

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究

张博智, 刘柯, 刘琨, 江俊峰, 张曼, 刘铁根

引用本文:

张博智, 刘柯, 刘琨, 等. 基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究[J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220205.

Zhang B Z, Liu K, Liu K, et al. Research on dynamic variance threshold algorithm based on distributed fiber vibration sensor system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220205.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220205>

收稿日期: 2022-08-23; 修改日期: 2022-11-06; 录用日期: 2022-11-28

相关论文

分布式光纤入侵信号检测与识别

张永康, 尚盈, 王晨, 赵文安, 李常, 曹冰, 王昌

光电工程 2021, 48(3): 200254 doi: [10.12086/oe.2021.200254](https://doi.org/10.12086/oe.2021.200254)

前向受激布里渊散射光纤传感研究进展

李天夫, 巴德欣, 周登望, 任玉丽, 陈超, 张洪英, 董永康

光电工程 2022, 49(9): 220021 doi: [10.12086/oe.2022.220021](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220021)

用于光纤干涉传感器的高稳定PGC解调技术

肖文哲, 程静, 张大伟, 孔勇, 叶华龙, 何军

光电工程 2022, 49(3): 210368 doi: [10.12086/oe.2022.210368](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210368)

光纤法布里-珀罗传感器的解调方法研究综述

周朕蕊, 邱宗甲, 李康, 张国强

光电工程 2022, 49(6): 210411 doi: [10.12086/oe.2022.210411](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210411)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



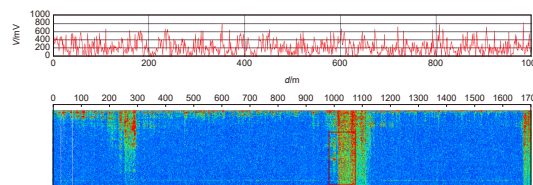
OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220205

基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究



张博智^{1,2,3}, 刘 柯⁴, 刘 琨^{1,2,3},
江俊峰^{1,2,3}, 张 曼⁴, 刘铁根^{1,2,3*}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300000;

²光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300000;

³天津市光纤传感工程中心, 天津 300000;

⁴天津求实飞博科技有限公司, 天津 300000

摘要: 为解决分布式光纤振动传感系统的定位准确性弱、灵敏度低及响应速率慢等问题, 提出了一种基于相位敏感光时域反射的动态方差阈值算法。该算法将经过带通滤波预处理后的信号进行方差处理、高斯模糊、阈值寻峰以及重心精确, 解决了长距离 DVS 检测由于背向瑞利散射信号的衰减以及运算量大造成的响应时间长的问题。并且采用并行编程技术将运算速度提高了 184%, 从而快速准确地确定扰动发生位置。实验研究了 39 km 长度的光纤上人为扰动和噪声的区别, 并通过动态方差阈值算法消除了噪声的影响并确定了扰动位置。该系统响应时间为 1 s, 空间分辨率为 20 m, 定位误差低于 0.1%。

关键词: 光时域反射; 方差处理; 高斯模糊; 阈值寻峰

中图分类号: TP212; TN253

文献标志码: A

张博智, 刘柯, 刘琨, 等. 基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究 [J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220205

Zhang B Z, Liu K, Liu K, et al. Research on dynamic variance threshold algorithm based on distributed fiber vibration sensor system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220205

Research on dynamic variance threshold algorithm based on distributed fiber vibration sensor system

Zhang Bozhi^{1,2,3}, Liu Ke⁴, Liu Kun^{1,2,3}, Jiang Junfeng^{1,2,3}, Zhang Man⁴, Liu Tiegeng^{1,2,3*}

¹School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China;

²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300000, China;

³Tianjin Fiber Optic Sensing Engineering Center, Tianjin 300000, China;

⁴Tianjin Qiu Shi Fiber Technologies Co., Ltd., Tianjin 300000, China

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2022-11-06; 录用日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年资助项目 (61922061); 国家自然科学基金资助项目 (60077023); 国家重点基金资助项目 (61735011)

*通信作者: 刘铁根, tgliu@tju.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Abstract: In order to solve the problems of weak positioning accuracy, low sensitivity, and slow response speed of the distributed fiber vibration sensor system, a dynamic variance threshold algorithm based on the phase-sensitive photosensitive time domain reflection is proposed. The signal preprocessed by the band-pass filter is processed by variance processing, Gaussian blur, threshold peak seeking, and accurate center of gravity. The problem of long response time caused by the attenuation of Rayleigh scattering signal and the large amount of computation in the long-distance DVS detection is solved. The parallel programming technology is used to improve the operation speed by 184%, so as to quickly and accurately determine the location of the disturbance. The difference between the man-made disturbance and the noise on a 39 km long optical fiber is experimentally studied, and the influence of the noise is eliminated by the dynamic variance algorithm. The response time of the system is 1 second, the spatial resolution is 20 meters, and the positioning error is less than 0.1%.

Keywords: ϕ -OTDR; variance; gaussian blur; threshold value

1 引言

分布式光纤振动传感系统 (Distributed vibration system, DVS) 是通过光纤作为传感敏感元件来感知振动。利用光时域反射测量技术 (optical time domain reflectometer, OTDR) 实现了对某一或多个振动点在同一时间内的感知和空间定位实时准确测量^[1]。其在长距离、全方位、多点非法入侵、结构损坏等振动相关事件的应用, 优于常规振动检测系统, 其优势是不受电磁干扰、探测距离长、定位精度高、可实现连续多点分布式测量。目前, 以瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射为基础, 构成了分布式光纤传感系统的重要光学理论。在光纤传输过程中, 散射的主要成分是瑞利散射, 它的散射强度更高。激光信号经脉冲调制后, 在光纤全程上各个点到达探测器的背向散射光的时间也各不相同, 光强度也各不相同, 通过探测器的背向瑞利散射光强度可以用来表示光纤全程的干扰。

