ISSN 1009-2722
CN37-1475/P

海洋地质前沿
Marine Geology Frontiers

第 31 卷第 6 期
Vol 31 No 6

文章编号:1009-2722(2015)06-0023-07

基于同步挤压变换的水合物储层地震信号时频分析

张建中[1,2],刘　晗[1,2],黄忠来[1,2],赵铁虎[3],孙运宝[3]

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100;2 海底科学与探测技术教育部重点实验室,青岛 266100;3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘　要:同步挤压变换是一种新的时频分析方法,通过对信号进行小波变换,并重排(挤压)所得到的小波系数谱,得到比小波变换等常用时频变换更高的时频分辨率。使用同步挤压变换对含水合物储集层的合成地震数据以及南海神狐海域的实测地震资料进行了处理,并与小波变换结果进行了对比。结果表明,同步挤压变换对地震数据的处理结果具有更高的时频分辨率,能够反映地震信号频率的精细变化,用于识别和圈定水合物储层。

关键词:同步挤压变换;时频分析;地震信号;水合物储层

中图分类号:TE122;P315　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.16028/j.1009-2722.2015.06004

时频分析技术能将地震数据分解为不同频率的调谐体。由于不同厚度的油气储层在高、低频调谐体上表现出不同的特征,通过对比和分析,可以对油气储层的位置、范围进行识别和估计。特别地,当储层很薄时,由于薄层对于地震反射波的滤波、调谐作用,以及油气对地震波的吸收,薄储层的反射信号在不同频率调谐体上会出现更加明显的区别。因此,通过对地震信号的时频分析,可以识别和定位薄储层油气藏。地震信号时频分析在油气储层识别上取得了巨大的成功[1]。海洋水合物储层往往很薄,并与其下部的游离气对通过的地震波进行改造,使地震波频率发生变化,时频分析也成为水合物储集层预测的重要方法之一[2]。

时频变换是时频分析的基础。无论是短时傅立叶变换(Short Time Fourier Transform,STFT),还是被广泛使用的小波变换(Wavelet Transform,WT)、S 变换(S-Transform,ST),都使用了某种类型的窗函数,并在该窗函数的区域内对信号的频率成分(瞬时能量)进行估计,导致在某一时刻得到的时频能量,总分布在以信号真实的瞬时频率为中心的一定的时间和频率范围内,因此,常规时频变换得到的瞬时频率能量分布是被模糊化的[3]。此外,受到海森堡不确定性原理的约束,时频变换结果的时间分辨率和频率分辨率不能同时达到最优。

Huang 等[4]提出的经验模态分解方法(EMD)摆脱了上述时频变换方法的局限性,可以得到更准确的信号瞬时频率特征。但是,EMD 没有严格的数学推理依据,这对人们理解和改进该方法提出了挑战[3]。同步挤压变换(Synchrosqueezing Transform,SST)是 Daubechies 等[3]提出的一种效果类似于 EMD 的新变换方法[5]。通过对信号的小波变换结果进行“挤压”,SST 可以将信号时频谱上的能量进行重新排列,使之聚集到信号的真实瞬时频率附近。SST 的时频分辨率与 EMD 相当,但是,它的变换过程经严格的数学推导而产生,有利于人们对该方法的理解,从而可以根据具体应用对其进行改进。目

收稿日期:2015-03-09

基金项目:中国地质调查局国家海洋地质专项(GZH201100308);国家自然科学基金(41074077,41230318)

作者简介:张建中(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事地震、重磁勘探的处理和解释方法等研究工作. E-mail:zhangjz@ouc.edu.cn

前,SST 在地球物理领域的应用还不多。

笔者利用合成信号对 SST 的性能进行测试并与小波变换进行了比较,同时也利用 SST 对海洋水合物地震勘探数据进行时频分析,展示其对水合物储集层的识别和预测效果。

1 同步挤压变换原理

时间域信号 $s(t)$的连续小波变换定义式为[6]:

$$W_s(a,b)=\int s(t)a^{-1/2}\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中:ψ^* 为母小波函数的共轭;

a 为尺度参数;

b 为时间参数。

根据帕萨瓦尔定理,(1)式在频率域的表达式为[3]:

$$W_s(a,b)=\frac{1}{2\pi}\int\hat{s}(\xi)a^{-1/2}\psi^*(a\xi)\mathrm{e}^{\mathrm{i}b\xi}\mathrm{d}\xi \tag{2}$$

