

· 处理方法 ·

S变换时频滤波去噪方法

赵淑红* 朱光明

(长安大学地质工程与测绘工程学院)

赵淑红,朱光明.S变换时频滤波去噪方法.石油地球物理勘探,2007,42(4):402~406

摘要 本文把S变换用于时频滤波。首先详细介绍了S变换的理论基础和具体实现过程,其次把S变换与其他滤波方法所取得的效果进行了比较,最后利用S变换对实际资料进行时频滤波,证明S变换时频滤波去噪方法克服了传统滤波去噪方法滤波因子不能随时间、频率变化而变化的缺陷。对于不同层有效波频率随时间变化的地震数据,S变换的时频窗的形状随着频率的变化而变化,其时窗宽度随频率呈反向变化。在低频段的时窗较宽,从而获得较高的频率分辨率;而高频段的时窗较窄,故可获得很高的时间分辨率。通过对理论记录 and 实际VSP数据的应用,证明S变换时频滤波方法不但可以滤除分布在不同时间范围、具有相近频率成分的干扰波(井筒波等),也可以消除视速度与有效波速度接近的干扰波。充分说明了S变换在时频滤波方面的优越性。

关键词 S变换 傅里叶变换 时频滤波

1 引言

S变换是由美国地球物理学家 Stockwell 于 1996 年提出的一种加时窗傅里叶变换方法^[1],它是以 Morlet 小波为基本小波的连续小波变换的延伸。S变换集中了短时傅里叶变换和小波变换的优点,其时窗宽度随频率呈反向变化,即在低频段的时窗较宽,从而获得较高的频率分辨率;而高频段的时窗较窄,故可获得很高的时间分辨率。克服了其他滤波方法的缺陷。在S变换中,基本小波由简谐波与高斯函数的乘积构成。基本小波中的简谐波在时间域仅作伸缩变换,而高斯函数则进行伸缩和平移。这一点与连续小波变换不同,在连续小波变换中,简谐波与高斯函数进行同样的伸缩和平移。与小波变换、短时傅里叶变换等时-频域方法相比,S变换有其独特的优点。如信号的S变换的时-频谱分辨率与频率(即尺度)有关,S变换的逆变换是傅里叶变换,因此与傅里叶谱密切相关;同时基本小波不必满足容许性条件等。在实际应用中,先把S变换从时间域转换到时频域,再转换到频率域,最后转换回时间域,因此具有无损可逆性。这些特点在实际应用中具有非常重要的价值。例如:在天然地震中用于

检测纵波的到达时间^[2],在储层预测中用于确定薄层厚度,以及各种瞬态信号的检测和识别^[3]、机械故障的早期诊断^[4]和分解机械的齿轮振动^[5]等等。尤其是把S变换应用于时频滤波中去除噪声,效果明显优于其他滤波方法。

众所周知,常用的去噪滤波方法多种多样,例如:一维滤波、 $F-K$ 域滤波、 $-p$ 变换滤波、SVD滤波、小波变换等。然而,各种去噪方法都受到使用条件的限制。一维频率滤波可以滤除与有效信号频带范围不同的噪声; $F-K$ 域滤波可以滤除与有效信号视速度不同的干扰波;SVD滤波假定有效波与干扰波在空间相干性上有明显差别等。地震记录只有满足某种去噪方法所需要的前提条件,才有可能取得良好的效果。本文把S变换应用于时频滤波中,首先详细介绍了S变换的理论基础和具体实现过程,然后把S变换与其他滤波方法进行了比较,并通过去除实际VSP资料中的井筒波,进一步验证了S变换时频滤波方法的优越性。

2 方法原理

S变换可以表示成连续小波变换(CWT)的“相位校正”。函数 $h(t)$ 的S变换表示为

* 陕西省西安市雁塔路126号长安大学地测学院物探系,710054

本文于2006年7月11日收到,修改稿于2007年4月26日收到。

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) w(\tau - t) \exp(-i 2 \pi f \tau) d\tau \quad (1)$$

其中

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

$$(f) = \frac{1}{|f|}$$

将式(2)代入式(1),有

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

设 $W(v)$ 为 $w(t)$ 的傅里叶变换,即

$$W(v) = \exp\left[-\frac{2\pi^2}{f^2} v^2\right] \quad (4)$$

式中的 v 和 f 具有相同的单位。

S 变换的窗函数必须满足条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} w(\tau - t, f) d\tau = 1$$

