

文章编号: 1001-1986(2014)01-0072-04

Hankel 矩阵滤波在微地震数据处理中的应用

张唤兰¹, 朱光明², 王保利³

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对微地震信号能量弱、信噪比偏低的问题, 将基于 Hankel 矩阵的滤波算法引入微地震信号处理中, 用于衰减微地震信号中的随机噪音, 提高微地震事件波至时间的拾取精度; 采用 Akaike 信息准则(AIC)自动选取信号特征值, 能适用于微地震事件的实时自动处理。与常规滤波方法相比, 该方法在压制噪音的同时保护了微地震信号, 其有效性和实用性在模型数据和实际微地震数据测试中得到了验证。

关键词: 微地震; 初至拾取; 滤波; AIC; Hankel 矩阵

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.01.017

Application of Hankel matrix filtering in microseismic data processing

ZHANG Huanlan¹, ZHU Guangming², WANG Baoli³

(1. College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the problems of weak energy of microseismic signals and low SNR a filtering algorithm based on Hankel matrix is introduced into microseismic data processing, it can attenuate random noise in microseismic data, and improve the picking accuracy of arrival of microseismic events; characteristic values of signals are automatically selected by using Akaike information criterion (AIC), so it can be applied to real time auto-processing of microseismic monitoring. The filtering method has better fidelity of the signal while attenuating the random noise, compared with the traditional methods. Synthetic data and real field data verify the validity and practicability of the method.

Key words: microseismic; picking of first arrival time; filtering; Akaike information criterion; Hankel matrix

微地震监控技术起源于 20 世纪 60 年代。近年来微地震监测技术已被应用于多个领域, 如油田水力压裂监控、煤层气压裂监测、油气藏的动态监测、矿山与地质灾害的安全监控、地热动态监控以及油田生产中的流体驱动前沿追踪等。

微地震事件的识别和波至时间的拾取是微地震数据处理的基础, 其拾取精度直接影响微地震事件的定位和最终解释。如何压制噪音, 提高微地震信号的信噪比, 是一个值得研究的问题。

随着微地震监控技术的广泛应用, 研究者针对微地震信号提出了很多种滤波方法, 如卡尔曼滤波^[1]、多道维纳滤波^[2]、自适应 FK 滤波^[3]、匹配滤波方法(或波形互相关)^[4-5]、自适应极化滤波方法^[6]和频率域极化滤波法^[7]、频域相干-时间域偏振滤波法^[8]、二维 FK 滤波和自适应极化滤波相结合的偏振-位置对比法震相分析技术^[9]。这些方法都是根据微地震

信号和噪音在不同情况下表现出不同特征进行信噪分离的。但这些方法都有一定的使用局限性, 如极化滤波是根据微地震信号本身就是极化信号, 而噪音是非极化信号, 因而使用极化滤波能将微地震信号和非极化的噪音信号有效地分开。但这必须是多分量数据。波形互相关滤波利用了多道信号之间有效信号具有相关性, 而噪音不具有相关性这一性质, 能有效地检测出被噪音湮没的微弱信号, 其前提是多道信号间的相关性越强效果越明显。二维 FK 滤波也是基于多道信号方法。

本文在前人研究成果的基础上, 将基于 Hankel 矩阵的滤波算法用于压制微地震信号中的噪音, 进而提高微地震信号的信噪比。这种方法首先将单道微地震记录排列成二维 Hankel 矩阵, 然后对 Hankel 矩阵进行 SVD 滤波, 最后从滤波后的 Hankel 矩阵中得到单道微地震信号。为了能使该滤波算法适用

收稿日期: 2012-11-16

作者简介: 张唤兰(1981—), 女, 山西兴县人, 博士研究生, 从事微地震事件信号处理研究。

于微地震信号的自动滤波、识别和波至时间拾取等,提出用 Akaike 信息准则自动选取 SVD 滤波中的特征值,最后利用实际记录进行方法测试。

1 方法原理

1.1 基于 Hankel 矩阵的滤波方法

这种滤波算法是在时间域内对单道数据根据有效信号的自相关性进行滤波的一种算法^[10-11]。将含噪的一维微地震信号 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ 排列成为 Hankel 矩阵的形式:

$$\mathbf{H} = \text{Hankel}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_m \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m & x_1 & \cdots & x_{m-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{H}$ 是一个 Hankel 矩阵,矩阵的每条反对角线上的元素是相同的,且 $\mathbf{H}$ 的每一行或者每一列元素都可以通过循环移位得到原始一维微地震信号 x 。

