

郭诗然, 曹晨光, 王续东, 等. 基于小波变换的动态海缆光纤衰减事件检测[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(1): 110-116.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24040306

基于小波变换的动态海缆光纤衰减事件检测

郭诗然¹, 曹晨光¹, 王续东¹, 樊晶晶¹, 安博文², 胡世泽²

(1 中海油融风能源有限公司, 上海 200335; 2 上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘要: 动态海缆受洋流冲刷产生物理振动, 同步引起动态海缆内的光纤产生物理性能变化。分布式光纤声波传感技术 (Distributed fiber Acoustic Sensing, DAS) 利用解调得到的相干瑞利散射光的相位来表征动态海缆振动信息, 并可同步输出瑞利散射和菲涅尔反射光强曲线。针对 DAS 探测得到的光强曲线存在信噪比较低不利于进行事件检测的问题, 本文提出一种低信噪比光强曲线的光纤衰减事件检测方法。该方法首先对信号进行降噪处理, 然后通过窗口标准阈值法和斜率法找出光纤发生反射事件和非反射事件的位置。本文比较了不同降噪算法的性能差异, 分析了信噪比对事件检测精度的影响。

关键词: 动态缆; 光纤衰减探测; 降噪; 事件检测; 性能差异

中图分类号: TN913.33

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)01-0110-07

Dynamic submarine cable fiber attenuation event detection based on wavelet transform

GUO Shiran¹, CAO Chenguang¹, WANG Xudong¹, FAN Jingjing¹, AN Bowen², HU Shize²

(1 CNOOC Rongfeng Energy Co., Ltd., Shanghai 200335, China;

2 College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Dynamic submarine cables generate physical vibrations due to the scouring of ocean currents, and the physical properties of the optical fiber in the dynamic cable are changed synchronously. Distributed fiber Acoustic Sensing (DAS) uses the phase of coherent Rayleigh scattering light obtained by demodulation to characterize the dynamic cable vibration information, and can synchronously output Rayleigh scattering and Fresnel reflection intensity curves. Aiming at the problem that the light intensity curve detected by DAS has a low signal-to-noise ratio, which is not conducive to event detection, this paper proposes an optical fiber attenuation event detection method with a low signal-to-noise ratio light intensity curve. This method firstly denoises the signal, and then uses the window standard threshold method and the slope method to find out the location of the reflective and non-reflective events in the optical fiber. In conclusion, the performance differences of different noise reduction algorithms are compared, and the influence of signal-to-noise ratio on event detection accuracy is analyzed.

Key words: dynamic cable; optical fiber attenuation detection; noise reduction; event detection; performance differences

0 引言

动态海缆是浮式风机的动力和通信纽带, 动态缆受海水冲击引起的长期晃动致使结构疲劳增加, 现有技术条件下, 无法对漂浮段动态缆结构疲劳进行直接监测, 但海缆内光纤受疲劳损伤后的传输衰减变化则可被记录, 因此可以通过监测光纤的传输衰减对海缆机械结构疲劳进行分析监测^[1-2]。

OTDR 事件定位算法一直以来都受到科研人员的高度重视^[3-5]。2019年, 朱信刚等学者^[6]引入边

缘检测算法对 OTDR 曲线进行事件定位分析, 结合最小二乘法和五点斜率分析事件的类型和损耗大小。同年, Lunglmayr 等学者^[7]提出线性 Bregman 迭代法, 利用迭代法对 OTDR 曲线进行自动检测事件, 但是却未对 2 种算法对噪声的具体影响进行分析。田奥升等学者^[8]在 2023 年提出一种小波软阈值降噪的方法, 对含噪的信息进行事件定位分析, 但是软阈值的连续性较好, 容易造成边缘模糊, 不利于事件定位算法。2024 年, 臧益鹏等学者^[9]提出了一种改进小波变换, 对阈值和处理方法做出改进, 使得

