

doi: 10.11720/wtyht.2019.1216
王志农,孙成禹,伍敦仕.基于最佳小波基的地震面波插值方法[J].物探与化探,2019,43(1):189-198.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1216>
Wang Z N, Sun C Y, Wu D S. Seismic surface wave interpolation method based on optimistic wavelet basis[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 189-198. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1216>

基于最佳小波基的地震面波插值方法

王志农¹, 孙成禹¹, 伍敦仕²

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 在利用实际地震数据中的面波反演近地表横波速度的过程中,若道间距较大、空间采样率不足,则会产生空间假频现象,从而降低频率速度谱的信噪比,影响频散曲线提取的精度以及反演效果,因此需要针对面波进行插值处理。文中提出了一种基于最佳小波基的地震面波插值方法,通过理论分析和实验误差对比在地震数据处理常用的众多小波基中选出适用于插值处理的最佳小波基 bior6.8,提高了插值精度。针对面波同向轴为线性且斜率较大的特点,文中首先采用线性动校正的方法对面波进行拉平处理,再进行小波变换插值,最后进行反线性动校正恢复面波。通过对理论模型与实际资料进行插值处理验证了本文方法的有效性,插值后的面波记录波形恢复较好,显著提高了频率速度谱的信噪比,有效解决了面波数据空间采样率不足引起的假频问题。

关键词: 面波插值;小波变换;最佳小波基;频率速度谱;空间假频

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0189-10

0 引言

多道面波分析技术(MASW)是 20 世纪 90 年代发展起来的一种基于面波的近地表无损探测技术,它利用面波特有的频散特性对近地表的横波速度结构进行反演^[1-3]。由于该技术具有无损、高效、低成本且精度较高等优点,近年来得到了快速的发展^[4]。在地震勘探领域,面波往往被视为噪声被压制,但是随着多道面波分析技术的发展,大炮地震数据中的面波记录开始逐渐被利用起来进行近地表结构的反演,并得到了较好效果^[5]。

在利用面波数据进行近地表结构反演时,频散曲线的拾取精度在很大程度上影响了反演的效果。在野外地震数据采集的过程中,由于施工条件的限制和工作量的限制等因素,常常出现地震记录的道间距较大或可用的地震道数量不足的现象,从而产生空间假频^[6-7]。若利用含有空间假频的地震面波数据进行反演,其频率速度谱中的面波能量聚焦不

好并且信噪比较低,甚至会出现假高阶能量的现象,致使难以精确地拾取频散曲线,从而导致反演精度降低。为了提高勘探精度,消除空间假频的现象,有必要对面波数据进行插值处理^[8]。

国内外的许多学者对地震数据的插值方法进行了研究。李庆忠^[9-10]对地震信号的内插与噪声剔除进行了研究,提出了一维情况下信号内插的最佳内插算子以及在空间域较彻底剔除干扰波的检噪算子,并将其推广到二维情况,讨论了二维 F-K 域中的信号内插及噪声剔除技术。Spitz^[11]提出了 F-X 域预测技术实现道内插的方法,该方法尽管有许多优点,但是仍然存在计算量大、精度较低等问题。国九英^[6-7]对 F-X 域道内插的方法进行了改进,并提出了一种新的 F-X 域实现道内插的方法,该方法在存在严重空间假频时,仍然可以得到较好的内插效果。Wang^[12]提出了基于小波变换的地震记录插值方法,该方法能够有效地消除假频并拓展地震信号的频宽。Hindriks、Duijndam^[13-14]将非均匀傅里叶变换应用于地震数据的插值处理,有效地克服了地震

收稿日期: 2018-06-04;修回日期: 2018-12-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(41874153,41504097)和国家科技重大专项(2016ZX05006-002-03)
作者简介: 王志农(1995-),男,硕士研究生,主要从事地震面波处理及反演研究工作。
通讯作者: 孙成禹(1968-),男,教授,主要从事地震波传播理论和地震勘探方法的教学和研究工作。

数据中的假频问题。高静怀、王西文^[15-17]等对地震资料处理中小波函数的选取问题进行了研究,提出能否选出接近地震子波的小波函数是决定利用小波变换处理地震资料成功与否的关键。Porsani^[18]提出半步预测滤波方法提高了地震信号插值的计算效率。Herrmann、Hennenfent^[19-21]等将曲波变换应用于地震插值,取得了较好效果。Candes、Donoho^[22-23]等将压缩感知理论应用于地震插值。张华^[24]提出了地震信号去噪的最优小波基选取方法,利用最优小波基对地震信号进行去噪处理可以有效提高地震信号的信噪比和分辨率。周聪^[8]将线性动校正引入到面波插值过程中,一定程度上消除了假频现象,提高了频率速度谱的信噪比。Mohammad^[25]提出数据驱动字典学习的方法对二维地震数据同时进行去噪和插值处理,有效提高了地震信号的信噪比。Kim^[26]提出了基于 POCS 算法的曲波变换三维地震数据插值方法,有效地降低了数据计算量,提高了三维地震数据的空间采样率。

利用小波变换对地震面波数据进行插值处理时,使用不同的小波基函数会对插值精度产生较大的影响。并且地震面波数据的同向轴斜率往往较大,若直接对其进行插值处理,插值后的面波数据同向轴经常会出现阶梯状不连续的现象。笔者提出了一种基于最佳小波基的地震面波插值方法。首先通过理论分析和实验误差对比选定适用于地震数据插值的最佳小波基函数 bior6.8。由于大部分的插值方法对同向轴倾角较大的地震数据的适应性较差,故采用线性动校正的方法对原始面波数据进行拉平处理,降低其同向轴倾角对插值精度的影响。然后通过对线性动校正后的数据进行空间滤波和频率调制得到高分辨率数据的高频估计部分,在一定程度上补偿了高频信息的缺失。最后利用最佳小波基函数 bior6.8 进行二维离散小波逆变换及反线性动校

正得到插值结果。通过对面波模型和实际地震数据处理效果的对比分析可知,文中提出的方法能够有效提高面波数据的空间采样率,消除空间假频现象,插值后的地震数据波形自然连续,频率速度谱的信噪比明显提高。

