光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024011901

基于 PE-CEEMD-SVD 的 Φ-OTDR 信号降噪方法

姚国珍[1,2,3]，李炳峰[1*]，谷元宇[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： 为实现相位敏感光时域反射仪中相位信号的精确测量，提出了一种基于排列熵算法的互补集合经验模态分解联合奇异值分解的新型降噪方法(PE-CEEMD-SVD)。首先，对含有噪声的相位信号进行CEEMD分解，得到一系列频率不同的IMF分量；然后，将PE算法和相关系数机制相结合，保留较大相关的有用分量，对较小相关的噪声分量使用SVD算法进行二次降噪；最后将两次降噪后保留下来的有用分量进行重构。仿真和实验结果表明，相较于EMD、EEMD和CEEMD降噪方法，该方法可获得更高信噪比的信号，有利于相位信号的精确测量。

关键词： 相位敏感光时域反射仪；排列熵；互补集合经验模态分解；奇异值分解；信噪比

中图分类号： TN911.6　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0663－07

Φ-OTDR Signal-Denoising Method Based on PE-CEEMD-SVD

YAO Guozhen[1,2,3], LI Bingfeng[1], GU Yuanyu[1]

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

Abstract: To precisely measure phase signals in phase-sensitive optical time-domain reflectometers, a novel noise-reduction method is proposed that is based on complementary ensemble empirical modal decomposition coupled with singular value decomposition using a permutation entropy algorithm. Initially, a phase signal containing noise is decomposed via complementary ensemble empirical modal decomposition (CEEMD) to obtain a series of components with different frequencies. Subsequently, the PE algorithm is combined with the correlation coefficient mechanism to retain useful components with a larger correlation, and the singular-value-decomposition algorithm is used to denoise the noise components with a smaller correlation. Finally, the useful components, retained after two denoising processes, are reconstructed. Simulation and experimental results demonstrate that, compared with empirical modal decomposition, ensemble empirical modal decomposition, and CEEMD, the proposed method achieves a higher signal-to-noise ratio, which is beneficial for the precise measurement of phase signals.

Key words: Φ-OTDR; permutation entropy; complementary ensemble empirical modal decomposition; singular value decomposition; signal-to-noise ratio

收稿日期：2024－01－19.

基金项目：国家自然科学基金项目(62205105)；河北省自然科学基金项目(E2019502179)；河北省省级科技计划项目(SZX2020034).

* **通信作者：**李炳峰

0　引言

相位敏感光时域反射仪(Φ-OTDR)被广泛应用于地下油气管道泄露[1]、架空输电线路舞动[2]、建筑物结构健康程度监测[3]等领域，其具有响应速度快、测量距离远等优点[4]。通过相位敏感光时域反射仪测得的振动信号包含大量噪声，其来源主要分为两类：一类是系统内部光器件引入的加性噪声，如激光相位噪声、光纤放大器的自发辐射噪声、数据采集卡的电子噪声等。此类噪声可以通过累加平均[5]、移动平均[6]、分离平均[7]等方法来进行有效去除。另一类是由于光纤所处环境而引入的随机噪声，该噪声紧密依附于相位信号。为了实现相位信号的精确测量，必须研究针对随机噪声的去除方法，提高相位信号的信噪比。

针对上述噪声，研究人员提出了不同的去除方法。2010 年，吕月兰等[8]将滑动平均法应用于 Φ-OTDR 系统中，使系统的信噪比得到提高。该算法直观、易掌握，但对滑动距离的选取存在一定的主观性和任意性，且对异常值的敏感度不高。2015 年，Wu 等[9]使用多尺度小波分解方法成功将信号的信噪比提高了 35 dB。小波降噪算法有较好的抑制随机噪声的能力，但是小波分析需要确定合适的小波分解尺度和小波基函数，这过于依赖降噪者个人的经验。2015 年，Hai 等[10]提出一种可根据信号的时频域特性自适应分解的经验模态分解法(EMD)。采用 EMD 时，虽然不需要选取小波基函数和小波分解尺度，但该算法会引入模态混叠，不利于信噪比的提升。2019 年，Qu 等[11]将压缩感知降噪算法应用于 Φ-OTDR 传感信号的处理中，信噪比改善至 34.98 dB。压缩感知降噪算法是对具有稀疏特性的信号进行压缩观测，通过低维观测信号实现对原始信号的精确重构，但测量矩阵的构造和重建算法的构建是该算法的难点。2022 年，管彦周等[12]在信号平均法的基础上，提出了一种引入方差概念的移动方差平均算法。该方法的研究对象不是经系统解调得到的相位信号，而是基于后向瑞利散射信号(RBS)的强度量，所以无法对相位信号携带的随机噪声进行有效去除。2023 年，王若凡等[13]利用 SSA 联合 VMD 的方法对振动信号进行降噪，该方法仅保留了信号的有用分量，对噪声分量未加处理而直接剔除，不利于完全体现原本的特征信息。

