

利用面波测定台间衰减系数*

胡家富, 段永康, 胡毅力

(云南大学地球科学系, 云南 昆明 650091)

摘要:使用相匹配滤波技术提取基阶面波振型的相位, 然后再利用时变滤波进行振幅谱校正, 以此分离出基阶振型面波信号. 对合成面波理论地震图的处理结果表明, 该方法可精确地从含高阶(最高阶数为5)的综合地震图中分离出基阶面波, 与利用同一模型合成的基阶面波相比, 分离出的基阶面波的振幅谱畸变很小. 根据中国数字化地震台网(CDSN)记录的长周期面波资料, 对与震源位于同一大圆弧上的北京、海拉尔台观测的瑞雷波进行处理, 分离出基阶振型信号, 然后利用两台的基阶振型信号进行反褶积得到台间格林函数. 由格林函数计算得到台间周期为13~142 s的面波衰减系数和群速度, 所得结果也较为平稳.

主题词: 面波; 群速度; 衰减系数

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(1999)02-0172-06

0 引言

地震面波带来了面波路径所经过的介质的信息, 这些信息是研究地下介质特征的重要依据. 频散和衰减是面波的两个基本特征, 分析面波的频散和衰减信息是研究地下介质结构的有效方法. 地震学家试图测量群到时、相位及振幅, 因为这些量对于研究地壳及上地幔结构、震源机制及地球非弹性是很重要的. 然而, 利用面波反演都要对问题进行参数化, 此外还要明确群速度、相速度所能揭示的结构. 事实上, 仅反演相速度会产生非唯一的解, 仅反演群速度非唯一性更加突出, 这主要是由于相速度与群速度之间的微分关系所致. 尽管二者并不是完全独立的, 但它们对问题的敏感性稍有差异. 为了增加解的分辨率, 可以把它们作为独立量同时测量. 另一方面, 由于地球的非弹性, 吸收信息也应该与相、群速度同时进行反演^[1]. 众所周知, 精确测定面波的衰减系数是比较困难的, 这主要是因为台站记录到的面波(无论是天然地震还是人工地震产生的)都是被污染过的, 这些污染包括随机噪声、地面脉动、时间间隔很短的两个地震的相互迭加、不同面波类型的相互迭加、艾利震相两旁的正频散与反频散的干扰、以及不同阶的面波成份的相互干扰等.

Dziewonski 利用多重滤波^[2]技术(Multiple Filter Technique, MFT)对地震记录作窄带通滤波后测定其频散, 随后又提出通过测定观测信号的残差^[3]来提高频散的精度. 在过去的几年里, Feng 等人发展了这些技术, 提出了适配滤波频时分析^[4](Matched Filter Frequency-Time

收稿日期: 1998-08-17

* 云南省自然科学基金资助项目.

第一作者简介: 胡家富, 男, 1965年生, 副教授, 从事地球物理学教学与研究工作.

Analysis, MF-FTAN)技术,该方法能精确测量群到时,但对振幅谱的估计没有多少改进.传统测量面波衰减系数的方法^[5]是使用位于同一大圆弧上的两台站的振幅比,由于高阶振型和噪声的存在,这就不可避免地会引起所得结果的波动和离散,甚至在个别周期还会出现负数,这就给理论解释带来了困难.即使是利用 MFT 处理后得到其“单一”频率的振幅,也不可能杜绝这一现象,这主要因为滤波器总是有一定的带宽,它不能完全消除高阶振型的影响.本文使用相匹配滤波^[6](Phase-Matched Filter, PMF)技术来消除高阶振型的影响,同时以时变滤波^[7](Time-Variable Filter, TVF)进行振幅谱校正,最后分离出基阶振型信号.利用位于同一大圆弧上的两个台站所记录到的基阶振型信号进行反褶积求得台间格林函数,最后得到台间面波衰减系数.通过对格林函数进行 MF-FTAN 处理来测量台间群速度频散.

1 理论与方法

1.1 基本理论

在震源距离为 x 处观测到的面波记录 $f(x, t)$ 可认为是一系列振型迭加的结果,并记为

$$f(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m A_m(x, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1)$$

其中

$$A_m(x, \omega) = I(\omega) S_m(\omega) \frac{R_m(\omega) e^{-\gamma_m(\omega)x}}{\sqrt{x}} e^{-iK_m(\omega)x} \quad (2)$$

是第 m 阶振型的傅氏谱,这里

$$\gamma_m(\omega) = \frac{\omega}{2U_m(\omega)Q_m(\omega)} \quad (3)$$

在上面的(1)~(3)式中, $I(\omega)$ 是仪器的响应, $S_m(\omega)$ 是第 m 阶振型的震源谱, $R_m(\omega)$ 是第 m 阶振型的路径响应, $\gamma_m(\omega)$ 是第 m 阶振型的衰减系数, $K_m(\omega)$ 是第 m 阶振型的波数; $U_m(\omega)$ 和 $Q_m(\omega)$ 分别为第 m 阶振型在频率为 ω 时的群速度和品质因子.

实际观测到的面波记录是系列振型迭加的结果.当震中距较小时,各种振型迭加在一起,不易辨认;只有当震中距足够大时,各种振型之间的速度差可使得基阶振型与高阶振型在时域内分离开,这一点早已被观测所证实.相匹配滤波通过消除所要分离的振型的相位,在时域内,压缩所感兴趣的特定振型,产生能量关于零延迟对称的零相位信号. Herrin 定义这个时域里的零相位信号为“伪自相关函数”(pseudo-autocorrelation function, PAF),假设地震图由简正振型迭加而成,则时域 PAF 为

$$\Psi_j(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{e^{iK_j^* x}\} \sum_m A_m e^{i(\omega t - K_m x)} d\omega \quad (4)$$

这里 A_m , K_m , K_j^* 分别是频率的函数,假定震源和仪器响应均已从 A_m 中消除, K_j^* 是所感兴趣的第 j 个振型的波数频散, $K_j^* x$ 表示第 j 个振型的相位,它由第 j 个振型的群到时积分得到,故括号内的项就表示相匹配滤波器.上式可以写为

$$\Psi_j(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_j e^{i(K_j^* - K_j)x} e^{i\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m \neq j} A_m e^{i(\omega t - K_m x)} d\omega \quad (5)$$

如果 $K_j^* \simeq K_j$,则上式中第一项积分逼近零相位而且集中于零延迟.假若所感兴趣的振型与其它振型是能区分开来的,则在时域里加一个具有零相位的窗 $W(t)$ 即可消除其它振型和噪声的影响,该窗为

$$W(t)\Psi_j(t)=W(t)\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}A_je^{i\delta Kx}e^{i\omega t}d\omega$$

(6)

这里 $\delta K=K_j^*-K_j$, 对时域加窗的 PAF 作傅氏变换就可得到所要分离的振型的振幅谱

$$A_je^{i\delta Kx}=\int_{-\infty}^{\infty}W(t)\Psi_j(t)e^{-i\omega t}d\omega$$

(7)

残差相位 δKx 被用来获得下一个新的波数频散的估计值

$$K_j^*=K_j^*-\delta K$$

为了得到精确的波数谱估计, 采用一个迭代过程, 直到在所感兴趣的带宽内, δK 逼近零为止. 然而, 由于加窗的影响, 不可避免地会使谱发生畸变. 为消除加窗的影响, 利用时变滤波的方法, 进行谱校正. 经校正后的振幅谱与最终迭代所得的相位 K_j^*x 相结合即可得到所要分离的振型的傅氏谱, 再经过逆傅氏变换便得到所要分离的振型的时域信号.

1.2 基本方法

分离出位于同一大圆弧上的两台站记录的基阶振型信号, 在频率域里作它们的自相关和互相关函数, 在时域里加以不同宽度的窗来消除相关函数中的噪声, 这样, 在频域里可获得较为平滑的谱, 然后取它们二者的比即为格林函数的谱^[8]. 对时域的格林函数进行 MF-FTAN 处理则可求得台间群速度, 台间介质的衰减系数由下式计算

$$\gamma(\omega)=-\frac{\ln(|H(\omega)|\sqrt{\sin\Delta_2/\sin\Delta_1})}{\Delta d}$$

(8)

这里, $H(\omega)$ 是格林函数的振幅谱, Δ_1 和 Δ_2 分别是两台站的震中距(单位为度), Δd 是两台站震中距之差(单位为 km).

