

刘荣平, 王有学, 蒋婵君, 等. 地震事件自动识别技术及其在南岭流动台阵的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(4): 409-417. doi:10.15953/j.1004-4140. 2016.25.04.04.

Liu RP, Wang YX, Jiang CJ, et al. Automatic identification method of earthquake event and its application in Nanling portable seismic array[J]. CT Theory and Applications, 2016, 25(4): 409-417. (in Chinese). doi:10.15953/j.1004-4140. 2016.25.04.04.

地震事件自动识别技术及其在南岭流动台阵的应用

刘荣平, 王有学[✉], 蒋婵君, 乃振龙, 徐金荣, 张琪, 曾成, 王心宇
(桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541006)

摘要: 地震事件识别是地震层析成像的重要组成部分。然而, 在处理宽频带流动台阵天然地震记录中识别地震事件过程中, 利用传统的人工识别方法耗时巨大, 效率十分低。本文首先运用 STA/LTA 对地震事件进行初步判断, 并结合支持向量机信号检测算法和多台联合检验法来提高地震事件判别的准确度及抗干扰能力, 达到天然地震事件的自动识别。南岭流动台阵数据的应用结果表明该综合识别算法可自动快速准确地判别地震事件, 并可用于地震震相的拾取。

关键词: 地震事件; 自动识别; STA/LTA; 支持向量机; 多台联合检验

doi:10.15953/j.1004-4140. 2016.25.04.04 中图分类号: P 315 文献标志码: A

地震事件识别技术是被动源地震层析成像工作的重要组成部分, 也是震源机制、地震定位、地球内部结构成像等一系列地震研究的基础^[1]。在巨量的天然地震数据库中搜寻地震事件, 使用传统的人工识别方法, 效率十分低, 而且耗费大量的时间。数字地震信号的出现、数字处理技术和计算机技术三者相结合, 促进了地震事件自动识别技术发展。地震信号自动识别及震相拾取方法应运而生, 节省了从海量地震观测数据中挑选地震事件的人工成本和工作时间, 并为后续的震相识别及走时拾取等工作奠定了基础。

目前地震事件自动识别已经有很多方法, 广泛使用的方法可分为时间域分析法、频率域分析法、时间频率域分析法、模式识别法及综合分析法^[2-3]。常用的时间域分析法有 STA/LTA (能量法或长短时法)、分形分维法及自回归模型分析法等。STA/LTA 是应用比较成熟的方法, 它不仅能判别是否有地震事件发生, 而且还能检测震相到时, 史蒂文森^[4]应用地震自动识别机 (Automatic Earthquake Processor, AEP) 系统进行初至波到时识别所运用的算法就是 STA/LTA。频率域分析法主要是以傅里叶变换为基础, Shensa^[5]利用快速傅里叶变换的能量谱密度原理构建了一个地震震相检测器, 并提出了平均功率检测器、平均偏差检测器和最大偏差检测器 3 种算法。时频分析法^[6]的提出弥补了傅立叶变换仅提供频率域信息的不足, 克服了无法提供时间域的信息的局限性, 特别是小波包分解变换非常适合解决非稳态地震信号的问题^[7-8]。模式识别法是依据研究对象的属性或特征, 应用分析算法判断它的类别, 使分类识别的结果尽可能地接近现实^[9]。一个模式识别系统通常由以下四个环节组成: 特征提取、特征选择、学习、训练和分类识别^[10-12]。Wang 等^[13]应用人工神经网络进

收稿日期: 2016-03-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41574039, 41174077); 大陆构造与动力学国家重点实验室开放课题 (K201505)。

行地震信号检测, 分别将递归 STA/LTA 时间序列和移动窗口谱作为输入数据, 其效果明显优于仅基于 STA/LTA 传统的算法。由此可见, 各种地震事件识别方法都有其优势与局限性, 目前还没有一种方法能独自很好地快速识别地震事件。

为了可靠地从天然地震流动台阵观测数据中检测地震事件, 本文依据地震波信号和噪声的各自特征, 应用时间和频率域信号分析方法, 并结合模式识别等技术对信噪比相对低情况下的地震事件进行快速、自动识别。