对矩阵 $\mathbf{H}$ 进行奇异值分解(SVD):

$$\mathbf{H} = \mathbf{u} \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m \end{bmatrix} \mathbf{v}^T \quad (2)$$

其中 $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{v}$ 均为 $m \times m$ 的正交矩阵, $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m]$ 为 Hankel 矩阵 $\mathbf{H}$ 的 m 个奇异值,且满足 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_m$ 。将式(2)写为:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^m \sigma_i \mathbf{H}_i \quad (3)$$

其中 $\mathbf{H}_i$ 为由第 i 个奇异值 σ_i 重构得到的矩阵。由奇异值分解理论可知,有效信号由于具有一定的相关性,奇异值通常比较大,在奇异值矩阵 σ 中排在前面;而噪音信号则由于行和列方向相关性都很弱,对应的奇异值比较小,排在奇异值矩阵 σ 的后面。因此,通过选取前面的奇异值进行重构即可达到去除噪音的目的,如下式:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \sum_{i=1}^p \sigma_i \mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,m} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,m} \\ \cdots & \cdots & & \vdots \\ h_{m,1} & h_{m,2} & \cdots & h_{m,m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 p 为奇异值截断位置, $\tilde{\mathbf{H}}$ 表示滤波后的 p 阶重构矩阵。这时,微地震信号中的随机噪音已经被去除,但通常情况下新的矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$ 已经不是 Hankel 矩阵了(不是正交对称矩阵),需将重构的 $\tilde{\mathbf{H}}$ 矩阵反对角线上的元素进行求和平均,得到去除噪音后的微地震有效信号分量(真实微地震信号的近似)构成

Hankel 矩阵:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \cdots & \tilde{x}_m \\ \tilde{x}_2 & \tilde{x}_3 & \cdots & \tilde{x}_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_m & \tilde{x}_1 & \cdots & \tilde{x}_{m-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $\tilde{x}_k$ 通过下式计算:

$$\tilde{x}_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k h_{i,k-i+1} \quad (6)$$

此时,得到的 $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m]$ 就是该一维微地震信号经过随机噪音压制后的有效信号。

这种基于 Hankel 矩阵的滤波算法通过利用 Hankel 矩阵的特性,将数据逐道排列为 Hankel 矩阵,再对排列好的 Hankel 矩阵进行奇异值分解去噪。该算法依赖单道微地震信号自身的自相关性,自相关性越强,去噪效果越好。

1.2 Hankel 矩阵的自适应 SVD 滤波

经过奇异值分解后,大的奇异值对应 Hankel 矩阵中相关性强的部分,一般认为这一部分是代表有效信号的;小的奇异值对应 Hankel 矩阵中相关性弱的部分,一般认为这一部分是代表背景噪音的。假设有效信号在奇异值序列中的分布范围 $1 \sim p$ 确定时,较大 p 值进行重构可以保证在压制噪音的同时不会对有效信号造成损伤。那么,确定 p 则是 SVD 滤波最关键的步骤,这将影响噪音压制的效果和对有效信号损伤的程度。如果 p 选择过小,会造成有效信号的损伤; p 选择过大,会降低噪音压制的效果。通常,在实际操作中依据奇异值序列曲线特征进行手动选取。这种手动方式不能适用于实时、大数据量的微地震数据,因此 p 需要自适应选择。

