

赵冲, 李辉峰, 赵驰, 等. 基于地震波相似性的非局部均值滤波压制异常振幅噪音[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3): 60-65.

基于地震波相似性的非局部均值滤波 压制异常振幅噪音

赵冲^{1,2}, 李辉峰¹, 赵驰^{1,2}, 杨飞龙^{1,2}, 杨文平³, 黄德智⁵, 罗浩¹, 赵修⁴, 张雪⁶

(1 西安石油大学, 西安 710065; 2 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065; 3 中石化石油工程地球物理有限公司华北分公司, 郑州 450000; 4 中石化中原石油工程有限公司, 河南濮阳 457000; 5 吉林大学, 长春 130026; 6 中国石油长庆油田分公司第四采油厂, 陕西靖边 718500)

摘要:非局部均值滤波是根据图像中各像素点间的相似性对图像进行去噪处理, 但该方法不能有效压制图像中的异常振幅噪音。共偏移距道集(按炮点坐标排序的等炮检距道集)中同时刻的地震信号具有相似性高且分布范围集中的特征, 因此可根据非局部均值滤波的权函数判断信号中的异常振幅噪音。基于上述理论, 提出了基于地震波相似性的非局部均值滤波异常噪音压制方法, 以有效地压制地震信号中的随机噪音与异常振幅噪音。该方法是在共偏移距道集中根据非局部均值滤波权函数来判断信号中的异常振幅噪音, 并采用局部振幅统计估算对异常振幅噪音进行压制, 从而达到去除地震信号中随机噪音和异常振幅噪音的目的。理论与实际地震数据试算结果表明, 笔者所提出的方法可以有效地压制地震信号中的随机噪音和异常振幅噪音, 可以让地震资料的信噪比得到进一步提高。

关键词:非局部均值滤波; 加权函数; 局部相似性; 异常振幅噪音; 随机噪音

中图分类号: P631.4 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.069

0 引言

非局部均值滤波(Non Local Means)是BUADES^[1]提出的图像处理方法。该方法根据图像中各像素点之间的结构相似性(主要是灰度相关性和几何结构相似性)和各像素点中噪声的不相关性, 通过在整个图像上寻找与处理像素块相似的图像块, 对其像素根据相似度进行加权平均来提高图像的信噪比^[2-5]。

共炮检距道集相邻地震道同时刻地震信号的旅行路径、波形以及波形畸变(畸变即动校拉伸)基本一致, 因此共炮检距道集相邻地震道同时刻的地震信号具有良好的相似性, 同时这种相似性在时空域中的分布范围非常集中^[6-7]。该相似性的时空域集中分布特征非常适用于非局部均值滤波方法去噪处理,

并且可以极大的缩小搜索范围、节约计算时间^[8-12]。

非局部均值滤波方法适用于去除高斯白噪音, 但不适用于异常振幅噪音^[13-15]。共炮检距道集同时刻的地震信号具有高相似性、分布范围集中的特征, 所以在局部区时空域内进行非局部均值滤波时, 参与滤波统计的各像素块加权函数值接近, 因此可以根据加权函数的数值异常判断异常振幅噪音。本文基于上述思路对非局部均值滤波方法进行改进, 提出了基于地震波相似性的非局部均值滤波异常振幅噪音压制方法。应用非局部均值滤波去噪时, 先根据加权函数对道集中的噪音进行判断, 其中高斯白噪音可用非局部均值滤波方法去噪, 对于异常振幅噪音则使用局部振幅统计方法去噪, 通过模型试算和实际数据试算, 验证了本文方法的噪音去除能力相比经典非局部均值滤波方法有明显提高。

收稿日期: 2020-06-07

资助项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目“基于压缩感知的起伏地表Kirchhoff型动态聚焦束偏移方法”(19JK0668); 陕西省自然科学基金“基于自适应反射点加密的三维井间地震逆高斯束叠加成像”(2021JQ-588); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养项目(YCS18212036, YCS18212037)
作者简介: 赵冲(1994—), 男, 在读硕士, 主要从事于地震资料数据处理方法以及解释方面的研究工作。E-mail: 306098851@qq.com

