光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022120102

基于 MELMD-ICA 的光纤振动信号降噪方法

尚秋峰[1,2,3]，黄　达[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： 针对分布式光纤传感系统所采集含噪信号，提出一种改进集成局部均值分解（MELMD）联合独立成分分析（ICA）的降噪方法，引入排列熵判决机制提高抑制模态混叠与虚假分量能力。首先使用 MELMD 方法分解含噪信号得到乘积函数（PF）并进行信号重构；将含噪信号和重构信号求差得到虚拟噪声，构造虚拟通道；然后使用 ICA 对含噪信号和虚拟通道进行信噪分离，得到最终结果。通过实验验证，该方法与 EMD-ICA，EEMD-ICA，MELMD 相比，能更好地消除信号中的噪声，保留信号的特征信息。

关键词： 分布式光纤传感；改进集成局部均值分解；排列熵；独立成分分析；降噪

中图分类号： TN911.6　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0312－07

Optical Fiber Vibration Signal Denoising Method Based on MELMD-ICA

SHANG Qiufeng[1,2,3]，HUANG Da[1]

（North China Electric Power University 1. Department 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，Baoding 071003，CHN）

Abstract： Aiming at the noisy signals collected by distributed optical fiber sensing systems，a noise reduction method to modified ensemble local mean decomposition（MELMD）combined with independent component analysis（ICA）is proposed. The permutation entropy decision mechanism was introduced to improve the ability to suppress modal aliasing and spurious components. Firstly，the product function（PF）was obtained by decomposing the noisy signal by MELMD method，and the signal reconstruction was carried out. The difference between the noisy signal and the reconstructed signal was calculated to obtain the virtual noise，and the virtual channel was constructed. Then ICA was used to separate the signal-to-noise of the noisy signal and the virtual channel to obtain the final result. Experimental results show that the proposed method can better eliminate the noise in the signal，and retain the characteristic information of the signal.

Key words： distributed fiber optic sensing；modified ensemble local mean decomposition；permutation entropy；independent component analysis；denoising

0　引言

基于布里渊光时域分析（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）技术的分布式光纤监测系统可以获得沿光纤的连续分布信息，具有长距离、耐久性、抗电磁干扰等优点，可在线监测振

收稿日期：2022－12－01.
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：**黄　达　**E-mail：**1797963161@qq.com

动、应变、温度等物理参量，具有广阔的应用前景[1-4]。BOTDA 基于受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering，SBS)原理[5]。当 BOTDA 用于振动信号监测时，在 SBS 过程中采集的光纤振动信号信噪比(SNR)偏低。光纤振动信号又具有非线性和非平稳的特性，易受噪声影响[6]。因此，必须对采集到的信号进行预处理，使降噪后的信号完整保留原始信号的细节特征，从而降低对分类器性能的要求，实现振动信号的有效识别。

目前常用的降噪方法有小波变换法(WT)、经验模态分解(EMD)及其改进方法等[7-8]。小波变换法存在基函数、阈值等选择问题，缺乏对信号局部特征的自适应性，且对光纤信号中低频噪声的抑制效果不明显[9]。Qin 等[10]提出了一种基于 EMD 的降噪算法，不需要设置基函数，弥补了 WT 的不足，具有良好的自适应性。Wu 等[11]提出的集成经验模态分解(EEMD)方法在 EMD 的基础上，通过加噪的方式抑制了 EMD 中模态混叠等问题。而 EMD，EEMD 在分解时容易出现过包络、欠包络、模态混叠和虚假分量多等问题，且后续利用 Hilbert 变换求取瞬时频率时会出现负频率现象，将影响信号降噪效果。程军圣等[12]提出了集成局部均值分解(ELMD)方法，并将其应用于故障诊断领域。ELMD 以局部均值分解(LMD)为核心，解决了 EMD 中过包络、欠包络问题，且不需要进行 Hilbert 变换，能够有效避免 EMD 和 EEMD 中的负频率问题，抑制模态混叠和虚假分量能力更强[13]。独立成分分析(ICA)[14]是一种信噪分离的方法，降噪的关键在于噪声通道的构建，而 EMD 等方法可以将信号分解为若干模态分量，因此可以根据模态分量的特征构建噪声通道，满足 ICA 的应用要求。文献[15-17]提出利用 EMD 等方法联合 ICA 的降噪法，取得了较好的效果。

