

一种改进的小波去噪方法在 OTDR 中的应用

齐晓辉,宋宛鸿,李文召

(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院,山东 威海 264209)

摘要:光时域反射仪(OTDR)测试中,系统链路噪声严重影响测试准确度,尤其是对于 0.05~0.2 dB 熔接损耗的准确检测,需要提高测试曲线的信噪比。根据 OTDR 波形特点,在小波阈值去噪的基础上提出一种改进的小波去噪方法,改进阈值利用对数函数的非线性并引入噪声方差,更利于滤除噪声;改进阈值判断函数留下原始数据细节并滤除噪声,且不改变反射事件和非反射事件的波形属性。实际测试表明:测试曲线相对信噪比提升了 10 dB 以上,去噪后配以曲线平滑滤波和恒虚警(CFAR)检测,准确检测出熔接事件。

关键词:光时域反射仪;小波变换;阈值判断函数;反射事件;非反射事件;恒虚警检测

中图分类号:TN929.11;TN206 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)04-0054-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of an improved wavelet denoising method in OTDR

QI Xiaohui, SONG Wanhong, LI Wenzhao

(College of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology(Weihai), Weihai Shandong 264209, China)

Abstract: In optical time domain reflectometer (OTDR) test, the system link noise seriously affects the test accuracy, especially for the accurate detection of 0.05–0.2 dB fusion loss, it is necessary to improve the signal-to-noise ratio of the test curve. According to the characteristics of OTDR waveform, based on wavelet threshold denoising, an improved wavelet denoising method is proposed. The improved threshold makes use of the nonlinearity of logarithmic function and introduces noise variance, which is more conducive to filtering out noise; the improved threshold judgment function leaves original data details and filters out noise, and does not change the waveform attributes of reflection events and non-reflection events. The actual test results show that the relative signal-to-noise ratio of the test curve is increased by more than 10 dB, and the fusion event can be accurately detected after denoising with curve smoothing filter and constant false alarm rate (CFAR) detection.

Key words: optical time domain reflectometer; wavelet transform; threshold judgment function; reflection event; non-reflective event; constant false alarm rate detection

0 引言

光时域反射仪(OTDR)在光纤维护和检测中发挥着重要的作用。OTDR 通过发射光脉冲信号到光纤中,然后接收因瑞利散射和菲涅尔反射返回的光功率信号,根据传输时间实现事件定位^[1-2],并对传回数据进行对数变换,得到测试曲线来判断事件的类型^[3]。

精确检测事件的前提是能够得到高信噪比(SNR)

收稿日期:2020-08-19。

作者简介:齐晓辉(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师。主要从事雷达信号处理、光纤检测和工业控制等工作。曾获得“变速恒频法电机励磁控制”哈尔滨市科技进步三等奖、国防科技进步二等奖 2 项和省部级三等奖 1 项。



的信号,这需要对原始的测试信号进行滤波处理,且处理不能改变信号的形状属性。但是,低通滤波会有时间信息的损失,这不利于事件位置的定位。短时傅里叶变换分辨率单一且仅适用于平稳信号^[4],而现实中的大部分信号都是非平稳的。中值滤波会造成信号的不连续性。小波变换则克服了上述缺点,且对突变敏感,有利于对事件点的精确检测^[5]。因此,本文提出一种基于小波变换的改进去噪方法,并结合时域滤波进行综合去噪,提升测试信号的 SNR,有利于熔接事件的检测。

1 OTDR 测试信号去噪

OTDR 的故障事件类型分为反射型事件和非反射型事件。对于反射事件的检测已有成熟的应用,而对

于非反射事件(本文主要针对熔接事件),由于其损耗小、受噪声的影响大,必须先对其进行去噪处理再检测,SNR 提升得越高,检测的准确度越高。本文首先检测反射事件的位置,再对 2 个反射事件中间的非反射事件进行检测,原始信号图如图 1 所示,可以清晰地识别出 3 个反射型事件的突变点。其中,A 点是测试光纤的起始端反射,B 点是连接器事件,C 点是光纤的末端。B、C 2 点中间有 7 个熔接事件,已被淹没在噪声中,这也是本文去噪方法的重点应用部分。

