

引用本文: 臧益鹏, 李现勤, 吴松桂, 等. 基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 23-28.

基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法

臧益鹏, 李现勤, 吴松桂, 葛 菲, 王炜廷, 顾文华

(无锡市德科立光电子技术股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对信号中噪声影响的问题, 提出了基于改进小波变换的光时域反射仪(OTDR)事件检测方法。首先通过对小波去噪算法进行改进, 获得新的阈值选取方式和阈值判断函数, 然后结合小波模极大值法和斜率法定位测量光纤发生事件位置和光纤始末端位置, 计算事件衰减损耗的同时对事件进行分隔和误判消除。仿真和实验结果表明: 所提方法的定位精准度较高, 反射事件和非反射事件的计算位置偏差分别小于 5 m 和 15 m; 测量光纤的事件检测分析结果与光纤连接位置及光纤总长度相符。

关键词: 小波变换; 光时域反射仪; 小波去噪; 事件检测; 精准定位

中图分类号: TN91 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2024)01-0023-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Event detection method of OTDR based on improved wavelet transform

ZANG Yipeng, LI Xianqin, WU Songgui, GE Fei, WANG Weiting, GU Wenhua

(Wuxi Taclink Optoelectronics Technology Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: To solve the problem of noise in signal, an event detection method of optical time domain reflectometer(OTDR) based on improved wavelet transform is proposed. Firstly, by improving the wavelet de-noising algorithm, a new threshold selection method and threshold judgment function are obtained. Then, the event location and the beginning end location of the fiber are measured by combining the wavelet mode maximum method and the slope legal bit, and the event attenuation loss is calculated while the event is separated and the misjudgment is eliminated. The simulation and experimental results show that the proposed method has high positioning accuracy, and the calculated position deviation of reflected event and non-reflected event is less than 5 m and 15 m, respectively. The results of event detection and analysis of the measured fiber are consistent with the connection position and the total length of the fiber.

Key words: wavelet transform, optical time domain reflectometer, wavelet denoising, event detection, precise positioning

0 引言

光时域反射计(OTDR)是一种以瑞利散射为基础的分布式光纤传感器, 通过对反射光的探测, 能有效测量传感光纤中任一位置处的接头损耗、熔接损耗、弯曲损耗, 并能定位一些故障点的位置^[1-3]。这对于及

时发现光纤网络故障、确保光纤网络安全稳定等方面具有十分重要的意义。近年来, 随着光纤网络变得越来越复杂, 对 OTDR 曲线进行分析以准确定位故障点位置成为极为重要的一环。传统的光纤网络故障点定位(事件检测), 一般依赖对 OTDR 曲线的人工识别, 然而这会导致事件定位精度不高、漏报或者多报事件的问题发生, 使其难以应用于复杂光纤网络的事件检测。随着定位算法的发展, 基于 OTDR 系统的高精度事件检测定位的实现成为可能^[4-7]。

当 OTDR 曲线信号信噪比较高时, OTDR 事件定位算法能够准确定位光纤网络中的事件位置, 因此受到了科研人员的重视, 并涌现出大量运用定位算法对 OTDR 曲线分析的报道。2008 年, NanoTronix 公司的

收稿日期: 2023-06-13。

基金项目: 江苏省卓越博士后计划资助。

作者简介: 臧益鹏(1993—), 男, 博士, 现就职于无锡市德科立光电子技术股份有限公司, 主要从事光通信系统中的智能算法方面的研究工作。入选江苏省第一届卓越博士后计划和江苏省双创博士。



