

文章编号:1006-1355(2011)05-0119-04

采用经验周期模态单元滤波方法 分离爆破地震信号和天然地震信号

何志文¹, 钱昌松^{1,2}, 杜中勇¹

(1. 第二炮兵士官学校, 山东 青州 262500; 2. 第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘要: 针对爆破地震信号和天然地震信号的分离问题, 引入基于经验周期的模态单元滤波方法, 提出一种新的爆破地震信号分离算法。实验结果表明, 算法可有效分离爆破地震信号和天然地震信号, 为地震信号分析提供一种新的思路。

关键词: 振动与波; 模态单元滤波; 天然地震信号; 爆破地震信号

中国分类号: O381

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355-2011.05.026

Separation of Exploding Seismic Signal from Natural Seismic Signal by Empirical Period Based on Mode Cell Filtering Method

HE Zhi-wen¹, QIAN Chang-song^{1,2}, DU Zhong-yong¹

(1. The Sergeant School of the Second Artillery, Qingzhou 262500, Shandong China;
2. Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the problem of separating exploding seismic signal from natural seismic signal, an empirical-period based mode cell filtering (EP-MCF) method is introduced. A novel EP-MCF-based method for separating the exploding seismic signal is proposed. The experimental results show that this method can separate exploding seismic signal from nature seismic signal efficiently. This paper provides a novel method for seismic signal analysis.

Key words: vibration and wave; mode cell filtering; natural seismic signal; exploder seismic signal

爆破技术在经济建设中的应用日益广泛。然而, 如何有效地控制爆破产生的地震效应对邻近岩石边坡、建筑物和各种地下工程结构产生的有害效应, 已成为工程爆破理论与应用研究的重要课题, 对爆破地震信号的分析 and 处理也是一项很有意义的工作。爆破作用引起的地震波是一种极为复杂的随机波, 所产生的地震信号具有短时、突变等特点, 是一种典型的非平稳随机信号^[1,2]。在爆破地震信号测量过程中, 通常会遇到天然地震信号的干扰, 所以分析处理之前, 首先需要分离天然地震信号和爆破地震信号。常见方法有基于 IIR 和 FIR 的滤波器^[3]。经验模态分解(EMD)是一种新的自适应信号分解方法^[4], 已经广泛应用于信号消噪^[5,6]。文献[7, 8]尝试

用两相邻过零点间的信号作为基本分析单元, 提出一种筛分间歇模态分量的算法, 文献[9]提出了一种新的模态单元滤波(Mode Cell Filter: MCF)模型, 它抛弃传统阈值消噪算法以单点为阈值处理对象的思路, 将固有模态分量(Intrinsic Mode Function: IMF)中两个相邻过零点间的振荡单元—模态单元作为基本分析对象, 通过模态单元振幅阈值处理判断模态单元的类型, 进而建立面向模态单元的高斯消噪模型。MCF 和小波阈值模型都是幅度阈值算法, 这类方法对高斯噪声消除效果较好, 但对地震信号消噪时, 效果较差。基于此, 我们在相关研究中提出利用经验频率判断模态单元类型, 进而实现基于经验周期的模态单元滤波(Empirical-Period - Based MCF: EP - MCF), 并应用于地震信号消噪^[10]。

本文将 EP - MCF 引入到爆破地震信号分离, 并设计对仿真信号和实际信号的消噪试验。论文首先介绍了 EMD 算法和 EP - MCF 的基本模型, 然后对含爆破地震干扰的总结了。

收稿日期: 2010-09-01; 修改日期: 2011-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(60705001, 40974037)

作者简介: 何志文(1979 -), 男, 硕士, 湖南常德市人, 主要从事军事地球物理中的信号处理方法与理论研究。

E-mail: 1363692705@qq.com

1 EMD算法

为使希尔伯特变换得到的基本分量的瞬时频率具有物理意义,文献[4]按以下两条件定义IMF:(1)极值点数目与过零点数目相差不超过1;(2)分量的局部极值点定义的上下包络的局部均值接近于零。第一个条件限定了IMF的窄带振荡特性,而第二个条件限定了IMF包络的对称性,从而保证该分量不包含其它模态分量。EMD算法认为,信号总由若干IMF和一个余项组成,它利用“筛选”算法,逐步从复杂信号中筛选出IMF分量,最后得到一个余项。给定一个信号 $x(t)$,EMD算法的基本步骤如下^[4]:

(1) 求 $x(t)$ 的所有极大值点和极小值点;

(2) 用三次样条函数法分别对极大值点序列和极小值点序列进行插值,得到信号的上下包络线 $e_+(t)$ 和 $e_-(t)$;

(3) 计算平均包络线: $m(t)=(e_+(t)+e_-(t))/2$,并提取信号的细节 $d(t)=x(t)-m(t)$;

(4) 判断 $d(t)$ 是否满足IMF的两个条件,若不满足,记 $x(t)=d(t)$,重复步骤(a)一步骤(d),直至满足条件。此时, $d(t)$ 为一个IMF,记为 imf_1 ;

(5) 记 $r_1(t)=x(t)-imf_1$ 为新的待分解信号,重复步骤(a)一步骤(d),得到第二个IMF,记作 imf_2 ,此时,余项为 $r_2(t)=r_1(t)-imf_2$ 。重复上述步骤,直到得到余项 $r_i(t)$ 为一个单调信号或小于某个阈值,分解结束。设 $d_i(t)$ 为逐次得到的 $d(t)$,文献[4]通过定义一个标准差SD来判断筛分是否终止。SD定义^[4]如下:

$$SD = \sum_{i=0}^T \frac{|d_{i-1}(t) - d_i(t)|^2}{d_{i-1}^2} \quad (1)$$

文献[4]认为,当SD在0.2到0.3之间时,就可终止筛选循环。最终 $x(t)$ 可以分解为 I 个IMF和一个余项,记作:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I imf_i + r_i(t) \quad (2)$$

2 EP-MCF模型

2.1 模态单元

EMD认为,信号总由若干具有对称包络的IMFs和一个余项组成。IMF是一种固有振荡分量,其最简单的运动形式是振荡。一次完整的振荡可以由一个波峰,一个波谷和三个过零点组成,而两个相邻过零点间包含一个波峰或波谷的信号则是组成IMF最基本的单元,代表信号局部固有振荡运动最小的完整单元。组成IMF最基本的单元称为模态单元^[9]。对模态单元的任何软/硬阈值处理都会破坏局部固有振荡的完整性。

模态单元的最大幅度称为模态振幅,模态单元两过零点的间的时间间隔称为零间距,也称为经验频率^[9]。利用模态振幅判断模态单元类型,并以模态单元为处理对象进行整理阈值处理的MCF模型^[9]是一种新的滤波算法,克服了简单的软/硬阈值处理对局部振荡完整性的破坏。文献[8]提出的经验频率域滤波本质上是一种利用经验频率作为模态单元类型的判断标准的滤波方法,与文献[10]中的基于经验周期的模态单元滤波机理相同。

2.2 经验周期阈值模型

这一节介绍相关研究中提出的基于经验周期阈值处理的EP-MCF模型。信号中噪声按照频率高低,可以分为低频噪声和低频噪声。低频噪声和低频噪声分别出现在低频模态和高频模态中,可以通过经验周期的大小判断其类型。假设信号模态单元的经验周期范围为 $[thp_i^-, thp_i^+]$,把 imf_i 中第 k 个模态单元记作 m_i^k ,则可将 imf_i 表示为 $imf_i = \{m_i^k, k=1, 2, \dots, K\}$,其中, $i=1, 2, \dots, I$ 。 p_i^k 表示 m_i^k 的经验周期, $\chi(thp_i)$ 表示由阈值 thp_i^- 和 thp_i^+ 对模态单元 m_i^k 的处理系数,则对 m_i^k 的经验周期阈值处理可表示为:

$$m_i^k(thp_i^-, thp_i^+) = \chi(thp_i^-, thp_i^+) m_i^k \quad (3)$$

其中

$$\chi(thp_i^-, thp_i^+) = \begin{cases} 1 & thp_i^- \leq p_i^k \leq thp_i^+ \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

公式(3)表示对模态单元 m_i^k 的阈值处理,简单地可以理解为是对模态单元的一个取舍。在小波幅度阈值算法中,不满足条件的信号被置零,其余信号被保留下来。而公式(3)(4)表示:不满足阈值条件的模态单元被置零,而其余模态单元被保留下来。可见,小波阈值处理方法是以一个采样点作为阈值对象,而EP-MCF是以模态单元为处理对象,这种处理方法恰好保留了振荡单元的完整性。