如前所述,奇异值序列为 $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m]$, 自动选择 p 的依据为 p 是奇异值序列中的拐点。实际上, p 值的选择是奇异值序列中拐点位置的检测。这里选择使用 Akaike 信息准则(AIC)方法自动检测奇异值序列中的拐点,进而确定有效信号在奇异值序列中的分布范围 $1 \sim p$ 。首先将奇异值序列进行如下变换:

$$f(\sigma_i) = \sigma_{i+1} - 2\sigma_i + \sigma_{i-1} \quad (7)$$

式(7)实际上是求奇异值序列曲线的 2 阶导数, $f(\sigma_i)$ 描述了奇异值曲线斜率的变化率。然后用下式求序列 $f(\sigma_i)$ 的 AIC 值^[12], 第 k 点的 AIC 值为:

$$\text{AIC}(k) = k \lg(\text{var}(x[1, k])) + (m - k - 1) \lg(\text{var}(x[k + 1, m])) \quad (8)$$

其中 var 为数据序列的方差; m 为采样点数。

$\text{AIC}(k)$ 序列中全局最小值对应的位置即为拐点位置。

2 算 例

构造一个主频为 40 Hz 的雷克子波, 在雷克子波中加入 1 dB 的高斯白噪声。噪声去除前后对比如图 1 所示, 其中图 1a 为雷克子波; 图 1b 为加入高斯白噪声的雷克子波, 信噪比为 1 dB; 图 1c 为滤波后的雷克子波; 图 1d 为去除的随机噪声。滤波后信噪比由原来的 1 dB 提高到 12 dB。信噪比的计算方法见下式:

$$SNR = 10 \times \lg \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2 / N}{\sum_{j=1}^M n_j^2 / M} \quad (9)$$

其中 s 和 n 分别为有效信号和噪音。即在地震记录道中, 截取两个分别为有效信号占主导和噪音占主导的时窗, 时窗长度分别取 N 和 M , 计算两个时窗内有效信号和噪音的平均能量, 再利用常用对数转化为分贝数。

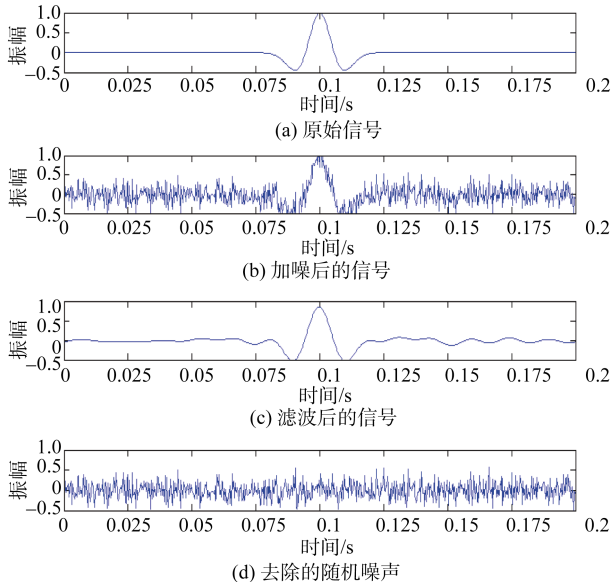


图 1 理论模型数据的去噪测试

Fig. 1 Noise suppression test of theoretical model data

图 2 为一道实际微地震信号的去噪试验结果图。图 2a 为信噪比为 0.5 dB 的实际微地震数据; 图 2b 为滤波后的效果; 图 2c 为去除的噪音信号。图中黑线为微地震事件手动拾取的波至时间位置。在滤波中, 使用 AIC 方法自适应选择 SVD 滤波中的奇异值范围, 进行自动去噪, 见图 3。滤波之后, 微地震数据的信噪比由原来的 0.5 dB 提高到 4 dB, 去除的噪音信号中没有明显的有效信号, 表明微地震事件的有效信号没有受到损伤。

