

# 近震相对定位法和南黄海地震 序列的时空分布

周蕙兰 李东升

(中国科技大学研究生院)

## 摘 要

本文根据相对定位法原理,建立了使用P<sub>n</sub>震相和拟牛顿最优化法测定地震空间位置和发震时刻的方法及程序,并对1984年5月21日南黄海地震序列进行了测定。

## 一、引 言

当一个地震的时空参数确定之后,其周围发生的许多地震的时空参数可以以它为参考点来测定。这种相对定位法首先由 Evernden<sup>[1]</sup>于1969年提出。1975年, Fitch<sup>[2]</sup>将这一方法用于远震定位。1985年, Shedlock等人<sup>[3]</sup>提出了近震相对定位与地壳结构的联合反演法。

用相对定位法,由于使用了待定地震与参考震的震相到时差,可以最大限度地消除地壳横向不均匀性的影响,提高定位精度。当然,参考震本身定位不准确时,将会使全部被测定的地震的位置有一系统偏移,但各地震之间的相对位置却是不变的。这一特点对于详细研究一个完整地震序列中各地震之间的关系、整个序列与地质构造的联系等问题,都是十分有利的。因此,相对定位法受到人们的重视。

本文根据相对定位法的原理,针对我国1984年5月21日南黄海地震序列定位中存在的困难(台网偏在震中区的西侧),建立了使用P<sub>n</sub>到时差资料实现相对定位的拟牛顿最优化方法和程序,并对该序列的时空分布进行了实际计算。

## 二、P<sub>n</sub>到时差

根据我国东部地区地震和地壳结构的情况,我们作以下合理假设:(1)所有地震都发生在地壳内;(2)地壳是均匀双层结构。其上层波速为 $v_1$ ,厚度为 $H_1$ ;其下层波速为 $v_2$ ,厚度为 $H_2$ ;莫霍界面以下波速为 $v_3$ 。

设已知的参考震的发震时刻为 $t_0$ ,震源位置为 $E_0$ (经度 $\lambda_0$ 、纬度 $\phi_0$ 、深度 $z_0$ ),而待

定地震j的相应值为 $t_j$ 和 $E_j(\lambda_j, \phi_j, z_j)$ , 则可以导出地震j与参考震的 $P_n$ 震相在台站 $S_k(\phi_k, \lambda_k, 0)$ 的到时差 $\Delta T_{jk}$ 的计算公式。

1. 参考震在地壳下层, 待定地震在地壳上层时, 即 $\begin{cases} z_0 > H_1 \\ z_j < H_1 \end{cases}$ ,

则由图1可知两个地震的 $P_n$ 到时差为:

$$\begin{aligned} \Delta T_{jk} = & \left( t_j + \frac{E_j A_j}{v_1} + \frac{A_j F_j}{v_2} + \frac{F_j G_j}{v_3} + \frac{G_j C_j}{v_2} + \frac{C_j S_k}{v_1} \right) - \left( t_0 + \frac{E_0 F_0}{v_2} + \frac{F_0 G_0}{v_3} + \right. \\ & \left. + \frac{G_0 C_0}{v_2} + \frac{C_0 S_k}{v_1} \right) = (t_j - t_0) + \frac{H_1 - z_j}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{z_0 - H_1}{v_2 \cos \theta_2} + \\ & + \frac{(\Delta_{jk} - \Delta_{0k}) - (H_1 - z_j) \operatorname{tg} \theta_1 - (z_0 - H_1) \operatorname{tg} \theta_2}{v_3} \quad (1) \end{aligned}$$

式中 $\theta_2$ 为 $P_n$ 在莫霍界面上的临界角,  $\theta_2 = \sin^{-1} \frac{v_2}{v_3}$ ;  $\theta_1$ 为 $P_n$ 在地壳上下层分界面上的

入射角,  $\theta_1 = \sin^{-1} \frac{v_1}{v_3}$ ;  $\Delta_{jk}$ 和 $\Delta_{0k}$ 分别为地震j和参考震到 $S_k$ 台的震中距, 且

$$\begin{aligned} \Delta_{jk} & \doteq 111.199 \left[ (\phi_j - \phi_k)^2 + (\lambda_j - \lambda_k)^2 \cos^2 \left( \frac{\phi_j + \phi_k}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \\ \Delta_{0k} & \doteq 111.199 \left[ (\phi_0 - \phi_k)^2 + (\lambda_0 - \lambda_k)^2 \cos^2 \left( \frac{\phi_0 + \phi_k}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

