

广义S变换在地震勘探中的研究进展

马见青¹, 李庆春¹, 王美丁²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北有色地质勘查局 物化探总队, 陕西 西安 710068)

摘要: 广义S变换是目前比较新的一种非平稳信号分析的时频分析方法, 其特点和优势为广义S变换的反变换与傅立叶变换有直接的联系, 保证其是无损变换; 线性变换保证其不存在交叉项; 时频分辨率与信号的频率有关; 基本小波不必满足容许性条件; 尺度性质使得广义S变换有很好的频率聚集能力。基于这些特点和优势, 在地震勘探中已经有了广泛的应用, 如利用广义S变换进行瑞利面波频散分析、时频域波场分离与去噪、沉积相旋回以及地震波初至识别等。笔者总结了应用中比较有代表性的广义S变换类型, 并结合实例, 阐述了该方法在地震勘探中的研究进展。

关键词: 时频分析; 广义S变换; 频散分析; 波场分离与去噪; 初至识别

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2011)02-0265-05

信号按照其统计量是否随时间变化可以分为平稳信号和非平稳信号。各阶统计量与时间无关的信号称为平稳信号, 反之, 信号的某阶统计量随时间的变化而变化, 则称为非平稳信号或时变信号。由于地震信号的二阶统计量(功率谱密度)为时变函数, 因此属于典型的非平稳信号^[1]。

为了更好地研究地震信号, 了解它们的频率随时间变化的关系, 需要使用时频分析方法。目前在傅氏变换的基础上, 提出并发展了一系列时频分析方法^[2], 例如线性的短时傅氏变换、连续小波变换等, 它们的算法简单, 且无交叉干扰, 但受测不准原则的限制, 时频分辨率不能同时达到最好。二次型(双线型)时频主要包括Cohen类时频分布、Wigner分布等, 在满足时频边缘分布的条件下, 这类时频分布可以理解能量密度分布, 其时频分辨率一般比较高, 但交叉项干扰很严重。美国地球物理学家Stockwell(1996)提出了S变换^[3], 它与短时傅氏变换和连续小波变换相比, 有许多独特的优势。但由于S变换中的基本小波函数形态固定, 使其在应用中受到限制。为克服这一限制, 许多学者对S变换进行了改造与推广, 提出了各种形式的广义S变换(GST)^[4-9]。

1 广义S变换的基本原理

地震信号 $x(t)$ 的S变换可以用一般式定义为

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

式中, $S(t, f)$ 表示信号 $x(t)$ 的S变换, $w(t)$ 为窗函数, τ 为窗函数的中心。根据窗函数形式的变化, S变换可以表示为如下几种形式:

(1) 当窗函数 $w(t)$ 与频率 f 无关时,

$$w(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

即高斯窗函数, 此时, 式(1)为短时傅氏变换。因此, 可以说短时傅氏变换是S变换的特例。

(2) 当窗函数 $w(t)$ 的宽度与频率 f 有关, 但不存在调节系数时,

$$w(t) = \frac{|f|}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{f^2 t^2}{2}\right),$$

此时, 式(1)为Stockwell等于1996年提出的S变换:

$$S(t, f) = \int x(\tau) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad (2)$$

其中, 窗函数 $w(t)$ 是宽度可变的高斯窗函数, 由简

收稿日期: 2010-04-27

基金项目: “863” 国家高技术研究 A 类课题“金属矿多波多分量地震处理解释新技术、新方法”(2007AA06Z103); 交通部西部交通建设项目(2007 318 812 62); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(2007 0710001)

谐波 $\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}$ 和高斯函数 $e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}}$ 两部分组成, 简谐波

在时间域仅作伸缩变换, 来控制时窗宽度, 而高斯函数则进行伸缩和平移。这样就使得 S 变换的时窗宽度随信号的频率呈反比变化, 在低频部分时窗较宽, 从而可以获得较高的频率分辨率; 而在信号的高频部分时窗较窄, 因此可以获得很高的时间分辨率。

