

经验模式分解(EMD)及其应用

徐晓刚¹,徐冠雷¹,王孝通¹,秦绪佳²

(1. 海军大连舰艇学院装备系统与自动化系,辽宁大连 116018;2. 浙江工业大学软件学院,浙江杭州 310032)

摘要: 经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是一种数据驱动的自适应非线性时变信号分解方法,可以把数据分解成具有物理意义的少数几个模式函数分量.本文总结归纳了一维 EMD、二维 EMD 方面的主要工作,比较了不同方法存在的优点与不足,指出了 EMD 研究存在的难题和瓶颈,并给出了 EMD 研究与应用的发展趋势.

关键词: 经验模式分解(EMD);内蕴模式函数分量(IMF);Hilbert 变换

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)03-0581-05

Empirical Mode Decomposition and its Application

XU Xiao-gang¹, XU Guan-lei¹, WANG Xiao-tong¹, QIN Xu-jia²

(1. Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China; 2. College of Software, Zhejiang University of technology, Hangzhou, Zhejiang 310032, China)

Abstract: Empirical Mode Decomposition (EMD) is a decomposition algorithm which is used to analyze nonlinear and time-varying signal. Different from the traditional signal analysis method, the decomposition is data-driven and self-adaptive. A review work about the current development of one dimensional EMD and Bidimensional EMD is introduced. At first, some basic concepts and main algorithm ideas are described. Then the advantages and shortages of EMD are discussed. At the end of the paper, several problems which are waiting to be solved are listed.

Key words: EMD; IMF; Hilbert transform

1 引言

信号分析与处理一直是最活跃的研究领域之一. Fourier 分析技术自提出以来,一直扮演着举足轻重的角色,但随着研究对象和研究范围的不断深入,也逐步暴露了 Fourier 变换在研究时变非线性信号时候的局限性.这种局限性体现在:Fourier 变换是一种全局性变换,得到的是信号的整体频谱,因而无法表述信号的时频局部特性,而这种特性正是非平稳信号最根本和最关键的性质.为了分析和处理非平稳信号,人们相继提出并发展了一系列新的信号分析方法:短时 Fourier 变换、双线性时频分布、Gabor 变换、小波分析、分数阶 Fourier 变换^[1,2]等.短时 Fourier 变换、小波分析、Wigner-Ville 分布、分数阶 Fourier 变换等算法从不同程度上对非平稳信号的时变性给予了恰当的描述,大大改进了 Fourier 分解的不足,但仍属于全局分析的范畴,究其原因在于他们都依赖于基函数的选取,基函数决定了这些方法对信号的分析能力.一旦基函数确定,与该基函数相适应的信号分析结果就相对理想,反之就得不到较好的效

果.而信号自身千变万化,不可能找到一种基函数可以与所有类型的信号相适应.那么,能否找到一种基函数可以随着信号自身的变化而变化呢?

在此背景下,1998年 Huang 等人^[3]提出了一种用来分析非平稳信号的基于经验的模式分解算法(EMD)和基于 Hilbert 变换的时频谱图. EMD 是基于数据时域局部特征的,它可把复杂的数据分解成有限的、通常是少量的几个内蕴模式函数分量(Intrinsic Mode Functions, IMF),通过 Hilbert 变换对相位进行微分求解瞬时频率,从而使得瞬时频率这一概念具有了实际的物理意义.由于分解是基于信号时域局部特征的,因此分解是自适应的,也是高效的,特别适合用来分析非平稳非线性的时变过程,它能清晰地分辨出交叠复杂数据的内蕴模式.

EMD 提出后,很快在许多领域取得了良好的应用,但是,由于基于经验进行信号的分析,EMD 在理论上目前还无法获得较好的解释,因此也遭到了许多学者的质疑.实际上,EMD 的最大突破在于不再依赖于基函数,它是数据驱动的自适应分析方法.

