

同步挤压小波变换提取地震信号瞬时属性

张志禹, 刘彦霞, 李向月

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 地震信号瞬时属性(振幅、相位、频率)的准确提取对于研究地球介质的岩性构造、油气储藏等具有重要意义; 针对用传统时频分析方法提取地震信号瞬时属性对噪声敏感、可靠性不强等问题, 提出了利用同步挤压小波变换(SST)提取地震信号瞬时属性的方法; 该方法是一种连续可逆的时频变换工具, 首先结合时频谱重排的思想, 得到同步挤压小波变换量值, 然后计算出实信号对应的解析信号, 接着求取瞬时属性, 最后与传统的 Hilbert 变换方法进行比较, 通过仿真信号试验和实际地震资料的应用表明, SST 提取的地震瞬时属性抗噪性更强、可靠性强, 尤其对于瞬时频率的提取。

关键词: 地震信号; 同步挤压小波变换; 瞬时属性

Extracting Instantaneous Attribute of Seismic Signals with Synchrosqueezing Wavelet Transform

Zhang Zhiyu, Liu Yanxia, Li Xiangyue

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The accurate extraction of instantaneous attribute (amplitude, phase, frequency) of seismic signals is of great significance for the study of the lithology structure, oil and gas reservoirs, etc. For the method of extracting the instantaneous attribute by traditional transform, the method is sensitive to noise and the accuracy is not accurate enough. In this paper, Synchrosqueezing Wavelet Transform is proposed to extract the instantaneous attribute of seismic signal. This method is a continuous and reversible time-frequency transform tool, first of all, combined with the idea of time-frequency rearrangement, the value of the squeezed wavelet transform is obtained, and then the corresponding analysis of real signal and finally obtain the instantaneous attribute. The simulation signal experiment and the application of the actual seismic data show that compared with the traditional Hilbert transform method, the instantaneous attribute extracted by this method are more robust to noise, with higher accuracy and less error, especially for instantaneous frequency extraction.

Keywords: seismic signal; synchrosqueezing wavelet transform; instantaneous attribute

0 引言

目前, 地质勘探主要以研究人工激发的地震波为主, 地震波是一种典型的非平稳信号, 其瞬时属性是地震记录分类、识别和解释的有效工具^[1]。其瞬时属性的准确提取及分析有助于揭示数据中隐藏的丰富地质信息, 提高对储层有利区预测的准确度, 发现地下能源。因此如何精确提取地震信号瞬时属性十分重要。

时频分析方法是研究处理非平稳信号的一个非常重要的工具, 主要方法如: 短时傅里叶变换(STFT)^[2], 但 STFT 的分辨率受固定窗函数的限制, 时间与频率分辨率相互牵制, 不能达到最好效果。小波变换(WT)^[3]引进了尺度和平移因子, 克服了短时傅立叶变换的单分辨率分析的

不足, 但在提高时频分辨率方面 WT 并没有新的突破。S 变换^[4](S-transform)是一种介于 STFT 和 CWT 之间窗函数可变的时频方法, 但 S 变换基本窗函数形态固定, 使其应用受到一定局限。

近几十年来, 随着地质勘探的不断发展, 学者们提出了很多种瞬时属性提取的方法。Gabor^[5]率先提出了解析信号法, 又称希尔伯特变换法(Hilbert)。该方法是提取地震信号瞬时属性中最常用的一种, 但 Hilbert 易受噪声影响, 将其用于低信噪比中获取的瞬时属性将严重失真, 尤其对于瞬时频率的提取。Norman Neidell 和 Tanrer^[6]首次运用解析信号法去构造复地震道。高静怀提出了利用解析小波求取地震信号瞬时属性的方法, 但在提高时频分辨率及提取瞬时属性方面并没有新的突破。

近年来, 由 Daubechies^[7]等人提出了同步挤压小波变换算法(synchrosqueezing wavelet transform, SST), SST 在瞬时频率计算、谐波提取、以及医学等方面得到了很好的

