

S变换时频滤波与其它滤波方法的比较

赵淑红, 王璇

(长安大学地质工程及测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:在提高信噪比时通常根据信号和噪音的差异选取不同的滤波方法。由于地震记录的复杂性,有时有效波与干扰波在视速度或频率上没有明显差异,为此本文提出一种利用S变换时频滤波的方法,并比较了该方法相对其它滤波方法在时频滤波方面的优势。

关键词:S变换; 时频滤波; 短时傅立叶变换; F-K滤波

中图分类号:P315.3⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2007)03-0224-06

Comparison between the Time-frequency Filtering of S Transform Method and Other Filter Method

ZHAO Shu-hong, WANG Xuan

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract:In usual different filter methods are selected according to the differences between effective signal and noise for increasing the signal-noise ratio. But for complication of seismic data, sometime the effective signal and noise have no clear difference in apparent velocity and frequency. For this problem a method using S transform to fulfill the time-frequency filtering is presented in this paper, and the advantage of S transform in time-frequency filtering is compared with other filter methods through example.

Key words:S transform; Time-frequency filtering; Short-time Fourier transform; F-K filtering

0 前言

在提高地震波信噪比方面,人们根据信号与噪音在某些方面的差异(例如视速度、频率等)来确定选取什么样滤波方法。常用的去噪方法有:一维滤波、F-K域滤波、 τ - P 变换滤波、SVD滤波、小波变换去噪等。但是各种去噪方法都有其使用条件,例如一维频率滤波可以把与有效信号频带不同的噪音消除掉;利用F-K域滤波可以把与有效信号视速度不同的干扰滤掉;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。只有地震记录满足某种去噪方法所需要的条件,才有可能取得良好的效果。实际地震记录非常复杂,本文提出的利用S变换时频滤波的方法可用在有效波与干扰波在视速度或者频率等方面都没有明显的差异时。并且通过实例比较S变换在时频滤波方面的优势。

1 方法原理

1.1 S变换

S变换首先由 Stockwell^[1]等人提出,它是以 Morlet小波为基本小波的连续小波变换的延伸。在S变换中基本小波是由简谐波与高斯函数的乘积构成的。与连续小波变换不同,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。而在连续小波变换中,简谐波与高斯函数进行同样的伸缩和平移。

S变换可以认为是连续小波变换(CWT)的“相位校正”。函数 $h(t)$ 的S变换表示为

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot w(\tau - t) \cdot \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

这里

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

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

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right) \cdot \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (3)$$

用 $W(v)$ 表示 $w(t)$ 的傅立叶变换

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

v 的单位和 f 的单位相同。

$$\begin{aligned} S \text{ 变换的窗函数必须满足条件: } \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau-t, f) d\tau &= 1, \text{ 因此, } S \text{ 变换和傅立叶变换满足关系式} \\ \int_{-\infty}^{\infty} S(t, f) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-2\pi i f t) \times \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau-t, f) d\tau dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-2\pi i f t) dt = H(f) \end{aligned} \quad (5)$$

同时, 式(5)可以确保 S 变换是可逆的。

根据短时傅立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 变换在频率域的表达, 具体表达式为

$$\begin{aligned} S(t, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(v+f) \cdot W(v) \cdot \exp(i2\pi v t) dv \\ &= F^{-1}(H(v+f) \cdot W(v)) \end{aligned} \quad (6)$$

F^{-1} 表示傅立叶反变换。

1.2 短时傅立叶变换

研究信号 $h(t)$ 在某一时刻 t 上的特征可以加强 t 时刻的信号, 衰减其它时刻的信号, 通过用中心在 τ 的窗函数 $w(t)$ 乘以信号来实现, 短时 Fourier 变换可以表示为

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) w(t-\tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau \quad (7)$$

式中 h 表示信号; τ 和 f 分别表示时间和频率, 令 $\omega = 2\pi f$ 。

利用褶积理论, 上式也可以表示为

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha+f) W(\alpha) \exp(2\pi i \alpha t) d\alpha \quad (8)$$