臧益鹏,李现勤,吴松桂,等: 基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法

YONGMIN K 等人^[8]使用卡尔曼滤波器计算衰减因子的方法对 OTDR 系统中的反射和非反射事件进行了检测,通过对 OTDR 测量数据进行近似,提出了二阶线性模型,设计了线性卡尔曼滤波器,实验验证了该方法能精确计算衰减因子,并通过衰减因子检测反射和非反射事件。2013 年, MUHAMMAD U 等人^[9]采用矢量索引算法从 OTDR 曲线中提取特征,将数值差分运算与向量索引匹配相结合,并在自己开发的 OTDR 板上进行了测试,实验结果表明矢量索引算法能够实现准确的事件检测。2016 年, JEAN P 等人^[10]使用基于自适应的滤波器进行 OTDR 曲线自动故障检测,通过 2 个阶段的参数自适应正则化滤波,准确识别出了曲线异常点。2018 年,刘丹蕾等人^[11]采用差值法和寻找斜率变化的方法对 2 组 OTDR 曲线数据进行处理,确定了光缆弯曲的位置。当弯曲点和光缆故障点小于一个脉冲宽度对应的距离时,系统能准确定位光缆故障点。2019 年,朱信刚等人^[12]引入边缘检测(Canny)算法对 OTDR 曲线进行事件定位分析,并结合最小二乘法和五点法分析事件的类型和损耗大小,在信噪比较高的情况下可以准确定位事件位置。虽然采用定位算法检测光纤网络事件位置的研究很多,但大多是基于滤波器或者斜率法,均存在计算复杂度高、难以实现或只适用于信噪比较高的情况,严重影响了在复杂光纤网络环境中准确定位事件位置的应用。因此,本文提出一种基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法,降低计算复杂度,提高定位精度。

1 基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法

1.1 OTDR 事件检测基本原理

OTDR 曲线信号模型可用式(1)表示。

$$F(t)=f(t)+\varepsilon \quad (1)$$

其中, $F(t)$ 为带噪声的信号, $f(t)$ 为理想信号, ε 为噪声。小波去噪是对 $F(t)$ 进行处理,尽可能剔除其中的高频噪声部分,保留低频信号和事件信息。

设定 $\varphi(t)$ 为小波母函数,将其进行伸缩和平移,可得到簇函数 $\varphi_{a,b}(t)$ 。其中,尺度因子 $a>0$,平移因子 $b \in \mathbb{R}$, $\mathbb{R}$ 为实数,经过伸缩和平移处理后的簇函数 $\varphi_{a,b}(t)$ 称为小波基函数。设尺度因子 $a=a_0$,如果关于小波变换 $f_w(a_0,b)$ 的导数 $\frac{\partial f_w(a_0,b)}{\partial b}=0$,则表明小波变换

$f_w(a_0,b)$ 在 (a_0,b) 处存在局部极值,在某特定领域中,若 b_0 中的任意一点都严格满足 $|f_w(a_0,b)| \leq |f_w(a_0,b_0)|$,那么称 (a_0,b_0) 是小波变换模 $f_w(a,b)$ 在尺度 a_0 下的极

值点,而 $|f_w(a_0,b_0)|$ 则是小波变换模 $|f_w(a,b)|$ 在 (a_0,b_0) 处的模极大值^[13]。

1.2 改进检测方法

在对 OTDR 曲线进行事件定位之前,考虑到噪声对定位精度的影响,需要先使用小波去噪算法对信号进行去噪处理。在实际应用中,研究人员会综合考虑降噪效果与定位精度,然后选择合适的小波基函数。同时,小波去噪的分解层数也会影响到信号去噪的效果。本文选择“db4”小波基、4 层分解来获得小波系数。

1.2.1 改进阈值选取方式

常用的阈值选取方式有 4 种:固定式阈值、启发式阈值、无偏风险估计阈值和极大极小阈值。其中,固定式阈值和启发式阈值选取的阈值较大,会导致过度滤除有用的高频信号;无偏风险估计阈值选取的阈值较小,保留小波系数更多,所以信号降噪的平滑效果更差。在 OTDR 系统中,极大极小阈值更适合作为阈值选取方式,本文在极大极小阈值基础上改进阈值选取方式。极大极小阈值和经过本文改进后的极大极小阈值的公式分别如式(2)、式(3)所示。

$$T=\begin{cases} 0.393\ 6+0.182\ 9\log_2^N, N>32 \\ 0, N\leq 32 \end{cases} \quad (2)$$

$$T_m=\begin{cases} \sigma_m(0.393\ 6+0.182\ 9\log_2^N), N>32 \\ 0, N\leq 32 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\sigma_m=\text{median}(|d_m|)/0.674\ 5$, d_m 为每层的小波系数, N 为每层信号长度。改进后的阈值选取方式利用对数函数的非线性特性对每一层阈值进行设置,并且逐层降低阈值,更适合作对含噪信号的处理。

