

基于 GEP 改进 LMD 在瞬时频率测量中的应用

杨波, 李世平

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 针对局部均值分解(LMD)在分解信号时存在的端点效应问题,为进一步提高 LMD 测量信号瞬时频率精度,抑制端点效应对信号分析带来的巨大影响,提出基于基因表达式编程(GEP)的 LMD 改进算法。为更准确地分析改进算法的效果,与镜像延拓等其他 3 种端点效应抑制方法进行对比。仿真结果表明:基于 GEP 的 LMD 改进算法均优于其他 3 种传统的改进方法,在分解信号后各分量两端发散程度最小,更加有效地抑制了解析过程产生的端点效应,从而更加精确地测量出原始信号的瞬时频率,具有更高的应用价值。

关键词: 端点效应; 瞬时频率; 局部均值分解; 基因表达式编程

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)05-0076-04

Application of Improved EMD Based on GEP in Instantaneous Frequency Measurement

YANG Bo, LI Shi-ping

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the end effect problem existed in the signal decomposition process of Local Mean Decomposition(LMD), to further improve the instantaneous frequency precision of EMD signal measurement and to restrain the strong impact brought by end effect on signal analysis, the improved LMD algorithm based on the Gene Expression Programming(GEP) was described. In order to analyze the effect of the improved algorithm more precisely, comparison was made with the other three kinds of suppression methods, including mirror extension method. The simulation results indicate that the improved LMD algorithm based on GEP are superior to the other three traditional improved methods, and the divergence degree of each component's both ends proves to be the minimum after the signal decomposition. In addition, the algorithm restrains the end effect brought by the decomposition process more effectively, and measures the instantaneous frequency of the original signal more precisely, which proves to be of higher application value.

Key words: end effect; instantaneous frequency; Local Mean Decomposition(LMD); Gene Expression Programming(GEP)

0 引言

由于科学技术水平的局限性,20 世纪 40 年代之前研究人员理想的将研究信号设为平稳信号,然而大部分天然和人工的信号都是非线性非平稳信号[1],用理想化的平稳信号处理方法存在着精度不高、实时性不强等问题,因此对非平稳信号的研究显得更加具有实际意义。瞬时频率(Instantaneous Frequency, IF)是非平稳信号的重要参数,其测量工作对于研究非平稳信号的特

点极为重要^[2]。目前针对多分量信号的瞬时频率估计算法主要有相位法、谱峰检测法、求根估计算法、短时傅里叶变换法(STFT)以及基于希尔伯特-黄变换^[3-4](Hilbert-Huang Transform, HHT)的局域波分解法等,测量方法虽有多种,但却都有着难以克服的缺陷。2005 年英国学者 SMITH J S 在经验模式分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[3]的基础上提出了局部均值分解(Local Mean Decomposition, LMD)^[5],并且在脑电图信号分析中得到了很好的应用。相比 EMD 而言, LMD 具有一些 EMD 没有的优良品质,但 LMD 和 EMD 一样,在分解信号的过程中,均存在端点效应^[6],严重影响其分解精度。为更好地抑制 LMD 端点效应的问题,本文提出

收稿日期:2015-03-27

修回日期:2016-04-15

作者简介:杨波(1992—),男,江西南昌人,硕士生,研究方向为控制科学与工程。

了基于基因表达式编程(GEP)预测方法改进 LMD,并与其他3种常用的抑制 LMD 端点效应的方法作比较。GEP 对要预测的数据对象没有严格的要求,而且运算速度快、预测精度高,因此比其他传统延拓方法具有更大的应用范围和价值。

1 LMD 方法及端点效应

1.1 LMD 简介

LMD 本质^[6]上是多分量信号自适应地分解为若干个具有明确物理意义的 PF(Product Function)分量之和,而原信号完整的时频分布即为求这些分量瞬时频率及幅值的组合,因此对原始信号瞬时频率的求解便简化为对各分量瞬时频率的求解。

LMD 分解非平稳信号是一个完备的过程,没有造成原始信号的信息丢失,其分解过程详见参考文献^[7],本文不再叙述。

1.2 端点效应

在进行 LMD 分解过程中,需要得到信号的所有极值点的信息,但实际中要分析的信号往往是被截断后的信号,边界外的极值点或边界包络不易准确得到,最初的方法是直接将端点视为极值点处理,但这样处理会使上、下包络线在两端附近产生严重扭曲。在进行 LMD 分解过程中,由于信号两端的极值点不能确定,分解后的 PF 分量会在两端出现虚假成分,并随着迭代过程的进行,边缘上的误差会不断向内传播,严重时“污染”整个数据序列,这就是 LMD 中的端点效应。

