

基于二维小波变换的面波压制技术

朱立彬¹, 莫延钢², 王彦春^{1*}, 马 斌²

(1 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

2 中石化地球物理公司胜利分公司, 山东东营 257100)

摘 要: 鉴于常规的傅里叶变换滤波及 $f-k$ 滤波等压制面波的局限性, 基于小波基函数的特点, 提出一种基于二维小波变换的低频噪音压制方法: 在对比分析各类型小波的基础上, 选择利于低频面波压制的小波基函数; 通过二维小波分解将地震数据转换到时间、空间、频率、波数四维域中, 对含面波成分的低频高波数部分进行高通滤波; 重构地震数据, 得到压制面波后的处理结果。经理论模拟记录的试算和低频采集资料的处理证明, 本方法去噪效果好, 且在面波压制过程中较好地保护了低频有效波。

关键词: 二维小波变换; 地震数据; 面波; 噪音压制

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2017.02009

地震资料中的低频信息在石油地震勘探中起着至关重要的作用。并且, 低频振幅是地震资料解释最重要的地震特征参数^[1], 但是, 在地震数据采集过程中, 低频地震信号往往会受到各种噪音的干扰, 使得低频信号的信噪比极低, 难以得到有效利用。面波是地震资料中的主要低频干扰, 它可以掩盖其他的有效反射, 特别是对近偏移距的地震数据影响更大^[2]。因此, 面波滤除处理是地震资料处理和解释的极为关键的环节, 处理结果的好坏将直接影响后续处理的效果。

面波与有效反射波在时间上和频率上都存在一定程度的重叠, 在滤除面波的同时要尽量避免对有效反射波造成衰减。目前滤除面波方法较多, 如高通滤波、内切除、 $f-k$ 滤波、 $\tau-p$ 变换等, 但利用这些常规方法滤除面波, 都会对低频有效波成分造成伤害^[3]。小波变换可以对数据进行

时频处理, 提高分频和局部的分析能力, 适用于低频噪音的压制。本文对影响小波变换处理效果的几种小波基函数和级数等进行研究, 提出了基于二维小波变换压制低频噪音方法。通过理论模拟及实际资料的处理, 均取得满意效果, 地震资料品质得到了提高。

1 基本原理

由于面波具有低频特性, 因此, 最简单的滤除方法就是采用高通滤波, 但是, 由于在面波所处的频带区域也包含有反射有效波, 因此, 滤波法在滤除面波的同时也将有效反射波滤除; $f-k$ 滤波和 $\tau-p$ 变换也是面波滤除处理中常用的分离措施, 但容易带来假频问题。小波变换, 特别是将 N 道地震记录构成一个二维阵列, 利用二维小波分解将地震记录转换到二维小波域, 即时间、空间、频率、波数四维域中^[4], 然后根据面波和有效反射波在时间、空间、频率和波数之间的差异来进行面波的滤除具有较好的效果。

在数学上, 将平方可积函数 $\psi(t)$ 进行伸缩或平移, 可得到小波序列:

收稿日期: 2016-11-12

基金项目: 国家科技重大专项课题“前陆冲断带及复杂构造区地震成像关键技术与构造圈闭刻画”(2016ZX05003-003)

作者简介: 朱立彬(1993—), 男, 在读硕士, 主要从事石油地质与地球物理综合研究等工作。E-mail: 2110160031@cugb.edu.cn

* 通讯作者: 王彦春(1959—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为地震勘探与信息处理。E-mail: w123yc@163.com

$$\psi_{a,\tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{x-\tau}{a}\right) \quad a > 0, \tau \in R \quad (1)$$

式中: a 为尺度因子;

τ 为平移因子。

在不同的尺度上,随着 a 的增大,函数 $\psi_{a,\tau}(x)$ 的窗口会逐渐加大,对应的频域窗口将会逐渐减小,中心频率也逐渐降低。

如果取 $a=2^j, \tau=k \times 2^j$, 其中 $j, k \in Z$, 一维离散小波函数可表示为:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}x - k) \quad (2)$$