(3) 当窗函数 $w(t)$ 不仅宽度与频率 f 有关, 而且加入调节系数后, 式 (1) 统称为广义 S 变换, Mansinha 等 (1997) 用下面的形式表示窗函数

$$w(t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\gamma_{\text{gs}}}} \exp\left(-\frac{f^2 t^2}{2\gamma_{\text{gs}}}\right) \quad (3)$$

参数 γ_{gs} 控制其有效时间宽度和频带宽度, 其越大, 时宽越大, 带宽越小; 反之, γ_{gs} 越小, 时宽越小, 带宽越大。

(4) Pinnegar 等提出了既可以调节窗函数标准差, 窗口又不对称的广义 S 变换^[5]。其窗函数为双曲窗函数

$$w_{\text{hy}} = \frac{2|f|}{\sqrt{2\pi(\gamma_{\text{hy}}^F + \gamma_{\text{hy}}^B)}} \exp\left(\frac{f^2 [X(\tau - t, \{\gamma_{\text{hy}}^B, \gamma_{\text{hy}}^F, \lambda_{\text{hy}}^2\})]^2}{2}\right), \quad (4)$$

其中

$$X(\tau - t, \{\gamma_{\text{hy}}^B, \gamma_{\text{hy}}^F, \lambda_{\text{hy}}^2\}) = \left(\frac{\gamma_{\text{hy}}^B + \gamma_{\text{hy}}^F}{2\gamma_{\text{hy}}^B \gamma_{\text{hy}}^F}\right)(\tau - t - \zeta) +$$

$$\left(\frac{\gamma_{\text{hy}}^B - \gamma_{\text{hy}}^F}{2\gamma_{\text{hy}}^B \gamma_{\text{hy}}^F}\right) \sqrt{(\tau - t - \zeta)^2 + \lambda_{\text{hy}}^2}, \quad (5)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\gamma_{\text{hy}}^B - \gamma_{\text{hy}}^F)^2}{4\gamma_{\text{hy}}^B \gamma_{\text{hy}}^F}}, \quad (6)$$

(5) 高静怀等将基本小波 $w(t)$ 推广为

$$w(t) = A e^{-\alpha(\beta - t)^2 - i2\pi f_0 t} \quad (7)$$

式中, A 为基本小波的幅度, α 为能量衰减率 ($\alpha > 0$), β 为能量延迟时间, f_0 为基本小波的视频率。定义

$$w_f(t) = A |f| e^{-\alpha(\beta - t)^2 - i2\pi f_0 t} = g_f(t) e^{-i2\pi f_0 t},$$

其中

$$g_f(t) = A |f| \exp[-\alpha(\beta - t)^2]。$$

除上述广义 S 变换的几种典型形式之外, 还有许多学者对窗函数进行简化和变形, 得到了更加实用和可操作性更强的广义 S 变换形式, 读者可以查阅相关的参考文献, 在此不再赘述。

2 广义 S 变换应用现状

目前, 广义 S 变换在地震勘探领域显示出了其强大的功能, 如利用广义 S 变换进行瑞利面波频散

分析^[10-14]、时频域波场分离与去噪^[15-16]、提取沉积相旋回^[17-19]以及地震波初至检测^[5, 20-21]等。

2.1 瑞利面波频散分析

层状介质瑞利面波频散曲线的正演分析表明, 曲线的高频部分与浅层介质相对应, 曲线的低频部分与深层介质相对应, 曲线的拐点与介质的分层界面相对应, 这样, 就可以确定岩土介质的分层情况。提取瑞利面波频散曲线的主要内容之一是求相速度, 常规求相速度的方法是相位谱法, 它是建立在简谐波理论基础之上的, 因此该方法有其固有的缺陷。基于此, 我们试图利用 S 变换时频分析方法进行瑞利面波的频散分析。其基本原理是: 首先在相邻两道数据的时频图上确定某一频率; 然后在这两张时频图上寻找该特定频率的极值点所对应的时间, 计算时间差值; 接着用这两道数据之间的道间距除以这一时间差, 这样就得到了该特定频率的一个相速度值, 对所有的道经过以上相同的处理, 就可以得到该频率的多个相速度值, 对这些值进行统计平均, 就得到该频率的一个频率—相速度值, 对所有的频率进行以上步骤的处理, 并将得到的频率—相速度值连成线, 就得到了频散曲线。

