

DOI: 10.11779/CJGE201410023

矿震 P 波到时拾取优化与降低震源定位误差应用研究

胡静云¹, 李庶林^{2*}

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012; 2. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 多通道微震监测系统采用的定位算法一般是基于 P 波到时与等速度模型, P 波到时拾取的准确与否直接影响着定位精度的高低。然而由于地震波传播衰减与应用环境背景噪声的原因, 参与定位的一些通道信噪比偏低, P 波到时拾取的随意性较大, 导致震源定位结果与实际震源位置相差较大, 影响了在矿山的实际应用效果。简要介绍了震源定位方法并开发应用了基于小波理论的离散信号滤噪程序, 通过对原始信号进行小波分解、给定阈值与重构处理后, 提高了原始信号的信噪比, 显著地提高了 P 波到时拾取准确度。结合某矿山特大采空区采场冒顶实例, 应用基于小波理论的信号滤噪方法对信噪比偏低的通道进行了滤噪处理, 重新优化拾取了 P 波到时。所得到的定位结果, 与处理前相比, 定位误差从 47~94 m 减小到 14~23 m, 大大提高了微震监测在矿山的实际应用效果。

关键词: 矿震; 微震监测; P 波到时; 小波滤噪; 定位误差

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)10-1940-07

作者简介: 胡静云(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事岩石力学声发射与微震监测等方面的研究。E-mail: hujingyun007@163.com。

Optimization of picking mine microseismic P-wave arrival time and its application in reducing error of source locating

HU Jing-yun¹, LI Shu-lin²

(1. Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, China; 2. School of Architectural and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The locating algorithm of multi-channel microseismic monitoring system is generally based on the P-wave arrival time and equal velocity model. The P-wave arrival time directly influences the precision of positioning. However, due to the attenuation of earthquake wave propagation and background noise, some channels are involved in positioning with low SNR, and random picking of P-wave arrival time may lead to great positioning error and affect the actual application effect in mines. The source location method and application of the noise signal filtering procedure based on wavelet theory are introduced. According to the wavelet decomposition, given threshold and reconstruction of signal, the SNR of the original signals is enhanced, and the picking accuracy of the P-wave arrival time is significantly improved. Taking some roof collapse examples in a mine with outsize goaf, re-optimization of picking the P-wave arrivals time in low SNR channels improves the precision of positioning results from 47 ~ 94 m to 14 ~ 23 m, and the actual application effect in mines is greatly improved.

Key words: mine microseism; microseismic monitoring; P-wave arrival time; wavelet de-noising; locating error

0 引 言

全数字型多通道微震监测能实现对破裂源的实时监测与三维空间定位, 可以对岩体开挖过程中破裂源的集中区域与演化路径进行监测。经大量专家学者的积极推广应用, 特别是国内于 2003 年在凡口铅锌矿建立第一套多通道微震监测系统以来^[1], 微震监测技术在矿山领域获得了空前的发展, 目前成为矿山岩体工程稳定性监测领域的重要监测手段, 在水电、交通隧道等领域中的应用前景越来越大^[2]。震源定位精度对在上述各领域中的应用意义重大, 然而, 实际监测过

程中, 地震波传播衰减与各种噪音源干扰导致 P 波信号信噪比偏低, P 波到时拾取误差较大, 从而降低了震源定位精度, 影响了矿山实际应用效果。

对于高信噪比的地震信号, 人工拾取 P 波到时可以达到较高的准确度, 但由于人工拾取效率很低且依赖于处理人员的经验, 因此地震学上建立了实际应用

基金项目: 国家科技部科研院所技术开发研究专项资金项目 (2013EG215024); 国家科技支撑计划课题 (2013BAB02B06)

