

文章编号 1004-924X(2024)10-1433-10

面向电力管廊外破监测的分布式 光纤传感技术研究

范佳铭¹, 黄闽南¹, 王一山¹, 雍明超², 吕立冬^{1*}

(1. 安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 电力管廊是城市里重要的基础设施, 对其结构和状态进行监测及评估备受关注。本文针对电力管廊外力破坏监测的问题, 提出一种基于衰减补偿的光时域差分曲线方差阈值定位振动事件的方案, 并通过实验论证了其定位外破事件的准确性。该方案基于相敏型光时域反射系统架构, 根据管廊外破事件引起的光纤振动导致光时域反射曲线在该事件位置处混乱度急剧增加的现象, 对不同测量序列得到的光时域反射曲线作差, 然后对光纤各位置对应的差值向量数据求方差, 设定方差阈值定位外破事件。同时, 考虑到光纤衰减导致方差阈值随距离增加而降低的问题, 采用衰减补偿算法使光纤上任意散射位置对应相同的脉冲功率水平, 从而修正光纤衰减对方差阈值的影响。实验搭建了分布式光纤振动传感系统, 采用脉宽为 30 ns、峰值功率为 30 dBm 的光脉冲, 在约 25 km 的光纤范围, 获得 ±3 m 的定位精度。电力管廊外力破坏事件, 具有低频、大扰动、持续长的特点, 所提出系统方案通过曲线平均抑制瑞利散射衰落噪声, 结合光纤衰减补偿校正散射信号幅值, 从而将振动事件引起的光信号相位变化作为探测曲线波动的主导因素, 以确保对外力破坏事件不漏报、不误报。

关键词: 电力管廊; 相位敏感光时域反射; 差分方差算法; 振动监测; 阈值定位

中图分类号: TN212 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243210.1433

Research on distributed optical fiber sensing technology for power pipe corridor breakdown monitoring

FAN Jiaming¹, HUANG Minnan¹, WANG Yishan¹, YONG Mingchao², LÜ Lidong^{1*}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology,

Ma'anshan 243032, China;

2. Xuji Group Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

* Corresponding author, E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn

Abstract: The power pipe corridor is an important infrastructure in the city, and the monitoring and evaluation of its structure and state have attracted much attention. Aiming at the problem of external failure monitoring of power pipe corridor, this paper proposed a scheme for locating vibration events based on attenuation compensation and variance threshold of optical difference time domain curve, and proved its accuracy by experiments. This scheme was based on the phase-sensitive optical time domain reflectometry system architecture. According to the phenomenon that the optical fiber vibration caused by the broken event

收稿日期: 2023-12-14; 修订日期: 2024-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51977001)

outside the pipe corridor led to a sharp increase in the confusion of the optical time domain reflectometry curve at the location of the event, the optical time domain reflectometry curve obtained from different measurement sequences was differentiated, and then the difference vector data corresponding to each position of the optical fiber was evaluated and the variance threshold was set to locate the broken event. At the same time, considering the problem that the variance threshold decreased with the increase of distance due to fiber attenuation, the attenuation compensation algorithm was used to make any scattering position on the fiber correspond to the same pulse power level, so as to correct the influence of fiber attenuation on the difference threshold. A distributed fiber-optic vibration sensing system was set up in the experiment. Optical pulses with a pulse width of 30 ns and a peak power of 30 dBm were used to obtain a positioning accuracy of ± 3 m in the optical fiber range of about 25 km. The external force damage event of the power pipeline gallery has the characteristics of low frequency, strong disturbance, and long duration. The proposed system scheme suppresses Rayleigh scattering fading noise through trace averaging, and combines fiber optic attenuation compensation to correct the amplitude of the scattering signal. Therefore, the phase change of the optical signal caused by vibration events is the dominant factor in trace fluctuations to ensure that external force damage events are not missed or misreported.

Key words: power pipe corridor; phase sensitive optical time domain reflectometry; difference variance algorithm; vibration monitoring; threshold location

1 引言

当前,电力管廊发展迅速,已成为城市中重要的电力设施^[1]。电力管廊为电缆和通信线路提供了一种受保护环境,避免其受外部环境因素的影响,有助于提高电力系统的可靠性。电力管廊通常铺设在地下,可避免电力电缆在地上散乱地铺设,降低维护难度。地下电力管廊提供了易于监控和维护的环境,运维人员可以更容易地巡查和检修电缆以及通信线路,确保系统的可维护性和安全性。截至2022年我国综合管廊已建和在建长度为7 500 km^[2],其中,以北京市雄安新区为例,已建成综合管廊136 km。据统计,2022年地下管线破坏事故共1 162起,其中给排水管道破坏事故数量最多共901起^[3]。管廊设施遭到损坏,常常严重影响人们的生产和生活,例如,2018年,深圳地铁施工时连续两次将电力电缆挖断,导致周边5 000多户居民停电。2019年,北京轨道交通七号线进行维护桩钻孔,导致燃气管道泄漏,造成直接经济损失14.8万元。当前,综合管廊的安全监测有人工巡检^[4]、视频监控^[5]、机器人巡检^[6]、光纤传感监测^[7]等方法。由于人工巡检工作效率低、容易出现漏检等情况,已经逐渐被智能化监测所取代;视频监控可能存在一定视野

