

文章编号: 0253-9985(2008)02-0236-04

最优化广义 S 变换及其在油气检测中的应用

史燕红, 边立恩, 贺振华

(成都理工大学 “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 时频分析是直接应用地震资料进行烃类检测的重要手段之一, 基于实际地震信号的非平稳特征及短时傅立叶变换、Gabor 变换、小波变换等常规时频分析方法的缺点和不足, 通过在 S 变换中引入新的参数 p 来调节窗函数的标准差, 并结合 Jones 和 Parks 等提出的时频聚集性度量准则来选取最优的 p 值, 得到了一种新的时频分析方法, 即最优化广义 S 变换。合成信号试算结果表明, 该方法比常规时频分析方法具有更好的时频聚集性。在实际生产, 此方法的应用结果显示由它生成分频数据体对于地层的含油气性检测和识别具有比较明显的效果。

关键词: 时频分析; 非平稳信号; 最优化广义 S 变换; 分频剖面; 油气检测

中图分类号: P631.4 文献标识码: A

Optimal generalized S-transform and its application to hydrocarbon detection

Shi Yanhong, Bian Li'en, He Zhenhua

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,
Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract Time-frequency analysis is one of the important means for direct hydrocarbon detection with seismic data. Real seismic signals are non-stationary and shortcomings and deficiencies exist in conventional time-frequency analysis methods such as short-time Fourier transform, Gabor transform and wavelet transform. To tackle these problems, a new time-frequency analysis method—optimal generalized S-transform—is achieved by adding a new parameter “ p ” in S-transform to adjust the standard deviation of window function and selecting the optimal value of p according to the measurement criteria of the time-frequency aggregation proposed by Jones and Parks. Trial calculation with synthetic signals shows that this method has a better time-frequency aggregation than conventional time-frequency analysis methods. Application of this method to actual seismic data shows that the frequency-division data volume generated by this method is effective in hydrocarbon detection and identification.

Key words time-frequency analysis; non-stationary signal; optimal generalized S-transform; frequency-division profile; hydrocarbon detection

随着地震勘探技术的不断发展和完善, 频谱分析技术已经成为利用地震资料直接进行烃类检测的重要手段之一。而如何将地震资料的时间域数据变换到频率域, 则是进行频谱分析的基础, 也是影响油气检测效果和可靠性的关键技术环节^[1, 2]。由于在地震勘探中, 当地震波在地下介质中传播时, 由于传播路径的复杂性及不同时刻不

同岩性的地层对地震波吸收、衰减程度的差异使得地震信号呈现出明显的时变、非平稳特征^[3]。对于这类信号, 要在时间域和频率域同时揭示信号谱及能量谱的变化特征, 采用传统的基于信号全局特征的傅立叶变换已无能为力, 为此, 人们提出并发展了一系列适合分析非平稳信号的方法, 如短时傅立叶变换 (STFT)、Gabor 变换、小波变换

收稿日期: 2009-01-10。

第一作者简介: 史燕红 (1977-), 女, 硕士研究生, 地球物理信号与信息处理。

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA04A102-12); 国家自然科学基金项目 (40774064)。

(WT)及 Cohen 类^[3~6]双线性时频分析等。

由 Stockwell 等提出的 S 变换是连续小波变换思想的延伸, 其基本小波由简谐波和高斯窗函数的乘积构成, 简谐波在时域仅做尺度伸缩, 而高斯窗函数进行伸缩和平移变换, 与短时傅立叶、小波变换相比有其独特的优点, 如信号的 S 变换分辨率与频率相关同时与其傅立叶谱保持直接的联系, 基本小波不必满足容许性条件等^[7]。然而由于 S 变换中基本小波是固定的, 使其在实际地球物理信号处理和分析的应用中受到限制, 为此, 诸多学者对 S 变换加以发展和推广, 提出了广义 S 变换^[8~12], 在处理不同的实际信号时它们各有自己的优缺点。

本文首次将 Jones 和 Parks^[13]提出的表征信号时频聚集性的度量准则引入到基本 S 变换中, 提出了最优化广义 S 变换, 通过合成信号的仿真实验验证了方法的有效性, 最后给出了该方法在油气检测中的应用实例。

