

蒋婵君, 王有学, 熊彬, 贲鹏, 徐金荣, 乃振龙. 2017. 利用小波变换提取面波群速度. 地震学报, 39(3): 356-366. doi: 10.11939/jass.2017.03.005.

Jiang C J, Wang Y X, Xiong B, Yun P, Xu J R, Nai Z L. 2017. Measurement of surface wave group velocity using wavelet transform. *Acta Seismologica Sinica*, 39(3): 356-366. doi:10.11939/jass.2017.03.005.

利用小波变换提取面波群速度^{*}

蒋婵君^{1,2)} 王有学^{1,2),†} 熊彬¹⁾
贲鹏¹⁾ 徐金荣¹⁾ 乃振龙¹⁾

1) 中国广西桂林 541006 桂林理工大学地球科学学院

2) 中国北京 100037 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室

摘要 选取了几种常见的小波母函数, 分别提取了同一理论下的面波数据的群速度, 并与理论群速度进行对比, 结果表明 Morlet 小波提取面波群速度的效果最好。此外, 将 Morlet 小波与常用的多重滤波提取群速度的结果进行了比较, 结果表明: ① 多重滤波法非常依赖高斯滤波系数 α 的取值, α 的取值应随面波周期的增大而减小; ② 在 α 取值得当的前提下, 在 20—35 s 周期范围内多重滤波法提取面波群速度的相对误差比 Morlet 小波小, 在周期大于 35 s 时, 两者相对误差相近; ③ 合适的 α 值的选取需在不同周期段耗费大量时间进行大量试验, 这说明多重滤波法不具备自适应性; 而采用小波变换分析短周期信号时, 时间窗变窄, 频率窗变长, 当分析长周期信号时, 时间窗变长, 频率窗变窄, 具有对信号的自适应性, 这是小波变换相比多重滤波法的最大优点。

关键词 面波 群速度 小波变换 Morlet 小波 多重滤波法

doi:10.11939/jass.2017.03.005 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Measurement of surface wave group velocity using wavelet transform

Jiang Chanjun^{1,2)} Wang Youxue^{1,2),†} Xiong Bin¹⁾
Yun Peng¹⁾ Xu Jinrong¹⁾ Nai Zhenlong¹⁾

1) College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guangxi Guilin 541006, China

2) State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Wavelet transform is proposed to measure surface wave group velocity in this paper. Several common mother wavelets are respectively used to calculate Rayleigh wave group velocities of the same synthetic seismograms, the results are compared with the theoretical group velocities. The comparison results indicate that Morlet wavelet is the most effective one in calculating group

* 基金项目 国家自然科学基金(41574039)、大陆构造与动力学国家重点实验室开放基金(K201505)和广西自然科学基金重点项目(2016GXNSFDA380014)共同资助。

收稿日期 2016-08-02 收到初稿, 2016-11-19 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: uxue.wang@glut.edu.cn



velocities. Furthermore, we compare Morlet wavelet transform with the most common used multiple filter technique in calculating group velocity, from which the following conclusions are drawn: ① multiple filter analysis method extremely depends on the value of Gaussain filter parameter α , and smaller value of α should be chosen during long period of surface wave; ② when the value of α is chosen adaptively, multiple filter analysis method is more accurate than Morlet wavelet transform in calculating group velocities when the period of surface wave is between 20 seconds and 35 seconds, while multiple filter analysis method has the similar accuracy with Morlet wavelet transform when the period of surface wave is over 35 seconds; ③ multiple filter analysis method will cost much more time to choose adaptive value of Gaussain filter parameter α for different periods without self-adaptivity to signals; however, wavelet transform can narrow the time window and lengthen the frequency window when analyzing short period signals and lengthen the time window and narrow the frequency window when analyzing long period signals with self-adaptivity to signals, which shows the outstanding advantage of wavelet transform over the multiple filter analysis method.

Key words: surface wave; group velocity; wavelet transform; Morlet wavelet; multiple filter technique

引言

地震面波层析成像是研究地壳、上地幔结构的有力工具。面波层析成像依赖于面波频散特征，其核心是提取高质量的面波群速度或者相速度。1969年，Landisman等提出了在时间域内进行的移动窗分析法(Landisman, 1969)，同年Dziewonski等(1969)提出了在频率域上进行的多重滤波法(multiple filter technique, 简写为 MFT)。如果选择高斯滤波器作为移动窗分析法的窗函数，那么移动窗分析法与多重滤波法是等价的。目前，多重滤波法是提取面波群速度最常用的方法(曹小林等, 1999; 何正勤等, 2001; 朱介寿等, 2002; 陈立等, 2012; 房立华等, 2013; 王敏玲等, 2015)。因其频时分辨率与高斯滤波系数的选择密切相关，因此，前人对高斯滤波系数的选择进行了大量的研究：Inston等(1971)提出了最佳带宽滤波；Levshin等(1972)给出了高斯滤波系数的经验选择；Cara(1973)提出了高斯滤波系数的最佳滤波方案；Nyman 和 Landisman(1977)提出了高斯滤波系数的均等显示方法；Herrmann 和 Ammon(2004)给出了不同震中距下高斯滤波系数的参考值；Kolínský(2004)给出了高斯滤波系数选择的经验公式；朱良保和熊安丽(2007)通过线性时间分辨方法来选择高斯滤波系数；陈浩朋等(2014)同时考虑高斯滤波系数随震中距和周期的变换，给出了不同震中距下各周期分段的高斯滤波系数参考值。

小波变换克服了多重滤波法中窗口大小不能自动随周期变化的缺点；在分析短周期信号时，其时间窗变窄，频率窗变长，当分析长周期信号时，其时间窗变长，频率窗变窄，具有对信号的自适应性。Wu等(2009)用Morlet小波提取双台相速度，并与传统的窄带通滤波互相关法进行了比较，结果表明Morlet小波效果更优，自此此后Morlet小波被应用于面波相速度的层析成像(潘佳铁等, 2011; 余大新等, 2016)。本文介绍了小波变换提取面波群速度的原理和步骤，采用Mexican Hat小波、Morlet小波、Daubechies小波和Symlets

小波提取同一理论下的面波数据的群速度，并分别与理论群速度进行对比，选取提取效果最好的 Morlet 小波作为小波母函数；同时，基于理论数据和实际数据，在前人对高斯滤波系数 α 取值研究的基础上，分别采用 3 种 α 值进行多重滤波，并分别与 Morlet 小波进行详细地对比。

1 基本原理

1.1 小波变换定义

令 $\psi(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 为平方可积的实数空间, R 为实数, t 为时间。其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$, ω 为角频率。当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足式(1)的条件时, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|^{-1}} d\omega < \infty, \quad (1)$$

称 $\psi(t)$ 为基本小波或小波母函数。将小波母函数 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移, 产生一组小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$, 即

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2)$$

式中, a 为尺度参数, b 为位置参数。

设 $f(t) \in L^2(R)$, 小波变换可定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

式中, $f(t)$ 为时间域信号, $W_f(a, b)$ 为小波系数, “*”为共轭运算。

1.2 利用小波变换提取面波群速度的基本步骤

利用小波变换提取面波群速度频散曲线的基本步骤为: ① 挑选高质量的面波数据 $f(t)$ 进行预处理, 包括去倾斜、去均值, 并进行带通滤波, 带宽为 0.008—0.2 Hz; ② 对面波数据进行重采样, 采样间隔为 $\Delta t=1$ s; ③ 将面波数据 $f(t)$ 进行希尔伯特变换, 构造解析信号 $z(t)$; ④ 对于某一周期 T_i , 计算当前周期 T_i 下的尺度参数 $a=f_0 T_i / \Delta t$ (其中 f_0 为小波母函数的中心频率), 将解析信号 $z(t)$ 代入式(3)进行小波变换, 得到小波变换系数 W_{T_i} , 其最大幅值对应的时间即为该周期 T_i 的群速度到达时间, 之后根据震中距将到时转换为群速度; ⑤ 重复步骤④, 直到求出所有待求周期的群速度值。从上述步骤可以看出, 当周期 T_i 减小时, 尺度参数 a 值变小, 小波函数的时间窗变窄, 而频率窗变长; 当周期 T_i 变大时, 尺度参数 a 值变大, 小波函数的时间窗变长, 而频率窗变窄, 具有对信号的自适应性。

2 小波母函数的选取

小波分析中使用到的小波母函数 $\psi(t)$ 不是唯一的, 且同一信号用不同的小波母函数分析会得到不同的结果。本文选取几种常见的小波母函数, 分别提取同一理论下面波数据的群速度, 并与理论群速度进行对比, 以此来选择最合适的小波母函数。

2.1 本文使用的小波函数

Mexican Hat 小波, 简称 Mexh 小波(图 1a), 为高斯(Gauss)函数的二阶导数, 即

$$\psi(t) = (1-t^2) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (4)$$

Morlet 小波是法国地球物理学家 Morlet 等(1982)在分析地震信号时提出, 其一般数学形式为

$$\psi(t) = \cos(2\pi f_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right), \quad (5)$$

式中, f_0 为小波母函数的中心频率, $f_0=0.8125$. Morlet 小波波形如图 1b 所示.

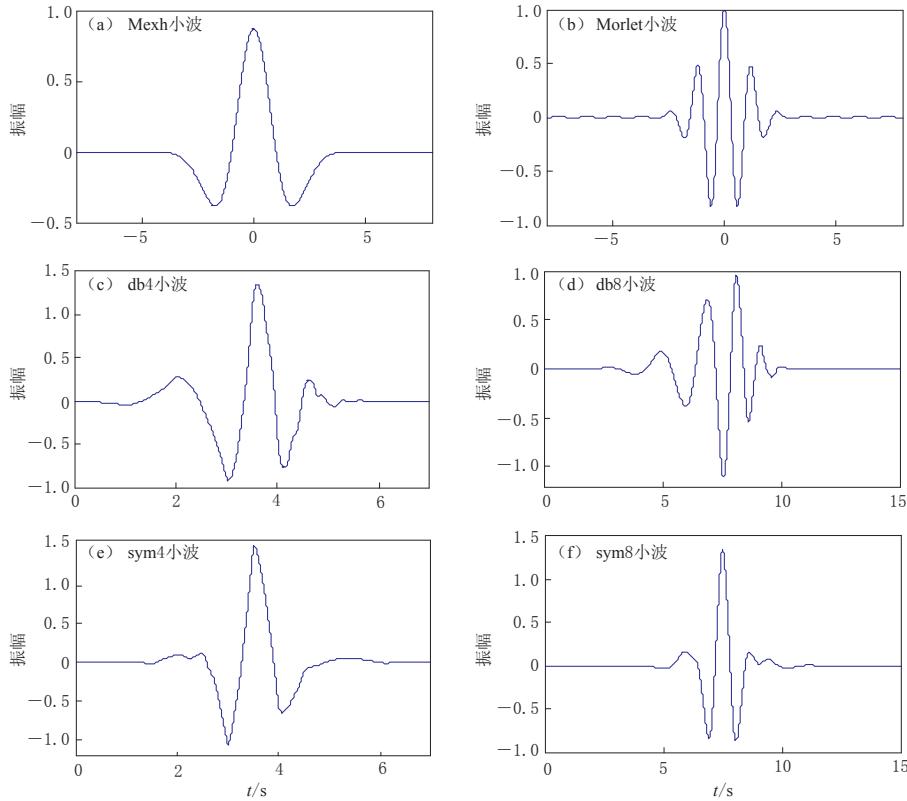


图 1 常见小波波形图

Fig. 1 Waveforms of some common wavelets

Daubechies 小波是由 Daubechies (1988)构造的, 简写为 $\text{db}N$, N 为小波阶数, 且 $N=1, 2, \dots, 10$. 当 $N=1$ 时, 便成为 Haar 小波. 除此外, 该小波没有明确的解析表达式. db4 小波和 db8 小波的波形分别如图 1c, d 所示.

Symlets 小波系也是由 Daubechies (1990)提出的, 简写为 $\text{sym}N$, 且 $N=2, 3, \dots, 8$. Symlets 小波系近似对称, 没有具体的表达式, 是对 Daubechies 小波函数的一种改进. sym4 小波和 sym8 小波的波形分别如图 1e, f 所示.

2.2 不同小波函数对比

利用 Herrmann 和 Ammon(2004)的程序包中的地震学程序, 采用模态叠加方法计算理论面波数据. 选择 AK135 模型(Kennett *et al*, 1995)作为地球速度结构模型; 地震走向为 0° , 滑动角为 0° , 倾角为 45° , 地震震级为 $M_W 6.0$, 震源深度为 20 km, 震中距为 3000 km, 台站方位角为 45° ; 数据采样间隔为 1 s, 模态叠加选择的模态个数为 5. 根据以上数据计算理论瑞雷面波数据的垂向分量, 结果如图 2 所示.

将理论面波数据进行希尔伯特变换, 构造解析信号, 分别采用上述几种常见的小波母函数提取理论面波数据的群速度, 并分别与理论群速度进行对比(图3). 结合不同小波母

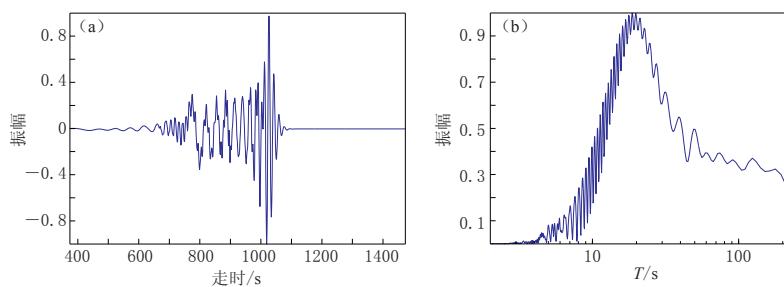


图 2 理论瑞雷面波垂向分量波形(a)和振幅谱(b)

Fig. 2 Vertical component synthetic seismogram of Rayleigh wave (a) and its amplitude spectra (b)

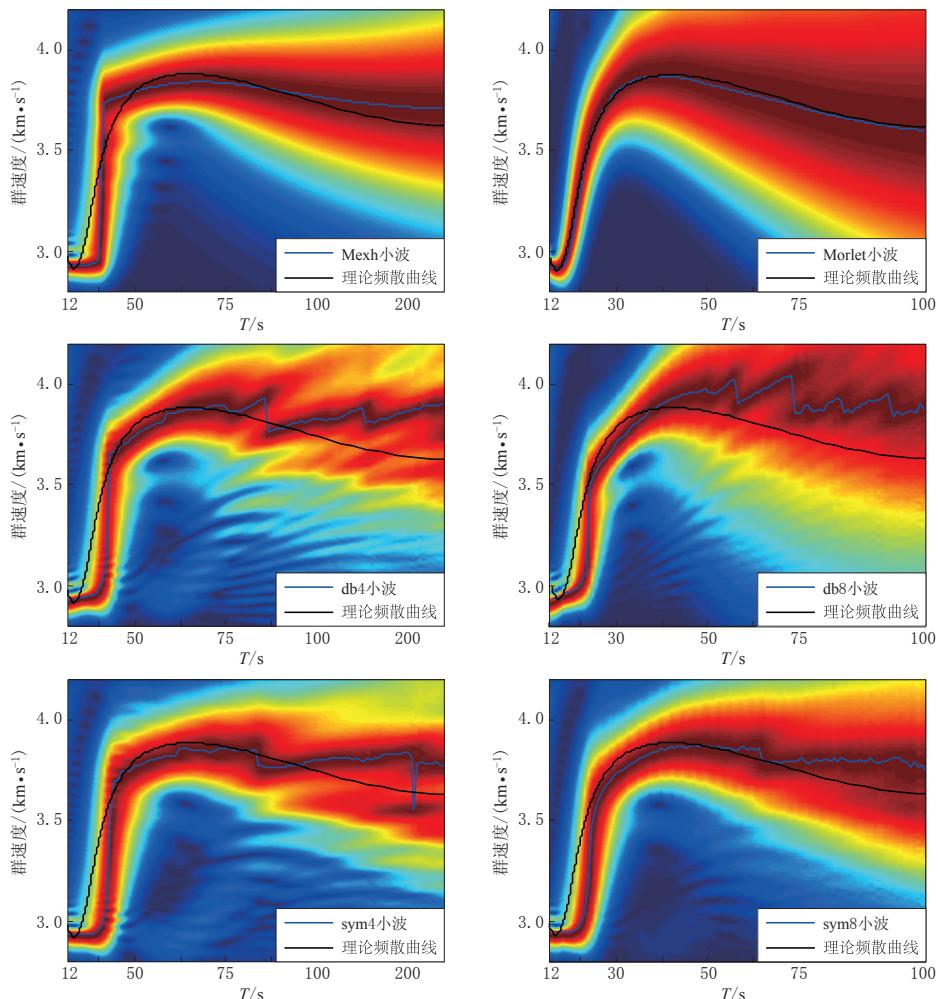


图 3 不同小波母函数提取的面波群速度与理论群速度对比

Fig. 3 Comparison between surface wave group velocities obtained from different wavelet generating functions with theoretical values

函数提取面波群速度的相对误差(图 4)可知, Morlet 小波提取群速度的相对误差远小于其它几种小波提取群速度的相对误差, 因此本文选取 Morlet 小波作为小波母函数。

3 Morlet 小波与多重滤波法对比

多重滤波法是目前提取面波群速度最常用的方法。多重滤波法的基本原理是对地震面波数据在频率域用中心角频率为 ω_n 的高斯无相移带通滤波器进行滤波, 然后经傅里叶反变换到时间域, 最大振幅的到时即为该频率群速度波包的到时。

$$H_n(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < \omega_{ln}, \\ \exp\left[-\alpha\left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2\right], & \omega_{ln} \leq \omega \leq \omega_{un}, \\ 0, & \omega > \omega_{un}, \end{cases} \quad (6)$$

式中, $H_n(\omega)$ 为高斯滤波器的频率响应, α 为高斯滤波系数, ω 为角频率, ω_n 为为中心角频率, ω_{ln} 为下限中心角频率, ω_{un} 为上限中心角频率。

在多重滤波法中, 高斯滤波系数 α 的取值对面波群速度的计算影响非常大。本文分别采用 3 种不同的 α 取值对图 2 中的理论面波数据进行多重滤波, 并分别与 Morlet 小波提取结果进行对比。根据 Morlet 小波和多重滤波提取面波群速度与理论面波群速度对比(图 5)及其相对误差(图 6)可知: 第一种 α 取值为 α 取常相对带宽 50.3 时(Dziewonski *et al.*, 1969; 周青云等, 2006)(图 5b), 在 20—35 s 周期范围内, 多重滤波法提取群速度的相对误差比 Morlet 小波小, 但在 35—220 s 周期范围内多重滤波法提取群速度的相对误差曲线出现明显起伏, 呈锯齿状, 且有 7 处峰值段比 Morlet 小波提取群速度的相对误差大(图 6); 第二种 α 取值为 α 取 75 时(Herrman, Ammon, 2004)(图 5c), 在 20—35 s 周期范围内多重滤波法提取群速度的相对误差比 Morlet 小波小, 但在 35—220 s 周期范围内多重滤波法提取群速度的相对误差曲线出现更明显的起伏, 呈锯齿状, 且有 8 处峰值段比 Morlet 小波提取群速度的相对误差大(图 6); 在陈浩朋等(2014)给出的高斯滤波系数 α 参考值的基础上进行了适当调整, 第三种 α 取值为当 $T \leq 45$ s 时 α 取 50, 当 $T > 45$ s 时 α 取 12.5(图 5d)。在 20—35 s 周期范围内多重滤波法提取群速度的相对误差比 Morlet 小波小, 在 $T > 35$ s 时, 两者的相对误差相近, 具体表现为: 在 35—70 s 和 160—220 s 周期范围内多重滤波法提取群速度的相对误差比 Morlet 小波提取群速度的相对误差略大, 在 70—160 s 周期范围内多重滤波法提取群速度的相对误差与 Morlet 小波相近(图 6)。

综上所述, 当 $T < 45$ s 时, 3 种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差相近, 但当 $T > 45$ s 时, 3 种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差相差较大, $\alpha = 75$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差最大, $\alpha = 50.3$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差次之, $\alpha = 12.5$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差最小, 这充分说明多重滤波法非常依赖 α

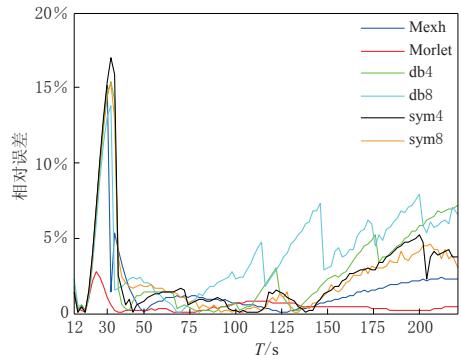


图 4 不同小波母函数提取面波群速度的相对误差

Fig. 4 Relative errors of surface wave group velocities obtained from different wavelet generating functions

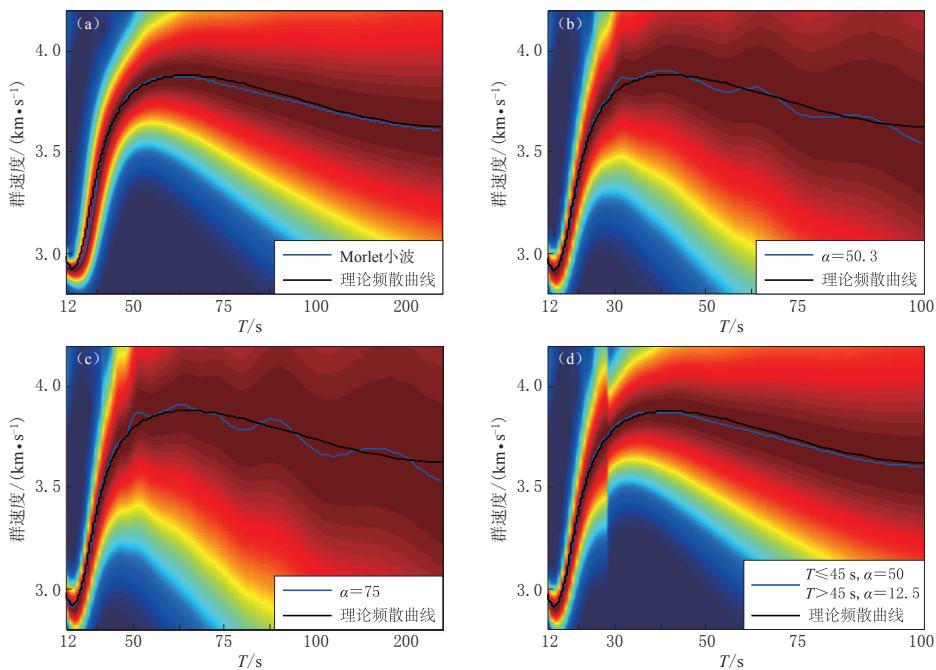


图 5 Morlet 小波和多重滤波提取面波群速度与理论面波群速度对比

Fig. 5 Comparison between surface wave group velocities obtained from Morlet wavelet transform and multiple filter technique with theoretical values

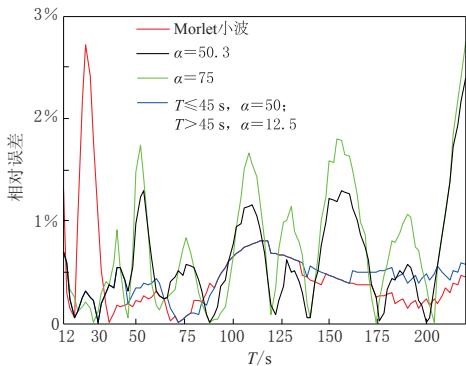


图 6 Morlet 小波和多重滤波法提取面波群速度的相对误差

Fig. 6 Relative errors of surface wave group velocities obtained by Morlet wavelet transform and multiple filter technique

应性，而小波变换是自适应的。

4 实际数据处理

本文使用南岭西部地区流动台阵的第一期观测数据作为试验数据，检验 Morlet 小波提取面波群速度的效果，并与多重滤波进行比较。采用 Eentec 宽频带地震仪采集天然地震

的取值，且 α 的取值与周期有关，长周期下 α 取值应减小，以便减小误差。在 20—35 s 周期范围内，3 种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差均小于 Morlet 小波，在 35—220 s 周期范围内，前两种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差均比 Morlet 小波提取群速度的相对误差大，而第三种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差与 Morlet 小波整体接近，这说明在 α 取值得当的前提下，在 20—35 s 周期范围内多重滤波法的相对误差比 Morlet 小波小，在 $T > 35$ s 时，两者的相对误差整体接近。但是，若想在多重滤波法中 α 取得适当的值，就必须进行大量试验，在不同周期段人为选择相适应的 α 值，也就是说，多重滤波法不具备自适应性，而小波变换是自适应的。

面波数据。我国南岭西部地区某台站记录到某个远震事件的面波数据如图 7 所示。该地震事件位于日本海域, 震中为(144.68°E, 37.17°N), 震源深度为 25.67 km, 震级为 M_w 7.1, 发震时刻为国际标准时间 2013 年 10 月 25 日 17 时 10 分 18 秒, 震中距为 31.91°。在前人对 α 取值研究的基础上, 本文分别采用 3 种不同的 α 取值对图 7 中的实际面波数据进行多重滤波, 并分别与 Morlet 小波提取结果进行对比。图 8a 为 Morlet 小波提取结果; 图 8b 为 α 取常相对带宽 50.3 时多重滤波的提取结果(Dziewonski *et al.*, 1969; 周青云等, 2006), 结果显示长周期段($T > 50$ s)群速度出现起伏; 图 8c 为 α 取 75 时多重滤波的提取结果(Herrman, Ammon, 2004), 长周期段($T > 50$ s)群速度也出现起伏, 且起伏幅度更大; 在陈浩朋等(2014)给出的高斯滤波系数 α 的参考值上进行适当调整, 当 $T \leq 35$ s 时 α 取 50,

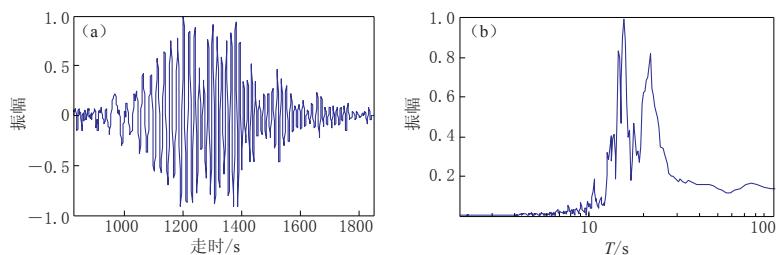


图 7 南岭西部地区某台站记录到的 M_w 7.1 地震垂直分量瑞雷面波波形(a)和振幅谱(b)

Fig. 7 Vertical component seismogram of Rayleigh wave (a) and its amplitude spectra (b) of M_w 7.1 earthquake recordod by one station in western Nanling region

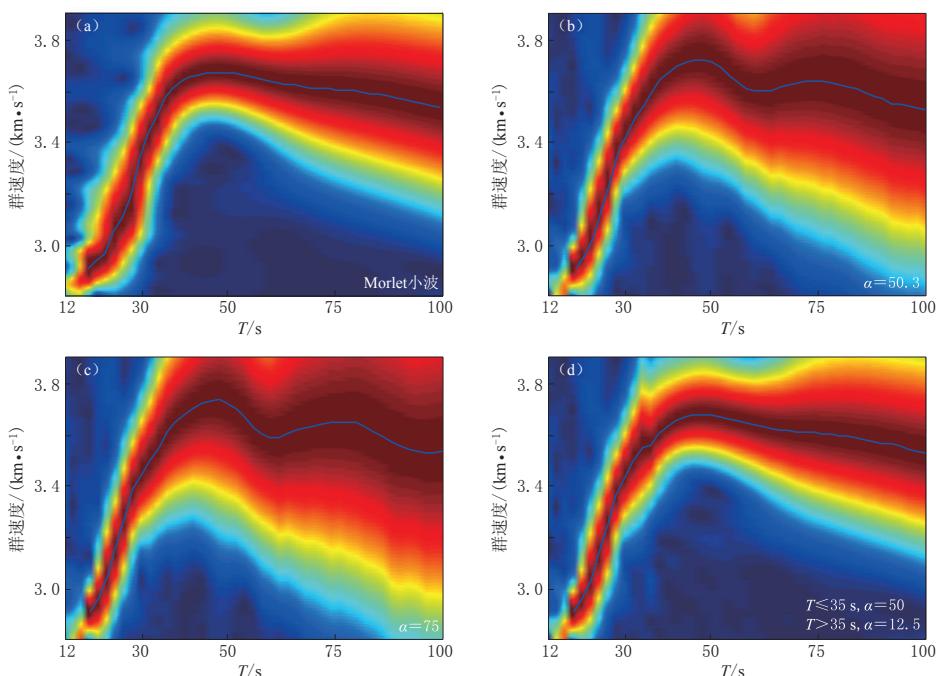


图 8 多重滤波法和 Morlet 小波提取南岭西部地区某台站的面波群速度

Fig. 8 Surface wave group velocities of one station in western Nanling region obtained from multiple filter technique and Morlet wavelet transform

当 $T > 35$ s 时 α 取 12.5, 其提取结果见图 8d, 长周期段 ($T > 50$ s) 多重滤波提取的群速度未出现起伏, 比前两种 α 取值下的提取结果更可靠, 这充分说明多重滤波法非常依赖 α 的取值, 且长周期段 α 取值应减小。在短周期段 ($T < 35$ s), 3 种 α 取值下的多重滤波提取的群速度基本一致, 但与 Morlet 小波提取的群速度有细微差别, 结合第三节的对比结果, 3 种 α 取值下的多重滤波提取的群速度比 Morlet 小波更可靠。在长周期段, 第三种 α 取值下的多重滤波提取的群速度与 Morlet 小波相近, 比前两种 α 取值下的多重滤波更可靠。

5 讨论与结论

本文采用小波变换方法提取面波群速度, 对几种常见的小波母函数提取方法进行了对比, 对比结果表明: 在 Mexican Hat 小波、Morlet 小波、Daubechies 小波和 Symlets 小波这 4 种常见的小波中, Morlet 小波提取面波群速度的误差最小。但小波的种类很多, 今后有必要开展其它小波(如 Meyer 正交小波等)的对比研究。

多重滤波法是目前提取面波群速度最常用的方法。本文采用 Dziewonski 等(1969)、Herrma 和 Ammon(2004)、陈浩朋等(2014)分别提出的 3 种取值对同一理论面波数据进行多重滤波, 并与连续小波变换进行对比, 得到以下结论:

1) 当 $T < 45$ s 时, 3 种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差相近, 但当 $T > 45$ s 时, 3 种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差相差较大, $\alpha = 75$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差最大, $\alpha = 50.3$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差次之, $\alpha = 12.5$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差最小, 这充分说明多重滤波法非常依赖 α 的取值, 而且 α 的取值和周期有关, 长周期下 α 取值应减小, 以便减小群速度的计算误差;

2) 在 20—35 s 周期范围内, 3 种 α 取值下的多重滤波提取群速度的相对误差均小于 Morlet 小波, 在 35—220 s 周期范围内, $\alpha = 50.3, 75$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差均比 Morlet 小波提取群速度的相对误差大, $\alpha = 12.5$ 时的多重滤波提取群速度的相对误差与 Morlet 小波相近。这说明在 α 取值得当的前提下, 在 20—35 s 周期范围内多重滤波法的相对误差比 Morlet 小波小, 在周期大于 35 s 时, 两者相对误差整体接近;

3) 多重滤波法非常依赖 α 的取值, 在不同周期段需耗费大量时间进行繁复的试验以选取合适的 α 值, 这说明多重滤波法不具备自适应性; 而小波变换在分析短周期信号时, 时间窗变窄, 频率窗变长, 当分析长周期信号时, 时间窗变长, 频率窗变窄, 具有对信号的自适应性, 这是小波变换相比多重滤波法最大的优点。

中国科学院测量与地球物理研究所陈浩朋博士提供了地震面波理论数据, 美国圣路易斯大学 Robert B Herrmann 教授和美国宾夕法尼亚州立大学 Charles J Ammon 副教授提供了本研究使用的地震学程序包, 作者在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 曹小林, 张雪梅, 朱介寿. 1999. 中国及邻区的地震面波频散反演[J]. 成都理工学院学报, 26(3): 295–298.
 Cao X L, Zhang X M, Zhu J S. 1999. Surface wave dispersion inversion in China and adjacent regions[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 26(3): 295–298 (in Chinese).
 陈浩朋, 朱良保, 王清东, 杨颖航, 张攀. 2014. 面波群速度测量误差分析[J]. 地球物理学进展, 29(5): 1985–1995.