式中:ξ 为角频率;

$\hat{s}(\xi)$为信号的傅立叶变换。假设信号 $s(t)=A\cos(\omega t)$,则

$$\hat{s}(\xi)=\pi A[\delta(\xi-\omega)+\delta(\xi+\omega)] \tag{3}$$

将式(3)代入(2)可得:

$$W_s(a,b)=\frac{A}{4\pi}a^{1/2}\hat{\psi}^*(a\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}b\omega} \tag{4}$$

对于小波变换结果中任意一个时间—尺度点(a,b),如果其对应的 $W_s(a,b)\neq0$,那么此处对应的候选瞬时频率为[3]:

$$\omega_s(a,b)=-iW_s(a,b)^{-1}\frac{\partial}{\partial b}W_s(a,b) \tag{5}$$

式中:i 为虚数单位。

有了与(a,b)点对应的$(\omega_s(a,b),b)$后,就可以算出瞬时频率,将时间—尺度谱重排为时间—频率谱。

假设信号的采样频率为 sf,小波变换时所取尺度的个数为 N,那么在重排后的时间—频率谱上,离散的频率值就为 $\omega_l=l*sf/N$,$l\in[1,N]$。在实际进行重排时,以每个 ω_l 为中心,凡是与 ω_l 之间的距离小于 $\Delta\omega=\omega_l-\omega_{l-1}$的候选瞬时频率(尺度)所对应的小波系数,都会被相加到一起,并保存到 ω_l 处。据此,同步挤压变换被定义为[3]:

$$T_s(\omega_l,b)=\Delta\omega^{-1}\sum_{a_k:\,|\omega_s(a_k,b)-\omega_l|\leqslant\Delta\omega/2}W_s(a_k,b)a_k^{-3/2}\Delta a_k \tag{6}$$

式中:a_k 为离散的尺度,且 $\Delta a=a_k-a_{k-1}$。

可以看到,通过在每个时间点,沿着频率(尺度)方向挤压(重排)小波变换的系数谱,时频能量分布将会变得更加集中。同步挤压变换的重构公式为[3]:

$$s(b)=\mathrm{Re}\left[C_\psi^{-1}\sum_l T_s(\omega_l,b)(\Delta\omega)\right] \tag{7}$$

式中:$C_\psi=0.5\int_0^\infty\hat{\psi}^*(\xi)\xi^{-1}\mathrm{d}\xi$,Re 为取实部符号。以上为同步挤压变换的基本原理,其中最重要的部分包括候选瞬时频率的求取、小波系数谱的挤压(重排)以及信号的重构。

2 合成信号测试

首先用一个合成的调频信号说明同步挤压变换(SST)的特点,并与连续小波变换(CWT)进行比较。设计的合成信号 $f(t)$由 3 种不同的信号叠加而成(图 1):频率不变的 10 Hz 的余弦信号$f_1(t)=\cos(2\pi10t)$,25 Hz 的调频信号 $f_2(t)=\cos(2\pi25t-4\cos(10t))$,以及 40 Hz 的调频信号 $f_3(t)=\cos(2\pi40t-6\cos(10t))$。此外,在合成信号加入信噪比(SNR)为 3 dB 的高斯白噪音 $e(t)$,加噪后的信号为 $f(t)+e(t)$(图 1),其中信噪比定义为:

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

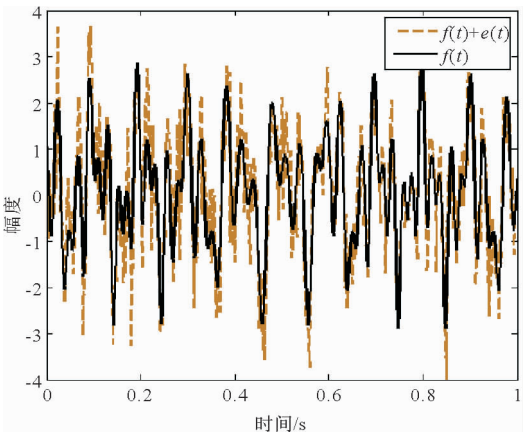


图 1 合成信号 $f(t)$及加噪信号 $f(t)+e(t)$

Fig. 1 The synthetic signal $f(t)$ and the noised signal $f(t)+e(t)$

式中：I 为纯信号幅值；

I_n 为含燥信号幅值。

对原合成信号分别进行 CWT 和 SST 后可以看到，2 种变换均能分出信号不同频率的 3 个分量，其中，CWT 结果在频率和时间方向上能量团较宽、较模糊，与之相比，SST 能量团在频率和时间方向上更精细、更清晰(图 2)。可见，SST 比 CWT 具有更高的频率分辨率和时间分辨率，能够准确的给出信号的瞬时频率。对加噪后的信号做同样处理，结果如图 3 所示。受噪声影响，2 种变换结果都有一定程度的畸变，但 SST 结果比 CWT 结果的畸变小，可见，SST 除了分辨率高以外，还具有一定的抗噪能力。

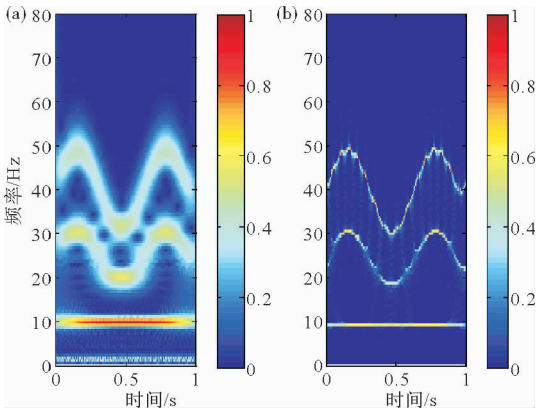


图 2　(a)合成信号 CWT 时频；(b)SST 时频

Fig. 2　(a) CWT of the synthetic signal; (b) SST of the synthetic signal

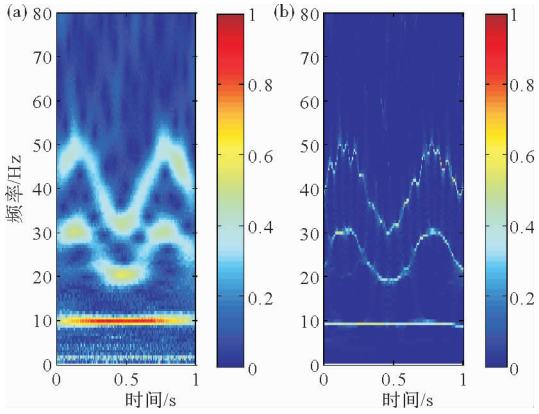


图 3　(a)加噪后的合成信号 CWT 时频；(b)SST 时频

Fig. 3　(a) CWT of the noised synthetic signal; (b) SST of the noised synthetic signal

SST 是一种可逆变换，即通过 SST 反变换(ISST)可完全恢复原始信号。反小波变换(ICWT)和 ISST 的结果，即重构信号，与原信号基本重合(图 4)，重构误差都很小(图 5)。此外，通过 SST 时频图，选取一定频率所在区域，可以提取信号各个组成分量。在图 2b 中，选取时频曲线所在频段提取信号 $f(t)$ 的各分量。25 Hz 和 40 Hz 调频信号由于 2 者频率相近，在频率重组挤压时受到影响，提取信号与原信号稍有差异，10 Hz 余弦信号无干扰，提取结果与原分量基本无差异，总体上各分量的效果较好(图 6)。