2 数字实验

为了检验用上述方法分离基阶振型面波的效果, 我们用表 1 所列出的模型来合成震中距为 2 000 km 处的瑞雷波综合地震图, 其最高振型为 5 阶, 地动信号的位移如图 1 所示. 从该图可明显看出高阶振型的存在. 图 2 是综合地震图的振幅谱, 从图 2 中可看出高阶振型叠加在基阶振型之上, 而且变化较快.

表 1 地层模型参数

层号	h_i/km	$\alpha_i/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\beta_i/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_i/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	10	5.6	3.3	2.8
2	20	6.0	3.8	3.0
3	20	7.6	4.5	3.2
4	30	7.8	4.7	3.3
5	40	8.0	4.8	3.4
6	∞	8.2	4.9	3.5

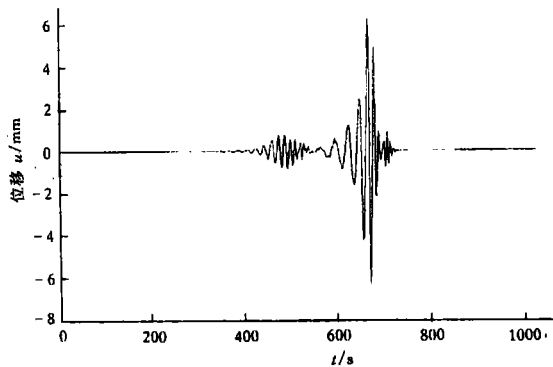


图 1 合成的面波综合地震图

Fig. 1 Synthetic seismogram of surface wave.

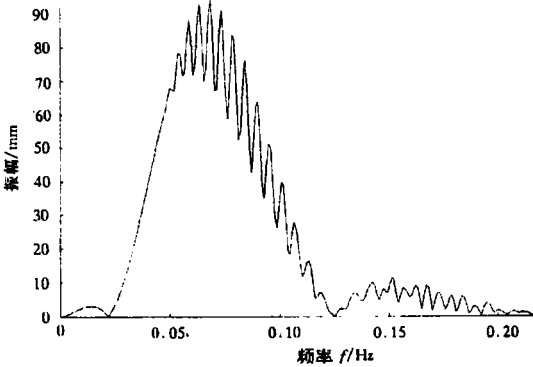


图 2 综合地震图的振幅谱

Fig. 2 Amplitude spectrum of synthetic seismogram.

为了从综合地震图中分离基阶振型, 首先进行 MFT 处理得到群延时, 然后对群延时进行积分得到相匹配滤波器, 与此同时用时变滤波进行振幅校正. 反复迭代直到在所感兴趣的带宽内 PAF 函数接近零相位, 由最终得到的波数计算相位, 最后分离出的基阶振型瑞雷面波如图 3 所示. 从图 1 和图 3 中可看出: 高阶面波已经明显不存在, 且基阶振型的形状基本不变, 更重要的是长周期面波没有被截断, 这是加窗所不能达到的. 图 4 是利用表 1 中的参数合成的基阶振型的振幅谱(虚线)和分离出的基阶振型的振幅谱(实线). 相比之下, 经过分离以后, 振幅谱的畸变很小, 这就为计算衰减系数提供了保障.

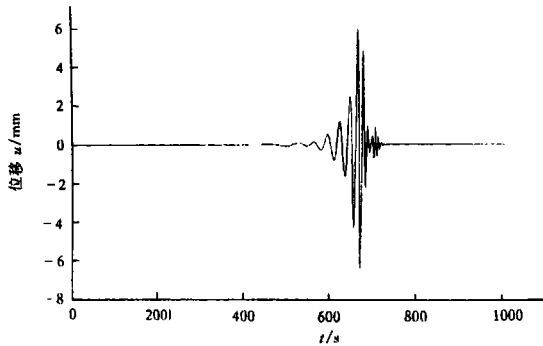


图 3 分离出的基阶面波地震图
Fig.3 The isolated fundamental mode waveform.

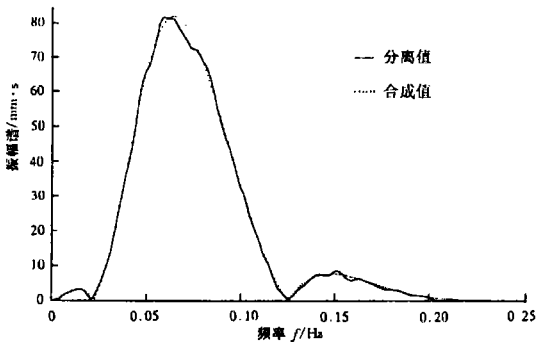


图 4 合成基阶振型与分离基阶振型的振幅谱
Fig.4 Amplitude spectrums of isolated and synthetic fundamental modes.

3 应用

在合成地震图试验中, 虽然该方法能准确地分离出基阶振型面波, 但在实际的地震信号记录中, 由于介质的复杂性和噪声的存在, 使得震相更加复杂. 图 5 和图 6 分别所示的波形是 CDSN 中的北京、海拉尔台记录到的长周期面波垂直分量, 采样间隔为 1s, 采样长度为 3 000 点. 该地震发生在 1990 年 1 月 5 日(GMT), 震中位置为 106.71°E, 8.47°S, 震级为 $M_S=6.2$. 表 2 是各台站位置及有关参数.

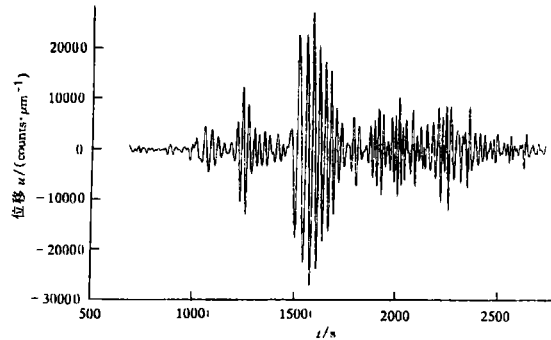


图 5 北京台记录的垂向分量
Fig.5 The vertical component recorded at Beijing station.

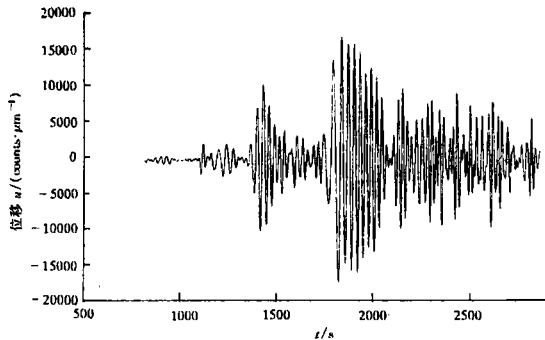


图 6 海拉尔台记录的垂向分量
Fig.6 The vertical component recorded at Hailaer station.

表 2 台站位置及有关参数

台站名称	台站位置	震中距 Δ/km	方位角(北编东)
北京	116.175°E, 47.040°N	5 471.25	9.58°
海拉尔	119.700°E, 49.258°N	6 532.84	9.89°

由于震中距较大,各震相已分离出来,由图5和图6可明显看出高阶振型的存在.为了得到较平稳的格林函数谱,首先,利用传递函数进行仪器校正,得到地面位移,再分别对位移信号进行MF-FTAN处理得到初始的群速度频散,由此得到相匹配滤波器的初始相位,经迭代处理分离得到两台记录的基阶振型信号.其次,为了消除几何扩散的影响,将两台的基阶信号校正到某一参考距离处(例如1000 km).最后,利用两台记录的基阶振型信号计算台间格林函数,对格林函数进行MF-FTAN处理得到的台间群速度频散如图7所示,面波衰减系数如图8所示.利用(3)式还可以得到台间介质的 Q 值.

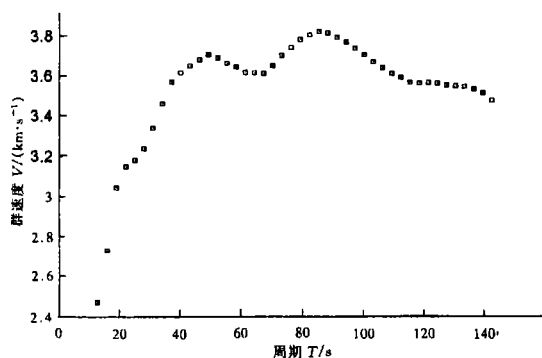


图7 台间基阶瑞雷波群速度

Fig. 7 The interstation group velocity from fundamental Rayleigh wave.

