

文章编号: 1001-1986(2014)05-0087-05

叠前非局部平均滤波压制随机噪音

胡新海^{1,2}, 欧阳永林³, 曾庆才³, 王 兴³, 康敬程³

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007;
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 非局部平均滤波方法的去噪性能优异, 但其在地震资料处理中的应用刚刚起步。该方法利用数据具有的结构冗余, 以包含局部结构的小窗口或邻域为单元, 利用局部结构相似性进行加权运算, 增强有效信号, 压制随机噪音。针对叠前地震资料数据量大、噪音背景强、局部结构简单; 原始非局部平均算法对每一点滤波, 需要对数据体内所有点计算权系数后进行加权计算, 计算量大, 对强噪音背景适用性差等不足, 对原始非局部平均算法进行了改进, 主要包括: 基于速度谱的搜索窗口分割; 基于梯度域奇异值分解的局部结构相似集选择方法; 基于相似集大小的自适应滤波参数选择方法。试验结果表明, 该方法改进后对于叠前地震数据的随机噪声具有较好的压制作用。

关 键 词: 叠前非局部平均滤波; 自适应加权; 梯度域奇异值分解; 预选择; 去噪

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.05.017

De-noising seismic data with pre-stack nonlocal means method

HU Xinhai^{1,2}, OUYANG Yonglin³, ZENG Qingcai³, WANG Xing³, KANG Jingcheng³

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Langfang 065007, China)

Abstract: The nonlocal means method has good denoising performance, but its application is newly developing in seismic data processing. The method, using the structural redundancy of data, taking the small window with local structure and neighborhood as unit, conducts weighted arithmetic by using local structural similarity to enhance effective signals and to depress random noises. Aiming at huge amount of pre-stack seismic data, strong background noise and simple local structure, the original nonlocal means method filters each point, conducts weighted calculation after calculating the weight coefficient of all points within data. Because of short points such as huge computation volume and poor adaptability to strong noise background, the original nonlocal means method has been improved. Three modifications have been proposed for the nonlocal means algorithm. Firstly, the scan windows are divided with velocity spectrum; then, pre-selection of similar set is based on singular value decomposition in gradient domain; lastly, selection of self-adaptive filtering parameter is based on the scale of similar set. De-noising results for the test data demonstrate that the method can effectively depress the random noise of seismic data.

Key words: pre-stack nonlocal means method; self-adaptive weighting; singular value decomposition in gradient domain; pre-selection; denoising

随机干扰严重降低了地震资料的信噪比, 其频谱很宽, 无一定视速度, 因而不能利用随机干扰和有效波之间在频谱上的差异或传播方向上的差异(即视速度上的差异)来进行压制^[1]。非局部平均滤波(Non-Local Means Filtering, NLMF)是一种性能优异的滤波方法, 其利用图像具有的结构冗余度, 以小窗口或邻域为单元进行加权运算, 增强有效信号的

结构压制随机噪音。相比常用的带通滤波、奇异值分解、 $f\text{-}x$ 预测反褶积等方法, 非局部滤波法是一种全新的方法。原有的时间域和频率域滤波方法从本质上都是对位置相邻的计算点加权平均的局部平均滤波。非局部平均滤波已经在图像数据、雷达数据、声音数据的随机噪音压制中得到了广泛的应用, 但该方法目前还未见在叠前地震数据去噪中得到应用。

原始的非局部平均算法计算每一个点滤波系数时要对整个数据体进行权值运算，因此这种方法的计算量非常大，难以适用于叠前地震资料处理。为使得非局部平均滤波应用于叠前处理，需要减少权的计算次数。在图像处理领域，研究人员提出了许多提高计算效率的方法。Mahmoudi 等^[2]利用图像子块的均值与平均梯度方向对邻域进行预选择，生成相似像素集合，这种方法可以显著提高运算速度，但是对于弱梯度与低信噪比图像去噪效果不佳；Coupe 等^[3]采用图像子块的均值与方差选择与当前图像子块相似的邻域，其对于低信噪比资料有较好的适应性，但存在改变纹理走向的风险；Ramathan^[4]利用概率统计的方法排除不相似子块，该方法对于低信噪比资料适应性较差；Tasdizen 等^[5]利用主成份分析将特征向量空间用于相似系数求取，这种矩阵向量化的方法可能破坏图像的结构信息；Brox 等^[6]利用聚类树生成相似集，该方法存在存储代价过高的问题。

