

文章编号 1004-924X(2026)10-1507-09

## 基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统

汪雨辰, 童家欢, 汪贝宁, 王兴运, 吕立冬\*

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 分布式光纤振动传感系统长时间运行, 其核心器件性能可能不稳定, 比如光源功率波动以及探测器增益变化等, 从而导致系统出现误报和漏报。传统的振动事件定位算法采用静态阈值, 振动事件判别的灵敏度较低, 此外由于缺乏对系统硬件性能变化的考虑, 难以满足系统对长时间运行可靠性的要求。针对此问题, 本文提出基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统方案, 通过设置标定单元对信号进行功率校正, 同时利用标定单元获取阈值浮动系数, 构建逐差阈值曲线, 最后通过归一化处理进行振动事件定位。实验搭建了分布式光纤振动传感系统, 采用脉宽为 30 ns、峰值功率约为 33 dBm 的光脉冲, 选用长约 25 km 的传感光纤在约 10 km, 20 km, 25 km 位置处施加振动事件, 实验结果显示系统能准确识别和定位传感光纤沿线的振动事件。本文搭建的系统能克服因器件不稳定导致的信号波动问题, 阈值定位算法灵敏度高、通用性好, 且能保证较高的系统动态范围。

**关键词:** 分布式光纤传感; 标定单元; 功率校正; 阈值定位

**中图分类号:** TP212.9; TN212 **文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20263410.1507 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263410.1507

## Distributed optical fiber vibration sensor based on calibrated reference threshold

WANG Yuchen, TONG Jiahuan, WANG Beining, WANG Xingyun, LÜ Lidong\*

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology,  
Ma'anshan 243032, China)

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

**Abstract:** The core components of the distributed optical fiber vibration sensors may be unstable over a long period of operation, such as the fluctuation of light source and the gain change of detectors, which leads to high false and inactive alarm rate. As traditional vibration event location algorithms use static thresholds, the sensitivity for vibration event discrimination is relatively low, and without the consideration of the instability of the system's hardware, it is difficult to satisfy the reliability requirement during long-term operation. To address this issue, this paper proposed a distributed optical fiber vibration sensor scheme based on calibrated reference threshold. A calibration unit was arranged to correct the signal power and obtain the threshold fluctuation coefficient, and then, a difference threshold curve was constructed, and finally, by normalization processing the threshold curve was transformed for vibration event location. In experiments, a distributed optical fiber vibration sensor was built, with a light pulse width of 30 ns and

收稿日期: 2026-02-05; 修订日期: 2026-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51977001)

peak power of approximately 33 dBm and a sensing optical fiber approximately 25 km in length. And three vibration events were loaded at positions of about 10, 20, and 25 km along the sensing fiber respectively. The experimental results demonstrated that the proposed sensor can accurately identify and locate the vibration events along the sensing optical fiber. The new sensor can overcome the problem of the instability of the system hardware, and improve the sensitivity of vibration event identification with the integration of the advantages of the traditional difference algorithm and ratio algorithm, which ensures good algorithm universality and also keeps a high system dynamic range.

**Key words:** distributed optical fiber sensing; calibration unit; power correction; threshold locating

## 1 引言

在光纤传感领域,光纤光栅技术通常为单点测量<sup>[1]</sup>,难以满足大范围多点振动监测需求;干涉型光纤传感技术虽能实现高精度振动监测<sup>[2]</sup>,但其信号解调过程复杂,需依赖高速计算单元,增加系统开发难度。而分布式光纤传感技术可以对整条光纤上的外界振动事件进行多点、连续实时监测。其中,分布式光纤振动传感系统(Distributed Optical Fiber Vibration Sensor, DOFVS)利用瑞利散射光相位的变化引起信号强度变化的特性监测线路中的振动事件<sup>[3-4]</sup>。

系统长时间运行时,硬件性能可能不稳定,导致采集的信号出现波动。其定位算法中逐差法定位阈值受信号功率绝对幅值影响,且定位的灵敏度随光纤位置变化。比值法中近零位置相除易导致误报,虽然加入噪声电平可以抑制,但同时会减小系统的动态范围。

在 DOFVS 中,振动事件的定位通常采用逐差法和比值法。逐差法通过对相邻的两条曲线做差来检测振动事件,将无振动事件时的曲线差值作为理论阈值,将理论阈值乘一个系数作为定位阈值,后续,若某位置处的曲线差值超过设定的定位阈值,则判定该位置发生了振动事件<sup>[5-6]</sup>。逐差法依赖信号的绝对差值,易受系统硬件条件的影响,由于瑞利散射信号强度随传输距离衰减导致传感光纤后端的瑞利散射信号越来越弱,从而使得曲线的差值越来越小,最终导致系统对传感光纤后端振动事件检测的灵敏度急速降低。因此,文献[7]提出方差阈值算法定位振动事件,首先对光时域反射曲线进行衰减补偿,然后对曲线做逐差处理,再利用方差分析方法进行阈值定位。该算法虽然通过衰减补偿解决了因为信号

