

地震波到时与视出射角联合定位方法研究^①

李 稳¹, 张元生^{1,2}, 何 斌¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:提出了利用地震波到时和 P 波初动视出射角联合定位的新方法。经过理论计算和实际地震资料处理结果分析,显示该方法对震源深度分辨有较好的改善,从而提高了地震的定位精度。该方法适合于现代数字化地震观测定位,其地震定位结果对研究地震断层性质和断层的空间展布有重要意义。

关键词:地震波到时; 视出射角; 联合定位

中图分类号: P315.65

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)03-0207-04

Study on Seismic Location Method Using Seismic Arrival-time and Apparent Emergence Angle

LI Wen¹, ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, HE Bin¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A new seismic location method using seismic arrival-time and P-wave apparent emergence angle is presented. Through actualized theoretical calculation and actual seismic data disposition, it is proved that using this method could improve the resolving power to focal depth. This method is better for seismic location in the digital seismic network, and the results are valuable for studying fault properties and fault spreading.

Key words: Seismic arrival-time; Apparent emergence angle; Multiparameter seismic location

0 引言

地震定位指的是确定地震的震源位置和发震时刻。地震定位结果可提供有关地震活动性的重要信息。探索地震定位方法是地震科学的重要课题。

早期的地震定位主要采用几何作图法。计算定位起源于 1912 年 Geiger 法的提出^[1-2],其实质是将非线性方程组线性化,并通过最小二乘原理求解。到 20 世纪 70 年代随着计算机的兴起,Geiger 的思想得到了广泛应用,并出现了一些改进方法,如阻尼最小二乘法^[3]、共轭梯度法、奇异值分解法等,这些方法在一定程度上解决了迭代过程的失稳和发散,提高了数值计算的稳定性。为解决用简单速度模型代替复杂地壳结构所引起的误差,发展出了多事件

定位法;Douglas 提出了同时反演多个地震震源参数和台站校正的 JED 方法^[4];Dewey 将其扩展成包括震源深度定位的 JHD 方法^[5];后来 Crosson 提出了震源位置与速度结构联合反演的 SSH 方法^[6],该方法在地震定位的同时还可获得有关速度结构的信息,至今仍得到众多学者的深入研究和广泛应用^[7-14]。相对于直接求取震源位置的绝对定位法,在一定条件下计算震源之间相对位置的定位方法称为相对定位法,如主事件定位法^[15]和双差定位法^[16]。其中双差法不但能有效减小由于对地壳速度结构了解不精引起的误差,而且不依赖于主事件,在丛集地震空间跨度较大时也适用,因而得到了广

① 收稿日期:2009-01-05

基金项目:国家自然科学基金(40874029)资助;中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2009023

作者简介:李 稳(1983-),男(汉族),河南开封人,硕士研究生,主要从事地震波理论与应用研究。

泛应用^[17-20]。目前非线性定位法也得到了快速发展,常见的有 powell 法、遗传算法^[21]、蒙特卡洛法^[22]等。非线性定位法实现从数据空间到模型空间的直接映射,可有效避免解陷入局部极小,但一般运算量较大。

虽然地震定位方法在不断完善,但震源深度定位不精已成共识。为了提高对震源深度的分辨,本文提出了联合定位的新方法,并进行了理论计算和实际地震定位计算。

1 原理与方法

1.1 视出射角与真出射角

真出射角是地震波射线与地面的夹角,常用 e 表示。视出射角是地面位移矢量与地面的夹角,常用 \bar{e} 表示^[23]。视出射角计算见公式(1);视出射角与真出射角的关系式为公式(2):

$$\tan \bar{e} = \frac{A_z}{\sqrt{A_{NS}^2 + A_{EW}^2}} \quad (1)$$

$$\cos e = \frac{V_P}{V_S} \cdot \cos\left(\frac{90^\circ + \bar{e}}{2}\right) \quad (2)$$

式中, A_z 为地动位移的垂直分量, A_{NS} 为 NS 分量, A_{EW} 为 EW 分量; V_P 为纵波速度; V_S 为横波速度; 其比值为介质的泊松比。

