

# 地震预警中的动态地震定位方法研究及应用\*

王庆民<sup>1</sup>, 刘希强<sup>1</sup>, 沈得秀<sup>2</sup>, 沙成宁<sup>3</sup>

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 山东省地震工程研究院, 山东 济南 250021;  
3. 青海省地震局, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 使用2009~2011年山东地震台网记录到的71次网内地震波形资料, 采用2个地震台站的到时差所构造的震中轨迹近似满足双曲线方程, 并结合单台测定的方位角及震中距信息, 使用Voronoi图对震中位置加以约束的技术思路, 实现地震定位精度的逐步提高。与山东地震台网观测报告给出的震中位置进行对比分析, 结果表明: 单台定位平均误差为18.3 km, 双台定位平均误差为16.6 km, 三台定位平均误差为10.7 km。

**关键词:** Voronoi图; 地震定位; 双曲线方程; 山东地震台网

**中图分类号:** P315.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)04-0485-05

## 0 引言

地震预警技术在我国甚至世界上都是一个较新的研究领域, 特别是快速地震定位技术, 是地震预警技术的核心之一。只有快速准确地确定震中位置, 并充分利用非破坏性地震波(P波)和破坏性地震波(S波或面波)到达预警目标区的时间差, 对预警目标区域提供预警响应, 以便采取必要的应急措施, 以达到防灾减灾、保护人民生命和财产安全的目的。

地震预警主要是利用P波和S波的到时差来达到预警的目的, 所以对时效性的要求非常高, 而传统的多台多震相定位方法虽然精度高, 但它的计算响应时间太长, 无法满足地震预警的需求。为了解决地震预警中时效性与定位精度之间的矛盾, 国内外很多学者进行了这方面的研究工作(董鹏聪, 2006; 马强, 2008; Rosenberger, 2009; 王庆民等, 2012)。本文所采取的近实时动态地震定位方法就是利用少数台站实时获得的有限地震信息, 分别计算出方位角、震中距和双曲线, 并利用方位角、震中距和双曲线的相互组合达到用最少的时间获得最高的精度。我们利用此方法对2009~2011年山东地震台网记录到的71次网内地震波形资料进行重新定位, 并与山东地震台网观

测报告给出的震中位置进行对比分析, 以便研究实时动态地震定位方法在地震预警中的应用前景。

## 1 基本方法

实时动态地震定位方法的核心内容就是当地震发生以后, 根据整个地震台网中台站触发的先后顺序, 采用单台触发确定震中所在区域, 双台触发确定震中轨迹所在空间位置, 三台触发确定准确的震中经纬度坐标, 以实现渐进式地震定位的目的, 从而不断提高地震定位精度, 以期解决地震预警中时效性与定位精度之间的矛盾。

举例来说, 当1个有感地震发生以后, 随着地震波在整个地震台网中的传播, 利用有限的台站(一般选取3个台站)记录的P波到时信息, 先将地震震中限定在一个非常有限的区域内, 然后进一步缩小到一个有限的线段上, 最终确定一个比较准确的地震震中经纬度坐标。随着获得的地震信息的不断增加, 将地震定位结果进行实时不间断的修定, 使定位精度逐步提高。在该方法中我们引入了Voronoi图进行强约束, 不但可以控制地震快速定位的精度, 而且可以使定位过程中的数据计算量、预警响应计算时间都减小, 以便获得更长的预警时间, 减小预警盲区。

2010年3月24日12时27分22.7秒在山东省

\* 收稿日期: 2012-12-17.

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAK19B04)和中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH12029)共同资助.

莒南发生  $M_L 1.3$  地震,震中位置 ( $35.248^\circ \text{N}$ ,  $118.836^\circ \text{E}$ ),山东地震台网中的 JUN、TAT 和 JUX 台先后记录到了该次地震,P 波到达这 3 个台站的时间分别为 24.38 s、28.14 s 和 28.19 s。本文以该次地震做为实例,详细解释动态地震定位的技术思路和方法。

### 1.1 利用 Voronoi 图确定地震发生的区域

Voronoi 图目前已广泛应用于图形学、机械工程、虚拟现实、地理信息系统、机器人、图像处理、CAD 等领域,受到人们的广泛关注,也初步应用于地震速报 (Satriano *et al.*, 2008) 和应急管理中。在地震定位中的应用思路就是根据三角形增长算法的原理 (姬安召, 兰燕, 2009) 将测震台站两两相连形成 Delaunay 三角网,同时作连线的中垂线,中垂线相交形成若干个凸多边形,即 Voronoi 图 (也称为泰森多边形)。

