

李 月, 林红波, 杨宝俊等. 强随机噪声条件下时窗类型局部线性化对 TFPF 技术的影响. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1899~1906, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.025

Li Y, Lin H P, Yang B J, et al. The influence of limited linearization of time window on TFPT under the strong noise background. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7): 1899~1906, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.025

## 强随机噪声条件下时窗类型局部线性化 对 TFPF 技术的影响

李 月<sup>1</sup>, 林红波<sup>1,3</sup>, 杨宝俊<sup>2\*</sup>, 吴 宁<sup>1</sup>, 李诗宽<sup>1</sup>, 高 岨<sup>4</sup>

1 吉林大学信息工程系, 长春 130012

2 吉林大学地球物理系, 长春 130026

3 吉林大学地质学系, 长春 130061

4 长春理工大学通信工程系, 长春 130022

**摘 要** 为了更广泛地应用时频峰值滤波方法消减地震勘探记录中强随机噪声, 本文比较详细地探讨了该方法在应用时需要处理的时窗选取、一个时窗内局部线性化等主要基础技术问题. 经过时变时窗的仿真计算, 运用多项指标比较, 包括整体背景强弱、振幅谱、信噪比、均方误差、有效子波波峰波谷幅值、畸变程度, 综合评价出  $(L_0 + L_x)$  时窗滤波的效果较理想. 对于三角波这类简单类型的周期波, 其时频峰值滤波效果与边线段平均曲率变化、时窗长度等条件有关, 即三角波边线段平均曲率越大, 滤波结果的均方误差越大; 另外, 边线段平均曲率增大时, 选取的时窗长度有变小的趋势. 总之, 在地震勘探中应用时频峰值滤波方法消减强随机噪声时, 一方面要合理地选取时窗参数, 另一方面时窗参数又不能变化过大, 以避免对有效子波波形产生畸变影响.

**关键词** 时频峰值滤波, 自适应时窗, 局部线性化, 地震勘探, 强随机噪声

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.025

中图分类号 P631

收稿日期 2008-07-21, 2009-06-05 收修定稿

### The influence of limited linearization of time window on TFPT under the strong noise background

LI Yue<sup>1</sup>, LIN Hong-Bo<sup>1</sup>, YANG Bao-Jun<sup>2\*</sup>, WU Ning<sup>1</sup>, LI Shi-Kuan<sup>1</sup>, GAO Heng<sup>4</sup>

1 Department of Information Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

2 Department of Geophysics, Jilin University, Changchun 130026, China

3 Department of Geology, Jilin University, Changchun 130061, China

4 Department of Telecommunication Engineering, Changchun University of Science and Technology 130022, China

**Abstract** Time-frequency peak filtering (TFPF) method is a staple technique for eliminating strong random noise in seismic exploration data. For applying these techniques extensively, this paper discussed the details of application of this method, such as choice of the length of time window, local linearization in one time window, etc. For the results of the simulation of time-varying time window TFPF, we compare many values, including the strength of global background, the amplitude of spectrum, signal-to-noise ratio, mean square error, the amplitude of peak/valley of valid wavelet, and the degree of the aberrance of wavelets, and then conclude synthetically that time-windowing

**基金项目** 国家自然科学基金(40574051, 40774054)、吉林省科技发展计划项目(20050526)资助.

**作者简介** 李 月, 女, 1958 年生, 毕业于吉林大学地球物理系, 研究方向为信号分析与处理. E-mail: liyue@jlu.edu.cn

\* **通讯作者** 杨宝俊, E-mail: yangbaojun@jlu.edu.cn

filtering ( $L_0-L_x$ ) will get rather ideal effect. In the case of triangle waves, the filtering effect of TFPF is related to the average curvature of side line, the length of time window, etc. The bigger the average curvature of side line is, the bigger the mean square error is; moreover, increasing the average curvature of side line will cause a trend of decreasing in the chosen length of time window. In conclusion, applying TFPF method for eliminating random noise in seismic exploration, suitable parameter of time window should be chosen, on the other hand, the parameter of time window should not vary too much, so the waveform of valid wavelet is not distorted.

**Keywords** Time-frequency peak filtering, Adaptive length of the time window, Local linearization, Seismic exploration, Strong random noise

