

激光与光电子学进展

面向 DAS 系统的震源信号初至波到达时间拾取方法

黄亮¹, 梁磊^{1,2*}, 江轲¹, 杜尚明¹¹武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 湖北 武汉 430070;²武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 在基于相敏光时域反射计(Φ -OTDR)的光纤分布式声传感(DAS)系统定位震源二维空间位置方法中,由于干扰和噪声的影响,存在震源初至波到达光缆不同位置时间信息获取不准确的问题,带来较大的定位误差。针对 DAS 系统,提出了一种基于双边滤波边缘检测的震源初至波到达时间拾取方法。首先,将 DAS 系统采集的震源时空二维信号转换成灰度图,用双边滤波方法进行降噪,然后,应用基于 Canny 算子的边缘检测方法提取灰度图像中的边缘特征,来获得震源初至波到达时间。这种方法能够同时考虑时空二维数据的时间和空间整体特征,提高低信噪比信号初至波到达时间的拾取精度。现场实验表明,该方法对于受干扰和系统噪声影响的低信噪比信号,拾取的到达时间平均误差不超过 3 ms,拾取精度比传统方法高,算法平均耗时仅需 0.1 s,拾取时间短。

关键词 分布式声传感; 震源; 边缘检测; 双边滤波; 到达时间拾取

中图分类号 P315

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223443

First Arrival Time Pickup Method of Vibration Signals for Distributed Acoustic Sensing Systems

Huang Liang¹, Liang Lei^{1,2*}, Jiang Ke¹, Du Shangming¹¹National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;²School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China

Abstract Two-dimensional (2D) spatial position of a vibration source in an optical distributed acoustic sensing (DAS) system can be determined based on a phase-sensitive optical time-domain reflectometer. However, due to interference and noise, this approach may acquire inaccurate arrival time information of the first arrival wave of the vibration source at different positions of the optical cable, resulting in large positioning errors. In this study, we propose a method of estimating the first arrival wave of the vibration source in a DAS system based on bilateral filtered edge detection. First, the spatio-temporal 2D signals collected by the DAS system were converted into a gray-scale map, and then the bilateral filtering method was used to reduce the noise. The edge features in the gray-scale image were extracted using a Canny operator-based edge detection method to obtain the first arrival time of the source. The proposed method can simultaneously consider the overall temporal and spatial characteristics of spatio-temporal 2D data and improve the accuracy of low signal-to-noise ratio signal of first arrival time pickup. Results show that for low signal-to-noise ratio signals affected by interference and system noise, the average error for pickup arrival time does not exceed 3 ms, pickup accuracy is higher than that of the traditional method; the algorithm takes only 0.1 s on average, and pickup time consumption is low.

Key words distributed acoustic sensing; vibration source; edge detection; bilateral filtering; arrival time pickup

1 引言

基于相敏光时域反射计(Φ -OTDR)的光纤分布式声传感(DAS)系统通过埋地光缆,可以高精度地检测

和定位周围环境中各种震源产生的振动^[1-3]。定位震源到光纤的垂直偏移距离即震源的二维定位是当前的研究热点^[4]。基于到达时间差(TDOA)的定位技术是 DAS 系统中最常用的震源二维定位方法^[5]。震源初至

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-03-03; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 三亚崖州湾科技城管理局 2019 和 2020 年度科技计划资助项目(SKJC-KJ-2019KY02, SKJC-2020-01-016)

