

引用本文:王顶顶,张红娟,王鹏飞,等.基于时变滤波经验模态分解的 Φ -OTDR信号降噪方法[J].光通信技术,2025,49(6):64-68.

基于时变滤波经验模态分解的 Φ -OTDR信号降噪方法

王顶顶¹,张红娟^{1*},王鹏飞³,靳宝全^{2,3}

(1.太原理工大学 电气与动力工程学院,太原 030024;

2.太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室,太原 030024;3.太原理工大学 电子信息工程学院,太原 030024)

摘要:为提高相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)在复杂噪声环境下的振动检测性能,解决传统降噪方法在处理非平稳、多频振动信号时存在的模态混叠和参数依赖问题,提出一种基于时变滤波经验模态分解(TVF-EMD)的 Φ -OTDR信号降噪方法。该方法首先利用TVF-EMD将原始振动信号自适应分解为多个固有模态函数,通过计算各模态的样本熵,设定阈值以区分信号相关模态与噪声相关模态,并基于信号相关模态重构振动信号,从而实现噪声的有效抑制。仿真结果与实验验证表明,所提方法可使平均信噪比分别提升13.281、14.3 dB,且在实际高速公路隧道振动信号中噪声波动显著降低。

关键词:相位敏感光时域反射仪;信噪比;时变滤波经验模态分解;固有模态;样本熵

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0064-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.012

Φ -OTDR signal denoising method based on time-varying filtering empirical mode decomposition

WANG Dingding¹, ZHANG Hongjuan^{1*}, WANG Pengfei³, JIN Baoquan^{2,3}

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To enhance the vibration detection performance of phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) in complex noise environments and address the issues of mode mixing and parameter dependency found in traditional denoising methods when processing non-stationary, multi-frequency vibration signals, a Φ -OTDR signal denoising method based on time-varying filtering empirical mode decomposition (TVF-EMD) is proposed. This method first adaptively decomposes the original vibration signal into multiple intrinsic mode functions using TVF-EMD. By calculating the sample entropy of each mode, a threshold is set to distinguish between signal-related modes and noise-related modes. The vibration signal is then reconstructed based on the signal-related modes, thereby achieving effective noise suppression. Simulation results and experimental verification show that the proposed method increases the average signal-to-noise ratio by 13.281 dB and 14.3 dB, respectively, and significantly reduces noise fluctuation in the practical vibration signals from a highway tunnel.

Key words: phase-sensitive optical time-domain reflectometry, signal-to-noise ratio, time-varying filtering empirical mode decomposition, intrinsic mode function, sample entropy

收稿日期:2024-12-11。

基金项目:国家自然科学基金项目(62375197)资助;中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B004)资助;山西省科技创新团队项目(201805D131003)资助。

作者简介:王顶顶(1999—),男,湖北武汉人,硕士研究生,2021年于武汉大学获得学士学位,现就读于太原理工大学电气与动力工程学院电气工程专业,主要研究方向为电气智能检测技术,重点关注分布式光纤传感系统的信号处理方法。

***通信作者:**张红娟(1974—),女,博士,教授,主要研究方向为电气节能、电气检测和电力电子等新技术。



0 引言

相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)以光纤作为传感介质,通过分析后向瑞利散射光信号的相位变化实现对外界振动的连续分布式检测^[1]。该技术具备灵敏度高、响应速度快与抗电磁干扰强等优势^[2],在智慧城市、电缆外破预警及输电线路覆冰监测等场景中展现出广阔的应用前景^[3-5]。然而,系统采集的相位信号易受符合高斯分布的随机噪声干扰^[6],导致振动信号信噪比(SNR)降低、有效特征被噪声淹没,限制了 Φ -OTDR

在工程实际中的进一步应用。

为提升 Φ -OTDR系统振动信号的SNR,研究者提出了多种去噪方法:奇异值分解(SVD)通过分解信号为奇异值,保留主成分以实现降噪,对平稳信号效果显著^[7],但在处理具有非平稳特征的 Φ -OTDR振动信号时性能受限;小波阈值降噪适用于非平稳信号^[8],但其效果依赖于小波基与分解层数的选择,且对细节系数的处理不足可能导致信号细节丢失;经验模态分解(EMD)作为一种自适应分解方法,无需预设基函数,可将非线性、非平稳信号分解为若干固有模态函数(IMFs)^[9-11],但在频率成分复杂、噪声较强时易出现模态混叠与间歇性问题,影响SNR提升;后续提出的自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)通过引入噪声辅助与平均化处理,在一定程度上抑制了模态混叠,提高了稳定性^[12],但仍难以有效分离频率相近成分,且计算复杂度较高;变分模态分解(VMD)在抑制模态混叠方面表现良好^[13-14],但其分解效果受参数设置影响显著,惩罚因子与分解层数多依赖经验选取,引入优化算法则进一步增加了计算负担。