针对信号中噪声先验知识未知的情况，本文提出了一种改进的集成局部均值分解(MELMD)方法。MELMD 以 ELMD 为基础，通过引入排列熵(PE)判决方式，作为检测信号中含噪程度的度量指标，利用噪声的排列熵较大这一性质，去除噪声的影响。由于原信号会存在不规则、随机成分，这部分信号会由于排列熵较大而被视作噪声，导致信号失真，因此，本文在 MELMD 重构的基础上结合 ICA 对算法进一步改进，以还原信号的细节信息，突出主要成分。本文方法充分结合了 ELMD 和 ICA 的优点，在抑制噪声的同时最大程度保留信号的特征。

1　MELMD-ICA 降噪模型

1.1　MELMD 分解

MELMD 是在 ELMD 的基础上引入排列熵随机性判决机制，通过排列熵去除随机噪声的影响，提高抑制模态混叠和虚假分量的能力。

ELMD 具体步骤如下：

1)在原始信号 $x(t)$中加入 M 次均值为 0 的白噪声 $n_i(t)$，$i=1,2,\cdots,M$，得到含噪信号 $x_i(t)$：

$$x_i(t)=x(t)+n_i(t) \tag{1}$$

2)使用 LMD 将含噪信号 $x_i(t)$分解为$PF_{ij}(t)$分量和余项 $u_i(t)$，记为 $a_{ij}(t)$：

$$a_{ij}(t)=\sum_{j=1}^{L-1}PF_{ij}(t)+u_i(t) \tag{2}$$

式中，j 是 LMD 分解的第 j 个分量，L 是每次 LMD 分解得到的分量个数；$PF_{ij}(t)$是第 i 次叠加白噪声得到的第 j 个 PF 分量。

3)将相应尺度上 PF 分量 $PF_{ij}(t)$做集合均值得到最终结果 $PF_j(t)$：

$$PF_j(t)=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}PF_{ij}(t) \tag{3}$$

为去除噪声的影响，考虑到原始信号中噪声先验知识未知，采用排列熵检测分解的 PF 分量是否为异常信号。对 ELMD 分解的第 j 个分量 $PF_j(t)$对应的离散序列 $x(i)$进行重构，其中 $i=1,2,\cdots,N$，N 为序列总长度，得到如下序列：

$$\begin{bmatrix} X(1)=(x(1),x(1+\tau),\cdots,x(1+(m-1)\tau)) \\ X(2)=(x(2),x(2+\tau),\cdots,x(2+(m-1)\tau)) \\ \cdots\cdots \\ X(N-(m-1)\tau)=(x(N-(m-1)\tau), \\ x(N-(m-2)\tau),\cdots,x(N)) \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，m 为嵌入维数，τ 是时间延迟。将第 j 个分量中的 m 个信号按升序排列，可得：

$$X(j)=(x(j+(j_1-1)\tau)\leqslant x(j+(j_2-1)\tau)\leqslant \cdots\leqslant x(j+(j_m-1)\tau)) \tag{5}$$

式中，$j_1,j_2,\cdots,j_m$ 为每个元素列的索引数。因此共有 $m!$ 种排列方式，对应有 $m!$ 种信号序列。计算每种信号序列的概率分布为 $P_1,P_2,\cdots,P_{m!}$，且 $\sum_{i=1}^{m!}P_i=1$。根据香农熵理论可得排列熵定义为：

$$H_{\mathrm{PE}}(m)=-\sum_{i=1}^{m!}P_i\ln P_i \tag{6}$$

对式(6)作标准化处理,得到最终结果:

$$H_{\mathrm{PE}}=\frac{H_{\mathrm{PE}}(m)}{\ln m!} \tag{7}$$

计算排列熵时需要确定 m 和 τ。m 取值过大会造成算法效率降低,过小则会导致重构信号包含的信息很少,算法失去意义;τ 的值对信号熵值的影响较小。根据文献[8]的经验,本文将 m 设为 6,τ 设为 1。