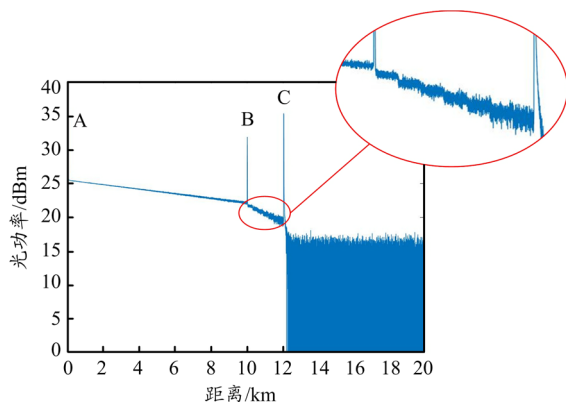


图 1 原始信号图

1.1 改进小波去噪方法

本文采用改进的小波阈值去噪方法来对信号进行去噪处理,主要分为以下 4 个步骤:①确定小波基和小波分解层数。由于“haar”小波的对称性、易于实现,且与事件波形形状相关性强的特点,本文选择用“haar”小波基,并采用 5 层分解来获得小波系数。②获得 OTDR 测试数据的小波系数。③根据改进的阈值选取方法和阈值判断函数来对小波系数做阈值处理。④根据处理后的小波系数重构出去噪后的信号。

1.1.1 阈值选取方法的改进

阈值选取有 4 种常用的方法:无偏风险估计阈值、固定式阈值、启发式阈值和极大/极小阈值,如表 1 所示。

表 1 中, th 表示阈值, $f(n)=(\text{sort}(|s(n)|))^2$, ($n=0,1,2,\dots,N-1$), $s(n)$ 是信号, N 为信号的长度, σ 为噪声的方差。

对于 OTDR 信号来说,包含噪声方差的阈值去噪效果更好,并且由于小波系数随着分解层数的变化而变化,故阈值也应随着层数的变化而变化。上述阈值只有固定式阈值的阈值函数与噪声方差有关,因此本文在固定式阈值的基础上进行修改,提出改进的阈值^[8]。改进的阈值利用对数函数的非线性来对每一层的阈值进行设置,逐层降低阈值,并且由于引入噪声

表 1 常用阈值选取办法

类型	函数
无偏风险估计 阈值	$th_r=\sqrt{f(n_{\min})}$
固定式阈值	$th=\sigma\sqrt{2\log N}$
启发式阈值	$th=\begin{cases} \sigma\sqrt{2\log N}, \sqrt{\frac{1}{N}\left(\frac{\ln N}{\ln 2}\right)^3} < \left[\sum_{j=1}^N s(j) ^2 - N\right]/N \\ \min(\sigma\sqrt{2\log N}, \sqrt{f(n_{\min})}), \text{else} \end{cases}$
极大/极小 阈值	$th=\begin{cases} 0.3936+0.1829\left(\frac{\ln N}{\ln 2}\right), N>32 \\ 0, N\leq 32 \end{cases}$

方差的影响,更适合用作对含噪信号的处理。根据实验效果对参数进行改进,本文提出改进的阈值公式定义为:

$$th_m=\sigma_m\sqrt{2\log N}/\log_2(m) \quad (1)$$

其中, th_m 是阈值选择方法中每层设定的阈值, $\sigma_m=\text{median}(w_m(k))/0.6745$, $w_m(k)$ 为小波系数 ($k=1,2,\dots,p$), p 为该层小波的长度, m 为小波分解的层数。

1.1.2 阈值判断函数的改进

传统的阈值判断函数分为硬阈值函数和软阈值函数。

硬阈值函数为:

$$\text{hard}(s, th)=\begin{cases} s, |s| \geq th \\ 0, |s| < th \end{cases} \quad (2)$$

