

利用多重滤波法提取面波群速度及其 高斯滤波参数取值

蒋婵君¹, 王有学¹, 熊彬¹, 王海燕²

(1. 桂林理工大学 a. 地球科学学院; b. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006;

2. 桂林理工大学博文管理学院, 广西 桂林 541006)

摘要:介绍了多重滤波法提取瑞利面波群速度的原理和步骤,并基于不同震中距的理论瑞利面波数据和高质量的实际数据,采用4种不同的高斯滤波参数 α 取值方案提取群速度曲线,结果表明:当周期范围跨度较大时,高斯滤波参数 α 取值不仅应考虑震中距,还应考虑周期;对于不同震中距,在周期小于45 s时,高斯滤波参数 α 取值范围较大,但在周期大于45 s时,不同的高斯滤波参数 α 取值对群速度的提取影响较大,此时 α 的取值应谨慎;在这4种不同的 α 取值方案中,本文改进后的周期分段 α 取值方案效果最好。

关键词:面波;群速度;多重滤波法;高斯滤波参数

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

天然地震面波层析成像是探测地壳和上地幔结构的最常用方法之一,其前提是从面波数据中提取高质量的相速度或者群速度。目前,提取面波群速度的方法有移动窗分析法^[1]、多重滤波法^[2]和连续小波变换^[3],其中多重滤波法是提取面波群速度最常用的方法^[4-9]。

Landisman等^[1]提出了在时间域采用矩形窗作为时间窗口的移动窗分析法,Dziewonski等^[2]提出了在频率域采用高斯滤波器的多重滤波法。如果将移动窗分析法中的矩形窗改为高斯窗,那么时间域移动窗分析法与频率域多重滤波法是等价的。目前,多重滤波法作为最常用的提取群速度的方法,其效果在很大程度上取决于高斯滤波参数 α ,因此需要选择合适的高斯滤波参数值,前人对此作了大量的研究:Inston等^[10]提出了最佳带宽滤波;Cara^[11]提出了最佳滤波方案;Nyman等^[12]提出了均等显示方法;Herrmann等^[13]给出了不同震

中距的高斯滤波参数的参考取值;Kolínsky^[14]研究发现,高斯滤波参数与信号周期之间存在准线性变化的规律,但仅适用于该研究中所采用的天然地震数据;朱良保等^[15]提出了线性时间分辨方法选择高斯滤波参数;陈浩朋等^[16]提出了不同震中距的高斯滤波参数按照周期分段进行取值。本文将采用Dziewonski等^[2]、Herrmann等^[13]、陈浩朋等^[16]分别提出的高斯滤波参数 α 取值,并且在陈浩朋等^[16]的周期分段取值基础上作了调整改进,利用多重滤波法对合成瑞利面波数据和高质量实际数据进行群速度的提取,分析高斯滤波参数 α 的不同取值对多重滤波法的影响。

1 多重滤波法原理

1.1 单台法

中心频率为 ω_n 的高斯带通滤波器 $H_n(\omega)$ 为

收稿日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41574039);广西自然科学基金重点项目(2016GXNSFDA380014);广西高校中青年教师基础能力提升项目(2018KY0857)

作者简介: 蒋婵君(1984—),女,博士研究生,讲师,研究方向:地球物理勘探,554083077@qq.com。

通讯作者: 王有学,博士,教授,uxue.wang@glut.edu.cn。

引文格式: 蒋婵君,王有学,熊彬,等.利用多重滤波法提取面波群速度及其高斯滤波参数取值[J].桂林理工大学学报,2019,39(2):356-361.

$$H_n(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < \omega_{ln}; \\ \exp\left[-\alpha\left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2\right], & \omega_{ln} \leq \omega \leq \omega_{un}; \\ 0, & \omega > \omega_{un}. \end{cases} \quad (1)$$

其中： α 为高斯滤波参数； ω_n 为中心频率； ω_{ln} 为中心频率的下限频率； ω_{un} 为中心频率的上限频率^[2-3,16-17]。

令 $BAND = (\omega_{un} - \omega_n)/\omega_n = (\omega_n - \omega_{ln})/\omega_n$ ， $\beta = \alpha BAND^2$ 。其中 $BAND$ 为相对带宽， β 为截断阈值。实际计算中必须对高斯函数进行截断，原则上在截断后不能引起明显的吉普斯效应， β 一般取值为 3，截断处的能量相对于能量峰值下降了 30 DB。当高斯滤波参数为常数时， $BAND$ 也为常数时，此时称为常相对带宽^[15]。

设某一台站记录的天然地震面波数据为 $f(t)$ ，对 $f(t)$ 进行傅里叶变换得到 $f(\omega)$ ；在频率域，用中心频率为 ω_n 的高斯带通滤波器 $H_n(\omega)$ 对 $f(\omega)$ 进行滤波得到 $F_n(\omega)$ ；然后将 $F_n(\omega)$ 进行傅里叶反变换转换到时间域，并对其进行希尔伯特变换得到幅值包络，最大振幅的到时即为该频率 ω_n 的群速度波包的到时 t_n ；假设面波沿大圆路径传播，根据震中距 L 和群速度波包到时 t_n ，即可计算出该中心频率 ω_n 的群速度 $U_n = L/t_n$ 。重复上述步骤，直到求出所有待求频率(周期)的群速度值^[17]。

1.2 双台法

假设面波沿大圆路径，当两个台站与震中近似在同一条大圆弧上时(图 1)，可以用双台法提取两个台站间的群速度。

设这两个台站记录的天然地震面波数据分别为 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ ，其互相关函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(\tau)f_2(\tau - t)d\tau, \quad (2)$$

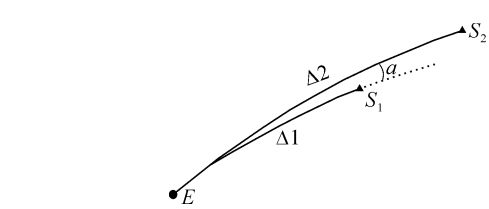
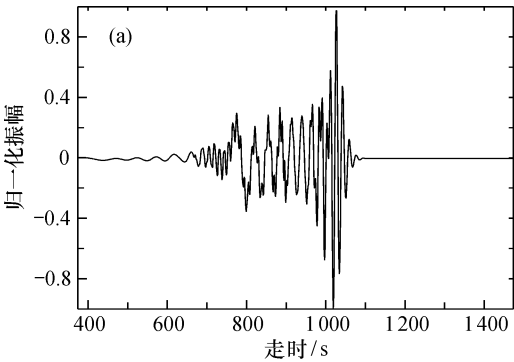


图 1 双台法示意图
Fig. 1 Diagram for two-station method

$f(t)$ 相当于第 1 个台站激发第 2 个台站接收的地震记录。此时，用单台法的步骤提取 $f(t)$ 的群速度^[16]。

单台法和双台法只是面波的数据来源不同，单台法适用于震中在研究区域内，双台法适用于震中在研究区域外。在提取群速度的原理和步骤上，单台法和双台法没有区别，故而本文均以单台法为例。

2 高斯滤波参数

2.1 理论瑞利面波数据

为了分析高斯滤波参数 α 的取值对多重滤波法的影响，采用模态叠加方法^[13] 计算理论瑞利面波数据：选择地球速度结构 AK135 模型^[18]，地震震源参数见表 1，5 个接收台站，其震中距分别为 1 000、2 000、3 000、4 000 和 8 000 km，方位角 45°，数据采样间隔为 1 s。震中距为 3 000 km 的理论瑞利面波数据及其振幅谱见图 2，提取的周期范围为 4 ~ 220 s。

2.2 高斯滤波参数取值

在多重滤波法中，选择合适的高斯滤波参数 α

表 1 地震震源参数
Table 1 Source parameters

模态叠加数	地震走向	倾角	滑动角	地震震级	震源深度
5	0°	45°	0°	6.0	20 km

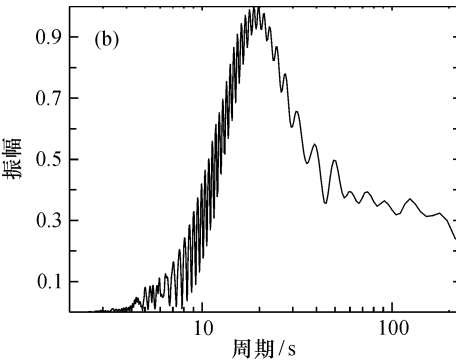


图 2 震中距 3 000 km 的理论瑞利面波数据(a) 及其振幅谱(b)
Fig. 2 Synthetic seismogram of Rayleigh wave at distance of 3 000 km(a) and its amplitude spectra(b)

可以减少面波群速度测量误差。

Dziewonski 等^[2]给出了 $\alpha = 50.3$; Herrmann 等^[13]给出了 4 ~ 100 s 内不同震中距下高斯滤波参数 α 的参考值(表 2,文献[13]并没有明确给出震中距 3 000 km 时的高斯滤波参数 α 参考值,但可以根据震中距 2 000 km 和 4 000 km 的 α 参考值插值求取)。采用上述两种不同的常相对带宽取值方案,对不同震中距的理论瑞利面波数据进行多重滤波,其结果分别见图 3a1—a5、图 3b1—b5。采用 Dziewonski 等^[2]、Herrmann 等^[13]的高斯滤波参数 α 取值提取的群速度曲线在周期较大时均出现起伏,与理论群速度曲线拟合程度差;并且震中距越小,群速度曲线在周期较大时的起伏越剧烈,与理论群速度曲线拟合程度越差。这说明,高斯滤波参数 α 的选取若只考虑震中距的大小,在周期较大时很难取得较好的效果,因此,当周期范围跨度较大时,高斯滤波参数 α 取值不仅应考虑震中距,还应考虑周期。

表 2 不同方法的高斯滤波参数 α 取值						
Table 2 Values of Gaussian filter parameter α for different method						
震中距 /km	Dziewonski 等 ^[2]	Herrmann 等 ^[13]	陈浩朋等 ^[16]		本文改进方法	
			4 ~ 60 s	60 ~ 200 s	4 ~ 45 s	45 ~ 200 s
1 000	50.3	25	12.5	—	12.5 ~ 50.3	—
2 000	50.3	50	25	6.25	25 ~ 50.3	6.25
3 000	50.3	75	50	12.5	50 ~ 75	12.5
4 000	50.3	100	100	25	50 ~ 100	25
5 000	50.3	200	200	50	50 ~ 200	50

陈浩朋等^[16]给出了不同震中距不同周期分段的高斯滤波参数 α 取值(表 2),对不同震中距的理论瑞利面波数据进行多重滤波,其结果见图 3(c1—c5)。除了震中距 1 000 km 以外,采用陈浩朋等^[16]的高斯滤波参数 α 取值提取的群速度曲线在周期较大时没有出现明显的起伏,且与理论群速度曲线拟合较好,这是因为陈浩朋等^[16]的高斯滤波参数 α 取值同时考虑了震中距和周期范围。

但当震中距为 2 000、3 000、4 000 和 8 000 km 时,尤其是当震中距为 2 000、3 000 km 时,采用陈浩朋等^[16]的高斯滤波参数 α 取值提取的群速度曲线在 45 ~ 60 s 范围内与理论群速度曲线拟合相对较差,这说明陈浩朋等^[16]的周期分段点 60 s,取值过大,经过试验后将周期分段点由 60 s 调整为 45 s(表 2),改进后提取的群速度曲线见图 3(d2—

d5),改进后提取的群速度曲线在 45 ~ 60 s 范围内与理论群速度曲线拟合得更好。

对于不同震中距,在周期小于 45 s 范围内,尽管 Dziewonski 等^[2]、Herrmann 等^[13]、陈浩朋等^[16]的高斯滤波参数 α 取值不同(表 2),但提取的群速度曲线均无明显区别(图 3a1—a5, b1—b2, c1—c5),这说明在周期小于 45 s 范围内,高斯滤波参数 α 取值范围较大,不应局限于某一数值,改进后的取值范围见表 2。

另外,当震中距为 1 000 km,即震中距较小时,在周期大于 45 s 范围内,采取不同的高斯滤波参数 α 取值提取的群速度曲线均与理论群速度曲线拟合差(图 3a1, b1, c1),这说明提取的周期不应超过 45 s(表 2)。

3 实际数据

本文使用南岭西部地区流动台站观测数据作为试验数据,地震事件信息见表 3,共 12 个台站(表 4),台站的地震记录见图 4,地震记录质量高。以 JH01 台站记录为例,采用 4 种不同高斯滤波参数 α 取值方案(表 2)对其进行多重滤波,结果如图 5 所示。

采用 Dziewonski 等、Herrmann 等给出的常相对带宽取值提取的群速度曲线在周期 45 s 后均出现一定程度的起伏;采用陈浩朋等给出的周期分段 α

表 3 地震事件信息					
Table 3 Information of the earthquake event					
震级 M_w	格林尼治时间	经度/°E	纬度/°N	深度/km	
7.1	2013-10-25T17:10:18.43	144.68	37.17	25.67	

表 4 宽频带流动台站信息			
Table 4 Information of broadband stations			
台站编号	经度/°N	纬度/°E	高程/m
JH01	112.02	25.00	559
BB01	112.01	24.44	477
CW01	111.51	24.01	92
BT01	111.02	24.00	115
WQ01	110.50	24.09	173
HZ01	111.55	24.42	132
JX01	110.01	23.97	616
LA01	108.99	24.99	143
LW01	109.01	24.49	122
XA01	109.50	24.49	84
ZS01	110.02	24.48	191
AD01	109.00	24.01	174

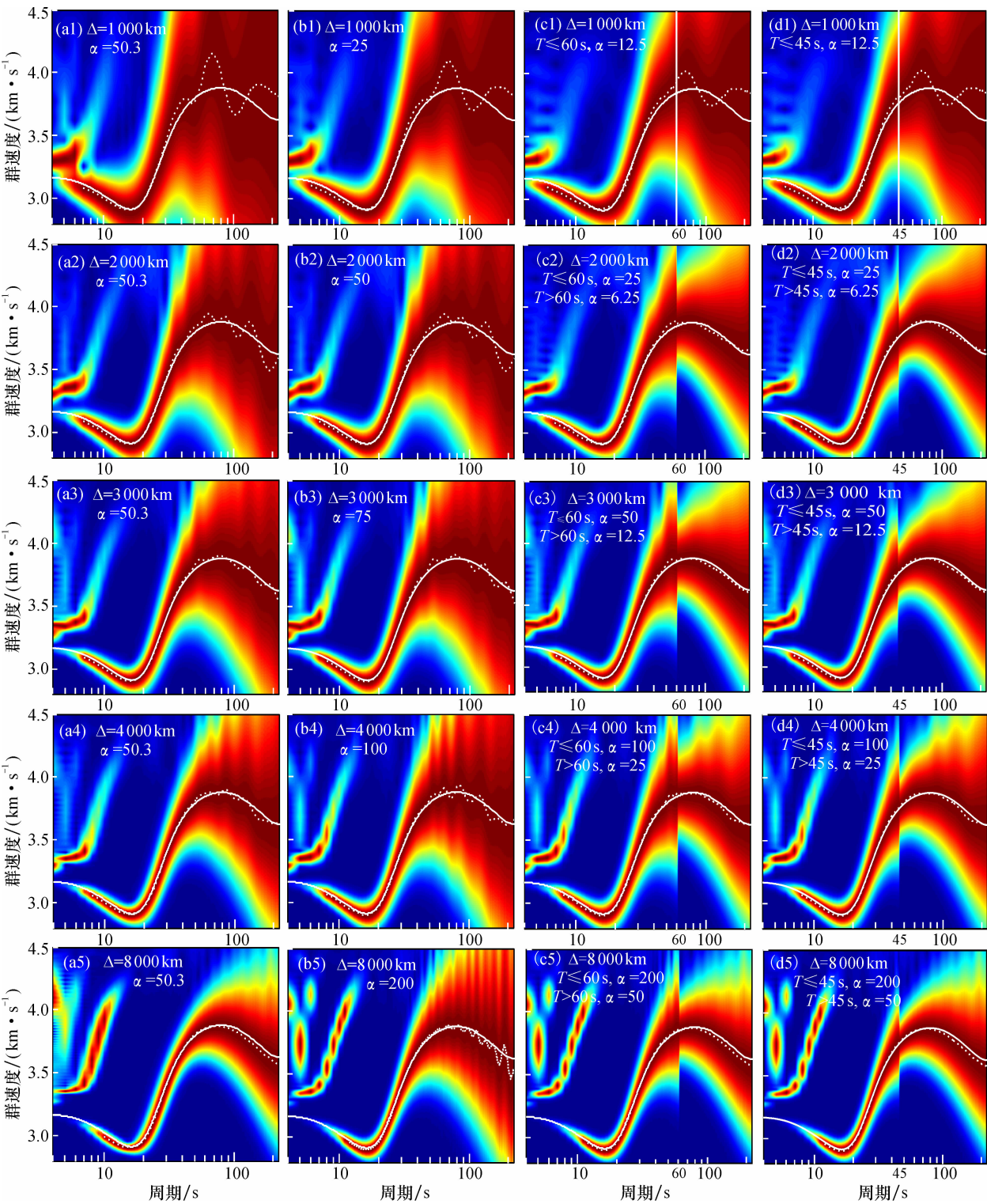


图3 不同震中距采用不同的 α 取值提取的群速度曲线
Fig. 3 Group-velocity curves at different epicentral distances with different α values
(白色实线为理论群速度曲线；白色虚线为多重滤波法提取的群速曲线)

取值提取的群速度曲线在60 s后起伏消失,但在45 ~ 60 s 范围内仍有一定程度的起伏;采用改进后的周期分段 α 取值提取的群速曲线在45 ~ 60 s 范围内起伏也消失。由此可见,高斯滤波参数 α 取值

失当会造成多重滤波法提取的群速度曲线在周期大于45 s 范围内出现假象起伏,这在一定程度上会影响后续的速度反演精度。对12个台站提取的群速度曲线取平均值(图6),在4种不同的 α 取值方

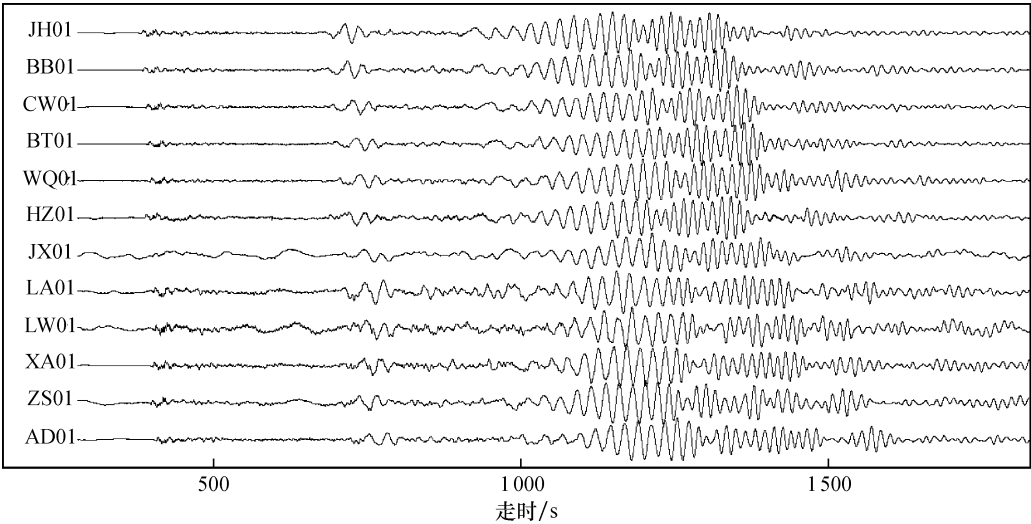


图 4 地震事件不同台站垂直分量记录

Fig. 4 Vertical components record of different stations for the same earthquake event

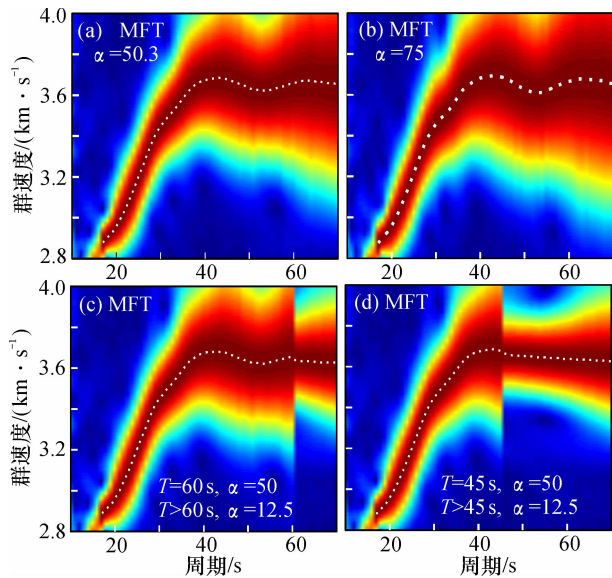


图 5 对 JH01 台站记录采用不同 α 取值提取的群速度频散
Fig. 5 Group-velocity measurements record of JH01 station by MFT using different α values

案中,改进后的周期分段 α 取值提取的平均群速度曲线最光滑。

4 结论与建议

采用 Dziewonski 等、Herrmann 等的常相对带宽取值、陈浩朋等的周期分段取值、改进的周期分段取值,分别对不同震中距的理论瑞利面波数据和高质量的实际数据进行多重滤波,并对这 4 种不同 α 取值方案的提取结果进行对比,结果表明:

(1) 当震中距为 1 000 km 时,即震中距较小时,提取的周期不应超过 45 s。

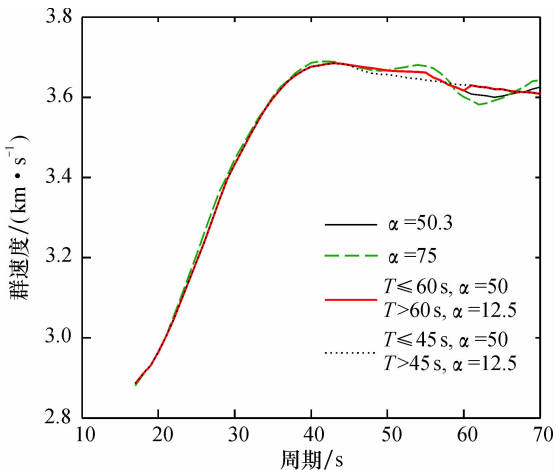


图 6 采用不同 α 取值提取的所有台站的平均群速度频散
Fig. 6 Average group-velocity measurements of all stations by MFT using different α values

(2) 当周期范围跨度较大时,高斯滤波参数 α 取值不仅应考虑震中距,而且还应考虑周期。

(3) 对于不同震中距:在周期小于 45 s 时,不同的高斯滤波参数 α 取值对群速度的提取无明显影响,此时 α 取值范围较大,不应局限于某一数值;但在周期大于 45 s 时,不同的高斯滤波参数 α 取值对群速度的提取影响较大,此时 α 的取值应谨慎。

