

利用多重滤波方法提取面波频散曲线

周青云^{1,2}, 何永峰², 靳平², 廖桂生¹

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:多重滤波方法已被证明在分析面波的频散特性时是一种有效而快速的方法。本文用单个台站的单次地震事件记录,应用MFT(Multiple Filter Technique)方法提取了内华达地区的面波频散曲线并分析了其特征,认为其具有大陆基振型瑞利波频散曲线的典型特征。还利用广义反透射系数法快速计算了瑞利面波频散曲线,尤其是基阶瑞利波相速度及群速度频散曲线;并且在由振型叠加方法合成的理论地震图的基础上,通过比较理论频散曲线和MFT方法得到的频散曲线,研究了多重滤波的可靠性。

关键词:瑞利波;多重滤波;群速度;频散曲线

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)01-0046-05

Using MFT Obtain Rayleigh-wave dispersion curve

ZHOU Qing-yun^{1,2}, HE Yong-feng², JING Ping², LIAO Gui-sheng¹

(1. Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. North West Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Multiple filter analysis method (MFT) has been proved efficient for computing the dispersion curve of surface wave. In the article, with the data of earthquake event in Nevada area recorded by single station, MFT is used to derive the dispersion curve of Nevada area, and its characteristic are deeply analyzed. The result shows that the dispersion curves in Nevada area own the character of the dispersion curves of the typical mainland fundamental Rayleigh mode. Furthermore, theoretical dispersion curve of Rayleigh wave is calculated by generalized reflection-transmission method, and the phase velocity curve and group velocity curve of the fundamental Rayleigh mode are compared with that derived from the synthetic seismogram calculated by the modal summation method with MFT. Two results coincide better in the interested frequency range, showing MFT is reliable.

Key words: Rayleigh wave; MFT (Multiple Filter Technique); Group velocity; Dispersion curve

0 引言

面波在地震记录中,尤其在远距离的浅震记录中是特别显著的长周期信号,面波检测及基于面波信号幅值的面波震级的测量对于地震事件识别有非常重要的意义。但是和体波信号不同的是,面波信号具有明显的频散特性,其频散曲线(即相速度或群速度与信号周期的关系曲线)主要和地下介质的速度结构有关。由于频散的存在,随传播距离的增大面波信号的能量被弥散到越来越大的时间窗口中,从而降低了信号的能量密度及信噪比,进而造成

低震级时面波信号检测及面波震级测量的困难。一种被称作相位匹配滤波器的信号处理方法^[1]可以用来解决这一问题。该方法的思想是用频散曲线来“压缩”面波信号,即将包含面波信号的地震和频散因子作反褶积,从而达到提高面波信号信噪比的目的。为实现这一方法,可以从特定介质模型出发计算出特定路径的面波频散曲线,或是从较大地震的面波记录提取特定路径的面波频散曲线。本文利用多重滤波方法来提取美国内华达地区的瑞利面波的群速度曲线,并应用到对该地区中小地震事件的面

波信号分析中。

1 多重滤波方法

1.1 基本原理

事实上面波频散曲线的提取及反演也是研究地球内部构造的重要手段^[2]。对于老式的模拟地震图,提取面波频散曲线通常的方法是峰谷分析方法^[3]。在数字记录的地震图中对于频散曲线的提取有两种常用的方法:双台法^[3]和单台法^[3]。双台法要求有两个地震台站且震中在同一个大圆上。但是在实际情况中有时很难满足这样的条件。单台法克服了双台法苛刻的条件,被广泛应用在频散曲线的提取中。本文的多重滤波方法就是单台法中的一种。Dziewonski et al.^[4]提出了多重滤波方法来确定频散面波的群速度,已被证明在分析面波的频散特性时是一种有效而快速的方法。

多重滤波方法的基本原理很简单:对原始地震图在频率域用中心频率为 ω_0 的高斯无相移带通滤波器进行滤波:

$$H_n(\omega) = \begin{cases} 0 & \omega < \omega_{l,n} \\ \exp\left[-\alpha\left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2\right] & \omega_{l,n} \leq \omega \leq \omega_{u,n} \\ 0 & \omega > \omega_{u,n} \end{cases}$$

