

# 地震定位的广义反演方法及计算程序

张先康 石琳珂

(国家地震局地球物理勘探大队)

## 摘 要

本文介绍一种利用近震P、S波到时,在任意垂直非均匀介质中利用广义反演理论确定地震事件空间位置的概率分布的方法及计算程序。做为一个例子,给出了用这个方法对滦县近场地震观测资料的数值计算结果,并与程序HYPO81所得的结果作了比较。

## 引 言

地震定位的方法一般基于以下原理,即寻找一组描述地震位置与发震时间的参数向量 $\underline{m}$ ,它使得:

$$S(\underline{m}) = (\underline{t} - \underline{g}(\underline{m}))^T \cdot \underline{C}_d^{-1} \cdot (\underline{t} - \underline{g}(\underline{m}))$$

最小。其中,

$$\underline{m} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ T \end{pmatrix}$$

X、Y、Z、T分别是事件的空间位置坐标和发震时刻, $\underline{t}$ 表示P、S波的到时; $\underline{C}_d$ 是描述观测数据误差的协方差矩阵。 $\underline{g}(\underline{m})$ 是非线性算子,它把模型空间映射到数据空间。它的形式依赖于所给定的地球结构。常采用把走时方程线性化,然后利用最小二乘判据获得使s最小的参数向量。但是,一般说来,一方面由于观测数据中包含有误差,另一方面由于算子 $\underline{g}(\underline{m})$ 的形式又依赖于包含有一定不确定性的地壳速度结构,因此更合理的反演结果应该是给出考虑了上述不确定程度在内的地震参数的空间概率分布。近来,A. Tarantolá等人以及Mitsuhiro Matsúura等人的工作给出了他们利用贝叶斯理论处理反演问题以及确定地震空间参数的方法〔4〕〔5〕。

## 一、原 理

A. Tarantolá等人将贝叶斯方法应用反演问题理论中,得到了广义反演解〔4〕。

依照他们的方法, 参数的信息状态总是可以用定义在相应参数空间的概率密度函数来表示。观测数据, 模型参数与可测参数的理论关系以及模型参数的先验信息三者信息状态的结合便产生反演问题的广义解, 即模型参数在参数空间的后概率密度函数。

用  $\underline{t}$  表示可测参数,  $\underline{m}$  表示模型参数, 它们之间的理论关系可表示成:

$$\underline{F}(\underline{t}, \underline{m}) = 0 \quad (1)$$

在  $\underline{t}$  和  $\underline{m}$  可分离的情况下, (1) 式可以改写成:

$$\underline{t} = \underline{g}(\underline{m}) \quad (2)$$

其中,  $\underline{g}(\underline{m})$  是一个把模型空间映射到数据空间的非线性算子。常常由于我们对理论关系的知识十分有限, 不能对给定的  $\underline{m}$  给出确定的  $\underline{t}$ , 只能给出  $\underline{t}$  的某种概率分布。比如, 在地震定位问题中, 由于我们不能事先确定一个“真实”的地壳速度模型, 因此, 对给定的地震位置只能说可能的走时分布是什么。这样, 理论关系 (2) 应由边概率密度函数  $f(\underline{t}|\underline{m})$  来描写, 或者用全概率密度函数  $f(\underline{t}, \underline{m})$  来描写。有关系

$$f(\underline{t}, \underline{m}) = f(\underline{t}|\underline{m}) \cdot W_m(\underline{m}) \quad (3)$$

其中,  $W_m(\underline{m})$  表示模型参数的零信息密度函数, 它表示了对模型参数无任何信息的状态。

观测数据和对模型参数的先验知识提供了另一个信息状态, 用  $h(\underline{t}, \underline{m})$  来表示。

这两个信息状态的结合给出了我们对整个系统的一个新的信息状态, 相应的后概率密度函数记为  $P(\underline{t}, \underline{m})$ , 则有

$$P(\underline{t}, \underline{m}) = \frac{f(\underline{t}, \underline{m}) \cdot h(\underline{t}, \underline{m})}{W(\underline{t}, \underline{m})} \quad (4)$$

其中,  $W(\underline{t}, \underline{m})$  表示零信息状态。所谓反演问题的广义解就是上式对模型参数  $\underline{m}$  的边概率密度函数

$$P_m(\underline{m}) = \int \frac{f(\underline{t}, \underline{m}) \cdot h(\underline{t}, \underline{m})}{W(\underline{t}, \underline{m})} \cdot d\underline{t} \quad (5)$$

