

刘 财,李红星,陶春辉等. 模糊嵌套多级中值滤波方法及其在地震数据处理中的应用. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1534 ~ 1542

Liu C, Li H X, Tao C H, et al. A new fuzzy nesting multilevel median filter and its application to seismic data processing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1534 ~ 1542

模糊嵌套多级中值滤波方法及其 在地震数据处理中的应用

刘 财¹, 李红星^{1,2}, 陶春辉², 刘 洋¹, 王 典¹, 苏 巍¹, 顾春华²

1 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

摘 要 多级中值滤波器在地震数据处理应用中, 其滤波长度越大, 消噪效果越好, 但同时也会破坏有效信息. 如果为了保护有效信息而减少滤波长度, 又会造成大量的噪声不能消除. 本文提出一种新的模糊嵌套多级中值滤波器, 设计一个阈值作为判断参数, 使滤波器能够在消除随机噪声时采用长滤波器滤波, 而在保留有效信息时采用短滤波器滤波, 从而既能很好地消除随机噪声, 又能最大限度地保护有效信息, 保留有效信息的细节结构. 经过模型分析和实际资料处理都取得了很好的效果.

关键词 随机噪声, 中值滤波, 模糊嵌套多级中值滤波, 地震, 数据处理

文章编号 0001-5733(2007)05-1534-09

中图分类号 P631

收稿日期 2006-04-10, 2007-03-19 收修定稿

A new fuzzy nesting multilevel median filter and its application to seismic data processing

LIU Cai¹, LI Hong-Xing^{1,2}, TAO Chun-Hui², LIU Yang¹, WANG Dian¹, SU Wei¹, GU Chun-Hua²

1 College of Geor Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2 The Second Institute Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

Abstract In the application of multilevel median filter to seismic data processing, it is more effective to use a longer wavelength in removing the random noises, but the longer wavelength has a more damaging effect to the data, and is detrimental in preserving the details of the signals. This paper brings forward a new fuzzy nesting multilevel median filter based on the multilevel median filter concept. The new filter uses a long wavelength for the filter when removing the random noises, and uses a short wavelength when preserving the details of the signals. Therefore, we can remove the random noises yet are still able to preserve the details of the signals. We have had very good results from both model analyses and actually processing the data.

Keywords Random noises, Median filter, Fuzzy nesting multilevel median filter, Seism, Data processing

1 引 言

中值滤波(MF)在信号处理中是一种既简单又

有效的方法^[1]. 由于它具有抑制噪声(尤其是脉冲噪声)和保护边缘的特征,因而在信号处理领域中得到重视,特别是在非平稳信号的处理中取得了较大的成功^[2]. 然而中值滤波的一个严重不足之处在

基金项目 国家自然科学基金项目(40574042);国家油气专项(SQ-2004-07-05);国家“863”计划资助项目(2005AA615040);国家海洋局青年基金项目(2007311)资助.

作者简介 刘 财,男,1963年生,教授,主要从事地球物理数学方法研究. E-mail:liucai@jlu.edu.cn

于相对滤波窗口而言,较为“细小”的信号细节结构易被破坏和丢失。在二维图像处理中,中值滤波的这一缺憾要比在一维信号的处理中更加明显。主要原因有两个:其一是二维信号几乎没有根信号,也就是说几乎所有的二维信号经中值滤波以后都要受到不同程度的破坏;其二是图像中诸如细线、拐角等细节结构往往包含重要的信息,这些结构的破坏或丢失往往比噪声本身的影响更严重。人们一直在努力寻求兼有细节保护和噪声抑制的优良特性的滤波器。基于这一目标,近年来人们提出了许多新的改进的中值滤波器:多级中值滤波器(MLM)、自适应多级中值滤波器^[1](AMLM)、自适应模糊多级中值滤波器^[3]、多级非线性加权平均中值滤波器^[4]等。多级中值滤波器是针对图像处理提出的一种最具代表性的细节保护中值滤波器之一,这种滤波器通过一组能较好地“匹配”图像细节的基本结构——基本子窗口来有效地区分信号结构和噪声,从而达到保护细节结构和消除噪声的目的。MLM有许多优良性能,除了具有细节保护能力外,它的简单、直观和易于实现也具有很大的吸引力。然而,由于MLM的滤波输出是基于比滤波窗口小的多的基本子窗口的中值滤波,因此它消除噪声的能力较差,这是它的一个主要缺点。

一般中值滤波技术(MF)在地震资料处理中的应用已经有过一些探讨^[5~9]。二维多级中值滤波技术以往一直都只用于图像处理领域,文献^[10]对该方法应用于地震勘探中随机噪声的消除处理做了初探^[10]。在应用二维多级中值滤波进行地震资料处理时,滤波长度越大,其消除噪声的效果就越好,但同时也会破坏有效信息^[11],使有效信息的细节结构模糊。如果为了保护有效信息而减小滤波长度,又会造成大量的噪声不能消除。为了解决这一矛盾,本文在多级中值滤波的基础上提出一种新的模糊嵌套多级中值滤波器,设计一个阈值作为判断参数,使滤波器能够在消除随机噪声时采用长滤波器滤波,而在保留有效信息时采用短滤波器滤波,从而达到既能很好地消除随机噪声,又能最大限度地保护有效信息,保留有效信息的细节结构。所谓模糊中值滤波器是指通过设计阈值来判断图像中某点是否为噪声,从而决定是否对此点进行中值滤波。如文献^[3]针对牛肉图像噪声的特征和人眼的分辨能力提出:当前像素点灰度值与邻域像素点的平均灰度值的差大于某个阈值时判断其为噪声,小于阈值则认为是

正常的信号,而阈值则根据牛肉图像的颜色特征选取。而本文在参考了地震数据各种滤波方法^[12~18]与中值滤波技术的基础上,针对地震记录有效信号的时间连续性与空间相关性提出一种以长多级中值滤波器输出的振幅平均值作为阈值来区分随机噪声与地震有效信号,更适用于对地震数据进行随机噪声的滤波处理。

