

利用多尺度形态学识别微地震监测中的弱信号

李会俭^{*①②} 王润秋^{①②} 曹思远^{①②} 药鑫蕊^{①②} 王芳琳^③ 孙立鹏^{①②}

(①中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; ②中国石油大学(北京)CNPC 物探重点实验室,北京 102249; ③中国石化江苏油田分公司物探研究院,江苏南京 210046)

李会俭,王润秋,曹思远,药鑫蕊,王芳琳,孙立鹏. 利用多尺度形态学识别微地震监测中的弱信号. 石油地球物理勘探,2015,50(6):1105-1111.

摘要 针对井中微地震监测数据由于信噪比低、震源强度小、信号弱等原因造成的有效信号难于识别的问题,本文将多尺度形态学理论应用于弱信号分析、识别中。有效信号与噪声在振幅和持续时间上具有一定的差异,因此可以在形态上进行数字信号分析。该方法基于波形形态的细节差异进行分析,对数据的形态特征进行分解。利用形态学中多个尺度的结构元素与原始数据进行运算,可以得到不同尺度的分量。通过分析不同尺度下的信号特征,估计并检测出微弱信号和噪声。模型数据测试和野外实际微地震资料处理结果均表明,本文方法可有效地识别较弱的信号并对噪声进行压制,验证了该方法的有效性和实用性。

关键词 多尺度形态学 微地震事件 弱信号识别 微地震震级

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.06.010

1 引言

在水力压裂微地震事件监测中的震级一般较小^[1],一般 $M \in [-3, 1]$ (M 为里氏分级)。在大地震监测中,规定了相邻震级间的能量相差 32 倍,因此最大震级与最小震级间的能量相差可达 10^6 倍。震级较小的事件在地震记录中很难识别^[1,2],为了突出微弱信号,可以对噪声进行压制,如频率域滤波^[3]、盲信号处理^[4]、曲波阈值去噪^[5]、Hankel 矩阵滤波^[6]等技术,也可以通过直接的信号检测技术进行提取,如基于贝叶斯的高阶统计量方法^[7]和改进的长短时窗能量比法^[8]等。在通常情况下,微地震数据的频带范围较大,从 100Hz 到 1500Hz 均有分布^[3]。常规的频率域数字信号处理技术在信号去噪和识别中受到限制。数学形态学是一种有效、实用的图形图像检测处理方法,能从形态学的角度表示和描述图像的信息^[9,10]。Matheron^[11]和 Serra^[12]将这种方法命名为数学形态学,他们所提出的随机几何积分理论和拓扑逻辑理论奠定了数学形态学的理论基础。随后,该理论在图形图像学领域迅速发展。

Wang^[13]根据不同的尺度元素进行形态学运算,提出了多尺度形态学变换。数学形态学在地震裂缝识别中也取得了一定效果^[14,15]。

郑桂娟等^[16]、王润秋等^[17]将数学形态学用于地震数据处理,分析了多尺度形态学中结构元素的大小和形状对实际信号处理的影响。随后,Wang等^[18]、段中钰等^[19]将多尺度形态学方法应用于线性噪声压制和面波压制,取得了较好的效果。前人根据信号在形态上的差异进行信号分离^[20]和随机噪声压制^[21],而且保持了原始信号的振幅和相位特征。数学形态学的主要优点在于运算简洁,如在一般情况下只包括布尔运算、加减法运算,而不需要更复杂的乘/除法及指数/对数运算,因此计算效率高,易于实现^[16]。对于微地震数据而言,可以得到实时计算结果,从而可方便地对储层改造进行实时监测。

本文利用多尺度形态学方法识别微地震数据的微弱信号,从波形形态的细微差异角度进行分析,并提供一种有别于其他频率域、频率-空间域、频率-时间域的数字信号处理方法,具有一定的适应性。当微弱信号的形态特征主要表现在某一尺度信号中时,可在分解后的数据中识别该信号。

*北京市昌平区中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院,102249。Email: lihuijian1117@163.com

本文于 2015 年 1 月 4 日收到,最终修改稿于同年 8 月 31 日收到。

2 多尺度形态学原理

在图形图像处理领域,数学形态学具有十分广泛的用途^[22]。该理论的两大基本要素为:原始数据和所用的结构元素^[23]。其中结构元素是指作用于原始数据中的形态学算子,其形状和大小决定了处理效果。数学形态学中最基本的两个算子是腐蚀和膨胀,其运算组合即为开启和闭合。