## 1 引言

近年来,随着国民经济的发展,对油气资源需求量有较大提高.这一方面要求增加油气勘探投入,另一方面,要求提高勘探的技术水平,去适应更加复杂的勘探条件.目前,地震勘探记录的低信噪比(不高于 1.5 : 1),直接影响了对记录的后续处理以及间接地加大对构造、地层岩性解释的难度.提高信噪比、消减记录中的强随机噪声,已成为地震勘探的主要难题之一.现有的消减随机噪声的处理技术达到几十种.大致可分为三类技术,第一类去噪技术主要利用了有效信号与随机噪声的内在区别,如同相轴内多子波间相似性,随机噪声与有效子波间的不相关性质等.这类技术如中值滤波<sup>[1]</sup>是一种能有效抑制随机噪声的非线性技术,它可导致不同程度的平均效应;多项式拟合技术<sup>[2]</sup>对由随机噪声严重的地震资料得到的多道资料信噪比较低,甚至可能出现假同相轴.第二类去噪技术是已有方法的推广或提高,效果有明显改善.如刚建立的二维多级中值滤波技术<sup>[3]</sup>,即是一维中值滤波技术的推广和发展,对于消减随机噪声具有较强的能力,但对于达到 1 : 2 甚至更低信噪比的资料其效果不够理想.小波变换是一种多尺度、多分辨率的时频分解方法,可以认为它是普通频谱分析、时频分析的深化.包括物理小波帧去噪技术<sup>[4]</sup>,二维小波变换去噪<sup>[5]</sup>,结合其他去噪方法(如与小波域隐马尔可夫模型结合),可保留记录的边缘特征<sup>[6]</sup>.这种技术对于强随机噪声的消减尚有待改进.第三类去噪技术大体利用所提出的新方法、新系统,在时空域消减随机噪声.如将  $f-x$  域反褶积与局部奇异值分解技术相结合能有效增强弱同相轴信息<sup>[7]</sup>,其中奇异值分解的时空范围选择是困难的.混沌振子系统检测技术<sup>[8]</sup>用于检测随机噪声背景中的有效信号,具有很强的能力,尚处于研究阶

段;有效但尚处于研究阶段的去噪技术还有基于 Ricker 子波核支持向量回归技术<sup>[9]</sup>,基于 Curvelet 的数据处理方法<sup>[10]</sup>.

上述三类消减随机噪声的技术,虽然有的已用于生产,但它们共同的不足是对于强随机噪声的消减存在不同程度不同类型的困难<sup>[11~13]</sup>.我们对时频峰值滤波技术<sup>[14]</sup>在地震勘探记录中的应用进行了前期研究<sup>[15]</sup>,可以认为这种方法对消减强随机噪声具有相当强的优势.这种滤波技术将叠加了随机噪声的有效信号编码为瞬时频率,利用时频平面的峰值作为瞬时频率估计目标,可以增强低信噪比记录中的带限确定性信号.研究发现,时频峰值滤波技术在实际应用时,它的一些基础条件仅是近似满足,如随机噪声均值为零,计算时窗内有效波形线为直线,自适应时窗,等等.基础条件的这些近似,对时频峰值滤波技术的效果产生多大影响?如何减少那些不利影响?研究这些问题对进一步广泛应用这项技术有一定的基础性作用.

## 2 计算时窗的时变性与同相轴视主频关系

时频峰值滤波过程中为满足局部线性化条件,计算选用的时窗不能过大;地震勘探有效子波视主频  $f_m$  随地层深度而变化,所以计算时窗也应该随记录时间而变.理论上的论证与实际计算稍有出入,原因是理论上的证明过程有一系列的近似.

### 2.1 关于时窗的选择问题

Boualem B 和 Mostefa M<sup>[14]</sup>在分析 TFPF 技术的滤波效果时指出,因不满足线性化条件( $x(t)=at+c$ )产生偏差(bias),然后两位学者利用偏差数量限制(如  $\xi=0.05$ ),得到资料处理时窗  $\tau$  所满足的不等式 ( $1 \leq \tau \leq \frac{0.634 f_s}{\pi f_p}$ ,其中  $f_s, f_p$  分别为采样频率和最

大瞬时频率). 该等式表明时窗长度数量与  $f_s$ 、 $f_p$  有关, 在固定采样率条件下,  $\tau$  与  $f_p$  有关. 而  $f_p$  作为窗内最大频率, 它随记录时间位置而变化. 上述表明, TFPF 技术所使用的时窗 ( $\tau$ ) 参数通常与记录时间有关, 即  $\tau(t)$ . Katkovnik V 和 Stankovic L<sup>[16]</sup> 提出在平稳高斯白噪声背景条件下, 若窗长  $\tau \rightarrow 0$ , 时间采样率  $f_p \rightarrow \infty$ , 且  $\tau f_p \rightarrow \infty$ , 经过对偏差的方差、均值的计算, 假设窗长函数为长方形, 最后得到最优窗长  $\tau_{opt}$  与噪声方差  $\sigma_\epsilon^{2/5}$  成正比, 与  $(f_s x''(t))^{1/5}$  成反比. 由于得到该结果经过了一系列近似与假设, 所以仅可以认为  $\tau_{opt}$  随  $\sigma_\epsilon$  增大而变大, 随  $f_s$  增大而减小, 并且随记录  $x''(t)$  的变大而减小. 实际上,  $\sigma_\epsilon$  是记录时间的函数,  $f_s$ 、 $x''(t)$  也随记录时间而变化, 因此可以得出,  $\tau_{opt}$  是记录时间的函数, 即  $\tau_{opt}(t)$ . 这与 Boualem B. 和 Mostefa M. 的结论是一致的. 总之, (1) TFPF 技术处理记录时所用最佳时窗与记录时间有关; (2) 方差越大, 则窗长越大; 采样频率越高, 则窗长越小; (3) 特别地, 记录随时间变化  $x''(t)$  亦与  $\tau$  有关,  $x''(t)$  变化越大,  $\tau$  越小; (4) 上面几点说明, 对记录进行 TFPF 处理时, 处理所用窗长是可变的. 基于上述理论分析, 本文进行了时变时窗的仿真计算.

