

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.012

基于相位差时延估计法的岩石声发射源定位研究

黄晓红¹, 张艳博², 田宝柱², 刘祥鑫²

(1.河北联合大学 信息工程学院, 河北 唐山 063009; 2.河北联合大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009)

摘 要: 针对岩石力学试验声发射时差定位算法中时延估计精度受诸多不确定因素的影响问题, 提出全相位相位差法时延估计, 通过小波分解与全相位频谱分析相结合求解相位差得到声发射信号的时延估计。利用小波分解找到不同传感器接收到的声发射信号中的同一主频的子带信号; 对这些同一主频的子带信号分别做全相位频谱分析, 得到每个子带信号中间样点的相位, 再根据相位差与时间差的关系求出声发射信号到达不同传感器之间的时间差; 进而利用时差定位法反演声发射源, 实现了声发射源更精确的定位。在花岗岩 (50 mm×100 mm×50 mm) 上进行断铅试验, 选取 10 个测点, 经声发射监测验证结果表明, 该时延估计方法能有效地减小声发射源定位的误差, 提高声发射源的定位精度, 平均绝对误差比美国 PCI-2 型声发射仪器定位结果提高约 3 mm, 该方法为反演声发射源提供了一种有效途径。

关 键 词: 声发射; 小波分解; 全相位频谱分析; 相位差; 源定位

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 02-0381-07

Time delay estimation and acoustic emission source location of rock based on phase difference

HUANG Xiao-hong¹, ZHANG Yan-bo², TIAN Bao-zhu², LIU Xiang-xin²

(1. College of Information Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China;

2. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China)

Abstract: Lots of uncertain factors affect the time delay estimation precision of time-difference location method in rock acoustic emission(AE) experiments. Aiming at this problem, the all phase phase-difference time delay estimation method is proposed. Time delay of AE signal is deduced through the phase-difference obtained by combining wavelet decomposition and all phase frequency analysis. AE sub-band signals with the same dominant frequency from different sensors are found with wavelet decomposition. Then the phases of middle sample of every sub-band signal are obtained with all phase frequency analysis method for those chosen sub-band signals, and the time-differences of AE signals' reaching different sensors are computed according to the relationship between phase-difference and time-difference. Finally, the AE source is located by the method of time-difference location. Experiments are conducted on a 50 mm×100 mm×50 mm granite stone, and AE source is generated by broken lead at ten different points. Under the lab environment, the results from the proposed AE location method indicate that using phase-difference based on wavelet transform and all phase frequency analysis can effectively improve the accuracy of location of AE source. Compared to the results obtained by the PCI-2 acoustic emission instrument, the absolute error reduces by about 3 mm, so as to provide an effective way for AE source inversion.

Key words: acoustic emission (AE); wavelet transform; all phase spectrum analysis; phase difference; source location

1 引 言

声发射空间定位的研究始于 20 世纪 60 年代晚期, Mogi^[1]最早对花岗岩板在弯曲变形条件进行声发射的二维定位; Scholz^[2]在 1968 年用一组声发射探头组成探头阵, 确定每个声发射事件的三维空间

位置; Xu 等^[3]研究了在真三轴压缩条件下几种岩样的微裂纹初步定位, 通过定位能够勾划出岩石损伤区域; Jansen 等^[4]应用声发射技术研究了岩石破裂过程随时间变化的三维微裂纹分布, 描述了岩石损伤累积、裂纹成核以及宏观裂纹扩展规律; 赵兴东等^[5,16,17]应用 AE 及其定位技术, 对不同岩样破裂过

