

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205827

CEEMDAN-WT 降噪提升 BOTDA 信噪比研究*

杨瑞¹ 李维勤¹ 白清^{1,2} 王宇^{1,2} 刘昕^{1,2} 靳宝全¹

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室 太原 030024;

2. 山西省交通科技研发有限公司 太原 030032)

摘要:针对布里渊光时域分析仪(BOTDA)存在的信号噪声问题,提出一种自适应噪声完备集合经验模态分解联合小波阈值(CEEMDAN-WT)的降噪方法。首先,分析了CEEMDAN-WT算法降噪原理,基于微波扫频测量原理建立了BOTDA信号解调模型,通过仿真研究验证了CEEMDAN-WT方法可有效去除信号中的随机噪声。其次,搭建了BOTDA测温系统,在不同传感距离和不同空间分辨率下进行了降噪效果实验验证。结果表明,在30 km的传感距离和2 m的空间分辨率下,CEEMDAN-WT方法将光纤末端的信噪比提升了8.89 dB。研究证明,CEEMDAN-WT方法可为BOTDA信噪比提升提供一种有效方案。

关键词: 布里渊光时域分析仪;CEEMDAN;小波阈值;信噪比

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Signal-to-noise ratio improvement for BOTDA using CEEMDAN-WT method

Yang Rui¹ Li Weiqin¹ Bai Qing^{1,2} Wang Yu^{1,2} Liu Xin^{1,2} Jin Baoquan¹

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province,

Taiyuan University of technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Transportation Technology

Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: To improve the Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system performance limited by signal noise, we proposed a noise reduction method based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise combined wavelet threshold (CEEMDAN-WT). First, the noise reduction principle of CEEMDAN-WT algorithm is analyzed. Besides, the BOTDA signal demodulation model is set up based on the principle of microwave sweep frequency measurement. The simulation results show that CEEMDAN-WT method can remove the random noise in the signal effectively. Then, the BOTDA system is set up for temperature measurement. The CEEMDAN-WT method is adopted to suppress the noise of each measured power curve at different sensing distances and different spatial resolutions. Finally, the experimental results show that the signal-to-noise ratio (SNR) at the end of the optical fiber is improved by 8.89 dB utilizing the CEEMDAN-WT noise reduction method, under the sensing distance of 30 km and the spatial resolution of 2 m. Research show that the CEEMDAN-WT method provides an effective scheme for improving the SNR of BOTDA.

Keywords: Brillouin optical time domain analyzer; CEEMDAN; wavelet threshold; signal-to-noise ratio

0 引言

分布式光纤传感技术以光纤为传感媒介,可实现温度、应变、振动等多种参量的分布式测量,具有监测范围

广、测量灵敏度高、工作性能稳定等优点。其中,基于光纤受激布里渊效应的布里渊光时域分析仪(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)通过测量光纤中布里渊频移(Brillouin frequency shift, BFS)的变化量,可实现长距离^[1-2]、高空间分辨率^[3-4]的温度或应变测量^[5],被

收稿日期: 2022-09-15 Received Date: 2022-09-15

* 基金项目: 中国博士后科学基金(2021M691989)、山西省重点研发计划(202102130501021)、山西省科技创新人才团队专项(201805D131003)项目资助

广泛应用于电缆状态监测、地下管廊监测、桥梁裂损预警、矿井塌陷预警、建筑结构变形预警等领域^[6]。

但 BOTDA 系统信号在采集、放大、检测的过程中,由于外界环境等因素会引入一些不可避免的随机噪声,如激光器引入的强度噪声^[7],光电探测器引入的热噪声、散粒噪声^[8],光纤损耗引起的噪声,放大器引入的自发辐射噪声等,导致系统测量精度恶化。因此,必须对采集到的信号进行处理,提取有用信号以提升系统信噪比。针对这一问题,研究人员提出多种降噪算法来提高 BOTDA 信噪比。2011 年, Bernini 等^[9]在 BOTDA 系统中运用累加平均算法,在 50 km 的传感距离上实现了 5 m 的空间分辨率和 1.6 °C 的测温精度。但该算法通常需要对信号进行上千次采集,存在测量耗时较长的问题。2012 年, Farahani 等^[10]对少量累加平均的信号进行小波阈值(wavelet threshold, WT)降噪,得到了与 1 000 次累加平均处理下相同的测量精度,有效缩短了系统测量时间。但在小波阈值降噪算法中,小波基函数及分解层数的选取会影响信号的降噪效果,实际测量过程中难以准确选取合适的小波基函数及分解层数。2016 年, Soto 等^[11]提出将二维、三维图像去噪算法应用于布里渊增益谱的降噪,在 50 km 的传感距离上,将信噪比分别提升了 14.2 dB、20.7 dB^[11],但该方案没有对 BFS 的特征进行分析^[12]。2020 年, Zhao 等^[13]提出了一种基于经验值模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的降噪算法,在 6 km 的传感距离上将布里渊信号的信噪比提升了 11.69 dB,但 EMD 算法进行信号分解时会造成模态混叠问题,导致信号无法精确重构。

针对上述问题,本文提出联合自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)和小波阈值(wavelet threshold, WT)滤波对 BOTDA 的单频功率信号进行降噪处理,可避免 EMD 算法中存在的模态混叠问题^[14-15],同时克服 CEEMDAN 方法容易丢失高频分量的缺陷,可实现信号的准确重构。具体为,将原始信号进行 CEEMDAN 分解,选用相关系数作为判定依据,筛选出有效本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量,并通过 WT 算法进一步滤除有效 IMF 分量中的噪声,之后进行重构得到降噪后信号。本文工作如下:首先,基于微波扫频原理建立 BOTDA 信号处理仿真模型,验证了 CEEMDAN-WT 降噪方法的有效性。其次,搭建了 BOTDA 系统,在 30、20、10 km 的光纤上对算法进行实验验证,结果表明,降噪后光纤沿线信噪比均得到有效提升。