作者简介: 郭诗然(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向: 安全生产研究和管理。

通信作者: 曹晨光(1993—), 男, 工程师, 主要研究方向: 安全生产研究和管理。Email: 694649206@qq.com。

收稿日期: 2024-04-03

算法的精确度得到提升,但算法复杂度过高,且对不同噪声的情况也未做具体分析。

以上方法都是建立在使用精密的 OTDR 仪器测得的 OTDR 曲线基础上的。DAS 通过解调瑞利散射光的相位来表征振动信息,同时输出含噪声的光强曲线^[10-11]。基于上述情况,本文提出一种基于 DAS 输出的 OTDR 曲线进行事件检测方法,通过对噪声的分析及去除,提高了检测的准确性,采用窗口化阈值对事件进行定位,降低算法复杂度,节约光纤资源和硬件设备。

1 总体方案设计

本文的研究内容为基于 DAS 输出的 OTDR 曲线进行事件检测。总体方案设计如图 1 所示。将光纤接入 DAS 得到含有噪声的 OTDR 曲线,对含噪声的 OTDR 曲线进行降噪处理,最后分别进行反射事件检测和非反射事件检测^[12]。

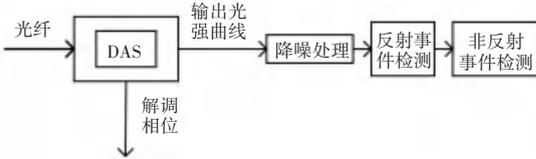


图 1 总体方案设计

Fig. 1 Overall scheme design

2 降噪方法

2.1 滤波器降噪

滤波器降噪即对 OTDR 信号进行滤波处理,在光强曲线处理中可以消除噪声、平滑曲线、增强细节,并调整信号的动态范围,从而提高曲线的质量和可读性^[13-14]。

本文检测的链路过长且噪声较高,故选取较低的截止频率和较高的阶数,但阶数过高会使曲线平滑不利于事件检测^[15-16],采集的 OTDR 曲线的平均时间为 1 s,根据奈奎斯特定理,采样频率需大于 2 Hz。

2.2 累加平均降噪

在对 OTDR 信号处理过程中,通过将信号窗口化,并对信号采用累加平均降噪法,对窗口中的数据取平均值,而后用平均值代替原来的值,对整个重叠窗口取平均值,窗口内的数据被平均化,从而减小了噪声的影响^[17-18]。平均值作为原窗口的值,有助于消除噪声引起的突变或异常值。这种方法尤其适用于均值为 0 的噪声类型,例如高斯噪声。

2.3 小波降噪

在 OTDR 信号中,有效信号主要集中在频段的

低频部分,噪声则主要集中于高频部分,而有效信号中的突变信号也主要分布在高频部分,且对应较大的小波系数。因此,将 OTDR 信号进行小波变换后,在高频部分对应的小波系数中,噪声对应的小波系数数值要小于突变信号对应的小波系数数值^[19-20]。所以对于信号的小波降噪实际上是将高频小波系数中的噪声小波系数加以滤除,然后保留较大的高频小波系数,最后根据保留下来的系数进行小波重构得到降噪的数据^[21]。

小波分解流程如下:

(1) 小波分解。小波分解原理如下:

对任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换(CWT)为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

其中, $\Psi(t)$ 表示母函数; a 表示尺度因子; b 表示平移因子。

取 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^{-m}$ ($m, n \in \mathbb{Z}$), 得到离散小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a_0|^m}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (2)$$

当 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 时,得到二进制小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi(2^{-m} t - n) dt \quad (3)$$

(2) 分解后高频系数的值量化。对每个高频系数,确定一个阈值进行量化运算。本文采用极大极小阈值,用硬阈值函数来处理阈值。阈值规则如下:

$$A = \begin{cases} \sigma(0.3936 + 0.1829 \log_2 n), & n > 32 \\ 0, & n < 32 \end{cases} \quad (4)$$