通过以上计算,可得到原始信号分解的各个 PF 分量的排列熵。排列熵越大代表离散序列的随机性越强,存在随机噪声等异常现象。针对不同信号的特点,设置阈值,使用排列熵区分有用信号与噪声,将超出阈值的 PF 分量提取出来,重构噪声信号,并从原始信号中剔除噪声信号,实现降噪的效果。将剩余数据进行 ELMD 分解,得到信号最终的 PF 分量。MELMD 方法继承了 ELMD 的优势,并极大程度降低了模态混叠现象和伪分量现象。MELMD 的流程图如图 1 所示。

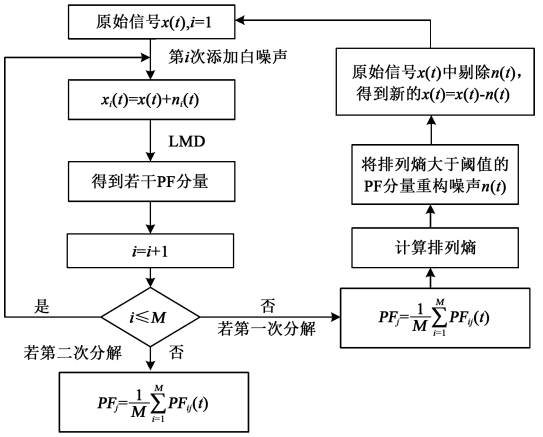


图 1 MELMD 流程图

1.2 ICA 原理

ICA 能将源信号分离成若干独立分量。除了已知源信号是独立统计外,无需其他先验知识。ICA 可以在混合矩阵未知的情况下,通过测得的观测信号推断出源信号。ICA 模型可以表示为:

$$\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{S}(t) \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{S}(t)=[s_1(t),s_2(t),\cdots,s_n(t)]^{\mathrm{T}}$ 为信号源产生的 n 维信号,$\boldsymbol{A}$ 是 $m\times n$ 阶满秩矩阵,混合 $\boldsymbol{S}(t)$ 构成观测信号 $\boldsymbol{X}(t)=[x_1(t),x_2(t),\cdots,x_m(t)]^{\mathrm{T}}$。ICA 处理一维信号时需要构造虚拟噪声,将一维信号扩展到多维信号。考虑到观测信号中含有噪声,则有:

$$\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{S}(t)+\sum a_in_i=\begin{bmatrix}1,a_1,\cdots,a_d\\0,1,\cdots,0\\\cdots\\0,0,\cdots,1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}S\\n_1\\\cdots\\n_d\end{bmatrix}=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{S}(t) \tag{9}$$

式中,a_i 为噪声 n_i 的权重,d 为噪声个数。虚拟噪声与实际噪声越接近,得到的源信号越准确。通过引入虚拟噪声,ICA 能够求得 $\boldsymbol{A}$ 的逆矩阵 $\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{S}(t)$ 的最优解 $\boldsymbol{Y}(t)$,即 $\boldsymbol{Y}(t)=\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{X}(t)$,将观测信号信噪分离,实现降噪的目的。本文采用收敛速度快、稳定性高的 FastICA[15] 进行信号处理。

1.3 MELMD-ICA 降噪设计

考虑到经 MELMD 重构后剩余分量为噪声主导的虚拟噪声,能很好地反映待分离的噪声特点,同时可能包含原信号的有效成分。为实现光纤振动信号的降噪处理并还原信号真实信息,基于以上分析,提出了 MELMD-ICA 降噪方法,具体流程如下:

1)将含噪信号进行 ELMD 分解,得到一系列 PF 分量,并计算各分量的排列熵;

2)确定排列熵的阈值 T,依据阈值的大小判断各分量的含噪程度,将高于阈值的分量重构噪声,并从含噪信号中剔除噪声,以去除随机噪声的影响;经过多次仿真,本文将排列熵阈值设为 0.6,可以区分有效信号与随机噪声;

3)将剩余部分进行 ELMD 分解,最终得到信号各个 PF 分量并对其进行重构,实现 MELMD 降噪,并将含噪信号中去除重构信号得到虚拟噪声;

4)将含噪信号作为观测信号,联合虚拟噪声构造多维通道,满足 ICA 的应用要求;