这里 W 是 w 的傅立叶变换; α 的单位和 f 相同。

短时反 Fourier 变换表示为

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} STFT(\tau, f) w(t-\tau) \exp(2\pi i f t) d\tau df \quad (9)$$

这样信号在窗函数上的展开就可以表示为在 $[\tau - \delta, \tau + \delta]$ 、 $[\omega - \epsilon, \omega + \epsilon]$ 区域内的状态, 并把这一区域称为窗口。 δ 和 ϵ 分别称为窗口的时宽和频宽, 时宽和频宽表示时频分析中的分辨率, 窗宽越小则分辨率越高。如果 δ 和 ϵ 都非常小, 就会有很好的时频分析效果。但海森堡 (Heisenberg) 测不准原理 (Uncertainty Principle) 指出 δ 和 ϵ 是互相制约的, 两者不可能同时为无限小的数值 (事实上, $\delta\epsilon \geq \frac{1}{2}$, 且仅当 $w(t)$ 为高斯函数时, 等号成立)。

1.3 F-K 滤波

F-K 滤波是在频滤波数域中进行的二维滤波。这种滤波的基本思想是: 首先将地震记录作二维 Fourier 变换, 求出频波谱; 根据频谱的特点, 设计二维滤波器的频波响应函数; 在频率波数域中进行二维滤波, 即计算地震记录的频波谱与滤波器的频波响应函数之积; 将所得结果作二维付氏反变换, 即可得二维滤波结果。

2 理论资料

图 1 是利用短时傅立叶变换的时频滤波与一维频率滤波的效果比较图。(a) 是输入数据, 它是由频率不变的子波与反射系数褶积的理论记录加上白噪声而得到的; (b) 为滤波因子与短时傅立叶变换得到的时频参数进行乘积的结果; (c) 为时频滤波结果; (d) 为一维频率滤波结果。(c)、(d) 有差别, 但不是很明显, 主要因为有效信号的频率成分不发生变化, 这时利用时频方法进行的滤波也很难体现出其优势。对于实际地震记录, 随着波在介质中传播距离的变化有效波的频率成分也在变化, 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, 这时时频滤波方法就体现出自身优势了。图 2、图 3、图 4 分别为短时傅立叶变换、S 变换及一维滤波方法对不同层位有效波频率随时间变化的地震道的滤波效果分析。从图中可以看出, 对于不同的滤波方法, 利用二维滤波方法所得到的结果更加与未加噪声的信号相贴近, 而利用 S 变换所得出的结果较之短时傅里叶变换更加干净平滑。所以对于不同层位有效波频率随时间变化的地震数据, 利用短时傅立叶变换、S 变换进行时频滤波的效果要好于一维滤波的效果。由于短时傅立叶变换是单一分辨率, 而 S 变