本文针对 Φ-OTDR 相位信号中随机噪声的去除问题，提出了一种基于 PE 算法的 CEEMD 联合 SVD 的新型降噪方法。该方法首先通过 CEEMD 对相位信号进行分解，再利用 SVD 算法对经过筛选得到的较小相关的噪声分量进行二次降噪。通过更大程度地保留各 IMF 分量中的有用成分，使降噪后的信号更完全地体现原本的特征信息，从而有利于相位信号的精确测量，对定量表达外界扰动事件具有重要意义。

1　相干探测 Φ-OTDR 系统

基于相干探测原理的 Φ-OTDR 系统结构如图 1 所示。激光器用于产生窄线宽、高相干的激光；保偏耦合器按照 90∶10 的分光比将输入光分成两束偏振态相同的本振光和探测光；使用声光调制器(AOM)产生一定的频移并将稳定连续的激光调制成脉冲光；掺铒光纤放大器(EDFA)将信号光功率放大后经环形器送至传感光纤；传感光纤中返回的的 RBS 与本振光在 50∶50 耦合器中发生拍频，并由平衡探测器(BPD)将拍频光信号转化成电信号；电信号经数据采集卡(DAQ)后实现模数转换；最后送入计算机(PC)中进行处理。

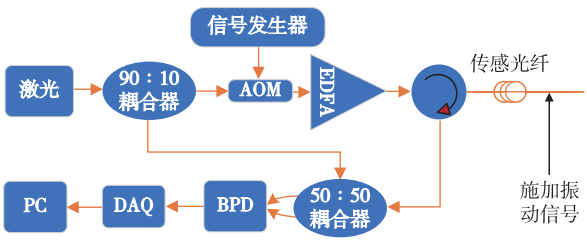


图 1　基于相干探测原理的 Φ-OTDR 系统结构框图

在图 1 中，BPD 的输出功率可表示为：

$$P \propto E_s(t)E_0(t)\cos(\Delta\omega t+\varphi(t)-\varphi_0) \quad (1)$$

式中，$E_s(t)$为 RBS 的振幅；$E_0(t)$为本振光的振幅；φ_0 为本振光的初始相位；$\Delta\omega$ 为角频率，且 $\Delta\omega=2\pi\Delta f$，$\Delta f$ 为 AOM 引入的移频量；$\varphi(t)$为由扰动产生的相位。

由 DAQ 采集到 BPD 的输出信号可表示为[14]：

$$S(n) \propto E_s(n)E_0(n)\cos(\Delta\omega_n n+\varphi(n)-\varphi_0) \quad (2)$$

式中，$\Delta\omega_n$ 为对应的数字角频率，可表示为 $\Delta\omega_n=2\pi\Delta f/f_s$；$f_s$ 为 DAQ 的采样率；n 为采样点序号，且 $n=1,2,3,\cdots,N$，其中 N 表示采集卡每次采样总点数。

