

文章编号: 1001-1455(2010)05-0535-06

## 2 次爆炸事件的相关性与能量比研究\*

郝春月, 郑 重

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 主要对全球地震台网(GSN)牡丹江(MDJ)地震台记录的 2006 年 10 月 9 日与 2009 年 5 月 25 日爆炸事件进行分析对比研究。应用 2 次事件的 P 震相最大振幅比值和功率谱比值估计了 2 次事件的能量比。应用互相关值和相干函数方法计算了 2 次事件在时域与频域的相关性。最后得出, 2009 年的爆炸事件与 2006 年爆炸事件相比, 3 个方向的 P 震相最大单振幅比值平均为 3.97, 功率谱比值平均为 4.5, 由此估计 2009 年爆炸事件是 2006 年爆炸事件能量的 4~5 倍。MDJ 台 3 个方向(Z、N、E)记录的 2 次事件在 1~4 Hz 频段的互相关值平均为 0.88, 相干函数平均为 0.8 左右。

**关键词:** 爆炸力学; 相关性; 相干函数; 爆炸事件; 能量比; 功率谱比

**中图分类号:** O389

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

### 1 引言

2006 年 10 月 9 日 1 时 35 分, 在北纬 41.29°、东经 129.09°、深度 0 km 处发生一起爆炸事件<sup>[1]</sup>, 此次爆炸事件距离全球地震台网(GSN)的牡丹江(MDJ)地震台约 3.35 deg(372.49 km), 方位角为 186.4°; 2009 年 5 月 25 日 0 时 54 分(UTC), 在北纬 41.3°、东经 129.04°、深度 0 km 处又发生一起爆炸事件<sup>[2]</sup>, 该事件的位置距离 MDJ 约 3.34 deg(371.37 km), 方位角为 187.1°。这 2 次爆炸事件距离很近。为研究 2 次爆炸事件的能量比与相似性, 本文中试图对 MDJ 地震台 3 个分向(Z、N、E)记录的 2 次事件进行波形记录单振幅比、功率谱比、相关值和相干函数的计算与分析。

### 2 资料

2 次事件均被 MDJ 地震台记录。MDJ 地震台位于中国黑龙江省东南部, 属于全球地震台网(GSN), 本文中选用的数据均来自 MDJ 台。图 1 显示了 MDJ 台 3 个分向(即垂直向、北南向与东西向)在 2006 年 10 月 9 日与 2009 年 5 月 25 日记录的爆炸事件波形。

图 1 显示了 25 s 的波形数据, 横轴表示采样点, 纵轴为振幅。每幅图上显示的 2 个重要震相分别为  $P_n$ (首波, 即 Moho 面绕射纵波)与  $P_g$ (直达纵波), 在每组震相的最大值处标注了最大幅值。2 次爆炸记录的  $P_n$  与  $P_g$  震相在 3 个分向(Z、N、E)之间的最大振幅的单振幅比值( $A_{09}/A_{06}$ )分别为 4.794、2.716、4.402 和 3.929、3.192、3.950(见图 2)。

### 3 功率谱比的计算

为了解 2 次爆炸事件在频率域的能量分布情况, 对 2 次爆炸事件进行了功率谱的计算与分析, 功率谱分析采用 Welch 平均周期图法。Welch 平均周期图法是对直接法的改进, 即把一长度为  $N$  的数据  $x_N(n)$  分成  $L$  段(在分段时可允许每一段的数据有部分的重叠), 每一段的长度为  $M$ 。分别求每一段的功率谱, 然后加以平均。每一段的功率谱为<sup>[3]</sup>

\* 收稿日期: 2009-07-17; 修回日期: 2009-10-25

基金项目: 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金项目(DQJB08B19)

