

兰州和海拉尔核查地震台阵慢度和方位角校正方法研究

王娟, 邱宏茂, 张波, 刘俊民, 王晓明,
王洪, 卢远镭, 许进, 李健, 崔甲甲

(禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085)

摘要:介绍了一种地震台阵慢度和方位角格点校正方法,在预定义的格点空间调整校正慢度和方位角,从而消除系统偏差,提高地震台站慢度与方位角估计的精度。利用该方法对我国核查地震台阵海拉尔和兰州方位角和慢度进行了校正,离线和在线的测试显示了台站慢度和方位角估计性能的提高。

关键词: 核查地震台阵; 慢度; 方位角; 校正

中图分类号: P315.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2010)04-0330-04

Research on Method of Slowness-Azimuth Station Corrections for LZDM and HILR Verification Seismic Arrays

WANG Juan, QIU Hong-mao, ZHONG Bo, LIU Jun-min, WANG Xiao-ming,
WANG Hong, LU Yuan-lei, XU Jin, LI Jian, CUI Jia-jia

(CTBT Beijing National Data Centre & Radio-Nuclide Laboratory, Beijing 100085, China)

Abstract: A method of slowness-azimuth station corrections (SASC) for seismic array which is designed to correct slowness and azimuth in predefined small bins is introduced. The aim of SASC is to remove the systematic bias from observations so that the performance slowness-azimuth for stations can be improved. The slowness-azimuth for HILR and LZDM Verification Seismic Arrays in Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CNBT) Beijing National Data Centre (NDC) is corrected using this method, and the results of testing with new correction show improvement of slowness and azimuth estimation.

Key words: CTBT seismic array; Slowness; Azimuth; Correction

0 引言

地震监测台站从结构上一般来说有三分向单台站和台阵两种类型。核查地震台阵是由日内瓦裁军谈判特设科学专家组在1958年提出,目的是探测远方地下核试验的地震信号,给禁止核试验提供核查手段。此后美国、英国等一些国家开始了建设地震台阵的试验与研究,先后建立了十多个地震台阵,包括加拿大的黄刀台阵、美国的LASA台阵和挪威的NORSAR台阵^[1]。1996年9月10日的联合国

大会通过了全面禁止核试验条约(CTBT),要求建立全球范围内的地震监测台网,它包含两部分:基本台网和辅助台网。基本台网由50个基本台站组成,辅助台网由120个辅助台站组成。基本台网将形成地震监测系统的主干,将近60%的基本台站将最终为地震台阵,其中包括我国的海拉尔台阵(HILR)和兰州台阵(LZDM)。2004年下半年海拉尔和兰州地震台阵通过了我国的验收,开始试运行,并于

收稿日期:2009-08-06

基金项目:国防科技预先研究军控核查技术(513310104)

作者简介:王娟(1973-),女(土家族),湖南涟源人,硕士,副研,现从事禁核试核查监测数据处理技术研究。

2007年7月向禁核试北京国家数据中心传送实时数据。

简单地说,地震台阵是在与所观测地震波波长相当的孔径范围内有规则排列的一组地震计,通过这组地震计的输出信号进行各种组合分析,压低至干扰背景,突出有用地震信号和获取有关震源及地球内部结构的信息。与单一的三分向地震台站相比,台阵的主要优点之一是可用频率-波数分析比较准确地提取出地震信号到达台站的方位角和慢度。这两个参数是表征地震信号的两个关键参数,在地震信号的识别、震相的关联和地震定位等多个方面都起着十分重要作用。但在实际运行中,台站的方位角和慢度会出现一定的系统偏差^[2]。由此需要进行一系列的标定来校正慢度和方位角,从而进一步校正震源位置。

本文提出的台站慢度、方位角格点校正,其目的是消除慢度与方位角的系统偏差,提高地震台站慢度与方位角估计的精度。本文所有的校正以 IAS-PEI91 模型为理论值,该模型是国家数据中心基本的地球模型。

1 慢度与方位角的计算与校正方法

1.1 计算方法

地震台阵的方位角、慢度用频率波数分析方法计算。地震台阵原始时域数据转换为频率波数功率谱,其尖峰表示空间相干波形数据的慢度和方位角。

国家数据中心数据处理系统使用宽带 f-k 算法^[3]计算频率波数功率谱,计算公式如下:

$$P(S_n, S_e) = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} \left| \sum_{i=1}^J F_i(f) \cdot e^{j2\pi f(s_n \cdot \text{dnorth}_i + s_e \cdot \text{deast}_i)} \right|^2}{J \sum_{f=f_1}^{f_2} \{ F_i(f)^2 \}} \quad (1)$$

式中 s_n, s_e 分别为慢度矢量的北南和东西分量; $F_i(f)$ 是第 i 个台阵传感器在频率 f 的傅立叶振幅; dnorth_i 和 deast_i 分别为第 i 个台阵元素相对于参考子台的北南、东西坐标; f_1, f_2 分别为最低和最高频率; J 为台阵传感器个数。

f-k 频谱的尖峰显示掠过台阵信号的慢度和方位角。两维插值可提高 f-k 功率谱的尖峰的慢度坐标 (S_{e_p}, S_{n_p}) 的精确性,经过插值处理的慢度坐标用来计算信号空间相干平面波能量的方位角和慢度:

$$\text{azimuth} = \begin{cases} \text{atan}\left(\left|\frac{S_{e_p}}{S_{n_p}}\right|\right) & S_{e_p}, S_{n_p} \geq 0 \\ 90 + \text{atan}\left(\left|\frac{S_{e_p}}{S_{n_p}}\right|\right) & S_{e_p} \geq 0, S_{n_p} < 0 \\ 180 + \text{atan}\left(\left|\frac{S_{e_p}}{S_{n_p}}\right|\right) & S_{e_p} < 0, S_{n_p} < 0 \\ 270 + \text{atan}\left(\left|\frac{S_{e_p}}{S_{n_p}}\right|\right) & S_{e_p} < 0, S_{n_p} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{slow} = \sqrt{S_{e_p}^2 + S_{n_p}^2} \quad (3)$$

1.2 慢度与方位角校正

为了实现地震台站慢度与方位角格点校正(SASC),我们在慢度空间设计了一个极平面格点文件,每个格点都由唯一的慢度和方位角间隔决定。对于慢度-方位角观察值的分布来说,极平面格点比简单的笛卡尔平面格点更合适。选取的慢度值范围从 0 到 40 sec/deg,包括区域性震相在不同的慢度区间方位角的划分有所不同,设计的格点文件一共包括 906 个格点,如图 1 所示。慢度-方位角的观察值、残差与理论值之间的关系如下^[4]:

$$\text{慢度: } \xi_p = \xi_o - \xi_r \quad (4)$$

$$\text{台站-事件方位角: } \theta = \theta_o - \theta_r \quad (5)$$

上两式中, ξ_r, θ_r 分别为慢度、方位角残差, SASC 校正的目的是减小预定义格点内观察值的系统偏差。在预定义的格点内的慢度与方位角校正值定义为该格点内慢度和方位角残差的中间值,校正后的慢度和方位角观察值如下两式所示:

$$\xi_c = \xi_o - \xi_r \quad (6)$$

$$\theta_c = \theta_o - \theta_r \quad (7)$$

ξ_c, θ_c 为预定义格点内的慢度、方位角校正值。在一

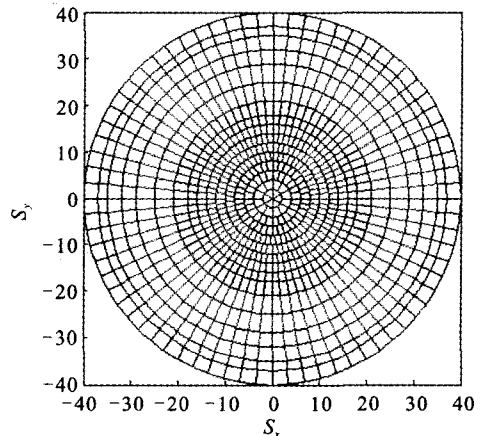


图1 SASC 格点文件图形表示
Fig. 1 SASC grid in slowness space.

个格点内震相的慢度与方位角须符合以下条件:该格点内的震相观察值个数需大于 10,慢度残差的标准偏差小于 1 sec/deg,方位角残差的标准偏差小于 15 deg,该格点内的校正才视为有效。以上限制是为了防止预定义格点内观察值的散度太大,当格点内观察值个数不够或有较大散度时,该格点内的慢度和方位角观察值将不做校正。

2 性能评估与测试结果

2.1 海拉尔和兰州台阵慢度和方位角估计性能评估

在执行慢度与方位角校正前,需对运行系统中的海拉尔和兰州台阵的慢度和方位角进行性能评估。我们分析了 20 个月(2007 年 8 月 1 日—2009 年 4 月 31 日)的数据。表 1 为未校正前 20 个月期间海拉尔和兰州台阵慢度和方位角估计性能。图 2 和图 3 分别为海拉尔和兰州慢度与方位角残差的柱状图,两图中(a)、(b)子图分别为未校正前的慢度残差柱状图和方位角残差柱状图,(c)、(d)子图为校正后的慢度残差柱状图和方位角残差柱状图。所取的样本为自动处理与交互分析相关联的高信噪比震相。理想情况下慢度与方位角残差柱状图应为均值为 0 的正态分布。然而实际情况下许多台站的慢度与方位角经常有一个系统偏差。在所选时间段内,海拉尔台阵的慢度和方位角估计性能比兰州台阵性能好,有较低的残差标准偏差和中间值。

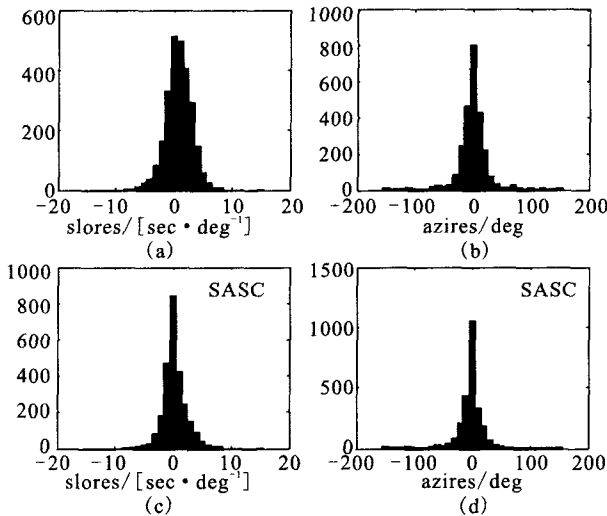


图 2 海拉尔台阵慢度与方位角残差柱状图

Fig. 2 Histograms of slowness and azimuth residuals at HILR.

2.2 测试结果

我们用前述方法对海拉尔和兰州台阵进行慢度

和方位角格点校正,并产生 SASC 参数文件,该参数文件用于国家数据中心台站处理和台网处理软件中。为得出两台阵的 SASC 参数文件,所使用的训练数据样本需满足以下条件:从分析员审定事件库中选择的事件至少由 5 个台站定位,且方位角的间隙小于 180°;属于被选择事件的信号为时间确定,高信噪比的信号;所有的检测信号为自动处理与交互分析相关联的高信噪比震相。在 2007 年 8 月 1 日—2009 年 4 月 31 日期间,分析员审定事件库中总的事件数为 19 704 个事件,符合上述条件的事件数为 5 126 个,其中有海拉尔台阵参与定位的事件为 3 263 个,兰州台阵参与定位的事件为 2 654 个。表 2 为海拉尔、兰州地震台阵的 SASC 比较,Nobs 为总的观察震相样本值;Ncor 为观察震相样本贡献给 SASC 校正的震相数目;Bin_pop 为有观察震相的格点数目;Ncb 为计算出的可用于校正的格点。

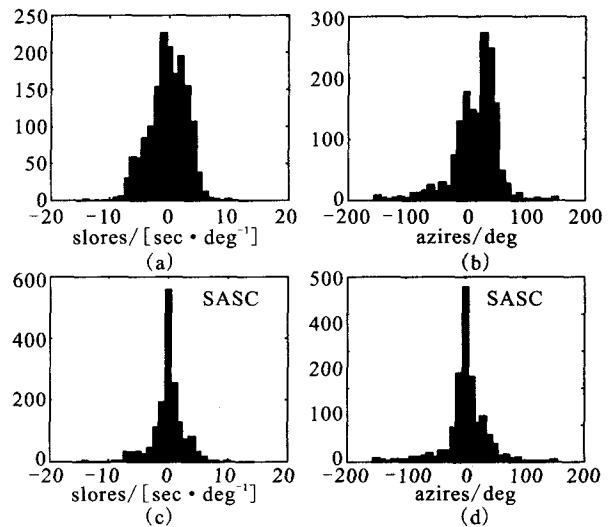


图 3 兰州台阵慢度与方位角残差柱状图

Fig. 3 Histograms of slowness and azimuth residuals at LZDM.

表 1 未校正前的海拉尔和兰州台阵慢度与方位角残差统计

台站	震相数	慢度残差/[sec·deg ⁻¹]		方位角残差/°	
		中间值	标准偏差	中间值	标准偏差
HILR	2 576	0.80	1.66	-0.01	17.28
LZDM	1 603	-0.10	2.38	24.22	27.35

表 2 海拉尔和兰州地震台阵的 SASC 比较

台阵	Nobs	Ncor	Bin_pop	Ncb
HILR	2 576	1 019	175	39
LZDM	1 603	624	184	24

图 4 分别为海拉尔和兰州地震台阵的 SASC 图,从格点中心指出的实心矢量显示落入格点中的信号将被该矢量校正(带一个菱形结束)。图中空白

的区域表明从观察数据中未得出格点校正。

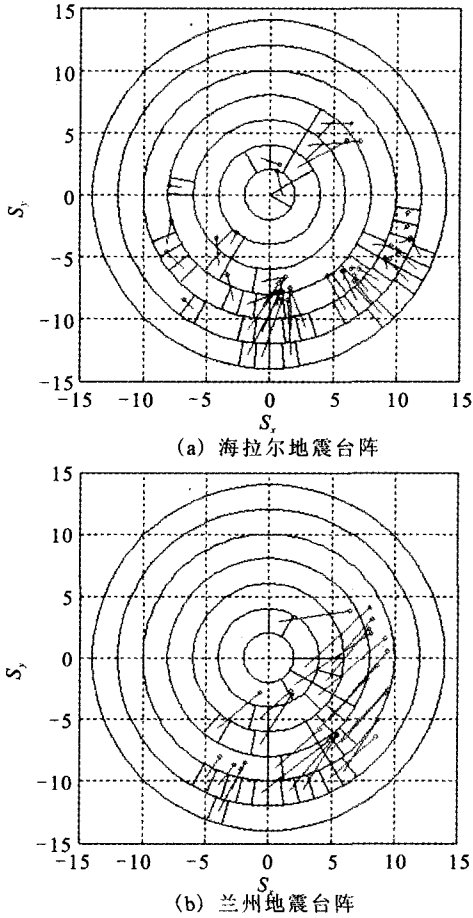


图 4 兰州和海拉尔台阵的 SASC 图
Fig. 4 SASC maps of HILR and LZDM.

表 2 为经过慢度和方位角格点校正后的海拉尔和兰州台阵的慢度与方位角残差统计。对比表 1 与表 2,校正后台阵的慢度和方位角估计性能比校正前的性能要好。图 2 和图 3 (c)、(d)子图中的慢度与方位角残差柱状图更近似为均值为 0 的正态分布。

表 2 校正后海拉尔和兰州台阵慢度与方位角残差统计

台站	震相数	慢度残差/[sec · deg ⁻¹]		方位角残差/°	
		中间值	标准偏差	中间值	标准偏差
HILR	2 576	0.07	1.35	-0.36	15.55
LZDM	1 603	0.02	1.62	0.93	21.45

3 结束语

本文讨论的台阵方位角和慢度校正方法具有通用性,开发的慢度方位角校正格点(SASC)程序能方便有效地对系统其他有足够多样本集的地震台站生成慢度方位角校正文件,完成台站的慢度方位角校正。程序设计灵活,参数文件中格点文件的设置及格点内慢度、方位角条件的选取可针对具体台站进行设定。利用本文所讨论的方法,采用 20 个月的样本数据对海拉尔和兰州台阵调整校正慢度及方位角,得出了该台站的新的台站慢度校正参数和 SASC 参数文件,经对这些新的校正参数的在线和离线测试显示了慢度和方位角估计性能有了提高。

需指出的是,本文所讨论的算法是建立在假设台站正下方的地质结构是横向均匀成层介质以及台阵的所有传感器是在同一水平面基础上的,未考虑复杂的地质结构。复杂的地质结构将可能会导致慢度和方位角测量背离理论值。

[参考文献]

- [1] RINGDAL F, HUSEBYE E S. Application of Arrays in the Detection, Location, and Identification of Seismic Events[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1982, 72:201-224.
- [2] Schweitzer J. An assessment of the estimated mean mislocation vectors for small-aperture arrays[A]//NORSAR semiannual technical Summary, 1 April-30 September[G]. Kjeller, Norway;NORSAR Sci. Rep., 1995;128-129.
- [3] Kväerna T. Automatic Onset Time Estimation Based on Autoregressive Processing[A]//Semiannual Technical Summary, 1 April-30 September[G]. Kjeller, Norway;NORSAR Sci. Report, 1995;113-133.
- [4] Bondar I, R G North, G Beall. Teleseismic slowness-azimuth station corrections for the International Monitoring System Seismic Network[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1999, 89: 989-1003.