将一个将阈值处理后的 imf_i 记作 $thp imf_i$,则:

$$thp imf_i = \{m_i^k(thp_i^-, thp_i^+), k=1, 2, \dots, K\} \quad (5)$$

当 $thp_i^- = 0$, $thp_i^+ > 0$ 时,(3)(4)(5)式实现对 imf_i 的低通EP-MCF;当 $thp_i^- > 0$, $thp_i^+ = \infty$ 时,实现对 imf_i 的高通EP-MCF;当 $thp_i^- > 0$, $thp_i^+ > 0$ 时实现对 imf_i 的带通EP-MCF。在上面的EP-MCF模型中,可根据 imf_i 经验周期分布,设置不同的 thp_i ,实现不同频率特性的滤波器。

对各分量滤波后,可按(6)式重构信号 $\tilde{x}(t)$:

$$\tilde{x}(t) = \sum_i thp imf_i + \delta r(t) \quad (6)$$

在以上模型中, $[thp_i^-, thp_i^+]$ 可根据模态序号的

变化而变化,也可根据信号的频谱确定一个固定的 $[thp_i^-, thp_i^+]$ 。具体阈值的大小与需要分离的有用信号的频率范围有关,这一点与其他带通滤波器相同,即带通滤波方法可在带通参数设定的前提下获得与这些参数相对应的带通信号。EP-MCF方法可根据地震信号的频率范围,确定阈值的大小,从而实现等效的带通滤波。由于经验周期是完整震荡过程的一半,所以经验周期 t_e 与傅立叶分析中的频率 f 之间存在一种粗略转换关系^[8]:

$$f \cong 1/2t_e \quad (7)$$

其中 t_e 为经验周期, f 为频率。所以,选择阈值的步骤如下:(a)通过傅里叶频谱确定信号的频谱范围;(b)通过(7)式转换出经验周期的上下限。

2.3 仿真信号实验

这里采用一个干扰很小的真实地震信号作为原始信号 $s_1(t)$,地震信号采样频率为50 Hz,长度为1 024。用MATLAB中Randn函数生成的随机噪声 $s_2(t)$ 模拟高频背景噪声,用频率分别为8 Hz、4 Hz和2 Hz的低频余弦信号叠加得到的 $s_3(t)$ 模拟低频背景噪声。按照 $s(t)=s_1(t)+s_2(t)+s_3(t)$ 叠加得到模拟的含噪地震信号 $s(t)$,如图1所示。

令 T_s 为采样周期,则采用经验周期阈值分别为 $thp_i^- = 12T_s$, $thp_i^+ = 40T_s$,用EP-MCF对仿真地震信号进行消噪得到结果为 $ds(t)$,实验结果中,8 Hz、4 Hz和2 Hz的低频余弦信号被有效抑制,地震波形基本分离出来。

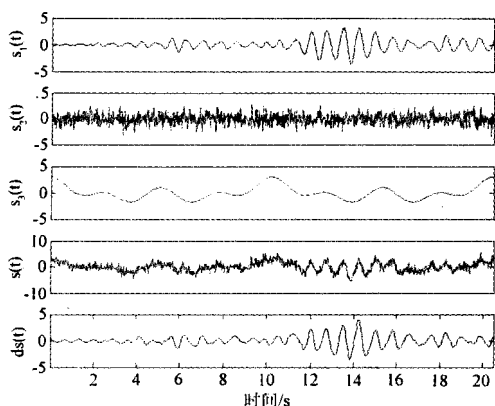


图1 仿真信号结果

Fig.1 Results of simulated signal

2.4 爆破地震与天然地震信号分离

地震台观测的数据除了地震源激发的地震波外,还包含爆破等高频干扰数据,这影响了地震信号的进一步应用。呼和浩特记录的2003年7月25日一远震波形信号(UD方向)的P波中叠加了一爆破记录,如图2所示。原始信号中,在50 s附近有一个峰值很大的高频噪声为爆破记录,而200 s附近的震

动波形主要源于天然地震。在原始数据的频谱中显示了两个主要的能量区域:一个是在5 Hz以下部分,与地震波形对应;另一个是10 Hz到20 Hz之间的区域,与爆破地震记录对应。