1.2.2 改进阈值判断函数

设置小波分解每层阈值后,需要根据阈值对每层小波系数进行处理。在阈值处理时,判断函数主要分为 2 种:硬阈值函数和软阈值函数。硬阈值函数小波系数和软阈值函数小波系数可分别用式(4)和式(5)表示。

$$d_h=\begin{cases} d_m, |d_m|>T_m \\ 0, |d_m|<T_m \end{cases} \quad (4)$$

$$d_s=\begin{cases} \text{sign}(d_m)(|d_m|-T_m), |d_m|>T_m \\ 0, |d_m|<T_m \end{cases} \quad (5)$$

对于硬阈值函数,当小波系数绝对值小于阈值时被置为零,反之则保持原有小波系数值不变,这种强制置零的方式的信号容易产生震荡,导致出现信号不连续的问题^[14];而软阈值函数虽然连续性更好,但由于

信号被压缩而产生偏差,容易丢失信号细节,导致信号信息可能会被改变。

考虑到上述硬阈值函数和软阈值函数的不足,本文结合 2 种阈值判断函数的特点对阈值判断函数小波系统进行改进,如式(6)所示。

$$d_0 = \begin{cases} \text{sign}(d_m) \left(|d_m| - \frac{T_m}{\exp(|d_m| - T_m)} \right), & d_m \neq 0 \\ 0, & d_m = 0 \end{cases} \quad (6)$$

改进后的阈值判断函数既保留了小波系数的符号,同时也通过自然常数的指数函数来调节阈值,不仅保证了信号连续性又能减小信号偏差,有效保留了信号中的细节信息。

2 数值仿真

OTDR 传输特性曲线如式(7)所示。

$$P_B(z) = \eta \tau P_0 e^{-2\alpha z} \quad (7)$$

其中, $P_B(z)$ 表示随传输距离 z 变化的信号光强, η 为后向散射因子, τ 为脉冲宽度, P_0 为入射光功率, α 为光纤损耗系数。本文数值仿真中采用的测量光纤总长 $L=150$ km、后向散射因子 $\eta=10$ W/J、脉冲宽度 $\tau=2$ μ s、入射光功率 $P_0=200$ mW, 光纤损耗系数 $\alpha=0.2$ dB/km 的 OTDR 曲线。实际使用 OTDR 测量光纤时, 本文在 OTDR 曲线中设置了突出点及衰减点, 以模拟真实光纤中存在的光纤起始端、末端、连接器等反射事件, 以及熔接、接头等非反射事件。

2.1 信号去噪

为了模拟实际 OTDR 曲线存在噪声的情况, 在仿真信号中叠加高斯白噪声信号, 采用本文改进后的小波去噪算法对仿真信号进行去噪处理, 得到的去噪信号和原始信号对比情况如图 1 所示。可以看出, 与原始

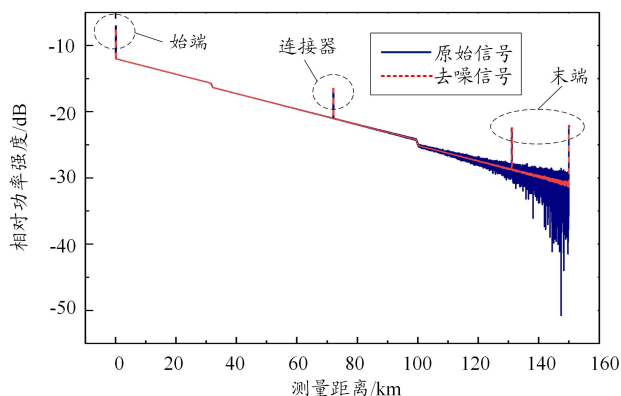


图 1 原始信号与去噪信号对比图

始信号相比, 采用改进后小波去噪算法处理后的信号(去噪信号)曲线平滑很多, 波动范围明显减小。根据计算得出, 原始信号的信噪比为 36 dB, 去噪信号的信噪比为 55 dB, 提高了 19 dB。这对后续事件检测, 尤其是非反射事件检测的准确度起到关键作用。