2 二维多级中值滤波基本原理

2.1 中值滤波器(MF)基本原理

假设地震记录由下式来描述:

$$\{x_{i,j}\} \quad (i = 1, 2, \dots, N_x; j = 1, 2, \dots, N_t),$$

式中, i 和 j 分别为数据的空间与时间下标, N_x 表示数据的空间采样数,即地震道数, N_t 表示每道地震记录的时间采样数。设第 i 道的数据序列为 X_j ($j = 1, 2, \dots, N_t$),如果给定的中值滤波器的滤波长度为 N (一般 N 为奇数),则对第 i 道的数据的第 k 点的中值滤波($\text{median}[\cdot]$)过程为:

$$\text{原始数据: } X_{k-(N-1)/2}, \dots, X_k, \dots, X_{k+(N+1)/2}$$

$$\text{排 序: } Y_{k-(N-1)/2}, \dots, Y_k, \dots, Y_{k+(N+1)/2}$$

$$\text{输 出: } Y_k$$

- (1) 取以第 k 个样点为中心的 N 个样点;
- (2) 对这 N 个样点按数值从小到大的顺序排列,排序后以 Y_j 表示;
- (3) 取排序后的 N 个样点的中心位置的数值作为第 k 点的输出值。

重复上述过程,即可实现地震数据记录的中值滤波。

2.2 二维多级中值滤波器基本原理^[19~21]

设 (\cdot, \cdot) 为离散二维信号,对于一个中心位于 (n_1, n_2) 的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 的方形滤波窗口,可以定义一种基本子窗口(图1)为:

$$\begin{cases} W_1(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2) & -N & k & N \\ W_2(n_1, n_2) = (n_1, n_2 + k) & -N & k & N \\ W_3(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2 + k) & -N & k & N \\ W_4(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2 - k) & -N & k & N \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 $W_1(n_1, n_2)$ 表示以 (n_1, n_2) 为中心的数值序列: $\{(n_1 - N, n_2), \dots, (n_1, n_2), \dots, (n_1 + N, n_2)\}$,同理可以根据(1)式得出 $W_2(n_1, n_2)$, $W_3(n_1, n_2)$, $W_4(n_1, n_2)$ 所表示的数值序列。

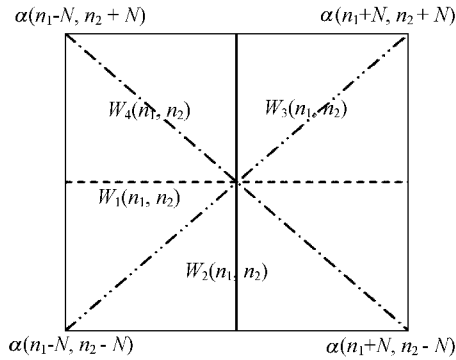


图 1 二维多级中值滤波器基本子窗口

$W_1(n_1, n_2)$ 为落在——上的 (\otimes, \otimes) 数值序列,
 $W_2(n_1, n_2)$ 为落在——上的 (\otimes, \otimes) 数值序列,
 $W_3(n_1, n_2)$ 为落在 - - 上的 (\otimes, \otimes) 数值序列,
 $W_4(n_1, n_2)$ 为落在 - · - 上的 (\otimes, \otimes) 数值序列.

Fig. 1 Basic window of multilevel median filter

多级中值滤波的输出定义为:

$$Y_{MLM}(n_1, n_2) = \text{median}[Y_{\max}(n_1, n_2), Y_{\min}(n_1, n_2), (n_1, n_2)], \quad (2)$$

其中,

$$Y_{\max} = \max_i [Z_i(n_1, n_2)], \quad (3)$$

$$Y_{\min} = \min_i [Z_i(n_1, n_2)], \quad (4)$$

$$Z_i(n_1, n_2) = \text{median}[(\cdot, \cdot) W_i(n_1, n_2)], \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

其中 $\text{median}[\cdot]$ 表示一般中值滤波(MF).

为了描述方便,省掉“(n_1, n_2)”并将基于窗口“(\cdot)”的一般中值滤波操作简记为 $\text{median}[\cdot]$. 下面给出 MLM 的另一种定义形式:

$$\overline{SW}_{\max} = \overline{z_i = Y_{\max}} W_i, \quad (6)$$

$$\overline{SW}_{\min} = \overline{z_i = Y_{\min}} W_i, \quad (7)$$

\overline{SW}_{\max} 、 \overline{SW}_{\min} 分别表示有极大、极小中值的基本子窗口,很容易证明

$$Y_{\max} = \text{median}[\overline{SW}_{\max}], \quad (8)$$

$$Y_{\min} = \text{median}[\overline{SW}_{\min}], \quad (9)$$

所以等价地有

$$Y_{MLM} = \text{median}[\text{median}[\overline{SW}_{\max}], \text{median}[\overline{SW}_{\min}], (n_1, n_2)], \quad (10)$$

多级中值滤波(MLM)可以看作是一种自适应结构. 这种自适应特性是其具有优秀的细节保护能力的重要原因,但同时又看到 MLM 的“自适应程度”是有限的,MLM 的“自适应机构”仅限于在 $W_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 中选择两个有极大(极小)中值的基本子窗口,选定的基本子窗口的中值与 (n_1, n_2) 共同确定多级中值

滤波的输出 Y_{MLM} , 所以 Y_{MLM} 最终是基于较小窗口(基本子窗口)的中值滤波,这是一般多级中值滤波滤波能力较差的根本原因. 提高滤波长度 N 的值可以提高去除随机噪声的效果,但同时却破坏了有效信息. 本文提出的模糊嵌套多级中值滤波器,能够在消除随机噪声时采用长滤波长度滤波,而在保留有效信息时采用短滤波长度滤波,从而达到既能很好地消除随机噪声,又能最大限度地不破坏有效信息,保留有效信息的细节结构.

