

CEEMDAN 和小波包降噪算法在光纤光栅复用传感网络中的应用

江虹¹,郑晓丹^{1,2},刘鹏辉¹,李冬¹,张笑鸣¹

(1.长春工业大学 电气与电子工程学院,长春 130012;2.国网蒙东赤峰供电公司 松山变电工区,内蒙古 赤峰 024000)

摘要:针对被采样的超弱光纤光栅反射光谱中含有干扰噪声的问题,提出一种应用于大容量超弱传感网络的混合组网去噪算法。该算法将具有自适应噪声的完整集成经验模态分解(CEEMDAN)与小波包降噪算法相结合,通过小波包阈值去噪对测量信号进行处理后,将初步处理过的信号进行 CEEMDAN;再将分解得到的本征模态函数(IMF)分量和残余分量按照相关系数排列顺序叠加重构,从而获得去噪后的信号。实验结果表明:在 4 种不同信噪比且连续 20 次重复性试验的情况下,CEEMDAN 与小波包降噪相结合的优化算法的信噪比最大程度可提升 3.682 dB,均方根误差最多可降低 0.245 dB,相关系数最多可提升 0.0353,三大指标均得到明显改善。

关键词:自适应噪声;模态分解;小波包降噪;组网复用;超弱光纤光栅

中图分类号:TH9 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)01-0001-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of CEEMDAN and wavelet packet noise reduction algorithm in fiber grating multiplexed sensor network

JIANG Hong¹, ZHENG Xiaodan^{1,2}, LIU Penghui¹, LI Dong¹, ZHANG Xiaoming¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. State Grid Mengdong Chifeng Power Supply Company, Songshan Substation Aream, Chifeng, Inner Mongolia 024000, China)

Abstract: Aiming at the problem of interference noise in the sampled ultra-weak fiber grating reflection spectrum, a hybrid network denoising algorithm for large-capacity ultra-weak sensor networks is proposed. The algorithm combines the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and the wavelet packet noise reduction algorithm. After the measurement signal is processed by the wavelet packet threshold denoising, the preliminarily processed signal is subjected to CEEMDAN. The eigenmode function (IMF) component and the residual component obtained by the decomposition are superimposed and reconstructed according to the order of the correlation coefficient, so as to obtain the denoised signal. Under the conditions of four different signal-to-noise ratios and 20 consecutive repeatability tests, the experimental results show that the signal-to-noise ratio of the optimization algorithm combined with CEEMDAN and wavelet packet noise reduction can be increased by 3 dB to the greatest extent, the root mean square error can be reduced by 0.245 dB and the correlation coefficient can be increased by 0.0353 at most. The three indexes have been significantly improved.

Key words: adaptive noise, modal decomposition, wavelet packet noise reduction, network multiplexing, ultra-weak fiber grating

0 引言

近年来,随着光信息技术的迅猛发展,基于超低

收稿日期:2021-01-02。

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No.20190302085GX)资助。

作者简介:江虹(1970—),女,工学博士,教授,研究方向为光电子器件、光电检测及信号处理等,获得授权专利 5 项,其中授权国家发明专利 3 项,授权国家实用新型专利 2 项。公开出版学术专著 4 部,在《Energies》、《光电子·激光》、《激光与红外》、《光通信技术》、《吉林大学学报》和 IEEE 等国际重要会议上发表论文 30 余篇。曾荣获吉林省科学技术奖(二等奖)。



反射率的光纤布喇格光栅(FBG)传感器越来越受到社会的广泛重视。与传统光纤光栅传感器相比,超弱光纤光栅传感器具有长距离、大容量和高空间分辨率等优点,在结构健康监测、机械设备状态检测等方面被广泛应用。

超弱光纤光栅的传感原理^[1]是光纤光栅传感器随着外界压力、应变等各种环境因素的改变,其反射光谱信号的中心波长会同时发生偏移,经检测,便可得出被测量中心波长的变化。因此,超弱光纤光栅传感系统应用^[2]的关键是精确地解调出中心波长。在大容