收稿日期: 2013-12-02

*通讯作者

效果较好的 P 波到时自动拾取算法^[3-5], 矿山微地震监测领域沿用了地震学的 P 波到时自动拾取算法。对于低信噪比的微弱地震信号, 采用人工或自动算法拾取的方法很难准确拾取 P 波到时, 如何滤除与抑制噪音、提高 P 波到时拾取准确度, 国内外学者在如下方面做了许多工作: Sleeman 等^[6]对 1109 个事件采用不同的带通滤波器使信号得到增强, 使 P 波到时正确拾取的事件数量达到 71%; Hafez 等^[7]建立了基于谱图与多分辨率 Haar 小波分析的两个无参数算法来处理地震信号与噪音; Hafez 等^[8]针对信噪比较低的地震信号创立了一种基于最大重叠离散小波滤波器的多分辨率分析的无参数算法, 该算法能提高人工拾取微弱地震信号 P 波到时准确度, 并对近震震级约为 1 且无法进行人工拾取 P 波到时的地震进行 P 波到时的自动拾取; 刘希强等^[9]提出了一种基于直达 P 波信号与背景噪声在能量、非高斯性、非线性和偏振特性的不同而进行区域地震事件到时拾取的新算法, 并改进了拾取 P 波到时的属于二阶统计量的 VAR-AIC 方法, 提出了用三阶统计量进行震相到时拾取的 TOC-AIC 方法, 当信噪比较低、震相初至比较模糊时, TOC-AIC 方法拾取的震相到时精度最高; 陈飞等^[10]利用多尺度小波分解对记录不清、信噪比小、震相无法辨识的地震信号进行了滤噪处理, 结果表明多尺度小波分解在弱震信号的震相到时识别上具有很好的效果; 徐宏斌等^[11]利用小波变换对大尺度岩体结构微震信号进行了去噪处理; 刘代志等^[12]针对 AR 模型到时检测方法对信噪比很低的地震波记录检测能力低下的缺点, 发展了基于小波包分解滤噪的 AR 模型到时检测方法; 吴招才等^[13]对现阶段地震数据去噪中的小波方法进行了总结, 提出应用小波变换来压制地震资料中的噪声的两个主要途径: 一是利用小波的分频特性去噪, 主要用来压制面波等规则干扰; 二是在小波域对小波系数进行非线性处理后重构去噪, 主要用于压制随机干扰。金解放等^[14]通过理论与试验得出 Daubechies 小波族中的 Db4 小波基是岩石声发射信号滤噪处理的合适小波基。

在已有的文献中, 通过优化 P 波到时拾取准确度降低矿山微地震定位误差的具体研究还比较少见。本文研究了如何利用小波变换理论对低信噪比的原始微地震信号进行滤噪, 压制噪音成分提高信噪比, 优化 P 波到时拾取准确度, 并应用于矿山复杂特大采空区冒顶实例, 显著降低了震源定位误差, 提高了微震监测在矿山领域的应用效果。

1 震源定位方法

矿山微震源空间定位方法假设介质为各向均匀同性的, 即等波速场模型^[15]。假设震源为点源, 其三维

空间坐标与发震时刻分别为 $h(x_0, y_0, z_0)^T$ 与 t , 为未知量。设 P 波传播速度为 v , 一组传感器的空间坐标为 $(x_i, y_i, z_i)(i=1, \dots, n)$, 均为已知量, 其中 n 为传感器数量, 假设地震波从震源传播到传感器的路径为两者之间的斜直线, 则地震走时 tt_i 用下式表达

$$tt_i = \frac{[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2]^{1/2}}{v} \quad (1)$$

每个传感器的理论计算 P 波到时 t_{ci} 由两部分组成: 发震时刻 t 和从震源到第 i 个传感器的走时 tt_i , 计算公式如下:

$$t_{ci} = tt_i + t \quad (2)$$

在第 i 个传感器, 实际确定的 P 波到时为 t_{oi} , 为已知量, 理论计算 P 波到时为 t_{ci} , 由于实际岩层的非均质性和 P 波到时拾取的误差, 对于每个传感器实际确定的 P 波到时与理论计算的 P 波到时存在差异, 定义第 i 个传感器的时间残值函数 γ_i 为

$$\gamma_i = t_{oi} - (tt_i + t) \quad (3)$$

根据最小二乘法原理, 总误差定义为 $\sum \gamma_i^2$ 。现在的目标是找到最优的震源坐标与发震时刻使得总误差 $\sum \gamma_i^2$ 达到全局最小值。

总误差函数有 4 个未知变量, 即震源空间位置与发震时刻, 要使总误差达到全局最小值, 有总误差对发震时刻的微分为

$$\frac{d(\sum \gamma_i^2)}{dt} = 0 \quad (4)$$

解上述方程, 得到发震时刻为

$$t = \frac{\sum t_{oi}}{n} - \frac{\sum tt_i}{n} \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (3), 得

$$\sum \gamma_i^2 = \sum \left[\left(t_{oi} - \frac{\sum t_{oi}}{n} \right) - \left(tt_i - \frac{\sum tt_i}{n} \right) \right]^2 \quad (6)$$

通过上述变换, 总误差函数只有 3 个未知变量, 即震源三维空间坐标。由式 (6) 可以看出, 实际确定的一组传感器的 P 波到时 t_{oi} 直接影响着总误差函数, 因此 t_{oi} 的拾取准确度直接影响着求解出的震源空间位置。

寻求最优定位结果即是寻找总误差的全局最小值, 根据寻找数学算法的不同目前主要有 Geiger 迭代法与单纯形迭代法, 本系统采用的是单纯形迭代算法。单纯形迭代算法在三维空间中的单纯形为四面体, 单纯形图形初始点一般选取在第一触发传感器位置上, 四面体的另外 3 个顶点的选择没有具体规定, 但单纯形图形大小一般为 1/3 到 1/2 监测区域范围。迭代算法遵循 4 种变形机制, 即映射、扩展、收缩与折中, 在此限于篇幅不详细介绍, 详细说明可见参考文献