2.1 形态学基本算子^[18]

膨胀算子的运算符为‘ \oplus ’。假设原始数据为 $f(z)$, 结构元素为 $g(z)$ 。则 $(f \oplus g)(z)$ 表示利用结构元素 $g(z)$ 膨胀数据 $f(z)$, 即

$$(f \oplus g)(z) = \max[f(z-x) + g(x) \mid x \in g, (z-x) \in f] \quad (1)$$

腐蚀算子的运算符为‘ \ominus ’。假设原始数据为 $f(z)$, 结构元素为 $g(z)$ 。则 $(f \ominus g)(z)$ 表示利用结构元素 $g(z)$ 腐蚀数据 $f(z)$, 即

$$(f \ominus g)(z) = \min[f(z+x) - g(x) \mid x \in g, (z+x) \in f] \quad (2)$$

腐蚀和膨胀运算组合即为开启和闭合, 即先腐蚀后膨胀为开运算, 先膨胀后腐蚀为闭运算, 分别为

$$(f \circ g) = (f \ominus g) \oplus g \quad (3)$$

$$(f \bullet g) = (f \oplus g) \ominus g \quad (4)$$

图 1 为腐蚀、膨胀、开启、闭合的计算结果。由图中可见: 膨胀、腐蚀可以认为是 A、B 小球在原始数据上从左到右滚动, 小球中心点的轨迹即为膨胀、腐蚀的结果, 腐蚀和膨胀具有平滑信号的作用; 开启和闭合为腐蚀和膨胀的组合运算, 也相当于进行二次平滑、去除毛刺的作用。通过运用这些基本的形态学算子, 可以实现数字滤波。

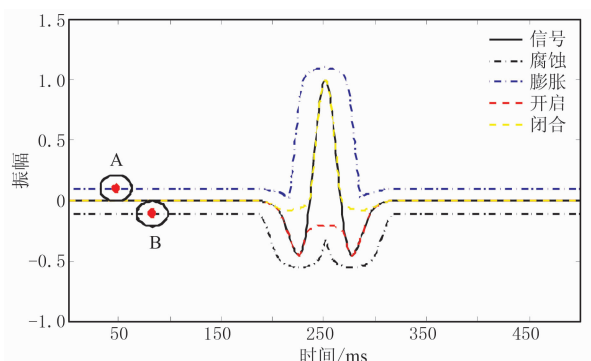


图 1 腐蚀、膨胀、开启、闭合的计算结果

2.2 多尺度分解方法

在形态学理论中结构元素的形状和大小决定了数据处理的效果^[17]。当一个图像包含多种类型、多种尺度的信号或噪声时, 仅用单一尺度的结构元素是无法满足处理要求的。因此在这种情况下, 可以应用多尺度形态学进行图像和信号处理。

多尺度形态学利用多个尺度的结构元素进行运算。一系列不同尺度的结构元素与基本算子的运算, 被称为多尺度形态学^[13]。其中多尺度运算中的开启和闭合算子分别定义为

$$(f \cdot nB) = (f \ominus nB) \oplus nB \quad (5)$$

和

$$(f \circ nB) = (f \oplus nB) \ominus nB \quad (6)$$

式中: f 为原始数据; B 为结构元素; n 为结构元素的个数。如果 B 为初始结构元素, 则定义 nB 为第 n 个结构元素, 可以通过对结构元素 B 进行 $n-1$ 次自身膨胀得到^[19], 即

$$nB = B \oplus \underbrace{B \oplus \cdots \oplus B}_{n-1 \text{次}} \quad (7)$$

文中选择半椭圆形结构元素, 其表达式为

$$B(t) = \sqrt{R^2 - 4\left(\frac{R \cdot t}{L-1} - \frac{R}{2}\right)^2} \quad 0 \leq t \leq L \quad (8)$$

