

应用同步挤压小波变换去除面波

刘 哈 张建中* 黄忠来

(中国海洋大学海洋地球科学学院,海底科学与探测技术教育部重点实验室,山东青岛 266100)

刘哈,张建中,黄忠来.应用同步挤压小波变换去除面波.石油地球物理勘探,2016,51(1):71-79.

摘要 同步挤压小波变换(SWT)是一种新的连续可逆时频分析方法,具有较高的时间和频率分辨率,利用该变换可去除地震资料中的面波。将时间域地震记录变换到时频域,在时频域准确识别面波区域并切除,再将切除面波后时频域信号反变换到时间域,就得到去除了面波的地震记录。理论模型合成数据和实测资料的处理结果表明:该变换可以有效去除面波而不损失有效反射波,且效果优于连续小波变换、S变换和 $f-k$ 滤波等方法。

关键词 同步挤压小波变换 时频分析 消除面波

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.01.010

1 引言

现有压制面波的方法主要根据面波与有效波的频率、速度、时频特征的差异去除面波^[1-3]。根据面波和有效波频率的差异压制面波的方法有低截频、高通滤波、带通滤波等,这些方法在去除面波的同时也会损失低频有效信号。根据视速度差异压制面波的方法有 $f-k$ 滤波和 $\tau-p$ 变换等; $f-k$ 滤波要求数据必须空间规则采样,而且滤波窗口难选取,还会使干扰背景出现断断续续的短轴,即干扰背景“蚯蚓化”现象,降低了地震剖面的横向分辨率;而面波的速度和频率随时间的推移发生变化,通过 $\tau-p$ 变换后面波数据不是一个点,从而不能完全去除面波^[2,3]。

随着时频分析方法的发展,将含面波记录变换到时频域,利用面波和有效波在时频域的差异去除面波,取得了良好的应用效果。常用的时频变换方法有:短时傅里叶变换(STFT)、连续小波变换(CWT)和S变换(ST)等。其中,STFT因其窗口长度固定,而无法根据信号的频率变换自动调节分辨率,对非平稳信号处理效果较差^[4];CWT通过对信号的时间—尺度分析,具有多分辨率分析的特点,但小波基难以选择,时间—尺度域的变换结果不直

观^[5];S变换介于前两者之间,结合了两种方法的优势,可自适应调节分辨率且其逆变换是傅里叶变换,具有无损可逆性^[6]。近年来,也出现了一些基于时频差异的新的面波压制方法,如曲波变换法^[7]、基于经验模态分解(EMD)的 $f-k$ 域面波压制^[8]等方法,均取得了较好的效果。

同步挤压小波变换(synchrosqueezing wavelet transform, SWT)是一种新的时频分析方法,它以小波变换为基础,通过对小波系数进行重组,从中提取时频曲线,因此具有极高的精度和频率分辨率^[9]。同步挤压变换最初应用于音频信号分析中,目前已应用于心电图分析^[10]、机械故障诊断^[11]、气候动力学^[12]等领域,在地球物理领域中的研究和应用较少^[13,14]。本文应用同步挤压小波变换去除地震记录中的面波,并与其他时频方法进行比较,表明同步挤压小波变换去除面波效果良好。

2 同步挤压小波变换

一个时变信号一般可以分解为多个本征函数的叠加,即信号 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos[\theta_k(t)] + e(t) \quad (1)$$

式中: $A_k(t)$ 为第 k 个分量的瞬时振幅; $\theta_k(t)$ 为第 k

* 山东省青岛市崂山区松岭路238号中国海洋大学海洋地球科学学院,266100。Email: zhangjz@ouc.edu.cn

本文于2014年9月30日收到,最终修改稿于2015年10月26日收到。

本研究受国家自然科学基金项目(41074077,41230318)和高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20130132110023)资助。

个分量的瞬时相位； $e(t)$ 为噪声或误差； K 为信号可分解的分量数。同步挤压变换是在其他时频变换（如STFT、CWT、ST）基础上，根据信号各组成分量的时频特征，压缩时频曲线，达到提高时间和空间分辨率的目的。本文介绍并应用基于连续小波变换的同步挤压法，即同步挤压小波变换去除面波。

同步挤压小波变换首先对信号 $f(t)$ 进行连续小波变换(CWT)，得到小波系数 $W_f(a, b)$ ，计算公式为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中： a 和 b 分别为尺度和平移因子； ψ 为小波母函数；“*”表示共轭。根据Plancherel定理，在频域的等价变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{1}{\sqrt{a}} \hat{f}(\xi) \hat{\psi}^*(a\xi) e^{i b \xi} d\xi \quad (3)$$

式中： ξ 是圆频率； $\hat{f}(\xi)$ 、 $\hat{\psi}(\xi)$ 分别是 $f(t)$ 、 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。考虑简单的谐波函数 $f(t) = A \cos(\omega t)$ ，其傅里叶变换为 $\hat{f}(\xi) = \pi A [\delta(\xi - \omega) + \delta(\xi + \omega)]$ ，根据式(3)，其连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{A}{2} \int \frac{1}{\sqrt{a}} [\delta(\xi - \omega) + \delta(\xi + \omega)] \times \hat{\psi}^*(a\xi) e^{i b \xi} d\xi = \frac{A}{2\sqrt{a}} \hat{\psi}^*(a\omega) e^{i b \omega} \quad (4)$$

若 $\hat{\psi}(\xi)$ 在 $\xi = \omega_0$ 处集中分布，则小波系数 $W_f(a, b)$ 将会在尺度 $a = \frac{\omega_0}{\omega}$ 附近分布，在时频图上，小波系数谱分布范围较宽且边界较模糊、分辨率较低。