1 方法原理

利用小波变换对地震数据进行插值处理相当于对地震数据进行重构,使其空间上道数加密,时间上的采样点数保持不变。对高分辨率地震数据进行二维离散小波变换可以将数据分解为低分辨率的四个子块,分别得到低频部分 a1 以及水平、垂直和对角线方向的高频部分 h1、v1、d1。如图 1 所示,其中 a1、h1、v1 和 d1 分别为对高分辨率地震数据 c_0 做一级小波变换得到的 4 个子带,a2、h2、v2 和 d2 分别为对垂直方向的高频部分 v1 做二级小波变换得到的 4 个子带。

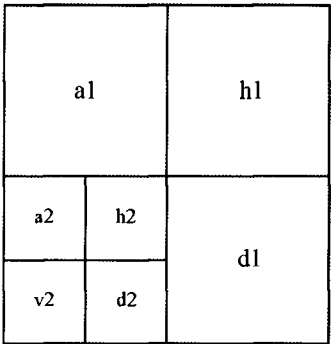


图 1 二级小波变换示意

Fig. 1 Sketch of second level wavelet transform

已知二维地震数据 $f(x,y)$, 数据大小为 $M \times N$, 以及尺度函数 $\varphi(x,y)$ 和小波函数 $\psi(x,y)$, 其中 φ 和 ψ 满足容许性条件, 构成正交小波基。则对于 $f(x,y)$ 在初始尺度 j_0 下的二维小波变换可以表示为:

$$\begin{cases} W_{\varphi}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) , \\ W_{\psi}^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j, m, n}^i(x, y) , i = \{H, V, D\} . \end{cases} \tag{1}$$

其中:

$$\begin{aligned} \varphi_{j, m, n}(x, y) &= 2^j \varphi(2^j x - m, 2^j y - n) , \\ \psi_{j, m, n}^i(x, y) &= 2^j \psi(2^j x - m, 2^j y - n) , i = \{H, V, D\} . \end{aligned} \tag{2}$$

则 $f(x,y)$ 的二维小波逆变换可以表示为:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_m \sum_n W_{\varphi}(j_0, m, n) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{i=H, V, D} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_m \sum_n W_{\psi}^i(j, m, n) \psi_{j, m, n}^i(x, y) . \tag{3}$$

通常的小波变换插值方法是利用高分辨率与低分辨率地震数据之间的相似性,在插值过程中把低

分辨率地震数据近似为高分辨率数据的低频部分,并将高分辨率数据的高频部分置零后进行二维小波逆变换即可得到插值后的地震数据。这种方法由于在插值过程中将高分辨率数据的高频细节部分直接置零,会导致一部分高频细节信息的丢失。为了对丢失的高频细节信息进行补偿,可以假设低分辨率地震数据与高分辨率地震数据具有相同的构造信息,并对低分辨率地震数据进行空间滤波和频率调制,这样可以估计出高分辨率地震数据在水平、垂直和对角线 3 个方向上的高频细节部分。这种高频估计的方法可以在一定程度上补偿插值结果中丢失的高频细节信息,提高插值的精度。

大部分的地震数据插值方法在地震信号同向轴的斜率较小时,插值效果较好。但是对于面波数据而言,同向轴的斜率较大,直接对数据进行插值效果并不理想,插值后的同向轴经常会出现阶梯状不连续的现象。通过在小波插值前利用线性动校正将面波信号的同向轴拉平,可以降低其斜率,然后对拉平后的数据进行插值,最后进行反线性动校正,将面波信号恢复至初始位置得到最终的插值结果,具体流程如图 2 所示。通过对面波模型和实际数据进行测试,证实利用上述方法对面波数据进行插值的结果较好,保证了面波波形的连续性,降低了插值道的波形畸变。