5)使用 FastICA 对通道信号进行信噪分离,突出主要成分,获取包含有效信息的独立分量。算法具体过程如图 2 所示。

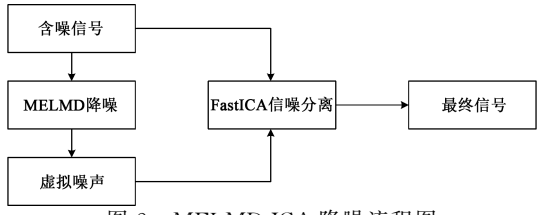


图 2 MELMD-ICA 降噪流程图

2 仿真分析与对比

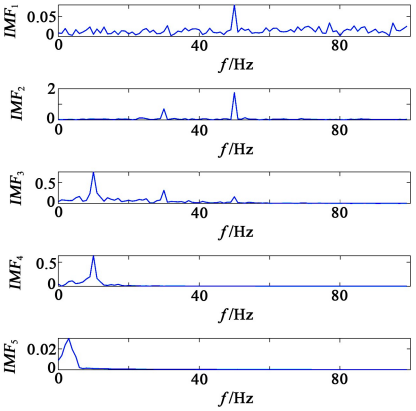
MELMD,EEMD,ELMD 均是以一定的条件将非线性、非平稳的信号通过迭代筛选自适应地分解

成若干分量，从而得到信号的时频分布。采用 MATLAB 生成含噪信号，用来模拟采集的振动信号。仿真信号 $x(t)$ 可表示为：

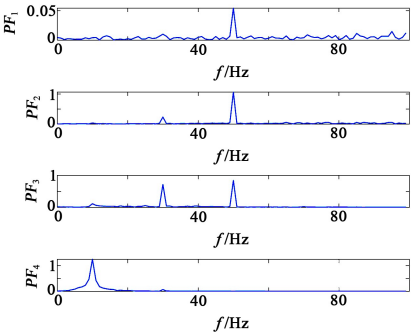
$$\begin{cases} x_1(t) = -\sin(60\pi t + \pi/3) \\ x_2(t) = 3t\sin(20\pi t + \pi/5) \\ x_3(t) = 2\sin(100\pi t) \\ n(t) = \mathrm{wgn}(0.3) \\ x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + n(t) \end{cases} \tag{10}$$

仿真参数设置为：采样率 1 kHz，采样时间为 1 s，wgn(·)表示高斯白噪声。信号 $x(t)$ 包含四种成分：频率为 30 Hz，幅值为 1 的低频信号 $x_1(t)$；频率为 10 Hz 的变幅信号 $x_2(t)$；频率为 50 Hz，幅值为 2 的高频信号 $x_3(t)$；功率为 0.3 dBW 的噪声 $n(t)$。经过多次实验，本文将幅值系数设为 0.2，集成次数设为 200，对振动信号分别进行 EEMD，ELMD 和 MELMD 分解，得到不同的 IMF 分量与 PF 分量。图 3 所示为分解各分量的频谱图。

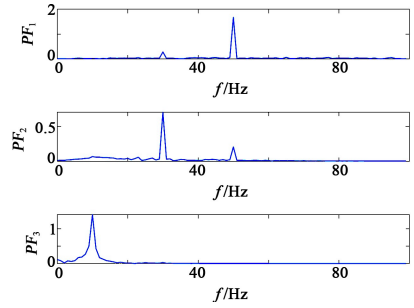
首先，采用 EEMD 方法对 $x(t)$ 进行分解，结果如图 3(a)所示，信号产生了 5 个 IMF 分量，产生了虚假分量。根据各模态分量的频谱图可知，同一频率成分出现在不同分量中，或者相同分量包含了多种频率，各模态混叠严重。ELMD 处理结果如图 3(b)所示，信号产生了 4 个 IMF 分量。与 EEMD 相比，ELMD 核心是 LMD 方法，分解的各个 PF 分量本质上是调频调幅信号，相互独立，这在一定程度上抑制了模态混叠与虚假分量现象，但依然存在模态混叠现象。MELMD 分解结果如图 3(c)所示，信号产生了 3 个 PF 分量，分解后的分量与信号的有用成分相符，相较于 EEMD 和 ELMD，MELMD 有效抑制了模态混叠现象，且抑制虚假分量的能力更强，分解的结果更加准确。