盲区使安全隐患得不到及时发现;机器人巡检的方式成本高昂而且难以很好地观察到管道的内部情况。分布式光纤传感技术以其监测覆盖距离长、测量对象广、抗电磁干扰能力强、小巧便携、抗腐蚀性好和性价比高等特点备受关注^[8]。这一技术将光纤与管廊一同铺设,通过监测外破事件引起的光纤振动信号,就能够及时察觉到一些外部破坏事件,如地下管道的形变、破损、入侵等,因此具有广泛的应用前景。

相位敏感光时域反射仪(Phase sensitive Optical Time Domain Reflectometer, Φ -OTDR),常用于分布式光纤振动定位^[9],它与光时域反射技术(Optical Time-Domain Reflectometer, OTDR)具有基本相似的结构,但最大的不同在于 Φ -OTDR采用的是窄线宽激光器^[10],以保证传感光的相位对振动事件的高度灵敏性。在外部扰动下如振动、温度和应变,会改变光纤上对应位置点的折射率和长度^[11],从而改变 Φ -OTDR背向瑞利散射光的相位,通过解调相位改变引起的背向瑞利散射光强度变化,可以实现对外部扰动的定位和识别^[12]。与其他分布式光纤振动定位方法相比,它具有更高的灵敏度和更快的响应速度,通常用于微小扰动的监测^[13]。

出于实时监测的需要,数据传输及处理速

度应及时且高效^[14]。传感器采集到的原始数据量庞大,必须进行快速处理。此外,事件定位与识别需要在较短的时间内完成^[15],因此,优化处理算法是有效提高检测效率的重要手段^[16]。通过改进算法,可以更准确地识别并定位外力破坏事件。国内外学者针对 Φ -OTDR系统信号解调算法进行了诸多研究,到2010年,Yuelan Lu将移动平均和移动差分应用到 Φ -OTDR系统振动定位,文中没有说明移动平均窗口的大小和差分的间隔,在时间处理上需要较长时间^[17]。2012年,梁可桢等人提出了利用数字相干检测技术解调出瑞利散射信号的振幅和相位,并且通过维纳滤波技术使得系统中的相位噪声减少,提高 Φ -OTDR的系统灵敏性^[18]。Zengguang Qin等人提出了小波变换的应用方法来降低系统噪声,小波变换降噪可以很好地保留信号的特征信息并且可以有效地提高信噪比^[19]。2013年,Tao Zhu等人提出了二维边缘检测方法,将采集到的连续背向瑞利散射信号通过边缘检测方法与Sobel算子卷积构成二维图像,并计算曲线的图像梯度来定位扰动位置,以增强系统的信噪比^[20]。2017年,Haijun He等人提出了一种基于二维双边滤波的自适应图像恢复算法,将采集到的瑞利散射信号转化为二维图像,通过算法可以有效地平滑噪声并且提取出有效的信号^[21]。Yong-Seok Kwon等人提出了移动平均算法,分析了移动平均法中各参数之间的关系,找出了参数之间的最优值可以有效地检测到事件^[22]。2021年,Yu-Xin Bai等人提出了一种基于经验模态分解和时频峰值滤波的融合降噪方法,增强了系统对低频干扰的识别^[23]。

虽然国内外学者在分布式光纤传感领域取得了许多研究成果,但还是存在许多难题没有解决,比如在长距离监测中提高系统的定位精度、降低系统的误报率和提高系统稳定性等问题^[24]。本文通过对逐差法分析发现由于激光器发出的功率不稳定以及背景噪声的影响,会使逐差法在定位时出现误报率较高的情况以及光纤距离越长逐差定位阈值越低的“怪象”。针对上述问题,我们首先增加时域曲线平均次数,抑制瑞利散射衰落噪声,降低探测曲线的随机波动,然后,引入了衰减补偿,消除了衰减因素,将

光纤沿线各位置处的散射信号校正到同一尺度,使信号的相位参数成为唯一的变量,从而克服了传统逐差法中光纤距离越长,差值反而越低的问题,在此基础上,提出了一种时域差分曲线的方差阈值算法,利用对散射光信号相位变化引起的时域曲线的混乱度统计特征分析,定位振动事件。实验表明,该算法可克服瑞利散射信号随机性的影响,从而对光纤振动事件的定位更加准确,在电力管廊外破监测与定位中具有实用价值。