(4) 在周期大于 45 s 时,采用 Dziewonski 等、Herrmann 等的常相对带宽取值提取的群速度频散曲线有明显的起伏;采用陈浩朋等提出的周期分段 α 取值提取的群速度曲线虽然避免了周期大于 60 s 后的假象起伏,但在 45 ~ 60 s 范围内仍有一

定程度的假象起伏;将陈浩朋等的周期分段点 60 s 调整为 45 s 后,避免了 45 ~ 60 s 范围内的假象起伏。因此,在 4 种不同的 α 取值方案中,本文改进后的周期分段 α 取值效果最好。

参考文献:

[1] Landisman M, Dziewonski A, Satô Y. Recent improvements in the analysis of surface wave observations[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1969, 17(4): 369 – 403.

[2] Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1969, 59(1): 427 – 444.

[3] 蒋婵君, 王有学, 熊彬, 等. 小波变换提取面波群速度[J]. *地震学报*, 2017, 39(3): 356 – 366.

[4] 何正勤, 丁志峰, 叶太兰, 等. 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*, 2001, 23(6): 596 – 603.

[5] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 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*, 2002, 45(5): 646 – 664.

[6] 李永华, 吴庆举, 张瑞青, 等. 用面波方法研究上扬子克拉通壳幔速度结构[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(7): 1757 – 1767.

[7] 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 华北地区勒夫波噪声层析成像研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(7): 2268 – 2279.

[8] 吴珊珊, 姜明明, 何玉梅, 等. 利用背景噪声成像研究合肥—金华剖面地壳速度结构及径向各向异性的东西差异[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 584 – 592.

[9] Tang Z, Mai P M, Chang S-J, et al. Evidence for crustal low shear-wave speed in western Saudi Arabia from multi-scale fundamental-mode Rayleigh-wave group-velocity tomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 495: 24 – 37.

[10] Inston H H, Marshall P D, Blamey C. Optimization of filter bandwidth in spectral analysis of wavetrains[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1971, 23(2): 243 – 250.

[11] Cara M. Filtering of dispersed wavetrains[J]. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 1973, 33(1): 65 – 80.

[12] Nyman D C, Landisman M. The display-equalized filter for frequency-time analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1977, 67(2): 393 – 404.

[13] Herrmann R B, Ammon C J. Computer programs in seismology, 3. 30 [CP/OL]. [2015 – 11 – 10]. <http://www.Eas.slu.edu/eqc/eqccps.html>.

[14] Kolínský P. Surface wave dispersion curves of Eurasian earthquakes: the SVAL program[J]. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2004, 1(2): 165 – 185.

[15] 朱良保, 熊安丽. 面波频散测量的频时分析法[J]. *地震地磁观测与研究*, 2007, 28(1): 1 – 13.

[16] 陈浩朋, 朱良保, 王清东, 等. 面波群速度测量误差分析[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(5): 1985 – 1995.

[17] 周青云, 何永峰, 靳平, 等. 利用多重滤波法提取面波频散曲线[J]. *西北地震学报*, 2006, 28(1): 46 – 50.

[18] Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122: 108 – 124.

Measurements of surface-wave group velocity using MFT and the value of Gaussian filter parameter

JIANG Chan-jun¹, WANG You-xue¹, XIONG Bin¹, WANG Hai-yan²
(1. a. College of Earth Sciences; b. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Bowen College of Management, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Principle of multiple filter technique(MFT) was illustrated. Based upon synthetic Rayleigh waves at different epicentral distances and high-quality real data, MFT was applied to measure group velocities using four different values of Gaussian filter parameter. The results show that the value of Gaussian filter parameter should be chosen, not only for the epicentral distance, but also the period. When the period range is wide, Gaussian filter parameter has wide value range. When the period is smaller than 45 s, the value of Gaussian filter parameter should be decided carefully. When the period is longer than 45 s, the value will affect largely the group velocity measurements. The optimized values of Gaussian filter parameter proposed is the best in this paper.

Key words: Rayleigh wave; group velocity; multiple filter technique; Gaussian filter parameter