图 1a 所示的是在山西省运城市采集的单炮实际面波记录, 道间距为 1 m, 采样率 0.5 ms。现以第 15 道、第 16 道数据的处理为例来解释该方法。图 1b 是第 15 道、第 16 道数据进行 S 变换得到的时频谱图, 分别在两张时频图上寻找频率为 25 Hz 的极值点所对应的时间分别为 0.160 5、0.169 s, 时间差为 0.008 5 s; 道间距为 1 m, 这样, 频率为 25 Hz 所对应的一个相速度为 $1.0/0.008 5 = 117.65 \text{ m/s}$ 。用同样的方法, 就可以得到不同频率对应的相速度, 即频散曲线。最后, 将频率转换成波长, 并以半波长表示勘探深度, 就可以得到工程勘探中常用的速度—深度图 (图 1c)。

实际资料处理表明, S 变换避免了用传统的相位谱法提取瑞利面波频散曲线时, 在道间距较大的情况下, 计算得到的相邻两道的瑞利面波分量的相位可能会相差 2π 的整数倍的限制。采用 S 变换进行瑞利面波频散曲线提取是一种新的思路, 但该方法提取瑞利面波频散曲线的前提是在时间域内资料有很高的信噪比, 尽量不要包含高频的反射信号, 这种条件在目前去噪技术已经很成熟的情况下, 完全可以满足。

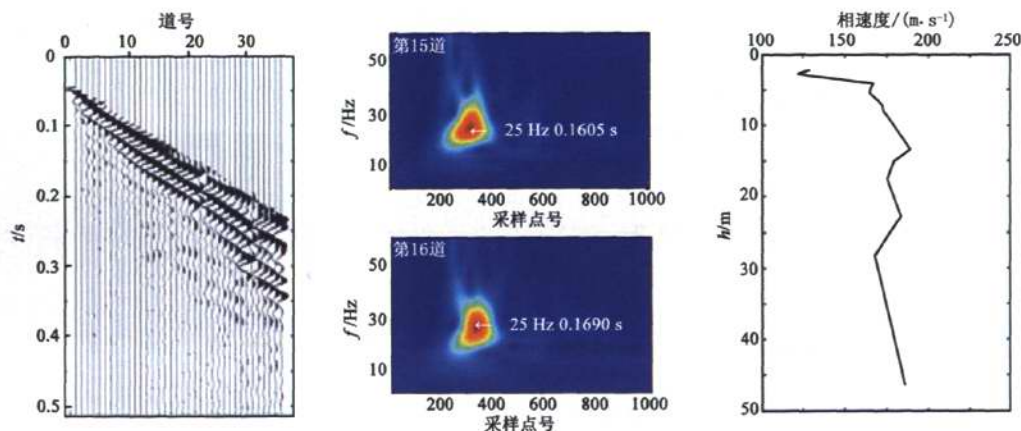


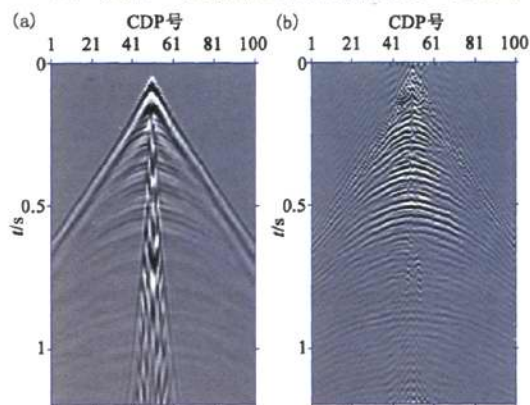
图1 远城单炮实际面波记录(左)、时频谱(中)及速度—深度曲线(右)