衰减导致后端振动事件检测灵敏度低的问题,但是它会放大差值曲线末端的噪声,使得定位阈值随着传感光纤距离的增加而增大,从而导致系统对前端振动事件检测的灵敏度降低。比值法通过对相邻的两条曲线进行比值来检测振动事件,在无振动状态下,相邻曲线的比值接近 1,发生振动事件时,振动位置处对应的曲线比值显著增大。若某位置对应的曲线比值超过设定的定位阈值,则判定该位置发生了振动事件<sup>[8-9]</sup>。使用比值法进行定位时,由于探测曲线存在幅值近零数据点,近零数据点做除数必然导致非常大的比值,容易引起误报。文献[10]提出基于虚拟噪声电平的系统性能优化算法,通过在光时域反射信号中引入与信号近零幅值均值相关的虚拟噪声电平,从而避免了近零数据点的产生,同时优化系统动态范围和探测灵敏度。然而,振动事件的定位阈值是参照固定数值设定的,当器件不稳定时,信号功率发生变化,导致定位阈值随之波动,从而使得定位阈值缺乏通用性。

目前,关于 DOFVS 的研究正在朝着提升信噪比、提高定位精度以及降低误报率等方向发展。文献[11]采用基于频率和波长多样化的差分聚合方法将系统的信噪比提升了 13.4 dB,但是频率和波长的多样性,对传感系统激光源要求高,系统结构复杂。文献[12]采用 Savitzky-Golay 平滑算法将系统的信噪比提高了 5.41 dB,然而算法的多项式阶数和窗口大小需要根据不同的环境进行调整。文献[13]通过滑动窗口计算时域曲线的相关系数判别振动事件,实现了  $\pm 3$  m 的定位误差,这要求数字信号处理单元具有较大的计算资源,否则定位的实时性可能受到影响。文献[14]结合区域划分和边缘检测算法进行振动事件定位,将系统的定位误差控制在

2.84 m 以内。该方法依赖阈值区分振动区域,环境变化时需调整阈值,必然会增加算法的复杂性。文献[15]采用二维图像编码和深度学习神经网络进行振动事件识别,识别六种振动事件的精度超过 94.25%。文献[16]结合少样本学习和表格机器学习进行  $\Phi$ -OTDR 事件分类,该方法的平均交叉验证准确率达到 90.0% $\pm$ 6.24%。由于深度学习和机器学习方法依赖于大量精确标记的样本进行有效训练,且在训练和推理过程中需要大量的计算,在实际应用中存在一定困难。

虽然逐差法、比值法、降噪算法以及机器学习等处理方法在振动事件识别和定位方面均有一定适用性,但是它们都必须以其采集到高质量的原始信号为前提。在实际应用过程中,随着 DOFVS 长时间运行,受器件性能波动、光源不稳定以及增益变化等多种因素的影响,信号容易出现波动和噪声加剧的问题,进而难以满足上述处理方法的应用要求。传统逐差法在振动事件定位中依赖信号绝对幅值,从而使定位阈值受激光功率波动影响,而且定位的灵敏度随光纤距离逐步降低。此外,上述处理方法采用静态阈值来识别振动事件。该静态阈值为一条固定的水平直线,在实际的操作中阈值的设定通常基于主观经验,但由于缺乏对系统硬件性能变化的考虑,难以满足系统对长时间运行稳定性和可靠性的基本要求。本文针对上述问题,提出基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统,通过设置标定单元对光时域反射信号进行功率校正,解决因器件不稳定导致信号波动的问题,再通过标定单元提供阈值浮动系数,结合多项式拟合得到的振动

阈值函数,进而生成幅值随光纤距离变化的动态阈值曲线,建立了定位阈值与光纤位置的函数关系,解决逐差法灵敏度随位置变化的问题,并获得最佳灵敏度。克服了传统的振动事件定位算法灵敏度受传感光纤距离影响的问题,并解决了常规的静态阈值曲线无法适应系统对长期运行稳定性的要求。最后,再借用比值定位算法的归一化方法得到归一化的振动数据曲线,解决比值法对信号幅值近零位置点相除容易导致比值过大产生误报的问题,以及算法的通用性和可靠性的问题。基于该算法所构建的分布式光纤振动传感系统采集 256 条光时域反射曲线的时间为 64 ms,第一次定位花费时间约为 0.25 s。与依赖机器学习方法的系统相比,该系统无需依靠大量标记的样本和庞大的计算资源,仅对原始信号进行算法处理,算法流程简单且高效。此外,其系统结构较为简单、设备成本相对较低。