## 2.2 时变时窗时频峰值滤波的仿真计算

为比较时变时窗对时频峰值滤波效果的影响, 对同一种记录选取三种时窗计算, 即定时窗(简记为  $L_0$ )、自适应时窗(简记为  $L_x$ )、混合时窗(在有效子波范围采用定时窗, 子波外采用自适应窗, 简记为  $L_0 + L_x$ ). 合成的记录含一个同相轴, 子波为 Ricker 型, 视主频为 25 Hz, 与同相轴相应的波速为 800 m/s, 道间距  $\Delta x = 30$  m, 每炮 40 道, 偏移距  $dx = 0$  m. 具体图形见图 1a. 图 1b 是对图 1a 的各道加进随机噪声  $n(t)$ , 其平均功率为  $\sigma^2 = 0.01$  w. 图 1(c, d, e) 分别是用  $L_0$ 、 $L_0 + L_x$ 、 $L_x$  三种时窗处理图 1b 的结果. 为更明显表述时窗的滤波效果, 对图 1(c, d, e) 中前 10 道进行了放大, 即图 1(f, g, h). 图 1(i, j) 是与图 1(d, e) 处理结果相应的时窗变化. 图 1k 是未加噪、加噪、滤波结果道的傅里叶振幅谱.

由图 1(c, d, e) 整张记录看, 有效子波恢复的都较理想, 用  $L_0$  时窗(图 1c)处理的结果道背景稍强. 在放大的前 10 道记录(1f, 1g, 1h)上见到, 与  $L_0$  相应的结果, 强背景噪声更加明显; 子波峰值振幅值,  $L_0$  与  $L_x$  相应的结果具有相近表现, 而  $(L_0 + L_x)$  的结果更为理想; 另外,  $L_x$  的结果子波有畸变, 而  $L_0$ 、 $(L_0 + L_x)$  则较好地保持了原子波形状. 在振幅谱中(图 1k),  $(L_0 + L_x)$ 、 $L_x$  两种时窗相应的振幅谱明显优于  $L_0$  的; 与  $L_x$  振幅谱线相比,  $(L_0 + L_x)$  振幅谱线的极大值更接近原来未加噪记录的振幅谱极值位置. 为更清楚地表明滤波效果, 计算了三种窗长滤波结果的信噪比、均方误差(表 1). 信噪比指标,  $L_x$  结果最优,  $(L_0 + L_x)$  次之; 均方误差指标,  $(L_0 + L_x)$  最优,  $L_x$  次之. 进一步统计有效子波的两个波谷一个波峰的幅值, 与理论 Ricker 子波的比较(表 2),  $(L_0 + L_x)$  的结果, 波峰与两个波谷相应的幅值都与理论 Ricker 子波的幅值(1 V、-0.4449 V)最接近;  $L_0$  结果次之. 另外, 从图 1(f, g, h) 放大图可见, 与  $L_x$  时窗相应的滤波结果, 子波有较明显的畸变. 为更清楚地说明这个认识, 对第 10 道的有效子波波形进行求导, 借以反映子波波形的畸变程度(图 2). 由图中三条曲线可见, 与  $L_0$  时窗相应的导数曲线更为圆滑, 基本未发生“抖动”现象; 与  $(L_0 + L_x)$  时窗相应的导数曲线在尾部(E)出现局部“抖动”; 而与  $L_x$  时窗相应的导数曲线存在多处“抖动”现象, 如 A, B, C, D 等多处出现“+”, “-”变更, 而  $(L_0 + L_x)$  在 E 处出现的变化是同种导数的大小变化, 比“+”, “-”变更畸变要小些.

表 1 三种窗长滤波效果比较之一(信噪比和均方误差)

Table 1 Comparison of filtered effect with three kinds of window-length (SNR and MSE)

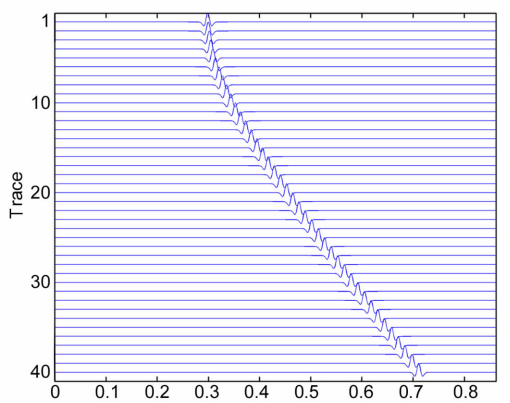
三种窗长	信噪比 (SNR/dB, 加 0; 噪 A; 信 1; 号 7; 为 A; 6.57)	均方误差 (MSE/V <sup>2</sup> )
固定窗长( $L_0=9$ )	27.43	0.00098
有信号处为固定窗长( $L_0=9$ ), 其他自适应窗长 $L_x$	39.91	0.00055
自适应窗长 $L_x$	42.42	0.00075

表 2 三种窗长滤波效果比较之二(波峰、波谷, 幅值)