2 系统方案

2.1 系统搭建与数据采集

实验系统如图1所示,窄线宽激光器发出连续光信号,该连续光进入声光调制器,数据采集卡产生电脉冲触发声光调制器将连续光信号调制为光脉冲,接着,光纤放大器提升光脉冲的峰值功率,然后,光脉冲进入光纤环形器1端口,再从2端口输出并进入到被测光纤中,光脉冲在被测光纤中传输产生的背向瑞利散射光从光纤环形器的2端口进入,然后从该光纤环形器的3端口输出并进入光电探测器。数据采集卡采集光电探测器输出的电信号,并将数据传输给上位机进行分析处理^[25]。

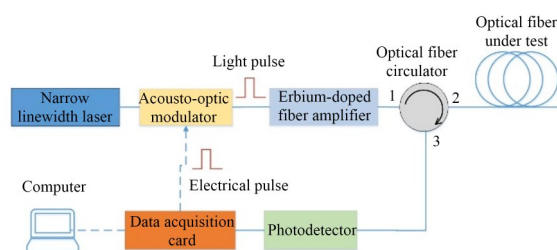


图1 Φ -OTDR系统图

Fig. 1 Schematic diagram of Φ -OTDR system

实验中,激光波长为1 550.12 nm,线宽为1.6 kHz,脉冲频率为3kHz,脉冲宽度为30 ns、峰值功率30 dBm,数据采集卡采样率为100 Msps。电力管廊外破事件,通常由挖掘机、冲击锤、重型机车等引起,一般频率在50 Hz以下,且振动强度大,对于低频、大强度事件的捕捉,监测与定位应以“稳”和“准”为目标,因此,可以适当增加曲线

平均次数,降低瑞利衰落噪声的影响,确保无外破事件时时域曲线“平稳”,进而凸显外破振动事件引起的光纤中光信号相位动态变化导致的光时域反射曲线混乱度增加的特性,保证电力管廊外力破坏定位的“准确”。本实验的数据平均次数为 100。目前模拟微小振动事件常用的方法是将光纤缠绕在压电陶瓷上加载周期性电压信号来模拟振动事件。然而,在实际情况中光纤的振动情况没有压电陶瓷反映得那么完美。另外,在光纤附近走动^[26-27]、敲击^[28-29]来模拟振动事件也比较常见。实验中,我们将光纤末端固定在地面上,再以 10 Hz 以下频率、常规非破坏性力度轻微拍击光纤或者敲击光纤附近地面区域模拟外破事件引起光纤振动,振动起始位置在光纤末端 24 225 m 处,振动范围约为 20 m。

实验采集 128 条光时域反射曲线进行对比分析。图 2 显示了施加振动事件时,128 条背向瑞利散射曲线的叠加,从中,可以非常明显地观察到图中虚线框内背向瑞利散射曲线混乱度非常大,而虚线框外的背向瑞利散射曲线(非振动区域)基本完全重合。

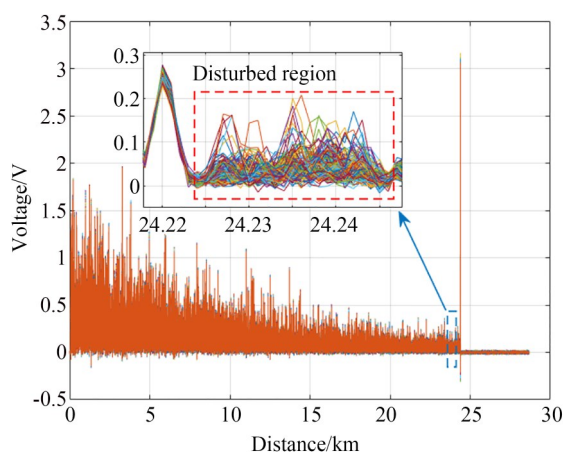


图 2 施加振动事件的 Φ -OTDR 曲线

Fig. 2 Φ -OTDR curve with vibration event loaded

2.2 传统算法分析

通过记录光脉冲进入被测光纤以及光纤沿线各位置处散射光返回的时间值,可以定位被测光纤沿线各散射位置。散射位置的距离与时间的对应关系如(1)式所示:

$$L = \frac{c \cdot t}{2n_f}, \quad (1)$$

其中: L 为光纤沿线各位置对应的距离, t 为光脉冲发送及光纤沿线某位置散射光返回的时间, n_f 为光纤的纤芯折射率, c 为真空中的光速^[30]。

Φ -OTDR 系统定位最常用的算法就是逐差定位算法,该方法简单且迅速,具备良好的实时性。其核心思想是将时域光信号强度的差值变化量与一个预设的阈值进行比较。如果变化量超过阈值,其对应的位置就被视为外界振动事件的发生位置。图 3 为逐差曲线,它是由 128 条背向瑞利散射曲线通过逐差相减得到的结果。对散射曲线进行逐行相减,可以获得各条散射曲线之间由于外部振动引起的光强变化信息。

