

强震预警中 P 波到时 STA/LTA 和 贝叶斯 BIC 双步骤检拾研究*

杨黎薇¹, 邱志刚², 林国良¹, 王玉石³

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 昆明学院 城乡建设与工程管理学院, 云南 昆明 650214;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 以云南地区的地震数据为基础, 借鉴国内外 P 波震相自动识别相关研究, 提出一套可实时处理 P 波震相的方法, 即 STA/LTA 和贝叶斯 BIC 双步骤检拾法。应用此方法对所选取的云南强震动台网观测记录进行 P 波自动精确识别, 并与人工检拾方法结果进行对比, 确定 STA/LTA 和贝叶斯 BIC 双步骤检拾法的识别精度能满足地震预警快速准确的要求。

关键词: 地震预警; P 波; 强震记录; STA/LTA; 贝叶斯准则; 双步骤检拾

中图分类号: P315.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)04-0619-10

0 引言

地震要素有 3 个: 发震时间、发震地点和震级大小, 地震预警的核心内容就是对地震三要素进行快速估计。作为一种有效的地震防灾减灾手段, 地震预警必须满足 2 个特性: 可靠性和时效性。首先, 预警系统所提供的信息必须具有相对准确性和稳定性; 其次, 预警系统应能够提供尽可能长的应急反应时间。换言之, 地震预警系统就是要满足地震警报发布速度与地震警报内容准确度之间的最大平衡关系。可见, 在最短时间内确定震中位置和震级大小是预警的重点环节, 而地震定位和震级估算又直接依赖于精确的震相检拾结果, 因此, 深入研究地震动震相自动检拾问题很有必要。

震相自动检拾是基于识别地震波到达后能量、频率成分、极化等特征上的变化来实现的, 多数震相自动检拾方法是通过提取信号和噪声中的不同特征来区分真实地震信号与噪声(尹得余, 2012)。自动检拾作为地震预警系统高效准确进行震相判别的唯一选择, 其准确度对地震定位和震级确定结果有非常重要的影响。近几年, 国内外

很多学者对此进行了多方位研究, 也取得了一些进展(陈少波, 2015)。

常用 P 波震相检拾方法主要有能量分析、地震波形偏振分析、自回归分析、神经网络、小波变换、高阶统计、复合方法等(史洪山, 2012)。到目前为止, 还没有任何一种单一方法可以识别所有震相, 每一种方法都有一定局限性和应用范围。能量分析是通过选取合适特征函数去突出地震震相主要特征, 再使用长短时平均方法检拾震相。长短时平均(STA/LTA)算法是能量分析中最常用的检拾 P 波到时方法, 由 Stevenson (1976) 最早提出并应用于判别地震波初至。随后, Allen (1978, 1982)、Baer 和 Kradolfer (1987)、Earle 和 Shearer (1994) 对长短时方法进行不同程度的改进。Ambuter 和 Solomon (1974)、Anderson (1981)、Meevilly 和 Majer (1982) 曾利用地震记录幅值的绝对值作为特征函数, Swindell 和 Snell (1977) 利用地震记录幅值的平方作为特征函数, Earle 和 Shearer (1994) 用 Hilbert 变换求取特征函数, 在确定相应特征函数之后, 通过长短时平均方法去判定 P 波震相初动(马强, 2008)。这类方法适用于震相清晰的地震事件, 当信噪比低或初动不明显时, 检拾效果较差(Stevenson, 1976;

* 收稿日期: 2017-01-25.

基金项目: 云南省地震局青年基金“强震预警中的震级快速判定研究”(201406)、云南省地震科技人员传帮带培养项目(C3-2104004)和国家自然科学基金——高铁联合基金项目(U1434210)联合资助。

Allen, 1978, 1982; Baer, Kradolfer, 1987; 高淑芳等, 2008)。地震波形偏振分析主要是综合三分向地震资料后开展奇异值解析, 提出能反映偏振特性的量去进行震相识别 (Vernon, 1987; Jukevics, 1988; 刘建华等, 2006; 马强, 2008)。Flinn (1965)、Vidale (1986)、Cichowicz (1993)、Mao 和 Gubbins (1995)、Earle (1999) 发现震相到来时质点运动的偏振方向会发生改变, 于是他们提取出使用地震波的偏振特征去检拾和判别震相到时。这类方法主要应用于检测原地应力和地震预报等方面, 其对资料窗口长度和信噪比变化特别敏感, 会产生同向轴重叠问题。自回归分析先假设震相到时前后地震状态为 2 个不同的稳态过程, 再找到震相到时点, 即 2 个稳态过程划分点 (王继等, 2006; 周彦文, 2008; Sleeman, 1999)。Maeda (1985) 提出一种时域赤池信息量准则, 即直接通过地震波形记录数据求取 AIC 函数, 跳过对 AR 模型阶数的求取过程。Sleeman (1999) 提出了自回归方法, 在此基础上, Leonard and Kennett (1999) 和 Leonard (2000) 将自回归的假定 AR - AIC 用作 P 波震相的自动检拾。这类方法属于目前应用最为广泛的 P 波震相识别方法, 其精确度和稳定性能满足地震预警的工作需要, 算法高效但模型结构复杂, 计算量也较大。神经网络把与地震资料相关的可用信息作为网络输入去识别震相 (Wang, Teng, 1995; Zhao, Takano 1999)。Zhao 和 Takano (1999)、Dai 和 MacBeth (1995, 1997)、Murat 和 Rudman (1992)、Wang 和 Teng (1995) 都对神经网络方法进行震相识别做过研究。Tong 和 Kennett (1996) 利用该方法进行震相识别, 建立有关地震波特性的专家知识库, 再根据检测到的震相特性去推理判别震相的类型。这种理论化的人脑神经网络数学模型, 是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种信息处理系统, 具有高度非线性, 能够进行复杂的逻辑操作和非线性实现系统, 检拾精确度高。小波分析把地震记录 P 波到时的特征表现在不同小波变换系数上, Chakraborty 和 Okaya (1995)、Kanauldip 和 Farid (1997) 提出小波变换的主要成分分析, 刘希强等 (1998, 2000a, b) 对该算法做出进一步探索; Zhang 等 (2003) 将 AIC 准则与小波变换结合起来进行震相检拾, 小波变换虽然在震相识别方面取得了一定成效, 但其本质依然