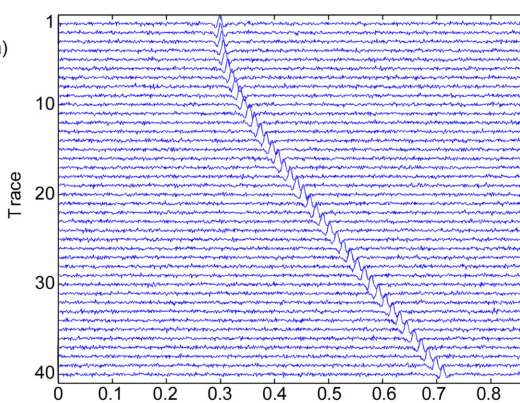
Table 2 Comparison of filtered effect with three kinds of window-length (wave crest, wave valey and amplitude)

三种窗长	左波谷(振幅/V)	右波谷(振幅/V)	波峰(振幅/V)
固定窗长( $L_0=9$ )	-0.3471/-0.4449	-0.4008/-0.4449	0.7242/1
混合窗长( $L_0 + L_x$ , $L_x$ 为子波外自适应窗长)	-0.3531/-0.4449	-0.4443/-0.4449	0.8939/1
自适应窗长( $L_x$ )	-0.2994/-0.4449	-0.3904/-0.4449	0.7089/1

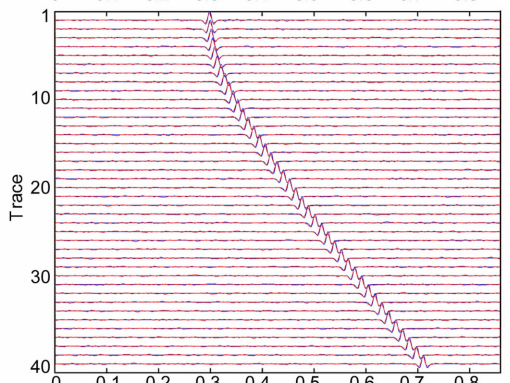
注: 表中波谷 -0.4449 V 和波峰 1V 是原 Ricker 子波的特征幅值.



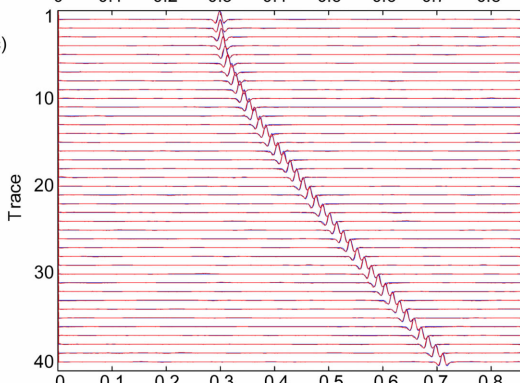
(a)



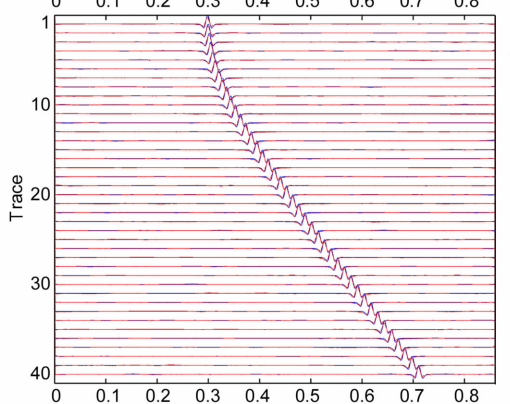
(b)



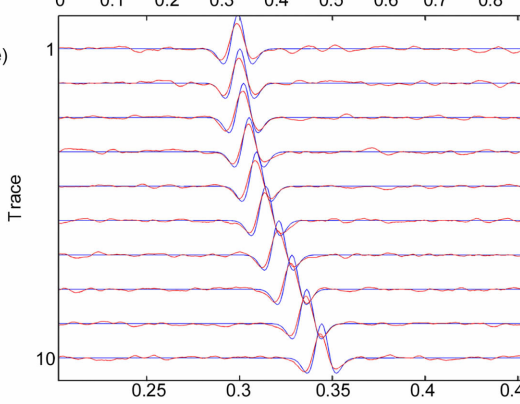
(c)



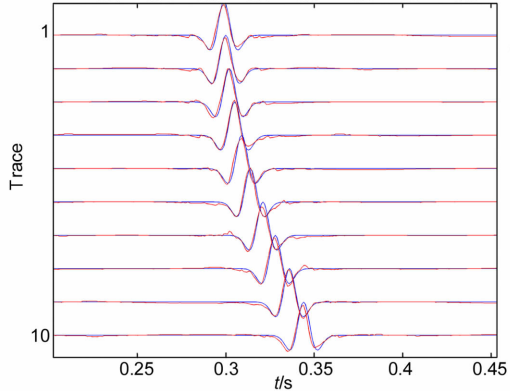
(d)