其中, s 为信号,大于阈值 th 的信号不变,小于 th 的信号被置零。这种强制置零的方式使信号产生附加震荡导致信号不连续^[9],会对信号后续的分析与处理造成影响。

软阈值函数为:

$$\text{soft}(s, th)=\begin{cases} \text{sign}(s)(|s|-th), |s| \geq th \\ 0, |s| < th \end{cases} \quad (3)$$

软阈值法虽然较硬阈值法连续性更好,但是由于压缩信号产生偏差,易丢失信号细节,进而影响重构信号的真实性。

由于软、硬阈值判断函数会带来种种不便,本文参考文献[10]中的阈值判断函数公式为:

$$\text{litd}_L=\begin{cases} d_L-2th+\frac{2th}{1+e^{-\sqrt{\frac{2}{d_L}}}}, |d_L| \geq th \\ 0, |d_L| < th \end{cases} \quad (4)$$

其中, d_L 为小波各层分解所得得到的高频系数, L 表示的是小波分解层数。

为了克服硬阈值的吉布斯效应和软阈值的易遗漏细节,本文基于式(4)并结合实验效果对阈值判断

函数进行改进。实验在 3 ns~20 μs 范围内变换信号脉宽,并改变通道数和雪崩光电二极管(APD)偏置电压,对在近、中、远端接有 7×100 m 或 5×100 m 熔接事件的光纤进行测试,并根据评价指标(见文章第 3 部分)对函数进行调整。根据实验效果,结合式(4)和软阈值函数的优点,本文重新定义了一个新的介于软、硬阈值函数之间的阈值判断函数。该函数考虑保留小波系数的符号,并利用自然常数的指数函数来对阈值影响进行调节,以 $|d_L| - th_m$ 作为指数来进行控制,在保证连续性的同时缩小偏差。改进的阈值判断函数为:

$$newd_L = \begin{cases} \text{sign}(d_L) \left(|d_L| - \frac{th_m}{e^{|d_L| - th_m}} \right), & d_L \neq 0 \\ 0, & d_L = 0 \end{cases} \quad (5)$$

该改进阈值函数介于软、硬阈值函数之间,保留软、硬阈值函数的优点并优化。正负值的设定使原本系数的符号得以保留。当小波系数与阈值相近时,得出的新系数的绝对值就越小,这表明原系数与噪声相近,认为是噪声,可以去掉;当小波系数与阈值的差值很大时,第二项趋于 0,原系数得以保留;当小波系数与阈值相等时,代数式为 0。因此,此函数既保证了连续性,又有效保留了原始测量数据的细节。

1.2 综合去噪

本文将改进小波去噪与时域平滑去噪相结合的去噪方法称为综合去噪。对 2 段光纤进行去噪处理,其中光纤 1 号为一段 10 km 开始处接有 7 个间隔为 300 m 的熔接事件的光纤;光纤 2 号为一段 200 m 处开始接有 5 个间隔为 100 m 的熔接事件并后接 300 m 的光纤,综合去噪的流程图如图 2 所示。图 3 为改进小波去噪和综合去噪对比图,从图 3(a)和图 3(c)看出,单纯经过改进小波去噪后已有显著效果,但仍有少部分尖刺残留;为优化去噪效果,再对非反射区段进行一次