通信作者: *L30L30@126.com

波到达光缆不同位置的时间信息是该定位方法的关键特征参数之一,它的准确性直接影响定位精度,它的拾取速度影响定位的实时性^[6]。

目前,针对 DAS 系统中震源初至波的到达时间提取,主要借鉴传统地震台站监测中的一些思路和方法^[7]。Liu 等^[8]设计的基于 DAS 系统的水下振动源定位系统中,使用了广义互相关(GCC)方法,该方法通过计算信号间的互相关函数获得初至波到达时间。然而,在噪声和信号多径传播干扰的影响下,光缆不同位置监测到的低信噪比振动信号相关性变差,降低了初至波到达时间拾取精度。Ding 等^[9]在 DAS 震源定位方法中提出用计算信号短时平均能量(STE)来拾取信号到达时间。段建华^[10]提出长短时能量比法(STA/LTA)拾取微震事件初至波到达时间,取得了一定效果。然而,利用振动信号能量拾取初至波到达时间的方法需要设定能量阈值作为触发条件,因此这类方法对噪声信号比较敏感,对于低信噪比信号的提取误差大。随着深度学习技术的兴起,Zhu 等^[11]利用卷积连接方式的优势,将卷积神经网络应用于地震初至波到达时间拾取。Hu 等^[12]、Ma 等^[13]提出了基于不同结构的卷积神经网络拾取地震初至波到达时间的方法,取得了不错的改进效果。但深度学习所需训练样本数据较大,训练时占用的内存空间和计算资源较多,并且需要使用手工标注训练数据的标签,消耗了大量人力。

DAS 系统通过埋地传感光缆形成线性的多传感单元阵列,可以大范围、远距离检测和定位震源。然而,DAS 系统采集的震源时空二维数据,存在系统噪声和车辆行驶、人员活动等外界干扰^[14],因此,需使用信噪比低于 10 dB 的信号计算到达时间信息。上述方法都存在到达时间拾取不准确的问题^[15],但是,如果采用一维时间序列到达时间拾取方法,效率低,且难以利用信号空间特征来提高拾取精度。

针对 DAS 系统,本文提出了一种基于双边滤波边缘检测的震源初至波到达时间拾取方法。首先,将 DAS 系统采集的震源时空二维信号转换成灰度图,用双边滤波方法进行降噪。双边滤波是一种保边滤波,在去除噪声的同时保留边界信息,减少环境干扰和噪声对到达时间拾取的影响。然后,基于 Canny 算子的边缘检测方法提取灰度图像中的边缘特征,获得震源初至波到达时间。这种方法能够同时考虑双边滤波降噪后时空二维数据的时间和空间整体特征,提高低信噪比信号到达时间拾取精度。最后搭建实验系统开展了现场应用测试。

2 基本原理

2.1 问题描述与 DAS 系统时空二维数据模型

DAS 系统通过埋地传感光缆检测定位震源,如图 1(a)所示,按特定空间分辨率,将传感光缆的一段长度等效为一个传感单元,形成线性的多传感单元阵

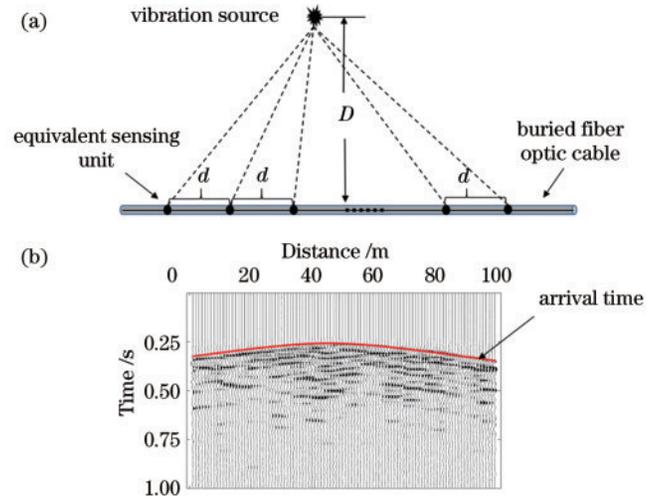


图 1 DAS 系统监测震源模型和震源信号示意波形图。(a)监测模型;(b)震源信号波形

Fig. 1 Schematic of the model of the DAS system monitoring the vibration source and signal waveform of the vibration source. (a) Monitoring model; (b) signal waveform of the vibration source

列^[16]。当震动事件发生时,例如液压挖掘机开始工作、爆炸等,震源会引发地震波,地震波将在地下介质中传播^[17],由于各传感节点所在空间位置不同,震源初至波即地震 P 波到达各传感节点的时间不同。DAS 系统监测到的震源信号示意波形如图 1(b)所示,其初至波到达时间理论上呈现双曲线的形式。