因此, S 变换可以写成

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \exp(-2\pi i f \tau) \times \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau - t, f) d\tau dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau = H(f) \quad (5)$$

式(5)实际上给出了 S 变换和傅里叶变换的转换关系。此外式(5)可以确保 S 变换可逆。

根据短时傅里叶变换在时间域和频率域的相互转化过程,同样可以得到 S 变换在频率域表示,具体表达式为

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(v + f) W(v) \exp(i 2 \pi v t) dv$$

$$= F^{-1} [H(v + f) W(v)] \quad (6)$$

F^{-1} 表示傅里叶反变换。

3 广义 S 变换时频滤波

时频分析方法除了表征信号的频率成分随时间变化外,另一个重要的用途是去除噪声。根据噪声在时频平面上的分布特征,确定时频滤波因子,再利用时频分析反变换方法,从含噪声的信号中消除噪声,提高剖面的信噪比,这种滤波方法称为时频滤波。时频滤波通常根据地震记录道的频谱分析资料,分析不同时刻的频率范围,设计随时间变化的滤

波因子,对不同时刻的地震波采用与之匹配的滤波因子进行滤波。当地震波在地层中传播时,随着传播距离的增加,高频成分迅速衰减。传统的时变滤波方法只能对浅、中、深层等每个时间段利用频率的差异进行一维滤波,尤其是对于一个二维地震剖面,如果每道利用相同的滤波因子进行滤波,也无法满足地震子波在地层中传播时不稳定的实际情况,不能有效去除噪声,完整地保留有效波的频率成分。本文利用广义 S 正反变换实现时频滤波,可以克服常规时变滤波方法的缺陷。

3.1 时频滤波器

时频滤波器的滤波过程表示为

$$y(n) = S^{-1} [S[h(n)] H(n, k)] \quad (7)$$

式中: S 和 S^{-1} 分别为 S 变换和反变换; $H(n, k)$ 为时频滤波算子。时频滤波算子一般根据信号的瞬时频率被设计成一个二维的窗函数,即

$$H(n, k) = \begin{cases} 1 & k \in [f_i(n) - B(n)/2, f_i(n) + B(n)/2] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_i(n)$ 为信号的瞬时频率; $B(n)$ 为时频滤波器的带宽。带宽 $B(n)$ 一般根据信号的能量在时频平面上沿瞬时频率聚集程度来确定。

3.2 时频滤波器的实现过程

(1) 利用频谱分析、 $F-K$ 变换、S 变换等方法,估计有效信号和干扰信号的瞬时频率分布特征;

(2) 根据时间剖面确定滤波器的时间分布范围,拾取每道中噪声的分布时间,确定噪声在整个时间剖面上的分布范围,以文件的形式保存;再根据噪声频率的分布特征,确定滤波器的时频滤波算子 $H(n, k)$, $H(n, k)$ 根据噪声的时间分布和频率分布范围确定,并没有具体的表达式;

(3) 利用 S 变换计算信号 $h(n)$ 的时频分布 $S(n, k)$;

(4) 对 $S(n, k) H(n, k)$ 进行反变换得到 $y(n)$, $y(n)$ 即为时频滤波器的输出。

4 理论资料

图 1 为短时傅里叶变换时频滤波与一维频率滤波的效果比较图。图 1a 为输入数据,它是由频率不变的子波与反射系数褶积得到的理论记录加白噪而得到的结果;图 1b 为滤波因子与利用短时傅里

叶变换得到的时频参数进行乘积的结果;图 1c 为短时傅里叶时频滤波结果;图 1d 为一维频率滤波结果。从图 1c、图 1d 中可以看出二者差别明显,主要因为有效信号的频率成分不随时间发生变化,时频滤波很难体现出其优势。对于实际地震记录,随着地震波在介质中传播距离的变化,有效波的频率成分发生改变,浅层干扰波的频率成分可能和深层有效波的频率成分重合,此时便可利用时频滤波方法滤除分布在不同时间范围、具有相同频率成分