收稿日期: 2018-04-04; 修回日期: 2018-04-26。

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(41390454)。

作者简介: 张志禹(1966-), 男, 山西朔州人, 博士, 硕士生导师, 教授, 主要从事阵列信号处理和模式识别方向的研究。

结果^[8-9]。SST 具有良好的时频分辨率, 并能够重构待分析信号, 同时 SST 自身拥有去噪的功能的特点^[10-11]。这样用 SST 提取的瞬时属性有良好的抗噪性和可靠性, 这样大大提高了所获取瞬时属性的准确性。

综上所述, 本文提出了用同步挤压小波变换提取地震信号瞬时属性的方法, 首先结合时频谱重排的思想, 得到同步挤压小波变换量值, 然后计算出实信号对应的解析信号, 接着提取瞬时属性, 最后与 Hilbert 的结果进行了对比, 并将该方法运用在某油田实际地震资料中进行验证, 实验结果表明 SST 可较准确提取地震信号瞬时属性, 具有良好的抗噪性和可靠性, 尤其对于瞬时频率的提取, 其分辨率更高。

1 同步挤压小波变换

Daubechies 等人提出了同步挤压小波变换^[7]。首先对时间域信号 $f(t)$ 进行连续小波变换, 给定母小波函数 φ 得到小波系数 $W_f(a, b)$:

$$W_f(a, b) = \int f(t)a^{-1/2}\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (1)$$

式中, a 为尺度参数, b 为时间参数: φ^* 为母小波函数的共轭。

令谐波信号 $f(t) = A\cos(\omega t)$ 。

根据 Plancherel 定理, 对谐波信号进行连续小波变换式为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int \hat{f}(\epsilon)a^{1/2}\hat{\varphi}^*(a\epsilon)e^{i\epsilon b}d\epsilon \quad (2)$$

式中, ϵ 是角频率, $\hat{f}(\epsilon)$ 、 $\hat{\varphi}(\epsilon)$ 分别是 $f(t)$ 、 $\varphi(t)$ 的傅里叶变换。

又因为 $f(t)$ 的傅里叶变换为:

$$\hat{f}(\epsilon) = \pi A[\delta(\epsilon - \omega) + \delta(\epsilon + \omega)] \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 可得:

$$W_f(a, b) = \frac{A}{4\pi}a^{1/2}\hat{\varphi}^*(a\omega)e^{i\omega b} \quad (4)$$

这里如果 $\hat{\varphi}(\epsilon)$ 在负频率域趋于零, 且在 $\epsilon = \omega_0$ 处集中分布, 则系数 $W_f(a, b)$ 在时频面内 $a = \frac{\omega_0}{\omega}$ 处集中分布, 并在一定范围内延尺度分布。

对系小波系数求偏导, 则估计瞬时频率为:

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} -i(W_f(a, b))^{-1} \frac{\partial}{\partial b} W_f(a, b), & |W_f(a, b)| > 0 \\ \infty, & |W_f(a, b)| = 0 \end{cases} \quad (5)$$

通过式 (5), 小波系数 $W_f(a, b)$ 由时间-尺度平面转化到时间-频率平面, 变为 $W_f[\omega_f(a, b), b]$ 。可以通过挤压任一中心频率 ω_l 附近区间 $[\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]$ 的值来获得小波系数的同步挤压变换量值 $T_f(\omega_l, b)$ 。这里 $\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$ 。同步挤压变换量值可以表示:

$$T_f(\omega_l, b) = \Delta\omega^{-1} \sum_{a_l: |\omega_l(a_l, b) - \omega_l| \leq \Delta\omega/2} W_f(a_k, b)a_k^{-3/2}\Delta a_k \quad (6)$$