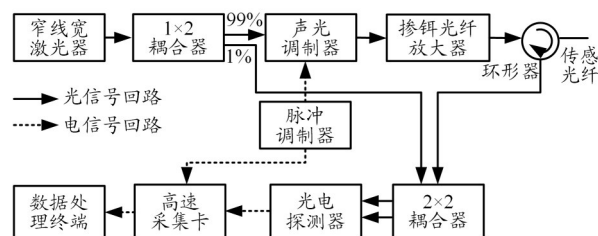
针对 Φ -OTDR系统所检测振动信号频率成分复杂、非平稳性强及噪声干扰显著的特点,本文提出一种基于时变滤波经验模态分解(TVF-EMD)的 Φ -OTDR信号降噪方法,旨在在进一步有效提升系统SNR,增强振动特征的辨识能力。

1 基本原理

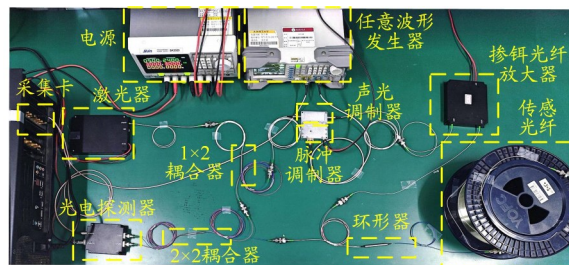
1.1 Φ -OTDR测振原理及噪声分析

Φ -OTDR系统结构如图1所示。窄线宽激光器输出连续激光,经1×2耦合器分为探测光和本振光。探测光由声光调制器调制成脉冲光,再经掺铒光纤放大器放大后输入传感光纤。携带振动信息的瑞利后向散射(RBS)光返回环形器,并在2×2耦合器中与本振光拍频。光电探测器将拍频光信号转化为电信号,随后,该电信号被送入数据采集系统进行处理。通过调节驱动信号输出,可以改变 Φ -OTDR系统探测光脉冲的脉宽和重频,二者分别决定了系统的空间分辨率和振动采样率。

Φ -OTDR系统通过分析RBS光获取光纤沿线不同位置的振动信号。在外部振动作用下,振动位置的光纤长度、纤芯直径和折射率会因外部压力而发生变化。这些变化分别对应应变效应、泊松效应和光弹效应,并调制RBS光的相位。理论上,发生振动的光纤段两端RBS光相位差与振动强度之间存在线性关



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 Φ -OTDR系统结构图

系^[2]。因此,振动信号可通过解调相位进行定量测量。

Φ -OTDR系统的探测电流 I 可以表示为

$$I = 2kE_{LO}E_R \cos \theta \cos(\Delta\omega t + \phi + \Delta\phi_{noise}) \quad (1)$$

其中, k 为比例系数, E_{LO} 为本征光幅值, E_R 为RBS光幅值, θ 为偏振角, $\Delta\omega$ 为声光调制器产生的固定频率偏移, t 为时间, ϕ 为相干光波的相位差, $\Delta\phi_{noise}$ 为激光器相位噪声。

将 I 乘以同频正交分量并作进一步变换得

$$\begin{cases} I_{\cos}(t) = kE_{LO}E_R \cos \theta \cos(2\Delta\omega t + \phi + \Delta\phi_{noise}) + kE_{LO}E_R \cos \theta \cos(\phi + \Delta\phi_{noise}) \\ I_{\sin}(t) = kE_{LO}E_R \cos \theta \sin(2\Delta\omega t + \phi + \Delta\phi_{noise}) + kE_{LO}E_R \cos \theta \sin(\phi + \Delta\phi_{noise}) \end{cases} \quad (2)$$

经过低通滤波去除二倍频分量后可以表示为

$$\begin{cases} I'_{\cos}(t) = kE_{LO}E_R \cos \theta \cos(\phi + \Delta\phi_{noise}) \\ I'_{\sin}(t) = kE_{LO}E_R \cos \theta \sin(\phi + \Delta\phi_{noise}) \end{cases} \quad (3)$$