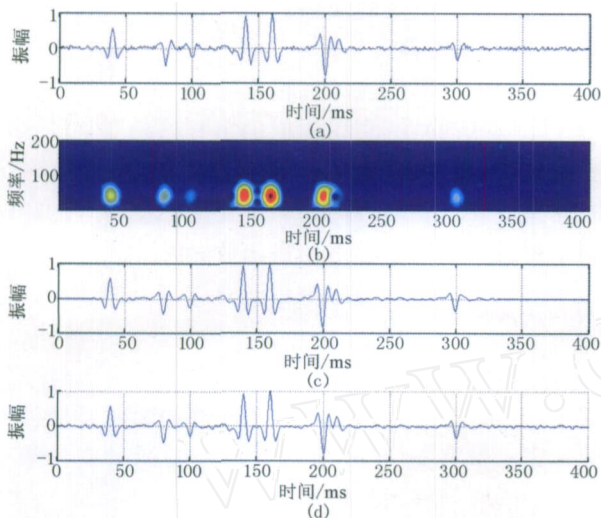


图 1 短时傅里叶变换时频滤波与一维滤波效果分析

(a)输入数据(各个层位处于波的主频不变,加随机噪声);
(b)时频分布参数与滤波因子的乘积;(c)短时傅里叶变换时频滤波结果;(d)一维滤波结果

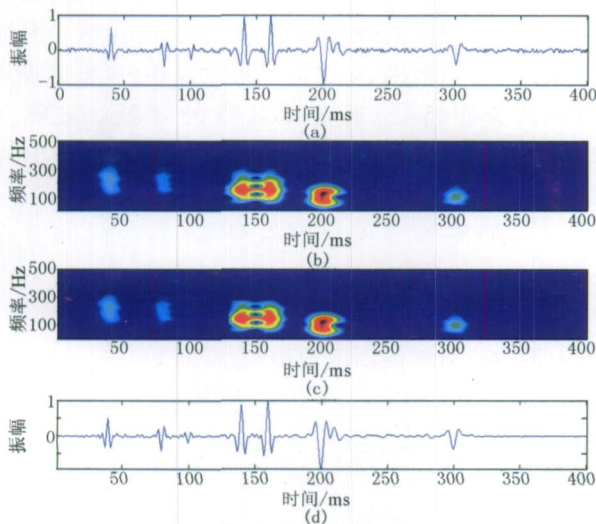


图 2 短时傅里叶变换时频滤波

(a)输入数据(各个层位处于波的主频变化,加随机噪声);
(b)时频分布;(c)时频分布参数与滤波因子的乘积;(d)短时傅里叶变换滤波结果

的干扰波。图 2、图 3、图 4 分别为短时傅里叶变换、高斯 S 变换及一维滤波方法对不同层位地震道的滤波分析效果。可以看出,对于不同层位有效波频率随时间变化的地震数据,利用短时傅里叶变换、高斯 S 变换进行时频滤波的效果要好于一维滤波的效果。由于短时傅里叶变换时窗形状不能随频率的变化而改变,而高斯 S 变换的时频窗的形状随着频率的变化而变化。因此,利用高斯 S 变换滤波的效果要好于短时傅里叶变换。