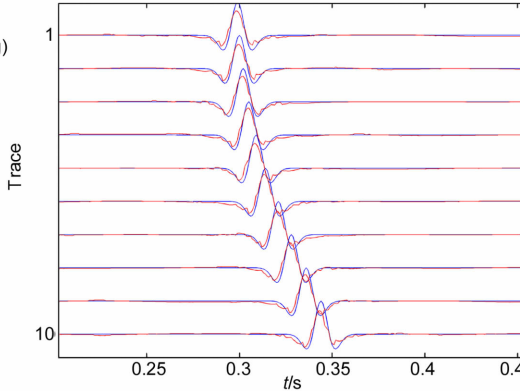
(e)



(f)



(g)



(h)

(续)

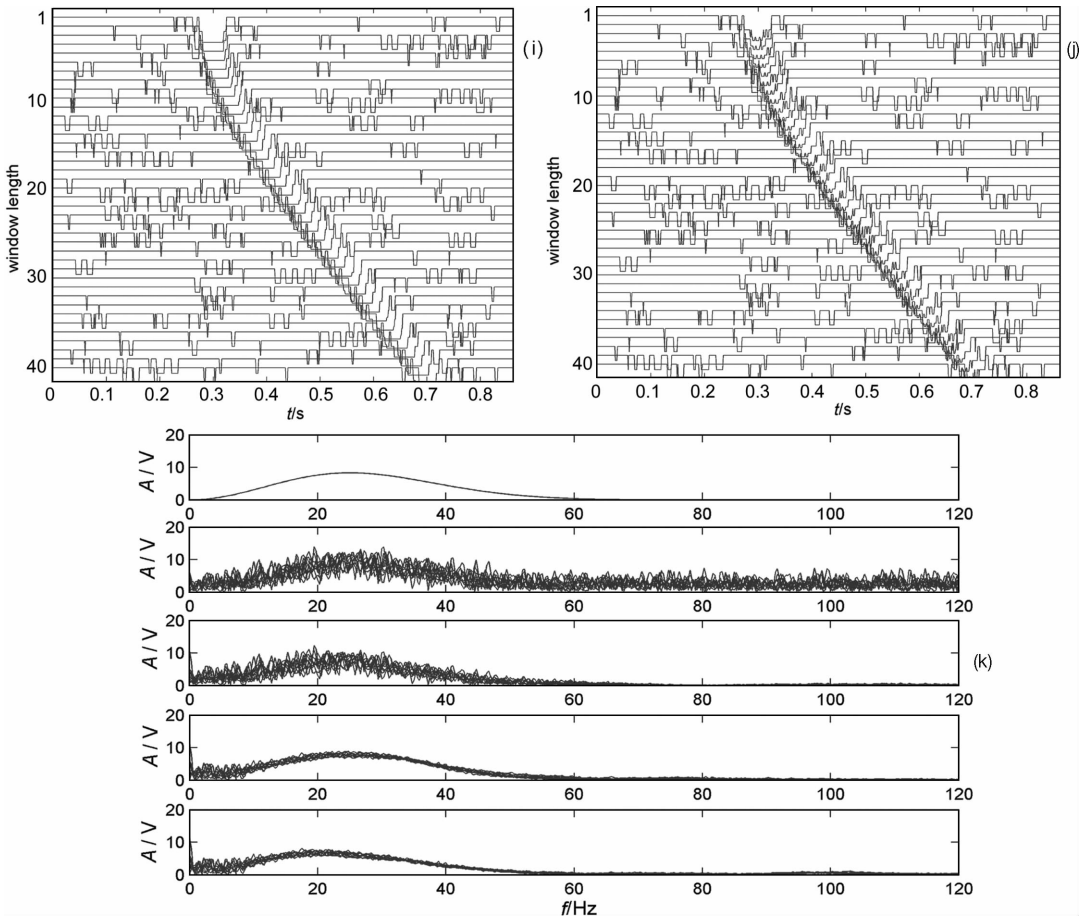


图 1 时窗长度变化对时频峰值滤波效果的影响

(a)原始记录;(b)加噪记录;(c)时频峰值滤波结果 1( $L_0=9$ );(d)时频峰值滤波结果 2( $L_0+L_x$ );(e)时频峰值滤波结果 3( $L_x$ );(f)对图 1c 的前 10 道放大;(g)对图 1d 的前 10 道放大;(h)对图 1e 的前 10 道放大;(i)处理得到图 1d (即结果 2)时所用的变化时窗;(j)处理得到图 1e(即结果 3)时所用的变化时窗;(k)Fourier 振幅谱(自上至下分别属于  $S_1(t)$ , 与前 10 道的  $\hat{S}_i(t)$ , 结果 1, 结果 2, 结果 3)

Fig. 1 The influence of varying time-window length on filtered effect by TFPF

(a) Original record; (b) Record with noise; (c) Result 1 of TFPF ( $L_0=9$ ); (d) Result 2 of TFPF ( $L_0+L_x$ ); (e) Result 3 of TFPF ( $L_x$ ); (f) The enlarged first 10 traces in Fig. 1c; (g) The enlarged first 10 traces in Fig. 1d; (h) The enlarged first 10 traces in Fig. 1e; (i) The corresponding time-window length of Fig. 1d; (j) The corresponding time-window length of Fig. 1e; (k) Amplitude spectrum (from the top to the bottom, they are amplitude spectrum of  $S_1(t)$ ,  $\hat{S}_i(t)$  of the front 10 traces, Result 1, 2 and 3).