依托于 Fourier 变换, 摆脱不了 Fourier 分析的局限性。这类方法会限制信号的精细分辨, 随着尺度增大, 小波变换相应正交基函数的频谱局部性就越差。高阶统计是引入偏度和峰度 2 个量去自动识别地震资料从高斯段变为非高斯段的点, 该点即被认为对应地震信号的初至 (Saragiotis *et al*, 2002)。Saragiotis 等 (2002) 为了消除人为因素和噪声对震相检拾的影响, 提出运用高阶统计学的方法来检拾震相。这类方法对波形清晰程度的要求高, 检拾结果稳定性不算理想。复合方法则是把 2 种或 2 种以上的方法联合使用, 进而获取更好的结果 (Bai, Kennett, 2000)。Bai 和 Kennett (2000) 提出将能量分析方法、瞬时频率分析方法、自回归分析方法等结合起来检拾震相。这类方法在一定程度上弥补了单一算法的缺陷, 权衡考虑各方面因素, 得到较完善精确的结果。综上所述, 本文采用复合方法自动识别 P 波到时。

本文借鉴国内外 P 波震相自动识别的相关研究, 以云南地区的地震数据为基础, 提出一套可实时处理 P 波震相的复合方法, 即 STA/LTA 和贝叶斯 BIC 双步骤检拾法。应用此方法对所选取的云南强震动台网观测记录进行 P 波自动精确识别, 并通过比较此方法与人工检拾方法的实测结果, 以确定 STA/LTA 和贝叶斯 BIC 双步骤检拾法的识别精度是否满足地震预警对时效性与准确度的要求。

1 基于 STA/LTA 和 BIC 算法的 P 波震相自动检拾研究

1.1 P 波震相特征函数

震相在地震图上显示为性质不同或传播路径不同的地震波组。各种震相在到时、波形、振幅、周期和质点运动方式等方面都各有特征。在 P 波震相中, 质点沿着波的传播方向运动, 通常在震中距 105° 的范围内, P 波震相是地震图上的初至震相。

对地震记录来说, P 波在垂直向的特征明显, 一般在地震波 P 波初动点的幅值和频率会明显发生变化, 在大多数情况下, 可以观察到一个明显的向上或向下的脉动, 由此可判定 P 波初动点。所以用于识别 P 波震相的特征参量必须能够反映这些变化趋势, 才能准确地识别 P 波震相 (毛燕

等, 2011)。选取特征函数是为了使用 STA/LTA 震相识别方法时, 引入一个新的时间序列 $CF(i)$ 来反映原始记录信号的变化特征, 以此为基础再计算 STA/LTA 值。特征函数的选取对识别结果精度至关重要, 它必须能灵敏地反映信号到达时的频率或幅值特征变化, 甚至能增强这些变化。为了将 P 波的特征尽量放大, 本文使用 Allen (1978) 所提出的特征函数进行波相特征放大处理:

$$CF_p = x_{ud}(k)^2 + [x_{ud}(k) - x_{ud}(k-1)]^2 \quad (1)$$

式中: CF_p 表示 P 波拾拾的特征函数; $x_{ud}(k)$ 为第 k 时刻竖向的速度记录。使用 (1) 式主要是考虑到 P 波作为纵波, 在传递的过程中应该保持其传播方向与振动方向一致, 故而采用垂直记录上的变化去体现 P 波的特征。

1.2 STA/LTA + BIC 双步骤拾拾法

STA/LTA + BIC 双步骤拾拾法主要是将常用的长短时平均算法 (STA/LTA) 与目前国际上较受关注的贝叶斯分割算法 (BIC) 结合起来对地震 P 波震相进行精确拾拾, 确定出一种性能稳定、准确度高、可应用于地震预警系统中 P 波震相自动判别的方法。

1.2.1 STA/LTA 拾拾

长短时平均 (STA/LTA) 算法是地震预警中最常用的拾拾 P 波到时方法, 这种方法反应了幅值的瞬时变化。STA 表征信号短时平均值, 主要反映信号幅值瞬时的变化; LTA 表征信号长时平均值, 主要反映相对于待检信号的背景噪声平均水平。STA 比 LTA 变化快很多, 该算法通过 STA 与 LTA 之比反映信号水平或者能量的变化。当地震信号到达时, STA/LTA 值会出现明显增大, 当该比值大于预先所设定的阈值, 其对应的时刻点则被认为是 P 波的初动点。

STA/LTA 的计算值体现了长短时窗内的能量比, 本文应用时间窗的拾拾公式为 (Allen, 1982):

$$STA(i)/LTA(i) = \frac{\sum_{k_1}^i CF_p(i)/(i - k_1 + 1)}{\sum_{k_2}^i CF_p(i)/(i - k_2 + 1)} \quad (2)$$

式中: $STA(i)$ 和 $LTA(i)$ 分别表示 P 波信号在 i 时刻的短时和长时平均值; $CF_p(i)$ 为 P 波信号在 i 时

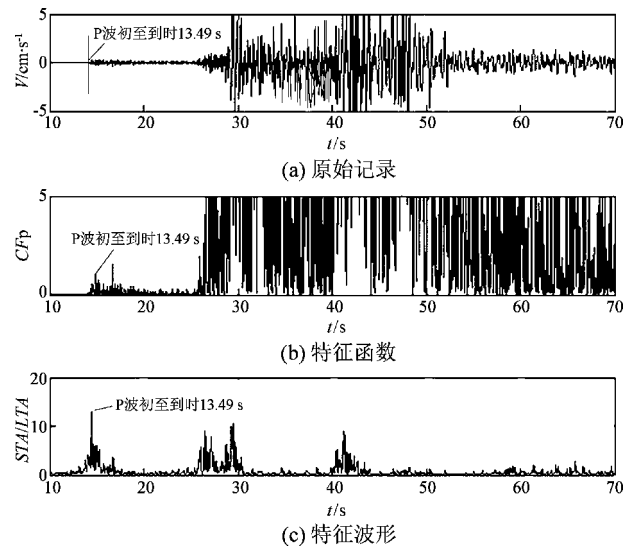


图1 对2014年云南景谷M6.6地震时
景谷永平台记录使用STA/LTA方法
拾拾到的P波到时

Fig. 1 Pick-up P wave travel time of the Yunnan Jinggu M6.6 earthquake on October 7, 2014 recorded by Yongping station through STA/LTA method

