

# 基于宽频带倾斜仪数据的地震定位<sup>\* 1</sup>

周 勇<sup>1)</sup> 陈志遥<sup>1,2)</sup> 吕品姬<sup>1,2)</sup> 张 燕<sup>1,2)</sup>

(1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉 430071  
(2) 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地, 武汉 430071

**摘 要** 基于宽频带倾斜仪数据, 利用震源扫描算法(SSA)对地震进行定位, 结果表明: 在 3 个台站的情况下, 对于网外地震, 速度取均匀球壳模型, 其定位精度随地震距台网距离增加而降低, 在地震距最近台站为 837 km 时, 经向误差为  $-1.11^\circ$ , 纬向误差为  $2.73^\circ$ 。同时, 发现 2008 年 12 月—2009 年 4 月期间黄梅台、宁陕台的宽频带倾斜仪时间系统可能存在故障。

**关键词** 宽频带; 倾斜仪; 地震定位; 定位精度; 震源扫描算法(SSA)

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

## EARTHQUAKE LOCATION BASED ON BROADBAND TILTMETER DATA

Zhou Yong<sup>1)</sup>, Chen Zhiyao<sup>1, 2)</sup>, Lü Pinji<sup>1, 2)</sup> and Zhang Yan<sup>1, 2)</sup>

(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071  
(2) Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071

**Abstract** On the basis of the broadband tiltmeter data, the earthquakes are located with source-scanning algorithm(SSA). The results show that under the condition of three seismic stations, for outside network earthquakes, with uniform spherical shell model, the location precision decreased with the increasing distance from the network, and in the nearest station is 878 km, the longitude error is  $-1.11^\circ$  and the latitude error is  $2.73^\circ$ . At the same time, we found that there may be problems in the time system of Huangmei station and Ningshan station in December 2008 to April 2009.

**Key words:** broadband; tiltmeter; earthquake location; positioning accuracy; Source-Scanning Algorithm(SSA)

## 1 引言

地倾斜观测是一种形变观测手段, 具有观测精度高、资料连续以及物理意义明确等优势。“九五”以来, 数字化的观测技术逐步取代了模拟观测技术, 数据采样间隔由模拟观测的 1 小时采集 1 次加密为 1 分钟采集 1 次。2006 年以来, 中国地震局地震研究所胡国庆教授等研制的 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪(以下简称宽频带倾斜仪), 实现了倾斜仪采样周期

从 1 分钟到 1 秒钟的跨越, 并开始在全国部分台站进行观测实验<sup>[1-3]</sup>。近年来, 地震计、重力仪、倾斜仪记录到的扰动信号得到人们越来越多的关注<sup>[4,5]</sup>。宽频带倾斜仪的实验观测结果也表明, 宽频带倾斜仪记录中除了固体潮信息、地震的同震效应外, 还有其他的扰动信号<sup>[6]</sup>。对于该类信号, 扰动信号源的准确定位对确认其产生机理有重要的意义。

地震作为显著的地球物理现象, 在宽频带倾斜

\* 收稿日期: 2012-12-19

基金项目: 中国地震局地震研究所所长基金(15201116020)

作者简介: 周勇, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 地壳形变与地震. E-mail: zy29@foxmail.com

仪中有明确的响应。使用宽频带倾斜仪记录数据对地震定位,既是对宽频带倾斜仪数据中扰动信号源定位的基础,又是对宽频带倾斜仪及其台网的检测。引入震源扫描算法使用宽频带倾斜仪数据对地震进行定位,并生成震源时空分布图。

## 2 地震定位方法

震源扫描算法是 2004 年由 Hohn Kao<sup>[7]</sup>提出的一种绘制震源分布图的方法,它和传统震源定位方法比起来,不需要提取震相,仅考虑能量的传播,通过台站记录的相对振幅和到时来判断指定时间和区域是否有震源存在。Hohn Kao 等<sup>[8]</sup>在研究 Cascadia 北部俯冲带的震颤事件时,在震颤事件波形中,看起来连贯的信号传播时的时间间隔非常宽,使得拾取相位变得极其困难,无法使用传统定位方法,最后利用震源扫描算法确定震颤事件发生的位置和时间,取得了较满意的结果。2006 年李文军<sup>[9]</sup>使用震源扫描算法对南北地震带进行了定位实验,发现该方法在没有人工干预的情况下较好地定出地震位置。2008 年李文军<sup>[10]</sup>将该方法应用于与震颤事件波形特征相似的列车运动的定位,在台站位置不佳、速度模型简单、信噪比较差条件下有效追踪了列车震源。