通过对小波系数求导可初步估计瞬时频率，即

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} \frac{-j \partial_b W_f(a, b)}{W_f(a, b)} & W_f(a, b) \neq 0 \\ \infty & W_f(a, b) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由时间—尺度平面 (b, a) 转化到时间—频率平面 $[b, \omega_f(a, b)]$ 。将任一中心频率 ω_i 附近区间

$[\omega_i - \frac{1}{2} \Delta\omega, \omega_i + \frac{1}{2} \Delta\omega]$ 的值挤压到中心频率 ω_i 上，获得同步挤压变换量值 $T_f(\omega_i, b)$ ，可达到提高分辨率的目的。由于 a, b, ω 值均离散， $a_i - a_{i-1} = (\Delta a)_i$ ，同步挤压变量可表示为

$$T_f(\omega_i, b) = \sum_{a_i: |\omega_f(a, b) - \omega_i| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_f(a, b) a_i^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_i \quad (6)$$

同步挤压小波反变换为

$$\begin{aligned} f(t) &= \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \left(\int_0^{+\infty} W_f(a, b) a^{-\frac{3}{2}} da \right) \right] \\ &= \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_i W_f(a, b) a_i^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_i \right] \\ &= \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_i T_f(\omega_i, b) (\Delta\omega) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $C_\psi^{-1} = \int_0^{+\infty} \varphi^*(\xi) \frac{d\xi}{\xi}$ ， $\varphi^*(\xi)$ 为小波函数共轭的傅里叶变换； a_i 为离散的尺度； i 为尺度个数； Re 表示取实部。通过反变换可重构信号 $f(t)$ ，且同步挤压小波变换是一种正反无损变换^[12]。

3 合成信号的不同变换结果比较

下面用一个合成信号说明SWT变换的特点，并与CWT和S变换进行比较。设计的合成信号 $f(t)$ 如图1中实线所示。它由三种不同频率的信号叠加而成： $0 \sim 0.7s$ 为20Hz余弦信号 $f_1(t) = \cos(40\pi t)$ ， $0.3 \sim 1s$ 为30Hz余弦信号 $f_2(t) = \cos(60\pi t)$ ， $0 \sim 1s$ 为频率在80Hz震荡的余弦调频信号 $f_3(t) = \cos[160\pi t - 5\cos(30t)]$ ，这三种信号如图5所示。同时，对合成信号加入信噪比(SNR)为3dB的高斯白噪声，加噪信号如图1中虚线所示。其中信噪比的计算公式为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{I^2}{(I_n - I)^2} \quad (8)$$

式中： I 为纯信号； I_n 为加噪信号。

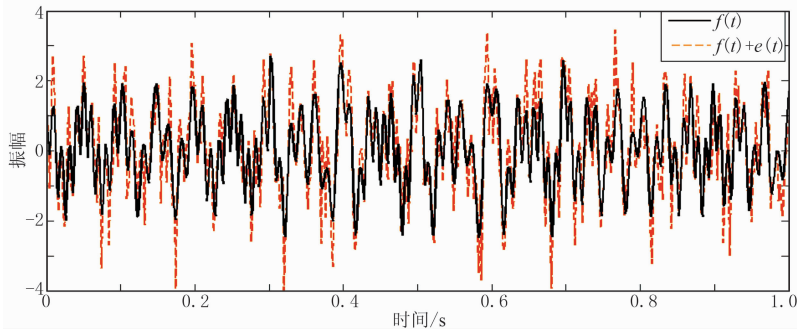


图1 合成理论信号 $f(t)$ 及其加噪信号 $f(t)+e(t)$

对原信号进行时频分析,分别做 ST、CWT 和 SWT 变换,处理结果如图 2 所示。由图可见,三种变换均能分辨信号三个分量的频率,其中,ST 和 CWT 结果在频率和时间方向上能量团较发散、较模糊;与之相比,SWT 能量团在频率和时间方向上更聚焦、更清晰。可见,同步挤压小波变换比 ST 和 CWT 具有较高的频率分辨率和时间分辨率,能够准确识别信号的瞬时频率。对加噪后的信号做同

样处理,结果如图 3 所示。由图可见,受噪声影响三种变换结果都有一定程度的变化,ST 中的高频噪声干扰严重,使得 80Hz 的余弦调频信号很难被识别;CWT 中高频噪声和低频信号能量都比较弱,也不利于识别高频信号;而 SWT 中高频噪声能量弱,可识别出 80Hz 频率的高频信号。可见,同步挤压小波变换除具有高分辨率以外,还具有一定的抗噪能力。