[15]。迭代过程的每一步都会根据式(6)计算出单纯形图形四面体各个顶点的总误差值,然后根据变形机制进行单纯形图形的变形与移动,寻找总误差值不断收敛降低的区域,直到寻找到满足设定的停止迭代的总误差值条件的点,停止迭代的总误差值条件是人为规定的,一般设定在 0.05~0.005 之间,满足停止迭代的点即为理论上的震源空间位置,若迭代过程中总误差值是不断发散的,则无解。

2 基于小波理论的离散信号滤噪方法

2.1 小波变换原理

小波理论是目前信号处理中最先进的技术。对于具有 N 个采样点的离散原始波形信号 $x(k\Delta t)$, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$, Δt 为采样时间间隔,离散小波变换公式为^[7]

$$\langle x, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a_0|^m}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(k\Delta t) \overline{\psi(a_0^{-m}t - nb_0)} dt. \quad (7)$$

式中 $\psi(t)$ 为一个基小波函数; $a=a_0^m$, $b=nb_0a_0^m$, $m, n \in Z$, 且 $a \neq 0$ 。 a 称为伸缩因子, b 称为平移因子。

傅里叶变换只能对原始信号进行频率域上的分析,而对于原始信号频率随时间的变化过程则无能为力。在式(7)中小波变换通过平移因子 b 的变化,实现了对原始信号时间域上的分析;对于某一个确定的平移因子 b ,当原始信号在局部时间段上的频率成分复杂时,则伸缩因子 a 变小,使被分析的时间段窗口变窄,使得时间分辨率提高,而频率分辨率变得粗糙些,反之则相反。这些优点使得小波变换具有对原始信号进行时域与频域二维分析的功能,当原始信号中的噪音信号与有用信号在时域或频域中存在差别时,就能实现对噪音信号的提取、压制与消除。

2.2 离散信号的小波滤噪过程

矿山监测到的某次冒顶产生的原始微地震波信号如图1所示,可以看出噪音信号与有用信号在时间域与频域上均有较明显的差异,噪音信号在整个时间域上都存在且频率成分相对较低,而有用信号主要在 0.05~0.1 s 这 50 ms 的时间段内存在,且其频率成分相对较高。根据原始信号噪音与有用信号的频域与时域的差别,下面给出了基于小波理论的离散信号滤噪过程。

(1) 离散信号的小波分解

一维信号的离散小波分解的数学公式为^[16]

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_k cA_0(k) \phi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k cA_1(k) \phi_{j-1,k}(t) + \sum_k cD_1(k) \psi_{j-1,k}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $x(t)$ 为原始信号; $\psi(t)$ 为基小波函数; ϕ 为尺

度函数; cA_1 与 cD_1 分别为第一分解层次下的低频系数与高频系数。

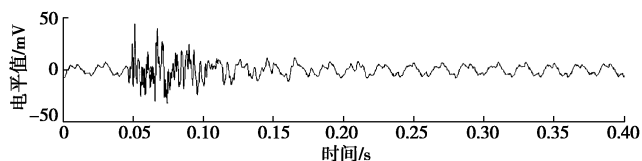


图1 原始微地震波信号

Fig. 1 Original microseismic signal

在每一个分解层次下,继续对低频系数 cA 部分进行进一步的分解,得到更深一层低频系数 cA 与高频系数 cD ,对高频系数不再进行进一步的分解。对于一维信号来说,分解层次一般为3层。图2为图1所示原始信号的第三分解层次的高频系数与低频系数,小波分解采用的是小波基函数 sym8,由图2可以看出,原始信号中的低频部分在第三分解层次的低频系数中得到体现,且其系数值基本位于区间 $[-25, 25]$ 中。

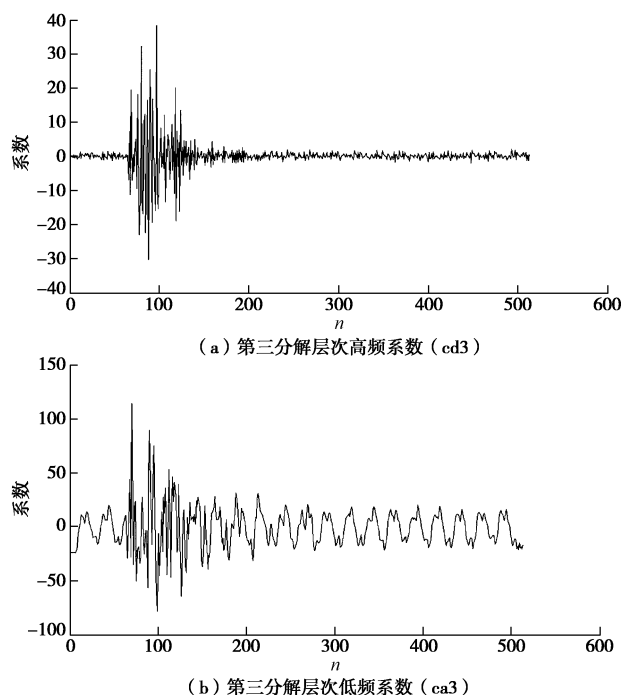


图2 各分解层次下的低频与高频系数

Fig. 2 Each decomposition level under low frequency and high frequency coefficients