(a) EEMD



(b) ELMD



(c) MELMD

图 3　EEMD，ELMD，MELMD 分解各模态频谱图

3　实验设置

搭建的实验系统如图 4 所示。激光器(DFB-LB)：输出稳定连续的激光；电光调制器(EOM)：改变探测光频率；声光调制器(AOM)：将激光器输出的激光调制成泵浦脉冲光；集成式双路光纤被动放大器(EDFA)：将探测光(EDFA1)和泵浦光(EDFA2)的功率放大；可调衰减器：调节光功率；偏振分析仪(POD)：检测海缆内置光纤中连续探测光偏振态的变化；光电探测器：将光信号转换为电信号；数字采集卡：采集来自光电检测器的电信号；

基于研究团队前期研究，通过有限元仿真得到了海缆不同环境下的振动波形[18-20]。文献[18]仿真了海浪冲刷条件下的海缆有限元模型，得到了浪高为 0.1 m，流速为 2 m/s 海浪条件下的冲刷信号。文献[19]通过有限元分析法中的瞬态动力学建立了海缆在岩石上的二维模型，摩擦时间设为 0.5 s，海缆施加起始速度为 0.25 m/s，滑动方向沿 x 轴的正方向，同时在 y 方向施加了约束，使海缆摩擦运动方向只能沿 x 轴正向，利用此模型获得了海缆摩擦信号。文献[20]建立了船锚砸海缆三维模型，设定锚重为 156 kg，重力加速度 $g=9.8$ m/s^2，得到海缆受锚砸作用 0.05 s 的振动信号。

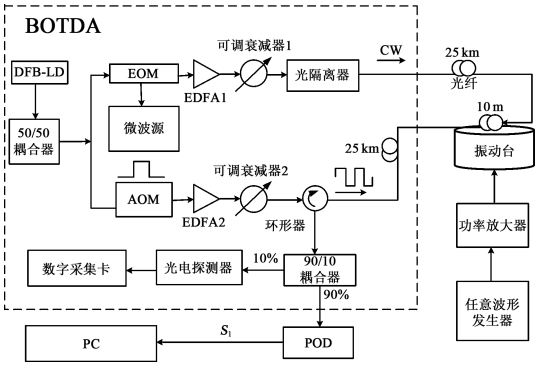
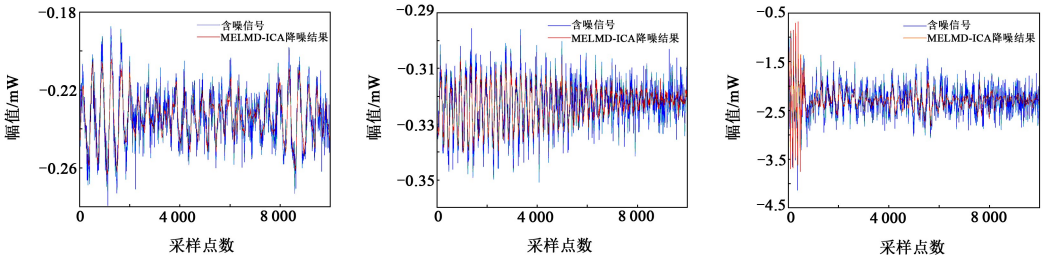


图 4 基于 BOTDA 海缆故障模拟振动信号监测实验系统

将仿真的三种振动信号输入到任意波形发生器中生成波形，功率放大器将其放大后控制振动台上的一段光纤振动，振动信号调制 BOTDA 中单模光纤的偏振态，由 POD 和 BOTDA 原理可知，其归一化斯托克斯矢量 S_1 反映了振动段光纤偏振态变化，与摩擦、冲刷和锚砸振动规律一致[5]。因此本文降噪采用的原始信号为 S_1 信号。

4 实验验证与分析

由于受到噪声的干扰，光纤振动信号的细节特征容易埋没在噪声中，难以提取信号的有效信息。因此利用本文所提的 MELMD-ICA 方法对三种含噪信号进行降噪，设置幅值系数为 0.2，集成次数为 200，并将降噪后的信号与原信号进行对比，如图 5 所示。