由式(2)可知，相干探测方法是通过振动引起光

信号的相位变化来实现振动传感。因此，对相位信号进行降噪处理，可实现相位信号的精确测量，从而进一步提高外界扰动事件检测的准确性。

2 算法原理与步骤

2.1 CEEMD 原理

模态混叠是指在一个 IMF 中存在多种频率成分，或者在多个 IMF 中出现一种频率成分。为了解决 EMD 中的模态混叠问题，Wu 等[15]提出了 EEMD 方法，在 EMD 的基础上叠加了白噪声。EEMD 方法在一定程度上提高了 EMD 分解的精度，但完备性不强。如果新加入的高斯白噪声残留，将无法完美重构信号。CEEMD 是以 EMD 为基础，通过对 EEMD 加以优化，克服其完备性不强而得到的一种模态分解方法。CEEMD 把两次原始信号作为一组，分别叠加两个正负白噪声。在此基础上，分别进行 EMD 分解，再对各 IMF 分量求均值，最后再集总平均得到重构信号。相较于 EMD 和 EEMD，CEEMD 方法不仅减少了集总平均次数和分解迭代次数，加入的两倍高斯白噪声还有利于完美重构原始信号。

采用 CEEMD 算法对信号进行分解可分为如下三步：

1)设原始信号为 $x(t)$，把正负相反的白噪声 $n(t)$加入 $x(t)$中，得到两个信号，分别为 $x_1(t)$和 $x_2(t)$，如式(3)所示：

$$\begin{cases} x_1(t)=x(t)+n_i(t) \\ x_2(t)=x(t)-n_i(t) \end{cases} \tag{3}$$

2)对加入噪声后的复合信号进行 EMD 分解，得到 IMF_1 和 IMF_2，计算每组分量的均值 IMF_{av}，如式(4)所示：

$$IMF_{av}=\frac{IMF_1+IMF_2}{2} \tag{4}$$

3)若用 $C_i(t)$表示步骤 2)中得到的不同分量，则 $x(t)$经 CEEMD 处理后，可表示为：

$$x(t)=\sum_{i=1}^{m}C_i(t)+r(t) \tag{5}$$

式(5)中，$r(t)$是 $x(t)$经过 CEEMD 分解后的残余分量，m 是嵌入维数。

2.2 PE 原理

PE 算法能够检测 IMF 分量的随机性，所以引入排列熵判定机制能更大程度地保留各 IMF 分量中的有用信号成分。在参数设置合理的情况下，PE 值越大，IMF 分量有序性越低。因为噪声分量的随机性很大，所以可以通过设置合适的 PE 阈值筛选出噪声分量，从而提高 Φ-OTDR 系统信噪比[16]。PE 算法原理如下：

1)设信号为 $\{x(i),i=1,2,\cdots,n\}$，对其进行相空间重构，得到如下矩阵：

$$\begin{bmatrix} x(1) & x(1+\tau) & \cdots & x(1+(m-1)\tau) \\ x(2) & x(2+\tau) & \cdots & x(2+(m-1)\tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(k) & x(k+\tau) & \cdots & x(k+(m-1)\tau) \end{bmatrix} \tag{6}$$

式(6)中，m 为嵌入的维数；τ 为延时因子；k 为重构分量数目，且 $k=n-(m-l)\tau$。

2)将矩阵中的第 j 个分量 $x(j)$，$x(j+\tau)$，…，$x(j+(m-1)\tau)$进行升序排列。各元素位置的列索引为一组符号序列，如式(7)所示：

$$S(m)=(j_1,j_2,\cdots,j_m) \tag{7}$$

每个重构分量表示 m 维重构空间，共有 $m!$ 种排列方式。

3)计算所有 m 维符号序列的概率 $P_1\sim P_k$，根据香农熵得到序列 $x(i)$的排列熵定义，如式(8)所示：

$$H_P=-\sum_{j=1}^{k}P_j\ln(P_j) \tag{8}$$

当 $P_j=1/m!$ 时，排列熵取最大值。实际中，H_P 一般取归一化，如式(9)所示：

$$0\leqslant H_P=\frac{H_P}{\ln(m!)}\leqslant 1 \tag{9}$$

2.3 SVD 原理

SVD 算法可以降低非线性信号的脉冲噪声和白噪声，控制降维程度，最大程度地保留有用信息，所以可将 SVD 算法用于 CEEMD 分解之后的二次降噪。SVD 算法的核心是矩阵分解，通过将一个矩阵分解为三个矩阵的乘积，实现信号的降噪。利用 SVD 算法进行信号处理时，常用的矩阵有 Hankel 矩阵、Cycle 矩阵和 Toeplitz 矩阵等。本文利用经 CEEMD 处理后的一维 Φ-OTDR 信号来构造 Hankel 矩阵。SVD 算法原理如下所示：