## 2 系统搭建与测试

### 2.1 系统搭建

本文搭建的 DOFVS 结构如图 1 所示,窄线宽激光器(NLL-1550-1,武汉光迅)发出连续的光信号进入声光调制器(T-M200-0.1C2J-3-F2S, Gooch&Housego),计算机控制数据采集卡(USB9812A,北京星烁)发出电脉冲,电脉冲驱动声光调制器将连续光调制成光脉冲,光脉冲进入掺铒光纤放大器(BG-pulse-EDFA-M-20W-1550-FC/APC,厦门彼格)中提高峰值功率,然后光脉冲由光纤环形器 1 端口进入再从 2 端口输出到标定单元和传感光纤(G.652,长飞光纤),光脉

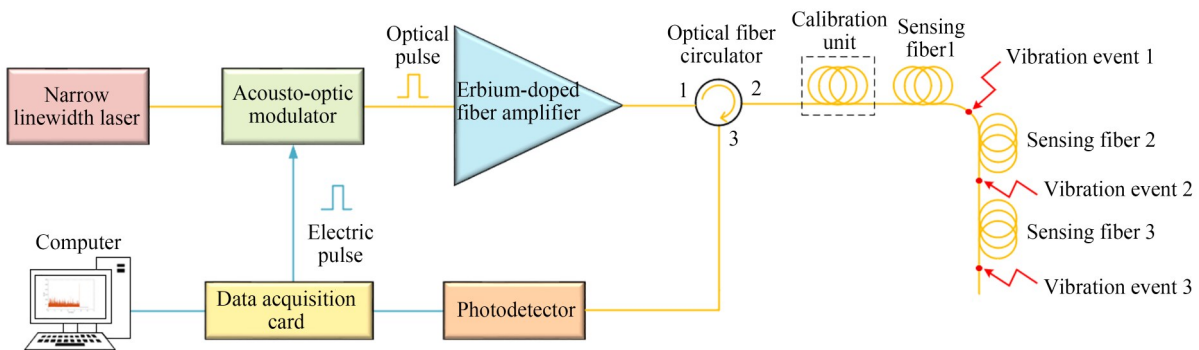


图 1 DOFVS 结构图

Fig. 1 DOFVS structure diagram

冲在传感光纤中传输产生背向瑞利散射光,由光纤环形器 2 端口进入再从 3 端口输出至光电探测器 (BG-DASA-M1-1550-30-FC/APC, 厦门 彼格),光电探测器将光信号转化为电信号,数据采集卡采集电信号,并将数据传输至计算机进行处理分析<sup>[17]</sup>。窄线宽激光器波长为 1 550.12 nm,线宽为 1.6 kHz。脉冲宽度为 30 ns,重复率为 3 500 Hz,峰值功率约为 33 dBm。标定单元由长约 100 m 的光纤绕制在抗振的泡沫圆盘上,泡沫结构为光纤发挥良好的缓冲减振作用,使其在实验中不受振动干扰。标定单元用于曲线功率校正并为后续动态阈值曲线构建提供基础数据支撑。传感光纤为全长约 25 km 的单模光纤,由三捆光纤熔接而成,其长度分别约为 10 km, 10 km 和 5 km。实验中,在相邻两段光纤的熔接位置处施加振动事件,对应的位置分别为光纤全长的约 10 km, 20 km 和 25 km 处。光电探测器的带宽为 100 MHz。数据采集卡采样率为 100 MS/S,数据采集卡具有累加功能,为权衡系统实时性和频率响应范围,累加次数设置为 100 次。

图 2 展示了系统采集的无振动事件状态下的 256 条光时域反射曲线,其中 15 km 附近曲线的细节放大如子图所示,可以看出曲线各个位置对应的功率波动相对较小,曲线贴合度高。DOFVS 长时间运行时,器件的稳定性可能会发生变化,进而导致曲线出现波动。比如,窄线宽激光器的输出功率波动、掺铒光纤放大器工作电流的变化会影响脉冲峰值功率,光电探测器的增益不稳定,会导致信号幅值发生变化。图 3(a)显示了图 2 中标定单元区域即光纤前端 100 m 范围对应的光时域反射曲线。从图 3(a)可以看出,在无振动事件状态下,光时域反射曲线的贴合度较高,而图 3(b)显示了器件不稳定导致光时域反射曲线幅值波动情况。从图 3(b)可以看出,器件不稳定导致光时域反射曲线的贴合度差。根据 DOFVS 常用的振动事件识别与定位算法,系统极易出现误报。因此,本文通过设置标定单元,基于设定的参考曲线,将标定单元中光纤对应的光时域反射曲线校正到同一测量参数条件,克服器件不稳定性导致的光时域曲线幅值波动问题,另外,通过标定单元获得振动阈值函数初始参数从而获得随传感光纤距离变化的振动定位阈