1 地震事件自动识别的方法原理

STA/LTA、支持向量机方法和多台相关检验相结合是进行地震事件自动识别的主要方法。首先, 对单台采用长短时方法初步确定可能的地震事件 (也可能是人类活动造成的干扰); 然后, 对信号的特征值运用经过训练的支持向量机进一步判断是否是地震事件, 进一步减小误判率; 最后进行多台相关检验, 确定地震事件。地震事件自动识别的流程如图 1 所示。

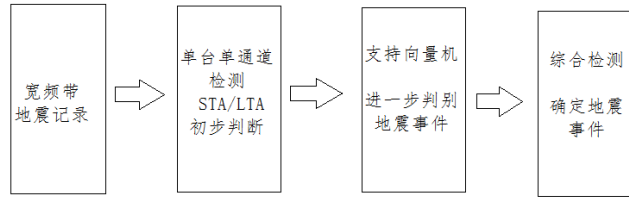


图 1 地震事件自动识别流程图

Fig.1 The procedure of earthquake event identification

1.1 STA/LTA 触发事件

STA/LTA 触发事件实际是一种能量检测法, 它是依据长短时平均比法的原理, 事先设定阈值 (图 2), 根据记录信号中的能量变化来判断是否有事件发生。STA 表示某点 t_0 之后采样长度为 N 的一段信号的绝对平均振幅 $\alpha_{STA}(t_0)$, LTA 表示某点 t_0 信号之前采样长度为 M 的一段信号的绝对平均振幅 $\alpha_{LTA}(t_0)$ 。

$$R(t_0) = \frac{\alpha_{STA}(t_0)}{\alpha_{LTA}(t_0)} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_{STA}(t_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s(t_i) \\ \alpha_{LTA}(t_0) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M s(t_j) \end{cases}, \quad t_i \geq t_0 \geq t_j \quad (2)$$

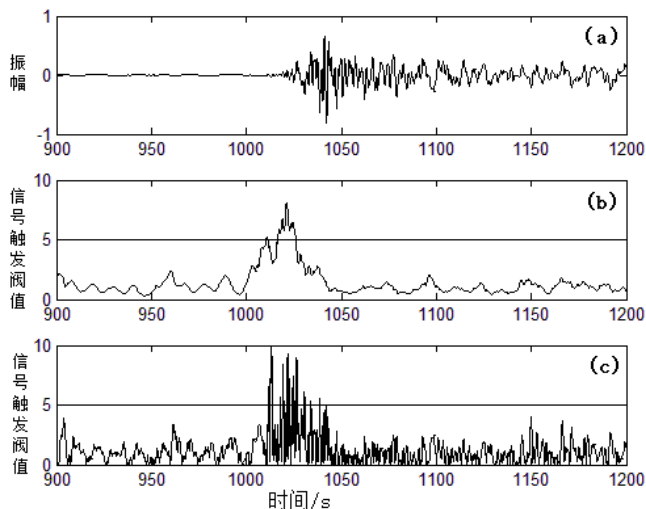
为了使对数字地震记录序列的检测更为灵敏采样单值触发检测, 此时 $N=1$, 若 $\alpha_{STA}(t_k) = s(t_k)$, $M=8f_s$, 则 $\alpha_{LTA}(t_k)$ 的递推公式为:

$$\alpha_{LTA}(t_k) = \alpha_{LTA}(t_{k-1}) + \frac{|s(t_k)| - \alpha_{LTA}(t_{k-1})}{M} \quad (3)$$

其中 f_s 为采样率，则触发公式为

$$R(t_k) = \frac{s(t_k)}{\alpha_{LTA}(t_k)} \quad (4)$$

传统 STA/LTA 的 STA 时长为 4 s, LTA 时长为 8 s。本文为了使检测更为灵敏,可以减少地震事件的漏判,提高识别准确度,改用单值触发。由图 2 可见单值触发的 STA/LTA 对于信号的检测更为敏感。