采用EP-MCF方法时,选择经验周期阈值分别为 $thp_i^- = 0T_s$ 和 $thp_i^+ = 6T_s$,输出结果为爆破地震信号,用 $thp_i^- = 6T_s$ 和 $thp_i^+ = 45T_s$ 输出结果为地震信号,其余输出为低频噪声。图3为EP-MCF方法分离的地震、爆破信号及其频谱,其中,(a)(b)为爆破信号波形图及其频谱图,(c)(d)为地震信号及其频谱。从波形图可以看出:在50 s附近的高频噪声为爆破记录,被分离出来;而在200 s附近的地震记录被很好地抑制。从爆破信号的频谱图也可以看出:小于5 Hz处的频谱没有出现小的波峰,地震信号被很好抑制;在地震信号的频谱中,10 Hz以上的频谱幅度基本为零,高频的爆破信号也被很好地抑制。

分别采用文献[9]中提出的基于模态振幅的MCF方法、最优小波基方法对爆破信号进行分离,并将残

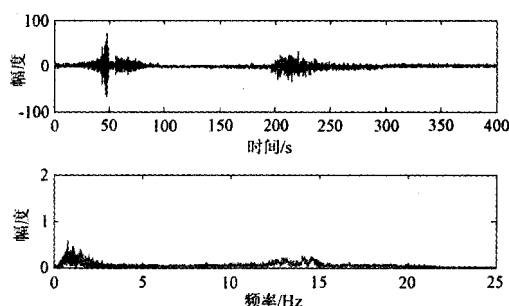


图2 原始地震信号和频谱

Fig.2 Waveform and spectrum of original seismic signal

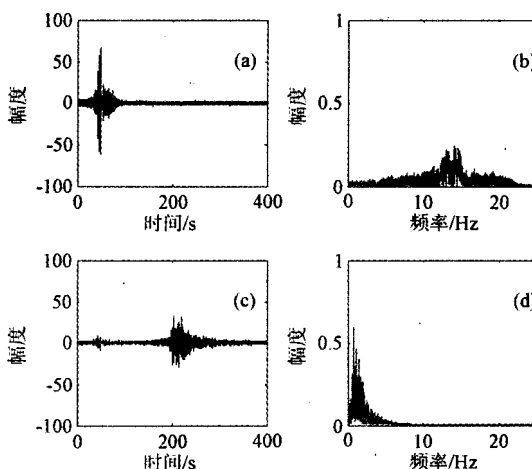


图3 EP-MCF方法分离的地震、爆破信号及其频谱。其中,(a)、(b)为爆破信号及其频谱,(c)、(d)为地震信号及其频谱
Fig.3 Waveform and spectrum of seismic signal and blasting signal by EP-MCF. Which, (a) (b) for the blast signal and its spectrum, (c) (d) for the seismic signal and its spectrum

余部分作为地震信号输出,最后比较三种方法的性能。图4为最优小波基消噪方法分离的地震、爆破信号及其频谱。其中,(a)、(b)为地震信号及其频谱,(c)、(d)为爆破信号及其频谱。从分离信号的波形可看出,爆破信号和地震信号基本没有分离,所分离的爆破信号基本为高斯噪声。可见,基于最优小波基的滤波方法不适用于爆破信号和地震信号

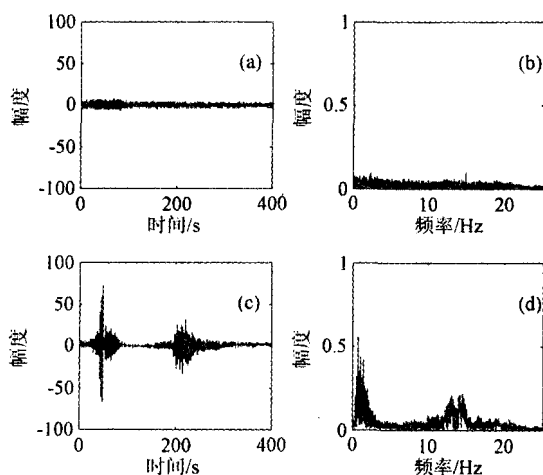


图4 最优小波基消噪方法分离的地震、爆破信号及其频谱。其中,(a)(b)为爆破信号及其频谱,(c)(d)为地震信号及其频谱
Fig.4 Waveform and spectrum of seismic signal and blasting signal by MCF based on the optimal wavelet denoising method.