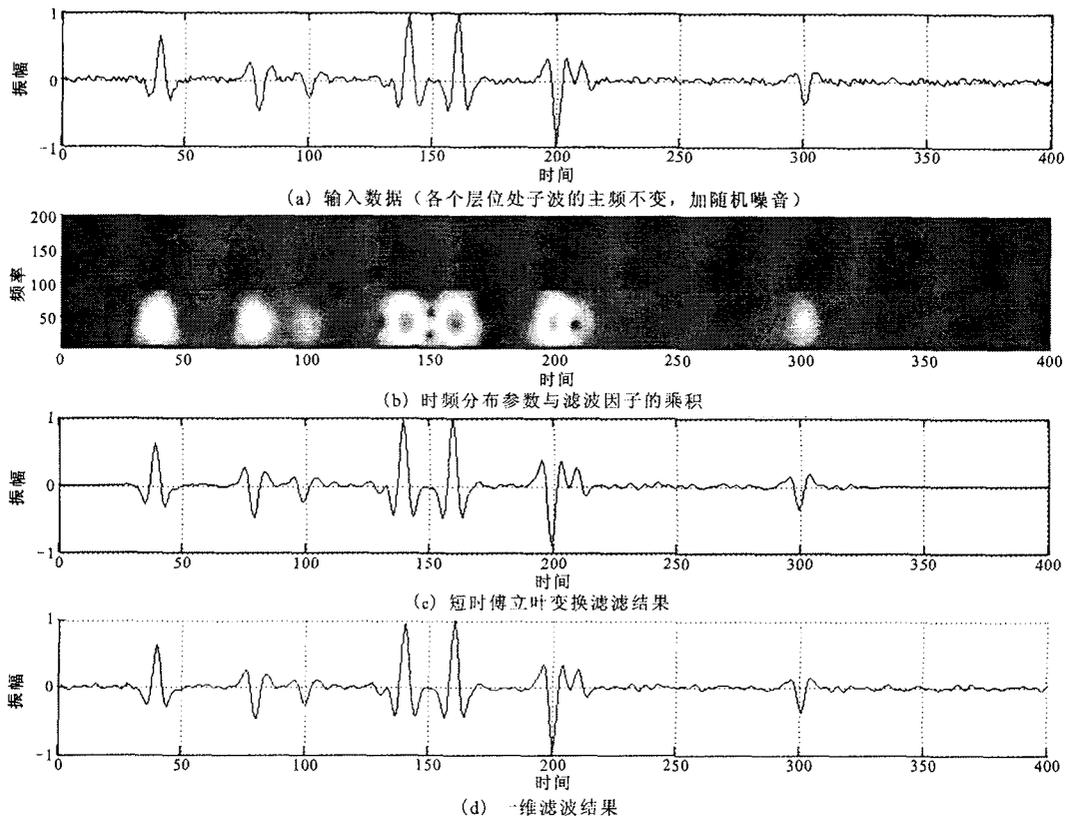


图 1 短时傅立叶变换进行时频滤波与一维滤波效果分析

Fig. 1 Comparison between time-frequency filtering of Short-time Fourier Transform and 1-D filtering performing.

