光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023120101

基于经验模态分解的单端 BOTDA 系统降噪方法研究

张立欣[1,2,3]，刘紫娟[1*]，康清华[1]，王　磊[1]，李永倩[1,2,3]

（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： 针对单端布里渊光时域分析（BOTDA）系统存在噪声大、信噪比较低等不足，提出一种基于经验模态分解的降噪方法。理论分析经验模态分解的降噪原理和少模光纤单端布里渊光时域分析传感原理，通过搭建的单端结构布里渊光时域分析温度传感系统，对经验模态分解的降噪效果进行对比分析。实验和仿真结果表明，经验模态分解算法对温度传感系统具有良好的降噪效果，降噪后信噪比提升了约 3.06 dB，温度测量精度提升了约 0.98 ℃。

关键词： 布里渊光时域分析；经验模态分解；温度传感；降噪方法

中图分类号： TN212　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0336－05

Denoising Method for Single-Ended BOTDA System Based on Empirical Mode Decomposition

ZHANG Lixin[1,2,3], LIU Zijuan[1], KANG Qinghua[1], WANG Lei[1], LI Yongqian[1,2,3]

(1. Dept. of Electronic and Communication Engin.; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technol.; 3. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technol., North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: To address the problems of high noise and low signal-to-noise ratio in single-ended Brillouin optical time-domain analysis systems, a denoising method based on empirical mode decomposition (EMD) was developed. Theoretical analyses of the denoising principle of EMD and the sensing principle of single-ended Brillouin optical time-domain analysis in a few-mode optical fiber were conducted. The denoising effect of EMD was comparatively analyzed by constructing a single-ended Brillouin optical time-domain analysis temperature-sensing system. The experimental and simulation results show that the EMD algorithm exhibited a good denoising effect on the temperature sensing system and that it improved the signal-to-noise ratio and temperature measurement accuracy by approximately 3.06 dB and 0.98 ℃, respectively.

Key words: Brillouin optical time domain analysis; empirical mode decomposition; temperature sensing; denoising method

0　引言

基于布里渊光时域分析（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）的分布式光纤传感技术[1]可测量温度、应变、振动等参量并能实现长距离的连续监测，且具有较高的空间分辨率和测量精度，在电力、石油、航空及大型结构的健康状态监测等方面具有广阔的应用前景[2-3]。BOTDA 传感技术主要包括双端型和单端型两种主要结构，双端型 BOTDA[4]需从传感光纤两端相向入射探测光和泵浦光，在实际工程应用中存在系统结构复杂、应用不便等问题。相较于双端型 BOTDA，单端型 BOTDA[5]在光纤发生断裂时仍具有检测能力，单端工作方式的特点使其在实际工程中应用更为方便。

收稿日期：2023－12－01.
基金项目：国家自然科学基金项目(62205105，52177141)；中央高校基本科研业务费专项基金项目(2022MS079)；河北省省级科技计划项目(平台编号：SZX2020034).
* **通信作者：**刘紫娟

由于单端 BOTDA 系统的探测信号小、噪声大，随着传感距离的增加，信噪比（Signal-Noise Ratio，SNR）的降低会导致测量精度下降。少模光纤（Few-Mode Fiber，FMF）作为一种区别于普通单模光纤的新型光纤被应用于分布式温度测量中，其可传输有限个正交模式，可以实现温度、应变、弯曲等传感测量，并可以克服多参数交叉敏感问题，具有多参量同时测量的潜力[6]；但由于受少模光纤中模式内或模式间相互作用的受激布里渊散射（Stimulated Brillouin Scattering，SBS）的影响，其探测难度远大于普通单模光纤。