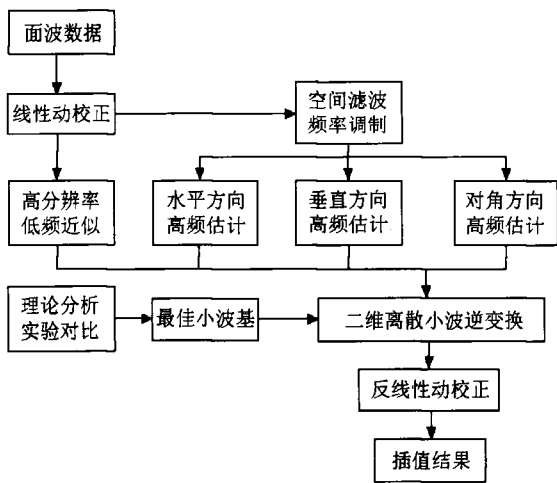


图 2 小波变换面波插值流程
Fig.2 Flow chart of surface wave interpolation

2 模型测试

2.1 最佳小波基的选取

在对地震数据进行小波变换时,选择小波基的自由度很大。在利用小波变换对地震数据进行不同

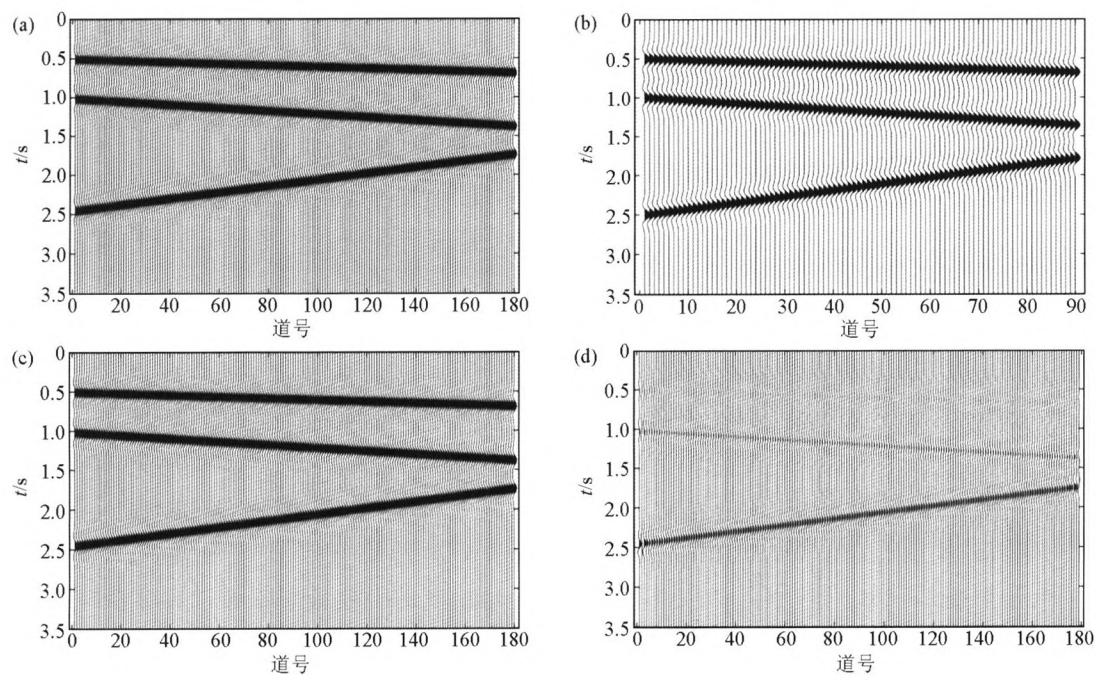
的处理时,最佳小波基的选取准则也不尽相同。因此,有必要针对面波插值的特点选取最佳小波基。适用于地震数据处理的小波函数需要同时具备正则性、对称性、相似性和合适的支撑长度等性质。正则性好的小波可以获得较好的平滑效果;对称性好的小波能够有效地避免相位畸变;与地震信号子波波形具有相似性的小波基函数可以使信号在时间—尺度域的能量分布更加集中;对于小波函数的支撑长度来说,若长度太长容易产生边界问题,太短则不利于信号能量的集中。这些性质对于一个小波函数来说不能同时全部满足,不同特性之间的权衡问题是选取一个最佳小波函数的关键。文中提出的方法为在一个由地震数据处理常用的小波基(db、sym、bior)组成的小波基库中通过实验误差对比,优选出一个适用于面波插值的小波基函数作为最佳小波基。

图 3a 为合成的二维褶积地震记录,含有 3 个斜率不同的同向轴,从上至下斜率依次增大。记录共 180 道,时间采样间隔为 0.5 ms,采样长度为 350 ms,雷克子波主频为 30 Hz,道间距为 2 m。对记录进行二分之一均匀抽道,得到图 3b 所示的抽道记录,道间距为 4 m,共 90 道。利用小波基库中的每个小波基函数分别对抽道记录进行插值处理,将插值结果与原始记录进行对比求得插值误差,这里的误差计算方法为记录中所有采样点的误差绝对值的和。

从误差图 3d 中可以看出斜率越大的同向轴,插值后的误差越大。因此针对面波信号同向轴为线性的特点采用线性动校正的方法,降低其同向轴的斜率,从而减小插值的误差。

把图 4 中的各小波基的插值误差进行对比发现三类小波基中插值误差最小的小波基分别为 db2、sym7 和 bior6.8,其中插值误差最小的小波基为 bior6.8。另外,图 4c 中出现多个小波基的插值误差几乎相等的现象,这是因为 bior 类小波基在进行信号分解和重构时所用滤波器是两个不同的滤波器,而在插值过程中仅用到重构滤波器。其中插值误差相等的小波基所对应的重构滤波器的差别主要是其滤波器的长度不同,而滤波器形状基本相同,这对插值误差的影响不大,所以会出现上述插值误差几乎相等的现象。

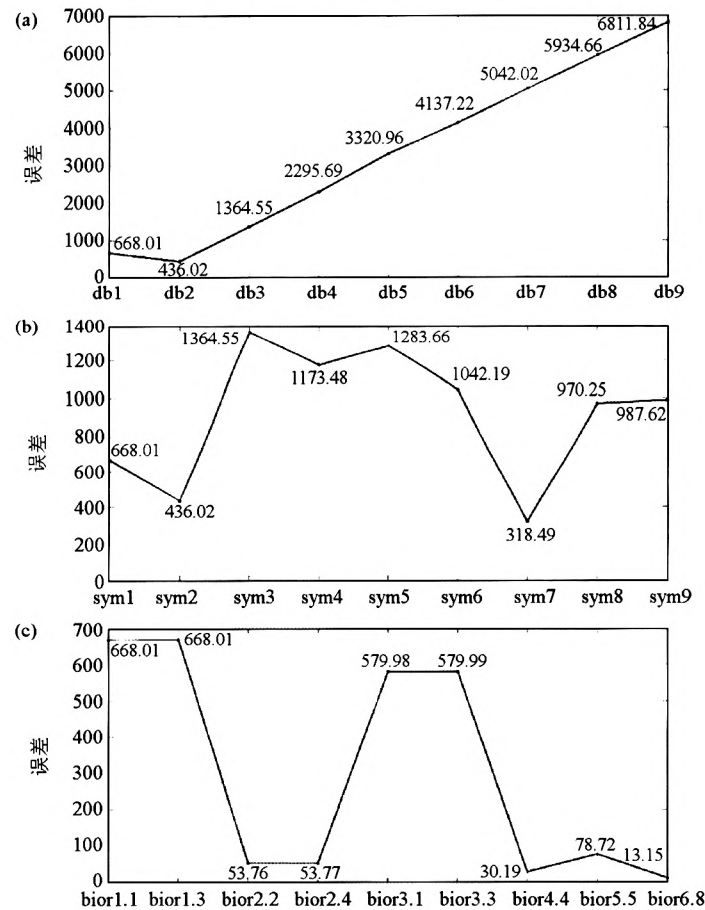
bior6.8 小波基的尺度函数和小波函数波形以及重构所用的高通和低通滤波器如图 5、6 所示,可以发现其波形与地震子波具有很好的相似性,这有利于地震信号的能量在时间尺度域更好地集中。



a—原始记录;b—抽道记录;c—插值记录;d—插值误差
a—original record;b—track record;c—interpolation record;d—interpolation error