收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.51174071, No.51374088)。

第一作者简介: 黄晓红, 女, 1973 年生, 教授, 硕士生导师, 主要从事信号与信息处理方面的教学和研究工作。E-mail:tshxh@163.com

程中的声发射活动规律进行了试验研究,揭示不同岩样的破裂失稳机制;裴建良等^[8]基于柱覆盖分形模型,研究了单轴压缩条件下花岗岩 AE 事件空间分布的分形维数变化规律。目前,定位方法按声发射定位原理分:区域定位法和时差定位法。常用的几种定位方法主要有:最小二乘法、Bayesian 定位方法、慢度离差法、相对定位法、Geiger 定位方法和单纯形定位方法。区域定位法根据声发射信号的传感器个数和相对时差时序来判定声发射源所处的区域,是一种快速简便而粗略的方法,具有一定的不确定性。为了得到惟一的定位点,目前声发射源的定位技术大都采用时差定位。时差定位方法中的时延判定方法通常有 4 种:阈值法、最大能量法、互相关函数法和基于模态分析和小波变换的时延方法。其中阈值法是最直观简单的时延估计方法,但若信噪比低,估计精度不能保证,而且其结果和设置门限值直接相关,门限值设置稍有偏差,就会造成很大的误差,所以其不适用于大范围的监测;最大能量法窗口宽度的大小适度是很关键的问题,需根据具体信号进行分析获取;互相关法具有较强的抑制噪声的能力,能对有噪声的信号进行时延估计而得到较好的结果,但在实际操作中,由于噪声影响以及声发射信号波形在传播过程中的反射、折射等原因的影响,相关函数的最大峰会被弱化,有时还会出现多个峰值,这些为确定时差带来了困难;基于模态分析与小波变换的时延方法为准确反演声发射源提供了新的研究思路和方法,最终也是通过设定相对于峰值的阈值和互相关方法计算时差。

对于岩石类材料的声发射监测,由于声发射信号传播速度较快,要求采用精确的时延判定方法,否则会造成较大的误差。误差的大小直接影响着定位精度,所以研究声发射波的到达时间或各传感器接收到的声发射信号的时差问题显得十分重要。

全相位 FFT 频谱分析可测任意含有一个或多个频率的正弦波信号的取样点的相位,较传统的 FFT 谱分析具有优势。全相位数字信号处理技术已经应用在煤矿电网电能质量分析^[9]、无线通信信号相位和振幅的判决^[10]、机械故障信号检测^[11]、超声波传输时间高精度测量^[12]、相位式激光测距^[13]、铁道信号频率检测^[14]等领域,但在声发射信号源定位分析的研究刚刚起步。本课题通过小波分解与全相位频谱分析结合求解相位差得到岩石声发射信号的时延估计新算法,提高声发射源定位精度,以期能够对声发射源进行精度较高的空间预测。

2 基于小波分解和全相位频谱分析的相位差时延估计

时延估计是声源定位领域内的一项关键技术,通过处理 3 个或更多传感器接收的声发射信号到达时间差实现目标定位。本文提出一种新的时延估计算法,利用小波分解和全相位频谱分析相结合进行相位差估计,进而得到时间差估计来进行声发射源定位。

2.1 小波分解

小波分解通过伸缩和平移对信号进行分析,从而可以实现多分辨率分析,关于小波变换的文献很多这里不再赘述。本文利用小波分析的方法提取不同损伤声发射波相应的单一频率或某一很窄的频段内的波形。因为在实际的检测当中,接收到的声发射波形一般是由很多模式组成的,还夹有大量的噪声信号,这样,直接拿任意两个通道的声发射波形作时延估计,定位结果一般来讲是不能满足工程需要的。因此,在时延估计之前,应对检测到的波形作小波分解的预处理。

2.2 全相位 FFT 频谱分析

用长为 $2N-1$ 的卷积窗 w 对中心样点 $x(0)$ 前后 $2N-1$ 个数据进行加权,然后将间隔为 N 的两个数据进行叠加,再对叠加后的数据进 FFT 变换即得全相位谱分析结果^[15-16],图 1 为全相位频谱分析框图(以 $N=4$ 为例, N 为离散傅里叶变换点数)。

