

# 近震定位技术及其在桂东北宽频带 地震流动台网中的应用

何晓玲, 王有学, 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:** 通过对近震定位技术的研究, 利用根据 P 波到时对近震震源进行定位, 并且应用于桂东北地区的宽频带地震台网采集到的近震资料, 应用结果表明: 近震定位技术不仅可以得到近震的震中位置、震源深度以及发震时刻, 而且可以得到地震波在震源以上部分地壳中传播的平均 P 波速度。

**关键词:** 近震震源定位; P 波到时; 桂东北宽频带地震台网

中图分类号: P631

文献标识码: A

收稿日期: 2016—01—26

## The Application of Near Earthquake Location Technique to Temporal Seismic Network in Northeastern Guangxi

He Xiaoling, Wang Youxue, Zhang Qi, Zeng Cheng, Wang Xinyu

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

**Abstract:** By determination technique for the local earthquakes, this paper uses the P-wave arrivals to determine the parameters of the local earthquakes occurred in southeastern China, and the results show that this technique can not only obtain the location of the epicenter, depth and trigger time, but also the average velocity of P-wave above the hypocenter.

**Key words:** local earthquake determination; P-wave arrival; broadband seismic array

## 1 引 言

地震定位是地震学中最经典、最基本的问题之一<sup>[1-5]</sup>。早期的地震定位法主要以几何作图法为主, 作图法测定基本参数简便直观、易掌握, 但台站数较多时, 作图法较麻烦, 精度也会降低。地震线性定位方法大多源于 1912 年 Geiger 提出的经典方法<sup>[6]</sup>, 自 20 世纪 70 年代始, 基于科学计算和计算机技术的辅助定位方法得到了迅速发展, 相继提出一系列基于 Geiger 思想的方法和技术:

Lee 等人陆续做出了 HYPO71, HYPO78~81 系列方法<sup>[7]</sup>, 现在依然被普遍使用; 自 Backus 和 Gilbert 提出新的反演理论后, Klein 提出了 HYPOinverse 算法<sup>[8]</sup>; Lienert 等人在此基础上进行了改进, 推出 HYPOcenter 算法<sup>[9]</sup>; 随后 Vidale 和 Nelson 在进一步研究的基础上, 提出了三维速度模型下的 Quake3D 方法<sup>[10]</sup>。

针对多事件定位, 1967 年 Douglas 最先提出 JED 理论<sup>[11]</sup>, 后来 Dewey 将其扩展为包括深度定位的震源位置与台站校正的联合反演方法 (JHD)<sup>[12]</sup>, 使定位精度得到较大提高。1976 年,

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41574039)

第一作者: 何晓玲 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事应用地球物理研究。E-mail: hexiaoling\_gut@sina.com

Crosson 提出震源位置与速度结构的联合反演方法 (SSH)<sup>[13]</sup>, 与 JHD 方法相比, 无需引入台站校正, 同时反演出速度结构和震源参数, 解决了人为构造的速度模型引起的误差问题。此外, 在 JHD 方法的基础上, Spence 提出了相对定位法 (ATD)<sup>[14]</sup>, 这也是一个经典的、应用广泛的方法。

另外, 1999 年 Engdahl 等人提出用于全球定位的 EHB 方法<sup>[15]</sup>, 运用多种震相定位, 精度明显得到提高。2000 年, Waldauser 和 Ellsworth 提出双重残差定位法 (DDA)<sup>[16]</sup>, 其优点在于可以利用谱域中的互相关分析来读取事件的到时差, 大大提高了到时数据的精确度。较相对定位法而言, 事件对距离不受限制, 适用性强, 且若使用多种相位到时差, 定位效果更佳。

本文针对桂东北宽频带地震台网所采集到的近震数据, 采用计算机辅助定位法, 利用 P 波到时时对近震的震源进行定位, 确定近震的震源参数。该方法不仅可以得到近震的震源参数 (震中位置、震源深度以及发震时刻), 而且可以得到地震波在震源以上部分地壳中传播的平均 P 波速度, 计算精度较高。

## 2 近震震源定位

对于近震来说, 一般可以将地球表面的曲率忽略不计; 同时, 由于桂东北地区的近震都是浅震, 震源主要位于上地壳。因此, 可以将上地壳看作为均匀介质, 从而可以利用 P 波到时时对近震事件进行定位。

假设震源位于  $O(x_0, y_0, h)$ , 第  $i$  个台站位于  $P(x_i, y_i, 0)$ , 则震中为  $O^*(x_0, y_0, 0)$ 。由图 1 可以看出, 地震波的传播路径为  $OP$ , 其走时方程为

$$t_i = \frac{1}{v} \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + h^2} \quad (1)$$