其中, σ 表示噪声信号的标准差, n 表示小波系数的个数。 σ 的表达式为:

$$\sigma = \frac{\text{middle}(W_{j,k})}{0.6745, 0} \leq k \leq 2^{j-1} - 1 \quad (5)$$

其中, $W_{j,k}$ 表示分解尺度 j 下的小波系数。分子表示对 $W_{j,k}$ 取绝对值后再取中值。保留大于阈值的系数原值,将小于阈值的系数置 0^[22]。

3 降噪性能对比

本文通过对数据添加均值为 0、方差不同的高斯噪声,并将其作为原噪声数据,在此基础上对噪声数据分别进行 3 种降噪处理。因为非反射事件的损耗值与噪声方差的关系对降噪有一定影响,原数据的损耗值约为 1.5,实验选取噪声方差在 0.5 ~

3.0 之间的典型值进行仿真实验。其中,滤波降噪算法采用的是6阶低通巴特沃斯滤波器,截止频率为0.1 Hz,采样频率为2 Hz;累加平均降噪算法的平均窗口为20,重叠窗口为5;小波降噪算法选择合适的基小波,确定分解层数,基小波应具有正交性和紧支撑性^[23],本文选用‘haar’基小波,分解层数为4。

采用信噪比、损耗值和斜率作为降噪性能指标。为了更好地计算损耗值和斜率,对降噪后的数据进行加权拟合,找到非反射事件点 w 后,为避免噪声的干扰,选用前后间隔为30的两点、即 $w - 15$ 和 $w + 15$ 两点进行损耗值和斜率的计算。

(1) 加入均值为0、方差为0.5的高斯白噪声。图2是对原始数据加入均值为0、方差为0.5的高斯白噪声后的数据,图3~图5是对加入噪声后的数据分别进行滤波降噪拟合、累加平均降噪拟合和小波降噪拟合后的数据。

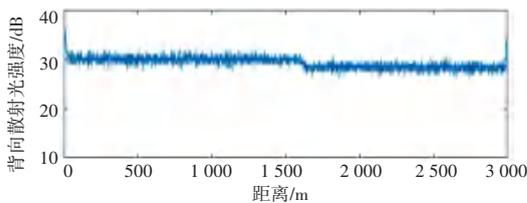


图2 添加方差为0.5的高斯白噪声后的数据

Fig. 2 Data after adding Gaussian white noise with a variance of 0.5

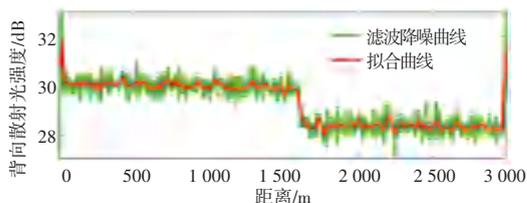


图3 方差0.5噪声数据滤波降噪后的数据

Fig. 3 Data after filtering and denoising the noise with a variance of 0.5

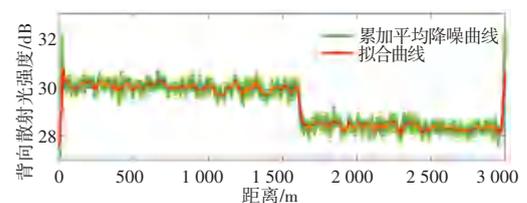


图4 方差0.5噪声数据累加平均降噪后的数据

Fig. 4 Data after accumulated average noise reduction of noise data with a variance of 0.5

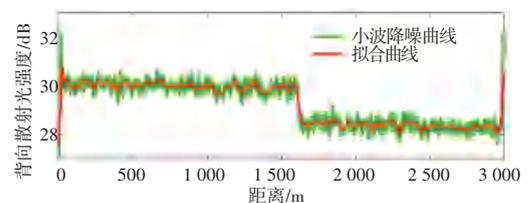


图5 方差0.5噪声数据小波降噪后的数据

Fig. 5 Data after wavelet denoising of noise data with a variance of 0.5

(2) 加入均值为0、方差为1.5的高斯白噪声。图6是对原始数据加入均值为0、方差为1.5的高斯白噪声后的数据,图7~图9是对加入噪声后的数据分别进行滤波降噪拟合、累加平均降噪拟合和小波降噪拟合后的数据。