量组网复用传感网络中,由于受到各种光噪声干扰,使得输出的光谱信号波形失真,中心波长的峰值位置出现误差,降低了后续解调系统的精确度。因此,选择一种合适的去噪算法对提高系统输出信号的精确度非常关键。本文提出一种自适应噪声的完整集成经验模态分解(CEEMDAN)与传统的小波包降噪相结合的算法。

1 波分+时分混合复用传感网络部分结构原理

波分+时分混合复用光纤光栅传感阵列^[3](简称 TWDM-FBG)原理如图 1 所示,该 TWDM-FBG 混合复用系统由光源、光环路器和 FBG 传感器阵列组成。光源输出光数字信号进入光环路器,再入射至 FBG 阵列中。在 n 个经波分复用方式组合的 FBG 传感器中, n 的大小取决于测量点动态范围和光源带宽。在光纤之间加入一种延时光纤,时间间隔分别为 $0, \tau, \dots, n\tau$,传感信号将以时间差 2τ 在抵达解调系统时彼此分离,达到突破带宽限制、良好扩容的目的。

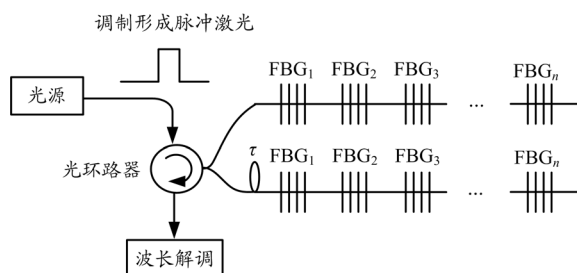


图 1 TWDM-FBG 原理示意图

FBG 传感的原理导致了当反射率越大时光谱阴影效应问题就越突出,对 FBG 测量精度的影响也较大。大容量 TWDM-FBG 中,由于反射所需时间的不同,可能会导致在不同时刻进入较长光纤阵列的光脉冲,它们在距离不同的光纤光栅上产生的反射信号会同时从光环路器输出,从而形成多脉冲串扰,当这些串扰造成的误差累计到一定程度,会对测量结果造成很大影响。

虽然运用大容量超弱光纤光栅波分+时分混合复用网络可显著降低串扰噪声、提升复用能力^[4],但是当数量较多的超弱光纤光栅传感器进行混合组网复用^[5]时,光谱阴影效应、光信道噪声和多次反射噪声串扰所产生的累积效应严重限制了传感网络的发展^[6],对解调精度具有较大影响。因此,混合组网系统的光谱信号去噪问题是大容量光纤光栅传感网络精确解调的关键。

2 算法与原理设计

针对高低频噪声的分析处理,本文提出一种以 CEEMDAN 算法为主体,与小波包降噪算法相结合的复合优化算法。

2.1 小波包降噪原理

小波包降噪是指全局分解所采集到的含噪信号,将噪声对应的小波包系数去除后重构(噪声与纯净信号在不同频带上对应的小波包系数不同),便可得到去噪后的信号。设含噪声信号 $s=x+v^i(t)$, x 为纯净信号, s 可构成含噪信号。小波包降噪算法具体操作如下:

- ①运用小波函数构造所需的阈值 T 和阈值函数 S ;
- ②通过计算确定小波基及其分解层数;
- ③在小波包降噪函数中,设定好上述参数后根据此函数把 S 分解为一系列小波包系数;
- ④将全部小波包系数按照所获阈值和阈值函数进行降噪处理;
- ⑤通过叠加重构全部经过处理的小波包系数,得到结果为最优小波包降噪后的信号。

2.2 CEEMDAN 算法原理分析

CEEMDAN 算法原理^[7]是指在进行经验模态分解(EMD)时各个阶段添加有限数量的自适应高斯白噪声,当集成次数非常少时,重构误差接近于零,与原信号保持模态一致。CEEMDAN 算法可以将光纤光栅反射信号进行准确恢复^[8-9],使高频信号避免在幅值不稳定时产生模态混叠现象,减少高频信号的丢失^[10]。CEEMDAN 算法的实现过程如下:

- ①求出第一阶的本征模态函数(IMF)分量 IMF_1 。在光纤光栅反射信号 $x(t)$ 中加入高斯白噪声 $v^i(t)$,可以将第 i 次的信号表示为:

$$x^i(t)=x(t)+v^i(t) \quad (1)$$

其中, $i=1, 2, \dots, I$ 。使用 EMD 算法分解 $x^i(t)$ 得到相应的 IMF_1^i , 即:

$$IMF_1=\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_1^i \quad (2)$$

残差为:

$$r_1(t)=x(t)-IMF_1 \quad (3)$$

- ②计算第二阶 IMF 分量 IMF_2 。在残差 $r_1(t)$ 中加入高斯白噪声 $v^i(t)$, 进行 i 次实验, 每次实验均为:

$$r^i(t)=r_1(t)+v^i(t) \quad (4)$$

对上述信号进行 EMD, 得到第一阶的本征模函数分量 IMF_2^i , 则

$$IMF_2=\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_2^i \quad (5)$$

残差为:

$$r_2(t)=r_1(t)-IMF_2 \quad (6)$$

③若求得信号残差为单调函数,则计算结束;若所得信号不满足要求,无法进行下一次 EMD,将继续计算直到所得余项为单调函数且达到系统要求,方可终止运算。恢复出的原始反射信号 $x(t)$ 表示为:

$$x(t)=\sum_{i=1}^n IMF_i+r_n(t) \quad (7)$$

2.3 相关系数计算

当得到 CEEMDAN 的 IMF 分量后,选择要处理哪些固有模态分量非常重要。若依据特定参数作为标准找出含噪较多的信号,并将以上分量进行集中处理,则能够最大程度地保留有用信号。因此,如何在大量分量中快速准确分辨出含噪声较多的分量是目前最关键的问题。假如 IMF 分量和原始信号分别与噪声混合后的信号二者之间相似程度较高,那么此 IMF 分量中所含噪声较大,反之则包含较少的噪声。因此,引用互相关系数来计算二者之间的相似度,通过该种联系对 IMF 分量进行补充。互相关系数 R 的公式为:

$$R(IMF_i, y)=\frac{\text{cov}(IMF_i, y)}{\sqrt{\text{cov}(y)} \sqrt{\text{cov}(IMF_i)}} \quad (8)$$

$$\text{cov}(IMF_i, y)=\sum_{i=1}^N (IMF_i - \overline{IMF})(y - \bar{y}) \quad (9)$$

$$\text{cov}(IMF_i)=\sum_{i=1}^N (IMF_i - \overline{IMF})^2 \quad (10)$$

$$\text{cov}(y)=\sum_{i=1}^N (y - \bar{y})^2 \quad (11)$$

其中, y 为原始信号与噪声相结合的混合信号, $\bar{y}$ 为原始信号与噪声混合信号的平均值。

2.4 CEEMDAN 与小波包降噪相结合的优化算法

本文首先采用小波包降噪算法对信号进行处理,消除一些光信道之间串扰噪声;接着,采用 CEEMDAN 算法分解预处理过的信号,求出各个 IMF 分量和预处理之后得到信号之间的互相关系数;然后,按照互相关系数的排列和分类来确定含噪较大的 IMF 分量,通过阈值降噪法去除 IMF 分量中的串扰噪声;最后,将处理前后的 IMF 分量和其残余分量利用一定规则重新构建后即可获得降噪后的信号。CEEMDAN 算法与小波包降噪算法相结合的复合优化算法流程如图 2 所示。