式中, a_k 为离散尺度, 且 $a_k - a_{k-1} = (\Delta a)_k$ 。

同步挤压变换的反变换为:

$$f(t) = \text{Re}[C_\varphi^{-1} \sum_l T_f(\omega_l, b)(\Delta\omega)] \quad (7)$$

式中, $C_\varphi^{-1} = \int_0^\infty \varphi^*(\epsilon) \frac{d\epsilon}{\epsilon}$, Re 是求实部, $\varphi^*(\epsilon)$ 是母小波函数的共轭的傅里叶变换, 由反变换可得到信号的近似完全重构。

2 同步挤压小波变换提取地震信号瞬时属性

本文中, 提取瞬时属性的步骤就是结合时频谱重排的思想, 得到同步挤压小波变换量值, 然后计算出实信号对应的解析信号, 最后提取瞬时属性。

而同步挤压小波变换量值为式 (6)。

$W_f(a, b)$ 把 $W_f(a, b)$ 中尺度离散化, 并将式 (1) 带入式 (6) 可得:

$$T_f(\omega_l, b) = \Delta\omega^{-1} \sum a_k^{-1/2} \int f(t)\bar{\omega}^*\left(\frac{t-b}{a_k}\right)dt a_k^{-3/2}\Delta a_k = \Delta\omega^{-1} \sum a_k^{-1} \int f(t)\bar{\omega}^*\left(\frac{t-b}{a_k}\right)dt \frac{\Delta a_k}{a_k} \quad (8)$$

这里, 由高静怀等 [3] 研究的小波变换与信号瞬时特征分析一文中, 可知: 任意给一信号 $f(t) \in L^2(R)$, $f(t)$ 相对于解析小波 $g(t)$ 的小波变换同样可以定义为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int f(t)g^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (9)$$

因此, 对式 (9) 的尺度 a 离散化后得 $W_f(a_k, b)$, 代入式 (8) 中可得:

$$T_f(\omega_l, b) = \Delta\omega^{-1} \sum W_f(a_k, b) \frac{\Delta a_k}{a_k} \quad (10)$$

其中: ω_l 是同步挤压小波变换在时间-频率平面所取的任一中心频率, 而 $\Delta\omega$ 被定义为: $\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$, 因此, $\Delta\omega$ 相当于一常数。

所以, 对于任一实函数 $f(b) \in L^2(R, db)$, 可以写出通过同步挤压小波变换计算出的实信号所对应的解析信号为:

$$T_f(\omega_l, b) = f(b) + iH[f(b)] \quad (11)$$

其中: $H[f(b)]$ 表示 $f(t)$ 的希尔伯特变换。

因此, 实信号 $f(t)$ 对应的瞬时属性为:

瞬时振幅:

$$A(t) = [f^2(t) + f^{*2}(t)]^{1/2} \quad (12)$$

瞬时相位:

$$\theta(t) = \text{arctg} \frac{f^*(t)}{f(t)} \quad (13)$$

瞬时频率:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} [\arctan(\frac{f^*(t)}{f(t)})] \quad (14)$$

其中: $f^*(t)$ 为 $f(t)$ 对应的解析信号的虚部,

$$f^*(t) = H[f(t)] = \text{Im}T_f(\omega_l, b)$$

3 实验结果与分析

3.1 雷克子波 (Ricker 子波)

本文采用 SST 来提取主频 30 Hz, 长度为 100 个采样点加入信噪比为 30 dB 高斯白噪声的 Ricker 子波 (图 1) 的瞬时属性, 并与传统的 Hilbert 变换结果对比, 图 2 (a)、(b) 分别为 SST、Hilbert 提取的瞬时振幅, 图 2 (c)、(d) 分别为 SST、Hilbert 提取的瞬时相位, 图 2 (e)、(f) 分别为 SST、Hilbert 提取的瞬时频率。