随着发电站、管线^[2-3]、桥梁以及隧道^[4-5]等技术水平的不断提升, 其主要基础设施中的安全问题日益受到人们的关注。传感技术挖掘与发展, 是实现感知物理量变化的一种有效途径。美国 TAMU 在 1993 年利用外部振动采用背向瑞利散射光的相位调制进行振动分析^[6]。基于超窄线宽激光光源的 ϕ -OTDR 技术第一次走向世人。中国科学院上海光机所梁可桢等人于 2012 年提出了一种新型的数字相干监测和维纳滤波技术的振动监测技术, 传感距离达到了 3.5 km, 检测到振动频率为 200 Hz 的正弦信号^[7]。Hugo F. Martins 等人于 2013 年提出了一种 ϕ -OTDR 系统, 用于高精度的超声波测定^[8]。天津大学孙振世在 2016 年进行了分布式光纤振动传感器对压力水管泄漏检测的

研究^[9]。安徽大学俞本立教授在 2017 年采用统计计算方法, 有效地抑制了误差。武汉理工大学李信宇等人于 2019 年提出了一种基于弱光栅阵列增强的 ϕ -OTDR 传感系统, 为高灵敏度的分布式振动测量提供了一种方法^[10]。吴慧娟等人于 2021 年介绍了 DVS/DAS 信噪分离、基于机器学习模型的多维信号的检测和识别算法^[11]。

在长距离 DVS 应用中, 检测信号的衰减主要是因为长距离传输时瑞利散射发生减弱^[12], 而且地面生活场景的复杂及未知地理条件下导致实际误报率偏高问题, 使得 DVS 的长距离检测算法还不能达到实际应用的要求, 如高灵敏度以及低误报率等^[13]。DVS 长距离检测算法在边界安防、管道泄漏、长距离光纤传输安全等应用中具有重大意义。

因此, 本文根据方差分析能在一维信号中迅速、高效地检测振动特征, 提出了一种动态方差阈值算法, 并使用了能提高系统响应速度的并行编程技术。

2 理论推导

2.1 ϕ -OTDR 原理分析

瑞利散射是一种波长与入射光相同的弹性散射。瑞利背向散射的传输距离与时间的关系式如式 (1) 所示:

$$t = 2nS/c, \quad (1)$$

式中: t 为光信号从发射到接收所用的时间, n 为光纤的纤芯折射率, S 为传输距离, c 为光在真空中的传播速度^[14]。由式 (1) 可知, 瑞利散射光返回的速度越快, 距离光源越近, 返回时间和距离呈线性关系。采集卡接收到信号的时间顺序即为信号的位置信息。

光纤的折射率会由于在该位置上的传感光纤受外界扰动的影响而改变, 从而引起光在相应位置上相位的改变, 其相位变化如式 (2) 所示:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(l\Delta n + n\varepsilon l), \quad (2)$$

式中: λ 为光的中心波长, l 为光纤长度, ε 为光纤的应变张量。相位的改变会影响该位置电场的变化, 最终反映出光的相位变化^[15]。采集卡接收到的电场变化即为信号的相位变化。

所以采集到的信号是光纤沿线各个位置的背向瑞利散射光相位随着位置变化而变化的曲线。

2.2 动态方差阈值算法

图 1 为动态方差阈值算法流程图, 首先将采集的信号通过带通滤波器进行降噪预处理, 以便对扰动信号更精确地辨识。每个位置采集的全部数据可以用矩阵 $\mathbf{X}$ 来表示:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: i 为采样的位置数, j 为每秒钟采样的帧数。对矩阵 $\mathbf{X}$ 逐行进行方差处理:

$$y_i = \frac{1}{j} [(x_{i1} - \bar{x}_i)^2 + (x_{i2} - \bar{x}_i)^2 + \cdots + (x_{ij} - \bar{x}_i)^2]. \quad (4)$$

得到了矩阵 $\mathbf{Y}$:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

从而将每个点采集到的一维信号转换成一个具体的数值, 并且这个数值能够区分扰动/非扰动。如果

是平静的位置, 那么该位置的数据的方差相对于相邻位置的方差变化较小; 如果是扰动的位置, 那么该位置的数据的方差相对于相邻位置的方差变化较大。

经过方差处理后, 对矩阵 $\mathbf{Y}$ 进行高斯模糊处理:

$$z_i = \frac{y_{i-m} \cdot w_{i-m} + y_{i-m+1} \cdot w_{i-m+1} + \cdots + y_i \cdot z_i + \cdots + y_{i+m} \cdot w_{i+m}}{2m+1}, \quad (6)$$

式中: m 为高斯模糊的宽度, w 为高斯分布的系数^[16]。得到了矩阵 $\mathbf{Z}$:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_i \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将矩阵 $\mathbf{Z}$ 绘制成曲线, 将波形进行平滑连续的优化, 有利于后续的阈值寻峰算法。若不对曲线进行平滑连续的优化则会造成存在反复穿越阈值的现象, 从而产生误报。

在对采集的数据进行预处理并将所得曲线平滑处理后, 若想确定扰动位置则需要对曲线进行阈值寻峰。在短距离的 DVS 系统中, 可以取固定阈值来得到振动峰的起始点和结束点, 并求出该振动峰的重心位置, 从而得到震动的精确位置。在长距离的 DVS 系统寻峰算法中, 随着距离增加, 光信号会衰减, 信号的强度也会减弱。这种衰减有些固定的趋势: 在十公里内衰减十分明显, 十公里后衰减的速度逐渐放慢。因为这一趋势的变化, 我们的算法也会受到影响。当我们完成第二步方差加模糊算法之后, 就可以得到一个很明显的波形, 通过阈值寻峰很容易得到波峰的具体位置。这种算法在短距离 (5 km 以内) 没有明显的问题, 但在长距离的情况下, 因为原始信号值随着距离的增加而逐渐衰减, 初始端电压和末端电压相差很多, 导致我们前面得到的结果波形高度也会差很多^[17], 这种