传统的降噪方法主要通过提高信号采集过程中被测信号的平均次数的方式来实现，但叠加平均次数对 SNR 提升效果有限且耗时较长，因此研究单端 BOTDA 系统的降噪方法十分重要。Farahani 等[7]提出一种基于自适应线性预测的方法来对 BOTDA 信号进行去噪；Soto 团队[8]利用二维、三维图像重构来消除 BOTDA 的系统噪声，使信噪比分别提高 15.6 和 22.1 dB。之后研究者们提出基于经验模态-有限冲击响应滤波[9]、局部均值分解[10]及优化变分模态[11]的降噪算法。此外还有利用小波去噪[12]和 Kuwahara 滤波算法[13]提升信噪比的方法。

本文基于少模光纤单端 BOTDA 传感系统，提出一种利用经验模态分解（Empirical Mode Decomposition，EMD）的降噪方法，探索提升信噪比和测量精度的方法，经 EMD 算法降噪后信噪比提升了约 3.06 dB，温度测量精度提升了约 0.98 ℃。

1　基于 EMD 的单端 BOTDA 系统降噪原理

1.1　EMD 降噪原理

EMD 算法是一种自适应的时频分析方法[14]，通过分解非平稳信号，将其分为多个本征模态函数（Intrinsic Mode Function，IMF），不同时间维度上的局部特征都被包含在 IMF 分量中。每个 IMF 分解成包络信号和纯调频信号，对纯调频信号和包络信号求解可得到瞬时频率和瞬时幅值。EMD 算法的分解步骤如下：

（1）$x(t)$ 表示原始序列，求出 $x(t)$ 对应的所有极大值点，采用样条插值法求得上包络线 $e_+(t)$；同理，求出 $x(t)$ 对应的所有极小值点，并求得下包络线 $e_-(t)$。

（2）求上、下包络线的均值 $u(t)$，即：

$$u(t)=\frac{e_+(t)+e_-(t)}{2} \tag{1}$$

（3）将均值 $u(t)$ 从原始序列 $x(t)$ 中分离出来，得到差值 $y(t)$：

$$y(t)=x(t)-u(t) \tag{2}$$

检验得到的差值 $y(t)$ 是否满足：①每个 IMF 分量所对应的零点以及极点的个数相等或都等于 1；②在任意时间点上由局部极大、极小值拟合得到上、下包络线的平均等于 0。若 $y(t)$ 满足要求，则 $y(t)$ 是第一个 IMF，记为 IMF_1；若不满足要求，则令 $y(t)=x(t)$，返回第一步反复迭代，直到 $y(t)$ 达到要求。设置标准差（SD）为筛选终止条件：

$$SD=\sum_{i=1}^{k}\frac{|y_{i-1}(t)-y(t)|^2}{y_{i-1}^2(t)} \tag{3}$$

当 SD 处于 0.2 和 0.3 之间时，停止筛选。

（4）若 $y(t)$ 表示第一个 IMF 分量，继续得到分解的第二个 IMF，直到残余分量 $RES(t)$ 为常数时或者是单调函数时停止。经过一系列的分解过程，可以表示为：

$$x(t)=\sum_{i=1}^{k}IMF_i(t)+RES(t) \tag{4}$$

式中，k 为经过 EMD 分解后得到 IMF 分量的序号，$RES(t)$ 为分解后的残余分量。

1.2　少模光纤单端 BOTDA 传感原理

基于少模光纤的单端 BOTDA 传感系统原理图如图 1 所示。从传感光纤的一端同时入射连续光和脉冲光，二者同时进入传感光纤。在传感光纤中，以连续光在光纤尾端产生的菲涅尔反射光为探测光，脉冲光为泵浦光。当二者之间的光频率差等于布里渊频移 $\nu_B=\nu_P-\nu_F$ 时，二者发生 SBS 作用，对经过 SBS 作用后的探测光进行检测，则可以得到分布式的待测信息。

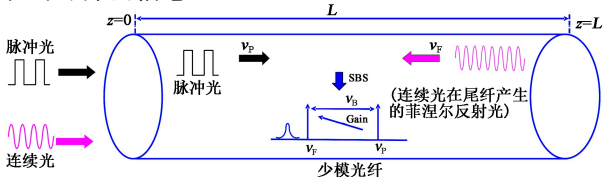


图 1　基于菲涅尔反射的单端 BOTDA 系统原理图

少模光纤芯径大、阈值高、传输有限个模式，当光波耦合进入 FMF 中时，不同模式下的光波信号会形成不同的布里渊散射谱。对于 FMF 而言，由于不同模式下的散射角不同，不同模式下 FMF 中布里渊频移（Brillouin Frequency Shift，BFS）可表