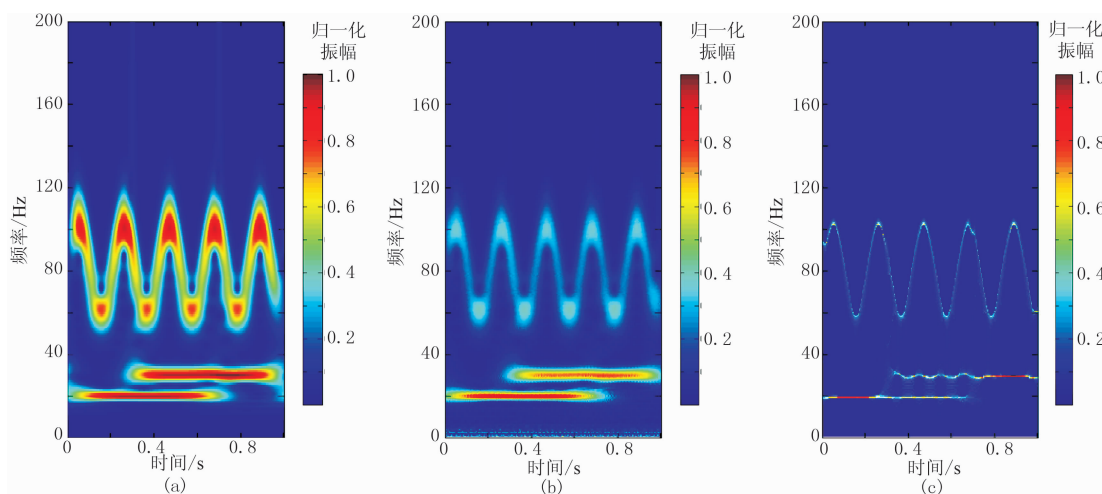


图 2 合成理论信号不同方法的时频谱
(a)为 ST; (b)为 CWT; (c)为 SWT

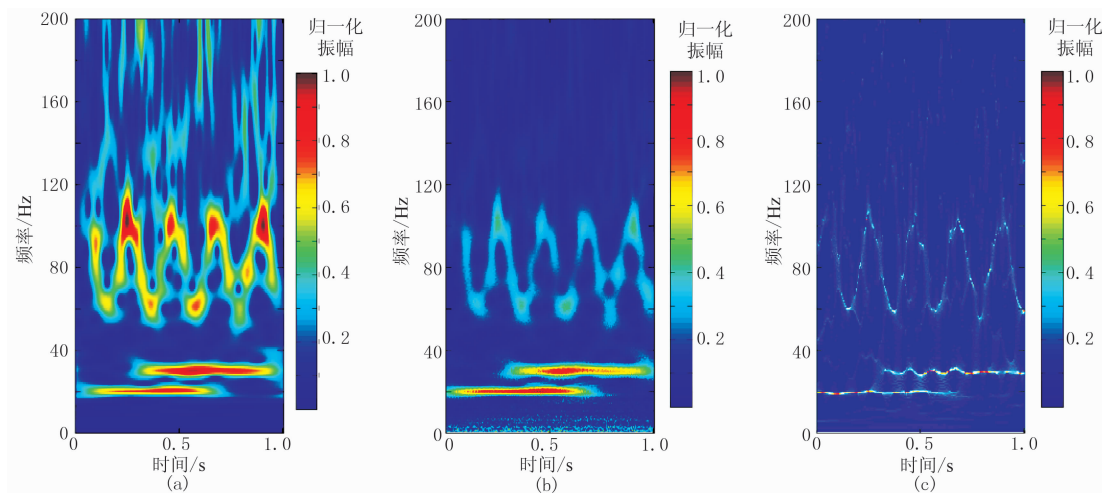


图 3 加噪理论信号不同方法的时频谱
(a)为 ST; (b)为 CWT; (c)为 SWT

同步挤压小波变换是一种可逆变换,即通过反变换可完全恢复原始信号。分别用 ST、CWT 和 SWT 对各自正变换结果进行反变换,结果如图 4 所示。三种反变换结果即重构信号与原信号基本重合,重构误差都很小。用均方差(MSE)衡量误差大小,即

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |f(t) - \hat{f}(t)|^2 \quad (9)$$

式中: $f(t)$ 是原信号; $\hat{f}(t)$ 是反变换后的信号; N 为采用点个数。计算的 ST、CWT 和 SWT 的均方差分别为 9.38×10^{-6} 、 6.62×10^{-6} 和 5.84×10^{-6} 。可见,SWT 反变换重构信号精度高。此外,通过

SWT 时频图,选取一定频率所在区域,可以提取信号的各个组成分量。在图 2c 中,选取 18~22、27~32 和 55~105Hz 频段提取信号 $f(t)$ 的各分量,结果如图 5 所示。由图可见,20Hz 和 30Hz 余弦信号

两者频率相近,在频率重组挤压时受到影响,提取信号在 0.3~0.7s 与原信号稍有差异;80Hz 调频信号无干扰,提取结果与原分量基本无差异,总体上提取各分量效果较好。