震源扫描算法的基本原理如图 1 所示。

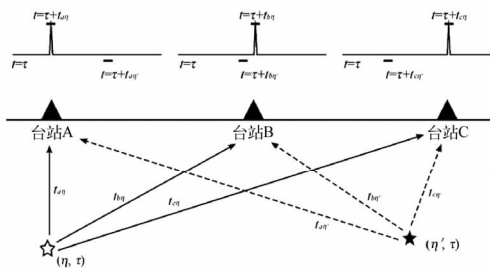


图 1 震源扫描算法的基本原理

Fig. 1 Basic principle of SSA

假设时刻  $\tau$  位置  $\eta$  (图中的空心五角星) 发生了一次事件,分别经过时间  $t_{a\eta}$ 、 $t_{b\eta}$ 、 $t_{c\eta}$  被台站 A、B、C 记录到,那么各个台站记录中事件发生时刻  $\tau$  加上各台站的理论到时(即  $\tau$  加上位置  $\eta$  分别到各个台站的走时  $t_{a\eta}$ 、 $t_{b\eta}$ 、 $t_{c\eta}$ )对应的振幅最大,将此时刻的振幅累加得到表征时刻  $\tau$  位置  $\eta$  事件发生可能性的亮度函数值:

$$br(\eta, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |(\tau + t_{\eta n})| \quad (1)$$

式中  $u_n$  为归一化的波形记录,各个台站取相同权重,  $t_{\eta n}$  (图 1 中为  $t_{a\eta}$ 、 $t_{b\eta}$ 、 $t_{c\eta}$ ) 表示位置  $\eta$  到台站  $n$  计算的某个最大震相的走时,  $u_n(\tau + t_{\eta n})$  表示取台站  $n$

的归一化波形记录中  $\tau + t_{\eta n}$  时刻对应的振幅,因子  $\frac{1}{N}$  使得亮度函数值在  $[0, 1]$  之间。显然,如果所有台站记录的最大振幅都是对应着时刻  $\tau$  位置  $\eta$  的事件,则亮度函数值  $br(\eta, \tau) = 1$ , 而时刻  $\tau$  位置  $\eta'$  (图中的实心五角星) 的亮度函数值  $br(\eta', \tau) = 0$ , 这和假设相一致。

通过系统地搜索可能位置和时间就可以确定事件的时空分布。在通常情况下,亮度函数值为 1 的情况很少见,可以认为整个时空中亮度函数值最大时对应着事件发生的时刻和位置。

由于对速度模型的认识存在误差,每个台站理论最大振幅的到时和观测到时有微小差别,因此在选定的时间窗内包含前后时间点的贡献,公式为:

$$br(\eta, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\sum_{m=-M}^M W_m |\mu_n(\tau_{\eta n} + m\delta t)|}{\sum_{m=-M}^M W_m} \right\} \quad (2)$$

式中,  $M$  表示以理论到时的时间窗长,  $\delta t$  为采样间隔,  $W_m$  是根据理论到时和观测到时差而选择的权重。

## 3 地震定位实例

### 3.1 台站筛选

震源扫描算法中到时决定了计算亮度函数值的数据,而在数据处理过程中发现黄梅台、宁陕台记录到地震的时刻远远滞后于理论到时。对 2008 年 12 月—2009 年 4 月期间  $20^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 、 $100^\circ \sim 130^\circ \text{E}$  范围内 4.5 级以上地震进行了统计(表 1)。利用地震目录提供的震源信息(2009 年 1 月 4 日台湾地震和 2009 年 3 月 7 日琉球群岛地震因数据质量差未使用)和黄梅台、宜昌台、宁陕台(2009 年 4 月无数据)、乾陵台、张家口台在此期间提取的地震到时,计算出时距图(图 2)。黄梅台和宁陕台记录的地震到时有明显的时间滞后,对比不同方向的地震射线,发现该时间滞后不因方向不同而不同,同时,黄梅台和宁陕台附近没有明显的活动断层和低速区,因此推测,这两个台站宽频带倾斜仪的时间系统可能出现了故障。