示为：

$$\nu_B = \frac{2n_f V_A}{\lambda_p}\cos(\theta_f/2) \tag{5}$$

式中，n_f 为各个模式下的有效折射率，θ_f 为各个模式下的散射角。

当频率为布里渊频移时，FMF 的布里渊散射谱达到峰值，此时有：

$$g_{0(f)} = \frac{2\pi^2 n_f^7 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 \rho V_A \Delta\nu_B} \tag{6}$$

式中，$\Delta\nu_B$ 为 FMF 中布里渊散射谱的谱宽。

通过对少模光纤与单模光纤的布里渊散射谱进行仿真，可以获得如图 2 所示的布里渊散射谱。由图可知，由于 FMF 中不同模式下光入射角不同，且多种模式之间相互作用，其布里渊散射谱峰值降低、谱宽展宽。相较于单模光纤，少模光纤的布里渊散射信号小、信噪比较低，因此需要利用降噪处理来提升系统信噪比。

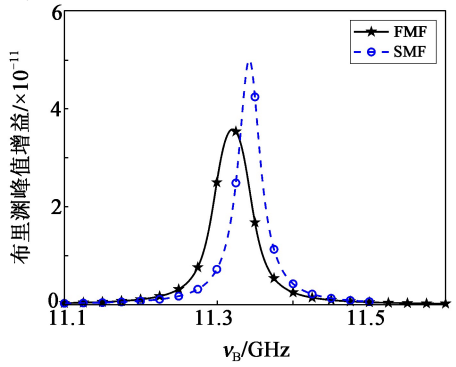


图 2 少模光纤与单模光纤的布里渊散射谱

2 实验系统搭建及降噪结果分析

2.1 少模光纤单端 BOTDA 传感系统的搭建

采用如图 3 所示的少模光纤单端 BOTDA 温度传感实验系统对阶跃两模光纤进行温度传感实验。实验系统选用 EXFO 的线宽为 100 kHz 的窄线宽激光器，输出的光信号在经过分光比为 50∶50 的保偏耦合器(PMC)后被分为上下两个支路，上支路光信号进入由任意波形函数发生器(AFG)驱动的电光调制器(EOM1)进行脉冲调制，后经掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大，并由光纤布拉格光栅(FBG1)来滤除自发辐射噪声；下支路由微波源(MG)驱动 EOM2 生成抑制载波的双边带信号，经铒镱共掺光纤放大器(EYDFA)放大后由 FBG2 滤除自发辐射噪声和反斯托克斯(Stokes)光。两路光信号经耦合器合成并经扰偏器(PS)降低偏振衰落噪声后进入阶跃两模光纤(SI-2-FMF)。将微波调制连续光在光纤尾端产生的菲涅尔反射光作为探测光与脉冲泵浦光在 SI-2-FMF 中发生 SBS 作用，然后经光纤布拉格光栅(FBG3)滤波后保留斯托克斯光连接光电探测器(PD)，PD 对携带 SBS 作用的光信号直接检测并由示波器(OSC)进行采集和显示。

实验采用的传感光纤为 SI-2-FMF，标准长度为 1 km，分别由约 650，50，300 m 的三段 SI-2-FMF 构成，其中将 50 m 光纤置于水浴锅中进行温度控制。在本实验系统中，将待测两模光纤与单模环形器利用法兰盘拼接，光纤中可以稳定传输 LP_{01}，LP_{11a}，LP_{11b} 三种模式。传感脉冲宽度设置为 50 ns、周期为 12 μs，采用入纤脉冲光 3 mW，入纤连续光 1.6 mW，将微波源频率从 10.765 GHz 扫描到 10.865 GHz，扫描步长为 5 MHz。将 SI-2-FMF 呈自然松散状态置于室温中，室温恒定在 26 ℃；将其中 50 m 长 SI-2-FMF 放入恒温水浴锅中进行加热，温度保持在 50 ℃，每次测量进行 5 000 次叠加平均，重复三次实验内容。