其基本思路是把整个地震台网中的每个地震台站都看作 1 个点,寻找每个点的有序目标三角形,而寻找有序目标三角形的常规方法是遍历所有的三角形,找到与该目标点相关的所有三角形。对该有序目标三角形的圆心按空间位置进行顺时针或逆时针排序,然后依次连接圆心就可生成该点的 Voronoi 图 (即这个台站所对应的 V 单元)。而对于整个地震台网来说,需遍历所有点 (地震台站),就可生成包含所有地震台站的整个地震台网的 Voronoi 图。图 1 给出了由山东省虚拟测震台网形成的 Voronoi 图。

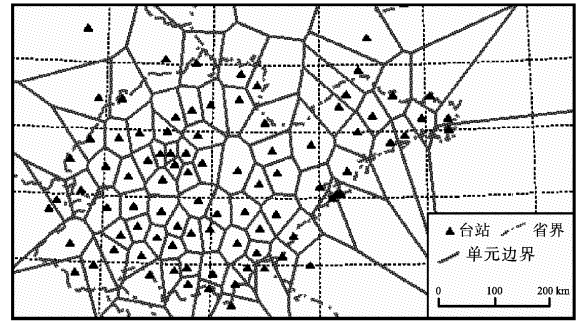


图 1 山东虚拟地震台网建立的 Voronoi 图

Fig. 1 Voronoi diagram established by Shandong Virtual Seismic Network

当地震发生以后,整个地震台网中仅有 1 个地震台站最先记录到该次地震的地震波 (最先到达的是 P 波),根据 Voronoi 图的性质,则可以确定地震震中必位于这个地震台站所生成的 V 单元区域内。

JUN 台最先记录到山东省莒南  $M_L 1.3$  地震,则该地震震中一定位于 JUN 台所在的 V 单元内,也就是由 5 个顶点所围成的凸多边形内。由于确定该地震震中区域仅需要第 1 个台站的 P 波到时,则计算响应时间几乎为 0,如图 2a 所示。

### 1.2 利用单个台站数据对震中进行粗略定位

在传统的地震定位方法中,最简便的定位方法就是利用单台方位角和单台震中距进行地震定位 (田玥, 陈晓非, 2002)。由于单台方位角和震中距的计算误差比较大,所以在地震预警中,

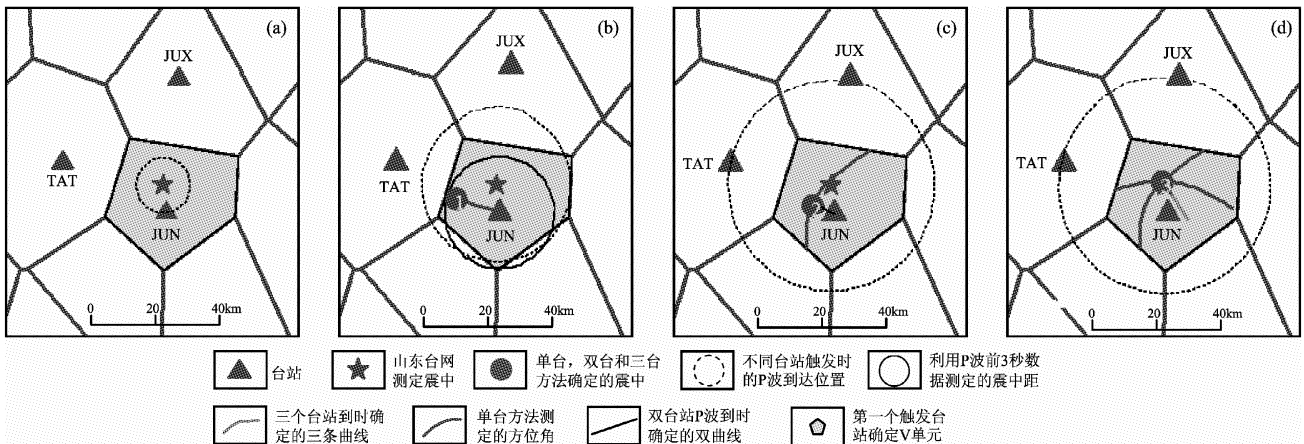


图 2 动态地震定位原理

(a) 单台定位; (b) 双台定位; (c) 三台定位; (d) 动态地震定位示意图

Fig. 2 The principle of dynamic earthquake location

(a) single-station location; (b) double-stations location; (c) three-stations location;

(d) scheme diagram of dynamic earthquake location

引入凸多边进行强约束,使震中距的误差尽可能减小,以便最大限度的减小定位误差。

在地震定位的实际计算中,我们将利用单台记录到的P波前3s波形数据计算单台方位角和震中距,并对地震进行粗定位,其原理如图2b所示。在前面给出的地震实例中,其定位误差为16.17 km(指重新定位后震中位置与地震台网观测报告给出的震中位置之间的距离,不考虑震源深度的影响,下同)。

