

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.012

基于变分模态分解的探地雷达信号分析方法

许军才^{1,2},任青文¹,黄临平²

(1. 河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098;
2. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室,江西 南昌 330013)

摘要: 将变分模态分解方法引入探地雷达信号处理中,针对探地雷达信号非平稳特征,利用变分模态分解原理建立探地雷达信号去噪方法。方法基于变分模态分解将雷达波信号分解为特征模态函数,再由样本熵决定高阶模态是否保留,实现白噪声去除。通过探地雷达 Ricker 子波和正演模型试验,检验该方法的正确性和有效性。与传统的小波变换、集成经验模态分解方法进行对比,研究探地雷达信号去噪效果,并将该方法用于分析实际工程探地雷达信号。研究表明,该方法能有效去除探地雷达信号中的噪声,在强干扰背景下,能获得高于 20 dB 的信噪比。

关键词: 小波变换;去噪处理;探地雷达;变分模态分解

中图分类号:TV523; TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)06-0545-06

GPR signal analysis method based on variational mode decomposition

XU Juncai^{1,2}, REN Qingwen¹, HUANG Linping²

(1. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
2. *Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China*)

Abstract: The Variational Mode Decomposition (VMD) method is introduced into the GPR signal processing. According to the non-stationary characteristic of GPR signal, the method of signal de-noising based on VMD principle has been established. The VMD is used to decompose the radar wave signal into the intrinsic mode function (IMF), and then the entropy of sample is used to determine whether the higher-order IMF is reserved to remove the noise. The accuracy and validity of the method are verified by GPR with Ricker wavelet and forward model test of de-noising, and the proposed method is compared with the traditional wavelet transform and the EEMD (ensemble empirical mode decomposition) method. After that, this method is used to analyze the GPR signal of a practical engineering. The results show that the method can effectively remove the noise in the GPR data and can obtain above 20 dB signal-to-noise ratio (SNR) even under strong background.

Key words: wavelet transform; de-noise; GPR; Variational Mode Decomposition

探地雷达作为一种快速、有效的探测手段,在工程建设中得到了广泛的运用。在进行信号采集过程中探地雷达信号经常受到各种噪声的干扰,使得获取的信号不能反映真实的检测结果。因此,有效准确地从噪声背景中将真实信号提取出来,去噪处理对于探地雷达信号处理与解释具有重要作用^[1-3]。

探地雷达信号去噪处理方法很多,早期人们利用傅立叶变换,在频率域对信号进行滤波处理。然而傅立叶变换是以假设信号为平稳信号条件下的一种表征信号频率特征的方法,该方法是对被分析信号在整个时间域内的频率特征的平均结果^[4]。因此,采用傅立叶变换不能完全表征非平稳信号的频率特征随时间变化

基金项目: 国防重点学科实验室开放基金(RGET1502);水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2017A02);国家自然科学基金重点项目(11132003)

作者简介: 许军才(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事大型基础设施健康监测与检测研究。E-mail: xujc@ hhu. du. cn

通信作者: 黄临平,教授。E-mail: linphuang@ ecit. edu. cn

引用本文: 许军才,任青文,黄临平. 基于变分模态分解的探地雷达信号分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):545-550.

XU Juncai, REN Qingwen, HUANG Linping. GPR signal analysis method based on variational mode decomposition[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6):545-550.

的特点^[5]。小波变换是一种时间-尺度分析方法,具有良好的时频局部化特性,常用于探地雷达信号去噪处理,但是基函数一旦确定,在分析处理过程中就不能改变,因此它的基函数不能随信号的改变而改变^[6-7]。针对这一问题,Huang 等^[8]、李枝文等^[9]提出的经验模态分解(EMD)方法具有自适应特点,特别适用于非线性非平稳信号的分析处理,通过舍弃高阶模态分量实现去噪处理。然而,经验模态分解方法的主要问题是缺乏数学理论,建模困难,另外还存在端点效应、模态混叠、计算量大等问题^[10-11]。变分模态分解(VMD)是近年来提出的一种新的模态分解方法,将信号分量的获取过程转移到变分框架内,通过构造并求解约束变分问题实现原始信号的分解,方法具有牢固的数学理论基础,能够有效解决常规经验模态分解方法中存在的不足,并且具有较高的运算效率^[12]。