1 基本原理

1.1 S 变换

Stockwell (1996) 将信号 $h(t)$ 的 S 变换定义为如下形式:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right] \exp(-i2\pi f t) dt \quad (1)$$

式中: f 为频率; τ 为时窗函数的中心点, 它控制高斯窗函数在时间轴上的位置。

令

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (2)$$

则 (1) 式变为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{1}{\sigma(f) \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma(f)^2}\right] \exp(-i2\pi f t) dt \quad (3)$$

$\sigma(f)$ 为对应与频率 f 的窗函数的标准差, 用于调制窗函数的宽度, 可见与短时傅立叶变换相比 S 变换的优点就在于窗函数的标准差 σ 是频率 f 的函数, 时窗宽度取决于频率, 在低频段的时窗较宽, 从而可以获得较高的频率分辨率; 而高频段

的时窗较窄, 可获得很高的时间分辨率。

1.2 最优化广义 S 变换

事实上, 对于有些信号来讲, 其窗函数采用式 (2) 定义的标准差所得到的时频分布也许并不是最优的, 为此, 本文对 (2) 式定义的标准差做了改造, 改造后的形式如下:

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|^p} \quad (4)$$

其中 $p = p(f)$ 为对应于频率 f 的最优化调节因子, 则最优化广义 S 变换具有如下的表达式:

$$S^p(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^{2p}}{2}\right] \exp(-i2\pi f t) dt \quad (5)$$

参数 p 控制着窗函数的宽度, 对于给定的信号, 只要参数 p 的最优值能够确定那么最优化广义 S 变换便得以实现。本文引入了 Jones 和 Parks^[13]提出的时频聚集性度量准则, 用于确定 p 的最优值, 整个计算流程如下。

1) 对不同的 $p \in (0, 1]$, 按 (5) 式计算 $S^p(\tau, f)$;

2) 对每一个 p 和 f 根据 Jones 和 Parks 时频聚集性度量准则计算:

$$M_{JP}(f, p) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |S^p(\tau, f)|^4 d\tau}{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |S^p(\tau, f)|^2 d\tau \right)^2} \quad (6)$$

3) 将使 $M_{JP}(f, p)$ 达到最大的 p 值作为对应于频率 f 的最优化调节因子:

$$p_{opt}(f) = \arg \max_p [M_{JP}(f, p)] \quad (7)$$

4) 最优化广义 S 变换即为:

$$S^p(\tau, f) = S^{p_{opt}(f)}(\tau, f) \quad (8)$$

2 合成信号试算对比

图 1a 是合成信号及其时频谱, 信号的表达式为:

$$x(t) = \cos(68\pi t - 20\pi t^2) + \cos(2\pi \sin(5\pi t) + 120\pi t) + \cos(168\pi t + 28\pi t^2) \quad (9)$$