于是,求得含有激光器相位噪声的RBS光相位为

$$\phi + \Delta\phi_{noise} = \arctan(I'_{\sin}(t)/I'_{\cos}(t)) \quad (4)$$

然而,激光器相位噪声会影响相位解调的准确度,进而导致 Φ -OTDR系统检测的振动信号包含大量随机噪声。激光器相位噪声源自光子自发辐射事件^[15]。自发辐射导致输出光场幅值和相位的变化,幅值改变会影响光子分布密度,进而调制光场相位,这种效应被称为幅相耦合。激光器输出激光的相位变化 $\Delta\phi_{noise}$ 可以表示为

$$\Delta\phi_{\text{noise}} = \sum_{i=1}^n (\phi_p(i) + \phi_{\text{apc}}(i)) = \sum_{i=1}^n -\frac{1}{2\Delta E_i} [\alpha - 2\Delta E_i^{1/2} (\sin\theta_i - \alpha \cos\theta_i)] \quad (5)$$

其中, $\phi_p(i)$ 和 $\phi_{\text{apc}}(i)$ 分别表示单次自发辐射直接和通过幅相耦合引起的相位变化, n 表示自发辐射事件的总数, ΔE_i 和 θ_i 分别表示单次自发辐射引起的光场强度变化和随机相位。由中心极限定理可知, 当 n 足够大时, $\Delta\phi_{\text{noise}}$ 的分布近似于高斯分布, 即激光器相位噪声近似于高斯分布。

1.2 基于 TVF-EMD 的降噪方法整体流程

Φ -OTDR 系统检测的振动信号通常具有复杂的频率成分, 且叠加有大量激光器相位噪声。传统 EMD 在处理此类信号时存在分离能力不足和间歇性问题, 易导致模态混叠。TVF-EMD 在 EMD 基础上引入时变滤波思想, 充分利用信号的瞬时幅度与频率信息, 自适应设计局部截止频率^[16], 并采用 B 样条逼近作为滤波器, 有效克服了传统 EMD 的分离与间歇性问题, 从而显著抑制模态混叠。该方法可将 Φ -OTDR 系统检测的振动信号分解为一系列 IMF 分量, 再根据样本熵阈值筛选出信号相关模态, 重构振动信号以实现去噪。

本文所提出的降噪方法整体流程如图 2 所示。首先, 采集 Φ -OTDR 系统的原始振动信号; 接着, 利用 TVF-EMD 将其分解为多个 IMF 分量, 并计算各分量的样本熵; 然后, 依据设定的样本熵阈值, 将各模态区分为信号相关模态与噪声相关模态; 最后, 基于信号相

关模态重构振动信号, 完成去噪过程。

样本熵是一种用于量化信号复杂度的指标, 其值越大, 表明信号的随机性越高、复杂度越强。高斯噪声因具有较强随机性和不可预测性, 通常对应较大的样本熵; 而振动信号通常具备一定的结构性和可预测性, 其样本熵相对较低。因此, 通过合理设定样本熵阈值, 可有效划分信号相关模态与噪声相关模态。

IMF 分量的样本熵可按以下步骤计算:

1) 设某一 IMF 分量的时间序列为 $x(n)$, 将其重构为 m 维向量组 $\{X_m(1), X_m(2), \dots, X_m(N-m+1)\}$ 。其中, N 为时间序列 $x(n)$ 的长度。 $X_m(i) = \{x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)\}$, $1 \leq i \leq N-m+1$ 。

2) 定义 $X_m(i)$ 与 $X_m(j)$ 的距离 d 为

$$d = \max_{k=0, 1, \dots, m-1} (|x(i+k) - x(j+k)|) \quad (6)$$

3) 统计满足 $d \leq r$ (其中 r 为相似容限, 且 $j \neq i$) 的 j 的数量, 记为 B_i 。定义:

$$B_i^m(r) = \frac{B_i}{N-m-1} \quad (7)$$

$$B_m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \quad (8)$$

其中, $B_i^m(r)$ 为近似比例, $B_m(r)$ 为 2 个序列在相似容限 r 下匹配 m 个点的概率。

4) 将重构向量的维度扩展到 $m+1$, 按上述步骤计算出 $B_{m+1}(r)$, 则该 IMF 分量的样本熵为

$$S(m, r) = -\ln(B_{m+1}(r)/B_m(r)) \quad (9)$$

2 降噪效果验证实验

2.1 仿真实验

本文通过合理选择样本熵阈值, 可有效地区分噪声模态与信号模态。为确定合适的阈值, 采用 TVF-EMD 对叠加高斯噪声的单音信号进行模态分解, 并从频域角度分析各模态是否包含有效信号成分。考虑到实际检测的振动信号频率 f 多位于 $0 \sim 200$ Hz 内, 对该频段内的单音信号与高斯噪声进行 TVF-EMD 分解后, 各模态的样本熵如图 3 所示。可以看出, 噪声模态的样本熵普遍高于 0.4, 而信号模态的样本熵均低于 0.3。因此, 本文将样本熵阈值设定为 0.35, 以实现噪声模态和信号模态的有效判别。

实际 Φ -OTDR 系统采集的振动信号通常具有复杂的频率成分, 本文采用多频信号模拟此类振动。模拟信号的采样率为 1 kHz, 采样时间为 1 s。设原始信号为 $x_1(t)$, 包含 12、15 Hz 这 2 个频率的正弦成分。在此基础上添加噪声得到带噪信号 $x(t)$, 分别使用

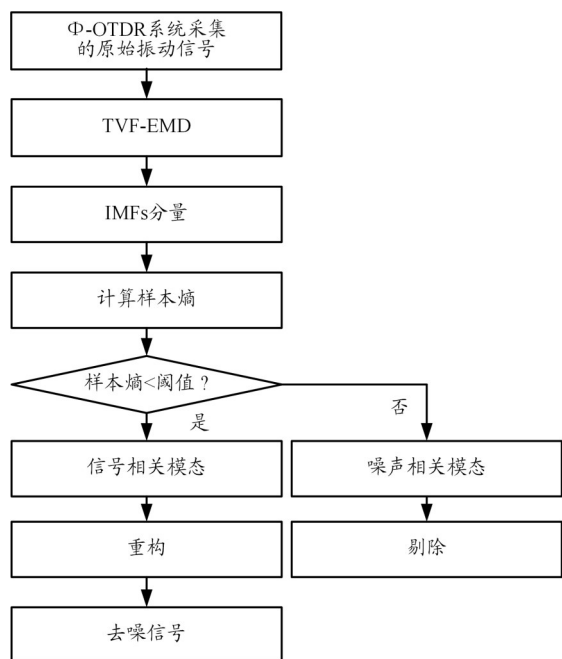


图2 基于 TVF-EMD 的降噪方法整体流程图

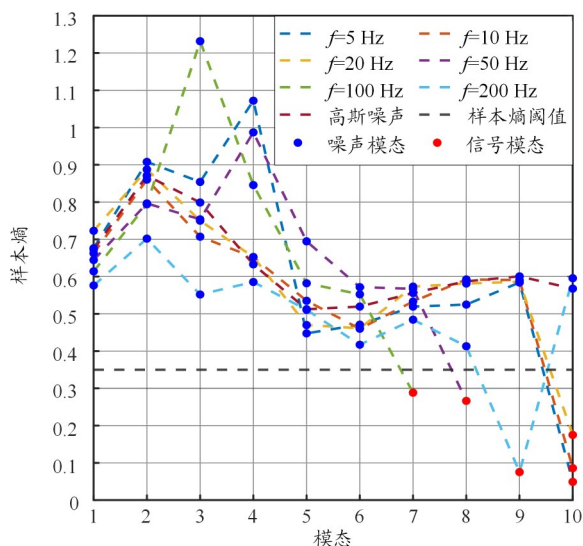


图3 经TVF-EMD分解后各模式的样本熵

CEEMDAN和TVF-EMD对其进行分解,得到2种方法下各IMF分量的时域波形与频谱。在CEEMDAN方法中,存在模态混叠现象,12 Hz和15 Hz的信号未能被有效分离。相比之下,TVF-EMD方法有效克服了模态混叠问题,即使12 Hz与15 Hz频率相近,其对应正弦分量仍被清晰分离。通过计算,使用TVF-EMD方法分解的各IMF分量的样本熵如表1所示。其中模态7和模态8的样本熵低于所设阈值0.35,被判定为信号相关模态。选取这2个模态重构信号,经计算,带噪声信号的SNR为13.701 dB,重构信号的SNR提升至26.982 dB。本文所提降噪方法有效抑制了高斯白噪声,使模拟振动信号的SNR提高了13.281 dB。