从图 3 可以看出来,逐差曲线在振动处有明显的尖峰,但是在前端 2~3 km 处存在几个非常明显的噪声,这是因为可能受到背景噪声或者激光器功率不稳定的影响导致有几条背向瑞利散射曲线呈现不同的扰动幅度。如果采用逐差相减的算法出现了较高的尖峰点,在阈值定位的时候由于尖峰的存在,系统容易出现误报或错误定位。如何减小随机噪声的干扰是解决系统误报率高的有效途径。

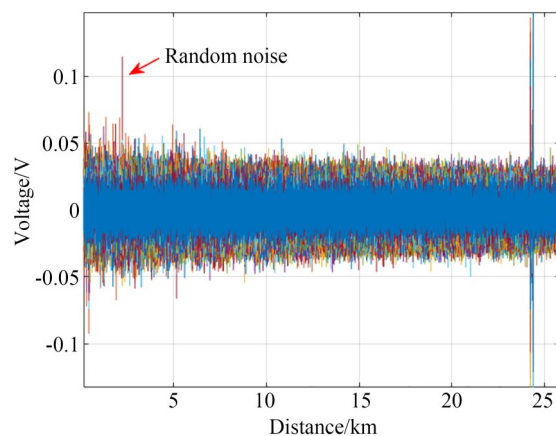


图 3 逐差曲线

Fig. 3 Differential curve

3 差分方差窗口阈值算法

本文运用数学统计学中的方差分析来对逐差曲线进行处理和分析。方差能够反映出随机变量离散程度,曲线振动处的混乱度大,而曲线

非振动区域的混乱度相对于曲线振动处的混乱度几乎不变,如图2所示。通过方差处理可以降低背向瑞利散射曲线噪声的影响提高信噪比,于是,本文提出了一种振动事件定位算法:时域差分曲线方差算法,从而定位振动位置,其系统的数据处理流程图如图4所示。

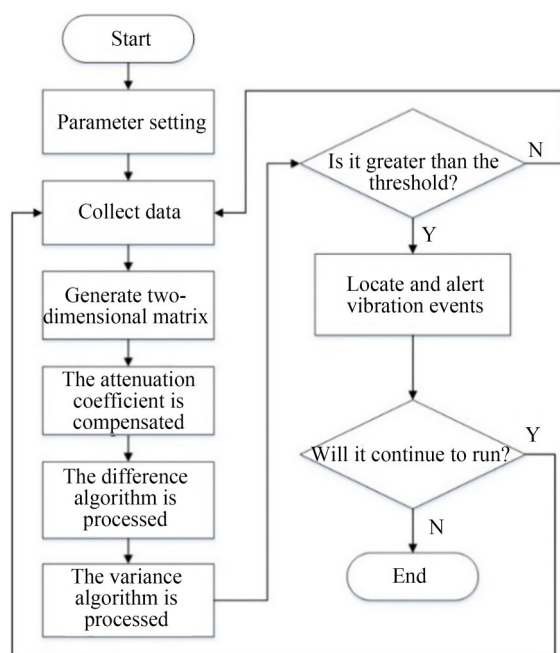


图4 数据处理流程图

Fig. 4 Data process flow chart

首先对系统进行参数设置,然后开始数据采集。采集到的数据转化为矩阵形式,矩阵形式可以更加清晰地表达出光时域反射曲线的条数以及长度距离信息,再通过衰减系数补偿方式使得背向瑞利散射曲线后端的功率补偿。然后,进行差分处理得到一个差分矩阵,再对差分矩阵进行方差处理最后得到一条方差曲线。通过阈值对时域差分曲线的方差曲线进行判断,确定是否有振动事件。若无振动事件则继续采集数据,若存在振动事件则对振动位置进行定位并发出报警信号。

算法的具体过程是先将采集到的原始数据进行时域差分,再将所得的曲线做方差处理进而得到方差曲线。具体步骤如下:

将采集卡采集到的一维数据进行矩阵处理,

获得二维矩阵,用矩阵 X 来表示:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,N} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M,1} & x_{M,2} & \cdots & x_{M,N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

X 为一个 $M \times N$ 的二维矩阵,其中“ M ”代表光时域反射曲线条数,“ N ”代表光纤沿线各位置信息。如图5所示,其中行向量 M 为128即总共有128条光时域反射曲线数据,列向量 N 为25 000个位置数据,相邻间隔为1 m,即对应总的光纤长度为25 km。