(a) 原始地震事件记录波形, (b) 传统 STA/LTA 序列, (c) 单值触发 STA/LTA 序列

图 2 阈值检测事件示意图

Fig.2 The diagram of threshold detected event

1.2 支持向量机识别

为了进一步检验触发的事件是地震事件还是干扰事件,本文采用二类分类模型的支持向量机方法对触发的事件提取特征,并通过学习训练以达到区分地震事件和干扰事件的目的。

1.2.1 支持向量机

支持向量机具有结构简单、泛化能力好,合适解决小样本以及高维数据等优势。支持向量机属于二类分类模型,它的学习方式是在特征空间上的间隔最大化,其本质为求解凸二次规划问题,相当于正则化的合页损失函数的最小化问题^[14-15]。

设一个特征空间上的训练数据集为

$$x_i \in \mathcal{X} \in R^n, y_i \in \{-1, 1\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中, x_i 为第 i 个特征向量, y_i 为 x_i 的类标记。支持向量机的学习目标是在特征空间中寻找一个分离超平面,能将两类数据正确划分和几何间隔最大化。分离超平面是由法向量 \mathbf{W} 和 \mathbf{b} 截距所决定的,其方程为 $\mathbf{WX} + \mathbf{b} = 0$ 。当训练数据线性可分时,我们将支持向量机学习的最优化表示为

$$M = \begin{cases} \min_{w,b} \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 \right) \\ s.t. \left(y_i \left(\frac{w}{\|w\|} \cdot x_i + \frac{b}{\|w\|} \right) \right) \geq 1, \quad i=1,2,\dots,N. \end{cases} \quad (6)$$

当训练数据近似线性可分时, 引入一个松弛变量以及相应的惩罚参数, 从而线性支持向量机的学习问题变成如下凸二次规划问题:

$$M = \begin{cases} \min_{w,b} \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \right) \\ s.t. \left(y_i \left(\frac{w}{\|w\|} \cdot x_i + \frac{b}{\|w\|} \right) \right) \geq 1 - \xi_i, \quad i=1,2,\dots,N, \quad \xi_i \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

当训练数据线性不可分时, 利用核函数 $K(x_i, x_j)$ 能够学习非线性支持向量机, 相当于隐式地在高维的特征空间中学习线性支持向量机。通过引进拉格朗日 $\alpha_i (i=1,2,\dots,N)$ 对偶性来求解以上最优化问题, 求得分类决策函数为

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i K(x_i, x_j) + b^* \right) \quad (8)$$

用支持向量与拉格朗日乘子共同确定参数 b , 即

$$b^* = f(x) - \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i K(x_i, x_j). \quad (9)$$

1.2.2 SVM 特征提取

识别特征的选取是模型建立中的关键环节。特征矢量应该有效地描述原样本的信息, 同时输入变量不宜过多, 以免造成“维数灾难”或者“过学习”的问题。通过分析干扰信号与地震信号的特征, 可知地震信号的振幅持续时间较长, 一般从几分钟到几十分钟, 而干扰信号持续时间很短, 一般只有几秒, 因此可以用振幅比的方法来提取识别干扰信号与地震信号的特征。

本文取触发点后不同时段平均振幅与触发点前的平均振幅比作为特征值, $\alpha_{LTA}(t_0)$ 取触发点前 60 s 地震记录的平均振幅作为背景值, $\alpha_{STA}(t_0)$ 分别取触发点后 2^k 到 2^{k+1} ($k=1,2,\dots,8$) s 的地震记录的平均振幅。利用 8 个时段的 $\alpha_{STA}(t_0)$ 与背景值的比作为支持向量机的分类特征值, 其中特征值包含触发点后 2 s ~ 8 min 左右的振幅比, 未提取触点后 0 ~ 2 s 的振幅比是因为干扰信号与地震信号的前两秒都是强振幅。

1.2.3 建立非线性 SVM 模型

在非线性 SVM 模型建立中, 有关研究表明高斯核函数 (RBF) 在各种数据库中进行分类测试时可取得较好的效果^[14-15], 所以我们利用高斯核函数:

$$K(x_i, x_j) = \exp \left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (10)$$

