

基于经验模式分解的混沌干扰下谐波 信号的提取方法^{*}

李鸿光[†] 孟 光

(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030)

(2003 年 8 月 15 日收到, 2003 年 11 月 18 日收到修改稿)

由混沌信号和谐波信号组合而成的复杂信号的分离方法一直受到关注. 利用经验模式分解方法, 依据任何信号由不同的固有简单振动模态组成的概念, 将由混沌信号和谐波信号组合而成的复杂信号分离为不同的内在模态函数, 并从中分解出谐波信号. 通过利用 Duffing 方程产生的混沌信号进行的仿真实验, 结果都表明该方法在一定参数范围内非常有效.

关键词: 经验模式分解, 混沌, 信号处理

PACC: 0540, 0545

1. 引 言

自然现象中有许多可观测的混沌信号, 如海杂波信号和心电信号等. 另外, 混沌信号如今也可用于完成某种专门功能, 如保密通信或电子对抗等^[1,2]. 其中, 将混合在混沌信号中的谐波信号分离出来是混沌信号处理领域中重要的课题. 在这一领域的研究中, Leung^[3]利用最小相空间体积方法研究了嵌入在混沌噪声中 AR 模型的参数估计; Haykin^[4]利用人工神经网络的方法研究了在海洋杂波背景下的小目标信号提取; Short^[5-7]利用混沌预测的方法考察了混沌通信系统中信号的提取; Wang 等人^[8,9]依据混沌吸引子固有的几何性质, 借助微分流形切空间的概念, 提出一种从强混沌干扰中提取被掩蔽的谐波信号的方法.

一种被称为经验模式分解(EMD)方法于 1998 年由 Huang^[10]提出后, 经验证在很多方面的应用效果都优于其他的信号处理方法^[10,11]. 在信号分析中, 时间尺度和随时间尺度分布的能量是信号的最重要的两个参数, EMD 方法基于信号的局部特征时间尺度, 能把复杂的信号函数分解为有限的内在模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)之和, 每一 IMF 所包含的频率成分不仅与采样频率有关, 而且

最重要的是随信号本身变化而变化, 因此 EMD 方法是自适应的信号处理方法, 非常适于非线性和非平稳过程, 具有很高的信噪比.

本文基于 EMD 理论, 依据任何信号由不同的固有简单振动模态组成的概念, 将由混沌信号和谐波信号组合而成的复杂信号分离为不同的 IMF, 并从中分解出谐波信号. 本文首先简单介绍了 EMD 方法, 然后利用 Duffing 方程产生的混沌信号进行的仿真实验, 表明该方法简单有效.

2. EMD 方法简介^[10]

EMD 方法假设: 任何信号或数据由不同的固有简单振动模态组成, 每一模态不论是线性或是非线性的, 都具有相同数量的极值点和零交叉点, 在相邻的两个零交叉点之间只有一个极值点, 任何两个模态之间相互独立, 这样任何一个信号就可以被分解为有限个 IMF 之和, 其中任何一个 IMF 都满足以下条件:

1) 整个数据段内, 极值点的个数和零交叉点的个数必须相等或相差最多不能超过一个.

2) 任何一点, 由局部极大值点形成的包络线和由局部极小值点形成的包络线的平均值为零, 在实

^{*} 国家“十五”科技攻关计划重点项目(批准号 2001BA204B05-KHKZ0009) 国家自然科学基金重点项目(批准号 50335030)和国家教育部博士点基金资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: hgli@sjtu.edu.cn

际运用时,其平均值的绝对值小于某一个很小的数即可.

与简单的单调函数相比,一个 IMF 代表了一个简单的振动模态.运用 IMF 可以把任何信号 $x(t)$ 按如下步骤进行分解:

1) 确定信号所有的局部极值点,然后用三次样条线将所有的局部极大值点连接起来,形成上包络线.

2) 用三次样条线将所有的局部极小值点连接起来,形成下包络线,上下包络线应该包络所有的数据点.

3) 上下包络线的平均值记为 m_1 , 求出

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (1)$$

如果 h_1 是一个 IMF, 那么 h_1 就是 $x(t)$ 的第一个分量.

