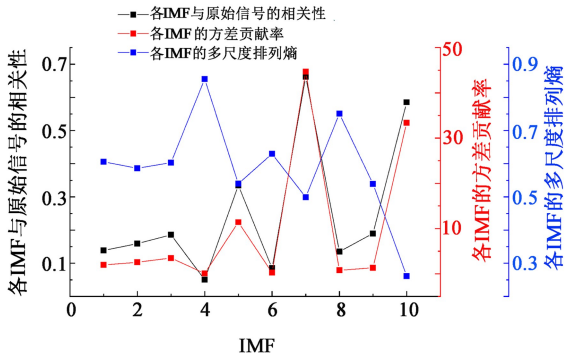
不同振动信号	VMD	
	K	α
BOTDA 无振动信号	10	1 376.914 5
海缆冲刷振信号	10	1 000.000 0
海缆锚砸振动信号	10	1 666.912 4
海缆摩擦振动信号	10	1 163.896 1

2.3.2 多尺度排列熵阈值

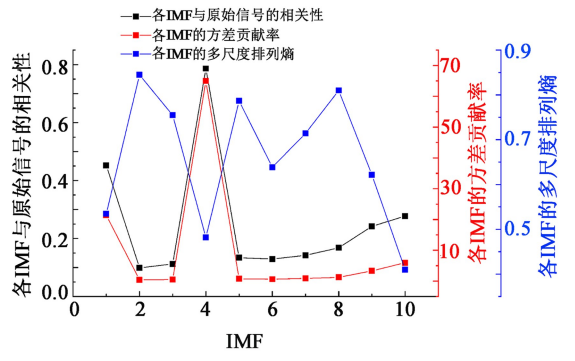
图 5 显示了 4 种 BOTDA 信号经 VMD 分解后各个 IMF 与原始信号的相关性、各个 IMF 的方差贡献率、各个 IMF 的 MPE 熵值。图 5(a)中由 IMF 与原始信号的相关系数可以看出，相关性最高的前 3 个 IMF 分量为 IMF7，IMF8 与 IMF9。由方差贡献率可以看出，IMF7，IMF8 与 IMF9 分量的贡献率大。结合相关系数与方差贡献率可以得出，IMF7，IMF8 与 IMF9 分量对原始信号影响较大，为了避免噪声影响，取其中 MPE 熵值最小的为阈值，即取 IMF9 的熵值 0.50 为阈值。其余图 5(b)～(d)中阈值的确定方法与图 5(a)一样，阈值为别取为 0.30，0.42 和 0.46。