1.2 联合定位方法

本文的联合定位方法是一种利用到时数据和视出射角参数进行地震定位的方法。在地球物理反演中,增加观测信息量或增加独立的参数信息可减轻反问题的多解性。该方法增加了地震波视出射角参数无疑可以提高对地震深度的分辨,是本方法的特点。

联合定位方法的基本原理为应用蒙特卡洛法来实现地震联合定位。蒙特卡洛法是一种随机搜索方法,具有彻底搜索法的效果,同时比彻底搜索法的计算效率高。在联合定位计算过程中根据对离群点的加权方式不同及量纲不同^[24],以走时残差的 2-范数与真出射角残差的 1-范数相乘建立目标函数,其表达式为

$$E = \|t_i^O - t_i^T\|_2 \cdot \|e_j^O - e_j^T\| \quad (3)$$

上式可写成

$$E = \sqrt{\sum_i^N (t_i^O - t_i^T)^2} \cdot \sum_j^M |e_j^O - e_j^T| \quad (4)$$

式中, i 是台站序号; N 是台站总数; t_i^O 为第 i 个台站的观测走时; t_i^T 为理论走时; j 是具有视出射角的台站序号; M 为具有视出射角参数的台站总数; e_j^O 为

第 j 个台站的观测真出射角值; e_j^T 为第 j 个台站的真出射角理论值。

如果地震为双差定位结果,在速度模型不准确的情况下我们只做震源深度修正。其迭代目标函数为

$$E = \sum_j^M |e_j^O - e_j^T| \quad (5)$$

根据水平层状介质模型进行射线追踪^[25]可计算出理论走时(t_i^T)和理论真出射角(e_j^T),波速比可取泊松介质(波速比为 1.732),应用公式(2)可计算出实际真出射角(e_j^O)。在地震定位迭代计算过程中,使其目标函数值最小或达到预期值,可终止计算。

2 计算与分析

2.1 建立速度模型

考虑到甘肃地震台站的实际分布情况,选择图 1 中的矩形区域(实线框)为理论计算区。根据前人在临泽地区(虚线框)的层析成像研究成果^[8]建立了水平层状速度模型(表 1),波速比取 1.732(泊松介质)。在理论计算中整个区域的速度模型与表 1 相同,不考虑横向非均匀性。而在临泽震群的实际计算中应用双差定位结果,加入临泽附近的几个台站的视出射角参数,只做震源深度修正。所以该速度模型是合理的。

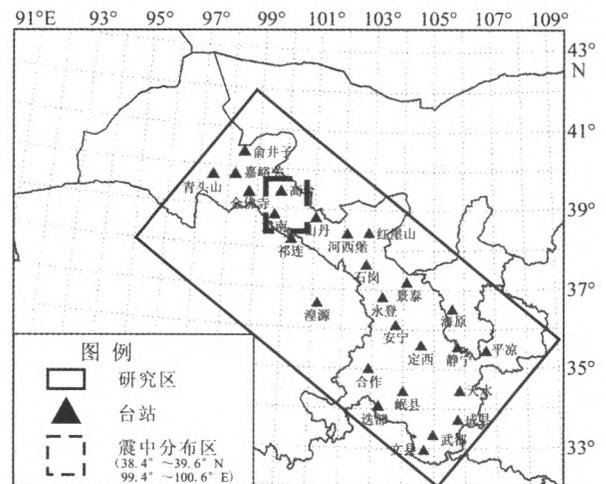


图 1 研究区和台站分布图

Fig. 1 Study area and locations of seismic stations.