对 10 个质量较好的地震事件及随机选取 10 个干扰信号作为输入数据，采样最小二乘支持向量机（LS-SVM）进行训练，其训练分类见图 3 和表 1。

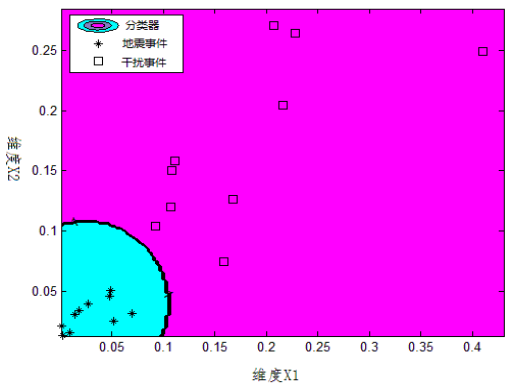
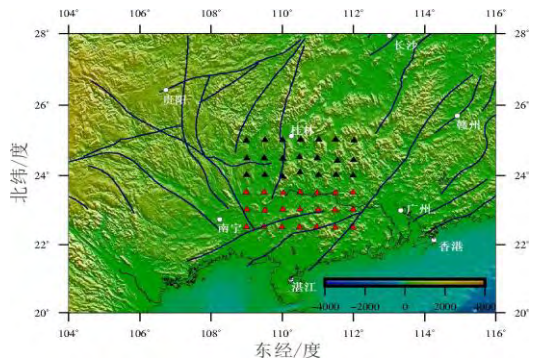


图 3 地震信号与干扰信号的训练分类结果

Fig.3 Training classification of seismic and interference signals



黑、红色三角形为地震台站，黑色线条为断裂

图 4 南岭地区地形及天然地震流动台阵

Fig.4 Topography and portable seismic array in Nanling

图 3 中,Class 1 表示干扰事件,Class 2 表示地震事件,由图 3 可以看出训练达到 100% 正确的分类效果，说明提取的特征矢量能很好地区分地震事件与干扰背景。

表 1 SVM 判别地震事件结果

Table 1 Discrimination result of earthquake events with SVM method

项目	训练样本		测试样本	
	地震事件	干扰事件	地震事件	干扰事件
实际事件/个	10	10	8	10
正确分类/判定事件/个	10	10	7	8
精准度/%	100	100	87.50	80

1.3 多台联合判别地震事件

利用天然地震流动台阵中地震事件初至震相到时的简单特性可以减少误检率，这要求事件必须在某一短时间间隔中被多于给定数目的地震台站所确定，且相应的时间间隔必须与台站间隔以及地壳中的地震波速相匹配。多台相关检验具体做法是：当台阵内台间距非常接近时，相邻台站记录的地震事件初至震相到时有较好的相关性，即相邻台站之间震相到时较为接近，而干扰噪声一般没有相关性。为此，可将相邻台站间到时差在一定范围的事件认定为地震事件。到时差可以由两台之间的距离和两台之间的地表波速大致求出。

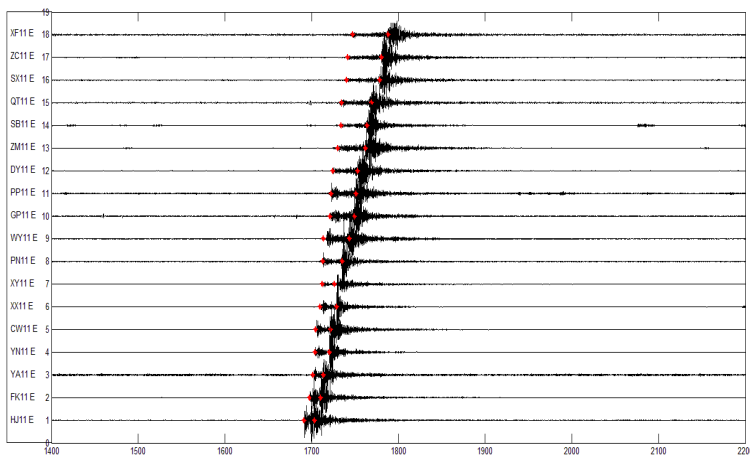
由于干扰事件对于每个台站是随机的。利用多台联合判别法，根据地震台阵内台站间最大距离确定最大到时差 ΔT ，若 ΔT 时间段内有超过 60% 台站检测到触发信号，则认为该触发信号为地震事件。该方法能有效去除随机干扰，使地震事件判别准确度进一步提高。