作者简介: 郝春月(1973—), 女, 硕士, 副研究员。

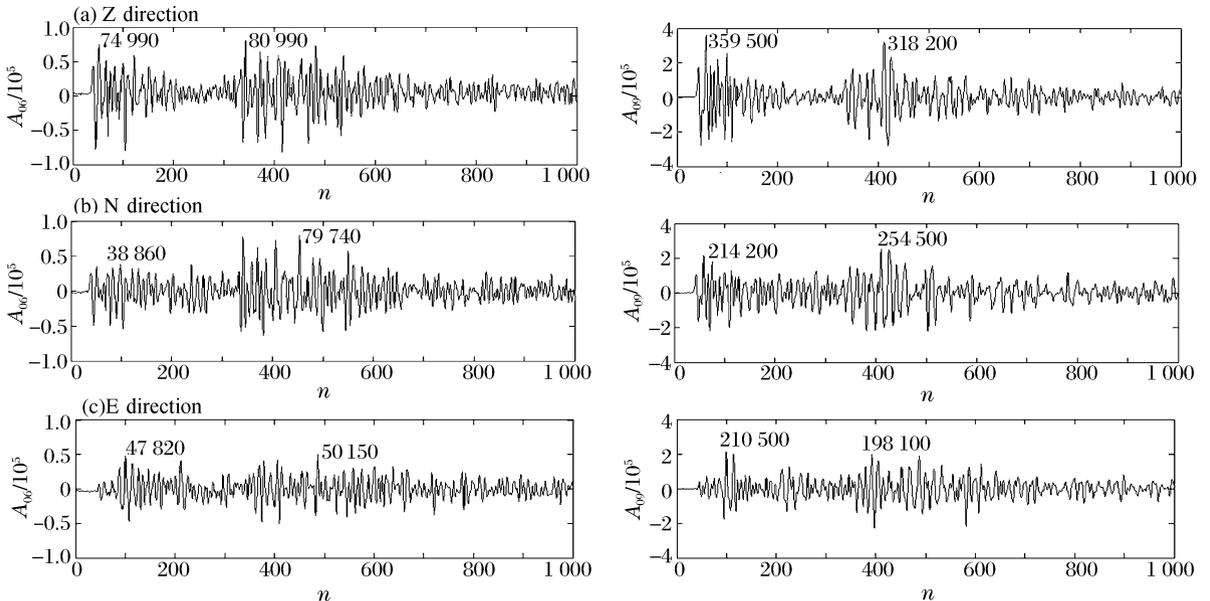


图1 MDJ 地震台记录的2次爆炸事件的波形图(25 s时间段)

Fig.1 Waveforms of explosion events recorded by MDJ seismic station

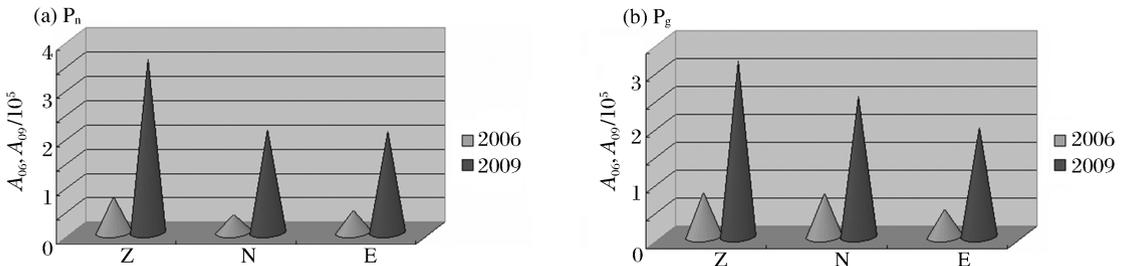


图2 2次爆炸事件记录的 P<sub>n</sub> 与 P<sub>g</sub> 震相在3个分向之间的最大振幅的单振幅比

Fig.2 Ratios of the maximum amplitude of P<sub>n</sub> and P<sub>g</sub> in three components recorded by the two explosion events

$$P_i(\omega) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_N^i(n) d(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (1)$$

式中:  $U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} d^2(n)$ 。U 为归一化因子,使用它是为了保证所得到的谱是渐近无偏估计。 $d(n)$  是汉宁窗。这样,几段的平均功率谱为

$$P(\omega) = \frac{1}{MUL} \sum_{i=1}^L \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_N^i(n) d(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (2)$$

