

经验模态分解及其雷达信号处理

杨彦利, 邓甲昊

北京理工大学机电学院; 机电工程与控制重点实验室, 北京 100081

摘要 为了准确估计信号的瞬时频率, 可用经验模态分解 (EMD) 将信号分解成有限个窄带信号。该方法因具有很强的自适应性及处理非平稳信号的能力而引起广泛关注, 已在众多工程领域得到应用。但 EMD 是基于经验的方法, 数值仿真和试验研究仍是分析 EMD 算法的主要方法。本文总结了 EMD 算法存在的问题, 并指出深入挖掘支持该方法的理论基础是消除制约 EMD 算法进一步发展和应用推广的关键。针对所存在的问题, 从改进筛分停止准则、抑制端点效应、改进包络生成方法和解决模态混叠问题等诸方面阐述了改进 EMD 算法的研究进展。综述了 EMD 在雷达信号处理领域的应用。最后分析指出了进一步研究 EMD 的几个主要方向。

关键词 经验模态分解 (EMD); 希尔伯特-黄变换 (HHT); 时频信号分析; 雷达信号处理

中图分类号 TN911.7

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)10-0101-05

Empirical Mode Decomposition and Its Application to Radar Signal

YANG Yanli, DENG Jiahao

Laboratory of Mechatronic Engineering & Control, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to better estimate the instantaneous frequency of signals, the empirical mode decomposition (EMD) algorithm, proposed by Huang et al., is used to break multi-component signals into several narrow subbands. EMD is an adaptive method and can be used to analyze nonstationary signals, so it has been widely applied to many engineering fields. However, EMD is still considered as an empirical method because it lacks a rigorous mathematical foundation, and its analysis depends largely on numerical simulations and experimental investigations. In this paper, related problems of the EMD algorithm are discussed, including its theoretical foundation and its applications. Some modified EMD algorithms are considered to overcome problems, such as stopping criterion, end effect, envelope of signals and mode aliasing. The applications of EMD to the processing of radar signals are reviewed. Some directions for further research on the EMD algorithm are suggested.

Keywords empirical mode decomposition (EMD); Hilbert-Huang transform (HHT); time-frequency signal processing; radar signal processing

0 引言

当今信息时代, 快速、高效的数据处理技术在科学研究、工程应用乃至社会生活的方方面面都起着重要的作用。伴随着计算机技术的兴起, 频谱分析被广泛应用于工程实践。但 Fourier 变换要求信号满足 Dirichlet 条件, 即对信号进行平稳性假设, 而现实中大量存在的是非平稳信号。针对 Fourier 变换的不足, 短时 Fourier 变换 (Short Time Fourier Transform, STFT), 即通过对一个时间窗内的信号进行 Fourier 变换, 分析非平稳信号。虽然 STFT 具有时频分析能力, 但它具有固定

的时频分辨率, 且难以找到合适的窗函数。而时频分析方法中的 Wigner-Ville 分布存在严重的交叉项, 会造成虚假信息出现。小波变换具有可变的时频分析能力, 在图像压缩和边缘检测等领域得到成功应用。但小波基不能自动更换, 而且对众多小波基的合理选取也是一个难题。小波变换本质上是一种可变窗的 Fourier 变换^[1]。总之, 这些方法没有完全摆脱 Fourier 变换的束缚, 从广义上说都是对 Fourier 变换的某种修正, 而且其时频分辨率受到 Heisenberg 不确定原理的制约。

Huang 等^[2]在 1998 年提出了经验模态分解 (Empirical

收稿日期: 2010-03-24

作者简介: 杨彦利, 博士研究生, 研究方向为探测、制导与控制, 电子信箱: yy1070805@163.com; 邓甲昊 (通信作者), 教授, 研究方向为中近程目标探测、信号处理及感知与自适应控制, 电子信箱: bitdjh@sohu.com

Mode Decomposition, EMD) 算法, 它能够自适应地处理非平稳信号。EMD 已经在机械振动^[2-4]、地震^[5]、医学^[6]等领域的信号处理上得到广泛应用。但由于 EMD 是数值型方法, 目前还缺乏严格的理论基础。虽然对 EMD 算法进行了大量的研究, 但 EMD 的理论体系还不完善。完善 EMD 理论体系及 EMD 的应用推广具有现实意义。