因此,  $\Delta T_{jk}$ 是 $H_1, v_1, v_2, v_3, \phi_j, \lambda_j, z_j$ 和 $t_j$ 的函数。当地壳结构已知时, 它只是 $\phi_j, \lambda_j, z_j$ 和 $t_j$ 的函数。

2. 待定地震在地壳下层, 参考震在地壳上层, 即 $\begin{cases} z_0 < H_1 \\ z_j > H_1 \end{cases}$ , 则类似地有

$$\begin{aligned} \Delta T_{jk} = & (t_j - t_0) + \frac{H_1 - z_0}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{H_1 - z_j}{v_2 \cos \theta_2} + \\ & + \frac{(\Delta_{jk} - \Delta_{0k}) + (H_1 - z_0) \operatorname{tg} \theta_1 + (z_j - H_1) \operatorname{tg} \theta_2}{v_3} \quad (2) \end{aligned}$$

3. 待定地震和参考震都在地壳上层, 即 $\begin{cases} z_0 < H_1 \\ z_j < H_1 \end{cases}$ , 则有

$$\Delta T_{jk} = (t_j - t_0) + \frac{z_0 - z_j}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{(\Delta_{jk} - \Delta_{0k}) + (z_j - z_0) \operatorname{tg} \theta_1}{v_3} \quad (3)$$

4. 待定地震和参考震都在地壳下层, 即 $\begin{cases} z_0 > H_1 \\ z_j > H_1 \end{cases}$ , 则有

$$\Delta T_{jk} = (t_j - t_0) + \frac{z_0 - z_j}{v_2 \cos \theta_2} + \frac{(\Delta_{jk} - \Delta_{0k}) + (z_j - z_0) \operatorname{tg} \theta_2}{v_3} \quad (4)$$

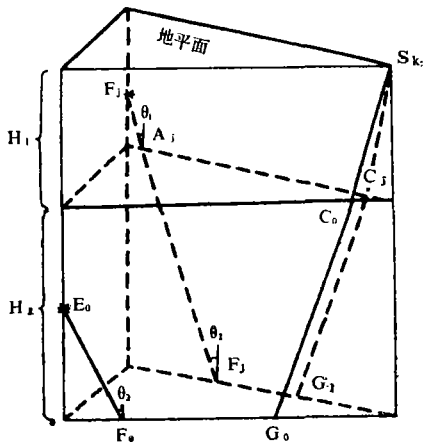


图1 待定震和参考震的Pn射线路径示意图 (取  $z_1 < H_1, z_0 > H_1$ )

Fig.1 An illustration for the Pn ray path of reference earthquake and that of event needed to measure

### 三、相对定位法和目标函数

按公式(1)一(4)可以计算待定地震与参考震的Pn震相的理论到时差  $\Delta T_{ik}$ , 而两者的观测到时差  $\Delta t_{ik}$  可在地震图上直接测得。

对于地震j取目标函数f为:

$$f = \sum_{k=1}^K (\Delta T_{ik} - \Delta t_{ik})^2, \quad (5)$$

式中  $k = 1, 2, \dots, K$ , K为台站个数。

用最优化方法使f取最小而定出地震j的参数, 即为相对定位法。

地震j参数的测量精度用标准误差R来衡量:

$$R = \sqrt{\sum_{k=1}^K (\Delta T_{ik} - \Delta t_{ik})^2 / (K - N)}, \quad (6)$$

式中N是测定参数的个数。

### 四、拟牛顿DFP变尺度最优化算法

使f达最小值而确定待求参数的具体算法很多, 本文采用了拟牛顿方法类中的DFP变尺度算法[4、5], 它能克服最速下降法和阻尼牛顿法的缺点, 而在一定程度上却又具有两者的优点。

将待定参数, 例如  $t_j, \phi_j, \lambda_j, z_j$ , 以具有N个元素(N即为待定参数个数)的一维向量  $\vec{x}$  来表示, 即

$$\vec{x} = (t_j, \phi_j, \lambda_j, z_j)^T \quad (\text{右上标T表示转置, 下同}), \quad (7)$$

于是, 目标函数可表示为  $f(x)$ 。将  $f(x)$  在  $x_1$  点作台劳展开:

$$f(\vec{x}) \approx f(\vec{x}_1) + \vec{g}_1^T \Delta \vec{x} + \frac{1}{2} \Delta \vec{x}^T A_1 \Delta \vec{x}, \quad (8)$$