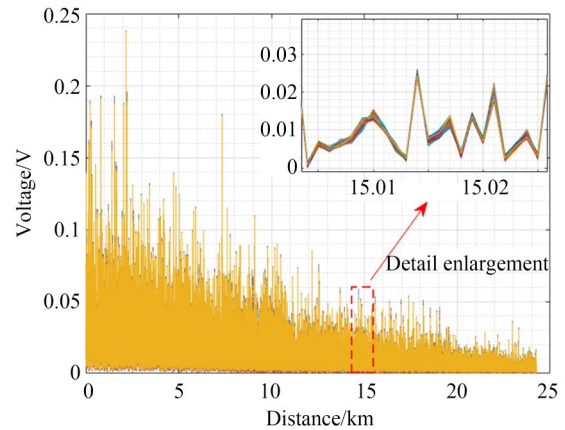
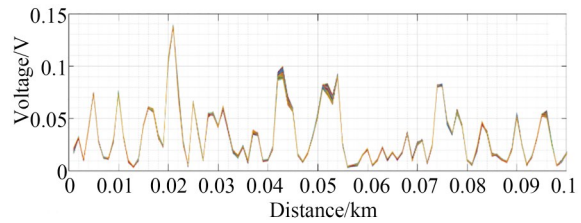


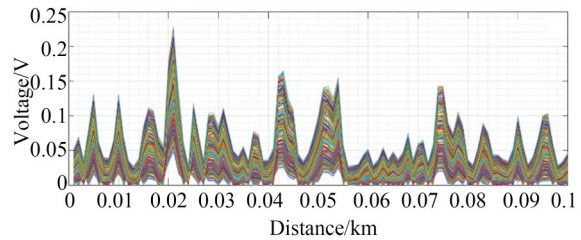
图 2 光时域反射曲线

Fig. 2 Optical time domain reflectometry curves



(a) 正常曲线

(a) Normal curves



(b) 受到器件波动影响的曲线

(b) Curves affected by device instability

图 3 光时域反射曲线前端 100 m 的数据

Fig. 3 Data of the first 100 meters of the optical time-domain reflectometry curves

曲线,以提升系统对振动事件定位的灵敏度。

## 2.2 传统定位阈值算法

在 DOFVS 中,定位阈值是用于判断传感光纤沿线振动事件是否发生的重要标准,定位阈值的设置直接影响系统的检测准确性和灵敏度。如果定位阈值设置过高,系统只有在振动信号非常强烈时才会识别为振动事件,这意味着一些较小的振动事件可能会被忽视,导致漏报,定位阈值设置过低时,系统会对微弱的信号变化做出反应,将微小的干扰信号误判为振动事件,导致误报。

逐差法是振动事件定位中常用的方法,采用无振动事件时的曲线差值作为理论阈值,将理论阈值乘一个系数作为定位阈值<sup>[18]</sup>。在 DOFVS 系统中,将数据采集卡采集到的数据转化成二维矩阵,用矩阵  $A'$  来表示:

$$A' = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,N} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ A_{M,1} & A_{M,2} & \dots & A_{M,N} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中: $A'$ 为一个  $M \times N$  的二维矩阵, $M$ 表示光时域反射曲线的条数, $N$ 表示光时域反射曲线的长度。

在 DOFVS 中,由于材料吸收、散射等因素,光信号的强度会随传输距离指数式衰减,在长距离监测下,可能导致后端区域的振动事件无法被准确检测<sup>[19]</sup>。逐差法中曲线差值的信号强度会随着传输距离的增加而衰减,导致后端信号幅值变小,系统对后端振动事件检测的灵敏度降低。为了在长距离监测中克服这一难题,需要对光时域反射曲线数据进行衰减补偿,从而保证信号强度的稳定性,提升系统对后端振动事件的监测能力<sup>[20]</sup>。

$$A'' = A' e^{\alpha L}, \quad (2)$$

其中: $A''$ 表示进行衰减补偿后的曲线数据, $\alpha$ 表示单模光纤的单程衰减系数, $\alpha$ 取 0.2 dB/km, $L$ 表示光纤各位置对应的距离。

对衰减补偿后的相邻两条曲线逐差再取绝对值,得到数据矩阵  $B$ :

$$B = \begin{pmatrix} |A_2'' - A_1''| \\ |A_3'' - A_2''| \\ \dots \\ |A_M'' - A_{M-1}''| \end{pmatrix} = (b_1, \dots, b_k, \dots, b_N), \quad (3)$$