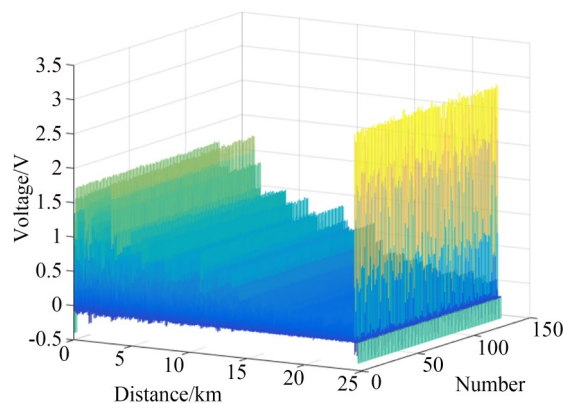


图5 三维时域曲线分布

Fig. 5 3-D time domain curve distribution

由于光脉冲功率会随着传输距离的增加而减小,为了在长距离监测中更加精准地判断出振动位置,对 X 矩阵中的各行(即光时域反射曲线数据)进行衰减系数补偿:

$$X'_{i,N} = X_{i,N} e^{\frac{2\alpha L}{4.3429}}, \quad (3)$$

其中: X' 为衰减系数补偿后的曲线数据, $X_{i,N}$ 为原矩阵对应的行向量, α 表示光在光纤的衰减系数,对于单模光纤, α 取0.2 dB/km, L 表示光纤沿线各位置对应的距离。对 X 矩阵对应的行向量都进行衰减系数补偿,最终得到了一个 $M \times N$ 的 X' 矩阵。对 X' 矩阵中,从第一行开始,相隔 n 行的两行向量数据相减,其中 n 代表逐差间隔,得到时域差分曲线的数据矩阵如(4)式:

$$Y_k = \begin{bmatrix} X'_{n+1} - X'_1 \\ X'_{n+2} - X'_2 \\ \vdots \\ X'_N - X'_{N-n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

这样,(4)式可以表示为, $k=N-n$ 行的差分

Y 矩阵, 每一行对应时域逐差曲线数据。

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,N} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \cdots & y_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{k,1} & y_{k,2} & \cdots & y_{k,N} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

接下来, 计算 Y 矩阵中每一列的平均值, 得到一个 $1 \times N$ 的矩阵 M :

$$M = \frac{1}{k} \left[\sum_{i=1}^k y_{i,1}, \sum_{i=1}^k y_{i,2}, \cdots, \sum_{i=1}^k y_{i,N} \right]. \quad (6)$$

然后, 对 Y 矩阵中各列对应的数据进行方差处理, 得时域方差数据:

$$D = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k (y_{i,1} - M_{1,1})^2, \sum_{i=1}^k (y_{i,2} - M_{1,2})^2, \\ \cdots, \sum_{i=1}^k (y_{i,N} - M_{1,N})^2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

最后, 还可以对 D 求方根, 得到时域差分曲线的标准差数据 Z 。

$$Z = \sqrt{D}. \quad (8)$$

于是, 通过实验数据的统计与分析, 选择一个合适的定位阈值能够有效地减少瑞利散射随机性的影响, 同时保持对振动事件的敏感性。

4 结果分析

实验中, 施加振动事件, 采集了 128 条有振动的光时域反射曲线数据。图 6 为施加振动事件的光时域反射曲线图, 被测光纤区域包含 24 303 个数据点, 每个数据点间隔为 1 m, 对应光纤长度为 24.303 km。

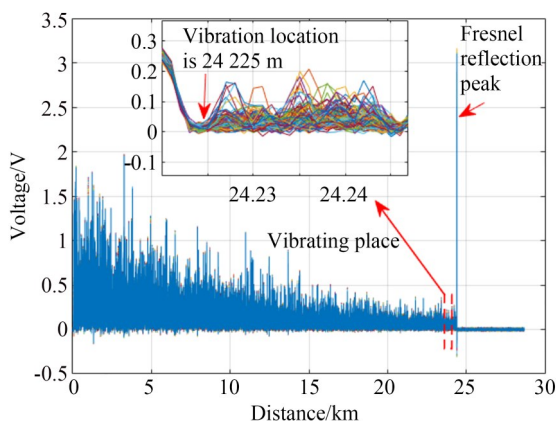


图 6 光时域反射曲线

Fig. 6 Optical time domain reflecting curves

振动位置在 24 225 m 处开始, 振动长度大约为 20 m, 因为实验是放在自然环境下, 所以在实验过程中会有一些环境因素引起的振动干扰, 但是这与人为敲击的干扰影响不同, 不会影响最后的定位结果判断。从图 6 中可以明显看出反射端有一个菲涅尔反射峰, 在数据处理过程中将菲涅尔反射峰去除, 更加方便后面的数据分析。

由于光脉冲在传输过程中经历衰减时, 信号强度会逐渐减小, 导致信噪比降低。衰减系数补偿可以将被测光纤沿线各位置处的散射幅值校正到同一水平, 从而使光信号相位成为引起时域探测曲线幅值波动的唯一(主导)变量, 最终使得检测和分析信号时更加准确。图 7 为衰减系数补偿前后对比图, 图 7(a) 为未进行衰减系数补偿曲线, 图 7(b) 为进行衰减系数补偿曲线, 可以看出衰减系数补偿后, 时域探测曲线基本齐平, 即光纤沿线各位置的散射光信号幅值得到统一, 这样, 信号相位的变化就成为时域曲线波动的主导因素。