或者写成

$$P_m(\underline{m}) = h_m(\underline{m}) \cdot \int \frac{h_t(\underline{t}) \cdot f(\underline{t}|\underline{m})}{W_t(\underline{t})} \cdot d\underline{t} \quad (6)$$

当描述这些信息状态的概率密度函数都是高斯型时, (6) 式可以表示成<sup>[5]</sup>

$$P_m(\underline{m}) = h_m(\underline{m}) \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot [\underline{t}^\circ - \underline{g}(\underline{m})]^T \cdot (\underline{C}_t + \underline{C}_T)^{-1} \cdot [\underline{t}^\circ - \underline{g}(\underline{m})] \right\} \quad (7)$$

其中,  $\underline{t}^\circ$  是观测数据,  $\underline{C}_t$  是描述观测数据误差的协方差矩阵,  $\underline{C}_T$  是描述理论关系不确定程度的协方差矩阵。在我们的问题中,

$$\underline{m} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ T \end{pmatrix},$$

则 (7) 式可写成

$$P(X, Y, Z, T) = h(X, Y, Z, T) \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot [t^0 - g(X, Y, Z, T)]^T \cdot (C_t + C_r)^{-1} \cdot [t^0 - g(X, Y, Z, T)] \right\} \quad (8)$$

(8) 式中  $h(X, Y, Z, T)$  是表示地震参数先验信息状态的概率密度函数。在对发震时刻没有任何先验信息时, 可以取  $h(T) = 1$ , 有

$$h(X, Y, Z, T) = h(X, Y, Z) \cdot h(T) = h(X, Y, Z) \quad (9)$$

在地震定位问题中, 更有意义的是震源位置的确定。在一定情况下, 震源深度的不确定性往往与发震时刻的不确定性相关连, 在台阵密集于震源上方时尤为明显。因此, 如果我们通过边缘概率密度函数把发震时刻的影响去掉, 可以得到更为准确的地震空间参数<sup>[4][5]</sup>, 有

$$P(X, Y, Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(X, Y, Z, T) \cdot dt \quad (10)$$

把计算到用时计算走时表示出来,

$$g_i(X, Y, Z, T) = l_i(X, Y, Z) + T \quad (11)$$

其中  $l_i(X, Y, Z)$  是第  $i$  个台站的 P 或 S 波走时, 则有

$$P(X, Y, Z) = K \cdot h(X, Y, Z) \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot [t^0 - l^i(X, Y, Z)]^T \cdot Q \cdot [t^0 - l^i(X, Y, Z)] \right\} \quad (12)$$

其中

$$Q = (C_t + C_r)^{-1} \quad (13)$$

$$q_i = \sum_j Q_{ij} \quad (14)$$

$$K = \left( \frac{2\pi}{\sum q_i} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$t^0 = t^i - \frac{\sum_j q_j \cdot t^j}{\sum_j q_j} \quad (16)$$

$$l^i = l^j - \frac{\sum_j q_j \cdot l^j}{\sum_j q_j} \quad (17)$$

## 二、计算程序

根据上述原理,我们编写了计算程序LOQUAK。该程序用FORTRAN语言编写,可以在IBM PC/XT及其兼容机上实施。图一给出了程序框图。

程序具有较大的灵活性,它可以计算事件位置的空间概率分布、平面概率分布以及深度概率分布。被计算的空间格点框架由程序自动产生。程序也可以给出事件位置的数学期望值。地壳速度结构允许是任意的垂向非均匀的,包括正、负梯度层及低速层在内,对于变梯度层可以用一组恒定梯度层来有效地逼近。观测数据的误差以及速度结构的不确定性对定位结果的影响也允许考虑在内。