式中: L 为结构元素长度; R 为半椭圆最大幅度。

进行多尺度分解的目的是将微弱信号分解为不同的尺度信号并进行信号分析。因此, 初始结构元素幅值和长度的选取决定了分解的效果。如果选取的结构元素恰当, 便能从噪声中分离并识别微弱信号。经过多次试验分析和验证, 总结出以下结构元素的选取标准

$$\begin{cases} R \approx A_{mp}/4 \\ L = a/f \end{cases} \quad (9)$$

式中: A_{mp} 为可识别信号的最大振幅值; f 为原始数据主频; $a \in [1, 1.5]$ 。

在分解过程中, 选取信号的最大振幅值是为了将信号分解在不同的尺度中, 以削弱噪声对信号的干扰, 使观测到的弱信号更加明显。根据不同的结构元素, 可以计算原始信号的不同尺度下的趋势信号

$$y_i = \frac{f \cdot iB - iB + f \circ iB \cdot iB}{2} \quad (10)$$

将相邻的趋势信号进行相减, 定义为该尺度的分解

信号 F_i , 即

$$\begin{cases} F_1 = f - y_1 \\ \vdots \\ F_i = y_{i-1} - y_i & 1 < i \leq n-1 \\ \vdots \\ F_n = y_{n-1} \end{cases} \quad (11)$$

式中 f 为原始信号。即通过 $n-1$ 个结构元素, 将原始数据分解为 n 个不同形态学尺度下的信号分量。通过分析不同尺度的信号, 选择适当的加权系数对噪声进行压制和有效信号的保留, 实现对输入数据的重组

$$f(x, t) = \sum_1^n \eta_i F_i(x, t) \quad (12)$$

式中 η_i 为各个尺度分量的加权系数。

3 合成数据分析

为了验证本文所述多尺度形态学分解方法的有效性及其实用性, 设计了震级 $M = -3, -2, -1, 0, 1$

的 5 个微地震事件的组合信号(图 2), 在试验中可以轻易地观测到震级较大的信号($M = -1, 0, 1$), 但 $M = -3, -2$ 的地震记录比较微弱, 在信号的识别和提取上存在一定难度。文中应用多尺度形态学分解方法, 将原始组合信号分解为 5 个尺度。图 3 为原始信号和多尺度形态学分解后的 5 个分量。由图中可见, 在尺度分量中可识别较弱震级信号, 尺度 1~ 尺度 4 主要是对振幅较大的信号进行分解(图 3b~ 图 3e), 较小的震级信号则保留在尺度 5 中, 即在尺度 5 中可以检测到较小震级的弱信号(图 3f)。