变分模态分解已在结构的健康诊断、水电站监测信号分析及地震勘探数据的去噪处理等领域进行了成功的试验性研究^[13-17]。本文将变分模态分解方法引入探地雷达信号处理中,针对探地雷达信号特征,利用变分模态分解原理建立探地雷达信号去噪方法。通过探地雷达 Ricker 子波和正演模型试验,检验该方法的正确性和有效性,并与传统的小波变换、集成经验模态分解(EEMD)方法去噪效果对比研究。最后,将该方法用于实际工程的探地雷达信号去噪处理。

1 变分模态分解去噪原理

VMD 是变分问题,为使每个模态的估计带宽之和最小,假设每个模态具有不同中心频率的有限带宽,为解决这一变分问题,采用了交替方向乘子法,不断更新各模态及其中心频率,逐步将各模态解调到相应的基频带,最后各个模态及相应的中心频率被一同提取出来。

假定将一输入信号 $f(t)$ 分解为 N 个特征模态函数(IMF)分类,则相应的变分问题构造过程如下:

a. 对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换得到其解析信号:

$$\left(\delta(t) + \frac{i}{\pi t}\right) u_k(t)$$

(1)

式中: $\delta(t)$ ——狄利克来函数; t ——时间; $u_k(t)$ ——特征模态函数; i ——虚数符号。

b. 对得出的解析信号预估中心频率,通过移频方式,将各解析信号的频谱变换到基带上:

$$\left[\left(\delta(t) + \frac{i}{\pi t}\right) u_k(t)\right] e^{-i\omega_k t}$$

(2)

式中: ω_k ——中心频率。

c. 计算上述解调信号的 L^2 范数即欧氏距离,估计各模态带宽,其变分问题如下:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{i}{\pi t}\right) u_k(t) \right] e^{-i\omega_k t} \right\|^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_k u_k = S \end{cases}$$

(3)

式中: S ——含噪数据。

对上述变分问题,利用二次罚函数项和 Lagrange 乘子将其转化为无约束问题。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{i}{\pi t}\right) u_k(t) \right] e^{-i\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle$$

(4)

式中: α ——惩罚因子; $f(t)$ ——输入信号; $\lambda(t)$ ——Lagrange 乘子; L ——Lagrange 函数。

d. 利用乘子交替方向算法求取式(3)无约束变分问题。

特征模态函数个数对分解结果影响很大,特征模态函数个数的确定有很多方法,主要有粒子群算法、中心频率观察法和 EMD 预分解法等^[18-19]。利用 VMD 可以将信号分解为不同的模态,当信号中含有随机噪声时,分离出的模态中将有较高模态存在,如果将较高频率模态分量去除,便能实现去除随机噪声。

本文通过样本熵决定高阶模态是否保留,当该模态样本熵小于阈值将保留该模态,否则将该模态予以去除,其表达式为

$$S = \sum_{k=1}^M u_k \qquad S_{EM} \leq A$$

(5)

式中: S_{EM} ——样本熵; A ——阈值。

2 探地雷达信号去噪试验

根据前面提出的 VMD 去噪方法,为了验证该方法的有效性,对 VMD 去噪方法进行去噪试验,利用 VMD 方法对 Rick 信号和正演模型进行分析。定义去噪以后的数据与检测原数据的差值为含有的噪声,信号与噪声能量的比值为信噪比,通常利用该参数衡量去噪效果。计算公式为

$$R = \frac{\|M\|_2^2}{\|S - M\|_2^2}$$

式中: R ——信噪比; $\|\cdot\|_2^2$ ——模的平方; M ——无噪模拟数据。

2.1 Ricker 信号分析

Ricker 信号是探地雷达最基本的组成信号,取中心频率 50 MHz,时长 1 000 ns,初始波形如图 1(a)所示。以 Ricker 波形为研究对象,在该波形加入随机噪声,取 $R=-13.769$ dB,加入噪后,波形如图 1(b)所示。