在此分别对2个时间窗进行功率谱估计,一个为P波组的30 s时间窗,另一个为S波和面波组的200 s时间窗。首先分别对2组时间窗进行1~4 Hz和0.1~2 Hz的滤波(根据图3(图中灰色表示功率谱密度),即P震相在1~4 Hz频段能量最大,S与面波震相在0.1~2 Hz频段能量最大)。进行功率谱计算所用的30 s P波组数据为1 200点(采样率为0.025 Hz),利用的汉宁窗窗长为256点,重叠128点。最后对功率谱进行了5点平滑。另外S波和面波组的时间窗为200 s,数据为8 000点,利用的汉宁窗窗长为1 024点,重叠512点。最后对功率谱进行了5点平滑。2次事件的功率谱计算完毕后,可以得出2次事件的功率谱点对点的比值。

由于计算功率谱是为了对2次事件进行对比,并且MDJ台的传递函数在2次事件之间没有变化,所以没有对波形进行去除仪器传递函数的计算。因为在计算2次事件的谱值比过程中,会抵销传递函数,所以忽略了这个步骤。忽略这个步骤的结果是,图4~5显示的2次事件功率谱的纵轴单位不是(m/s)<sup>2</sup>,也不是表示能量衰减所用的dB,而是量纲为一。

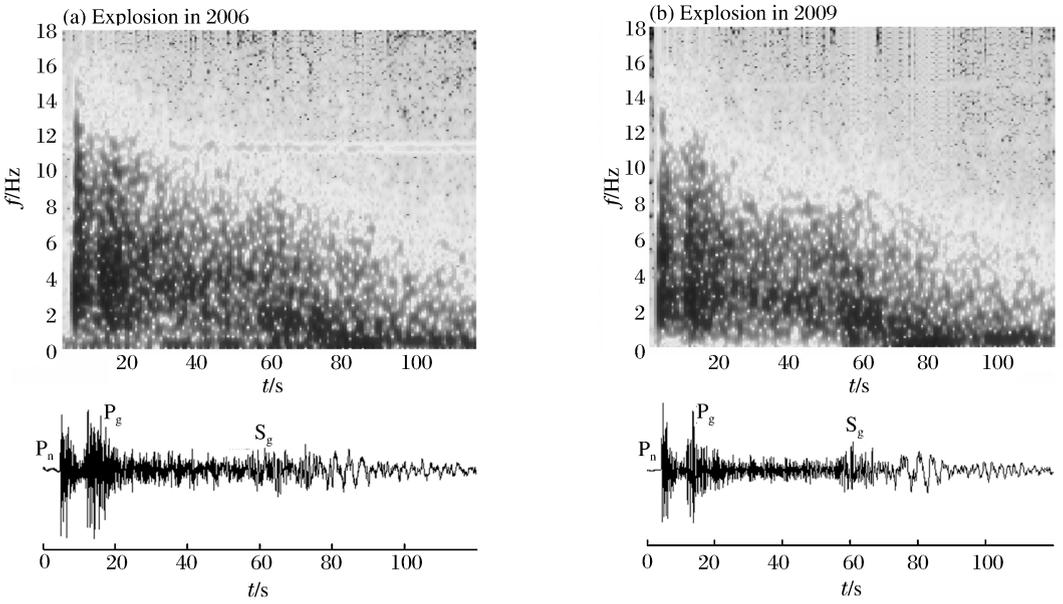


图 3 2006 年与 2009 年的爆炸事件在 MDJ 台垂直向记录波形的时频谱图

Fig. 3 Time-frequency spectrum analysis of the two explosion events recorded in the vertical component