DAS 系统采集的震源时空二维数据可以组成矩阵^[18]。假设有 L 个等效传感节点,等效传感节点个数由 DAS 系统的空间分辨率和传感光缆长度决定,DAS 系统采集数据时间序列长度 $N = f_s \times t$,其中, t 为时间, f_s 为 DAS 系统采样率。由此可得 DAS 信号矩阵为

$$\mathbf{X}_{N \times L} = \begin{bmatrix} x(1,1) & x(1,2) & \cdots & x(1,L) \\ x(2,1) & x(2,2) & \cdots & x(2,L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N,1) & x(N,2) & \cdots & x(N,L) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $x(i,j)$ 为第 j 个等效传感节点处第 i 时刻信号的幅值。

将式(1)的矩阵数据中每道数据分别进行归一化处理,公式为

$$\mathbf{X}_1(N,j) = \left| \frac{\mathbf{X}(N,j)}{\max_{i=1}^N |\mathbf{X}(i,j)|} \right|, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(N,j)$ 为第 j 道原始数据; $\mathbf{X}_1(N,j)$ 为经过归一化后的第 j 道数据。

将 DAS 系统采集的震源信号归一化数据绘制成二维图,如图 2(a)所示,图 2(b)是不同信噪比的单道信号图。

震源初至波到达时间拾取的本质是要确定各数据

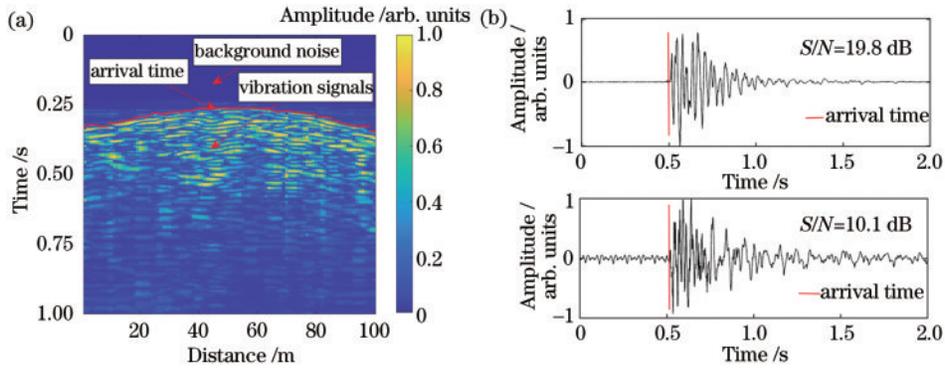


图 2 DAS 系统采集的震源信号图。(a) 振动信号二维图；(b) 不同信噪比单道信号图

Fig. 2 Signal of the vibration source acquired by the DAS system. (a) Two-dimensional diagram of the vibration signals; (b) single-channel signal diagram with different signal-to-noise ratios

道上纯背景噪声和震源产生的地震波信号之间的分界时刻。地震初至波到达时一般具有能量强、起跳明显的特点,表现出明显的边界特征,因此,可以先将 DAS 归一化数据转换成灰度图数据,然后,对信号灰度图像的边缘特征进行检测,确定震源初至波到达时间。

2.2 基于双边滤波的降噪方法

在 DAS 系统中,采集的信号包含系统噪声和环境干扰噪声,系统噪声主要由激光的相位噪声、部分干涉问题以及热噪声和散粒噪声等电噪声引起^[19]。这些噪声的存在严重影响了到达时间拾取的准确性。

传统的 Canny 边缘检测算法在滤波部分用高斯滤波来进行信号预处理,在清除噪声的过程中会过度清除掉图像的边缘信息,导致部分边缘信息丢失。针对这一问题,采用双边滤波代替高斯滤波进行信号预处理,不仅可以有效地去除噪声还可以保留更多有用的边缘信息,为下一步边缘检测拾取信号到达时间创造了有利条件。

基于双边滤波的降噪方法,用双边滤波器对信号灰度化数据进行滤波,双边滤波器为一个空间距离相关的高斯函数与一个灰度值距离相关的高斯函数相乘^[20],表示为

$$\omega(i, j, k, l) = \exp \left[-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|I(i, j) - I(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2} \right], \quad (3)$$