3 模糊嵌套多级中值滤波基本原理与实现过程

模糊嵌套多级中值滤波器是在多级中值滤波的基础上提出一种改进的多级中值滤波器,其设计思想为:设计一个阈值作为判断参数,使滤波器能够在消除随机噪声时采用长滤波器滤波,而在保留有效信息时采用短滤波器滤波,从而达到既能很好地消除随机噪声,又能最大限度地不破坏有效信息,保留有效信息的细节结构.

(1) 定义基本子窗口

设 (\cdot, \cdot) 为离散二维信号,对于 (n_1, n_2) 定义两个基本子窗口为:

$$\begin{cases} W_{N1}(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2) & - N & k & N \\ W_{N2}(n_1, n_2) = (n_1, n_2 + k) & - N & k & N \\ W_{N3}(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2 + k) & - N & k & N \\ W_{N4}(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2 - k) & - N & k & N \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} W_{M1}(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2) & - M & k & M \\ W_{M2}(n_1, n_2) = (n_1, n_2 + k) & - M & k & M \\ W_{M3}(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2 + k) & - M & k & M \\ W_{M4}(n_1, n_2) = (n_1 + k, n_2 - k) & - M & k & M \end{cases}, \quad (12)$$

其中 $N > M$, N 代表长滤波器长度, M 代表短滤波器长度. $W_{Ni}(n_1, n_2)$ 、 $W_{Mi}(n_1, n_2)$ 分别为滤波器长度为 N 、 M 时的基本子窗口,具体含义和式(1)相同.

(2) 长滤波器与短滤波器滤波输出

长滤波长度滤波结果为

$$Y_{MLM}^N(n_1, n_2) = \text{median}[Y_{\max}^N(n_1, n_2), Y_{\min}^N(n_1, n_2), (n_1, n_2)], \quad (13)$$

短滤波长度滤波结果为

$$Y_{MLM}^M(n_1, n_2) = \text{median}[Y_{\max}^M(n_1, n_2), (n_1, n_2)],$$

$$Y_{min}^M(n_1, n_2), (n_1, n_2)], \quad (14)$$

(13)、(14) 式的计算过程及其中变量的含义同式(2)、(3)、(4)、(5)。

(3) 设置阈值与长、短滤波器 (N 、 M) 的选择

$$C = \frac{1}{m} \sum_{n_1, n_2} Y_{MLM}^N(n_1, n_2), \text{ 其中 } m \text{ 为 } Y_{MLM}^N(n_1, n_2) \text{ 的总数量。}$$

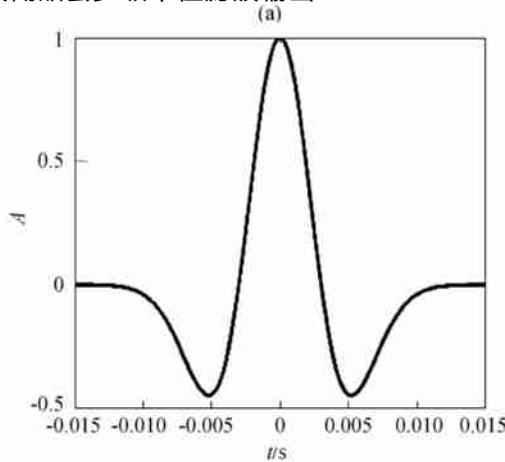
C 代表了地震数据经过长滤波器滤波后输出的振幅平均值(剖面总振幅与采样点总数的比值)。

随机噪声(多为斑点噪声)相对地震有效信号在时间和空间上没有连续和相关性,多表现为单点的突变特性,从而多极中值滤波器在大滤波长度情况下基本可以完全消除随机噪声,但对有效信号不是消除,而只是部分消除,也即破坏。这样长滤波器滤波后的输出信号能量被认为主要是被部分消除的有效信号。因此,当 $Y_{MLM}^N(n_1, n_2) < C$ 时可认为此点为随机噪声点(或没有能量值点),当 $Y_{MLM}^N(n_1, n_2) > C$ 时可认为此点为有效地震信号点。

从而以此阈值为判断,将 $Y_{MLM}^N(n_1, n_2) > C$ 的数据恢复采用短滤波器滤波结果,从而更加突出有效信号细节结构;同时对 $Y_{MLM}^N(n_1, n_2) < C$ 的数据仍然采用长滤波器滤波结果,增强消除噪声效果。

由上述知,长滤波器(即选择 N 值)的选择原则为:其滤波输出结果可以消除绝大多数的噪声,兼顾尽量保留有效信号;短滤波器(即选择 M) 的选择原则为:其滤波输出结果保留绝大多数的有效信号,兼顾尽量消除噪声;具体的 N 、 M 的数值根据具体地震数据,并结合前两项原则确定。

(4) 模糊嵌套多级中值滤波输出



当 $Y_{MLM}^N(n_1, n_2) < C$ 时:

$$Y_{MLM} = Y_{MLM}^N(n_1, n_2), \quad (15)$$

当 $Y_{MLM}^N(n_1, n_2) > C$ 时:

$$Y_{MLM} = Y_{MLM}^M(n_1, n_2). \quad (16)$$

4 理论模型分析

模型采用简单的三层模型进行分析,模型参数如表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of model

层厚度	200 m	400 m	
层速度	2000 m/s	3000 m/s	4000 m/s

模型的单炮(炮点在零点)反射地震记录如图 2,采用 75 Hz 的雷克子波(只考虑反射系数,其他因素不予考虑)

将随机噪声加入地震合成记录后如图 3a。根据文献[2]我们知道多级中值滤波在保留有效信号波形形态的条件下能够消除随机噪声的最大密度为 30%,本文随机噪声的最大强度为地震记录最大振幅的 5 倍,噪声分布密度取 30%,可以看到随机噪声已经严重影响到地震反射信息的识别。