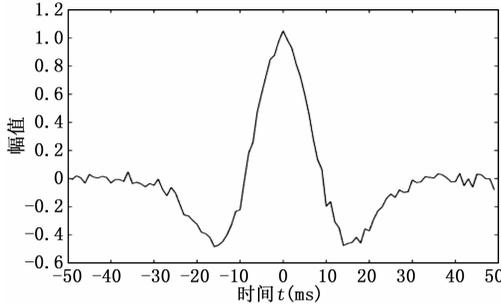


图 1 加入 30 dB 高斯白噪声的 Ricker 子波

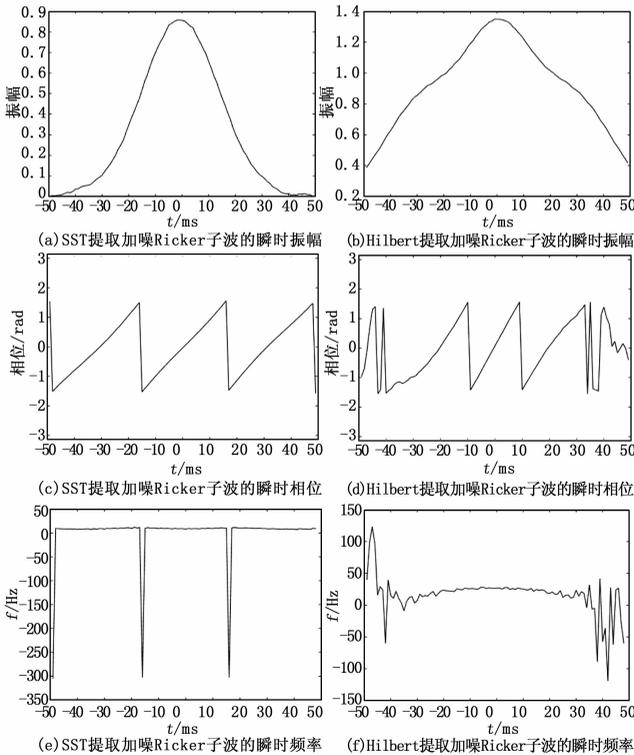


图 2 提取的结果示意图

对比图 2 中 SST 和 Hilbert 提取的结果, 可知, 利用 SST 提取加噪 Ricker 子波的瞬时属性几乎不会受到噪声的影响, 尤其对于瞬时相位和瞬时频率的提取。Hilbert 变换所提取的瞬时属性不是很理想, 瞬时振幅受噪声影响不大, 但瞬时相位与瞬时频率在边缘处已经失真。可见, Hilbert 变换对于噪声是相当敏感的。而 SST 具有很好的抗噪性, 提取的瞬时属性可靠性更强。

3.2 单道实际地震信号

随机抽取一道地震信号进行分析, 此信号为 2 000 个采样点数的单道含随机噪声的地震信号, 如图 3 (a) 所示。同步挤压小波逆变换后的该道地震信号如图 3 (b) 所示。

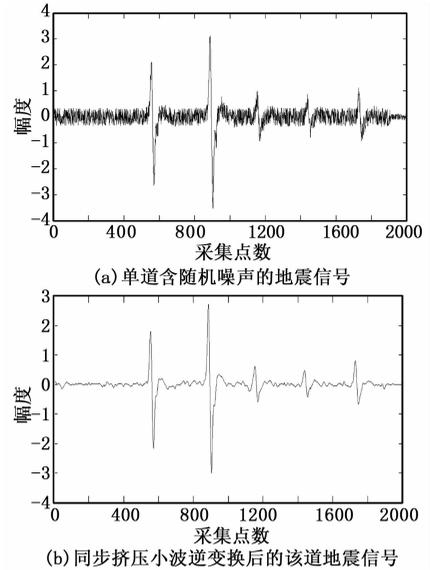


图 3 地震信号图

本文采用 SST 提取同步挤压小波逆变换后的该道地震信号的瞬时属性, 并与传统 Hilbert 变换提取的结果进行对比。图 4 (a)、(b) 分别为 SST、Hilbert 提取同步挤压小波逆变换后的该道地震信号的瞬时振幅, 图 4 (c)、(d) 分别为 SST、Hilbert 提取同步挤压小波逆变换后的该道地震信号的瞬时频率, 结果如图所示。