2.2 时频域波场分离与去噪

S 变换提供了一种时-频联合表示。通过 S 变换正、反变换可以将信号由时间域变换到时频域,再回到时间域,这个过程没有任何信息损失,因此为压制面波提供了理论支撑。这样,将单道地震信号 $x(t)$ 经 S 变换映射在二维时频面上,根据面波低频率,强振幅的特性,它在时频图上占据特定的区域。设计一个时频滤波器,将面波区域填充为零,然后利用 S 反变换,将滤波后的时频谱变换到时间域,就实现了压制面波的目的。

图 2a 为某野外实际地震炮记录,从炮记录上可以看出,在近偏移距道面波较发育,且有明显的频散。图 2b 是利用 S 变换压制面波后的记录,可以清楚地看到,低频的面波得到了有效的压制,其他地震波仍然清晰的保留,尤其是湮没在面波记录中的反射同相轴变得更加连续。

图 3 为第 55 道数据压制面波前后的 S 变换时



a—原始地震记录;b—压制面波后的重构记录

图2 原始地震记录经压制面波后的结果

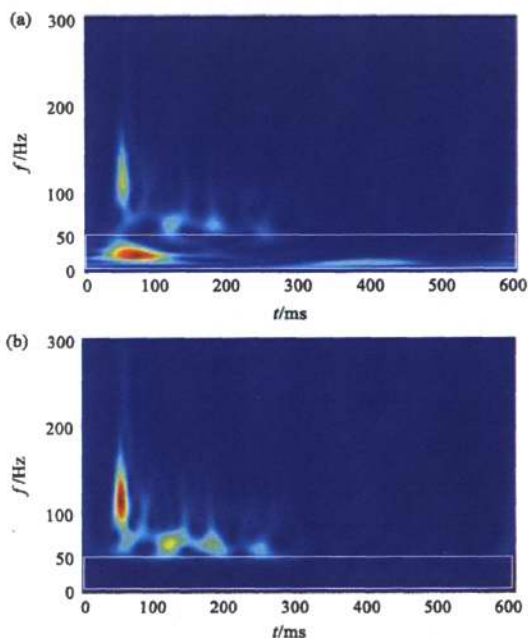


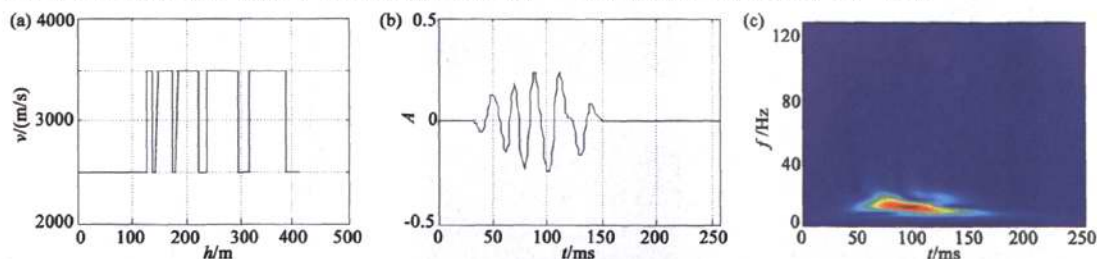
图3 利用 GST 压制地震面波前(a)后(b)的单道时频谱,同样,在时频谱中,面波所分布的区域全部被压制掉了(见白色框)。

2.3 提取沉积旋回路

地震旋回体的主要特点是形成层序体的地层层理厚度与其岩性和粒度成分有明显的相关性,沉积物颗粒由粗到细,则对应的地层层理厚度由大到小。相反,当沉积物颗粒由细到粗,则对应的地层层理厚度逐渐变大。层理结构中的尺度变化及变化的方向性,决定了地震响应频率成分的差异。现在简单模拟一个正旋回的例子。泥岩 2 500 m/s,厚度从 5 m 增加到 30 m;砂岩 3 500 m/s,厚度从 14 m 增加到