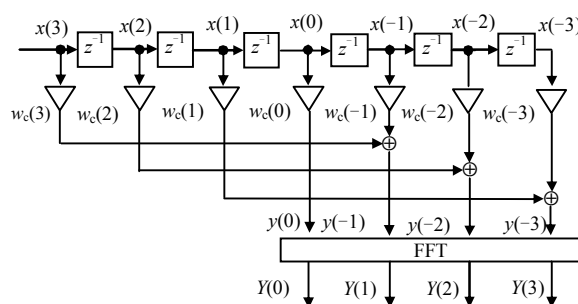


图 1 全相位频谱分析图

Fig.1 Diagram of all phase frequency analysis

下面理论推导单频复指数信号 $x(n) = e^{j\frac{2\pi mn}{N} + \theta_0}$ 。

全相位 FFT 频谱 (θ_0 为离散信号的初始相位, $x(n)$ 为离散时间信号序列)。全相位数据的来源,可以认为,对于时间序列中的一点 $x(0)$, 只存在 N 个包含该点的 N 维向量:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= [x(0) \ x(1) \ \cdots \ x(N-1)]^T \\ x_1 &= [x(-1) \ x(0) \ \cdots \ x(N-2)]^T \\ &\quad \cdots \cdots \cdots \\ x_{N-1} &= [x(-N+1) \ x(-N+2) \ \cdots \ x(0)]^T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

将每个向量进行循环移位, 把样本点 $x(0)$ 移到首位, 则得到另外的 N 个 N 维向量:

$$\left. \begin{aligned} x'_0 &= [x(0) x(1) \cdots x(N-1)]^T \\ x'_1 &= [x(0) x(1) \cdots x(-1)]^T \\ &\dots\dots\dots \\ x'_{N-1} &= [x(0) \cdots x(-N+1) x(-1)]^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据离散傅立叶变换的移位性质, 式 (1) 的离散傅立叶变换 $X'_i(k)$ 和式 (2) 的离散傅立叶变换 $X_i(k)$ 之间有很明确的关系:

$$X'_i(k) = X_i(k) e^{j \frac{2\pi k i}{N}} \quad (3)$$

全相位频谱是由 $X'_i(k)$ 之和组成, 所以全相位频谱 $X_{AP}^{(k)}$ 分析结果为

$$\left. \begin{aligned} X_{AP}^{(k)} &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X'_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i(k) e^{j \frac{2\pi k i}{N}} = \\ &\frac{1}{N^2} e^{j\theta_0} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(n-i) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} e^{j \frac{2\pi k i}{N}} = \\ &\frac{1}{N^2} e^{j\theta_0} \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j \frac{2\pi(m-k)i}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi(m-k)n}{N}} = \\ &\frac{1}{N^2} e^{j\theta_0} \frac{e^{j\pi(m-k)} - e^{-j\pi(m-k)}}{e^{j\pi(m-k)/N} - e^{-j\pi(m-k)/N}} \cdot \\ &\frac{e^{-j\pi(m-k)} - e^{j\pi(m-k)}}{e^{-j\pi(m-k)/N} - e^{j\pi(m-k)/N}} = \\ &\frac{1}{N^2} e^{j\theta_0} \frac{\sin^2[\pi(m-k)]}{\sin^2[\pi(m-k)/N]} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

而全相位 FFT 谱的相位值为 θ_0 , 即为中心样点 $x(0)$ 的理论相位值, 该值与频率偏离值 $m-k$ 无关 (m, k 为谱线的序号), 也就是说全相位 FFT 具有相位不变性。对输入的 $2N-1$ 个数据进行全相位频谱分析后, 从谱分析结果找出峰值谱线, 再测出此峰值谱线的相位值, 此测量值即是输入序列的中心样点的理论相位值, 而且真实的频率值不管偏离峰值多少, 在峰值谱线处所测的相位始终正确。

在全相位 FFT 分析之前, 对检测到的波形作一些预处理。利用小波分析的方法提取不同损伤声发射波相应的单一频率或某一很窄的频段内的波形, 然后作全相位 FFT 分析, 利用相位差技术确定传感器接收信号的时差, 然后进行声发射源的定位, 能够提高定位精度。