刻的特征函数值; i 为变化时刻点; k_1 和 k_2 均为变化时刻前某一时点 ($k_2 < k_1 < i$)。

P波到达前后, 记录的幅值变化较大, STA平均值的窗长取值与待测信号的周期相关, 决定了记录事件是否能够正确触发, 取值太短会误触发, 取值太长会漏触发; 而LTA平均值的窗长取值仅是与信号的背景噪声水平相关, 取值范围相对固定。以2014年10月7日发生的云南景谷M6.6主震中景谷永平台的UD向记录为例, STA和LTA时间窗长的选取对计算结果的精度有较大的影响, 其值的选取需结合特征函数的特点与STA/LTA计算方法来确定, 同时为了准确判定地震事件初动点, 特征函数的阈值通常都会定为10。在本文中, 设定特征函数阈值参数为10, 长窗长取15 s, 短窗长取0.5 s, 即可达到较为理想的拾拾效果。当特征函数值大于10时, 可判定有地震事件发生, 如图1所示, 该记录的P波初动点出现在曲线跳跃点处, 即13.49 s处; 用STA/LTA方法拾拾到的P波也在13.49 s处对应触发。这种以能量变化实现特征拾拾的方法对于地震弱信号适应性较强, 拾拾效果高, 适用于震相清晰、规则型的地震事件。

1.2.2 贝叶斯 (BIC) 信息准则

当前有许多模型选择方法, 如似然法、贝叶斯法和信息准则法等。1973 年统计学家 Hirotugu Akaike 提出 Akaike 信息准则 (AIC) 用来进行模型选择, 对模型信息的发展产生了深远影响, Schwarz (1978) 在此基础上提出了贝叶斯 (BIC) 信息准则。

最大似然准则是一种具有理论性的点估计法, 此方法的基本思想是: 从模型总体随机抽取 n 组样本观测值后, 最合理的参数估计量以观测值出现的概率最大为最大估计准则。而模型选择问题即是从 K 个候选模型 $M = \{M_i; i = 1, 2, \dots, K\}$ 中选出一个最能表示给定 N 个数据 $X = \{X_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ 分布的模型选择问题。BIC 准则是一种基于模型复杂度惩罚机制的渐进最大似然准则, 用来解决模型选择问题 (薛昊, 2010)。

假设数据集 X 对于每个模型 M_j 的最大似然式为 $L(x, M_j)$, k_j 为模型 M_j 的参数个数, 那么模型 M_j 的 BIC 计算式可用 (3) 式表示:

$$BIC(M_j) = \lg L(x, M_j) - \frac{1}{2} \lambda k_j \lg(N) \quad (3)$$

式中: 对数似然函数 $\lg L(x, M_j)$ 反映了模型精确度, 它可以测量效率参数化模型的预测数据, 也可用来选择集群数量内出现的一个特定数据集; λ 为惩罚因子; $\lambda k_j \lg(N)$ 反映了对模型复杂度的惩罚, 它可提高模型的灵活性, 满足规则内的惩罚需求 (薛昊, 2010)。

由于样本数据的似然值会随着模型参数的增加而增加, 单纯采用极大似然估计会造成模型参数过多、维数过大, 所以我们在 BIC 准则中引入了对模型复杂度的惩罚。由 (3) 式使 BIC 计算取得最大值得模型, 即为基于贝叶斯信息准则的最优模型:

$$M^0 = \arg \max_{j=1,2,\dots,k} BIC(M_j) \quad (4)$$

1.2.3 BIC 算法流程

在波形图中, 并不是只会出现单一的分割点, 很多时候, 会有多个分割点出现, 为了得到最优分割点, 本文采用贝叶斯准则中顺序检测算法逐个找出分割点, 最后得到分割点的最大值, 确定 P 波震相的精确到时。具体流程如图 2 所示。

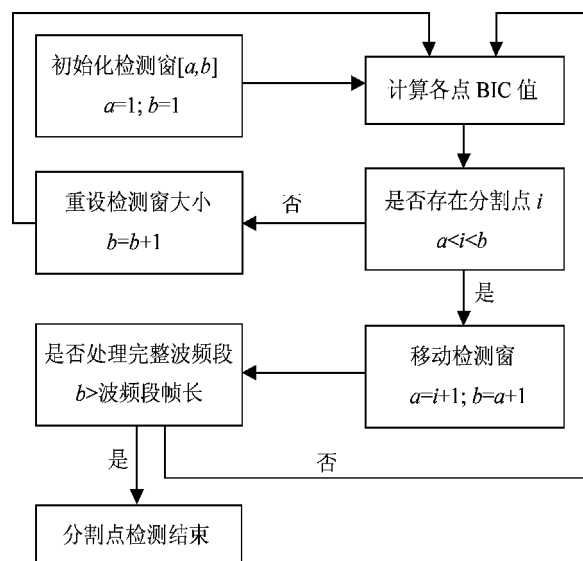


图 2 BIC 检测整段波形的算法流程

Fig. 2 BIC detection for the waveform algorithm process

图 2 中, 首先是初始化检测窗 $[a, b]$, 且 $a = 1$; $b = 1$ 。这一步骤表明视窗一开始仅包含 2 个样本点 a 和 b 。接着开始进行 BIC 检测 $[a, b]$ 窗内是否存在分割点, 不存在分割点时, 对检测窗窗长增加 1, 即令 $b = b + 1$, 重新开始 BIC 检测分割点; 存在分割点时, 则移动检测窗, 即 $a = i + 1$; $b = a + 1$, i 为分割点, 读取该分割点值并按顺序逐步增加检测窗长度, 直至整个完整波频段检测结束。