图 3 是图 2 中单道信号去噪试验使用 AIC 方法进行自适应选取 SVD 滤波中奇异值的示意图。图 3a 为该单道信号进行奇异值分解得到的奇异值序列曲

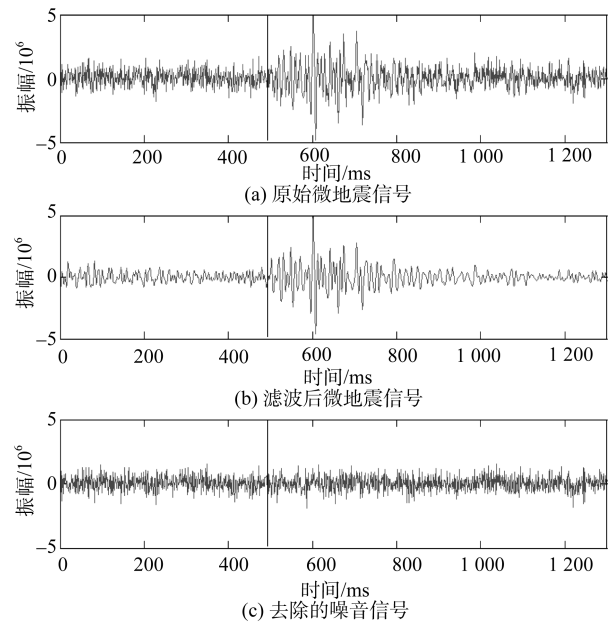


图 2 实际微地震数据的去噪试验

Fig. 2 Noise suppression test of field microseismic data

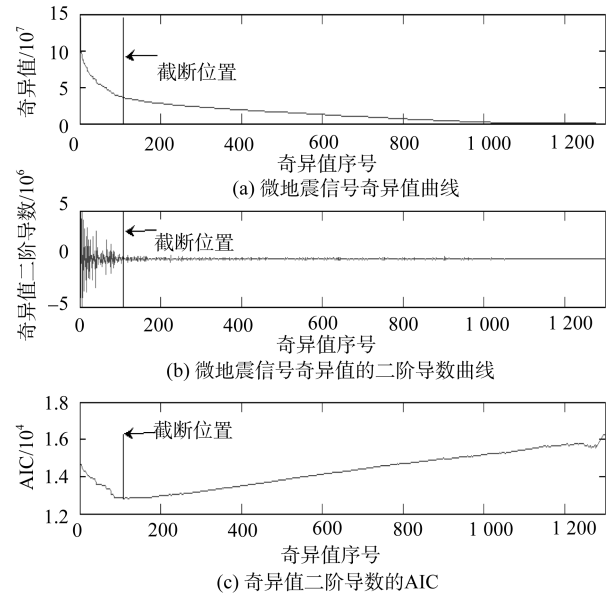


图 3 AIC 方法自适应选择 SVD 滤波中奇异值范围

Fig. 3 Adaptive selected singular value range using AIC method

线; 图 3b 为利用式(7)计算得到的奇异值序列的二阶导数曲线; 图 3c 为利用式(8)计算得到的 AIC 曲线。图中黑线为 AIC 序列全局最小值对应的位置, 也即自适应选取的 SVD 滤波中的奇异值范围上界。利用图 3 中自适应选取的奇异值范围对数据进行滤波, 从图 2 中的滤波效果可以看出, 自适应选取的奇异值范围能在压制背景噪音的同时较好地保护有效信号不受到损伤。

为了更好地测试这种滤波方法在微地震信号中的去噪效果, 将其应用到多道微地震信号的

去噪处理中。多道微地震信号与单道微地震信号的去噪方法没有差别,只是多道微地震信号是逐道去噪的。

图 4 为野外实际多道微地震数据的去噪效果对比图。图 4a 为原始微地震记录;图 4b 为滤波后的

微地震记录;图 4c 为去除的背景噪音。图 4 中黑线为手动拾取的各道波至时间。通过计算可知,多道微地震数据经过滤波后平均信噪比由原来的 0.51 dB 提高到 3.97 dB,滤波后初至波的起跳更容易拾取,且从去除的噪音信号中没有发现明显的有效信号。