1 EMD 算法及其存在的问题

1.1 EMD 算法

EMD 是希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 的第一步。HHT 的发明被认为是美国国家航空航天局 (NASA) 史上最重要的应用数学发现之一。HHT 分为两步:^[1] ① EMD 分解; ② 希尔伯特变换。而 EMD 是 HHT 的关键一步。EMD 基于以下 3 点假设^[1]: ① 信号至少有 2 个极值: 1 个极大值、1 个极小值; ② 信号特征时间尺度由极值间的时间间隔确定; ③ 如果数据中缺乏极值点, 但存在缺陷点, 可通过一次或多次微分获得极值点。

EMD 通过将多频信号分解成有限个本征模态函数 (Intrinsic Mode Functions, IMF) 来实现对信号不同模态的分离。IMF 需满足 2 个条件^[1]: ① 在整个数据区内, 局部极值点 (包括局部极大值和局部极小值) 与过零点数目至多相差 1 个; ② 在任意点, 由局部极大值构成的上包络和局部极小值构成的下包络的平均值为零。IMF 基于局部特征时间尺度而不是局部平均时间尺度, 这更能体现瞬时频率的物理意义。IMF 的抽取过程被称为筛分过程, 通过筛分, EMD 可以把信号中变化最快的成分最先抽取出来。

对于给定信号 $x(t)$, 记为 $\tilde{x}(t)$, EMD 抽取第一个 IMF 的筛分过程如下^[1]:

- 1) 找出信号 $\tilde{x}(t)$ 的所有局部极值点;
- 2) 分别对极大值序列和极小值序列进行分段三次样条插值拟合, 以生成上包络线 $e_u(t)$ 和下包络线 $e_d(t)$;
- 3) 计算上、下包络线的均值: $m(t) = (e_u(t) + e_d(t)) / 2$;
- 4) 从信号 $\tilde{x}(t)$ 中减去均值, 得: $h(t) = \tilde{x}(t) - m(t)$;
- 5) 重复以上步骤直至得到 1 个 IMF, 记为: $c_1(t) = h(t)$;
- 6) 将 $c_1(t)$ 从 $x(t)$ 中分离出来, 得到余项: $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ 。

将余项 $r_1(t)$ 作为待分解信号, 重复以上步骤直至满足筛分结束条件 (即待分解信号已经单调或 IMF 的个数满足要求)。经过 EMD 的筛分, 信号被分解为有限个 IMF 分量: $c_1(t)$, $c_2(t)$, ..., $c_n(t)$ 和一个余项 $r_n(t)$, 因此, 原始信号可表示为^[1]

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中, $r_n(t)$ 为信号的直流分量或一个常数。

筛分有 2 个目的: 去除模态的叠加、使波形更加对称^[1]。为了实现这两个目的, 有时需要很多次筛分。而过多的筛分, 可能会使 IMF 成为恒定幅值的调频波, 因此需要定义筛分停止准则来结束 EMD 的筛分循环, 以确保 IMF 子带信号的物

理意义。

1.2 存在的问题

Huang 等^[1]指出 EMD 需要关注和进一步研究的几个方面: ① 包络生成方法的改进; ② 端点效应抑制方法的改进; ③ 隐藏在强信号中微弱信号的提取; ④ 通过采样以准确地估计出信号的瞬时频率; ⑤ EMD 突破了对正交分解的约束, 但却不能区分相近频率成分; ⑥ 虽然 EMD 能将信号分解成 IMF 子带信号, 但不能确保每个 IMF 有明确的物理意义。

EMD 算法存在的问题可归纳为^[1,7-14]: ① 缺乏严格的理论基础; ② 模态混叠; ③ 易产生新频率成分; ④ 实时性差; ⑤ 切实有效的 IMF 判定准则 (即筛分停止准则) 难以建立; ⑥ 端点效应问题; ⑦ 最优 EMD 分解问题等。

理论基础问题是 EMD 算法的关键和难点。由其算法可知, EMD 是一种数值驱动型方法, 缺乏严格的数学表达。目前对 EMD 的认识依然多来自于经验和数值仿真分析。这并不是否认仿真分析的结果, 而是期望像 Fourier 变换和小波变换那样给出 EMD 算法的严格数学表达。理论基础的建立有助于解决 EMD 的其他问题。

钟佑明等^[7]将 Hilbert 变换的 Bedrosian 乘积定理改变成局部乘积定理, 试图对 IMF 定义、瞬时频率的计算、EMD 算法的收敛性等问题做出统一解释, 但局部 Bedrosian 乘积定理缺乏严格的证明, 而且该定理的前提条件是 IMF 的频带之间不相交, 而由文献[15]、[16]的仿真结果可以看到, 相邻 IMF 子带信号在频谱上有重叠且有时重叠比较严重。