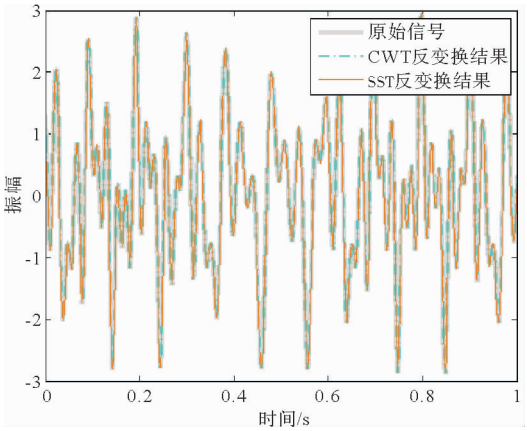


图 4　原信号以及利用 CWT 和 SST 反变换重构出的信号

Fig. 4　The original signal and the signals reconstructed by ICWT and ISST

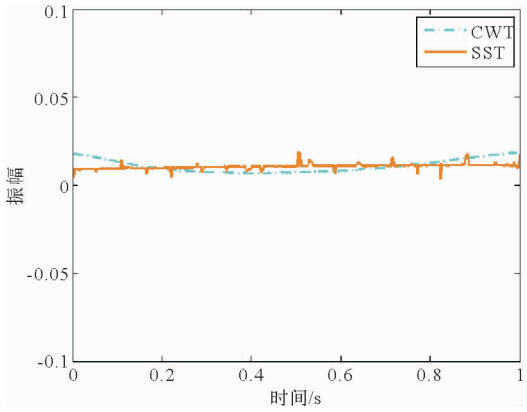
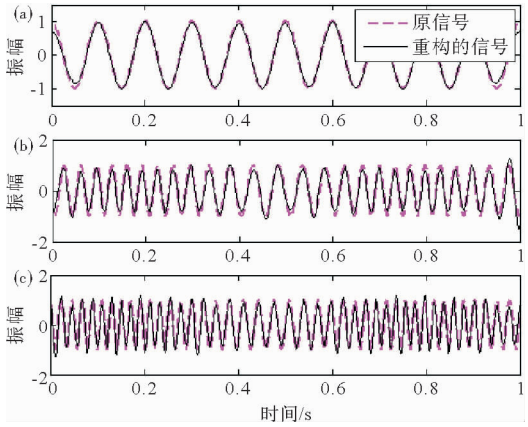


图 5　CWT、SST 反变换结果与原信号之差

Fig. 5　Differences between the original signal and both the reconstructed signals by CWT and SST



(a) 10 Hz 余弦信号;(b) 25 Hz 调频信号;(c) 40 Hz 调频信号

图 6 由 SST 提取的 3 个分量

Fig. 6 Three components extracted by SST

为了说明同步挤压变换对水合物储集层地震信号的时频分析优势,作者设计了一个海洋水合物储集层模型,仿真了该模型的自激自收地震资料,并分别利用小波变换和同步挤压变换对合成地震资料进行了时频分析。设计的二维理论模型,长 2 000 m,深 500 m,最上方为海水,海水下方黄色区域为砂石和泥土层,中间绿色区域为天然气水合物,下方紫色部分为游离气,游离气下方绿色区域为海底沉积物和岩石层。从上而下各层的速度分别为 1 500 m/s、1 800 m/s、2 200 m/s、2 800 m/s、1 937 m/s 和 2 000 m/s(图 7a)。地震子波为零相位 Ricker 波,主频为 25 Hz,采样频率为1 000 Hz。图7b为合成地震剖面。我们用CWT