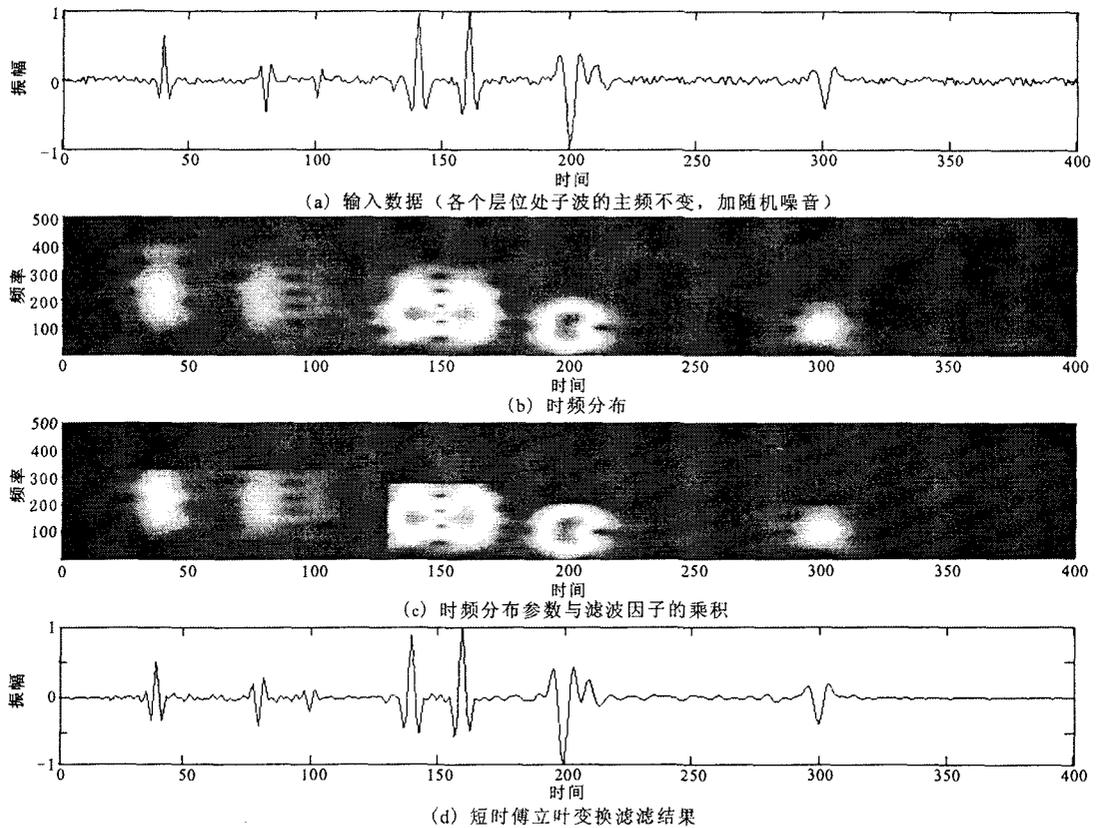


图 2 利用短时傅立叶变换进行时频滤波

Fig. 2 Time-frequency filtering based on Short-time Fourier Transform.

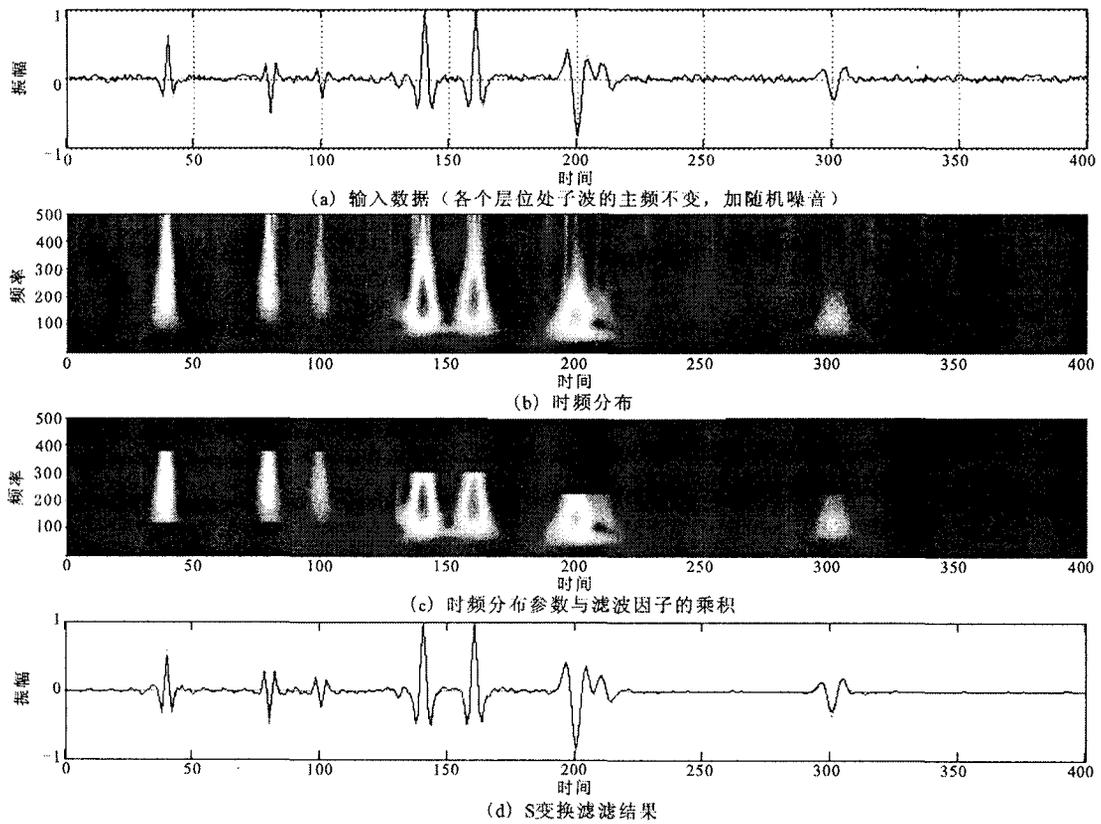


图 3 利用 S 变换进行时变滤波

Fig. 3 Time-frequency filtering based on S transform.