Which, (a) (b) for the blast signal and its spectrum,
(c) (d) for the seismic signal and its spectrum

分离。图5为幅度阈值MCF方法^[9]分离的地震、爆破信号及其频谱。其中,(a)(b)为地震信号及其频谱,(c)(d)为爆破信号及其频谱。从分离信号的波形可以看出,爆破信号和地震信号基本分离,但在50 s附近还残留了一部分幅度较大的爆破信号波形,而在频谱图中,在10 Hz附近还存在一个波峰,可见该方法也不能完全将地震信号和爆破信号分离。

3 结 语

针对爆破地震信号和天然地震信号分离问题,引入基于经验周期的模态单元滤波算法。该算法与基于小波分解或傅立叶分解的消噪算法相比,最大的优势是分解时无需基函数,完全是自适应分解。以呼和浩特记录的2003年7月25日一远震波形信号(UD方向)的P波中叠加的一个爆破记录用为例,分离爆破地震信号和天然地震信号。实验结果表明,最优小波基方法和幅度阈值MCF方法不能将爆破地震和天然地震信号分开,而本文算法将两者基本分离,且受低频干扰影响小,为各种不同频率震源的地震信号分离提供了一种新的思路。本文算法是在原始EMD算法基础上实现的,试验结果较好;

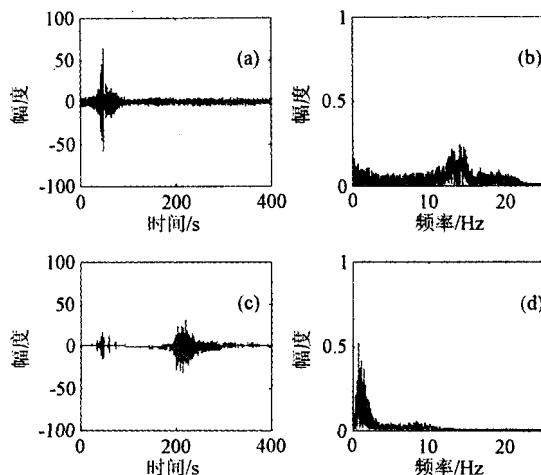


图5 基于幅度阈值的模态单元滤波方法分离的地震、爆破信号及其频谱。其中,(a)(b)为爆破信号及其频谱,(c)(d)为地震信号及其频谱

Fig.5 Waveform and spectrum of seismic signal and blasting signal by MCF based on amplitude threshold. Which, (a) (b) for the blast signal and its spectrum,
(c) (d) for the seismic signal and its spectrum

如果能够较好地解决模态混叠问题,则EP-MCF的信号分离效果会更好。

参考文献:

- [1] Dowding C. H. Monitoring and control of blasting effects [A]. Mining Engineering Handbook [M]. Prentice Hall. 1985:746-760.
- [2] 张雪亮,黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981.
- [3] 万用革. 数字信号处理的MATLAB实现[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [4] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. Roy. Soc. London A[J]. vol. 454, pp. 903 - 995, 1998.
- [5] B. V. Manuel, B. W. Weng and K. E. Barner, ECG signal denoising and baseline wander correction based on the empirical mode decomposition[J]. Computers in Biology and Medicine, vol. 38, no. 1, pp. 1-13, Jan. 2008.
- [6] L. J. Hadjileontiadis. A Novel Technique for Denoising Explosive Lung Sounds Empirical Mode Decomposition and Fractal Dimension Filter[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 26, no. 1, pp. 30-39, Jan - Feb. 2007.
- [7] 钱昌松, 刘志刚, 胡重庆, 等. 一种新的经验模态分解及其应用初探[A]. 地球物理探测与应用[C]. 西安地图出版社, 2007: 201-205.
- [8] 钱昌松, 刘代志, 刘志刚, 等. 基于模态振幅的模态单元滤波及其在高斯消噪中的应用[OL]. <http://www.paper.edu.cn/>, 中国科技论文在线, 2008.
- [9] 钱昌松, 刘代志, 等. 间歇信号的经验模态筛选方法[OL]. 中国科技论文在线. (<http://www.Paper.edu.cn>). 2008, 8, 22.
- [10] 钱昌松. 改进经验模态分解及其在地球物理信号处理中的应用[D]. 第二炮兵工程学院, 2009.