DOI:10.16136/j.joel. 2022.03.0475

一种基于 CEEMDAN-改进小波阈值的 OTDR 信号去噪算法

罗惠中1,刘偲嘉2,甘育娇2,李 妮1,姜海明1*,朱铮涛1,谢 康1

(1. 广东工业大学 机电工程学院,广东 广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司,广东 广州 510600)

摘要:为了解决光时域反射仪(optical time domain reflectometer,OTDR)中背向散射信号受噪声干扰严重问题,本文提出了一种基于自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,CEEMDAN)和改进小波阈值的OTDR信号去噪算法,利用CEEMDAN分解算法具有的抗模态混叠现象和降低重构误差等优点,将信号分解为若干IMF分量,根据相关系数的分析方法,找到噪声占主导的本征模态函数(intrinsic mode function,IMF)分量和信号占主导的IMF分量的临界点,去除噪声占主导的IMF分量,并将改进的小波阈值去噪方法对信号占主导的IMF分量进行去噪,最后重构信号。结果表明,本文提出的方法与传统的硬阈值方法、CEEMDAN-硬阈值方法和改进的小波阈值方法相比,能更好地抑制噪声,并达到更好的去噪效果,突显OTDR事件特征,更易于事件的检测。

关键词:(optical time domain reflectometer,OTDR);(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,CEEMDAN);小波阈值去噪;相关系数

中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)03-0241-07

An OTDR signal denoising algorithm based on CEEMDAN-improved wavelet threshold

LUO Huizhong¹ , LIU Sijia² , GAN Yujiao² , LI Ni¹ , JIANG Haiming^{1*} , ZHU Zhengtao¹ , XIE Kang¹

School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;
 Guangzhou Water Supply Limited Company, Guangzhou, Guangdong 510600, China)

Abstract: In order to solve the problem that the backscattered signal is seriously disturbed by noise in an optical time domain reflectometer (OTDR), this work proposes an OTDR signal denoising algorithm based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) improved wavelet threshold. By using the CEEMDAN decomposition algorithm to resist modal aliasing and reduce reconstruction errors, the signal is decomposed into several intrinsic mode function (IMF) components. On the basis of the analysis method of the correlation coefficient, the critical point between the noise-dominated IMF components and the signal-dominated IMF components are removed. Then the signal-dominated IMF components are denoised by the improved wavelet threshold denoising method, and the signal is finally reconstructed. The results show that the proposed method can suppress the noise better and achieve better results and highlight the event features compared with the traditional hard threshold method, CEEMDAN-hard threshold method and the improved wavelet threshold method and make event detection easier.

Key words:optical time domain reflectometer (OTDR); complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN); wavelet threshold denoising; correlation coefficient

1 引 言

光时域反射仪(optical time domain reflectometer,OTDR)是利用脉冲光在光纤中传输时产生的 背向散射光信号来表征光纤传输特性的一种仪 器。OTDR 作为一种非破坏的光纤测量技术,可 对光纤长度、光纤的传输衰减和故障定位等进行 测量,在光纤光缆的生产、施工、维护等方面得到 了广泛的应用,是光纤通信领域中不可或缺的测 试仪表。

OTDR 曲线可以反映背向散射光沿光纤传输的损耗分布情况,在 OTDR 测试曲线中,包含的事件类型主要有非反射事件、反射事件和光纤末端,如光纤接头、熔接、弯曲、断裂等事件^[1],这些事件对应着光纤中各处损耗。对于反射事件,正常情况下 OTDR 曲线有着较高的信噪比,容易被检测识别,但对于非反射事件等较小的事件点时,容易被噪声淹没,当曲线受噪声污染严重,曲线中的事件难以识别,所以在信号分析过程中对信号进行去噪处理必不可少。

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和小波去噪一样都是目前常用的信号降噪 方法。EMD广泛地应用于非线性和非平稳信号 去噪中,EMD可根据信号的特征信息分解出固有 模态分量实现多分辨率的分析,但该算法本身却 存在模态混叠、端点效应等问题^[2]。集合经验模 态分解(ensemble empirical model decomposition, EEMD)在EMD算法的基础上进行了改进,引入 白噪声改善了模态混叠及端点效应,但重构后的 信号有残留白噪声[3]。自适应噪声完备集合经验 模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN) 算法 针对 EEMD 算法残留噪声问题, 通过加入自适应 噪声,有效地避免了信号的重构误差^[4]。另外,小 波阈值去噪以其原理简单、计算量小和易于实现 等优点在小波去噪中应用最为广泛,但传统的软 阈值去噪存在失真,影响去噪效果,硬阈值去噪在 阈值处不连续,容易导致信号出现振荡,且小波阈 值去噪需要根据信号的特点选择适当的小波基、 分解层数、阈值和阈值函数等^[5],自适应差也限制 了其应用。针对这些缺陷,本文提出一种改进的 小波阈值去噪方法,结合 CEMMDAN 分解去噪, 提升 OTDR 信号的信噪比,更有利于事件的检测 与识别。