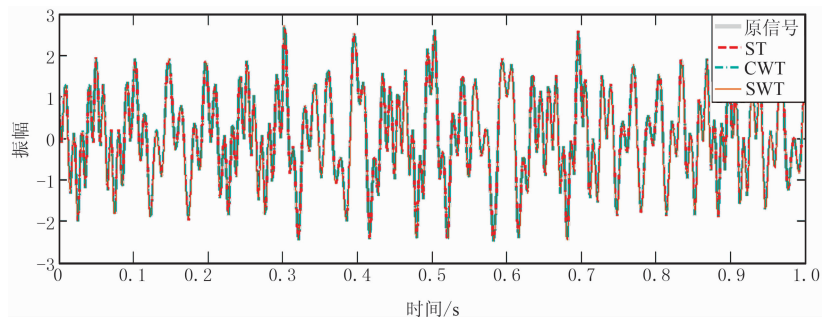


图 4 原始信号及 ST、CWT、SWT 反变换结果

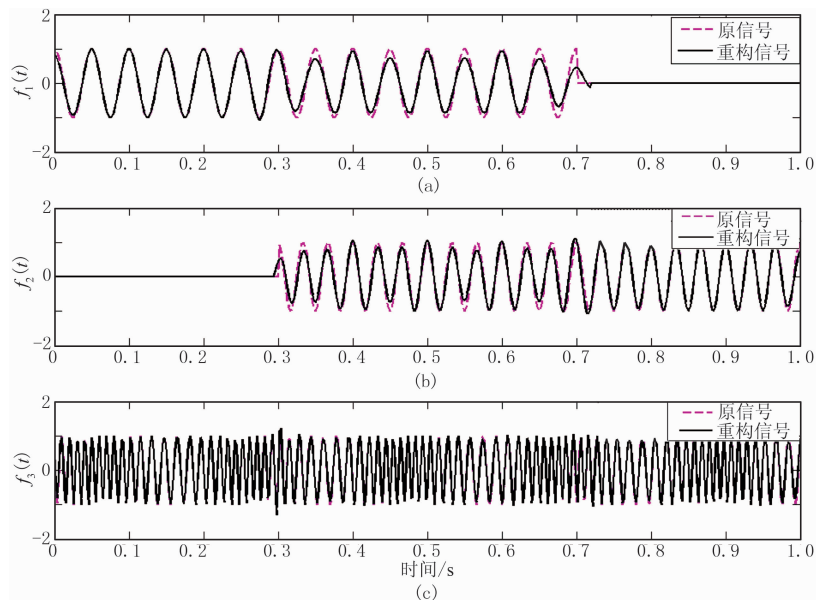


图 5 SWT 法提取的三个分量的调频信号

(a)20Hz; (b)30Hz; (c)80Hz

4 同步挤压小波变换去除面波

利用面波与有效波的频率差异,通过时频分析方法把时间域地震记录转化到时频域后,可以将面波和有效波分开。同步挤压小波变换作为一种具有严谨数学理论基础的新的时频分析方法,具有极高的时频分辨率和一定的抗噪能力,适用于去除地震资料中的面波。用该方法对含面波的地震道进行处理时,在时频域中准确识别出面波区域后,对面波区域做赋零值处理,再反变换到时间域,即可得到去除面波后的地震记录,且未损失有效波。对整个地震

记录去面波的步骤如下:

(1)根据面波和有效波在时间—空间域的差异,将地震记录分为两部分:含面波和不含面波部分,仅对含面波数据进行处理,保护不含面波数据;

(2)对含面波地震道用 SWT 算法做时频分析,找出面波在时频图上所在的频率段 $[f_1, f_2]$ 和时间段 $[t_1, t_2]$,将该区域赋零值,再将该时频域信号反变换到时间域,即得到去面波后的信号;

(3)对含面波道按步骤(2)依次进行处理;

(4)将无面波部分和已去除面波的地震记录叠加,得到去面波后的地震记录。

为验证方法的正确性和有效性,对模拟记录和

实际资料进行处理。图 6 是用全波场正演软件模拟的三层水平地层模型含面波单炮记录。震源是主频为 30Hz 的雷克子波,共 101 道,道间距为 50m,采样间隔为 4ms,记录长度为 5.0s。由图可见明显的面波干扰,且频散严重。图 7 是图 6 中第 54 道去面波前后的地震记录及同步挤压小波变换的时频谱。由图中可见,在 SWT 时频谱上,面波和有效波得到有效分离(图 7b),将面波区域(图 7b 方框内)赋零值后再进行反 SWT 变换,较好地去除了面波(图 7c)。依次对含面波的第 38~63 道地震记录进行处理,即可去除地震记录中的面波。图 8 为去除面波后的模拟记录。由图中可见,压制面波效果良好。

图 9 为 A 区含面波的实际地震记录,共 120 道,采样间隔为 2ms,记录长度为 3.0s,其中第 55~75

道含有面波。由图中可见,面波的存在对浅、中层反射波产生严重干扰。图 10 为图 9 数据两道地震记录及其频谱,由图 10b、图 10d 可以看出,在 10Hz 以下,面波能量较强(方框内)。图 11 和图 12 分别为两道记录 ST、CWT 和 SWT 变换的时频谱。可以看出,在 10Hz 以下,面波在二维时频谱中低频范围内沿时间轴成带状分布(方框内),而有效波沿频率轴成带状分布;与 ST 和 CWT 变换结果相比,SWT 变换通过挤压后,在频率方向上面波能量团更聚集,面波范围更精确,更易识别(图 11c 和图 12c 中的方框内)。SWT 变换比 ST 和 CWT 变换能更好地将面波和有效波分离开来(图 12c 中椭圆与方框内)。将识别的面波区域(方框内)做赋零值处理,就去掉了面波,再把去掉面波的时频信号进行

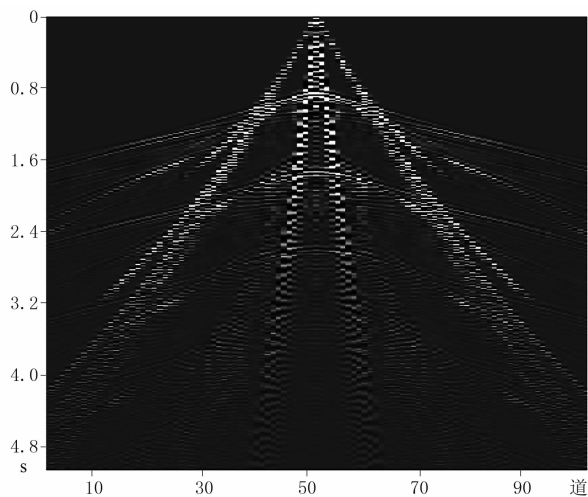


图 6 模拟单炮记录

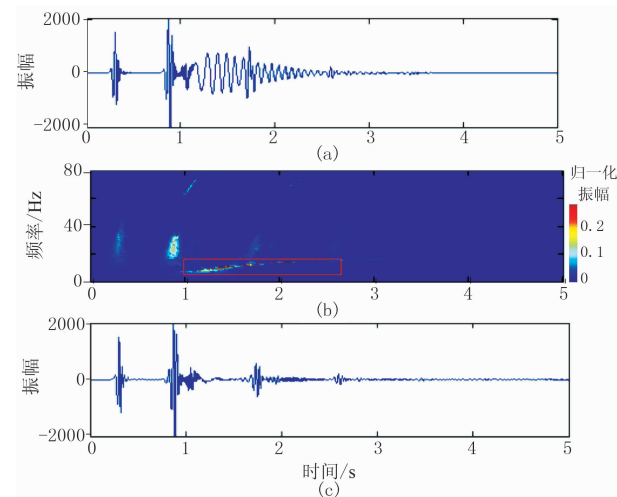


图 7 图 6 第 54 道地震记录(a)、SWT 时频谱(b)及去除面波后的记录(c)