为了验证改进后小波去噪算法在保留原始信号细节信息上的优越性, 本文同时采用改进后小波去噪算法和传统小波去噪算法对原始信号进行处理, 对比结果如图 2 所示。可以看出, 传统小波去噪算法会造成信号细节部分产生振荡(局部放大图中 72 km 处与 72.2 km 处), 而采用了改进小波去噪算法的事件开始位置与结束位置处的曲线更为平滑, 没有振荡, 更有利于事件定位的准确性, 在保证信号连续性的同时也有效保留了原始测量数据的细节信息, 比传统小波去噪算法更有优势且信噪比更低。但是, 在实际应用中, OTDR 系统采集信号后会进行多次平均, 若采用小波去噪算法提升的信噪比有限, 因此应优先考虑提升事件检测准确度。

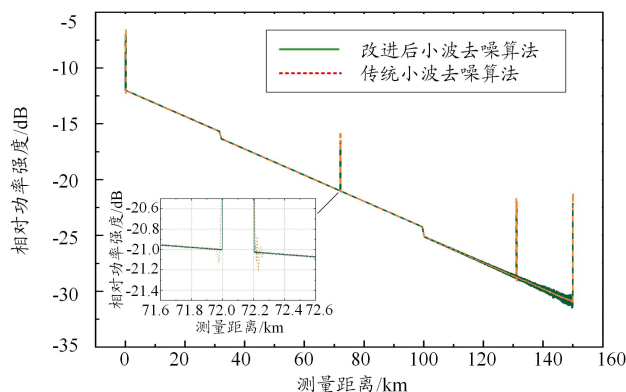


图 2 传统小波去噪算法和改进后的小波去噪算法对比

2.2 事件检测

首先, 对原始信号进行去噪处理, 再对仿真信号的反射事件与非反射事件分别进行检测, 最后进行定位与损耗计算。事件检测的具体方法如下: ①利用“haar”小波对信号第一层小波细节系数直接进行重构, 通过获取信号的模极大值而获得信号的突变点位置, 该位置即为反射事件和测量光纤的始末端位置。②将始末端位置对应的信号进行去除以防止对非反射事件的检测造成干扰。③对信号进行分段, 每 50 个数据点为一个数据段, 即 1~50 为一个数据段, 2~51 为另一个数据段, 以此类推, 那么总共有 $N-49$ 个数据段; 对每个数据段均进行最小二乘拟合, 得到每个数据段的斜率 k ; 设定斜率阈值和非反射事件损耗阈值,

臧益鹏,李现勤,吴松桂,等: 基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法

若同时满足这 2 个判定条件,则标记为非反射事件。
④对标记的反射事件与非反射事件进行事件分隔与事件误判消除,判断标准为若 2 种事件定位位置的距离大于/等于 $1.2w$,则分隔为 2 种事件;若距离小于/等于 $0.8w$,则为噪声引起的事件误判,对其进行消除。确定好反射事件和非反射事件后,计算事件损耗。事件检测方法流程图如图 3 所示。

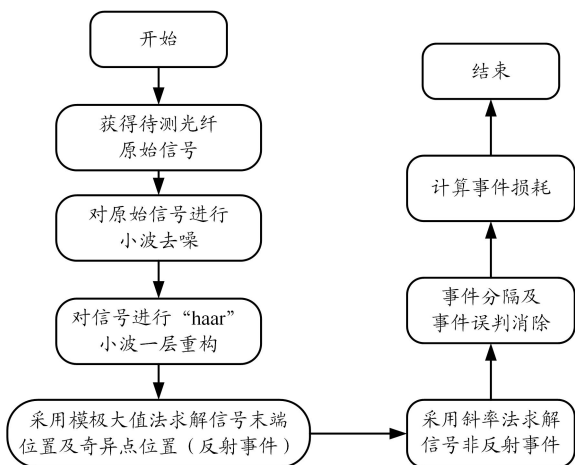


图 3 事件检测方法流程图

通常一个事件的持续距离与分辨空间相一致,数据的分辨空间 w (脉冲宽度所对应的距离)为

$$w = \frac{c\tau}{2000n} \quad (8)$$

其中,分辨空间 w 单位为 km, c 为光速, n 为光纤的折射率,本文取 $n=1.4679$ 。

采用上述事件检测方法对仿真模拟信号进行检测,对经过小波去噪后的信号采用“haar”小波分解。因为反射事件的信息主要集中在细节系数部分,所以可以利用第一层尺度分解的细节系数直接重建得到包含反射事件的高频信号,再采用小波模极大值法得到高频信号的模极大值,小波模极大值图如图 4 所示。