其中: $b_k$ 为列向量, $k$ 表示传感光纤任意距离。对数据矩阵  $B$  的每一列取最大值,得到逐差峰值曲线数据如公式(4)所示:

$$B' = \{ \max(b_1), \dots, \max(b_k), \dots, \max(b_N) \}. \quad (4)$$

将图 2 中的 256 条无振动时的光时域反射曲线,使用公式(2)衰减补偿,再使用公式(3)逐差取绝对值,最后使用公式(4)提取最大值处理,得到无振动事件的逐差峰值曲线  $B'_1$  结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出使用衰减补偿逐差法<sup>[7]</sup>的

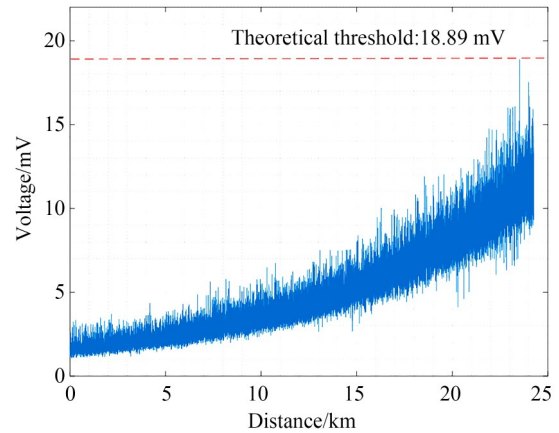


图 4 逐差峰值曲线

Fig. 4 Differential peak curve

理论阈值为 18.89 mV,后端信号幅值变大,系统对前端振动事件检测的灵敏度降低。随着传感光纤长度的增加,光纤沿线随机噪声的差值被补偿增大,定位阈值的取值相应增大。这种算法存在明显弊端,当传感光纤长度较短时,可将阈值设定在一个较低的水平,实现对微弱振动信号的定位。当传感光纤长度增加时,若仍采用较低的阈值,会出现将噪声信号误判为振动事件,导致定位结果出现大量的虚报。因此,必须根据传感光纤长度的变化,合理调整阈值的大小,确保振动事件定位的准确性。而且,逐差法依赖信号峰值功率,高功率信号和低功率信号的差值结果存在差异,当信号峰值功率变化时,逐差法的定位阈值随之变化。

比值法可以解决逐差法中对信号绝对幅值的依赖。但是,若采用比值法进行振动事件定位,该算法对近零数据点做除数必然导致非常大的比值,容易引起误报<sup>[10]</sup>。逐差法采用信号绝对差值,在处理近零数据点时不会产生非常大的值,保证了数据处理结果的准确性。本文综合逐差法和比值法的优点,提出基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统。

### 3 基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统

基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统,通过标定单元对光时域反射曲线进行功率校正。

首先,取出标定单元数据矩阵  $C$ :

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,100} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,100} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ A_{M,1} & A_{M,1} & \dots & A_{M,100} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

计算标定单元内每条曲线的均值,并以第一条曲线的均值  $\bar{C}_1$  作为参考值:

$$C' = \{\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_M\}^T. \quad (6)$$

将标定单元内每条曲线的均值除以参考值,从而得到每条曲线的校正系数:

$$D = \frac{C'}{\bar{C}_1} = \left( \frac{\bar{C}_1}{\bar{C}_1}, \frac{\bar{C}_2}{\bar{C}_1}, \dots, \frac{\bar{C}_M}{\bar{C}_1} \right)^T. \quad (7)$$

最后,将待校正曲线除以校正系数。从而将每一条探测曲线的功率校正在同一测量条件<sup>[21]</sup>:

$$E = \frac{A'}{D} = \left( \frac{A_1}{D_1}, \frac{A_2}{D_2}, \dots, \frac{A_M}{D_M} \right)^T. \quad (8)$$

散射功率是标定单元中光纤所有位置点散射信号的均值,若标定单元本身发生微弱的振动事件,由于扰动具有随机性,信号的均值结果相对稳定,系统不会发生误校正。通过标定单元进行功率校正能克服窄线宽激光器输出功率波动、掺铒光纤放大器工作电流变化以及光电探测器增益不稳定所导致的脉冲峰值功率和信号幅值变化的问题,从而提高振动事件检测的准确性。

对于振动事件定位判别阈值选择的问题,首先对无振动事件的逐差峰值曲线  $B'_1$  使用高阶多项式拟合,得到振动阈值函数。如图 5 所示,蓝色曲线为无振动事件的逐差峰值曲线  $B'_1$ ,对其进行