从整个算法的流程可看出, 算法的时间复杂度和分割点数有关, 虽然 BIC 的检测精度很高, 但其在检测过程中计算量非常大。

从长短时平均 (STA/LTA) 方法的检拾效果来看, 其算法简单、稳定快速, 主要缺点是检拾到的 P 波到时往往比实际到时滞后。而贝叶斯 (BIC) 方法检拾精度高、稳定可靠, 但其检拾 P 波到时需要对整个完整波频按顺序逐步检测分割点, 最后才能判定出所有分割点的最大值, 确定出 P 波到时。因此, 如果采用 STA/LTA 粗略检拾到 P 波到时后, 缩小检测范围, 再用 BIC 准则进行 P 波震相的精确拾取, 比在整条地震记录图上直接应用 BIC 准则要更快, 精度与直接应用 BIC 准则检拾相同。

1.2.4 BIC 在 P 波检拾中的应用

假设 $X = x_i \in R^d, i = 1, 2, \dots, N$ 为一段由基于帧的 N 个强震动记录特征向量序列, d 为特征向量的维数, 且其中至多存在一个波频分割点。由于

地震波同段波频流的特征向量序列服从多元高斯分布, 因此判定帧 $i \in (1, N)$ 是否为波频分割点的问题就可以转换为对模型的选择问题。常用的模型有 2 种: 一种是在模型 M_1 中 X 整体上服从单一高斯分布, 即 $X = x_1, x_2, \dots, x_N \sim N(\mu, \Sigma)$; 另一种是在模型 M_2 前 i 个序列服从某一高斯分布 $X = x_1, x_2, \dots, x_N \sim N(\mu_1, \Sigma_1)$, 后 $N-i$ 个序列服从另一高斯分布 $X = x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_N \sim N(\mu_2, \Sigma_2)$ 。

对于多元高斯分布 $N(\mu, \Sigma)$, 当

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ \Sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T \end{cases} \quad (5)$$

对数似然函数 $\lg L(x, M_j)$ 取得最大值, 其中 μ 为高斯分布中均值的最大似然估计, Σ 为高斯分布中协方差矩阵的最大似然估计。

在 R^d 多维空间中, 均值向量 μ 的参数个数为 d ; 协方差矩阵 Σ 是对称矩阵, 它的未知参数个数为:

$$1 + 2 + \dots + d = \frac{d(d+1)}{2} \quad (6)$$

由 (6) 式可推出, 模型 M_1 中的未知参数个数为 $d + 1/2d(d+1)$, 即 $k_1 = d + 1/2d(d+1)$; 模型 M_2 中的未知参数个数为 $2[d + 1/2d(d+1)]$, 即 $k_2 = 2[d + 1/2d(d+1)]$, 因此由式 (3) 可得:

$$BIC(M_1) = -\frac{d}{2} N \lg 2\pi - \frac{N}{2} \lg |\Sigma| - \frac{N}{2} - \frac{1}{2} \lambda \left[d + \frac{1}{2} d(d+1) \right] \lg N \quad (7)$$

$$BIC(M_2) = -\frac{d}{2} N \lg 2\pi - \frac{i}{2} \lg |\Sigma_1| - \frac{N-i}{2} \lg |\Sigma_2| - \frac{N}{2} - \lambda \left[d + \frac{1}{2} d(d+1) \right] \lg N \quad (8)$$

令 $\Delta BIC(i)$ 为 (8) 式与 (7) 式之差, 则

$$\Delta BIC(i) = BIC(M_2) - BIC(M_1) \quad (9)$$

最后推出:

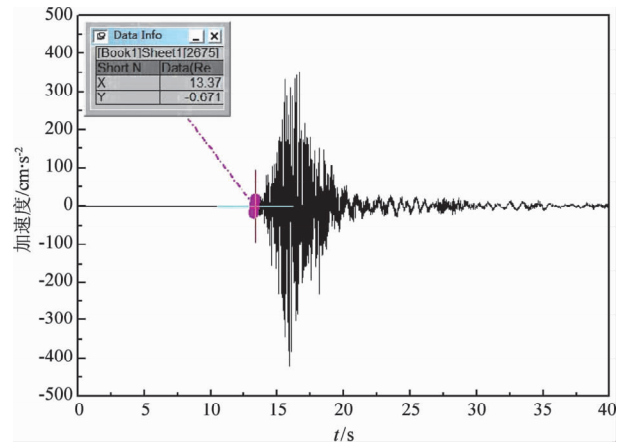
$$\Delta BIC(i) = \frac{1}{2} \left\{ N \lg |\Sigma| - i \lg |\Sigma_1| - (N-i) \lg |\Sigma_2| - \lambda \left[d + \frac{1}{2} d(d+1) \right] \lg N \right\} \quad (10)$$

其中: Σ 、 Σ_1 、 Σ_2 分别为高斯分布 $N(\mu_1, \Sigma)$ 、 $N(\mu_1, \Sigma_1)$ 、 $N(\mu_1, \Sigma_2)$ 中关于协方差矩阵的最大似然估计。

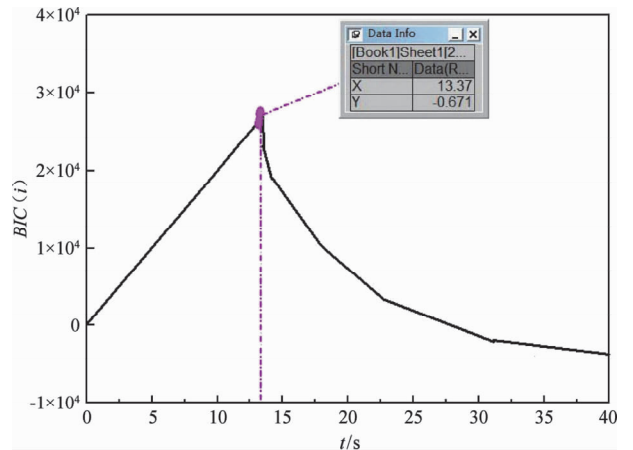
$\Delta BIC(i) > 0$ 时, 表明 $BIC(M_2) > BIC(M_1)$, 即模型 M_2 优于模型 M_1 , 当 $\Delta BIC(i)$ 的取值为最大值, 则认为这是最优分割点 i , 最终使 $\Delta BIC(i)$ 取得最大值得帧 i 为 P 波震相到时点。

$$i = \operatorname{argmax}_{1 < i < N; \Delta BIC > 0} \Delta BIC(i) \quad (11)$$

