

局域能量逐层提取的 LMD 模态混叠抑制方法

郭 枫

(中国人民解放军91550部队94分队,辽宁 大连 116023)

摘要:提出了一种基于局域能量逐层提取的局域均值分解(Local Mean Decomposition, LMD)模态混叠抑制方法。对待分析信号利用 LMD 得到一系列乘积函数(Product Function, PF),对各 PF 的能量进行积分,根据积分比值确定模态混叠导致的能量泄漏程度,并从具有模态混叠的高阶 PF 中移除下一阶 PF 的成分构成新的 PF,从原始信号中减去新的 PF 得到新的待处理信号,继续执行 LMD,直到所有 PF 频率成分各自独立,从而实现对模态混叠的抑制。仿真结果表明:算法可以有效抑制小频率比混合信号导致的模态混叠,在实际工程上具有一定推广应用价值。

关键词:LMD; PF; 模态混叠; 局域能量

本文引用格式:郭枫. 局域能量逐层提取的 LMD 模态混叠抑制方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016(12): 155 - 158.

Citation format:GUO Feng. LMD Mode Mixing Suppression Method by Layer Local Energy Extraction[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(12): 155 - 158.

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

文章编号:2096 - 2304(2016)12 - 0155 - 04

LMD Mode Mixing Suppression Method by Layer Local Energy Extraction

GUO Feng

(Unit 94 of the No. 91550th Troop of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: An improved algorithm based on local energy layer by local mean decomposition (LMD) layer extraction was proposed. The signal was decomposed to series Product Function (PF) by LMD and the local energy of each PF was obtained by integration. The leakage of energy level can be determined according to the local energy ratio, based on which the mode mixing component can be removed from the high order PF. The new PF was subtracted from the original signal and LMD was carried on repeatedly until all the PF was obtained. The improved LMD can ensure that all PF frequency components are independent of each other, so as to realize the suppression of mode mixing. The simulation results show that the algorithm can effectively overcome the mode mixing caused by near frequency signal in the multicomponent signal, and it has certain application value in practical engineering.

Key words: LMD; PF; mode mixing; local energy

以傅里叶变换为基础的经典谱估计方法在非平稳信号处理中表现出不足^[1],为了能够揭示非平稳信号内蕴的物理过程,时频分析技术得到了人们的重视。近年来,以局域均值分解(Local Mean Decomposition, LMD)和经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)为基础的局域波分析

方法^[2-3]得到了人们的重视,局域波分析方法从瞬时频率概念出发,在将非平稳信号分解为系列单分量后,利用希尔伯特谱给出信号的时频表示结果,从而打破了不确定性原理的约束,具有非常好的时频聚集性能。但是,到目前为止,LMD和EMD的数学理论基础尚不完备,在分解过程中都承受端