2 应用实例

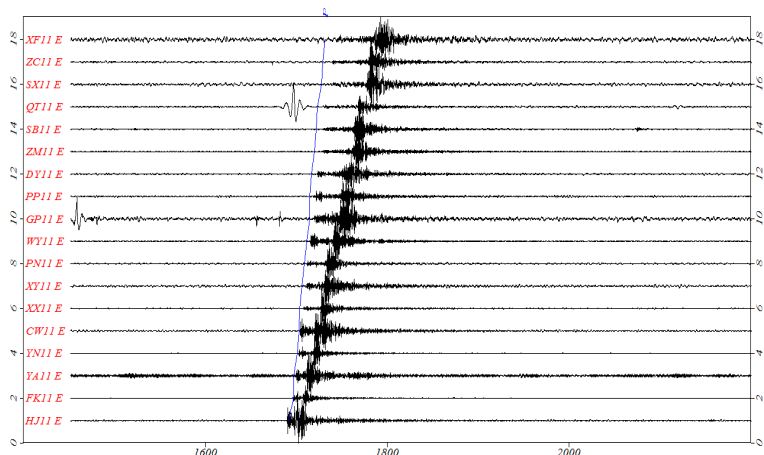
本文使用南岭地区天然地震流动台阵（图 4）的观测数据，以怀集地震与尼泊尔地震作为实验数据，检验地震事件的自动识别效果（图 5（a）和图 6（a）），并结合桂林理工大学开发的地震震相的射线追踪及走时计算软件 WinQuake 所拾取的 P 波震相（图 5（b）、图 6（b））作对比。

2.1 近震事件识别

2014 年 10 月 23 日 18 时 27 分（中国东八区时间）在我国广东省怀集县发生了 3.5 级地震（ 24.0°N ， 112.4°E ），震源深度约 10 km，震中距离最近的台站 HJ11 不足 50 km。由图 5（a）可以看出，18 个地震台中 100% 检测到触发信号，多台联合判别确定这个地震事件。图中主要有两列触发信号，其中前一列为地震到达触发信号，后一列为面波触发的信号。



(a) 怀集地震自动识别图（红色“+”表示触发信号；横坐标为时间，单位秒）



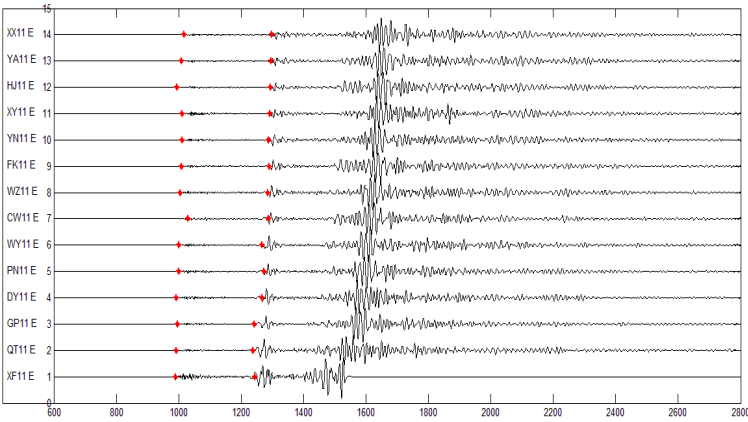
(b) 怀集地震 P 波人工拾取图（P 波至是根据 IASP91 模型计算得到的；横坐标为时间，单位秒）