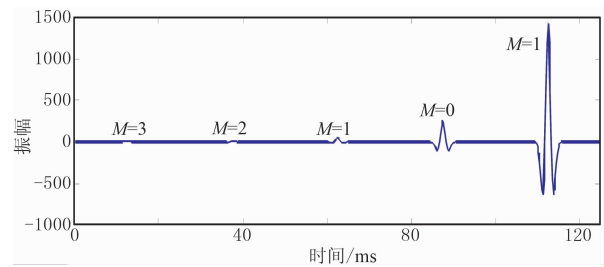


图 2 不同震级信号的组合

雷克子波主频为 300Hz, 采样间隔为 0.25ms

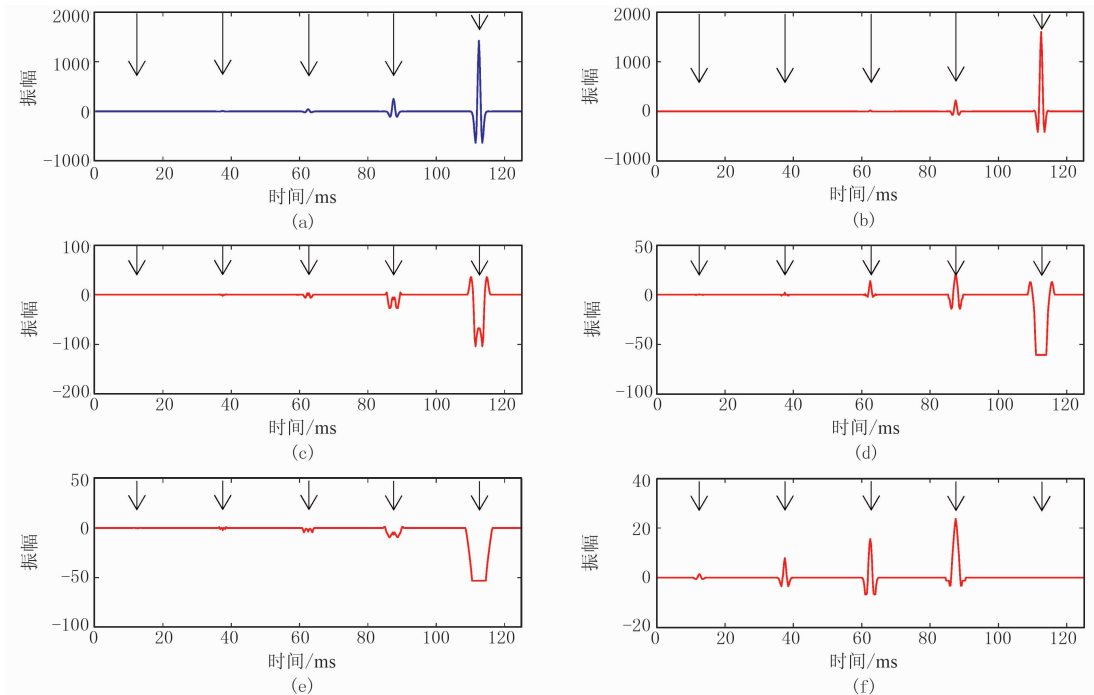


图 3 原始信号和多尺度形态学分解后的 5 个分量

(a)原始信号; (b)尺度 1; (c)尺度 2; (d)尺度 3; (e)尺度 4; (f)尺度 5

为了说明多尺度形态学分解方法对噪声的压制效果, 设计了一个含噪有效信号的去噪试验, 图 4 为合成的含噪数据及去噪后结果。由图中可见: 有效信号为两个相位相反的雷克子波(图 4a), 加入 20,

50Hz 的单频噪声后信噪比变为 -8.8dB (图 4b), 经多尺度分解后信噪比提高到 5.3dB (图 4c)。上述结果表明, 多尺度形态学分解重组方法对强噪声具有明显的压制效果, 可突出微弱信号。当有效信号与

噪声存在频带重叠时,利用频率域滤波器去噪存在较大难度。图 5 为含噪信号与多尺度分解重组信号的波形及时频谱。由图中可见:有效信号与噪声存在频带重叠(图 5a 右);经多尺度分解重组后,20Hz 和 50Hz 的单频噪声得到有效压制,同时保留了雷克子波(图 5b 右)。图 5 的结果说明,即使噪声与子

波间存在频带重叠,利用多尺度形态学方法也能较好地将它们分离。本文提出的多尺度形态学弱信号提取方法与其他频率域处理方法的不同之处在于,该方法以信号的振幅特征和延续时间特征为标准,通过结构元素区分不同尺度之间的差异,从而达到对噪声压制、弱信号识别的目的。