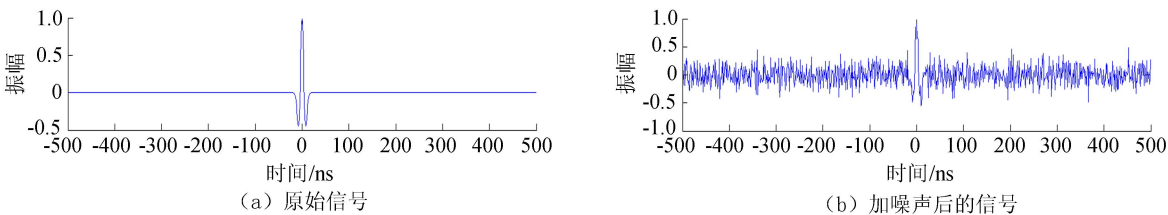


图 1 Ricker 模拟信号
Fig.1 Ricker simulation signal

VMD 方法对信号的分解中,特征模态函数个数对分解结果有一定的影响。为研究了不同 IMF 分量数对去噪效果的影响,取 IMF 分量数在 2~10 范围内。根据 VMD 去噪原理,研究不同 IMF 分量数时 VMD 去噪效果,图 2 是加噪信号去噪后的信噪比。

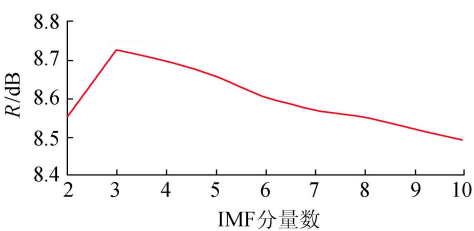


图 2 不同 IMF 分量数时 VMD 去噪效果
Fig.2 De-noise effect of VMD
changing with IMF number

从图 2 结果来看,IMF 分量数对去噪效果有一定的影响,并存在一个最佳的 IMF 分量数。因此为了获取最佳的去噪效果,需要采用一定方法对 IMF 分量数进行设定,本文采用 EMD 预分解法来确定 IMF 分量数。

为了进一步研究 VMD 方法对探地雷达信号去噪效果,还分别采用了 WT、EEMD 和 VMD 共 3 种不同方法对图 1(b)中的信号去噪,去噪结果见图 3。

根据图 3 的结果,3 种方法均能对随机噪声进行有效压制,但图 3(c)的 VMD 中随机噪声的干扰成分明显低于前面 2 种方法。利用式(6)得出 3 种不同方法去噪后的信噪比,分别为 0.364 dB、2.305 dB 和 8.767 dB。对比发现 WT 方法的去噪能力最低,EEMD 方法去噪能力次之,VMD 去噪能力最强。因此,VMD 去噪方法对探地雷达子波去噪能力优越于 WT 和 EEMD。

2.2 正演合成数据分析

假定模型是砂土、孔洞及空气组成的 3 层结构,其中最上层为空气,中间为混凝土层,底层为砂土层,砂土层中间位置有圆形孔洞,模型尺寸与大小见图 4(a),其中混凝土和砂层厚度都为 0.15 m,砂土内部孔洞直径为 0.075 m。