(a) 摩擦信号 (b) 冲刷信号 (c) 锚砸信号

图 5 原信号与降噪结果

由图 5 可知，MELMD-ICA 方法降噪结果的整体特征与原信号基本一致，保真度高。为对比验证本文所提方法的降噪效果，采用下列对比方法对含噪信号进行处理：1) EMD-ICA 降噪法，使用 EMD 对信号进行分解并采用相关性准则判断出噪声，再使用 ICA 进行信噪分离；2) EEMD-ICA 降噪法，使用 EEMD 对信号分解，其余过程与 1) 中一致；3) MELMD 强制去噪法，即将信号经 MELMD 分解后的信号直接重构得到降噪信号。相关系数(CC)表达式为：

$$CC=\frac{\mathrm{cov}(x,y)}{\sqrt{D(x)}\cdot\sqrt{D(y)}} \tag{11}$$

式中，x，y 分别为含噪信号与 IMF 分量，cov(·)表示协方差，$\sqrt{\mathrm{D}(\cdot)}$ 表示标准差。通过相关性准则(见表1)来区分有效信号与噪声。本文将 EMD-ICA 和 EEMD-ICA 降噪法中相关系数阈值设为 0.3，低于阈值的分量视为噪声。

表 1 相关程度的划分

相关程度	相关系数
微相关	0～0.3
实相关	0.3～0.5
显著相关	0.5～0.8
高度相关	0.8～1

为量化四种方法的降噪性能，采用信噪比、平均绝对百分比误差(MAPE)、相关系数指标作为评价参数。其中 SNR 与 MAPE 的表达式为：

$$SNR=10\lg\frac{x^2}{(y-x)^2} \tag{12}$$

$$MAPE=\frac{100\%}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{y(i)-x(i)}{x(i)} \tag{13}$$

式中，x 为原信号，y 为重构信号，N 为信号长度。相关系数的定义见式(11)。各降噪方法指标对比如表 2 所示。

表 2 不同降噪方法的性能比较

信号	参数	EMD-ICA	EEMD-ICA	MELMD	本文方法
摩擦信号	*SNR*/dB	32.171 2	33.964 7	33.647 2	39.484 6
	MAPE/%	1.76	1.54	1.55	0.57
	CC	0.921 1	0.929 4	0.923 5	0.992 0
冲刷信号	*SNR*/dB	28.948 1	29.206 3	28.182 7	35.565 7
	MAPE/%	0.89	0.86	0.95	0.13
	CC	0.837 6	0.863 7	0.804 8	0.998 0
锚砸信号	*SNR*/dB	20.212 5	20.535 3	22.282 7	28.398 4
	MAPE/%	7.47	5.91	5.58	3.16
	CC	0.565 0	0.602 3	0.745 0	0.941 0

对于不同的振动信号，由式(11)～(13)可知降噪指标受信号幅值与降噪方法的共同影响。由表 2

可知，同一降噪方法对不同信号的降噪效果不同。EEMD-ICA 方法的降噪性能均略高于 EMD-ICA，可以解释为 EEMD 通过加噪并集成的方式改善了信号局部极值分布，抑制了 EMD 中模态混叠现象，提高了有效信息的完整性；MELMD 方法的降噪效果有时会低于 EMD-ICA 和 EEMD-ICA，优势不明显，这是因为原信号中常含有不规则的部分，这部分信号排列熵值较大，容易被视作噪声，因此引入 FastICA 作进一步处理，突出主要成分。由图 5 和表 2 可知，采用 MELMD-ICA 方法降噪后的信号最大程度保留了原信号的细节，整体信号的特征与原信号基本一致，降噪后的信噪比相比 MELMD 平均高出 6.44 dB，整体降噪效果优异。

5　结论

本文提出了 MELMD 与 ICA 联合的降噪法。MELMD 无需噪声的先验知识，可以自适应地去除噪声的影响。对 BOTDA 系统中采集的含噪信号进行降噪处理，以信噪比、平均绝对百分比误差、相关系数作为指标比较所提方法与常用的降噪方法的性能差异。实验结果表明，与 EMD-ICA，EEMD-ICA 和 MELMD 方法相比，所提方法具有最高的信噪比和相关系数，且平均绝对百分比误差最小，降噪后的信号最大程度保留了原信号的信息，更能反映信号的特征，证明了该方法的有效性，对于分布式光纤传感系统实际振动信号的特征提取与模式识别具有重要意义。

参考文献：

[1] Coscetta A, Minardo A, Zeni L. Distributed dynamic strain sensing based on brillouin scattering in optical fibers[J]. Sensors, 2020, 20(19): 1-23.