收稿日期:2016 - 07 - 22;修回日期:2016 - 08 - 25

作者简介:郭枫(1985—),女,硕士,助理工程师,主要从事装备试验数据处理研究。

点效应和模态混叠问题的影响。LMD 是 S. S. Jonathan 首先提出的一种将信号分解为乘积函数 (Product Function, PF) 的方法^[4], 类似于 EMD 但是又不同于 EMD。两者最主要的区别是, EMD 将信号分解为一系列具有隐含物理意义的 IMF, 而 LMD 将信号分解为一系列幅度函数与瞬时频率表示的 PF。从两者的适用性来说, EMD 更适用于瞬态信号或者是多个频率较为稳定的单分量组成的多分量信号, 而 LMD 更适用于具有调频信号特征的单分量组成的多分量信号^[5]。当待处理信号中含有小频率比信号或多个单分量或者是在信号中具有间歇性高频弱信号干扰时, EMD 会产生模态混叠^[6-7], 即同一阶 IMF 中含有多个分量的信息。实际应用中发现, 上述情况也会导致 LMD 产生模态混叠。由于局域波分析方法在信号分解后利用希尔伯特谱进行分析, 而希尔伯特谱仅适用于单分量信号, 模态混叠的存在导致瞬时频率求解的错误, 从而模糊了以局域波为基础的时频表示结果。针对 LMD 模态混叠问题, 相关研究人员将 EMD 模态混叠抑制的方法应用于 LMD 方法中, 证明同样具有良好的模态混叠抑制性能, 如文献[8]提出的总体局域均值分解法, 可以有效解决间歇性高频弱信号干扰导致的模态混叠问题。但是对于含有小频率比的多个单分量组成的多分量信号在 LMD 分解过程中产生模态混叠问题, 目前尚未见相关文献报道。而该类信号在工程上广泛存在, 典型的如飞行器试验中的遥测高低频振动信号、冲击信号等。本文针对 LMD 在处理含有小频率比单分量信号的多分量信号时的模态混叠现象进行了分析, 提出了一种基于局域能量逐层提取的 LMD 方法, 首先利用 LMD 得到一系列 PF, 对各 PF 的能量进行积分, 根据积分比值确定模态混叠导致的能量泄漏程度, 并从具有模态混叠的高阶 PF 中移除下一阶 PF 的成分构成新的 PF, 从原始信号中减去新的 PF 得到新的待处理信号, 继续执行 LMD, 直到所有 PF 频率成分各自独立, 从而实现对模态混叠的抑制, 最后用仿真信号对文中提出的方法进行了验证, 证明了算法的有效性。

1 LMD 与模态混叠

作为局域波的一种实现方法, LMD 不需要固定的基函数, 是一种自适应的信号分解方法。通过 LMD 可以将多分量信号分解为一系列乘积函数 PF, 每个乘积函数 PF 为一个包络信号和一个纯调频信号的乘积^[9]。如果每个 PF 均满足单分量条件, 那么在此基础上进行瞬时频率求解才有意义。LMD 的具体实现步骤可以总结如下^[10-11]:

1) 首先确定原始信号 $x(t)$ 所有局部极值点, 包括极大值点和极小值点, $n_{11}(k_l)$ ($l=1, 2, \dots, M$), 分别根据式(1)和式(2)求得局部幅值 $m_{11}(t)$ 和局部均值 $a_{11}(t)$ 。

$$m_{11}(t) = \frac{n_{11}(k_l) + n_{11}(k_{l+1})}{2} \quad (1)$$

$$a_{11}(t) = \frac{|n_{11}(k_l) - n_{11}(k_{l+1})|}{2} \quad (2)$$

2) 采用滑动平均对所有得到的均部均值与局部幅值进

行光滑处理, 将光滑的局域均值函数 $\tilde{m}_{11}(t)$ 从原始信号中分离出来, 并利用光滑局部幅值函数 $\tilde{a}_{11}(t)$ 进行归一化操作。

$$h_{11}(t) = x(t) - \tilde{m}_{11}(t) \quad (3)$$

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{\tilde{a}_{11}(t)} \quad (4)$$

3) 如果 $s_{11}(t)$ 不是一个区间 $[-1, 1]$ 上的纯调频信号, 则将 $s_{11}(t)$ 作为原始信号重复 n 次步骤 1) 和 2) 的操作, 直到满足要求为止, 瞬时相位和瞬时频率可以由式(5)和式(6)给出。

$$\varphi_1(t) = \arccos(s_{11}(t)) \quad (5)$$

$$f_1(t) = \frac{d\varphi_1(t)}{2\pi dt} \quad (6)$$

4) 所有局部幅值的乘积得到瞬时幅值

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t) \quad (7)$$

而首个函数乘积可以由式(8)给出

$$PF_1(t) = a_1(t)s_{1n}(t) \quad (8)$$

5) 将第一个 PF 分量从原始信号中分离出来

$$u_1(t) = x(t) - PF_1(t) \quad (9)$$

得到新的信号 $u_1(t)$ 作为原始信号重复步骤 1) ~ 4), 重复 k 次, 直到所有 $u_k(t)$ 都满足单调函数, 至此, 原始信号可以表示为 k 个 PF 分量与一个单调分量的和

$$x(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + u_k(t) \quad (10)$$

如果 LMD 能够完全分解, 即分解所得到的 PF 为纯调频信号与幅度信号乘积, 则瞬时幅值和瞬时频率可以准确获得, 那么可以在 LMD 的基础上进行时频分析, 获得采集得到的观测信号的时域和频域局域化信息。如果多分量信号中两个单分量成分频率非常接近, 那么在 LMD 过程中将会产生模态混叠, 在具有模态混叠的 PF 分量上求解瞬时相位和瞬时频率都会产生无法解释的结果。