2.2 理论计算

根据上述地震台站及速度模型,通过理论计算获得一组理论数据,包括地震空间位置参数(图 2(a))和每个地震的台站 \bar{P} 和 \bar{S} 理论走时及理论真

出射角。然后对地震的经度和纬度以 $\pm 0.3^\circ$ 为上限进行随机扰动;对深度以 ± 10 km 为上限进行随机扰动。扰乱后地震空间分布如图 2(b)所示。深度对比如图 2(c)。图 3(a)为利用到时数据的蒙特卡洛法定位结果;图 3(b)为利用到时与视出射角的蒙特卡洛法联合定位结果;图 3(c)为其深度对比。考虑到实际工作中双差法使用的普遍性,利用双差法进行理论计算所得结果如图 4(a)–(c)所示。

表 1 水平层状速度模型

深度/km	P 波速度/[$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$]
0~5	5.05
5~10	5.95
10~15	6.00
15~20	6.21
20~25	6.28
25~50	6.65
莫霍面	8.17

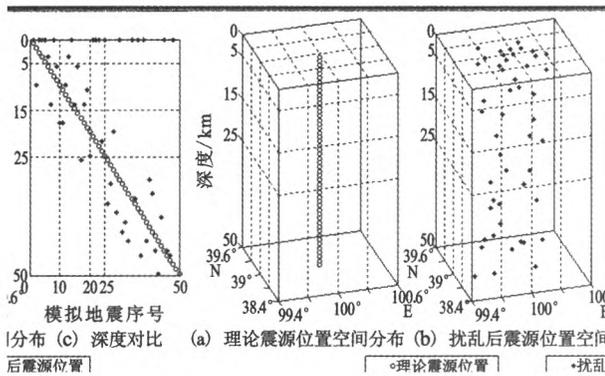


图 2 理论震源位置及扰乱后震源位置分布

Fig. 2 Distribution of theoretical earthquake locations and disturbed earthquake locations.

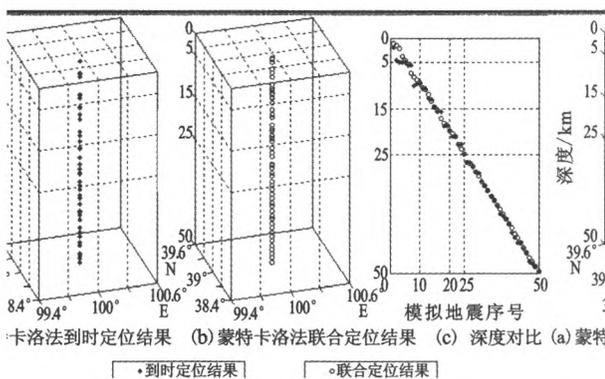


图 3 蒙特卡洛法定位结果对比图

Fig. 3 Locations results using Monte Carlo method.

可见在模型准确的情况下,利用到时的蒙特卡洛法和双差法定位结果已具有精确的震中位置,水平向误差在 0.2 km 左右。但深度误差相对较大,在深度对比图中表现明显,平均误差分别为 0.54

km 和 2 km。联合定位结果在不失震中精度的基础上具有更高的深度准确度,平均误差仅为 0.21 km 和 0.35 km。我们根据理论数据计算了在准确震中位置,不同震源深度对应的平均走时残差和平均视出射角残差。图 5 为震源深度为 13.7 km 的模拟地震事件相应的残差曲线。其平均走时残差曲线在接近极小时变化平缓,而平均视出射角残差曲线却变化明显且在接近理论深度处达到极小。其它模拟地震事件的残差曲线图均有类似现象,由此推断视出射角对深度的敏感性高于到时。

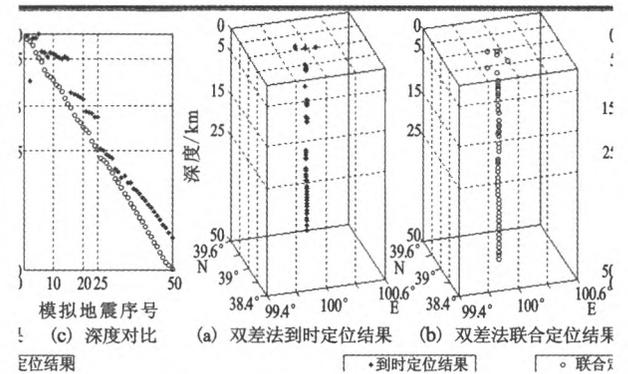


图 4 双差法定位结果对比图

Fig. 4 Locations results using double-difference algorithm.