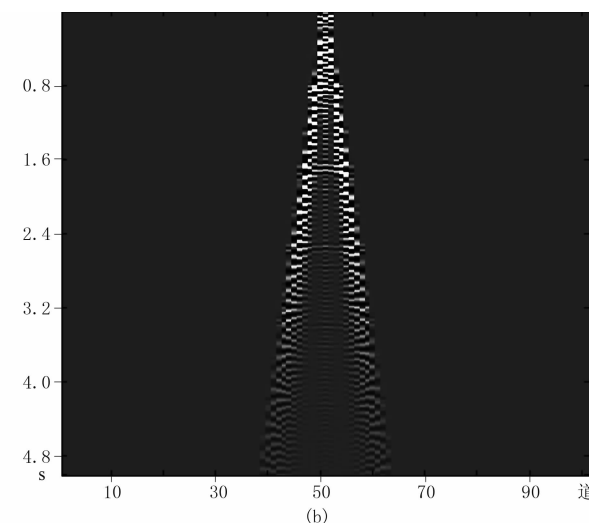
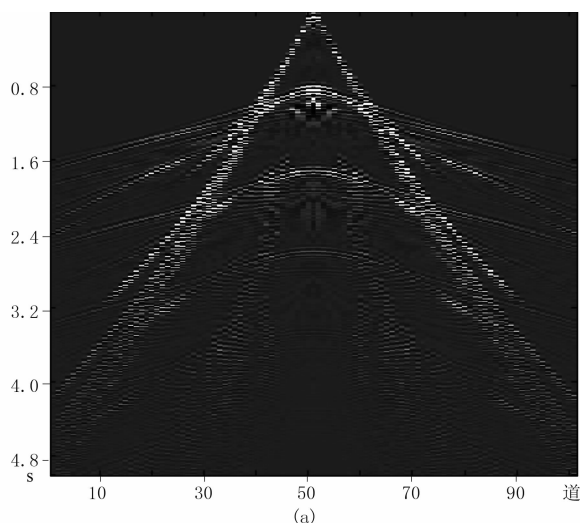


图 8 图 6 去除面波后的模拟记录(a)及去除的面波(b)

反变换,即可得到没有面波的地震记录。图 13 为第 60 道记录 SWT 去面波后的地震记录及其频谱。图 13b 与图 10b 相比,面波所占的低频成分的能量得到压制,其有效波所占的低频成分的能量并没有损失。

图 14 为图 9 数据不同方法去除面波后的地震记录。由图 14a~图 14c 可以看出,被面波掩盖的有效波突显出来,同相轴连续性增强,反射波更清晰,SWT 比 CWT 和 ST 的效果更好。相比图 14e、图 14f 与图 14d 可以看出,CWT 和 ST 法去除的面波记录中含有一些更强的反射波同相轴(图 14e、图 14f 方框中),即有效波成分,这主要是由于面波在 CWT 的时频谱中能量较发散,使得一些地震记