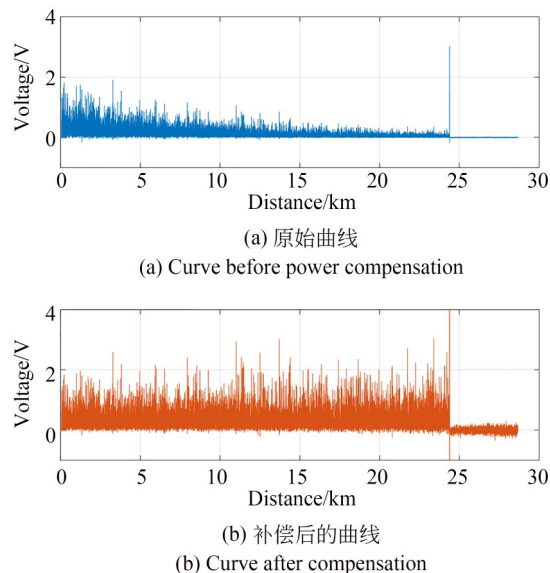


图 7 衰减系数补偿前后曲线对比图

Fig. 7 Attenuation coefficient compensation before and after curve comparison

图 8 为衰减系数补偿后的差分曲线, 从图中可以看出衰减系数补偿后的差分曲线整体呈喇叭的形状, 这是因为对曲线进行衰减系数补偿后, 曲线后端的功率得到提升, 相对应的噪声也会被放大, 差分处理可能会突出这些差异, 使信

号的时域表现呈现喇叭形状。差分曲线可能几条曲线可能存在随机性对差分曲线进行阈值定位时可能会发生误报的情况,所以进一步对衰减系数补偿后的差分曲线进行处理。

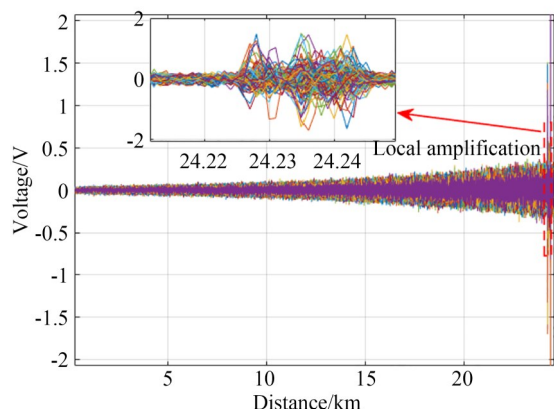


图 8 衰减系数补偿后的差分曲线

Fig. 8 Difference curve after attenuation coefficient compensation

图 9 为不同间隔的时域差分曲线的方差对比图,间隔分别为 1 和 5 进行滑动得到的差分方差曲线。从图 9 中可以看出差分方差曲线后端往上偏,因为衰减系数补偿后的差分曲线后端的幅值变大,对曲线做方差处理会使后端的信号变大。对比间隔为 5 的差分方差曲线的振动峰值要比间隔为 1 的差分方差曲线的振动位置处方差更高。对于微弱的振动事件,方差值越高对振动事件进行定位越灵敏,所以选择逐差间隔时,合适的间隔可以提高差分方差曲线的信噪比。

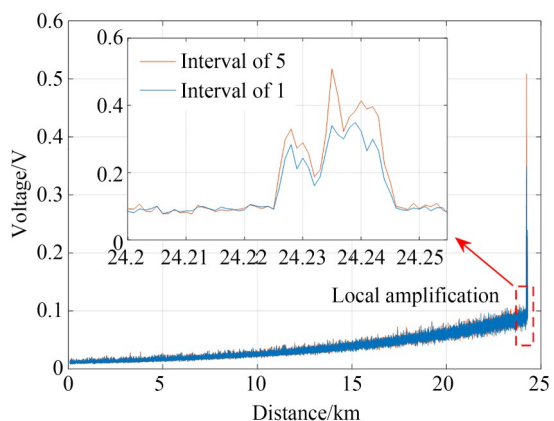


图 9 差分方差曲线间隔对比图

Fig. 9 Difference variance curve interval contrast diagram

因为对光纤进行衰减系数补偿,使得光时域反射曲线后端的功率得到修正,相应地也会使光纤后端的噪声放大。但是,从图 8 和图 9 中可以看出振动位置处的方差远大于前端的非振动区域方差值,在方差阈值的选择上可以将阈值设置在未振动区域末端对应电平值的 1.2~1.5 倍,这样可以很好地降低噪声的干扰。基于时域差分曲线方差的定位效果如图 10 所示,定位点在 24 226 m 与理论的定位点 24 225 m 偏差 1 m。上述的处理方法可以有效地滤除一些微小的噪声,降低在非振动的区域的判定误差,从而使系统定位更加准确。