1 方法原理

1.1 非局部均值滤波算法

假设含有噪声的图像为 g , 原始无噪声图像为 s ,

随机噪声为 n , 则含噪声图像模型为:

$$g(i) = s(i) + n(i) \quad (1)$$

式中: $(i) \in I, I$ 为图像域;

$g(i)$ 为含噪图像;

$s(i)$ 为原始图像;

$n(i)$ 为均值是 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声。

非局部均值滤波算法通过计算图像中所有像素点与图像中某一像素点 i 的相似度, 并根据相似度求得图像中各点对像素点 i 的加权系数, 再通过求取的加权系数将图像中所有像素点加权求和平均得到像素点 i 去噪后的估计值:

$$ng(i) = \frac{\sum_{j \in I} w(i, j) g(j)}{\sum_{j \in I} w(i, j)} \quad (2)$$

式中: $ng(i)$ 为滤波结果;

$w(i, j)$ 为加权函数, 由像素 i 与像素 j 相似度决定。 N_i 与 N_j 分别为以像素 i 像素 j 为中心的方形域, 像素 i 像素 j 相似度取决于邻域矩阵 $g(N_i)$ 与 $g(N_j)$ 的相似度, 邻域矩阵间的相似度通过高斯加权距离 $d(i, j)$ 来衡量:

$$d(i, j) = \left\| g(N_i) - g(N_j) \right\|_{2, \alpha}^2 \quad (3)$$

式中: $\alpha > 0$ 为高斯加权的标准差;

$\|\cdot\|_2$ 为 L^2 范数, $d(i, j)$ 越小, 则邻域矩阵之间的相似度越大, 对应的权值系数 $w(i, j)$ 就越大。加权函数 $w(i, j)$ 表达式为:

$$w(i, j) = \exp\left(-\frac{d(i, j)}{h^2}\right) \quad (4)$$

式中: h 为平滑参数, 其根据像素 j 与像素 i 相似度决定加权系数的衰减。

1.2 异常振幅噪音压制能力分析

对于含有 N 个像素点的 2 个完全相等邻域矩阵 $g(N_i)$ 与 $g(N_j)$, 它们的高斯距离 $d(i, j)=0$, 加权函数 $w(i, j)=1$ 。若信号振幅水平为 s_a , 在矩阵中 m 点存在有异常振幅噪音 n_a , 令 $k = n_a/s_a$ 。则邻域矩阵 $g(N_i)$ 与 $g(N_j)$ 的高斯距离和加权函数如下:

$$d(i, j) = |k \cdot s_a| \quad (5)$$

$$w(i, j) = \exp\left(-\frac{k \cdot s_a}{h^2}\right) \quad (6)$$

$w(i, j)$ 与 $d(i, j)$ 成反比例指数函数关系, k 越大 $w(i, j)$ 越小, 邻域矩阵 $g(N_i)$ 与 $g(N_j)$ 的影响越小。因此, 若图像中含有异常振幅噪音, 则非局部

均值滤波的去噪能力会严重下降, 同时受异常振幅噪音污染的图像块在参与其他图像块滤波时, 还会导致异常振幅噪音扩散到其他图像块的滤波结果中。

1.3 异常振幅噪音的判断及去除

由 1.2 分析可知, 2 个完全相等或极度相似的邻域矩阵 $g(N_i)$ 与 $g(N_j)$, 它们的高斯距离 $d(i, j)$ 和加权函数 $w(i, j)$ 的值代表着噪音的强弱。因此, 若图像域 I 内参与计算的 n 个图像块完全相等或极度相似, 则加权函数和等于或约等于 n , 即:

$$\sum_{j \in I} w(i, j) \approx n \quad (7)$$

当图像块中存在异常振幅噪音时 $w(i, j)=0$, 若被去噪的邻域矩阵 $g(N_i)$ 内存在异常振幅噪音, 则各邻域矩阵的加权函数和约等于 1, 即:

$$\sum_{j \in I} w(i, j) \approx 1 \quad (8)$$

因此, 通过判断 $\sum_{j \in I} w(i, j)$ 值接近于 1 的程度可以确定邻域矩阵 $g(N_i)$ 是否存在异常振幅噪音。

对于邻域矩阵 $g(N_i)$ 存在的异常振幅噪音, 通过求取区域振幅的中值乘以异常振幅噪音加权系数 $wa(i, j)$ 对其压制, 具体如下:

$$Am(x, y) = \text{med}(A(x-n, y-n), \dots, A(x+n, y+n)) \quad (9)$$

$$b = A(x, y)/Am(x, y) \quad (10)$$

$$wa(x, y) = \begin{cases} a \cdot b \cdots A(x, y) > thr \cdot Am(x, y) \\ 1 \cdots A(x, y) \leq thr \cdot Am(x, y) \end{cases} \quad (11)$$

$$Aef(x, y) = A(x, y)/wa(x, y) \quad (12)$$

$Am(x, y)$ 为 $g(N_i)$ 图像块的振幅中值, n 为 $g(N_i)$ 图像块矩形半径, $A(x, y)$ 为 $g(N_i)$ 图像块中点位置像素振幅值, $A(x-n, y-n), \dots, A(x+n, y+n)$ 为 $g(N_i)$ 图像块内各点振幅, thr 为异常振幅噪音门槛(样点振幅与正常振幅比值, 当比值大于 thr 时认为该样点值含有异常振幅噪音), a 为系数, $a \in (1/thr, 1)$, $Aef(x, y)$ 为去噪后振幅。

2 理论模型试算

非局部均值滤波方法是将搜索区域内各图像块按相似系数加权求和平均以达到去噪的目的, 因此搜索区域内各图像块的整体相似性会对滤波结

果产生影响。同时本文方法为了易于实现,引入了“搜索窗口”的概念,以待去噪像素点 (i,j) 为中心设置一定大小的搜索窗口,将加权平均计算限定在搜索窗口范围内,从而避免对整个图像像素点进行加权平均。

图1为非局部均值滤波搜索区域对滤波结果影响对比图。图1a数据为共炮检距道集理论数据,采样间隔为1ms,记录长度3s;图1b数据为图1a

数据中加入其单道绝对振幅平均值10倍的随机噪音;图1c数据为搜索范围 7×31 的滤波结果;图1d数据搜索范围 7×11 的滤波结果。对比图1c与图1d可知,因为搜索范围的扩大会增加算法的时间复杂度,同时参与加权平均的像素也会增多使得去噪像素被过度平滑,所以会严重降低非局部均值滤波的去噪能力。