针对目前 EMD 研究工作的进展,本文从局部均值

求解技术、边界处理技术、快速算法、时频分析等方面对 EMD 研究状况进行了总结,分析了 EMD 方法的优缺点,指出了进一步研究的主要方向。

2 经验模式分解算法以及 Hilbert-Huang 时频谱

2.1 1-D EMD 分解

在 EMD 分解过程中, Hung 强调一个基本模式分量函数需要满足如下两个条件^[3]:

(1) 在整个数据序列中,极值点的数量与过零点的数量相等,或最多相差不能多于一个。

(2) 在任一时间点上,信号的局部最大值和局部最小值定义的包络均值为零。

满足以上两个条件的基本模式分量被称为内蕴模式函数(IMF)。因为在按过零点定义的每一个周期中,只包括一个基本模式的振荡,没有复杂的叠加波存在。按照定义,一个基本的内蕴模式函数分量并不被限定为窄带信号,它可以是幅度和频率调制的,事实上,它可以是非平稳的。如上所述,纯粹的频率和幅度调制函数可以是基本内蕴模式函数,尽管它们有一定的带宽。EMD 分解算法的基本思想是:对一给定信号,先获得信号极值点,通过插值获得信号包络,得到均值,与均值的差得到分解的一层信号;如此重复,获得分解结果: $f(t) = \sum_{i=1}^l inf_i(t) + r$,即 l 个 IMF 和一个残差 r 。

2.2 基于 Hilbert 变换的时频分析

在获取 $f(t) = \sum_{i=1}^n inf_i + r_n$ 分解后, Huang 就应用 Hilbert 变换对各个分量进行变换,从而获取时频分析,称之为 Hilbert-Huang 时频谱。

3 EMD 分解关键技术及其当前国内外主要现状

根据目前的研究工作,EMD 分解关键技术包括:局部均值求解技术,边界处理技术,快速算法,时频分析等,下面将根据一维和二维处理两大类,对这几个方面的工作进行分析总结。

3.1 局部均值求解技术

3.1.1 一维

经验模式分解先求取局部均值,然后用信号局部均值作差来获取内蕴模式函数分量,因此,局部均值求解至关重要,决定了算法的总体性能。一维 EMD 分解中的局部均值典型算法是基于样条的包络法^[3],相对于最近邻域线性插值、二次插值以及三次插值来说,该算法在没有噪声或者较高信噪比的情况下具有最优的均方误差。但是该算法容易受噪声干扰,鲁棒性差,同时容易产生过冲和欠冲现象。针对该问题,文献[4]试图用 B 样条插值算法来改进,但没有明显区别。由此,徐等提出了限邻域均值求解方法,这一方法有效地利用

了时频特性的测不准原理,虽然这种方法不能完全消除过冲和欠冲现象,但是相比于其他方法过冲和欠冲要小许多^[5]。

3.1.2 二维

二维 EMD 分解是一维 EMD 分解思想与算法在二维信号上的推广,目前主要分为四类:单向二维 EMD (Single Direction EMD, SDEM)^[6]、基于二维包络函数的 EMD (2D Interpolation Function based EMD, IFEMD)^[7-9]、方向 EMD (Directional EMD, DEMD)^[10] 和限邻域 EMD (Neighborhood Limited EMD, NLEMD)^[5,11,12] 等。

(1) SDEM^[6] 思想简单,只是将一维的算法简单地拓展在二维图象的行或者列上,并应用于雷达信号粒子噪声消除等,由于没有考虑到二维信号在周围邻域各个方向上的关联性,严重地破坏了二维信号各个方向上的整体相关性,从严格意义上来说它不属于二维经验模式分解。

(2) 文献[7~9]出现的 IFEMD 基于不同的插值函数提取包络曲面,将一维思想推演到二维空间进行。其共同特点是可以在二维空间很好地获取 IMF,缺陷是计算或存储量上的开销太大。目前的主要二维插值函数分为:径向基函数、 B 样条函数和三角插值等。