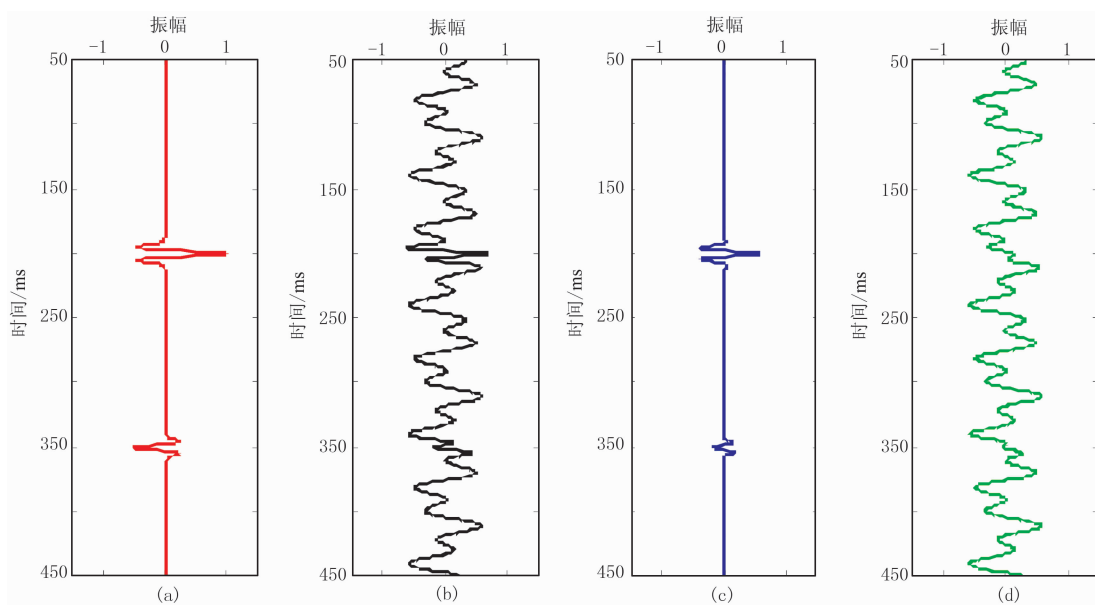


图 4 合成的含噪数据及去噪后结果

(a)有效信号; (b)加噪数据; (c)去噪后数据; (d)残差

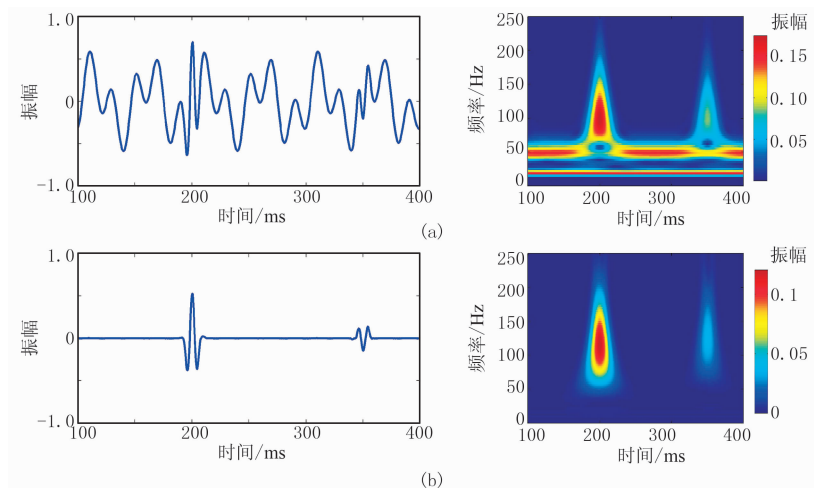


图 5 含噪信号(a)与多尺度分解重组信号(b)的波形(左)及时频谱(右)

4 实际资料处理与分析

本文利用多尺度形态学分解及重构方法对实际微地震数据进行处理。图 6 为野外微地震三分量检波器记录。由图中可以明显地观测到 H_1 分量中

750ms 处的 P 波和 H_2 分量中 800~900ms 处的 S 波。文中主要针对受低频噪声和随机噪声影响的 P 波进行信号分析和噪声压制。

根据多尺度形态学分解原理,依次用 4 个半椭圆结构元素与原始数据(图 6)进行式(10)的运算,得到趋势信号 y_i ,图 7 为原始第三道数据及趋势信

号运算结果。随后利用式(11)将相邻的趋势信号进行相减后得到多尺度分解结果(图 8)。由图中可见,尺度 1 数据主要为小尺度高频噪声,尺度 2~4 数据显示了 750ms 处的微地震信号,而尺度 5 数据则主要为大尺度噪声。因此,对尺度 1 和尺度 5 分

量进行压制,保留尺度 2~4 分量,选择合适的加权系数进行多尺度分量叠加,得到单道数据与多尺度分解重组信号的波形及时频谱(图 9)。由图中可见:位于 750ms 处相对振幅明显增强,这种数据有利于拾取信号初至(图 9a 左);从原始数据的时频谱