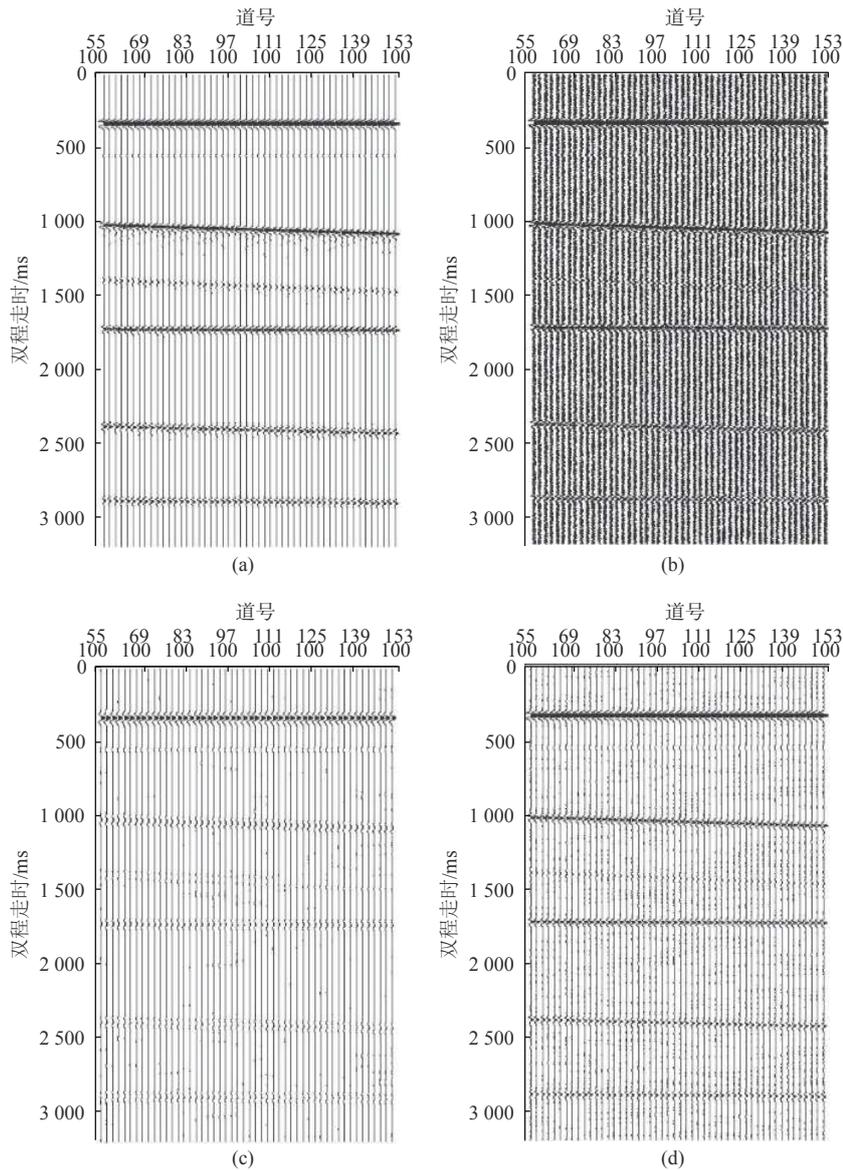


图1 搜索区域对非局部均值滤波的影响

Fig.1 The effect of searching area on non-local mean filtering

图2为理论数据试算对比图,滤波所用邻域矩阵搜索范围为 7×11 、 $Thr=30$ 、 $a=0.1$ 。图2a为共炮检距道集理论数据;图2b为图2a数据中加入了单道平均绝对振幅值10倍的随机噪音以及随机加入单道平均绝对振幅值10000倍(相当于

数据中同相轴波峰振幅的100~500倍)的异常振幅噪音后的数据;图2c为经典非局部均值滤波方法的滤波结果;图2d为本文方法的滤波结果;图2e为图2b数据应用本文方法滤波后去掉的噪音。