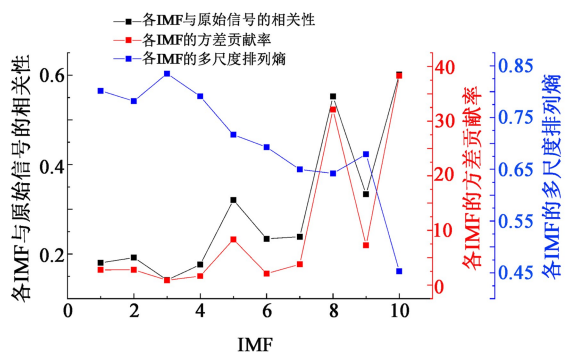
(a) BOTDA 无外加振动信号



(b) 海缆冲刷振动信号



(c) 海缆锚砸振动信号

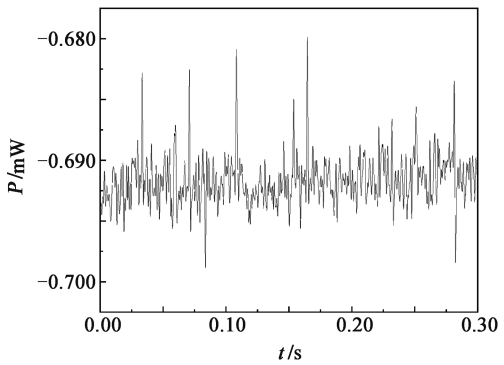


(d) 海缆摩擦振动信号

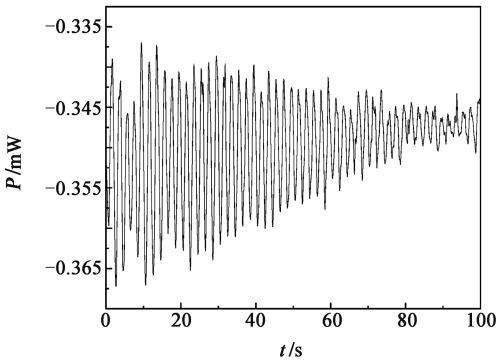
图 5 相关性、方差贡献率、多尺度排列熵联合确定阈值

2.3.3 BOTDA 振动信号降噪

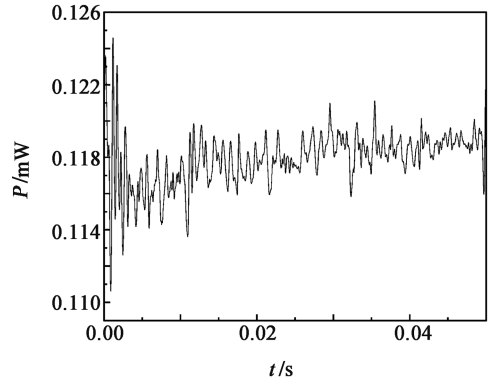
图 6 为 TSA-VMD-MPE 算法降噪结果，对比图中海缆振动信号波形与BOTDA系统无外加振



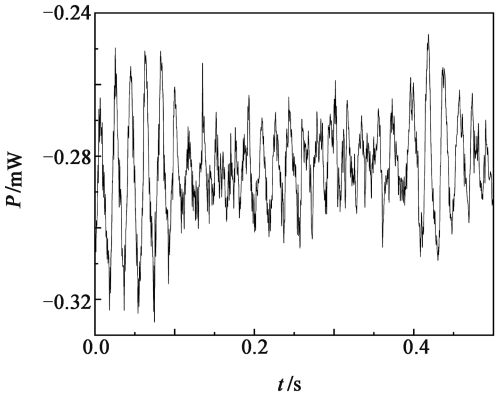
(a) BOTDA 振动监测系统无振动信号



(b)　海缆冲刷振动信号



(c)　海缆锚砸振动信号



(d)　海缆摩擦振动信号

图 6　降噪后的振动信号

动信号时的波形，可以看出本文搭建的基于 BOTDA 的振动监测系统成功监测到了海缆振动信号。对比图 2 与图 6 中海缆振动信号的波形，可以看出降噪后振动信号波形符合模拟信号波形，且降噪后信号特征明显，易于后续分析识别。

2.4　TSA-VMD-MPE 降噪效果

利用降噪前后的信噪比(SNR)衡量降噪效果。结果见表 2。

由表 2 可以看出降噪前 3 种 BOTDA 振动监测系统获取的海缆振动信号 SNR 较低，说明 BOTDA 在发生 SBS 时会产生大量噪声，导致信号信噪比降低，而利用 TSA-VMD-MPE 算法降噪后，3 种海缆振动信号 SNR 明显比降噪前高，平均提高了 12.029 6 dB。实验结果证明 TSA-VMD-MPE 算法降噪效果较好。

表 2　BOTDA 振动信号 TSA-VMD-MPE 降噪前后 SNR 对比

不同工况	TSA-VMD-MPE	
	降噪前 SNR/dB	降噪后 SNR/dB
锚砸	12.961 8	25.951 5
摩擦	13.173 5	24.026 7
冲刷	19.979 2	32.225 2

2.5　MPE 阈值选取方法适应性验证

将本文所提 MPE 阈值确定方法应用到 EEMD，CEEMD 两种信号分解算法中，对海缆振动信号降噪，结果见表 3。

表 3　CEEMD-MPE 与 EEMD-MPE 降噪效果

不同工况	降噪后 SNR/dB	
	CEEMD-MPE	EEMD-MPE
锚砸	25.819 5	25.764 9
摩擦	23.677 0	23.000 0
冲刷	32.184 7	32.028 4

表 3 显示出本文所提 MPE 阈值方法与 CEEMD 或 EEMD 结合也可以得到很好的降噪效果，说明 MPE 阈值确定方法适应性较好。

3　结论

本文搭建了基于 BOTDA 的振动监测系统，用于监测海缆振动信号，成功获取了海缆振动信号数据。由于 BOTDA 发生 SBS 时导致实验得到的海缆振动信号含有大量噪声，不利于进一步分析，故需要对其进行降噪。引进 TSA 算法优化 VMD，获得 K 与 α 的最优组合，针对 MPE 没有明确的阈值确定规则，提出利用 IMF 与原始信号的相关性、IMF 的方差贡献率两个指标联合确定 MPE 阈值的方法。将 TSA 优化后的 VMD 与 MPE 结合对海缆振动信号降噪。实验结果表明，本文所提的 TSA-VMD-MPE 算法能够对振动信号实现降噪，且效果较好。

参考文献：

[1]　Yongkang D, Liang C, Xiaoyi B. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100 km sensing length[J]. Opt. Lett., 2011, 36(2): 277-279.

[2]　刘靖阳，王　涛，张　倩，等. BOTDA 系统温度应变双参量传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(13):

306-321.