2.3 相位差法

因为全相位频谱分析时主谱线处的相位对应的是接收信号中间样点的相位, 故可以求两路传感器接收信号中间样点到达的时间差来进行定位。设

第 i 个传感器在时刻 t_i 接收到信号中间样点, 其对应的相位 φ_i 为:

$$\varphi_i = \varphi_0 + \Omega t_i = \varphi_0 + 2\pi f_c t_i \quad (5)$$

式中: φ_0 为初始相位; f_c 为主谱线频率, 即峰值点对应的频率。

同理, 设第 j 个传感器在时刻 t_j 接收到信号中间样点, 其对应的相位 φ_j 为

$$\varphi_j = \varphi_0 + \Omega t_j = \varphi_0 + 2\pi f_c t_j \quad (6)$$

φ_i 和 φ_j 可以通过对两路传感器接收信号进行全相位频谱分析求出主谱线的相位得到。将式 (5) 和 (6) 联立, 得

$$\varphi_j - \varphi_i = 2\pi f_c (t_j - t_i) \quad (7)$$

可求得时间延迟 Δ_{ji} :

$$\Delta_{ji} = t_j - t_i = \frac{\varphi_j - \varphi_i}{2\pi f_c} \quad (8)$$

通过式 (8) 相位差法得到时间延迟, 下面需要用时延估计定位法进行声发射源定位研究。为了提高定位精度, 定位算法采用最小二乘法, 避免了初值的选取引起的运算误差。

2.4 最小二乘法

最小二乘法求解是利用安装在样品表面不同位置的传感器在同一时间测定某一位置的声发射信号, 利用该信号到达不同传感器的时间差来求取声发射源的位置坐标^[17]。在各向同性介质中建立适当坐标, 理论上最少需要建立 3 个方程才可以求出声发射源位置坐标, 但当方程多于 3 个时可以减少干扰误差, 从而计算出的声发射源坐标更加准确。可选取 4 个传感器来建立方程进行求解, 4 个传感器的位置坐标分别为: (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3) 、 (x_4, y_4, z_4) , 并假设 K 点为声发射源, 坐标为 (x, y, z) , 则得到 4 个方程如下:

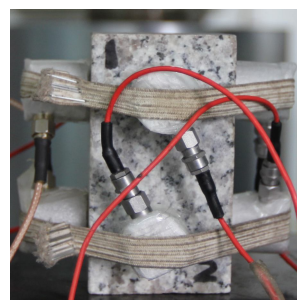
$$\left. \begin{aligned} V\Delta_{12} &= \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \\ V\Delta_{23} &= \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \\ V\Delta_{34} &= \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \\ V\Delta_{41} &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: V 为波速。试验测得花岗岩样品中的 P 波波速为 $3\,128.023\,5\text{ m/s}$; Δ_{ij} 为声发射信号从 K 点到达第 i 、 j 个传感器的时间差, 求解上述方程组即可求出声发射源 K 点的坐标。