4) 如果 h_1 不满足 IMF 的条件, 把 h_1 作为原始数据, 重复 1) 2) 3), 得到上下包络线的平均值 m_{11} , 再判断 $h_{11} = h_1 - m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件, 如不满足, 则重循环 k 次, 得到 $h_{(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$, 使得 h_{1k} 满足 IMF 的条件. 记 $c_1 = h_{1k}$, 则 c_1 为信号 $x(t)$ 的第一个满足 IMF 条件的分量.

5) c_1 从 $x(t)$ 中分离出来, 得到

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (2)$$

将 r_1 作为原始数据重复以上过程, 得到 $x(t)$ 的第二个满足 IMF 条件的分量 c_2 , 重复循环 n 次, 得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 IMF 条件的分量. 当 r_n 成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时, 循环结束.

因此, 可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为 n 个 IMF 和一个残量 r_n 之和. 其中分量 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 分别包含了信号从高到低不同频率段的成分, 每一频率段所包含的频率成分不同, 而且随信号 $x(t)$ 变化而变化, 而 r_n 则表示了信号 $x(t)$ 的中心趋势.

3. 仿真实验与讨论

Duffing 方程是人们所熟悉的具有重要应用背景的非线性振子, 它具有丰富的动力学行为, 这些动力学行为至今还是人们研究的重要内容. 考虑 Duffing 方程

$$\ddot{x} + c\dot{x} - \omega_0^2 x + dx^3 = P \cos(\omega t), \quad (3)$$

其中 ω_0 为系统固有圆频率, c 为系统阻尼, d 为非

线性参数, P 与 ω 分别为外激励幅值和外激励频率. 另外, 谐波信号为 $y(t) = A \sin(\omega_h t)$. 本文利用经典的四阶 Runge-Kutta 对方程 (3) 进行数值求解, 取 $x(0) = 1.0$. 为了得到理想的数值结果, 需要将开始的数百个周期略去, 这样才能近似得到不受初始条件影响的混沌时间信号 $x(k)$. 令谐波信号 $y(k)$ 与 $x(k)$ 组合一个复杂信号, 即

$$z(k) = y(k) + x(k), \quad (4)$$

通过对 $z(k)$ 做 EMD, 可以从中分离出与 $y(k)$ 同频率和同相位的谐波信号.

3.1. 仿真实验 1

取 Duffing 振子的参数 $c = 0.05$, $\omega_0^2 = 0.2$, $d = 1$, $\omega = 1.0$ 和 $P = 27.5$, 谐波信号的参数 $A = 1.0$ 和 $\omega_h = 0.5$, 采样间隔为 $\Delta t = \pi/400$, 接收信号数据长度 $N = 20000$, 并过滤掉前 100 个周期的信号.

图 1 给出相应的混沌信号 $x(k)$, 谐波信号 $y(k)$ 以及两者组合后的复杂信号 $z(k)$, 由图 1 可见, 与混沌信号相比, 谐波信号要小很多. 单从组合信号 $z(k)$ 的波形上看, 无法觉察到其中隐藏的谐波信号. 通过 EMD 方法可以得到 $z(k)$ 的三个内在模态函数 c_1, c_2 和 c_3 , 其中 c_3 为从这段接收信号中分离出的谐波信号. 图 2 给出输入谐波信号 y 和分解后的谐波信号 c_3 . 与输入谐波信号 y 相比, 输出谐波信号 c_3 的幅值有一定的衰减. 从图 2 也可以看出, 输出谐波信号 c_3 的两端变化较大, 这主要是由于在应用 EMD 方法, 构成上下包络线的三次样条函数在序列的两端会出现发散现象.

3.2. 仿真实验 2

取 Duffing 振子的参数 $c = 0.05$, $\omega_0^2 = 0.2$, $d = 1$, $\omega = 1.1$ 和 $P = 10.0$, 谐波信号的参数 $A = 1.0$ 和 $\omega_h = 0.3$, 采样间隔为 $\Delta t = \pi/400$, 接收信号数据长度 $N = 20000$, 并过滤掉前 100 个周期的信号.

图 3 给出相应的混沌信号 $x(k)$, 谐波信号 $y(k)$ 以及两者组合后的复杂信号 $z(k)$. 由图 3 可见, 谐波信号较混沌信号小. 从组合信号 $z(k)$ 的波形上看, 也无法觉察到其中隐藏的谐波信号. 通过 EMD 方法可以得到 $z(k)$ 的三个内在模态函数 c_1, c_2 和 c_3 , 其中 c_3 为从这段接收信号中分离出的谐波信号. 图 4 给出输入谐波信号 y 和分解后的谐波信号 c_3 . 输入谐波信号 y 的幅值和输出谐波信号 c_3 的幅值相差不大.