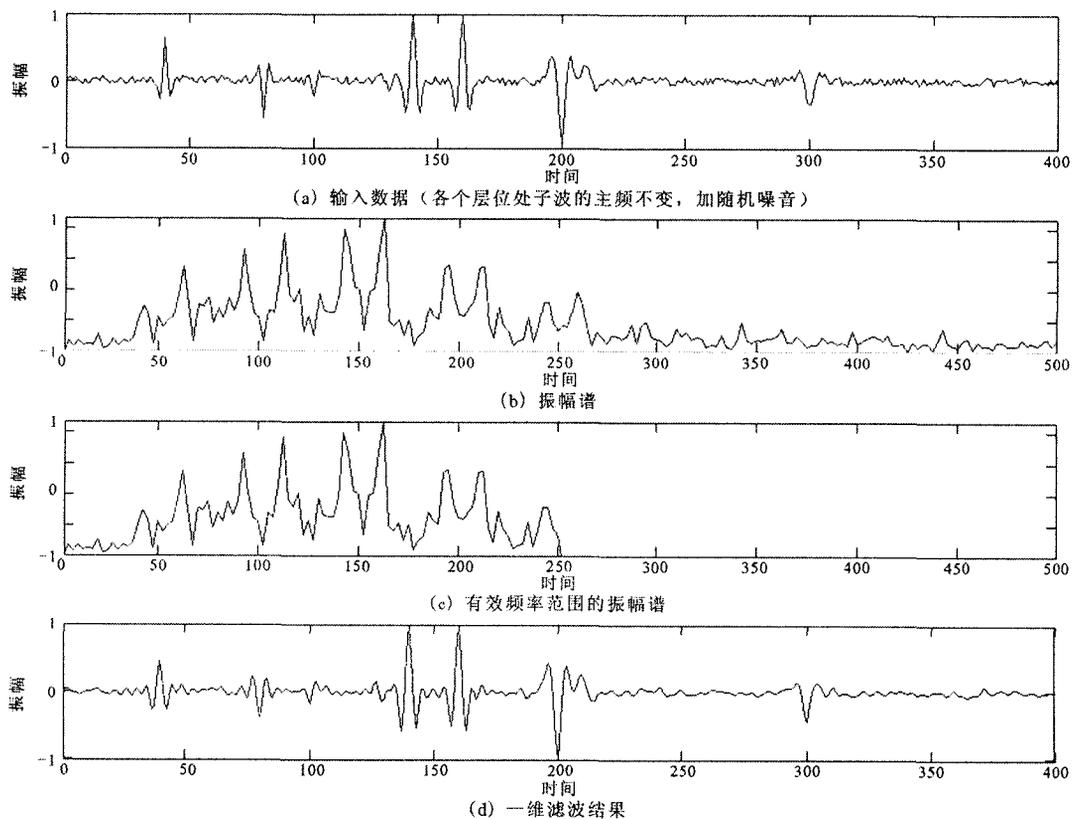
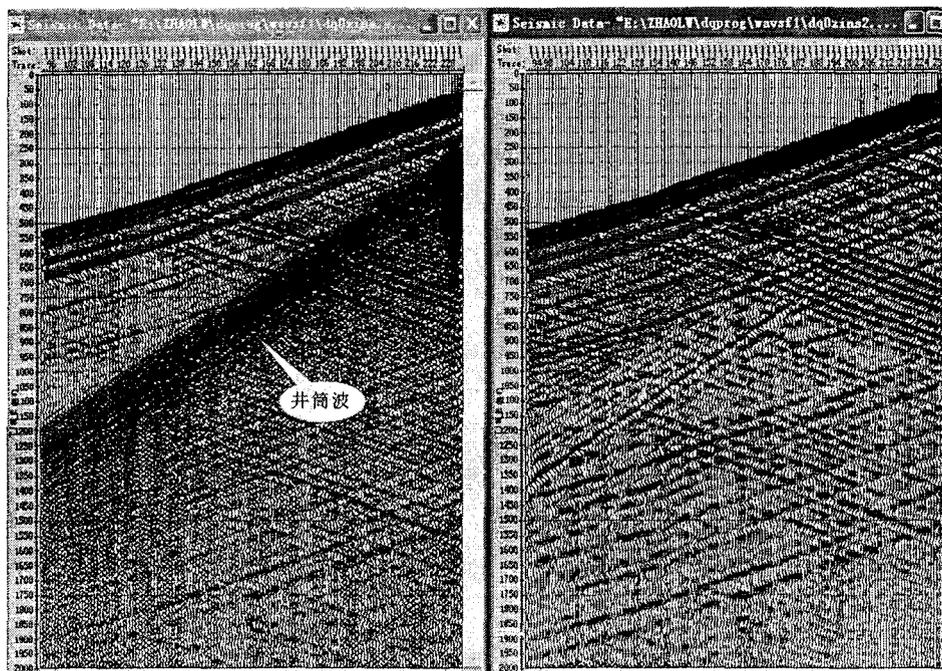