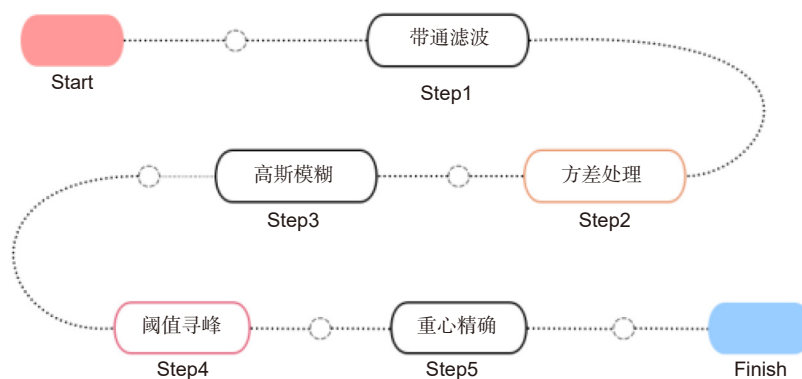


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

情况下如果继续使用固定的阈值, 显然是不可取的。所以我们使用一段距离的平均值作为动态阈值, 这段距离的宽度选取需要谨慎, 通过对比 10 m、500 m、1 km、5 km 的距离宽度发现, 距离宽度太小容易被扰动位置干扰, 太长则会准确度不足。所以我们采用 1 km 作为平均值的距离宽度, 该宽度生成的阈值能保证低漏报率及低错报率。

2.2.1 带通滤波

带通滤波器可以有效地抑制输入信号在一定的频率范围外的信号成分, 避免了特定范围外的波动。带通滤波器会使信号频率成分在一定的频率范围内下降, 只允许一定频率范围内的信号成分通过^[12]。带通滤波器分为: FIR(有限冲激响应滤波器), IIR(无限冲激响应滤波器)。FIR 滤波器在保证幅度特性满足技术要求的同时, 有做到严格的线性相位特性, 故在本文采用了 FIR 滤波器。带通滤波器具有天然去噪的优势并且在 DVS 系统中的速度也很快。由于光时域反射信号具有其特定频率范围, 且无论是光路还是电路的噪声都会对解调有影响, 所以我们将 FIR 滤波器应用在 DVS 系统中从而降低噪声干扰、提高信噪比。

2.2.2 方差分析

方差是在统计学上反映出随机变量离散程度的物理量。在概率论中用方差对随机变量与其数学期望(即均值)之间的偏离程度进行度量。统计中的方差(样本方差)为各样本值与全部样本值平均数之差的平方值的平均数^[18]。在很多实际应用中, 研究数据的偏差程度, 也就是方差, 是非常有意义的。

方差分析是一种显著性试验, 用于两个或两个以上的均数差异。研究得出的数据因各种因素而呈现波动状。引起波动的原因分为两类, 一类是不可控的随机因素, 另一类是实验中主动施加的影响因素。在

DVS 系统中, 环境噪声是一个不可控的随机因素, 而扰动是一个影响因素, 它是主动施加的。

2.2.3 高斯模糊

高斯模糊又称高斯平滑, 它通常用于降低影像杂讯, 减少细节层次, 广泛应用于影像处理领域。通过高斯模糊技术处理后的影像, 其视觉效果与在一般灯光阴影下使用毛玻璃作为镜头观察图像的效果相近^[19]。高斯平滑也常用于计算技术视觉算法中的预处理阶段, 以增强不同比例大小下的图像效果(参见尺度空间表示以及尺度空间实现)。图像的高斯模糊过程, 数学上可以理解为图像与正态分布做卷积。影像模糊做卷积搭配圆形边框, 会产生更精准的焦外影像效果。高斯模糊可以看作图像低通滤波器, 因为高斯函数的傅里叶变换是另一个高斯函数。在 DVS 算法数据处理中可以将采集到的波形进行平滑连续的优化, 从而有利于后续的阈值寻峰算法。

3 实验结果

如图 2 所示, 文中所做的实验硬件系统, 采用声光调制器(AOM)实现了对超窄线宽激光器发射的脉冲调制, 生成了一个连续相干脉冲光信号。利用环形器将 EDFA 放大后的光脉冲信号传输到传感光纤中。并且通过环形器, 将脉冲光信号在传感光纤中所产生的背向瑞利散射信号输入到光电探测器中, 由此进入数据采集卡处理信号^[20]。由于要进行长距离振动检测, 我们结合了前向拉曼放大, 使得传感距离长达 39 km。其中, 数据采集卡的脉冲周期为 1 kHz, 脉冲宽度为 200 ns, 采样率为 100 MHz。拉曼放大器功率为 27 dBm。

3.1 噪声分析

对分析不利的信号均可称作噪声。通过实际检测,

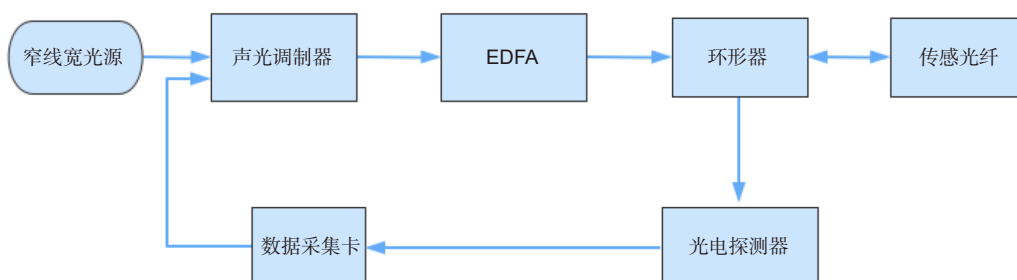


图 2 结构示意图

Fig. 2 Structural diagram

发现 DVS 噪声大致分为以下几类:

1) 偏振引起的噪声。特点表现为偶发性的低频高能量。在光缆悬挂晃动时可能会出现。影响较大, 但其集中分布在低频段, 所以容易处理。

2) 外界物理噪声。比如 DVS 传感光缆附近的震动装置。常见的有空调机, 高压电线上的震动装置, 影响较大且不容易避免。即便知道外界震动的固有频率也不容易消除, 因为当外界的固定频率震动传递到光缆时, 引起的光信号的震动不是固有频率^[21]。