其中 α 取50.3; ω_n 为中心频率; $\omega_{l,n}$ 为中心频率 ω_n 的下限频率; $\omega_{u,n}$ 为中心频率的上限频率。

用以上滤波器滤除掉通带以外的所有分量,再用傅里叶反变换回到时间域,得到的最大振幅对应的时间,就认为是以 ω_0 为中心频率的群速度波包的到达时间。

1.2 理论验证

为了分析多重滤波方法的可靠性,需要把滤波得到的频散曲线与真实的频散曲线进行比较。借合成理论地震图能够得到一条理论的频散曲线,就可以在一个已知的模型基础上进行对比分析。选取适合于内华达地区的 Basin & Range 模型(图1、图2),是一个典型的含有地盾的速度模型。图3为利用面波激发理论振型叠加后得到的瑞利面波理论地震图,可以看到明显的频散特征。理论地震图计算的有关参数如下:面波理论地震图,共取 $m = 10^{12}$ 点,时间窗 $T = 200$ s,震中距 $D = 800$ km,频率范围 $f: 0.01 - 2.0$ Hz,震源形式为爆炸源。从图2可以看出内华达速度模型下不同振型(尤其是占优势成分的基阶和次高阶振型)之间的相速度之差很大,导致频散特征非常显著。图4为利用广义反透射系

数法快速计算得到的瑞利面波理论频散曲线。

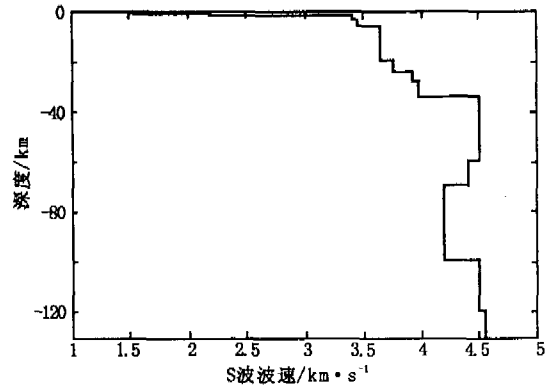


图1 内华达地区速度模型

Fig.1 Velocity model of Nevada area.

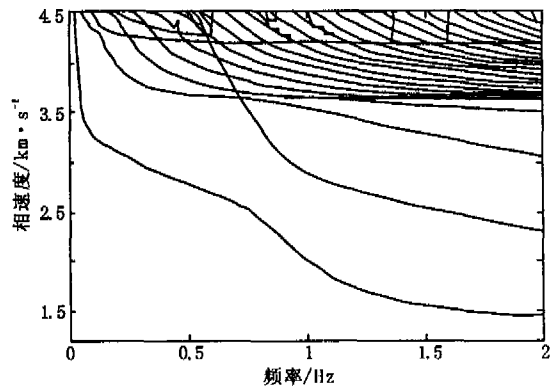


图2 内华达地区速度模型相速度频散曲线

Fig.2 The phase velocity dispersion curve from Nevada's velocity model.

我们利用多重滤波方法提取了上面模型下基阶面波群速度曲线,并与利用广义反透射系数法快速计算瑞利面波频散曲线方法得到的理论结果进行对比(图5),结果吻合得较好,说明多重滤波方法是正确的。需要注意的是,当周期较大时(频率较低时)多重滤波方法得到的结果误差有偏大的趋势,这也是该方法缺点之一。本文分析的结果表明在10~50 s范围内多重滤波方法是比较可靠的;而在提取一些极远震事件面波频散曲线时获得的结果不准确。

2 计算实例

2.1 具体步骤

- (1) 选定包含了所要提取的频散信息的时间段的地震记录为 $f(t)$;
- (2) 对所选数据进行去倾向,去掉零点漂移;
- (3) 由于所要研究的面波数据不需要很高的采样率,对地震数据重新进行采样,采样率为每秒一个点;

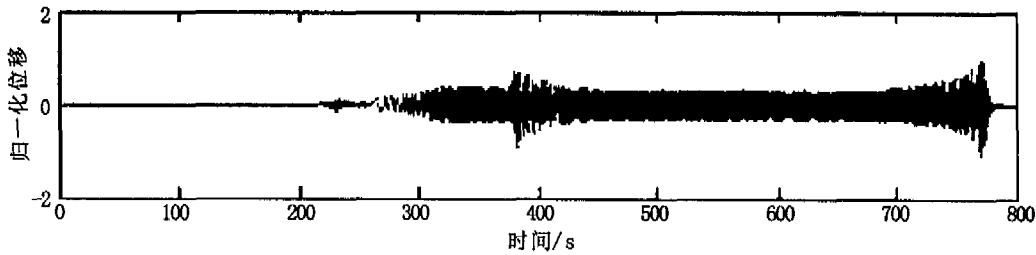


图3 内华达地区速度模型下振型叠加得到的瑞利面波

Fig. 3 The Rayleigh wave from the fundamental Rayleigh model in Nevada area.

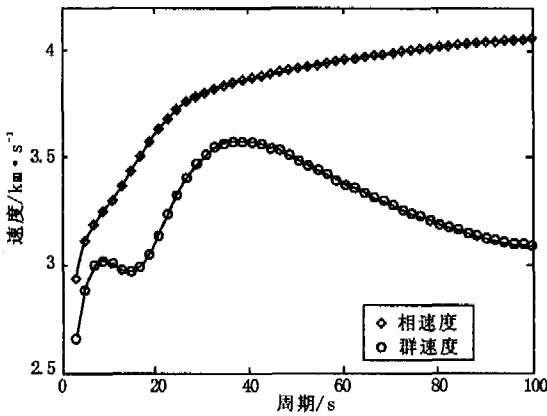


图4 基阶瑞利波相速度频散和群速度频散曲线

Fig. 4 The phase velocity and group velocity dispersion curves of the fundamental Rayleigh model in Nevada area.

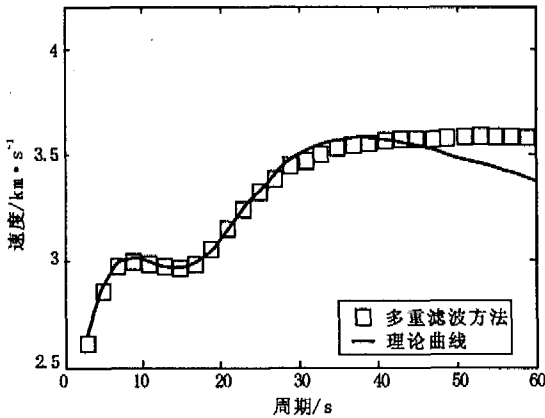


图5 理论基阶瑞利波群速度曲线与多重滤波方法的对比

Fig. 5 Comparing between the group velocity curve of fundamental Rayleigh model and the curve of MFT.

(4) 为了保证频率域采样率远远小于高斯带通滤波器的带宽,在所选定的地震记录时间段后补零,取时间窗口为5 000 s;

(5) 对地震记录 $f(t)$ 进行傅里叶变化为 $F(\omega)$,并去掉相应记录通道的仪器响应;

(6) 频率域的数字信号 $F(\omega)$ 与高斯带通滤波器 $H(\omega)$ 相乘,滤去带通以外的频率分量;

(7) 将滤波后的数字信号用傅里叶反变化转换到时域,对其进行希尔伯特变化并求出变化后的幅值包络,其最大幅值对应的时间被认为是该中心频率的群速度波包的到达时间。

2.2 在内华达地区的应用

本文利用得到的内华达地区面波频散曲线,分析了从1986年到1987年发生在内华达地区的5次核爆和1999年发生在该地区的一次天然地震事件,事件参数如表1所示。文中选用了SA RSCP (Regional Seismic Test Network) 台网、美国和加拿大的部分台站所记录的数据,各个台站到内华达核试验场区的震中距范围为 8° 到 32° ,表2为这些台站的有关参数。分析了这些台站上垂向长周期记录中的面波数据,采样率为每秒1个点。如图6所示,这些台站上的垂向分量记录的面波波形均很清晰。

表1 内华达地区事件列表

日期	时间	纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	深度/km	m_b	类型
1986-10-16	19:25:00.1	37.2202	-116.4616	0.00	5.60	爆炸
1986-06-05	15:04:00.1	37.0983	-116.0155	0.00	5.40	爆炸
1986-11-14	16:00:00.1	37.1004	-116.0481	0.00	5.80	爆炸
1986-07-17	21:00:00.1	37.2787	-116.3556	0.00	5.70	爆炸
1987-08-13	14:00:00.1	37.0610	-116.0453	0.00	5.90	爆炸
1999-08-01	16:06:24.0	37.3720	-117.0830	18.4	5.60	地震

表2 台站列表

台站	台网	国家	纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	高程/km
RSSD	IU	USA	44.1200	-104.0360	2.060
GAC		Canada	45.7033	-75.4783	0.062
RSNT	RS	Canada	62.4797	-114.5917	-0.050
RSON	RS	Canada	50.8589	-93.7022	0.221
ANMO	IU	USA	34.9462	-106.4567	1.840
BAR	CI	USA	32.6800	-116.672	0.548
HKT	IU	USA	29.9618	-95.8384	-0.413

利用MFT方法得到的内华达至上述各个台站的路径平均群速度曲线如图7和图8所示。本文所选台站分布于北美洲大陆,地质构造比较复杂。北美洲大陆的地壳厚度比IASPEI-91^[8]所确定的地壳厚度要厚5~6 km,地壳速度要高于IASPEI-91所确定的地壳速度。西部为属于科迪勒拉山系北段

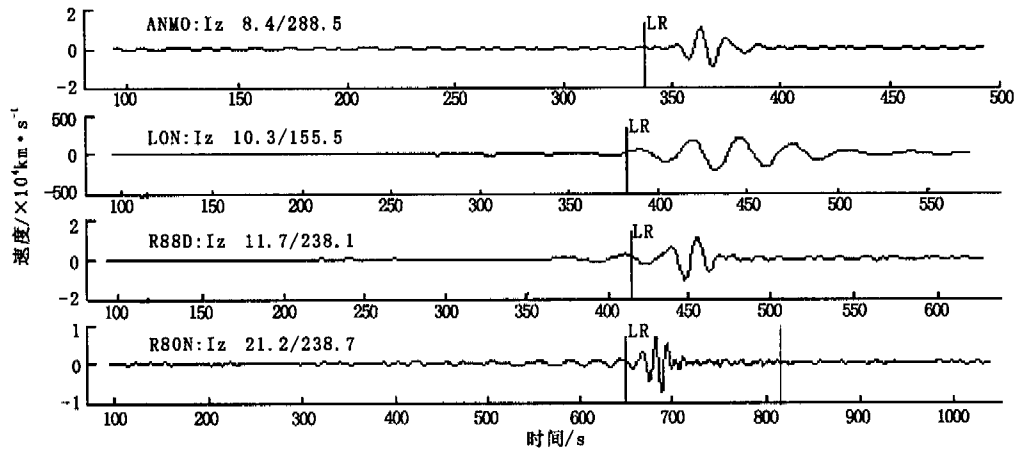


图6 不同台站长周期垂向分量的(瑞利波)面波记录

Fig. 6 The long-period vertical components of Rayleigh wave recorded at different stations.

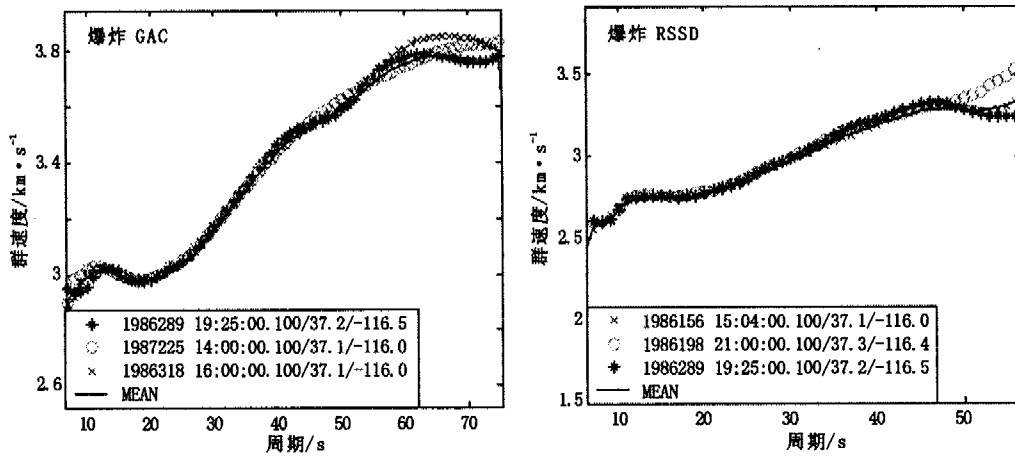


图7 内华达地区瑞利波频散曲线(GAC台站、RSSD台站)

Fig. 7 Dispersion curves of Rayleigh wave in Nevada area(GAC, RSSD stations).

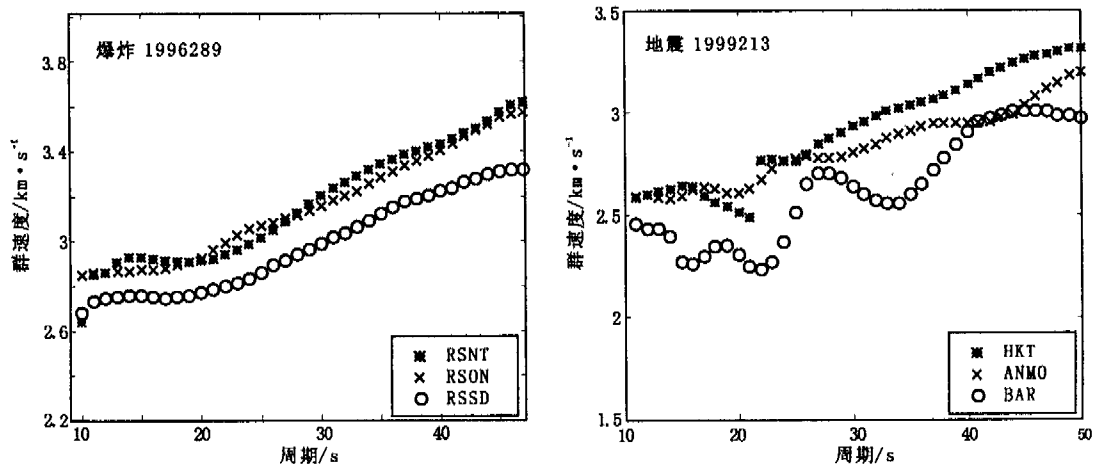


图8 内华达地区核爆事件和天然地震事件瑞利波频散曲线

Fig. 8 Dispersion curves of Rayleigh wave for explosion and earthquake in Nevada area.