使用 BIC 准则方法拾拾 2014 年云南景谷 M6.6 主震中景谷永平台站 UD 向记录的 P 波到时, 获得结果如图 3 所示。图 3a 描述了在该加速度时程曲线中, P 波到时相对于记录起始时刻是 13.37 s; 图 3b 描述了采用 BIC 拾拾 P 波震相变化中 $\Delta BIC(i)$



(a) 加速度时程曲线



(b) BIC 拾拾 P 波震相到时曲线

图 3 对 2014 年云南景谷 M6.6 地震中景谷永平台的记录使用 BIC 方法拾拾到的 P 波到时
Fig. 3 Pick-up P wave travel time of the Yunnan Jinggu M6.6 earthquake on 2014 recorded by Yongping station through BIC method

的取值为最大值时所对应的 i 值为 13.37 s, 即 BIC 拾 P 波到时为 13.37 s。

人工拾景谷永平台 UD 向记录 P 波到时为 13.40 s, STA/LTA 自动拾拾结果为 13.49 s, 比人工拾拾结果滞后 0.09 s; BIC 自动拾拾结果为 13.37 s, 比人工拾拾结果提前 0.03 s。

1.3 STA/LTA + BIC 双步骤拾拾的工作流程

STA/LTA + BIC 双步骤拾拾法的工作流程如图 4 所示, 强震仪的阈值产生触发事件时, 实时数据的特征函数可直接采用 (1) 式计算特征函数值; STA/LTA 粗略拾 P 波到采用 (2) 式计算; BIC 精确拾 P 波到采用 (11) 式计算。首先根据特征函数计算结果, 对记录波形展开 P 波粗略拾拾, 应用 STA/LTA 长短时平均法检测或报警触发事件, 当 STA/LTA 刻画出记录幅值的瞬时变化时, 立刻判别 P 波阈值是否触发, 若是 STA/LTA 计算结果超过常数阈值 THR, 则认为是地震事件, 进入下一步精确拾拾; 反之则是干扰事件, 拾拾工作及时结束。本方法对地震事件 P 波的精确拾拾采用 BIC 自动拾拾法, 其拾拾结果作为最终的 P 波到成为地震预警的重要参数。

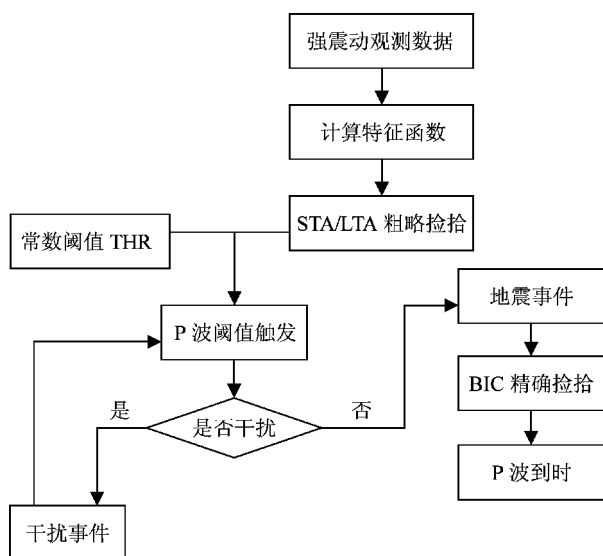


图 4 STA/LTA + BIC 双步骤拾拾法的工作流程

Fig. 4 The workflow for STA/LTA and BIC double-step pick-up method

归纳 STA/LTA + BIC 双步骤拾拾法的基本步骤主要有 2 点: (1) 先用 STA/LTA 法粗略拾 P 波到; (2) 以粗略到点为基准, 前后各推 0.5 s, 在此范围内使用 BIC 准则进行精确拾拾。

2 实际算例分析

根据本文对震相拾拾方法的原理介绍与工作流程, 对云南省数字强震动台网记录的 17 次 $M_L \geq 5.0$ 地震事件进行 STA/LTA + BIC 双步骤自动拾拾, 拾拾记录均来自震中距在 100 km 范围内的强震动台站记录。

2.1 数据选取

本文所用数据来自于云南省数字强震动台网获取的强震记录, 包括了 2008—2014 年 17 次 $M5.0 \sim 7.0$ 地震事件, 涵盖了云南盈江、腾冲、彝良、洱源、景谷等地震多发区域。对 P 波震相而言, 其在竖直向的幅值变化较大, 我们对地震动记录进行初次人工筛选, 剔除丢头、叠加等波形异常的强震记录, 选取震中距在 100 km 以内、P 波在竖直向相对突出的竖向原始加速度时程记录 173 个, 并对数据进行预处理。筛选后的各地区的加速度时程记录数量分布如表 1 所示。

2.2 实际拾拾情况分析

如表 1 所示, 台网内选取这 17 个地震事件的记录, 有 9 个震中距在 100 km 内的记录出现漏检, 其它记录拾拾工作正常。分析原因发现, 其中有 4 个记录人工拾拾也无法分辨 P 波时, 2 个记录中的地震波形有其他小震的干扰叠加, 其余 3 个原因不明。

表 2 中, STA/LTA 拾拾与人工拾拾的 P 波到时平均差值为 0.698 s, 标准差值为 0.531 s; STA/LTA + BIC 拾拾与人工拾拾的 P 波到时平均差值为 0.091 s, 标准差值为 0.156 s。从地震系统的工作要求而言, STA/LTA 拾拾结果误差相对较大, 其精确度可达到地震烈度速报的工作要求; STA/LTA + BIC 拾拾结果误差相对很小, 其精确度能够达到地震预警系统的工作要求。

图 5 显示了 STA/LTA 自动拾拾与人工拾拾 P 波到时结果的偏差分布, 可以看出, STA/LTA 自动拾拾 P 波到时的偏差基本以正数为主, 最大偏差将近 2.0, 其拾拾结果通常大于人工拾拾结果, 即其对 P 波到时的自动拾拾往往存在滞后的现象。图 6 表示了 STA/LTA + BIC 自动拾拾与人工拾拾 P 波到时结果的偏差分布, 可以看出, STA/LTA + BIC 自动拾拾 P 波到时的偏差均匀分布在 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, 以 $0 \sim 0.2$ 之间的分布最广。该方法对