式中  $\vec{g}_1 = \nabla f(\vec{x}_1); \quad (9)$

$$\Delta \vec{x} = \vec{x} - \vec{x}_1; \quad (10)$$

$$A_i = \left( \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_1 \partial x_m} \right)_{\vec{x} = \vec{x}_i} \quad (11)$$

这样, 求  $f(\vec{x})$  最小值的问题可以用寻找(8)式右端的最小值的办法来多次逐渐逼近。记(8)式右端的最小值为  $\vec{x}_{i+1}$ , 则它应满足

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i - A_i^{-1} g_i \quad (12)$$

采用拟牛顿DFP变尺度算法, 取搜索方向

$$\vec{P} = -H g \quad (13)$$

这里H是构造的一个正定对称矩阵, 而且H尽可能接近  $A^{-1}$ , 即

$$H \approx A^{-1} \quad (14)$$

于是迭代过程为: 给定初始值  $\vec{x}_0$ , 置  $H_0 = I$ , 令  $\vec{P}_0 = -H_0 g_0$ , 从  $\vec{x}_0$  沿  $\vec{P}$  方向求  $f$  的最小点, 即求  $t_0$ , 使得

$$f(\vec{x}_0 + t_0 \vec{P}_0) = \min_t f(\vec{x}_0 + t \vec{P}_0) \quad (15)$$

然后算出

$$\vec{x}_1 = \vec{x}_0 + t_0 \vec{P}_0 \quad (16)$$

$$\vec{g}_1 = \nabla f(\vec{x}_1) \quad (17)$$

$$\vec{y}_0 = \vec{g}_1 - \vec{g}_0 \quad (18)$$

$$H_1 = H_0 + \frac{t_0 \vec{P}_0 \vec{P}_0^T}{\vec{P}_0^T \vec{y}_0} - \frac{H_0 \vec{y}_0 \vec{y}_0^T H_0}{\vec{y}_0^T H_1 \vec{y}_0} \quad (19)$$

和  $\vec{P}_1 = -H_1 \vec{g}_1 \quad (20)$

再从  $\vec{x}_1$  沿  $\vec{P}_1$  方向求  $f$  的最小点, 即求  $t_1$ , 使

$$f(\vec{x}_1 + t_1 \vec{P}_1) = \min_t f(\vec{x}_1 + t \vec{P}_1) \quad (21)$$

求出  $t_1$  后重复上述过程。迭代次数取  $i = 0, 1, 2, \dots$ , 直到精度满意为止。

在计算时, 求偏导数用Stewart差商公式来代替, 本文不再赘述[6, 6]。

按以上算法设计并实现了在CROMENCO微机上求地震参数  $t_i$ 、 $\phi_i$ 、 $\lambda_i$  和  $z_i$  的程序。

## 五、南黄海地震序列的时空分布

1984年5月21日我国南黄海发生了  $M_s 5.9$  级地震(记作M), 其震中位置为东经  $121^\circ.59$ , 北纬  $32^\circ.40$ 。在主震之前约1分钟, 发生了一次  $M_s 5.4$  级的地震(记作F), 震中位于东经  $121^\circ.61$ , 北纬  $32^\circ.47$  (1、2)。主震之后到1984年12月为止, 共发生3.0级以上的余震17次, 最大震级为4.0。对这些小震的定位有一定困难, 因为地震台网在震中区的西侧, 且震中距都在100km以上。为此, 我们使用上述相对定位程序来测定余震的时空分布。

由于震相初至清晰, 地震F的参数显然比主震M的精度要高些, 因此取它为参考震。各次地震的  $P_n$  到时观测值取自文献1)和2)。该地区的地壳结构按上海市地震局由爆破资料所

得的结果来做简化模拟，具体数据见表1。

余震参数的计算结果列于表2。由于各次地震的深度相差不大，在P<sub>n</sub>到时差上反应很小，所以未能给出可信的震源深度值。

图2是地震序列的震中分布图。余震区长轴方位约为N50°W，长约18km，短轴约10km。与文献[7]用一般定位法得到的余震区相比较，本文的结果小一些，而且长轴方位更偏西。