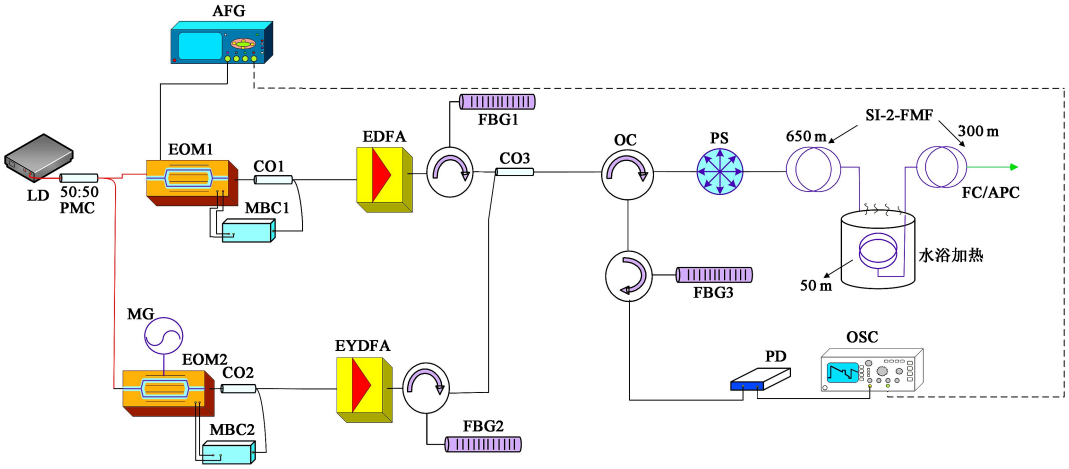


图 3 基于阶跃两模光纤的单端 BOTDA 传感系统

在加温段为 50 ℃下测得 SI-2-FMF 的三维布里渊散射图如图 4 所示，可以看出时域信号的波动和噪声较大，会影响测量精度。

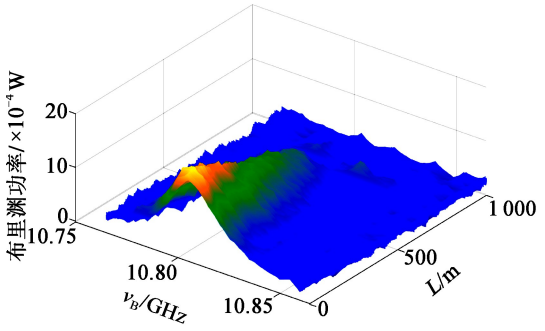


图 4　SI-2-FMF 三维布里渊散射图

对加温段约 685 m 位置处的数据做洛伦兹拟合，可得到如图 5 所示的布里渊散射谱，拟合得到加温段的 BFS 约为 10.832 GHz，均方根误差为 $\sigma^2=0.007\ 55$，由此求得信噪比 $R_{SNR}=21.22$ dB。根据布里渊频移测量精度公式，计算得到 $\Delta\nu_B$ 约为 7.11 MHz，SI-2-FMF 的温度系数为 1.2 MHz/℃，进一步求得温度测量精度 δT 约为 5.93 ℃。