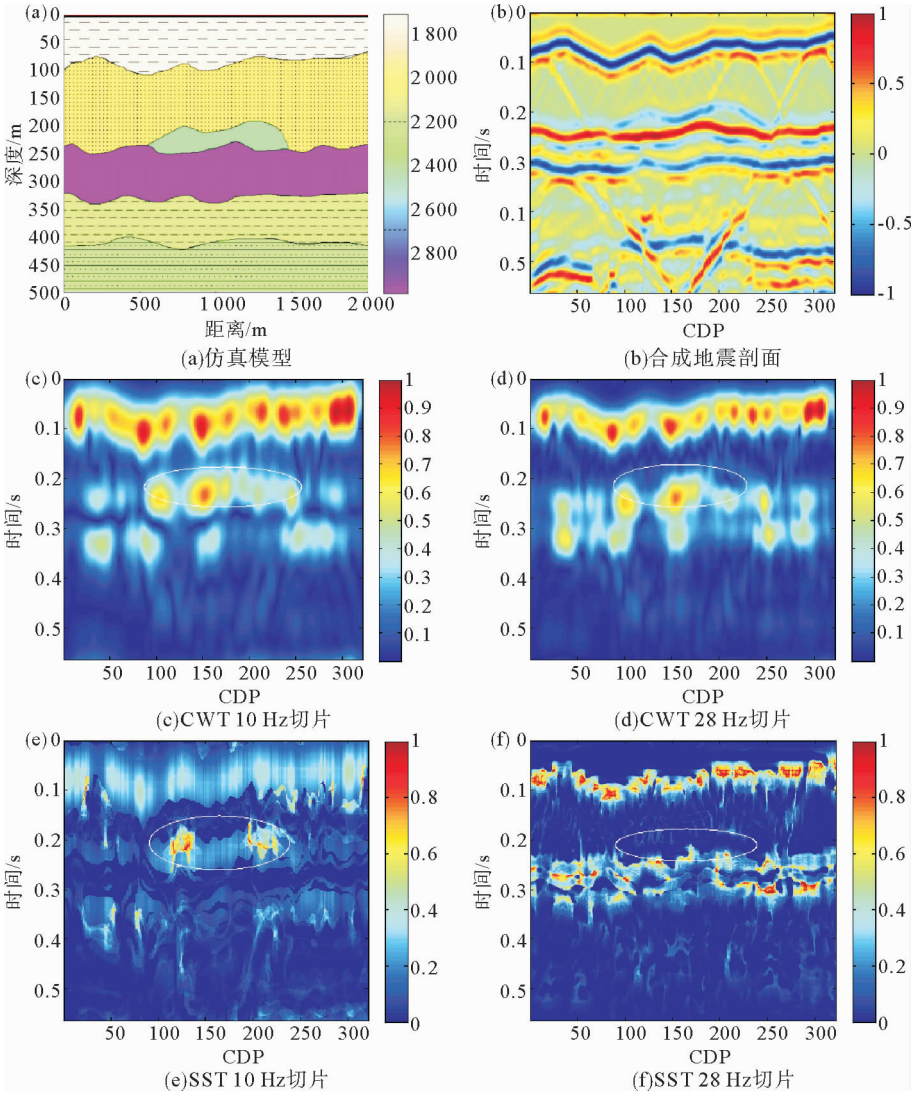


图 7 仿真信号及两种谱分解方法结果比较

Fig. 7 Synthetic signal and comparison of the two spectral decomposition methods

对该剖面数据进行谱分解处理，得到 10 Hz 单频率切片(图 7c)和 28 Hz 单频率切片(图 7d)。为了方便和 SST 结果进行对比，我们将 CWT 结果的尺度坐标转换为频率。对比图中白色圈内的能量分布可以发现，在高频切片中，地震波的能量明显降低，这和此处存在水合物层是相符合的。因此，对比低频切片和高频切片上能量的变化，可以帮助识别储层。

用 SST 对该地震剖面也进行了处理，得到与 CWT 频率对应的低频切片(图 7e)和高频切片(图 7f)。可以明显看到，SST 的低频和高频切片差异较大。在低频切片图上，在白色圈内的水合物区域存在较强能量；而到了高频切片图上，相同区域的能量完全消失，反映出了储层对于地震波的衰减作用。而且，与小波变换相比，SST 的时频分辨率更高，在单频切片上能更清楚的分辨出储层区域所在位置。

3　实际资料处理

利用同步挤压变换对实测海洋地震资料进行了时频分析。地震波在地下传播时，会受到介质的影响而逐渐衰减，且频率越高衰减越多[7]。根据薄层地震波调谐理论，反射层的厚度越薄，其反射波的峰值频率就越高，反之亦反；另一方面，储层的含油气性对于反射波的峰值频率也有影响。一般来说，由于油和气对于地震波的高频成分吸收较大，所以油气储层位置会出现低频阴影[8]。根据这些特点，可以对多道地震信号进行时频分析，并形成若干单频调谐数据体。由于不同厚度和属性的薄层的调谐频率不同，通过比较不同频率调谐体在同一位置的时频能量分布情况，就可以识别含油气性以及对储层厚度估算。