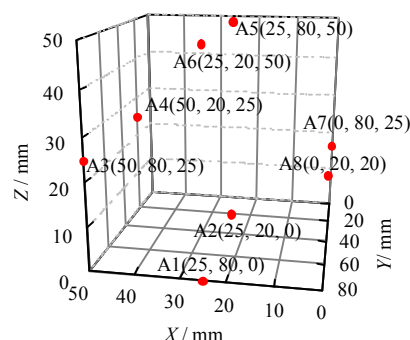
3 试验分析

试验岩样为花岗岩, 采用 DJ-4 型自动岩石切割机加工成尺寸为 $50\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的试件, 然后使用 SHM-200 型双端面磨石机对试件的正方形端面进行打磨, 保证上下两个端面的平行和光滑度。在试件加工过程中需用水对试件进行冷却及润滑。声发射系统采用美国物理声学公司 PAC (Physical Acoustic Corporation) 生产的 PCI-2 型声发射测试分析系统采集断铅试验过程中的声发射信号, 传感器型号为 R6a 型, 谐振频率为 90 kHz , 工作频率范围为 $35 \sim 100\text{ kHz}$ 。声发射系统的阈值设定为 40 dB ; 前置放大器型号为 2/4/6, 其频带范围为 $20 \sim 1\,200\text{ kHz}$; 采样频率为 2 MHz 。为减小传感器自身产生的不可避免的误差, 用凡士林作为耦合剂, 将探头耦合在岩样上。本文试验中布置的 8 个传感器的坐标分别为 A1 (25, 80, 0)、A2 (25, 20, 0)、A3 (50, 80, 25)、A4 (50, 20, 25)、A5 (25, 80, 50)、A6 (25, 20, 50)、A7 (0, 80, 25)、A8 (0, 20, 25), 单位为 mm。从中选取 4 个合适的传感器并对其接收到的信号进行分析求解。8 个传感器的位置及坐标示意图如图 2 所示。传感器自身有一定的表面积, 其安装精确到毫米, 试验中, 为了保证传感器自身固定时的坐标定位, 先确定传感器的安装位置, 然后以此位置为圆心, 以传感器的半径画圆, 安放传感器使其和圆形区域高度重合, 保证传感器中心和安放位置中心吻合, 因而坐标也一致。试验共做了 10 个坐标点 (25, 60, 50)、(25, 45, 50)、(50, 60, 25)、(50, 45, 25)、(25, 60, 0)、(25, 45, 0)、(0, 60, 25)、(0, 45, 25)、(25, 100, 35)、(25, 100, 15) 的断铅试验。对断铅试验过程中 8 个传感器获取的声发射信号分别进行小波去噪处理和小波分解, 比较分解后的子带信号, 找到各个传感器中主频最接近的 4 个子带信号, 然后对这 4 路子带信号进行全相位频谱分析, 分别找到主频对应的相位 (对于全相位频谱分析而言, 主频位置对应的相位即截取信号中间样点的相位), 利用相位差法进行时间差测量, 最后用最小二乘法进行定位。

图 3 列举了在坐标点 (50, 45, 25) 进行断铅试验, 8 个传感器采集到的信号及对应的小波分解



(a) 传感器实际位置



(b) 传感器坐标位置

图 2 传感器布置及坐标位置示意图
Fig.2 Schematics of sensor placement and coordinate positions

第 5 层细节信号的频谱图。由于岩石声发射信号频率分布在中低频, 分解层数通常采用 $3 \sim 6$ 级, 本文分解到 5 层已能得到很好地低频细节信息。从图中可以看出, 子带细节信号是接收到的信号的经过带通滤波器得到的窄带信号。从这 8 路采集信号中寻求合适的 4 个子带信号, 分别求出信号主频如表 1 所示, 可以看出 2、5、7、8 这 4 个传感器接收到的信号经过小波分解后的子带信号频率是相同的, 均为 43.01 kHz , 并且原始接收信号主频和分解后的子带信号主频一致, 故选择这 4 个传感器的第 5 层细节信号进行全相位相位差计算。在 10 个声发射源定位过程中, 有的声发射源发出的信号在 8 个传感器中找出 3 个以上主频大致相同的信号, 这个主频位置差值最大一般在 4 个样点, 选择平均的主频作为时间延迟公式中的频率, 这是产生定位误差的原因之一。

美国 PCI-2 型声发射仪器测得时间延迟及定位结果见表 2, 全相位相位差法测得时间延迟及用最小二乘法定位结果见表 3。可以看出, 整体全相位相位差法定位绝对误差小于美国 PCI-2 型声发射仪器定位绝对误差 (由于待测坐标点有 0 点, 所以计算绝对误差), 平均绝对误差减小约 3 mm 。由图 4 可以直观地看出两种方法绝对误差的大小。