图 3 最佳小波基 bior6.8 插值结果

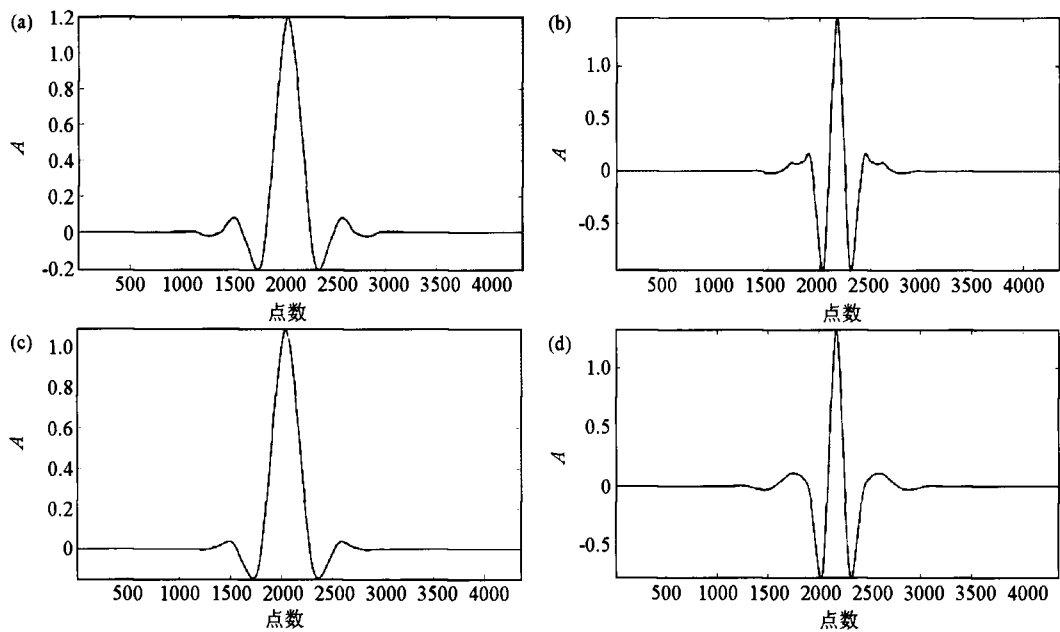
Fig.3 Interpolation result using optimistic wavelet basis bior6.8



a—db 类小波基误差;b—sym 类小波基误差;c—bior 类小波基误差
a—db wavelet basis error;b—sym wavelet basis error;c—bior wavelet basis error

图 4 三类小波基插值误差对比

Fig.4 Interpolation error comparison

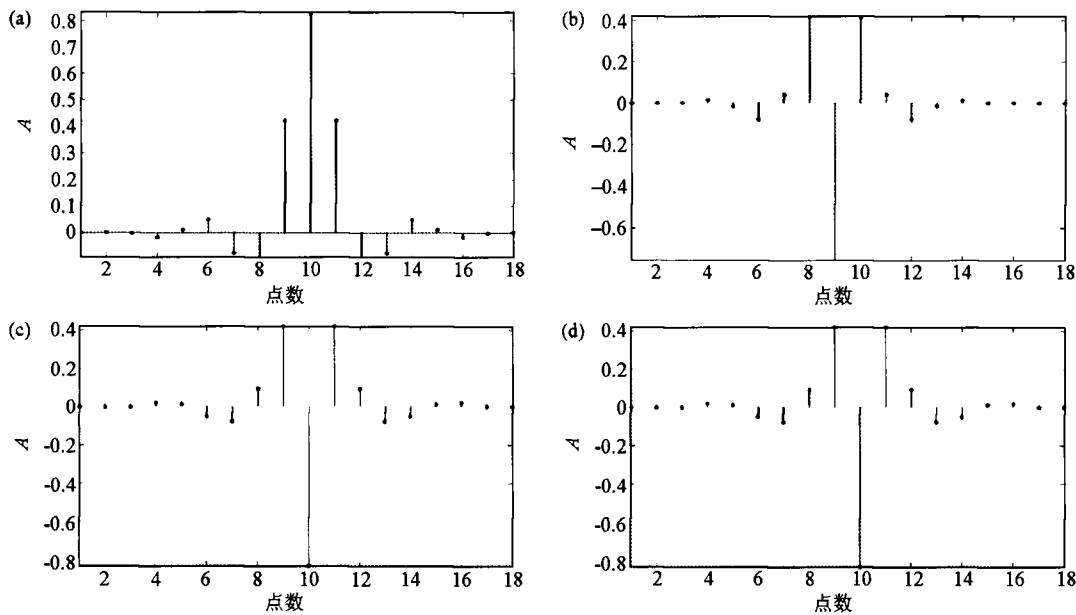


a—分解尺度函数;b—分解小波函数;c—重构尺度函数;d—重构小波函数

a—decomposition of scaling function;b—decomposition of wavelet function;c—reconstruction of scaling function;d—reconstruction of wavelet function

图 5 bior6.8 小波基

Fig.5 Wavelet basis bior6.8



a—分解低通滤波器;b—分解高通滤波器;c—重构低通滤波器;d—重构高通滤波器

a—decomposition low pass filter;b—decomposition high pass filter;c—reconstructing low pass filter;d—reconstructing high pass filter

图 6 bior6.8 小波基对应的滤波器

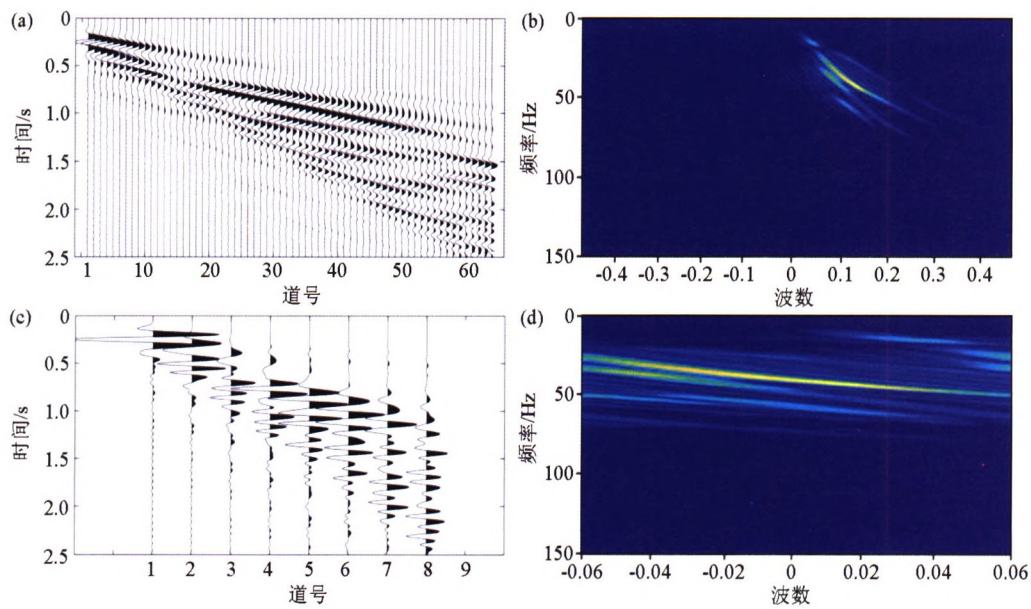
Fig.6 Filters corresponding to wavelet basis bior6.8