实测二维地震资料为南海神狐海域天然气水合物勘探测线 2 的一部分。图 8 是目标区域的偏移叠加剖面，探井的位置在第 130 道处附近，打井结果证明了在此处存在天然气水合物。在 0.2～0.25 s 之间，可以看到一条明显的 BSR，BSR 的上方是天然气水合物，下方存在游离气。由于天然气水合物层的纵、横波速度和密度等物性参数相差不大，其成矿带通常为一个物性相对均匀的地质体，这造成沉积层内反射系数很小，因此，在 BSR 上方的地震剖面上，存在能量较弱的低振幅区域，通常称为“空白带”[9]。

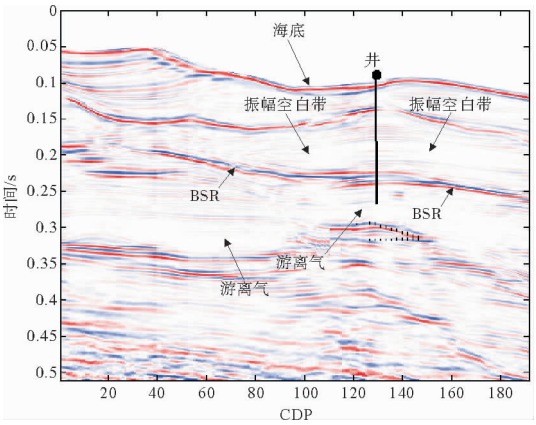


图 8　天然气水合物储层实际地震剖面

Fig. 8　The real seismic profile through the natural gas hydrate reservoir

分别使用 CWT 和 SST，对该地震数据进行谱分解处理(图 9)。比较 CWT 在 15 Hz(图 9a)和 35 Hz(图 9b)的单频率切片，在比较两图的箭头所指位置，因 BSR 下方游离气对地震波的衰减，使得低频切片出现了“低频阴影”，且黄色圈处的能量比绿色圈处的更低。造成这种情况的原因是在 130 道 0.32 s 附近存在一个类似楔形的结构(图 8)。厚度的不同导致了两处地层反射波的峰值频率不同，即出现最大峰值的频率不同，从而在单频率切片上表现出幅值的不同。比较 SST 在 15 Hz(图 9c)和 35 Hz(图 9d)的单频切片与小波变换的结果，SST 图上同样表现出低频阴影，而且阴影区域更清楚。可见，由于 SST 具有更高的时频分辨率，反映地震信号的频率变化优于 CWT，能较好地用于识别水合物储集层。

4　结论

通过将信号的时频变换谱进行重新排列，同步挤压变换可以使信号的能量聚集到真实的瞬时频率附近，比小波变换等常用的时频变换具有更高的时间—频率分辨率。用同步挤压变换对地震资料进行处理，可以获得地震数据频率的精细变化，从而更有利于识别油气储层、天然气水合物储层，确定储层的位置和范围。可以预见，同步挤压