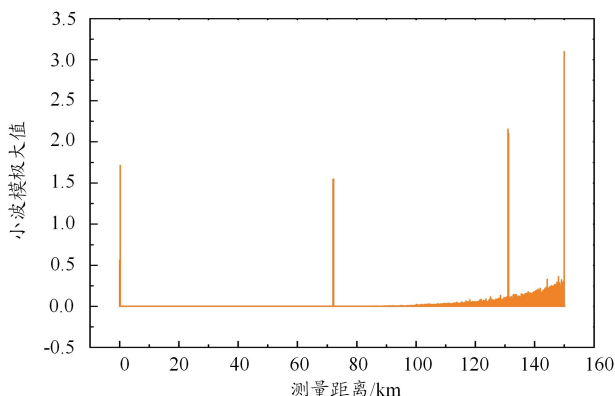


图 4 小波模极大值图

可以看出,图中的突出峰为测量光纤中反射事件及始末端位置。采用小波模极大值法获得测量光纤中反射事件与始末端位置后,去除光纤始末端位置对应的信号以排除光纤始末端的干扰,然后对信号进行数据分段,对每个数据段进行最小二乘拟合,获得每个数据段的斜率如图 5 所示。图中插图(凹陷处)为不同位置的非反射事件。由局部放大图可以看出,非反射事件对应的数据段斜率明显小于正常光纤的斜率,且反映出反射事件位置。在非反射事件定位时,需要去除前面已经定位出的反射事件;同时,非反射事件的衰减应比相同距离的正常光纤衰减更大。因此,为了正确区分反射事件和非反射事件,需要设置斜率阈值和事件损耗阈值。对定位好的反射事件与非反射事件进行事件分隔和事件误判消除,确定好事件位置后,根据测量光纤信号计算出事件损耗。

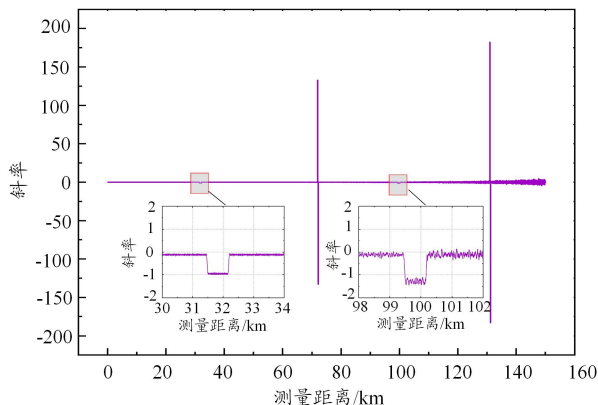


图 5 去除光纤始末端后的数据段斜率

仿真模拟信号的事件检测分析结果如表 1 所示。可以看出,采用本文提出的事件检测方法可精确定位事件位置,反射事件的检测计算位置与仿真信号设定位置偏差小于 5 m,而非反射事件检测计算位置偏差小于 15 m。由于非反射事件定位主要依赖于斜率法与斜率阈值的选择,受噪声影响程度要高于反射事件定

表 1 仿真模拟信号的事件检测分析结果

事件序号	事件类型	仿真信号设定位置/km	检测计算位置/km	检测计算损耗/dB
1	光纤始端	0.204	0.204	—
2	非反射事件	31.500	31.506	0.671
3	反射事件	72.000	71.997	0.175
4	非反射事件	99.500	99.487	0.874
5	反射事件	131.000	130.998	0.214
6	光纤末端	150.000	149.997	—

位,且在利用斜率法进行计算时,虽然计算了整个数据段,但也会造成非反射事件定位的偏差。因此,非反射事件定位准确度要略低于反射事件定位。

3 实验分析

本文经过上述数值仿真模拟后,在实验室搭建了一套 OTDR 系统,用于对长距离传感光纤的测量,以验证所提的 OTDR 事件检测方法在实际应用中的可行性。实验采用 ANALOG 公司的 ADA4355 OTDR。为获得较高的动态范围和探测到更远的距离,将 OTDR 测试系统的脉冲宽度设置为 $10\ \mu\text{s}$,待测光纤由任意几段光纤连接组成,更好地贴合实际环境中传感光纤发生故障和连接处弯曲等情况。OTDR 实物图如图 6 所示。