表 1 STA/LTA + BIC 双步骤检拾法自动检拾 P 波结果

Tab. 1 The automatic – pickup P – wave results by STA/LTA + BIC two – step pick – up method

发震时间	发震地点	震级 (<i>M</i>)	实际 记录 个数	可用 记录 个数	震中距 100 km 内漏检 记录个数
2011 – 03 – 10 12:58:11	盈江	5.9	3	2	0
2011 – 06 – 20 18:16:50	腾冲	5.3	17	11	1
2011 – 08 – 09 19:50:16	腾冲	5.2	20	13	1
2012 – 06 – 24 15:59:32	宁蒗	5.7	7	4	0
2012 – 09 – 07 11:19:41	彝良	5.7	13	11	1
2012 – 09 – 07 12:16:29	彝良	5.6	15	11	2
2013 – 03 – 03 13:41:15	洱源	5.5	29	21	1
2013 – 04 – 17 09:45:54	洱源	5.0	20	19	1
2013 – 08 – 31 08:04:14	香格里拉	5.9	4	1	0
2014 – 08 – 03 16:30:10	鲁甸	6.5	48	16	1
2014 – 04 – 05 06:40:32	永善	5.3	5	5	0
2014 – 05 – 24 04:49:21	盈江	5.6	8	4	0
2014 – 05 – 30 09:20:13	盈江	6.1	11	5	0
2014 – 10 – 07 21:49:39	景谷	6.6	36	19	0
2014 – 12 – 06 02:43:44	景谷	5.8	23	16	0
2014 – 12 – 06 18:20:00	景谷	5.9	23	13	1
总计			282	171	9

表 2 2 种方法自动检拾结果与人工检拾结果
的平均偏差和标准差

Tab. 2 The mean deviation and standard deviation of P wave travel time between two automatic collecting methods and artificial collecting

自动检拾方法	平均偏差/s	标准差/s
STA/LTA	0.698	0.531
STA/LTA + BIC	0.091	0.156

P 波到时的自动检拾结果与人工检拾结果吻合。综上所述，采用 STA/LTA + BIC 自动检拾 P 波到时的结果与人工检拾 P 波到时结果偏差很小，误差不超过 0.5。

2.3 震中距对 P 波到时准确度及时效性的影响

为了研究震中距是否会影响地震 P 波震相到时的准确程度，我们统计了人工判别、STA/LTA 和 STA/LTA + BIC 自动判别 3 种检拾结果，将记录台站的震中距范围扩大至 0 ~ 160 km，具体变化如图 7 所示。由图 7 可见，采用 STA/LTA + BIC 自动

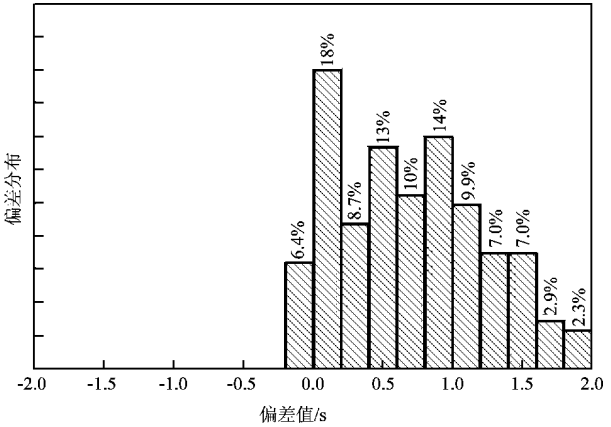


图 5 STA/LTA 自动检拾与人工检拾
P 波到时偏差分布

Fig. 5 Distnubtion of deviation of P – ware travel time between STA/LTA automatic method and artificial collecting

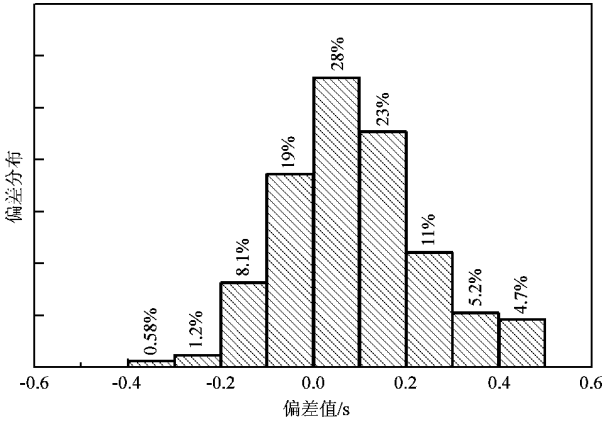


图 6 STA/LTA + BIC 自动检拾与人工检拾
P 波到时偏差分布

Fig. 6 Distribution of deviation of P – wave travel time between STA/LTA + BIC two steps pick – up method and artificial collecting

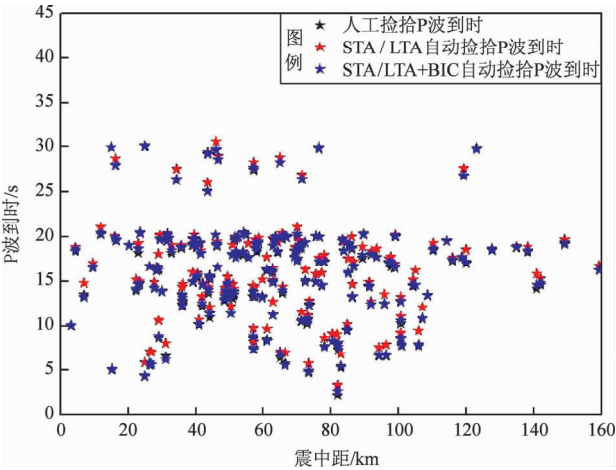


图 7 不同震中距使用 3 种方法检拾 P 波到时对比
Fig. 7 Comparison of P – wave travel time among three collecting methods in different epicentre distance