本文通过分析叠前地震数据的结构冗余特性，对原始非局部平均算法进行了改进，提出了可以适用于叠前地震数据处理的方法。这主要包括叠前地震数据体分块、相似邻域预处理、相似邻域优选、自适应滤波参数选择 4 部分内容。

1 非局部平均滤波基本原理

设原始地震记录为 f ，由有效波 s 与干扰波 n 组成，即 $f = s + n$ 。NMLF 处理后的记录为 \hat{f} ， i, j 为地震记录中的采样点，点 i 的滤波后结果为若干与其局部结构相似的样点 j 加权求和得到。每一点 j 均具有特定的权系数。为定量计算 i 与 j 点的结构相似度，需要定义一个包含结构信息的邻域作为比较单位。邻域的维度由数据的维度决定，其形状和大小是可变的。 i 点与 j 点的局部结构相似度是利用邻域间高斯加权的欧几里德距离 $D(i, j)$ 来表示。

设以 i 点为中心的邻域为 $N(i)$ ，滤波后样点的振幅为 $\hat{f}(i)$ ，以 j 点为中心的邻域为 $N(j)$ ，滤波前 j 点的振幅为 $f(j)$ ， $w(i, j)$ 为权系数， $D(i, j)$ 为高斯加权欧式距离， A 为搜索窗口， h 为滤波参数， G_a 为高斯核函数， a 为高斯核函数的标准差， x_0, y_0 表示高斯核的中心点坐标。将 NMLF 用公式表示如下：

$$\hat{f}(i) = \sum_{j \in A} w(i, j) f(j) \quad (1)$$

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

$$D^2(i, j) = \|G_a \otimes (f(N_i) - f(N_j))\|^2 \quad (3)$$

$$G_a(x, y) = \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2a}\right) \quad (4)$$

其中，滤波参数 h 控制指数函数的衰减速度，起着控制平滑程度的作用。高斯核函数确定 i 的邻域与 j 的邻域的欧几里德距离，给予远距离的点较小的权值，近距离点的邻域赋以较大的权值，使得与中心点邻域最接近的结构保存（ \otimes 表示集合内对应元素相乘）。 $w(i, j)$ 满足 $0 \leq w(i, j) \leq 1$ 并且 $\sum_j w(i, j) = 1$ 。

其计算方式如图 1 所示，五星所在点为计算点(采样点)，方框内的部分为邻域，3 种不同的线段代表 3 种不同的局部结构。对于任意一个计算点 p ，其局部结构可用以其为中心的邻域表示，滤波时与该点邻域结构越相似，则分配的权值越大，局部结构相同的计算点权重最大。图中 p 点与 q_1 点的邻域结构相似度最高，因此其权值 $w(p, q_1)$ 远大于 q_2 的权值 $w(p, q_2)$ 与 q_3 的权值 $w(p, q_3)$ 。这样，参与滤波点的权重与其位置无关，仅仅与计算点邻域的局部结构相似性有关。因此，这种滤波方法称为非局部平均滤波算法。NMLF 算法正是利用有效信号局部结构重复出现的概率大于干扰信号来增强有效波压制干扰波。

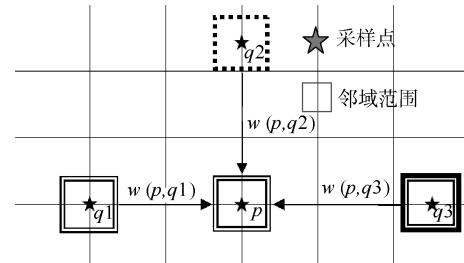


图 1 NMLF 加权计算示意图
Fig.1 The weighted method of NMLF

原始的 NMLF 算法中搜索窗口 A 为整个数据体。设数据体、搜索窗口、邻域的大小分别为 x, y 和 z ，那么 NMLF 的计算复杂度为 $O(xyz)$ ，因此选择合适的搜索窗口与邻域可以显著提高计算效率。