3 实验结果分析

3.1 测试信号实验分析

为了验证所提算法的去噪效果,本文使用 Matlab

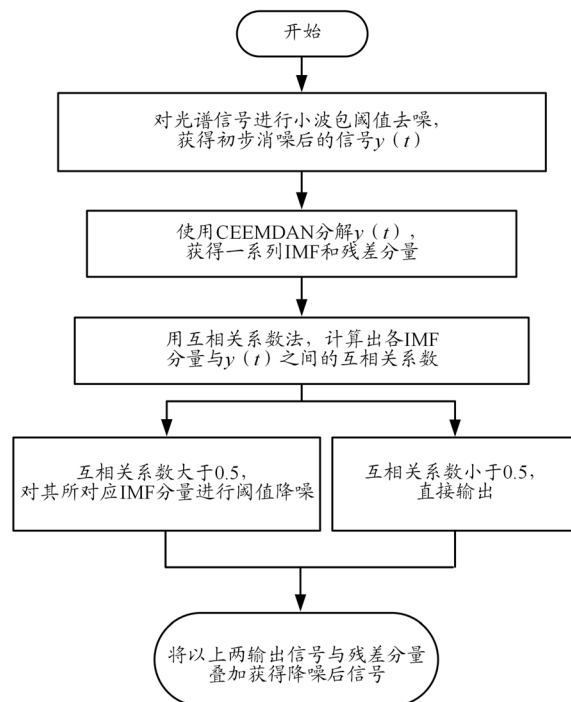


图 2 算法流程图

进行仿真实验。由于超弱光纤光栅反射光谱模型符合高斯函数,故将高斯函数 $n=500\exp[-(x-60)^2/250]$ 看成一个光纤光栅反射光谱,加入高斯白噪声,采用小波包降噪算法处理加噪后的光谱信号,得出最优小波基 sym10,分解层数为 3。使用互相关算法计算所获得的 IMF 分量和含噪信号、小波包降噪后得到的信号的相似性,对相关系数大于 0.5 的 IMF 分量进行阈值降噪。本文采用 CEEMDAN 强制算法、CEEMDAN+传统阈值^[2]降噪方法以及本文提出的 CEEMDAN 与小波包降噪相结合的算法分别进行实验,结果如图 3 和图 4 所示。可以看出,本文提出的降噪方法经实验所得的信号与原始波形最接近。峰值处数值受噪声影响较小,距离峰值越远,受噪声的影响越大。由此可得,本文提出的降噪方法比其它 2 种降噪方法具有更好的降噪效果。

