

doi:10.11720/wtyht.2015.1.18
刁瑞,单联瑜,尚新民,等.微地震监测数据时频域去噪方法[J].物探与化探,2015,39(1):112-117.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.18
Diao R,Shan L Y,Shang X M,et al.The denoising method for microseismic monitoring data in time-frequency domain[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(1):112-117.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.18

微地震监测数据时频域去噪方法

刁瑞,单联瑜,尚新民,芮拥军,赵翠霞
(中国石化胜利油田分公司 物探研究院,山东 东营 257022)

摘 要: 原始微地震监测数据的信噪比相对较低,监测数据品质决定了微地震有效信号的定位精度,提高监测数据信噪比是微地震处理的关键环节。改进 S 变换对窗函数进行能量归一化处理,解决了常规 S 变换时频谱中频率定位不准的问题,具有更高的时频分辨率精度。利用改进 S 变换的良好二维时频域聚焦特性,设计时变的二维时频域滤波器,将时频域去噪方法引入到微地震监测数据的去噪处理中。利用改进 S 变换对微地震监测数据进行时频分析,能够更加准确地分析不同信号分量的振幅能量以及频率随时间的变化情况,实现微地震有效信号分量与噪声干扰分量的有效分离。通过合成模拟信号和实际井中微地震监测数据的试处理 and 对比分析,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: S 变换;时变滤波;去噪方法;模拟信号;微地震数据

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)01-0112-6

时频分析的基本思想是设计时间和频率的联合函数,同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度,是分析非平稳信号的有力工具^[1]。Stockwell 等^[2]提出的 S 变换继承并发展了短时傅里叶变换和连续小波变换,采用可变的高斯窗函数,时频分辨率随着频率发生变化,基本小波不需要满足容许性条件,并且 S 变换与傅里叶谱保持直接的联系。由于 S 变换的基本小波是固定不变的,使得 S 变换的应用受到限制,许多学者通过改进基本小波或窗函数得到了改进的 S 变换,并取得了良好的应用效果。Pinneagar 等^[3]将改造后的 S 变换应用于地震信号与含噪声非平稳信号的处理;高静怀等^[4]将改进 S 变换用于薄层的地震探测、有色噪声与信号的识别和预测砂岩储层;陈学华等^[5-7]利用改进 S 变换进行时频谱分解、油气储层低频阴影检测和油气识别等;刁瑞等^[8-10]将改进 S 变换与谱模拟方法相结合,应用于地震资料的高分辨率处理中。

原始微地震监测数据中噪声的类型多、能量强、分布范围广,微地震监测数据的信噪比相对较低。在微地震监测数据处理过程中,首先要提高微地震

监测数据的信噪比,然后才能进行微地震有效信号的准确定位。提高微地震监测数据的信噪比是微地震处理的关键环节,通常采用信号增强和噪声压制两种思路来消除微地震监测数据中的噪声,常用的经典去噪处理方法包括:中值滤波、多项式拟合、反褶积滤波、频率域滤波和时间域褶积滤波等^[11-15]。笔者利用改进 S 变换的良好二维时频域聚焦特性,设计时变的二维时频域滤波器,将其引入到微地震监测数据的有效信号提取和噪声干扰压制中。基于改进 S 变换的二维时频域去噪方法具有多分辨率、去相关性和较高保真度,适应于低信噪比的非平稳信号。通过合成模拟信号和实际井中微地震监测数据的去噪效果对比分析,验证了基于改进 S 变换的二维时频域微地震去噪方法的可行性和有效性。

1 改进 S 变换

常规 S 变换的时频窗口能够随着频率尺度自适应地调整,具有较高的时频分辨率。但随着频率的增加,常规 S 变换^[6]的窗函数幅值会迅速增大,对时频谱的能量分布产生明显的加权效应,高频端出

现异常能量值。为解决时频谱中频率定位不准的问题,对常规 S 变换的窗函数进行能量归一化处理,实现提高时频分辨率精度的目的,改进 S 变换的窗函数为^[7]

$$w(t-\tau,f)=\left(\frac{|f|^p}{\pi\lambda}\right)^{1/4}\exp\left(\frac{-f^p(t-\tau)^2}{2\lambda}\right),\quad (1)$$