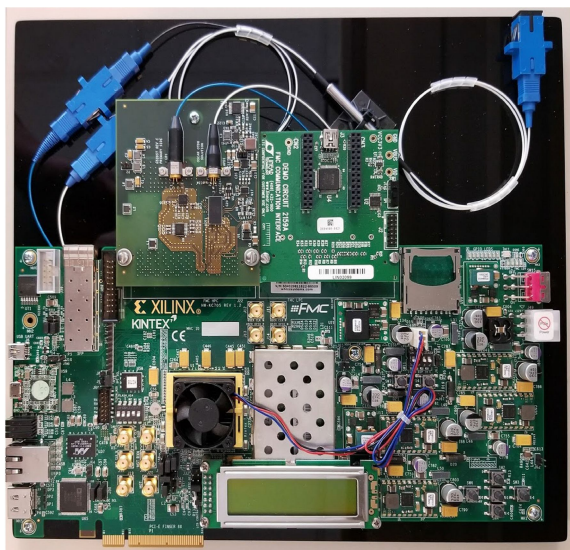


图 6 ADA4355 OTDR 实物图

本文以 $4 \times 14.760\ \text{km} + 10.016\ \text{km}$ 共 5 段光纤连接而成的传感光纤为例。由于实验中使用的 OTDR 系统在进行信号采样时已经对信号进行了多次平均处理,所以小波去噪对原始信号的信噪比的提升较少。小波去噪后信号和小波模极大值如图 7 所示。可以看出,经过小波去噪后的信号较为平滑,能够清晰地显示出测量光纤始末端及反射事件所引起的突变;对去噪后信号求小波模极大值,模极大值位置正好对应于测量光纤始末端及反射事件位置。利用小波模极大值法获得测量光纤始末端位置后,将光纤始末端位置对应信号进行去除,以排除光纤始末端的干扰,然后对去噪后信号数据进行分段并进行最小二乘拟合。每个数据段的斜率如图 8 所示。通过选取合适的斜率阈值与损耗阈值,根据图 8 的数据计算出非反射事件位置;再

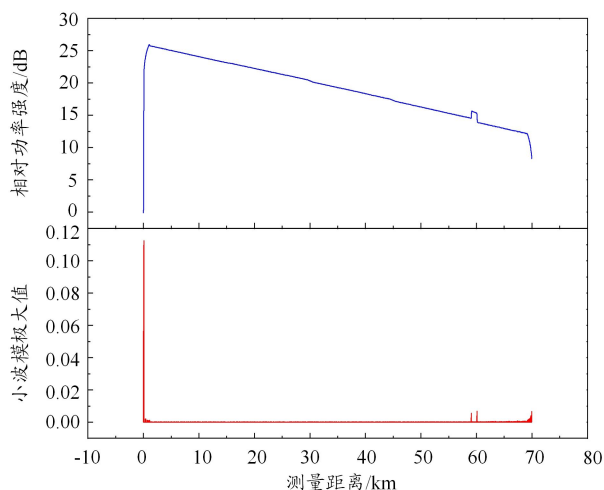


图 7 小波去噪后信号(上图)及去噪后信号的模极大值(下图)

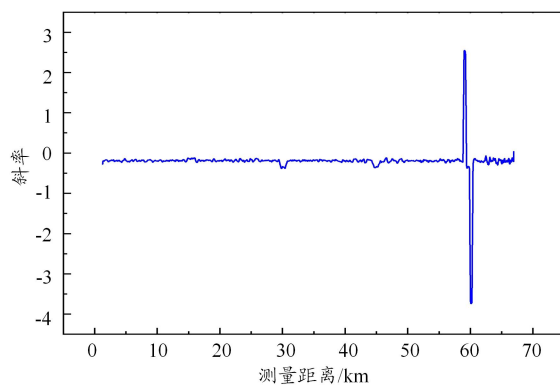


图 8 去除光纤始末端后的数据段斜率

对测量光纤中的反射事件和非反射事件进行事件分隔与事件误判消除,最终确定事件准确位置。实验信号的事件分析结果如表 2 所示。可以看出,测量光纤的事件检测分析结果与光纤连接位置及光纤总长度相一致,位置偏差小于 80 m。实际光纤测量结果偏差大于仿真模拟结果的原因是由于在实际应用中噪声影响比模拟时更大,且信号在采集时已经经过多次平均,有可能会造成事件位置处细节信息的缺失。同时,