2 CEEMDAN 原理

EMD 算法思想是将非线性的波形信号转换为

一系列单频的分量信号和残差信号。分解过程根据 信号极值,通过三次样条插值拟合信号的上、下包 络,并利用上、下包络的平均值去分解出有限个本征 模函数(intrinsic mode function, IMF)分量^[6],但在 分解过程中,由于局部极值会多次跳变,导致模态呈 现混叠问题。集合经验模态分解是 EMD 的改进方 法,通过添加必要的辅助白噪声可以在某种程度上 抑制模态混叠。不过,经 EEMD 分解后的 IMF 分量 存在噪声残留,分解效率降低,带来较大的重构误 差。自适应噪声完备集合经验模态分解算法在处理 非稳态和非线性信号方面具有很大优势,并且可以 在一定程度上消除传统的 EMD 算法中的模态混叠 效应,在每个分解过程实现了自适应的噪声添加,提 高了分解效率,而且减少了噪声的残留,降低了原序 列数据的重构误差^[7]。CEEMDAN 的具体分解步骤 如下:

步骤 1:在采集到的信号 *x*(*n*)中添加 *i* 组自适应 白噪声,第 *i* 组信号可表示为:

 $X_i(n) = x(n) + e_i(n),$ (1) 式中,x(n)为采集的原始信号,i为添加组数(i=1, 2,…,T), $e_i(n)$ 为添加的噪声信号。

步骤 2:采用 EMD 分解算法对各组添加噪声的 信号 X_i(n)进行分解,得到各组的第1阶模态分量 I_{1,i},然后立即对其进行加总平均计算,得到第1个模 态分量 I₁:

$$I_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i} I_{1,i}, \qquad (2)$$

将信号x(n)减去第1个模态分量得到残余分量为:

$$r_1(n) = x(n) - I_{1o}$$
 (3)

步骤 3: 在残余分量中继续加入 *i* 组白噪声 *e_i* (*n*),构成新的待分解信号:

$$R_{1,i}(n) = r_1(n) + e_i(n),$$
(4)

然后对 R_{1,i}(n)进行 EMD 分解,得到第 2 阶模态分量 I_{2,i},并求和取平均值 I₂:

$$I_{2} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T} I_{2,i}, \qquad (5)$$

残余分量可表示为:

$$r_2(n) = r_1(n) - I_2$$
 (6)

步骤 4:重复执行步骤(1)、(2)和(3),直到信号 不能再被分解,即信号单调为止,从而得到 h 个分量 和一个残差 $r_h(n)$,信号 x(n)可表示为:

$$x(n) = \sum_{i=1}^{h} I_i + r_h(n)_{\circ}$$
(7)

3 小波阈值去噪

3.1 去噪原理

小波阈值去噪首先选取适合的小波基函数及分 解层数,将含噪信号进行小波分解,得到一系列的低 频小波系数和高频小波系数,具体小波去噪算法流 程图如图1所示。一般而言,低频小波系数主要是 有用信号,而高频小波系数主要是噪声信号,去噪过 程中通过估计噪声强度生成阈值,利用阈值函数处 理高频小波系数中噪声相关分量^[8,9],从而提高有用 信号的比重,最后对处理后的高频系数和低频系数 进行重构,得到去除噪声后的信号。





3.2 阈值选取

在小波阈值去噪中,传统的阈值选取准则分别 为固定式阈值、无偏风险估计阈值、启发式阈值、极 大或极小阈值^[10],这4种选取方法在小波去噪分析 中最为常用。但在实际去噪过程中,含噪信号经过 小波分解后,随着尺度的增加,噪声的小波系数幅值 越来越小,而信号的小波系数的幅值会越来越大。 因此,在不同尺度上阈值的选取也应该不同,使其能 够适应每层的噪声分布状况。因此,本文针对不同 分解层数的噪声分布情况,选取的阈值方法为^[11]:

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \log_2 N / \ln(j+1)}, \qquad (8)$$