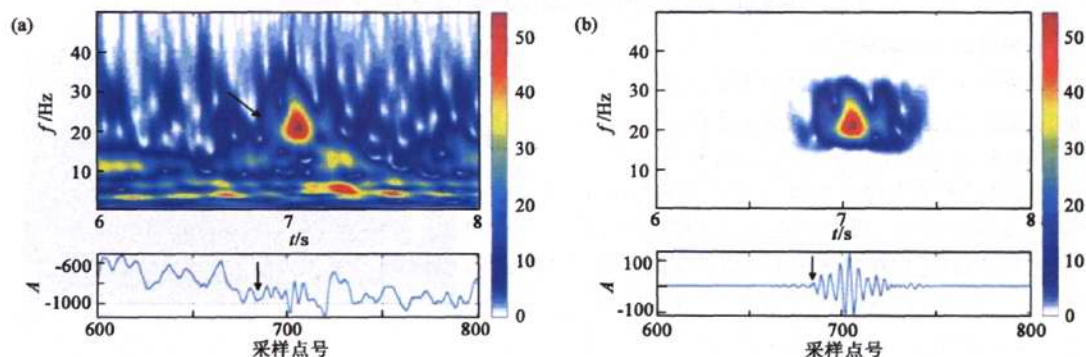
70 m。地震子波采用的是零相位 40 Hz 的雷克子波。由时频谱图 4 可以看出,沉积周期中地层厚度由下向上逐渐减小,反射波频率从左到右由高逐渐

变低,频率随地层厚度的增大而逐渐降低。地震旋回划分方法是顶部对应高频,底部对应低频,分别与沉积旋回和时频分解的趋势一致。



a—正旋回地震模型;b—合成记录;c—合成记录的时频谱

图4 利用 GST 提取沉积相旋回



a—利用广义 S 变换对进行 P 波初至检测;b—经时频滤波后重构的地震记录

图5 利用 GST 进行 P 波初至检测

2.4 地震波初至检测

在地表复杂地区,初至波往往存在以下一些特征:①包含了各种不同类型的波至,相位混乱;②存在微震和噪声等干扰,且干扰波频率和波形特征与初至波不同,从而使初至波峰值相位无法连续追踪,甚至无法拾取。广义 S 变换时频表示具有较好的时频聚集性和时频分辨率,这为 S 变换拾取地震波初至提供了理论基础。地震波初至处前后在时频图上形成振幅能量的突变,因此在时频域内拾取初至比时间域更具有可靠性。图 5a 为 Pinnegar (2003) 利用广义 S 变换对进行 P 波初至检测,从时间域直接判断 P 波初至非常困难,但在时频域中还是可以清楚地识别出来(见箭头所示)。图 5b 是经时频滤波后重构的地震记录,利用广义 S 变换时频滤波将 P 波前后的信号滤掉,从重构记录中可以更加清晰地看到地震波的初至(见箭头所示)。

3 结论与展望

S 变换是以 Morlet 小波为基础的连续小波变换

的延伸,而且与傅氏变换有着直接的联系,它所拥有的独特的优势已经成为非平稳信号分析处理的一个有力的手段,可以调节窗函数标准差。窗口不对称的广义 S 变换弥补了 S 变换的一些不足,具有更高的分辨率。目前,S 变换以及广义 S 变换在地球物理和其他很多领域中已经取得了很多的成果,应用前景广阔,例如上面提到的应用仅仅利用了时间与频率联合表示的信息,还没有用到相位信息。有理由相信这种时频分析方法会得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 朱光明,李庆春,胡建平. 数字信号分析[M]. 西安:陕西人民出版社,2003:384~385.
- [2] 科恩 L. 时-频分析:理论与应用[M]. 白居亮,译. 西安:西安交通大学出版社,1998.
- [3] Stockwell R G, Mansinha L P, Lowe R. Localization of the complex spectrum; the S transform[J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(4): 998~1001.
- [4] Stockwell R G. A basis for ef Digital Signal Processing of the S-transform[M]. Digital Signal Processing, 2006: 1~22.
- [5] Pinnegar C R, Mansinha L. The S-Transform with Windows of Ar-