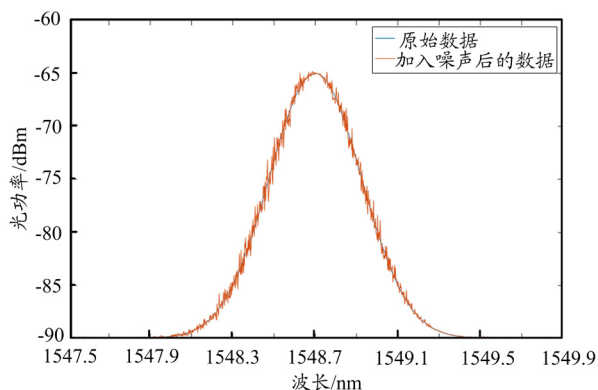


图 3 加入白噪声的高斯函数

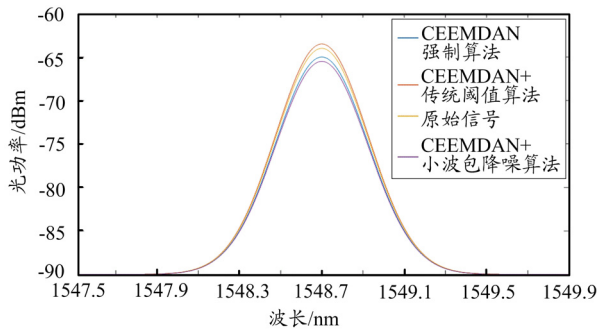
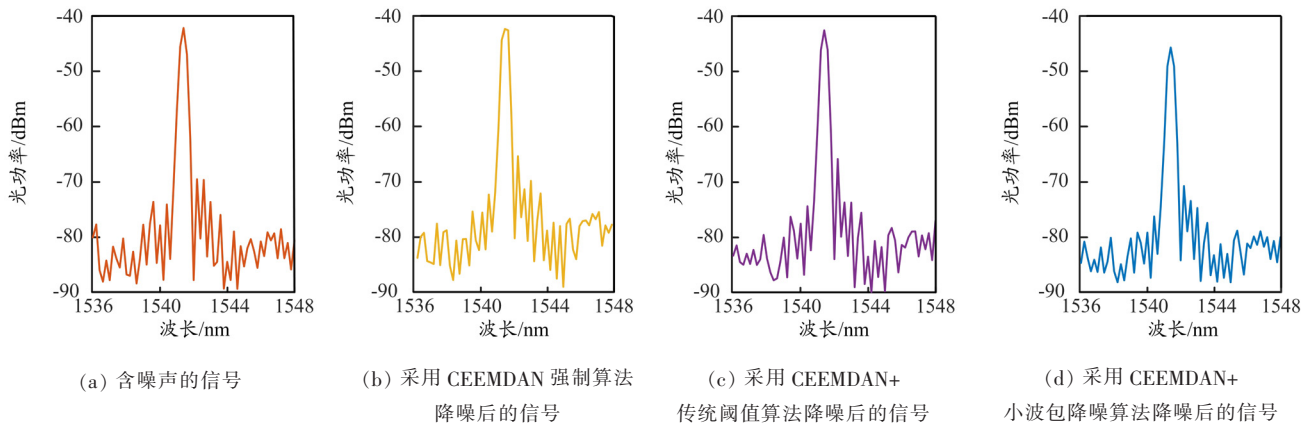
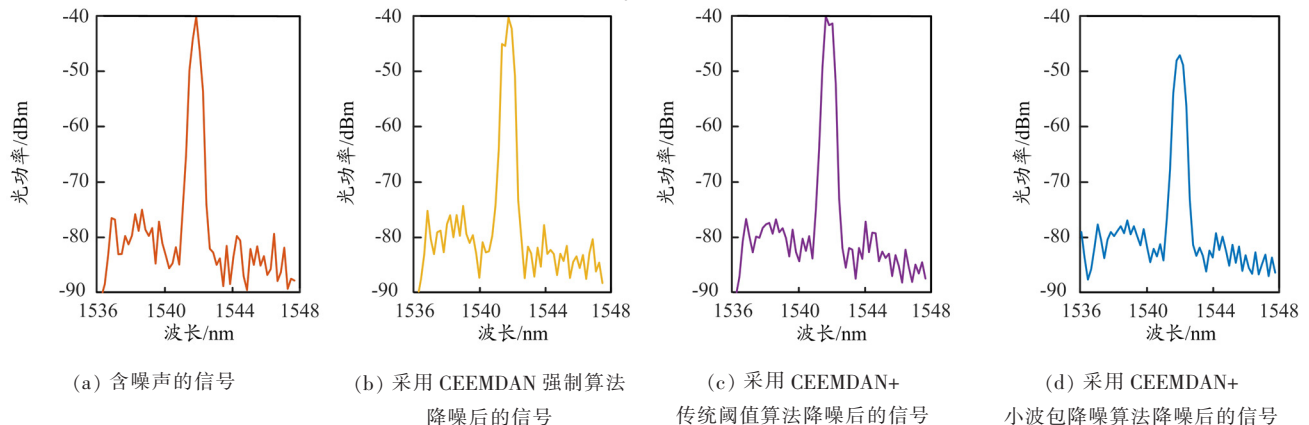


图4 3种算法对比结果

3.2 实验信号实测分析

为了进一步测试算法性能,本文随机采集实验系统(图1)超弱光纤光栅阵列中FBG₂₃、FBG₄₆₀、FBG₇₅₂和FBG₁₃₄₃的反射光谱进行去噪测试。由于在实际测试中不能控制反射信号中的噪声和类型,为了便于控制信噪比(SNR),这里运用Matlab对采集到的超弱光纤光栅反射光谱信号加入高斯白噪声,图5(a)~图8(a)为4个FBG叠加25 dB高斯白噪声后的反射光谱曲线,并分别采用文中涉及到的3种方法进行去噪处理,去噪效果如图5~图8中(b)~(d)所示。

图5 FBG₂₃的反射光谱曲线图6 FBG₄₆₀的反射光谱曲线

通常可采用SNR、均方根误差(RMSE)和相关系数 R 对降噪的具体效果进行评价, RMSE数值越小、SNR和相关系数 R 的数值越大,则说明降噪效果越好。对比图5~图8可知,加入25 dB高斯白噪声的3个光纤光栅光谱信号曲线在峰值位置出现了明显的毛刺和波动,导致形成假峰;CEEMDAN强制算法去噪效果最差,波形图上存在明显的振幅;CEEMDAN+传统阈值算法降噪效果相对好一些,但在反射光谱信号中心波长的位置仍然存在毛刺现象,效果仍不理想,去除噪声信号不彻底。