经过记录整体背景强弱、振幅谱、信噪比、均方误差、有效子波波峰波谷幅值、畸变程度等六个方面综合评价,以( $L_0+L_x$ )时窗滤波结果更好,即信噪比较高、均方误差小、波峰波谷幅值与原子波的最接近、畸变程度最小.在有噪声条件下,若采用自适应时窗(即  $L_x$ ),在有效子波存在的范围内,原有是规则变化的时窗可能被噪声“破坏”,从而引起子波的较大畸变.这一结果并不能证明自适应时窗是失败的,而是需要研究这类时窗变化在使用时的“抗噪”能力.

### 3 三角波边长弯曲程度变化时频峰值滤波效果分析

对于实际信号,其振幅变化呈线性关系的很少.为研究振幅变化呈非线性关系时频峰值滤波效果,选取三角波的边长呈均匀的弯曲变化(由平均曲率  $\rho$  标志),用相同时窗的时频峰值滤波处理,并加以局部放大比较滤波效果.

图3(a, b)为不同  $\rho$  边长的三角波一个周期以

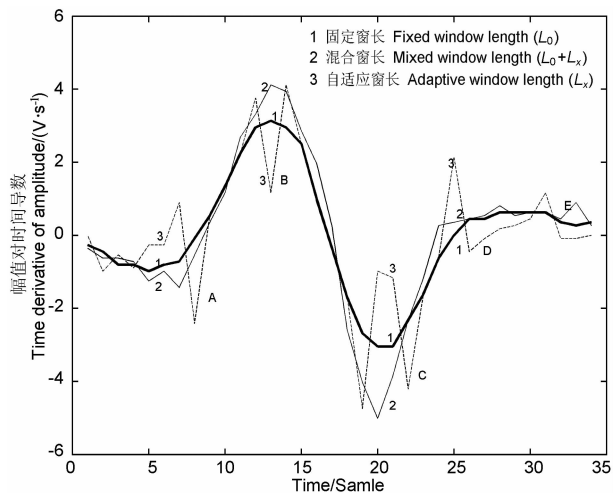


图 2 与三种窗长相应滤波结果:由子波波形计算时间导数  
Fig. 2 Filtered results corresponding to the three kinds of window-length; time derivative of waveform

及相应的滤波结果,其中自(I~IV), $\rho$ 逐渐增大.图 3c 是对图 3(a,b)几个小图中待放大范围的放大图,图 3c1 相应于三角波左边长上待放大的位置,3c2 相应于三角波右边长上待放大位置.在图 3(a,b)与(I)、(II)、(III)、(IV)相应的(a)与(b)看不出区别,而实际上滤波前后不可能不变,由放大的图 3c 见到这类变化的比较.分析该图的放大部分(图 3c)可知:对于三角波一个周期的左边长,滤波后的边长都位于原边长的右侧,而对于右边长,滤波后的边长都位于左侧;如果同时考查左、右边长,即一个周期的三角波,则是这个三角波周期经时频峰值滤波处理将变“窄”;另外,比较图 3c1、2 两部分,右边长部分滤波后的“偏离”比左边长大,大致右边长部分比左边长部分相应的偏离超过约一半.对于一个周期的左边长部分和右边长部分内,即左四段偏移

