

基于图像分析的双台面波相速度 频散曲线快速提取方法

姚华建 徐果明 肖翔 朱良保

(安徽合肥 230026 中国科学技术大学地球和空间科学系)

摘要 双台波形的互相关方法是面波相速度频散曲线提取的一种常用方法。传统的方法精度不高,效率较低。本文提出了一种基于图像分析的频散曲线快速提取方法,采用图像显示互相关振幅矩阵,且提出了快速追踪整条频散曲线的算法,并用 Matlab 编写了交互式的处理软件。基于这种方法编写的资料处理软件提高了双台相速度频散曲线提取的速度和精度,为大批量处理地震数据资料提供了坚实的软件基础。基于图像分析的方法可以更为清晰地展现出双台间的面波频散曲线的特征,对频散曲线的识别和分析也提供了更为有效的研究工具。

关键词 面波; 双台; 相速度频散曲线; 图像分析

中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1003-3246(2004) 01-0001-08

引言

面波频散是研究地壳上地幔大尺度结构,及横向不均匀性的一种强有力的手段。地震学家通常采用单台法或双台法来提取面波频散特性。单台法需要知道震源发震时刻的初始相位 (James N et al, 1960), 在震源机制未知或是估计的震源初始相位与实际相差较大时,在较近的台站上计算得到的面波相速度会存在较大的误差。而双台法则不需要考虑震源机制,只需要两个接收台站和震源位于同一大圆路径上,利用满足此条件的双台地震资料可以非常准确地求得双台间的面波频散特性。Pliant 和 Knopoff (1964) 提出时变滤波 (TVF) 的思想,Knopoff 等 (1966) 同时采用傅里叶分析和时变滤波的处理方法得到了双台相速度频散。Landisman 等 (1969) 建议采用移动窗方法或多重滤波法 (MFT) (Dziewonski et al, 1969) 获得双台间的群速度,并采用加窗的互相关方法消除噪声和无用信号,从而获得稳定的相速度频散曲线。Herrin 和 Goforth (1979) 提出了相位匹配滤波法 (PMF) 来更加精确地提取相速度和群速度。Nakanishi (1979) 提出了维纳滤波的方法去提取 Rayleigh 面波单台相速度频散和 Q 。Taylor 和 Toksöz (1982) 采用时间域域内的维纳滤波方法得到了双台间的相速度、群速度和衰减系数。Hwang 和 Mitchell (1986) 提出了频率域内维纳滤波方

作者简介: 姚华建 (1979~), 男, 硕士研究生, 2001 年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系, 获学士学位; 目前主要从事地震面波反演、层析成像以及地震信号处理方面的研究工作
国家自然科学基金资助项目, 基金号 49974008, 40374010
本文收到日期: 2003-10-29

法,得到了双台面波的 Green 函数,并讨论比较了用于分离基阶面波的相位匹配滤波法和时变滤波法的有效性。

双台波形的互相关方法是面波相速度频散曲线提取的一种常用方法 (Brisbourne A M et al, 1998; 徐果明等, 2000)。传统的做法是,先绘制互相关振幅矩阵的等值线,再在等值线图上用手工描点的方式勾画出相速度频散曲线。这种做法精度不高,且效率较低。

本文提出一种基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法,可以快速准确地提取出整条频散曲线。与传统的等值线方法不同,这里我们用图像显示振幅矩阵,从而可以更加清晰地分析双台间的相速度频散特征。我们用 Matlab 编写了频散曲线提取的交互式软件,并提出了快速追踪整条频散曲线的算法。在互相关振幅矩阵图像上,只需要用鼠标点击频散曲线所在的附近区域,便可立即自动搜索得到整条频散曲线。与传统的等值线描点方法相比,本方法提高了双台相速度频散曲线的提取效率和精度。且基于图像分析的方法可以更为清晰地展现出双台间的面波频散特征,对频散曲线的识别和分析提供了更为有效的研究工具。

1 资料

我们选取地震事件的矩震级均在 5.0~7.0 之间,震源深度为小于 100 km 的浅震。台站为全球数字地震台网 (GDSN) 和中国数字地震台网 (CDSN) 的部分台站。所计算挑选的双台路径偏离大圆路径的误差均小于 2° 。我们处理的双台地震波形记录以及仪器参数均来自地震学联合研究所 (IRIS),台站波形记录为长周期 (采样率为 1 Hz) 垂直向的地震记录,所选取的波形记录的质量都比较好,由这些地震波形记录我们可以提取出双台瑞利面波的频散曲线。