以仿真信号为例说明 LMD 的模态混叠, 仿真信号由 3 个中心频率不同的正弦信号组成, 采样频率 $f_s = 2\ 000$ Hz, 正弦信号中心频率分别为 $f_1 = 100$ Hz、 $f_2 = 60$ Hz 和 $f_3 = 15$ Hz。

$$x(t) = 5\sin(2\pi f_1 t) + 3\sin(2\pi f_2 t) + \sin(2\pi f_3 t) \quad (11)$$

仿真信号时域波形和 LMD 分解结果如图 1 所示, 对应的仿真信号和各 PF 的频谱如图 2 所示。

从图 1 和图 2 中可知, LMD 分解得到的第一阶 PF 存在着严重的模态混叠, 即第一阶 PF 分量中含有第二阶 PF 的成分, 同时 LMD 得到了两个虚假分量, 这是由于分解过程中插值和拟合导致的能量泄漏, 在实际处理中可以去掉虚假分量, 因为能量泄漏产生的虚假分量量级很低。但是第一阶 PF 的模态混叠将导致第一阶 PF 无法直接求取瞬时相位和瞬时频率, 而第二阶 PF 由于部分信息被分解到第一阶 PF 之中, 能量泄漏严重, 本来为 3 的能量幅值仅剩 0.5 左右在第二阶 PF 中, 这直接导致对第二阶 PF 进行希尔伯特谱幅值求解时产生歧义。因此, 在进行时频分析之前必须消除该模态混叠。