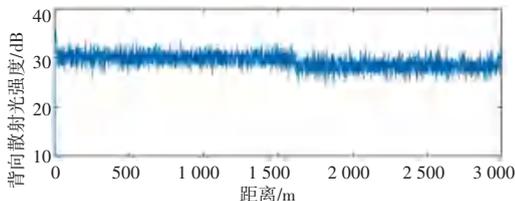


图6 添加方差为1.5的高斯白噪声后的数据

Fig. 6 Data after adding Gaussian white noise with a variance of 1.5

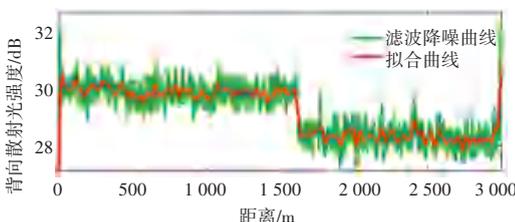


图7 方差1.5噪声数据滤波降噪后的数据

Fig. 7 Data after filtering and denoising the noise with a variance of 1.5

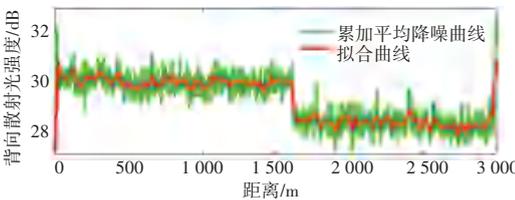


图8 方差1.5噪声数据累加平均降噪后的数据

Fig. 8 Data after accumulated average noise reduction of noise data with a variance of 1.5

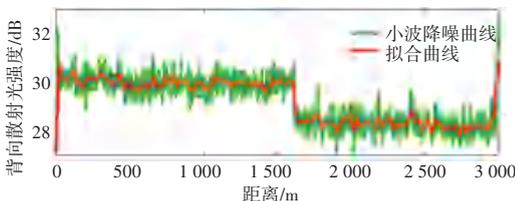


图9 方差1.5噪声数据小波降噪后的数据

Fig. 9 Data after wavelet denoising of noise data with a variance of 1.5

(3) 加入均值为0、方差为2.0的高斯白噪声。图10是对原始数据加入均值为0、方差为2.0的高斯白噪声后的数据,图11~图13是对加入噪声后的数据分别进行滤波降噪拟合、累加平均降噪拟合和小波降噪拟合后的数据。

(4) 加入均值为0、方差为3.0的高斯白噪声。图14是对原始数据加入均值为0、方差为3.0的高斯白噪声后的数据,图15~图17是对加入噪声后的数据分别进行滤波降噪拟合、累加平均降噪拟合和