分别用 3 点滤波长度(图 3b)、11 点滤波长度的多级中值滤波器(图 3c)和 11 点嵌套 3 点模糊多级中值滤波器(图 3d)对图 3a 进行滤波。合成记录的处理效果对比见图 3。

从图 3 可以看出,经过 3 点滤波长度的多级中值滤波器滤波后,地震纪录的有效信号绝大部分得到了很好的保留,细节信息得以保存,但随机噪声消

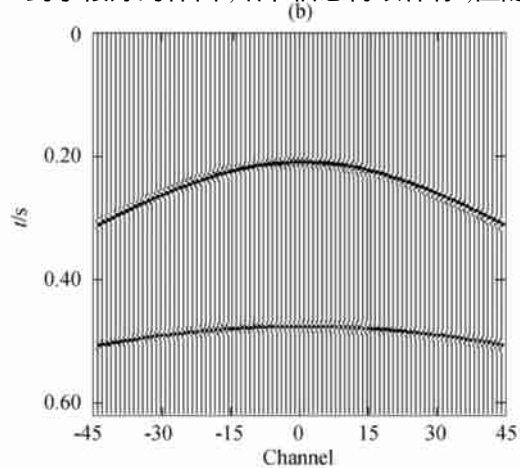


图 2 模拟地震记录
(a) 雷克子波;(b) 模型共炮点合成地震记录。

Fig. 2 Simulative seismogram
(a) Ricker wavelet; (b) Common born synthetic seismogram of model.

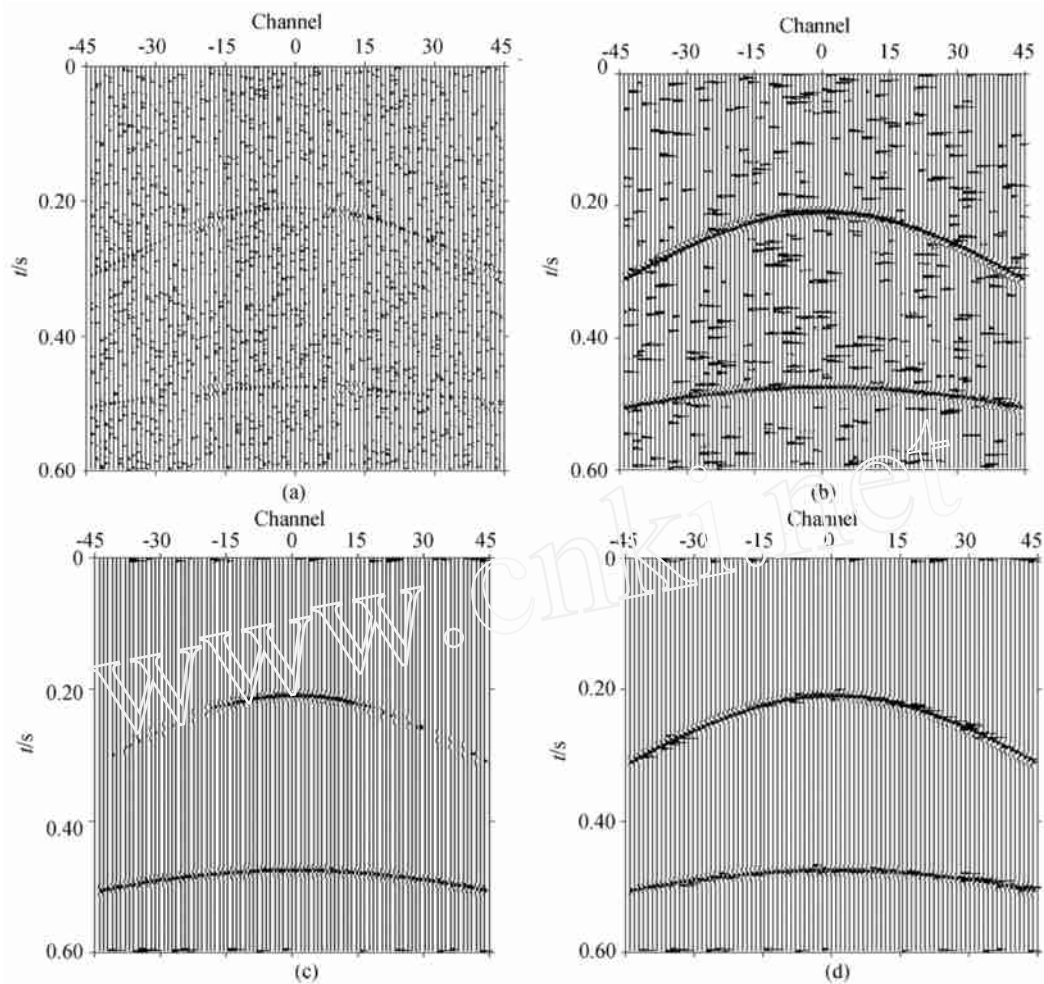


图 3 合成记录处理效果对比图

(a) 加入随机噪声的地震记录; (b) 3 点多级中值滤波器处理结果; (c) 11 点多级中值滤波器处理结果;
(d) 11 点嵌套 3 点模糊嵌套多级中值滤波器处理结果。

Fig. 3 The result contrast of synthetic seismogram processed by different filter

(a) Synthetic seismogram with random noises; (b) Processed by 3×3 multilevel median filter; (c) Processed by 11×11 multilevel median filter; (d) Processed by 11×11 nesting 3×3 fuzzy nesting multilevel median filter.