同样可以构造尺度函数:

$$\varphi_{j,k}(x) = 2^{-j/2}\varphi(2^{-j}x - k) \quad (3)$$

将一维推广到二维,若 $n=(n_1, n_2)$, 由此可定义二维可分离尺度函数:

$$\begin{aligned} \varphi_{j,n}^2(x, y) &= \varphi_{j,n_1}(x)\varphi_{j,n_2}(y) = \\ &= \frac{1}{2^j}\varphi(2^{-j}x - n_1)\varphi(2^{-j}y - n_2) \end{aligned} \quad (4)$$

和二维可分离小波函数:

$$\begin{aligned} \psi_{j,n}^k(x, y) &= \frac{1}{2^j}\psi^k(2^{-j}x - n_1, 2^{-j}y - n_2), \\ k &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5)$$

则有:

$$\begin{aligned} \psi^1(x, y) &= \varphi(x)\psi(y), \psi^2(x, y) = \\ &= \psi(x)\varphi(y), \psi^3(x, y) = \psi(x)\psi(y) \end{aligned} \quad (6)$$

若 $h(n)$ 和 $g(n)$ 分别为与 $\varphi(n)$ 和 $\psi(n)$ 对应的镜像滤波器,则二维小波分解可表示为:

$$\begin{cases} A_{j+1}(x, y) = \sum_{m,n} A_j(x, y)h(m-2x)h(n-2y) \\ D_{j+1}^{(h)}(x, y) = \sum_{m,n} A_j(x, y)h(m-2x)g(n-2y) \\ D_{j+1}^{(g)}(x, y) = \sum_{m,n} A_j(x, y)g(m-2x)h(n-2y) \\ D_{j+1}^{(d)}(x, y) = \sum_{m,n} A_j(x, y)g(m-2x)g(n-2y) \end{cases} \quad (7)$$

从小波变换的数学分析可以看出,利用二维小波分解可以将地震记录转换到二维小波域中,其中 $A_j(x, y)$ 为第 j 次分解后的低频低波数分量, $A_{j+1}(x, y)$ 为第 $j+1$ 次分解后的低频低波数分量, $D_{j+1}^{(h)}(x, y)$ 、 $D_{j+1}^{(g)}(x, y)$ 和 $D_{j+1}^{(d)}(x, y)$ 分别为第 $j+1$ 次分解后的低频高波数、高频低波数和高频高波数分量。

2 低频面波压制方法

二维小波分解后,面波主要集中于低频低波数和低频高波数部分,而高频低波数和高频高波数部分基本不含面波,且低频高波数分量含有有效反射波成分极小^[5]。如继续将低频低波数分量进行二维小波分解,并利用高通滤波器对分解后的低频高波数部分进行滤波,可滤除面波成分,然后再进行重构则可实现面波的有效衰减。

2.1 常用小波的特性

小波基函数种类繁多,在压制面波的实际应用中,有许多小波基函数得到了应用^[6]。小波基函数特性主要由正则性、支撑度、对称性、消失矩及正交性等几方面来描述。正则性用来刻画小波的光滑程度,对小波要求一定的正则性是为了获得更好的重构信号,一般正则性越高就意味着更高的消失矩;支撑度越短,衰减越快,小波的空间局部化特性越好,精度越高,而且小波变换的计算量越低,更便于快速实现,一个函数不可能在时域和频域都是紧支的,一般希望小波基能够在时域上具有短的支撑度;对称性的小波函数和尺度函数决定了滤波器具有线性相位特性,用于信号处理中可以避免非线性相移而导致的失真;消失矩决定了小波变换后能量集中于低频分量的程度,消失矩越大,能量集中程度越高;正交性与分解后信息冗余的高低有关,用具有正交性的小波分解后,会降低信息的冗余度。

常用小波的特性如表 1 所示。从表中可以看出, Symmlet 小波具有较好的对称性、与 Daubechies 小波相当的支撑度和消失矩。

3.2 小波基函数及分解级数的确定

对单炮地震记录采用不同的小波函数分解并进行面波衰减处理,其结果如表 2 所示。其中, E_r 为面波衰减处理后反射波区域与原始记录反射波区域之间的平均绝对误差, E_r 越小就表明面波衰减处理对有效反射波的影响就越小; E_s 为原始面波部分和提取出的面波部分的平均绝对误差, E_s 越小,表明面波衰减处理就越彻底。