Liu Jingyang, Wang Tao, Zhang Qian, et al. Research progress of temperature and strain dual-parameter sensing technology in BOTDA system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 306-321.

[3] 尚秋峰，李玉洁. BOTDA系统偏振效应研究动态[J]. 光通信研究，2020(1)：26-32，65.

Shang Qiufeng, Li Yujie. Reserach trend of polarization effects in BOTDA system[J]. Study on Optical Communications, 2020(1): 26-32, 65.

[4] Coscetta A, Minardo A, Zeni L. Distributed dynamic strain sensing based on Brillouin scattering in optical fibers[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5629.

[5] Williams G R, Brown G, Hartog W, et al. Distributed temperature sensing (DTS) to characterize the performance of producing oil wells[J]. Proc. of SPIE, 2000: 4202.

[6] Mirhabibi M, Negarestani A, Bolorizadeh M A, et al. A new approach for radon monitoring in soil as an earthquake precursor using optical fiber[J]. J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 301(1): 207-211.

[7] Zhang W, Huang W, Li L, et al. High resolution strain sensor for earthquake precursor observation and earthquake monitoring[C]// Proc. of the 6th European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2016.

[8] Bao X, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(12): 8601-8639.

[9] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Trans. on Signal Proc., 2014, 62(3): 531-544.

[10] 蔡宇琦，方瑞明，彭长青，等. 基于ANHGA-VMD和耦合隐马尔可夫模型的有载分接开关机械故障诊断[J/OL]. 高电压技术：1-11[2021-05-24]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201444.

Cai Yuqi, Fang Ruiming, Peng Changqing, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load tap-changer based on ANHGA-VMD and coupled hidden Markov model[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-11[2021-05-24]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201444.

[11] 龙 丹，牛 聪，周怀来，等. 基于VMD算法在地震数据时频分析中的应用[J]. 地球物理学进展，2020，35(1)：166-173.

Long Dan, Niu Cong, Zhou Huailai, et al. Application of VMD algorithm in time-frequency analysis of seismic data[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 166-173.

[12] 田 英，刘启跃. VMD改进多尺度排列熵和LLTSA的列车车轮损伤诊断[J/OL]. 机械科学与技术：1-6[2020-10-09]. https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003－8728.20200233.

Tian Ying, Liu Qiyue. Train wheel damage diagnosis of VMD improved multiscale permutation entropy and LLTSA[J/OL]. Mechanical Science and Technol. for Aerospace Engineering: 1-6[2020-10-09]. https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200233.

[13] 杨秋玉，阮江军，庄志坚，等. 高压断路器机械振动信号的参数自适应降噪方法[J/OL]. 高电压技术：1-14[2021-05-24]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201244.

Yang Qiuyu, Ruan Jiangjun, Zhuang Zhijian, et al. Parameter adaptive noise reduction method for mechanical vibration signals of high-voltage circuit breakers [J/OL]. High Voltage Engineering: 1-14[2021-05-24]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201244.

[14] Kaur S, Awasthi L K, Sangal A L, et al. Tunicate swarm algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 90.

[15] Aziz W, Arif M. Multiscale permutation entropy of physiological time series[C]// Proc. of IEEE International Multitopic Conf., 2005.

[16] 鲁铁定，谢建雄. EEMD-多尺度排列熵的GPS高程时间序列降噪方法[J]. 大地测量与地球动力学，2021，41(2)：111-115，220.

Lu Tieding, Xie Jianxiong. EEMD-multiscale permutation entropy noise reduction method for GPS elevation time series[J]. J. of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 111-115, 220.

[17] 冯雨珊，尚秋峰，吕安强. 波浪力作用下光纤复合海底电缆动力学有限元分析[J]. 光通信研究，2017(4)：30-34.

Feng Yushan, Shang Qiufeng, Lü Anqiang. Dynamic finite element analysis of fiber optical composite submarine cable under wave[J]. Study on Optical Communications, 2017(4): 30-34.

[18] 柳小花. 光纤复合海底电缆扭转与磨损特性的有限元分析[D]. 保定：华北电力大学，2017.

Liu Xiaohua. Finite element analysis of optical fiber composite cable submarine's torsion and wear characteristics [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.

[19] 尚秋峰，巩 彪，郑国强. 锚砸作用下光纤复合海底电缆的振动特性分析[J]. 光通信研究，2021(5)：45-49，56.

Shang Qiufeng, Gong Biao, Zheng Guoqiang. Analysis of vibration characteristics of optical fiber composite submarine cable under anchoring[J]. Study on Optical Communications, 2021(5): 45-49, 56.

作者简介：

尚秋峰(1968－)，女，博士，教授，研究方向为光纤传感及信号处理技术。