1 CEEMDAN-WT 降噪方法

1.1 CEEMDAN 原理

定义算子 $E_n(\cdot)$ 为含噪信号 $x(t)$ 经 EMD 获得的第

n 个模态分量, $\omega_m(t)$ ($m=1, 2, \dots, M$) 为分解过程中添加的白噪声, ε_i ($i=0, 1, \dots, I$) 为添加白噪声的标准差, IMF'_i 为经 CEEMDAN 获得的第 i 个模态分量, CEEMDAN 算法具体步骤如下^[16-18]:

在含噪信号 $x(t)$ 中多次加入白噪声 $\omega_m(t)$, 进行 M 次 EMD, 计算平均值, 得出 CEEMDAN 的第 1 个模态分量 $IMF'_1(t)$:

$$IMF'_1(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_1[x(t) + \varepsilon_0 \omega_m(t)] \quad (1)$$

$i=1$ 时, 计算由 CEEMDAN 得到的第 1 个余量 $r_1(t)$:

$$r_1(t) = x(t) - IMF'_1(t) \quad (2)$$

对信号 $r_1(t) + \varepsilon_1 E_1(\omega_m(t))$ 再进行 M 次 EMD, 直到得到 $IMF'_2(t)$, 计算平均值, 得出 CEEMDAN 的第 2 个模态分量 $IMF'_2(t)$:

$$IMF'_2(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_1[r_1(t) + \varepsilon_1 E_1(\omega_m(t))] \quad (3)$$

在后续每个阶段, 即 $i=2, 3, \dots, I$, 计算第 i 个余量 $r_i(t)$, 以及 CEEMDAN 的第 $i+1$ 个模态分量 $IMF'_{i+1}(t)$:

$$r_i(t) = r_{i-1}(t) - IMF'_i(t) \quad (4)$$

$$IMF'_{i+1}(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_1[r_i(t) + \varepsilon_i E_i(\omega_m(t))] \quad (5)$$

直到余量无法进行分解时中止迭代, 得到最终的余量信号 $R(t)$:

$$R(t) = x(t) - \sum_{i=1}^I IMF'_i(t) \quad (6)$$

则原始含噪信号 $x(t)$ 为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I IMF'_i(t) + R(t) \quad (7)$$

为便于后文描述, 将分解后的余量视为最后一阶 IMF 分量, 不作单独区分。

1.2 WT 原理

WT 实现信号降噪的过程如下^[19]: 首先选择适当的小波基函数和分解层数对含噪信号进行分解, 得到一系列高频分量和低频分量以及相应的小波分解系数。然后利用阈值处理函数对高频分量的小波分解系数进行处理使其适当减小。最后对低频分量及修正过的高频分量进行小波重构得到降噪后信号。

采用 WT 算法降噪时, 降噪性能受阈值函数、小波基函数及分解层数的影响较大。本文在对布里渊仿真信号进行 WT 降噪的过程中, 通过多次试验发现采用软阈值函数, db6 小波, 对加噪的布里渊信号进行 4 层分解时, 去噪效果最好。故本文选取软阈值函数作为阈值处理函数。

软阈值函数:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - \mu), & |\omega_{j,k}| \geq \mu \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \mu \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\omega_{j,k}$ 表示含噪信号原始小波系数， $\hat{\omega}_{j,k}$ 表示降噪后的小波系数， μ 为阈值。

1.3 CEEMDAN-WT 降噪原理

为了筛选 CEEMDAN 分解后用于信号重构的有效 IMF 分量，引入相关系数作为判据。假设两个信号为 $X(i)$ 和 $Y(i)$ ，它们的相关系数定义为：

$$R = \frac{[X(i) - \bar{X}][Y(i) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum [X(i) - \bar{X}]^2 [Y(i) - \bar{Y}]^2}} \quad (9)$$

当相关系数在 0~0.2 时可认为二者的相关性较弱。参考林丽等^[20]提出的 EMD 改进算法，本文选取 0.1 作为相关系数阈值，当 IMF 分量与分解前信号的相关系数小于 0.1 时，视其为伪 IMF 分量，不参与信号重构。

CEEMDAN-WT 降噪方法原理如图 1 所示，将含噪布里渊单频功率信号进行 CEEMDAN 分解，得到各阶 IMF 分量，计算各阶 IMF 分量与未分解信号的相关系数，将其中的伪 IMF 分量剔除，剩余分量视为包含有用信息的有效 IMF 分量。利用 WT 算法滤除每一个有效 IMF 分量中的高频噪声，将降噪后的有效 IMF 分量进行重构得到最终信号。

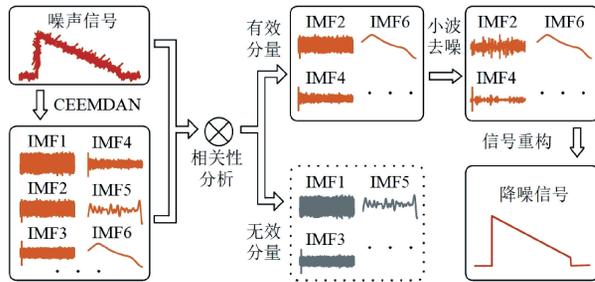


图 1 CEEMDAN-WT 降噪方法示意图

Fig. 1 CEEMDAN-WT noise reduction method

2 仿真降噪研究

为了验证 CEEMDAN-WT 降噪方法在 BOTDA 信号处理中的有效性，构建仿真布里渊单频功率信号进行研究。设置光纤长度为 9 500 m，为模拟实际中半导体光放大器输出光脉冲与采集卡接收到的同步触发信号间存在的时间差，在光纤起始位置设置 200 m 传感盲区。当采集距离大于光纤长度时，又会在光纤末端出现无信号区，故在光纤末端之后再设置 500 m 传感盲区。信号在传输过程中会由于各种因素产生损耗，故设置布里渊信号强度沿线下降。在光纤 8 750~8 950 m 处施加信号强度变化，模拟该处因环境温度改变而导致的布里渊频移变化。