除效果很差(图 3b);经过 11 点滤波长度的多级中值滤波器滤波后,随机噪声绝大部分已经被消除,但反射信号也遭到了严重的破坏(图 3c);经过 11 点嵌套 3 点模糊多级中值滤波器滤波后,随机噪声绝大部分已经被消除,效果和 11 点多级中值滤波器滤波相当,同时从反射信号可以看出模糊多级中值滤波器对反射信号的保护要明显好于 11 点多级中值滤波器,效果与 3 点中值滤波器相当(图 3d)。通过上面的图件对比说明 11 点嵌套 3 点的模糊嵌套多级中值滤波的效果并不仅仅是 11 点与 3 点多级中值滤波的一个中间效果,而是在消除噪声的能力上相当于 11 点多级中值滤波器,在保护反射信号的能力上相当于 3 点多级中值滤波器。

下面我们从频谱的角度来进一步证明模糊嵌套多级中值滤波器对地震记录处理的优势所在。我们

统一取图 2b、图 3(a~d)的第 24 道记录进行频谱分析,它们对应的频谱对比见图 4。

从频谱图图 4 可以看出,加入随机噪声后原始地震记录的频谱已经被噪声频谱所淹没;经过 3 点滤波长度的多级中值滤波器滤波后频谱基本保留了原始地震记录的反射信号频谱,但噪声的频谱仍然在很大程度上覆盖了反射信号频谱,尤其是高频部分能量很高;经过 11 点滤波长度的多级中值滤波器滤波后,虽然噪声的频谱基本消失,但反射信号的频谱也遭到了严重的破坏;经过 11 点嵌套 3 点模糊嵌套多级中值滤波器滤波后的频谱不仅消除了随机噪声的频谱,而且很好的恢复了反射信号的频谱特征。从上面分析可以很容易的得出与图 3 分析结果一致的结论:模糊嵌套多级中值滤波器既能够达到长滤波长度时多级中值滤波器的消除噪声的效果,又能

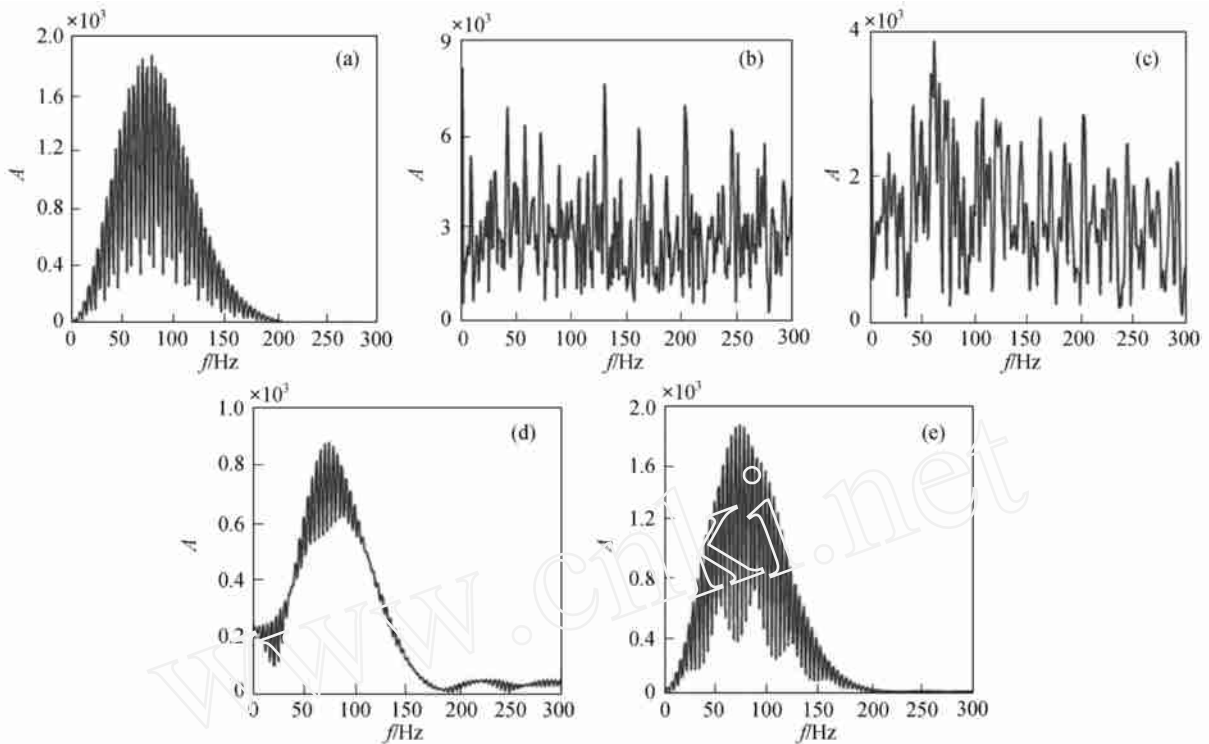


图4 第24道频谱对比图

(a) 图2b第24道记录频谱;(b)图3a第24道记录频谱;(c)图3b第24道记录频谱;
(d)图3c第24道记录频谱;(e)图3d第24道记录频谱。

Fig. 4 Frequency spectrum contrast of 24th channel

(a) Frequency spectrum contrast of 24th channel of Fig. 2b;(b) Frequency spectrum contrast of 24th channel of Fig. 3a;
(c) Frequency spectrum contrast of 24th channel of Fig. 3b;(d) Frequency spectrum contrast of 24th channel of Fig. 3c;
(e) Frequency spectrum contrast of 24th channel of Fig. 3d.