式中,j为分解层数, λ_j 为第j层小波系数阈值,N为 信号的长度, σ_j 为第j层小波系数所含噪声的标 准差。

3.3 阈值函数的改进

传统的小波阈值去噪函数有硬阈值函数和软阈 值函数 2 种,并在众多研究领域得到了广泛的应用, 但这 2 种方法都有各自的缺点。在硬阈值函数处理 中,将小于阈值的高频小波系数置 0,大于阈值的小 波系数保持不变,重构所得到的信号会有附加振荡, 产生伪吉布斯现象。软阈值函数计算中,将小于阈 值的高频小波系数置 0,大于阈值的小波系数进行一 个恒定的偏差,虽然整体连续性好,但在重构信号时 会带来一定的重构误差,去噪效果不佳^[12]。

硬阈值函数的表达式为:

$$W_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, \mid w_{j,k} \mid \geq \lambda \\ 0, \mid w_{j,k} \mid < \lambda \end{cases},$$
(9)

软阈值函数的表达式为:

$$W_{j,k} = egin{cases} ext{sign}(w_{j,k})(\mid w_{j,k} \mid -\lambda) \,, \mid w_{j,k} \mid \geq \lambda \ 0, \mid w_{j,k} \mid < \lambda \end{cases},$$

(10)

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \,, \tag{11}$$

$$w = \text{Median}(|w_{j,k}|)/0.6745, \qquad (12)$$

式中,*j*为分解层数, $w_{j,k}$ 为分解的第*j*个尺度下第*k*个小波系数, $W_{j,k}$ 为 $w_{j,k}$ 估计的小波系数, λ 为阈值, N为信号的长度, σ 为第1层小波系数所含噪声的标 准差。

为了克服软、硬阈值去噪法的缺陷,参考文献 [13]的阈值函数,本文提出了一种改进的阈值函数 用于去噪,该函数在阈值处连续,解决软阈值函数去 噪效果差的问题,随着小波系数的增加,当小波系数 大于设定的阈值时,处理后的小波系数无限逼近处 理前的小波系数,减小了硬阈值函数带来的恒定 偏差。

改进的阈值函数表示为:

$$\begin{split} \mathbf{W}_{j,k} &= \\ \begin{cases} w_{j,k} \Big[1 - \frac{p^{2a}}{u^{2a} \mathrm{e}^{b(|w_{j,k}| - \lambda_j)^2}} \Big], \mid w_{j,k} \mid \geq \lambda_j \\ 0, \mid w_{j,k} \mid < \lambda_j \end{split}$$
(13)

$$u = (e^{w_{j,k}} + e^{-w_{j,k}})/2, \qquad (14)$$

$$p = (\mathrm{e}^{\lambda_j} + \mathrm{e}^{-\lambda_j})/2, \qquad (15)$$

式中,*j*为分解层数, $w_{j,k}$ 为分解的第*j*个尺度下第*k* 个小波系数, $W_{j,k}$ 为 $w_{j,k}$ 估计的小波系数, λ_j 为第*j* 层的阈值,调节因子*a*、*b*为正整数。

改进后的阈值函数曲线介于硬软阈值函数曲线

• 244 •

之间,该阈值函数在阈值处为连续的,解决了硬阈值 函数带来的振荡问题,并且随着小波系数的增大,重 构信号与真实信号之间的差值逐步减小,消除了软 阈值函数固定偏差问题,结合以自然常数为底的指 数函数形式的阈值处理小波系数,能提高小波去噪 后信号的重构质量。

基于 CEEMDAN-改进小波阈值去 噪方法

根据上述原理,CEEMDAN-改进小波阈值去噪 方法如下:

1)利用 CEEMDAN 分解算法对含噪 OTDR 信 号进行分解,得到第 1 至 h 层的 IMF 分量和一个残 差,其中阶数小的 IMF 分量为低频分量,可认为它是 信号占主导的 IMF 分量,阶数大的 IMF 分量为高频 分量,可认为它是噪声占主导的 IMF 分量,相关系数 是衡量变量之间相关程度的统计指标^[14]。本文根据 各 IMF 分量的相关系数的差值,找到噪声占主导的 IMF 分量和信号占主导的 IMF 分量的临界点^[15]。 相关系数的计算式如下:

 $R(x, I_{h}) = \frac{\sum_{n=1}^{T} [x(n) - \overline{x}] [I_{h}(n) - \overline{I_{h}}]}{\sqrt{\sum_{n=1}^{T} [x(n) - \overline{x}]^{2}} \sqrt{\sum_{n=1}^{T} [I_{h}(n) - \overline{I_{h}}]^{2}}},$ (16)