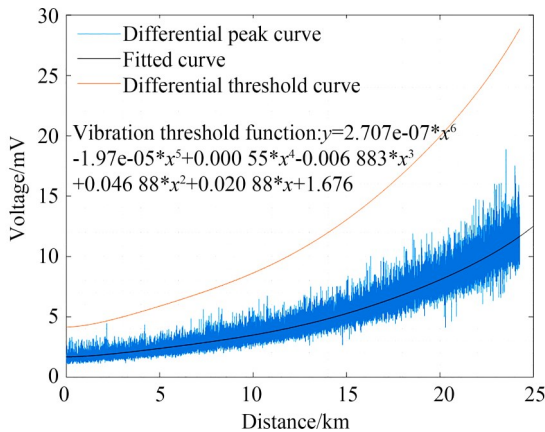


图 5 逐差峰值曲线、拟合曲线及逐差阈值曲线

Fig. 5 Differential peak curve and the fitted curve and the differential threshold curve

高阶多项式拟合<sup>[22]</sup>后得到黑色的拟合曲线,即为振动阈值函数  $y$ 。然后,取标定单元对应的曲线的最大值与最小值的比值,从而得到阈值浮动系数  $\delta$ 。将振动阈值函数  $y$  整体乘以该系数,即可得到逐差阈值曲线  $y_1$ :

$$y_1 = y \times \delta. \quad (9)$$

如图 5 中的红色曲线所示(彩图见期刊电子版)。该阈值曲线为动态阈值曲线,有效克服了传统振动事件定位算法中灵敏度受传感光纤距离影响的问题,同时解决了静态阈值难以满足系统长期运行稳定性的要求。

将图 5 中逐差峰值曲线  $B'_1$  对应数据除以逐差阈值曲线  $y_1$  对应数据,得到的归一化结果  $y'$ :

$$y' = \frac{B'_1}{y_1}. \quad (10)$$

归一化结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,归一化处理将传统定位阈值的单位由毫伏转换为无量纲的相对值。噪声信号的强度趋于平缓,不仅解决了衰减补偿后导致前端振动事件检测灵敏度低的问题,也有效避免了衰减补偿逐差法中因传感光纤距离增加而导致随机噪声差值被放大、进而使定位阈值不断升高的问题。这种算法处理使定位的阈值具有通用性,同时能有效克服逐差定位阈值算法受激光功率波动的影响。通常将定位阈值设置为 1,也可根据具体情况适当增加。

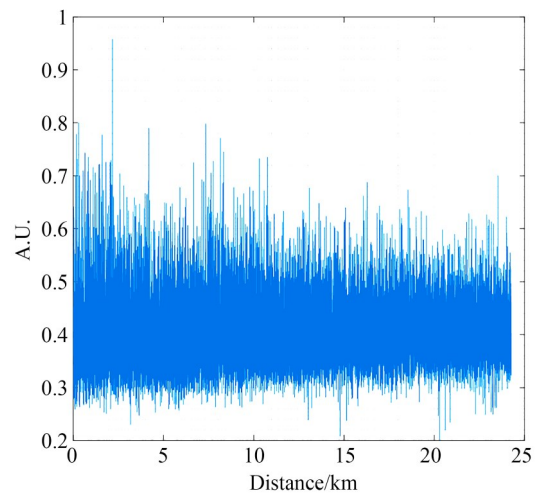


图 6 逐差值归一化处理结果图

Fig. 6 Result graph after difference-based normalization processing

### 4 结果分析

实验中,在传感光纤上大约 10 km, 20 km, 25 km 处同时施加三个振动事件,得到的逐差峰值曲线和逐差阈值曲线如图 7 所示,其中,在对应位置处可以看到三个明显的逐差峰。

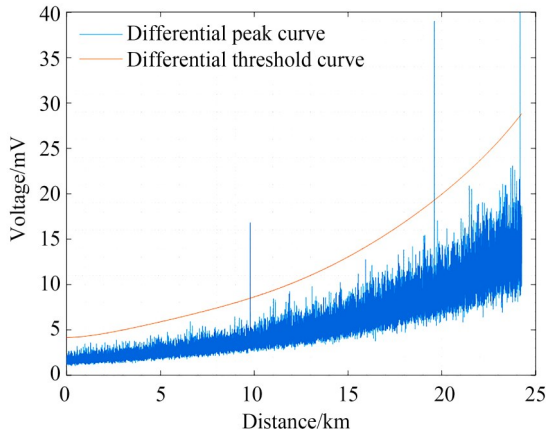


图 7 逐差峰值曲线和逐差阈值曲线

Fig. 7 Differential peak curve and differential threshold curve

将图 7 中得到的两条曲线进行处理,用逐差峰值曲线对应数据除以逐差阈值曲线对应数据,得到的归一化结果及振动事件对应区域如图 8 所示。

图 8 中三个振动位置的对应区域如子图所示,设置振动事件的定位阈值为 1。从子图中可以看出三个振动位置分别为 9.781 km, 19.596 km, 24.177 km。实验得到的振动位置