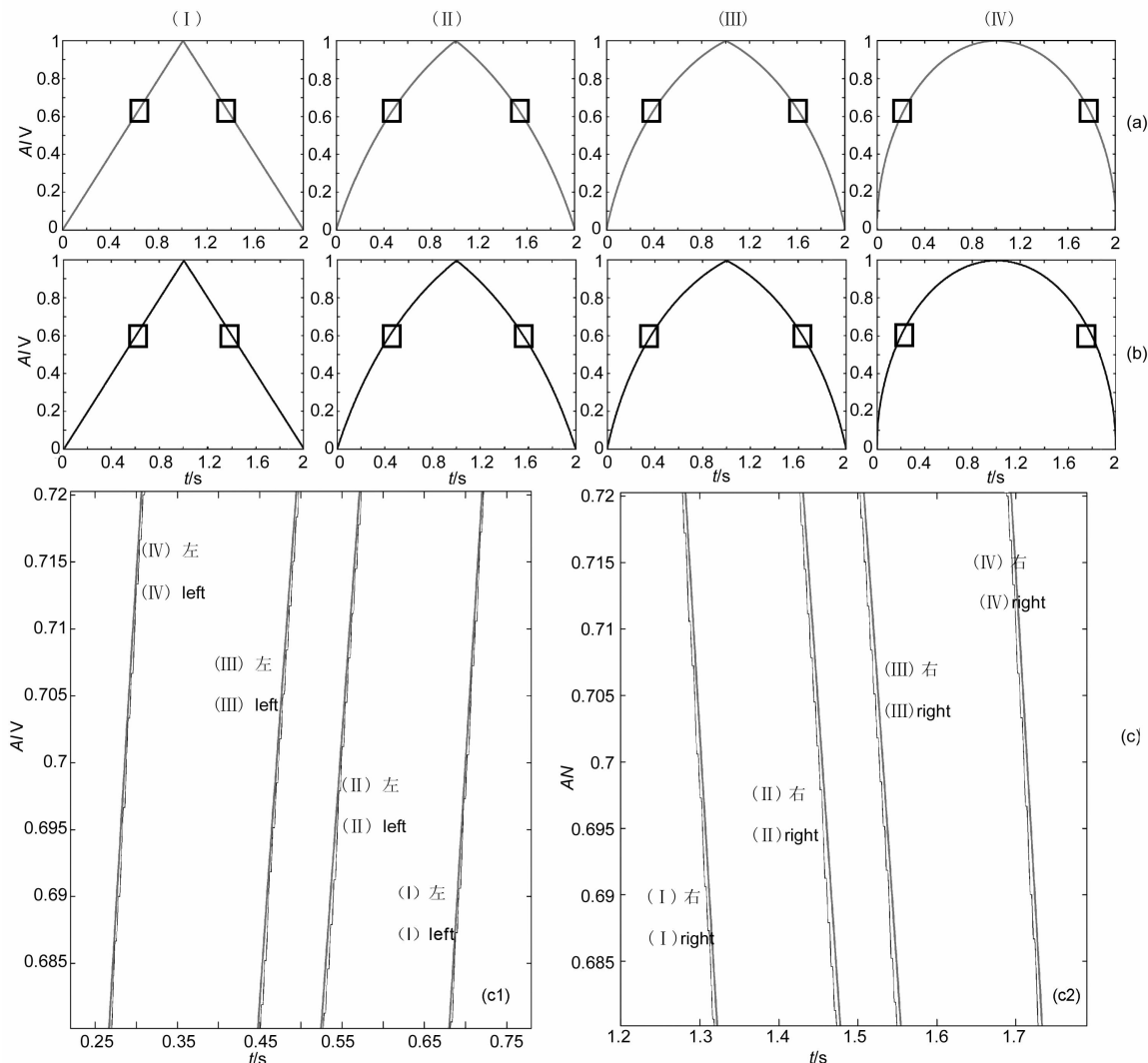


图 3 不同弯曲程度三角波的一个周期经定长时窗时频峰值滤波处理效果比较

(a)原始一个周期的波形;(b)滤波处理后;(c)局部放大.

Fig. 3 Comparison of TFPF result with fixed window length for the signal of period from different curved triangular wave  
(a) The original waveform in a cycle; (b) Waveform of filtered signal; (c) View of partial enlargement.

量基本一致. 右边长部分的四段偏移量也基本一致. 本节研究的三角波信号比较简单, 在地震勘探记录上的信息变化比较大, 包括地震子波视主频和振幅, 将引起更为复杂的“偏离”结果.

为了更清楚地说明三角波边线段曲率变化引起的滤波效果变化, 计算了均方误差(表3); 同时还计算了在计算时窗变化时, 与不同边线段相应滤波结果的均方误差(表4). 分析表3、4可知: (1)三角波边线段平均曲率越大, 滤波结果的均方误差越大. (2)对于三角波边线段为直线的滤波结果, 窗长从3增至15时, 在7点时均方误差最小, 这可能窗长为7时与该三角波有一定的“频率匹配”, 即并不是窗长越小越好. (3)对于三角波边线段为 $\rho_1$ (表3)的滤波结果, 在比较小的窗长条件下, 随着窗长的增大, 均方误差呈现“阶梯”状变化, 即窗长为3、5、7、9、11分别具有3.1569和3.2293  $V^2$ 的均方误差. 显然窗

长取3、5要优于其他长度的时窗. (4)综上所述, 对于三角波这类简单周期波类型, 其时频峰值滤波效果与边线段平均曲率变化、时窗长度等条件有关. 如果对于更复杂类型子波的去噪处理, 其效果的约束将会是相当困难的. 例如, 地震子波通常由多个波峰波谷组构, 并具有混合相位性质, 虽然视主频是一个, 但波峰波谷变化是不规则的, 若想得到比较理想的处理结果, 需要更多的试处理.

表3 三角波边线段不同类型(由平均曲率刻画)滤波结果的均方误差

Table 3 MSE of filtered results for different type of sidelines of triangluar wave

三角波边线段类型	I	II	III	IV
MSE/ $V^2$	2.9774	3.2293	3.2456	3.4762

注: I型——直线; II型——平均曲率 $\rho_1$ ; III型——平均曲率 $\rho_2$ ; IV型——平均曲率 $\rho_3$  ( $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ).

表4 不同窗长与滤波结果均方误差之间数值关系

Table 4 Numerical relation between diffent window-length and MSE of liteded result

窗长	3	5	7	9	11	13	15	
MSE/ $V^2$	边线段为直线	2.9944	3.0791	2.9774	3.1036	3.2053	3.2787	3.3371
	边线段为曲线( $\rho_3$ , 表3)	3.1569	3.1569	3.2293	3.2293	3.2293	3.2903	3.3429

## 4 结论与讨论

从理论角度讲, 由于实施滤波的计算时窗 $L$ 与一系列参量有关, 应用变时窗计算可能得到更准确结果. 仿真计算表明, 采用时变时窗计算, 将容易引起有效子波的畸变. 为解决这一问题, 提出一个折中方案, 即在有效子波部位采用定时窗, 其余部位采用变时窗处理. 经过对三角波边线段曲率变化引起滤波结果的分析, 在相同时窗条件下, 曲率越大引起MSE越大. 在滤波过程中, 时窗长度、时窗内线性化、有效子波视主频、计算时间几者之间相互制约, 应用中通过有效子波的时窗不易过小.