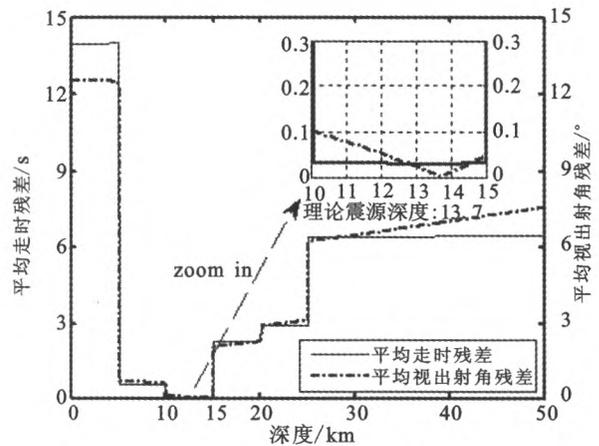


图 5 残差曲线图

Fig. 5 Distribution of residual curves.

考虑到实际工作中,对于小震仅震中附近台站能接收到清晰的波形记录,且求取视出射角时难免产生误差。仅选用震中距小于 100 km 台站的视出射角参数,并随机赋予它们 $\pm 1^\circ$ 的误差,重新进行计算。结果的深度平均误差为 1.4 km,增加了约 1 km,属于可接受的范围。

2.3 实际计算——临泽地震序列

甘肃临泽从 2004 年 6 月 3 日至 6 月 30 日共发

生了96个地震,其中3级以上地震12个,4级以上地震6个。在地震报告中有3台以上 \bar{P} 及 \bar{S} 到时记录的地震共47个。利用甘肃测震台网波形资料,处理求得相应地震的视出射角参数。考虑到获取整个研究区准确速度结构的困难,根据针对临泽地区建立的速度模型(表1),首先利用双差法定位,再加入视出射角参数做深度修正,实现联合定位。定位后的震中分布如图6所示,集中于榆木山北缘断裂(AF260-1)东段。为更好地分析地震与构造的关系,我们近垂直于断裂做A-B剖面(图7),可见增加视出射角修正的联合定位结果在深度方面更加收敛,呈"楔形"分布,具有SW向特征,且显示出较明显倾角,推断其约为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。定位结果与榆木山北缘断裂在中东段呈NW向延伸,走向 320° 左右,倾向SW,倾角逐渐变大为 $40^{\circ}\sim 75^{\circ}$,东段较陡的地质认识^[26-27]相吻合。

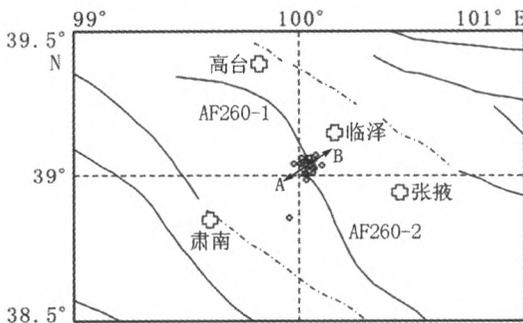


图6 临泽地区震中、断裂分布图

Fig. 6 Distribution of epicenters and faults in Linze area.

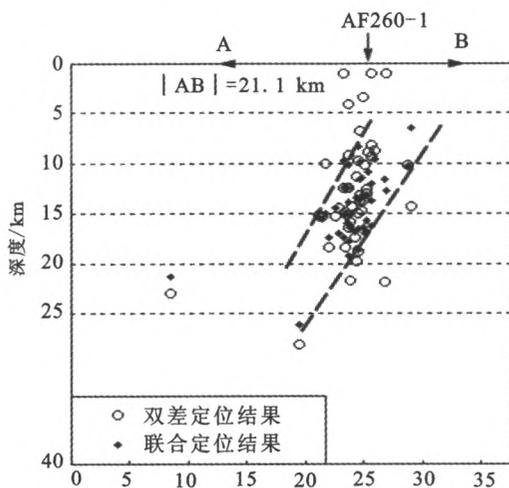


图7 垂直断裂的震源深度分布图

Fig. 7 Distribution of earthquake locations on the profile perpendicular to fault strike.