判别方法与人工捡拾方法的捡拾结果几乎是完全吻合的,而 STA/LTA 自动判别方法捡拾的结果有延时滞后现象产生。同样,将 STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时的偏差与震中距的变化分布绘制成图 8,其结果与图 6 相符,无论震中距如何变化,采用 STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时的偏差都很小。由此可见,震中距远近对 P 波到时的准确程度没有任何影响,采用合适的捡拾方法才能提高捡拾结果的精确度。

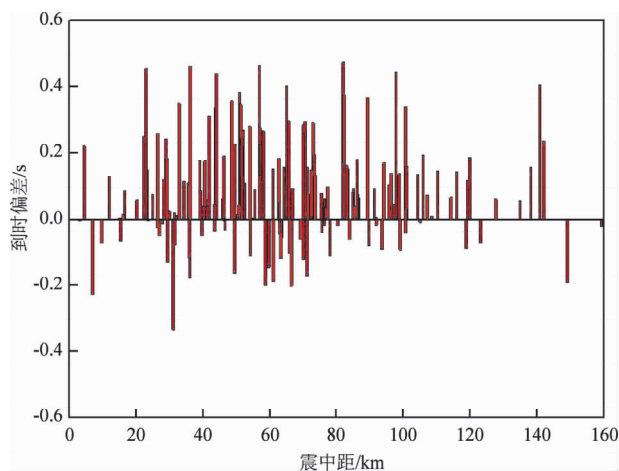


图 8 STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时
偏差与震中距的对应关系

Fig. 8 Corresponding relation of deviation of P - wave
travel time by STA/LTA + BIC two - steps method
and epicentre distance

为了得到不同震中距下采用 STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时的速度,本文引入速度节奏来显示捡拾速度,即规定一个节奏值,每个数据捡拾的用时以规定节奏值相应的倍数表示,这样就能通过不同的节奏数值看出每个数据的捡拾用时长短,进而推断出 P 波传播于不同介质时的速度变化。如图 9 所示,采用 STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时速度节奏随震中距的变化是逐渐增大的。究其原因,可能是随着震中距逐渐增大,不同场地介质会对 P 波传播速度及方向产生改变,影响后续对 P 波震相识别的速度。

综上所述,震中距的远近对 P 波震相识别的精度没有影响,P 波到时捡拾结果的准确程度取决于采用方法是否适合;但震中距的远近对 P 波震相识别用时长短有一定影响,随着震中距逐渐增大,自动捡拾 P 波初至的耗时也会呈逐渐增长趋势。

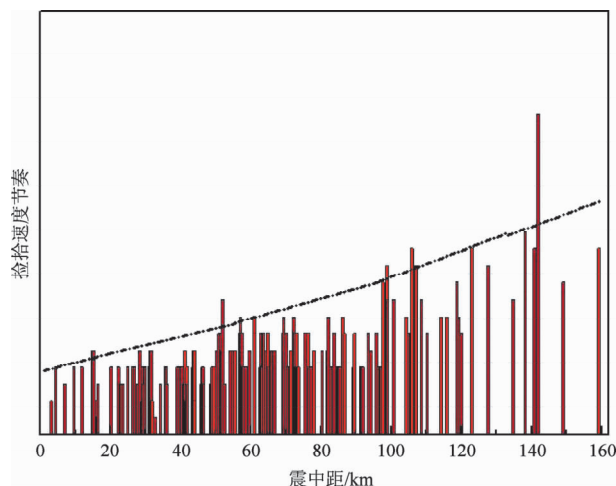


图 9 STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时
速度节奏随震中距的变化

Fig. 9 Velocity rhythm of automatic collecting P wave
travel time varied with epicentral distance by
STA/LTA + BIC two - steps method

3 讨论与结论

本文借鉴了国内外 P 波震相自动识别的相关研究,以云南地区的地震数据为基础,提出一套可实时处理 P 波震相的方法,即 STA/LTA 和贝叶斯 BIC 双步骤捡拾法。应用此方法对所选取的云南强震动台网观测记录进行 P 波自动精确识别,并与人工捡拾方法的实测结果进行比较,得到以下结论:

(1) STA/LTA 自动捡拾与人工捡拾 P 波到时的偏差基本以正数为主,最大偏差将近 2.0 s,其捡拾结果通常大于人工捡拾结果,即其对 P 波到时的自动捡拾往往存在滞后的现象。STA/LTA + BIC 自动捡拾 P 波到时的偏差在 0.0 值上下均匀分布,主要分布在 $-0.2 \sim 0.2$ s 之间,最大偏差也超不过 0.5 s,该方法其对 P 波到时的自动捡拾结果与人工捡拾结果接近吻合。

(2) 长短时平均 (STA/LTA) 方法捡拾速度快;贝叶斯 (BIC) 方法精确度高。因此,在用 STA/LTA 粗略捡拾到 P 波后,再用 BIC 准则进行 P 波震相的精确拾取,从地震预警的实时性与时效性要求来看,效果比在整条地震记录图上直接应用 BIC 准则要好。

(3) 通过大量数据实际验证,P 波特征函数触发阈值设为 10 较合适。阈值小于 10 误判率会增高,

阈值大于10漏检率也会增高。进行P波到时检拾时,信噪比高检拾结果理想,若是其中有噪声等干扰信号影响,检拾质量会受到很大影响。

(4)采用P波震相自动检拾方法,结果虽然具有较高的精度,但对S波震相自动检拾并未尝试,可在下一步工作中继续研究S波震相自动检拾。

通过对比分析,STA/LTA与BIC相结合的P波到时检拾方法不但利用了STA/LTA稳定可靠的特点,在初步检拾点的附近选取一个恰当的时间窗包含P波震相初至过程,再以这个合适的时间窗进一步开展BIC准则精确检拾,检拾结果稳定可靠,准确性高。STA/LTA和贝叶斯BIC双步骤检拾法的识别精度能够达到地震预警的要求,可作为云南地区预警系统建设的参考。

参考文献:

陈少波. 2015. 地震预警系统的P波震相自动识别方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

高淑芳,李山有,武东坡,等. 2008. 一种改进的STA/LTA震相自动识别方法[J]. 世界地震工程,24(2):37-41.

刘建华,刘福田,胥颐. 2006. 三分量地震资料的偏振分析[J]. 地球物理学进展,21(1):6-10.

刘希强,周蕙兰,李红. 2000a. 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,22(2):143-146.