表 2 实验信号的事件检测分析结果

事件序号	事件类型	测量光纤位置/km	事件位置/km	事件损耗/dB
1	光纤始端	—	1.163	—
2	非反射事件	29.520	29.440	0.402
3	非反射事件	44.280	44.237	0.384
4	反射事件	59.040	59.027	0.668
5	光纤末端	69.056	69.048	—

臧益鹏,李现勤,吴松桂,等: 基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法

长距离光纤的实际长度与光纤盘上标签标明长度也存在一定偏差。

4 结束语

本文提出了基于改进小波变换的 OTDR 事件检测方法。先对小波去噪算法进行改进,再对 OTDR 测量光纤信号进行去噪处理,并采用小波模极大值法和斜率法相结合对信号进行事件检测。仿真结果表明:相较于传统小波去噪算法,改进后的算法能够保留数据的细节信息,对后续事件检测更具优势;同时,采用本文所提 OTDR 事件检测方法对仿真信号进行检测,能够有效定位出事件位置和光纤始末端位置,其中反射事件的检测计算位置与仿真信号设定位置偏差小于 5 m,而非反射事件检测计算位置偏差小于 15 m,定位准确度较高。

本文所提检测方法可以较为精准地对测量光纤进行事件和始末端定位,测量光纤的事件检测分析结果与光纤连接位置及光纤总长度相一致,为光纤网络中事件的精准检测定位奠定了基础。下一步工作将结合智能优化算法和小波变换算法在精准定位事件的基础上,继续深入研究提升事件定位准确度和快速响应的方法。

参考文献:

- [1] HU C J, LI J. The application of wavelet transform in analysis of OTDR curve [C]//IEEE. Proceeding of 2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Los Alamitos: IEEE, 2010: 216–219.
- [2] RAMJI T, PRASANT K S. Dynamic range enhancement of OTDR using lifting wavelet transform-modified particle swarm optimization scheme[J]. IET Optoelectronics, 2019, 13(6): 295–302.
- [3] CUI H M, ZHAO R M, HOU Y L. Improved threshold denoising method based on wavelet transform [J]. Physics Procedia, 2012, 33: 1354–1359.
- [4] LI Q, ZHANG C X, LI C S. Fiber-optic distributed sensor based on phase-sensitive OTDR and wavelet packet transform for multiple disturbances location [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(24): 7235–7238.
- [5] 李翔. 基于小波分析的测量信号处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] LIU F L, ZAROWSKI C J. Detection and location of connection splice events in fiber optics given noisy OTDR data. Part II. R1MSDE method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(2): 546–556.
- [7] ZHANG X, ZHAO H, SUN G, et al. Localization of non-reflective events in OTDR data combining DWT with template matching[C]//IEEE. Proceeding of 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing. Shanghai, China: IEEE, 2011, 4: 2275–2279.
- [8] YONGMIN K, JINGHAO S, SUNG R H, et al. Analyzing OTDR measurement data using the kalman filter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(5): 947–951.
- [9] MUHAMMAD U, SAJID S M. Vector indexing algorithm for post processing of OTDR data[C]//IEEE. Proceeding of 2013 18th European Conference on and Optical Cabling and Infrastructure. Graz: IEEE, 2013: 257–262.
- [10] JEAN P, MARIO H S, JOAQUIM D G, et al. Adaptive filter for automatic identification of multiple faults in a noisy OTDR profile[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3418–3424.
- [11] 刘丹蕾, 闻金朝, 彭怀敏. 基于 OTDR 的光缆故障点精确定位方法[J]. 光散射学报, 2018, 30(4): 384–387.
- [12] 朱信刚, 陆飞飞, 陆英, 等. 基于非局部均值滤波增强的 OTDR[J]. 光通信技术, 2019, 43(2): 58–62.
- [13] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617–643.
- [14] M CUI H M, ZHAO R M, HOU Y L. Improved threshold denoising method based on wavelet transform [J]. Physics Procedia, 2012, 33: 1354–1359.