经过理论计算及实际地震资料处理结果分析,说明了利用地震波到时与P波初动视出射角进行联合定位可改善对震源深度的分辨。该定位方法在现代数字地震定位中具有广泛适用性。

地震定位精度受台网布局、读数精度、速度模型等诸多因素的影响,在现有条件下,通过增加对视出射角,尤其是震中附近若干台站视出射角的利用,提高定位精度,获取更准确的深度结果,对研究断层性质、断层空间展布有实用价值。

致谢:感谢沈旭章博士在泊松比取值问题中给予的指导和帮助。

[参考文献]

- [1] 杨文东,金星,李有山,等. 地震定位研究及应用综述[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(1):14-20.
- [2] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only[J]. Bull. St. Louis. Univ.,1912,8:60-71.
- [3] 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. Am,1986,76(3):771-783.
- [4] Douglas A. Joint epicenter determination[J]. Nature,1967,215:47-48.
- [5] Dewey J. Seismicity and tectonics of western Venezuela[J]. Bull. Seism. Soc. Am,1972,62(6):711-751.
- [6] 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.
- [7] Aki K, et al.. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere[J]. J. Geophys. Res,1977,82(2):277-296.
- [8] 李清河,张元生,涂毅敏. 祁连山—河西走廊地壳速度结构及速度与电性的联合解释[J]. 地球物理学报,1998,41(2):197-209.
- [9] 张元生,李清河,徐果明. 联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(I)——理论与方法[J]. 西北地震学报,1998,20(2):8-15.
- [10] 张元生,李清河,徐果明. 联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(II)——应用[J]. 西北地震学报,1998,20(3):8-15.
- [11] ZHANG Yuan-sheng, ZHOU Min-du, RONG Dai-lu, et al.. 3-D velocity structure in the central-eastern part of Qilianshan[J]. acta seismologica sinica,2004,17(3):272-281.
- [12] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J]. 西北地震学报,2007,29(4):319-325.

(下转 226 页)

3 结论与讨论

(上接 210 页)

- [13] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 甘东南地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J]. 中国地震,2007,23(4):383-392.
- [14] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 青藏高原东北缘地区非弹性衰减 Q 值和场地响应的研究[J]. 地震研究,2008,31(2):114-118.
- [15] Spence W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1980, 70(1): 171-183.
- [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] 杨智娴,陈运泰,郑月军,等. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学(D辑),2003,33(增刊):129-134.
- [18] 荣代璐,李亚荣. 基于"双差法"地震精确定位研究 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震的发震断层和发震机制(英文)[J]. 西北地震学报,2004,26(3):223-227.
- [19] 王海涛,李志海,赵翠萍,等. 新疆北天山地区 $M_s \geq 2.0$ 地震震源参数的重新测定[J]. 中国地震,2007,23(1):47-55.
- [20] 莘海亮,张元生,郭晓,等. 2004 年 6 月甘肃临泽震群地震精确定位[J]. 西北地震学报,2008,30(1):71-74.
- [21] 周民都,张元生,张树勋,等. 遗传算法在地震定位中的应用[J]. 西北地震学报,1999,21(2):167-171.
- [22] 王家映. 地球物理反演理论(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2002:136-145.
- [23] 傅淑芳,刘宝诚. 地震学教程[M]. 北京:地震出版社,1991: 83-85.
- [24] 姚姚. 地球物理反演基本理论与应用方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002:16-18.
- [25] 高尔根,徐果明. 二维速度随机分布逐步迭代射线追踪方法[J]. 地球物理学报,1996,39(增刊):302-308.
- [26] 国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂带[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [27] 陈柏林,王春宇,宫红良,等. 关于河西走廊盆地榆木山北缘断裂晚第四纪活动特征的新认识[J]. 地质通报,2007,26(8): 976-983.