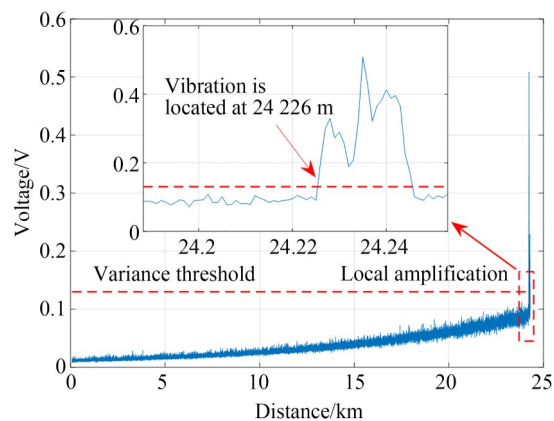


图 10 定位结果图

Fig. 10 Results for vibration event location

在实时性方面与移动平均-移动差分算法进行比较^[17],通过 MATLAB 计时程序进行比较,差分方差阈值算法第一次定位花费的时间为 0.51 s,移动平均-移动差分算法定位花费时间为 0.71 s,运行速度相比于移动平均-移动差分算法提高了 28.1%。该数据算法处理系统是连续处理的,利用 FPGA 数据处理模块^[31],该系统在连续运行过程中,除了第一次启动时的响应时间外,后续对振动事件的响应时间非常短,可以有效地提高系统的实时性。此外,通过实验发现,当扰动的强度较小时,逐差定位算法等某些传统算法部分曲线的扰动信号会被噪声所淹没,导致无法很好地对扰动点进行定位,而本文所提出的时域差分曲线方差阈值算法可以有效地判断出振动位置,精度高、实时性好,可用于电力管廊外破事件定位。

5 结 论

分布式光纤传感技术对电力管廊的外力破坏监测相较于其他传统方法优势显而易见,分布式光纤振动检测系统能够覆盖大范围区域的电力管廊,并且可以同时监测多个位置的振动情况,大大简化了监测系统的布置和维护工作。因此,提高光纤振动检测系统的精确度和稳定性是十分重要的。

本文针对逐差定位算法在定位时无法有效地克服随机噪声的干扰导致系统容易出现误报或者错误定位的情况,提出一种基于衰减补偿的光时域差分曲线方差阈值定位算法。根据逐差曲线产生的随机噪声特性,通过运用方差阈值手段可以有效地克服随机噪声的干扰提高系统准确度。同时,考虑到光纤衰减会使散射信号幅值随距离增加而降低在进行方差阈值定位时后端阈值偏小的问题,通过采用衰减系数补偿算法,使光纤上任意散射位置对应相同的脉冲功率,进而使差分曲线在光纤上任意位置对应相同的波

动幅度,解决了光纤衰减对方差阈值定位的影响。电力管廊外力破坏事件,具有低频、大扰动、持续长的特点,监测与定位应当力求“稳”和“准”,适当牺牲灵敏性而增加曲线的平均次数,可以获得更好的抗瑞利衰落噪声的效果,再结合衰减补偿算法,可凸显振动事件引起的光纤中散射光信号相位主导特性,再通过时域曲线差分及方差阈值判别算法可保证在外力破坏情况下不误报、不漏报。通过实验结果表明,在约 25 km 的光纤范围内实现了 ± 3 m 的定位精度,与传统的逐差定位算法相比差分方差阈值算法不仅能够准确定位扰动点而且可以降低误报率。这表明该算法在振动事件定位方面具有显著的有效性和可行性。在实时性方面相比于移动平均-移动差分算法提高了 28.1%,利用 FPGA 数据处理模块,可以缩短第一次启动时的响应时间,在连续运行过程中,对后续振动事件的响应时间非常短,可以有效地提高系统的实时性。而且,该系统不仅成本较低且实施简单,具备较高的准确性,可以用于对电力管廊的安全监测。

参考文献:

- [1] 钟成,翟迪,陆阳,等. 基于改进灰狼算法的电力管廊覆盖优化技术[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 68-76.
ZHONG C, ZHAI D, LU Y, *et al.* Coverage optimization technology of power pipe gallery based on improved gray wolf algorithm [J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 68-76. (in Chinese)
- [2] 梁宁慧,兰菲,庄场,等. 城市地下综合管廊建设现状与存在问题[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1622-1635.
LIANG N H, LAN F, ZHUANG Y, *et al.* Current situation and existing problems of urban utility tunnel construction [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(6): 1622-1635. (in Chinese)
- [3] 中国测绘协会地下管线专业委员会. 2022 年全国地下管线事故统计分析报告[R]. 北京:北京地下管线综合管理研究中心, 2023.
China Association of Surveying and Mapping Underground Pipeline Professional Committee. 2022 National Underground pipeline accident statistical analysis report [R]. Beijing: Beijing underground Pipeline Integrated Management Research Center, 2023.
- [4] 梅芳. 综合管廊巡检检测及其智能调度[D]. 西安:长安大学, 2018.
MEI F. *Inspection and Control of Underground Pipelines and Intelligent Dispatching* [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [5] 郑明雨,郭春爽. 城市综合管廊的监控和报警系统[J]. 北方建筑, 2022, 7(2): 61-65.
ZHENG M Y, GUO C S. Monitoring and alarm system of urban utility tunnel [J]. *Northern Architecture*, 2022, 7(2): 61-65. (in Chinese)
- [6] 腾云,陈双,邓洁清,等. 智能巡检机器人系统在苏通 GIL 综合管廊工程中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 393-401.
TENG Y, CHEN S, DENG J Q, *et al.* Application of intelligent inspection robot system in sutong GIL utility tunnel project [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 393-401. (in Chinese)
- [7] 蒋浩. 基于 Φ -OTDR 的管道第三方破坏监测技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2023.
JIANG H. *Research on Third-Party Damage Monitoring Technology of Pipeline Based on Φ -OTDR* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese)