计算过程中的参数,干砂介电常数为 3,电导率为 0.000 1 S/m,空气介电常数为 1,电导率为 1.0×10^{-10} S/m。

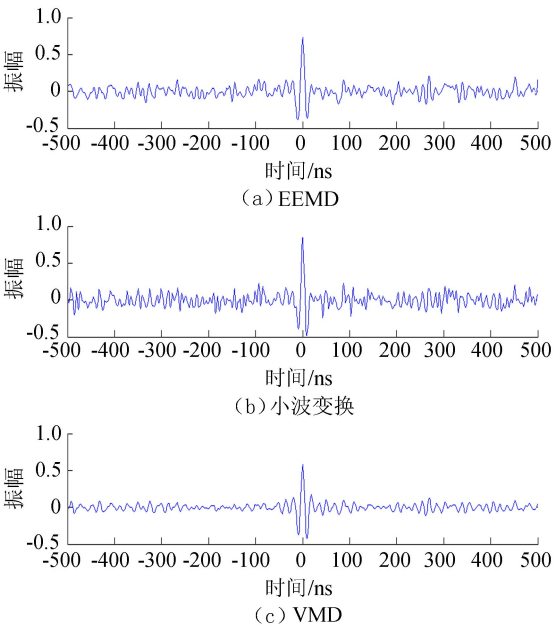


图 3 Ricker 信号去噪结果
Fig.3 De-noise effect of Ricker signal

设定计算区域大小为 $2.5\text{ m}\times0.15\text{ m}$, 计算网格大小为 0.0025 m , 时窗 $0\sim12\text{ ns}$, 以 Ricker 波作为激励, 主频为 900 MHz , 天线收发距为 0.025 m , 模拟采样 125 道, 通过 FDTD 方法可正演出所有道处的探地雷达时间序列信号。以测线方向为横坐标, 时间轴为纵坐标, 将 125 道的时间序列信号合成, 并以图像方式显示如图 4(b) 所示。

将图 4(b) 正演数据加入强白噪声, 取 $R=-3.140\text{ dB}$, 图 5(b) 为加入噪声后的探地雷达信号, 图 5(b) 中的雷达图像显示, 层面同相轴和孔洞区域反射弧比较模糊, 很难清楚分辨出内部结构。

