

兰州台阵响应函数及不同方位 小地震事件 FK 分析结果

沈旭章^{1,2}, 梅秀苹¹, 张淑珍¹, 秦满中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: 计算了兰州台阵不同频率的台阵响应函数, 对台阵附近不同方位的 4 个小震进行了 FK 分析。结果显示兰州台阵 2 Hz 以下的台阵响应函数在 origin 附近呈现出对称的单主峰图样, 而高于 2 Hz 时台阵响应函数出现较多旁瓣, 表明该台阵对于 2 Hz 以下的信号具有较好的分辨能力。小震的 FK 分析结果表明, 根据甘肃省地震局地震目录和 IASP91 速度模型计算得到 P 波方位角和慢度与 FK 分析的结果总体上比较一致, 但也存在一定差别, 这种差别可能由所使用的理论模型和当地模型有差别以及未做台阵校正所引起。

关键词: 兰州台阵; 台阵响应函数; FK 分析

中图分类号: P315.78

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2010)01-0059-06

The Array Response Function of Lanzhou Seismic Array and Results of FK Analysis for Small Earthquakes in Different Azimuths

SHEN Xu-zhang^{1,2}, MEI Xiu-ping¹, ZHANG Shu-zhen¹, QIN Man-zhong¹

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

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

Abstract: The array response function of Lanzhou seismic array is calculated in different frequencies. Four small earthquakes in different azimuths are analyzed with FK method. The results indicate that there is a main peak in the image of FK analysis in frequency smaller than 2 Hz, and many side lobes correspond with higher frequencies, which indicate that the array has good ability to resolve the signals with frequency less than 2 Hz. The results of FK method for 4 small earthquakes indicate that the azimuth and slowness estimated by FK analysis are mainly consistent with the results calculated by seismic catalog referring IASP91 velocity model, but there is difference between both results. The difference maybe caused by difference between the velocity structure beneath the array and the IASP91 model, as well as no application of array correction.

Key words: Lanzhou seismic array; Array response function; FK analysis

0 引言

中国政府在 1996 年签署《全面禁止核试验条约》之后, 按照全面禁止核试验条约组织国际监测系统(CTBTO/IMS)附件规定在国内建立了两个地震台(站)阵, 作为 IMS 的基本台阵, 其中之一建在

兰州以南的大尖山上, 位于兰州观象台西南约 18 km。项目由中国地震局地球物理研究所总负责, 甘肃省地震局监测中心承建, 兰州观象台具体实施。许健生等^[1-2]对台阵的建设、台阵的地质背景以及各

收稿日期: 2008-10-21

基金项目: 地震科学联合基金(606041); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2010013

作者简介: 沈旭章(1976-), 男(汉族), 副研究员, 博士, 主要从事地震波、地球深部结构和定点形变数据分析的研究。

台站的台基都作了较为详细的阐述。郝春月等^[3-4]利用台阵勘测观测中的资料对勘测点的信号与噪声进行了计算分析,并且通过分析噪声和信号的相干函数确定了该台阵能检测出 PG 与 P 震相的最佳内外环半径分别为 380 m 和 1 550 m,据此确定了各个子台的位置。

兰州台阵有 9 个子台组成,分布在两个同心圆环上(图 1),各子台的具体位置参见文献[5]。在各子台都安装的 CMG-3ESPV 垂直向短周期地震仪,中心子台还安装了一套瑞士三分向甚宽频带地震仪,型号为 STS-2。通过勘测点功率谱的估计与分析,郝春月等^[3]对不同频率噪声的功率值进行了估计,结果表明该地区噪声环境比较稳定,适合台阵的建设,又通过分析中国数字地震台网(CDSN) 10 个地震台站和国内两个 IMS 台阵(海拉尔台阵和兰州台阵)资料,对加入两个台阵后 CDSN 的监测定位能力进行了评估^[5-6],结果表明加入台阵资料后定位能力明显增强,各震级上定位能力范围大幅度扩展,特别是 $M_s 7.0$ 地震由于两个台阵的加入可以进行全球定位,并且在两台阵的连线方向上定位能力明显优于其它方向。

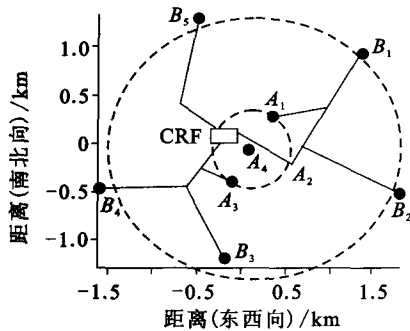


图 1 兰州台阵布局(参考文献[2])

Fig. 1 Distribution of Lanzhou seismic array (referring reference [2]).

通过近 6 年的连续观测兰州台阵已经记录到了大量的波形资料,通过分析这些资料可以对周边的小震和地球内部介质等进行深入的研究。台阵响应函数是描述台阵对不同频率和慢度的地震信号的敏感度和分辨率的重要参数,也是衡量台阵检测能力的重要标志,因此在对任何一个台阵的资料进行处理之前应该明确知道该台阵的响应函数。在国内,有关上海台阵的响应函数已经有很多研究成果^[7-8],而对于兰州台阵的台阵响应则鲜有文章讨论。本文将利用 FK 分析方法计算兰州台阵的台阵响应函数,并对不同方位的 4 个震中距在 1.8° 以内的小震

进行 FK 分析,以考察兰州台阵对于近震及地方震的分辨能力,为该台阵资料的进一步应用提供参考。

1 台阵响应函数

对于一个地震台阵,第 n 个地震仪和参考台站 A 的信号区别仅在于初至波达到的时间不同。第 n 个台站记录到的台阵下方的平面波可以利用其传播方向和视速度(或者慢度)进行定义^[9]:

$$w_n(t) = w(t - r_n \cdot p) \quad (1)$$

其中 r_n 为第 n 个地震仪和参考台站 A 的方向矢量, p 为第 n 个地震仪记录到的震相的慢度。

对于一个地震信号,相对于参考台站,所有台阵中 N 个子台观测的聚束结果为

$$b(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w_j(t + r_j \cdot (p - p_0)) \quad (2)$$

其中 p_0 为参考台站的慢度。聚束后的结果仅是慢度 $(p - p_0)$ 和台站的几何参数 r_j 的函数。如果慢度选择正确,则通过聚束可以很好的突出地震信号,压制随机噪声。

聚束后的能量可以通过聚束后信号幅度平方的积分进行计算;

$$E(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} b^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w_j(t + r_j \cdot (p - p_0)) \right]^2 dt \quad (3)$$

根据巴塞伐尔(Parzeval)定理,式(3)在频率域可以表示为

$$E(\omega, p_0 - p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\bar{w}(\omega)|^2 \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\omega \cdot r_j \cdot (p_0 - p)} \right|^2 d\omega \quad (4)$$

其中 $\bar{w}(\omega)$ 为地震信号 $w(t)$ 的傅立叶变换。根据慢度和波数(k)的关系 $k = \omega \cdot p$,公式(4)可表示为

$$E(\omega, k_0 - k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\bar{w}(\omega)|^2 |C(k_0 - k)|^2 d\omega \quad (5)$$

其中

$$|C(k_0 - k)|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\omega \cdot r_j \cdot (p_0 - p)} \right|^2 \quad (6)$$

根据公式(2)、(3),聚束后的幅度是慢度 p 和台阵台站几何参数 r_j 的函数,如果 $p - p_0$ 改变,则幅度也会发生变化。假设各台站的入射波具有相同的慢度,即 $p - p_0 = 0$,此时 $|C(k_0 - k)|^2 = 1$,聚束的效果达到最佳,其它慢度的信号都被压制。因此式(6)称作台阵的响应函数(ARF)。台阵响应函数有

如下基本特征:

- (1) 台阵的孔径决定了台阵对于波数(慢度)的分辨能力,台阵孔径越大分辨波数(慢度)的能力越强;
- (2) 台阵中子台的数目决定了台阵能够精确识

别震相信号的能力,即对特定慢度信号进行叠加时压制其余慢度信号的能力;

- (3) 子台之间的距离决定台阵响应函数旁瓣的位置和最大能分辨的波数,子台间距越小能够分辨的波长也越小;

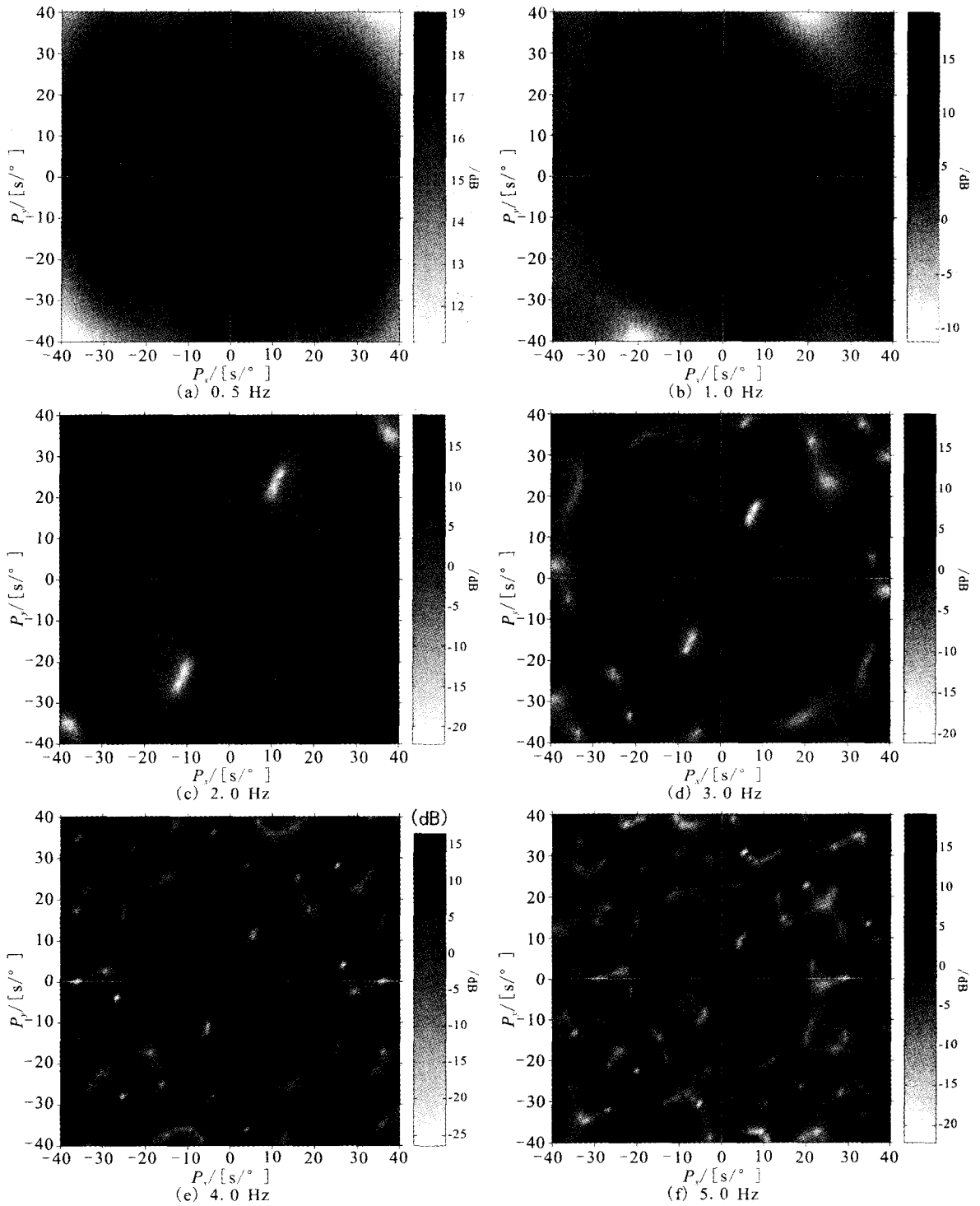


图 2 兰州台阵不同频率台阵响应函数

Fig. 2 The array response function of Lanzhou seismic array in different frequencies.

(4) 台阵的几何形状决定了台阵对于不同方位的分辨能力。

根据台阵响应函数可以分析台阵布局是否合理和波数的分辨力,如果一个台阵响应图像主峰高而尖,旁瓣少而低,则说明该台阵波数分辨能力高,布局合理。

公式(4)为 FK 分析的结果,它是台阵记录波场的频率-波数(慢度)功率谱,通过 FK 分析可以得到地震事件的方位和不同震相的慢度。

2 兰州台阵响应函数

利用公式(6)可以计算不同频率的兰州台阵的响应函数。图 2 为 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 Hz 对应的兰州台阵响应函数。可以看到,对于 2 Hz 以内的频率,台阵响应函数的极大值集中在原点附近,只呈现出一个明显的峰值,说明该台阵对 2

Hz 以内的地震信号具有很好的响应。当频率大于 2 Hz 时,在其它区域出现了很多旁瓣,说明对于高于 2 Hz 的信号台阵的响应能力和分辨能力减弱。这主要由台阵的分布以及子台间的距离所引起。

3 不同方位地震事件 FK 分析结果

为了进一步考察兰州台阵对地震事件的定位和分辨能力,我们对台阵周围 1.8 σ 以内的四个不同方位的小震(震级范围 $2.0 < M_L < 2.7$)进行了 FK 分析。由于对于频率高于 2 Hz 的信号分辨率不是很好,因此首先对地震波形在 0.8~2.0 Hz 频率范围内用巴特沃斯滤波器进行了滤波以压制噪声,该频率范围也包含了大部分近震 P 波能量。地震的详细信息见表 1。地震和台阵的分布见图 3 所示。

表 1 FK 分析所用到的地震事件信息

编号	日期	时间	纬度 /°	经度 /°	震级 /M	深度 /km	震中 距/°	方位角/°		P 波慢度/[s/°]	
								S	FK	S	FK
1	2007-01-11	18:28:50.0	35.65	101.53	2.0	0	1.79	261.00	261.87	13.75	14.14
2	2007-03-31	4:11:38.0	36.07	103.95	2.1	11	0.24	59.35	59.04	17.70	15.55
3	2007-04-6	18:46:58.0	35.23	105.15	2.2	0	1.38	120.87	130.60	13.75	14.75
4	2007-08-27	5:10:49.0	37.13	103.65	2.7	1	1.18	358.06	4.57	17.05	16.72

注:地震目录由甘肃省地震局预报室提供。S:根据震源和台阵位置计算得到的结果;FK:FK 分析结果

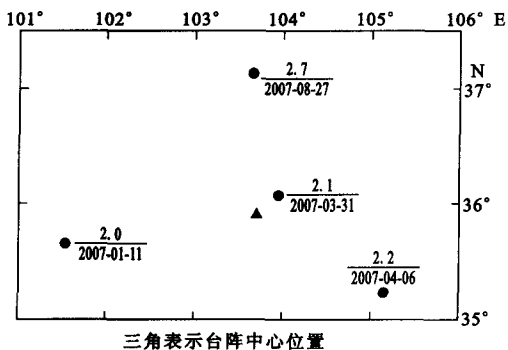


图 3 研究选择的小震分布

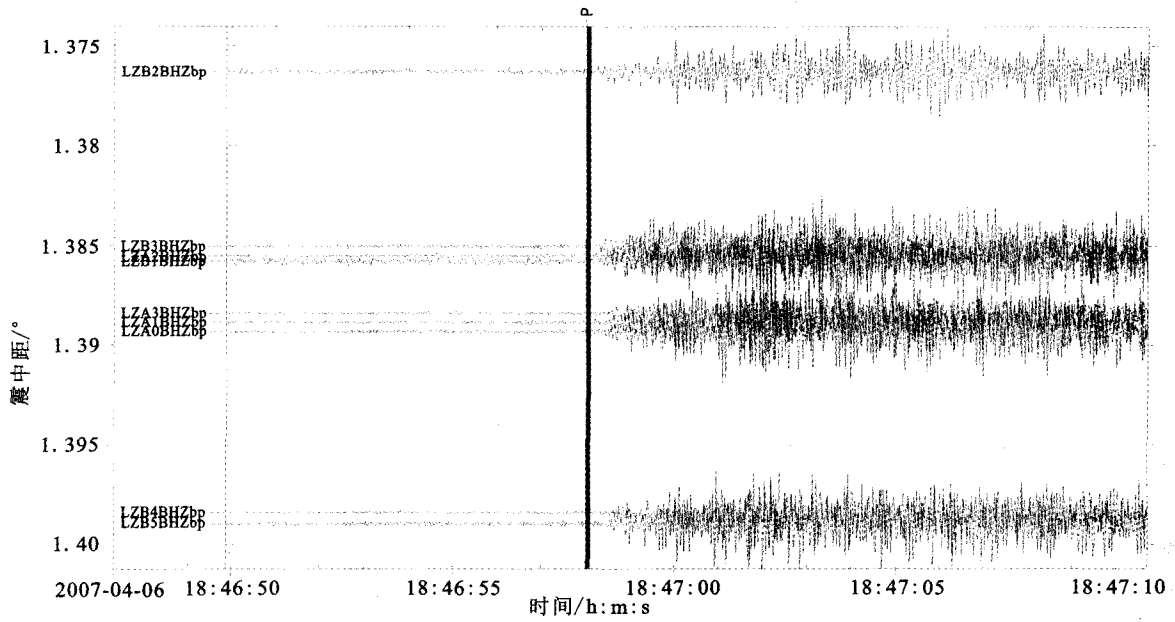
Fig. 3 Distribution of selected small earthquakes.

由于台阵中心的甚宽频带仪器和其它 9 套短周期仪器类型不同,因此我们在进行数据分析的时候只选择了宽频带的 9 个单分量记录。根据地震目录提供的震源位置和深度可以计算理论的方位角;参考 IASP91 模型^[10],计算初动震相的理论慢度和到时。对实际观测记录,我们首先手工确定了 P 波到时,截取了 P 波前后 10 s 左右的信号,图 4(a)为第 3 号地震事件的 9 个子台垂向记录地震波形 P。经过滤波后对 P 之后 3 s 时间窗内的信号进行 FK 分析(图 4(b)),结果表明地震的方位角为 130.60°,

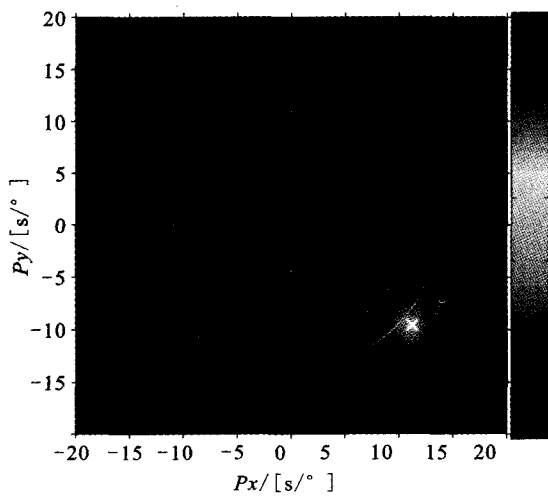
对应震相的慢度为 14.75 s/°。FK 分析结果中能量较为集中,没有其它明显的旁瓣,说明台阵对该地震事件的定位能力和震相识别能力较好。

另外我们也对 P 之前 5 s 内的噪声信号进行了 FK 分析(图 4(c)),图形中能量没有很好的集中,而是散布在不同位置,说明没有相关性较强的信号,是一种随机的噪声。根据地震目录提供的震源参数得到该地震的方位角为 120.87°,P 波的慢度为 13.75 s/°,FK 分析的结果和根据地震目录得到的结果存在一定的差别。

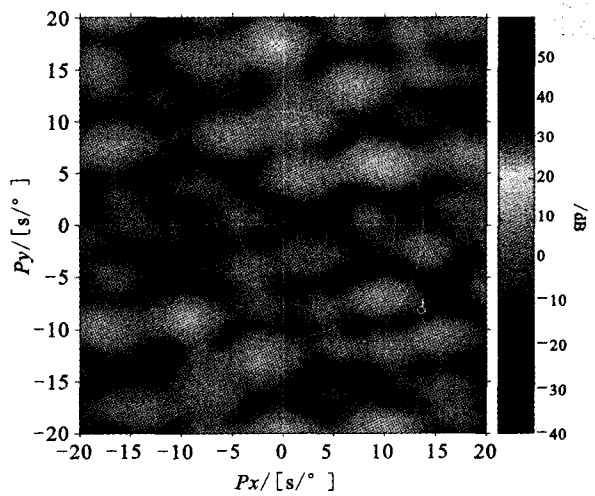
图 5 显示了表 1 中 1、2 和 4 号地震 FK 分析的结果。表 1 中也列出了根据地震目录和 IASP91 速度模型得到的理论方位角和 P 波慢度以及根据 FK 分析结果得到的方位角和慢度。对比二者的结果,对于 1 和 2 号地震,FK 分析得到的方位角与根据地震目录计算得到的较为一致,差别在 1°以内;而对于 3 和 4 号地震,差别较大,最大达到了 10°左右,平均差别为 4.2°。4 个地震慢度差别在 2.15 s/°以内,平均差别为 0.27 s/°。FK 分析的结果一方面受到台阵布局的影响,另一方面也受到台阵周围下方速度结构的影响。本研究中理论的 FK 分析结果都



(a) 波形



(b) P之后3 s时间窗内信号的FK分析结果



(c) P之前5 s时间窗内噪声的FK分析结果

图 4 第 3 号地震事件波形及 FK 分析结果。

Fig. 4 The waveforms of event No. 3 and results of FK analysis.

是根据 IASP91 速度模型计算给出,与当地实际情况有所差别,因此本文 FK 分析结果与根据地震目录得到结果的差别。一方面可能来自于所用模型和实际模型存在差别引起,另一方面没有进行台阵校正也会对 FK 分析的结果有影响。

4 结论

本文计算了兰州台阵的台阵响应函数,结果表明对于各个方向 2 Hz 以下的信号台阵响应函数在 原点附近都呈现出一个明显对称的主峰,对于更高频率的信号,除了中心主峰以外,在其它区域出现了很多旁瓣,表明该台阵对于各个方向 2 Hz 以下的地

震信号具有较好的分辨力,而对于更高频率的信号则分辨较差。利用 FK 分析方法对四个不同方位的小震作了 FK 分析,结果表明 FK 分析得到的地震方位角和 P 波慢度与根据地震目录计算的理论结果大体一致,但也存在差别,这种差别与很多因素有关,包括仪器记录误差、人为读数误差、定位技术限制等,但我们认为误差主要由当地速度模型与 IASP91 速度模型的差别引起。在未来的研究中,我们将结合台阵周边地区的速度结构,利用大量的观测资料计算不同方位的台阵校正参数,对兰州周边地区的小震进行进一步精确的定位研究。地质调查、地震变形数值模拟^[11]和浅层勘探^[12]都表明,兰

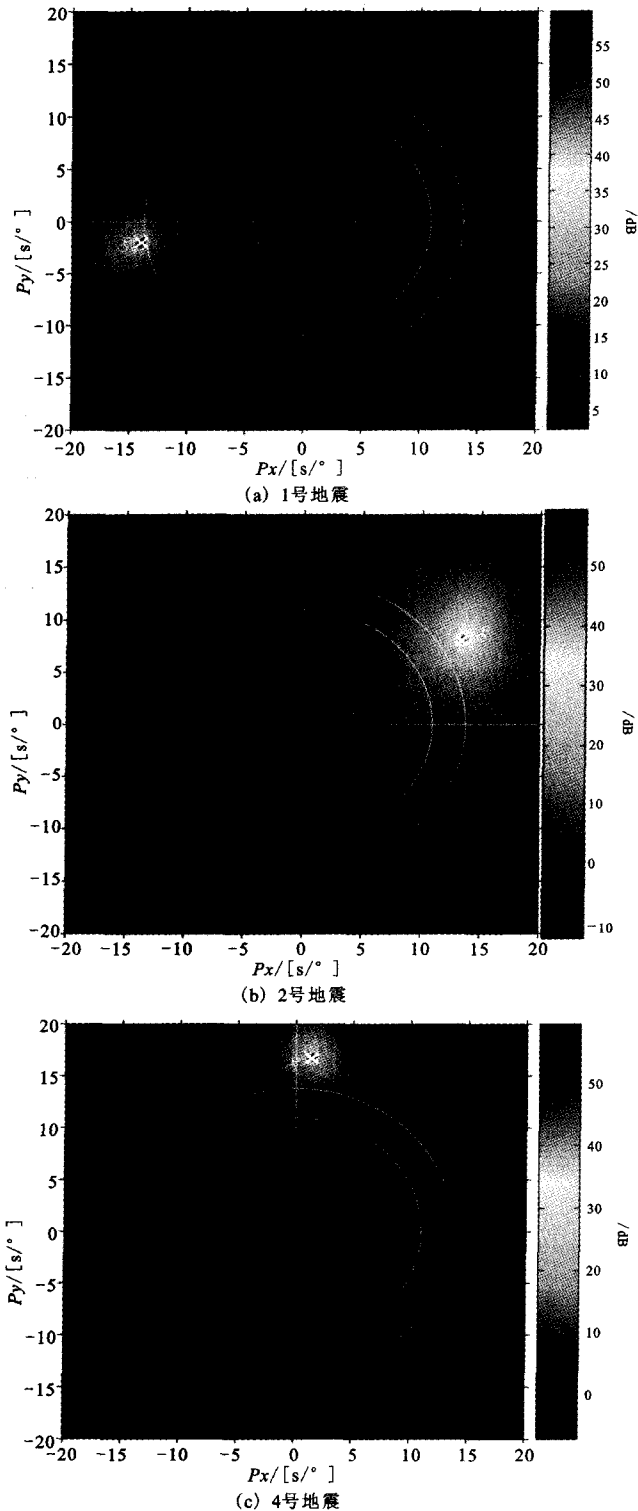


图5 第1、2和4号地震FK分析结果

Fig. 5 The results of FK analysis for event No. 1, No. 2 and No. 4.

州盆地存在活动断层,通过对小地震精确定位可以对这些断层的活动性进行监测,有利于该区域地震危险性分析。

致谢:本研究所用台阵数据由兰州观象台测震组提供,两个评审专家给出了非常有益和宝贵的建议,地震目录由甘肃省地震局预报室提供,资料出分析处理中用到了 Sandia 实验室的 Matseis 软件和 Lawrence Livermore 实验室的 SAC 软件,在此表示谢意。

[参考文献]

- [1] 许健生,李建,刘旭,等. 兰州大尖山台阵建设[J]. 西北地震学报,2005,27(增刊):27-30.
- [2] 许健生,赵仪全,苏向州,等. 兰州大尖山地震台阵勘址[J]. 地震地磁观测与研究,2006,27(B08):51-57.
- [3] 郝春月,郑重,周公威. 兰州台阵勘址测点的功率谱估计与分析[J]. 地震地磁观测与研究,2002,23(3):-
- [4] 郝春月,郑重,牟磊育. 兰州台阵勘址测点对相干函数的计算与分析[J]. 地震地磁观测与研究,2002,23(4):29-33
- [5] 郝春月,郑重,郭燕平,等. 中国数字地震台网(CDSN)和 IMs/PS 台阵的监测定位能力评估[J]. 地震地磁观测与研究,2006,27(2):56-63.
- [6] 郝春月,郑重,周公威. 兰州台阵勘址测点相关值曲线的计算分析与初选台阵评估[J]. 地震学报,2003,25(6):608-614.
- [7] 佟玉霞,朱元清. 上海地震台阵响应图及其计算方法估[J]. 地震地磁观测与研究,2002,23(2):47-54.
- [8] 于海英,朱元清. 频率一波数分析基础理论及上海地震台阵响应分析[J]. 地震研究,2006,29(3):312-316.
- [9] Bormann P, IASPEI. New Manual of Seismological Observatory Practice[M]. Potsdam: Geoforschungszentrum, 2002.
- [10] Kennett B L N, Engdahl E R. Travel times for global earthquake location and phase identification[J]. Geophys J Int., 1991, 105: 429-465.
- [11] 王爱国,袁道阳,梁明剑. 兰州盆地最大潜在地震变形数值模拟[J]. 西北地震学报,2008,3:232-238.
- [12] 卢育霞,王振明,王兰民,等. 兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术[J]. 西北地震学报,2008,30(4):344-353.