小波降噪拟合后的数据。

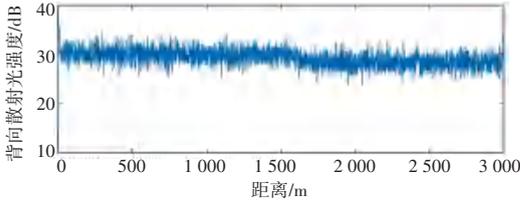


图 10 添加方差为 2.0 的高斯白噪声后的数据

Fig. 10 Data after adding Gaussian white noise with a variance of 2.0

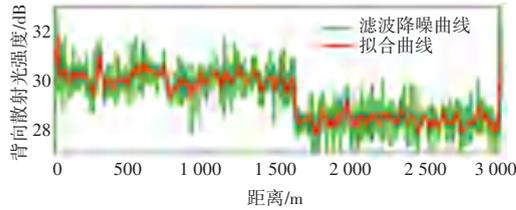


图 11 方差 2.0 噪声数据滤波降噪后的数据

Fig. 11 Data after filtering and denoising the noise with a variance of 2.0

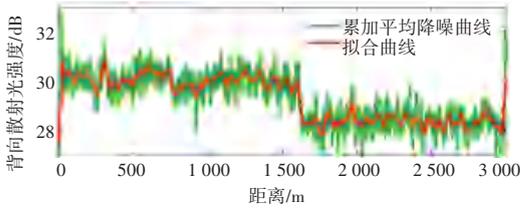


图 12 方差 2.0 噪声数据累加平均降噪后的数据

Fig. 12 Data after accumulated average noise reduction of noise data with a variance of 2.0

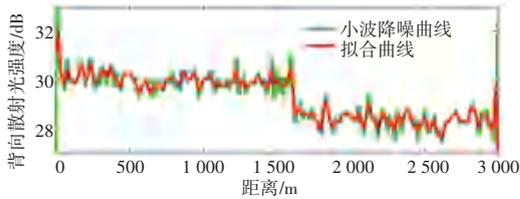


图 13 方差 2.0 噪声数据小波降噪后的数据

Fig. 13 Data after wavelet denoising of noise data with a variance of 2.0

进一步可得,3 种降噪方法后的仿真结果见表 1。从仿真结果来分析,当方差为 0.5 时 3 种方法均能有效进行降噪,保留原有的事件特征;当方差为 1.5 时,滤波法的结果较为模糊,另外 2 种方法依旧能检测;当方差为 2.0 时,滤波法和累加平均法虽也

能进行降噪,但是原有的事件特征较模糊,而小波降噪仍将事件特征有效保留下来;当方差为 3.0 时,3 种方法均不能得到非常好的效果。从降噪后的信噪比和损耗值/斜率来分析可知,无论方差为多少,小波降噪后的数据更接近原始数据。综上分析可得,本文将采取小波降噪进行实验。

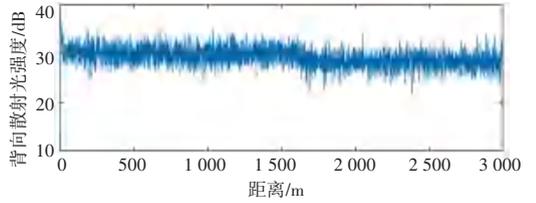


图 14 添加方差为 3.0 的高斯白噪声后的数据

Fig. 14 Data after adding Gaussian white noise with a variance of 3.0

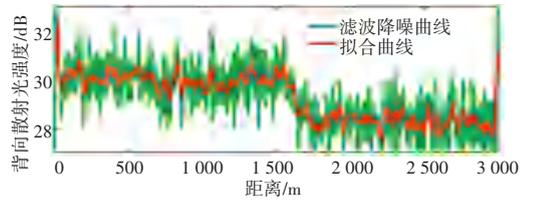


图 15 方差 3.0 噪声数据滤波降噪后的数据

Fig. 15 Data after filtering and denoising the noise with a variance of 3.0

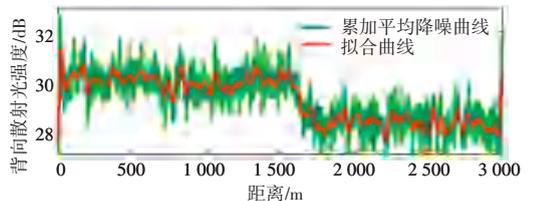


图 16 方差 3.0 噪声数据累加平均降噪后的数据

Fig. 16 Data after accumulated average noise reduction of noise data with a variance of 3.0

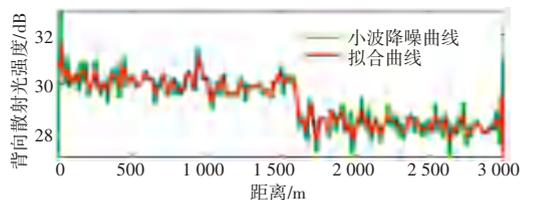


图 17 方差 3.0 噪声数据小波降噪后的数据

Fig. 17 Data after wavelet denoising of noise data with a variance of 3.0

表 1 3 种降噪方法后的信噪比、损耗值/斜率

Table 1 The Signal-to-Noise Ratio, loss value / slope after three noise reduction methods