2 基于 GEP 预测的 LMD 改进算法与其他3种方法的仿真对比

2.1 抑制端点效应的常用方法

1) 多项式拟合^[8]:在求原始信号的 IMF 分量的循环过程中,利用信号两端的3个极值点求出拟合多项式,从而得到极值点在两端处的近似值,再求出序列的上下包络。该方法对原数据列的处理,能把其中主要信息有效提取出来。

2) 基于斜率的改进方法(ISBN 延拓)^[9]:基于斜率方法是基于信号两端附近的波动延伸的延拓方法,可以有效地抑制 EMD 的端点效应。本文采取的是基于斜率的改进方法(Improved Slope Based Method, ISBM)。

3) 镜像延拓^[10]:顾名思义,就是将两面镜子分别放在信号两端对称的位置(端点处除外),同时将内部信号向外映射,从而得到长度翻倍的周期信号。镜像延拓是目前处理 EMD 端点效应最常用、精度最高的方法。

2.2 GEP 预测简介

GEP 是由葡萄牙科学家 FERREIRA C 于 2000 年底

首次提出,2001 年底以论文的形式正式发表的^[11],它融合了遗传算法的两个传统领域—遗传算法(GA)和遗传编程(GP),是一种新型进化算法。GEP 融合了 GA 和 GP 的优点,又克服了两者的不足^[12]。其根本的区别在于个体编码方式不同:GA 个体由长度固定的线性符号串(染色体)表示;GP 个体由形状、大小不同的非线性实体(解析树)表示;而 GEP 先将个体编码成长度固定的字符串(染色体),再表示成形状、大小不同的非线性实体(表达式树)。编码方式的独特使得 GEP 能通过简单的编码来解决复杂的实际问题,GEP 的效率要比传统遗传编程系统高出 100~60000 倍^[11,13]。

标准 GEP 的基本过程如图 1 所示。

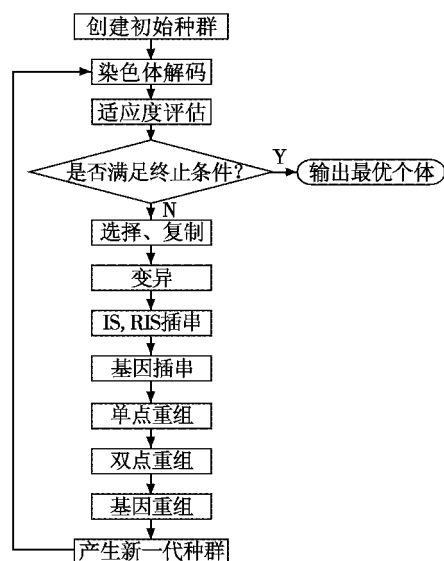


图 1 GEP 算法的基本过程

Fig. 1 Fundamental process of the GEP algorithm

2.3 基于 GEP 预测改进方法原理

由于对端点效应抑制效果的好坏与信号边界处理效果的好坏有着最直接的关系,因此焦点在信号两端极值点的预测上。本文提出的基于 GEP 预测的改进方法原理上分为以下几个步骤:首先,通过 GEP 对原始信号两端分别向外预测两个极值点;其次,将信号的两端作为极值点,对预测后的信号进行 LMD 分解,得到若干个 PF 分量;再次,将这些 PF 分量按原信号时间尺度进行截取,去掉两端多余的信号点;最后,对截取后的 PF 分量进行频率分析,求解瞬时频率。