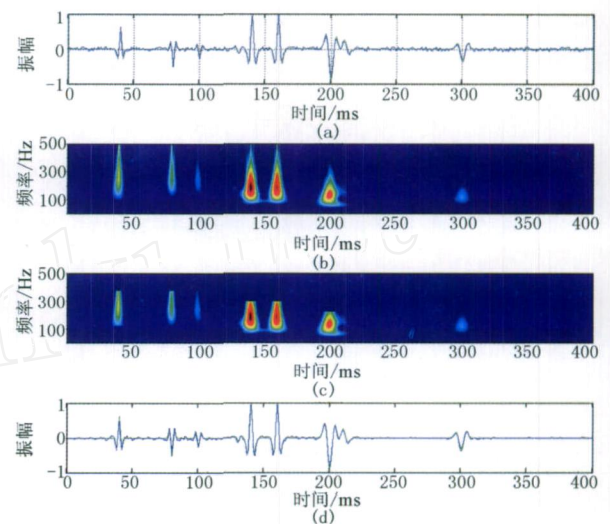


图 3 高斯 S 变换时变滤波

(a)输入数据(各个层位处于波的主频变化,加随机噪声);
(b)时频分布;(c)时频分布参数与滤波因子的乘积;(d)高斯 S 变换滤波结果

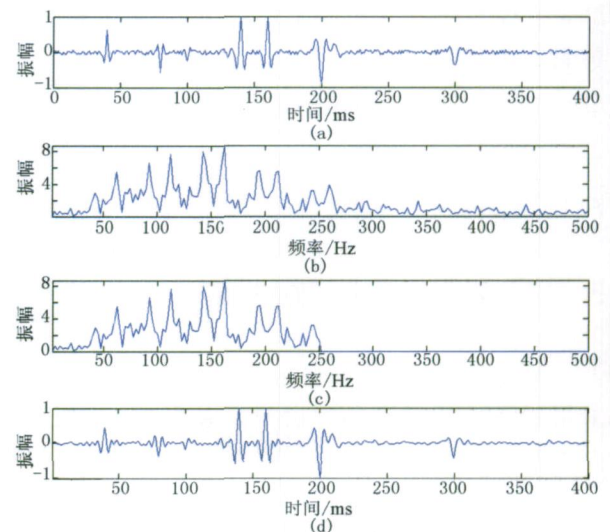


图 4 一维滤波对主频变化的理论记录(加噪声)一维滤波

(a)输入数据(各个层位处于波的主频变化,加随机噪声);
(b)振幅谱;(c)有效频带范围的振幅谱;(d)一维滤波结果

5 S 变换在实际资料中的应用

图 5 为输入的 VSP 数据,其中含有严重的井筒波。图 6 为广义 S 变换时频滤波后的剖面。从图 5、图 6 中可以看出,图 6 中的井筒波受到明显压制,信噪比得到很大提高。图 7 为一维滤波的剖面,其中的井筒波也受到明显压制,信噪比与图 5 相比有所提高,但有效波的频率成分损失严重。图 8 为 $F-K$ 滤波后的结果,其中的井筒波压制效果不佳,而且有效波的频率成分也有明显损失。因此可

以得出结论:一维滤波和 $F-K$ 滤波方法在滤除井筒干扰波的同时严重损害了有效波的频率成分。而 S 变换时频滤波方法由于具有时窗宽度随频率呈反变化,在低频段的时窗较宽,从而获得较高的频率分辨率;而在高频段的时窗较窄,故可得到很高的时间分辨率。由图 6 可见,井筒干扰波得到了很好地压制,分辨率、信噪比明显高于其他滤波方法。

图 9 和图 10 分别是对上述 VSP 数据进行 S 变换时频滤波前、后的最后一道数据的时频分布图(对每一道地震数据进行时频滤波时,选取的时频窗是变化的,图 9、图 10 仅显示最后一道