1)设信号 $x=\{x_1,x_2,\cdots,x_i\}$，$i=1,2,\cdots,M$，则 Hankel 矩阵如式(10)所示：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_m \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & x_{n+1} & \cdots & x_M \end{bmatrix} \tag{10}$$

式(10)中，M 为信号长度；m 为滑动窗口宽度，且 $m+n-1=M$，$m \geqslant n$。当 $m=M/2$ 时，降噪效果最好。

2)对 $\boldsymbol{D}$ 进行奇异值分解，得到：

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{A}\sum\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}=\sum_{i=1}^{r}\beta_i\boldsymbol{x}_i y_i^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

式(11)中，$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$ 为正交矩阵；$\boldsymbol{x}_i$，$\boldsymbol{y}_i$ 是矩阵 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 的第 i 个列向量；r 为矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的秩；$\sum$为对角元素由奇异值组成的对角方阵；β_i 为奇异值，且 $\beta_1>\beta_2>\cdots>\beta_j>0$，$\beta_j$ 为第 j 个奇异值。奇异值越大，越能表征真实信号，奇异值越小，越能表征噪声信号，所以可以采用奇异值的一阶差分谱和二阶差分谱来选取需要保留的奇异值[17]。将二阶奇异值差分谱的极大值点及之前的奇异值保留，将极大值点之后的奇异值置零，能最大程度地保留有用信号。

2.4　PE-CEEMD-SVD 降噪设计

CEEMD 是以 EMD 为基础，通过对 EEMD 加以优化后得到的一种模态分解方法。CEEMD 方法可有效改善其完备性不强的问题，但仅通过 CEEMD 方法进行单次降噪，存在有用信号分量利用不充分等问题。针对上述问题，提出一种基于 PE 算法的 CEEMD 联合 SVD 分解的新型降噪方法。

采用 PE-CEEMD-SVD 降噪方法进行降噪的步骤如下：

1)对含有噪声的 Φ-OTDR 信号进行 CEEMD 分解，得到频率降序排列的 IMF 分量。

2)将 PE 算法和相关系数机制相结合，保留较大相关的有用分量，对较小相关的噪声分量使用 SVD 算法进行二次降噪。

3)将两次降噪后保留的有用信号及残余分量进行重构。

含有噪声的相位信号经过 CEEMD 分解后得到一系列频率不同的 IMF 分量，不满足筛选条件的 IMF 分量同时包含噪声分量和部分有用信号分量，若不经处理直接舍弃，会导致有用信号分量的丢失，不利于波形重构。因此，可利用 SVD 算法对 CEEMD 分解之后的结果进行二次降噪。此方法可以充分保留高频 IMF 成分中的有用信息，减轻对重构信号的影响。PE-CEEMD-SVD 算法流程如图 2 所示。

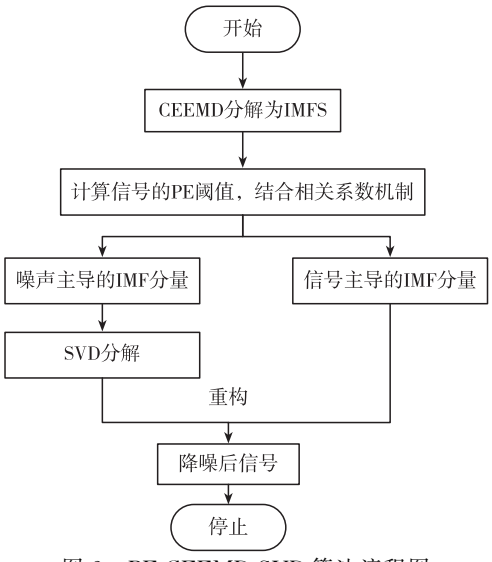


图 2　PE-CEEMD-SVD 算法流程图

3　仿真和实验分析

3.1　降噪效果评价方法

对信号进行处理后，其降噪效果可以通过信号的时域波形和频谱图进行定性评价，也可通过 SNR 和 RMSE 作为评价指标定量评价。SNR 和 RMSE 的定义如式(12)和式(13)所示：

$$SNR=10\lg\frac{\sum_{n=0}^{N-1}x^2(n)}{\sum_{n=0}^{N-1}(y(n)-x(n))^2} \tag{12}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1}|y(n)-x(n)|^2}{N}} \tag{13}$$