表1 常用小波的特性

Table 1 Characteristics of the common wavelet

小波类型	N阶表示形式	正交性	支撑长度	消失矩	对称性
Daubechies	dbN	有	2N-1	N	较差(除了db1)
Symmlet	symN	有	2N-1	N	近似对称
Biorthogonal	bior.N _r , N _d	双正交	分解: 2N _d +1 重构: 2N _r +1	2N _r	可以对称
Coiflets	coifN	有	6N-1	小波函数 2 N尺度函数 2N-1	近似对称

表2 采用不同小波提取面波的性能比较

Table 2 Comparison of extracting surface wave by using different wavelet

小波类型	消失矩	平均绝对误差		耗用时间/s	支撑度
		反射波区域 E _r	面波区域 E _s		
db20	20	0.042 4	0.042 4	1.204	35
sym20		0.038 7	0.038 7	11.656	35
db10	10	0.043 1	0.043 1	0.641	17
sym10		0.039 3	0.039 3	0.907	17
coif5		0.038 1	0.038 1	0.906	7
db8	8	0.041 1	0.041 1	0.578	13
sym8		0.039 8	0.039 8	0.609	13
coif4		0.039 8	0.039 8	0.719	21
bior2.8		0.041 3	0.041 3	0.671	15
db5	5	0.040 5	0.040 5	0.515	7
sym5		0.039 9	0.039 9	0.516	7
db4	4	0.043 4	0.043 4	0.484	5
sym4		0.040 1	0.040 1	0.484	5
bior2.4		0.047 1	0.047 1	0.500	7
coif2		0.041 4	0.041 4	0.515	9

从表2中可以看出:对于同一种小波基函数,其消失矩越大,反射波区域的平均绝对误差 E_r 就越小,即面波衰减处理对有效反射波的影响就越小;在消失矩相同的情况下, Symmlet 小波 E_r 较小,优于 Daubechies 小波和 Coiflets 小波,其中, sym5 小波比 db8 小波的 E_r 还小,因此, sym5 小波在面波衰减处理中具有较好的性能。

在面波衰减处理过程中,如果一次分解没有将面波完全分离,可以逐级分解,此时只需对上一次分解的低频低波数分量进行二维小波分解,然后将低频高波数分量高通滤波后,与上一次分解得到的其余小波分量进行逐级信号重构。理论上,面波分离过程可以无限进行下去。通常分解级数越少,则面波可能得不到有效的分离;分解级数越多,则计算耗时就越长。分解级数主要取决

于对面波的分离程度,若低频低波数分量仍含有面波成分,则需继续分解,直到低频低波数分量中基本不含面波为止。通过试验分析,经过2级分解后的低频低波数分量还含有一定的面波成分,而3级小波分解后的低频低波数分量基本不含面波成分。因此,采用3级小波分解,对面波能进行有效的衰减;同时,又能保证较高的处理效率。

3.3 滤波器及其参数的确定

为了使得滤波后不发生相位的非线性失真,应该采用具有严格线性相位的数字滤波器,因此,最好选用偶对称的 FIR 数字滤波器。但是采用线性相位 FIR 数字滤波器滤波会导致信号的延时,因此必须对由滤波器引起的延时进行补偿。线性相位 FIR 数字滤波器的延时为:

$$\alpha = \frac{N-1}{2} \quad (8)$$

式中: N 为滤波器的阶数。

因此,要将滤波后的数据进行 α 点的平移,以补偿滤波引起的时延。

由于面波具有低频的特点,故采用高通滤波器进行滤波。滤波器截止频率的确定取决于面波的最高频率,截止频率过高,则在滤除面波的同时会导致有效反射波的衰减,截止频率选得过低,则面波不能被完全滤除。如果面波的最高离散频率为 k ,每道数据长度为 L ,则滤波器的数字截止频率为:

$$\omega_c = \frac{2\pi}{L} \times k = \frac{2k\pi}{L} \quad (9)$$

滤波器的阶数与滤波器的过渡带宽有关,阶数越大,则滤波器越接近于理想滤波器,过渡带宽越窄,但是滤波时的运算量也就越大;阶数越小,则过渡带宽就会增大,往往会导致高于截止频率的信号被一定程度的衰减。