探究 EMD 理论体系的另一种思路是借助偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE)。基于 PDE 的 EMD 方法是通过 PDE 从局部极值中直接估计包络的均值。Deléchéle 等^[8]给出了基于 PDE 的 EMD 筛分过程的解析表达式。Diop 等^[9]证明了筛分过程收敛于 PDE 的解, 而 PDE 的解是唯一的。另外, 基于局部积分均值的 EMD (Local Integral Mean-based EMD) 方法^[10]、基于约束最优化的 EMD (EMD based on constrained optimization) 方法^[11]也可用于直接估计包络的均值, 从而避免计算上、下包络。但这些方法仍然需要筛分, 且筛分停止准则的选取依然是大问题, 不同的停止准则会导致分解结果出现很大差异。Azzaoui 等^[12]利用拐点来估计慢变信号, 从而避免了筛分。实际上, 这些方法并不能保证估计的均值一定是信号的成分, 也不能保证不引入新频率成分。

EMD 算法已应用于许多工程实践中^[2-6], 而上述问题却制约着 EMD 自身的发展和应用推广, 它迫切需要坚实的理论基础来支撑。完善的理论基础则会促进 EMD 的广泛应用。因此探索 EMD 算法的理论体系充满机遇和挑战。

2 改进 EMD 算法的技术途径

针对 EMD 算法存在的问题, 已有多版本改进 EMD 算法, 尤其是端点效应、筛分停止准则和包络生成方法更是成为研究热点。改进 EMD 的方法可分为以下 5 类: ① 改进筛

分停止准则;②抑制端点效应;③改进包络生成方法;④解决模态混叠;⑤与小波变换^[5]、自相关^[2]和支持向量机^[3]等信号处理方法相结合来改善 EMD 的性能。下面着重围绕前 4 项进行讨论。

2.1 改进筛分停止准则

由 EMD 筛分过程可知,适当的筛分停止准则在保证 IMF 的有效性和提高 EMD 的实时性方面起着重要作用。基于不同 IMF 之间正交性这个假设,程军圣等^[17]提出了能量差跟踪法。但是 IMF 之间的正交性还缺乏严格的数学证明,通过后验数值验证的方法^[1]进行验证缺乏足够的说服力,而在信号成分之间具有较强相关性的情况下,能量差跟踪法不能得到正确的 IMF^[18]。Xuan 等^[18]分析了 Rilling 等提出的 3 阈值准则,指出此方法的问题是阈值不能随信号而自动变化,并设计了带宽准则,通过限制局部带宽来判断 IMF。可是,带宽准则的依据是 IMF 在任意时刻的单一频率特性,而很多情况下,EMD 分解得到的子带信号很难满足单一频率特性。此外,还有基于模态函数相邻零值点距离的间歇性控制规则^[19]、谱熵和主成分分析的 EMD 筛分停止准则^[20]等。不过,目前还没有一个能使 EMD 高效分解且普遍适用的停止准则。

2.2 抑制 EMD 的端点效应

端点效应是指由于信号的端部可能不是极值点,而三次样条插值会造成包络在端部的扭曲变形,该变形会在后续筛分过程中被迅速放大且向数据的内部扩展,导致分解出现严重的失真,甚至无法顺利进行^[1]。

对于有限支撑的数据,样条插值过程中端点效应虽不可避免,但又必须克服。解决的基本思路是在数据区以外设置一定数量的虚拟极值点,让端点效应只发生在延拓数据上,插值完成后,舍弃所延拓的部分,从而保证数据区不受端点效应的影响。在实际应用中,除 Huang 等^[1]采用的特征子波法,即根据端部两个连续极值向两端延拓极值点,还有多种解决方法,胡爱军等^[21]曾将边界效应的处理方法分为 3 类,即:极值延拓、数据/极值预测、波形延拓。实际上,这 3 种类型基本上代表了目前解决端点效应的途径。

极值预测型的基本思想是通过对数据极值分布规律的某种认识,按照该规律来推测极值点在数据两端外侧的分布,从而设置一定数量的延拓极值点。极值延拓型是将数据的某些极值按照一定的规则向数据的两端延拓一定的个数。特征波延拓型的主要思想是通过某种规则在数据区内寻找能够连接到端部的一段子波,使延拓的部分延续端部信号的变化趋势。这 3 种方法对抑制端点效应都有一定效果,甚至对特定信号的处理效果良好。但由于实际信号的复杂多变性,这 3 种方法都表现出一定的局限性,或体现在抑制的效果上,或体现在运算的效率上。胡维平等^[22]对线性外延法、端点镜像法、AR 预测法、多项式拟合法和神经网络预测法 5 种边界处理方法进行定量测试比较,指出镜像法是相对较优的方法,认为在理论突破之前,继续研究传统的预测、延拓等方