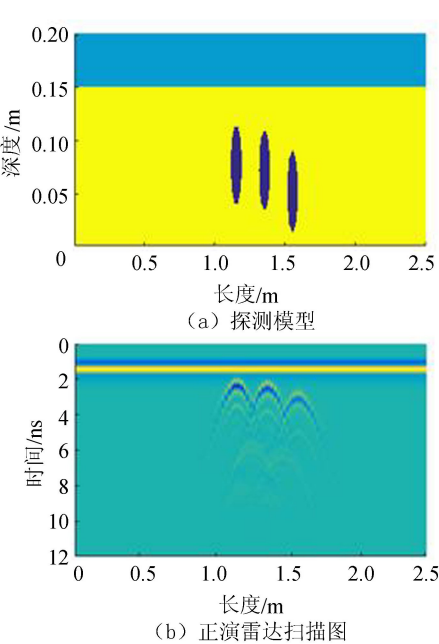


图 4 探地雷达正演模型
Fig. 4 Forward model of GPR

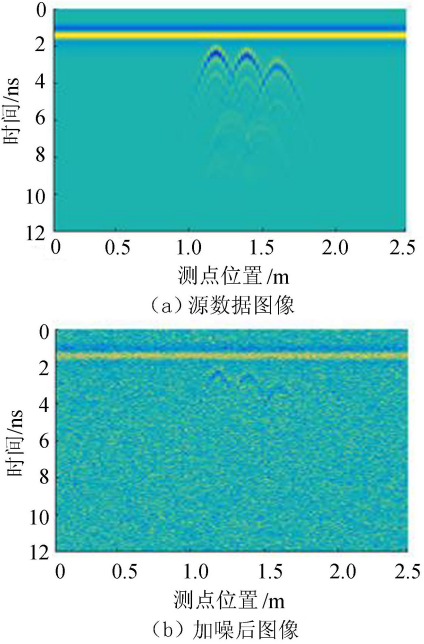


图 5 探地雷达正演加噪
Fig. 5 Forward signal of GPR under white noise background

以图 5(b) 中加噪后的数据作为研究对象, 同样采用 WT、EEMD、VMD 这 3 种方法分别对加噪数据进行处理, 结果见图 6。

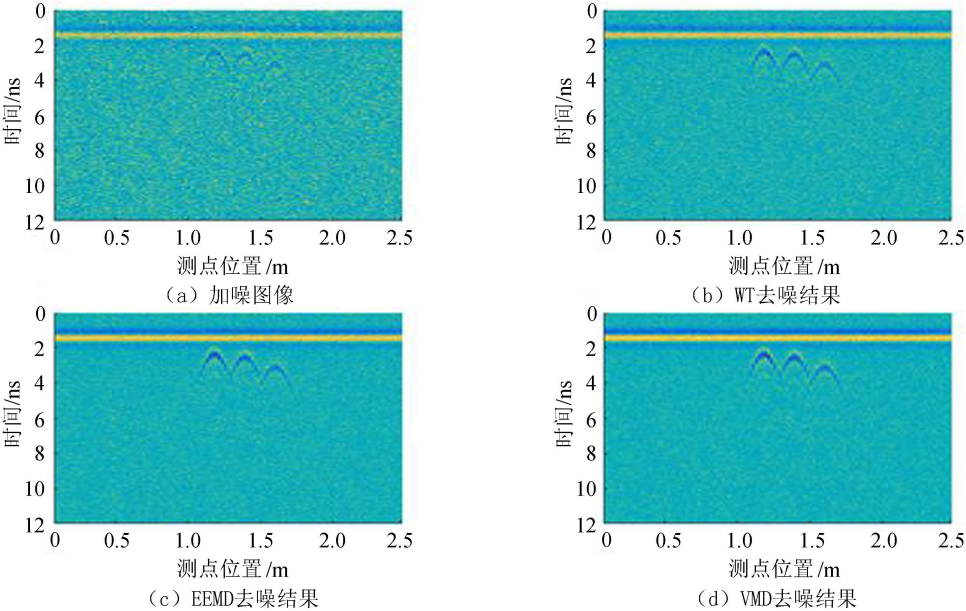


图 6 正演雷达数据 3 种方法去噪结果
Fig. 6 De-noise effect of radar data with three methods

从图 6 去噪前后对比来看, 3 种方法均能有效去除探地雷达信号中的随机噪声。3 种方法去噪效果比较来看, VMD 去噪后图像最清晰, 而 WT 去噪雷达图像最不清晰。求解出 WT、EEMD 和 VMD 这 3 种方法对正

演数据去噪后的信号信噪比,分别为 10.159 dB、18.681 dB 和 26.612 dB。就 3 种方法去噪能力而言,WT 方法的去噪能力最低,EEMD 方法去噪能力次之,VMD 去噪能力最强,这与 2.1 节 VMD 方法对子波处理效果完全一致。

3 工程应用

江西龙南县一自来水厂选址采用探地雷达方法对场地勘查,测线位于河边,探测设备采用 LTD2100 GPR,选用 100 MHz 天线,勘查现场如图 7(a)所示。该探测剖面长 140 m,道间距为 0.5 m,剖面共有 280 道记录,每道含 400 个采样点,图 7(b)为现场勘测探地雷达记录。

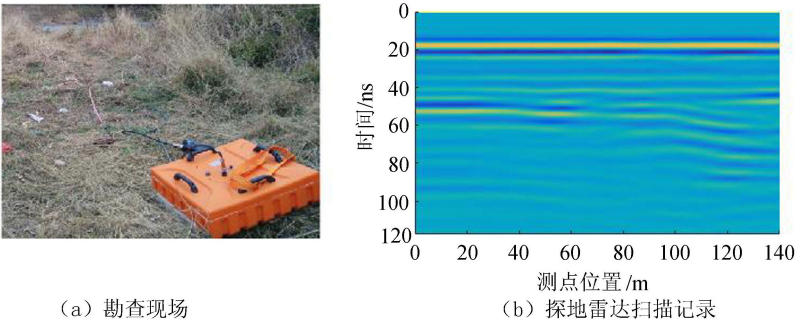


图 7 探地雷达勘测
Fig. 7 In situ exploration of GPR

在研究 VMD 滤波去除噪声过程中,将图 8(a)源信号加入强干扰,这里取初始信号的信噪比 $R = -2.908$ dB,得到加入强干扰后的结果如图 8(b)所示。在白噪声强干扰作用下,图 8(b)中地层反射信号非常模糊,很难分辨出地层深度。