其中, 采样间隔 $\Delta t = 1/256$ s, $t = n\Delta t$ ($n = 0, 1, 2, \dots, 255$)。

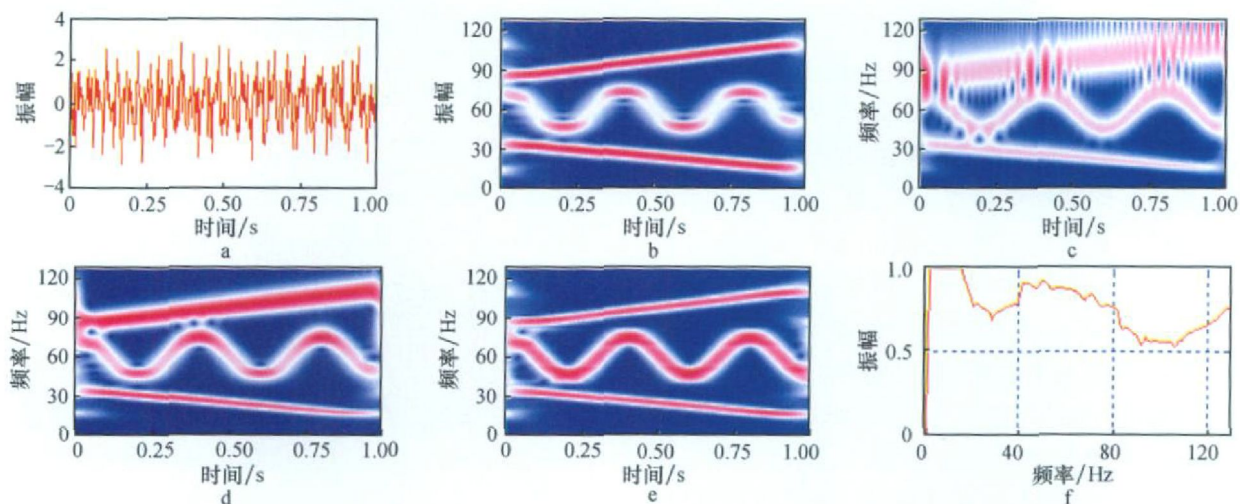


图 1 合成信号及其时频谱

Fig. 1 Composite signal and its time-frequency spectrum

a. 时域信号; b. STFT 变换结果; c. S 变换结果; d. 广义 S 变换结果; e. 最优化广义 S 变换结果; f. 参数 P 的最优化函数值

由上图可以看到, 短时傅立叶变换对信号的线性调频部分具有良好的时频聚集性, 而对正弦调制部分聚集性比较差 (图 1b), S 变换结果对信号的低频部分具有较高的频率分辨率, 但随着频率的增高, 分辨率明显降低且出现了不同信号成分的频率混叠 (图 1c), 采用文献 [12] 提出的广义 S 变换, 虽然分辨率较 S 变换有了很大的改善, 但还是存在随频率增大分辨率降低的问题 (图 1d), 而采用最优化广义 S 变换, 无论是低频成分还是高频成分, 线性调频部分还是正弦调制部分均获