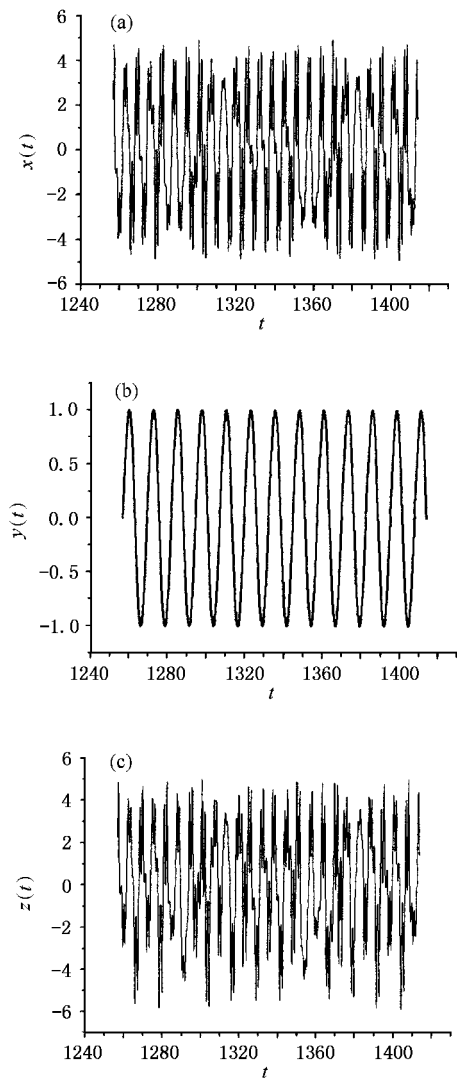


图 1 混沌信号、谐波信号和组合后的信号

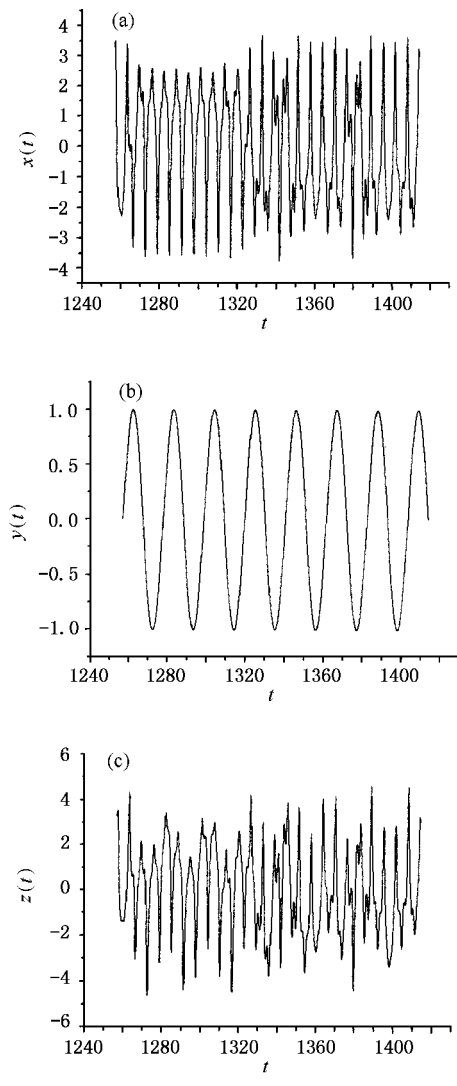


图 3 混沌信号、谐波信号和组合后的信号

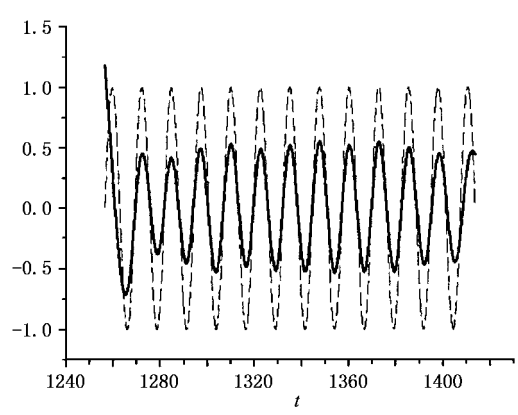


图 2 输入的谐波信号 y 和分解后的谐波信号 c_3 —— 为 $y(t)$, --- 为 $c_3(t)$

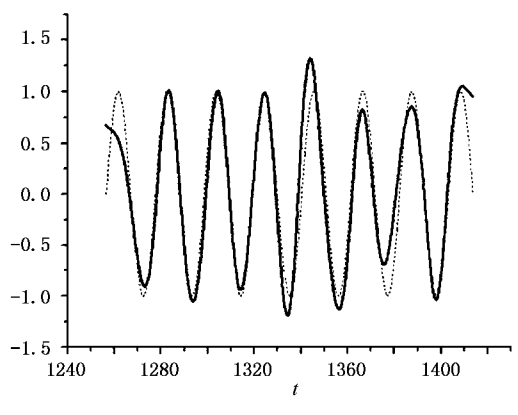


图 4 输入的谐波信号 y 和分解后的谐波信号 c_3 为 $y(t)$, —— 为 $c_3(t)$

3.3 仿真实验 3

由于 EMD 方法要寻找原始信号的局部极值点,进而求出上下包络线,如果采样频率发生变化,则得到的数据的局部极值点的个数会有所不同.