图2给出了一个计算结果例子,它是由8个台站的P波、S波到时确定的一个事件的空间位置概率分布以及期望值。

## 三、数值计算例子

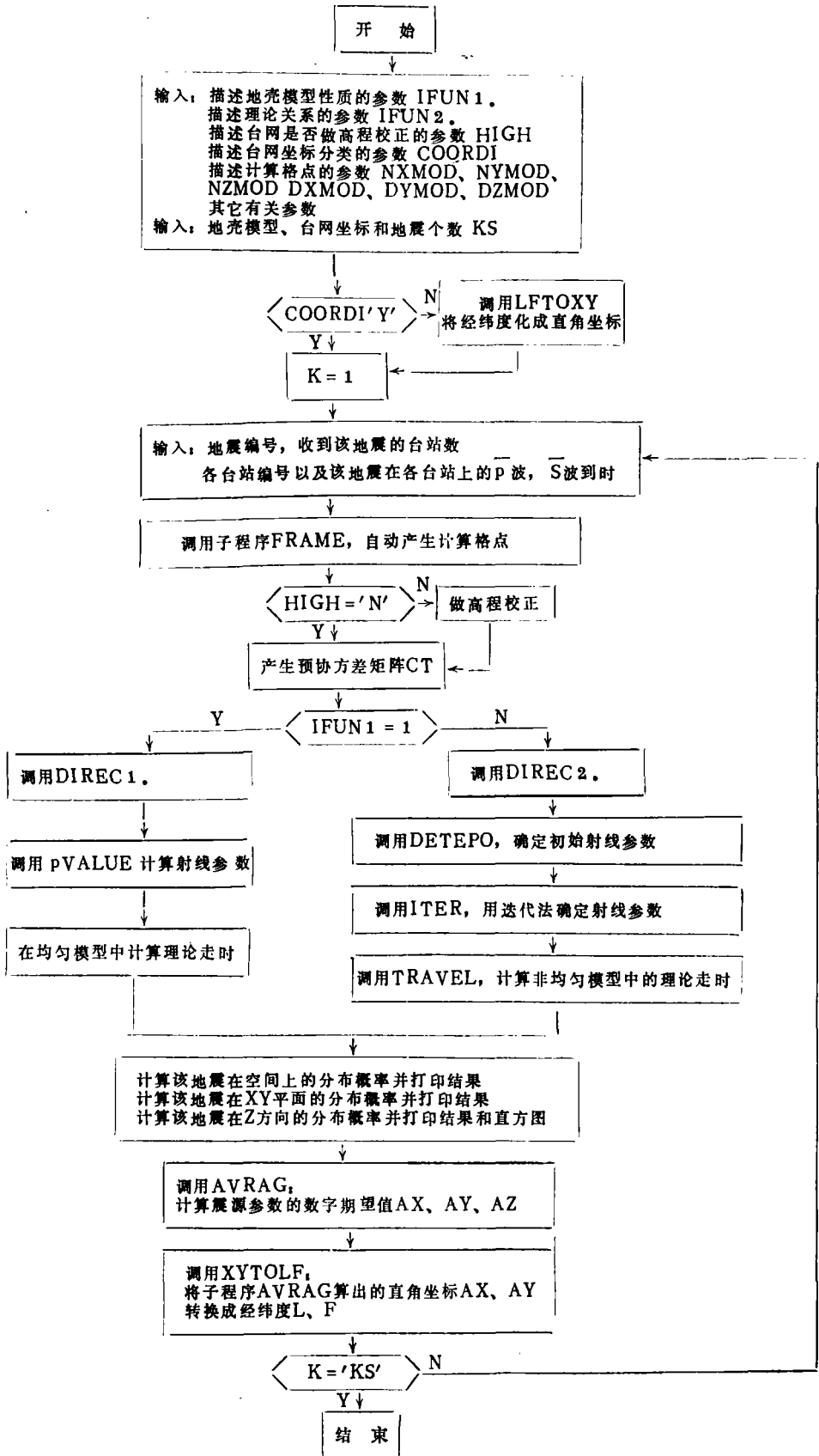
国家地震局地球物理勘探大队与国家地震局分析预报中心协作,于1984年7月中旬在唐山滦县地区布设了12个装备有PDR-1型数字地震仪的临时台网,点距约为4—12公里左右。在近一个半月的观测期间内,记录了59个近震事件〔1〕。表一给出了利用HYPO81〔1〕对其中的43个事件的定位结果。为了比较和检验我们的程序,利用程序LOQUAK对其重新进行了定位计算。

我们分别采用了两种地壳速度模型进行定位计算,计算中考虑了所采用的地壳模型的不确定程度的影响。模型A(表2)与文献〔1〕所采用的分层均匀地壳模型完全相同。由LOQUAK得到的地震位置数学期望值列于表3中。与表1比较可以发现,这些事件的平面位置两者的结果相差甚微,深度相差稍大些,一般为0.5—1.0公里,个别的可达1.5公里左右。这表明排除发震时间和考虑了地壳模型的不确定性后对地震定位,尤其是对深度的影响。