图 4 利用一维滤波对主频变化的理论记录(加噪音)滤波

Fig. 4 Filtering of theoretical records (plus noise) with main frequency varying based on 1-D filtering.

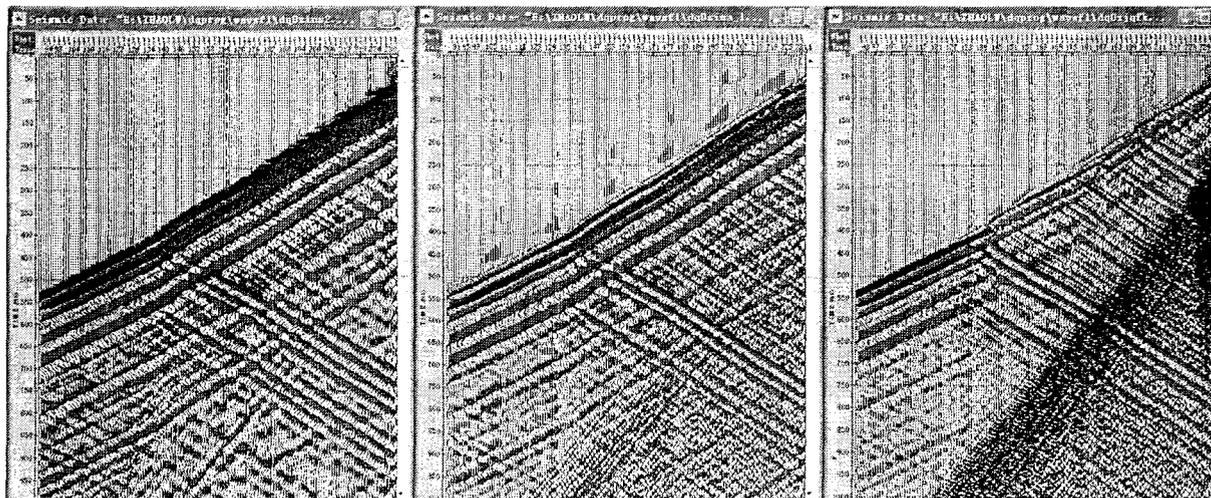


(a) 输入数据

(b) 去除井筒波后的效果

图 5 对零偏 VSP 数据井筒干扰波的去除

Fig. 5 Removing zero-biased VSP data pit shaft wave.



(a) S变换

(b) 一维滤波

(c) F-K滤波

图 6 不同方法对 VSP 数据去噪的信噪比比较

Fig. 6 Comparison among SNR of VSP signals using different methods to remove noise.

换的时频窗的形状随着频率的变化而变化,因此,利用 S 变换滤波的效果要好于短时傅立叶变换。

3 在实际资料中的应用

3.1 S 变换时频滤波效果

图 5 是利用 S 变换对某区 VSP 数据进行时频分析后,根据 S 变换时频滤波的原理去除井筒波的效果图。从图 5(a)的输入剖面看,井筒波的频率比较高,如果利用一维滤波方法肯定会伤及其它地