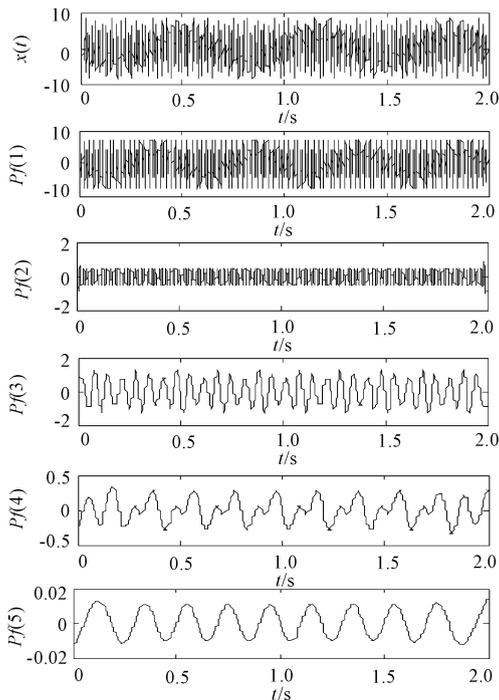


图1 LMD 分解结果

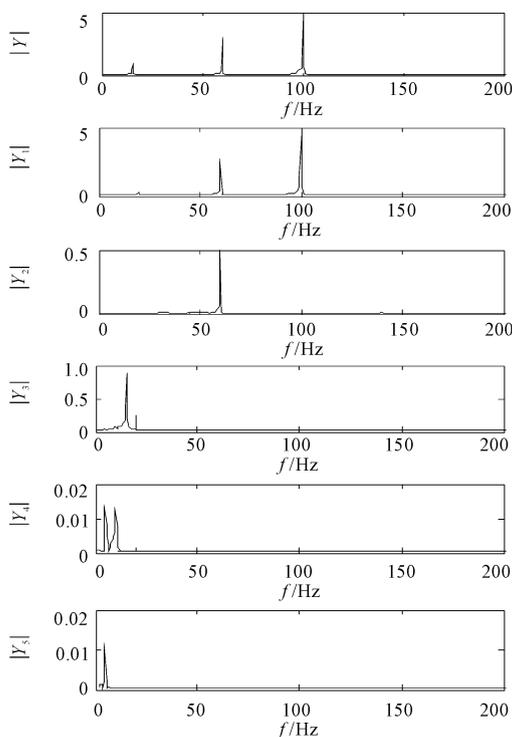


图2 信号和 PF 频谱

2 局域能量逐层提取的 LMD 方法

既然 LMD 在信号处理过程中获得的 PF 是依频率划分的,那么可以认为 LMD 同 EMD 类似,是一种多尺度筛分方法,即在频率上从高到低分解得到各 PF。对于 EMD 而言,

其分解尺度在对数频率域上是均匀尺度划分的,但是对于 LMD,该分解尺度规律尚未得到验证。模态混叠产生原因可以理解为 LMD 在信号的分解过程中分解尺度受限,导致相邻频率间能量串扰,因此从模态混叠的 PF 中移除相邻阶次的 PF 可以消除模态混叠。根据这一思想,给出一种局域能量逐层提取的 LMD 方法,具体实现步骤如下:

1) 设待分析多分量信号为 $x(t)$,将 $x(t)$ 进行 LMD 分解得到一系列 PF。

2) 对 $x(t)$ 和每个 PF 分别做傅里叶变换,观察每个 PF 中包含的频率信息内容,并依据设定的尺度 $a(f)$ 对频域进行划分,所选尺度 $a(f)$ 根据各 PF 覆盖的频率范围而定。

3) 按照尺度 $a(f)$ 对各阶尺度范围内的 $x(t)$ 的频谱进行积分,获得局域能量幅值 A_i ,同时对各 PF 进行频域积分,获得局域能量幅值 B_i 。

4) 在频率域判别最低阶次的模态混叠 PF,其相邻下一阶次 PF 的局域能量设为 B_j ,将其与 $x(t)$ 对应尺度的局域能量 A_j 进行比较,即 $\lambda_j = A_j/B_j$, λ_j 反映了相邻阶次能量泄漏的严重程度,则从模态混叠的 PF 中减去用局域能量比值修正的下一阶 PF,可以消除模态混叠,模态混叠 PF 相邻的最低阶次 PF 利用该比值直接修正,即:

$$\tilde{C}_j(t) = \lambda_j C_j(t) \quad (12)$$

$$\tilde{C}_{j-1}(t) = C_{j-1}(t) - (A_j - B_j)\tilde{C}_j(t) \quad (13)$$

利用式(12)修正了 $C_j(t)$ 的幅度,利用式(13)从 $C_{j-1}(t)$ 中移除了 $C_j(t)$ 的成分,从而实现对模态混叠的抑制。

5) 设

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \tilde{C}(t) \quad (14)$$

将 $\tilde{x}(t)$ 作为新的待分析多分量信号返回步骤 1) 继续执行 1)~4),直到所有模态混叠 PF 分量全部被消除。

3 仿真分析

以式(11)给出的仿真信号进行处理来验证文中提出方法的有效性。

由图 2 可以看出,对于仿真信号进行第一次 LMD 后,第一阶 PF 具有模态混叠,其包含了第二阶 PF 的成分,在频率域设尺度为 60Hz,求得局域能量积分比为 6.0,则对第二阶 PF 分量乘以 6 进行幅值修正,对第一阶 PF 减去 2.4 倍的第二阶 PF,移除第一阶 PF 中包含的第二阶 PF 信息,从而消除掉模态混叠。利用文中提出方法最终获得的 LMD 结果和对应的频谱分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看出,PILMD 方法得到 PF 在时域波形上已经消除了模态混叠的影响,对应的频谱如图 4 也表明在第一阶 PF 中仅仅含有少量的相邻第二阶 PF 成分,对后续的时频处理影响可以忽略,因此证明文中提出的局域能量逐层提取改进的 LMD 方法在处理含有小频率比单分量的多分量信号时,可以有效地抑制模态混叠,获得较为理想的分解结果。