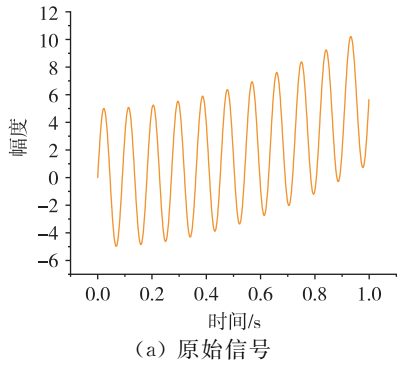
式(12)和式(13)中，$y(n)$为降噪后的信号，$x(n)$为原信号，N 为采样点数。

3.2　仿真分析

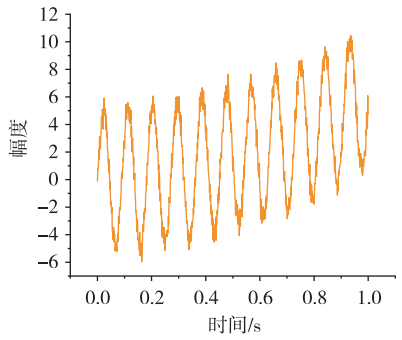
利用仿真软件生成包含噪声的振动信号，信号的频率为 11 Hz，信号采样率为 1 kHz，采样时间为 1 s，采样点数为 1 000。仿真信号可表示为：

$$\begin{cases}x_1(t)=5\sin(22\pi t)+6t^2\\ noise=0.5randn(size(x_1))\\ x(t)=x_1(t)+noise\end{cases} \tag{14}$$

式(14)中，$x_1(t)$为原始振动信号，$noise$ 为白噪声，$x(t)$为含有噪声的振动信号。图 3(a)、(b)为原始信号及加噪信号的波形图。



(a) 原始信号



(b) 加噪信号

图 3 原始信号和加噪信号的波形图

对加噪信号进行 CEEMD 分解，得到 9 个 IMF 分量，其波形及频谱如图 4 所示。由图 4 可知，IMF_1～IMF_5 存在大量原信号之外的频率分量，与原信号频率相差较大，波形污染较为严重；IMF_6 信号的频率为原信号主分量频率，即 11 Hz；IMF_7～IMF_9 信号频率集中在原信号频率范围附近，可以认为是低趋势分量。

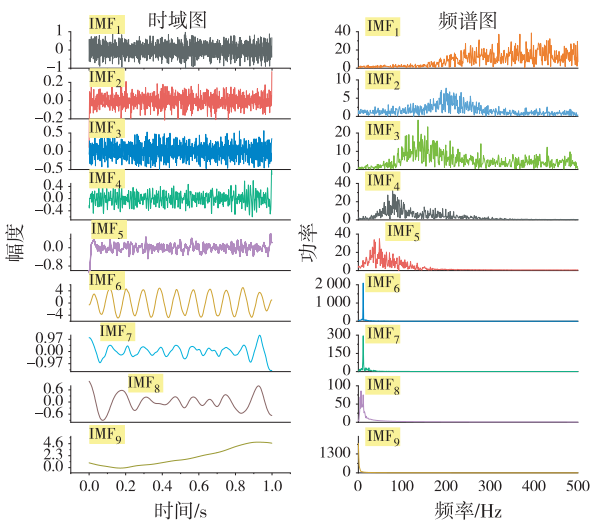


图 4 IMF 分量波形及频谱图

通过计算各个 IMF 分量与原信号的相关系数，可得到的相关性曲线图，如图 5 所示。从图 5 可知，信号主导的 IMF 分量为 IMF_6～IMF_9，噪声主导的 IMF 分量为 IMF_1～IMF_5，而为使重构信号与原始信号更加一致，要剔除掉 IMF_1～IMF_5 分量。