式中,x(n)是含噪 OTDR 信号, \bar{x} 为含噪 OTDR 信号的平均值, $\overline{I_h}$ 为第 h 层 IMF 分量的平均值。

利用该式计算各层的 IMF 分量与 *x*(*n*)信号之间的相关系数 *R*(*x*,*I_h*),并计算互相关系数的差值得到差分曲线。根据得到差分曲线,选取第一个大于零的峰值点作为噪声占主导的 IMF 分量与信号占主导 IMF 分量的临界点^[16],并去除噪声占主导的 IMF 分量。

2)用改进的小波阈值方法对信号占主导 IMF 分量进行去噪处理。选取合适的小波基及分解层 数,结合上述选取的阈值及改进阈值函数对小波系 数进行处理,使得去噪效果最佳。

3)利用处理的各层 IMF 分量和残差重构信号, 去噪流程图如图 2 所示。





5 去噪仿真实验

为验证本文提出的基于 CEEMDAN-改进小波 阈值去噪算法的有效性,对此信号测试曲线进行去 噪处理,含噪 OTDR 信号如图 3 所示。对信号 CEEMDAN 分解时,选取添加的自适应白噪声标准 差为 0.2,添加组数为 500 组,分解出的 IMF 分量允 许最大筛选迭代数为 5 000 次,含噪 OTDR 信号经 CEEMDAN 分解后得到 14 个 IMF 分量,如图 4 所 示。计算各分量与含噪信号的相关系数并做出差 值,差值曲线如图 5 所示,选择对应的第一个峰大于 零的点,剔除该点前的 IMF 分量,即噪声主导的 IMF1 分量。



图 3 含噪 OTDR 信号 Fig. 3 OTDR signal with noise

对剩余的 IMF 分量进行改进的小波阈值去噪, 本文采用 sym4 小波作为小波基,分解层数为5 层, 改进的阈值函数的调节因子 a 选取为 2 和 b 选取为 20,最后将去噪后的 IMF 分量进行信号重构,将硬阈 值去噪方法、CEEMDAN-硬阈值去噪方法、改进小波 阈值去噪方法和本文提出的 CEEMDAN-改进小波 阈值去噪方法进行去噪对比,去噪实验结果如图 6 所示。

本文采用信噪比(signal noise ratio, SNR)和均 方根误差(root-mean-square error, RMSE)作为去噪 性能的评价指标。信噪比反映了去噪方法的性能, 信噪比越高,噪声抑制效果越明显,去噪效果越好。 均方根误差反映了去噪信号与原始信号的相似性, 误差值越小,去噪性能越好,两个评价指标表达 式为[17]:

$$R_{SNR} = 10 \times \log 10 \left\{ \frac{\sum_{k=1}^{n} x^{2}(n)}{\sum_{k=1}^{n} [y(n) - x(n)]^{2}} \right\}, \quad (17)$$

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} [y(n) - x(n)]^2}, \qquad (18)$$

式中,x(n)为含噪信号,y(n)为去噪后的信号,n为 信号的长度。

OTDR 信号中尾端事件之后接收的是噪声信 号,本文采用去除尾端的无用信号后求其信噪比及 均方根误差。通过表1去噪性能指标对比可以发 现,本文提出的去噪方法的信噪比最高、均方根误差 最小,这说明该方法在有效地去除了噪声的同时,还 更好地保留了原始信号。去噪重构后信号变得更为 光滑和真实,带有的高频噪声明显减少,更易于后续 事件的分析与检测。



0.2 0.1 0.0 -0.1-0.2

2

4



The IMF component

6

10

12

8



图 6 去噪算法仿真实验结果:(a) 硬阈值去噪;(b) CEEMDAN-小波硬阈值去噪;

(c) 改进小波阈值去噪;(d) CEENDAN-改进小波阈值去噪

Fig. 6 Simulation results of denoising algorithm:

(a) Hard threshold denoising; (b) CEEMDAN-wavelet hard threshold denoising;

(c) Improved wavelet threshold denoising;

(d) CEENDAN-Improved wavelet threshold denoising

表 1 去噪性能指标对比

Tab. 1 Comparison of denoising performance indicators

Denoising method	SNR/dB	RMSE	
Hard threshold denoising	42.189	0.0052	
CEEMDAN- wavelet hard threshold denoising	46.746	0.0031	
Improved threshold denoising	48.241	0.0026	
CEENDAN - Improved wavelet threshold denoising	50.068	0.0021	