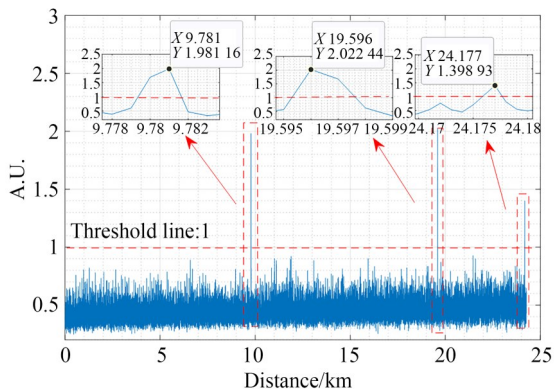


图 8 归一化结果及振动事件对应区域图

Fig. 8 Normalization results and the corresponding regional map of vibration events

结果与预先施加振动的位置基本一致,充分验证了本文搭建的系统对振动事件定位的准确性。在数据处理上,逐差法处理数据时通过减去噪声底,使动态范围不受基底噪声电平的限制,但是逐差法的定位阈值受探测光脉冲功率影响。比值法的定位阈值相对稳定,但是幅值近零位置的灵敏度高,容易引起误报,同时系统动态范围受限于基底噪声电平。本文提出的算法结合逐差法和比值法的优点,同时无需依靠大量标记的样本和庞大的计算资源,所得到的定位阈值不受探测光脉冲功率和传感光纤长度的影响,且系统的动态范围不受基底噪声电平限制。

### 5 结论

在 DOFVS 中常用的阈值定位算法如逐差法、衰减补偿逐差法、比值法存在通用性差、灵敏度低以及动态范围的局限性的问题,并且随着系统长期运行,其稳定性易受系统器件影响,从而可能导致系统误报。针对上述问题,本文在传统的 DOFVS 的基础上引入标定单元,校正激光功率波动引起的时域散射曲线的漂移问题,从而克服系统器件不稳定对定位阈值的影响,然后基于无振动条件下的衰减补偿逐差数据拟合得到振动阈值函数,再结合标定单元数据中的阈值浮动系数,生成逐差阈值曲线,获得振动事件定位的最佳灵敏度,再借用比值定位算法的归一化方法得到归一化的振动数据曲线。该算法结合了逐差法和比值法的优点,通过功率校正克服了传感系统硬件不稳定导致的激光功率波动对振动定位的影响,规避了常规逐差法中定位阈值对探测信号功率绝对幅值的依赖以及定位的灵敏度随光纤距离逐步降低的弊端;通过建立与距离关联的逐差阈值曲线获得随光纤位置调整的定位阈值以克服衰减补偿的逐差法光纤前端灵敏度低的问题;通过建立归一化的参考阈值曲线解决传统比值算法中噪声电平对动态范围的制约问题以及剔除噪声电平的相关算法可能存在的近零位置相除导致的误报问题,同时提高算法的通用性和可靠性。实验采用脉冲宽度为 30 ns、峰值功

率约为 33 dBm 的光脉冲,在长约 25 km 的传感光纤上进行振动事件定位监测,在传感光纤上大约 10 km, 20 km, 25 km 处同时施加三个振动事件,实验结果表明本文提出的基于标定参考阈值的分布式光纤振动传感系统能准确定位振动事件,定位阈值曲线灵敏度高,通用性好,具有工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 刘强,李文静,马超,等. 二维低频光纤布拉格光栅振动传感器的设计[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(6): 1450-1457.  
LIU Q, LI W J, MA C, *et al.* Design of two-dimensional low-frequency fiber Bragg grating vibration sensor[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1450-1457. (in Chinese)
- [2] 吴加俊,谢康,曹磊,等. 基于可拉伸光纤和干涉测量的振动传感器[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(5): 1200-1208.  
WU J J, XIE K, CAO L, *et al.* Vibration sensor based on stretchable optical fiber and interferometric measurement [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1200-1208. (in Chinese)
- [3] PALMIERI L. Distributed optical fiber sensing based on rayleigh scattering [J]. *The Open Optics Journal*, 2013, 7(1): 104-127.
- [4] 李微,傅海威,王柏安,等. 相位敏感光时域反射技术事件分类研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2026, 63(7): 473-490.  
LI W, FU H W, WANG B A, *et al.* Research progress on event classification using phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026, 63(7): 473-490. (in Chinese)
- [5] MARIE T F B, BIN Y, DEZHI H, *et al.* Principle and application state of fully distributed fiber optic vibration detection technology based on  $\Phi$ -OTDR: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16428-16442.
- [6] LU Y, 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.
- [7] 范佳铭,黄闽南,王一山,等. 面向电力管廊外破监测的分布式光纤传感技术研究[J]. 光学精密工

#### 作者贡献声明:

- 汪雨辰:实验数据分析,论文构思和撰写;  
童家欢:对实验和研究结果进行核实验证;  
汪贝宁:实验系统的设计与搭建;  
王兴运:提供资料与数据分析;  
吕立冬:实验方案、算法的提出及论文构思与编辑写作。

程, 2024, 32(10): 1433-1442.