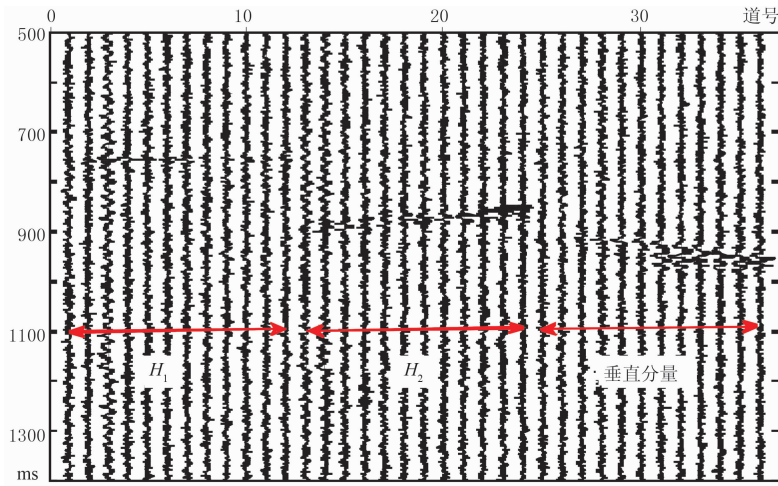


图 6 野外微地震三分量检波器记录

1~12 道为 H_1 分量;13~24 道为 H_2 分量;25~36 道为垂直分量

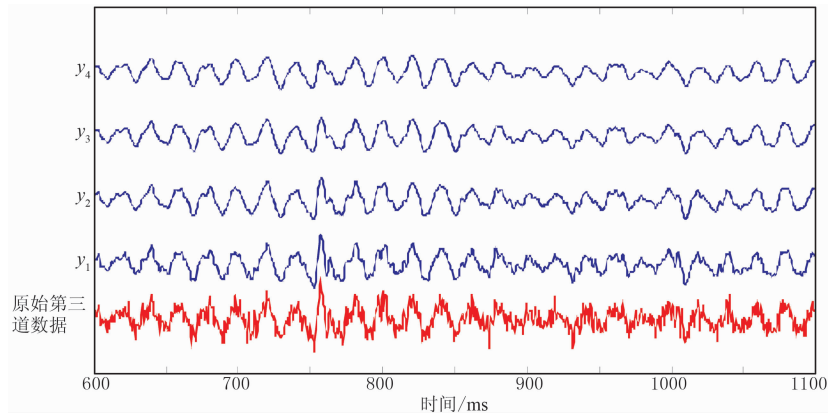


图 7 原始第三道数据及趋势信号运算结果

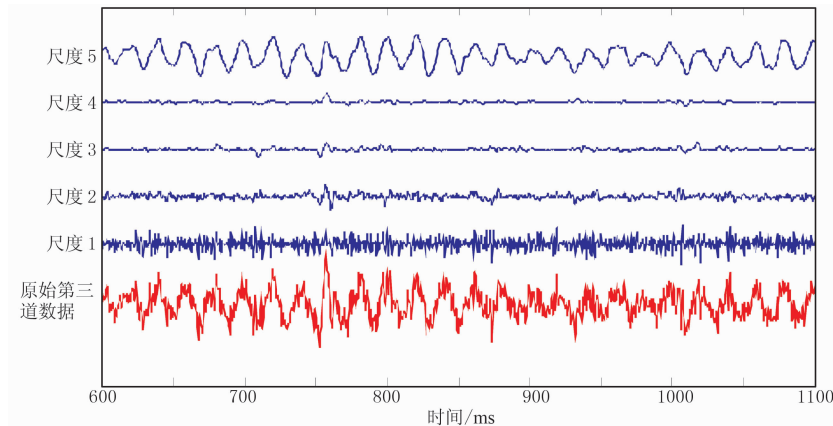


图 8 原始第三道数据及多尺度分解结果

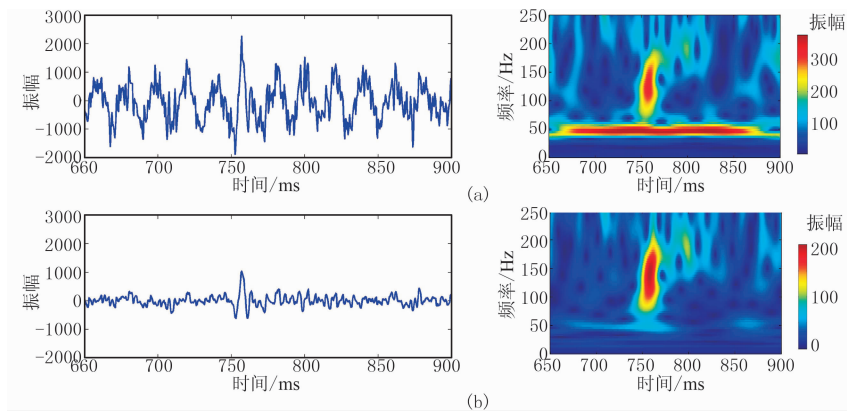


图9 单道数据(a)与多尺度分解重组信号(b)的波形(左)及时频谱(右)