时域平滑去噪^[11],处理效果如图 3(b)和图 3(d)所示,可以看出综合去噪效果更好。

光纤 1 号和光纤 2 号经过本实验的去噪处理后信号波形与原始波形的对比图如图 4 所示。可以看出,去噪后信号 SNR 提升明显,更利于熔接事件的检测。

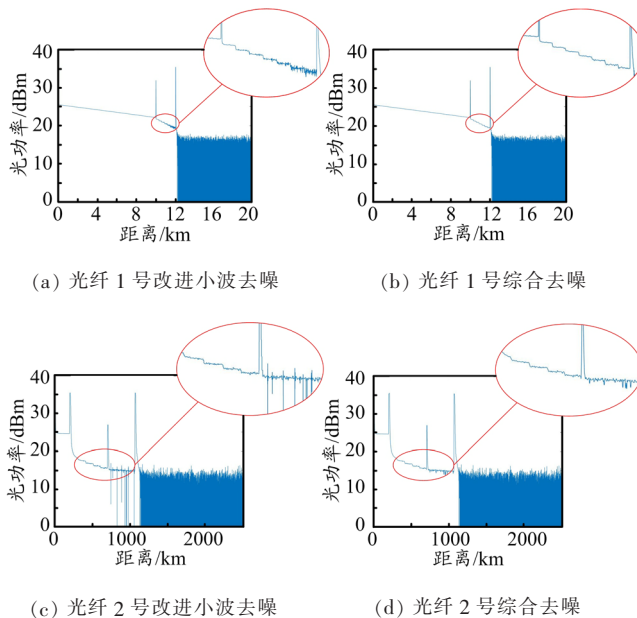


图 3 改进小波去噪和综合去噪对比图

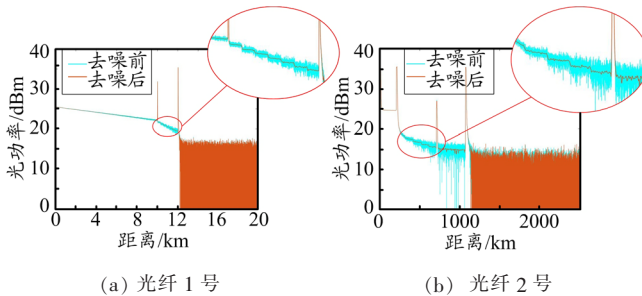


图 4 原始信号与去噪后信号对比图

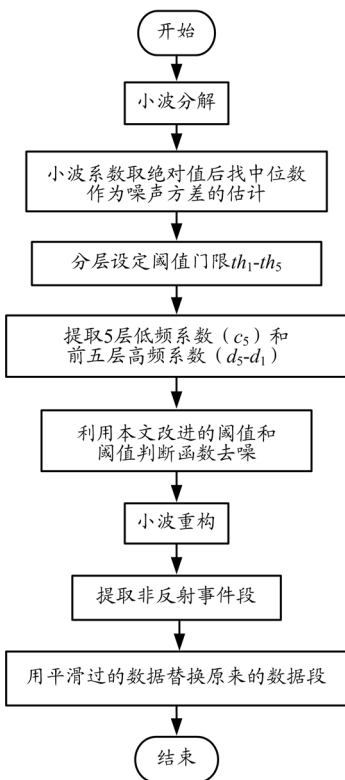


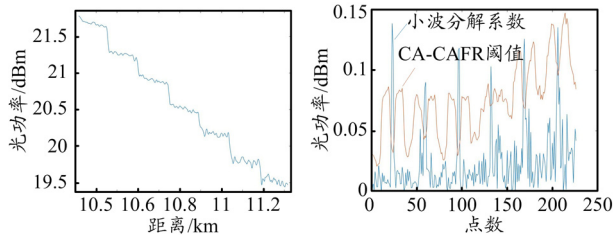
图 2 综合去噪流程图

2 事件检测

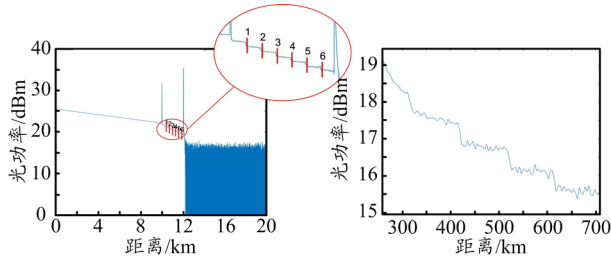
本文对反射型事件和非反射型事件分别进行检测。主要用到小波分解原理和单元平均恒虚警(CA-CAFR)原理,小波分解原理本文不再赘述。CA-CAFR检测是一种自适应检测算法^[12-13],它把检测单元左右的邻近信号作为参考单元,根据参考单元的均值和相关参数设置阈值门限^[14]。反射型事件的反射峰高易于检测,检测出反射事件点的位置后先对 2 个反射事件的中间区段进行截取(如图 5(a)所示),后进行非反射事件的检测;对非反射事件区段进行 haar 小波分解,发现第 4 层的小波系数利于检测,故对第 4 层的小波系数做 CA-CAFR 检测,结果如图 5(b)所示;检测出

接损耗事件点位置后,在原图上进行标记,如图 5(c)所示,准确检测出了 6 个熔接损耗点(7 个熔接事件会有 6 个熔接损耗点)。对光纤 2 号进行同样的处理,过程及结果如图 5(d)~图 5(f)所示。

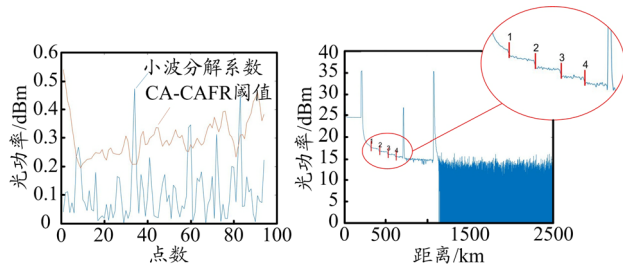
至此,本文成功检测出 OTDR 测试信号中的全部反射事件和非反射事件。



