DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0822-07

基于 PS12 台阵的微弱爆炸信号识别技术*

郝春月,李 丽,郑 重
(中国地震局地球物理研究所,北京 100081)

摘要: 对 GSN 台网的 HIA 地震台站与 CTBTO/IMS 的 PS12 地震台阵记录的 2007 年 12 月 11 日河北怀来“明灯 1 号”爆炸及 2006 年 10 月 9 日朝鲜爆炸事件进行对比分析。结果显示:PS12 台阵子台监测的 P 波信噪比提高至普通台站监测的 P 波信噪比的 4.6 倍;利用聚束技术进一步压低噪声后,PS12 台阵聚束信号的信噪比提高至单个钻井台站的 3 倍,比普通 HIA 台站记录的地震信号信噪比高 10 多倍。研究结果表明,钻井小孔径台阵可高效提高微弱信号的检测能力。

关键词: 微弱爆炸信号;地震台阵;HIA;PS12;信噪比;聚束技术
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

当前对爆炸产生的地震波研究较多[1-4],而对微弱爆炸信号研究相对较少。微弱地震信号的识别与定位对于秘密核试验监测、区域地震构造研究以及地震危险性估计都非常重要。为了给核禁试提供核查手段,1958 年日内瓦裁军谈判特设的科学专家组提出了建设地震台阵以监测与识别远处地下核试验的构想。地震台阵是指将包括很多地震计的地震设备不连续地排列在一个设计精良的布局上[5],可以用射电天文学和雷达科学中的天线台阵的基本数学原理予以分析[6]。像高倍望远镜对现代天文学的影响一样,地震台阵对地震学也有着极其重要的影响。相比于单独的地震台站,地震台阵的主要优点之一是可以通过对台阵子台的单独记录进行叠加而提高信噪比(SNR)。另外,地震台阵还可以确定地震信号的方向信息,也就是说,地震台阵可以对地震事件进行定位。

位于中国海拉尔的国际监测系统(IMS)PS12 台阵于 2001 年建成并运行。该台阵地处内蒙古自治区陈巴尔虎旗的三八牧场,有 9 个子台,呈双环形分布,孔径约 3 km,各子台的地震仪均放置于地下 40~50 m 的钻井中。为了研究 PS12 台阵的实际功效,利用距 PS12 台阵 30 km 处的 HIA 台站进行对比分析。HIA 台站同属于全球地震台网(GSN)和中国数字地震台网(CDSN)。选取的爆炸事件是 2007 年 12 月 11 日 19 时(国际时间)发生在河北省怀来县的“明灯 1 号”爆炸事件和 2006 年 10 月 9 日凌晨(国际时间)在朝鲜发生的爆炸事件(见图 1)。

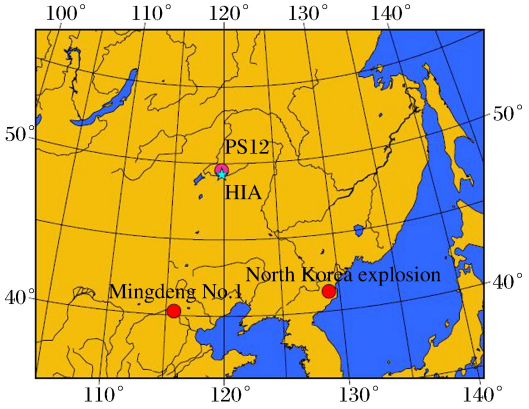

图 1 PS12、HIA、“明灯 1 号”与朝鲜爆炸的相对位置

Fig. 1 Distribution of PS12, HIA, “Mingdeng No. 1” and North Korea explosion

1 PS12 台阵和 HIA 台站的记录波形

1.1 HIA 台站对两次爆炸事件的记录波形

对于背景噪声一般的台站,在 1000 km 震中距处能够记录到里氏震级 M_L 为 4.0 及以上的地震[7]。

* **收稿日期**: 2016-03-04; **修回日期**: 2016-05-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(41474114)
第一作者: 郝春月(1973—),女,硕士,副研究员; **通信作者**: 李 丽,lilygrace@cea-igp.ac.cn。

2007 年 12 月 11 日 19 时在河北省怀来县发生的“明灯 1 号”爆炸震级为 2.8，HIA 台站距离爆炸地点约 1039 km，一般情况下 HIA 台站记录不到“明灯 1 号”爆炸信号。图 2 显示了 HIA 台站记录的 2007 年 12 月 11 日 19 时的波形信息，其中图 2(a)为未经滤波的宽频带信号，图 2(b)为经过 0.5～6.0 Hz 滤波的波形，其中“Z”“N”“E”分别表示垂直向、北南向和东西向。可以看出，原始波形与滤波波形没有记录到任何信号。实际情况与理论分析相符，即 HIA 台站无法记录 1000 km 以外的里氏震级为 2.8 的地震/爆炸事件。

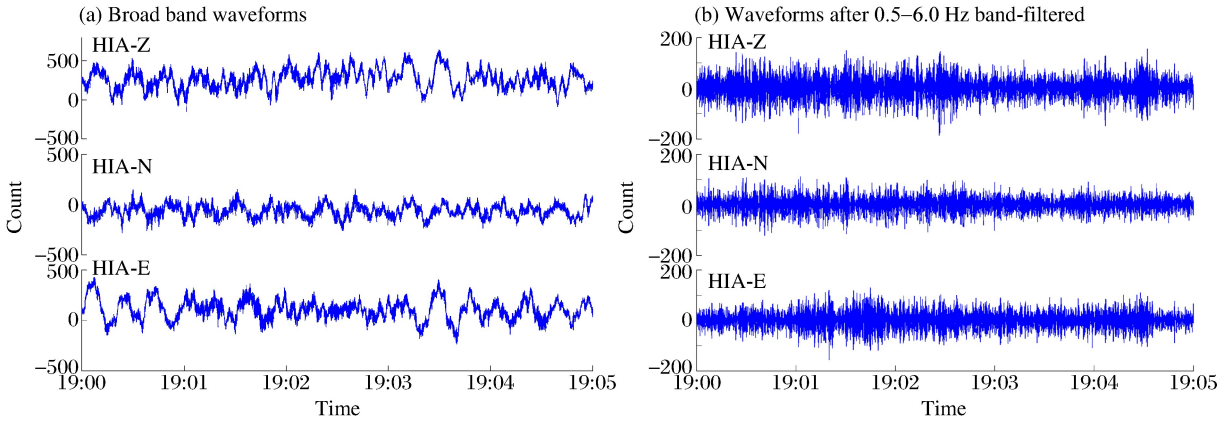

图 2　HIA 记录的“明灯 1 号”波形

Fig. 2　“Mingdeng No. 1” waveforms recorded by HIA

2006 年 10 月 9 日发生的朝鲜爆炸距离 HIA 台站 1140 km，体波震级 M_b 为 4.3。在 HIA 台站测得的未经滤波处理的宽频带波形数据中，找不到朝鲜爆炸信号，如图 3(a)所示；而经过 0.5～6.0 Hz 频段滤波后，隐约可见该事件波形，如图 3(b)所示，其中 Z 向 P 震相的信噪比为 1.5，E 向 P 震相初动埋入噪声，N 向无法确定 P 震相和其他震相。

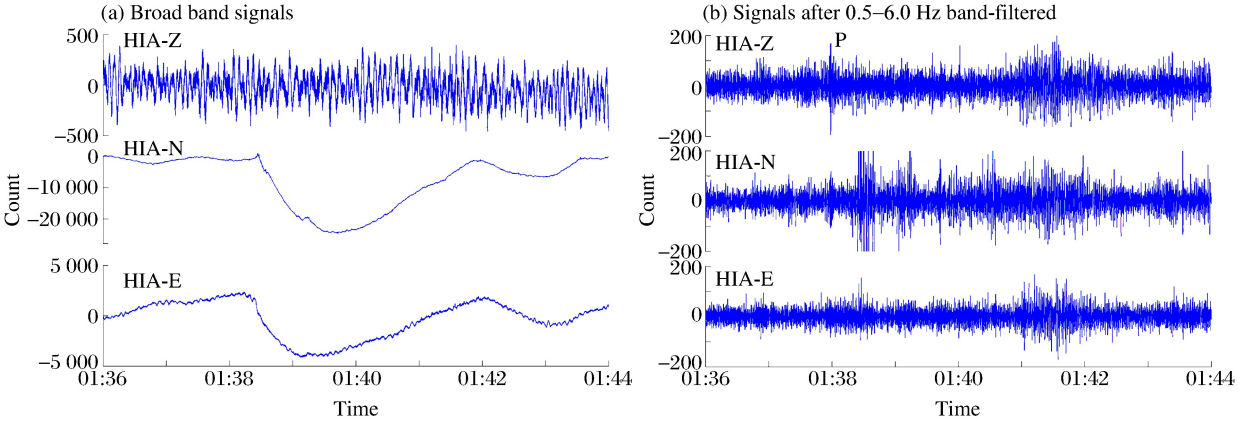

图 3　HIA 记录的朝鲜爆炸事件

Fig. 3　North Korea explosion waveforms recorded by HIA

1.2　PS12 台阵对两次爆炸事件的记录波形

根据经验，如果 HIA 台站无法记录“明灯 1 号”爆炸，那么比 HIA 台站远 30 km 的 PS12 台阵就更记录不到了。然而实际上 PS12 台阵的各个子台都隐约记录到了“明灯 1 号”爆炸[8]，如图 4 所示，其中每道波形左上角均标有台阵子台名称。由于 PS12 台阵为钻井台阵，各子台的深度在 45 m 左右，井下台站摆脱了地面上大部分人文高频噪声，使背景噪声很低，从而记录到原本无法记录的微弱地震信号。

PS12 台阵记录的 2006 年 10 月 9 日发生的朝鲜爆炸波形如图 5 所示。PS12 台阵各子台均是垂直向短周期(0.5～16.0 Hz)记录。可以看出，只有 6 个子台清晰地记录了该事件。各子台记录的朝鲜爆炸事件波形的信噪比平均值为 7。虽然 HIA 台站距离朝鲜爆炸地点更近一些，但是所记录的该事件波

形信噪比仅为 1.5 左右(见图 3(b))。以此事件为例,PS12 钻井地震台站的信噪比提高至一般地震台站信噪比的 4.6 倍。由于各地区的地质差异,该倍数关系并不标准,但是毫无疑问,钻井台站能够有效降低背景噪声,且效果显著。

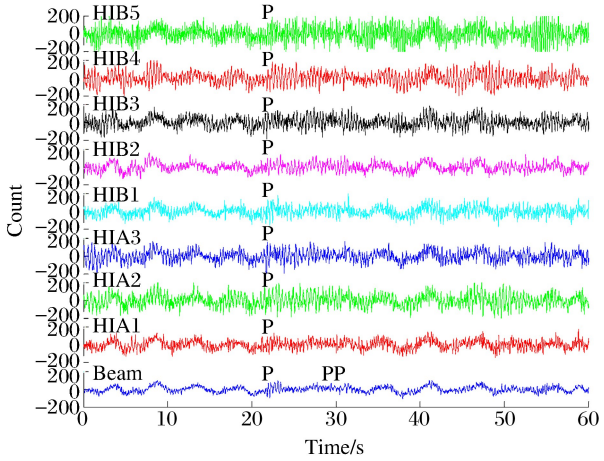

图 4 PS12 各子台记录的“明灯 1 号”爆炸波形

Fig. 4 “Mingdeng No. 1” waveforms recorded by PS12

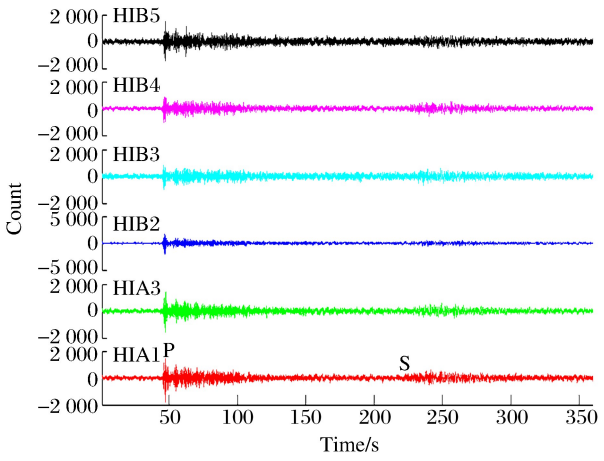

图 5 PS12 各子台记录的朝鲜爆炸波形

Fig. 5 North Korea explosion waveforms recorded by PS12

2 聚束技术概述

2.1 聚束概念的提出

地震台阵自 20 世纪 60 年代开始发展以来,给地震学带来了新的冲击。一个由许多相同地震仪组成、设计精良、空间分布紧密的台阵所产生的地震记录,可提供高质量、相似的数据集,用以研究精细地球结构。除了对单个台阵记录进行简单相加以提高信噪比以外,还开发出了许多特殊的台阵技术,如聚束技术、倾斜叠加技术、频率-波数分析等。

聚束技术就是把台阵各子台记录的波形进行叠加。如果波形叠加时不考虑各子台的时间延时,则 P 波初动将会被压制;如果波形叠加前对所有子台记录进行时间调整,以对齐参考台的 P 波初动,则由于信号彼此之间存在相关性,叠加后即可得到最大振幅,不相关的能量得以压制。

2.2 聚束定义

台阵聚束是分离记录信号的相关部分与不相关部分的基本方法[9]。它利用特定的慢度与方位角组合所对应的各个子台的不同走时,给出一个方位角和慢度组合,假如各子台波形移动一定的时间偏移量,那么所有具有相同反方位角和慢度的信号将全部相加。聚束就是利用一组能够确定地震位置的参数,即慢度和方位角,计算各子台之间的到时差,从而对各子台波形进行调整,然后再叠加的过程。

设台阵中第 i 个子台的位置矢量为 $\boldsymbol{r}_i$,绝对值 $|\boldsymbol{r}_i|$ 表示从台阵中心到第 i 个子台的距离。台阵中心可以是一个中心仪器,也可以是台阵的几何中心。对于由台阵中心台站记录的含有信号 $f(t)$ 和噪声 $n_i(t)$(方差为 σ^2)的初动波场,其时间序列为:

$$x_c(t)=f(t)+n_i(t) \tag{1}$$

由于台阵子台处于不同的位置,因此每个子台的初动波前具有不同的走时。走时差与波前慢度及传感器位置有关。因此位置为 $\boldsymbol{r}_i$ 的台站 i 所记录的时间序列为:

$$x_i(t)=f(t-\boldsymbol{r}_i\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{hor}})+n_i(t) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{u}_{\mathrm{hor}}$ 表示水平慢度矢量。经过时间校正的信号序列可由下式计算:

$$\tilde{x}_i(t)=x_i(t+\boldsymbol{r}_i\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{hor}})=f(t)+n_i(t+\boldsymbol{r}_i\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{hor}}) \tag{3}$$

对一个拥有 M 个子台的台阵进行延时相加,得到的聚束记录可由下式计算:

$$b(t)=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\tilde{x}_i(t)=f(t)+\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}n_i(t+\boldsymbol{r}_i\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{hor}}) \tag{4}$$

噪声的压制与用于数据处理的子台个数有关。对于一个含有 M 个子台的台阵，假设每个子台的信号 $f(t)$ 完全相关，而噪声 $n_i(t)$ 完全不相关，则台阵的信噪比 s_a 与其子台信噪比 s 的关系可以由一个很好的近似表达式[10]表示：

$$s_a = \sqrt{M}s \tag{5}$$

2.3　台阵聚束技术的发展与应用

台阵聚束技术是利用慢度与方位角组合形成的时间延迟作为叠加基础，由此而衍生出的频率-波数(F-K)分析技术。具体的处理过程为：给定一个慢度域，慢度域中的坐标为后方位角和慢度组合，对每个点进行聚束计算，错误的坐标给出低叠加能量，正确的坐标给出最高叠加能量，从而认定得到最高叠加能量的后方位角和慢度为该事件的定位值。因为慢度与震中距具有一一对应关系，所以该组合值可以定位地震事件。另外，台阵聚束技术(波形叠加)要求台阵子台波形必须相似，即子台波形的相关性好，这使得聚束法很难用于台站设备不统一的台网和大孔径台阵。

双聚束法(double beam method，DBM)是联合震源序列和接收台阵解决地球结构问题[11-13]的一种方法。根据格林函数原理，震源序列也可以应用固定台阵技术增大信噪比，因此将震源序列与固定台阵相结合的双聚束法将有效增大信噪比。滑行窗 F-K 分析[14]中，一固定宽度的短时间窗随着地震图以固定步长移动，在每个时间窗中，计算一个标准的 F-K 分析；F-K 分析结果，也就是每个时间窗中产生最大能量的慢度和反方位角以及信号的相干性信息被存储起来。这就把台阵记录转换为相干性、慢度与反方位角的时间序列信息。

3　利用聚束技术提高 PS12 台阵信噪比

图 4 中最后一道波形为 PS12 台阵经过聚束分析后获得的“明灯 1 号”波形。可以看出，此波形的噪声明显降低，信噪比得以提高。由于 9 个子台中只有 1 个子台没有数据，所以通过聚束分析使信噪比提升至单个台站的 $8^{1/2}$ 倍，即 2.8 倍。从普通台站的无法记录，到深井观测的隐约信号，再到隐约信号信噪比提升至 2.8 倍，由此可见小孔径钻井台阵检测微弱爆炸信号的巨大潜能。

对于 2006 年的朝鲜爆炸事件，PS12 台阵中有 6 个子台记录正常，获得的聚束波形信噪比提高至单个台站的 $6^{1/2}$ 倍，即 2.4 倍，如图 6 所示。图 6 中，最后一道波形为聚束波形，前 6 道波形分别为 6 个子台记录的 P 震相。可见，最后一道波形的信噪比明显增大。从普通台站的隐约记录，到深井台阵各子台信噪比为 7 的清晰记录，再到利用聚束技术将信噪比提升至 2.4 倍(如果所有子台均记录良好，则可提升至子台信噪比的 3 倍)，是普通台站信噪比的 16.8 倍，再次显示出小孔径钻井台阵的巨大优势。

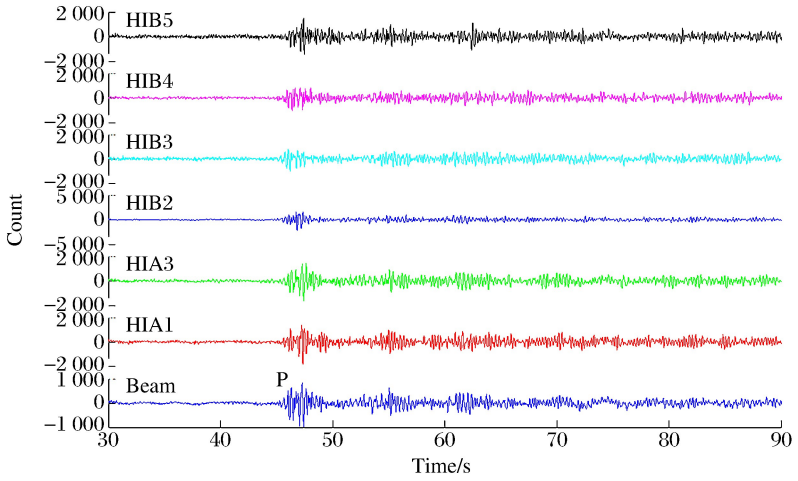

图 6　PS12 记录的 2006 年朝鲜爆炸事件波形

Fig. 6　2006 North Korea explosion recorded by PS12

4 爆炸事件定位

4.1 HIA 台站的定位能力

HIA 为一个三分向宽频带地震台站。三分向台站定位的方位角残差的标准偏差很大，可达 20°；而一般短周期台阵定位方位角残差的标准偏差为 10°～15°，短周期台阵定位远震的方位角残差的标准偏差可小于 10°[15]。所以一般而言，三分向宽频带地震台站仅作为参考参与地震台网的地震定位。

4.2 PS12 台阵对两次爆炸事件的定位

F-K 分析是台阵定位的一种主要方法，能够同时计算全部慢度矢量（即反方位角 θ 和水平慢度 u，习惯称反方位角为方位角），即同时计算地震波在不同慢度和不同反方位角上的能量分布。若信号的反方位角和慢度未知，则利用网格搜索法找到最优的 u 和 θ 组合，使延时相加的信号产生最高的振幅。为节省计算时间，此计算在谱域进行。

台阵记录的总能量 E 可以通过下式表示：

$$E(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}_0)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|\boldsymbol{S}(\omega)|^2\left|\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\mathrm{e}^{2\pi\mathrm{i}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}_0)\cdot\boldsymbol{r}_n}\right|^2\mathrm{d}\omega \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{S}(\omega)$ 为信号序列 $\boldsymbol{S}(t)$ 的傅里叶变换；N 为台阵子台数；$\boldsymbol{k}$ 为波数矢量；$\boldsymbol{k}_0$ 为 $\boldsymbol{u}_0$ 的波数矢量。式(6)还可以写成：

$$E(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}_0)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|\boldsymbol{S}(\omega)|^2|\boldsymbol{A}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}_0)|^2\mathrm{d}\omega \tag{7}$$

$$|\boldsymbol{A}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}_0)|^2=\left|\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\mathrm{e}^{2\pi\mathrm{i}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}_0)\cdot\boldsymbol{r}_n}\right|^2 \tag{8}$$

式(8)即为台阵的响应函数(ARF)。

根据图 7，PS12 台阵对“明灯 1 号”爆炸的定位信息为：方位角 θ=203.20°，慢度 u=10.97 s/°。“明灯 1 号”爆炸为人工爆炸，爆炸位置已知，根据已知爆炸位置和 PS12 台阵中心台的位置，可计算理论方位角和理论慢度，分别为 198.85°和 13.70 s/°。利用 PS12 台阵远震校正模型对 F-K 分析值进行校正，可获得校正方位角和校正慢度，分别为 198.46°和 11.69 s/°。

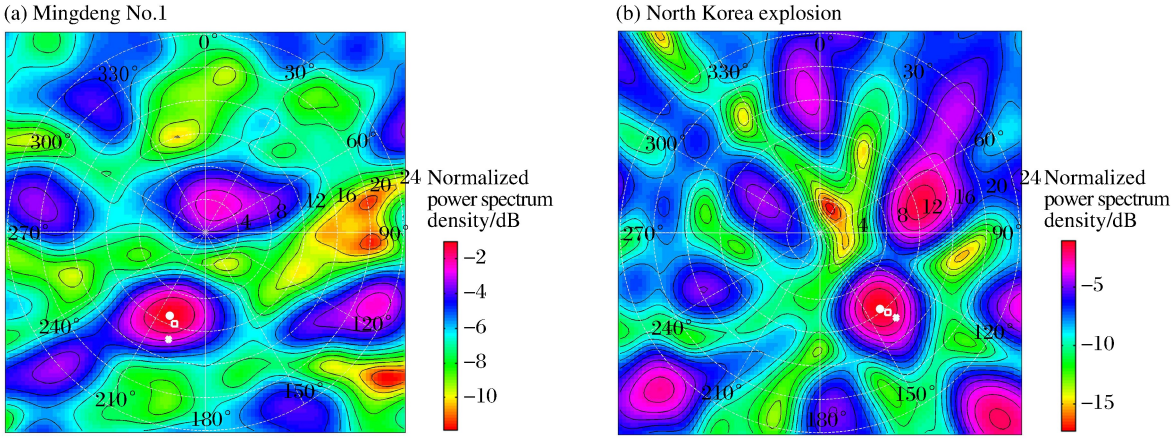

图 7 PS12 台阵对两次爆炸事件的 F-K 分析结果（方位角自正北向顺时针读取，水平慢度自中心点径向读取，不同颜色表示对数功率谱密度，最大功率谱密度标准化为 0 dB，等值线间隔为−1 dB。白色圆点表示能量最大的聚集点，即功率谱为零的点，表示事件的位置；空心方块表示校正值；白色菱形表示理论值）

Fig. 7 The F-K results for the two explosions recorded by PS12 (The azimuth is read clockwise from the due north, and the slowness is read in the radial direction, the colors represent the logarithm power spectrum density, the maximum power spectrum density has been normalized to 0 dB, the interval of the isoseismal line is −1 dB. The white circle is the maximum power spectrum density representing the location of the event, the square represents the value after correction, and the diamond represents the theoretical value.)

根据图 7，PS12 台阵对 2006 年 10 月 9 日朝鲜爆炸事件的定位信息为：方位角 $\theta=141.71°$，慢度 $u=11.62$ s/°。朝鲜爆炸事件的位置信息采用美国地质调查局(USGS)国家地震信息中心(NEIC)发布的地震目录(PDE)，据此可得出朝鲜爆炸事件的理论方位角和理论慢度，分别为 138.04°和 13.69 s/°。利用 PS12 台阵远震校正模型对 F-K 分析值进行校正，可获得校正方位角和校正慢度，分别为 139.44°和 12.59 s/°，如表 1 所示。

表 1 PS12 台阵对两次爆炸事件的定位

Table 1 Location of two explosions recorded by PS12 seismic array

事件	F-K 分析值(观测值)		经远震模型的校正值		理论值	
	θ/(°)	u/(s/°)	θ/(°)	u/(s/°)	θ/(°)	u/(s/°)
“明灯 1 号”爆炸事件	203.20	10.97	198.46	11.69	198.85	13.70
朝鲜爆炸事件	141.71	11.62	139.44	12.59	138.04	13.69

PS12 台阵对两次爆炸事件的定位结果表明，小孔径环形台阵表现出方位角分辨率较强的优势，但在慢度上存在一定偏差，虽然经过校正在一定程度上补偿了慢度值，但是与理论慢度值仍存在差距。这是因为本研究应用的校正模型是针对震中距为 30°～90°的远震模型，而两次爆炸事件距离 PS12 台阵在 10°左右，属于区域震范畴。区域震校正模型将是本课题组下一步的工作重点。除了建立区域震校正模型，对于某些特定地区，还可以根据该地事件进行定点校正。

台阵的主要目的是检测微弱信号。最大限度地利用台阵自身优势检测普通台站无法检测到的信号，再利用各种校正方法，使定位结果逼近研究区域是完全可行的。

5 结　论

(1) PS12 小孔径台阵在震中距比 HIA 三分向宽频带台站远 30 km 的情况下，各子台隐约记录到“明灯 1 号”爆炸事件，并清晰记录到 2006 年 10 月 9 日的朝鲜爆炸事件，说明钻井地震台可有效降低背景噪声，突出有用信号，相比于 HIA 三分向宽频带台站，在某些情况下可将信噪比提高至单个台站的 4.6 倍(2006 年 10 月 9 日朝鲜爆炸事件)，在某些情况下可以检测到宽频带地震台检测不到的信号(“明灯 1 号”爆炸)。

(2) 利用台阵聚束方法压低噪声，对于“明灯 1 号”爆炸事件，PS12 台阵有 8 个子台记录，信噪比提升至单个子台记录的 2.8 倍；对于朝鲜爆炸事件，PS12 有 6 个子台清晰记录，信噪比提升至单个子台信噪比的 2.4 倍，如果 9 个子台全部记录，则可将信噪比提升至单个子台的 3 倍。

(3) HIA 三分向宽频带台站的定位能力(即单台定位能力)较弱，而 PS12 台阵可以单独定位，并可根据相应的校正模型较准确地定位。

(4) 通过分析两个震中距在 1 000 km 左右的爆炸事件，结果显示，PS12 钻井小孔径地震台阵实现了 1 000 km 处检测并定位里氏震级 2.8 级地震事件的先例，在相同距离内记录的波形信噪比是普通台站的 10 多倍。对诸如“明灯 1 号”爆炸等千公里外普通台站无法记录到的事件，PS12 钻井小孔径地震台阵在千公里外能够记录并分析；对于诸如 2006 年 10 月 9 日朝鲜爆炸等千公里外普通台站记录震相不清晰的事件，PS12 钻井小孔径地震台阵在千公里外能够获取信噪比较高的信号，并可实现定位分析。

对微弱爆炸信号信噪比的两次提升(第一次是钻井本身，第二次是利用台阵聚束技术)，证明了钻井小孔径台阵强大的检测能力。在武器小型化、国防科技飞跃发展的今天，小孔径钻井台阵对于提升核侦查能力具有至关重要的作用。

参考文献：

[1] 王羽，高康华. 土中爆炸波与地下结构相互作用计算方法研究综述[J]. 爆炸与冲击，2015，35(5)：703-710.
Wang Yu, Gao Kanghua. Review on calculation methods for interaction between explosion waves in soil and underground structures[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(5): 703-710.

[2] 路亮,龙源,郭涛,等.爆破地震波作用下城市隧道结构动力响应的敏感性[J].爆炸与冲击,2014,34(6):701-708.
Lu Liang, Long Yuan, Guo Tao, et al. Dynamic response sensitivity of urban tunnel structures under blasting seismic waves to parameters[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(6):701-708.

[3] 潘振华,范宝春,归明月,等.流动系统中爆轰波传播特性的数值模拟[J].爆炸与冲击,2010,30(6):593-597.
Pan Zhenhua, Fan Baochun, Gui Mingyue, et al. Numerical simulation of detonation wave propagation in a flow system[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):593-597.

[4] 郝春月,郑重.基于爆炸地震波分析 3 次爆炸事件的主要特征[J].爆炸与冲击,2014,34(6):730-735.
Hao Chunyue, Zheng Zhong. Main characteristics for three explosion events based on explosion waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(6):730-735.

[5] Husebye E S, Ruud B O. Array seismology:Past, present and future developments[J]. Observatory Seismology, 1989:123-153.

[6] Harjes H P, Henger M. Array-seismologie[J]. Zeitschrift für Geophysik, 1973,39:865-905.

[7] 傅淑芳,刘宝诚,李文艺.地震学教程[M].北京:地震出版社,1980.

[8] 郝春月,郑重,张爽.利用台阵方法对明灯 1 号 50 吨爆破微弱信号的识别与处理[J].地震,2009,29(3):14-20.
Hao Chunyue, Zheng Zhong, Zhang Shuang. Using array methods to identify and process the weak signals generated by the first Brightlight 50 t explosion[J]. Earthquake, 2009,29(3):14-20.

[9] Rost S, Thomas C. Array seismology: Methods and applications[J]. Reviews of Geophysics, 2002,40(3):1-27.

[10] Harjes H P, Henger M. Array-seismologie[J]. Zeitschrift für Geophysik, 1973,39:865-905.

[11] Krüger F, Weber M, Scherbaum F, et al. Double beam analysis of anomalies in the core-mantle boundary region [J]. Geophysical Research Letters, 1993,20(14):1475-1478.

[12] Krüger F, Scherbaum F, Weber M, et al. Analysis of asymmetric multipathing with a generalization of the double-beam method[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996,86(3):737-749.

[13] Scherbaum F, Krüger F, Weber M. Double beam imaging: Mapping lower mantle heterogeneities using combinations of source and receiver arrays[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102(B1):507-522.

[14] Rost S, Weber M. A reflector at 200 km depth beneath the northwest Pacific[J]. Geophysical Journal International, 2001,147(1):12-28.

[15] Koch K, Kradolfer U. Investigation of azimuth residuals observed at stations of the GSETT-3 Alpha network[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997,87(6):1576-1597.

Recognition technology for weak explosion signals based on PS12 borehole seismic array

Hao Chunyue, Li Li, Zheng Zhong

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration*, 100081 *Beijing*, *China*)

Abstract: In this paper, we analyzed the waveforms of the two explosions that occurred on Dec. 11, 2007 and Oct. 9, 2006 as recorded using the HIA seismic station and the PS12 borehole seismic array. The results show that a borehole station can raise the signal-to-noise ratio (SNR) of the P waves to 4.6 times that of the common station at the same distance. With the beamforming technique, the SNR of the beamforming waveform from the PS12 is 3 times that from the single borehole station and over 10 times than that of the waveform recorded by the HIA. So the PS12 borehole seismic array can effectively improve the SNR of weak signals.

Keywords: weak explosion signals; seismic array; HIA; PS12; signal-to-noise ratio; beamforming technique

(责任编辑 王 影)