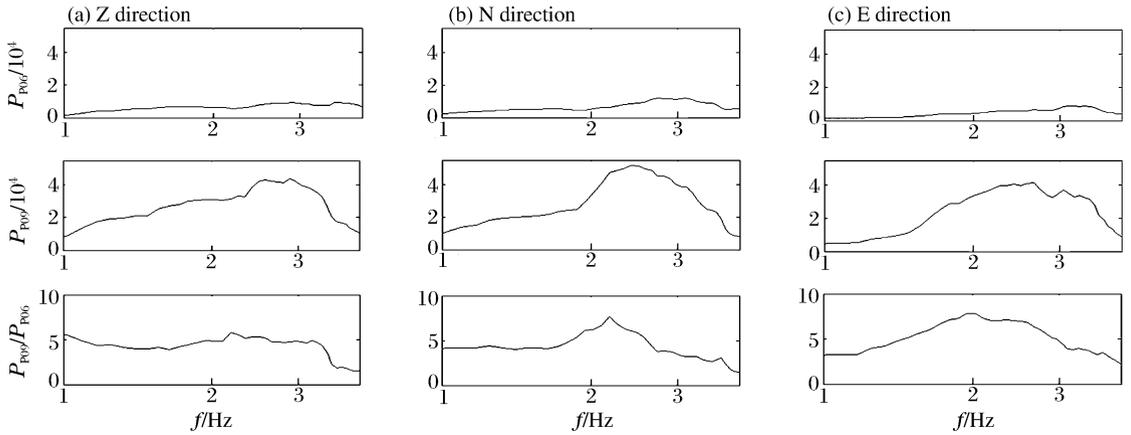


图 4 MDJ 地震台记录的 2 次爆炸之间 P 波组功率谱与谱值比

Fig. 4 Power spectrum densities of the P phase group of the two explosion events and the ratios of them

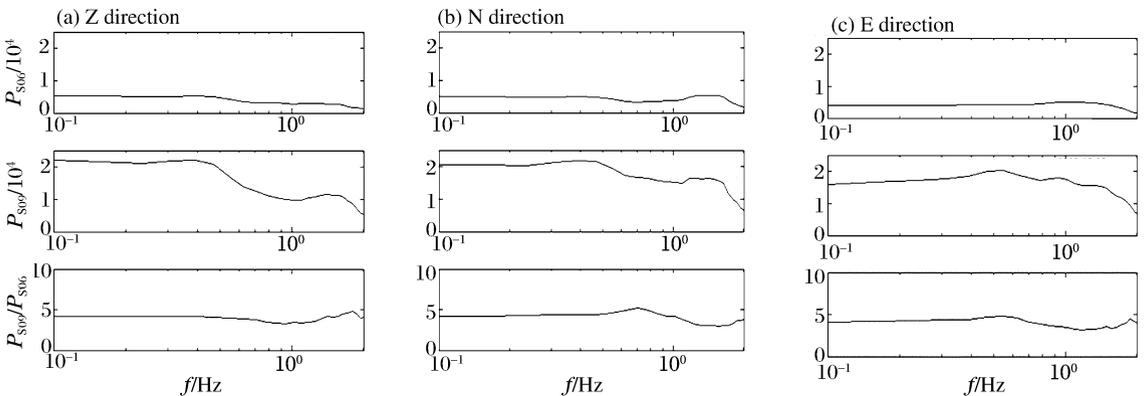


图 5 MDJ 地震台记录的 2 次爆炸事件之间的 S 波和面波组功率谱与谱值比

Fig. 5 Power spectrum densities of the S-Surface wave group of the two explosion events and the ratios of them

从图4中可以看出,MDJ台记录的P波组震相在垂直向的谱比值比较稳定,平均值在4.6左右。水平向的谱比值在2 Hz左右出现最大值,可达到8.0左右。但在1~4 Hz的频段内,北南向与东西向的谱比平均值分别为3.8和4.8。图5中,MDJ台记录的S波和面波组震相在3个方向的谱比值在4.6左右变化。功率谱代表了能量,由2次爆炸事件的P波组和S波组的功率谱比值,可估计2009年爆炸事件所释放的能量是2006年爆炸事件释放能量的4~5倍。

#### 4 2次爆炸事件的相关性分析

为探索2次事件是否为相似事件,对MDJ台记录的2次事件的3个方向的数据进行了相关性分析。首先给出2次事件的波形叠加图(图6),从图中可以看出,2次事件确实具有相似性。

为了对相似性有一个量的描述,对2次事件的互相关值进行计算。首先对波形进行1~4 Hz和2~4 Hz的带通滤波(根据图3,P波组震相在前几秒的能量主要集中在1~4 Hz)。然后选用2次爆炸前2 s的数据进行互相关值的计算。选择相关值计算的时间窗一般为1~2 s<sup>[4-5]</sup>,在此选择2 s,使波形窗能包含更多的震相信息。

2个时间序列的互相关函数可以由下式表示<sup>[6]</sup>

$$R_{xy}(\tau_p) = \frac{\sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}][y(i) - \bar{y}]}{\left\{ \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^N [y(i) - \bar{y}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

式中: $x(i)$ 和 $y(i)$ 分别是2个测点 $x$ 和 $y$ 记录的噪声时间序列, $N$ 表示数据样本点的个数, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 表示 $N$ 个样本点的平均值。

根据公式(3),计算得出MDJ台3个方向(Z、N、E)记录的2次事件在1~4 Hz频段的互相关值分别为0.889 2、0.814 4、0.930 2(图7(a)),而在2~4 Hz频段的互相关值分别为0.931 3、0.884 1、0.935 1(图7(b))。经过2~4 Hz带通滤波的波形相关值比经过1~4 Hz带通滤波的波形互相关值要高一些,表明了前2 s数据在2~4 Hz的能量要高些,并且互相关值平均为0.92。而在1~4 Hz的互相关值平均为0.88。

为了能够在频率域显示2次事件波形的相似性,对2次事件进行相干函数的计算。在频域中,经常用到可用功率谱表示的相干函数 $r_{xy}(f)$ ,相干函数 $r_{xy}(f)$ (又称凝聚函数)给出了2个随机信号在频率域的相似性,其中 $f$ 表示2个随机信号的频率。一般来说,相干函数的值在0~1之间变化。若2个信号完全不相关,则相干函数值为零。对于2个相同的信号,其相干函数为1。相干函数定义为<sup>[7]</sup>

$$r_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}(f)|}{\sqrt{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}} \quad (4)$$

式中: $G_{xx}(f)$ 和 $G_{yy}(f)$ 分别为2个随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的自功率谱密度; $G_{xy}(f)$ 为它们的互谱密度。

2次事件的波形经过1~4 Hz带通滤波后,利用10 s的P组震相数据进行相干函数计算(图8)。选择10 s,主要考虑尽可能包含足够的P组震相信息,还要考虑不要包含其他震相信息(如S震相)。

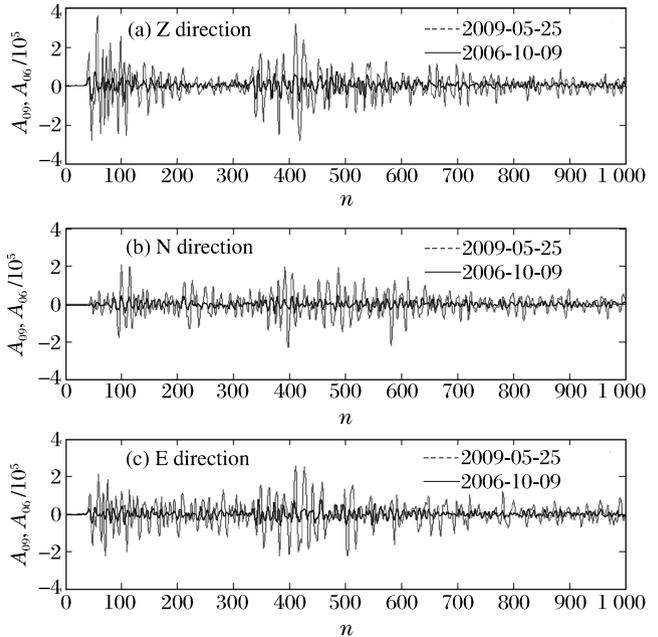


图6 2次事件的3个方向的波形记录叠加

Fig. 6 Overlap of the waveforms of the two events recorded

10 s 的时间窗主要包含 2 个 P 组震相, 即  $P_n$  与  $P_g$  震相,  $P_g$  震相在距  $P_n$  震相约 7.3 s 处, 而  $S_g$  (直达横波) 震相在距  $P_g$  震相约 40 s 处(图 3), 没有包含在内。所以 10 s 时间窗主要包含 P 组震相信息。由图 8 可以看出, 在 1~4 Hz 频段内, MDJ 地震台 3 个方向记录的 2 次事件的相干函数均保持在 0.8 左右。

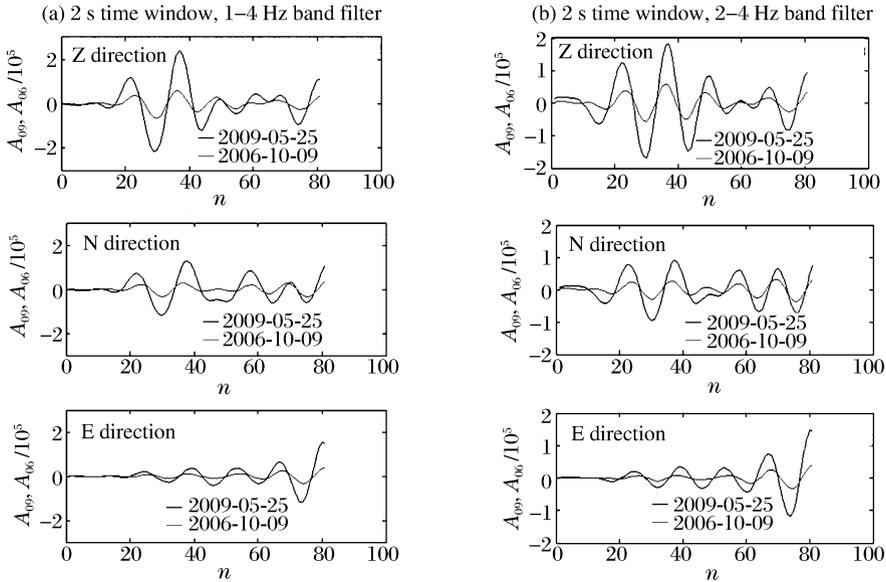


图 7 2 次事件的相关值计算结果

Fig. 7 The correlation results of the two events

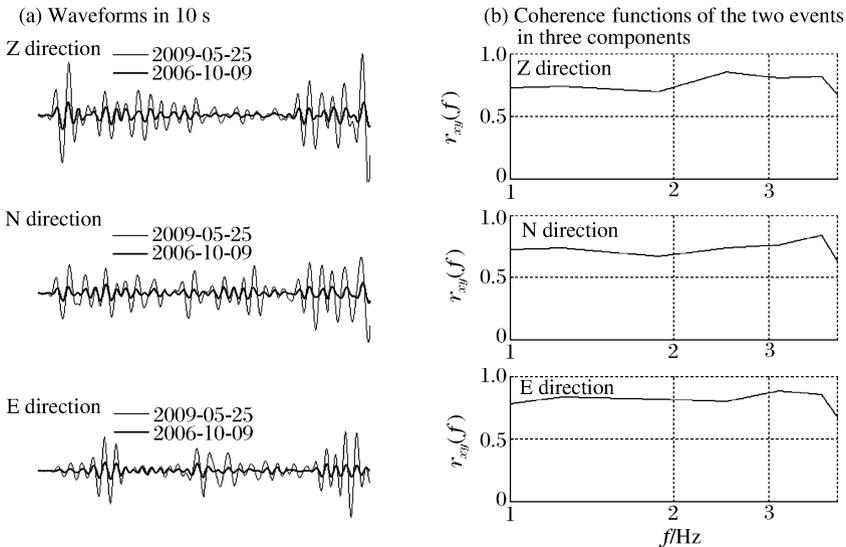


图 8 用来计算 2 次爆炸事件相干函数的数据波形(10 s)与 2 次事件的相干函数结果(1~4 Hz)

Fig. 8 Waveforms (10 s) used to calculate the coherence functions and the coherence function results of the two explosion events (1~4 Hz)

### 5 结 论

(1) 2 次爆炸事件的能量分布相似, 主要分布在 0.1~4 Hz 之间。其中 P 组震相的能量主要分布在 1~4 Hz, S 波和面波组震相的能量主要分布在 0.1~2 Hz。(2) 2 次爆炸事件记录的  $P_n$  与  $P_g$  震相在 3 个分向最大振幅的单振幅比( $A_{09}/A_{06}$ )平均为 3.97 和 3.69(图 2)。MDJ 台 3 个方向记录的 2 次爆炸事件的 P 波组、S 波和面波组功率谱比( $P_{09}/P_{06}$ )平均为 4.5。由此估计, 2009 年爆炸事件所释放的能量是 2006 年爆炸事件释放能量的 4~5 倍。(3) 在 1~4 Hz 和 2~4 Hz 频段内, 2 次事件 3 个方向的平均互相关值分别为 0.88 和 0.92。在 1~4 Hz 频段内, P 波组的相干函数平均保持在 0.8 左右。

衷心感谢许忠准研究员的指导,感谢张爽同志提供的数据。

## 参考文献:

- [1] USGS National Earthquake Information Center, US. Geological survey earthquake database[DB/OL]. America: USGS, 1940[2010-10-8]. <http://neic.usgs.gov/cgi-bin/epic/epic.cgi?SEARCHMETHOD=1&FILEFORMAT=4&SEARCHRANGE=HH&SYEAR=2006&SMONTH=10&SDAY=9&EYEAR=2006&EMONTH=10&EDAY=9&LMAG=3&UMAG=6&NDEP1=0&NDEP2=2&IO1=&IO2=&SLAT2=0,0&SLAT1=0,0&SLON2=0,0&SLON1=0,0&CLAT=0,0&CLON=0,0&CRAD=0&SUBMIT=Submit+Search>.
- [2] USGS National Earthquake Information Center, US. Geological survey earthquake database[DB/OL]. America: USGS, 1940[2010-10-8]. <http://neic.usgs.gov/cgi-bin/epic/epic.cgi?SEARCHMETHOD=1&FILEFORMAT=4&SEARCHRANGE=HH&SYEAR=2009&SMONTH=5&SDAY=25&EYEAR=2009&EMONTH=5&EDAY=25&LMAG=4&UMAG=5&NDEP1=0&NDEP2=2&IO1=&IO2=&SLAT2=0,0&SLAT1=0,0&SLON2=0,0&SLON1=0,0&CLAT=0,0&CLON=0,0&CRAD=0&SUBMIT=Submit+Search>.
- [3] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997:335-337.
- [4] Tormod K. On exploitation of small-aperture noress type arrays for enhanced P-wave detectability[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989,79(3):888-900.
- [5] Mykkeltveit S, Astebøl K, Doornbos D J, et al. Seismic array configuration optimization[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983,73(1):173-186.
- [6] Harjes H P. Design and siting of a new regional seismic array in Central Europe[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1990,80(6B):1801-1817.
- [7] Kulhanek O. Signal and noise coherence determination for the uppsala seismograph array station[J]. Pageoph, 1973,109(1):1653-1671.

## Relativity and energy ratio between two explosion events\*

HAO Chun-yue, ZHENG Zhong

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

**Abstract:** Two explosion events recorded by station MDJ on October 9, 2006 and May 25, 2009 were investigated, respectively. The energy ratio of the two explosion events was estimated by comparing the maximum P phase amplitudes and the power spectrum densities. Relativity of the two explosion events in time and frequency domains was determined by using the cross correlation and the coherence function. Comparison between the 2009 event and the 2006 event displays that the mean ratio of the maximum P phase amplitudes in three components is about 3.97, the mean ratio of the power spectrum densities is about 4.5. It indicates that the energy released by the 2009 explosion event is 4—5 times as much as that released by the 2006 explosion event. The mean cross correlation of the two events recorded in the three components of MDJ was about 0.88 in 1—4 Hz, and the coherence values of the two events are around 0.8 at the same frequency band.

**Key words:** mechanics of explosion; relativity; coherence function; explosion event; energy ratio; ratio of power spectrum density

\* Received 17 July 2009; Revised 25 October 2009

Corresponding author: HAO Chun-yue, haochunyue@gmail.com