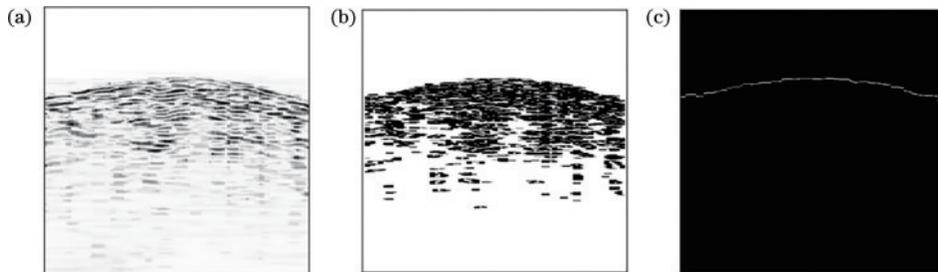


图 3 边缘检测提取到达时间过程示意图。(a) 双边滤波后灰度图；(b) 提取的边缘特征图；(c) 到达时间曲线二值图

Fig. 3 Schematic diagram of edge detection extraction of arrival time. (a) Grayscale map after bilateral filtering; (b) extracted edge features map; (c) arrival time curve binary map

式中: σ_d 为空域平滑系数; σ_r 为值域平滑系数; I 为灰度图像矩阵; i 和 j 是当前被卷积像素点 $I(i, j)$ 的坐标点; k 和 l 是邻域像素点的坐标点。将式(3)进行加权计算归一化,

$$I_D(i, j) = \frac{\sum_{k, l} I(k, l) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{k, l} \omega(i, j, k, l)}, \quad (4)$$

式中: $I_D(i, j)$ 是双边滤波降噪后信号 (i, j) 位置的幅值。最后得到双边滤波降噪后的灰度化数据,

$$I_{D_{N \times L}} = \begin{bmatrix} I_D(1, 1) & I_D(1, 2) & \cdots & I_D(1, L) \\ I_D(2, 1) & I_D(2, 2) & \cdots & I_D(2, L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_D(N, 1) & I_D(N, 2) & \cdots & I_D(N, L) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

双边滤波器受 3 个参数的控制:滤波器尺寸 R 、空域平滑系数 σ_d 、值域平滑系数 σ_r 。 R 越大,降噪作用越强,但计算时间越长。由高斯概率密度函数可知,有 95% 的高斯曲线分量都分布在 $[-\sigma_d/2, \sigma_d/2]$,所以 σ_d 取 $R/2$ 合适。当 σ_r 设置得较大时,灰度可以变化的范围也较大,灰度差异越大才能得到越高的权重值,增强降噪效果,但图像细小的边缘会受到影响。图 3(a)为双边滤波后的灰度图。

2.3 基于 Canny 算子的边缘检测拾取到达时间算法

对 DAS 信号进行降噪处理后,采用合适的初至波到达时间拾取算法确保拾取到达时间的准确性。基于 Canny 算子的边缘检测到达时间拾取算法的优势是利

用 DAS 系统多传感节点时空二维数据的时间和空间整体特征,提升低信噪比环境下的到达时间拾取精度。

所用边缘检测方法是使用 Canny 微分算子提取图像中像素灰度值突然发生变化的区域^[21]。Canny 算子是两个 3×3 的矩阵,分别为

$$\mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

前者用于计算图像横向像素梯度矩阵 \mathbf{G}_x ,后者用于计算图像竖向像素梯度矩阵 \mathbf{G}_y 。具体形式为

$$\mathbf{G}_x = \mathbf{S}_x * \mathbf{I}_D, \mathbf{G}_y = \mathbf{S}_y * \mathbf{I}_D, \quad (7)$$