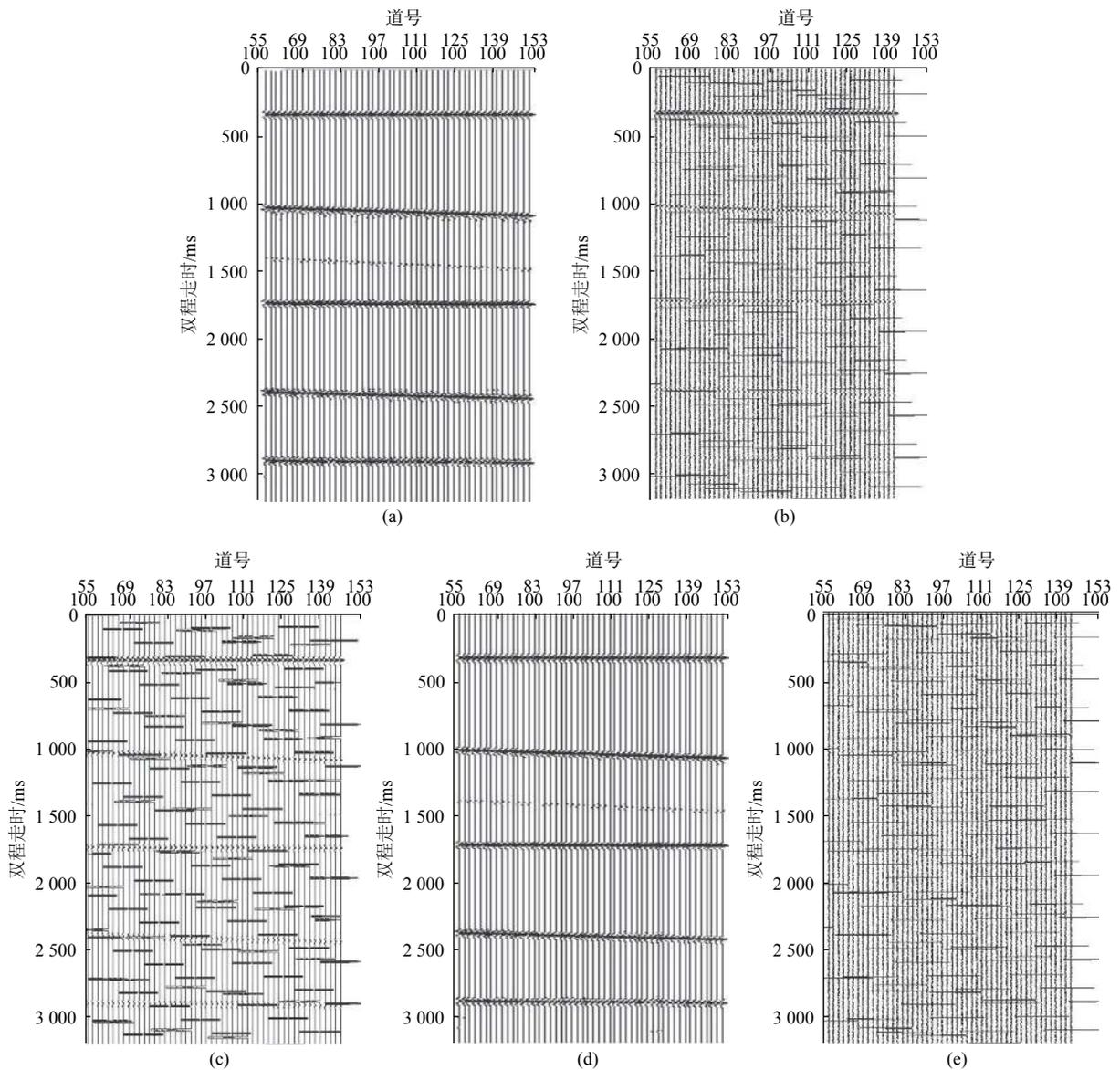


图 2 理论数据去噪效果图

Fig.2 Theoretical data denoising effect

在对图 2b 使用经典滤波方法后得到的图 2c 数据中可以发现其中加入的随机噪音得到了有效去除, 但加入的异常振幅噪音并未被有效压制。故采用本文方法对图 2b 进行滤波处理, 其结果如图 d 所示, 结合图 2e 可以发现数据中的随机噪音和异常振幅噪音都得到了有效压制。

3 实际资料应用与效果分析

对于水平层状均匀介质而言, 共炮检距道集内各道地震道同时刻的地震信号在旅行路径、波形、相位以及畸变(动校拉伸比例)等方面完全一致。当地层形态和介质各向异性发生变化, 但相邻地震

道间的一致性变化幅度要小于它们与其他地震道间的变化幅度, 即共炮检距道集内相邻地震道同时刻的地震信号存在一致性(即相似性), 从而使得共炮检距道集的相似性具有在小范围时空域内集中分布的特点。所以应用非局部均值滤波时, 可利用共炮检距道集的这种相似性小范围时空域内集中分布的特点, 将相似图像块的搜索范围由全局搜索改成局部搜索, 可极大地减小相似图像块的搜索范围和总体计算时间; 同时, 因为参与计算的图像块相似性高, 可以有效避免非相似性图像块对滤波结果的影响, 并有效提高去噪质量。

正常情况下, 地震波初至的振幅远大于其他地震信号振幅, 使用振幅统计方法进行异常振幅去

噪时,彼此之间会产生严重干扰,从而影响去噪效果。因此在使用振幅统计方法去除反射波中的异常振幅噪音时需要将初至切除,以避免初至对去噪结果的干扰;由于初至振幅远大于反射波振幅,应用振幅统计方法对其进行异常振幅噪音去除时,初至会被当做异常振幅噪音去除。又因为共炮检距道集地震信号的相似性时空域小范围集中的分布特性,所以对其应用本文改进的非局布均值滤波方法压制异常振幅噪音时,可以有效避免上述