2 基于图像分析的频散曲线快速提取方法

我们首先对双台地震波形记录进行了零漂校正,并去除了台站的仪器响应。之后分别对同一地震事件接收的双台波形记录进行归一化处理,再分别对归一化之后的双台记录 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 用多重滤波法进行处理,得到每个台站的群速度到时 $t_{g1}(T)$ 、 $t_{g2}(T)$,以及双台间的群速度,其中 T 为周期。之后,我们再做双台记录 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 的加可变宽度移动时窗的窄带滤波处理,得到基本上同频的简谐波。为了便于得到时间域内的频散曲线,我们选取窄带滤波的中心周期为 T_c ,初始和终止滤波周期分别为 T_S 与 T_E ,滤波周期间隔为 ΔT (这里取 1 s),滤波器的同频带带宽我们取为 $0.2\Delta T$ 。选取的窄带滤波器为加 Kaiser 窗的有限冲击响应滤波器,我们发现,当 Kaiser 窗的特征参数 β 值取为 9 时,窄带滤波的效果达到最好。窄带滤波的具体表达式为

$$y_i(t, T_c) = [s_i(t) \times w(t, T_c)] * h_d(t, T_c) \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中 $y_i(t, T_c)$ 为 i 台站波形记录加可变宽度移动时窗的窄带滤波的处理结果, $h_d(t, T_c)$ 为加 Kaiser 窗的有限冲击响应窄带滤波器, $w(t, T_c)$ 为可变宽度移动时窗

$$w(t, T_c) = \begin{cases} 1 & t_{gi}(T_c) - nT_c < t < t_{gi}(T_c) + nT_c \\ \cos\left(\pi \times \frac{|t - t_{gi}(T_c)| - nT_c}{T_c}\right) & -T_c/2 < |t - t_{gi}(T_c)| - nT_c < -T_c/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式中 $i = 1, 2$, 移动窗半宽系数 n 的典型值为 $2 \sim 4$ 。该移动窗的中心在 $t = 2\ 400\text{ s}$, $T_c = 100\text{ s} = 100\text{ s}$, $n = 3$ (图 1)。通过在时间域加此可变宽度移动时窗 $w(t, T_c)$, 可以很好地分离出基阶面波, 从而抑制高阶面波和其他波对基阶面波相速度提取产生的误差, 提高相速度提取的精度。

分别对每一周期的双台窄带滤波结果做互相关, 得到不同周期的互相关序列, 长度为 N , 互相关序列上的每一点都对应一双台波形的时移量 τ 。先将每个周期的互相关序列分别做归一化处理, 再将归一化之后的互相关序列按照周期从小到大的顺序按列排列起来, 便可以得到与周期 T 和时移量 τ 有关的互相关振幅矩阵 $C(T, \tau)$, 若共有 M 个互相关周期序列, 则矩阵大小为 $N \times M$ 。我们直接用图像的方法显示矩阵 $C(T, \tau)$, 横坐标为周期 T , 纵坐标为 τ , 从图像上我们可以非常清晰地发现, 双台波形互相关最好的区域。

由于 $C(T, \tau)$ 图像还不能直接反映出相速度与周期的关系, 所以, 必须将 $C(T, \tau)$ 转化成能直接反映周期 T 和相速度 c 之间关系的振幅矩阵 $C^*(T, c)$ 。由 $C(T, \tau)$ 矩阵上每一点所对应的时移量 τ , 我们均可以求出该点的相速度值 c ($c = D/\tau$, D 为双台沿大圆路径的距离)。很明显, 相速度 c 与时移量 τ 是成非线性的反比关系, 即 $C(T, \tau)$ 矩阵列向量上均匀变化的 τ 将得到非均匀变化的 c 。为了图像显示和频散曲线提取的方便, 我们采用二次样条插值的方法, 得到列向量上的每一点为等间隔相速度差值的振幅矩阵 $C^*(T, c)$ 。由于 τ 可能趋于 0, 所以, 为了防止 $C^*(T, c)$ 中某点值出现 ∞ 情况, 我们一般只选取互相关最明显, 且 c 值在 $2 < c < 7\text{ km/s}$ (对于天然地震的频散特征) 这个范围之内的区域进行计算和插值变换。我们编写的软件可以很快实现这个功能, 只需要用鼠标在 $C(T, \tau)$ 图像上点击一下, 便可以计算并显示被点击点的相速度值。这样, 我们便可以很方便地确定振幅矩阵的变换区域 (即 τ 值的范围), 然后通过人机对话的方式输入我们选定的 τ 值的范围, 从而可以显示该区域。