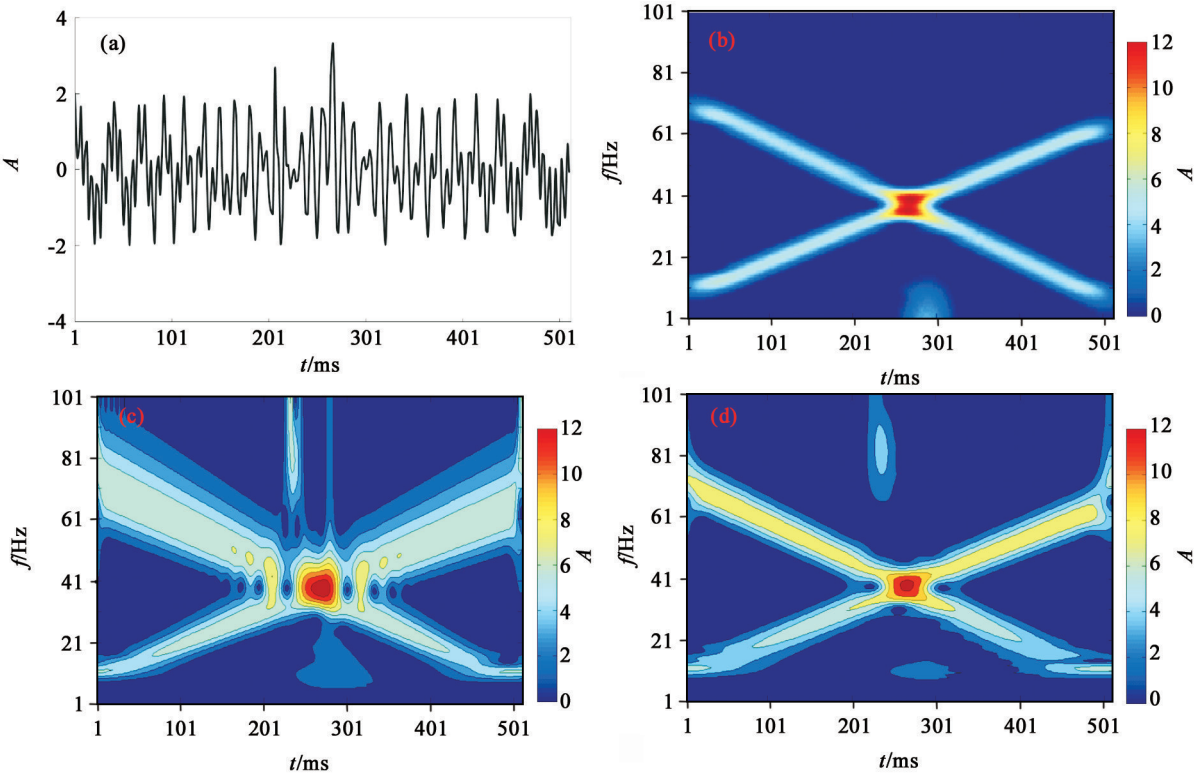
其中: f 为频率, t 为时间, τ 为窗函数的时间位置, λ 和 p 为用于调节窗函数的时间延续长度和衰减趋势, $\lambda>0,p>0$ 。微地震原始数据 $h(t)$ 的改进 S 变换的二维时频谱表达式为

$$S_{\text{GT}}(\tau,f)=\int_{-\infty}^{+\infty}h(t)\left(\frac{|f|^p}{\pi\lambda}\right)^{1/4}e^{\left(\frac{-f^p(t-\tau)^2}{2\lambda}\right)}e^{-i2\pi ft}dt,\quad (2)$$

式中: $h(t)$ 是微地震原始数据, $S_{\text{GT}}(\tau,f)$ 是微地震数据的时频谱。改进 S 变换的窗函数包络可以随着参数 λ 和 p 的不同而变化,根据实际应用的需要合理的选择参数 λ 和 p ,能够有效调节改进 S 变换的时频分辨率,具有较高的适应性和灵活性。