- bitrary and Varying Shape[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 381 - 385.
- [6] Sejdi E, Djurovi I, Jin Jiang. A Window Width Optimized S-Transform[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008; 1 - 13.
- [7] Pinnegar C R, Mansinha L. The bi-Gaussian Stransform[J]. SIAM Journal of Scientific Computing, 2003, 24(5): 1678 - 1692.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 杨成林, 宣紫燕, 张家奇, 等. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [11] 胡建平, 包乾宗, 陈亚东, 等. 时频分析在实测瞬态瑞雷波相速度提取中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 33(6): 53 - 55.
- [12] 孙党生, 李国占, 焦凯铭, 等. 基于时频分析的瑞雷波相速度提取及其应用[J]. 勘察科学技术, 2003, (3): 58 - 60.
- [13] 彭文, 王亮. 瑞雷面波频散特征的时频分析方法及应用[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(6): 8 - 13.
- [14] 孔令超, 侯兴民, 陈建立. 基于时频分析方法提取瞬态瑞利波频散曲线[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 8 - 13.
- [15] 陈爱萍, 邹文. 基于 S 变换的面波压制技术[J]. 世界地质, 2005, 24(1): 82 - 86.
- [16] 赵淑红, 朱光明. S 变换时频滤波去噪方法[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 402 - 406.
- [17] 雷克辉, 朱广生, 毛宁波, 等. 在小波时频域中研究沉积旋回[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 33(增刊 1): 72 - 73.
- [18] 崔凤林, 谢春来, 付雷, 等. 小波变换时频能量谱技术在地震地层划分中的应用[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 397 - 399.
- [19] 刘喜武, 年静波, 黄文松. 用广义 S 变换提取地震旋回的方法[J]. 石油物探, 2006, 45(2): 129 - 133.
- [20] 邹文, 陈爱萍, 顾汉明, 等. S 变换初至拾取技术及其在复杂山区中的应用[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(2): 63 - 65.
- [21] 顾汉明, 周鸿秋, 张学强. 初至时间的自动拾取[J]. 物探与化探, 1992, 16(2): 120.

SOME ADVANCES OF GENNERAL S TRANSFORM IN SEISMIC EXPLORATION

MA Jian-qing¹, LI Qing-chun¹, WANG Mei-ding²

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Team of Geophysical and Geochemical Exploration, Bureau of Geology for Non-ferrous Metals in Northwest China, CNNC, Xi'an 710068, China)

Abstract: The generalized S transform is a relatively new time-frequency analysis method for non-stationary signal, which has the following characteristics and advantages; S transform inverse transform and Fourier transform is directly linked to ensure that it is the non-destructive transform; linear transform ensure there is no cross-terms; time-frequency resolution and the signal frequency - related; basic wavelet do not have to meet the permit conditions; scale makes the generalized S transform have good aggregation ability for frequency. Based on these characteristics and advantages, the generalized S transform has been widely used in seismic exploration. Such as dispersion analysis of Rayleigh surface wave, wave field separation and noising, Extraction of sedimentary cycles and the first-arrive detection of seismic wave, etc. In this paper, we summarize the present representative of the generalized S transform type, and combine with examples, expound the research progress of this method in seismic exploration. Finally, we give a prospect of generalized S transform in seismic exploration.

Key words: time-frequency analysis; generalized S transform; dispersion analysis; wave field separation and noising; first-arrive detection of seismic wave; first-arrive detection

作者简介: 马见青(1984 -) 男,汉族,山西忻州人,博士研究生。现在长安大学地质工程与测绘学院地球探测与信息技术专业攻读博士学位,研究方向为地震数据信号处理及多波多分量波场分离,公开发表学术论文数篇。