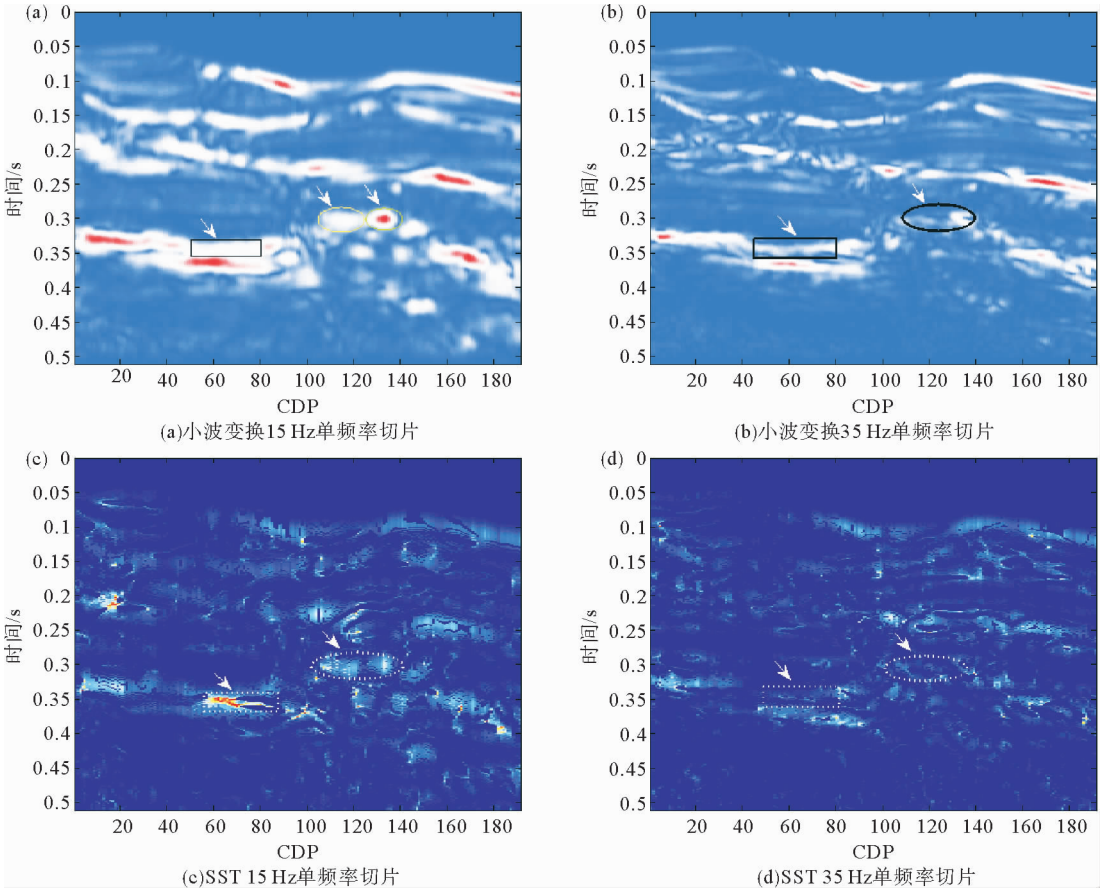


图 9 谱分解方法结果比较

Fig. 9 Comparison of spectral decomposition results using CWT and SST

变换将会广泛应用于地震数据的处理和解释。

参考文献：

[1] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization [J]. The Leading Edge, 1999, 18: 353-360.

[2] Geletti R, Busetti M. A double bottom simulating reflector in the western Ross Sea, Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(B4): 1-15.

[3] Daubechies I, Lu J, Wu H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.

[4] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C] // Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1998, 454(1971): 903-993.

[5] Thakur G, Brevdo E, Fučkar N S, et al. The Synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: Robustness properties and new paleoclimate applications [J]. Signal Process, 2013, 93(5): 1 079-1 094.

[6] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安：西安交通大学出版社，1995.

[7] 陆基孟，王永刚. 地震勘探原理[M]. 东营：石油大学出版社，2011.

[8] Castagna J P, Sun S J, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. The Leading Edge, 2003, 22(2): 120-127.

[9] Tomasini J, Ana H S, Conti B, et al. Assessment of Marine Gas Hydrates and Associated Free Gas Distribution Offshore Uruguay[J]. Journal of Geological Research, 2011(326250): 1-7.

A SYNCHROSQUEEZING TRANSFORM BASED TIME-FREQUENCY ANALYSIS ON SEISMIC SIGNALS OF HYDRATE RESERVOIRS

ZHANG Jianzhong[1,2], LIU Han[1,2], HUANG Zhonglai[1,2 *], ZHAO Tiehu[3], SUN Yunbao[3]

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;
3 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: The Synchrosqueezing Transform (SST) is a new time-frequency analysis method. SST can obtain the time-frequency (t-f) resolution better than common time-frequency transforms such as wavelet transform and so on, by performing wavelet transform on the signal and reassigning (squeezing) the corresponding coefficient spectrum. In this paper, both continuous wavelet transform (CWT) and SST are applied to process the synthetic seismic data from a model containing hydrate reservoirs and a real seismic data collected from the Shenhu area of the South China Sea. The test results show that SST is able to provide seismic profiles with higher t-f resolution than CWT, which can reflect more detailed change in frequency of seismic signal and help us identify and delineate hydrate reservoirs more precisely.

Key words: synchrosqueezing transform; time-frequency analysis; seismic signal; hydrate reservoir