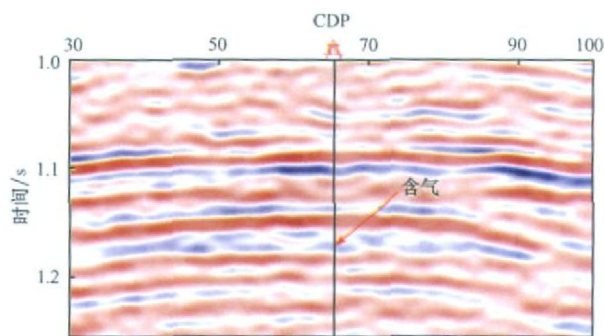


图 2 原始过井剖面

Fig. 2 Original profile tied to well

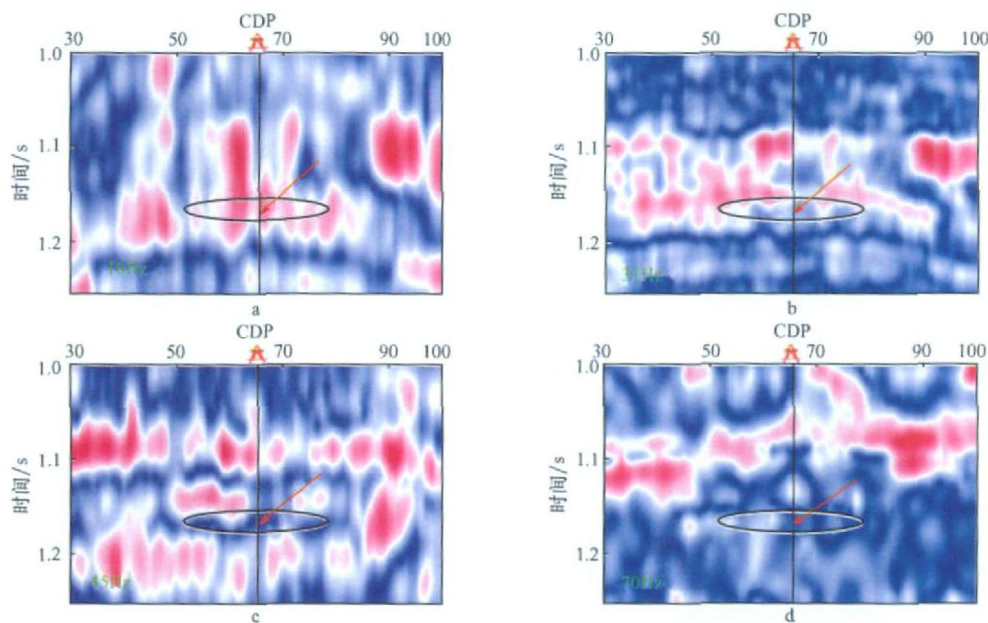


图 3 单频剖面

Fig. 3 Single frequency profiles

得了很高的分辨率 (图 1e), 其相应的最优化调节因子 p 值随频率的变化关系见图 1e。

3 实际资料应用分析

图 2 是某工区的一段过井剖面, 图 3a—d 是采用最优化广义 S 变换所提取的共频率剖面。我们知道, 当地震波在含油气地层中传播时要发生与频率相关的能量衰减, 其中高频成分的衰减远大于低频, 因此衰减的结果使得低频成分保留了比高频成分, 更为丰富的反映地层含油气性的信息^[14]。对比图 3a—d 可以发现, 椭圆标注区域在频率较低 (16 Hz) 时有明显的强能量, 而随着频率的增大 (≥ 31 Hz), 强能量逐渐消失, 由此我们可以预测椭圆标注的区域为有利的含油气段, 钻井资料显示, 在图 2 红色箭头标注处 (落在预测的有利区内) 钻遇了有工业价值的天然气流, 可见预测结果与钻井结果吻合度很好。

4 结论

1) S 变换结合了短时傅里叶变换与小波变换的优点, 并在一定程度上克服了它们的缺点, 适用于非平稳信号的时频分析。

2) 与标准的 S 变换相比, 本文提出的最优化广义 S 变换具有更好的时频聚集性, 对待分析信号的适用性更为广泛。

3) 应用实例表明本文提出的方法作为一种高精度的时频分析技术可以有效地应用于地层的含油气性检测和识别, 从而为储层预测提供了新的工具和手段。

参 考 文 献

- 1 毕研斌, 龙胜祥, 郭彤楼, 等. 应用频率衰减属性预测 TNB 地区储层含气性 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(01): 116~120
- 2 盛秋红, 肖兰雄. 频谱成像技术在采穴构造储层预测中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(01): 141~145
- 3 Cohen L. Time-frequency analysis Theory and application[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995, 25~27
- 4 Bracewell R N. The Fourier transform and its application[M]. New York: McGraw-Hill, 2000, 256~260
- 5 Gabor D. Theory of communication[J]. Journal of IEEE, 1946, 93(3): 429~457
- 6 Chakraborty A, Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods[J]. Geophysics, 1995, 60(6): 1906~1916
- 7 Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998~1001
- 8 Pinnegar C R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 381~385
- 9 Mansinha L, Stockwell R G, Lowe R P. Pattern analysis with two-dimensional spectral localization: Application of two-dimensional S-transform [J]. Physica, 1997, 239(3): 286~295
- 10 Mcfaden P D, Cook J G, Forster L M. Decomposition of gear vibration signals by generalized S-transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(4): 691~707
- 11 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
- 12 陈学华, 贺振华. 改进的 S 变换及在地震信号处理中的应用 [J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 449~453
- 13 Jones D L, Parks T W. A high resolution data-adaptive time-frequency representation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(12): 2127~2135
- 14 范洪军, 李军, 肖毓祥, 等. 地震分频技术在扇三角洲演化过程中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 682~686

(编辑 董立)

中国石化石油科技期刊研讨会召开

2009年3月25~29日, 由中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院、中国石油化工信息学会石油勘探开发研究院分会、《石油与天然气地质》编辑部主办的“中国石化石油科技期刊研讨会”如期召开。与会代表对我国科技期刊发展现状与改革趋势、运作模式、品牌意识、知识产权问题、编辑加工、对外交流机制、发行状况、审稿专家队伍、审退稿机制、编委会作用、稿源与文章质量、人才培养等方面进行了讨论。交流了科技期刊的办刊经验, 探讨了如何不断提高期刊影响因子的问题, 并对新形势下期刊的发展方向进行了展望。

(高岩)