- Chen H P, Zhu L B, Wang Q D, Yang Y H, Zhang P. 2014. An error analysis of surface wave group velocity measurement[J]. *Progress in Geophysics*, **29**(5): 1985–1995 (in Chinese).
- 陈立, 薛梅, Plon L K, 杨挺. 2012. 南海瑞雷面波群速度层析成像及其地球动力学意义[J]. 地震学报, **34**(6): 754–772.
- Chen L, Xue M, Plon L K, Yang T. 2012. Group velocity tomography of Rayleigh waves in South China Sea and its geo-dynamic implications[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(6): 754–772 (in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 王未来, 王长在, 杨婷. 2013. 华北地区勒夫波噪声层析成像研究[J]. 地球物理学报, **56**(7): 2268–2277.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, Wang C Z, Yang T. 2013. Love wave tomography from ambient seismic noise in North-China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(7): 2268–2277 (in Chinese).
- 何正勤, 丁志峰, 叶太兰, 孙为国, 张乃铃. 2001. 中国大陆及其邻域地壳上地幔速度结构的面波层析成像研究[J]. 地震学报, **23**(6): 596–603.
- He Z Q, Ding Z F, Ye T L, Sun W G, Zhang N L. 2001. Surface wave tomography of the crust and upper mantle of Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **23**(6): 596–603 (in Chinese).
- 潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 张风雪, 张广成. 2011. 华北地区瑞雷面波相速度层析成像[J]. 地球物理学报, **54**(1): 67–76.
- Pan J T, Wu Q J, Li Y H, Zhang F X, Zhang G C. 2011. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(1): 67–76 (in Chinese).
- 王敏玲, 陈赟, 梁晓峰, 徐逸鹤, 范宇婷, 徐涛, 张忠杰, 滕吉文. 2015. 华南及南海北部地区瑞利面波层析成像[J]. 地球物理学报, **58**(6): 1963–1975.
- Wang M L, Chen Y, Liang X F, Xu Y H, Fan Y T, Xu T, Zhang Z J, Teng J W. 2015. Surface wave tomography for South China and the northern South China Sea area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(6): 1963–1975 (in Chinese).
- 余大新, 吴庆举, 王鹏, 叶庆东, 潘佳铁, 高孟潭. 2016. 蒙古中南部地区基于天然地震的勒夫波相速度层析成像[J]. 地震学报, **38**(1): 41–52.
- Yu D X, Wu Q J, Wang P, Ye Q D, Pan J T, Gao M T. 2016. Love wave phase velocity tomography in the south-central Mongolia from earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(1): 41–52 (in Chinese).
- 周青云, 何永峰, 靳平, 廖桂生. 2006. 利用多重滤波方法提取面波频散曲线[J]. 西北地震学报, **28**(1): 46–50.
- Zhou Q Y, He Y F, Jin P, Liao G S. 2006. Using MFT obtain Rayleigh-wave dispersion curve[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **28**(1): 46–50 (in Chinese).
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 严忠琼, 曹小林. 2002. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, **45**(5): 646–664.
- Zhu J S, Cao J M, Cai X L, Yan Z Q, Cao X L. 2002. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific marginal seas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(5): 646–664 (in Chinese).
- 朱良保, 熊安丽. 2007. 面波频散测量的频时分析法[J]. 地震地磁观测与研究, **28**(1): 1–13.
- Zhu L B, Xiong A L. 2007. The frequency-time analysis method for surface wave dispersion measurement[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **28**(1): 1–13 (in Chinese).
- Cara M. 1973. Filtering of dispersed wavetrains[J]. *Geophys J Int*, **33**(1): 65–80.
- Daubechies I. 1988. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. *Commun Pure Appl Math*, **41**(7): 909–996.
- Daubechies I. 1990. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, **36**(5): 961–1005.
- Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **59**(1): 427–444.
- Herrmann R B, Ammon C J. 2004. Computer programs in seismology, 3.30[CP/OL]. [2013-08-20]. <http://www.eas.slu.edu/eqc/eqccps.html>.

- Inston H H, Marshall P D, Blamey C. 1971. Optimization of filter bandwidth in spectral analysis of wavetrains[J]. *Geophys J Int*, **23**(2): 243–250.
- Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophys J Int*, **122**(1): 108–124.
- Kolinský P. 2004. Surface wave dispersion curves of Eurasian earthquakes: The SVAL program[J]. *Acta Geodyn Geomater*, **1**(2): 165–185.
- Landisman M, Dziewonski A, Satō Y. 1969. Recent improvements in the analysis of surface wave observations[J]. *Geophys J Int*, **17**(4): 369–403.
- Levshin A, Pisarenko V F, Pogrebinsky G A. 1972. On a frequency-time analysis of oscillations[J]. *Ann Geophys*, **28**(2): 211–218.
- Morlet J, Arens G, Fourgeau E, Giard D. 1982. Wave propagation and sampling theory, Part II : Sampling theory and complex waves[J]. *Geophysics*, **47**(2): 222–236.
- Nyman D C, Landisman M. 1977. The display-equalized filter for frequency-time analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **67**(2): 393–404.
- Wu Q J, Zheng X F, Pan J T, Zhang F X, Zhang G C. 2009. Measurement of interstation phase velocity by wavelet transformation[J]. *Earthquake Science*, **22**(4): 425–429.