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

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

[4] 夏　猛，汤晓惠，王　颖，等. 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. 光学学报，2020，40(15)：36-42.
Xia Meng, Tang Xiaohui, Wang Ying, et al. Comparative analysis of strain monitoring of the installed optical fiber composite overhead ground wire using BOTDA/R[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 36-42.

[5] 尚秋峰，巩　彪. 基于 BOTDA 的海缆监测系统振动信号降噪方法研究[J]. 半导体光电，2021，42(5)：760-766.
Shang Qiufeng, Gong Biao. Research on vibration signal noise reduction method of submarine cable monitoring system based on BOTDA[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 760-766.

[6] 马愈昭，王瑞松，熊兴隆. 基于 BLCD 分解与 ACO-DBN 网络的光纤振动信号识别[J]. 光子学报，2021，50(2)：56-64.
Ma Yuzhao, Wang Ruisong, Xiong Xinglong. Optical fiber vibration signal recognition based on BLCD decomposition and ACO-DBN network[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 56-64.

[7] 吴　虎，孔　勇，王振伟，等. 基于端点检测与信号重组的光纤分布式传感信号识别[J]. 光子学报，2021，50(11)：123-130.
Wu Hu, Kong Yong, Wang Zhenwei, et al. Distributed sensing signal recognition of optical fiber based on endpoint detection and signal recombination[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11): 123-130.

[8] 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 and permutation entropy method for denoising of distributed optical fiber vibration sensing system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 62-73.

[9] 曲洪权，吉　祥，盛智勇，等. 基于局部均值分解的样本熵特征提取研究及应用[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(7)：97-107.
Qu Hongquan, Ji Xiang, Sheng Zhiyong, et al. Research and application of sample entropy feature extraction based on local mean decomposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 97-107.

[10] 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): 1-10.

[11] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

[12] Yang Y, Cheng J S, Zhang K. An ensemble local means decomposition method and its application to local rub-impact fault diagnosis of the rotor systems[J]. Measurement, 2012, 45(3): 561-570.

[13] 郝永梅，杜璋昊，杨文斌，等. 基于改进 ELMD 和多尺度熵的管道泄漏信号识别[J]. 中国安全科学学报，2019，29(8)：105-111.
Hao Yongmei, Du Zhanghao, Yang Wenbin, et al. Pipeline leakage signal identification based on improved ELMD and multi-scale entropy[J]. Chinese J. of Safety Science, 2019, 29(8): 105-111.

[14] Yang W L, Pilozzia A, Huang X D. An overview of ICA/BSS-based application to Alzheimer's brain signal processing [J]. Biomedicines, 2021, 9(4): 386.

[15] 熊兴隆，张琬童，李 猛，等. 基于局部均值分解和串行特征融合的光纤周界振动信号识别[J]. 光学学报，2019，39(2)：43-52.
Xiong Xinglong, Zhang Wantong, Li Meng, et al. Fiber-optic perimeter vibration signal recognition based on local mean decomposition and serial feature fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 43-52.

[16] 高康平，徐信芯，焦生杰，等. EEMD-ICA 联合降噪的旋转机械故障信号检测方法[J]. 噪声与振动控制，2022，42(2)：95-101.
Gao Kangping, Xu Xinxin, Jiao Shengjie, et al. EEMD-ICA combined noise reduction fault signal detection method for rotating machinery[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(2): 95-101.

[17] 谢中敏，沈宝国，胡 超. 基于 EMD-ICA 与遗传算法的轴承故障诊断方法[J]. 航空发动机，2021，47(5)：34-40.
Xie Zhongmin, Shen Baoguo, Hu Chao. Bearing fault diagnosis method based on EMD-ICA and genetic algorithm[J]. Aero Engine, 2021, 47(5): 34-40.

[18] 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 Yushang, Shang Qiufeng, Lü Anqiang. Dynamic finite element analysis of optical fiber composite submarine cable under wave force[J]. Optical Communication Research, 2017(4): 30-34.

[19] 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 torsion and wear characteristics of optical fiber composite submarine cable[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.

[20] 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 anchor impact [J]. Optical Communication Research, 2021(5): 45-49, 56.

作者简介：

尚秋峰(1968—)，女，博士，教授，主要研究方向为光纤传感及信号处理技术。