法并用特例进行证实可能不会得到更有意义的结果,并建议针对 EMD 的分解特性进行边界处理研究。鉴于单一方法的局限性,将多种方法结合起来使用也是一种思路,王秋生等^[23]通过仿真指出,外推极值点与镜像延拓法相结合比镜像延拓法、基于 AR 模型延拓法抑制端点效应更有效。

2.3 改进包络生成方法

三次样条插值有时会出现包络的过冲和欠冲问题,而高次多项式插值耗时较多^[1]。使用 B 样条插值来生成信号的上、下包络可以得到基于 B 样条的 Hilbert 变换递推公式^[14]。基于基因算法的最优化分段多项式内插法^[24]、三角内插法^[25]、分段三次埃尔米特多项式内插法^[4]等方法也被用来构造信号的上、下包络。

这些方法在改善包络生成质量上有一定优势,甚至对特定信号优势明显,但这些方法只是对三次样条插值在某种程度上的改进,并未从根本上解决三次样条插值所面临的问题。这些插值方法在本质上是从小极值样本中对低频信号的恢复^[26],只是在重构信号的能力上存在一些差异。因此,评价这些方法优劣的标准应取决于其对信号的重构能力(反应在重构误差上)。

2.4 解决模态混叠问题

Huang 等^[27]认为信号存在间断是发生模态混叠的原因,并提出了中断检测方法。具体是,通过设置每个 IMF 中信号周期长度的上限,将信号中不同周期的成分分离成不同的模态。这种中断检测准则需要对 EMD 结果是否发生模态混叠进行判断,只有在判断出发生了模态混叠的情况下,才用此方法对信号进行重新分解,这样就存在很大的人为影响因素。

基于信号间断引起模态混叠的认识,一些学者提出了几种克服模态混叠的方法。掩蔽信号最初是为克服模态混叠而设计的^[28]。Wu 等^[29]设计了 EEMD(Ensemble EMD)方法,即通过在信号中加入高斯白噪声来解决模态混叠问题。Gao 等^[30]先用 Teager-Kaiser 能量算子来定位间断成分,再用差分运算、累加求和,进而与 EMD 相结合的方法来改善 EMD 的模态混叠。此外,对原始信号进行插值以增加采样点数^[31]、用支持向量回归机来拟合局部均值曲线^[32]也能在一定程度上削弱 EMD 产生的虚假模态函数。这些方法能够在一定程度上解决模态混叠问题。

Wu 等^[29]将模态混叠定义为单个 IMF 中包含有全异尺度的信号,或相似尺度的信号被分解到不同的 IMF 中,但对于模态混叠还没有一个被普遍接受的确切定义。关于模态混叠有一点是公认的,即它通常指这样的情况:一个振动模态在不同的时刻被拆分进不同的 IMF 子带中。因此模态混叠的本质原因还有待深入研究,从而彻底解决模态混叠问题。

3 EMD 在雷达信号处理中的应用

鉴于 EMD 对非平稳信号的自适应分析能力,它在目标

识别领域受到青睐。多普勒雷达信号处理上的应用是其典型代表。多普勒效应是指由于波源与观察者的相对运动而出现观测频率与波源频率不同的现象,多普勒信号是典型的非平稳信号,是雷达识别目标的一类重要信号。Cai 等^[33]用 EMD 来提取植被覆盖下目标的时变多普勒信息。在穿墙噪声雷达上,Lai 等^[34]将 EMD 用于分析由于人体或人体部位的运动而产生的多普勒信号。而张榆锋等^[6]则用 EMD 分离混有管壁搏动成分的超声多普勒血流信号。另外,EMD 还被用于火星探测器中提取微尘粒子的多普勒信号^[35]、对雷达信号降噪^[15]等。由仿真和实际数据分析可知,EMD 方法具有更强的抗噪声能力和提取微弱多普勒信号的能力。

由于通过 EMD 算法可以获得更好的时频分布,在合成孔径雷达(SAR)上,EMD 可被用来抑制干涉图的相干斑噪声^[36]和窄带干涉^[37]、对 SAR 图像边缘的检测^[38]。而复数域 EMD 被应用于逆合成孔径雷达(ISAR)微动目标的成像^[39]。