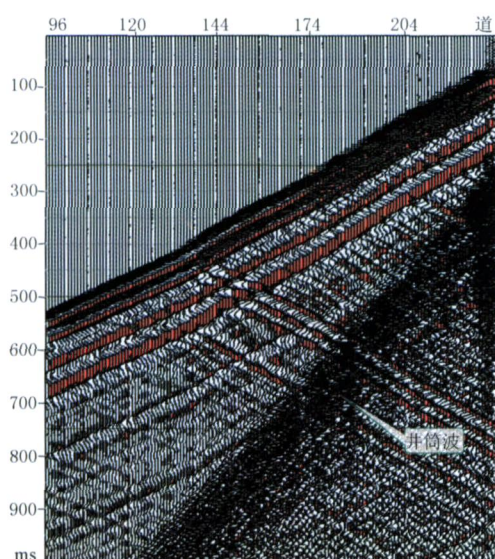


图 5 输入的零炮检距 VSP 数据

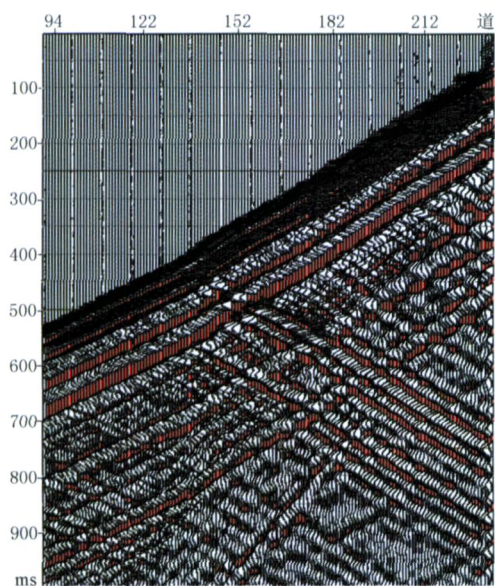


图 6 广义 S 变换去除井筒波后的剖面

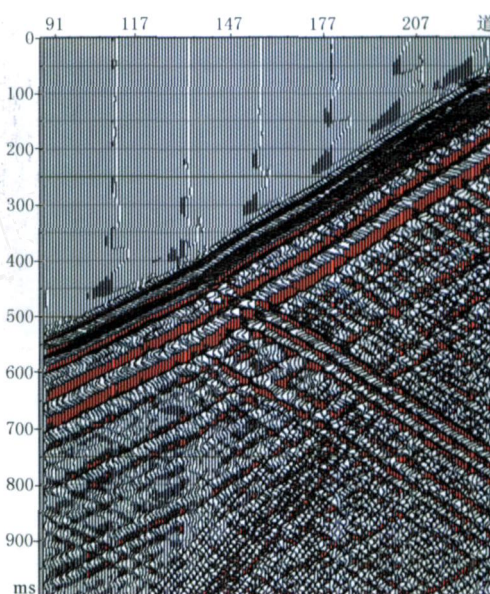


图 7 一维滤波去除井筒波后的剖面

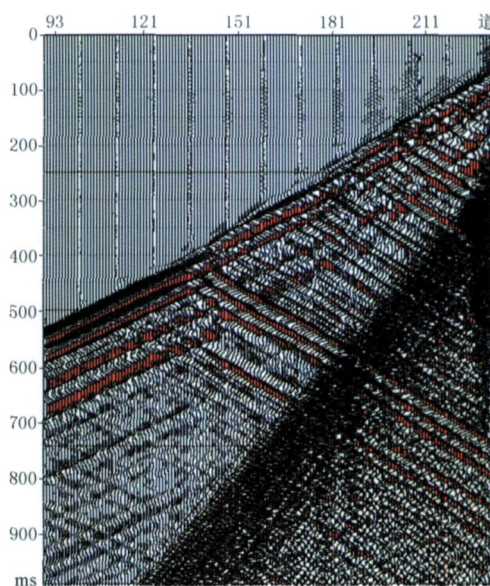


图 8 $F-K$ 滤波去除井筒波后的剖面

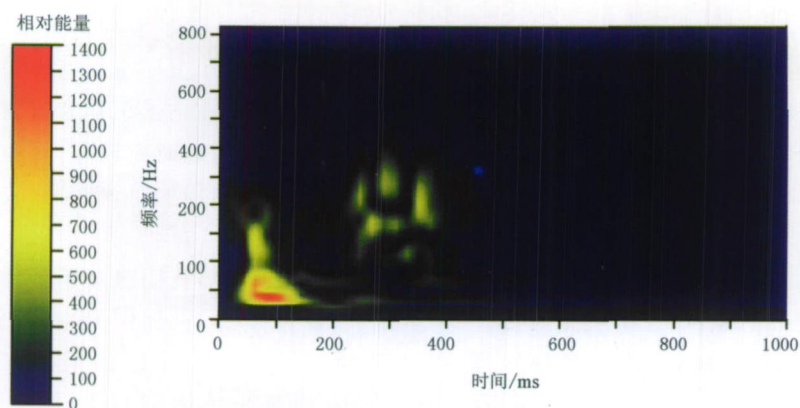


图9 图5中最后一道的时频滤波前剖面

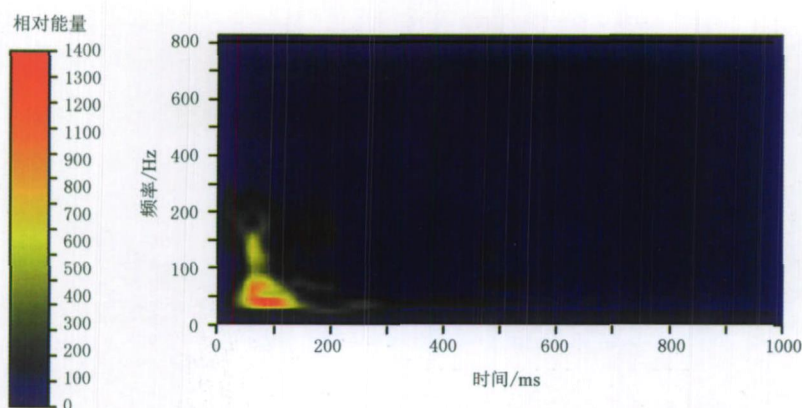


图10 图5中最后一道的时频滤波后剖面

地震数据滤波前、后的时频图)。从图9中可以看出,在时间200~500ms范围内分布有井筒干扰波,通过S变换时频滤波后,滤除了井筒干扰波(图10)。

6 结论

S变换时频滤波去噪方法克服了传统滤波去噪方法滤波因子不能随时间、频率的变化而变化的缺陷。对于不同层有效波频率随时间变化的地震数据,S变换的时频窗的形状随着频率的变化而变化,其时窗宽度随频率呈反向变化。在低频段的时窗较宽,从而获得较高的频率分辨率;而高频段的时窗较窄,故可获得很高的时间分辨率。通过对理论记录和实际VSP数据的应用,证明S变换时频滤波方法不但可以滤除分布在不同时间范围,具有相近频率成分的干扰波(井筒波等),而且也可以消除视速度

与有效波速度接近的干扰波。充分说明了S变换在时频滤波方面的优越性。

参考文献

- [1] Stockwell R G et al. Localization of the complex spectrum: The S-transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4):998~1001
- [2] Robert Pinnegar C et al. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape. *Geophysics*, 2003, 68(1):381~385
- [3] Andria G et al. Application of Wigner-Ville distribution to measurements on transient signals. *IEEE trans. Instrumentation and Measurement*, 1994, 43(2):187~193