在布里渊单频功率信号中加入高斯白噪声，模拟实际采集过程中存在的随机噪声，构造的布里渊单频功率信号及加噪信号如图 2 所示。

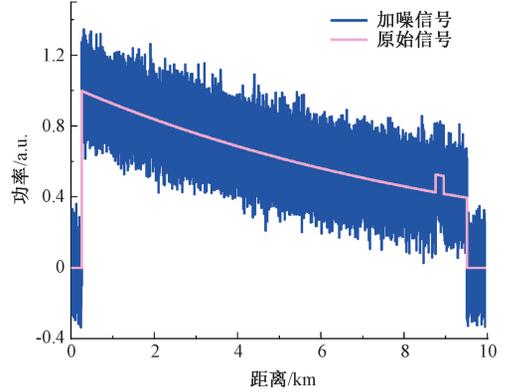


图 2 仿真单频功率信号

Fig. 2 Simulation of single frequency power signal

下面详述本文采用的 CEEMDAN-WT 降噪方法。首先，对加噪的布里渊单频功率信号进行 CEEMDAN 分解，得到的各阶 IMF 分量如图 3 所示。之后，计算 IMF 分量与未分解信号的相关系数，结果如表 1 所示。去掉其中相关性较弱的 1~7 阶分量，对剩余的 IMF 分量进行 WT 降噪，最后对降噪后的有效 IMF 分量进行重构得到降噪信号。为直观对比结果，绘制全部 WT 降噪后的 IMF 分量，如图 4 所示。可以看到 WT 降噪有效地去除了高频 IMF 分量中的噪声，且低频 IMF 分量不会受到影响。

表 1 IMF 分量与仿真信号的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of IMFs and simulation signal

分量	相关系数	分量	相关系数
IMF ₁	0.004 05	IMF ₁₀	0.219 70
IMF ₂	0.056 25	IMF ₁₁	0.205 82
IMF ₃	0.076 88	IMF ₁₂	0.237 59
IMF ₄	0.067 98	IMF ₁₃	0.254 61
IMF ₅	0.090 54	IMF ₁₄	0.259 32
IMF ₆	0.083 58	IMF ₁₅	0.347 42
IMF ₇	0.052 96	IMF ₁₆	0.483 22
IMF ₈	0.156 25	IMF ₁₇	0.471 64
IMF ₉	0.174 05	IMF ₁₈	0.644 00

图 5 为降噪效果对比图，由图 5 可知，使用 CEEMDAN-WT 降噪方法可有效去除随机噪声，该方法结合了 CEEMDAN 分解与 WT 降噪的优势，能够在有效分解信号的同时，最大程度地保留高频 IMF 分量中的有效信息。