3 效果分析

3.1 理论模型应用效果

设计理论模型为 3 套地层,采用主频为 40 Hz 的雷克子波激发、128 道接收,采样间隔为 4 ms,每道 512 个采样点。在模拟单炮地震记录中,面波区域有 3 组反射波,如图 1(a)所示。

对图 1(a)所示的地震记录,经三级小波分解后,进行面波滤除处理,处理结果如图 1(b)所示,面波得到较好的衰减;图 1(c)为模拟单炮记录与

处理后单炮记录的差值结果,在滤除面波的同时,基本不影响有效反射波,表明本方法去噪效果好,保真度较高。

3.2 实际地震资料应用效果

利用本文方法,对低频可控震源采集资料进行处理。图 2(a)为原始单炮地震记录,从图中可以看出,该记录中含有较强的面波。图 2(b)是采用本方法进行面波衰减的结果,图 2(c)为原始单炮地震记录与面波衰减处理结果的差值,即分离出的面波成分。从处理结果可以看出,该方法对面波的压制效果好,且未损伤低频有效信号。

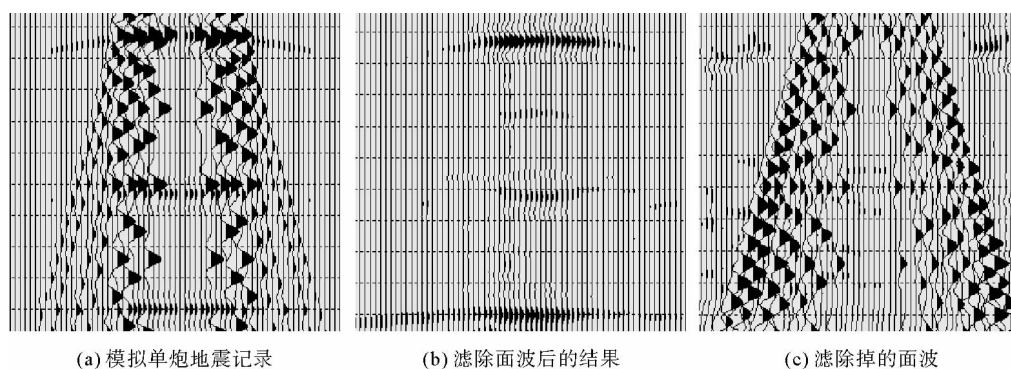


图 1 模拟单炮地震记录处理分析

Fig. 1 Simulation record processing effect

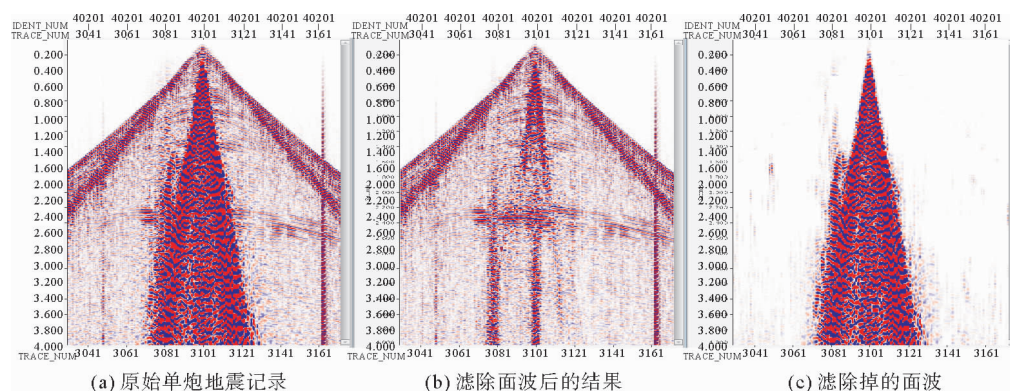


图 2 实际资料压制面波效果分析

Fig. 2 Actual seismic data suppressing effect

采用常规的面波压制方法与本文方法,获得 2 套面波压制后的地震数据,经统一的流程与参数进行处理,叠加结果如图 3 所示。图 3(a)为常规方法处理结果,图 3(b)为本文方法处理结果,