- [4] Daponte P et al. Detection of echoes using time-frequency analysis techniques. *IEEE trans. Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(1):30~40
- [5] McFadden P D et al. Decomposition of gear vibration signals by the generalized S-transform. *Mech Syst Signal Process*, 1999, 13, 691~707

(本文编辑:金文昱)

作者介绍

李庆忠 中国工程院院士,教授,1930 年生;1952 年毕业于清华大学物理系;曾在新疆、大庆、胜利及原石油物探局从事石油地震勘探工作 50 余年,所提出的理论和方法不仅解决了油气勘探中的技术难题,而且对物探技术的发展产生了深远影响,被石油天然气总公司命名为“石油工业杰出科技工作者”;先后出版专著两部,发表有影响的技术论文近 30 篇;现在中国海洋大学从事地震勘探领域的科研与教学工作。

蔡希玲 高级工程师,1962 年生;1981 年毕业于石油物探学校地震解释专业,1990 年获石油大学勘查地球物理专业学士学位,2000 年获成都理工学院地球探测与信息技术专业硕士学位;一直在东方地球物理公司(原石油物探局)研究院从事地震数据分析、处理和物探方法研究工作;现为中国地质大学(北京)在职博士研究生。

杨海生 高级工程师,1957 年生;1992 年于湖北省高等教育自学考试数学专业本科毕业;先后在江汉油田物探研究所和勘探开发研究院从事波动方程研究、地震方法应用软件开发设计及物探数据处理工作,发表论文约 10 篇。

董凤树 高级工程师,1967 年生;1989 年本科毕业于天津师范大学物理系,2002 年获中国石油大学(北京)地质工程专业硕士学位;先后在大港油田物探公司及东方地球物理公司海上勘探事业部从事地震数据采集和资料处理工作。

石战结 博士,工程师,1978 年生;2001 年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院勘查技术与工程专业,2006 年获该校地球探测与信息技术专业博士学位;曾先后发表论文近 10 篇;现在大庆油田有限责任公司勘探开发研究院从事地震数据处理与解释工作。