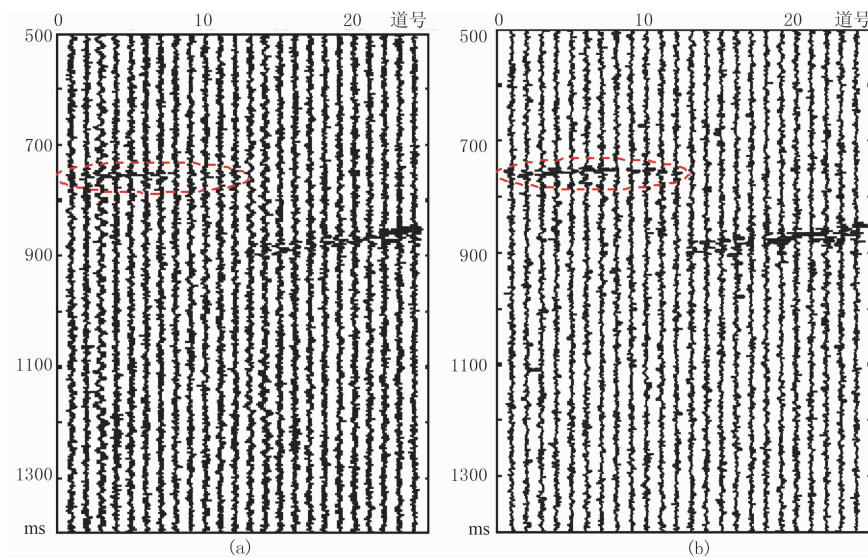


图10 多尺度分解重组前(a)、后(b)波形对比

红圈区域内信号振幅变化较明显

中可见,50Hz工业干扰的能量很强(图9a右);在多尺度分解重组后的数据及时频谱中50Hz能量得到很大压制,而位于750ms处的能量保存较好(图9)。上述结果证明利用多尺度形态学方法在压制低频噪声的同时,可较好地保留有效信号。

图10为多尺度分解重组前、后波形对比。由图中可见:多尺度分解重组前数据由于受工业干扰严重,P波初至不易拾取(图10a);多尺度分解重组后数据压制了工业干扰,同时显示出了更微弱的P波信号,波形的连续性得到了改善,提高了信噪比,为初至的拾取奠定了基础(图10b)。

5 结束语

本文提出了一种多尺度形态学的信号分析方法。通过结构元素对输入数据的多尺度运算,根据

信号形态特征将信号分解在不同的尺度中。通过对结构元素的调整,可以在分解信号中检测出微弱信号。通过选择适当的重组加权系数,实现对大尺度、强能量低频噪声和随机噪声的压制,达到提高信噪比、保留有效微弱信号的目的。文中的多尺度分解方法对结构元素的选取要求较高,需要通过分析噪声的特征进行参数调整。多尺度形态学方法从信号的形态特征角度进行分析、处理,也可先变换到频率域或频率—空间域、频率—波数域进行数字信号处理,并与其他信号分析方法相结合。

参考文献

- [1] Maxwell S. A brief guide to passive seismic monitoring. CSEG National Convention, 2005, 177-178.
- [2] Maxwell S. Confidence and accuracy of microseismic images. CSPG CSEG CWLS Convention, 2009, 480-483.