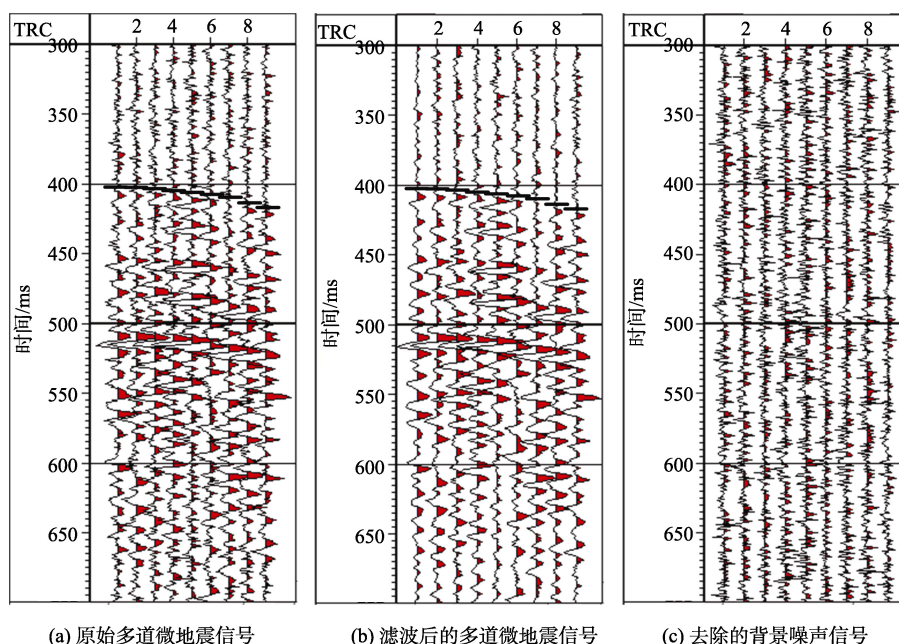


图 4 野外实际多道微地震信号滤波测试结果

Fig. 4 Filtering result of field multichannel microseismic signals

3 结 语

将一种基于 Hankel 矩阵的滤波算法引入微地震信号的随机噪音压制处理中,提高了微地震数据的信噪比,进而提高了事件波至时间的拾取精度。

在 SVD 滤波方法中,使用 AIC 方法自适应地选择 SVD 滤波中奇异值的范围,使得该方法能适用于微地震信号的实时、全自动波至时间拾取流程中。

该方法利用了单道信号的自相关性,与常规的滤波方法相比,在压制噪音的同时能更好地保护微地震信号。通过模型数据以及野外实际单道和多道微地震数据进行方法测试,试验结果证明了该方法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 宋维琪,何欣,吕世超. 应用卡尔曼滤波识别微地震信号[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(增刊 1): 34-38.
- [2] WANG J, TILMANN F, WHITE R S, et al. Application of frequency dependent multichannel Wiener filters to detect events in 2D three component seismometer arrays[J]. Geophysics, 2009, 74(6): 133-141.
- [3] LIANG C, THORNTON M P, MORTON P, et al. Improving signal-to-noise ratio of passive seismic data with an adaptive FK filter[C]. Houston: SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting, 2009: 1703-1707.
- [4] EISNER L, ABBOTT D, BARKER, et al. Noise suppression for detection and location of microseismic events using a matched filter[C]. Las Vegas: SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting, 2008: 1431-1435.
- [5] 朱卫星. 相关滤波在微地震数据处理中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(2): 130-138.
- [6] 朱卫星, 宋洪亮, 曹自强, 等. 自适应极化滤波在微地震信号处理中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(5): 367-371.
- [7] 宋维琪, 吕世超, 郭晓中, 等. 提高微地震资料信噪比的频率域极化滤波[J]. 石油物探, 2011, 50(4): 361-366.
- [8] 宋维琪, 孙英杰, 朱卫星. 微地震资料频域相干-时间域偏振滤波方法[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(2): 161-167.
- [9] 朱卫星, 宋维琪, 修金磊, 等. 微地震信号的偏振-位置对比法震相分离技术[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(4): 425-429.
- [10] AL-BANNAGI M S, FANG K, KELAMIS P G, et al. Acquisition footprint suppression via the truncated SVD technique: Case studies from Saudi Arabia[J]. The Leading Edge, 2005, 24(8): 832-834.
- [11] 余凯. 基于本征图像滤波的地震资料噪声衰减方法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2011.
- [12] MAEDA N. A method for reading and checking phase times in autoprocessing system of seismic wave data[J]. Zisin, 1985, 38(3): 365-379.