线性调频信号能够有效检验时频分析方法的时

频聚集性能,图 1a 为线性调频合成信号,合成信号由一个频率从低到高递增的线性调频信号、一个频率从高到低递减的线性调频信号、一个低频范围信号和一个高频范围信号分量叠加而成;图 1b 是短时傅里叶变换的时频谱,虽然能够识别出两个线性调频信号分量,但是高频信号分量却无法分辨,低频信号分量的分辨率也很低;图 1c 是 S 变换的时频谱,可以分辨出各个信号分量,其中的低频信号分量具有较高的频率分辨率,而高频信号分量具有较高的时间分辨率,具有类似多分辨率的特性,但是时频谱的分辨率整体较低;图 1d 是改进 S 变换的时频谱,各个信号分量都能清晰地分辨出来,在低频端时频分辨率仍然较高,而高频端的频率分辨率明显提高。通过对比图 1b、图 1c 和图 1d,改进 S 变换的时频谱具有较好的时频分辨率,合成信号中的低频端和高频端的信号分量能够清晰地分辨,两个线性调频信号的时频分辨率整体较高,对非平稳信号中不同频率信号分量有更强的识别能力。



a—合成信号;b—短时傅里叶变换时频谱;c—S 变换时频谱;d—改进 S 变换时频谱

图 1 不同时频分析方法的对比

2 时变二维时频域滤波器设计

原始微地震监测数据中包含声波、井场干扰、村镇车辆干扰和随机干扰等各种噪声,各类噪声分量在时间域和频率域内与微地震有效事件分量混叠在

一起,仅仅从时间域或频率域识别噪声比较困难。相对于在一维时间域或频率域分析,在二维时间—频率域对微地震原始数据进行时频分析,能够更好地区分有效信号分量和噪声分量频率随时间的变化规律。

根据微地震监测数据中有效信号的时频特征进行针对性的去噪处理。原始微地震监测数据可以表示为

$$h(t) = h_{\text{signal}}(t) + h_{\text{noise}}(t), \tag{3}$$

其中: $h(t)$ 为原始微地震监测数据; $h_{\text{signal}}(t)$ 为微地震中的有效信号分量; $h_{\text{noise}}(t)$ 为微地震监测数据中的噪声分量。对式(3)进行改进 S 变换处理,可以得到二维时频域的表达式

$$H(\tau, f) = H_{\text{signal}}(\tau, f) + H_{\text{noise}}(\tau, f), \tag{4}$$

其中: $H(\tau, f)$ 为 $h(t)$ 的二维时频谱; $H_{\text{signal}}(\tau, f)$ 为 $h_{\text{signal}}(t)$ 的二维时频谱; $H_{\text{noise}}(\tau, f)$ 为 $h_{\text{noise}}(t)$ 的二维时频谱。改进 S 变换是线性 and 可逆的,获得微地震监测数据的二维时频谱之后,根据噪声分量在二维时频谱上的分布特征来设计时变滤波器,使得噪声分量 $H_{\text{noise}}(\tau, f)$ 趋近于零,最大限度地保留微地震有效信号分量 $H_{\text{signal}}(\tau, f)$,最后经改进 S 逆变换处理,就可以得到噪声压制后的高信噪比微地震监测数据。

根据对实际原始微地震监测数据的频谱分析,微地震有效信号分量的频率范围具有一定带宽,而噪声分量一部分分布在低频端和高端,另一部分的频率范围与微地震有效信号分量的频率范围相互重叠。根据噪声分量在时频域的分布范围,利用微地震有效信号分量与噪声分量的时间方向和频率方向两个方面的差异特征,设计二维时频域滤波器,其数学表达式为

$$F(\tau, f) = \begin{cases} 1.0 & \tau \in [\tau_1, \tau_2], f \in [f_1, f_2], \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \tag{5}$$

其中: $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$ 和 $f \in [f_1, f_2]$ 是微地震有效信号分