2.4 仿真对比

本文共实现了 4 种端点效应改进方法测量非平稳信号瞬时频率的仿真,并将其仿真结果进行对比。

为了证明基于 GEP 改进 LMD 方法抑制端点效应的效果、测量瞬时频率的精度比其他方法更好,下面以一个非平稳仿真信号为例,其表达式为

$$x(t) = 0.5\sin(40\pi t^2) + \sin(200\pi t) + 0.5\cos(100\pi t) \quad (1)$$

选取时间范围 $0 \leq t < 0.23 \text{ s}$, 采样频率 $f_s = 1 \text{ kHz}$, 抽样点为 230。

对原始信号进行 LMD 分解之后可得如图 2 所示 4 种改进方法的分解结果, 其中, $u(t)$ 指算法对信号分解后的剩余量。

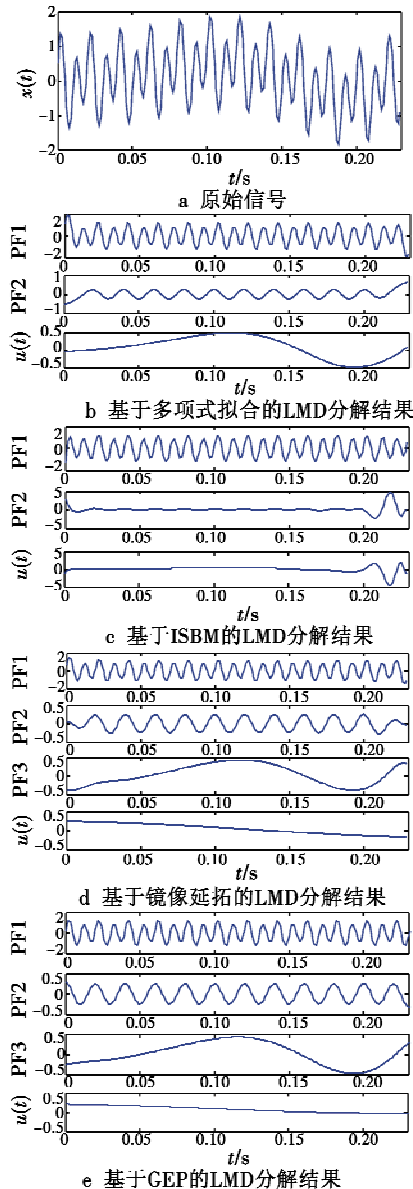


图 2 4 种改进方法分解结果

Fig. 2 Decomposition results of the four improved methods

通过观察 4 种抑制端点效应方法处理后的图像可以得到:一方面,对于前两种传统改进方法,分解后的 PF 分量两端出现明显的发散现象,而目前运用最为广泛的基于镜像延拓的改进方法的分解精度相比前两种方法有了一定的提高,但总体上说,基于 GEP 预测的 LMD 改进方法分解精度最高,说明分解过程中的端点效应影响最小,分解结果非常理想;另一方面,基于 ISBM 延拓的方法低频时数据发散严重,并且前两种方法分解后的 PF 分量数量均比后面两种方法少一个,说

明前两种方法不能有效地将低频分解出来,出现了模态混淆^[12]的情况。下面通过这几种方法测量信号的瞬时频率。

2.5 信号瞬时频率测量

为进一步比较这 4 种改进方法之间端点效应的影响程度的大小,本文分别测量出这 4 种改进方法处理原始信号后的瞬时频率,并做对比,如图 3 所示。

对原始信号表达式进行频率分析可知:其瞬时频率包含有恒定值为 100 Hz, 50 Hz 的部分及一个 $40t$ 的线性部分(频率由 0 线性增加至 12 Hz)组成。

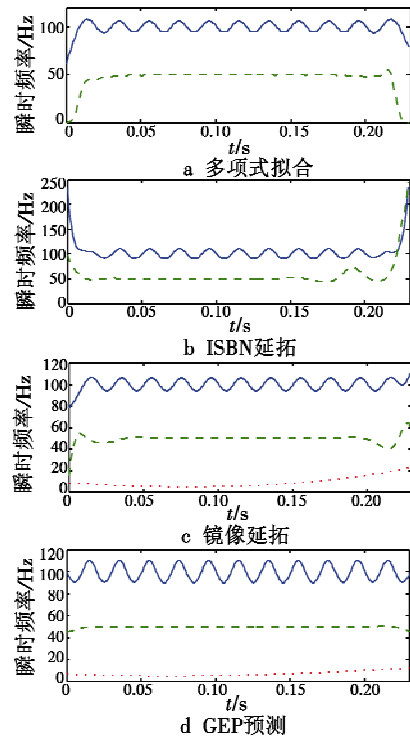


图 3 4 种改进方法测量瞬时频率

Fig. 3 Instantaneous frequency measurement of the four improved methods

通过测量瞬时频率的图像可以观察到:基于多项式拟合和 ISBM 延拓的端点效应抑制方法无法测量出线性低频部分,且在两端测量的瞬时频率仍存在严重的发散现象。镜像延拓法的精度得到明显提升,并克服了模态混淆的问题,但在两端处出现了小范围的发散。但相比之下,基于 GEP 的 LMD 改进算法测得的瞬时频率十分稳定,而且低频线性部分测量十分准确,端点处振荡几乎消失,能更加清晰地反映出原始非平稳信号的频率组成。因此,进一步证明了本文提出的改进算法测量非平稳信号瞬时频率的精度更高。