6 结 论

根据 OTDR 测试信号波形特征,本文提出了一种基于 CEEMDAN 和改进小波阈值去噪算法,利用 CEEMDAN 分解算法具有的抗模态混叠现象和降低 重构误差等优点,并结合改进的小波阈值方法去噪, 进一步地提升去噪效果。经验证,本文提出的去噪 方法相比传统的硬阈值方法、CEEMDAN-硬阈值方 法和改进的小波阈值去噪方法能更好地抑制噪声, 并达到更好去噪效果,突出了 OTDR 信号的细节,更 易于事件的检测,对 OTDR 信号去噪的实际应用有 着重要的意义。

参考文献:

[1] DENG C C. High precision OTDR event analysis and PC software design and implementation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020:5-7.

邓长城.高精度 OTDR 事件分析研究及上位机软件设计 与实现[D].成都:电子科技大学,2020:5-7.

- [2] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998,454(1971):903-995.
- [3] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2009,1(1):1-41.
- [4] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic. New York: IEEE, 2011; 4144-4147.
- [5] ZHANG Z F, WEI H, TAN B W. An improved wavelet threshold denoising method[J]. Study on Optical Communications, 2018, (2):75-78.
 张振凤,威欢,谭博文.一种改进的小波阈值去噪方法 [J].光通信研究, 2018, (2):75-78.
- [6] CHEN W, MA X H, MA Q L, et al. Denoising method of the *Φ*-OTDR system based on EMD-PCC[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(10): 12113-12118.
- [7] HE M, FENG L, ZHAO D D. A method to enhance SNR based on CEEMDAN and the interval thresholding in Φ-OTDR systems[J]. Applied Physics B, 2020, 126(5):97.
- [8] CUI G Z, ZHANG Z X, YANG L Z, et al. An improved wavelet threshold denoising algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(19): 50-58. 崔公哲,张朝霞,杨玲珍,等.一种改进的小波阈值去噪 算法[J].现代电子技术, 2019, 42(19), 50-58.
- [9] HAN Q,ZHANG Z H,WANG D S,et al. An OTDR event analysis algorithm based on EMD-based denoising and wavelet transform [C]//12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, July 16-18,2015, Qingdao, China. New York: IEEE, 2015: 1034-

1038.

- [10] QI X H, SONG W H, LI W Z. Application of an improved wavelet denoising method in OTDR[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(4):54-58.
 齐晓辉,宋宛鸿,李文召.一种改进的小波去噪方法在 OTDR中的应用[J].光通信技术, 2021, 45(4):54-58.
- [11] CHANG F X, HONG W X, ZHANG T, et al. Research on wavelet denoising for pulse signal based on improved wavelet thresholding[C]//First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications, September 17-19,2010, Harbin, China. New York: IEEE,2010;564-567.
- [12] CHEN Z K,LIU D H,ZHANG R C. Noise analysis on test data of optical time domain reflectometer based on softhard threshold compromise method[J]. Machine Tool & Hydraulics,2011,39(19):35-37.
 陈至坤,刘东海,张瑞成.基于软硬阈值折衷法的 OTDR 测试数据噪声分析[J]. 机床与液压,2011,39(19):35-37.
- [13] WANG S Z, ZHU Y T. Comparative simulation study of evolutional wavelet based on denoising algorithms [J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(1):128-132.
 王拴中,朱玉田.改进小波阈值去噪法的对比性仿真实 验与分析[J].噪声与振动控制, 2012, 32(1):128-132.
- [14] MENG H,LIU F,QU J T. Denoising algorithm of Φ-OTDR signal based on clear iterative EMD interval-thresholding [J]. Optics Communications,2019,453(2019):124352.
- [15] MA F.WANG X X.LIU X.et al. Application of segmentation threshold method and wavelet threshold denoising based on EMD in Phi-OTDR system[C]//Tenth International Conference on Information Optics and Photonics. July 8-11, 2018, Beijing, China. New York: IEEE, 2018, 10964:35-39.
- [16] CHENG X,MAO J D,LI J,et al. An EEMD-SVD-LWT algorithm for denoising a Lidar signal [J]. Measurement, 2021,168(3):108405.
- [17] ZHAO L Y, SUN J, DU R J, et al. Design of the comprehensive index for the signal processing quality evaluation and its application in the spectral signal denoising[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 6-9, 2017, Takamatsu, Japan. New York: IEEE, 2017:237-241.

作者简介:

姜海明 (1976-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光电器 件等方面研究.