式中: \mathbf{I}_D 为灰度图像矩阵; * 表示卷积运算。则由下式可计算得到梯度强度矩阵 \mathbf{G}_{xy} 。

$$g_{xy}(i, j) = \sqrt{g_x^2(i, j) + g_y^2(i, j)} \quad (8)$$

为了获得 DAS 系统中振动信号的准确到达时间,先对梯度图像进行非极大值抑制处理,剔除那些非边缘的像素点。运用 Ostu 法进行阈值分割,将低于高阈值的像素点赋以值“0”,其余赋以值“1”,以高阈值判定后形成的像素点为基础将那些像素点连接成边缘。由于监测的震源信号中具有多个波峰,则图像中提取的边缘特征包含多处,如图 3(b)所示。图像纵轴方向上每一列的第一个边缘所对应的时刻即为每一道数据的

初至波到达时间。于是,可以按列扫描像素值,记录每列像素值第一次从“0”跳变到“1”的位置,把这些位置所在时刻作为初至波到达时间。图 3(c)为绘制拾取的到达时间二值图,到达时间为

$$\mathbf{T} = [t_1, t_2, \dots, t_L], \quad (9)$$

式中: t_i 为震源信号到第 i 个传感节点的到达时间; L 为 DAS 系统传感光缆等效传感节点个数。

3 实验结果及分析

3.1 实验装置

通过现场实验验证所提方法在工程应用的可行性。图 4 为 DAS 系统设备的工作原理。使用窄线宽激光器(NLL)作为光源,激光由 10:90 光耦合器(OC1)分成两部分,10%的光被用作本地光以执行相干检测,90%的光被声光调制器(AOM)调制成光脉冲。经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,光脉冲被送入光环行器。然后,来自传感光缆的瑞利反向散射光在 50:50 光耦合器(OC2)处与本地光干涉,该干涉信号由平衡光电检测器(BPD)转换为电信号,经数据采集卡(DAQ)收集后由计算机处理。选用 Neubrex 公司的 DAS 系统(型号 NBX-S3000)开展实验和数据采集工作,设置采样率和空间分辨率分别为 20 kHz 和 1 m。

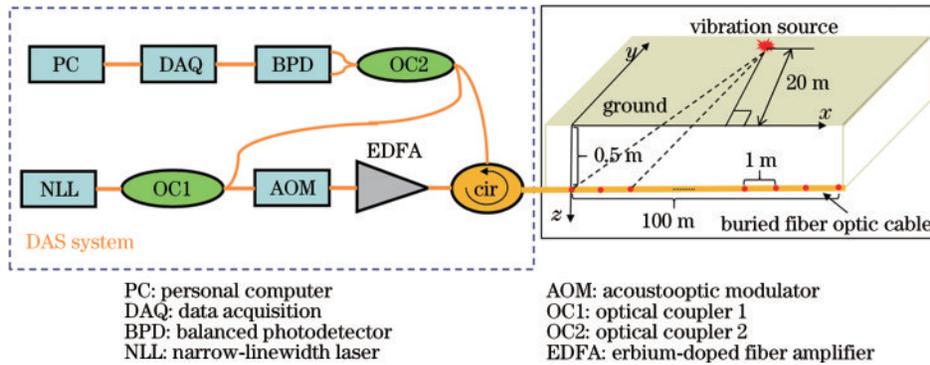


图 4 DAS 系统监测震源示意图

Fig. 4 Schematic diagram of DAS system monitoring source

图 5 是现场实验的场地布设示意图,将传感光缆埋于地下 0.5 m 处,形成线性光纤传感阵列。实验中传感光缆有效长度为 100 m、DAS 系统的空间分辨率为 1 m、等效传感节点共 100 个、数据采样时间为 1 s。因此,DAS 系统采集的二维时空数据是包含 100 个数据道、时长为 1 s 的振动信号。实验时,用 7.26 kg 的铅球落于地面作为激发地震波的震源,分别进行了高度为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 处落下的 5 组实验,每个高度进行 3 次实验,以此获得不同信噪比的实验数据。5 组实验数据计算得到的信噪比对应为 5.3 dB、10.1 dB、12.7 dB、16.1 dB、19.8 dB。同时,震源相对于埋地传感光缆的垂直偏移距离为 20 m。