2.2 面波插值

图 7a 为两层水平层状介质正演得到的面波记录,共 64 道,道间距为 1 m,时间采样间隔为 0.5 ms。对记录进行八分之一均匀抽道,得到图 7c 所示的抽道记录,共 8 道,道间距为 8 m。对比抽道前后的频率波数谱可以看到,抽道后的记录假频现象严重。

对抽道记录直接进行小波变换插值,会出现明显的波形阶梯状不连续的现象,特别是在同向轴斜

率较大且中间缺道较多时,不连续现象会更加明显。采用线性动校正对面波数据进行拉平处理可以很好地避免这一现象,提高插值波形的连续性。在进行线性动校正前需要对记录进行边界延拓,这样可以避免动校正拉平后的数据超出记录上边界,并防止小波变换插值时产生边界效应影响插值效果,边界延拓的部分可在插值后切去。



a—原始记录;b—原始记录对应频率波数谱;c—抽道记录;d—抽道记录对应频率波数谱

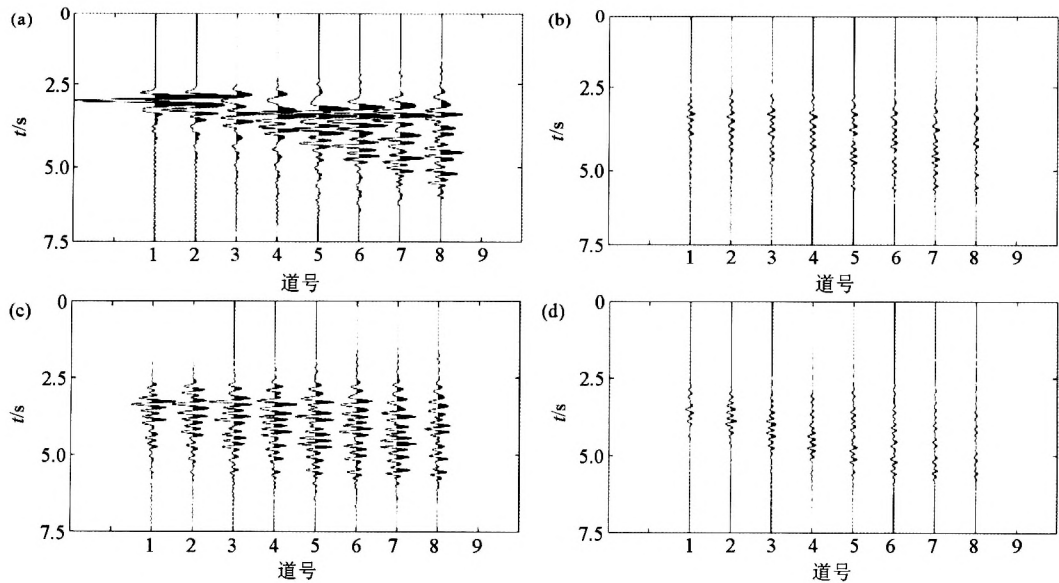
a—original record;b—frequency wavenumber spectrum corresponding to the original record;c—track record;d—frequency wavenumber spectrum corresponding to the track record

图 7 抽道前后地震记录及频率波数谱

Fig.7 Seismic records and dispersive images before and after extracting traces

图 8a 为对抽道数据进行线性动校正拉平处理的结果,将此记录作为高分辨率数据的低频近似。对低频近似部分进行空间滤波及频率调制,得到水平、竖直和对角线方向的高频估计部分,并保持其波形与原记录的相似性,如图 8b、c、d 所示。将低频近似部分和 3 个高频估计部分作为二维小波逆变换所用的四个子块,利用最佳内插小波基 bior6.8 进行小

波逆变换和反线性动校正得到图 9a 所示的插值结果。从插值结果的频率波数谱中可以看到假频现象被消除。对比原始记录和插值结果发现,插值记录同向轴波形连续性较好,高频信息得到很好的恢复。图 10 中将原始记录和插值结果的第 61 道抽出进行对比可以看到,插值结果与原始记录波形十分吻合,没有发生畸变,误差很小。



a—低频近似部分;b—水平方向的高频估计;c—垂直方向的高频估计;d—对角线方向的高频估计

a—low frequency approximation part;b—high frequency estimation of horizontal direction;c—high frequency estimation of vertical direction;d—high frequency estimation of diagonal direction

图 8 用于二维小波逆变换的四个子带

Fig.8 Four sub-bands used in 2D wavelet inverse transformation

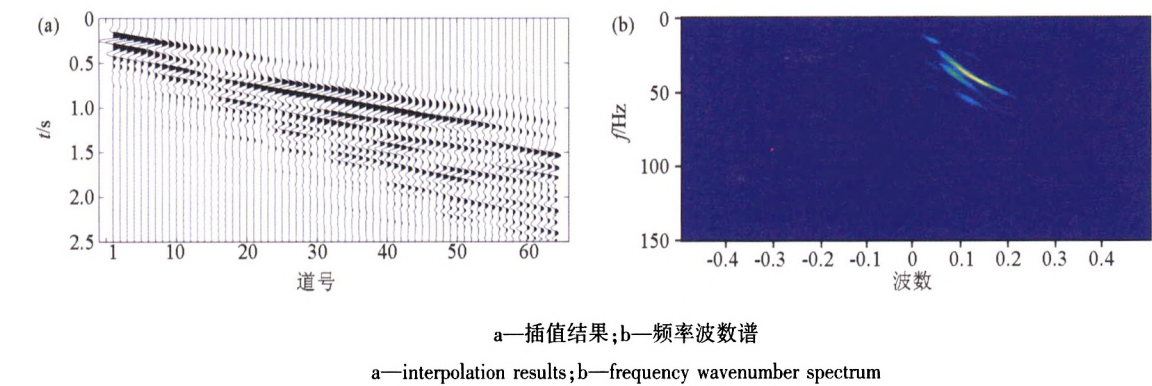


图 9 插值结果及其频率波数谱

Fig.9 Interpolation result and its FK spectrum

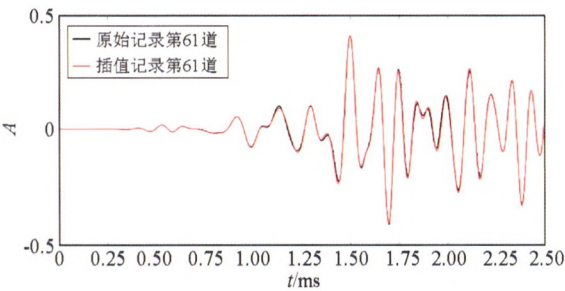
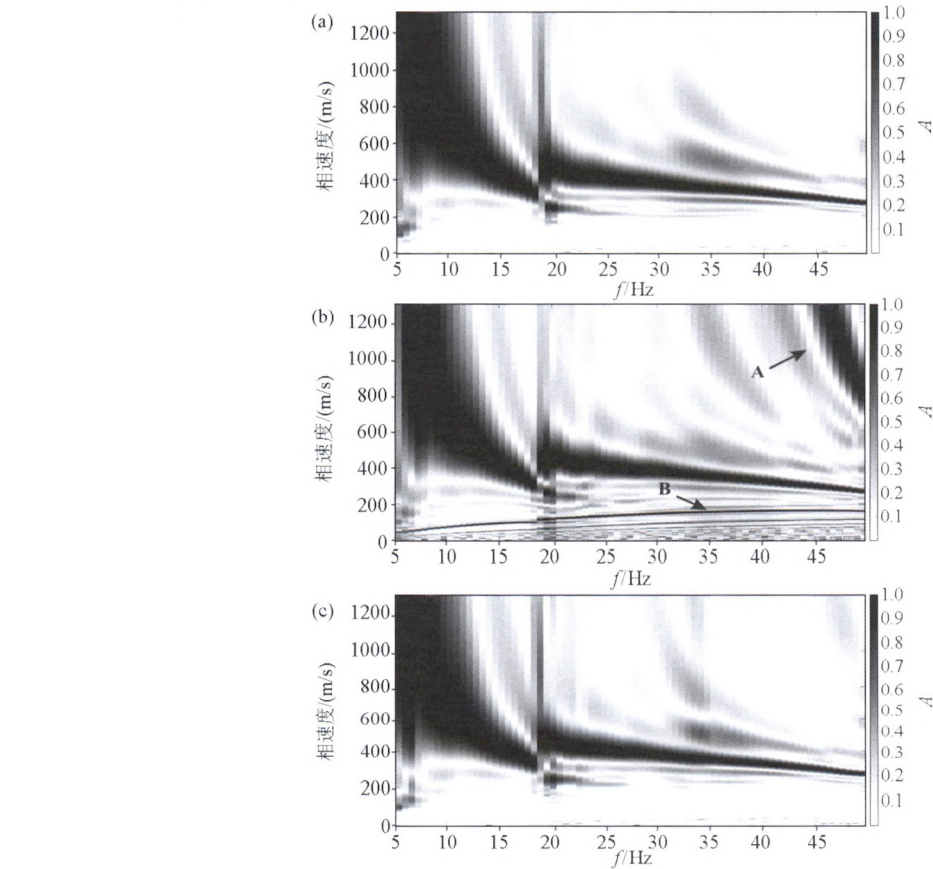


图 10 原始记录和插值结果的第 61 道波形对比
Fig.10 The 61st trace waveform comparison
between original record and interpolation result

利用相移法求出原始、抽道和插值记录的频率速度谱进行对比,如图 11 所示。相对于原始记录的频率速度谱,抽道记录的频率速度谱由于存在假频现象,在高频高速区 A 处产生了假高阶能量,严重影响了频散曲线的拾取,降低了频散曲线反演的精度,并且在低速区 B 处出现明显的噪声干扰,降低了频率速度谱的信噪比。在插值后的频率速度谱中,假高阶能量几乎被完全去除,低速区的噪声得到很好地压制,频率速度谱的信噪比显著提高,验证了文中提出的面波插值方法的有效性。



a—原始记录频率速度谱;b—抽道记录频率速度谱;c—插值结果频率速度谱
a—frequency velocity spectrum of original recording;b—frequency velocity spectrum of track recording;c—frequency velocity spectrum of interpolation results

图 11 频率速度谱对比
Fig.11 Dispersion images comparison

3 实际数据

通过对实际数据进行处理验证本文提出方法的有效性和实用性。图 12a 为某工区实际采集的地震记录,共 40 道,道间距为 52 m,时间采样间隔为 2 ms。利用文中提出的方法对实际数据进行插值,得到图 12b 所示的插值结果。将插值结果与原始记录进行对比发现红色框内的面波部分插值效果较

好,波形连续性较好基本没有发生畸变。对比图 12a、b 可以发现插值结果的体波部分插值效果并不好,出现明显的拉伸畸变现象。这是由于在插值前进行的线性动校正只是对于面波的线性同向轴适用的,体波的同向轴并不具备线性特性。在进行线性动校正、小波变换插值和反线性动校正之后,体波的同向轴不能得到有效的恢复。若要避免这一现象的产生,可以在插值处理前进行面波分离,将面波从地震数据中分离出来并单独对其进行插值处理。