为了去除噪声干扰影响,这里先对图 8(b)数据进行归一化处理,再采用 VMD 方法对预处理后的数据进行去噪。根据 VMD 原理,对图 8(b)中强噪声背景下的探地雷达信号去噪处理,得出去噪后的探地雷达信号,图 9 为去噪前后探地雷达图像。

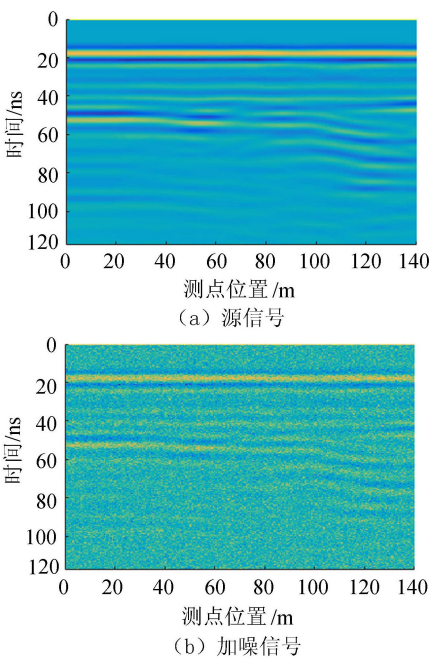


图 8 探地雷达剖面
Fig. 8 Profile of GPR

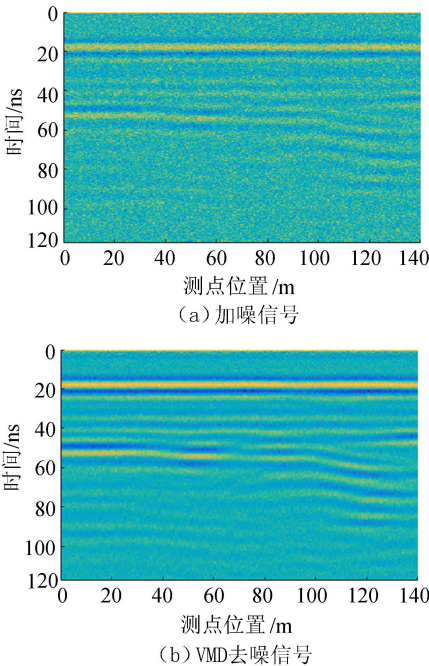


图 9 VMD 方法对探地雷达数据去噪
Fig. 9 De-noise of GPR profile data with VMD

由图 9 可知,去噪后的雷达图像,同相轴变得清晰,地层分界线变得容易识别。采用 VMD 方法去噪后, $R = 20.190$ dB,信噪比得到了大幅度提升,提高了 23.098 dB。因此,VMD 方法能显著滤除干扰影响。

4 结 论

- a. VMD 方法可以去除探地雷达信号的噪声,并能获得较高的信噪比。
- b. 在强噪声背景下,VMD 方法能有效去除探地雷达信号中的噪声。
- c. VMD 方法相对于传统去噪方法能够得到更好的信噪比,具有显著的优势。

VMD 在探地雷达信号处理中具有很好的应用前景,本文将该方法用于去除白噪声,由于实际环境存在多种噪声,需要对环境其他噪声进行深入研究,而 VMD 方法与 Hilbert 变换相结合可实现对瞬时信号的时频域分析,后续研究工作将进一步实施对雷达信号的瞬时频率特征分析研究及应用。

参考文献:

- [1] 郝文广,丁常富,梁娜. 小波降噪与 FFT 降噪比较[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(3):59-61. (HAO Wenguang, DING Changfu, LIANG Na. Comparison of wavelet denoise and FFT denoise [J]. Electric Power Science & Engineering, 2011, 27(3):59-61. (in Chinese))
- [2] OSKOOI B, JULAYUSEFI M, GOUDARZI A. GPR noise reduction based on wavelet thresholdings[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(5): 2937-2951.
- [3] 张春城,周正欧. 浅地层步进频率探地雷达的一种预处理方法[J]. 信号处理, 2004, 20(5): 507-511. (ZHANG Chun Cheng, ZHOU Zhengou. A pre-processing method for stepped frequency ground penetrating radar of shallow subsurface detection [J]. Signal Processing, 2004, 20(5): 507-511. (in Chinese))
- [4] ECONOMOU N. Time-varying band-pass filtering GPR data by self-inverse filtering[J]. Near Surface Geophysics, 2016, 14(2): 207-217.
- [5] 戴前伟,吴铠均,张彬. 短时傅里叶变换在 GPR 数据解释中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1227-1231. (DAI Qianwei, WU Kaijun, ZHANG Bin. A study of application of short-time Fourier transform to GPR data interpretation [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1227-1231. (in Chinese))
- [6] 曹茂森,任青文,王平. 子波关联维分析在缺陷振动检测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 209-212. (CAO Maosen, REN Qingwen, WANG Ping. Application of sub-wave correlation dimension analysis to fault vibration detection [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(2): 209-212. (in Chinese))
- [7] 邱颖,任青文,沈伟. 基于振动模态小波变换模极大的结构损伤检测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 302-305. (QIU Yin, REN Qingwen, SHEN Wei. Structural damage detection based on modulus maximized wavelet transform of vibration mode [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(3): 302-305. (in Chinese))
- [8] HUANG N E, SHEN S S P. Hilbert-Huang transform and its applications[M]. Singapore: World Scientific, 2005.
- [9] 李枝文,宋伟,肖柏勋,等. Hilbert 变换与小波变换在探地雷达资料处理中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(4): 428-432. (LI Zhiwen, SONG Wei, XIAO Boxun, et al. Application of hilbert transform and wavelet transform to data processing of ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(4): 428-432. (in Chinese))
- [10] AN X, YANG J. Denoising of hydropower unit vibration signal based on variational mode decomposition and approximate entropy [J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2015, 38: 282-292.
- [11] DAUBECHIES I, LU J, WU H. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [12] DRAGOMIRETSKIY K, ZOZZO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [13] WANG Y, MARKERT R, XIANG J, et al. Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 60/61: 243-251.
- [14] AN X, ZENG H. Pressure fluctuation signal analysis of a hydraulic turbine based on variational mode decomposition [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy, 2015, 229(8): 978-991.
- [15] LIU W, CAO S, WANG Z. Application of variational mode decomposition to seismic random noise reduction [J]. Journal of Geophysics & Engineering, 2017, 14(4): 888-899.
- [16] 张杏莉,卢新明,贾瑞生,等. 基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 356-363. (ZHANG, Xingli, LU Xinming, JIA Ruisheng, et al. Micro-seismic signal denoising method based on variational mode decomposition and energy entropy [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 356-363. (in Chinese))
- [17] 崔善政,郭艳珍,梁钊,等. 变分模态分解在去除心电图信号基线漂移中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 167-171. (CUI Shanzheng, GUO Yanzhen, LIANG Zhao, et al. Application of variational mode decomposition in removing ECG signal baseline drift [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 167-171. (in Chinese))
- [18] 刘长良,武英杰,甄成刚. 基于变分模态分解和模糊 C 均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3358-3365. (LIU Changliang, WU Yingjie, ZHEN Chengang. Rolling bearing fault diagnosis based on variational mode decomposition and fuzzy c means clustering [J]. Proceedings of the Csee, 2015, 35(13): 3358-3365. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-08-30 编辑: 张志琴)