3) 电子元器件引起的噪声。比如采集卡内部的噪声, 信号线的噪声等。此类噪声一般较弱且容易规避。

4) 光路引起的噪声。如光缆熔接头、法兰接头处, 不干净的接头面等引起, 此类噪声较容易处理。

如图 3 所示, 平静位置的信号无论高低, 都具有较小振幅的特点, 振幅基本在 200 mV 左右, 变化较小。

平静位置的信号特点: 较为平稳, 1000 个点的

振幅分布在 200 mV 的阈值范围内。整体曲线相当平滑。大部分位置具有较低的能量, 电压值集中在 200 mV 以下, 如图 3(a)、3(b); 小部分电压值由于实验光缆铺设存在多种干扰 (空调室外机, 光缆悬挂), 存在 600 mV~1000 mV 不等的较高电压, 如图 3(c)、3(d)。而扰动位置电压值振幅较大, 如图 4 所示, 信号不平稳, 波动大, 振幅最高能达到 1000 mV, 整体曲线呈锯齿状。根据采集的各种噪声频率范围, 本次实验的 FIR 带通滤波器频率范围设置为 40 Hz~500 Hz, 我们可以通过振幅大小来区分扰动和平静位置。

3.2 平均模糊与高斯模糊比较

在 DVS 系统中, 最后得到的波形往往不是平滑连续的, 这不利于后续的寻峰算法。通常采用加权平均模糊算法来解决这个问题^[22]。加权平均的算法十分简单: 取目标点前后点的各点平均值与权重的乘积的和来代替这个点的值。权重的取值是这一算法的关键: 可以取所有点的权重相同, 也就等于多个点平均值。这种做法虽然算法简单、速度快, 但是会出现一定程

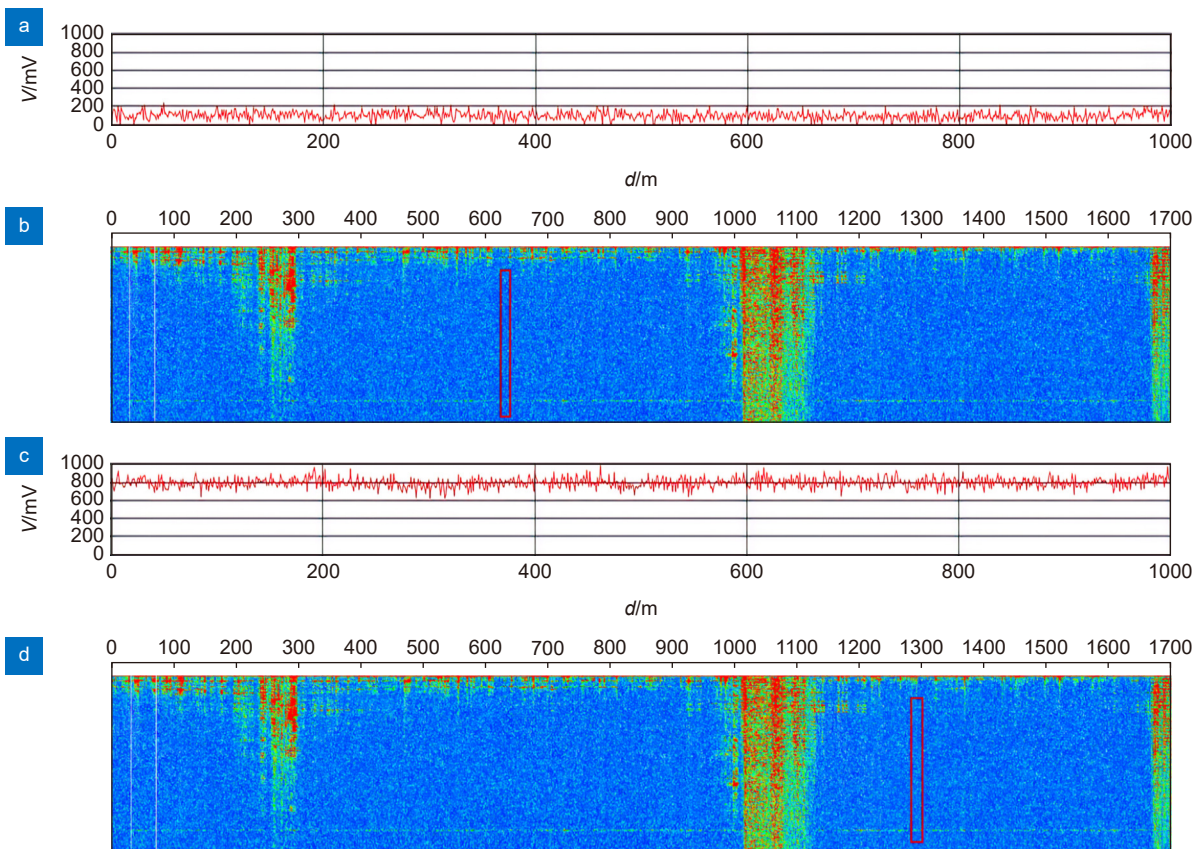


图 3 两种平静位置的信号特征及其频谱图 (横坐标为位置/米, 纵坐标为频率/赫兹) 对应的位置

Fig. 3 Signal characteristics of two quiet positions and their corresponding positions in the spectrum (abscissa is position/m, ordinate is frequency/Hz)

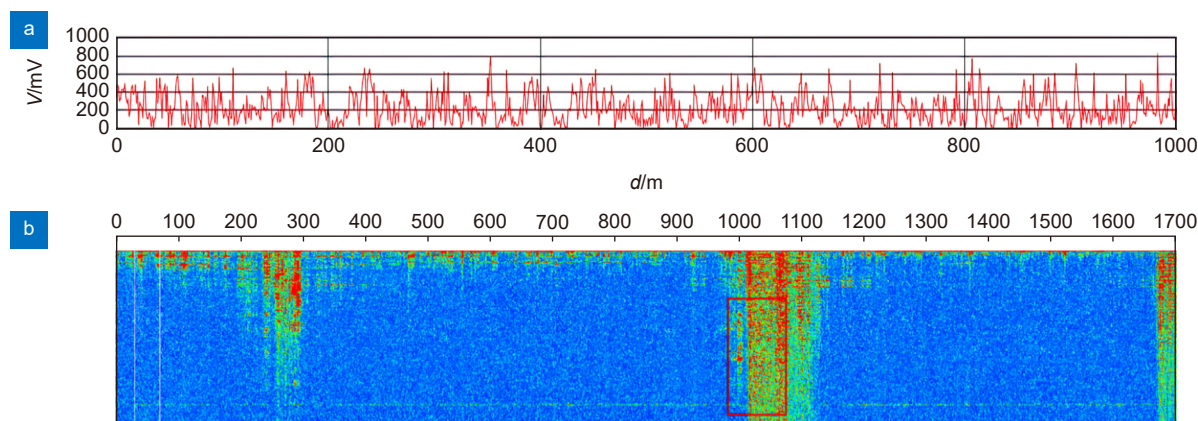


图 4 扰动位置处 1000 帧的数据及其频谱图 (横坐标为位置/米, 纵坐标为频率/赫兹) 对应的位置

Fig. 4 The data of 1000 frames at the disturbance location and the corresponding position of its spectrum (abscissa is position/m, ordinate is frequency/Hz)