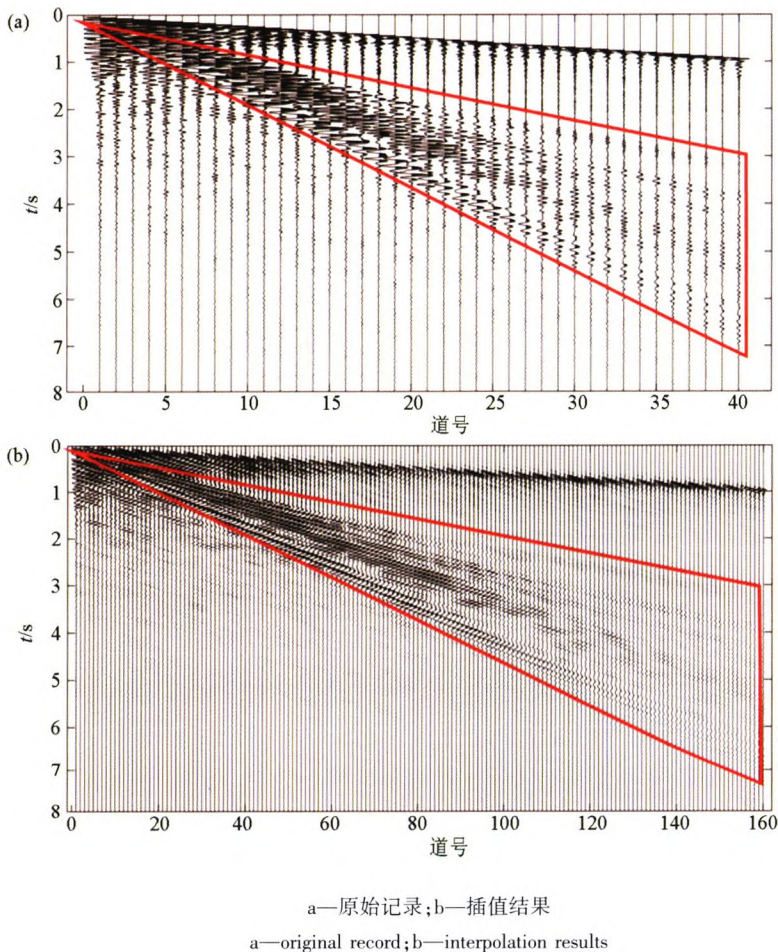


图 12 插值前后地震记录

Fig.12 Seismic records before and after interpolation

利用相移法求出原始记录和插值记录的频率速度谱进行对比,如图 13 所示。在原始记录的频率速度谱中高频部分噪声干扰严重,信噪比很低,并且在 A 处出现了明显的假高阶能量干扰。B 处的噪声干扰严重,特别是高阶的频散能量受噪声干扰严重,这对高阶频散曲线的精确拾取造成了很大的干扰。在插值后的频率速度谱中,假高阶能量基本被完全去除,高频部分的噪声得到有效压制,频率速度谱的信噪比得到了明显提高。通过对实际数据进行面波插值处理,插值后的波形及频率速度谱都取得了较好的效果,验证了本文提出的面波插值方法的实用性。

4 结论

通过以上理论分析以及对面波模型和实际资料的处理验证,可以得到如下结论:

1) 通过理论分析和实验误差对比,从地震处理常用的小波基库中优选出适合地震面波数据插值的最佳小波基 bior6.8。利用最佳小波基进行地震数据插值可以有效降低插值误差,提高插值结果的准确性。

2) 在对面波数据进行插值的过程中采用线性动校正的方法降低面波同向轴斜率,并对高分辨率

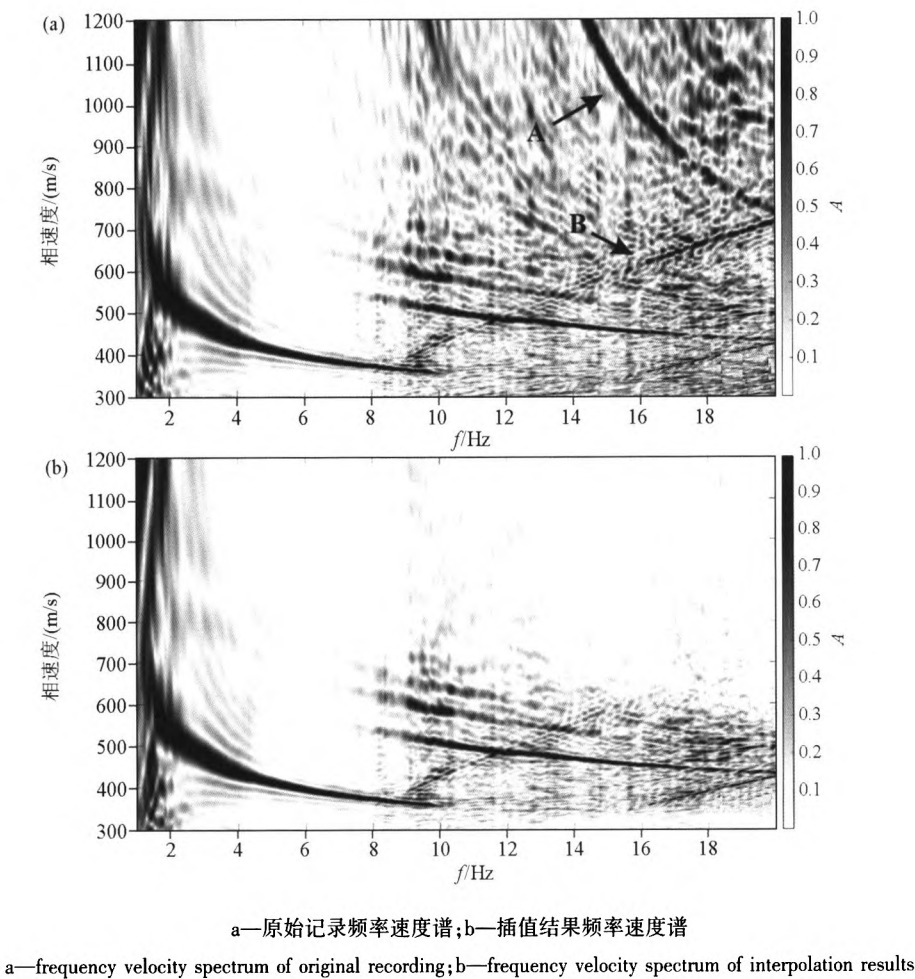


图 13 频率速度谱对比

Fig.13 Dispersion images comparison

数据的高频信息进行估计。这使得插值结果的波形具有更好的连续性,在一定程度上补偿了插值结果中的高频信息。

3) 利用本文方法对面波数据进行插值,可以明显提高频率速度谱的信噪比。解决了由于假频现象引起的频率速度谱中的假高阶能量和低信噪比的问题,有利于频散曲线的精确拾取。

参考文献(References):

[1] Park C B, Miller R D, Xia J. Multichannel analysis of surface waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 800-808.

[2] Socco L V, Foti S, Boier O D. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models-established approaches and new perspectives[J]. Geophysics, 2010, 75(5): A83-A102.