够达到短滤波长度时多级中值滤波器的保护有效信号的效果,从而更出色的兼顾了消除噪声和保护有效信号两个方面。

5 实际资料处理

将该方法用于某区实际地震剖面处理中,结果见图5,由图5可以看出,经过模糊嵌套多级中值滤波处理后的地震剖面上的同相轴连续性得到加强,信噪比提高,从差剖面(图6)还可以进一步看出,本方法比短滤波长度多级中值滤波器对消除随机噪声效果更佳,而相对于长滤波长度的多级中值滤波器,其有效信号的细节保护也要更好,更好地兼顾了消除噪声和保护有效信号细节两个方面。

6 结论

随机噪声(多为斑点噪声)相对地震有效信号在时间和空间上没有连续性,多表现为单点的突变特

性,从而多极中值滤波在大步长情况下基本可以完全消除随机噪声,但对有效信号不是消除而只是部分消除,也即破坏(有效信号时间上的连续性和空间上的相关性所致)。这样大步长多极滤波后的输出被认为能量主要为被部分消除的有效信号。基于上述认识,我们设置地震数据经过长滤波器滤波后输出的振幅平均值 C (剖面总振幅与采样点总数的比值)作为判断有效信号与随机噪声的阈值,当 $Y_{\text{MLM}}^N(n_1, n_2) < C$ 时,可认为此点为随机噪声点(或没有能量值点),当 $Y_{\text{MLM}}^N(n_1, n_2) > C$ 时,可认为此点为有效地震信号点。从而以此阈值为判断,将有效信号部分恢复采用短多极滤波结果,从而更加突出有效信号细节结构,对随机噪声部分保留长多级滤波结果,以保证很好地消除噪声。

通过理论模型的数值分析,在长滤波器滤波后,地震记录中的随机噪声基本被完全消除,地震有效信号被部分消除;在短滤波器滤波后,地震记录有效信号绝大多数被保留,而随机噪声得到了部分消除;通过运用本方法滤波后,有效信号的保留结果相当

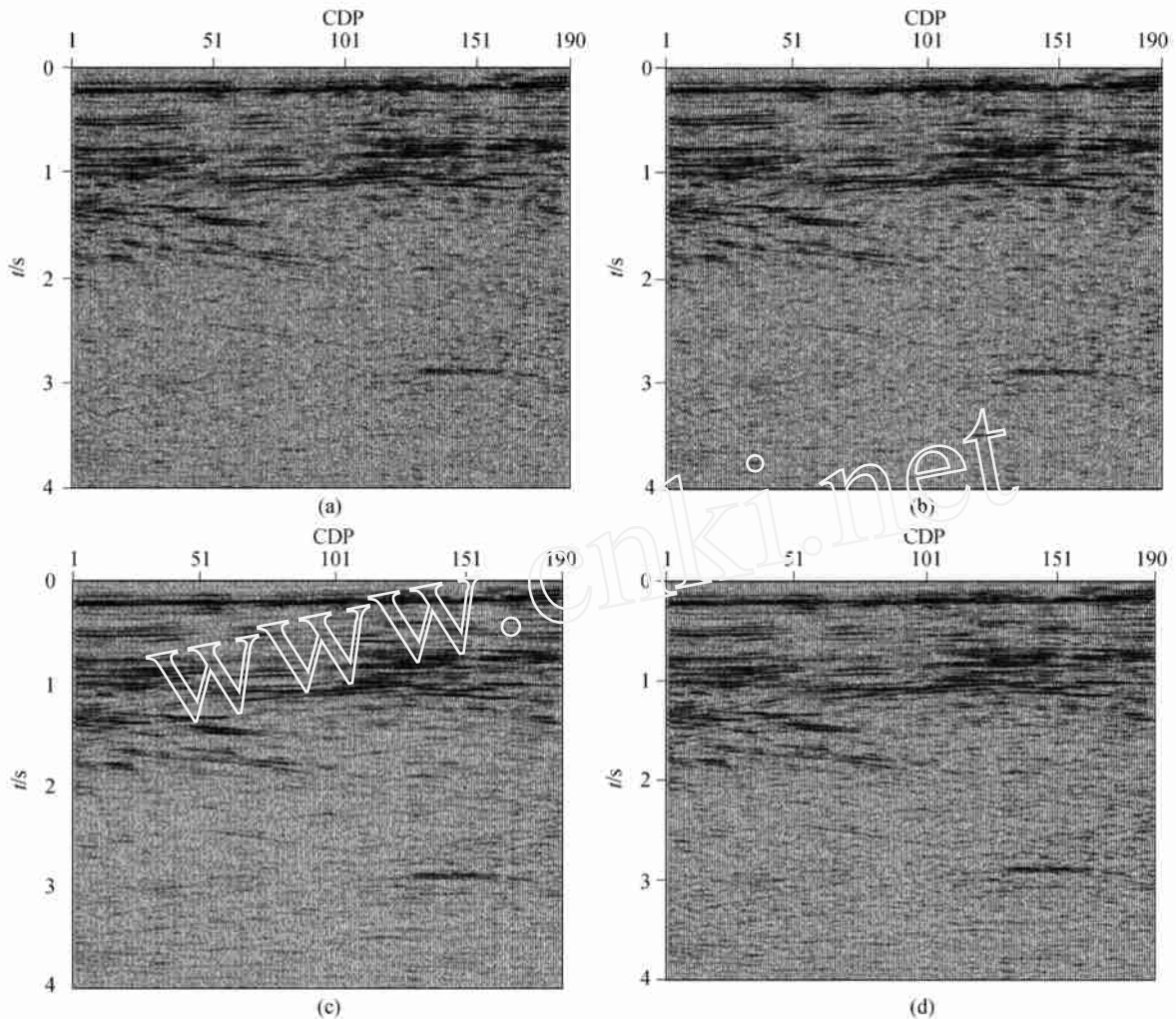


图 5 实测地震剖面处理效果对比图

(a) 实测地震剖面; (b) 3 点多级中值滤波器处理结果; (c) 11 点多级中值滤波器处理结果;
(d) 11 点嵌套 3 点模糊嵌套多级中值滤波器处理结果。

Fig. 5 The result contrast of practical seismogram processed by different filter

(a) Practical seismogram; (b) Processed by 3×3 multilevel median filter; (c) Processed by 11×11 multilevel filter;
(d) Processed by 11×11 nesting 3×3 fuzzy nesting multilevel median filter.