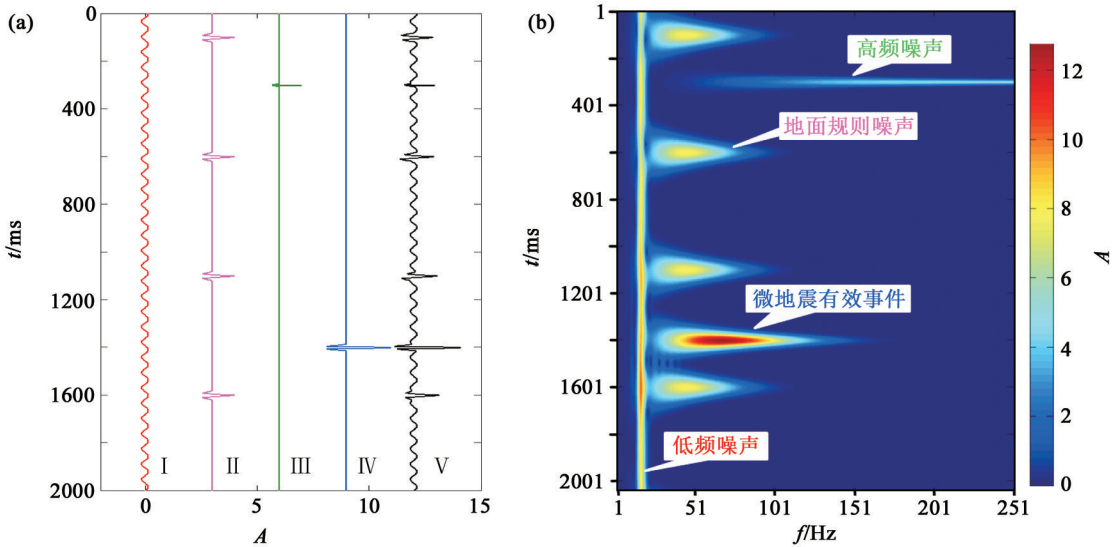
量的分布范围。在二维时频域中对原始微地震监测数据进行时变滤波处理

$$h_{\text{signal}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\tau, f) \times F(\tau, f) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} [H_{\text{signal}}(\tau, f) + H_{\text{noise}}(\tau, f)] \times F(\tau, f) d\tau, \tag{6}$$

其中: $h_{\text{signal}}(t)$ 是经过二维时变滤波处理后的微地震有效信号分量。通过二维时频域滤波处理后,只保留二维时频域内特定范围内的微地震有效信号分量,达到了压制噪声分量的目的。

3 仿真试验分析

通过合成模拟信号分析时频域去噪方法的可行性,并与常规的频率域带通滤波方法进行对比。图 2 是合成模拟信号及其二维时频谱。图 2a 是包含 4 个分量信号和 1 个合成的模拟信号 (V),其中 4 个分量分别是:低频余弦噪声信号 (II)、40 Hz 主频的地面规则干扰波噪声信号 (I)、150 Hz 主频的高频噪声信号 (III) 和 60 Hz 主频的微地震有效信号 (IV),其中建筑工地等地面规则干扰波噪声信号等间隔 500 ms 规则出现。图 2b 是合成模拟信号的改进 S 变换二维时频谱,从时频谱上可以看到这 4 类信号的时间分布和频率特征,4 类信号从频率特征上来看,低频噪声信号和 高频噪声信号是易于区分和压制的,但是规则干扰波噪声信号与微地震有效信号的频率范围重叠在一起,带通滤波方法不能有效压制噪声信号。规则干扰波噪声信号与微地震有效信号在时间分布上可以区分,因此可以根据微地震有效信号与噪声信号在二维时频谱上的时间域和

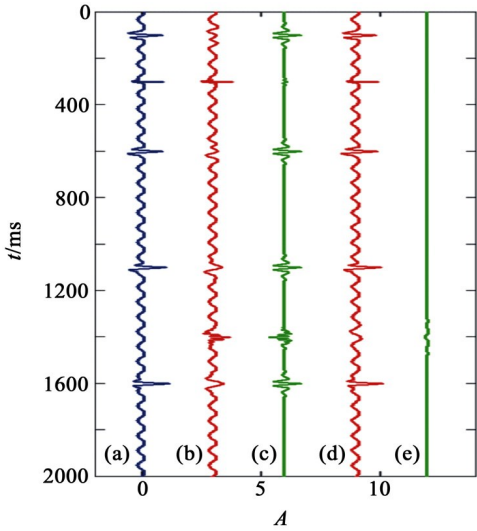


a—合成模拟信号;b—改进 S 变换时频谱

图 2 合成模拟信号及其二维时频谱

频率域两方面的分布特征,利用时频域滤波器进行针对性的去噪处理。

图 3 是带通滤波与时频域滤波的噪声压制效果对比,其中图 3a 是原始噪声分量,其中包括:低频余弦噪声信号、地面规则干扰波噪声信号和高频噪声信号;图 3b 是带通滤波方法处理后得到的噪声信号分量;图 3c 是图 3a 与图 3b 的差值,该差值能够反映带通滤波方法去噪效果的好坏,带通滤波方法去掉的噪声信号与原始模拟噪声信号分量差别较大,去噪效果不理想;图 3d 是时频域滤波方法压制的噪声信号分量;图 3e 是图 3a 与图 3d 的差值,该差值能够反映时频域滤波方法去噪效果的好坏。时频域滤波方法去掉的噪声信号与原始模拟噪声信号分量基本一致,噪声信号分量得到了较好的压制。