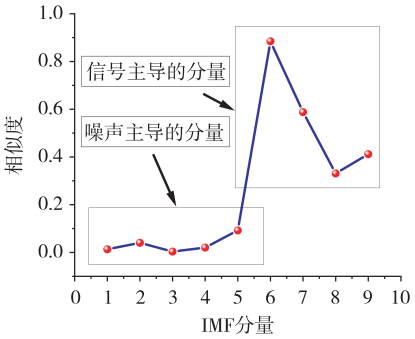


图 5 各个 IMF 与原信号的相关性图

在对 PE 值的计算过程中，需要恰当选取嵌入维数 m 和时间延迟 τ。综合考虑，根据经验取 $m=3$，$\tau=2$。表 1 为经计算得出的各 IMF 分量的 PE 值，可以看出，各分量的 PE 值是完全不相同的，表明了噪声对不同 IMF 分量的支配程度完全不同。PE 值越大，表示随机程度越高。噪声是随机且“满秩”分布的，即 PE 值越大，噪声对 IMF 分量的支配程度越高，所以可以通过设置合适的排列熵阈值筛选出噪声分量。

表 1 各 IMF 分量的 PE 值

名称	各分量 PE 值
IMF_1	1.779 0
IMF_2	1.769 8
IMF_3	1.776 5
IMF_4	1.233 8
IMF_5	0.989 1
IMF_6	0.690 3
IMF_7	0.805 8
IMF_8	0.688 5
IMF_9	0.676 4

本文设置 PE 阈值为 0.70，若 IMF 分量的 PE 值大于 0.70，则定义为异常信号，反之为平稳信号。由表 1 可知，IMF_1～IMF_5，IMF_7 为异常信号分量，与引入的相关系数机制结合考虑，最终将 IMF_1～IMF_5，IMF_7 分量使用 SVD 进行二次降噪。将经 SVD 降噪后的分量与小于 PE 阈值的 IMF_6，IMF_8，IMF_9 分量及残余分量进行信号重构，得到最终降噪后的信号，如图 6 所示。由图 3(a)和图 6 对比可知，降噪后信号与原始信号时域波形整体趋势一致，进一步说明该算法降噪性能的优越。

为了验证 PE-CEEMD-SVD 方法的去噪能力，将该算法与采用 EMD、EEMD 和 CEEMD 方法进行单次降噪后的效果进行对比，结果如表 2 所示。

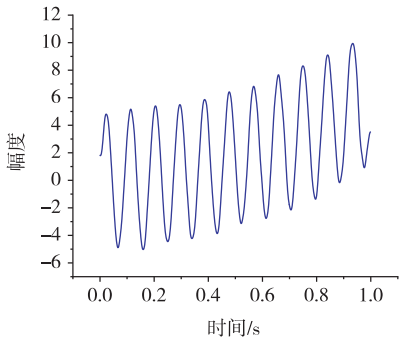


图 6　去噪后信号波形图

表 2　四种降噪方法效果对比

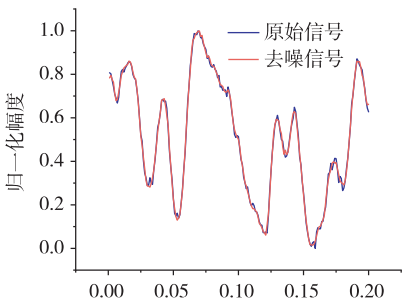
参数	本文算法	EMD	EEMD	CEEMD
SNR/dB	22.155 9	16.344 3	17.967 4	19.783 4
RMSE	0.014 8	0.031 4	0.022 8	0.019 2

从表 2 可知，通过四种方法对加噪信号进行降噪后，采用 PE-CEEMD-SVD 方法处理的信号的 SNR 较其他三种方法高出了 2～6 dB 不等，且 RMSE 达到了 0.014 8。仿真结果表明，所提出的 PE-CEEMD-SVD 降噪方法有效且优势明显。