在单条布里渊功率信号基础上，基于微波扫频原理按照洛伦兹谱型构建全部加噪的布里渊单频曲线，模拟

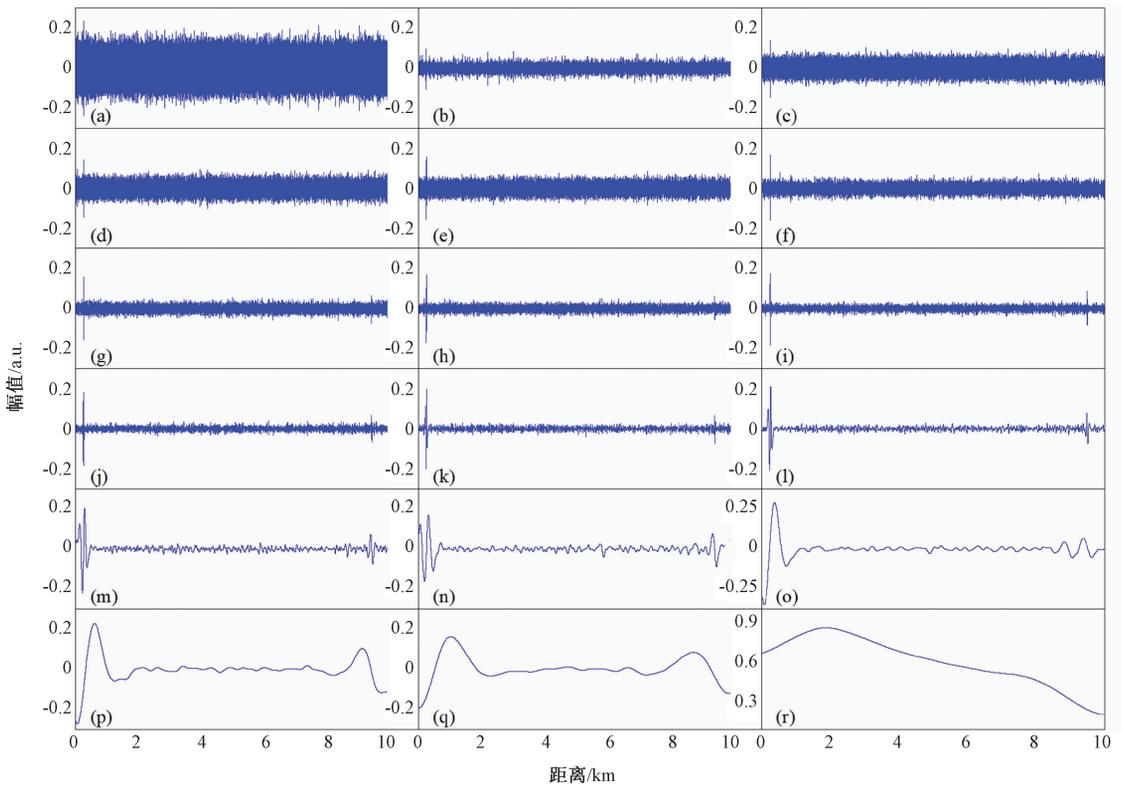


图 3 仿真信号 CEEMDAN 分解图 (a)~(r) 各阶 IMF 分量

Fig. 3 (a)~(r) IMFs from CEEMDAN decomposition of simulation signal

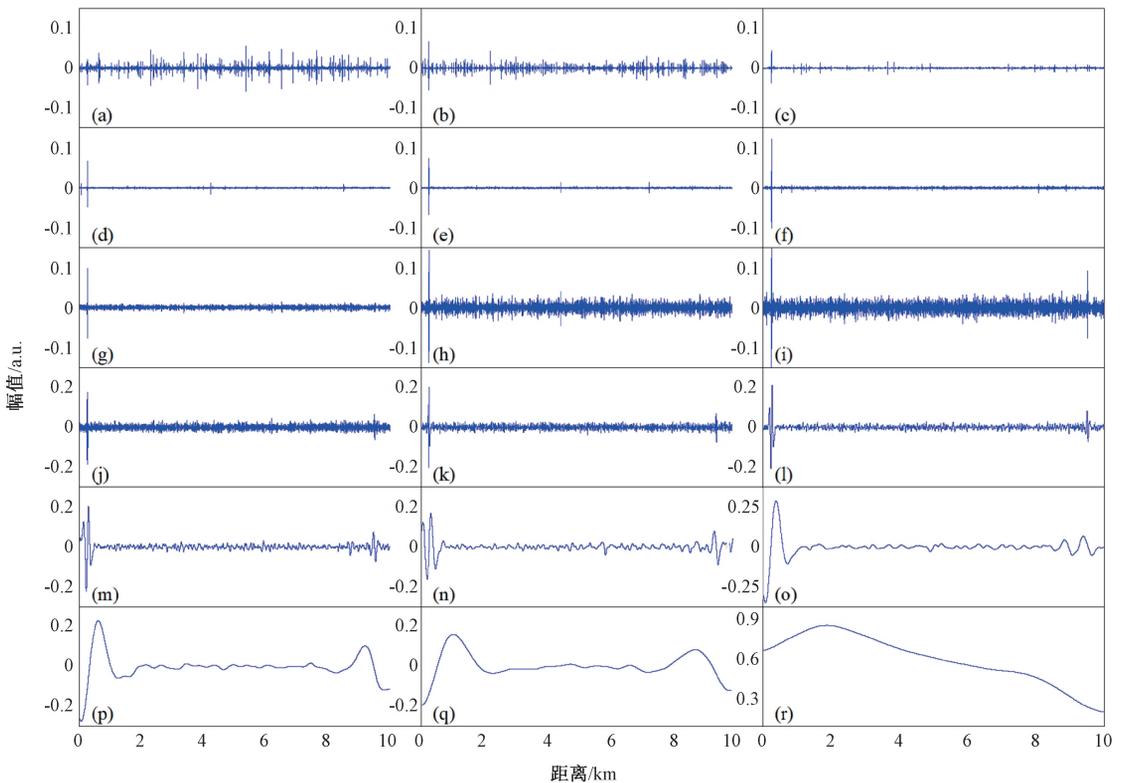


图 4 仿真信号各阶 IMF 分量经小波阈值去噪后结果 (a)~(r) 各阶 IMF 分量

Fig. 4 (a)~(r) IMFs of simulation signal after the wavelet threshold noise reduction

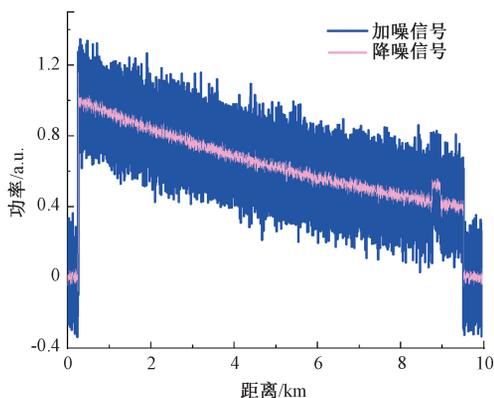


图 5 降噪效果示意图
Fig. 5 Noise reduction effect

实际扫频过程中测量到的全部信号。

设置非变温区光纤 BFS 为 10.70 GHz,变温区光纤 BFS 为 10.74 GHz。对每条加噪布里渊单频曲线分别进行 CEEMDAN-WT 降噪,并对降噪前后的数据分别进行洛伦兹拟合,得到降噪前后的 BFS 分布如图 6 所示。可以看到,降噪后整体的 BFS 波动幅度明显减小。同样,在内嵌图的变温区细节中,也可得知降噪后 BFS 拟合精度明显提高。

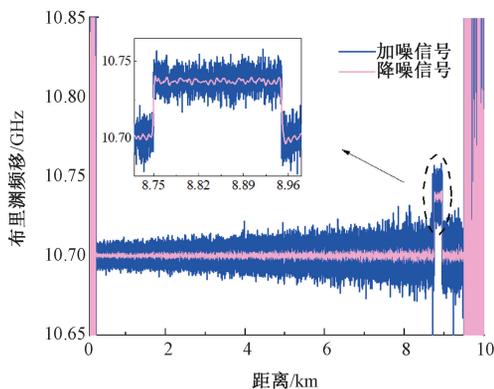


图 6 降噪前后 BFS 仿真曲线
Fig. 6 Simulated BFS distribution before and after noise reduction