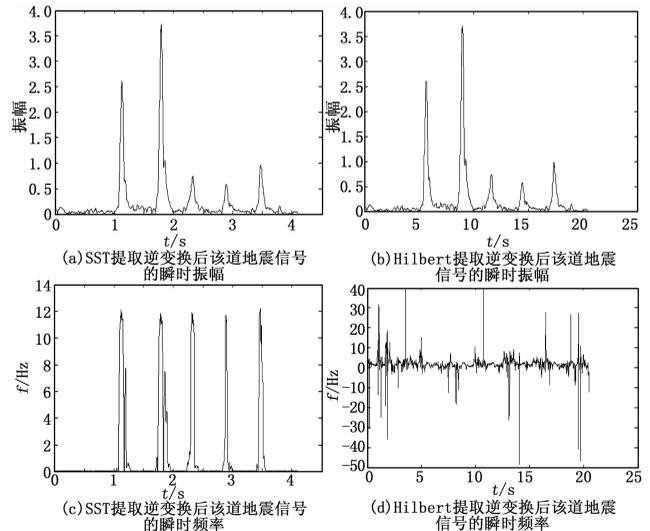


图 4 地震信号图

对比图 4 中 SST 和 Hilbert 提取的结果, 可知, 由于同步挤压小波逆变换后的单道实际地震信号 (图 3 (b)) 还是有少量噪声存在的, 与 Hilbert 相比, SST 提取的地震信号瞬时属性抗噪性更强, 精度更高, 尤其对于提取的瞬时频率几乎不会受到噪声的影响, 可靠性更强, 而 Hilbert 提取

的瞬时频率已严重失真。

4 实际油田资料的应用

图 5 是抽取了某油田实际数据叠加后的一个 100 道, 3 s 长的剖面, 道间距为 20 m, 每道的采样点数为 1 500 个, 采样间隔为 2 000 μs 。图 5 中黑色椭圆虚线内部区域表示地震资料目标层, 即实际主要产油气区域分布带。

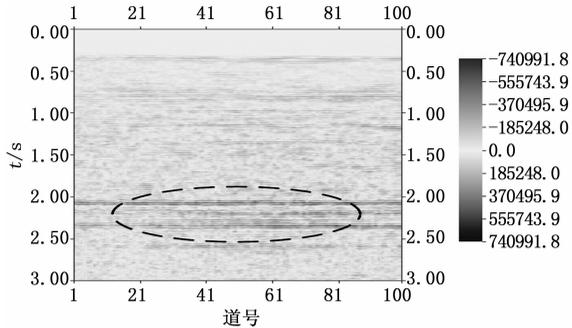


图 5 实际水平叠加时间剖面

由于实际地震剖面含有高频噪音, 信号能量不强以及整体层次不是很清晰, 用传统的 Hilbert 变换提取不到很好的瞬时属性剖面, 不利于层位追踪、油气储层描述。与 Hilbert 相比, SST 具有更精确的时间分辨率和频率分辨率, 能将随机噪声挤压并聚集分布, 使其大部分聚集在高频部分, 降低了随机噪声的能量, 从而使信号和噪声明显分离。

本文利用 SST 处理了该油田实际地震资料, 具体步骤为:

- 1) 将地震信号按每个道集都分解出来;
- 2) 通过 SST 对其在时频域进行处理, 得到处理后信息;
- 3) 根据每一道在时频谱中的分布情况, 对每一道数据分别提取对应的瞬时振幅、频率属性;
- 4) 将每一道的瞬时属性合并, 得到最终的瞬时振幅、频率剖面。