模型B(表4)采用国家地震局地球物理勘探大队柏各庄—丰南—丰宁—正兰旗深地震测深剖面获得的垂向非均匀含正、负速度梯度层的地壳模型。根据这个模型,LOQUAK的定位结果列于表5中。

作为例子,在图3,4,5,6中分别给出了7号事件和40号事件根据模型A和B得到的震中概率分布和深度概率分布。其中7号地震的结果是由7个台站的P、S波到时算出的;40号地震的结果仅由4个台站的P、S波数据算出。从图中可见,7号地震的震中概率分布和深度概率分布都相当尖锐,而40号地震无论是震中概率分布还是深度概率分布都是相当平缓的,这直观地表明了定位质量的优劣程度。在后者的情况下,如只计算地震位置的期望值将没有多少实际的意义。

1) 范文,原秦喜等,滦县地区的近场地震观测,华北地震科学,2,1987。



## A: PROBABILITY OF SPATIAL HYPOCENTURE DISTRIBUTION:

## LAYER 1 Z=8.500

.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.008	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

## LAYER 2 Z=9.000

.000	.000	.002	.000	.000
.000	.000	.030	.143	.000
.000	.000	.000	.001	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

## LAYER 3 Z=9.500

.000	.000	.013	.000	.000
.000	.000	.912	1.211	.000
.000	.000	.000	.046	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

## LAYER 4 Z=10.000

.000	.000	.036	.000	.000
.000	.000	11.101	3.905	.000
.000	.000	.002	.854	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

## LAYER 5 Z=10.500

.000	.000	.050	.000	.000
.000	.000	53.625	5.387	.000
.000	.000	.049	5.111	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

## LAYER 6 Z=11.000

.000	.000	.032	.000	.000
.000	.000	100.000	3.066	.000
.000	.000	.378	10.153	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

LAYER 7    Z=11.500  
 .000    .000    .008    .000    .000  
 .000    .000    68.086    .657    .000  
 0.00    .000    .957    6.793    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 0.00    .000    .000    .000    .000

LAYER 8    Z=12.000  
 .000    .000    .001    .000    .000  
 .000    .000    16.582    .052    .000  
 .000    .000    .781    1.517    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000

LAYER 9    Z=12.500  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    1.420    .002    .000  
 .000    .000    .202    .112    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000

LAYER 10    Z=13.000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .042    .000    .000  
 .000    .000    .016    .003    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000

LAYER 11    Z=13.500  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000

B; PROBABILITY OF EPICENTURE DISTRIBUTION;

.000    .000    .057    .000    .000  
 .000    .000    100.000    5.731    .000  
 .000    .000    .948    9.765    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000  
 .000    .000    .000    .000    .000

C, PROBABILITY OF DEPTH DISTRIBUTION;

Z= 8.50	.007	**
Z= 9.00	.154	**
Z= 9.50	1.920	**
Z=10.00	13.991	****
Z=10.50	56.519	*****
Z=11.00	100.000	*****
Z=11.50	67.326	*****
Z=12.00	16.662	****
Z=12.50	1.528	**
Z=13.00	.053	**
Z=13.50	.001	**

D, AUERAGE UALUES OF HYPOCENTURE;

X=644.909 Y=4405.133 Z=11.028

LONGITUDE	LATITUDE	DEPTH
118 41 28.101	39 46 2.128	11.028

图2 地震事件的计算结果

- A. 事件的空间概率分布
- B. 事件的震中概率分布
- C. 事件的深度概率分布
- D. 事件的震源位置期望值

PROBABILITY OF EPICENTURE DISTRIBUTION;

.000	.000	.000	.000	.000
.000	.049	.069	.000	.000
.000	1.450	100.000	.008	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

PROBABILITY OF DEPTH DISTRIBUTION;

Z=4.50	.083	**
Z=5.00	1.125	**
Z=5.50	11.249	****
Z=6.00	56.328	*****
Z=6.50	100.000	*****
Z=7.00	66.042	*****
Z=7.50	18.727	****
Z=8.00	2.754	**
Z=8.50	.410	**
Z=9.00	.031	**



Z=9.50            .001            \* \*

AVERAGE VALUES OF HYPOCENTURE,  
 X=648.001        Y=4399.985        Z=6.560  
 LONGITUDE        LATITUDE        DEPTH  
 118 43 33.812    39 43 13.378    6.560

图 3：根据模型A，用LOQUAK算出的7号事件的震中和深度概率分布

## PROBABILITY OF EPICENTURE DISTRIBUTION:

.000	.000	.000	.003	.007
.000	.000	.665	100.000	24.681
.000	.000	1.112	11.530	.013
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