图 5 怀集地震自动识别图和 P 波人工拾取图

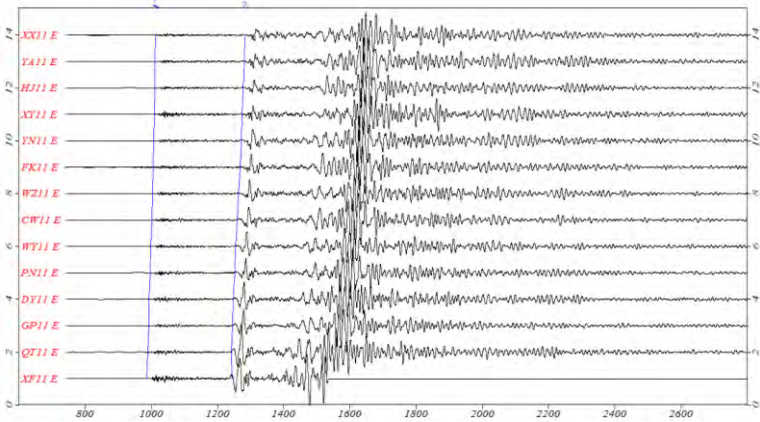
Fig.5 Automatic identification and manual identified P-wave arrivals for Huaiji earthquake

2.2 远震事件识别

2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分(北京时间)在尼泊尔发生 8.1 级地震(28.2°N , 84.7°E), 震源深度 20 km, 震中距离最近的台站 XF11 约 2 800 km。由图 6 (a) 可以看出, 在 1 000 s (约为 14 时 16 分) 附近, 14 个地震台中 100% 检测到触发信号, 在 1 250 s (约为 14 时 21 分) 附近, 14 个地震台中再次 100% 检测到触发信号。结合图 6 (b) 人工拾取地震震相的结果可知, 第一列信号由地震 P 波触发, 第二列信号由地震 S 波触发。



(a) 尼泊尔地震自动识别结果 (红色 “+” 表示触发信号; 横坐标为时间, 单位秒)



(b) 人工拾取图的尼泊尔地震 P 波与 S 波 (P、S 波至是根据 IASP91 模型计算得到的; 横坐标为时间, 单位秒)

图 6 尼泊尔地震自动识别图与 P & S 波人工拾取图

Fig.6 Automatic identification and Manual identified P & S-wave arrivals for Nepal earthquake

3 结论

在利用被动源地震层析成像研究地球内部结构的过程中, 从海量地震数据库中识别地震事件是一个复杂而且费时的的工作, 它是震相识别、走时拾取的基础。本文使用支持向量机这一模式识别方法, 结合地震信号长短时能量比、时频信息等特征向量, 并引入

多台联合判断的综合方法对地震事件进行自动识别。通过对南岭地区天然地震流动台阵数据的应用,结果表明该方法能够准确地识别地震事件,与传统的人工识别方法相比较,大大提高了地震事件识别的效率,进而为用于地震层析成像的震相识别及走时拾取提供可靠的地震事件信息。