4 展望

从 EMD 算法存在的问题、对 EMD 算法的改进、EMD 在雷达信号处理领域的应用等 3 方面总结了 EMD 算法的发展状况和研究进展。尽管 EMD 能够自适应地处理非平稳信号,并在众多领域中得到应用,但是 EMD 算法存在的问题严重制约着它的实际应用。虽然已有一些改进的 EMD 算法,尤其是在解决筛分停止准则和端点效应等问题上取得一些进展,但对 EMD 的认识依然多来自于经验,数值仿真和实验研究仍是分析 EMD 算法的主要方法。

除了继续研究端点效应、停止准则等几个热点问题外,未来研究的主要方向还包括以下几个方面:①探索 EMD 算法的理论基础,建立其理论框架,重新评估 EMD 存在的问题及现有的解决方法;②对 EMD 分解过程中引入的新频率成分进行数学上的分析,寻找其产生的根源,进而找出抑制新频率成分的有效措施;③研究 EMD 算法的高效、唯一性分解;④研究模态混叠的本质原因;⑤探索提高 EMD 分辨率的措施;⑥针对具体的应用领域,对 EMD 算法进行改进。

参考文献 (References)

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proc Roy Soc London A*, 1998, 454: 903-995.
- [2] 胡劲松, 杨世锡. 基于自相关的旋转机械振动信号 EMD 分解方法研究[J]. *机械强度*, 2007, 29(3): 376-379.
Hu Jingsong, Yang Shixi. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29 (3): 376-379.
- [3] 于德介, 陈森峰, 程军圣, 等. 一种基于经验模式分解与支持向量机的转子故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(16): 162-167.
Yu Dejie, Chen Miaofeng, Cheng Junsheng, et al. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(16): 162-167.
- [4] Liu S L, Zhao H F, Wang H, et al. Application of improved EMD algorithm for the fault diagnosis of reciprocating pump valves with spring failure[C]/Int Symp Signal Process Its Appl (ISSPA). NJ: IEEE, 2007: 1-4.
- [5] 曹晖, 曹永红. HH 变换在地震动信号分析中的应用 [J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(8): 922-927.
Cao Hui, Cao Yonghong. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(8): 922-927.
- [6] 张榆锋, 丁坤, 章克信, 等. 超声多普勒管壁搏动和血流信号的分离研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26(5): 641-646.
Zhang Yufeng, Ding Kun, Zhang Kexin, et al. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 26(5): 641-646.
- [7] 钟佑明, 秦树人. 希尔伯特-黄变换的统一理论依据研究[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(3): 40-44.
Zhong Youming, Qin Shuren. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25 (3): 40-44.
- [8] Deléclle E, Lemoine J, Niang O. Empirical mode decomposition: An analytical approach for sifting process [J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2005, 12(11): 764-767.
- [9] Diop E H S, Alexandre R, Boudraa A O. A PDE characterization of the intrinsic mode function [C]/Proc IEEE Int Conf Acoust, Speech Signal Process (ICASSP), 2009: 3429-3432.
- [10] Hong H, Wang X L, Tao Z Y. Local integral mean-based sifting for empirical mode decomposition [J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2009, 16 (10): 841-844.
- [11] Meignen S, Perrier V. A new formulation for empirical mode decomposition based on constrained optimization [J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2007, 12(14): 932-935.
- [12] Azzaoui N, Snoussi H, Duchêne J. An enhanced empirical mode decomposition without sifting [C]/15th Workshop on Statistical Signal Processing. NJ: IEEE, 2009: 796-799.
- [13] Rilling G, Flandrin P. One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2008, 56(1): 85-95.
- [14] Chen Q H, Huang N, Riemenschneider S, et al. A B-spline approach for empirical mode decomposition [J]. *Advances in Computational Mathematics*, 2006, 24: 171-195.
- [15] Wu S H, Liu Z S, Liu B Y. Enhancement of lidar backscatters signal-to-noise ratio using empirical mode decomposition method [J]. *Optics Communications*, 2006, 267(1): 137-144.
- [16] Wu Z H, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. *Proc Roy Soc London A*, 2004, 460: 1597-1611.
- [17] Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Research on the intrinsic mode function (IMF) criterion in EMD method[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2006, 20: 817-824.
- [18] Xuan B, Xie Q W, Peng S L. EMD sifting based on bandwidth[J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2007, 14(8): 537-540.
- [19] 于哲峰, 杨智春. 经验模分解中的间歇性控制方法改进及分解精度控制[J]. *机械科学与技术*, 2007, 26(5): 635-637.
Yu Zhefeng, Yang Zhichun. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2007, 26(5): 635-637.
- [20] 李雪耀, 邹晓杰, 张汝波, 等. 谱熵和主成分分析用于 EMD 分解研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(7): 797-802.
Li Xueyao, Zou Xiaojie, Zhang Rubo, et al. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(7): 797-802.
- [21] 胡爱军, 安连锁, 唐贵基. Hilbert-Huang 变换端点效应处理新方法 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(4): 154-158.
Hu Aijun, An Liansuo, Tang Guiji. *Chinese Journal of Mechanical*