的落基山脉,P波地幔速度要低于IASPEI-91所确定的地幔速度,并且在地幔深度70~130 km范围内存在P波低速层^[8];中部是较为稳定的科罗拉多地台,地壳厚度在37~48 km之间,P波地幔速度随深度增加而稳定增加,平均高于IASPEI-91所确定的P波地幔速度约0.2 km/s;东部在圣劳伦斯河谷以北为拉布拉多高原,以南为阿巴拉契亚山脉,P波地幔速度随深度增加而稳定增加,高于IASPEI-91所确定的地幔速度,但低于北美洲中部的平均地幔速度。内华达试验场位于中部盆地的南部,发生的事件沿不同的路径到达所选的各个台站,面波的传播经历了不同的地质结构,因此面波频散曲线差异较大,但总的趋势与大陆瑞利波频散曲线一致。当震中距为数百公里时,很容易接收到周期为6~10 s的面波,它们的能量主要限制在沉积岩层中,可以用它求得沉积岩层的厚度和速度;震中距超过一千公里时,很容易接收周期为数十秒左右的面波,它们的能量主要限制在地壳中。周期愈大的面波其波长愈大,因此穿透的深度愈大。在本文中我们只考虑了垂向的瑞利波分量。在图7中可以看出,基振型的频散曲线在周期20 s附近有一个极小点,它的能量很强,称为埃利(Airy)震相^[1],左边倒频散和右边正频散的波在此汇合。同时还可以看出对于发生在同一地区的不同事件在同一台站上的频散曲线总的趋势非常相似,尤其是在周期10 s到50 s阶段几乎完全一致,这也证明了对于同一类型的事件面波频散曲线的提取只与波的传播路径有关,与震源无关这一结论。图8对比了爆炸和地震获得的频散曲线。从图中可以看出,RSNT和RSON两个台站的群速度明显高于RSSD台站,这是由于RSNT和RSON两个台站位于较稳定的地盾部分,面波速度衰减较慢,而RSSD台站位于山区部分,其地质活动较频繁,面波速度衰减较快。同时还可以看出BAR台站上获得的频散曲线变化起伏较大,这是由于地震的震源比核爆要深,在震中距较小的情况下(BAR台站的震中距为4.7°)面波发育不明显,此时体波对最后的结果影响很大。随着震中距的增加,记录的面波周期增大,如ANMO、HKT(震中距分别是8.9°和19.1°)台站上获得的频散曲线在长周期部分体波成分能量减小,因此对多重滤波最后结果影响不大。

3 小结

总的来说,用多重滤波方法提取内华达地区瑞利波频散曲线是有效的。通过分析得到:(1)在提取内华达地区瑞利波频散曲线时采用长周期垂向分量记录的数据可以得到较理想的结果。因为在长周期部分体波成分一般能量较小,对多重滤波的结果影响不大。(2)本方法对短周期分量(0~10 s)不是很有效,在短周期部分频散曲线容易出现奇异值,因为瑞利波的主要能量集中在0.01~0.1 Hz范围内,在大于0.1 Hz的频率范围内主要集中的是体波能量;(3)在单个台站上获得的内华达地区不同事件面波频散曲线的一致性很好,这也证明了频散曲线只与传播路径有关,而与震源无关这一结论;(4)用多重滤波方法获得的内华达地区的瑞利波频散曲线具有大陆基振型瑞利波频散曲线的典型特征,随着周期的增大,群速度是递增的,即为正频散,并且在周期20 s附近出现埃利(Airy)震相。

[参考文献]

- [1] Herrin E, Goforth. Phase - Matched Filters: Application To The Study of Rayleigh Waves [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1977, 67 (5): 1259 - 1275.
- [2] Sayil N, I Osmansahin. Investigation of Crust and Upper - Mantle Structure in the Black Sea with Group-Velocity data [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90(1): 870 - 875.
- [3] 曾融生. 固体地球物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] Dziewonski A, S Bloch, M Landisman. A Technique For the Transient Seismic Signals [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1969, 59(1): 427 - 444.
- [5] Mitchell B. Radiation and Attenuation Of Rayleigh Waves From the Southeastern Missouri Earthquake Of October 21, 1965 [J]. J. Geophys. Res., 1973, 78(5): 886 - 899.
- [6] Herrmann R B. Some Aspects Of Band - pass Filtering Of Surface Waves [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1973, 63: 663 - 671.
- [7] Cakir O, M Erduran. Effect Of Earth Structure And Source Time Function On Inversion Of Single - Station Regional Surface Waves For Rupture Mechanism And Focal Depth [J]. Journal of the Balkan Geophysical Society. 2000, 2: 20 - 36.
- [8] Ryaboy V Douglas, R Baumgardt, Petr Firbas, et al. Application of 3-D Crustal and Upper Mantle Velocity Model of North America for Location of Regional Seismic Events [J]. Pure appl. Geophys., 2001, 158: 79 - 103.