杨培杰 博士研究生,1972 年生;1994 年本科毕业于大庆石油学院测井专业,2005 年获中国石油大学(华东)控制理论与控制工程专业硕士学位;主要从事测井数据的数据处理与解释工作;现在中国石油大学(华东)攻读博士学位,研究领域包括储层地球物理反演、地震信号处理、属性优化分析等。

赵淑红 讲师,1973 年生;1995 年毕业于西安地质学院应用地球物理专业并获学士学位,2006 年获博士学位;现在长安大学地质工程及测绘工程学院从事地球物理领域的教学与研究工作。

漆立新 高级工程师,1963 年生;1980 年毕业于中国地质大学(武汉)物探系,获学士学位,1991 年获该校地球探测与信息技术专业硕士学位;现在中石化西北分公司勘探开发研究院从事油气地震勘探与开发研究,同时为中国地质大学(武汉)在读博士研究生。

单联瑜 高级工程师,1958 年生;1982 年毕业于华东石油学院;现在胜利油田物探研究院从事地震资料的处理及科研管理工作,已发表多篇论文。

皮红梅 博士研究生,1981 年生;2003 年毕业于吉林大学地球物理专业,获理学学士学位;现在该校地球探测科学与技术学院攻读固体地球物理专业博士学位,研究领域为复杂地震波场数值模拟及地震非线性研究。

季敏 博士研究生,1976 年生;1999 年毕业于大庆石油学院应用地球物理专业;主要从事地震震属性、地震综合解释等方面的研究工作;目前在中国石油大学(北京)攻读硕士和博士学位。

陈海清 高级工程师,1964 年生;1983 年毕业于石油物探

学校地震解释专业,1991 年获石油大学函授学院勘查地球物理专业学士学位;一直在东方地球物理公司研究院地质研究中心从事地震资料解释及综合研究工作,现同时为中国海洋大学海洋地球科学学院在职博士研究生。

王保丽 博士研究生,1981 年生;2004 年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业,2006 年获该校地球探测与信息技术专业硕士学位;现在该校攻读博士学位,研究专业为地质资源与地质工程。

董臣强 高级工程师,1970 年生;1992 年本科毕业于成都地质学院石油地质专业,2000 年获中国地质大学(北京)石油与天然气工程专业硕士学位;一直从事油气勘探研究工作;现就职于胜利油田分公司新疆勘探开发中心,同时在职攻读中国地质大学(北京)石油与天然气工程专业博士学位。

唐华凤 博士,1979 年生;2001 年本科毕业于吉林大学资源环境专业,2004 年获该校海洋地质专业硕士学位,2007 年获该校矿产普查与勘探专业博士学位;求学期间在专业期刊上发表论文 8 篇;现在吉林大学地球科学学院从事石油地质领域的教学与科研工作。

孟小红 教授,博士生导师,1958 年生;1982 年毕业于长春地质学院地球物理专业,1987 年获该院地球物理专业硕士学位,1991 年获中国地质大学(北京)地球物理专业博士学位;现在中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院从事计算与综合地球物理领域的教学与科研工作。

张翔 副教授,清华大学博士后,1969 年生;1994 年毕业于江汉石油学院应用地球物理专业,获硕士学位;曾参与纵、横波勘探等多项研究,发表论文多篇;现在长江大学地球科学学院从事电磁勘探、模式识别及图像处理等方面科研和教学工作。

朱军 高级工程师,1966 年生;1987 年毕业于西南石油学院物探专业,获学士学位,1990 年获石油大学应用地球物理专业硕士学位。毕业后先后在西安石油勘探仪器总厂、中国石油集团测井有限公司从事测井方法和仪器的研究开发工作,曾主持和参与多项部级项目研究开发,发表论文 20 余篇,获专利多项。现在中国石油勘探开发研究院研究生部攻读博士学位。

郝志伟 硕士研究生,1980 年生;2004 年毕业于中国石油大学(华东)石油地质专业,获学士学位;现在胜利油田物探研究院从事石油勘探研究工作,同时为中国石油大学(华东)在职硕士研究生。

孙怡 工程师,1973 年生;1995 年毕业于西北大学地质系石油与天然气地质专业,2004 年获石油大学(华东)地球探测与信息技术专业硕士学位;一直从事石油勘探研究;现为中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业在读博士研究生。