### 1.3 利用双曲线确定地震震中轨迹所在空间位置

在平面直角坐标系内,到两个定点的距离之差的绝对值为常数(小于这两个定点间的距离)的点的轨迹是双曲线方程。而2个地震台站的P波到时差也近似满足这种双曲线分布规律,符合这一规律的点的坐标 $(x, y)$ 如式(1)所示,它表示的是震中轨迹:

$$\frac{4x^2}{V_p^2(T_2 - T_1)^2} - \frac{4y^2}{4c^2 - V_p^2(T_2 - T_1)^2} = 1. \quad (1)$$

式中,  $V_p$  代表P波速度,  $T_1$  和  $T_2$  分别代表2个台站的P波到时,  $(x, y)$  代表震中轨迹,其原理如图3所示。

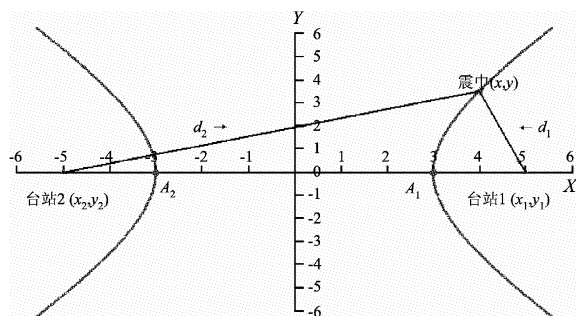


图3 双曲线定位原理

Fig. 3 The principle of hyperbola location

随着地震波继续向震中区域以外快速传播,台网中将有第2个台站记录到地震波,基于双曲线原理,利用两个台站的P波到时差构建震中轨迹方程(Paul, 2004),并使用双曲线方程的1个解代替单台地震定位中的震中距,结合单台测定的方位角信息,对单台地震粗定位结果进行适当修定,其原理如图2c所示。使用该方法对莒南 $M_L 1.3$ 地震实例重新定位的结果显示,定位误差约为8.82 km。

### 1.4 利用多条双曲线确定地震震中经纬度

地震波随着时间继续向震中区域以外传播,当整个地震台网中有第3个台站记录到P波到时信息时,可以使用3个台站相互组合构造3条双曲线方程,通过3条双曲线方程的交点坐标就可以更加准确地确定地震震中位置,并对前面的地震定位结果进一步修定,原理如图2d所示。使用3条双曲线对前面的地震实例进行定位的最终误差约为1.48 km。

由以上实例可知,动态地震定位方法是使用最少的地震信息,以最小的计算响应时间,达到最大的预警时效。由于仅使用先记录到地震的前3个台站的P波到时信息,其时效性是显而易见的,而地震定位精度在不断的修定过程中也达到逐步缩小误差的目的。由此可见,动态地震定位方法是地震预警中比较实用的一种快速定位方法,其地震定位过程如图4所示。

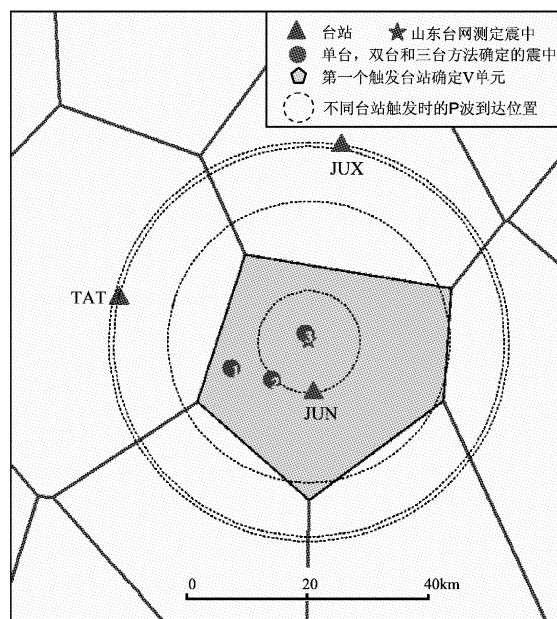


图4 动态地震定位过程

Fig. 4 The process of dynamic earthquake location

## 2 结果分析

我们采用实时动态地震定位方法,对山东地震台网2009~2011年有可靠波形记录的71个网内地震进行了重新定位处理,并将重新定位的结果与山东地震台网观测报告中给出的定位结果进行

对比分析,结果如图 5 和表 1 所示。

由图 5 可以看出,71 个地震震例单台、双台和三台定位的平均误差分别约为 18.7 km (图 5a)、16.6 km (图 5b) 和 10.7 km (图 5c)。因此,随着整个台网中触发台站的增多,地震定位的精度逐渐提高,而定位结果的偏差也逐渐减小。