## PROBABILITY OF DEPTH DISTRIBUTION:

Z= 5.50	21.301	*****
Z= 6.00	34.734	*****
Z= 6.50	57.762	*****
Z= 7.00	87.088	*****
Z= 7.50	100.000	*****
Z= 8.00	87.437	*****
Z= 8.50	49.608	*****
Z= 9.00	18.059	****
Z= 9.50	4.147	**
Z=10.00	.598	**
Z=10.50	.050	**

## AVERAGE VALUES OF HYPOCENTURE,

X=650.878        Y=4401.166        Z=7.228  
 LONGITUDE        LATITUDE        DEPTH  
 118 45 35.704    39 43 50.111    7.228

图 4 根据模型A，用LOQUAK算出的40事件的震中和深度概率分布

## PROBABILITY OF EPICENTURE DISTRIBUTION:

.000	.000	.000	.000	.000
.000	.007	2.097	.000	.000
.000	.017	100.000	.847	.000
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

PROBABILITY OF DEPTH DISTRIBUTION:

Z=4.50	.109	**
Z=5.00	.782	**
Z=5.50	2.433	**
Z=6.00	9.004	**
Z=6.50	46.238	*****
Z=7.00	100.000	*****
		****
Z=7.50	60.081	*****
Z=8.00	10.394	****
Z=8.50	.509	**
Z=9.00	.010	**
Z=9.50	.000	**

AVERAGE VALUES OF HYPOCENTURE,

X=648.020	Y=4400.008	Z=7.016
LONGITUDE	LATITUDE	DEPTH
118 43 34.664	39 43 14.106	7.016

图5: 根据模型B, 用LOQUAK算出的7号事件的震中和深度概率分布

PROBABILITY OF EPICENTURE DISTRIBUTION:

.000	.000	.000	.000	.001
.000	.000	.220	100.000	51.721
.000	.000	3.024	96.464	.204
.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000

PROBABILITY OF DEPTH DISTRIBUTION:

Z= 5.50	57.759	*****
Z= 6.00	79.629	*****
Z= 6.50	92.942	*****
Z= 7.00	100.000	*****
Z= 7.50	98.605	*****
Z= 8.00	76.061	*****
Z= 8.50	41.167	*****
Z= 9.00	13.523	****
Z= 9.50	2.660	**
Z=10.00	.310	**
Z=10.50	.022	**

## AVERAGE VALUES OF HYPOCENTURE;

X=650.554      Y=4401.183      Z=6.806

LONGITUDE      LATITUDE      DEPTH

118 45 21.933      39 43 50.610      6.806

图 6：根据模型B，用LOQUAK算出的40号事件的震中和深度概率分布

表 1 分层均匀模型A的HYP081的定位结果

地震编号	X	Y	Z	$\lambda$	$\phi$	台站数
1	654.11	4397.21	8.53	118°47'48."0	39°41'39."6	5
2	645.18	4405.42	9.71	118°41'39."6	39°46'11."4	8
3	653.20	4399.82	4.42	118°47'12."0	39°43' 4."8	10
4	646.28	4400.72	7.73	118°42'22."2	39°43'38."4	8
5	644.10	4405.98	10.79	118°40'54."6	39°46'30."0	8
6	648.96	4399.92	9.77	118°44'13."8	39°43'10."8	6
7	648.18	4400.20	6.08	118°43'41."4	39°43'20."4	7
8	647.28	4404.44	7.53	118°43'24."0	39°45'37."8	7
9	649.02	4399.22	6.97	118°44'16."2	39°42'48."0	5
10	642.09	4402.42	10.94	118°39'27."6	39°44'36."0	8
11	638.96	4402.38	11.06	118°37'16."2	39°44'36."6	7
12	635.12	4401.84	10.63	118°34'34."8	39°44'21."0	4
13	650.62	4400.92	5.71	118°45'24."6	39°43'42."0	8
14	650.54	4401.23	6.03	118°45'21."6	39°43'52."2	6
15	646.67	4402.68	16.86	118°42'40."2	39°44'41."4	8
16	645.17	4405.66	10.43	118°41'39."6	39°46'19."2	4
17	646.28	4400.78	7.09	118°42'22."2	39°43'40."2	5
18	643.06	4402.29	6.92	118°40' 8."4	39°44'31."4	4
19	648.20	4400.58	5.29	118°43'42."6	39°43'32."4	5
20	645.33	4404.84	7.72	118°41'40."6	39°45'52."2	7
21	644.08	4400.94	7.05	118°40'49."8	39°43'46."8	4
22	648.42	4399.28	7.51	118°43'51."0	39°42'50."4	4
23	648.38	4399.47	9.59	118°43'49."2	39°42'56."4	7