用 SST 方法所提取出的瞬时振幅剖面、瞬时频率剖面, 分别如图 6、图 7 所示。

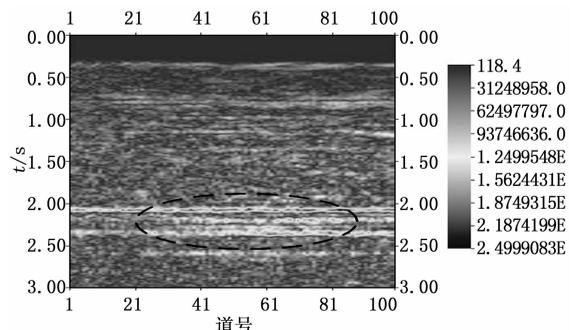


图 6 瞬时振幅剖面

从图 6、图 7 中可以看出, 在瞬时振幅剖面上, 中间出现了一个能量较强的异常区域 (黑色虚线椭圆区域), 其他部位的能量相对较弱。在瞬时频率剖面上, 中间出现了一

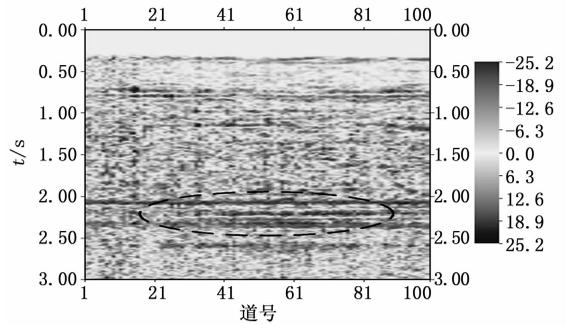


图 7 瞬时频率剖面

个高频区域 (黑色虚线椭圆区域), 其他部位的频率相对较低。说明图 6、7 中黑色椭圆虚线区域内存在异常, 有油气的存在。可见, 瞬时剖面有较高的时频分辨率, 能更加精确描述油气储层。

5 结束语

SST 提取地震瞬时属性是一种高分辨率瞬时属性的提取方法, 可以提取出较精确且抗噪性更强的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等地震属性, 能够较精确地反映丰富的地震属性信息, 为发现地下能源打下坚实的基础。该方法在地震数据解释及处理中具有较好的应用前景, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘霞, 马妍. 基于时频分析的地震信号瞬时参数提取方法研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2013, 21 (6): 2-5.
- [2] 刘希康, 丁志峰, 李媛, 等. STFT 与 WVD 在地震波时频分析中的应用 [J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37 (1): 15-17.
- [3] 王成龙, 曾珍, 周军. 小波域提取地震信号瞬时参数 [J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34 (1): 67-69.
- [4] 刘丽娟, 王山山. 广义 S 变换窗函数的分析和改进 [J]. 岩性油气藏, 2007, 19 (2): 76-79.
- [5] Gabor D. Theory of communication [J]. Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1946, 93 (3): 429-457.
- [6] Neidell N, Tanrer. Marine exploration actual conditions [J]. Progress in Exploration Geophysics. 1986, 2 (4): 97-105.
- [7] Daubechies A, Lu J, TWu H. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. Appl Comput. Harmon. Anal. 2011, 30 (2): 243-261.
- [8] 刘景良, 任伟新, 王佐才, 等. 基于同步挤压小波变换的结构瞬时频率识别 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (18): 37-42.
- [9] 张黎明, 张小栋, 陆竹风, 等. 用于稳态视觉诱发电位特征频率提取的同步压缩短时傅里叶变换方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51 (2): 20-26.
- [10] Wang P, Gao J, Wang Z. Time-Frequency Analysis of Seismic Data Using Synchrosqueezing Transform [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11 (12): 2042-2044.
- [11] Daubechies A, Lu J, TWu H. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. Appl. Comput. Harmon. Anal., 2011, 30 (2): 243-261.