方差	降噪方法信噪比/损耗值/斜率		
	滤波	累加平均	小波
0.5	19.93/1.5/0.044 1	20.16/1.5/0.044 5	27.27/1.5/0.048 3
1.5	19.22/1.5/0.037 5	19.47/1.6/0.040 0	21.56/1.5/0.040 5
2.0	19.00/1.5/0.034 8	19.27/1.7/0.037 7	20.40/1.5/0.039 4
3.0	18.49/1.6/0.032 0	18.79/1.6/0.037 2	19.08/1.8/0.038 2

4 光纤衰减事件检测

本文对原始数据和添加噪声、并通过小波降噪后的数据进行事件检测。

4.1 数据预处理

在对信号进行降噪处理后,为降低噪声对事件检测的影响,本文对尾端噪声进行去除。尾端噪声去除方法如下:先找到第一个光强小于均值的点,记录其位置,再朝后检查 100 个点确保光强小于均值的点达到一定比例、且存在连续 10 个点小于均值,确认噪声开始的位置,去除后面的数据。

4.2 反射事件的检测

反射事件检测流程如图 18 所示。因为反射事件的光强强度大于非反射事件的光强强度,且在反射事件发生的点光强强度迅速出现突变,所以本文可以将处理后的数据做差分求得斜率,同时对斜率做窗口化,计算每个窗口的标准差,继而设定一个阈值。由于后向瑞利散射的光强只与光纤衰减系数和光纤长度有关,故选用同样的光纤测定没有事件发生的 OTDR 曲线,计算其标准差。考虑到噪声的存在且发现事件点的标准差是一般情况下的 5~6 倍,故阈值可以选取正常标准差的 2~4 倍,找到标准差大于阈值的窗口,即可初步判定反射事件发生的窗口位置,此后在窗口内找到斜率变化最快的点就是反射事件发生的点。

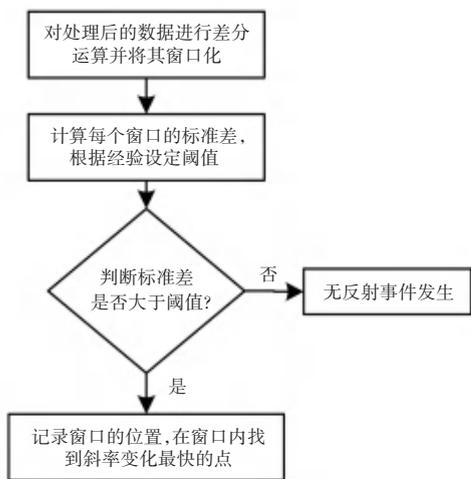


图 18 反射事件检测流程

Fig. 18 Reflection event detection process

差分运算公式为:

$$\Delta y(t) = y(t) - y(t-1) \quad (6)$$

其中, $y(t)$ 表示在时间 t 上的观测值, $\Delta y(t)$ 表示在时间 t 上的差异或变化值。

实验对原始数据和加噪后用小波降噪后的数据

进行了事件检测。检测结果如下。

图 19~图 20 中五角星位置为反射事件发生点,可见加噪后依旧能检测到反射事件点。

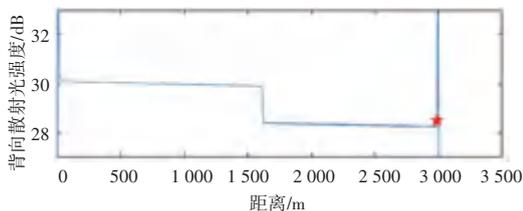


图 19 原始数据反射事件检测结果

Fig. 19 Reflection event detection results of raw data

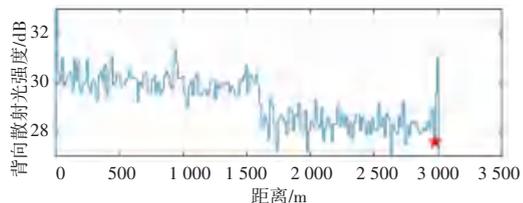


图 20 加噪后降噪的数据反射事件检测结果

Fig. 20 Reflection event detection results of data after adding noise and then denoising