续表 1

地震编号	X	Y	Z	$\gamma$	$\phi$	台站数
24	654.67	4413.63	4.63	118°48'25."2	39°50'31."2	6
25	646.50	4401.95	7.39	118°42'32."4	39°44'18."0	5
26	646.50	4400.62	7.56	118°42'31."2	39°43'34."8	6
27	646.04	4401.39	6.45	118°42'12."6	39°44' 0."0	4
28	646.14	4404.26	4.09	118°42'19."2	39°45'33."0	5
29	646.02	4406.26	8.92	118°42'15."6	39°46'37."8	4
30	646.70	4400.51	9.23	118°42'39."6	39°43'31."2	4
31	647.24	4399.74	9.09	118°43' 1."8	39°43' 6."0	6
32	650.43	4399.77	7.32	118°45'15."6	39°43' 4."8	5
33	649.81	4410.18	6.04	118°44'58."2	39°48'42."6	5
34	655.09	4413.76	6.84	118°48'43."2	39°50'35."4	5
35	646.03	4402.72	10.00	118°42'13."2	39°44'43."2	4
36	647.32	4400.73	8.64	118°43' 6."0	39°43'37."8	4
37	648.26	4402.87	6.76	118°43'46."8	39°44'46."8	4
38	654.54	4397.13	8.50	118°48' 6."0	39°41'36."6	8
39	655.07	4412.26	7.06	118°48'40."8	39°49'46."8	7
40	650.47	4401.30	5.71	118°45'18."6	39°43'54."6	4
41	658.06	4420.21	10.43	118°50'53."4	39°54' 2."4	5
42	648.76	4398.64	7.37	118°44' 4."8	39°42'29."4	4
43	648.55	4399.21	6.85	118°43'56."4	39°42'48."0	4

表 2 用以 LOQUAK 定位的分层均匀地壳模型 A

层序号	层速度(公里/秒)	深度(公里)
1	3.15	1.20
2	5.28	4.01
3	6.43	10.26
4	6.25	12.45
5	6.20	14.95
6	6.27	17.76
7	6.24	21.20
8	6.41	28.70
9	6.77	31.82
10	8.10	35.00

表 3 分层均匀模型 A、由 LOQUAK 计算得到的事件位置期望值

地震编号	X	Y	Z	$\lambda$	$\psi$	台站数
1	654.63	4396.61	9.42	118°48' 9."1	39°41' 19."8	5
2	644.91	4405.13	11.02	118°41' 28."1	39°46' 2."1	8
3	653.94	4399.06	5.56	118°47' 42."3	39°42' 39."5	10
4	646.04	4400.70	8.50	118°42' 12."0	39°43' 37."7	8
5	643.85	4406.00	11.90	118°40' 44."5	39°46' 30."7	8
6	649.00	4399.55	10.74	118°44' 15."5	39°42' 38."7	6
7	648.00	4399.99	6.56	118°43' 23."8	39°43' 13."4	7
8	647.44	4404.13	8.72	118°43' 13."5	39°45' 27."9	7
9	649.00	4399.02	7.52	118°44' 15."0	39°42' 41."4	5
10	641.52	4402.00	11.96	118°39' 3."4	39°44' 22."7	8
11	637.76	4401.95	11.86	118°33' 47."6	39°44' 25."4	7
12	634.72	4402.01	11.80	118°34' 17."7	39°44' 26."9	4
13	651.00	4400.91	5.62	118°45' 40."2	39°43' 41."4	8
14	650.98	4400.92	6.80	118°45' 39."7	39°43' 41."8	6
15	646.61	4402.10	18.63	118°42' 37."3	39°44' 22."6	8