为了去除所添加噪声的偶然性,本文在所采集到的光谱信号中分别加入10 dB、15 dB、20 dB和25 dB的高斯白噪声,根据式(12)~式(14)可求出SNR、RMSE和相关系数 R ,测试结果如表1~表3所示。

$$SNR = 10 \times \lg \left\{ \frac{\sum_{i=0}^N X^2(t)}{\sum_{i=0}^N [X(t) - x'(t)]^2} \right\} \quad (12)$$

其中, N 为所选择采样点的数量, $X(t)$ 是原始信号, $x'(t)$ 是降噪后的信号。

表 1 3 种降噪算法所得信号的 SNR

含噪声信号的 SNR/dB	去噪信号的 SNR/dB		
	CEEMDAN 强制算法算法	CEEMDAN+ 传统阈值算法	CEEMDAN+ 小波包降噪算法
10	18.961	19.982	21.123
15	21.751	23.917	24.982
20	25.989	27.592	29.016
25	30.182	32.116	33.864

表 2 3 种降噪算法所得信号的 RMSE

含噪声信号的 RMSE/dB	去噪信号的 RMSE/dB		
	CEEMDAN 强制算法算法	CEEMDAN+ 传统阈值算法	CEEMDAN+ 小波包降噪算法
10	0.6987	0.6913	0.4539
15	0.4967	0.4022	0.3213
20	0.2893	0.2614	0.2138
25	0.1823	0.1454	0.1142

表 3 3 种降噪算法所得信号的相关系数 R

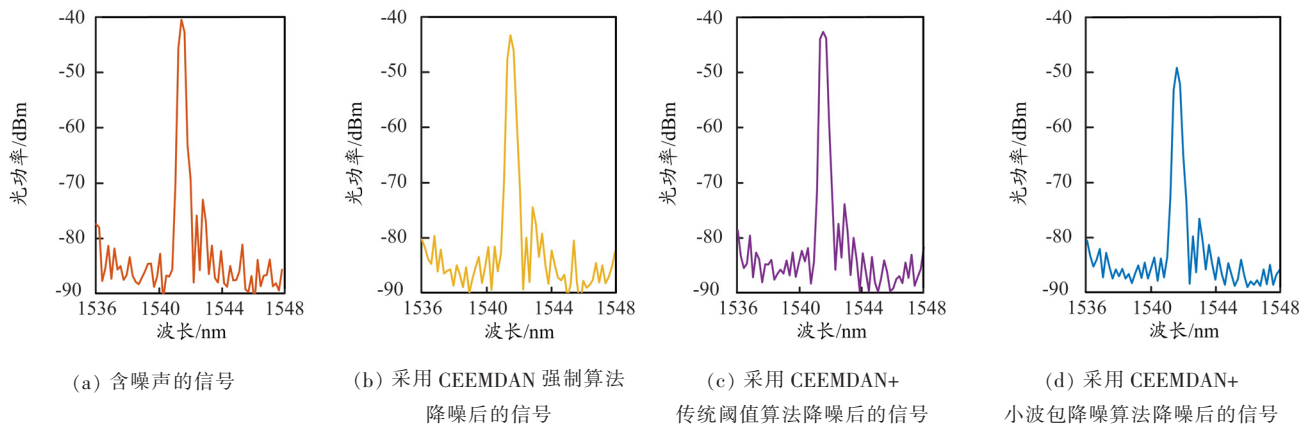
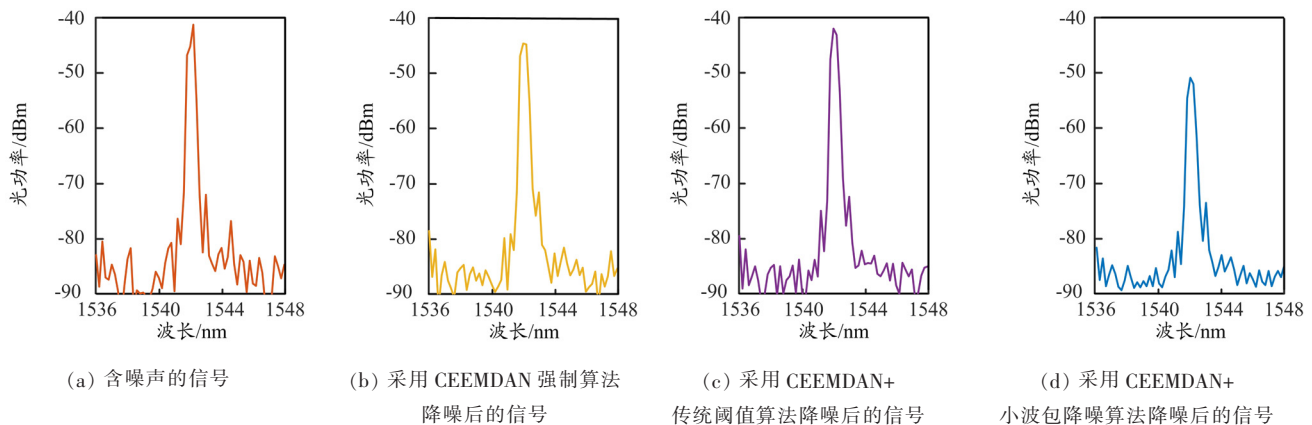
含噪声信号的 R/dB	去噪信号的 R		
	CEEMDAN 强制算法算法	CEEMDAN+ 传统阈值算法	CEEMDAN+ 小波包降噪算法
10	0.8025	0.8240	0.8266
15	0.8091	0.8359	0.8378
20	0.8157	0.8468	0.8489
25	0.8223	0.8552	0.8576