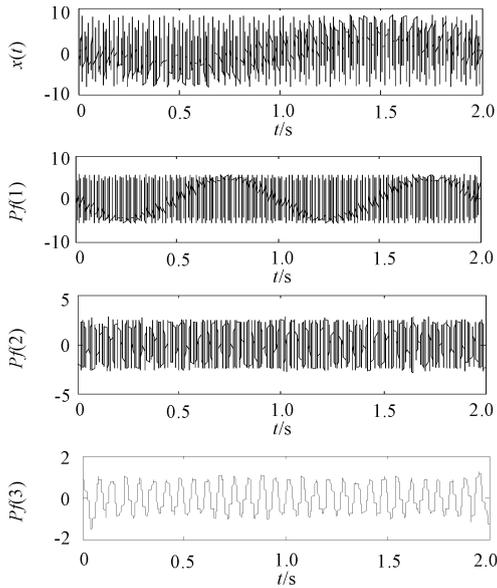


图3 改进 LMD 分解结果

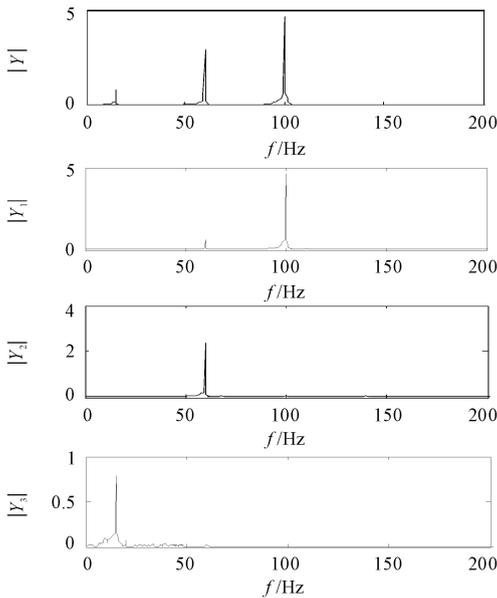


图4 改进 LMD 的 PF 频谱

4 结论

本文通过对 LMD 模态混叠的分析,提出了依据频率域尺度划分的局域能量逐层提取改进 LMD 方法,通过相邻阶次 PF 耦合信息的逐层提取,有效改善了 LMD 模态混叠,使

分解得到的各阶次 PF 具有了单分量性质,为后续时频分析奠定了基础。但是,LMD 产生模态混叠的原因以及数学解释,有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李振兴. 细化 FFT 的短时傅立叶变换方法[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(2): 133-135, 141.
- [2] 李琳, 张永祥, 明延锋. 改进的 LMD 方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 183-186.
- [3] 黎恒, 李智, 莫玮. 低采样率下经验模态分解性能提升研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 185-190.
- [4] 王衍学, 何正嘉, 訾艳阳, 等. 基于 LMD 的时频分析方法及其机械故障诊断应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 9-12.
- [5] SMITH J. S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of Royal Society Interface, 2005(2): 443-454.
- [6] 肖琰, 殷福亮. 解相关 EMD: 消除模态混叠的新方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 25-29.
- [7] 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.
- [8] 李慧梅, 安钢, 黄梦. 总体局域均值分解法在坦克变速箱滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(2): 37-42.
- [9] 程军圣, 杨怡, 杨宇. 基于 LMD 的能量算子解调机械故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(6): 915-919.
- [10] 宋海军, 黄传金, 刘宏超, 等. 基于改进 LMD 的电能质量扰动检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1700-1708.
- [11] 杨武. 基于 LMD 的 AR 模型在旋转机械故障诊断中的应用[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- [12] 周颖涛, 周绍骑, 姚远航. 减少模态混叠的改进 EEMD 算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015(1): 111-114.

(责任编辑 唐定国)