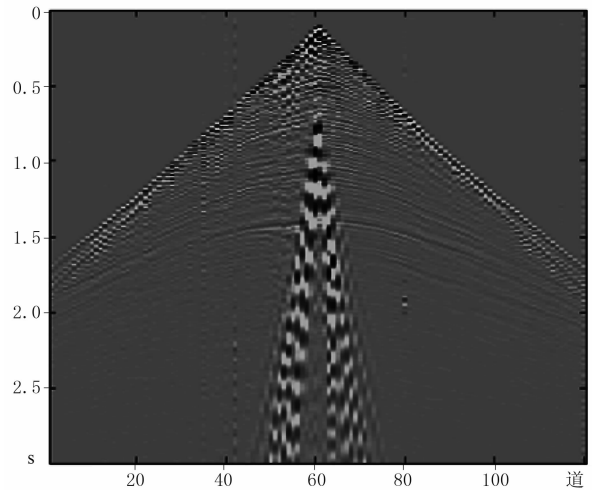


图 9 A 区含面波的地震记录

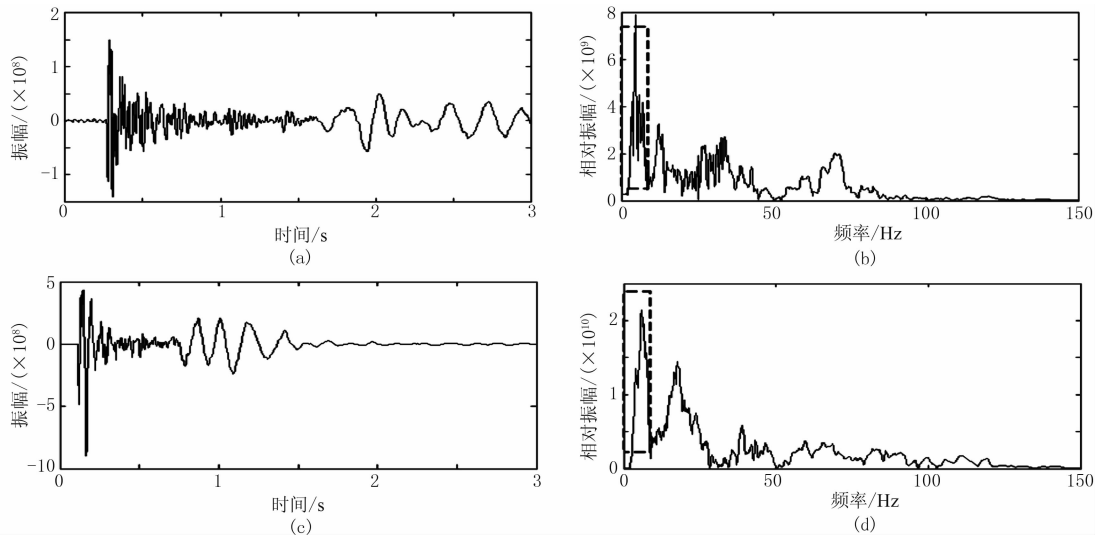


图 10 图 9 数据两道地震记录(左)及其频谱(右)
(a)、(b)为第 55 道; (c)、(d)为第 60 道

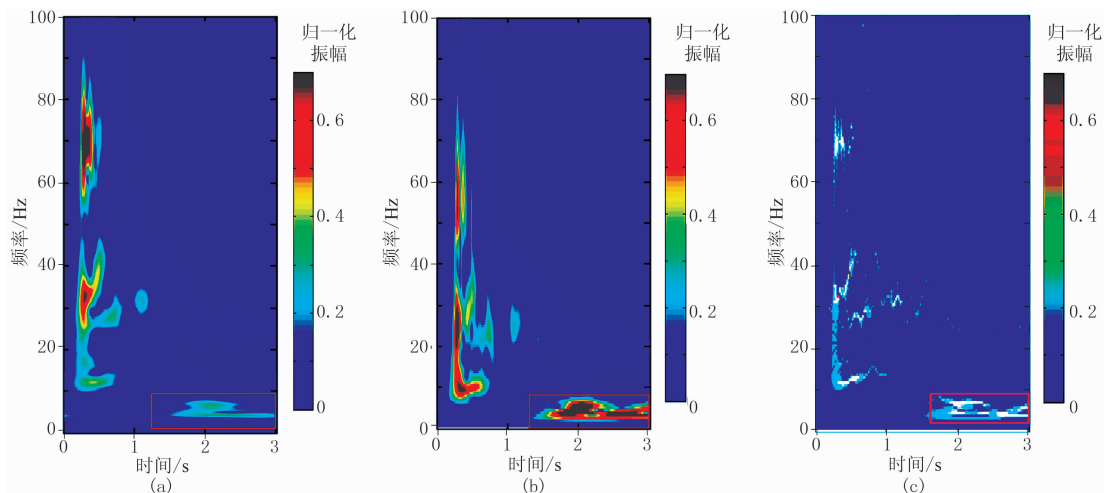


图 11 第 55 道记录不同变换方法的时频谱
(a)为 ST; (b)为 CWT; (c)为 SWT

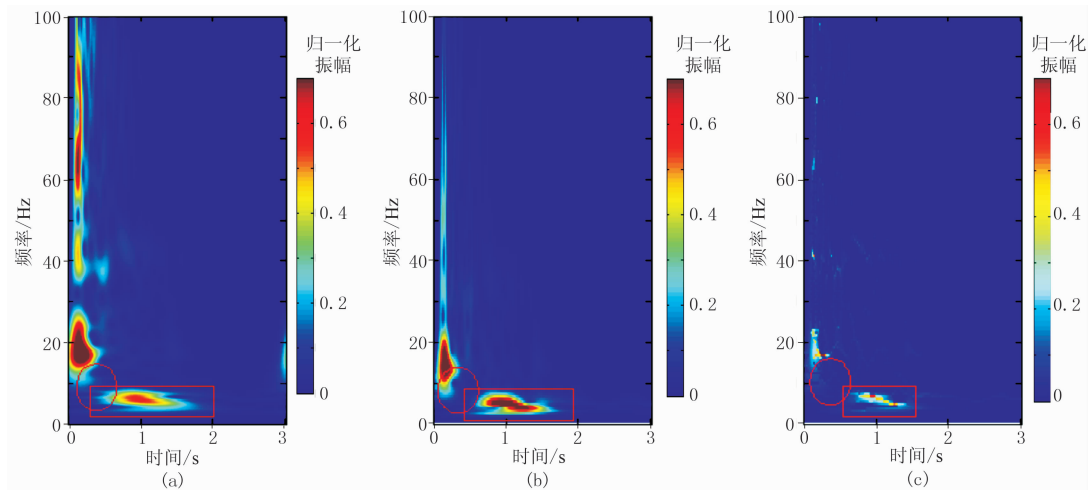


图 12 第 60 道记录不同变换方法的时频谱
(a)为 ST; (b)为 CWT; (c)为 SWT

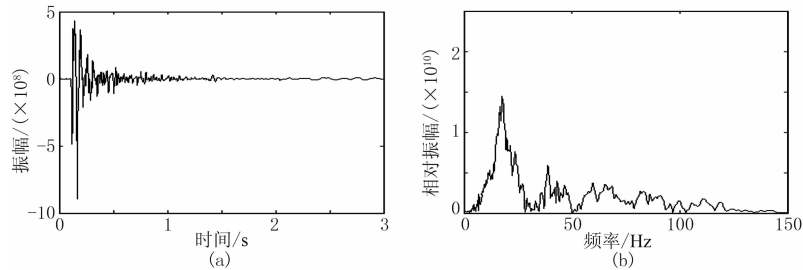


图 13 SWT 法去除面波后的第 60 道地震记录(a)及其频谱(b)