方的高频成分,影响剖面的效果。利用 S 变换的时变滤波后使有效波的相对能量大大加强,剖面的整体效果大大提高。

3.2 一维滤波、F-K 滤波及 S 变换时频滤波的效果比较

为了比较不同方法的滤波效果,将图 5(a)的局部区域分别进行了 3 种滤波。图 6(a)是经过时频滤波的剖面,可以看出信噪比得到大大改善;图 6(b)是经过一维滤波的剖面,表面上好像提高了信

噪比,但实际上把有效波的频率成分也滤掉了;图6(c)就是F-K滤波后的效果,可以看出效果很差。

图7是图5(a)输入数据的F-K谱,经过分析大致画出F-K滤波器的区域(黑色斜线条)。

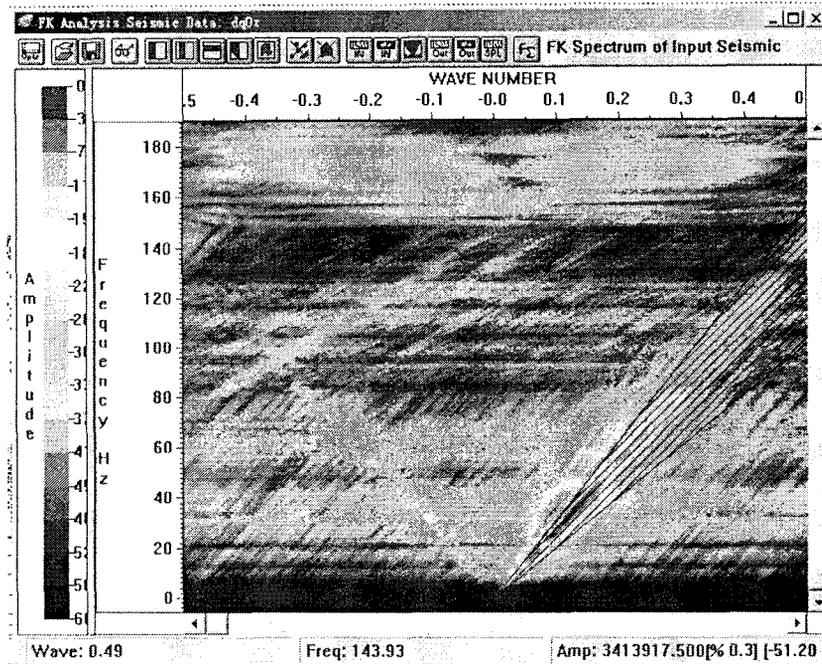


图7 输入数据的F-K谱

Fig.7 F-K spectrum with data inputting.

由图6可以看出,S变换时频滤波在去除井筒波干扰方面非常有效。

4 结论

时频滤波实际上是根据噪音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音的信号中消除噪声,提高剖面的信噪比。

通常时频滤波是根据记录地震道的频谱分析的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,使得不同时刻的波用不同的滤波因子进行滤波。地震波在地层中传播时一般是随着传播距离的增加高频成分吸收的多。传统的时变滤波方法的缺陷是:对于浅、中、深层等每个时间段,它还是利用频率的差异进行一维滤波,只不过是分成多次去实现。特别是对于一个二维地震剖面,如果每道利用相同的滤波因子还是不能满足要求,但是如果改变滤波因子,实现起来又比较麻烦。本文利用广

义S正反变换实现时频滤波就可以克服常规时变滤波方法的缺陷。另外S变换与短时Fourier变换等时-频域方法相比有其独特的优点,如信号的S变换的时-频谱分辨率与频率(即尺度)有关,且与其Fourier谱保持直接的联系,基本小波不必满足容许性条件等,这些特点在实际应用中是非常有用的。

[参考文献]

- [1] CAO Siyuan, CHEN Xiangpeng. The second-generation wavelet transform and its application in denoising of seismic data[J]. Applied geophysics, 2005, 2(2): 70-74.
- [2] Pinnegar C Robert. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 381-385.
- [3] 赵淑红, 张文波. 短时傅立叶变换在研究沉积回地质体中的应用[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(2): 59-62.
- [4] Pinnegar C R. Time-local Fourier analysis with a scalable, phase-modulated analyzing function: The S-transform with a complex window[J]. Signal Processing, 2004, 84(7): 1167-1176.