2 改进的 NMLF 方法

2.1 搜索窗口的选择

非局部平均滤波计算中计算量最大的是权系数的计算，因此仅选择对滤波效果影响较大的邻域进行权系数计算是一种提高算法效率的方法。但这种方法是否有效取决于数据的预选择特征与采用的预选择策略。相比图像资料，叠前地震数据的噪音背

景要大得多，但其规律性较强，结构复杂度较低。基于这些特点，在 CMP 道集中一段偏移距内开一个时窗作为运算邻域，然后利用块匹配规则在搜索窗口中找到该 CMP 道集与相邻 CMP 道集中与该邻域近似度满足某个阈值的邻域，再将这些邻域堆叠成一个三维矩阵；用可分的三维变换系数矩阵表示该三维矩阵，利用收缩变换系数进行去噪处理，然后再进行三维逆变换，最终将所有数据块与系数进行聚合得到去噪后的结果。

对于叠前 CMP 道集，其搜索窗口为一系列时空窗的叠合(图 2)。首先进行数据预处理，将叠前地震数据按照 CMP 线号、CMP、偏移距进行分选，对

CMP 道集做动校正；然后根据速度谱上控制标志层的谱点进行时间窗划分，其标准是保证主要目的层结构特征相近的部分都处于同一个搜索窗内。图 2 中速度谱上划分的时间窗包含 CMP1、CMP2、CMP3 三个 CMP 点，分别对应 3 个道集时间方向的窗口范围；在偏移距方向可以选择全偏移距也可以对偏移距进行等分。依照同样的办法，将 n 个相邻面元的 CMP 道集进行相似的划分，然后将得到的搜索窗口进行叠合，形成三维搜索域。其中 n 的大小取决于水平方向的构造平缓程度。需要注意的是，当构造变化较大时，相邻 CMP 道集同一位置相似性较差， n 的值过大时会使去噪效果变差，并可能出现结构噪声。

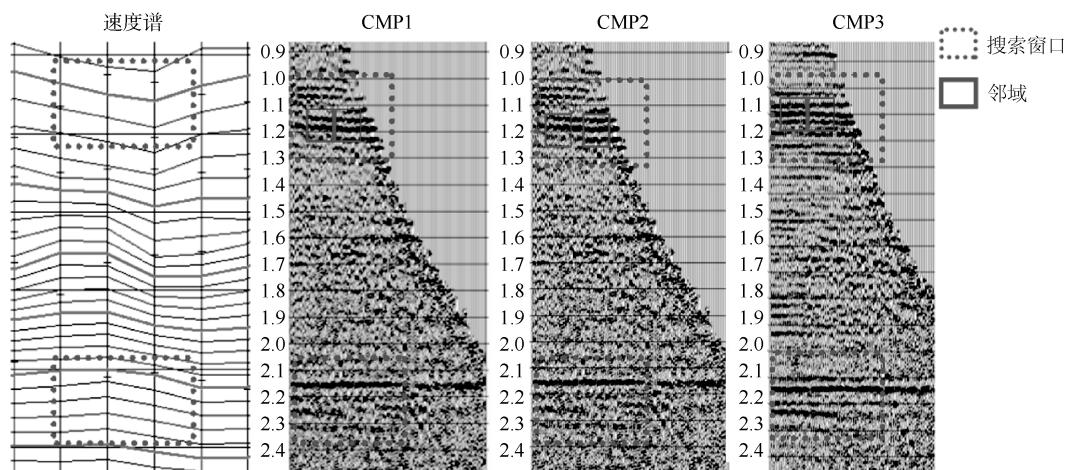


图 2 搜索窗口选择示意图
Fig.2 The method for selection of scan windows

2.2 相似集的选取

相似邻域的选择依赖于对数据局部特征的提取。经过静校正与动校正之后的叠前 CMP 道集有效信息近似于水平层状，利用奇异值分解算法难以表示因为 AVO 效应或构造因素引起的振幅变化。因此，选择梯度域奇异值分解法进行有效信息表示。对于搜索窗口内的数据，首先将三维搜索域中的各个搜索窗口 W 分别计算数据的梯度，然后将其排列成 $N \times 2$ 的矩阵 D 进行奇异值分解。

$$D = [\nabla W(1)^T, \nabla W(2)^T, \nabla W(3)^T, \dots, \nabla W(N)^T]^T = U \Sigma V^T \quad (5)$$