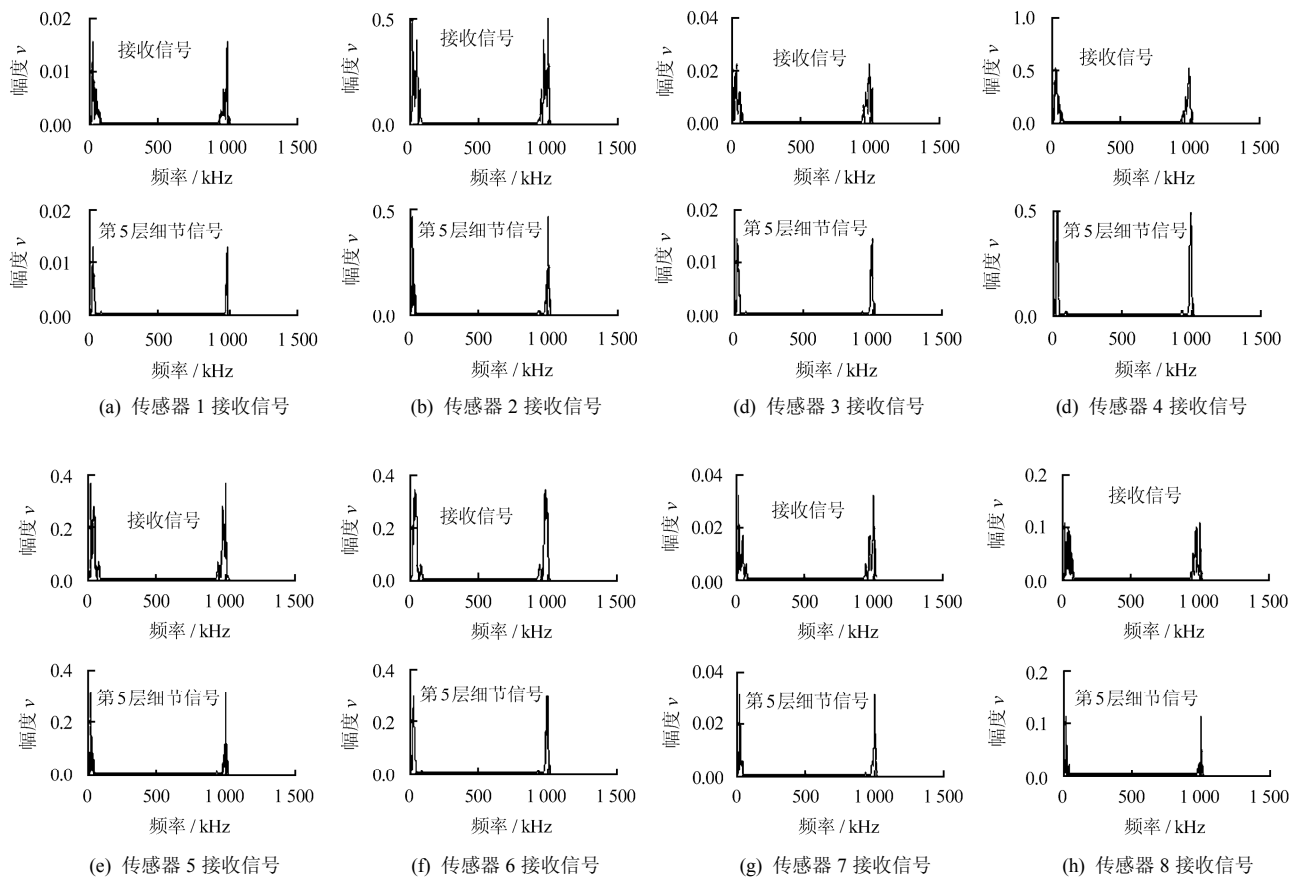


图3 断铅试验8个传感器接收到的信号及其小波分解信号

Fig.3 Signals and wavelet decompositions received from eight sensors of broken lead experiments

表1 8个传感器接收到的信号及小波分解后子带信号主频

Table1 Signals and dominant frequencies of the signal sub-band after wavelet decompositions of 8 sensors

传感器序号	接收到信号主频 / kHz	第5层细节信号主频 / kHz	传感器序号	接收到信号主频 / kHz	第5层细节信号主频 / kHz
1	52.78	52.78	5	43.01	43.01
2	43.01	43.01	6	76.25	54.74
3	66.47	46.92	7	43.01	43.01
4	62.56	62.56	8	43.01	43.01