韩复兴 博士研究生,1981 年生;现在吉林大学地球探测科学与技术学院应用地球物理系攻读博士学位,研究方向为地震波传播与成像。

钱荣钧 教授级高级工程师,中国石油集团公司高级技术专家,1945 年生;1969 年毕业于北京石油学院勘查地球物理专业;曾参加过辽河、中原、内蒙、塔里木等油田的勘探工作,长期致力于地震勘探技术的研究和管理工作,先后主持多项国家、省部级和局级重大攻关项目;现为《石油地球物理勘探》杂志主编。

construct phase spectrum of seismic wavelet, and yielded the amplitude spectrum of wavelet by autocorrelation of seismic traces, from which the seismic wavelet with mixed phase could be detected, realizing the deconvolution of seismic traces by improved Cauchy-constrained maximum posteriori deconvolution. It is shown by simulation tests and practical seismic data processing that maximum posteriori deconvolution can improve the resolution of seismic data in a precondition without reducing S/N ratio of seismic data.

Key words: high-order statistics, trispectrum, mixed-phase seismic wavelet, Cauchy prior distribution, maximum posteriori deconvolution

Yang Pei-jie, Department of Geophysics, College of Earth Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Time-frequency filtering to denoise by S transform.

Zhao Shu-hong and Zhu Guang-ming. OGP, 2007, 42(4):402 ~ 406

The paper uses the S transform for time-frequency filtering. Firstly, we introduced in detail the theoretical basis and concrete implement process of S transform, then, compares the achieved results of S transform with that of other filtering approaches, and finally uses S transform to carry out time-frequency filtering of practical data, demonstrating that the time-frequency filtering to denoise by S transform algorithm overcame the shortage that the filtering factors in traditional filtering and denoise approaches can not change with time and frequency variation. For the seismic data that the frequencies of significant events on different horizons varies with times, the shape of time-frequency windows of S transform varies with frequency, that is the width of windows varies with frequency in opposite direction: wide windows in low frequency band, yielding higher frequency resolutions; narrow windows in high frequency band, yielding higher time resolution. It is shown by the application of theoretical records and practical VSP data that time-frequency filtering approach by S transform can not only filter the noises with similar frequency contents and distributing in different time range (such as tube wave), but also diminish the noises that the apparent velocities approach to

the effective wave velocities, fully demonstrating the superiority of S transform in the time-frequency filtering aspect.

Key words: S transform, Fourier transform, time-frequency filtering

Zhao Shu-hong, Applied Geophysical Institute, Yanta Campus, Chan'an University, Xi'an City, Shanxi Province, 710054, China

Analysis of velocity field-building factors in Yakenbei area of Tianshan southern margin. Qi Li-xin and Gu Han-ming. OGP, 2007, 42(4):407 ~ 412

Based on the 3-D prestack depth migration results in Tianshan southern margin, the paper built up 2-D seismic-geologic model of Yakenbei area. In the design of model, we considered the gravel layer with high velocity that rapidly changes in lateral direction in Quaternary Xiyu Formation of shallow layer in Yakenbei area and the low-velocity gypsum mudstone layer that significantly changes in structural feature in Tertiary Jidike Formation of deep layer. The shot gather records were computed by simulation of field geometry in the area, then the common stack velocity and stack-migration sections were further yielded, with which the practical mean-square-root (msr) velocity values of the model and seismic-geologic models were correlated. It is shown by analyzed results that the velocities gradually changing laterally above the target makes the stack velocities be lower than msr velocities; existence of shallow gravel layer makes the stack velocities be higher than msr velocities above the target. Abovementioned both integrative influences make the stack velocities increasing by 8 % in comparison with msr velocity. The influence of shallow high-velocity gravel layer on time imaging of underburden is lower, but makes the stack velocities higher in deeper parts on both sides of high-velocity gravel layer, leading depth section to produce false sag image, and also to increase the structural variation amplitude near sag. Therefore, there is important meaning for guiding the error correction of common velocity analysis that quantitatively analyzing the errors of ordinary velocity analysis produced by velocity anomaly of two anomalous velocity zones: shallow high-velocity gravel layer and low-velocity gypsum mudstone layer in Yakenbei area and variation law.