三角插值方法耗时少于径向基函数插值,同时精度却要高于 B 样条函数插值算法,是目前一种较为流行的二维插值算法。

(3) DEMD^[10] 首先确定分解方向,再进行行列分解。该方法改善了二维经验模式分解计算量和存储量太大的缺点,缺陷是如果分解方向确定不准确,容易为后续处理造成较大的误差。若采用多方向的分解算法,又会增加时间开销,且效果又不一定保证。此外,由于破坏了二维空间上的相关性,有时候会产生明显的行列分解痕迹。

(4) 以上三种算法还存在一个共同缺陷,分解过程中由于图象区域点灰度值的剧烈变化和插值函数的过冲、欠冲,在图象分解中出现灰度斑,这些灰度斑对于图象后续处理产生了非常不利的影响。NLEMD 通过对每一次的分解限定二维最大时宽进行频率限制,同时采用新的自适应局部均值算法代替包络线均值算法,克服了以上三种算法的缺点,但是仍然存在着时间开销太大的缺陷^[5,11,12]。

3.2 边界处理技术

3.2.1 一维

在一维 EMD 方法的筛分过程中,构成上下包络的三次样条函数在数据序列的两端会出现发散现象,使得边界产生较大误差,而且这种误差会随着筛分过程的不断进行而向数据内部延拓^[3],从而污染整个数据

序列,这称为“边界效应”现象。为此,人们提出了各种方法进行边界处理,以降低“边界效应”的影响,获取最佳分解。目前主要的边界处理技术包括:自回归模型信号延拓^[13],神经网络信号延拓^[14],以及最大熵谱估计^[15]等方法。文献[13]主要采用成熟的AR模型预测技术对数据序列进行线性预测,获得了不错的效果。文献[14]依赖于神经网络模型的设计以及数据序列自身的特征,同样可以有效地抑制边界效应。而文献[15]提出了一种最大熵谱估计算法,即Burg方法对边界进行延拓直至找到边界外一个极值点。

上述各算法还无法确定哪种更优,目前所有的边界抑制方法都不能完全解决边界问题。

3.2.2 二维

关于二维边界处理,没有见到公开的专题论述文献,很多文献都没有对这一问题进行阐述。稍微涉及的主要方法有两种:一是一维处理方法在二维上的直接拓展^[6]。二是文献[16]提出了一种基于纹理合成的边界处理技术。由于二维信号不必象一维信号那样进行过多的层次分解,多数只需要分解前几层,因此边界效应的影响相对要小。

3.3 快速算法

3.3.1 一维

现在几乎所有的经验模式分解算法都比较慢,时间耗费在通过大量极值点进行插值和不断筛分的重复过程当中,目前出现的快速算法主要有两种:一种是改变插值算法,提高插值速度;另外一种就是改变停止条件,让筛分过程尽快结束。文献[17]提出了一种新的插值计算技术,该算法是一种新的非网格化偏微分求解数据插值技术,时间耗费少。改变停止条件是一种折中方案,文献[3]提出了一种改变停止条件的方法,这种方法意味着以性能的下降来换取时间上的效果。

3.3.2 二维

文献[17]提出了一种新的基于Delaunay三角插值技术的分解算法,主要是将原来的插值中的全局最优改为局部最优,将全局范围内的插值改为局部三角区域上的插值,从而减少插值点数来提高速度。同时还通过改变停止条件,来实现速度上的改进。目前,SDMD^[6]、DEMD^[10]的速度要快于IFEMD^[7~9]和NLEMD^[5,11,12]。