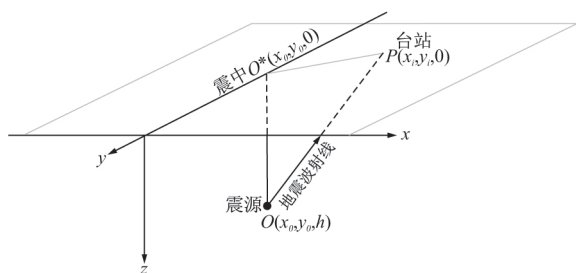


图 1 近震震相及其射线路径示意图

Fig. 1 Near earthquake phases and their ray path

其中  $h$  为震源深度, 单位为 km;  $v$  为地震波在上地壳内部传播的速度, 单位为 km/s;  $t_i$  是地震波的旅行时间, 单位为 s。

然而, 并不知道地震波的旅行时间  $t_i$ , 只知道地震的发震时刻  $T_0$ ; 如果知道地震波传播到第  $i$  个台站 P 的到时时为  $T_i$ , 那么地震波自震源到台站 P 的旅行时间就可以写为

$$t_i = T_i - T_0 = \frac{1}{v} \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + h^2} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

即

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + h^2 = v^2 (T_i - T_0)^2 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中,  $v$  为地震波在上地壳中的平均传播速度, 单位为 km/s。

通过求解 (2) 式的走时方程来确定震源参数  $(x_0, y_0, h, T_0)$  及地震波在上地壳中的平均传播速度。

设  $n$  个台站的观测到时依次为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 求震源参数  $(x_0, y_0, h, T_0)$  以及地震波在上地壳中的平均传播速度  $v$ , 使得目标函数

$$\phi(x_0, y_0, h, T_0, v) = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \min \quad (3)$$

其中,  $r_i = T_i - T_0 - t_i(x_0, y_0, h, v)$  为地震波旅行时间的残差, 单位为 s。

要使目标函数 (3) 式取极小值, 则

$$\nabla \phi(\theta) = 0 \quad (4)$$

其中

$$\theta = (x_0, y_0, h, T_0, v)^T,$$

$$\nabla \theta = \left( \frac{\partial}{\partial x_0}, \frac{\partial}{\partial y_0}, \frac{\partial}{\partial h}, \frac{\partial}{\partial T_0}, \frac{\partial}{\partial v} \right)$$

为了方便, 记

$$g(\theta) = \nabla \phi(\theta) \quad (5)$$

则对于 (5) 式, 在真解附近任意试探解  $\theta$  以及校正矢量  $\delta\theta$  满足

$$g(\theta^*) + [\nabla g(\theta^*)^T]^T \delta\theta = 0$$

即

$$[\nabla g(\theta^*)^T]^T \delta\theta = -g(\theta^*) \quad (6)$$

由式 (3)、式 (6) 两式即有

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial r_i}{\partial \theta_j} \cdot \frac{\partial r_i}{\partial \theta_k} + \frac{\partial^2 r_i}{\partial \theta_j \partial \theta_k} \right] \delta\theta_j = - \sum_{i=1}^n \left( r_i \frac{\partial r_i}{\partial \theta_k} \right)_{\theta^*} \quad (7)$$

如果  $\theta^*$  偏离真解  $\theta$  不大, 则  $r_i(\theta^*)$  和  $\frac{\partial^2 r_i}{\partial \theta_j \partial \theta_k}$

较小,可以忽略二阶导数项,则(7)式简化为近似的 Zoeppritz 方程<sup>[17]</sup>,通过求解近似的 Zoeppritz 方程,可求得  $\delta\theta$ ,继续迭代  $\theta=\theta^*+\delta\theta$  求解 Zoeppritz 方程,直至目标函数满足一定的精度,即可得到待求参数。