表2 美国 PCI-2 型声发射测试时间延迟及定位结果

Table 2 Time delay and location results of AE testing using PCI-2

声源实际位置 (x, y, z) / mm	传感器时延 Δ_{ij} / μ s	定位结果 (x, y, z) / mm	定位绝对误差 (x, y, z) / mm	定位平均误差 / mm
(25, 60, 50)	$\Delta_{14} = -9.7$, $\Delta_{45} = 0.8$, $\Delta_{57} = 3.7$, $\Delta_{71} = 5.2$	(24.78, 70.6, 48.45)	(0.22, 10.6, 1.55)	4.12
(25, 45, 50)	$\Delta_{23} = -10.8$, $\Delta_{36} = 1.7$, $\Delta_{67} = 0.8$, $\Delta_{72} = 8.3$	(18.78, 37.86, 43.01)	(6.22, 7.14, 6.99)	6.78
(50, 60, 25)	$\Delta_{25} = 5.2$, $\Delta_{56} = -4.7$, $\Delta_{67} = -1.5$, $\Delta_{72} = -1.0$	(38.77, 69.06, 18.27)	(11.23, 9.06, 6.73)	9.00
(50, 45, 25)	$\Delta_{25} = -0.4$, $\Delta_{57} = -5.5$, $\Delta_{78} = 4.4$, $\Delta_{82} = 1.5$	(44.29, 29, 13.5)	(5.71, 16, 11.5)	11.07
(25, 60, 0)	$\Delta_{12} = -2.5$, $\Delta_{24} = 3$, $\Delta_{46} = 0.8$, $\Delta_{61} = -1.3$	(32.44, 73.95, 1.526)	(7.44, 13.95, 1.526)	7.64
(25, 45, 0)	$\Delta_{45} = -25.9$, $\Delta_{56} = 33.8$, $\Delta_{68} = -4.3$, $\Delta_{84} = -3.5$	(14.66, 42.41, 9.33)	(10.34, 2.59, 9.33)	7.42
(0, 60, 25)	$\Delta_{25} = 4.2$, $\Delta_{56} = -5.2$, $\Delta_{67} = 9.5$, $\Delta_{72} = -8.5$	(9.091, 68.95, 23.46)	(9.091, 8.95, 1.54)	6.53
(0, 45, 25)	$\Delta_{24} = -2.8$, $\Delta_{45} = 0.8$, $\Delta_{56} = 1.5$, $\Delta_{62} = 0.5$	(8.69, 31.53, 20.53)	(8.69, 13.47, 4.47)	8.88
(25, 100, 35)	$\Delta_{13} = -1.6$, $\Delta_{35} = -1.9$, $\Delta_{57} = 0.7$, $\Delta_{71} = 2.8$	(27.35, 74.96, 32.32)	(2.35, 25.04, 2.68)	10.02
(25, 100, 15)	$\Delta_{17} = 0.125$, $\Delta_{73} = 0$, $\Delta_{35} = 0.425$, $\Delta_{71} = -0.55$	(26.48, 78.97, 13.58)	(1.48, 21.03, 1.42)	7.98