以上算法都是在插值和停止条件上进行改进,虽然速度有所提高,但是效果都不是很显著,离实时处理的要求还有相当大的距离。

3.4 时频分析

3.4.1 一维

一维时频分析技术相当简单,目前的主要方法就

是文献[3]提出的Hilbert-Huang变换,即首先进行经验模式分解,然后将分解后的各个内蕴模式函数分量进行Hilbert变换,获取各个内蕴模式函数分量的解析形式,最后对解析形式进行相位微分、求解瞬时频率等进行时频分析,最关键的问题在于Huang等人能够给出具有物理意义的瞬时频率。但是,文献[18]业已证明,只有在满足AFDE条件的情况下,EMD分解后的瞬时频率才有意义,否则按照传统观点是没有物理意义的,同时,文献[18]还给出了具体的判定条件来确定何种情况可以得到具有物理意义的瞬时频率。

3.4.2 二维

文献[15]提出了一种基于方向EMD分解的瞬时频率估计算法,该方法的优点在于无需进行Hilbert变换,完全是一种数据驱动的方法,故称之为直接法。缺点是由于求解一、二次导数,因此受高频噪声影响较大。

另外一种时频分析方法就是借助于Riesz变换^[19]进行每个分量的时频分析。由于Riesz变换对于内部一维信号的有效性,故特别适合于处理局部为一维结构的二维信号,但是对于局部非一维结构往往得不到好的结果。此外,可以考虑采用二象Hilbert变换^[20]对二维信号进行时频分析。

3.5 应用

在一维信号中,EMD在滤波、故障检测、医学分析、信息检测等方面都取得了很大的成功^[21~23],而在二维信号的处理上,已经获得应用的有:图像融合^[5,19]、边缘检测^[24]、图像滤波^[6]、纹理分析^[10]、图像压缩^[25]等,这些工作证明了经验模式分解的有效性。

4 存在的主要问题

尽管经验模式分解已经获得了大量的应用,但是目前仍然处于发展阶段,还有许多问题有待进一步解决。主要包括以下几个方面:

4.1 边界问题

目前的一维信号处理边界的技术都不具有通用性,而且真正意义上的二维边界处理技术还没有出现,文献[10]的边界处理算法仍然属于一维技术。

4.2 速度问题

目前所有的EMD方法都不能满足于实时处理,相比于快速Fourier变换和小波变换,目前经验模式分解的速度仍然较慢。

4.3 二维时频分析

关于一维信号的瞬时频率、瞬时相位都有严格的定义,但是在二维图像处理中这些定义如何扩展还是问题。由于二维信号的Hilbert变换定义形式并不唯一^[20],造成了瞬时频率和瞬时相位的不唯一性,结果是加大了二维信号的时频分析的难度。

4.4 局部均值求解问题

现在主流的算法就是求解上下包络线(或者包络面)的均值获取局部均值,但是这种方法无论采用何种插值技术都会产生一定的过冲和欠冲现象。

4.5 分解算法性能的评价标准

目前还没有一个用来评价经验模式分解算法的尺度或者说标准,大多数是依靠主观的观察和判断进行比对,造成了很多的不确定性,非常不利于经验模式分解算法的应用。

4.6 经验模式分解的理论依据

目前 EMD 并不像 Fourier 变换和小波变换一样有完整的数学理论支撑,它完全是一种基于“经验”的模式分解,对于 EMD 发展方向的指导性自然就不强,从而会阻碍 EMD 理论的进一步发展和应用。不过有人已经开始寻找 EMD 的理论支撑,例如文[26]将 EMD 作为一种滤波器族处理等,并且将其作为一种 Hurst 指数估计算法。同时,Huang 也试图从统计学的角度对其分解算法进行阐述^[27]。文献[18]等从多分量单分量的角度进行阐述。不过,这些都不能够给 EMD 以完美的理论解释。

5 结论及展望

EMD 理论的发展才刚刚起步,特别是多维信号的 EMD 分析,尚处于很不完善的阶段。本文给出了经验模式分解的基本思想和当前主要技术概况,从均值求解、边界效应抑制、快速算法、时频分析等方面分析了各种算法的优缺点。对于 EMD,需要进一步研究的工作包括以下几个方面:

(1) 经验模式分解的评价指标研究。在文献[18]中给出了已知信号分解前后信号的比对方法和指标,但是工程应用中信号的先验信息不可能已知,因此需要重新定义。

(2) 经验模式分解的理论框架研究。基于经验进行信号的分析,EMD 在理论上目前还无法获得较好的解释。相比之下,作为多分量信号到单分量信号的分解工具更适合于 EMD 的物理解释。按照传统理论,瞬时频率具有物理意义的信号必须是单分量信号,而 Huang 一直强调 IMF 的瞬时频率具有物理意义,同时徐等发现^[18],IMF 和单分量存在一定的关系但又不完全等同,因此如果把两者较好地统一也许会给出理想的理论支撑。

(3) 新的分解方法研究。目前所有分解方法的共同缺陷是:EMD 只能从高频到低频顺次分解各个分量,不能直接获取其中某一个或某几个分量信号,筛选过程的不确定性会导致算法速度下降,不利于实时处理,而且受到 AFDE 条件的限制^[18],会产生没有物理意义的分解结果和虚假分量等。因此,如何一次性提取所需的

信号,提高分解速度,是值得研究的工作,速度的提高将为工程的实际应用打下良好的基础。

(4) 多维时频分析问题。文献[15][19]已经试图进行了探索,但都存在破坏二维结构相关性的缺陷。建立多维的 Hilbert 变换,对相应的多维信号进行时频分析,将是一种有效的实现途径。

自 EMD 思想提出以来,EMD 作为一种新的信号分析处理方法已经在许多领域取得了很好的应用,虽然由于理论和方法的不够完善,存在许多问题,但可以肯定,随着 EMD 理论的进一步完善和发展,其应用前景会更加光明。

参考文献:

- [1] 陶然,齐林,王越. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
Tao R, Qi L, Wang Y. Theory and application of the Fractional Fourier transform [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] Xu G, Wang X, Xu X. Fractional quaternion Fourier transform, convolution and correlation [J]. Elsevier Signal Processing, 2008, 88(10): 2511 - 2517.
- [3] Huang N E, Zheng S, Steven R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear non-stationary time Series Analysis [A]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences [C]. London, The Royal Society Press, 454(1971), 1998: 903 - 995.
- [4] Q H Chen, Norden E. Huang, R Sherman, et al. A B-spline approach for empirical mode decompositions [J]. Advances in Computational Mathematics, 2006, 24(1-4): 171 - 195(25).
- [5] Xu G, Wang X, Xu X. Neighborhood limited empirical mode decomposition and application in image processing [A]. ICIG2007 [C]. Chengdu of China: IEEE C S Press, 2007. 08. 149 - 154.
- [6] Han C, Guo H, Wang C, Fan D. A novel method to reduce speckle in SAR images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23): 5095 - 5101.
- [7] Nunes J C, Bouaoune Y, Delechelle E, et al. Texture analysis based on the Bidimensional Empirical Mode Decomposition with Gray-Level Co-occurrence models [J]. IEEE, Machine Vision and Application, 2003(2): 633 - 635.
- [8] Nunes J C, Guyot S, Delechelle E. Texture analysis based on local analysis of the Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. Machine Vision and Applications, 2005(16): 177 - 188.
- [9] Xiong C, Xu J, Zou J, Qi D. Texture classification based on EMD and FFT [J]. J Zhejiang Univ SCIENCE (A), 2006, 7(9): 1516 - 1521.
- [10] 刘忠轩,彭思龙. 方向 EMD 分解与其在纹理分割中的应用