3.2 实验结果分析与对比

为了验证所提算法的优越性,首先将现场实验数



图 5 现场实验的场地布设示意图

Fig. 5 Site layout diagram of field experiments

据归一化转成灰度图数据,进行双边滤波降噪,双边滤波器参数设置为 $R=10$ 、 $\sigma_d=5$ 、 $\sigma_r=30$ 时取得较好的降噪效果。第一组数据的滤波前后对比结果如图 6(a)、(b) 所示,双边滤波方法有效压制了噪声,加强了图像纹理细节的处理,较好地保留了边缘特征。为了更有效地说明问题,进行了单道数据降噪前后对比,这里选取第 30 道数据,如图 6(c) 所示。

然后,使用基于 Canny 算子的边缘检测方法计算震源初至波的到达时间,结果如图 7(a) 所示,图中标记了每个位置的估计到达时间。拾取到达时间呈现双曲线分布,与理论到达时间分布一致,如图 7(b) 所示。

以算法自动拾取到达时间与专家人工拾取到达时间的均方根误差(RMSE)作为评价指标,评价基于双边滤波的边缘检测提取到达时间特征方法的性能。RMSE 定义为

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (t_i - t_{ri})^2}, \quad (10)$$

式中: $L=100$; t_i 为算法自动拾取到达时间; t_{ri} 为人工拾取到达时间。

表 1 为铅球从不同高度落下,每个高度 3 次实验的震源初至波到达时间的 RMSE。图 8 显示了误差的变化趋势,可以看出,由高信噪比数据拾取的到达时间误

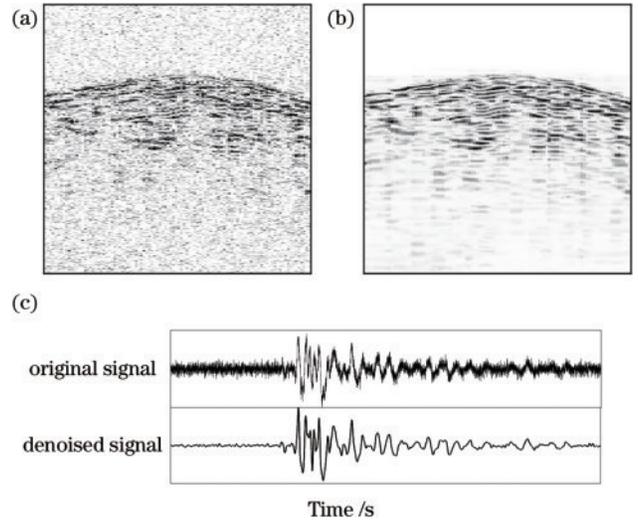


图 6 双边滤波降噪结果对比图。(a)原始数据灰度图;(b)双边滤波后灰度图;(c)第 30 道数据降噪对比图
Fig. 6 Comparison of bilateral filtering noise reduction results. (a) Grayscale map of raw data; (b) grayscale map after bilateral filtering; (c) comparison of the 30th channel data noise reduction

差相对更小,所有实验算法拾取与人工拾取的到达时间 RMSE 都不超过 3 ms。结果表明,所提出的到达时间拾取方法可在不同信噪比环境下,准确拾取到达时间。

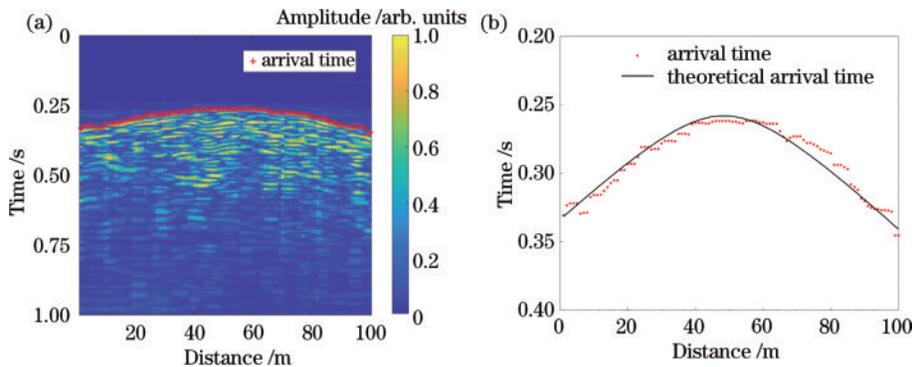


图 7 震源初至波到达时间拾取结果图。(a)到达时间拾取结果图;(b)到达时间细节图
Fig. 7 Arrival time pickup result of vibration source initial arrival wave. (a) Arrival time pickup results; (b) arrival time detail