于短滤波器滤波效果,随机噪声的消除结果相当于长滤波器滤波效果,证明了本方法的优越性;通过各滤波器滤波后地震记录频谱的对比可以看出,经过短多级中值滤波器滤波后噪声频谱仍然在很大程度上覆盖了反射信号频谱,尤其是高频部分能量很高;经过长多级中值滤波器滤波后,噪声频谱基本消失,但反射信号的频谱也遭到了严重的破坏;经过本方法滤波后的频谱基本为地震记录有效信号的频谱,说明本方法更好地兼顾了消除随机噪声和保护有效信号两个方面。并对实际剖面进行处理,对比处理前后的剖面及差剖面,进一步验证了模型分析结果的正确性与本方法的优越性。

参考文献 (References)

- [1] 宋焕生,梁德群,刘春阳.一种新的自适应多级中值滤波器.信号处理,1996,12(4):297~305
Song H S, Liang D Q, Liu C Y. A new adaptive multistage median filter. *Signal Processing (in Chinese)*, 1996, 12(4):297~305
- [2] 宋焕生,梁德群,刘春阳.用于图像处理自适应多级中值滤波器.西安交通大学学报,1998,32(1):25~28
Song H S, Liang D Q, Liu C Y. The AMLM filter for image processing. *Journal of Xi'an Jiaotong University (in Chinese)*, 1998, 32(1):25~28
- [3] 贾渊,姬长英.采用改进的自适应模糊多级中值滤波算法去除牛肉图像斑点噪声.农业工程学报,2005,21(2):102~105
Jia Y, Ji C Y. Removing the speckle noises in beef image using an

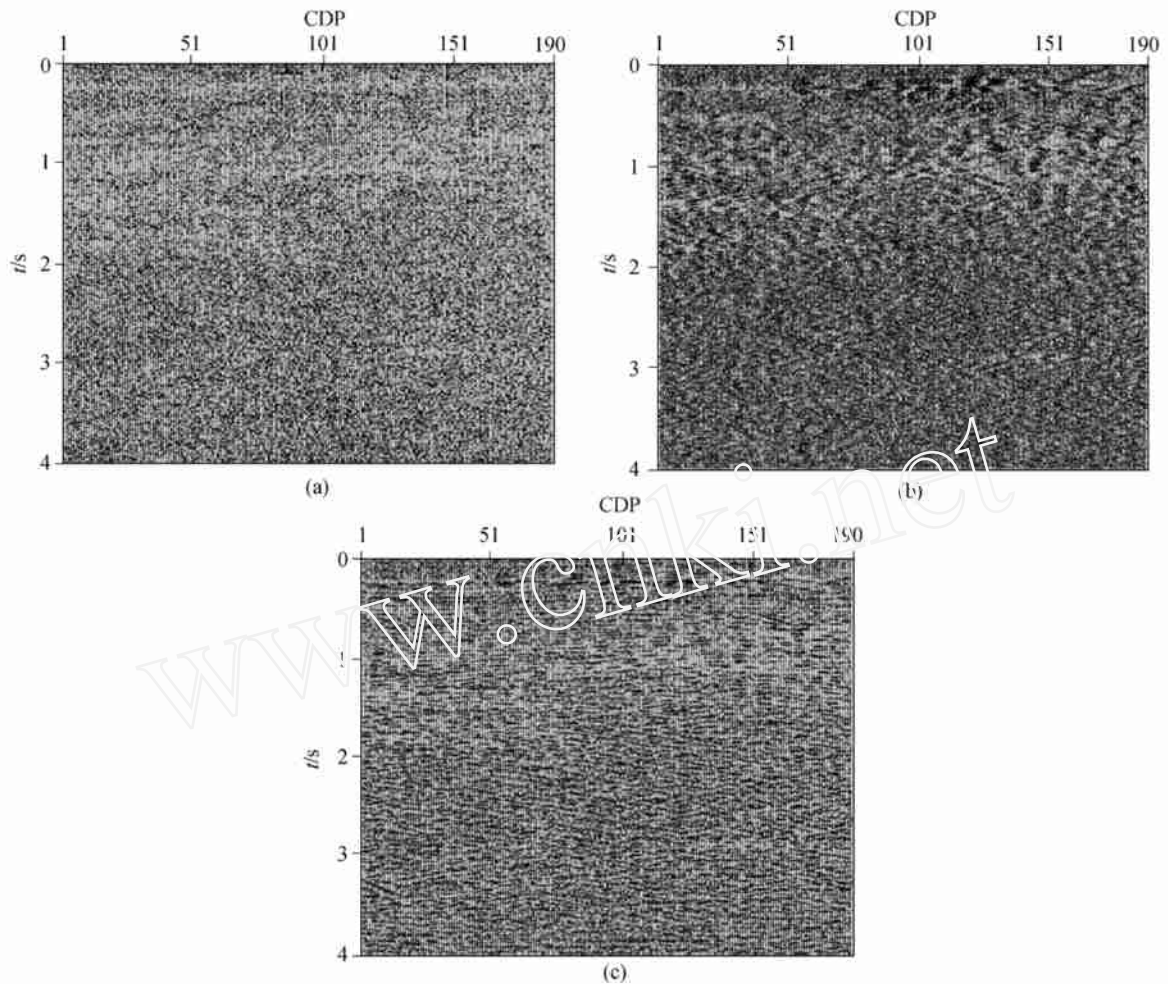


图 6 实测地震剖面处理差剖面对比图

(a) 3 点多级中值滤波器处理差剖面; (b) 11 点多级中值滤波器处理差剖面; (c) 11 点嵌套 3 点模糊多级中值滤波器处理差剖面.