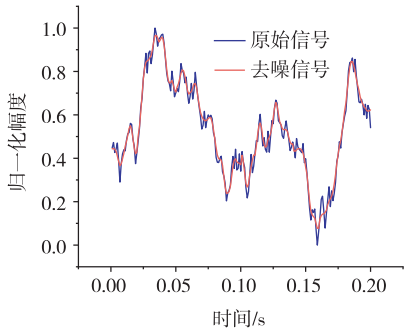
3.3　实验分析

为进一步验证所提出的降噪方法的有效性，搭建了 Φ-OTDR 实验系统。系统中激光器的中心波长为 1 550 nm，线宽为 1.5 kHz，耦合器分光比为 90∶10，AOM 产生的频移为 50 MHz，脉冲光的脉宽为 100 ns。基于此系统，设计了敲击、行走、攀爬三种不同的场景对周界安防场景进行模拟。实验时，将光纤敷设在 2 m 高的围栏上，由实验人员手持棍棒敲击围栏模拟敲击场景，将光纤掩埋在深度为 0.2 m 的泥土中，由实验人员来回脚踩铺地光缆来模拟行走场景，攀爬场景则通过实验人员攀爬围栏进行模拟。

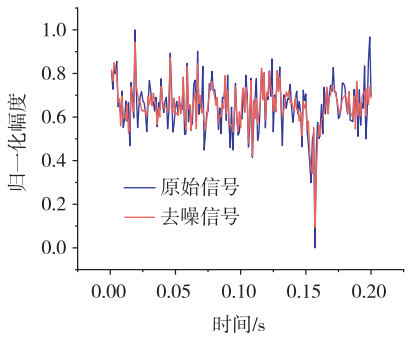
经过 PE-CEEMD-SVD 降噪前后的三种场景的信号的波形如图 7 所示，可以看出降噪前后信号的整体趋势一致，降噪后的信号波形更加平滑。



（a）敲击信号



（b）行走信号



（c）攀爬信号

图 7　PE-CEEMD-SVD 降噪前后的波形

采用 PE-CEEMD-SVD 方法与 EMD、EEMD 和 CEEMD 方法对信号处理后进行对比，结果如表 3 所示。

表 3　四种降噪方法效果对比

信号	参数	本文算法	EMD	EEMD	CEEMD
敲击	*SNR*/dB	29.393 2	22.702 3	23.104 3	25.796 1
	RMSE	0.021 9	0.042 4	0.032 9	0.027 9
行走	*SNR*/dB	22.155 1	15.078 6	17.042 4	18.149 2
	RMSE	0.035 6	0.047 9	0.040 2	0.038 1
攀爬	*SNR*/dB	28.856 3	17.489 2	19.236 5	22.417 5
	RMSE	0.016 8	0.039 7	0.036 5	0.025 6

由表 3 可知，四种降噪算法的降噪效果不同，采用 PE-CEEMD-SVD 算法处理的相位信号的信噪比和均方根误差均不同程度地优于另外三种算法。这是因为本文所提方法通过将 PE 算法和相关系数机制相结合，保留了较大相关的有用分量，对不满足筛选条件的 IMF 分量使用 SVD 算法进行了二次降噪，最大程度地保留了噪声分量中的有用信号成分，更小程度地减轻了对重构信号的影响。

4　结论

本文针对 Φ-OTDR 系统采集到的振动信号包含大量随机噪声的问题，提出了一种 PE-CEEMD-SVD 的新型降噪方法。通过仿真和实验共同验证

了所提方法的有效性，相较于 EMD、EEMD 和 CEEMD 单次降噪方法，PE-CEEMD-SVD 方法能更大程度地保留各 IMF 分量中的有用信号成分，更小程度地减轻对重构信号的波形的影响，从而更完全地体现原本的特征信息，且 SNR 和 RMSE 明显优于另外三种方法。

参考文献：

[1] 李晓蓉，刘旭丰，张 毅，等. 基于分布式光纤声传感的油气井工程监测技术应用与进展[J]. 石油钻采工艺，2022，44(3)：309-320.
Li Xiaorong，Liu Xufeng，Zhang Yi，et al. Application and progress of oil and gas well engineering monitoring technology based on distributed optical fiber acoustic sensing[J]. Oil Drilling and Production Technology，2022，44(3)：309-320.

[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.
Zhang Xuping，Ding Zhewen，Hong Rui，et al. Phase sensitive time-domain reflection distributed fiber optic sensing technology[J]. J. of Optics，2021，41(1)：100-114.