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N [X(t) - x'(t)]^2 \quad (13)$$

$$R = \frac{\text{cov}(X(t), x'(t))}{\sqrt{\text{cov}X(t)} \sqrt{\text{cov}[x'(t)]}} \quad (14)$$

从表 1~表 3 可以看出,与其它 2 种算法相比,本文提出的 CEEMDAN 与小波包降噪相结合的算法得出的 SNR 最大且具有更低的 RMSE 值,证明噪声去除得最彻底、可靠性更高和去噪结果更稳定。

此外,本文算法对信号进行去噪后,其反射光谱

图 7 FBG₇₅₂ 的反射光谱曲线图 8 FBG₁₃₄₃ 的反射光谱曲线

信号曲线在峰值位置的波动和毛刺被有效消除,并且去噪后的反射光谱曲线对比去噪前的反射光谱曲线整体平滑度得到改善,去噪效果比较好。

4 结束语

本文提出了 CEEMDAN 与小波包降噪相结合的算法,经该算法处理后的实验信号较传统算法更为清晰平滑。实验结果表明:所提算法的 SNR 最大程度可提升 3.682 dB, RMSE 最大能够降低 0.245 dB, 相关系数 R 最多可提升 0.0353, 三大指标均得到明显改善。因此,本文提出的 CEEMDAN 与小波包降噪相结合的算法对光纤光栅组网复用系统去除噪声具有很好的应用价值,有利于提高后续解调系统的精准性。

参考文献:

[1] 张天华,赵鸿,朱辰,等. Bragg 波长精确调控的光纤光栅刻写方法与实验[J]. 激光与红外,2014,44(3):285-287.

- [2] 胡宸源. 大容量光纤光栅传感网络高速解调方法及关键技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.
- [3] 兰海军. 基于光纤光栅波/时分复用传感网络研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [4] 代勇波. 光纤光栅传感特性与多点复用技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [5] 李晓磊. 光纤传感复用扩容与组网应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [6] 仲启媛,黄先祥,谭立龙,等. 光源噪声对光纤光栅解调精度的影响[J]. 激光与红外,2009,39(9):956-960.
- [7] REN Y, SUGANTHANP N, SRIKANTH N. A comparative study of empirical mode decomposition based short-term wind speed forecasting methods [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6 (1): 236-244.
- [8] 鲁丽,颜国正,赵凯,等. 基于集合经验模态分解的人体结肠动力分析[J]. 光学精密工程,2015,23(6):1850-1856.
- [9] 李晓莉,李成伟. 改进的自适应噪声总体集合经验模态分解在光谱信号去噪中的应用[J]. 光学精密工程,2016(7):1754-1762.
- [10] 徐阳,罗明璋,李涛. 基于 CEEMDAN 和小波阈值的 ECG 去噪算法研究[J]. 现代电子技术,2018,41(7):45-48,53.