3 实验验证

实验所搭建 BOTDA 温度传感系统如图 7 所示,采用中心波长为 1 550 nm,输出功率为 10 mW 的半导体激光器(LD)作为系统光源,其发出的光经 10:90 的耦合器(CPL)分为两路。

光功率 10% 的一路经衰减器 (VOA) 降低到合适功率后,由半导体光放大器(SOA)调制成脉冲光(实验设置脉冲宽度为 30 ns,重复频率为 3 000 Hz),随后经掺铒光

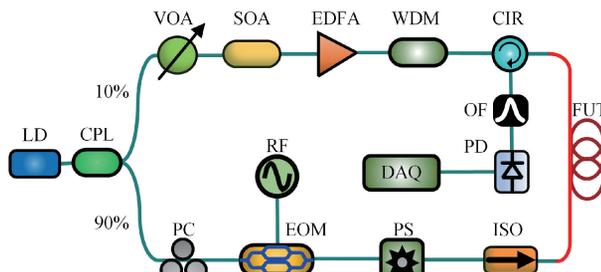


图 7 BOTDA 实验装置图
Fig. 7 BOTDA scheme

纤放大器 (EDFA) 放大,并通过波分复用器 (WDM) 滤除放大的自发辐射噪声后经由环形器 (CIR) 进入待测光纤 (FUT) 的一端。光功率 90% 的一路进入偏振控制器 (PC) 来调整光的偏振态,随后进入电光强度调制器 (EOM) 产生移频的布里渊双带探测光,探测光进入扰偏器 (PS) 调整信号的偏振态后经单向隔离器 (ISO) 进入待测光纤 (FUT) 的另一端。脉冲光和探测光在光纤中发生受激布里渊效应后,放大的探测光从环形器 (CIR) 输出端口输出,之后通过可调谐滤波器 (OF) 滤出所需的斯托克斯布里渊光,光信号经光电探测器 (PD) 输出为电信号,通过数据采集卡 (DAQ) 采集数据。其中 EOM 由微波源 (RF) 驱动产生步进为 2 MHz,范围从 10.750 ~ 10.920 GHz 的扫频信号,数据采集卡采集到 86 组布里渊单频功率信号后,通过洛伦兹拟合可获得光纤沿线的布里渊频移 (BFS) 分布。

图 8 为本次实验所使用的传感光纤,光纤 1 (长度为 30 812 m) 置于室温环境,光纤 2 (长度为 50 m) 置于恒温箱,恒温箱温度设置为 60 ℃,室温约 25 ℃。

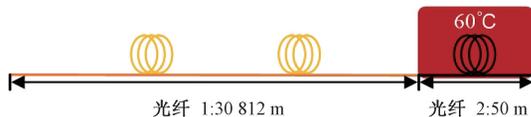


图 8 传感光纤示意图
Fig. 8 Configuration of sensing fiber

首先,选用中心频率为 10.820 GHz 的布里渊单频功率信号来验证本文提出降噪方法的可行性。采集该频率下累加平均 200 次的信号,使用 CEEMDAN 算法对其进行分解,得到各阶 IMF 分量如图 9 所示。计算各阶 IMF 分量与未分解信号的相关系数,结果如表 2 所示。去掉其中 1、2、3、9 阶 IMF 分量,对剩余 IMF 分量通过 WT 降噪后再进行信号重构,降噪前后的布里渊单频功率信号如图 10 所示。可以看到 CEEMDAN-WT 降噪方法对实际采集到的布里渊单频功率信号仍有明显的降噪效果。

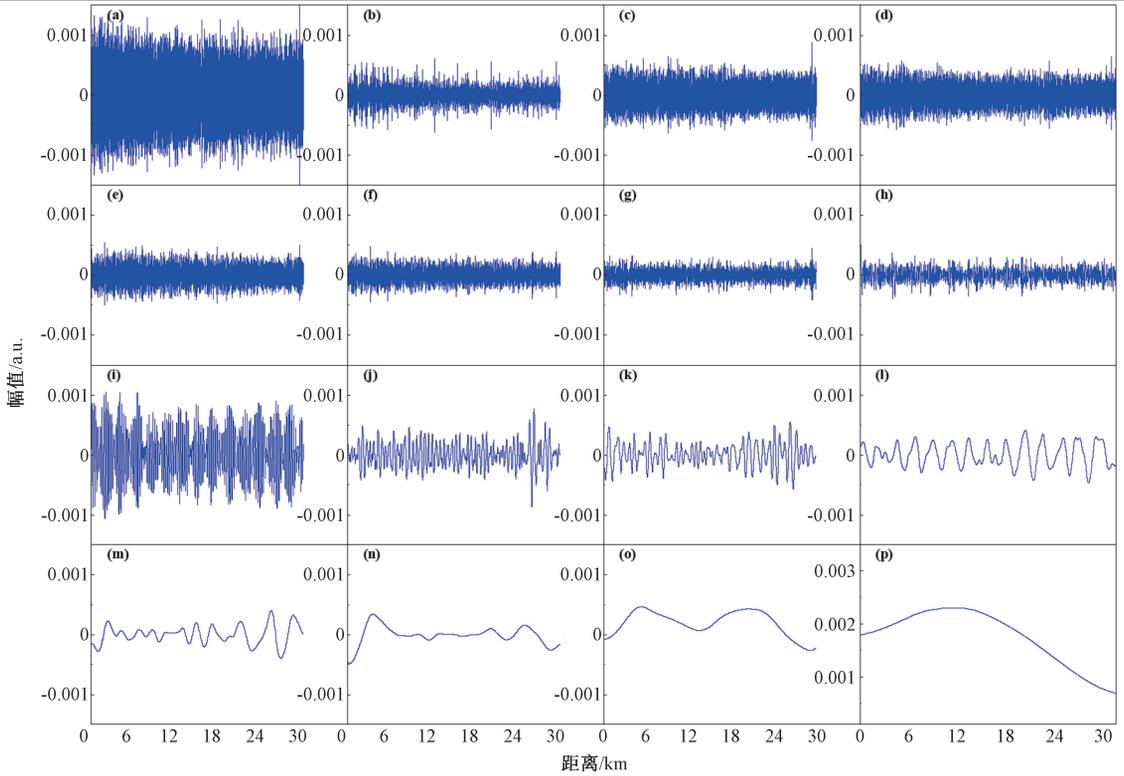


图 9 实验信号 CEEMDAN 分解图 (a)~(p) 各阶 IMF 分量

Fig. 9 (a)~(p) IMFs from CEEMDAN decomposition of experimental signal

表 2 IMF 分量与实验信号的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of IMFs and experimental signal

分量	相关系数	分量	相关系数
IMF ₁	0.067 36	IMF ₉	0.092 56
IMF ₂	0.087 00	IMF ₁₀	0.323 53
IMF ₃	0.097 88	IMF ₁₁	0.281 39
IMF ₄	0.126 15	IMF ₁₂	0.233 78
IMF ₅	0.179 66	IMF ₁₃	0.199 76
IMF ₆	0.140 42	IMF ₁₄	0.347 11
IMF ₇	0.120 20	IMF ₁₅	0.474 04
IMF ₈	0.215 72	IMF ₁₆	0.550 60

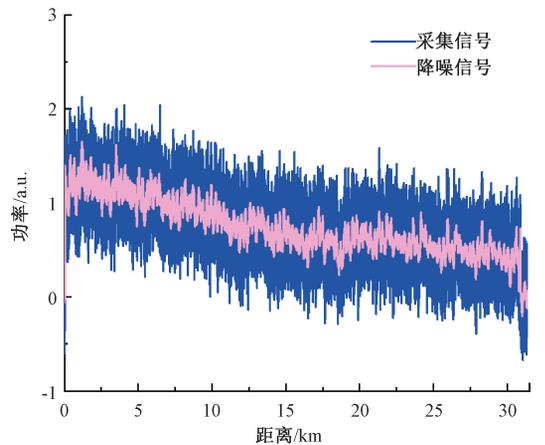


图 10 单频功率信号降噪效果对比图

Fig. 10 Comparison of noise reduction effect of single frequency power signal

之后,对全部采集到的布里渊单频功率信号进行降噪,并对降噪前后数据分别进行洛伦兹拟合获得光纤沿线的布里渊频移分布,如图 11 所示。可以看到未降噪数据拟合得到的 BFS 曲线有较多毛刺,频移拟合结果有较大异常值,BFS 波动较大。

图 11 内嵌图为变温区降噪前后的 BFS 分布,从图中可以看出,实测的传感空间分辨率为 3 m,与理论一致(脉冲宽度 30 ns)。计算变温区降噪前后的 BFS 波动极差及 RMSE(root mean square error),结果如图 12 所示,降噪后变温区的 BFS 波动极差由 6.1 MHz 降低至

1.8 MHz, RMSE 由 1.17 MHz 降低至 0.18 MHz,降噪后 BFS 拟合精度明显提高。此外,信噪比 SNR 是评估降噪效果的常用标准,其值为信号功率与噪声功率之比,而在实际测量过程中,真实信号的功率是未知的。

故定义降噪后信噪比提升 SNR_{I_m} 为:

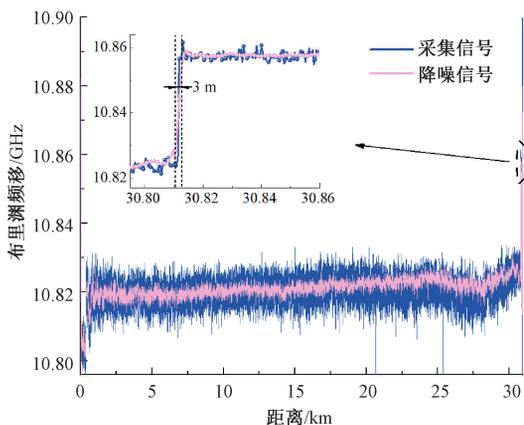


图 11 降噪前后 BFS 分布

Fig. 11 BFS distribution before and after noise reduction

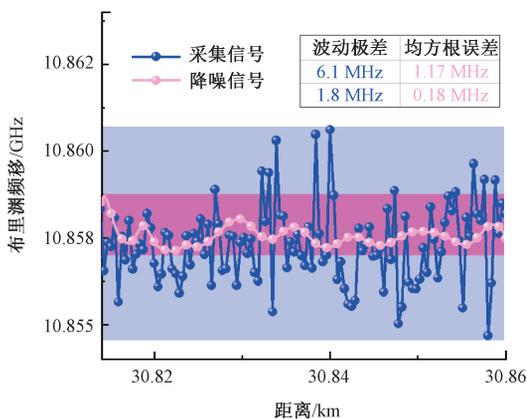


图 12 变温区降噪前后 BFS 分布

Fig. 12 BFS distribution before and after noise reduction in the temperature change area

$$SNR_{Im} = SNR_{Af} - SNR_{Be} =$$

$$10\lg \frac{P_S}{P_{N-Af}} - 10\lg \frac{P_S}{P_{N-Be}} = 10\lg \frac{P_{N-Be}}{P_{N-Af}} \quad (10)$$

式中: SNR_{Be} 与 SNR_{Af} 表示降噪前后信噪比, P_S 与 P_N 表示真实信号功率与噪声功率, P_{N-Be} 与 P_{N-Af} 表示降噪前后的噪声功率, 常用降噪前后拟合得到 BFS 值的 RMSE 来评估。由式(10)可知, SNR_{Im} 求解过程中, 无需得知 P_S 的值, 避免了实际测量中真实信号功率难以确定的问题。计算变温区的信噪比提升 SNR_{Im} , 可得降噪后传感光纤末端的信噪比提升了 8.12 dB。

非变温区降噪前后 BFS 的 RMSE 分布如图 13 所示。由图可知, 降噪后的 RMSE 明显减小, 光纤沿线信噪比均得到有效提升。

为进一步验证本文提出方法的有效性, 在 30、20、10 km 的传感距离下分别进行脉冲宽度为 20、30、40 ns 的温度测量对照实验, 光纤末端 50 m 置于 60 °C 的恒温箱中,

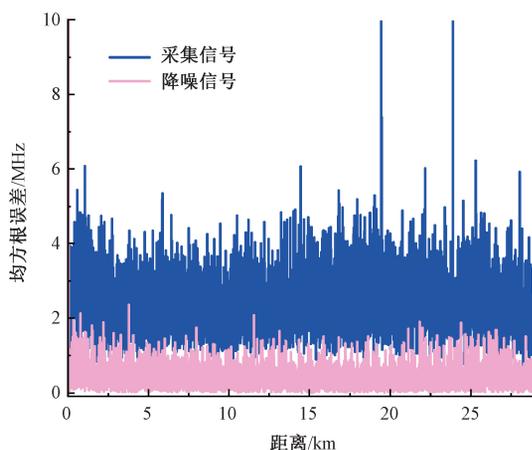


图 13 降噪前后 RMSE 分布

Fig. 13 RMSE distribution before and after noise reduction

得到各组实验降噪前后光纤沿线的 BFS 分布如图 14 所示。由式(10)计算光纤末端的信噪比提升 SNR_{Im} , 结果如表 3 所示。可以看到, 在不同的实验条件下, CEEMDAN-WT 方法均可使 BOTDA 系统信噪比得到有效提升。

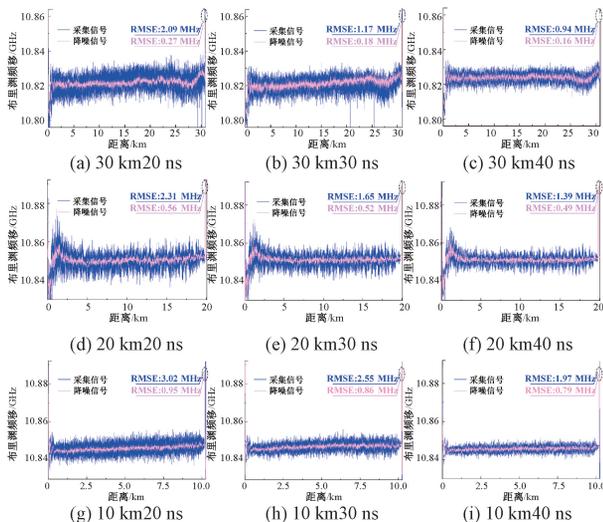


图 14 不同实验条件下的降噪前后 BFS 分布

Fig. 14 BFS distribution before and after noise reduction

表 3 不同实验条件下 CEEMDAN-WT 方法降噪后信噪比提升

Table 3 SNR_{Im} after noise reduction by CEEMDAN-WT method under different experimental conditions

脉冲宽度	传感距离/km		
	10	20	30
20 ns	5.02 dB	6.15 dB	8.89 dB
30 ns	4.72 dB	5.01 dB	8.12 dB
40 ns	3.96 dB	4.52 dB	7.69 dB

表 4 给出了近年来提出的几种 BOTDA 降噪算法性能对比,可见多种降噪算法在传感距离、空间分辨率和信噪比提升等方面各有优劣。其中,在测量距离为 30 km、空间分辨率为 2 m 时,本文所提出 CEEMDAN-WT 降噪算法可将光纤末端信噪比提升 8.89 dB,为 BOTDA 系统信噪比提升提供了一种新思路。

表 4 BOTDA 信噪比提升方法性能对比

Table 4 Performance comparison of BOTDA SNR improvement methods

时间	方法	传感距离/km	空间分辨率/m	信噪比提升
2020	EMD-FIR 算法 ^[13]	6	11	11.69 dB
2021	双对抗网络 (DANet) ^[21]	11.5	10	19.08 dB
2021	优化 LMD 算法 ^[22]	23	10	平均大于 10 dB
2022	基于压缩感知的优化方法 ^[23]	45	20	6.374 dB
2022	CEEMDAN-WT	30	2	8.89 dB

4 结 论

本文提出将 CEEMDAN-WT 降噪方法用于 BOTDA 系统。具体为,采用 CEEMDAN 算法对布里渊单频功率信号进行分解,利用相关系数筛选出有效 IMF 分量,通过 WT 算法进一步滤除有效 IMF 分量中的高频噪声后进行信号重构。首先,构造仿真布里渊信号模型来验证算法的有效性。仿真结果表明,CEEMDAN-WT 降噪方法对加噪单频功率信号中的随机噪声有很好的抑制效果,降噪后 BFS 的拟合精度明显提高。其次,搭建了 BOTDA 温度测量系统,在 30、20、10 km 的传感距离下分别进行脉冲宽度为 20、30、40 ns 的温度测量对照实验,对累加平均 200 次的单频功率信号进行 CEEMDAN-WT 降噪处理。实验结果表明,在 2 m 的传感空间分辨率下,降噪后 30 km 末端变温区 BFS 均方根误差 RMSE 由 2.09 MHz 降低至 0.27 MHz,光纤末端信噪比提升了 8.89 dB。

参考文献

[1] YANG Z S, HONG X B, WU J, et al. Theoretical and experimental investigation of an 82-km-long distributed Brillouin fiber sensor based on double sideband modulated probe wave [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(12): 124402.

[2] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展 [J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 158-176.

RAO Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7):

158-176.

[3] LI W H, BAO X Y, LI Y, et al. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616-21625.

[4] DONG Y K, ZHANG H Y, CHEN L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1229-1235.

[5] THEVENAZ L. Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: State of the art and perspectives [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2010, 3(1): 13-21.

[6] 周会娟, 廖毅, 孟洲. 基于布里渊散射的分布式光纤传感技术 [J]. *光学技术*, 2008, 101: 251-253.

ZHOU H J, LIAO Y, MENG ZH. Distributed optical fiber sensing based on Brillouin scattering [J]. *Optical Technique*, 2008, 101: 251-253.

[7] REN C, ZHANG S L. Abnormal intensity noises of LD-pumped microchip Nd: YAG laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 609-613.

[8] 解光勇. 光电探测器噪声特性分析 [J]. *信息技术*, 2008, 11: 8-10.

XIE G Y. Noise analysis for optoelectronic detector [J]. *Information Technology*, 2008, 11: 8-10.

[9] BERNINI R, MINARD A, ZENI L. Long-range distributed Brillouin fiber sensors by use of an unbalanced double sideband probe [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23845-23856.

[10] FARAHANI M A, WYLIE M T V, CASTILLO-GUERRA E, et al. Reduction in the number of averages required in BOTDA sensors using wavelet denoising techniques [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1134-1142.

[11] SOTO M A, RAMRIEZ J A, THEVENAZ L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10870.

[12] 李永倩, 王健健. 布里渊散射谱图像的边缘特征提取方法 [J]. *光通信技术*, 2021, 45(3): 37-41.

LI Y Q, WANG J J. Edge feature extraction method of Brillouin scattering spectral image [J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(3): 37-41.

[13] ZHAO J R, WANG T, ZHANG Q, et al. Signal-to-noise ratio improvement of Brillouin optical time domain analysis system based on empirical mode decomposition and finite impulse response [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(14): 4220-4227.

[14] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode

- decomposition with adaptive noise [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2011: 4144-4147.
- [15] 刘起超, 周云龙, 陈聪. 基于 CEEMDAN 和概率神经网络的起伏振动气液两相流型识别[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 84-93.
LIU Q CH, ZHOU Y L, CHEN C. Flow pattern identification of fluctuating vibration gas liquid two phase flow based on CEEMDAN and probabilistic neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 84-93.
- [16] 赵小惠, 张梦洋, 石杨斌, 等. 改进 CEEMDAN 算法的电机轴承振动信号降噪分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 159-164.
ZHAO X H, ZHANG M Y, SHI Y B, et al. Noise reduction analysis of motor bearing vibration signal based on improved CEEMDAN algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 159-164.
- [17] 张慧, 孟克其劳, 张占强, 等. 基于 CEEMDAN 和 HHT 的谐波检测方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(6): 83-87.
ZHANG H, MENG K Q L, ZHANG ZH Q, et al. Harmonic detection method based on CEEMDAN and HHT[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(6): 83-87.
- [18] 张震, 刘明萍, 张镇涛, 等. 基于 CEEMDAN 和小波软阈值的电能质量扰动信号去噪新方法[J]. 现代电子技术, 2021, 44(18): 63-68.
ZHANG ZH, LIU M P, ZHANG ZH T, et al. A new method for power quality disturbance signal denoising based on CEEMDAN and wavelet soft threshold [J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(18): 63-68.
- [19] 谢丽娟, 路锋, 王旭, 等. 一种用于信号去噪的小波阈值去噪算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4): 32-36.
XIE L J, LU F, WANG X, et al. Wavelet threshold denoising algorithm for signal denoising [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(4): 32-36.
- [20] 林丽, 余轮. 基于相关系数的 EMD 改进算法[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(12): 28-29.
LIN L, YU L. Improvement on empirical mode decomposition based on correlation coefficient [J]. Computer & Digital Engineering, 2008, 36(12): 28-29.
- [21] LIU J Y, WANG T, ZHANG Q, et al. Rapid noise removal based dual adversarial network for the Brillouin optical time domain analyzer[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34002-34014.
- [22] 张倩, 王涛, 赵婕茹, 等. 基于局部均值分解的布里渊光时域分析传感系统降噪算法[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 78-86.
ZHANG Q, WANG T, ZHAO J R, et al. Denoising algorithm for brillouin optical time-domain analysis sensing systems based on local mean decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 78-86.
- [23] 尚秋峰, 李雪丽, 管帅. 基于压缩感知的 BOTDA 性能增强方法[J]. 半导体光电, 2022, 43(4): 672-676.
SHNAG Q F, LI X L, GUAN SH. Performance enhancement method of BOTDA based on compressed sensing [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 672-676.

作者简介



杨瑞, 2020 年于太原理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: yr_tyut@163.com

Yang Rui received her B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2020. Now she is a M. Sc candidate in Taiyuan University of Technology. Her main research interest includes fiber optic sensors.



李维勤, 2020 年于西安邮电大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: xkx519657@163.com

Li Weiqin received his B. Sc. degree from Xi'an University of Posts & Telecommunications in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



靳宝全 (通信作者), 2010 年于太原理工大学获得博士学位, 现为太原理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: jinbaoquan@tyut.edu.cn

Jin Baoquan (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2010 from Taiyuan University of Technology. Now he is a professor and Ph. D. tutor in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes optical fiber sensors.