- Chinese)
- [8] 张春熹, 钟翔, 李立京, 等. 基于相位敏感光时域反射计的长距离入侵探测系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 742.
ZHANG C X, ZHONG X, LI L J, *et al.* Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 742. (in Chinese)
- [9] 王大伟, 封皓, 杨洋, 等. 基于 Φ -OTDR光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 830-837.
WANG D W, FENG H, YANG Y, *et al.* Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 830-837. (in Chinese)
- [10] PENG F, WU H, JIA X H, *et al.* Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804.
- [11] 单一男, 马智锦, 曾旭, 等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 1-9.
SHAN Y N, MA Z J, ZENG X, *et al.* Research on structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 1-9. (in Chinese)
- [12] WU H J, XIAO S K, LI X Y, *et al.* Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3156-3162.
- [13] LU L D, SU X C, ZHANG C L, *et al.* A novel distributed vibration sensor based on fading noise reduction in multi-mode fiber[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 8028.
- [14] LU L D, BU X D, WANG Q S. An optical fiber composite power cable panoramic state monitoring system for typical scene application[C]. 2021 *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. Haikou, China. IEEE, 2021: 2317-2321.
- [15] 吴念, 王海涛, 张宗峰, 等. 基于OPGW的输电线路覆冰广域监测方法[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 65-70.
WU N, WANG H T, ZHANG Z F, *et al.* Research of transmission line icing wide-area monitoring based on OPGW [J]. *Electric Power*, 2017, 50(5): 65-70. (in Chinese)
- [16] 张春熹, 邓卓, 王夏霄, 等. 谱减降噪法在相位敏感OTDR扰动传感系统中的应用[J]. 激光杂志, 2019, 40(3): 16-19.
ZHANG C X, DENG Z, WANG X X, *et al.* Application of spectral subtraction method in phase sensitive OTDR disturbance sensing system [J]. *Laser Journal*, 2019, 40(3): 16-19. (in Chinese)
- [17] LU Y L, ZHU T, CHEN L, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [18] 梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805004.
LIANG K Z, PAN Z Q, ZHOU J, *et al.* Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0805004. (in Chinese)
- [19] QIN Z G, CHEN L, BAO X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 542-544.
- [20] ZHU T, XIAO X H, HE Q, *et al.* Enhancement of SNR and spatial resolution in ϕ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [21] HE H J, SHAO L Y, LI H C, *et al.* SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 6802610.
- [22] KWON Y S, NAEEM K, JEON M Y, *et al.* Effect of parameters in moving average method for event detection enhancement using phase sensitive OTDR[C]. 2017 *25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*. Jeju, Korea (South). IEEE, 2017: 1-4.
- [23] BAI Y X, LIN T T, ZHONG Z C. Noise reduction method of Φ -OTDR system based on EMD-TFPPF algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 24084-24089.
- [24] LI D D, LOU S Q, XIN Q, *et al.* SNR enhancement of far-end disturbances on distributed sensor

- based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1957-1964.
- [25] FANG G S, XU T W, FENG S W, *et al.* Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [26] JUAREZ J C, MAIER E W, CHOI K N, *et al.* Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [27] JUAREZ J C, TAYLOR H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 1968-1971.
- [28] 魏然. 分布式埋地光纤敲击信号识别方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
WEI R. *Research on Knocking Signal Recognition Method of Distributed Buried Optical Fiber* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [29] 刘佳. 基于偏振检测的分布式光纤振动传感研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
LIU J. *Study on Distributed Optical Fiber Vibration Sensing Based on Polarization Detection* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [30] MARIE T F B, YANG B, HAN D Z, *et al.* Principle and application state of fully distributed fiber optic vibration detection technology based on Φ -OTDR: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16428-16442.
- [31] 王爽好. 基于 GPU 并行计算的分布式光纤声传感信号处理研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
WANG S H. *Research on Signal Processing of Distributed Acoustic Sensor Based on GPU Parallel Computing* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)

作者简介:



范佳铭(1998—),男,浙江天台人,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感技术及能源物联网方面的研究, E-mail: fanjiaming199905@163.com

通讯作者:



吕立冬(1982—),男,四川邻水人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事光纤传感技术及其在电力行业方面的研究, E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn