

地震台阵上信号方位角和慢度的时、 频域估计方法比较

严 锋, 靳 平, 范广超

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:地震台阵常用频率-波数分析法来估计地震信号的后方位角和慢度。尽管有关的算法是众所周知的,但不同的实现在某些情况下可能导致不同的结果。如应用在宽频带的澳大利亚 WRA 台阵的记录时,标准的 f-k 分析方法往往给出不正确的结果。本文发现错误是由 FFT 的频谱泄漏效应引起的,如在进行 FFT 之前对原始数据进行高通滤波则可以有效地避免这样的错误。进一步对在时域中直接估算信号方位角和慢度的一种算法进行了分析,比较发现时域方法的计算速度和精度都不低于频域方法,且在某些低信噪比的情况下,前者可以给出更可靠的结果。

关键词:地震台阵; f-k 分析; 频域波数; 时域波数; 慢度; 方位角

中图分类号: P315.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)04-0327-04

Comparison between Two Estimation Methods of Azimuth, Slowness of Seismic Signal in Frequency and Time Domains on Seismic Array

YAN Feng, JIN Ping, FAN Guang-chao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Frequency wave-number analysis (f-k analysis) is often taken to estimate the slowness and azimuth of seismic signal in seismic array. There are different algorithms of f-k analysis and in some special cases they lead to quite different results. For example, as being applied to the WRA array of Australia which is different from many other short period arrays by employing broadband seismic recordings at its substations, the standard f-k algorithm usually yields incorrect estimations of azimuth and slowness. It is found in this paper that the error is caused by the spectral leakage effect of FFT and may be avoided by applying a highpass filter to raw data before f-k. After comparing the time domain approach of estimating azimuth and slowness in the f-k method with the frequency domain, it is shown that the time domain approach actually is not less accurate or efficient than the improved frequency domain approach, and in the case of signal-to-noise ratio is very low, the results obtained from the time domain approach are more reliable.

Key words: Seismic array; F-k analysis; Frequency domain wave-number; Time domain wave-number; Slowness; Azimuth

0 引言

方位角和慢度是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关键性作用。地震台阵常用频率-波数分析

方法,即一般所说的 f-k 分析方法来估计地震信号的方位角和慢度。国际上台阵观测及相应的数据处理分析技术的应用已经较为普遍,但相关技术在国内却还处于起步发展阶段。f-k 分析方法早期是由

Capon^[1]等人研究的,后来在此基础上又发展起来了宽带 f-k 分析法^[2]、最大似然估计方法^[3]等。现在地震观测中常用的 f-k 分析算法是 Kværna 和 Doorbvos 在 1986 年提出的宽带 f-k 分析法。

作者在实际工作中发现,在采用宽带 f-k 分析方法来估算信号的方位角和慢度时,对绝大多数台阵该方法都可以给出比较满意的估计结果,但对澳大利亚的 WRA 台阵其估计结果往往却不正确。针对这一问题本文进行了分析,找到了导致这一问题的主要原因及解决办法。与此同时本文还直接应用时域方法来估算信号的方位角和慢度,并对时域和频域估计方法进行了比较分析。

1 频域波数分析与时域波数分析的原理

宽带 f-k 分析法的原理可统一表述如下:设 C 为各通道间的、经相位慢度校正后的信号谱相关矩阵,其元素可由下式计算:

$$C_{mn}(p) = \int F_n(\omega, p) F_m^*(\omega, p) \frac{d\omega}{2\pi} \quad (1)$$

式(1)中 $F_n(\omega, p) = F_n(\omega) \exp(i\omega p \cdot x_n)$, $F_n(\omega)$ 是第 n 个子台上信号的傅立叶变换; x_n 是第 n 个子台上的平面坐标; ω 是角频率; p 是慢度矢量。若将水平慢度矢量 p 分解为 p_x 和 p_y , 则信号的归一化慢度谱表示为

$$P(p, \omega) = P(p_x, p_y, \omega) = g^T C g / \{ |g^2| tr C \} \quad (2)$$

对垂直分量台阵来说 $g^T = (1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1)$, 其中元素的个数为台阵的子台数目。式中峰值对应的慢度值即是慢度矢量的估计值, tr 表示矩阵的迹。实际估计的频率波数谱为信号真实频率波数谱与台阵响应的褶积,即

$$\hat{P}(p_x, p_y, \omega) = \iint W(k_x - p_x, k_y - p_y) \times P(k_x, k_y, \omega) dk_x dk_y \quad (3)$$

式中 $W(k_x, k_y)$ 为台阵的响应^[4]:

$$W(k_x, k_y) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \exp(-ik_x(x_i - x_j) - ik_y(y_i - y_j)) \quad (4)$$

频域中 f-k 分析的实质是用假定的信号慢度矢量对各子台上的信号谱进行相位校正,以去除因信号在各子台上的到时差而引起的相位差;然后将校正后的信号谱进行叠加;将叠加后的谱振幅最大时的慢度矢量作为信号实际慢度矢量的估计值。其具

体实现过程为:从信号到时前一段时间开始读取一定长度的各子台数据,去除数据的线性趋势项,进行傅立叶变换;然后依据 f-k 分析的频带进行频率抽取,计算各子台的相移并用相移校正子台信号;再计算各子台的信号谱并将信号谱进行叠加,找出叠加后谱的最大值,其对应的慢度就是慢度矢量的估计值。

时域波数分析原理是直接的时间域内对信号进行延时对齐并叠加,而不对信号做傅立叶变换和频率抽取。假设第 i 个传感器接收的离散信号 $s_i(t)$ (t 是离散的,即 t 是抽样周期的整数倍, $t = nT$), 对传感器记录信号进行时域采样后,时域波数分析中所用的延时一定是抽样周期 T 的整数倍。时域波数分析由下式^[5]给出:

$$\begin{aligned} B(t) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(nT + \tau_i) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(nT + x_i \cdot p) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 x_i 表示子台 i 的位置向量, p 表示慢度向量。信号的归一化慢度谱的计算与式(2)相同。

时域波数分析方法是直接在时间域内进行计算的。其具体实现过程为:从信号到时前一段时间开始读取较长长度的子台数据,对此数据进行滤波,从滤波后的数据中读取相同长度的数据,对各子台而言读取的起始时间是同一时刻(信号到时前几秒)加上延时后的时间,因此各子台读取数据的起始时间并不相同;将截取的数据直接叠加后求其功率,并找出最大功率值对应的慢度即为慢度的估计值。

时域波数分析实质与频域波数分析相同,都是将慢度空间划分为很多格点,在每个格点上计算延时,对齐求和后求取信号的功率,最大功率值对应的慢度和后方位角组合就是两者的最佳估计。

2 频率波数分析与时域波数分析的比较

对于一般的台阵,常用的频率波数分析方法可以得到准确的估计值,而对 WRA 台阵使用频率波数分析却无法得到准确的估计值。图 1 为 WRA 台阵的布局;图 2(图版 I)为 WRA 台阵的台阵响应;图 3(a)(图版 I)为 WRA 台阵 WBO 子台记录的时间为 2004-03-07T13:14:03.9, 发生在 24.0°N, 121.8°E 的事件滤波前后的波形。该震相的理论慢度为 7.91 s/°, 理论方位角为 343.7°。图 3(b)(图版 I)为使用频率波数分析方法得到的估计结果。表 1 第

一行给出了分析结果及分析时所用的参数。与理论值相比该结果不正确。为此可对频率波数分析方法进行改进(在对原始数据进行傅立叶变换之前先对数据进行高通滤波),或采用时域波数分析方法。

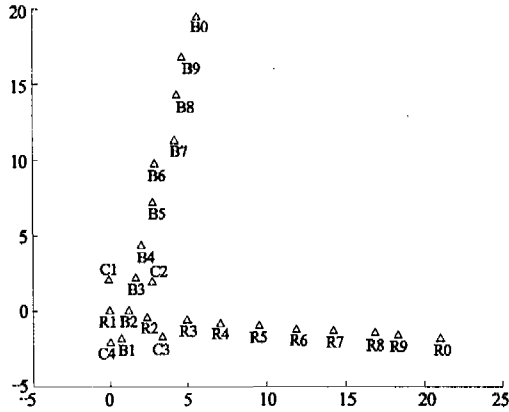


图 1 WRA 台阵布局

Fig. 1 Geometry of the WRA array.

图 3(c)和图 3(d)(图版 I 图 3)分别是改进后频率波数分析及时域波数分析的结果。表 1 第二行和第三行分别给出了两种分析方法的分析结果及分析时所用的参数值。可以看出,改进后的频率波数分析与时域波数分析都可给出正确的估计结果。

表 1 WRA 台阵资料不同方法的分析结果

	分析窗长 /s	震相	频带 /Hz	慢度 /[s/°]	后方位角 /°
频域波数分析	5	P	2~4	1.41	225.5
改进的频域波数分析	5	P	2~4	8.84	346.7
时域分析方法	5	P	2~4	8.47	342.5

众所周知,在时域中截断信号实际上相当于在时域中加窗,根据卷积定理频域中信号谱与矩形窗谱进行卷积,因此频域中 f-k 分析估计的信号功率谱实际上是信号真实功率谱与窗函数幅度谱的褶积。即 $\hat{S}_i(\omega) = \int S_0(\omega) e^{i\omega p_0 x_i} W(\omega - \omega) d\omega$ 。其中 $S_0(\omega)$ 为信号真实的功率谱; $W(\omega - \omega)$ 为窗函数的幅度谱。如果窗函数的幅度谱为 δ 函数,即 $W(\omega - \omega) = \delta(\omega - \omega)$, 当用正确的慢度进行相位校正后各子台经校正后的信号谱相同,即 $\hat{S}_i(\omega) e^{-i\omega p_0 x_i} = \hat{S}_0(\omega)$ 。而实际中 $W(\omega - \omega)$ 并不等于 $\delta(\omega - \omega)$, 因此由于时域加窗引起的泄漏效应必将存在。一般情况下选用不同的窗函数对信号谱的影响不会很大,但对 WRA 台阵的信号分别加矩形窗和布莱克曼窗信号谱相差较大,如图 4(图版 I)所示。原因是其他台阵一般为短周期地震计,而 WRA 台阵却是宽频带地震计,其记录波形中存在较强的低频噪声,在采用常用的频率波数分析法时由于加窗引起低频能量

的泄漏导致信噪比降低,因此得到错误的分析结果。而时域中则不存在这样的问题。

可以看出,时域与频域分析图中均存在边瓣,但两者产生的原因不同。在时域波数分析中,各子台的时间延迟对齐所关心的信号后,另一相关性信号或噪声在各子台的另一位置处也同时被对齐,因而产生了边瓣。频率域中用相移对齐信号对应于时域中的循环移位,假设信号在慢矢量为 p 处被对齐,由于循环移位在 $p + \delta p$ 处可能被再次对齐,因此产生了频域分析中的边瓣。频率域中实际估计的频率波数谱为信号真实频率波数谱与台阵响应的褶积,为了验证频域波数分析结果中边瓣的出现是否是褶积产生的结果,进行如下试验:试验假定在波数空间中具有如下形式的功率谱密度分布,即 $P(k_x, k_y) = \frac{e^{-\frac{(k_x - k_{x0})^2 + (k_y - k_{y0})^2}{\sigma^2}}}{\sigma^2}$, 其中 k_{x0}, k_{y0} 相当于信号的实际波数矢量,而 σ 反映信号在波数空间中的宽度,如图 5(a)(图版 I)所示;将上述“真实”功率密度谱和 WRA 台阵的响应作二维褶积,得到如图 5(b)(图版 I)所示的等高线图,从图中可以看出褶积后存在旁瓣,可见 f-k 分析结果中的边瓣来源于与台阵响应的褶积。

我们已知频域波数分析在信号信噪比较低时一般仍可得到准确的估计值。下面分析信噪比对时域波数分析的影响。图 6(a)(图版 I)为 ILR 台阵子台 7 记录的 2004-03-17T02:47:43.6 发生在 $36.5^\circ N, 85.1^\circ E$ 的事件的波形。该震相的理论慢度为 6.06 s/° , 理论方位角为 317.8° 。可以看出该信号的信噪比非常低(只有 2.1),图 6(b)、(c)(图版 I)为频域波数分析与时域波数分析的结果,表 2 为频域与时域分析时所用的参数及分析结果。可以看出,在信噪比很低时时域波数分析仍能给出正确的估计值,而频率波数分析给出的结果误差很大。

表 2 ILR 台阵资料不同方法的分析结果

	分析窗长/s	震相	频带/Hz	慢度/[s/°]	后方位角/°
频域波数分析	5	P	1~2	10.62	211.4
时域分析方法	5	P	1~2	4.71	310.8

下面将频域波数分析与时域波数分析两种分析方法用于国内的兰州台阵,以便检验文中提出的时域波数分析方法。以兰州台阵记录的 2002-01-09T19:41:43.2 发生在青海(震中位置: $34.77^\circ N, 99.60^\circ E$)的 3.4 级地震为例, Pn、Pg、Lg 震相的理论慢度分别为 $13.92 \text{ s/}^\circ, 19.46 \text{ s/}^\circ, 31.46 \text{ s/}^\circ$, 理论方位角为 365.1° 。图 7 为该事件在兰州台阵的子台 A2 上的波形,滤波器频带为 $2\sim 4 \text{ Hz}$;图 8(图版 I)

和图9(图版II)分别是不同震相的频域和时域波数分析结果。可以看出,频域和时域分析均给出了正确的估计值,可见文中所采用的时域波数分析方法是稳定可靠的。



图7 兰州台阵子台2记录的波形

Fig. 7 Waveform of A2-substation of LZA.

表3 兰州台阵资料不同方法的分析结果

	分析窗长/s	震相	频带/Hz	慢度/[s/°]	后方位角/°
频域波数分析	5	Pn	2~4	15.59	261.2
	5	Pg	1.5~3	19.53	258.7
	5	Lg	1~2	33.26	250.4
时域分析方法	5	Pn	2~4	15.46	258.9
	5	Pg	1.5~3	19.04	259.3
	5	Lg	1~2	33.80	250.4

3 时域波数分析的精度分析

进行频率波数分析时,设中心台上信号窗口为 $[t_a, t_b]$, 则第 i 个子台上所选取的信号窗口为 $[t_a, t_b] - p_0 x_i$, 即所截取的信号的起止时间和信号长度是相同的。但由于各个子台上的信号相对于中心台有时延,并不完全相同,频域中实际估计信号的功率谱为 $s(\omega) = e^{-i\omega(t-p_0 x_i)} \sum_{i=1}^N \left(\int_{t_a-p_0 x_i}^{t_b-p_0 x_i} s_i(t) e^{-i\omega t} dt \right)$, 这可能导致 $f-k$ 分析精度的下降。而时域波数分析则不存在这一问题,因为在时间域内截取信号的起止时间是用子台延时校正后的,因此在截取时间段内所包含的信号是相同的。时域中估计信号的功率谱为 $s(\omega) = e^{-i\omega(t-p_0 x_i)} \sum_{i=1}^N \left(\int_{t_a}^{t_b} s_i(t) e^{-i\omega t} dt \right)$, 从这一意义上说,时域波数分析的精度并不低于频域波数分析的精度。且频率域中由于存在周期性影响,使得对于周期的整数倍无法分辨,而时间域中则不存在此问题。

通过式(5)可以看出,在时间域中计算延时,需要对其进行离散化,因而时域波数分析中所用的延时 τ_i 一定是抽样周期 T 的整数倍。对延时离散化的过程就引入量化误差。假设抽样周期为 T , 令 τ_i 表示理想延时,由于时间量化引入的误差为 $\delta\tau_i = n_i T - \tau_i$, 可以预计当 $\frac{\delta\tau_i}{T}$ 很小时,这种由于时间量化引起的误差是可以忽略的。通过大量的实际数据分析发现,只要抽样周期小于信号周期的 $\frac{1}{4}$ 倍,其量化

引起的误差是很小的;而当其小于信号周期的 $\frac{1}{4}$ 倍时,几乎无影响。在实际处理中也可用内插法提高信号的采样率从而减小量化误差。但当采样周期小于信号周期的 $\frac{1}{4}$ 倍时,差值与否对分析结果的影响很小。

4 结论

通过上面的分析可以看出,频域波数的不同实现方法将产生不同的结果。在低频噪声能量很弱时,两种方法都可得到准确的估计值;而当低频噪声较强时,窗函数的影响将引起低频能量的泄漏,此时用第一种方法分析时,信号实际已经受到低频能量泄漏的影响,因此导致错误的估计值。而对于第二种方法,由于信号先经过高通滤波,因此低频噪声将被滤除,同时由于截取的信号窗较长,因此由于滤波引起的边缘效应也被去除,实际进行傅立叶变换的信号是不受低频噪声及滤波器边缘效应影响的信号,因此可得到准确的估计值。与频域波数分析相比,时域波数分析也可得到准确的慢度和后方位角的估计,且由于其实现方法的特点,不受低频噪声和台阵布局的影响。时域中采用内插法提高采样率从而减小量化误差,可以提高估计精度,但当采样率高于信号频率4倍以上时,插值与否对估计精度影响非常小。通过实验对比,在同样的慢度空间和慢度搜索精度下,时域波数分析的运算时间与频率波数分析运算时间相当,但时域波数分析方法较频域波数分析法稳定。

[参考文献]

- [1] Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proc. IEEE 57, 1969, 1408-1418.
- [2] Kvaerna T, D J Doornbos. An integrated approach to slowness analysis with arrays and three-component array data[A]. in: Semiannual Technical Summary, 1 October 1985-31 March 1986. Kjeller, Norway; Sci. Rept. No. 2-85/86, NORSAR, 1986.
- [3] Kvaerna T, F Ringdal. Stability of various F-K estimation techniques[A]. in: Semiannual Technical Summary, 1 April 1986-30 September 1986, Sci. Rept. No. 1-86/87, Kjeller, Norway; NORSAR, 1986, 29-40.
- [4] Jin Wang. A Scheme for Initial Beam Deployment for the International Monitoring System Arrays[J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159: 1005-1020.
- [5] Peter Bormann. New Manual of Seismological Observatory Practice (Volume 1) [M]. Potsdam: Geo Forschungs Zentrum, 2002.

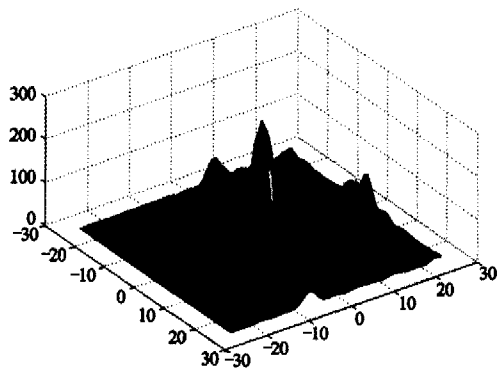


图2 WRA 台阵响应图
Fig.2 Response of the WRA array.

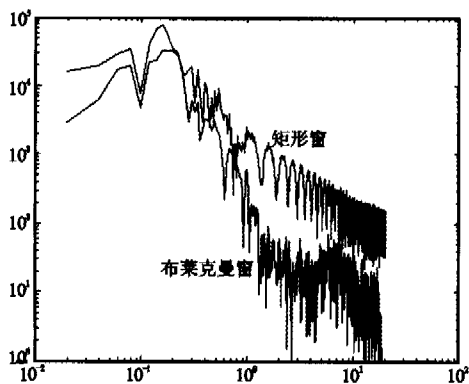
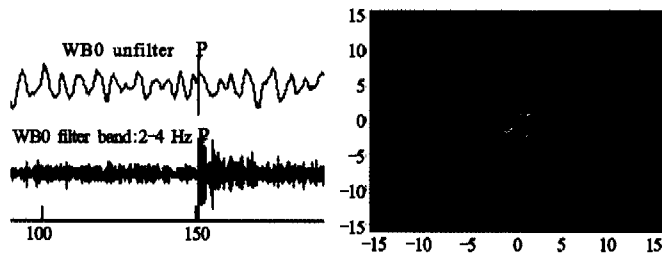
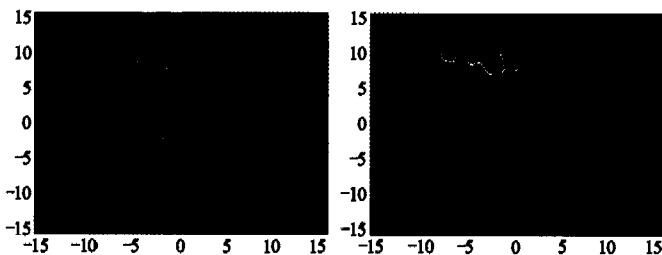


图4 加不同窗后信号的幅度谱
Fig.4 Amplitude spectrum of added different window.



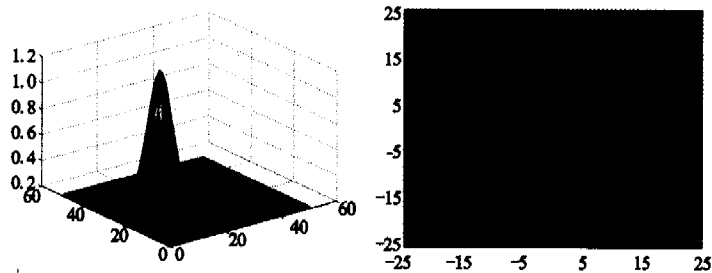
(a) 记录波形 (b) 频域波数分析结果



(c) 改进后的频域波数分析结果 (d) 时域分析结果

图3 WRA 台阵资料不同方法的分析结果(坐标值为慢度, 单位 s°)

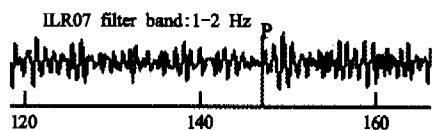
Fig.3 Results from different wave-number analysis methods for data of WRA array.



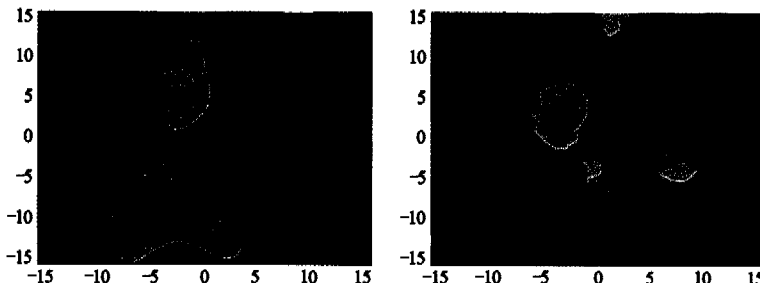
(a) 构造的二次函数 (b) 台阵响应与构造函数的褶积

图5 构造的二次函数及其与台阵响应的褶积

Fig.5 The constructed quadric function and its convolution results with array response.



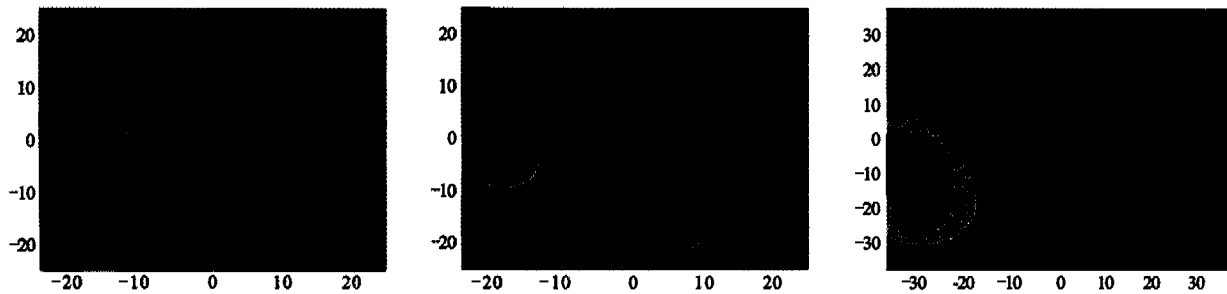
(a) ILR 台阵记录波形



(b) 频域分析结果 (c) 时域分析结果

图6 ILR 台阵资料分析结果

Fig.6 Results from frequency wave-number analysis methods and time domain analysis for data of ILR array.



(a) Pn 震相的频域分析结果 (b) Pg 震相的频域分析结果 (c) Lg 震相的频域分析结果

图8 兰州台阵资料的各震相频域分析结果

Fig.8 Results of frequency wave-number analysis for different phases recorded in LZA array.

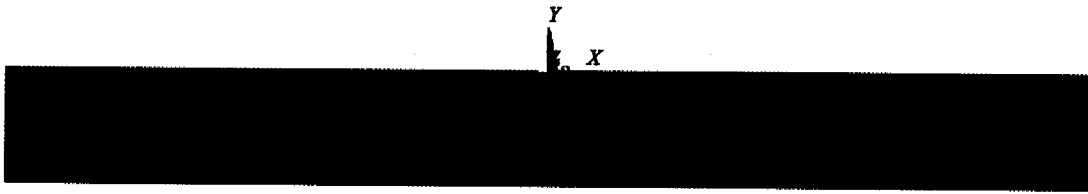


图 1 观测系统中心和河道中心重合模型

Fig.1 Model of observation system and riverway with both center overlapping.

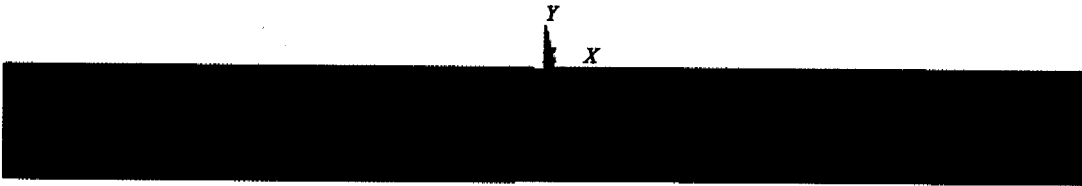


图 2 模型的网格划分

Fig.2 Partition gridding of the model.

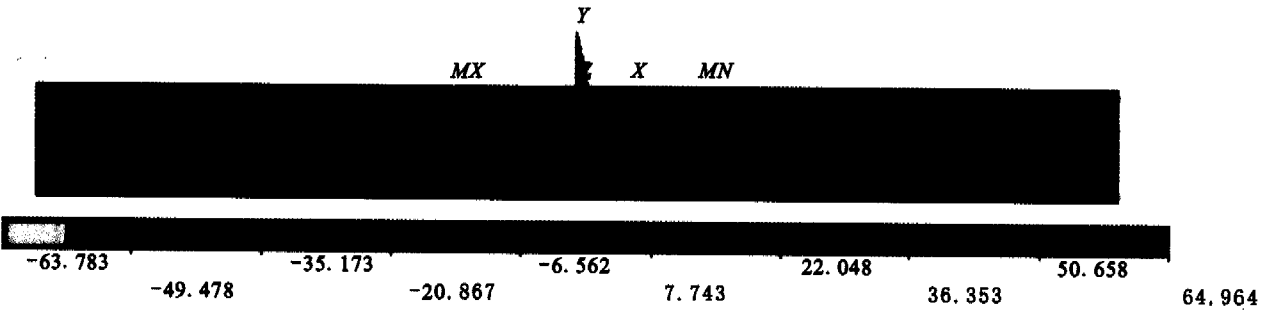


图 3 河水涨前数值模拟结果

Fig.3 Numerical simulation solution before swelling.

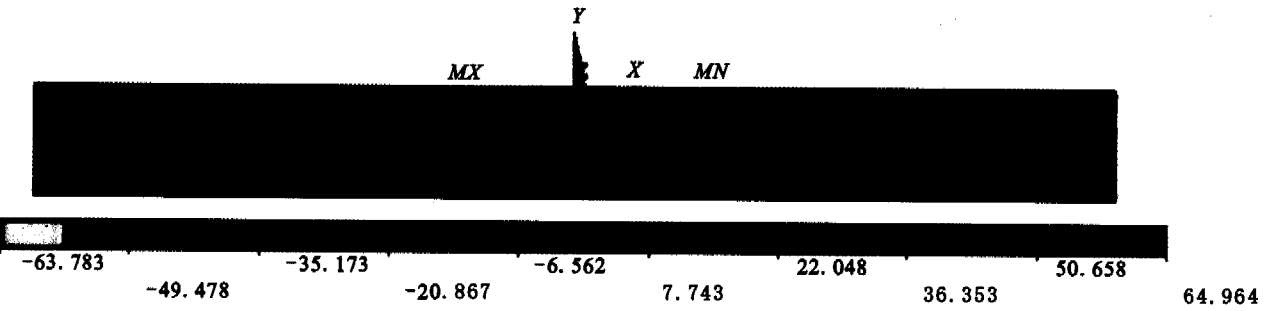


图 4 河水涨后数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation solution after swelling.

严 峰等：地震台阵上信号方位角和慢度的时、频域估计方法比较

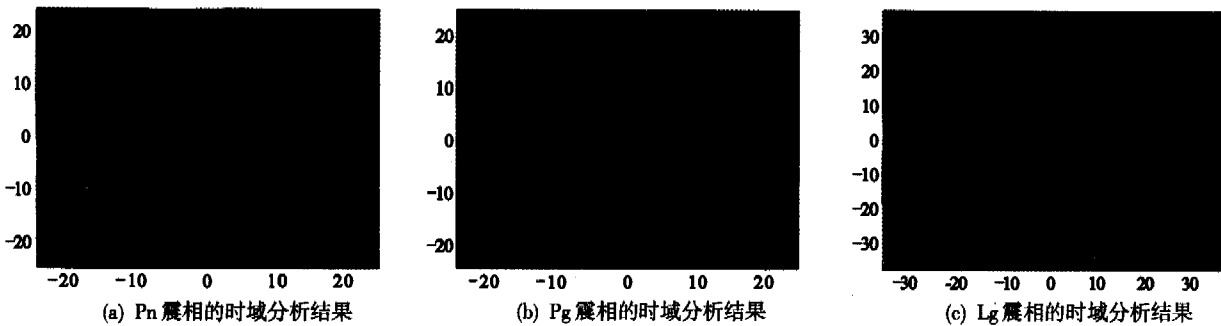


图 9 兰州台阵资料的各震相时域分析结果

Fig.9 Results of time domain analysis for different phases recorded in LZA array.