- Engineering*, 2008, 44(4): 154–158.
- [22] 胡维平, 莫家玲, 龚英姬, 等. 经验模态分解中多种边界处理方法的比较研究[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(6): 1394–1398.
Hu Weiping, Mo Jialing, Gong Yingji, *et al.* *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(6): 1394–1398.
- [23] 王秋生, 段丹辉. 经验模态分解的边界效应处理技术[J]. *计算机测量与控制*, 2006, 14(12): 1673–1675.
Wang Qiusheng, Duan Danhui. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(12): 1673–1675.
- [24] Kopsinis Y, McLaughlin S. Investigation and performance enhancement of the empirical mode decomposition method based on a heuristic search optimization approach [J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2008, 56(1): 1–13.
- [25] Hawley S D, Atlas L E, Chizeck H J. Some properties of an empirical mode type signal decomposition algorithm[J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2010, 17(1): 24–27.
- [26] Yang Y L, Deng J H, Tang W C, *et al.* Nonuniform extrema resampling and empirical mode decomposition [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2009, 18(4): 759–762.
- [27] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 1999, 31: 417–457.
- [28] Deering R, Kaiser J F. The use of a masking signal to improve empirical mode decomposition [C]//Proc IEEE Int Conf Acoust, Speech Signal Process (ICASSP). NJ: IEEE, 2005: 485–488.
- [29] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1–41.
- [30] Gao Y C, Ge G T, Sheng Z Y, *et al.* Analysis and solution to the mode mixing phenomenon in EMD[C]//Congress Image Signal Process (CISP). NJ: IEEE, 2008: 223–227.
- [31] 盖广洪. 经验模态分解的一种改进算法[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(11): 1199–1202.
Gai Guanghong. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2004, 38(11): 1199–1202.
- [32] 李雪耀, 黄永平, 张汝波. 一种基于支持向量回归机的经验模态分解方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(7): 779–784.
Li Xueyao, Huang Yongping, Zhang Rubo. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(7): 779–784.
- [33] Cai C J, Liu W X, Fu J S, *et al.* A new approach for ground moving target indication in foliage environment [J]. *Signal Process*, 2006, 86(1): 84–97.
- [34] Lai C P, Ruan Q, Narayanan R M. Hilbert–Huang transform (HHT) analysis of human activities using through-wall noise radar [C]//Int Symp Signal Syst Electron (ISSSE). NJ: IEEE, 2007: 115–118.
- [35] Zhang J, Srirama P K, Mazumder M K. E-SPART analyzer for mars mission: A new approach in signal processing and sampling [J]. *IEEE Trans Ind Appl*, 2007, 43(4): 1084–1090.
- [36] Yue H Y, Guo H D, Han C M, *et al.* A SAR interferogram filter based on the empirical mode decomposition method [C]//Proc IEEE Int Geosci and Remote Sens Symp (IGARSS). NJ: IEEE, 2001: 2061–2063.
- [37] Zhou F, Xing M D, Bai X R, *et al.* Narrow-band interference suppression for SAR based on complex empirical mode decomposition [J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2009, 6(3): 423–427.
- [38] Han C M, Guo H D, Wang C L, *et al.* A new multiscale edge detection technique [C]//Proc IEEE Int Geosci and Remote Sens Symp (IGARSS). NJ: IEEE, 2002: 3402–3404.
- [39] Bai X R, Xing M D, Zhou F, *et al.* Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical mode decomposition [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46(11): 3514–3523.

(责任编辑 吴晓丽)

第6届国际稀土开发与 应用研讨会

时 间: 2010年8月
地 点: 北京

主办单位: 中国稀土学会

通信地址: 北京市海淀区学院南路76号
中国稀土学会办公室 (100081)
电 话: 010-62182748
传 真: 010-62173501
电子信箱: csre@cs-re.org.cn