参考文献

- [1] 王彩霞, 白超英, 王馨. 地震震相初至自动检测技术综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (5): 2363-2375.
Wang CX, Bai CY, Wang X. Review of automatic onset time picking for seismic arrivals[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(5): 2363-2375. (in Chinese).
- [2] 王继, 陈九辉, 刘启元, 等. 流动地震台阵观测初至震相的自动检测[J]. 地震学报, 2006, 28(1): 42-51.
Wang J, Chen JH, Liu QY, et al. Automatic onset phase picking for portable seismic array observation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(1): 42-51. (in Chinese).
- [3] 侯建荣, 黄培清, 骆建文. 多分维分形曲线维数计算的小波方法[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(S1): 18-21.
Hou JR, Huang PQ, Luo JW. A wavelet method for dimension evaluation of fractal multi-dimension curves[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(S1): 18-21. (in Chinese).
- [4] Stevenson R. Microearthquakes at flathead lake, montana: A study using automatic earthquake processing[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(1): 61-79.
- [5] Shensa M. The deflection detector, its theory and evaluation on short-period seismic data[J]. Texas Instruments, Alexandria, Virginia, 1977. TR. 77-103.
- [6] 李山有, 朱海燕, 武东坡, 等. 基于振幅和瞬时频率的震相自动识别方法[J]. 世界地震工程, 2006, 22(4): 1-4.
Li SY, Zhu HY, Wu DP etc. Automatic recognition of seismic phase based on amplitude and instantaneous frequency[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(4): 1-4. (in Chinese).
- [7] 赵广超, 肖斌, 国闯, 等. 小波分析理论与图像降噪处理[J]. 微型机与应用, 2011, 30 (19): 35-37.
Zhao GC, Xiao B, Guo C, et al. The image denoising based on wavelet analysis[J]. Image Processing and Multimedia Technology, 2011, 30(19): 35-37. (in Chinese).
- [8] 刘希强, 周蕙兰, 李红. 基于小波包变换的地震数据时频分析方法[J]. 西北地震学报, 2000, 22(2): 40-43, 73.
Liu XQ, Zhou HL, Li H. The time-frequency analysis method about seismic data based on wavelet packet transform[J]. Northwestern Seismological Journal, 2000, 22(2): 40-43, 73. (in Chinese).
- [9] 范会敏, 王浩. 模式识别方法概述[J]. 电子设计工程, 2012, 20(19): 48-51.
Fan HM, Wang H. An overview of the pattern recognition methods[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(19): 48-51. (in Chinese).
- [10] 杨配新, 邓存华, 刘希强, 等. 数字化地震记录震相自动识别的方法研究[J]. 地震研究, 2004, 27(4): 308-313.
Yang PX, Deng CH, Liu XQ et al. Studies on auto-distinguishing phase of digital seismic recordings[J]. Journal of Seismological Research, 2004, 27(4): 308-313. (in Chinese).
- [11] 李慧婷, 黄文辉, 陈贵美. 应用人工神经网络方法识别近震与远震[J]. 华南地震, 2000, 20(4): 71-75.
Li HT, Huang WH, Chen GM. Recognition of near and far earthquake by artificial neural network[J]. South China Journal of Seismology, 2000, 20(4): 71-75. (in Chinese).
- [12] 张范民, 李清河, 张元生, 等. 利用人工神经网络理论对地震信号及地震震相进行识别[J]. 西北地震学报, 1998, 20(4): 43-49.
Zhang FM, Li QH, Zhang YS, et al. The seismic signal phase recognition by using artificial

- neural network theory[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(4): 43-49. (in Chinese).
- [13] Wang J, Teng TL. Artificial neural network-based seismic detector[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1995, 85(1): 308-319.
- [14] 王海军, 刘贵忠. 基于支持向量机的信号自动检测算法[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 85-94.
Wang HJ, Liu GZ. Automatic signal detection based on support vector machine[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 85-94. (in Chinese).
- [15] 郭辉, 刘贺平, 王玲. 最小二乘支持向量机参数选择方法及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 2033-2036, 2051.
Guo H, Liu HP, Wang L. Method for selecting parameters of least squares support vector machines and application[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 2033-2036, 2051. (in Chinese).

Automatic Identification Method of Earthquake Event and Its Application in Nanling Portable Seismic Array

LIU Rong-ping, WANG You-xue[✉], JIANG Chan-jun, NAI Zhen-long,
XU Jin-rong, ZHANG Qi, ZENG Cheng, WANG Xin-yu

(School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: The identification of earthquake events is very important in seismic tomography. However, during searching earthquake event from the huge earthquake data base acquired by portable array, the traditional manual method of identifying earthquake events is very inefficient and time-consuming. This paper uses STA/LTA method to judge the existence of earthquake event preliminary, uses the Support Vector Machines and the multi-station joint inspection to improve the accuracy of earthquake event discrimination and anti-jamming capability, and then earthquake event can be identified from huge earthquake data bank. Finally, this technique is applied to the Nanling portable seismic array data, and the result shows that the method can determine earthquake events automatically, quickly and accurately, and then the event data can be used for phases identification further.

Keywords: seismic events; automatic identification; STA/LTA; Support Vector Machines; joint multi-station inspection



作者简介: 刘荣平(1990—), 男, 桂林理工大学地质资源与地质工程专业硕士研究生, 主要从事地震信号处理及层析成像方法研究, Tel: 15107737682, E-mail: lrp0611@163.com; 王有学[✉](1961—), 男, 桂林理工大学地球科学学院教授, 博士生导师, 主要从事地球内部结构及地球动力学研究, Tel: 0773-5896341, E-mail: uxue.wang@glut.edu.cn。