表 1 到达时间的 RMSE
Table 1 RMSE of arrival time

Experiment	RMSE of arrival time /ms				
	$H=0.5$ m (5.3 dB)	$H=1.0$ m (10.1 dB)	$H=1.5$ m (12.7 dB)	$H=2.0$ m (16.1 dB)	$H=2.5$ m (19.8 dB)
Experiment 1	2.7	2.5	1.6	1.1	0.8
Experiment 2	2.2	2.0	1.7	0.9	0.7
Experiment 3	2.3	1.9	1.5	1.0	0.7

其次,针对铅球从不同高度落下获得的不同信噪比的实验数据,将所提方法与已有的三种方法,包括短时 STE、GCC、常规边缘检测法(TED)的拾取结果进行了比较。不同高度 3 次落铅球实验的平均 RMSE 比较结果如图 9 所示,在所有方法中,所提方法在不同信

噪比下都获得了最高拾取精度。与 STE、GCC 相比, TED 和所提方法的 RMSE 更小。而所提方法又优于 TED。尤其是在信噪比低于 10 dB 的信号中前两种方法到达时间拾取误差超过 5 ms,所提改进后的方法平均误差控制在 3 ms 以内。实验计算机使用的 CPU 为

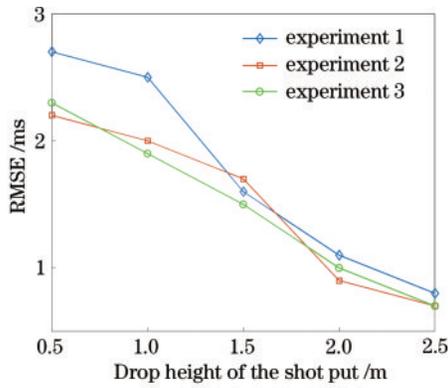


图 8 到达时间拾取结果 RMSE 图

Fig. 8 RMSE of arrival time pickup result

AMD Ryzen 5-5600H, 算法由 MATLAB R2020a 执行。当传感光缆长度为 100 m、采样时间为 1 s、DAS 系统采样率为 20 kHz 时,所提方法采集数据平均耗时仅需 0.1 s,时间短。不同到达时间拾取方法在多次运行测试的平均耗时结果如表 2 所示,所提方法低于 STE、GCC,与 TED 时间相近但拾取到达时间精度更高。

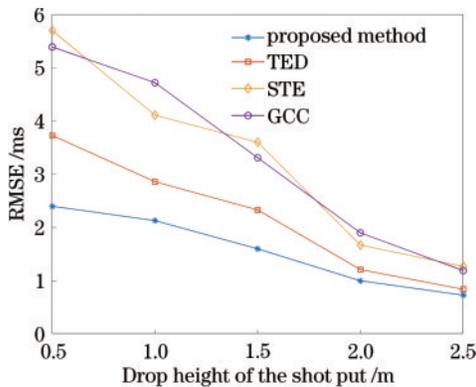


图 9 不同到达时间拾取方法效果对比图

Fig. 9 Comparison of the effects of different arrival time pickup methods

表 2 不同到达时间拾取方法平均耗时

Table 2 Average time consumption for different arrival time pickup methods

Parameter	Method			
	Proposed method	TED	STE	GCC
Average time consumption / s	0.10	0.09	1.63	5.26