其中 $\nabla W(i) = [\frac{\partial W(i)}{\partial x}, \frac{\partial W(i)}{\partial y}]^T$ 为 i 点的梯度； U 是

$N \times N$ 的正交矩阵； Σ 是 $N \times 2$ 的奇异值矩阵； V 为大小 2×2 的正交矩阵，其第二列向量对应最小的奇异值。奇异值矩阵的特征向量 λ_1 、 λ_2 反映特征向量方向的能量变化。在有效波位置振幅变化较小，特征值近似为零；在“断点”边缘位置振幅变化大，特征值 $\lambda_1 > \lambda_2 \approx 0$ 。由于奇异值具有较强的抗噪能力，

且噪声没有任何方向性，因此 λ_1 、 λ_2 能够表征数据的局部特征。采用文献 [7] 中提出的方法，将 $e(i) = \lambda_1(i) + \lambda_2(i)$ 作为局部方向能量的度量，并进行归一化处理：

$$\bar{e} = \frac{e - \min(e)}{\max(e) - \min(e)} \quad (6)$$

\bar{e} 表示图像的局部结构， \bar{e} 较大的区域包含丰富的细节信息， \bar{e} 较小的区域相对比较平坦。将 \bar{e} 作为预选择的依据，计算各图像子块的 \bar{e} 生成结构特征图。对于每一点，首先比较当前邻域的 \bar{e} 与其他点 \bar{e} 的差值，生成相似集^[7-8]。相似集的大小与邻域的形状大小是影响滤波的效果的重要因素，需要进行试验来确定。

2.3 自适应滤波参数选择

不同 CMP 道集的信噪比不同，即使同一 CMP 道集内不同位置的信噪比也有高有低。当信噪比水平超过一个数值以后，不可能找到一个全局的滤波参数使其对图像的各个部分都具有很好的去噪效果^[9-10]。滤波参数 h 直接决定 NLMF 的滤波性能，

对 h 进行自适应处理使其能够随信噪比变化而变化以达到好的去噪效果。根据对地震数据的冗余度分析可以得出：信噪比高的成分结构冗余度高，信噪比低的成分结构冗余度低。因此，可以根据数据冗余度代替信噪比来控制滤波参数的大小。由权值表达式 $w(i, j) = \exp(-\frac{D(i, j)}{h})$ 可以看出：邻域之间的欧式距离与滤波参数的比值决定了权值的大小。冗余度不同的点，其邻域之间的欧式距离具有不同的分布，为了得到更好的滤波效果，对于不同的距离分布应该选用不同的滤波参数。根据冗余度将数据分为冗余度大的邻域和冗余度小邻域。以数据格点邻域之间的欧式距离小于某个阈值的个数 num 占搜索窗点数 win 的比例 p 作为分类的准则，即：