- FAN J M, HUANG M N, WANG Y S, *et al.* Research on distributed optical fiber sensing technology for power pipe corridor breakdown monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(10): 1433-1442. (in Chinese)
- [8] ASHRY I, MAO Y, ALIAS M S, *et al.* Normalized differential method for improving the signal-to-noise ratio of a distributed acoustic sensor [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(18): 4933-4938.
- [9] PENG F, DUAN N, RAO Y J, *et al.* Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [10] 王子豪,冯玉祥,刘志凯,等. 基于虚拟噪声电平的分布式光纤振动传感系统性能优化[J]. 光学精密工程, 2025, 33(12): 1842-1852.  
WANG Z H, FENG Y X, LIU Z K, *et al.* Performance optimization of distributed optical fiber vibration sensing system based on virtual noise level [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(12): 1842-1852. (in Chinese)
- [11] GU J, LU B, YANG J, *et al.* High SNR  $\Phi$ -OTDR based on frequency and wavelength diversity with differential vector aggregation method [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 1-12.
- [12] 王子豪,刘志凯,冯玉祥,等. 相敏型光时域反射系统信噪比提升[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(2): 287-296.  
WANG Z H, LIU Z K, FENG Y X, *et al.* Improvement of signal-to-noise ratio for phase-sensitive optical time-domain reflecting system [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 287-296. (in Chinese)
- [13] 黄闽南,范佳铭,王一山,等. 基于时域曲线相关性鉴别的分布式光纤扰动定位算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2024(2): 93-97, 103.  
HUANG M N, FAN J M, WANG Y S, *et al.* Research on distributed optical fiber perturbation lo-

- cation algorithm based on time domain trace correlation identification [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(2): 93-97, 103. (in Chinese)
- [14] 沈伟,戴静怡,戴勇,等. 基于区域划分和边缘检测的 $\Phi$ -OTDR定位方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(17): 76-82.  
SHEN W, DAI J Y, DAI Y, *et al.*  $\Phi$ -OTDR localization method based on region segmentation and edge detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(17): 76-82. (in Chinese)
- [15] HU S, HU X, LI J, *et al.* Enhancing vibration detection in  $\Phi$ -OTDR through image coding and deep learning-driven feature recognition [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(22): 38344-38351.
- [16] LIN Z, LIN X, LI W, *et al.* Rapid few-shot tabular machine learning for  $\Phi$ -OTDR event classification [J]. *Optics Express*, 2025, 33(17): 36646.
- [17] HU X, DONG H, KONG Y, *et al.* Effective zero-shot learning method for event classification in  $\Phi$ -OTDR sensing systems [J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 35495-35512.
- [18] 梁生,刘腾飞,盛新志,等. 基于空间域差分的 $\varphi$ -OTDR光纤分布式扰动传感器定位方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0622005.  
LIANG S, LIU T F, SHENG X Z, *et al.* Investigation on space-domain difference based location method for  $\varphi$ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0622005. (in Chinese)
- [19] HEALEY P. Fading in heterodyne OTDR [J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(1): 30-32.
- [20] 黄闽南,王一山,范佳铭,等. 基于方差阈值的分布式光纤振动定位算法研究[J]. *传感技术学报*, 2024, 37(12): 2113-2118.  
HUANG M N, WANG Y S, FAN J M, *et al.* Research on distributed optical fiber vibration location algorithm based on variance threshold [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2024, 37(12): 2113-2118. (in Chinese)
- [21] 冯玉祥,刘志凯,黄闽南,等. 单光路拉曼分布式光纤测温系统[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2645-2653.  
FENG Y X, LIU Z K, HUANG M N, *et al.* Single optical channel based Raman distributed optical fiber temperature measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2645-2653. (in Chinese)
- [22] 吕观辉,刘晓梅,张增宝,等. 基于OpenCV的双波长光纤导引光在高精度装调上的应用[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(10): 1313-1321.  
LÜ G H, LIU X M, ZHANG Z B, *et al.* Application of dual-wavelength fiber guided light based on OpenCV in high-precision assembly and alignment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(10): 1313-1321. (in Chinese)

#### 作者简介:



汪雨辰(2001—),女,安徽桐城人,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感技术和电力物联网方面的研究。E-mail: 19567175967@163.com

#### 通讯作者:



吕立冬(1982—),男,四川邻水人,博士,教授,硕士生导师,2005年获得西安工业大学学士学位,2009年获得中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所硕士学位,2012年获得南京大学博士学位。主要研究方向为电力设备状态监测与诊断、分布式光纤传感、能源互联网等,现主要从事光纤传感技术及其在智能电网方面的研究。E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn