

郝春月、郑重、张爽, 2013, 那曲、和田台阵对汶川地震序列的定位误差校正, 中国地震, 29(4), 472 ~ 479。

那曲、和田台阵对汶川地震序列的定位误差校正

郝春月 郑重 张爽

中国地震局地球物理研究所, 北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

摘要 针对汶川地震序列, 利用慢度-方位角台阵校正 (SASC) 法来提高那曲、和田 2 个台阵的定位精度。结果显示, 那曲台阵对汶川地震序列定位后, 其后方位角和慢度残差的标准偏差在校正后分别降低了 32% 和 58%; 和田台阵的分别降低了 38% 和 71%。校正后, 那曲台阵记录的汶川地震序列中 100% 的地震都提高了定位精度; 和田台阵记录的所有地震的后方位角精度均得到提高, 78% 的地震其慢度精度得到了提高。

关键词: SASC 汶川地震序列 中国西部台阵

[文章编号] 1001-4683 (2013) 04-0472-08

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

与大孔径台阵不同, 小孔径台阵仅限于对区域地震或地方震的监测。大多数台阵方法都是先假设一平面波到达台阵, 从而计算其波前的后方位角和慢度。一般来说, 通过台阵技术得到的后方位角和慢度与理论上得到的有区别。为了减小观测值与理论值的差距, 研究者提出了很多方法, 其中慢度-方位角台阵校正 (SASC) 法就是其中之一。SASC 法通过比较慢度和方位角的观测值与理论值, 在不同的慢度域给出特定的校正值。很多学者研究过 SASC 法 (Bondar et al, 1999、2001; Tiira, 1999; Wang et al, 2000; Schweitzer, 2001; Ben et al, 2004)。利用 SASC 法能够有效提高信号的相关性和地震的定位精度 (Bondar et al, 1999; Koch et al, 1999), 即使对那些未发生过地震的地区也是如此 (Tiira, 1999)。有一些台阵进行 SASC 后, 其误差分布显示有系统偏差, 暗示着系统偏差与地下结构有关 (Bondar et al, 1999, Schweitzer, 2001), 有可能是由于倾斜的 Moho 面或台阵下方的倾斜层引起的 (Krüger et al, 1992; Lin et al, 1996)。在这些 SASC 的研究成果中, 经过校正后的观测值与理论值之间残差的标准偏差急剧下降; 残差中值更接近于 0; 残差变化范围也大幅减小 (Ben et al, 2004)。对中国新建立的西部台阵, 还没有类似的研究。那曲与和田地震台阵已运行两年多, 对汶川地震序列, 有完备的数据记录。为了得到更精确的汶川地震定位结果, 我们对那曲、和田台阵进行了 SASC 校正。

[收稿日期] 2012-07-04; [修定日期] 2012-10-19

[项目类别] 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项 (DQJB08B19) 资助

[作者简介] 郝春月, 女, 1973 年生, 副研究员, 主要从事数字信号处理、地震台阵技术研究与应用、台阵数据处理与台阵设计、台站监测能力等研究。E-mail: haovanilla@sina.com

本文应用 SASC 法对那曲、和田台阵记录的汶川地震序列进行了定位误差校正。那曲台阵位于青藏高原腹地、西藏自治区的北部。那曲地区的地势为南北高、中间低,地貌结构总体上东部为高山峡谷,中西部为高原湖盆。和田台阵位于和田地区皮山县境内,场地南部为西昆仑山脉,东部为皮牙曼背斜主峰。地貌上,场地四周为中低山丘陵,中部为一相对平坦、大致呈钩形的侵蚀谷地。基岩普遍出露,多数地段岩石新鲜、完整,局部风化地段岩石露头有片理,估计去除风化层后岩石完整性会变好。那曲、和田台阵均有 9 个子台,台阵孔径约为 3km(图 1)。

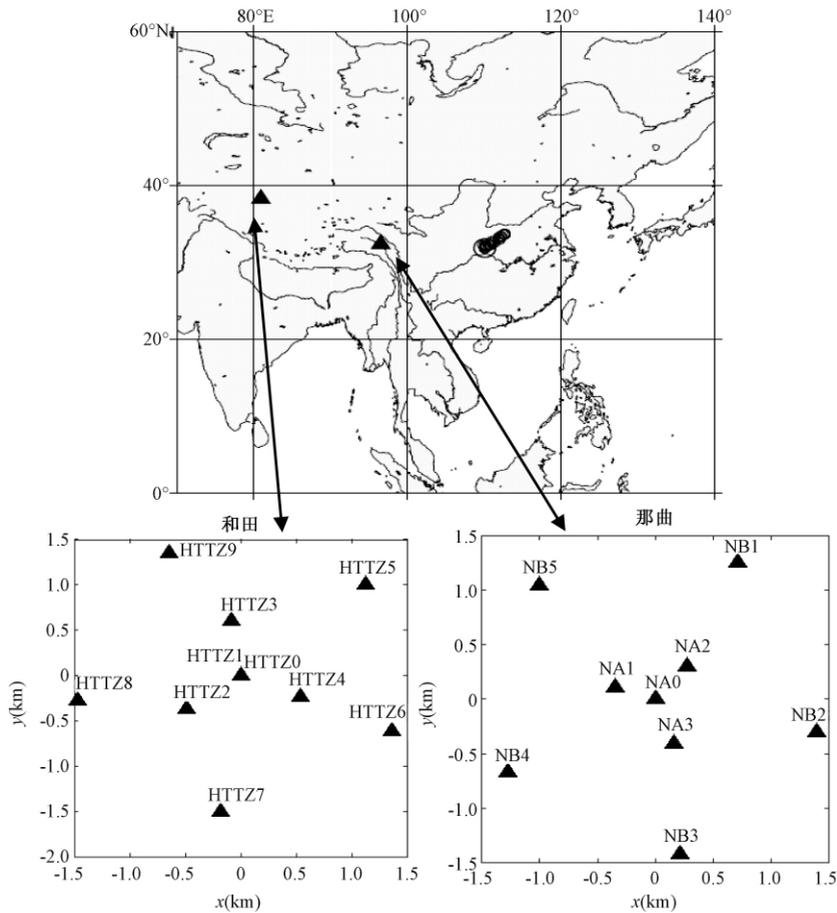


图 1 那曲、和田台阵的分布、布局 and 汶川地震序列

上面的图中三角表示台阵,圆圈表示 4.5 级以上的汶川地震序列;在下面的 2 个小图中,三角形表示台站

本文利用 $F-K$ 分析法获得地震后方位角和慢度的观测值,利用 IASP91 速度模型 (Kennett, 1991) 和来自国家地震台网中心的汶川地震目录计算后方位角和慢度的理论值 (Ben et al, 2004)。另外,采用 Schweitzer (2001) 提出的平均慢度校正法来计算 2 个台阵的矢量校正模型。通过以上方法,得到那曲、和田 2 个台阵的校正模型。

1 数据资料

本文主要对 4.5 级以上的汶川地震余震进行慢度校正,共计算了 2008 年 5 月 12 日~8 月 31 日间的 70 多个地震(图 1),地震参数由国家地震台网中心的地震目录提供。根据地震目录提供的震中位置,我们可计算后方位角和震中距;根据 IASP91 速度模型中震中距与慢度的关系,可获得地震的慢度值。以往的研究结果(Koch et al, 1997)表明,大的残差一般由异常情况引起,为此舍掉了后方位角残差和慢度残差分别大于 70° 和 $10\text{s}/^\circ$ 的地震,因为在计算慢度和后方位角的很多方法中,利用低信噪比的地震会产生分散性,并且当信噪比低于 20 时,误差会急剧增大(Steck et al, 1993; Walck et al, 1991; Harris 1990)。因此,本文剔除了信噪比小于 20 的地震。

2 分析方法

本文采用 F - K 分析法计算地震的后方位角和慢度,采用 Schweitzer (2001) 提出的平均慢度校正法进行 SASC 的计算。

2.1 F - K 分析

F - K 分析是一项标准的台阵技术,能够同时计算分布于不同慢度和方向的能量(Capon, 1973; Aki et al, 1980)。假如一个信号的慢度和后方位角是未知的,则可以进行慢度和后方位角组合的网格搜索以找出最好的参数组合,也就是这种组合能够使相加的信号产生最高的振幅。为减少计算时间,在谱域进行计算。在 F - K 分析中,手动拾取震相到时,并选取 3s 的时间窗。

2.2 平均慢度校正

以每 15° 的后方位角和每 $2\text{s}/^\circ$ 的慢度为步长,将 $0 \sim 20\text{s}/^\circ$ 的慢度域划分为 240 个慢度子域。本文校正的汶川地震序列仅占有其中的几个慢度子域。本文规定每个子域至少应该有两个观测值。若一个慢度子域中没有或只有一个观测值,那么这个慢度子域将不会有校正值;若一个慢度子域有两个或多个观测值,那么观测值与理论值的误差矢量平均值将作为这个慢度子域的校正值(Schweitzer, 2001)。若后方位角校正值大于 70° 或慢度校正值大于 $10\text{s}/^\circ$, 那么这个校正值将被取消,因为较大误差常与不合理情况如 F - K 分析中应用了很差的调谐参数等(Koch et al, 1997)有关。

本文确定 s_{oc} 为校正矢量,从观测慢度 s_o 指向理论慢度 s_l 。第 i 个慢度子域的校正矢量被定义为该慢度子域内 n 个慢度偏差的平均值,由如下公式表示

$$s_{oc} = \frac{\sum_{i=1}^n (s_{oi} - s_{li})}{n}$$

2.3 SASC 结果

应用前述的方法和数据,完成了那曲、和田两个地震台阵对汶川地震序列的慢度-方位角台站校正。图 2 为两个台阵的校正矢量模型。从图 2 中可以看出,那曲、和田两个台阵的校正矢量在方向上均朝向圆心,且幅度较大。即两个台阵对汶川地震序列的慢度观测值均大于理论值,这可能是由台阵下方的地下结构引起的。

图 2(a)、2(b)中所表示的台阵对汶川地震序列的校正模型可用表 1 表示。

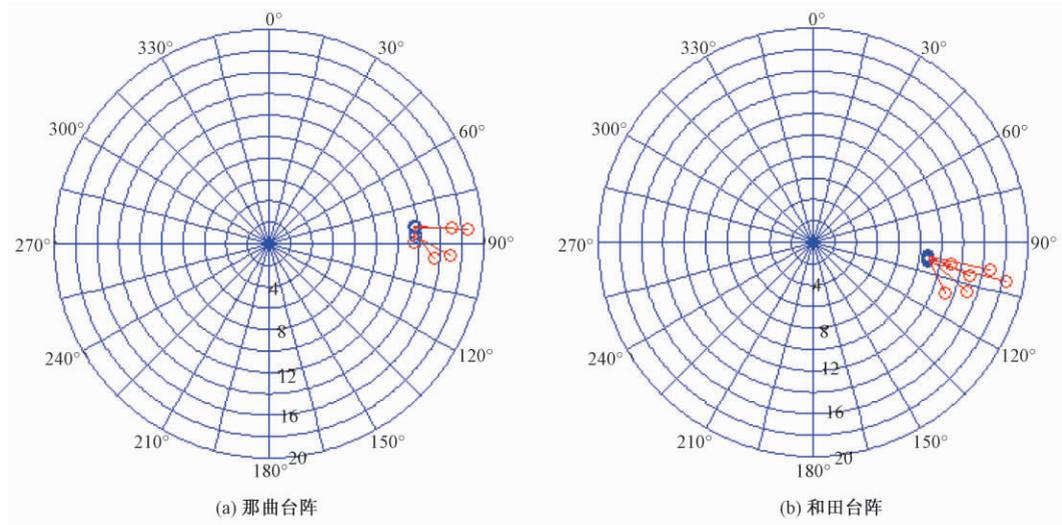


图2 那曲、和田两个台阵的 SASC 模型

径向轴表示 $0 \sim 20 \text{ s}/^\circ$ 的慢度, 每 $4 \text{ s}/^\circ$ 一个标注; $0^\circ \sim 360^\circ$ 的后方位角按顺时针方向读取;

红色圆圈表示观测值; 蓝色圆圈表示理论值

表 1

那曲、和田台阵的慢度-方位角校正值

台阵	后方位角 ($^\circ$)		慢度 ($\text{s}/^\circ$)	
	观测值	校正值	观测值	校正值
那曲台阵	> 75 ~ 90	-5.80	> 12 ~ 14	0.10
	> 75 ~ 90	-1.46	> 16 ~ 18	-3.35
	> 75 ~ 90	-2.94	> 18 ~ 20	-4.94
	> 90 ~ 105	-8.94	> 14 ~ 16	-1.80
	> 90 ~ 105	-6.48	> 16 ~ 18	-3.23
和田台阵	> 90 ~ 105	-0.38	> 12 ~ 14	-2.21
	> 90 ~ 105	-5.29	> 14 ~ 16	-4.18
	> 90 ~ 105	-2.32	> 16 ~ 18	-5.99
	> 90 ~ 105	-2.23	> 18 ~ 20	-7.63
	> 105 ~ 120	-13.39	> 12 ~ 14	-2.38
	> 105 ~ 120	-10.82	> 14 ~ 16	-4.26

由 $F-K$ 分析计算的地震定位结果, 减去 SASC 模型中相应慢度子域内的校正矢量, 可以得到校正后的地震定位结果。图 3 (a) ~ 3 (d) 分别显示了那曲、和田台阵在 SASC 校正前、后的定位结果与台网中心给出的定位结果之间的误差矢量。比较图 3 (a)、3 (b) 可发现, 校正前那曲台阵的慢度观测值比理论值大; 而经过 SASC 校正的那曲台阵的地震定位误差矢量明显减小, 误差矢量在方向上也出现随机性。图 3 (c)、3 (d) 显示, 与那曲台阵相似, 校正前和田台阵地震定位中的慢度观测值均大于理论值, 即有系统偏差; 而经过 SASC 校正的定位误差明显减小, 系统偏差也随之消失。故此表示 SASC 消除了和田台阵的系统偏差, 这可能是由于校正对象是地震序列。因为 SASC 对随机误差的校正效果较好, 它采用一定慢度范围内误差的平均值作为校正值。对于有些系统误差, SASC 不能将其完全消除掉。