(a) 光纤 1 号非反射区段的截取 (b) 光纤 1 号 CA-CAFR 检测结果



(c) 光纤 1 号事件标记 (d) 光纤 2 号非反射区段的截取



(e) 光纤 2 号 CA-CAFR 检测结果 (f) 光纤 2 号事件标记

图 5 事件检测

3 去噪结果分析

为便于对结果进行评价,本文设置了 3 个评价指标^[5],分别是相对 SNR、均方根误差(RMSE)和互相关函数值。由于无法获得无噪声的纯信号,故选用相对 SNR 作为衡量指标,相对 SNR 只适用于方法之间的比较,如表 2 所示。其中, $s(n)$ 是原始信号, $\hat{s}(n)$ 是去除噪声后的信号。

相对 SNR 越大,说明去噪效果越好;RMSE 越大代表去掉的噪声越多,但这也可能是去掉了有用的噪声;互相关函数值越小代表去掉的噪声越多,但也表明

表 2 评价指标公式

指标	公式
相对 SNR	$SNR=10\log\left(\frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N [s(n)-\hat{s}(n)]^2}\right)$
RMSE	$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N [s(n)-\hat{s}(n)]^2}$
互相关函数	$R_{12}(n)=\sum_{j=1}^N s_1(j)s_2(j-n)$

与原信号关联减小,可能去掉了过多的有用信号。故应辩证地对这 3 个指标的大小及其影响进行评价。

在仿真软件中经过对比实验研究发现,对于本实验的 OTDR 测试数据,在同样采用 haar 小波、5 层分解的情况下,采用启发式阈值、软阈值判断函数的去噪效果最好。现根据 3 个指标,将这种传统去噪法与本文综合去噪法作比较,结果如表 3 所示。

表 3 指标数据对比

去噪方法	3 项指标数据		
	相对 SNR/dB	RMSE 值	互相关函数值
传统去噪法	21.505	0.234	0.998
综合去噪法	35.628	0.134	0.999