总体而言,现场测试取得了良好的结果,证明了提出的基于双边滤波的边缘检测方法可以在干扰和噪声环境下,提高震源初至波到达时间拾取的精度,并且拾取时间短。

4 结 论

本文针对 DAS 系统采集的震源信号因存在系统噪声和外界干扰导致信号信噪比低的问题,提出了基

于双边滤波边缘检测的震源信号初至波到达时间拾取方法。该方法利用双边滤波可实现噪声抑制,以及有效利用时空二维数据的时间和空间整体特征,提高了低信噪比下震源信号初至波到达时间的拾取精度。现场实际测试表明,在强干扰和噪声环境下,到达时间拾取结果 RMSE 不超过 3 ms,拾取精度比传统方法高,算法平均耗时仅需 0.1 s,拾取时间短。

参 考 文 献

- [1] 刘宇琛. 基于 φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
Liu Y C. Research on distributed optical fiber vibration sensing system based on φ -OTDR[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [2] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.
- [3] 倪家升, 刘铁根, 尚盈, 等. 用于石油物探的分布式光纤声波地震检波器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0306006.
Ni J S, Liu T G, Shang Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic seismic geophone for petroleum geology exploration [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0306006.
- [4] 路豪. 基于集成学习模型的 DAS 振动源二维定位方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Lu H. Research on 2D localization method of DAS vibration sources based on an ensemble learning model [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [5] 梁生, 刘腾飞, 盛新志, 等. 基于空间域差分的 φ -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 the space-domain difference -based location method for φ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 0622005.
- [6] 李翔, 徐奴文. 微震震源定位研究现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 598-607.
Li X, Xu N W. Research developments and prospects on microseismic source location[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 598-607.
- [7] Akram J, Eaton D W. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data[J]. Geophysics, 2016, 81(2): KS71-KS91.
- [8] Liu Z C, Zhang L, Wei H M, et al. Underwater acoustic source localization based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 12880-12892.
- [9] Ding Z W, Zou N M, Zhang C, et al. Self-optimized vibration localization based on distributed acoustic sensing and existing underground optical cables[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 844-854.

- [10] 段建华. 基于 STA/LTA 和分形维算法的微震事件初至自动拾取方法[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(7): 73-77.
Duan J H. Automatic picking of microseismic event primary arrival based on STA/LTA and the fractal dimension algorithm[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(7): 73-77.
- [11] Zhu W Q, Beroza G C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method[J]. Geophysical Journal International, 2019, 216(1): 261-273.
- [12] Hu L L, Zheng X D, Duan Y T, et al. First-arrival picking with a U-net convolutional network[J]. Geophysics, 2019, 84(6): U45-U57.
- [13] Ma Y Y, Cao S Y, Rector J W, et al. Automated arrival-time picking using a pixel-level network[J]. Geophysics, 2020, 85(5): V415-V423.
- [14] 高新雨. 基于分布式光纤声学传感技术的地震信号观测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
Gao X Y. Research on seismic wave observation method based on distributed optical fiber acoustic sensing technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [15] Wu H J, Lu H, Yang S Q, et al. Vertical offset-distance estimation and threat level prediction of vibrations with DAS[J]. IEEE Access, 2020, 8: 177245-177254.
- [16] Deng Y P, Liu Q W, Li H, et al. Distributed vibration detection and location using phase-sensitive optical frequency domain reflectometry[C]//14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020), August 3-5, 2020, Sydney. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: C4D_2.
- [17] 杨俊峰. 浅层地下震源信号初至波方法的研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
Yang J F. Research of picking methods up the first arrival over shallow surface source signals[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [18] Jiang F, Li H L, Zhang Z H, et al. Localization and discrimination of the perturbation signals in fiber distributed acoustic sensing systems using spatial average kurtosis[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2839.
- [19] 李柯, 龚岩栋, 张卓. φ -OTDR 降噪处理的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2300002.
Li K, Gong Y D, Zhang Z. Research progress of φ -OTDR noise reduction processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 2300002.
- [20] 张娜娜, 张媛媛, 丁维奇. 经典图像去噪方法研究综述[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(5): 409-412, 423.
Zhang N N, Zhang Y Y, Ding W Q. Review of classical image denoising methods[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2021, 48(5): 409-412, 423.
- [21] 冯永亮. 基于 Canny 算子的图像边缘检测方法改进研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(8): 1567-1570.
Feng Y L. Improvement of image edge detection method based on Canny operator[J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(8): 1567-1570.