3 结论

针对 LMD 算法在分解非平稳信号时产生端点效应问题,为提高 LMD 分解精度,从而提高非平稳信号瞬时

频率测量精度,本文提出一种基于 GEP 预测的 LMD 改进方法。为更好地证明该方法的有效性,通过与其他3种传统的改进方法作对比,仿真分析表明:该方法在分解信号后,分量两端发散程度最小,对端点效应抑制效果最好,能更精确地测量非平稳信号的瞬时频率,证实了该改进方法的可行性,为 LMD 更加有效、精确地处理信号提供可靠地技术手段。

参考文献

- [1] 刘立君,王奇,杨克己,等. 基于 EMD 和频谱校正的故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(6):1278-1283. (LIU L J, WANG Q, YANG K J, et al. EMD and spectrum correction-based fault diagnosis method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6):1278-1283.)
- [2] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998. (ZHANG X D, BAO Z. Non-stationary signal analysis and processing [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1998.)
- [3] HUANG N E, ZHENG S, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc. R. Soc. Lond, 1998, 454:903-995.
- [4] HUANG N E, WU M L C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. Proc. R. Soc. Lond, 2003, 459:2317-2345.
- [5] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2(5):443-454.
- [6] 程军圣,张亢,杨宇,等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究[J]. 振动与冲击,2009,28(5):13-16. (CHENG J S, ZHANG K, YANG Y, et al. Comparison between the local mean decomposition and decomposition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5):13-16.)
- [7] 张淑清,孙国秀,李亮,等. 基于 LMD 近似熵和 FCM 聚类的机械故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(3):714-720. (ZHANG S Q, SUN G X, LI L, et al. Study on mechanical fault diagnosis method based on LMD approximate entropy and fuzzy C-means clustering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3):714-720.)
- [8] 刘慧婷,张旻,程家兴. 基于多项式拟合算法的 EMD 端点问题的处理[J]. 计算机工程与应用,2004,40(16):82-86. (LIU H T, ZHANG M, CHENG J X. Dealing with the end issue of EMD based on polynomial fitting algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(16):82-86.)
- [9] 方琨,王渝,马利兵,等. 基于 RO-SBM 的 Hilbert-Huang 变换端点效应抑制方法[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(2):319-324. (FANG K, WANG Y, MA L B, et al. The suppression method of end effect of Hilbert-Huang transform based on RO-SBM [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2013, 33(2):319-324.)
- [10] ZHAO J P, HUANG D J. Mirror extending and circular spline function for empirical mode decomposition method [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2001, 2(3):247-252.
- [11] FERREIRA C. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems [J]. Complex Systems, 2001, 13(2):87-129.
- [12] ZUO J, TANG C J, LI C, et al. Time series prediction based on gene expression programming [C]//Processing of the 5th International Conference for Web Information Age 2004, LNCS 3129, Berlin:Springer-Verlag,2004:55-64.
- [13] 唐常杰,张天庆,左劼,等. 基于基因表达式编程的知识发现[J]. 计算机应用,2004,24(10):7-10. (TANG C J, ZHANG T Q, ZUO J, et al. Knowledge discovery based on gene expression programming [J]. Computer Applications, 2004, 24(10):7-10.)
- (上接第75页)
- time estimate with recovery effect and retention time relaxation [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(8):3205-3214.
- [11] ST Microelectronics. Bad block management in NAND Flash memories [Z]. EE Times-India, 2004:3-5.
- [12] 徐玉杰. 高速大容量存储系统的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2014. (XU Y J. Design and implementation of high-speed and huge-capacity storage system [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.)
- [13] TAKEUCHI K. Novel co-design of NAND Flash memory and NAND Flash controller circuits for sub-30nm low-power high-speed solid-state drives [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(4):1227-1234.