[3] 单一男，马智锦，曾 旭，等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报，2021，42(4)：1-9.
Shan Yinan，Ma Zhijin，Zeng Xu，et al. Research on structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2021，42(4)：1-9.

[4] 马 福，王夏霄，魏旭毫，等. 基于 Φ-OTDR 的分布式光纤扰动传感系统研究现状[J]. 半导体光电，2018，39(1)：1-5.
Ma Fu，Wang Xiaxiao，Wei Xuhao，et al. Research status of distributed optical fiber disturbance sensing system based on Φ-OTDR[J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(1)：1-5.

[5] 陈瑞麟，万生鹏，贾 鹏，等. 基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统[J]. 应用光学，2018，39(4)：590-594.
Chen Ruilin，Wan Shengpeng，Jia Peng，et al. Distributed fiber Raman temperature measurement system based on cumulative average[J]. J. of Appl. Optics，2018，39(4)：590-594.

[6] 于 淼，孙铭阳，张耀鲁，等. 相位敏感光时域反射系统相位模糊及解卷绕[J]. 红外与激光工程，2021，50(5)：229-236.
Yu Miao，Sun Mingyang，Zhang Yaolu，et al. Phase fuzzy and unwinding of phase sensitive optical time domain reflectometry system[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(5)：229-236.

[7] Juarez J C，Taylor H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. Opt. Lett.，2005，30(24)：3284-3286.

[8] Lu Y，Zhu T，Chen L，et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. J. Lightwave Technol.，2010，28(22)：3243-3249.

[9] Wu H，Xiao S，Li X，et al. Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ-OTDR)[J]. J. Lightwave Technol.，2015，33(15)：3156-3162.

[10] Hai Q，Zhang Z，Wang D，et al. An OTDR event analysis algorithm based on EMD-based denoising and wavelet transform[C]// 12th IEEE Inter. Conf. on Electronic Measurement & Instruments，2015：1067-1071.

[11] Qu S，Chang J，Cong Z，et al. Data compression and SNR enhancement with compressive sensing method in phase-sensitive OTDR[J]. Opt. Commun.，2019，433：97-103.

[12] 管彦周，万生鹏，程亚楠，等. 基于移动方差平均算法的相位敏感光时域反射计去噪算法研究[J]. 仪器仪表学报，2022，43(10)：233-240.
Guan Yanzhou，Wan Shengpeng，Cheng Yanan，et al. Research on phase-sensitive optical time domain reflectometer denoising algorithm based on moving variance average algorithm[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2022，43(10)：233-240.

[13] 王若凡，杨 柳，李永凯，等. 基于改进 SSA-VMD 的列车门丝杠机构故障诊断技术研究[J]. 河南科技，2023，42(22)：18-23.
Wang Ruofan，Yang Liu，Li Yongkai，et al. Research on fault diagnosis technology of train door screw mechanism based on improved SSA-VMD[J]. Henan Science and Technology，2023，42(22)：18-23.

[14] 赵艳夺，王目光，张 静，等. 高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统[J]. 光学学报，2022，42(19)：31-39.
Zhao Yanduo，Wang Muguang，Zhang Jing，et al. Distributed fiber optic vibration sensing system with high spatial resolution and large bandwidth[J]. J. of Optics，2022，42(19)：31-39.

[15] Wu Z H，Huang N. Ensemble empirical mode decomposition：a noise-assisted data analysis method[J]. Adv. Adapt. Data Anal.，2009，1(1)：1-41.

[16] 于 淼，张耀鲁，何禹潼，等. 变分模态分解-排列熵方法用于分布式光纤振动传感系统去噪[J]. 光学学报，2022，42(7)：62-73.
Yu Miao，Zhang Yaolu，He Yutong，et al. Variational mode decomposition permutation entropy method for denoising of distributed fiber optic vibration sensing systems[J]. J. of Optics，2022，42(7)：62-73.

[17] 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.
Shang Qiufeng，Gu Yuanyu. Φ-OTDR signal noise reduction method based on GWO-VMD-SVD[J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(6)：913-918.

作者简介：

姚国珍(1979—)，男，博士，硕士生导师，主要研究方向为光纤传感与信号处理技术；

李炳峰(2001—)，男，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感与信号处理技术。