表1 各IMF分量的样本熵

模态序号	样本熵
1	1.391
2	1.327
3	0.848
4	0.603
5	0.616
6	0.536
7	0.290
8	0.224

2.2 降噪效果对比

为全面评估本文方法的性能,将其与小波阈值法、CEEMDAN及SVD这3种降噪方法进行对比。采用SNR、SNR提升量(ISNR)、均方根误差(RMSE)和波形相似系数(NCC)作为评价指标,结果如表2所示。

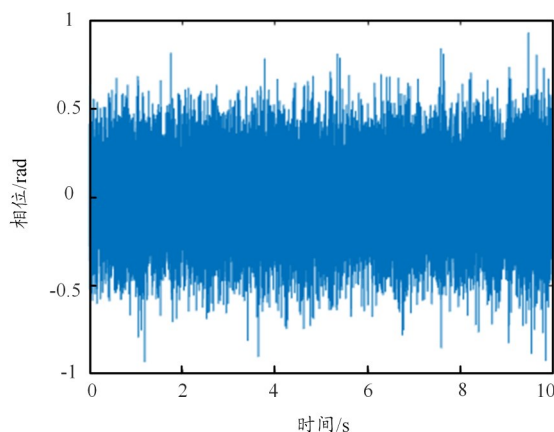
表2 不同降噪方法效果对比

降噪方法	SNR	ISNR	RMSE	NCC
带噪信号	13.701	—	0.980	0.979
小波阈值	19.713	6.012	0.490	0.995
SVD	20.367	6.666	0.455	0.996
CEEMDAN	24.724	11.023	0.275	0.998
本文方法	26.982	13.281	0.212	0.999

可以看出,相较于小波阈值、SVD和CEEMDAN方法,本文方法在ISNR、NCC和RMSE这3项指标上均表现最优,表明其在多频信号处理中具有更强的噪声抑制能力和更高的波形还原精度。

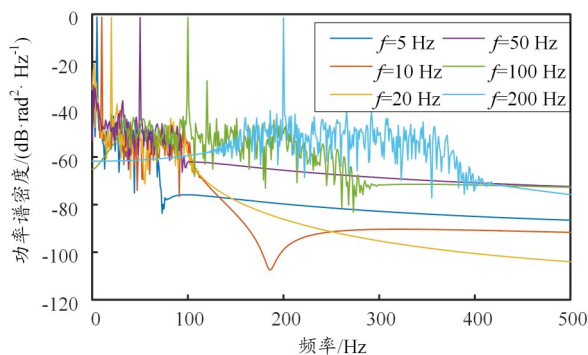
2.3 实测信号去噪

本文所述 Φ -OTDR系统的重频为2 kHz,脉宽为100 ns,分别对应2 kHz的振动采样率与10 m的空间分辨率。系统在无扰动状态下采集的相位信号即为相位噪声,其时域波形如图4所示。经统计,该相位噪声的均值为0.001 rad,标准差为0.231 rad,其分布符合高斯分布特性,与本文第1.1节的理论分析一致。

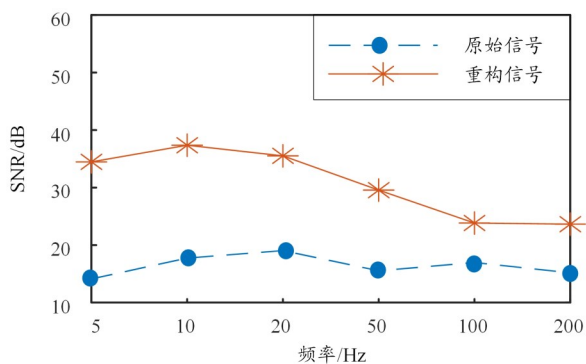
图4 Φ -OTDR系统相位噪声时域波形

为验证所提方法在 Φ -OTDR系统中的实际降噪效果,实验将系统连接至4 km长的传感光纤,并在距离前端3 km处通过压电陶瓷(PZT)施加单频振动。振动频率分别为5、10、20、50、100、200 Hz。由于施加于PZT的电压幅值保持不变,仅改变频率,因此各频率下的振动幅度基本一致。采集不同频率下的原始振动信号后,采用本文方法对其进行分解与重构,获得去噪信号,并从去噪前后时域波形、重构信号的功率谱密度及SNR提升等方面评估降噪性能。