从表 3 可以看出,相较于传统去噪方法,本文提出的综合去噪法的 SNR 提升了 14.1 dB,且拥有更小的 RMSE 和更大的互相关函数值,这说明该方法在更有效地去除了噪声的同时还更好地保留了原始信号,符合 OTDR 测试信号处理真实性的要求。该方法已应用到实际检测中,实际测量图如图 6 所示。其中,S 表示起始点,E 表示结束点,数字序号表示检测到的事件编号,上方的灰色直线表示该曲线的饱和阈值标识线。可以看出,光纤上事件被准确检出。

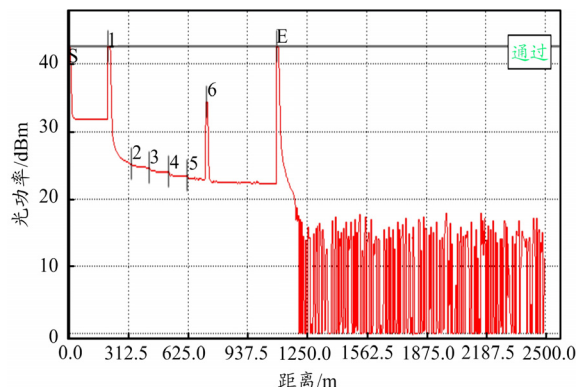


图 6 实际测量图

4 结束语

本文从改进小波阈值和其判断函数的角度出发,对 OTDR 测试信号进行去噪优化,并在小波去噪之后又进行了一次时域平滑去噪,进一步提升了去噪的效果。实验结果表明:本文提出的改进综合去噪方法能够有效滤除系统噪声,使熔接事件易于检测,且使用小波变换和 CA-CAFR 检测相结合的方法,可准确检测所有事件。

参考文献:

- [1] HU C J, LI J. The application of wavelet transform in analysis of OTDR curve[C]// 2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 26–28, 2010, Nanjing, China. Los Alamitos: IEEE, 2010: 216–219.
- [2] GU X D, SABLATASH M. Estimation and detection in OTDR using analyzing wavelets [C]//IEEE- SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, October 25–28, 1994, Philadelphia, USA. Piscataway: IEEE, 1994: 353–356.
- [3] HAN Q, ZHANG Z H, WANG D S, et al. An OTDR event analysis algorithm based on EMD-based denoising and wavelet transform[C]//2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), July 16–18, 2015, Qingdao, China. Beijing: IEEE, 2015: 1034–1038.
- [4] 徐铖晋. 分布式光纤传感系统的信号处理技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- [5] HU W, WAN S, LI B, et al. Study on the detection signal of OTDR based on wavelet denoising and approximate entropy[C]//2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, May 21–23, 2012, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2012: 1–4.
- [6] RAMJI T, PRASANT K S. Dynamic range enhancement of OTDR using lifting wavelet transform-modified particle swarm optimisation scheme[J]. IET Optoelectronics, 2019, 13(6): 295–302.
- [7] 吕春梅. 基于 OTDR 曲线的通信光纤故障诊断的研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- [8] 刘刚. 心电信号的去噪与 QRS 波检测算法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2009.
- [9] CUI H M, ZHAO R M, HOU Y L. Improved threshold denoising method based on wavelet transform [J]. Physics Procedia, 2012, 33: 1354–1359.
- [10] 刘丽娜. 改进的小波变换阈值去噪算法 [J]. 工业技术与职业教育, 2013, 11(2): 12–14.
- [11] PAWEL K, ROBERT S. Review and comparison of smoothing algorithms for one-dimensional data noise reduction[C]//2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, May 9–12, 2018, Swinoujscie, Poland. Piscataway: IEEE, 2018: 277–281.
- [12] XIA X Y, HAO D L, YAN L, et al. Optimal waveform design for smart jamming focused on CA-CFAR [C]//2017 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA), September 23–25, 2017, Xi'an, China. Washington: IEEE, 2017: 374–378.
- [13] 付康. 复杂背景下雷达恒虚警检测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [14] 周忠锦. 二维恒虚警算法研究及实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [15] 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]//2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 6–9, 2017, Takamatsu, Japan. Piscataway: IEEE, 2017: 237–241.