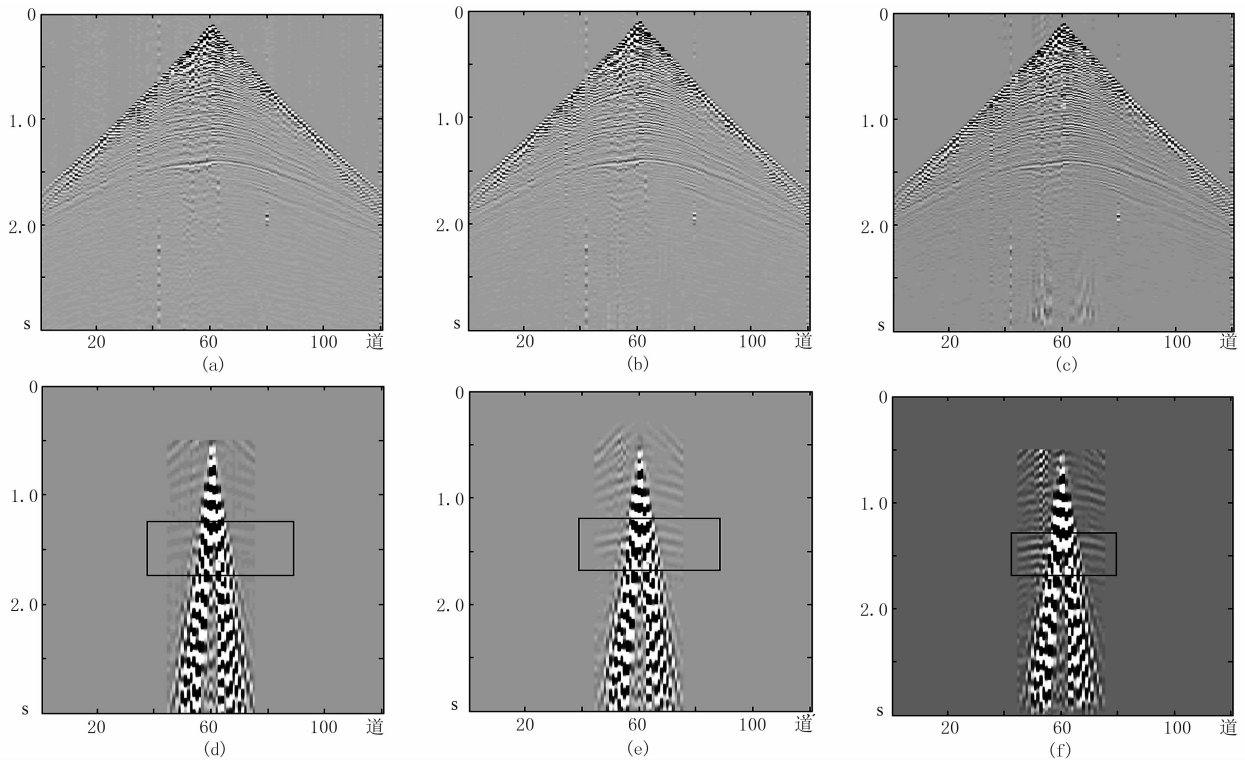


图 14 图 9 数据不同方法去除面波后的地震记录(上)及去除的面波(下)
(a)、(d)为 SWT; (b)、(e)为 CWT; (c)、(f)为 ST

录道的面波和有效波分界不明显,圈定的面波区域包含了一些能量弱的有效波。

图15为图9数据 $f-k$ 滤波结果。由图可以看出,面波和有效波在频率—波数谱中的低波数部分有重叠,因此滤波窗口难选取。根据面波的低频、低速、强能量特点,黑色矩形区域基本为圈定的面波区

域(图15a)。 $f-k$ 滤波后面波仍有残留(图15b中椭圆区域),且在去除面波的同时也去除了部分有效波。可见,与 $f-k$ 滤波方法相比,本文的 SWT 方法压制面波的效果更好。由于只对含面波地震记录做处理,所以最大限度地保护了有效波,且按道依次处理,虽然计算效率较低,但避免了空间假频的产生。