问题。

图3为实际数据试算对比图,滤波所用邻域矩阵搜索范围为 7×11 、 $Thr=20$ 、 $a=0.1$ 。图3a为共炮检距道集实际地震数据;图3b为经典非局部均值滤波方法去噪后的滤波结果;图3c为本文方法去噪后的滤波结果;图3d为图a数据应用本文方法滤波后去掉的噪音。综合对比图3b、3c和3d,发现本文方法去除随机噪音和异常振幅噪音的能力要强于经典非局部均值滤波方法。

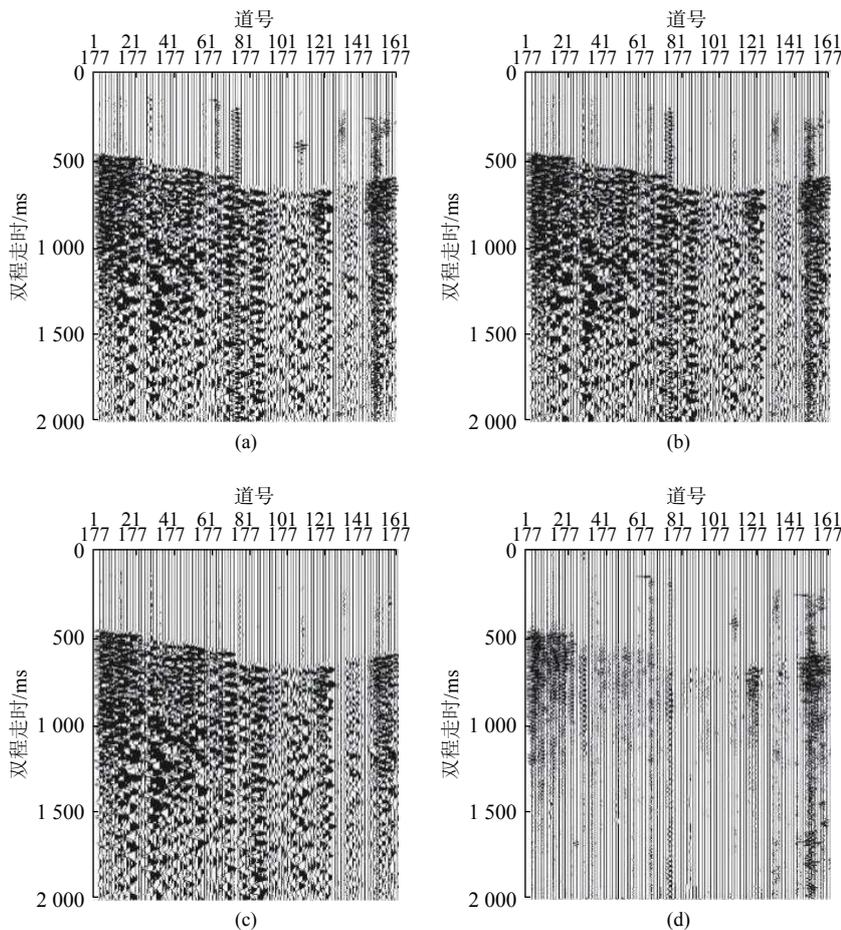


图3 实际数据试算对比

Fig.3 Comparison of trial calculated actual data

4 结论

本文基于共炮检距道集同时刻地震信号在时空域内小范围集中分布的特性,根据非局部均值滤波加权函数判断异常振幅噪音,可有效去除地震数据中的随机噪音和异常振幅噪音,提高非局部均值滤波方法的去噪能力。

该方法具有以下优点:

(1)利用共炮检距道集同时刻地震信号在时空

域内小范围集中分布的特性,对其应用非局部均值滤波方法,可有效减小相似性图像块的搜索范围、节约计算时间,并有效避免非相似性图像块对滤波结果的影响,提高去噪质量。

(2)对共炮检距道集地震数据应用非局部均值滤波,通过加权函数可判断异常振幅噪音,可有效提高非局部均值滤波方法的去噪能力。

(3)利用共炮检距道集同时刻地震信号在时空域内小范围集中分布的特性,对其应用非局部均值滤波方法,可以有效避免异常振幅噪音去除时的初

至与其他地震信号间的相互影响。

参考文献:

- [1] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE Computer Society, 2005.
- [2] 杨桃, 封磊, 孙怀江, 等. 基于低秩和全变差正则化的图像压缩感知重构[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 571-575, 614.
- [3] 李亚峰. 一种基于多字典学习的图像分割模糊方法[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1700-1709.
- [4] OSHER S, BURGER M, GOLDFARB D, et al. An iterative regularization method for total variation-based image restoration[J]. *Siam J Multiscale Model Simul*, 2005, 4: 460.
- [5] LUO E, CHAN S H, NGUYEN T Q. Adaptive image denoising by mixture adaptation[J]. *IEEE T I Process*, 2016, 25: 4489.
- [6] 刘国峰, 刘洪, 李博, 等. 山地地震资料叠前时间偏移方法及其 GPU 实现[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(12): 3101-3108.
- [7] 裴银祥. 快速非局部均值图像去噪算法[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [8] 樊勇. 基于高斯噪声的图像去噪算法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [9] 朱洪昌, 玄长虹, 刘群强. 复杂地表区浮动基准面计算方法的优化选取[J]. *油气地球物理*, 2010, 8(2): 22-27.
- [10] 崔树果, 朱凌燕, 王建花. f-x域 Cadzow 技术分块压制随机噪声及其应用[J]. *石油物探*, 2012, 51(1): 43-50, 112.
- [11] 袁恩辉, 陈风来, 奇志斌, 等. 奇异值分解在去除特殊干扰波中的研究与应用[J]. *非常规油气*, 2015, 2(5): 20-25.
- [12] 蔡斌, 刘卫, 郑重, 等. 一种改进的非局部均值去噪算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2016, 29(1): 1-10.
- [13] 王银杰. 基于非局部均值滤波的图像去噪算法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [14] 姜翠苹, 李涛, 周小伟, 等. 叠前保幅宽频处理技术及应用[J]. *非常规油气*, 2016, 3(5): 32-37.
- [15] 黄宁, 关语晴. 基于复杂地表横向一致性地震处理技术及应用: 以西部某油田 QS 地区资料为例[J]. *非常规油气*, 2018, 5(6): 42-49.

SUPPRESSION OF ABNORMAL AMPLITUDE NOISE WITH SEISMIC WAVE SIMILARITY NON-LOCAL MEAN FILTER

ZHAO Chong^{1,2}, LI Huifeng¹, ZHAO Chi^{1,2}, YANG Feilong^{1,2}, YANG Wenping³,
HUANG Dezhi⁵, LUO Hao¹, ZHAO Xiu⁴, ZHANG Xue⁶

(1 Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2 Shaanxi Key Laboratory of Oil and Gas Accumulation Geology, Xi'an 710065, China;

3 Sinopec Petroleum Engineering Geophysics North China Branch, Zhengzhou 450000, China; 4 Technology Company of

Zhongyuan Petroleum Engineering, Puyang 457000, Henan, China; 5 Jilin University, Changchun 130026, China;

6 PetroChina Changqing Oilfield Branch Fourth Oil Production Plant, Jingbian 710021, Shaanxi, China)

Abstract: Non-local mean filtering denoises the image based on the similarity between pixels in the image. However, this method cannot effectively suppress the abnormal amplitude noise in the image. The seismic signals simultaneously in common offset gathers (equal offset gathers sorted by shot coordinates) have the characteristics of high similarity and concentrated distribution. So, the abnormal amplitude noise in the signal can be judged according to the weight function of non-local mean filtering. Based on the theory mentioned above, this paper proposes a non-local mean filtering method for suppressing abnormal noise based on the similarity of seismic waves to effectively suppress random noise and abnormal amplitude noise in seismic signals. The trial results of theoretical and actual seismic data show that the method proposed in this paper can effectively suppress random noise and abnormal amplitude noise in seismic signals, and can further improve the signal-to-noise ratio of seismic data.

Key words: non-local mean filtering; weighting function; local similarity; abnormal amplitude noise; random noise