表 3 全相位相位差法声发射测试时间延迟及定位结果

Table3 Time delay and location results using all phase phase-difference method

声源实际位置 (x, y, z) / mm	传感器时延 Δ_{ij} / μ s	定位结果 (x, y, z) / mm	定位绝对误差 (x, y, z) / mm	定位平均误差 / mm
(25, 60, 50)	$\Delta_{14} = 2.33, \Delta_{45} = 7.66, \Delta_{57} = -7.96, \Delta_{71} = -3.56$	(22.19, 55.33, 50.3)	(2.71, 4.67, 0.3)	2.38
(25, 45, 50)	$\Delta_{23} = 2.05, \Delta_{36} = 9.49, \Delta_{67} = -7.40, \Delta_{72} = -5.2$	(17.9, 45.7, 58.13)	(7.1, 0.7, 8.13)	5.31
(50, 60, 25)	$\Delta_{25} = 0.66, \Delta_{56} = -1.91, \Delta_{67} = 5.74, \Delta_{72} = -4.54$	(38.26, 54.35, 21.50)	(11.74, 5.65, 3.5)	6.96
(50, 45, 25)	$\Delta_{25} = 0.64, \Delta_{57} = 4.51, \Delta_{78} = 0.56, \Delta_{82} = -5.67$	(49.26, 49.20, 27.82)	(0.74, 4.2, 2.82)	2.59
(25, 60, 0)	$\Delta_{12} = 1.76, \Delta_{24} = 7.64, \Delta_{46} = 3.12, \Delta_{61} = 2.41$	(22.5, 44.7, 9.1)	(2.5, 12.9, 1)	7.87
(25, 45, 0)	$\Delta_{45} = -2.53, \Delta_{56} = 8.02, \Delta_{68} = -6.86, \Delta_{84} = 2.16$	(30.2, 37.2, 1.5)	(5.2, 7.8, 1.5)	4.83
(0, 60, 25)	$\Delta_{25} = 0.34, \Delta_{56} = 0.56, \Delta_{67} = 9.36, \Delta_{72} = 2.49$	(7.9, 51.3, 24.4)	(7.9, 8.7, 0.6)	5.73
(0, 45, 25)	$\Delta_{24} = -1.92, \Delta_{45} = 1.88, \Delta_{56} = 2.86, \Delta_{62} = 10.7$	(6.7, 44.1, 31.9)	(6.7, 0.9, 6.9)	4.83
(25, 100, 35)	$\Delta_{25} = 2.56, \Delta_{56} = -4.02, \Delta_{68} = 8.59, \Delta_{82} = 9.54$	(24.3, 98.2, 46.3)	(0.7, 1.8, 11.3)	4.60
(25, 100, 15)	$\Delta_{23} = 1.31, \Delta_{34} = -1.23, \Delta_{46} = 1.45, \Delta_{62} = -5.14$	(22.58, 81, 15.5)	(2.42, 19, 0.5)	7.31

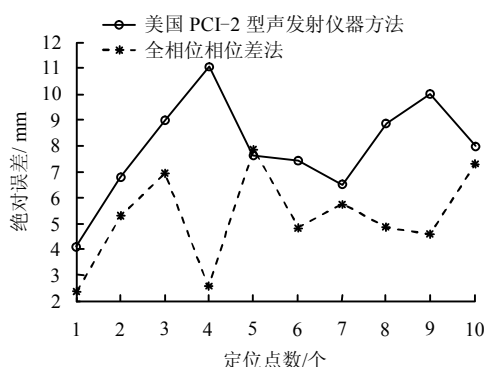


图 4 美国 PCI-2 型声发射仪器定位与全相位相位差法定位绝对误差比较

Fig.4 Absolute error comparison between positioning results with the PCI-2 acoustic emission instrument and the all phase method of phase

4 结 论

(1) 与传统 FFT 频谱分析相比, 全相位频谱分析具有“相位不变性”的优点。

(2) 借助于小波分解, 全相位频谱分析结合相位差法进行声发射信号时间差估计, 可以减小误差。

(3) 进行断铅三维定位试验, 全相位相位差法时延估计法定位的平均绝对误差比美国 PCI-2 型声发射仪器定位结果提高约 3 mm。

(4) 新算法为岩石声发射定位研究提供了一种途径。另外全相位频谱分析可以用 FFT 模块实现, 计算速度很快, 利于硬件实现。

参 考 文 献

[1] MOGI K. Study on elastic shocks caused by the fracture

of heterogeneous material and its relation to earthquake phenomena[J]. *Bull. of the Earthquake Research Institute*, 1962, 40(6): 831—853.

[2] SCHOLZ C. Experimental study of the fracturing process in brittle rock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73: 1447—1454.

[3] XU Zhao-rong, MEI Shi-rong, ZHUANG Can-tao, et al. Preliminary location of microcracks in several rock specimens under true triaxial compression[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994, 7(Supp.): 702—709.

[4] JANSEN D P, CARLSON S R, YOUNG R P, et al. Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B12): 22231—22243.

[5] 赵兴东, 刘建坡, 李元辉, 等. 岩石声发射定位技术及其实验验证[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(10): 1472—1476.

ZHAO Xing-dong, LIU Jian-po, LI Yuan-hui, et al. Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(10): 1472—1476.

[6] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1436—1440.

PENG Qi, ZHANG Ru, XIE He-ping, et al. Prediction model for rockburst based on acoustic emission time series[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1436—1440.