### 3 桂东北宽频带地震台网中的近震定位

自 2013 年起,为了更好地了解桂东北地区的

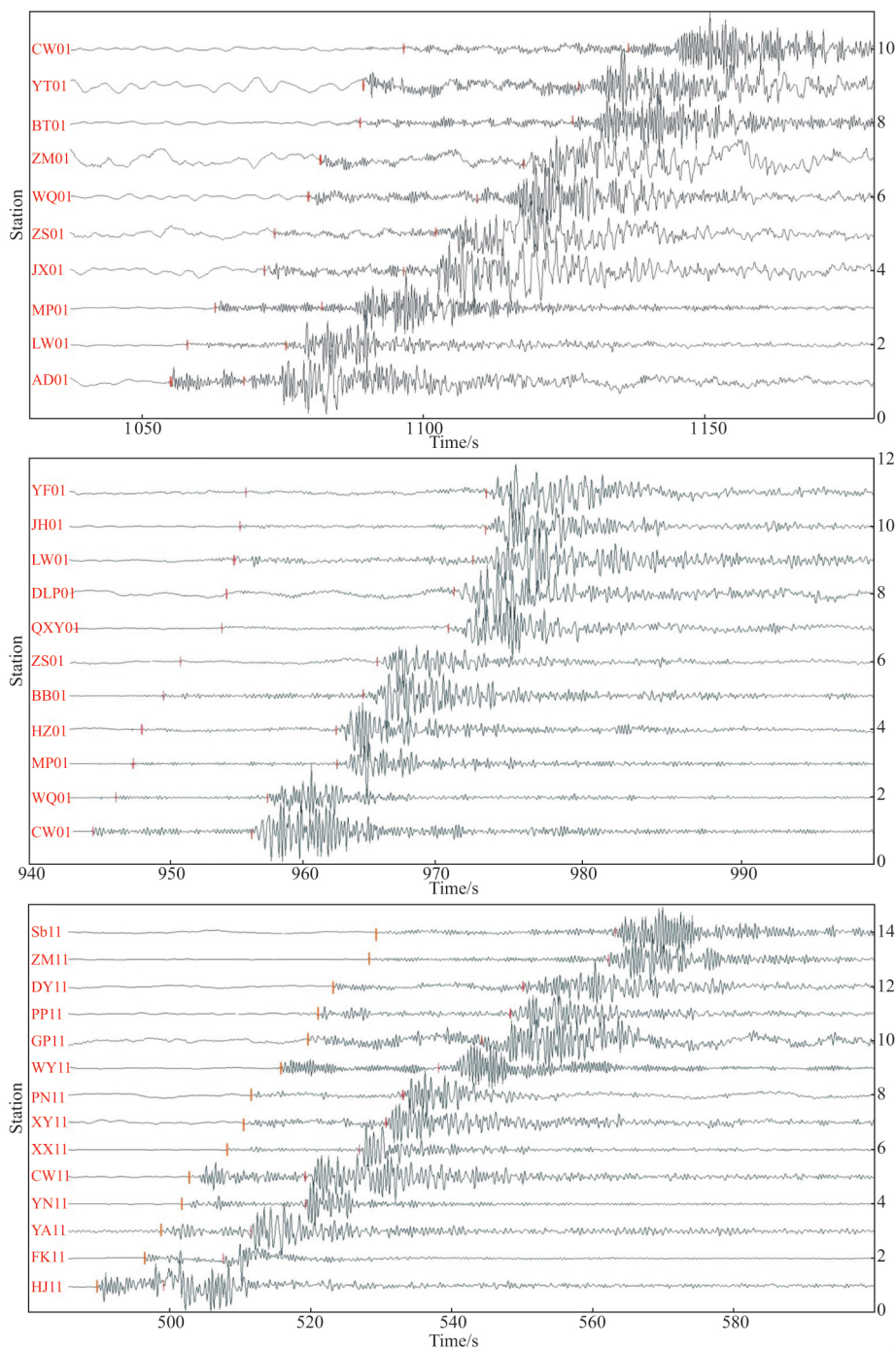


图 2 桂东北宽频带地震台阵周边地区近震事件记录  
(自上而下依次为 2013/10/23、2013/12/6 及 2014/10/23 发生的地震;纵坐标为台站名称,横坐标为时间,单位为秒)  
Fig. 2 The records of local earthquake events around seismic array in northeastern Guangxi  
(records of local earthquakes occurred on 2013/10/23, 2013/12/6 及 2014/10/23 from upper to bottom,  
respectively; vertical axis is the station order, and horizontal is the travelttime, unit is second)

表 1 近震震源位置结果

Table 1 The results of local earthquake event determinations

地震序号	发震时刻(北京时间)	震中位置		震源深度/km	$V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
		经度( $^{\circ}\text{E}$ )	纬度( $^{\circ}\text{N}$ )		
1	2013/10/23,16:17:00.25	107.4979	23.8185	5.04	5.49
2	2013/12/06,15:14:59.87	111.0043	22.3798	12.70	5.50
3	2014/10/23,10:27:52.87	112.4096	23.9834	14.97	5.44