(2) 各分解层次下系数的阈值量化

各分解层次下系数的阈值量化是指对反映了原始信号中的噪音成分的系数进行处理,这种处理方式采用阈值函数进行。阈值函数主要有以下3种:一为硬阈值函数;二为软阈值函数;三为半软阈值函数。由于硬阈值方法可以很好地保留信号边缘等局部特征,因此本文采用硬阈值函数,其表达式为

$$T_h(x, t) = \begin{cases} x & (|x| \geq t) \\ 0 & (|x| < t) \end{cases}, \quad (9)$$

式中, x 为各分解层次的系数, t 为阈值。

硬阈值函数的处理原则是对绝对值大于阈值 t 的系数取原值, 对绝对值小于阈值 t 的小波系数取 0。

确定恰当合理的阈值决定着滤噪效果, 目前还没有比较好的通用的方法, 用的较多的有 DJ 阈值、基于零均值正态分布的置信区间阈值、最小最大化阈值、理想阈值与人为给定阈值等。由于人为给定阈值方法是根据不同层次的小波系数的分布特征人为地确定阈值, 能很好地适应不同层次内的小波系数, 因此本文采用给定阈值方法。针对图 2 第三分解层次中的低频系数, 为了消除原始信号中的噪音信号, 对低频系数绝对值小于 25 的系数都重置为 0, 其他系数不变, 因此人为给定阈值为 25。

(3) 离散信号的小波重构

一维信号的离散小波重构公式是式(8)的逆过程, 各分解尺度下的低频系数利用阈值量化后得到的新的系数带入式(8), 即可得到对原始信号进行滤噪后的信号。

2.3 离散信号小波滤噪程序开发

借助 Matlab 软件中的小波分析工具包, 遵循小波滤噪方法中的信号分解、系数阈值量化与信号重构三步骤, 开发了针对一维离散信号的小波滤噪程序^[17], 如下所示。图 1 中的原始信号经该程序处理后得到的信号波形见图 5(a) 所示, 可以看出原始信号中的背景噪声得到了较好的抑制, 信号滤噪效果明显。

一维离散信号小波滤噪程序

$x1=m((N*47+1):N*48,4)*1000$; *给一维离散信号赋值, 信号采样率为 10kHz*

$[c,l]=wavedec(x1,3,'sym8')$; *采用 sym8 小波基函数进行信号分解*

$ca3=appcoef(c,l,'sym8',3);[cd1,cd2,cd3]=detcoef(c,l,[1\ 2\ 3]);cd1soft=wthresh(cd1,'h',0.8)$; *分解系数阈值量化*

$cd2soft=wthresh(cd2,'h',1.5);cd3soft=wthresh(cd3,'h',1.5);ca3soft=wthresh(ca3,'h',25);c2=[ca3\ soft'$

$cd3soft'$ $cd2\ soft'$

$cd1soft']$; $s3=waverec(c2,l,'sym8')$; *信号重构*

3 应用实例

针对江西省修水县香炉山钨矿面临的特大复杂采空区严峻的地压问题, 本课题组于 2010 年在该矿山建立了当时国内通道数最多的 48 通道微震监测系统^[18-19] (后于 2013 年扩展到 84 通道), 该微震监测系统携带

单轴加速度传感器, 传感器响应频率为 50~5000 Hz, 系统采样频率设置为 10 kHz。由于矿山采场冒顶产生的微震信号中一些低信噪比的通道拾取 P 波到时准确度低, 使得定位结果与现场实际位置相差较远。现以 2012 年 12 月 28 日 22 时井下采场监测到的一个微震定位事件为例来说明如何通过小波滤噪提高原始信号的信噪比与人工拾取 P 波到时的准确度。该事件被 14 个传感器监测触发, 各传感器监测到的波形见图 3 所示。由图 3 可以看出, 大部分传感器记录的信号具有高信噪比, 可以较准确地拾取 P 波到时, 但部分传感器记录信号信噪比偏低, 比如 #48、#35、#30、#34 与 #32 传感器。根据未进行小波滤波处理得到的 P 波到时进行震源定位的结果见图 4 所示, 定位结果在平面位置与高程上均与实际勘查确定的冒顶位置有较大误差, 各方向误差与总误差见表 2 的编号 1 事件的数据。