刘希强,周蕙兰,沈萍,等. 2000b. 用于三分向记录震相识别的小波变换方法[J]. 地震学报,32(2):125-131.

刘希强,周蕙兰,郑治真,等. 1998. 基于小波包变换的弱震相识别方法[J]. 地震学报,20(4):373-380.

马强. 2008. 地震预警技术研究及应用[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

毛燕,崔建文,郑定昌,等. 2011. 地震记录的P波自动检拾[J]. 地震研究,34(1):47-51.

史洪山. 2012. 地震预警震级测定技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

王继,陈九辉,刘启元,等. 2006. 流动地震台站观测初至震相的自动检测[J]. 地震学报,28(1):42-51.

薛昊. 2010. 基于BIC的通用音频分割方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.

尹得余. 2012. P波震相自动检拾与地震预警震级实时测定技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

周彦文. 2008. 基于单台P波记录的早期地震预警方法研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.

ALLEN R E. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,68(5):1521-1532.

ALLEN R E. 1982. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,72

(6B):225-242.

AMBUTER B P, SOLOMON. 1974. An event - recording system for monitoring small earthquakes[J]. Bulletin of Seismological Society of America,64(4):1181-1188.

ANDERSON K R. 1981. Epicentral location using arrival time order[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,70(2):541-545.

BAER M, KRADOLFER U. 1987. An Automatic phase picker for local and teleseismic[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,72(4):1437-1445.

BAI C Y, KENNETT B L N. 2000. Automatic phase - detection and identification by full use of a single three - component broadband seismogram[J]. Bulletin of Seismological Society of America,90(1):187-198.

CHAKRABORTY A, OKAYA D. 1995. Frequency - time decomposition of seismic data using wavelet - based methods[J]. Geophysics,60(6):1906-1916.

TONG C, KENNETT B L N. 1996. Auto seismic event recognition and later phase identification for broadband seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,86(6):1896-1909.

CICHOWICZ A R. 1993. An automatic S - phase picker[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,83(1):180-189.

DAI H C, MACBETH C. 1995. Automatic picking of seismic arrivals in local earthquake data using an artificial neural network[J]. Geophysical Journal International,120(3):758-774.

DAI H C, MACBETH C. 1997. The application of back - propagation neural network to automatic picking seismic arrivals from single - component recordings[J]. J Geophys Res,102(B7):15105-15113.

EARLA P. 1999. Polarization of the Earth's teleseismic wave field, Geophys [J]. J Int,139(1):1-8.

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

FLINN E. 1965. Signal analysis using recti linearity and direction of particle motion[J]. Proc IEEE 53:1874-1876.

JUKEVICS A. 1988. Polarization analysis of three - component array data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,78(5):1725-1743.

KANWALDIP A S, FARID U D. 1997. Wavelet transform methods for phase identification in three - component seismograms[J]. Bull Seism Soc Amer,87(6):1598-1612.

LEONARD M, KENNETT B L N. 1999. Multi - component autoregressive techniques for the analysis of seismograms[J]. Phys Earth Planet Interiors,113(1-4):247-264.

LEONARD M. 2000. Comparison of manual and automatic onset time picking[J]. Bull Seism Soc Am,90:1384-1390.

MAEDA N. 1985. A method for reading and checking phase times in auto - processing system of seismic wave data[J]. The Seismological Society of Japan,38:365-379.

MAO W, GUBBINS D. 1995. Simultaneous determination of time delays and stacking weights in seismic array beam forming[J]. Geophysics,60

- (2):491–502.
- MCEVILLY T V, MAJER E L. 1982. An automated seismic processor for micro earthquake network[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(1):303–325.
- MURAT M E, RUDMAN A J. 1992. Automated first arrival picking: a neural network approach[J]. *Geophysics Prospecting*, 40(6):587–604.
- SARAGIOTIS C H D, HADJILEONTIADIS L J, PANAS S M P. 2002. AI-S/K: a robust automatic seismic P-phase arrival identification scheme[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(6):1395–1404.
- SCHWARZ E G. 1978. Estimating the dimension of a model[J]. *Annals of Statistics*, 6(2):461–464.
- SLEEMAN R. 1999. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband Seismogram recordings[J]. *Phys Earth Planet Interiors*, 113:265–275.
- STEVENSON P S. 1976. Micro earthquakes at flathead lake, Montana: a study using automatic earthquake processing[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(1):1–80.
- SWINDELL H, SNELL N. 1977. Station Processor Automatic Signal Detection System, Phase I: Final Report, Station Processor Software Development[J]. *Texas Instruments Report*, ALEX(01)–FR–77–01.
- VERNON F L. 1987. Frequency dependent polarization analysis of high-frequency seismograms[J]. *Journal of geophysical research*, 92(B12):664–674.
- VIDALE T. 1986. Complex polarization analysis of particle motion[J]. *Bull Seism Soc Am*, 76(5):1393–1405.
- WANG J, TENG T L. 1995. Artificial neural network-based seismic detector[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(1):308–319.
- ZHAO Y, TAKANO K. 1999. An artificial neural network approach for broadband seismic phase Picking[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(3):70–680.
- ZHANG H, THURBER C, ROWE C. 2003. Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5):1904–1912.

Research on Double-steps Pickup of STA/LTA and Bayes BIC Rule Applied to Travel Time of P-wave in Strong Earthquake Early Warning

YANG Liwei¹, QIU Zhigang², LIN Guolinag¹, WANG Yushi³

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *School of Urban and Rural Construction & Engineering Management, Kunming University, Kunming 650214, Yunnan, China*)

(3. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract

Used the domestic and overseas researches of P wave seismic phase identification for reference, a real-time processing method for P wave seismic phase identification is proposed based on seismic data of Yunnan area. The method is STA/LTA + BIC two-step pick-up method, by which the selected records of P wave from Yunnan Strong Motion Observation Network were accurately and automatically identified. The differences between this method and the artificial pick-up method were compared and analyzed. The results shows that the precision of STA/LTA + BIC two-step pick-up method can meet the rapid accurate earthquake warning requirement.

Keywords: earthquake early warning; P-wave; strong earthquake records; STA/LTA; BIC rule; double-steps to pick up