对滤波后记录道和原始 Ricker 子波分别计算 Fourier 振幅谱, 滤波后记录振幅谱成锯齿状, 其通过带的幅值变化较大, 通过带的主要频率成分与 Ricker 子波振幅谱主要频率成分相近. 可以推测, 在不损失频率大部分成分, 以及保持谱特征形态前提下, 对锯齿形谱线进行最小二乘拟合(可能重复拟合), 得到一条新的谱线. 利用这条振幅谱线和已有的相位谱数据, 反变换得到一道新记录, 设想新记录应该在有效子波正则化、减弱背景噪声、信噪比等各

方面得到改善. 这是时频滤峰值波技术的后续处理, 而且仅是一个计划. 另外本文在第3节中对时变时窗的折中处理, 即在有效子波或同相轴部位采用定时窗, 其他部位采用时变时窗. 问题是对于待处理的记录, 我们不知道同相轴在哪里. 这需要对计算得到的时变时窗分布进行判断, 确定固定时窗的时间范围. 判断的手段也有待进一步研究.

## 参考文献(References)

- [1] Duncan G, Beresford G. Median filter behavior with seismic data. *Geophysical Prospecting*, 1995, **43**(3): 329~345
- [2] 万海涛, 苏永昌, 俞寿朋. 3-D 叠后地震资料多项式拟合提窗信噪比和道内插. 石油地球物理勘探, 1994, **29**(2): 208~212  
Wan H T, Su Y C, Yu S P. Improved the singal/noise ratio of stacked 3-D seismic data by polynomial fitting method, and the trace interpolation. *OGP*(in Chinese), 1994, **29**(2): 208~212
- [3] Liu C, Liu Y, Yang B J, et al. A 2D multistage median filter to reduce random seismic noise. *Geophysics*, 2006, **71**(5): 105~110
- [4] Zhang R F, Tadeusz J U. Physical wavelet frame denoising. *Geophysics*, 2003, **68**(1): 225~231
- [5] 杨立强, 宋海斌, 郝天珧等. 基于二维小波变换的随机噪声压制方法研究. 石油物探, 2005, **44**(1): 4~6

- Yang L Q, Song H B, Hao T Y, et al. Method of 2-D wavelet transform in attenuating random noise. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2005, **44**(1):4~6
- [6] Michael J. Edge preserving filtering on 3-D seismic data using complex wavelet transforms. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2006. 2872~2876
- [7] Maiza B, Mirko V D B. Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data. *Geophysics*, 2007, **72**(2):V59~V65
- [8] Li Yue, Yang B J, Yuan Y. et al. Ability to detect weak effective seismic signals by utilizing chaotic vibrator system. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(24):3010~3017
- [9] 邓小英, 李月. Ricker 子波核最小二乘支持向量机在地震勘探信号去噪应用中的参数设置研究. *地球物理学进展*, 2007, **22**(3):954~959
- Deng X Y, Li Y. Study of parameters setting for least square support vector machine based on Ricker wavelet kernel in the denoising applications of seismic prospecting signals. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(3):954~959
- [10] Felix J H, Wang DL, Gilles H, et al. Curvelet-based seismic data processing: A multiscale and nonlinear approach. *Geophysics*, 2008, **73**(1):A1~A5
- [11] 王建民, 陈树民, 苏茂鑫等. 近地表高频补偿技术在三维地震勘探中的应用研究. *地球物理学报*, 2007, **50**(6):1837~1843
- Wang J M, Chen S M, Su M X, et al. A study of the near surface high-frequency compensation technology in 3-D seismic exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(6):1837~1843
- [12] 王建民, 杨冬, 魏修成等. 多分量地震资料预测松辽盆地兴城地区深层火山岩与有利含气带. *地球物理学报*, 2007, **50**(6):1914~1923
- Wang J M, Yang D, Wei X C, et al. Predicting deep volcanic rocks and favorable gas zone near Xingcheng area in Songliao Basin using multicomponent seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(6):1914~1923
- [13] 李月, 杨宝俊, 林红波等. 地震勘探时空域双曲滤波因子的特点与提高信噪比的能力. *地球物理学报*, 2008, **51**(5):1557~1566
- Li Y, Yang B J, Lin H B, et al. Characteristics of hyperbolic time-distance relation filter in seismic prospecting and its ability increasing signal-to-noise ratio. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1557~1566
- [14] Boualem B, Mostefa M. Signal enhancement by time-frequency peak filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, **52**(4):929~937
- [15] Lin H B, Li Y, Yang B J. Recovery of seismic events by time-frequency peak filtering. *Proceedings of IEEE*, ICIP 2007, V:441~444
- [16] Katkovic V, Stankovic L J. Instantaneous frequency estimation using the Wigner distribution with varying and data driven window length. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1998, **46**(Step.):2315~2325

(本文编辑 汪海英)