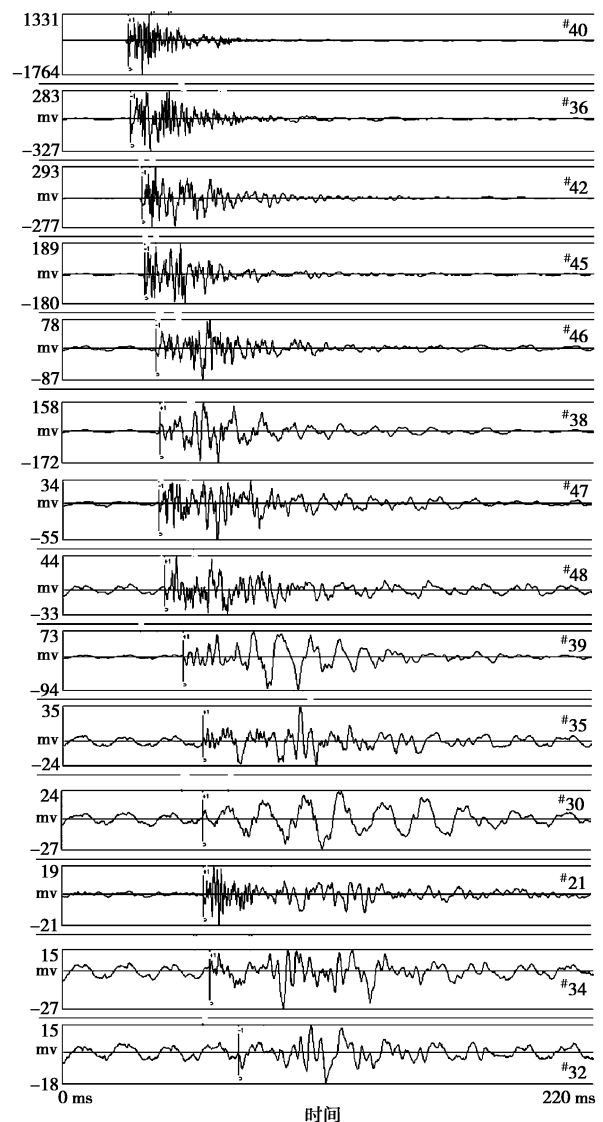


图 3 冒顶信号波形及人工拾取 P 波到时结果

Fig. 3 Roof collapse signal waveforms and artificially picked P-wave arrival time

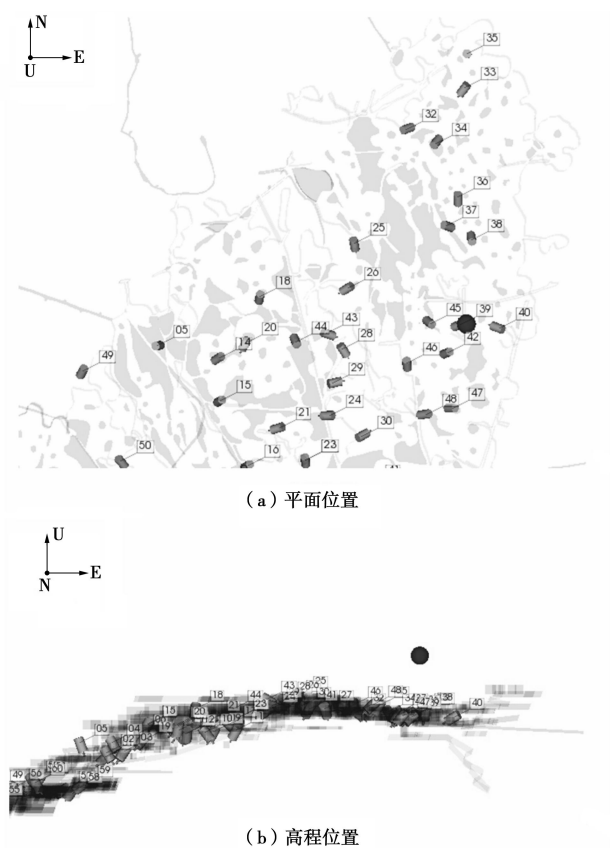


图 4 滤噪前人工拾取 P 波到时定位结果图

Fig. 4 Locating results before filtering with artificially picked P-wave arrival time

对低信噪比的#48、#35 传感器的信号波形按上述小波滤噪方法进行处理的结果见图 5 所示,原始信号经过小波滤噪后能较清晰地人工确定 P 波到时,各信噪比偏低的通道小波滤噪前人工拾取 P 波到时(方法 1)与滤噪后人工拾取 P 波到时(方法 2)对比见表 1 所示,各信噪比偏低的通道经方法 2 处理后得到的 P 波到时拾取结果在原始信号波形上的显示见图 6 所示。