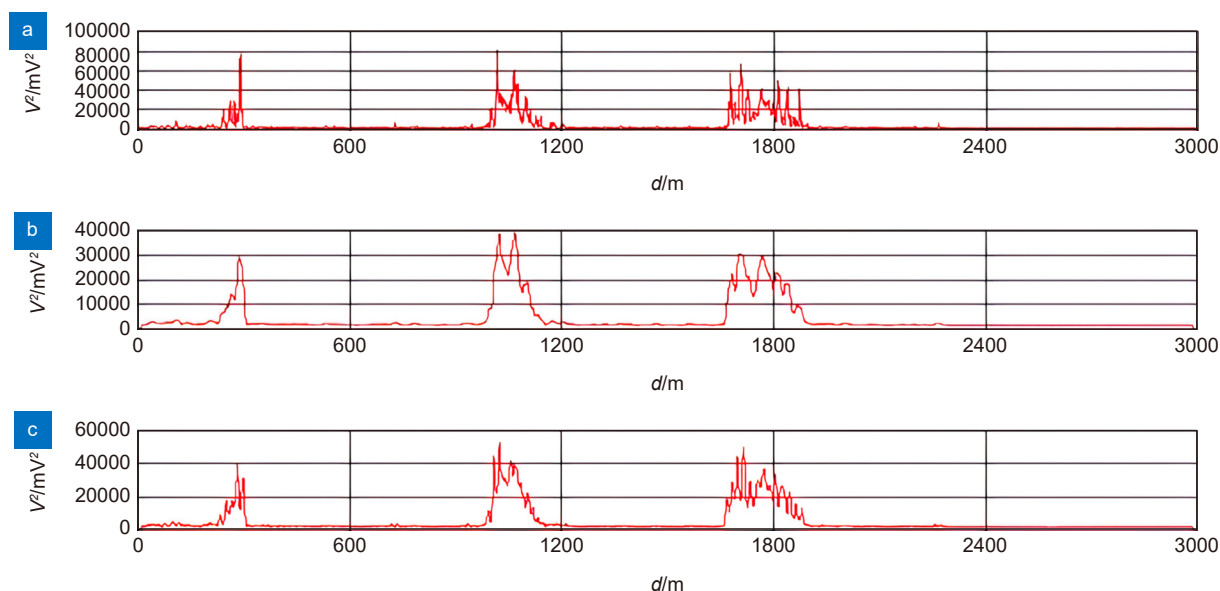


图 5 高斯模糊。(a) 为模糊前; (b) 为平均模糊, 宽度为 20; (c) 为高斯模糊, 高斯模糊的标准差 σ 等于 3, 宽度 21 个点

Fig. 5 Gaussian blur. (a) Before blurring; (b) Average blurring with a width of 20; (c) Gaussian fuzzy. The standard deviation σ of Gaussian fuzzy is equal to 3, and the width is 21 points

度的失真。因此, 本文采用高斯分布的加权平均算法既能平滑曲线又能很好地保留曲线特征。

由图 5 可以看出, 高斯模糊在保留原曲线特征的同时将曲线进行平滑, 效果优于平均模糊^[23]。若不对方差曲线进行高斯模糊处理, 在寻峰算法时对同一位置的扰动识别为多个峰, 从而增大误报率。在高斯模糊中, 其标准差代表着数据的离散程度, 标准差越高生成模版的各个系数相差较小, 对图像的平滑效果比较明显。宽度代表着加权平均的范围。当宽度等于六倍标准差时其概率分布为 99.8%。本次实验中, 我们

采用 3 的标准差, 即 21 的宽度, 这样既能保证曲线的平滑效果, 又能保留原曲线的特征。

3.3 使用并行编程技术提高运算速度

本系统的数据处理采用多线程模式, 而多线程的相当一部分时间是用于线程上下切换。所以在使用多线程时, 线程池一般都是搭配使用的。C#中使用线程池技术很简单, 关键在于如何设置最大线程数, 主要有以下两种类型:

计算密集型, 一般使用 $2 \times \text{CPU 核数} + 2$ 。例如计算机是 4 核, 那么使用 10 线程效果最佳。

IO 密集型, 最大线程数往往要比计算密集型高很多, 几十到几百都有可能, 具体要搭配 IO 的速度。C#在新的版本中, 提供了简单易用的并行编程 API, Parallel。

Parallel 可以执行多个指令, 同时启动多个线程, 是一种多线程的操作。主线程 (当前线程) 也会参与计算—阻塞界面 (主线程忙于计算, 无暇他顾) 是 Parallel 最直观的特点。

在 Task 的基础上进行封装得到了 Parallel, 可以同时使主线程 (当前线程)+等候线程参与计算。

分别使用十组不同的数据进行测算。串行处理平均 288 ms, 并行处理平均 103 ms。串行处理平均 CPU 占有率为 13%, 并行处理平均 CPU 占有率为 40%。在对 40 km 的数据进行处理时, 串行处理时长为 3.7 s, 并行处理仅需 1 s。并行处理的速度比串行快了将近三倍。优势很明显。