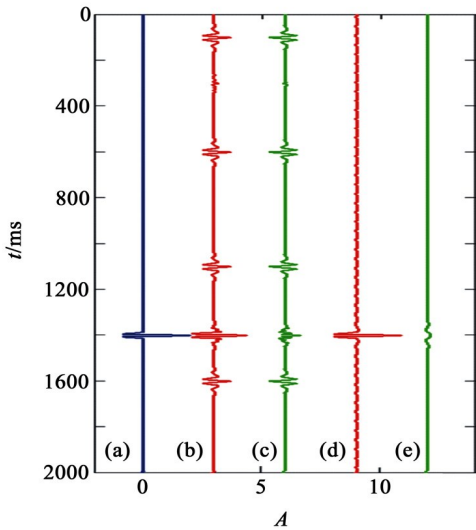


a—原始噪声分量;b—带通滤波方法分离的噪声;c—带通滤波方法的噪声差值;d—时频域去噪方法分离的噪声;e—时频域去噪方法的噪声差值

图 3 带通滤波与时频域滤波的噪声压制效果对比

图 4 是带通滤波与时频域滤波的有效信号识别结果对比,其中图 4a 是原始微地震有效信号分量;图 4b 是带通滤波处理得到的微地震信号分量;图 4c 是图 4a 与图 4b 的差值;图 4d 是时频域滤波处理得到的微地震信号分量;图 4e 是图 4a 与图 4d 的差值,两者的差值很小,通过时频域滤波方法处理后,识别的有效信号与模拟微地震有效信号基本一致。

从图 3 和图 4 可以看出,相对于常规的频率域带通滤波方法,时频域去噪方法能够较好地压制噪声。尽管 40 Hz 主频的地面规则干扰波噪声信号与 60 Hz 主频的微地震有效信号的频率范围相互重叠,但是结合时间方向和频率方向两个方面的差异特征,时频域滤波方法能够在时频域范围内有效压制该类干扰波噪声信号。



a—原始有效信号分量;b—带通滤波方法分离的有效信号;c—带通滤波方法的有效信号差值;d—时频域去噪方法分离的有效信号;e—时频域去噪方法的有效信号差值

图 4 带通滤波与时频域滤波的有效信号识别结果对比

4 实际井中微地震监测数据试处理

将基于改进 S 变换的时频域去噪方法引入到实际井中微地震监测数据中,通过试处理分析验证该方法的可行性。图 5 是某工区实际井中微地震数据的二维时频谱,从图中可以看出:微地震数据中低频噪声广泛分布,1 650 ms 处的微地震有效信号的频率范围为 30~150 Hz。在不同时间段上,二维时频域中微地震有效信号与噪声信号存在较明显的频率差异,根据时间方向和频率方向两个变量能够更加有效地压制微地震数据中的各类噪声信号。