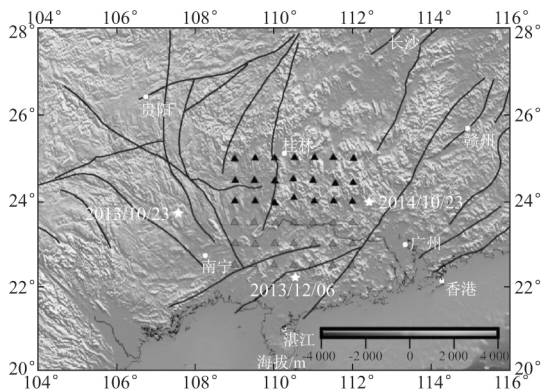


图 3 桂北地区地形、宽频带地震台网及近震震源分布  
(三角形为宽频带地震台站,白色星号为近震事件)

Fig.3 The topography, broadband seismic array and local earthquakes in northeastern Guangxi  
(triangular-broadband seismic station, white star-local event)

深部地球物理结构,进而研究桂东北地区的深部地质构造,桂林理工大学在桂东北地区布置了一个 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的宽频带地震台网(图3),对桂东北地区的深部构造进行研究。

在桂东北地区的宽频带地震台阵采集到的地震数据库中,挑选出台阵周边地区的三次近震事件,它们分别发生在2013年10月23日、2013年12月6日及2014年10月23日,其地震记录及P波到时拾取如图2所示。通过近震震源定位,得到三个近震震中分别位于广西壮族自治区平果县和巴马瑶族自治县的交界、广东省茂名市高州市以及广东省肇庆市怀集县,其定位结果如表1及图3所示,与中国台网给出的数据有很好的 consistency。

4 结 论

本文通过对近震定位技术的研究,采用计算辅助定位法,利用根据P波到时对近震震源进行

定位,并且应用于桂东北地区的宽频带地震台网采集到的近震资料,应用结果表明近震定位技术不仅可以得到近震的震中位置、震源深度以及发震时刻,而且可以得到地震波在震源以上部分地壳中传播的平均P波速度,其结果与中国台网给出的数据十分吻合。

参考文献:

[1] Pavlis G, Booker J R. The mixed discrete-continuous inverse problem : Application of the simultaneous determination of earthquake hypocenters and velocity structure[J]. J. Geophys. Res, 1980, 85(B9): 4 801-4 810.

[2] Spencer C, Gubbins D. Travel-time inversion for simultaneous earthquake location and velocity structure determination in laterally varying media [J]. Geophys. J. Roy. Astr. Soc, 1980, 63(1): 95-116.

[3] 赵仲和. 多重模型地震定位程序及其在北京台网的应用[J]. 地震学报, 1983, 5(2): 242-254.

[4] 吴明熙, 王鸣, 孙次昌, 等 1985 年禄劝地震部分余震的精确定位[J]. 地震学报, 1990, 12(2): 121-129.

[5] 赵卫明, 金延龙, 任庆维. 1988 年灵武地震序列的精确定位和发震构造[J]. 地震学报, 1992, 14(4): 416-422.

[6] Geiger L. Probability method for the determination of earth-quake epicenters from arrival time only [J]. Bull. St. Louis. Univ, 1912, 8: 60-71.

[7] Lee W H K, J C Lahr. HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes[J]. U. S. Geol. Surv. Open-File Rept, 1975: 75-311.

[8] Klein F W. Hypocenter location program HYPOIN-VERSE Part I: Users guide to versions 1, 2, 3 and 4 [J]. U. S. Geol. Surv. Open-File Rept, 1978: 78-694.

[9] Lienert B R, Berg E, Frazer L N. Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares[J]. Bull. Seism. soc Bull. Seism. Soc. Am, 1986, 76(3): 771-783.

- [10] Nelson G D, John E Vidale. Earthquake locations by 3-D finite-difference travel times[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1990, 80(2): 395-410.
- [11] Douglas A. Joint epicenter determination[J]. Nature, 1976, 215: 45-48.
- [12] Dewey J. Seismicity and tectonics of western Venezuela[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1972, 62(6): 1711-1751.
- [13] Crosson R S. Crustal structure modeling of earthquake data, 1, Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters[J]. J. Geophys. Res, 1976, 81(17): 3036-3046.
- [14] Spence W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1980, 70(1): 171-183.
- [15] Engdahl E R, Rob van derHilst, Raymond Buland. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1998, 88(3): 722-743.
- [16] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [17] 郑晓东. Zoeppritz 方程的近似及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1991, 02: 129-144+266.