表 1 P 波到时拾取对比表

Table 1 Comparison of picking P-wave arrival time

| 通道 编号 | 方法 1 的 P 波到 时/ms | 方法 2 的 P 波到时 /ms |
|----------|---------------------|---------------------|
| #48 | 44.7 | 43.0 |
| #35 | 63.1 | 60.5 |
| #30 | 63.4 | 58.8 |
| #34 | 66.1 | 65.2 |
| #32 | 79.1 | 69.1 |

对低信噪比的#48、#35、#30、#34 与#32 传感器的信号采用小波滤噪后人工拾取的 P 波到时参与定位计算后得到的定位结果见图 7 所示,由图可以明显看出定位事件在高程方向的定位误差显著降低,各方向误差与总误差见表 2 的编号 1 事件的数据,总误差由 86

m 降低到 22 m。表 2 为对 5 个微震事件采用方法 1 与方法 2 处理得到的定位结果,定位误差由方法 1 的 47~94 m 降低到方法 2 的 14~23 m,表明小波滤噪方法提高了微震信号的信噪比,提高了 P 波到时拾取准确度,使得矿山微震事件的定位误差显著降低,较好地提高了多通道微震监测技术在矿山的实际应用效果。

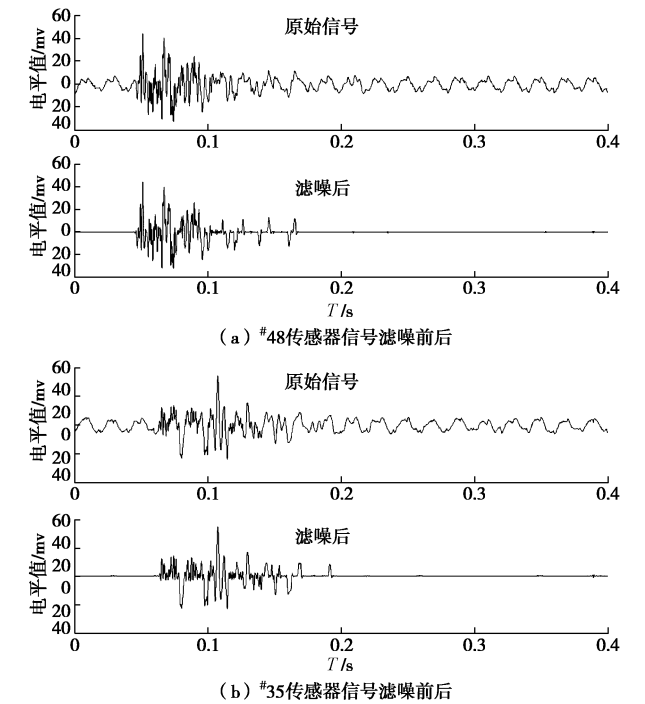


图 5 信噪比较低传感器信号小波滤噪结果

Fig. 5 Wavelet de-noising results of low SNR signal

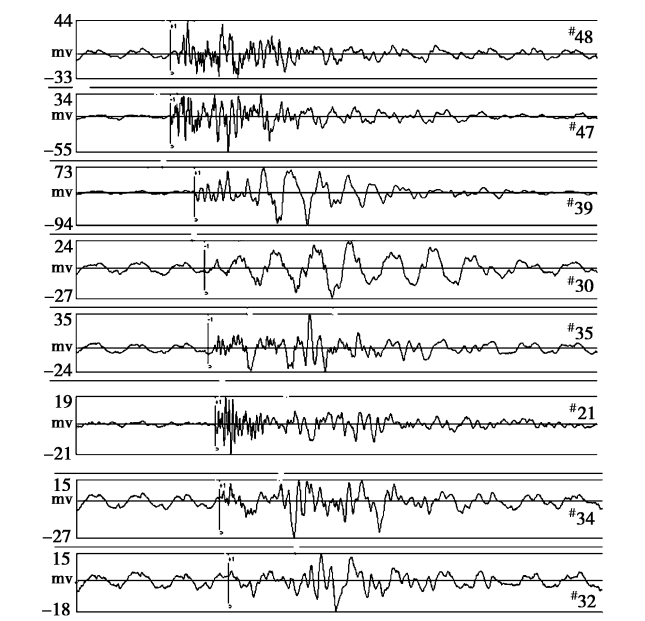


图 6 小波滤噪后人工拾取的 P 波到时

Fig. 6 Artificially picked P-wave arrival time after wavelet filtered

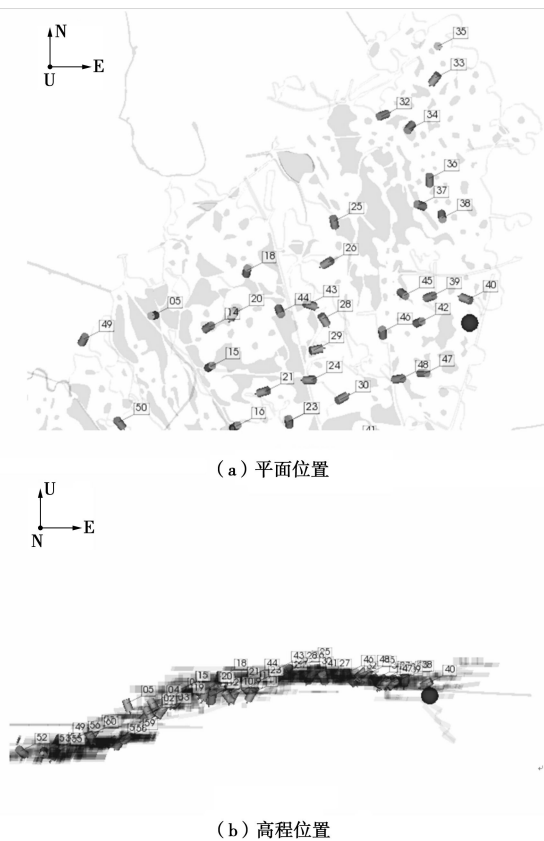


图 7 小波滤噪后人工拾取 P 波到时定位结果图

Fig. 7 Locating results after filtering with artificially picked P-wave arrival time

表 2 定位误差对比表

Table 2 Comparison of positioning errors (m)

| 编 号 | 项 目 | 实际位置 | 方法 1 | | | 方法 2 | | |
|-----|------|-------|-------|--------|------|-------|--------|------|
| | | | 定位结 果 | 各分量 误差 | 总误 差 | 定位结 果 | 各分量 误差 | 总误 差 |
| 1 | N | 41619 | 41667 | 48 | | 41636 | 17 | |
| | E | 35967 | 35931 | 36 | 86 | 35971 | 4 | 22 |
| | Elev | 615 | 676 | 61 | | 601 | 14 | |
| 2 | N | 41356 | 41303 | 53 | | 41337 | 19 | |
| | E | 35834 | 35904 | 70 | 94 | 35846 | 12 | 23 |
| | Elev | 589 | 623 | 34 | | 594 | 5 | |
| 3 | N | 41786 | 41722 | 64 | | 41775 | 11 | |
| | E | 36206 | 36187 | 19 | 73 | 36213 | 7 | 15 |
| | Elev | 608 | 579 | 29 | | 616 | 8 | |