4 数据分析

如图 6 所示, 我们在 37 km 的盘纤后接入 3 km

的测试光缆进行现场测试, 图 7 为原始数据, 共设置了 40960 个位置, 间隔 1 m, 每个位置采集 1000 帧数据。在实验过程中, 我们主要以最后 3 km 进行扰动测试, 通过晃动、敲打以及翻越的方式进行人为扰动。由原始数据可以看出, 在系统中加入拉曼放大器有效减缓了光信号的衰减^[24]。由于前 37 km 的盘纤更加敏感并且实验环境为自然环境, 所以其也处于一定的振动状态。但这种振动与人为的扰动不同, 在方差处理后具有相近的能量值, 在后续寻峰算法中不会形成扰动峰, 从而进行排除, 在 37550 m 和 38250 m 处进行人为扰动。

高斯模糊后得到了连续的一维位置与电压的曲线, 进行寻峰处理。图 8 为原始数据经方差处理后的数据曲线, 图 9 为扰动处经方差处理后的数据曲线放大图。在寻峰算法中, 如图 10 所示取每个位置前后 500 m, 共 1001 个点的平均值来绘制动态阈值曲线。通过对比噪声与各种人为扰动 (晃动、敲击、翻越) 的信号特征发现, 人为扰动的峰宽度均大于 80 m, 所以寻峰宽度也设置为 80 m, 从而区分扰动和噪声。



图 6 测试现场图

Fig. 6 Test site

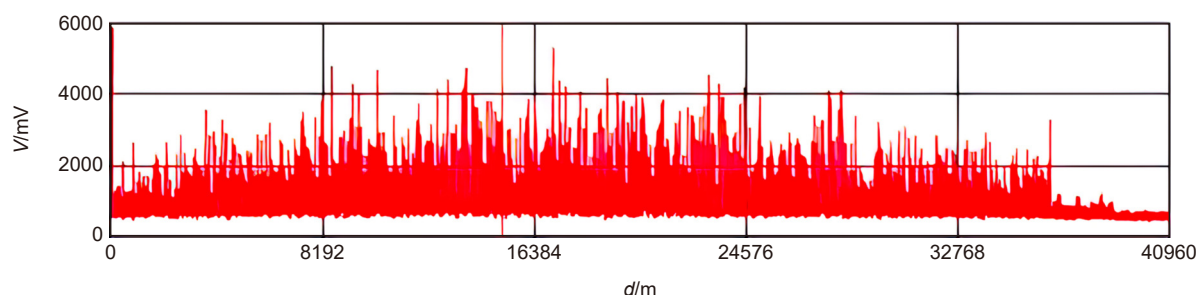


图 7 原始数据

Fig. 7 Raw data

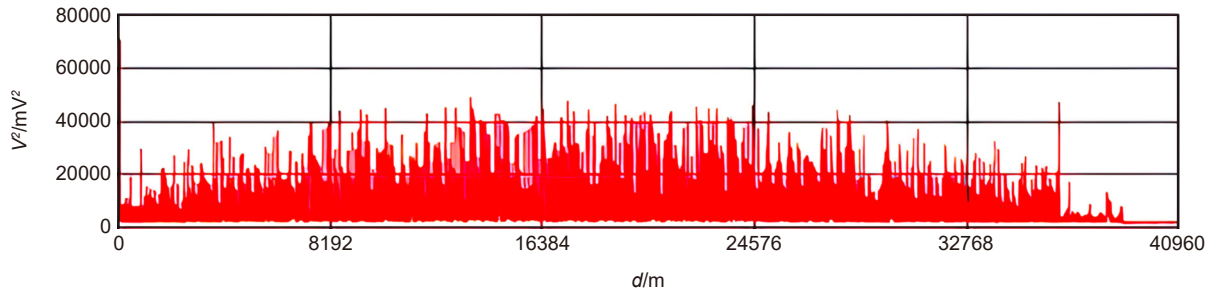


图 8 方差处理

Fig. 8 Variance treatment

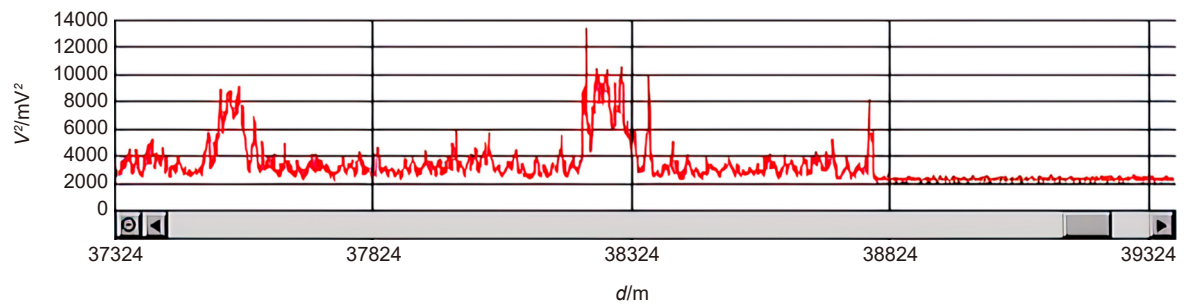


图 9 扰动处方差曲线

Fig. 9 Disturbance prescription difference curve

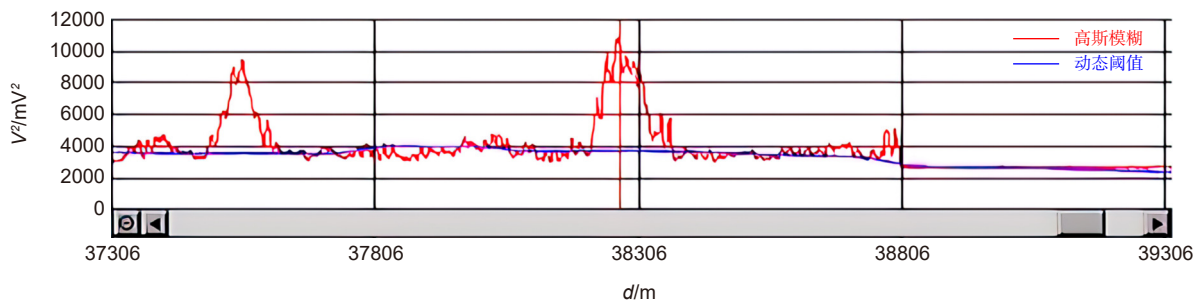


图 10 寻峰算法

Fig. 10 Peak seeking algorithm

最后对寻到的两个峰进行重心确定。振动峰重心确定有两种方法:

第一种方法: 将从振动峰初始点到结束点的所有点 (包括初始点和结束点) 的横纵坐标相乘后累加得到的数值除以二得到 x_w , 再从起始点 x_0 开始累加, 直到 $x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_i$ 大于 x_w , 则 x_i 为重心位置, 也即振动的精确位置。

第二种方法: 根据力矩求重心位置。将振动峰当成一根质量不均匀的直杆, 振动峰上的点的横坐标即为在该直杆上的位置, 纵坐标即为该位置点上的重量^[25]。直杆上的重量值分布于位置点上, 假定一重杆长度为 L , 将杆一端支架, 用秤称量另一端。设 X_1

为重心到支承端距离, G 是杆的重力, 另一端的重力为 W_1 , 则根据力矩平衡有:

$$W_1 * L = G * X_1. \quad (8)$$

若重力 G 已知, 则重心位置直接可求, 如果不确定, 则将杆反向再重复做一遍, 可建立一个方程, 重心位置即可求。第一种方法的操作数远多于第二种方法, 所需时间更多。本文采用第二种方法求得振动的精确位置。

经阈值寻峰算法得到的扰动位置为 37556 m 和 38243 m, 误差小于 0.1%, 漏报率为 0, 响应时间为 1 s。

5 结 论

光纤检测相较于传统振动监测方法有着巨大优势, 并且分布式光纤振动检测系统在工程应用得到了更加广泛的使用。因此, 提高检测系统的精确度和灵敏度就显得尤为重要^[26]。

本文首先在理论上分析了 ϕ -OTDR 的原理以及噪声和扰动的信号特征, 然后提出了一种基于 ϕ -OTDR 的动态方差阈值算法, 解决了长距离分布式振动检测算法由于光信号衰减和噪声扰动造成的灵敏度和准确率低的问题。实验数据表明, 该算法具有高定位精度及快速响应的优点, 并且能对多种扰动进行反应, 能广泛地应用在工程实践当中, 如管道泄漏、边界安防、建筑健康监测等。

利益冲突: 刘铁根是期刊的编委, 除此之外, 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

- [1] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, **23**(6): 2081–2087.
- [2] Tan D J, Tian X Z, Sun W, et al. An oil and gas pipeline pre-warning system based on ϕ -OTDR[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9157**: 91578W.
- [3] Wu H J, Chen Z Q, Lv L D, et al. Novel pressurized water pipe leak monitoring method based on the distributed optical fiber vibration sensor[J]. *Chin J Sci Instrument*, 2017, **38**(1): 159–165. 吴慧娟, 陈忠权, 吕立冬, 等. 基于DOFVS的新型压力输水管道泄漏在线监测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, **38**(1): 159–165.
- [4] Bao X Y, Zhou D P, Baker C, et al. Recent development in the distributed fiber optic acoustic and ultrasonic detection[J]. *J Lightwave Technol*, 2017, **35**(16): 3256–3267.
- [5] Duckworth G L, Ku E M. OptaSense distributed acoustic and seismic sensing using COTS fiber optic cables for infrastructure protection and counter terrorism[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8711**: 87110G.
- [6] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: 5194847[P]. 1993-03-16.
- [7] Liang K Z, Pan Z Q, Zhou J, et al. Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Chin J Lasers*, 2012, **39**(8): 0805004. 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.
- [8] Martins H F, martin-Lopez S, Corredera P, et al. High visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8794**: 87943F.
- [9] Sun Z S. Study on leakage monitor of pressure water pipe based on distributed optical fiber vibration sensing technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. 孙振世. 基于分布式光纤振动传感的压力水管泄漏监测应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [10] Li X Y, Che Q, Xiong Y C, et al. The analysis of improved phase-OTDR sensing system employing weak fiber Bragg grating array[J]. *J Optoelectron-Laser*, 2019, **30**(7): 673–677. 李信宇, 车前, 熊玉川, 等. 基于弱光栅阵列增强的 ϕ -OTDR传感系统性能分析[J]. *光电子·激光*, 2019, **30**(7): 673–677.
- [11] Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on ϕ -OTDR[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(13): 1306003–51. 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于 ϕ -OTDR的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(13): 1306003–51.
- [12] Chu Q X, Chen F C. Multiband bandpass filter technologies[J]. *J South China Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2012, **40**(10): 219–226. 褚庆听, 陈付昌. 多频带通滤波器技术(英文)[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, **40**(10): 219–226.
- [13] Zhang Y J, Liu W Z, Fu X H, et al. An extraction and recognition method of the distributed optical fiber vibration signal based on EMD-AWPP and HOSA-SVM algorithm[J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2016, **36**(2): 577–582. 张燕君, 刘文哲, 付兴虎, 等. 基于EMD-AWPP和HOSA-SVM算法的分布式光纤振动入侵信号的特征提取与识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(2): 577–582.
- [14] Yuan X Y, Tan Z W. Status and development of distributed optical fiber sensing technology based on ϕ -OTDR[J]. *Opt Commun Technol*, 2018, **42**(2): 23–26. 袁晓月, 谭中伟. 基于 ϕ -OTDR的分布式光纤传感技术的现状与发展[J]. *光通信技术*, 2018, **42**(2): 23–26.
- [15] Jin S, Song W, Yang C, et al. 120 km long-distance distributed optical fiber vibration sensing system[J]. *Study Opt Commun*, 2021(3): 20–24. 金桑, 宋伟, 杨纯, 等. 120 km长距离分布式光纤振动传感系统[J]. *光通信研究*, 2021(3): 20–24.
- [16] Lu B, Wang Z Y, Zheng H R, et al. High spatial resolution long distance distributed optical fiber vibration sensing system[J]. *Chin J Lasers*, 2017, **44**(10): 1015001. 卢斌, 王照勇, 郑汉荣, 等. 高空间分辨率长距离分布式光纤振动传感系统[J]. *中国激光*, 2017, **44**(10): 1015001.
- [17] Chow D M, Yang Z S, Soto M A, et al. Distributed forward Brillouin sensor based on local light phase recovery[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 2990.
- [18] Pan L, Liu K, Jiang J F, et al. Distributed fiber-optic vibration and temperature sensing system[J]. *Chin J Lasers*, 2018, **45**(1): 0110002. 潘亮, 刘琨, 江俊峰, 等. 分布式光纤振动和温度双物理量传感系统[J]. *中国激光*, 2018, **45**(1): 0110002.
- [19] Liu S Q, Yu F H, Hong R, et al. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(3): 200078.
- [20] Zan W, Wang Y, Liu X, et al. Envelope extraction for vibration locating in coherent ϕ -OTDR[J]. *Sensors*, 2022, **22**(3): 1197.
- [21] Li S, Qin Z G, Liu Z J, et al. Long-distance ϕ -OTDR with a flexible frequency response based on time division multiplexing[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(21): 32833–32841.
- [22] Zhang M, Wang S, Zheng Y W, et al. Enhancement for ϕ -OTDR performance by using narrow linewidth light source and signal processing[J]. *Photonic Sens*, 2016, **6**(1): 58–62.
- [23] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity ϕ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(11): 13804–13810.
- [24] Xiao W Z, Cheng J, Zhang D W, et al. High stability PGC

demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(3): 210368.

肖文哲, 程静, 张大伟, 等. 用于光纤干涉传感器的高稳定PGC解调技术[J]. *光电工程*, 2022, 49(3): 210368.

- [25] Zhang Y K, Shang Y, Wang C, et al. Detection and recognition of distributed optical fiber intrusion signal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(3): 200254.

张永康, 尚盈, 王晨, 等. 分布式光纤入侵信号检测与识别[J]. *光电工程*, 2021, 48(3): 200254.

- [26] Liu T, Li H, He T, et al. Ultra-high resolution strain sensor network assisted with an LS-SVM based hysteresis model[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(5): 200037.

作者简介



张博智 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式光纤传感技术。

E-mail: 437049504@qq.com

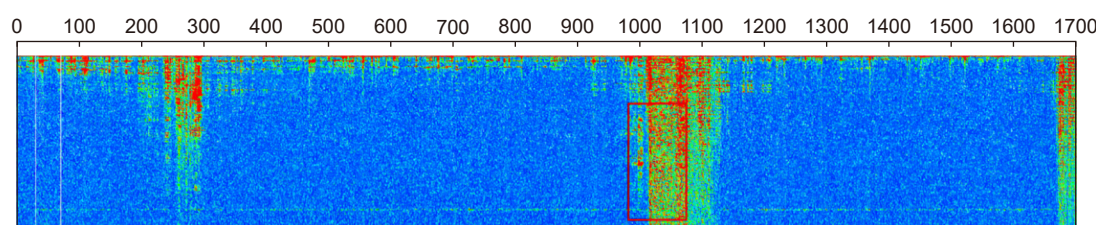


【通信作者】刘铁根 (1955-), 男, 天津大学精密仪器与光电子工程学院光学工程国家重点学科教授, 博士生导师, 从事光纤传感技术、光电检测技术、嵌入式图像检测技术等领域的研究工作。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn

Research on dynamic variance threshold algorithm based on distributed fiber vibration sensor system

Zhang Bozhi^{1,2,3}, Liu Ke⁴, Liu Kun^{1,2,3}, Jiang Junfeng^{1,2,3}, Zhang Man⁴, Liu Tiegeng^{1,2,3*}



The spectrum of vibration

Overview: Distributed optical fiber vibration sensing system (DVS) is a kind of vibration detection system which uses optical fiber as a sensing element to sense the vibration. Through OTDR, one or more vibration points can be sensed and located in space at the same time. Compared with the traditional vibration monitoring system, it has the advantages of no electromagnetic interference, long detection distance, high positioning accuracy, continuous multi-point distributed measurement, and so on. It is suitable for real-time accurate measurement of the vibration-related events such as long-distance, omni-directional, multi-point illegal invasion, and structural damage. At present, the main optical principle of the distributed optical fiber sensing system is based on Rayleigh scattering, Raman scattering, and Brillouin scattering. Rayleigh scattering is the main component of light scattering in the process of optical fiber transmission, which has high scattering light intensity. The time and intensity of the backscattered light produced by modulated pulse laser signal at each point in the whole process of optical fiber are different. The change of disturbance in the whole process of optical fiber can be characterized by the change of the intensity of Rayleigh scattering light measured by the detector with time.

In the long-distance DVS applications, due to the attenuation of Rayleigh backscattering in the process of long-distance transmission of light, the detection signal is weak and the perception sensitivity is high, which leads to the problem of high false alarm rate in the complex ground life scene and unknown buried conditions. Thus, the DVS long-distance detection algorithm in the complex environment can not meet the practical application requirements.

Therefore, aiming at the problem of long-distance complex noise interference and signal attenuation, combined with the characteristics that variance analysis can detect the vibration quickly and effectively in one-dimensional signal, this paper proposes a dynamic variance threshold algorithm, and uses the parallel programming technology to improve the response speed of the system. The signal preprocessed by the band-pass filter is processed by variance processing, Gaussian blur, threshold peak seeking, and accurate center of gravity. The problem of long response time caused by the attenuation of Rayleigh scattering signal and the large amount of computation in the long-distance DVS detection is solved. The parallel programming technology is used to improve the operation speed by 184%, so as to quickly and accurately determine the location of the disturbance. The difference between the man-made disturbance and the noise on a 39 km long optical fiber is experimentally studied, and the influence of the noise is eliminated by the dynamic variance algorithm. The response time of the system is 1 second, the spatial resolution is 20 meters, and the positioning error is less than 0.1%.

Zhang B Z, Liu K, Liu K, et al. Research on dynamic variance threshold algorithm based on distributed fiber vibration sensor system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220205; DOI: [10.12086/oee.2023.220205](https://doi.org/10.12086/oee.2023.220205)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China Youqing (61922061), National Natural Science Foundation of China (60077023), and National Key Fund (61735011)

¹School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China; ²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300000, China; ³Tianjin Fiber Optic Sensing Engineering Center, Tianjin 300000, China;

⁴Tianjin Qiu Shi Fiber Technologies Co., Ltd., Tianjin 300000, China

* E-mail: tgliu@tju.edu.cn