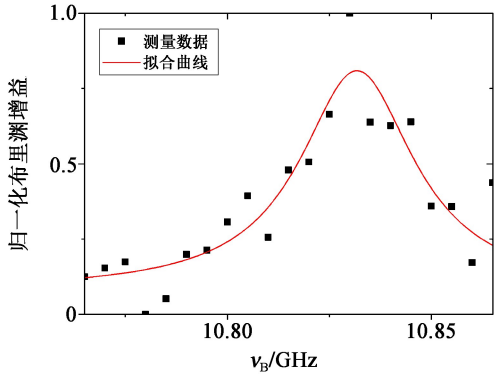


图 5　加温段 685 m 处的布里渊散射谱

2.2　EMD 算法的降噪结果分析

对频率为 10.80 GHz 下的传感信号进行 EMD 分解，得到 8 阶 IMF 分量（IMF1～IMF8）和一个残余趋势项（RES），如图 6 所示。由图可知，随着分解 IMF 分量的阶数增加，分解得到信号中含有的噪声信息也逐渐减少，有效分量逐渐增多。噪声信号主要分布在低阶 IMF 分量，分解得到的各阶 IMF 分量中 IMF1，IMF2 包含的噪声信号较大，分量 RES 为经过 EMD 分解得到的残余趋势项，该分量表示原始信号是一个呈逐渐下降的趋势。对分解出来的 IMF 分量进行降噪处理，去除原始序列中的噪声分量，保留有效信号分量，最后对降噪后的 IMF 分量和残差趋势项进行重构就得到降噪后的时域信号，如图 7 所示。

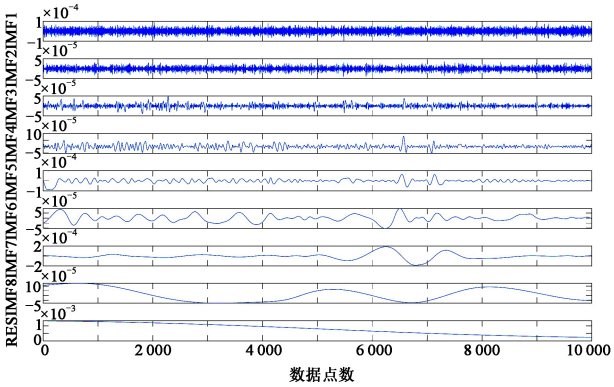


图 6　EMD 分解后的各阶 IMF 分量

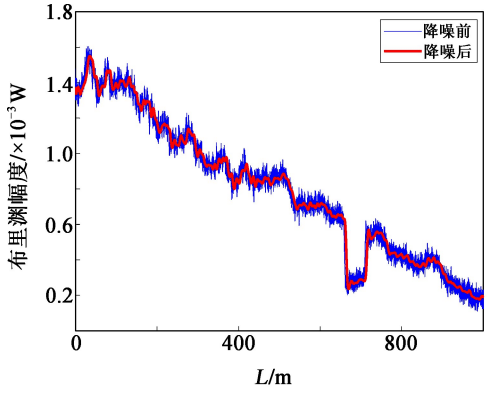
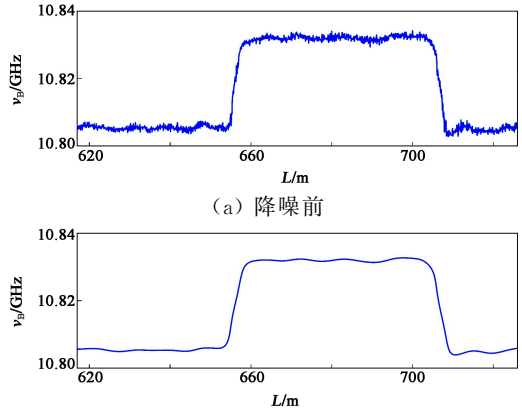


图 7　EMD 降噪前后信号对比

对比图 7 中降噪前后的时域曲线图可以发现，经过 EMD 算法降噪后曲线的噪声明显减少。将加温段约 685 m 位置处的数据做洛伦兹拟合，得到的均方根误差为 $\sigma^2=0.003\ 73$，由此求得信噪比 $R_{SNR}=24.28$ dB。根据布里渊频移测量精度公式，计算得到 $\Delta\nu_B$ 约为 5.94 MHz，温度测量精度 δT 约为 4.95 ℃。