振幅矩阵 $C^*(T, c)$ 经图像显示后, 可以更加明确地看出周期与相速度之间的关系, 在与 Gutenberg 基本地球模型所得到的瑞利面波理论相速度频散曲线的对比之下, 可以立刻确定出实际的频散曲线, 通常而言是互相关最好的一支。但在有些情况下, 对应于某一周期的互相关向量 [$C^*(T, c)$ 的一列], 互相关达最大值的点所对应的 c 并不是真实的相速度值, 而是与真实相速度值的相位相差 2π 的整数倍的点, 如果我们盲目地认为互相关最好的点就对应于该周期下的真实相速度值, 就会发生相速度在该周期位置发生突跳的错误。一般而言, 对于大的地球结构下的相速度频散曲线在中长周期 (如大于 60 s) 可以非常确定的判别出, 而低周期 (如低于 30 s) 可以采用从中长周期往低周期追踪的方式得到整条频散曲线。基于此思想, 我们编写了频散曲线的快速追踪算法, 可以快速地搜索得到整条频散曲线, 并自动地将相速度频散结果保存于文件中。具体步骤和软件实现如下。

(1) 先通过观察中长周期的 $C^*(T, c)$ 图像特征, 确定下真实的频散曲线, 再在 $C^*(T, c)$ 图像上接近实际频散曲线的位置用鼠标点击, 如图 5~图 7 所示, 鼠标自动提取该点的坐标 (T_0, c) 和振幅值 C^* 。

(2) 在周期为 T_0 的列向量上以点 (T_0, c) 为初始点, 同时向前向后搜索, 并选择振幅值

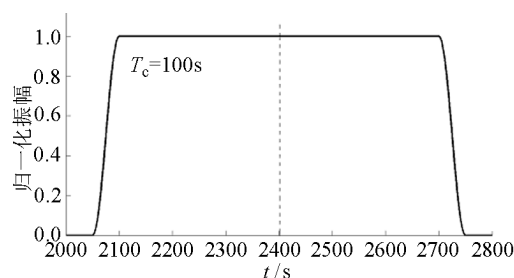


图 1 $T_c = 100\text{ s}$, 群到时 $t = 2\ 400\text{ s}$, $n = 3$ 时的移动窗

为增的那个方向作为最终搜索方向,并在此方向上搜索到第一个极大值点为止,该极大值点的纵坐标 c_0 即为周期为 T_0 时的相速度值。如图 2 的搜索示意图所示,极大值点为 C 。

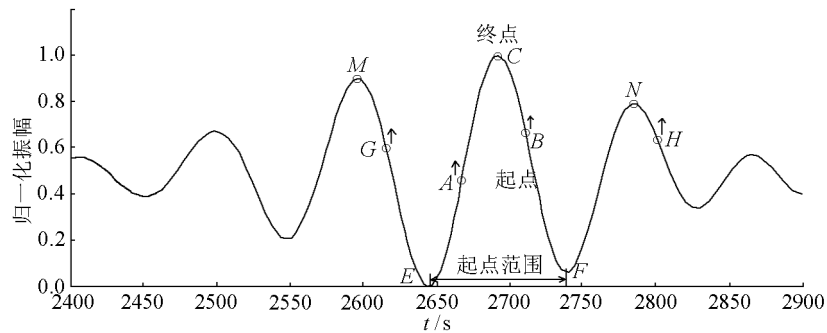


图 2 频散曲线快速搜索

图 2 中 C 点为某一周期的互相关序列中互相关达极大值的搜索终止点, E 、 F 分别为 C 点左右两旁的第一个极小值点, 这两点之间的区域为正确初始搜索点所在的区域, 该区域的点 (如点 A 、 B) 均可作为初始搜索点, 搜索终止点为 C ; 在此区域之外的点若为初始搜索点, 如点 G , 其搜索的终止点为极大值点 M , 若为点 H , 其搜索终止点为极大值 N , 均未错误的初始搜索点。图中的箭头方向为各点的搜索方向。

(3) 根据频散曲线的连续性, 即间隔周期的相速度值比较接近, 所以我们以得到的 (T_0, c_0) 为下一次搜索的初始点, 在相邻周期 $T_0 + \Delta T$ 和 $T_0 - \Delta T$ 的列向量上, 分别按步骤 (2) 的方法搜索得到相速度值 c_1 和 c_{-1} 。

(4) 再把 $(T_0 + j\Delta T, c_j)$ 作为周期 $T_0 + (j+1)\Delta T$ 列向量的搜索初始点, $(T_0 - k\Delta T, c_{-k})$ 作为周期 $T_0 - (k+1)\Delta T$ 列向量的搜索初始点, 在两个方向分别按步骤 (2) 的方法搜索, 重复此步骤, 直到分别当 $T_0 + j\Delta T = T_E$ 、 $T_0 - k\Delta T = T_S$ 时停止搜索, 这样便搜索得到一条完整的频散曲线。

(5) 按搜索得到的点在 $C^*(T, c)$ 图像上连线画出频散曲线, 并自动将频散数据保存到指定文件中。

该方法与传统的等值线描点法相比不仅在速度上而且在精度上都有很大的提高, 且交互式的图形软件界面对于分析频散曲线的整体或局部特征也有很大的帮助。我们所提出的处理方法以及基于此方法编写的软件提高了双台相速度频散曲线提取的速度和精度, 为大批量处理双台地震资料提供了高效可靠的保障。

3 实例分析

我们第 1 个计算实例为 1995 年 7 月 12 日 18:38:49 在 $(125.040^\circ \text{ E}, 12.320^\circ \text{ N})$ 发生的矩震级为 5.9 级的地震, 震源深度为 33 km。所选取地震记录是位于双台大圆路径上的两个台站 KMI (昆明台) 和 LSA (拉萨台) 的波形记录。这两个台站的原始波形记录见图 3。频散提取的起始周期为 $T_S = 20 \text{ s}$, 终止周期 $T_E = 150 \text{ s}$, 滤波周期间隔 $\Delta T = 1 \text{ s}$, 互相关振幅矩阵的周期数 $M = 131$ 。带通滤波器的同频带带宽取为 $0.2\Delta T = 0.2 \text{ s}$, Kaiser 窗的特征参数 $\beta = 9$, 可变宽度移动窗的半宽系数 $n = 3$ 。处理的双台波形长度均为 3 000 s (即 3 000 个采

样点), 这样得到的互相关序列的长度 $N = 5900$, 即互相关振幅矩阵的行数为 5999。如图 4 所示的互相关振幅矩阵 $C(T, \tau)$ 图像 (只显示了互相关最为明显的区域), 互相关最大值达 1, 白色区域为互相关显著的区域, 灰黑色区域为互相关不明显的区域。图 5 为图 4 经插值变换之后得到的振幅矩阵 $C^*(T, c)$ 的图像, 该图像十分清楚地给出了双台 KMI~LSA 间的频散关系, 频散曲线位于 $3.0 \sim 4.5$ km/s 之间的白色带状区域内, 该区域中的黑线即为搜索得到的频散曲线, 星号为初始搜索点。

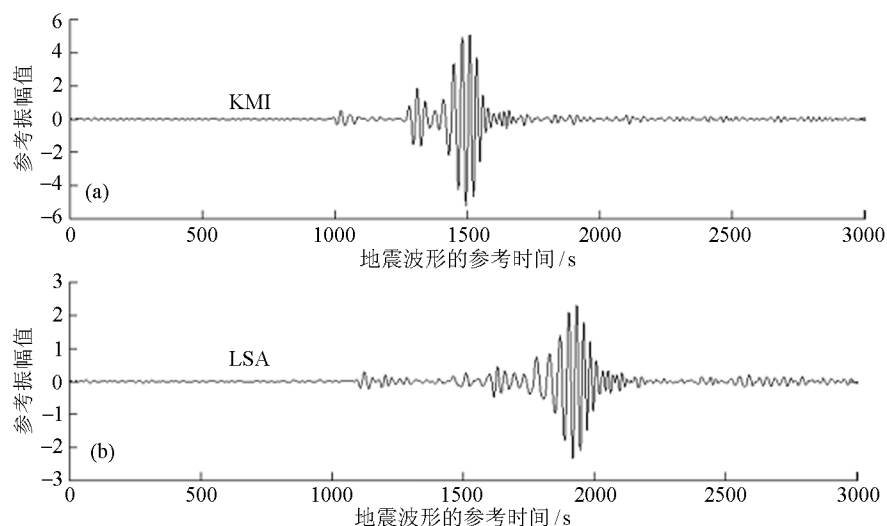


图 3 台站 KMI 和 LSA 的原始波形记录。

(a) KMI 原始波形记录; (b) LSA 原始波形记录

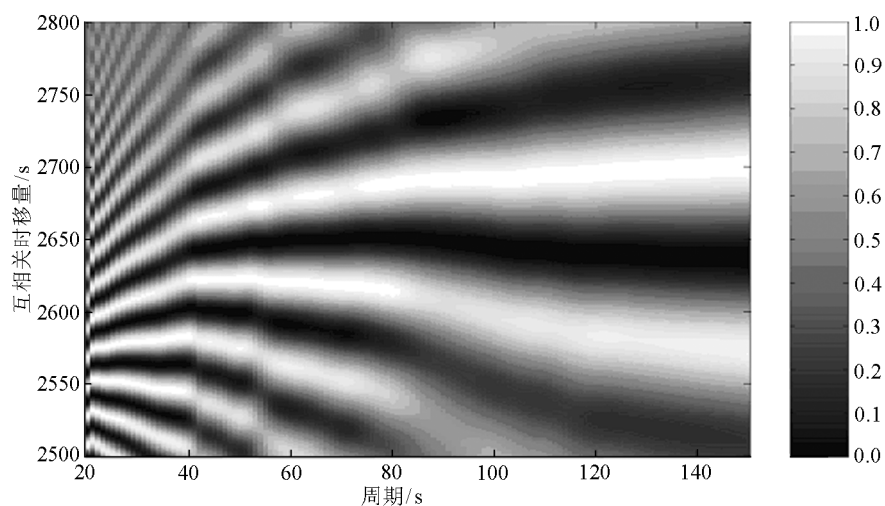


图 4 KMI~LSA 双台互相关振幅矩阵 $C(T, \tau)$ 图像 (只显示了互相关最为明显的区域)。

白色代表互相关明显, 灰黑色代表互相关不明显

第 2 个计算实例是 1995 年 10 月 1 日 15:57:16 发生在 (30.170° E, 38.100° N) 的地震事件, 震源深度为 33 km, 矩震级为 6.4 级。双台地震记录是位于大圆路径上的两个台站

BRVK 和 TLY 接收到的波形记录。与第一个例子的其他参数不变,经计算处理得到的振幅矩阵 $C^*(T,c)$ 的图像如图 6 所示,黑线为搜索得到的实际频散曲线。

第 3 个计算实例是 1996 年 2 月 7 日 7:57:21 发生在 $(120.900^\circ \text{E}, 1.100^\circ \text{N})$ 的地震事件,震源深度 33 km,矩震级为 5.6 级。双台记录为大圆路径上的两个台站 QIZ 和 WMQ 接受到的地震波形记录。与第一个例子的其他参数不变,经计算处理得到的振幅矩阵 $C^*(T,c)$ 的图像如图 7 所示,实际频散曲线为图中所示的黑线。

由图 5~图 7 我们可以发现,采用图像显示的技术频散曲线的位置很容易识别,所以初始搜索点的位置范围也易于确定,故而很快便可自动追踪得到整条频散曲线,追踪得到的频散值(周期和相速度)可以通过人机交互的方式自动保存到指定的数据文件中。

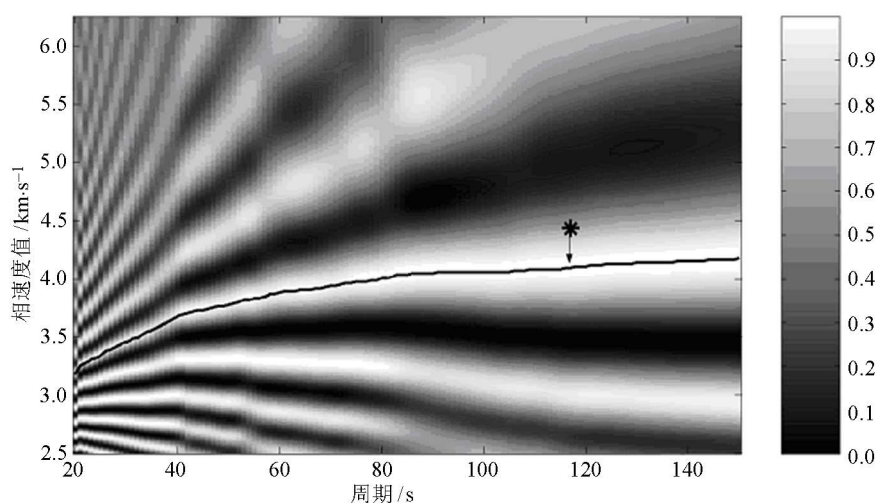


图 5 KMI-LSA 双台互相关插值变换振幅矩阵 $C^*(T,c)$ 图像。白色代表互相关明显,灰黑色代表互相关不明显;星号为初始搜索点,黑线为搜索得到的实际频散曲线