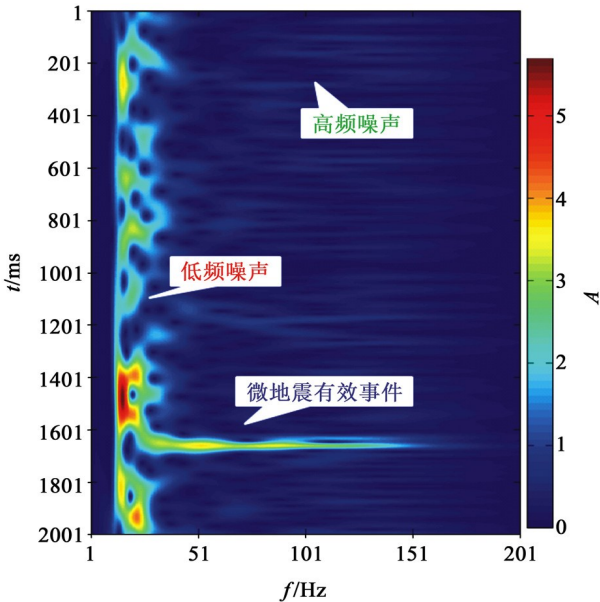
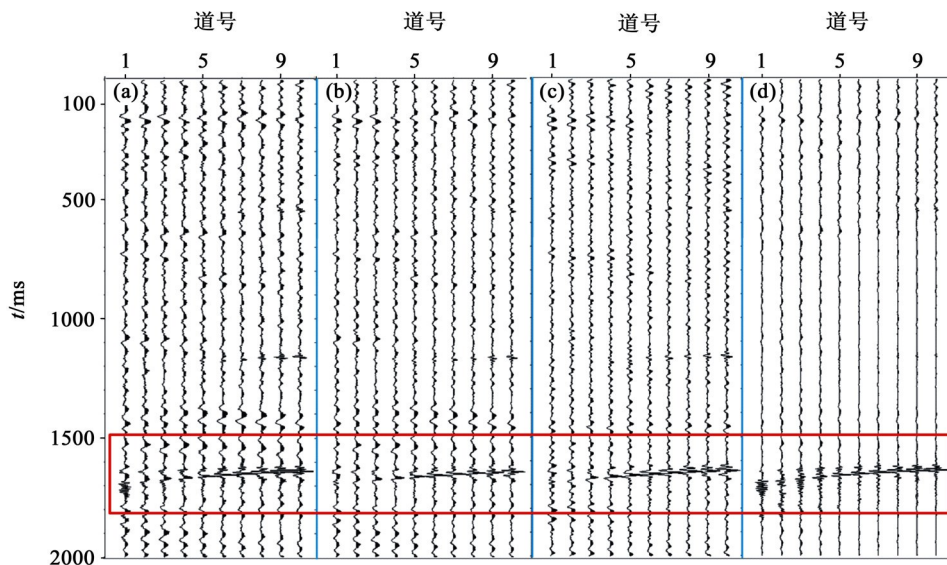


图 5 井中微地震数据的二维时频谱

图 6a 是实际原始井中微地震监测数据;图 6b 是进行带通滤波处理后得到的微地震监测数据,带通滤波范围是 20~120 Hz;图 6c 是进行带通滤波处理后得到的微地震监测数据,带通滤波范围是 30~80 Hz;图 6d 是进行时频域去噪处理后的微地震监

测数据。分析红色框内的井中微地震监测数据,对比滤波去噪处理前后的微地震有效信号,时频域去噪方法能够有效压制噪声,去噪后的微地震监测数据的信噪比明显提升。



a—井中微地震监测数据;b—带通滤波后监测数据(20~120 Hz);c—带通滤波后监测数据(30~80 Hz);d—时频域去噪后监测数据

图 6 实际井中微地震监测数据去噪分析

5 结论

改进 S 变换具有较好的时频分辨率,利用改进 S 变换对微地震监测数据进行时频分析,能够更加准确地分析微地震有效信号分量和干扰波噪声信号分量的能量以及频率随时间的变化规律。由于微地震监测数据中各类噪声信号分量在时间域和频率域内与微地震有效信号分量混叠在一起,仅仅从一维时间域或一维频率域压制噪声是比较困难的,在二维时频域内进行时变滤波处理,利用微地震有效信号与噪声信号的时间域和频率域两个方面的特征差异,能够得到较好地压制各类噪声信号。通过合成模拟信号和实际井中微地震监测数据的去噪处理对比分析,基于改进 S 变换的二维时频域去噪方法能够较好地压制噪声信号,实现提高微地震监测数据的信噪比的目的。

参考文献:

- [1] 李振春,刁瑞,韩文功,等.线性时频分析方法综述[J].勘探地球物理进展,2010,33(4):239-246.
- [2] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S-transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 17(6): 998-1001.
- [3] Pinnegar C R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 381-385.