图5(a)展示了本文方法在不同频率下重构振动



(a) 重构信号的功率谱密度



(b) 重构信号与原始信号 SNR

图5 单频振动信号功率谱密度和 SNR

信号的功率谱密度。可以看出,各曲线在对应单频位置,有明显的功率谱密度峰值,且远高于其它频段,表明本文方法在有效抑制噪声频段的同时,能够较好地保留各单频振动信号的主要频率特征。图5(b)为各频率原始信号与重构信号的SNR对比情况,可见本文方法对所有单频振动均实现了SNR提升,平均提升幅度达14.3 dB。

此外,本文还采集了由车辆经过引起的高速公路隧道路段实测振动信号。经本文方法降噪后,噪声波动由降噪前的1.287 rad降至0.26 rad,SNR显著提高,振动波形更加清晰,有助于后续振动特征提取与模式识别的研究。

3 结束语

本文提出了一种基于TVF-EMD的 Φ -OTDR信号降噪方法,可显著提升 Φ -OTDR系统的SNR。该方法将振动信号分解为一系列IMF,在保持较高计算效率的基础上,有效克服了传统EMD的模式混叠问题。通过计算样本熵以区分信号相关模态与噪声相关模态,并基于信号相关模态重构振动信号,从而实现噪声抑制。仿真结果表明,所提方法可将信号SNR提升13.281 dB;

实验验证进一步表明,该方法对不同频率的单频振动信号均具有良好适应性,平均SNR提升达14.3 dB。此外,在高速公路隧道路段采集的实际振动信号中,噪声波动由1.287 rad显著降低至0.26 rad,验证了该方法在实际应用中的有效性,为 Φ -OTDR系统在振动特征提取与模式识别中的进一步应用提供了可靠技术支持。

参考文献:

- [1] 蔡海文,叶青,王照勇,等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 9-24.
- [2] 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): 100-114.
- [3] WU H, LU M, XU C, et al. Nonlinear mixture signal separation with the extended slow feature analysis (xSFA) in fiber-optic distributed acoustic sensor (DAS)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(7): 2580-2594.
- [4] 范佳铭,黄闽南,王一山,等. 面向电力管廊外破监测的分布式光纤传感技术研究[J]. 光学精密工程, 2024, 32(10): 1433-1442.
- [5] 尚秋峰,谷元宇,樊小凯,等. 基于LCPSO与异构集成学习模型的输电线路覆冰等级预警方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 157-165.
- [6] 王仕昊,高妍,张红娟,等. 小波域噪声估计的分块自适应降噪方法提升 Φ -OTDR SNR研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 104-111.
- [7] 吕龙宝,庞拂飞,刘兔兔,等. 基于奇异值分解的 Φ -OTDR相位提取[J]. 光通信技术, 2018, 42(9): 51-54.
- [8] 郭家兴,钱君霞,闫安心,等. 基于VMD和排列熵的海缆振动信号降噪方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(2): 84-89.
- [9] CHEN W, MA X, MA Q, WEN J. Denoising method of the Φ -OTDR system based on EMD-PCC[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10): 12113-12118.
- [10] BAI Y, LIN T, ZHONG Z. Noise reduction method of Φ -OTDR system based on EMD-TFPP algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(21): 24084-24089.
- [11] 彭红焘,王梦琦,何文波,等. 基于经验模态分解与巴特沃斯滤波的 Φ -OTDR去噪算法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(13): 222-227.
- [12] HE M, FENG L, ZHAO D. A method to enhance SNR based on CEEMDAN and the interval thresholding in Φ -OTDR systems[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2020, 126(5): 1-10.
- [13] 高浩天,康杰虎,张振,等. 基于变分模态分解的相位敏感光时域反射仪SNR提升方法[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 49-58.
- [14] 尚秋峰,谷元宇. 基于GWO-VMD-SVD的 Φ -OTDR信号降噪方法[J]. 半导体光电, 2023, 44(6): 913-918.
- [15] JIA G, ZHANG H, WANG P, WANG Y, GAO Y, JIN B. Phase noise suppression for Φ -OTDR with optimized minima controlled recursive averaging method[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 2169-2175.
- [16] LI H, LI Z, MO W. A time varying filter approach for empirical mode decomposition[J]. Signal Processing, 2017, 138: 146-158.