从图中可以看出,2 种方法对面波压制都较彻底,但图 3(b)所示剖面的低频信息丰富、能量强,信噪比较高。所以,采用本文方法压制面波,能较好地保护低频有效信息。

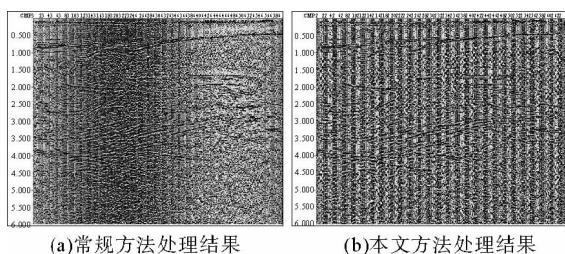


图3 叠加剖面对比

Fig.3 Stack section comparison

4 结论

本文针对低频面波噪声与低频有效信号在小波域内的不同特性,通过二维小波变换逐级分解地震数据,然后在含面波成分的低频高波数分量中进行高通滤波及时延补偿,最后对数据进行重构,实现了对低频面波的压制。采用该方法对理论模拟记录及实际资料进行去噪处理,可以有效地压制面波干扰,且不影响低频有效信号,达到提高分辨率和信噪比的目的。

SURFACE WAVE SUPPRESSION TECHNOLOGY BASED ON TWO-DIMENSIONAL WAVELET TRANSFORM

ZHU Libin¹, MO Yangang², WANG Yanchun^{1*}, MA Bin²

(1 China University of Geosciences (Beijing) Institute of Geophysics and Information Technology, Beijing 100083, China;

2 Sinopec Geophysical Corporation ShengLi Branch, Donying 257100, Shandong, China)

Abstract: Owing to the limitation of the conventional Fourier transform filtering and FK filtering methods in suppressing surface wave, we provided in this paper a surface wave suppression method based on two-dimensional wavelet transforms and the basic characteristics of the wavelet. Upon the basis of comparative analysis of various types of wavelet, we selected one from the others for low frequency surface wave suppression. Through the two-dimensional wavelet, decomposition can be used to convert seismic data into the four dimensional domains of time, space, frequency and wave number, and then conduct a high-pass filtering to the low frequency and high wave number component. As the result, reconstruction of seismic data and processing after the suppression of surface wave results are obtained. The theoretical simulation of the record and low frequency seismic data processing show that the denoising is effective. It can protect the low frequency effect wave effectively during the process to suppress the low frequency wave at the same time.

Key words: two-dimensional wavelet transform; seismic data; surface wave; noise suppression

参考文献:

- [1] Liu Y, Liu C, Wang D. A 1D time-varying median filter for seismic random, spike-like noise elimination[J]. *Geophysics*, 2009, 74(1): 17-24.
- [2] Liu G C, Chen X H, Li J Y, et al. Seismic noise attenuation using nonstationary polynomial fitting[J]. *Applied Geophysics*, 2011, 8(1): 18-26.
- [3] Lu W. Adaptive noise attenuation of seismic images based on singular value decomposition and texture direction detection[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2006, 3(1): 28-34.
- [4] 黄维清,王遂正,张 华. 基于二维小波变换的面波分离技术研究[J]. *山东科技大学学报:自然科学版*, 2007, 26(2): 20-23.
- [5] Marcilio Castro de Matos, Paulo Léo Manassi Osório. Wavelet Transform Filtering in the 1D and 2D for Ground Roll Suppression [J]. *SEG Expanded Abstract*, 2002: 2245-2248.
- [6] 李彩芹,张 华. 小波变换与 F-K 联合滤波在面波分离中的应用[J]. *中国煤田地质*, 2007, 19(4): 60-61.