| 4 | N | 41435 | 41472 | 37 | | 41442 | 7 | |
| | E | 36123 | 36102 | 21 | 47 | 36119 | 4 | 14 |
| | Elev | 576 | 597 | 21 | | 588 | 12 | |
| 5 | N | 41967 | 41925 | 42 | | 41974 | 7 | |
| | E | 35843 | 35803 | 40 | 60 | 35854 | 11 | 17 |
| | Elev | 602 | 587 | 15 | | 613 | 11 | |

4 结 论

震源定位误差是微震监测技术实际应用效果的一个很重要的指标, P 波到时拾取准确度是影响震源定位误差的主要因素, 也是目前降低震源定位误差较为可行的途径。本文通过对低信噪比的矿震信号进行基于小波变换的滤噪处理, 对噪声信号能进行很好的压制, 得到的主要结论如下:

- (1) 运用 sym8 小波基函数进行小波分解、采用人为确定阈值的硬阈值函数对小波系数进行阈值量化的方法对矿震信号进行滤噪处理是可行的。
- (2) 小波滤噪后显著地提高了原始信号的信噪比, 优化了 P 波到时拾取的准确度。
- (3) 多次矿山微震事件定位实例证明, 对低信噪比矿震信号进行小波滤噪、重新人工拾取 P 波到时后, 震源定位误差由 47~94 m 降低到 14~23 m, 提高了微震监测在矿山的实际应用效果。

参考文献:

[1] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2048 - 2053. (LI Shu-lin, YIN Xian-gang, ZHENG Wen-da, et al. Research of multi-channel microseismic monitoring system and its application to fankou lead-zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2048 - 2053. (in Chinese))

[2] 姜福兴, XUN Luo. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147 - 149. (JIANG Fu-xing, XUN Luo. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 147 - 149. (in Chinese))

[3] EARLE P, SHEARER P M. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(2): 366 - 376.

[4] AKI H, HIROAKI Y. Automatic picking of seismic arrivals in strong motion data using an artificial neural network[J]. Environmental Science and Technology, 2003, 17(5): 201 - 213.

[5] COLAK O H, DESTICI T C, OZEN S, CEREZCI O, ARY N. P phase and s phase detection using the daubechies wavelet transform(dwt) to minimize the noise at three component seismograms displacement records[C]// 13th European Signal Processing Conference. Paris, 2005.