- 用[J]. 中国科学 E 辑,信息科学,2005,35(2):113-123.
- [11] 徐冠雷,王孝通,徐晓刚,朱涛. 基于限邻域经验模式分解的多波段图像融合[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(3):225-228.
Xu G, Wang X, Xu X, Zhu T. Multi-band image fusion algorithm based on neighborhood limited empirical mode decomposition based[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(3):225-228. (in Chinese)
- [12] 徐冠雷,王孝通,徐晓刚,朱涛. 基于限邻域 EMD 的图像增强[J]. 电子学报,2006,34(9):99-103.
Xu G, Wang X, Xu X, Zhu T. Image enhancement algorithm based on neighborhood limited empirical mode decomposition based[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9):99-103. (in Chinese)
- [13] 张郁山,梁建文,胡聿贤. 应用 AR 模型处理 EMD 方法中的边界问题[J]. 自然科学进展,2003,13(10):1054-1059.
- [14] 邓拥军,王伟,钱成春等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理[J]. 科学通报,2001,46(3):257-263.
Deng Y, Wang W, Qian C, et al. The bound processing problem of EMD and Hilbert transform[J]. Science Bulletin, 2001, 46(3):257-263. (in Chinese)
- [15] 沈滨,彭思龙. 二维 EMD 的纹理分析及图像瞬时频率估计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(10):2345-2352.
Shen B, Cui F, Peng S. Bidimensional EMD for texture analysis and estimation of the instantaneous frequencies of an image [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(10):2345-2352. (in Chinese)
- [16] Liu Z, Peng S. Boundary processing of bidimensional EMD using texture synthesis [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1):33-36.
- [17] Damerval C, Meignen S, Perrier V. A fast algorithm for bidimensional EMD[J]. IEEE Signal Processing Letters, 12(10), 2005:701-704.
- [18] 徐冠雷,王孝通,徐晓刚等. 多分量到单分量可用 EMD 分解的条件及判据[J]. 自然科学进展,2006,16(10):1356-1360.
- [19] Thomas B, Pallek D, Sommer G. Riesz transforms for the isotropic estimation of the local phase of Moiré interferograms [A]. Proc. Mustererkennung, 22. DAGM-Symp [C]. Springer Verlag Press, London, UK, 2000:333-340.
- [20] 徐冠雷,王孝通,徐晓刚. 二象 Hilbert 变换[J]. 自然科学进展,2007,17(8):168-178.
- [21] Islam M K, Sumi A, Rahman M S. Analysis of temperature change under global warming impact using empirical mode decomposition[J]. International Journal of Information Technology, 2006, 3(2):131-139.
- [22] Norden E. Huang, Man-Li Wu, Wendong Qu, et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2003, 19:245-268.
- [23] Lemay M, Vesin J. QRST Cancellation Based on the Empirical Mode Decomposition[J]. Computers in Cardiology 2006, 33:561-564.
- [24] Han C M, Guo H, Wang C, et al. A new multiscale edge detection technique [A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. INSPEC Press, New York, 2002, 6:3402-3404.
- [25] Linderherd A. 2-D empirical mode decompositions-in the spirit of image compression [A]. Proceedings of the Royal Society A [C]. 2003, Orlando FL, SPIE Press, 459(2037):2317-2345.
- [26] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. Empirical Mode Decomposition As a Filter Bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):112-114.
- [27] Huang N E, Zheng S, Steven R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [A]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences [C]. London, The Royal Society Press, 454(1971), 1998:903-995.

作者简介:



徐晓刚 男,教授,1967年4月生于浙江永康,1999年大连理工大学获博士学位,研究领域包括:信号分析,图象处理,虚拟仿真等。
Email: xlgang@cad.zju.edu.cn



徐冠雷 男,1978年4月生于山东聊城,大连舰艇学院交通信息工程与控制专业博士生,研究方向为信号与图像处理。
Email: xgl86@163.com

王孝通 男,教授,1962年3月生于浙江义乌,1996年大连理工大学获博士学位,研究领域包括:信号分析,GIS,图象处理,虚拟仿真等。
Email: wxfm@dlut.edu.cn

秦绪佳 男,教授,1968年12月生于广西桂林,2001年大连理工大学获博士学位,研究领域包括:几何信号处理,计算机图形学等。
Email: qjx@zjut.edu.cn