根据不同地震走时算出的时间改正值相差太大,同时了解到实验观测期间黄梅台、宁陕台的宽频带倾斜仪频繁更换仪器和部件。因此在地震定位中,未使用这两个台站的数据。

### 3.2 定位实例

选择宽频带倾斜仪同时观测台站数相对较多的时段(2008-12—2009-04)作为研究时段。在此期间,乾陵台、宜昌台、张家口台 3 个台站(图 3,定位

表 1 地震目录  
Tab.1 Earthquake catalog

发震日期 (年-月-日)	发震时刻 (时:分:秒)	经度(°)	纬度(°)	深度(km)	震级( <i>M</i> <sub>s</sub> )	参考地点
2008-12-29	14:18:21.5	105.21	32.31	10	4.7	四川省绵阳市江油市
2008-12-30	09:31:25.7	122.39	24.73	95	4.9	台湾宜兰海域
2009-01-04	06:04:32.6	121.84	24.17	10	5.2	台湾花莲海域
2009-01-15	02:23:36.8	103.21	31.26	15	4.7	四川汶川
2009-01-17	20:41:51.5	104.07	26.87	10	4.5	贵州威宁
2009-01-23	20:38:13.1	121.13	21.22	12	5.5	菲律宾群岛地区
2009-01-24	21:46:36.2	122.02	24.92	12	4.5	台湾宜兰海域
2009-01-24	10:38:52.9	125.99	24.52	42	4.5	琉球群岛西南部
2009-02-10	05:24:33.9	121.17	22.6	11	4.8	台湾台东海域
2009-03-04	11:44:55.8	101.47	45.49	10	5.0	蒙古
2009-03-04	00:21:48.7	104.85	31.9	25	4.7	四川江油
2009-03-07	19:53:33.9	126.88	26.6	151	4.8	琉球群岛
2009-03-12	16:25:37.8	105.04	32.42	16	4.7	四川青川
2009-03-16	07:20:21.1	122.26	24.81	7	4.5	台湾宜兰海域
2009-03-22	22:45:42.4	128.49	25.9	5	5.1	琉球群岛
2009-03-22	20:48:52.1	104.2	26.95	11	4.9	贵州威宁
2009-03-27	03:19:51.2	127.28	27.01	135	6.0	琉球群岛
2009-04-06	00:47:03.9	104.26	31.86	9	4.5	四川北川
2009-04-15	15:23:30.5	129.85	26.9	7	5.1	琉球群岛
2009-04-17	20:37:44.7	121.58	24.05	4	4.5	台湾花莲
2009-04-20	15:22:39.3	129.99	27.14	44	5.0	琉球群岛

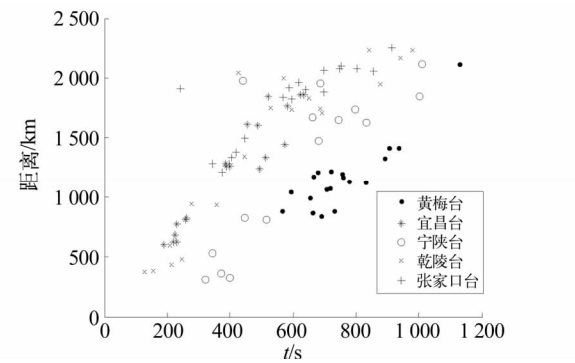


图 2 时距图  
Fig. 2 Diagram of time-distance

中未使用三角形台站的记录数据)记录的数据连续,固体潮清晰,有明显的近震、远震波形。

根据中国台网地震目录<sup>[11]</sup>,研究时段内台网内没有较大地震发生,选取离台站较近的的一次网外地震,该地震于 2008 年 12 月 29 日 14:18:21.5 发生在中国四川(32.31°N,105.21°E),震级大小为 *M*<sub>s</sub>4.7,上述 3 个台站均记录到了该次地震。