[3] 伍敦仕, 孙成禹, 林美言. 基于频率—速度域多重信号分类的面波高分辨率频散成像方法[J]. 石油物探, 2017, 56(1): 141-149.

Wu D S, Sun C Y, Lin M Y. High resolution dispersion imaging of surface waves based on signal classification in frequency-velocity domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(1): 141-149.

[4] 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 等. 高频面波方法的若干新进展[J].

地球物理学报, 2015, 58(8): 2591-2605.

Xia J H, Gao L L, Pan Y D, et al. New findings in high-frequency surface wave method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2591-2605.

[5] 姜福豪, 李培明, 张翊孟, 等. 多道面波频散分析在实际大炮数据中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 17-24.

Jiang F H, Li P M, Zhang Y M, et al. Frequency dispersion analysis of MASW in real seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 17-24.

[6] 国九英, 周兴元, 俞寿朋. F-X 域等道距道内插[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1): 28-34.

Guo J Y, Zhou X Y, Yu S P. Iso-interval trace interpolation in F-X domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1996, 31(1): 28-34.

[7] 国九英, 周兴元. F-K 域等道距道内插[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(2): 211-218.

Guo J Y, Zhou X Y. Iso-spaced trace interpolation in F-K domain [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1996, 31(2): 211-218.

[8] 周聪, 刘江平, 曾祥芝, 等. 小波变换在面波插值中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4395-4403.

Zhou C, Liu J P, Zeng X Z, et al. Application of wave transform on Rayleigh wave onterpolation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(11): 4395-4403.

[9] 李庆忠. 地震信号内插与噪声剔除(一)[J]. 地球物理学报, 1987, 30(5): 514-531.

- Li Q Z. Seismic signal interpolation and noise deletion(1)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1987, 30(5): 514-531.
- [10] 李庆忠. 地震信号内插与噪声剔除(二)[J]. 地球物理学报, 1988, 31(3): 329-341.
- Li Q Z. Seismic signal interpolation and noise deletion(2)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1988, 31(3): 329-341.
- [11] Spitz S. Seismic trace interpolation in the f-x domain [J]. Geophysics, 1991, 56(6): 785-794.
- [12] Wang Z L, Li Y D. Trace interpolation using wavelet transform [C]//Expanded Abstracts of the 64th Annual SEG Meeting. Los Angeles: Society of Exploration Geophysicists, 1994, 13: 729-730.
- [13] Hindriks C O H, Schonewille M A, Duijndam A J W. Efficient reconstruction of irregularly sampled seismic data in two dimensions [C]//The 58th Conference of the EAGE, 1996.
- [14] Duijndam A J W, Schonewille M A, Hindriks C O H. Reconstruction of band-limited signals, irregularly sampled along one spatial direction[J]. Geophysics, 1999, 64(2): 524-538.
- [15] 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 392-400.
- Gao J H, Wang W B, Zhu G M, et al. On the choice of wavelet functions for seismic data processing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(3): 392-400.
- [16] 王西文, 高静怀, 李幼铭. 高分辨地震资料处理中导数小波函数的构造[J]. 石油物探, 2000, 39(2): 64-71.
- Wang X W, Gao J H, Li Y M. Construction of derivative wavelet function in high resolution seismic data processing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2000, 39(2): 64-71.
- [17] 王西文, 刘全新, 高静怀, 等. 地震资料在小波域的分频处理与重构[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(1): 78-85.
- Wang X W, Liu Q X, Gao J H, et al. Frequency-shared processing and reconstitution of seismic data in wavelet domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(1): 78-85.
- [18] Porsani M J. Seismic trace interpolation using half-step prediction filters [J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1461-1467.
- [19] Herrmann F. Optimal seismic imaging with curvelets [C]//Expanded Abstracts of the 69th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2003.
- [20] Herrmann F. Curvelet imaging and processing: an overview [C]//CSEG National Convention, 2004.
- [21] Hennenfent G, Herrmann F, Neelamani R. Sparseness-constrained seismic deconvolution with curvelets [C]//CSEG Annual Conference Proceedings, 2005.
- [22] Candes E, Demanet L, Donoho D. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale Modeling and Simulation, 2006, 5(3): 861-899.
- [23] Donoho D. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [24] 张华, 陈小宏, 杨海燕. 地震信号去噪的最优小波基选取方法[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(1): 70-75.
- Zhang H, Chen X H, Yang H Y. Optimistic wavelet basis selection in seismic signal noise elimination[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(1): 70-75.
- [25] Nazari Siahsar M A, Gholthashi S, Abolghasemi V, et al. Simultaneous denoising and interpolation of 2D seismic data using data-driven non-negative dictionary learning[J]. Signal Processing, 2017, 6(17): 309-321.
- [26] Kim B, Jeong S, Byun J, et al. An efficient interpolation approach for insufficient 3D field data[J]. Exploration Geophysics, 2018, 49(1): 58-67.

Seismic surface wave interpolation method based on optimistic wavelet basis

WANG Zhi-Nong¹, SUN Cheng-Yu¹, WU Dun-Shi²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The surface wave in the real seismic data can be used to invert near surface shear velocity. If the trace interval is large and the spatial sampling rate is not enough, there will be spatial aliasing. This can not only decrease the signal-to-noise ratio of frequency-velocity spectra but also affect the accuracy of dispersion curves and the result of inversion. So it is necessary to do the interpolation of surface wave. This paper presents a seismic surface wave interpolation method based on optimistic wavelet basis. The optimistic wavelet basis bior6.8 which is suitable for interpolation processing can be selected among many wavelet bases commonly used in seismic data processing through the theoretical analysis and the comparison of experimental error. The use of optimistic wavelet basis bior6.8 will increase the accuracy of interpolation. Because the events of surface wave are linear and the slopes of them are larger, this paper uses the linear normal moveout to level the events of surface wave firstly, then carries out the wavelet transform interpolation, and finally uses the inverse linear normal moveout to recover the surface wave. The effectiveness of the proposed method is verified by the interpolation result of theoretical model and real seismic data. After the interpolation, the waveform of the interpolated surface wave records is well recovered. It can improve the signal-to-noise ratio of frequency-velocity spectra, and solve the aliasing problem effectively caused by the undersampling of the surface wave data.

Key words: surface wave interpolation; wavelet transform; optimistic wavelet basis; frequency-velocity spectrum; spatial aliasing

(本文编辑: 叶佩)