- [3] Eisner L, Abbott D, Barker W et al. Noise suppression for detection and location of microseismic events using a matched filter. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008, 27: 1431-1435.
- [4] 穆星. 基于盲信号处理技术的地震弱信号分离方法. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 47-49.
Mu Xing. Seismic weak signal separation based on blind signal processing. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 47-49.
- [5] 刘磊, 刘振, 张军华. 曲波阈值法地震弱信号识别及去噪方法研究. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1415-1422.
Liu Lei, Liu Zhen, Zhang Junhua. Denoising and detecting seismic weak signal based on curvelet thresholding method. Progress in Geophysics, 2011, 26(4): 1415-1422.
- [6] 张唤兰, 朱光明, 王保利. Hankel 矩阵滤波在微地震数据处理中的应用. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 72-75.
Zhang Huanlan, Zhu Guangming, Wang Baoli. Application of Hankel matrix filtering in microseismic data processing. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 72-75.
- [7] 宋维琪, 杨勤勇, 郭全仕等. 地面微地震资料弱信号提取方法研究. 石油物探, 2013, 52(2): 131-135.
Song Weiqi, Yang Qinyong, Guo Quanshi et al. Weak signal extraction method for surface microseismic monitoring data. GPP, 2013, 52(2): 131-135.
- [8] 宋维琪, 冯超. 微地震有效事件自动识别与定位方法. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 283-288.
Song Weiqi, Feng Chao. Automatic identification and localization of microseismic effective events. OGP, 2013, 48(2): 283-288.
- [9] Mukhopadhyay S, Chanda B. A multiscale morphological approach to local contrast enhancement. Signal Processing, 2000, 80(4): 685-696.
- [10] Mukhopadhyay S, Chanda B. An edge preserving noise smoothing technique using multiscale morphology. Signal Processing, 2002, 82(4): 527-544.
- [11] Matheron G. Random Sets and Integral Geometry. John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.
- [12] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. Academic Press, New York, USA, 1982.
- [13] Wang D. Classification of remotely sensed images using mathematical morphology. Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994, 3: 1615-1617.
- [14] 陈辉, 胡英, 李军. 数学形态学在地震裂缝检测中的应用. 天然气工业, 2008, 28(3): 48-50.
Chen Hui, Hu Ying, Li Jun. Application of mathematical morphology to seismic fracture detection. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 48-50.
- [15] Faucon T, Decencière E, Magneron C. Morphological segmentation applied to 3D seismic data, mathematical morphology. 40 Years on Computational Imaging and Vision, Springer Netherlands, 2005, 475-484.
- [16] 郑桂娟, 王润秋. 数学形态学在地震资料处理中的应用探索. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 277-281.
Zheng Guijuan, Wang Runqiu. Application of mathematical morphology in seismic data processing. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(4): 277-281.
- [17] 王润秋, 郑桂娟, 付洪洲等. 地震资料处理中的形态滤波去噪方法. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 277-281.
Wang Runqiu, Zheng Guijuan, Fu Hongzhou et al. Noise-eliminated method by morphologic filtering in seismic data processing. OGP, 2005, 40(4): 277-281.
- [18] Wang R Q, Li Q, Zhang M. Application of multi-scaled morphology in denoising seismic data. Applied Geophysics, 2008, 5(3): 197-203.
- [19] 段中钰, 王润秋. 多尺度形态学在地震资料处理中的应用研究. 勘探地球物理进展, 2010, 33(2): 135-140.
Duan Zhongyu, Wang Runqiu. Application of multi-scale morphology in seismic data processing. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(2): 135-140.
- [20] Starck J L, Elad M, Donoho D L. Redundant multi-scale transform and their application for morphological component analysis. Advance in Imaging and Electron Physics, 2004, 132(82): 278-348.
- [21] 李海山, 吴国忱, 印兴耀. 形态分量分析在去除地震资料随机噪声中的应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 554-561.
Li Haishan, Wu Guochen, Yin Xinyao. Application of morphology component analysis to remove of random noise in seismic data. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 554-561.
- [22] Haralick R M, Sternberg S R, Zhuang X H. Image analysis using mathematical morphology. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, 1987, 9(4): 523-550.
- [23] Serra J. Image Analysis Using Mathematical Morphology. Academic Press, London, 1982.
- [24] Sternberg S R. Gray scale morphology. Computer Graphics and Image Processing, 1986, 35(86): 333-355.
- [25] Maragos P. Pattern spectrum and multiscale shape representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1989, 11(7): 701-716.

(本文编辑: 刘勇)

作者简介



李会俭 博士研究生, 1986 年生; 2009 年毕业于中国石油大学(北京)勘查技术与工程专业, 获工学学士学位; 2012 年毕业于中国石油大学(北京)地球探测与信息技术专业, 获硕士学位; 现在中国石油大学(北京)攻读地质资源与地质工程专业博士学位。长期从事常规地震和微地震数据的处理、解释及方法研究工作。