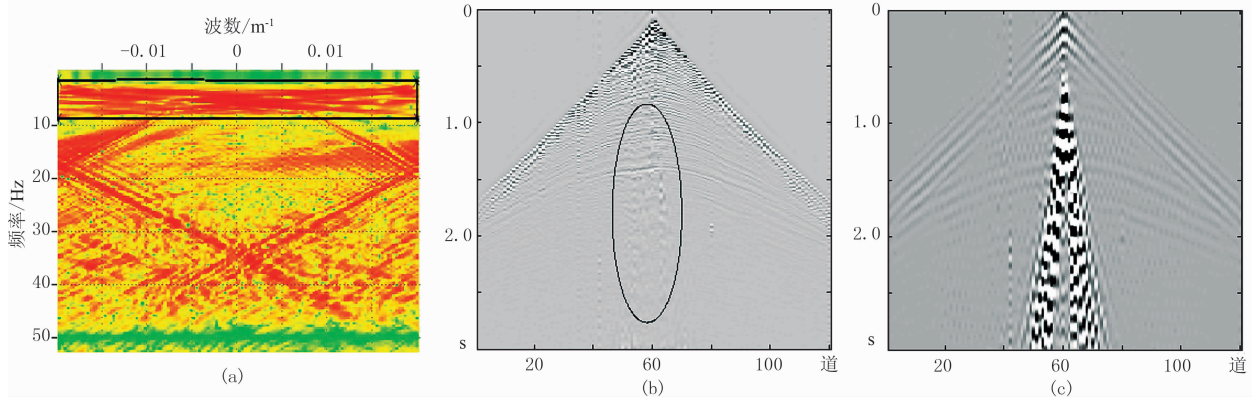


图15 图9数据 $f-k$ 滤波结果

(a)为 $f-k$ 谱; (b)为 $f-k$ 滤波去除面波后地震记录; (c)为去除的面波

5 结论

(1)同步挤压小波变换是一种高精度、高分辨率的时频变换方法,且是一种可逆无损变换,能很好地分离不同频谱特性的信号。

(2)由于面波与有效反射波频率成分的差异,同步挤压小波变换能从地震资料中分离出面波,且去除面波的效果优于CWT、ST等时频变换方法及 $f-k$ 滤波方法。

(3)由于同步挤压小波变换同时具有时频高分辨率,因此在解决基于时频率分析的地球物理问题时具有显著优势。

参考文献

- [1] 王德营,李振春,董烈乾. Shearlet域和TT域联合压制面波方法. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 53-60. Wang Deying, Li Zhenchun, Dong Lieqian. Surface wave joint suppression based on Shearlet transformation and time-time transformation. OGP, 2014, 49(1): 53-60.
- [2] Calbraith J N, Wiggins R A. Characteristic of optimum multi-channel stacking filters. Geophysics, 1968, 33(1): 36-48.
- [3] 张军华,吕宁,田连玉等. 地震资料去噪方法技术综合评述. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 546-553. Zhang Junhua, Lü Ning, Tian Lianyu et al. An over-

- view of the methods and techniques for seismic data noise attenuation. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 546-553.
- [4] 刘喜武,张宁,勾永峰等. 地震勘探信号时频分析方法对比与应用分析. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 743-753. Liu Xiwu, Zhang Ning, Gou Yongfeng et al. The comparison and application of time-frequency analysis methods to seismic signal. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 743-753.
- [5] 陈文超,高静怀,包乾宗. 基于连续小波变换的自适应面波压制方法. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2854-2861. Chen Wenchao, Gao Jinghuai, Bao Qianzong. Adaptive attenuation of ground roll via continuous wavelet transform. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11): 2854-2861.
- [6] 赵淑红,朱光明. S变换时频滤波去噪方法. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 402-406. Zhao Shuhong, Zhu Guangming. S transform time-frequency filtering denoising method. OGP, 2007, 42(4): 402-406.
- [7] 董烈乾,李振春,王德营等. 第二代Curvelet变换压制面波方法. 石油地球物理勘探, 2011, 46(6): 897-904. Dong Lieqian, Li Zhenchun, Wang Deying et al. Ground-roll suppression based on the second generation Curvelet transform. OGP, 2011, 46(6): 897-904.
- [8] 董烈乾,李振春,杨少春等. 基于经验模态分解的 $f-x$ 域面波压制方法. 石油地球物理勘探, 2013, 48(1): 42-48. Dong Lieqian, Li Zhenchun, Yang Shaochun et al. A

- method of f - x domain surface wave suppression based on empirical mode decomposition. OGP, 2013, 48(1): 42-48.
- [9] Daubechies I, Lu J, Wu H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [10] Wu H. Instantaneous frequency and wave shape functions. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2013, 35(2): 181-199.
- [11] Li C, Liang M. Time-frequency signal analysis for gearbox fault diagnosis using a generalized synchrosqueezing transform. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 26(1): 205-217.
- [12] Thakur G, Brevdo E, Fućkar N S et al. The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: robustness properties and new paleoclimate applications. Signal Processing, 2013, 93(5): 1079-1094.
- [13] Wang P, Gao J, Wang Z. Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing transform. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2042-2044.
- [14] Herrera R H, Han J, van der Baan M. Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis. Geophysics, 2014, 79(3): 55-64.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



刘哈 硕士研究生,1989 年生;2013 年毕业于中国海洋大学地球信息科学与技术专业,获学士学位;现在该校攻读地球探测与信息技术专业硕士学位,主要从事地震勘探资料处理方法研究。

· 消息 ·

欢 迎 订 阅

欢迎您订阅 2016 年《石油地球物理勘探》!

《石油地球物理勘探》是一份创刊于 1966 年、伴随着我国石油工业的飞速发展而迅速成长起来的优秀科技期刊。她于 1992 年、1997 年蝉联全国优秀科技期刊一等奖;1999 年荣获首届国家期刊奖;2001 年进入中国期刊方阵,获“双高期刊”荣誉;2003 年、2005 年蝉联第二届和第三届国家期刊奖“百种重点期刊”;2008 年获“中国精品科技期刊”称号;2009 年获“新中国 60 年有影响力期刊”称号;2012 年荣获“中国国际影响力优秀学术期刊”荣誉;2013 年、2015 年分别入选全国“百强科技期刊”。多年来一直为美国工程引文索引(EI)收录的源刊。

《石油地球物理勘探》主要报道内容有石油物探的新理论、新方法、新技术、新经验,范围涉及地震资料采集、处理、综合解释、非地震勘探、相关理论及方法的综述,为从事石油勘探及相关领域的广大科技和生产人员服务。该刊为双月刊,每期定价 60 元,全年共 6 期,订价 360 元。

本刊可通过银行汇款和邮局汇款订阅。为保证您能按时收到所订刊物,请将您的详细地址、单位、邮编、电话等内容告知编辑部。通过银行汇款者请在汇票上注明“订刊”字样。

订户可登录本刊网站 <http://www.ogp-cn.com> 下载订单。

银行汇款请寄

收款单位:中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司

开户银行:中国建设银行股份有限公司涿州物探分理处 银行帐号:13001666209050000633

邮局汇款和订单请寄

河北省涿州市 11 号信箱《石油地球物理勘探》编辑部 邮编:072751

联系方式

《石油地球物理勘探》编辑部 谷双双 电话:(0312)3739320;email:ogpfxq@sina.com

通过 email 订刊的各位,请在汇款后发邮件确认。