对宽频带倾斜仪记录到的原始数据通过小波(db4 小波)分解并提取 1~6 层的数据进行重建获得高频数据(2~128 s),以滤去低频信号、凸显地震信号。为消除理论到时和观测到时的微小差别,选择 20 s 长度的正态分布时间窗对高频数据进行卷积。

速度模型取均匀球壳模型,初始速度取 3 km/s,并在此基础上适度调整。由于地震为浅源地震(10 km),同时地震距台网较远(距离最近台站乾陵 376 km),对水平距离影响(0.13 km)的数值远小于初始速度,因此,距离计算中仅考虑椭球(WGS-84 参考椭球)面距离,误差不超过 10 m<sup>[12]</sup>。

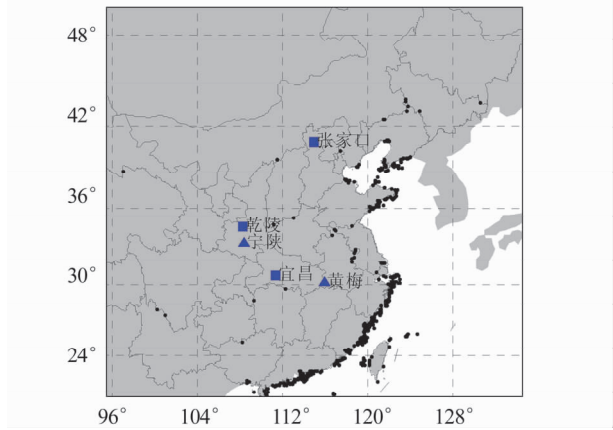


图 3 台站分布  
Fig. 3 Location of seismic stations

扫描时间选取在 14:10—14:30 的时间段内,扫描间隔为 1 分钟。在扫描范围 20°~50°N,100°~130°E 内,以 0.5°为间隔建立的格网,速度分别取 2.8、2.9 以及 3.0 km/s,按照震源扫描算法计算亮

度函数值。最大亮度函数值所在的位置即代表定位的地震发生位置,最大亮度函数值出现的时刻即代表定位的地震发生时刻(图 4~6,图中方框为台站位置,圆圈为最大亮度函数值位置,星形符号为实际地震位置,颜色表示计算得到的亮度值,图 7 中意义同)。

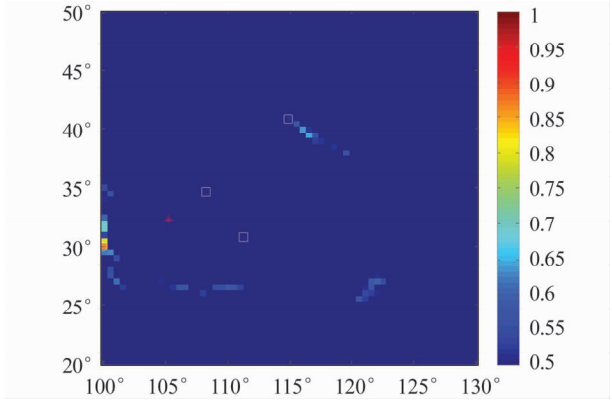


图 4  $V=2.8\text{ km/s}$  的亮度图(14:15:00)  
Fig. 4 Diagram of lightness with  $V=2.8\text{ km/s}$ (14:15:00)

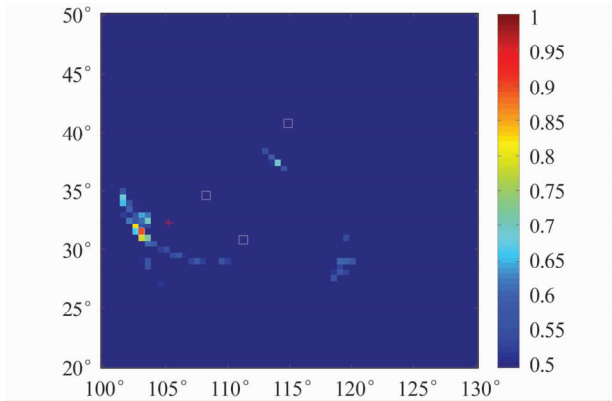


图 5  $V=2.9\text{ km/s}$  的亮度图(14:18:00)  
Fig. 5 Diagram of lightness with  $V=2.9\text{ km/s}$ (14:18:00)