[6] SLEEMAN R, VANECK T. Robust automatic p-phase picking: an online implementation in the analysis of broadband seismogram recording[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1999, 113(1/2/3/4): 265 - 275.

[7] HAFEZ G, KHAN A, KOHDA T. Clear p-wave arrival of weak events and automatic onset determination using wavelet filter banks[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(3): 715 - 723.

[8] HAFEZ ALI G, MOSTAFA RABIE, KOHDA T. Seismic noise

- study for accurate P-wave arrival detection via MODWT[J]. Computers & Geosciences, 2013, **54**(2): 148 - 159.
- [9] 刘希强, 周彦文, 曲均浩, 等. 应用单台垂向记录进行区域地震事件实时检测和直达P波初动自动识别[J]. 地震学报, 2009, **31**(3): 260 - 271. (LIU Xi-qiang, ZHOU Yan-wen, QU Jun-hao, et al. Real-time detection of regional events and automatic P-phase identification from the vertical component of a single station record[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, **31**(3): 260 - 271. (in Chinese))
- [10] 陈飞, 赵永, 刘阳, 等. 多尺度分析在地震信号处理中的应用[J]. 中国地震, 2004, **20**(4): 405 - 409. (CHEN Fei, ZHAO Yong, LIU Yang, et al. Application of wavelet on seismic signal processing[J]. Earthquake Research in China, 2004, **20**(4): 405 - 409. (in Chinese))
- [11] 徐宏斌, 李庶林, 陈际经. 基于小波变换的大尺度岩体结构微震监测信号去噪方法研究[J]. 地震学报, 2012, **34**(1): 85 - 96. (XU Hong-bin, LI Shu-lin, CHEN Ji-jing. A study on method of signal denoising based on wavelet transform for micro-seismicity monitoring in large-scale rockmass structures[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, **34**(1): 85 - 96. (in Chinese))
- [12] 刘代志, 王仁明, 李夕海, 等. 基于小波包分解及AR模型的单通道地震波信号初至点检测[J]. 地球物理学报, 2005, **48**(5): 1098 - 1102. (LIU Dai-zhi, WANG Ren-ming, LI Xi-hai, et al. Onset point identification of single-channel seismic signal based on wavelet packet and the AR model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, **48**(5): 1098 - 1102. (in Chinese))
- [13] 吴招才, 刘天佑. 地震数据去噪中的小波方法[J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(2): 493 - 499. (WU Zhao-cai, LIU Tian-you. Wavelet transform methods in seismic data noise attenuation[J]. Progress in Geophysics, 2008, **23**(2): 493 - 499. (in Chinese))
- [14] 金解放, 赵奎, 王晓军, 等. 岩石声发射信号处理小波基选择的研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, **27**(2): 12 - 15. (JIN Jie-fang, ZHAO Kui, WANG Xiao-jun, et al. Study on selection of wavelet basis for processing of rock acoustic emission signal[J]. Mining R & D, 2007, **27**(2): 12 - 15. (in Chinese))
- [15] 林峰, 李庶林, 薛云亮, 等. 基于不同初值的微震源定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 996 - 1002. (LIN Feng, LI Shu-lin, XUE Yun-lian, et al. Microseismic sources location methods based on different initial values[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 996 - 1002. (in Chinese))
- [16] 中国生, 徐国元, 赵建平. 基于小波变换的爆破地震信号阈值去噪的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(9): 1055 - 1059. (ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, ZHAO Jian-ping. Study and application of threshold de-noising in seismic signals of blasting based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1055 - 1059. (in Chinese))
- [17] 金鑫, 沈珠江, 刘崇茹. MATLAB在土工试验数据处理中的应用[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 272 - 275. (JIN Xin, SHEN Zhu-jiang, LIU Chong-ru. Data processing of geotechnical experiment using MATLAB[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 272 - 275. (in Chinese))
- [18] 胡静云, 林峰, 彭府华, 等. 香炉山钨矿残采区地压灾害微震监测技术应用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21**(4): 109 - 115. (HU Jing-yun, LIN Feng, PENG Fu-hua, et al. Research on application of microseismic monitoring technology on ground pressure hazard of residual are in xianglushan tungsten mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, **21**(4): 109 - 115. (in Chinese))
- [19] 程超, 兰晓平, 吴水生, 等. 香炉山钨矿特大采空区地压微震监测技术应用研究[J]. 中国钨业, 2011, **26**(5): 10 - 13. (CHENG Chao, LAN Xiao-ping, WU Shui-sheng, et al. On the microseismic monitoring technology on the ground pressure in the large gob[J]. China Tungsten Industry, 2011, **26**(5): 10 - 13. (in Chinese))