4.3 非反射事件的检测

非反射事件检测流程如图 21 所示。在检测出反射事件的位置后,将反射事件位置去除,在 2 个反射点之间寻找非反射事件发生的位置,可以计算 2 个反射事件点之间的斜率差值,如果大于没有反射事件发生的阈值则可以初步判断 2 个反射事件点之间存在非反射事件。接下来,在 2 个反射之间将每段数据窗口化,设定窗口大小,对每个窗口进行最小二乘法拟合,设定非反射事件的阈值,整段拟合的斜率必然远小于非反射事件的斜率,约大于正常拟合的斜率。为去除噪声的影响,选择整段拟合斜率的 2~3 倍作为阈值,将拟合后的斜率与阈值进行比较,得出非反射事件发生的窗口。

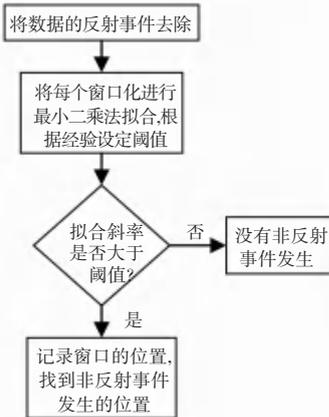


图 21 非反射事件检测流程

Fig. 21 Non-reflective event detection process

设一组离散数据 $\{(X_i, Y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 将其拟合成 $y(x) = ax + b$, 使得结果最小。该结果的数学公式为:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (7)$$

欲求其最小值对应值, 应分别对两参数求偏微分:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) x_i = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

解得:

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \\ b = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i\right) \end{cases} \quad (9)$$

其中, a 为拟合曲线的斜率, b 为拟合曲线在 y 轴上的截距。

仿真运行后可得, 图 22~图 23 中五角星位置为非反射事件发生点, 可见加噪后依旧能检测到非反射事件点。事件定位误差见表 2。

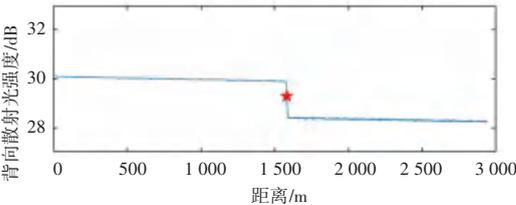


图 22 原始数据非反射事件检测结果

Fig. 22 Non-reflective event detection results of raw data

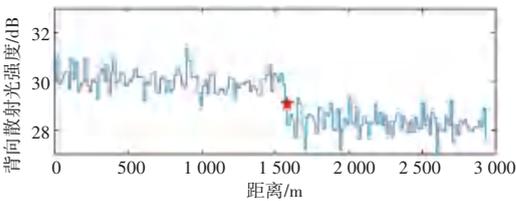


图 23 加噪后降噪的数据非反射事件检测

Fig. 23 Non-reflective event detection results of data after adding noise and then denoising

表 2 事件定位误差

Table 2 Event location error

数据	反射事件/m	非反射事件/m	损耗值/dB
原始数据	2 987	1 615	1.505
加噪声后再降噪的数据	2 977	1 601	1.800
误差	10	14	0.295