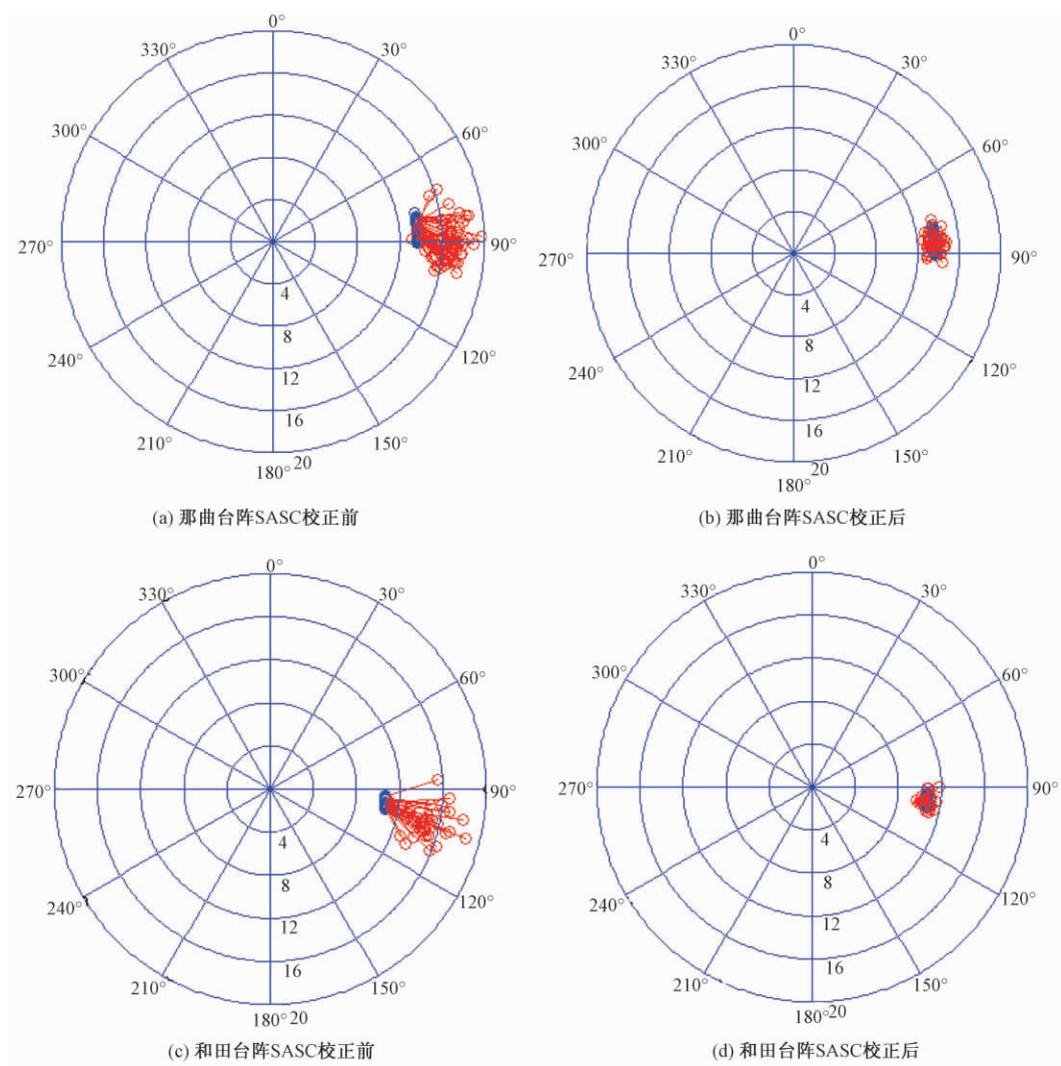


图3 两台阵的定位误差矢量

径向轴表示 $0 \sim 20 \text{ s}^{-1}$ 的慢度, 每 4 s^{-1} 一个标注; $0^\circ \sim 360^\circ$ 的后方位角按顺时针方向读取;

红色圆圈表示观测值; 蓝色圆圈表示理论值

3 SASC 的评估

经过对那曲、和田台阵校正前后后方位角残差和慢度残差的比较可知, 校正后最大误差范围明显减小, 而小误差地震明显增多, 后方位角和慢度残差的中值在校正后趋于 0, 而校正前此中值与 0 相距很大。那曲、和田台阵的后方位角和慢度残差在校正前后的中值见表 3。由表 3 可见, 那曲台阵经过校正后, 后方位角和慢度残差的标准偏差分别下降了 32%、58%, 而残差的中值均降到 0.1 以下; 和田台阵后方位角和慢度残差的标准偏差分别下降了 38%、71%, 中值均降到 0.7 以下。

表 3 那曲、和田台阵 SASC 校正前后后方位角残差与慢度残差的标准偏差和中值

台阵	分组	后方位角残差 ($^{\circ}$)		慢度残差 ($s/^{\circ}$)	
		标准偏差	中值	标准偏差	中值
那曲台阵	校正前	5	4.5	1.2	3.2
	校正后	3.4	-0.09	0.5	0.05
和田台阵	校正前	5.6	4.6	1.6	4.3
	校正后	3.5	-0.7	0.5	0.04

图 4(a)~4(d) 分别显示了那曲、和田台阵后方位角残差和慢度残差在校正前后定位结果的对比。在图 4 的每一分图中都有一条对角线用以区分定位结果,可以检验出经过 SASC 后的定位结果是否改善。对角线左上方的圆圈表示校正后定位精度提高的事件而其右下方的圆圈表示校正后定位精度下降的事件。经过分析图 4,我们给出以下结果:汶川地震序列经过那曲台阵的慢度校正后,所有地震的定位精度都得到提高。汶川地震序列经过和田台阵的慢度校正后,所有地震的后方位角精度得到提高,78.8% 的地震其慢度精度得到提高。

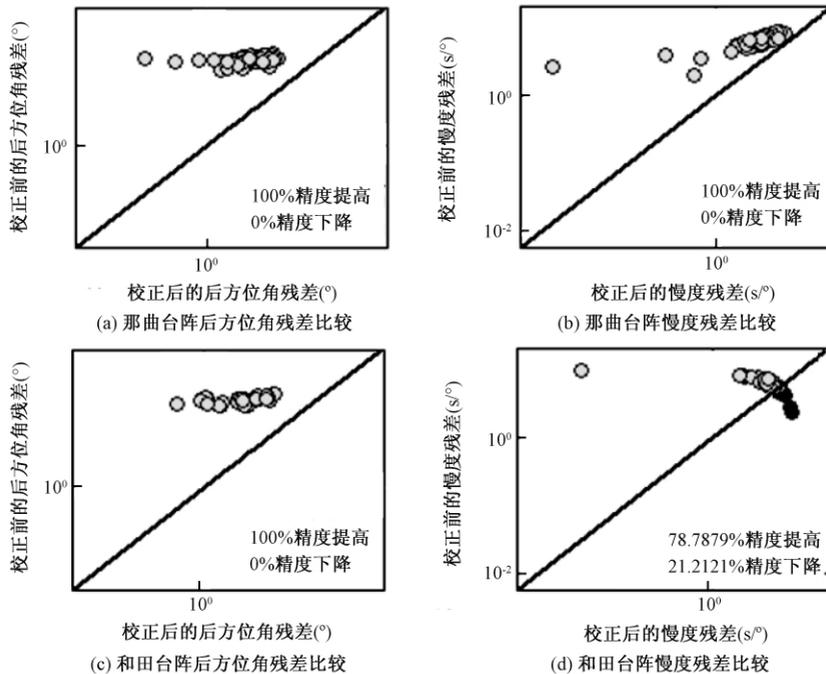


图 4 那曲、和田台阵在校正前后定位结果的比较

4 结论

对那曲、和田台阵进行 SASC 评估的结果显示,平均慢度校正法能够大幅度地减小定位误差矢量。对于地震序列而言,SASC 的校正效果要好于对一般随机地震的校正。

那曲、和田台阵经过校正后,其记录的汶川地震序列后方位角残差和慢度残差的标准偏差大幅度下降,校正后残差中值均趋于 0。汶川地震序列经过那曲台阵的慢度校正后,

100% 的地震的定位精度都得到提高。对于和田台阵, 经过慢度校正后, 所有地震的后方位角精度得到提高, 78% 的地震其慢度精度得到提高。结果表明, 经过慢度校正后, 两个台阵对于汶川地震序列的定位精度大幅度提高。

由那曲、和田台阵记录的汶川地震序列的定位误差分布发现, 两个台阵针对汶川地震序列均出现不同程度的系统误差, 这可能与两台阵的地下结构有关, 但由于我们使用的事件是地震序列, 慢度域的覆盖面积很少, 故也可能和这个序列发生地的地下结构有关。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”为本研究提供地震波形数据。感谢靳平研究员的指导与帮助。

参考文献

- Aki K, Richards P, 1980, Quantitative seismology, theory and methods, vols. I and II [M]. Freeman, New York J Seism, 70 ~ 77.
- Ben H Y, Koch K, Bartal Y, 2004, Use of GSETT-3 gamma data in the slowness-azimuth calibration of IMS primary arrays at regional distances, J Seism, **8**, 129 ~ 142, doi:10.1023/B:JOSE.0000009514.12336.fb.
- Bondar I, North R, Beall G, 1999, Teleseismic slowness azimuth station corrections for the international monitoring system seismic network, Bull Seism Soc Am, **89**, 989 ~ 1003.
- Bondar I, Yang X, North R, et al, 2001, Location calibration data for CTBT monitoring at the prototype international data center, Pure Appl Geophys, **158**, 19 ~ 34. doi:10.1007/PL00001155.
- Capon J, 1973, Signal processing and frequency wave number spectrum analysis for a large aperture seismic array. Methods Comput Phys, **13**, 1 ~ 59.
- Harris D B, 1990, Comparison of the direction estimation performance of high-frequency seismic arrays and three-component stations, Bull Seism Soc Am, **80**, 1951 ~ 1968.
- Kennett B L N, 1991, IASPEI 1991 seismological tables, research school of earth science, Australian National University.
- Koch K, Kradolfer U, 1997, Investigation of azimuth residuals observed at stations of the GSETT-3 Alpha network, Bull Seism Soc Am, **87**, 1576 ~ 1597.
- Koch K, Kradolfer U, 1999, Determination of mislocation vectors to evaluate bias at GSETT-3 primary stations, J Seism, **3**, 139 ~ 151, doi:10.1023/A:1009823825899.
- Krüger F, Weber M, 1992, The effect of low-velocity sediments on the mislocation vectors of the GRF array, Geophys J Int, **108**, 387 ~ 393, doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00866.x.
- Lin C-H, Roecker S W, 1996, P-wave back azimuth anomalies observed by a small-aperture seismic array at Pinyon Flat, Southern California: implication for structure and source location, Bull Seism Soc Am, **86**, 470 ~ 476.
- Schweitzer J, 2001, Slowness corrections—one way to improve IDC products, Pure Appl Geophys, **158**, 375 ~ 396, doi:10.1007/PL00001165.
- Steck L K, Prothero W A, 1993, Observations of direct P wave slowness and azimuth anomalies for teleseismics recorded in Long Valley Caldera, California, Bull Seism Soc Am, **83**, 1391 ~ 1419.
- Tiira T, 1999, Slowness vector correction for teleseismic events with artificial neural networks, Phys Earth Planet Inter, **112**, 101 ~ 109, doi:10.1016/S0031-9201(98)00179-4.
- Walck M C, Chael E P, 1991, Optimal back azimuth estimation for three-component recording of regional seismic events, Bull Seism Soc Am, **81**, 643 ~ 666.
- Wang J, McLaughlin K, Nagy W, 2000, Updated Slowness-Azimuth Seismic Station Corrections for the CTBT International Monitoring System, CCB Memo CCB-PRO-00/20.

Corrections for the location errors of Wenchuan aftershocks recorded by Nagqu and Hotan array

Hao Chunyue Zheng Zhong Zhang Shuang

Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

Abstract We use slowness-azimuth station correction (SASC) method to improve the location accuracy of the Wenchuan aftershocks recorded by Nagqu and Hotan seismic arrays. The results showed that the standard deviations of backazimuth and slowness errors of Wenchuan aftershocks recorded by Nagqu array decreased 32% and 58% respectively after correction. The numbers are 38% and 71% for Hotan array. After the correction, the location accuracy of Wenchuan aftershocks recorded by Nagqu array are all improved, for Hotan array, 78% aftershocks were improved in slowness and 100% were improved in backazimuth.

Key words: SASC Wenchuan aftershocks Seismic arrays in western China