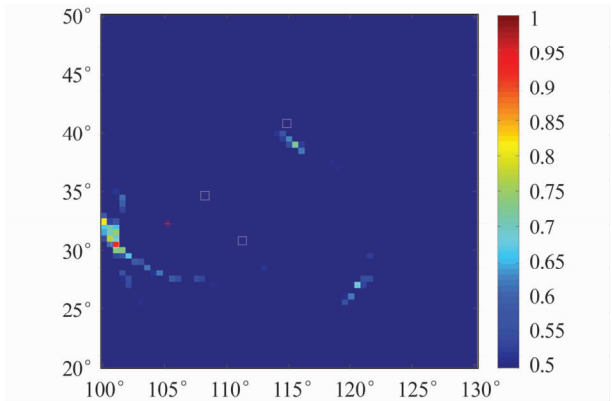


图 6  $V=3.0\text{ km/s}$  的亮度图(14:16:00)  
Fig. 6 Diagram of lightness with  $V=3.0\text{ km/s}$ (14:16:00)

由图 4~6 可知,速度结构对定位的时刻和位置都有较大影响,取  $2.9\text{ km/s}$  对应的定位结果为最终结果。

使用不同的时间和空间扫描步长,发现它们只对定位结果的时间和空间分辨率有影响。

采用相同的方法和参数,扫描时间段取 09:20—09:40,速度值取  $3.3\text{ km/s}$ ,对 2008 年 12 月 30 日 09:31:25.7 发生在台湾( $24.73^\circ\text{N}$ ,  $122.39^\circ\text{E}$ )的一次  $M_B 4.9$  地震进行了定位,定位结果见图 7。

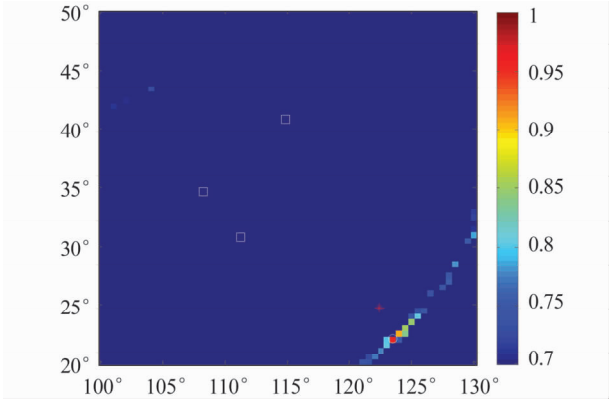


图 7 亮度图(09:30:00)  
Fig. 7 Diagram of lightness(09:30:00)

比较两次定位结果(表 2),可以明显看到距离台网越远,定位误差越大。同时,宽频带倾斜仪台站数少,由于实验观测台站数量有限及数据质量差等因素,用于定位的台站仅有 3 个。另外,震源分布在台网外部且距离较远,特别是对于发生在台湾的地震定位中,地震离最近的台站都有  $878\text{ km}$ 。距离越远定位需要更精确的速度模型,而均匀球壳模型则过于简单。

表 2 定位结果比较

Tab.2 Comparison between the location results						
地震	地震目录位置		定位结果		差值	
	纬度	经度	纬度	经度	纬度	经度
四川地震	32.31°	105.21°	32°	104°	0.31°	1.21°
台湾地震	24.73°	122.39°	22°	123.5°	2.73°	-1.11°

5 讨论与结论

使用宽频带倾斜仪数据,采用震源扫描算法对地震进行定位,在台站数少、地震分布在台网外部且距离远、速度模型简单的情况下,得到了可以接受的结果。

震源扫描算法无需辨认震相和初动,可有效应用于使用宽频带倾斜仪记录数据对地震的定位中,对台网外地震的定位也有一定的精度,其精度随距离增加而降低。

黄梅台、宁陕台的宽频带倾斜仪时间系统可能存在故障,在使用 2008 年 12 月—2009 年 4 月该两台的数据进行分析时应避免时间滞后带来的问题。