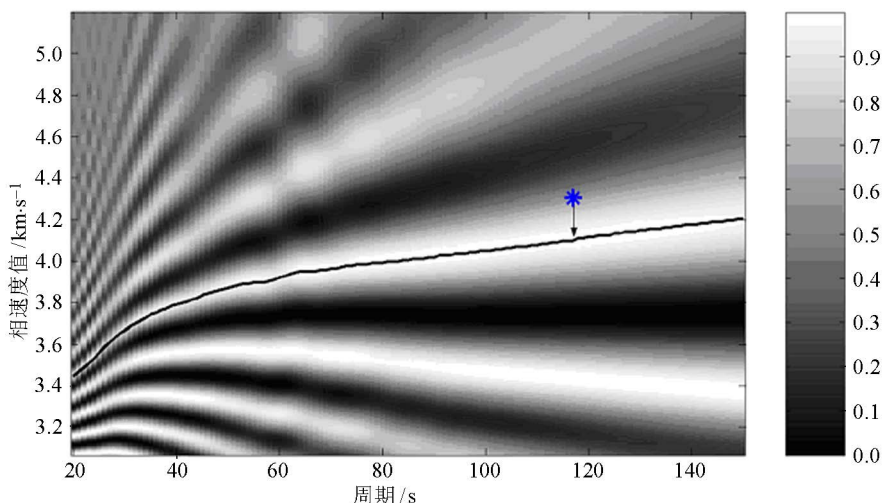


图 6 BRVK~TLY 双台互相关插值变换振幅矩阵 $C^*(T,c)$ 图像。星号为初始搜索点,黑线为搜索得到的实际频散曲线

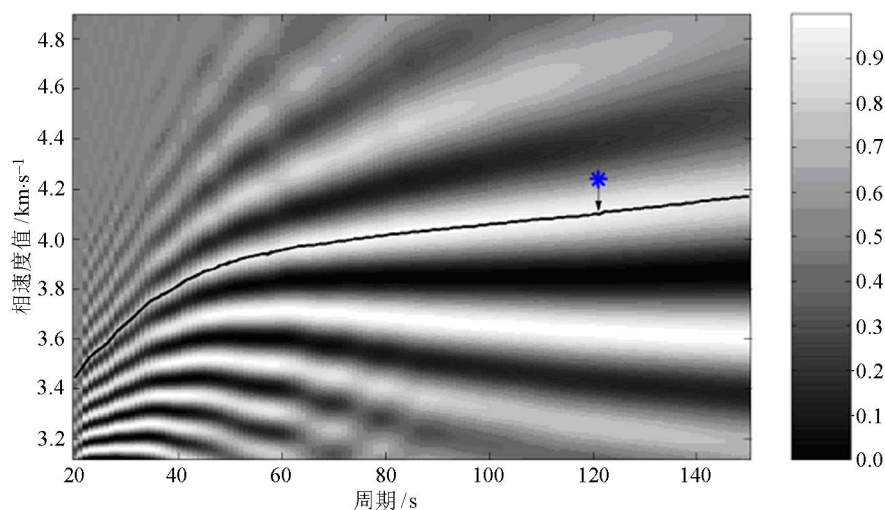


图 7 QIZ~WMQ 双台互相关插值变换振幅矩阵 $C^*(T, c)$ 图像。
星号为初始搜索点，黑线为搜索得到的实际频散曲线

4 结论

本文提出了一种基于图像分析方法的双台相速度频散曲线快速提取方法，编写了交互式处理软件，并给出了整条频散曲线的快速追踪算法，可以快速准确地提取出实际频散曲线。与传统的等值线描点方法相比，本方法提高了频散曲线提取的精度和速度，为处理大批量的双台地震数据资料提供快速可靠的软件基础。基于图像显示分析的方法可以更为清晰地展现出双台间的面波频散特征，对频散曲线的识别和分析提供了更为有效的研究工具。

参考文献

- 徐果明, 李光品等. 2000. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维结构 [J]. 地球物理学报, 43(3): 366~376
- Brisbourne A M and Stuart G W. 1998. Shear-wave velocity structure beneath north island, New Zealand, from Rayleigh-wave interstation phase velocities [J]. Geophys J Int, 133, 175~184
- Dziewonski A, Bloch S and Landisman M. 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals [J]. Bull Seism Soc Am, 71, 161~181
- Herrin E and Goforth T. 1977. Phase-matched filters: application to the study of Rayleigh waves [J]. Bull Seism Soc Am, 59, 427~444
- Hwang H J and Mitchel B J. 1986. Interstation surface wave analysis by frequency-domain wiener deconvolution and modal isolation [J]. Bull Seism Soc Am, 76, 847~864
- James N Brune, John E Nafe, Jack E Oliver. 1960. A simplified method for the analysis and synthesis of dispersed wave trains [J]. J Geophys Res, 65, 287~304
- Knopoff L S Mueller and Pilant W L. 1966. Structure of the crust and upper mantle in the Alps from the phase velocity of Rayleigh waves [J]. Bull Seism Soc Am, 56, 1 009~1 044
- Landisman M, Dziewonski A and Sato Y. 1969. Recent improvements in the analysis of surface wave observations [J]. Geophys J R A S, 17, 369~403
- Nakanishi I. 1979. Phase velocity and Q of mantle Rayleigh waves [J]. Geophys J, 65, 331~357
- Pilant W L and Knopoff L. 1964. Observation of multiple seismic events [J]. Bull Seism Soc Am, 54, 19~39

Taylor S and Toksoz N. 1982. Measurement of interstation phase and group velocities and Q using Wiener filtering [J]. Bull Seism Soc Am, 72, 73~91

A quick tracing method based on image analysis technique for the determination of dual stations phase velocities dispersion curve of surface wave

Yao Huajian, Xu Guoming, Xiao Xiang and Zhu Liangbao

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract

The cross-correlation of the dual stations waveform is a routine method for determining phase velocities dispersion curve of surface wave. Traditionally, the dispersion curve is delineated by hand on the contour map of cross-correlation amplitude matrix. Its precision and efficiency is very low. In this article, we propose a quick tracing method based on image analysis technique for the determination of the dispersion curve. We wrote interactive GUI software with Matlab. We adopt that the image displays the cross-correlation amplitude matrix. Base on it, we can be easy to identify the dispersion curve correctly. The technique provides an algorithm of the quick tracing entire curve and may pick up the entire dispersion curve quickly and precisely on the image of the cross-correlation amplitude matrix, at same time, the dispersion datum are saved in the file automatically. The processing software advances the precise and efficient for the picking up the dispersion curve of the dual stations, and provides a solid basis for the great deal processing the seismic datum. The image analysis method may clearly display the character of surface wave dispersion for the dual stations and provides an efficient approach to identify and analysis dispersion curve.

Key words: surface wave, dual stations, phase velocities dispersion curve, image analysis