将 617～726 m 范围内的信号进行洛伦兹拟合可以获得如图 8 所示的降噪前后的布里渊频移分布，可以看出经EMD降噪后的BFS的波动远小于



（a）降噪前

（b）降噪后

图 8　617～726 m 范围内降噪前后的布里渊频移分布

降噪前的波动情况。通过计算加温区降噪前后的信噪比,可以得到,经 EMD 降噪后信噪比提升了约 3.06 dB,温度测量精度提升了约 0.98 ℃。

3 结论

本文基于少模光纤单端 BOTDA 温度传感系统,针对单端 BOTDA 系统存在的信号小、噪声大、信噪比较低的问题,提出了利用 EMD 算法进行降噪的方法。EMD 算法可将信号分解为多个 IMF 分量,通过对 IMF 分量和 RES 分量进行重构可以得到降噪后的传感信号。利用搭建的少模光纤单端结构布里渊光时域分析温度传感系统,对温度传感信号进行 EMD 降噪前后的结果对比分析。实验数据和仿真结果表明,EMD 算法对温度传感系统具有良好的降噪效果,降噪后信噪比提升了约 3.06 dB,温度测量精度提升了约 0.98 ℃。该研究有效提升了少模光纤单端 BOTDA 温度传感系统的信噪比和测量精度,为后续实现高性能的多参量传感提供了理论和实验依据。

参考文献:

[1] Qi D, Guan X, Cheng Y S, et al. Peak-tracking BOTDA with dynamic ternary search[J]. Opt. Express, 2023, 31(20): 31946-31954.

[2] Zhang M M, Wei W L, Li W H, et al. Endogenous BOTDA in the self-homodyne coherent detection transmission system for communication-integrated datacenter temperature monitoring[J]. Opt. Lett., 2023, 48(18): 4749-4752.

[3] Li Z L, Zhou Y, Hua Z X, et al. Balanced detection for performance enhancement in a pulse-coded Brillouin optical time domain analyzer[J]. IEEE Sens. J., 2023, 23(2): 1166-1171.

[4] Xu P B, Guo H P, Wang X L, et al. Ring-core few-mode fiber and DPP-BOTDA-based distributed large-curvature sensing eligible for shape reconstruction[J]. Opt. Express, 2022, 30(23): 42553-42563.

[5] Cui Q S, Pamukcu S, Lin A X, et al. Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA[J]. IEEE Sens. J., 2011, 11(2): 399-403.

[6] Li A, Wang Y F, Fang J, et al. Few-mode fiber multi-parameter sensor with distributed temperature and strain discrimination[J]. Opt. Lett., 2015, 40(7): 1488-1491.

[7] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. Acceleration of measurements in BOTDA sensors using adaptive linear prediction[J]. IEEE Sens. J., 2013, 13(1): 263-272.

[8] Soto M A, Ramírez J A, Luc T. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. Nat. Commun., 2016, 7: 10870.

[9] 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]. Appl. Opt., 2020, 59(14): 4220-4227.

[10] 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 Qian, Wang Tao, Zhao Jieru, et al. Denoising algorithm for Brillouin in optical time-domain analysis sensing systems based on local mean decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 78-86.

[11] 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 noise reduction method of vibration signal in submarine cable monitoring system based on BOTDA[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 760-766.

[12] Qian X, Wang Z, Sun W, et al. Long-range BOTDA denoising with multi-threshold 2D discrete wavelet[C]// Asia-Pacific Optical Sensors Conference, 2016: W4A.24.

[13] 孟彦杰, 查剑锋. Kuwahara 滤波在布里渊光时域分析传感图像去噪中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 126-132.
Meng Yanjie, Zha Jianfeng. Application of Kuwahara filter in Brillouin optical time-domain analysis sensing image denoising[J]. Laser Optoelectron. Prog., 2018, 55(7): 126-132.

[14] 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]. Appl. Opt., 2020, 59(14): 4220-4227.

作者简介:

张立欣(1989—),女,河北省石家庄市人,工学博士,主要从事分布式光纤传感及其在电力系统中应用方向的研究。