Fig. 6 Margin section plane of practical seismogram processed by different filter

(a) Margin section plane of practical seismogram processed by 3×3 multilevel median filter; (b) Margin section plane of practical seismogram processed by 11×11 multilevel median filter; (c) Margin section plane of practical seismogram processed by 11×11 nesting 3×3 fuzzy nesting multilevel median filter.

improved adaptive fuzzy multilevel median filter algorithm. *Transactions of the CSAE*(in Chinese), 2005, **21**(2):102 ~ 105

- [4] 蒋立辉,赵春晖. 基于多级非线性加权平均中值滤波算法的散斑噪声抑制. *激光与红外*, 2003, **33**(5):380 ~ 382

Jiang L H, Zhao C H. Speckle noise suppressing based on multilevel nonlinear weighted mean median filter. *Laser & Infrared* (in Chinese), 2003, **33**(5):380 ~ 382

- [5] 严又生. 井间地震串滤波波场分离方法. *物探化探计算技术*, 1997, **19**(3):210 ~ 215

Yan Y S. Wave field separation with a cascaded filter on crosswell seismic data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1997, **19**(3):210 ~ 215

- [6] 陈仲委,秦德中. 自适应顺序统计滤波在地震资料处理中的应用. *石油地球物理勘探*, 2006, **41**(3):271 ~ 274

Chen Z W, Qin D Z. The application to seismic data processing of self-adapt sequence statistic filter. *OGP*(in Chinese), 2006, **41**(3):

271 ~ 274

- [7] 王卫华. 利用中值相关滤波预测相干信号. *石油地球物理勘探*, 2000, **35**(3):273 ~ 282

Wang W H. Coherent signal prediction using mid-value correlative filtering. *OGP*(in Chinese), 2000, **35**(3):273 ~ 282

- [8] 鲍祥生,尹成,田继东,韩朝军. 中值滤波的一种快速算法. *石油物探*, 2005, **44**(4):325 ~ 328

Bao X S, Yin C, Tian J D, Han C J. One kind of fast algorithm on the Median Filtering. *Geophysical Prospecting for Petrole* (in Chinese), 2005, **44**(4):325 ~ 328

- [9] 赵彦青,吴继伟,萧蕴诗. 最优中值滤波跨度计算及其应用. *计算机辅助工程*, 2006, **15**(1):59 ~ 62

Zhao Y Q, Wu J W, Xiao Y S. Computation and application of optimum median filter length. *Computer Aided Engineering* (in Chinese), 2006, **15**(1):59 ~ 62

- [10] 刘财,王典,刘洋等. 二维多级中值滤波技术在随机噪

- 声消除中的应用. 石油地球物理勘探, 2005, **40**(2): 163 ~ 167
Liu C, Wang D, Liu Y, et al. Preliminary study of using 2D multi-level median filtering technique to eliminate random noises. *OGP*(in Chinese), 2005, **40**(2): 163 ~ 167
- [11] 冯 颀, 刘 财, 杨宝俊等. 中值滤波器对信号相位和形状影响的研究. 石油物探, 2002, **41**(1): 37 ~ 42
Feng X, Liu C, Yang B J, et al. The impacts of median filter to the phases and shapes of signals. *Geophysical Prospecting for Petrole*(in Chinese), 2002, **41**(1): 37 ~ 42
- [12] 金 龙, 陈小宏, 李景叶. 基于误差准则和循环迭代的时移地震匹配滤波方法. 地球物理学报, 2005, **48**(3): 698 ~ 703
Jin L, Chen X H, Li J Y. A new method for time-lapse seismic matching filter based on error criteria and cyclic iteration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 698 ~ 703
- [13] 王绪松, 杨长春. 对地震图像进行保边滤波的非线性各向异性扩散算法. 地球物理学进展, 2006, **21**(2): 452 ~ 457
Wang X S, Yang C C. An edge-preserving smoothing algorithm of seismic image using nonlinear anisotropic diffusion equation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(2): 452 ~ 457
- [14] 金 雷, 李 月, 杨宝俊. 用时频峰值滤波方法消减地震勘探资料中随机噪声的初步研究. 地球物理学进展, 2005, **20**(3): 724 ~ 728
Jin L, Li Y, Yang B J. Reduction of random noise for seismic data by time-frequency peak filtering. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(3): 724 ~ 728
- [15] 艾印双, 郑天愉. 波场延拓深度滤波方法. 地球物理学报, 1998, **41**(3): 400 ~ 407
Ai Y S, Zheng T Y. Wavefield continuation depth filtering. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, **41**(3): 400 ~ 407
- [16] 胡天跃, 王润秋. 地震资料处理中的聚束滤波方法. 地球物理学报, 2000, **43**(1): 105 ~ 115
Hu T Y, Wang R Q. Beamforming in seismic data processing. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2000, **43**(1): 105 ~ 115
- [17] 耿建华, 马在田, 董良国. 单分量地面纪录地震波场分离的非线性滤波方法研究. 地球物理学报, 2002, **45**(2): 268 ~ 273
Geng J H, Ma Z T, Dong L G. Seismic wave of one-component record separation by non-linear filtering. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(2): 268 ~ 273
- [18] 张军华, 吕 宁, 田连玉等. 地震资料去噪方法技术综合评述. 地球物理学进展, 2006, **21**(2): 546 ~ 553
Zhang J H, L ūN, Tian L Y, et al. An overview of the methods and techniques for seismic data noise attenuation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(2): 546 ~ 553
- [19] Nieminen A, Foster P E. A new class of detail-preserving filters for image processing. *IEEE Trans. on PAMI*, 1987, **9**(1): 74 ~ 90
- [20] Arce G R, Foster R E. Detail-preserving ranked-order based filter for image processing. *IEEE Trans on ASSP*, 1987, **37**(1): 83 ~ 98
- [21] Duncan G, Beresford G. Median filter behavior with seismic data. *Geophysical Prospecting*, 1995, **43**(3): 329 ~ 345

(本文编辑 胡素芳)