表1 南黄海—大陆一带的地壳简化模型

	$v_{p a}$ (km/s)	层厚 (km)
地壳上层	5.90	16
地壳下层	6.28	17
上地幔顶部	8.08	

表2 1984年5月南黄海地震余震参数的计算值

地震代号	发震时间			震中位置		震级 M <sub>s</sub>	误差 R
	月	日	时 分 秒	东经(度)	北纬(度)		
F	5	21	23 37 48.2	121.61	32.47	5.4	
M	5	21	23 38 58.8	121.59	32.48	5.9	
1	5	22	00 25 45.9	121.58	32.42	3.8	0.224
2	5	22	01 10 42.8	121.65	32.51	3.0	0.551
3	5	22	02 51 49.3	121.61	32.30	3.4	0.354
4	5	22	05 43 23.2	121.73	32.34	3.1	0.404
5	5	22	08 10 46.6	121.57	32.32	3.0	0.771
6	5	22	22 07 46.1	121.53	32.46	3.4	0.246
7	5	23	23 26 27.8	121.48	32.50	3.0	0.443
8	5	24	21 32 58.7	121.71	32.45	3.1	0.576
9	5	24	23 19 58.7	121.67	32.46	3.3	0.305
10	5	25	03 59 48.1	121.57	32.47	3.4	0.213
11	5	30	10 36 50.1	121.62	32.33	3.4	0.548
12	5	30	23 58 02.5	121.65	32.44	3.5	0.401
13	6	08	05 14 48.2	121.54	32.51	3.1	0.533
14	7	14	02 04 43.1	121.58	32.45	4.0	0.453
15	7	15	15 36 37.9	121.51	32.30	3.0	0.509
16	9	26	01 51 09.6	121.68	32.40	3.0	0.705
17	12	26	11 43 26.4	121.54	32.46	3.2	0.490

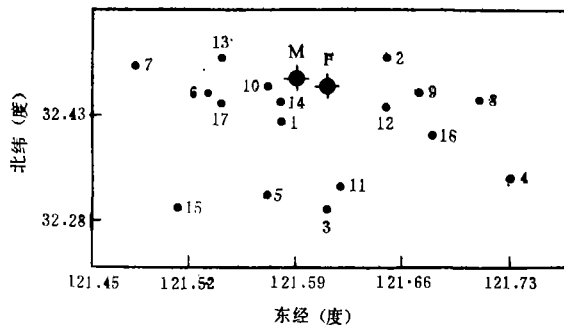


图2 南黄海地震序列的震中分布(图中字母与数字同表2)

Fig. 2 The epicentral distribution of seismic sequence of South Yellow Sea

1) 上海市地震局, 地震月报, 1984.  
2) 江苏省地震局, 江苏省地震台网观测报告, 1984.

## 小 结

如前所述, 相对定位法有其优越性, 但是, 只使用待定地震和参考震的 $P_n$ 到时差, 仍难以给出震源深度的可信结果。联合两个地震的直达波 $\bar{P}$ 的到时差和 $P_n$ 与 $\bar{P}$ 的到时差, 可以使这一情况得到改善。限于南黄海地震序列与现有台网的距离都较大, 以及不掌握实际观测资料, 无法进一步精选清晰震相加以利用, 本文未能在这方面进行研究。

在工作中, 得到朱元清同志的热情帮助, 谨致深切谢意。

(本文1988年6月23日收到)

## 参 考 文 献

- [1] Evernden, A., Identification of earthquakes and explosions by use of teleseismic data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 3828—3856, 1969.
- [2] Fitch, T.J., Compressional velocity in source regions of deep earthquakes, an application of the master earthquake technique, *Earth Planet Sci. Letters*, Vol. 26, 156—166, 1975.
- [3] Shedlock K.M. and S.W. Roecker, Determination of elastic wave velocity and relative locations using refracted waves, I. Methodology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 75, 415—426, 1985.
- [4] 南京大学数学系, 最优化方法, 科学出版社, 1978.
- [5] 邓乃扬, 无约束最优化计算方法, 科学出版社, 1982.
- [6] 刘德贵, FORTRAN算法汇编, 国防工业出版社, 1982.
- [7] 徐映深, 南黄海6.2级地震构造背景的初步探讨, *地震学刊*, No. 1, 1985.

## A METHOD OF RELATIVELY LOCALIZING NEAR EARTHQUAKES AND TIME—SPACE DISTRIBUTION OF EARTHQUAKE SEQUENCE OF SOUTH YELLOW SEA

Zhou Huilan, Li Dongsheng

(Beijing Graduate School, University of Science and Technology of China)

### Abstract

According to the principle of relative localization, this paper set up a method and program to measure location and original time of earthquake by using  $P_n$  phase and Quasi-Newton Optimization, and made an application to the earthquake sequence occurred in South Yellow Sea on May 21, 1984.