续表 3

地震编号	X	Y	Z	Y	$\phi$	台站数
16	644.58	4405.28	12.29	118°41'14."4	39°46'4."8	4
17	646.18	4400.26	8.21	118°42'17."8	39°43'23."4	5
18	642.70	4401.73	8.58	118°39'52."9	39°44'13."0	4
19	648.05	4400.61	5.63	118°43'55."5	39°43'33."2	5
20	644.97	4404.65	8.96	118°41'30."2	39°45'46."5	7
21	644.64	4401.66	8.06	118°41'14."1	39°44'9."3	4
22	648.96	4398.85	8.09	118°44'13."3	39°42'36."1	4
23	648.00	4399.03	10.09	118°43'33."0	39°42'42."4	7
24	655.00	4414.00	6.88	118°48'39."5	39°50'43."1	6
25	646.88	4402.03	8.07	118°42'48."4	39°44'20."2	5
26	646.96	4400.89	8.19	118°42'51."0	39°43'43."2	6
27	646.02	4401.80	7.26	118°42'12."0	39°44'13."2	4
28	645.99	4404.40	5.30	118°42'13."0	39°45'37."8	5
29	645.65	4406.01	10.05	118°41'59."8	39°46'30."0	4
30	646.70	4399.95	10.74	118°42'39."4	39°43'12."9	4
31	647.70	4399.81	9.92	118°43'21."0	39°43'8."0	6
32	650.95	4399.81	8.06	118°45'37."4	39°43'5."8	5
33	650.00	4410.01	6.87	118°45'5."9	39°48'37."0	5
34	655.87	4414.68	9.18	118°47'56."6	39°50'11."2	5
35	646.38	4402.40	10.69	118°42'28."3	39°44'35."5	4
36	647.52	4400.81	9.57	118°43'14."1	39°43'40."3	4
37	648.44	4403.12	7.74	118°43'54."7	39°44'54."7	4
38	655.08	4396.38	9.41	118°48'27."9	39°41'12."1	8
39	655.03	4412.24	7.21	118°48'39."3	39°49'46."0	7
40	650.88	4401.17	7.23	118°45'35."7	39°43'50."1	4
41	658.94	4421.18	11.76	118°52'17."8	39°55'31."3	5
42	649.07	4398.50	7.98	118°44'17."4	39°42'24."5	4
43	649.04	4399.04	8.23	118°44'16."5	39°42'42."2	4

表 4 模型B有正、负速度梯度层的地壳模型

层序号	层顶速度(公里/秒)	层底速度(公里/秒)	层底深度(公里)
1	2.80	3.50	1.23
2	4.50	6.05	4.00
3	6.05	6.31	10.15
4	6.31	6.18	12.61
5	6.18	6.22	15.23
6	6.43	6.10	18.15
7	6.10	6.38	21.54
8	6.51	6.52	25.07
9	6.52	6.30	30.61
10	6.30	7.23	32.00

表 5 根据模型B、由LOQUAK得到的事件位置的期望值

地震编号	X	Y	Z	$\lambda$	$\phi$	台站数
1	654.27	4396.95	9.26	118°47'54."4	39°41'31."0	5
2	645.00	4405.22	10.84	118°41'31."8	39°46' 4."8	8
3	653.00	4399.99	4.88	118°47' 3."8	39°42'10."5	10
4	646.06	4400.82	8.38	118°42'12."9	39°43'41."8	8
5	643.98	4406.00	11.79	118°40'50."0	39°46'30."7	8
6	649.00	4399.79	10.48	118°44'15."6	39°43' 6."6	6
7	648.02	4400.01	7.02	118°43'34."7	39°43'14."1	7
8	647.83	4404.53	7.93	118°43'30."4	39°46'40."9	7
9	649.00	4399.04	7.48	118°44'15."0	39°42'42."0	5
10	641.97	4402.04	11.90	118°39'22."2	39°44'23."6	8
11	638.33	4402.18	11.99	118°33'47."7	39°44'26."7	7
12	634.93	4401.90	11.48	118°31' 1."2	39°45'34."0	4
13	650.96	4401.00	5.93	118°45'38."4	39°43'44."3	8
14	650.86	4400.96	6.88	118°45'34."7	39°43'43."2	6
15	646.78	4402.22	18.28	118°42'44."2	39°44'26."6	8