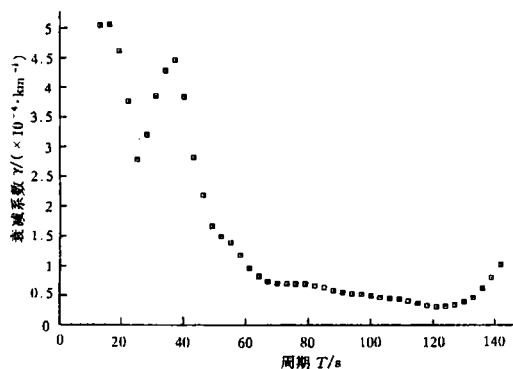


图8 台间基阶瑞雷波衰减系数

Fig. 8 The interstation attenuation coefficient from fundamental Rayleigh wave.

4 结果与讨论

本文使用相匹配滤波技术分离特定的振型,并利用时变滤波进行谱校正,以减小谱偏差.对合成的理论地震图的处理表明,分离出的基阶振型谱几乎与用同一模型合成的基阶振型谱完全一致,这是因为所使用的群到时是精确的,而且不存在其它噪声.对实际资料取得较为满意的结果,在13~142 s的周期范围内,每间隔3.0s测得一衰减系数,均未出现负值,克服了双台振幅比测量中的解释困难,并为研究地球非弹性问题提供了可靠的依据.而且所得结果也很平滑,只是在周期为20s附近出现了微小的波动,这是因为在20s附近频散及振幅谱激烈变化,给精确测量带来了一定的困难.另一方面,在实际的地震记录中存在相干噪声,群速度频散中必然有一定的误差,故PAF不易达到零相位,分离出的基阶振型不可避免地存在误差.而且,从理论上讲,用来消除噪声的窗都是有一定宽度的,当噪声信号与要分离的信号在时域相隔很近时,就不易得到满意的效果.尽管出现了一些小波动,但其结果比用双台振幅比方法所得结果平稳得多.

参考文献

- [1] Wiggins R A. The general linear inversion problem; implication of surface waves and free oscillations for earth structure[J]. Rev. Geophys. Space Phys., 1972, 10(1): 251~285.
- [2] Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. A technique for the analysis transient seismic signals[J]. Bull. Siesm. Soc. Am., 1969, 59(1): 427~444.
- [3] Dziewonski A, Mills J, Bloch S. Residual dispersion measurement—A new method surface-wave analysis[J]. Bull. Siesm.

Soc. Am., 1972, 62(1): 129~139.

- [4] Feng C C, Teng T L. An error analysis of frequency-time analysis[J]. Bull. Siesm. Soc. Am., 1982, 73(1): 143~155.
- [5] 何正勤, 叶太兰, 孙为国. 中朝准地台东部的地壳上地幔 Q_β 结构[J]. 地震学报, 1996, 18(1): 97~102.
- [6] Herrin E, Goforth T. Phase-matched filter: application to the study of Rayleigh waves analysis[J]. Bull. Siesm. Soc. Am., 1977, 67(5): 427~444.
- [7] Cara M. Filtering dispersed wavetrains[J]. Geophys. J., 1973, 33(1): 65~80.
- [8] Taylor S R, Toksoz M N. Measurement of interstation phase and group velocities and Q using Wiener filtering[J]. Bull. Siesm. Soc. Am., 1982, 72(1): 73~91.

MEASUREMENT OF INTERSTATION ATTENUATION COEFFICIENTS FROM SURFACE WAVE

HU Jia-fu, DUAN Yong-kang, HU Yi-li

(*Earth Science Department, Yunnan University, Kunming 650091, China*)

Abstract

A Phase-matched filter is applied to extract phase of fundamental surface wave, and then time-variable filter is used to correct amplitude spectrum in order to isolate fundamental mode signs. By processing of synthetic seismogram of surface wave, it is shown that the method can precisely isolate fundamental surface wave from higher synthetic seismogram including the fifth mode, and deformation of amplitude spectrum is very small comparing with spectrum of fundamental mode resulted from the same model. Based on long period surface wave recording of the Chinese Digital Seismological Network, the fundamental mode is isolated from Rayleigh wave recorded at Beijing and Hailaer stations which is positioned on the same great circle path with epicenter, the interstation Green's function is estimated from deconvolution of the fundamental mode signs of the two stations. The interstation group velocity and attenuation in a period of from 13 seconds to 140 seconds are calculated from the Green's function, moreover, the results are significantly more stable.

Key words: Surface wave; Group velocity; Attenuation coefficient