从结果分析来看, 加噪后的事件定位及损耗值检测结果存在误差, 但误差在工程应用要求范围内。

5 结束语

本文进行基于分布式光纤声波传感的动态海缆光纤衰减事件检测。先对 DAS 采集到的含噪 OTDR 信号进行降噪分析, 通过对比信噪比、损耗值和斜率, 分析出小波降噪是最优方法; 再对 OTDR 信号进行小波降噪, 为了更好定位事件, 研究去除了尾端噪声, 最后本文采用窗口标准差阈值和最小二乘法拟合检测反射事件和非反射事件。仿真实验表明: 对 DAS 技术采集到的含噪 OTDR 信号, 小波降噪能有效降低噪声的影响, 准确地检测到反射事件和非反射事件发生的位置。

本文提出的降噪方法和检测方法能有效检测出含噪声信号的事件, 使得光纤衰减监测无需依靠专用精密 OTDR 仪器, 节约了光纤资源和硬件设备, 具备工程应用推广价值。

参考文献

- [1] 刘艾华, 林毅峰, 刘志远, 等. 浮式风机的动态海缆疲劳监测方法 [P]. 中国: CN114486581B, 2023-10-31.
- [2] 李雷, 赵惜阳, 钱洪宇, 等. 近海风电场潮间带风机集电海缆维修施工案例分析 [J]. 电线电缆, 2024, 67(1): 49-52.
- [3] WANG Yang, WANG Xijun, LI Xiaoling. OTDR-based optical fiber bending and tensile loss analysis [J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(3): 164-169.
- [4] 周智龙. OTDR 在公路机电工程光缆线路施工中的应用 [J]. 运输经理世界, 2023(7): 157-159.
- [5] 原恩育, 汤俊杰. 基于 OTDR 与电子地图的光缆故障自动监测系统研究 [J]. 信息通信, 2019(6): 274-275.
- [6] 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.
- [7] LUNGLMAYR M, AMARAL G C. Linearized Bregman iterations for automatic optical fiber fault analysis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Tmeasurement, 2019, 68(10): 3699-3711.
- [8] 田奥升, 张晔, 马超, 等. 基于小波软阈值滤波的含噪故障诊断方法 [J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(9): 1-4.
- [9] 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.
- [10] 王子恒, 景洪. 分布式光纤声波传感系统的研究与工程应用 [J]. 传感器世界, 2020, 26(12): 12-18.
- [11] 孙琪真, 范存政, 李豪, 等. 光纤分布式声波传感技术在石油行业的研究进展 [J]. 石油物探, 2022, 61(1): 50-59.
- [12] 张佐星, 施冬钢, 胡龙舟, 等. 喇曼复用 OTDR 模式识别算法研究 [J]. 光通信技术, 2019, 43(7): 21-24.
- [13] 谢芳, 陆文骏. 基于 Matlab 的 IIR 数字滤波器的设计与仿真 [J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2022, 34(3): 39-42.
- [14] 胡波. 光电检测电路噪声分析与噪声处理 [J]. 电子技术与软件工程, 2019(24): 76-77.
- [15] 黄波. 巴特沃斯数字滤波器的设计与仿真实现 [J]. 河南科技,

- 2021,40(36):10-12.
- [16] 田园. 基于 Matlab 的数字滤波器设计与仿真[J]. 无线互联科技, 2023, 20(19): 4-6.
- [17] 潘冬阳, 南钢洋, 白雪. 基于高速信号采集系统累加平均算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(8): 122-125.
- [18] 田竞红. 基于累加平均的超声 C 扫信号降噪方法研究[J]. 科技视界, 2022(30): 20-22.
- [19] 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.
- [20] 徐一帆. 小波降噪对汽车发动机噪声信号的处理方法研究[J]. 内燃机与配件, 2019(14): 14-15.
- [21] 邢挺, 范增盛, 马君梁, 等. 基于小波变换改进阈值函数的故障行波去噪方法[J]. 电工技术, 2023(17): 37-43.
- [22] 费鸿禄, 山杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. 爆破, 2022, 39(3): 41-47.
- [23] 高琳, 曹建国. 基于输气管道泄漏声发射信号特征的小波基构造研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 128-135.