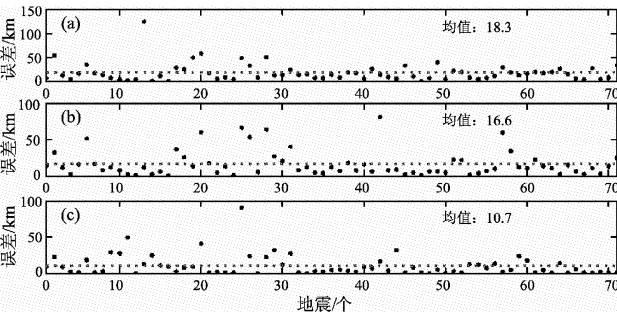


图 5 71 个震例重新定位结果与编目结果偏差  
(a) 单台定位偏差; (b) 双台定位偏差;  
(c) 三台定位偏差

Fig. 5 Deviation between reposition location and cataloging results of 71 earthquake examples  
(a) single-station location bias; (b) double-station location bias; (c) three-station location bias

表 1 71 个震例的定位精度统计结果

Tab. 1 Statistical results of positioning accuracy of the selected 71 earthquake cases

精度	单台定位 震例数	百分比	双台定位 震例数	百分比	三台定位 震例数	百分比
I	7	9.86%	16	22.54%	37	52.11%
II	20	28.17%	15	21.13%	10	14.08%
III	8	11.27%	15	21.13%	11	15.49%
IV	36	50.7%	25	35.21%	13	18.31%

注: I 类: 震中误差≤5 km; II 类: 5 km<震中误差≤10 km; III 类: 10 km<震中误差≤15 km; IV 类: 震中误差>15 km。

表 1 给出了 71 个震例重新定位后的精度分析,从表可知,随着记录地震波台站数的增加,获取的地震信息量也在增加,定位精度也得到了显著

的提高, I 类定位精度从单台定位时的 9.86% 提高到了三台定位时的 52.11%, 提高了 42.25%, 地震数增加了约 30 个。而 IV 类定位精度由单台定位时的 50.7% 下降到三台定位时的 18.31%, 下降了 32.39%, 地震个数减少了约 23 个。说明动态定位方法是地震预警中比较理想的快速定位方法。

3 结论和讨论

我们使用动态地震定位方法对山东地震台网记录到的 71 个地震震例进行重新定位。从重新定位的结果来看,可以得到以下结论:

- (1) 采用的动态地震定位方法能够在保证一定的定位精度的前提下,提供更多的地震预警时间。
- (2) 引入 Voronoi 图的强约束在实际应用是比较有效的,但是当地震恰好位于 V 图边界上时,由于加入了强约束条件则会使定位误差变大,这种特殊情况须增加更多的约束信息来进行进一步分析。

参考文献:

董鹏聪. 2006. 地震预警中震源参数的快速确定研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

姬安召, 兰燕. 2009. 三角形增长算法构建 Delaunay 三角网 DEM 的原理与实现[J]. 测绘, 32(2): 65-69.

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.

田玥, 陈晓非. 2002. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展, 17(1): 147-155.

王庆民, 刘希强, 沈得秀. 2012. Voronoi 图和双曲线联合方法在地震快速定位中的应用[J]. 西北地震学报, 34(3): 234-238.

Rosenberger. 2009. Arrival-Time Order Location Revisited[J]. BSSA, 99(3): 2 027 - 2 034.

Paul R. 2004. Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray [J]. BSSA, 94(4): 1 546 - 1 550.

Satriano C, Lomax A, Zollo A. 2008. Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning[J]. BSSA, 98(3): 1 482 - 1 494.

## Research and Application of Dynamic Earthquake Location Method in Earthquake Early Warning

WANG Qing-min<sup>1</sup>, LIU Xi-qiang<sup>1</sup>, SHEN De-xiu<sup>2</sup>, SHA Cheng-ning<sup>3</sup>

(1. *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China*)

(2. *Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, Shandong, China*)

(3. *Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

### Abstract

Using the epicenter trajectory which is constructed by the arrival time difference of two seismic stations approximately meets hyperbolic equation, combined with the azimuth and epicenter distance determined by the single station, we used technical ideas of the epicenter location restricted by Voronoi diagram so as to realize that the accuracy of earthquake location gradually increase based on the 71 earthquake waveforms recorded by Shandong Seismic Network from 2009 to 2011, . Compared with the location of the epicenter in observation report of Shandong Seismic Network, the results showed that the average error of location respectively determined by a single station, two stations and three stations was 18.3 km, 16.6km, and 10.7 km.

**Key words:** Voronoi diagram; earthquake location; hyperbolic equation; Shandong Seismic Network