$$p = num/win \quad (7)$$

则对于不同冗余度的邻域，有：

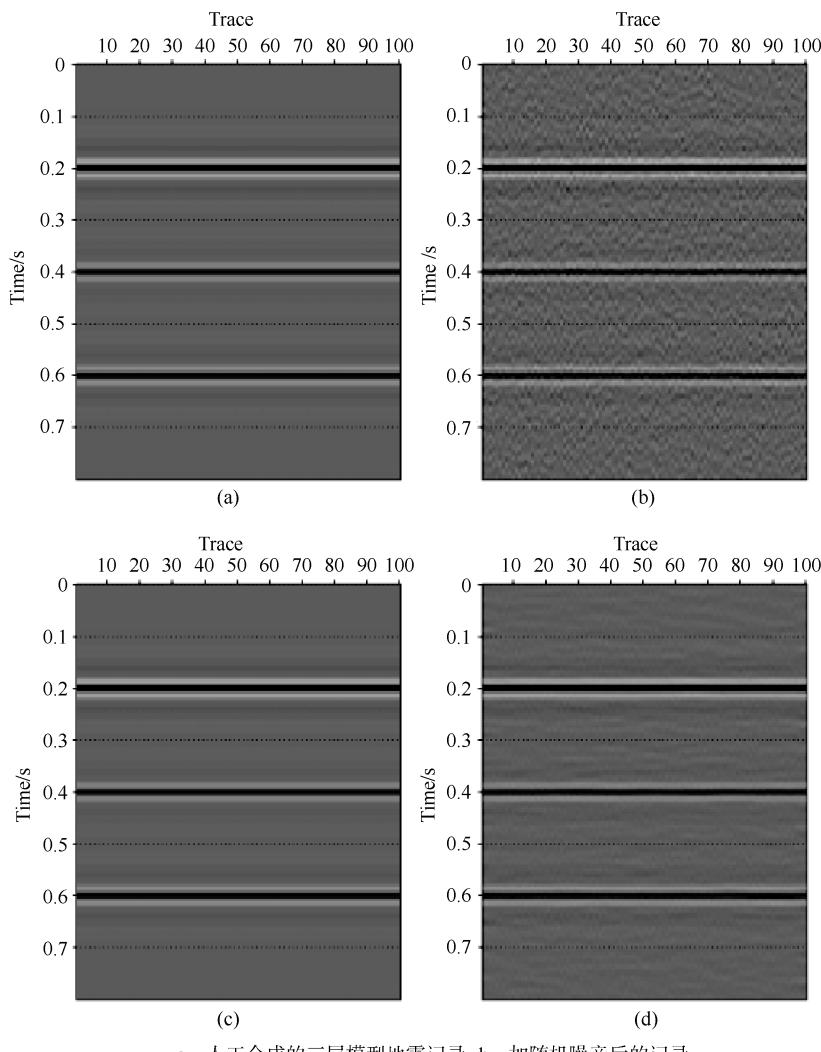
$$h = \lambda \cdot p^\alpha \cdot \sqrt{d_{max}} \quad (8)$$

式中 h 为滤波参数； λ 为基础加权系数； α 为衰减指数； d_{max} 为相似集中最大的欧几里德距离。

资料中冗余度高的邻域 p 值较大，对应较大的滤波参数。 α 一般为正值， α 越大则不同冗余度的邻域间滤波参数大小差别越大。欧几里德距离越大代表冗余度越高，不同位置的最大欧几里德距离不同，可以利用控制邻域的 d_{max} 对应的权值来控制整体权值的分配。式(8)综合了滤波效果的整体调整和局部调整，利用 λ 和 α 来控制整体效果，同时利用不同位置 p 与 d_{max} 对于不同位置不同结构的邻域自适应地选择滤波参数，而不是全局利用一个固定参数，这样可以避免有的位置过度平滑而有些位置滤波不充分的情况。

4 应用效果

图 3 为模型数据滤波效果图，由此表明：相比常用的 FX 预测反褶积(RNA)，非局部平均滤波对于随机噪声具有更加有效的压制作用。



a—人工合成的三层模型地震记录; b—加随机噪音后的记录;
c—非局部平均滤波后的效果图; d—FX预测反褶积后的效果图

图 3 模型数据非局部滤波效果图

Fig.3 Effect of nonlocal filtering of model data

图4为某区块的实际地震资料。图4a为动校正后未做非局部平均滤波的道集,图4b为非局部平均滤波后的道集,可见非局部平均滤波可以较好的压制随机噪音,显著提高地震数据信噪比,增强有效波的同相性;图4c为保幅性说明图,实线为原始道集a时窗范围2 700~2 800 ms的AVO曲线,虚线为滤波后道集b时窗范围2 700~2 800 ms的AVO曲线。滤波前后a道集的AVO曲线有所改变,而相对振幅关系得到了保持,由此可见非局部均值滤波具有保幅性。图4d原始道集的叠加剖面,图4e为非局部平均滤波后道集的叠加剖面,表明经过叠前非局部平均滤波处理后,剖面整体信噪比明显提高,层位连续性增强。