续表 5

地震编号	X	Y	Z	Y	Z	台站数
16	644.68	4405.27	12.19	118°41'18."8	39°46'6."7	4
17	646.34	4400.80	7.69	118°42'24."7	39°43'40."8	5
18	642.90	4401.92	8.88	118°40'1."2	39°44'8."9	4
19	648.22	4400.54	5.72	118°43'43."6	39°43'31."2	5
20	645.05	4404.99	8.48	118°41'34."1	39°45'57."2	7
21	644.28	4401.23	7.76	118°43'36."9	39°46'28."4	4
22	648.73	4399.05	8.24	118°44'3."8	39°42'42."5	4
23	648.00	4399.25	9.86	118°43'33."2	39°42'49."5	7
24	654.99	4413.95	7.22	118°48'39."0	39°50'41."5	6
25	646.79	4401.97	7.98	118°42'44."7	39°44'18."5	5
26	646.91	4400.87	8.07	118°42'48."6	39°43'42."7	6
27	646.03	4401.59	7.12	118°42'12."2	39°44'6."5	4
28	646.00	4404.17	5.32	118°42'13."1	39°45'30."3	5
29	645.64	4406.01	9.88	118°41'59."6	39°46'30."0	4
30	646.61	4399.99	10.53	118°42'35."4	39°43'14."4	4
31	647.49	4399.81	9.74	118°43'12."1	39°43'7."9	6
32	650.72	4399.80	8.06	118°45'27."9	39°43'5."5	5
33	650.00	4410.01	6.59	118°45'5."9	39°48'36."9	5
34	655.11	4414.03	7.85	118°44'14."1	39°42'30."5	5
35	646.04	4402.75	10.59	118°42'13."5	39°44'44."4	4
36	647.43	4400.74	9.34	118°43'10."5	39°43'38."1	4
37	648.32	4402.97	7.51	118°43'49."8	39°44'50."0	4
38	654.98	4396.83	9.37	118°48'24."2	39°41'26."7	8
39	655.00	4412.01	7.47	118°48'37."8	39°49'38."4	7
40	650.55	4401.18	6.81	118°45'21."9	39°43'50."6	4
41	658.58	4420.72	11.66	118°52'17."6	39°55'31."4	5
42	648.99	4398.68	7.92	118°44'14."1	39°42'30."5	4
43	648.94	4399.04	8.29	118°44'12."4	39°42'42."3	4



## 四、讨论

本方法有如下特点：首先走时方程不必被线性化，同时允许把地壳速度模型的不确定性对定位的影响考虑在内；其次，由于我们计算的是事件空间位置的边概率密度，因此排除了发震时间对定位的影响，提高了事件空间位置尤其是深度的精确程度。再者，作为结果，除了给出事件空间位置的期望值外，同时给出了它的空间分布概率，震中分布概率以及深度分布概率，从而使定位质量一目了然，更充分地利用震相到时所提供的关于事件空间位置的信息。

本工作得到孙武城、刘昌铨同志的热情支持；国家地震局物探大队计算机房的同志提供了调试程序和计算的种种方便；文献(1)的作者们以及唐山近场地震观测队热情提供了观测资料以及他们的观测结果，在此一并致谢。

(1986年11月28日收到初稿)

## 参 考 文 献

- [1] 赵冲和，多重模型地震定位程序及其在北京台网的应用，地震学报，5，2，1983。
- [2] 刘昌铨，贾士旭等，唐山地震区地壳上地幔结构特征，地震学报，8，4，1986。
- [3] Yan Fengton, Lei Suhua and Wang Xinhui Crustal Structure and Travel Time Table of the Western yunnan Earthquake Prediction Study Area Journal of Seismological Research, Vol. 9, No. 3, May, 1986.
- [4] A. Tarantola' and B. Valette Inverse Problems = Quest for Information J. Geophys. 1982, 50, 159—170
- [5] Mitsuhiro Matsu'ura Bayesian Estimation of Hypocenter with Origin Time Eliminated J. Phys. Earth. 32, 469—483, 1984.
- [6] David D. Jackson and Mitsuhiro Matsu'ura A Bayesian Approach to Nonlinear Inversion J. G. R. Vol. 90, No. B1, 58—591, January 10, 1985.

**GENERALIZED INVERSION METHOD OF  
HYPOCENTER DETERMINATION AND ITS COMPUTER  
PROGRAM**

Zhang Xiankang    Shi Linke  
(Geophysical Prospecting Brigade, SSB)

**Abstract**

In this paper, a generalized inversion method for the determination of hypocenters probability distribution based on P and S arrivals of near earthquakes in a medium with vertically heterogeneous property and its computer program are presented. As an example, by using this method, a numerical result based on the data recorded by a temporary digital station network in Luan Xian region in North China is given, and it is compared with the result based on the same data by using the existed computer program HYP081.

**向作者读者致歉**

因工作不慎，在印刷过程中造成如下差错：第5卷2期目录中漏一字及40页图1倒置。在此特向作者范文等同志和广大读者致歉。

华勘五一七印刷厂