- [4] 高静怀,陈文超,李幼铭,等.广义 S 变换与薄互层地震响应分析[J].地球物理学报,2003,46(4):526-532.
- [5] 陈学华,贺振华.改进的 S 变换及其在地震信号处理中的应用[J].数据采集与处理,2005,20(4):449-453.
- [6] 刁瑞,李振春,韩文功,等.基于广义 S 变换的吸收衰减分析技术在油气识别中的应用[J].石油物探,2011,50(3):260-265.
- [7] 刁瑞,冯玉苹.利用储层的频谱吸收特性识别油气藏[J].石油地球物理勘探,2012,47(5):766-772.
- [8] Diao R, Shang X M, Rui Y J, et al. Spectral modeling deconvolution based on improved S transform and its use in hydrocarbon detection [C]//London: 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2013.
- [9] 尚新民,刁瑞,冯玉苹,等.谱模拟方法在高分辨率地震资料处理中的应用[J].物探与化探,2014,38(1):75-80.
- [10] 刁瑞,尚新民,芮拥军,等.时频域谱模拟反褶积方法研究[J].岩性油气藏,2013,25(1):116-121.
- [11] 易洪春,刘树才,贺克升,等.基于 EMD 去噪方法研究及其在地质勘探中的应用[J].物探与化探,2013,37(3):533-537.
- [12] 李强,尚新民,赵胜天,等.非一致性时移地震资料叠前互约束处理技术[J].物探与化探,2011,35(1):97-102.
- [13] 李雪英,张晶,孔祥琦,等.基于离散小波变换的地震资料自适应高频噪声压制[J].物探与化探,2013,37(1):165-170.
- [14] 冯兴强,郭建平.两种压制随机噪声的滤波方法对比研究[J].物探与化探,2006,30(6):545-547.
- [15] 马见青,李庆春,王美丁.广义 S 变换在地震勘探中的研究进展[J].物探与化探,2011,35(2):265-269.

The denoising method for microseismic monitoring data in time-frequency domain

DIAO Rui, SHAN Lian-Yu, SHANG Xin-Min, RUI Yong-Jun, ZHAO Cui-Xia
(Shengli Geophysical Research Institute, Sinopec, Dongying 257022, China)

Abstract: The microseismic monitoring data have low signal-to-noise ratio and contain lots of noise with different characteristics. The location accuracy of the microseismic event depends on the signal-to-noise ratio of microseismic monitoring data. In microseismic monitoring data processing, it is very important to improve the signal-to-noise ratio. The improved S transform, which has high time-frequency resolution, is useful for microseismic monitoring data. Microseismic events can be better processed in time-frequency spectrum than in conventional Fourier transform. Based on the fine focus in time-frequency domain and flexible window function choice of improved S transform, the authors designed a 2D time variable time-frequency filter, which was used to process micro-seismic monitoring data. The combined signal and field micro-seismic monitoring data demonstrate the feasibility and efficiency of the method.

Key words: S transform; time variable filtering; denoising method; simulate signal; microseismic data

作者简介: 刁瑞(1985-),男,硕士,2011年获中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业硕士学位,现在胜利油田物探研究院工作,主要从事地震资料处理及地球物理方法研究工作,公开发表论文数篇。

~~~~~  
上接 111 页

# An analysis of applying the box wave survey technology to the Liupan Mountain loess tableland area

PAN Jia-Zhi, XU Xiao-Kun, HE Jing-Guo, NING Peng-Peng, YE Chun-Xue  
(Shengli Branch Company, Sinopec Petroleum Engineering Geophysical Co., Ltd., Dongying 257100, China)

**Abstract:** The Liupan Mountain basin is covered with thick loess, and is hence an area with complex surface bed and deep bed. Great thickness of loess and complex landform result in extremely well-developed interference waves in this area, which seriously affect the signal-to-noise ratio of the seismic data. In order to investigate the development characteristics of the interference waves in this area and conduct effective directed suppression, the authors, through an analysis of the application of the box wave survey technology in this area, put forward an effective way of box wave survey in combination with production, which can overcome the effect of static correlation on the data of box wave survey. In the light of the box wave survey data obtained from two landform conditions, the authors analyzed the variations of the interference field waves under the conditions of different landforms and surface beds, and found that the characteristics of interference waves that affect the shallow beds and the middle-deep beds are somewhat different. Through the analysis of the combined noise-suppressing effects, the authors put forward the combined receiving type for conducting directed noise-suppression suitable for exploration targets in different depths. The results achieved by the authors have improved the signal-to-noise ratio of the data collected from the target bed of the Liupan Mountain great thickness loess tableland area.

**Key words:** Liupan Mountain loess tableland; box wave; interference wave field; combined noise suppression

**作者简介:** 潘家智(1973-),男,汉族,山东武城人,高级工程师,长期从事地震采集技术方法的研究工作。