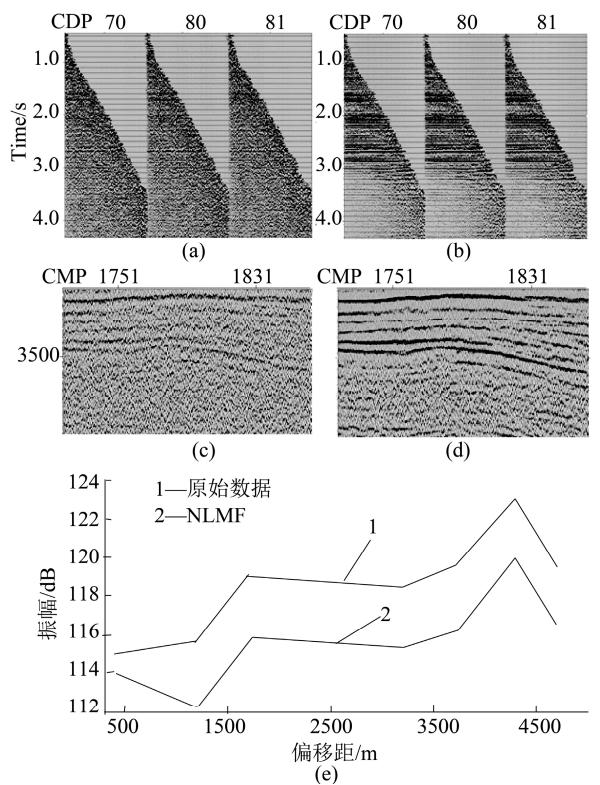


图4 实际资料非局部滤波效果图

Fig. 4 The result of NMLF on actual seismic data

5 结语

提出的用于叠前随机噪音压制的快速非局部平均算法,采用梯度域奇异值分解提取数据的局部结

构信息,构造局部结构特征描述因子,在此基础上,提出了相似集优选方法,求取体现结构相似度的权系数,并结合地震数据的特点,利用速度场自动划分搜索窗口;通过算法分析,提出了自适应滤波参数的选择方法代替原有的单一参数,能够对数据不同信噪比的局部区域更好地进行滤波;应用模型地震数据与实际地震资料进行测试,验证了方法的保幅性与有效性。

该方法适用于低信噪比地区的三维叠前地震数据区处理,可以提高剖面整体信噪比,增强层位连续性。叠前地震资料数据量大,而且该方法属于全局搜索算法,虽然进行了优化,但运算与存储量依然较大,因此要将算法进行并行化改造作为努力的方向。

参考文献

- [1] 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): 44–49.
- [2] MAHMOUDI M , SAPIRO G. Fast image and video denoising via nonlocal means of similar neighborhoods[J]. IEEE Signal Processing Letters , 2005 , 12(12) : 839–842.
- [3] COUPE P , YGER P , PRIMA S , et al. An optimized block-wise nonlocal means denoising filter for 3-D magnetic images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging , 2008 , 27(4) : 425–441.
- [4] VIGNESH R , OH B T , KUO C C J. Fast non-local means(NLM) computation with probabilistic early termination[J]. IEEE Signal Processing Letters , 2010 , 17(3) : 277–280.
- [5] TASDIZEN T. Principal neighborhood dictionaries for nonlocal means image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing , 2009 , 18(12) : 2649–2660.
- [6] BROX T , KLEINSCHMIDT O , CREMERS D. Efficient nonlocal means for denoising of textural patterns[J]. IEEE Transactions on Image Processing , 2008 , 17(7) : 1083–1092.
- [7] 许光宇,谭结庆,钟金琴. 有效保持细节特征的快速非局部滤波方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(23): 196–202.
- [8] 余松煜. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989: 18–57.
- [9] 许录平. 数字图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] 刘涛. 小波域中的非局部平均去噪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.