为了考察局部极值点数目发生的变化是否会影响到谐波信号的提取,取 Duffing 振子的参数为 $c = 0.05$, $\omega_0^2 = 0.2$, $d = 1$, $\omega = 1.0$ 和 $P = 27.5$,谐波信号参数 $A = 1.0$ 和 $\omega_h = 0.3$,采样间隔为 $\Delta t = \pi/200$,接收信号数据长度 $N = 20000$,并过滤掉前 100 个周期的信号.

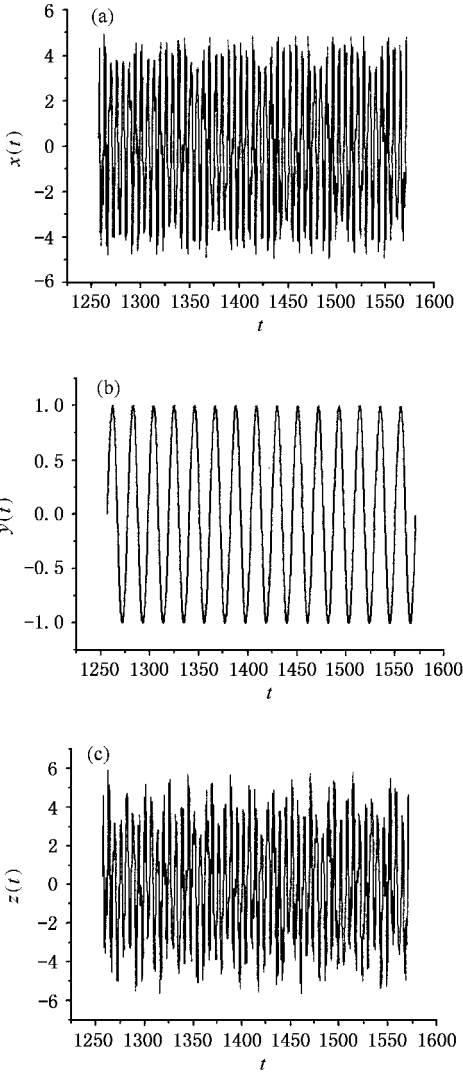


图 5 混沌信号、谐波信号和组合后的信号

图 5 给出相应的混沌信号 $x(k)$ 、谐波信号 $y(k)$ 以及两者组合后的复杂信号 $z(k)$. 由图 5 可见,谐波信号较混沌信号小,从组合信号 $z(k)$ 的波

形上看,也无法觉察到其中隐藏的谐波信号.通过 EMD 方法可以得到 $z(k)$ 的三个内在模态函数 c_1 , c_2 和 c_3 ,其中 c_3 为从这段接收信号中分离出的谐波信号.图 6 给出输入谐波信号 y 和分解后的谐波信号 c_3 .除了在边界外,输入谐波信号 y 和输出谐波信号 c_3 符合得很好.

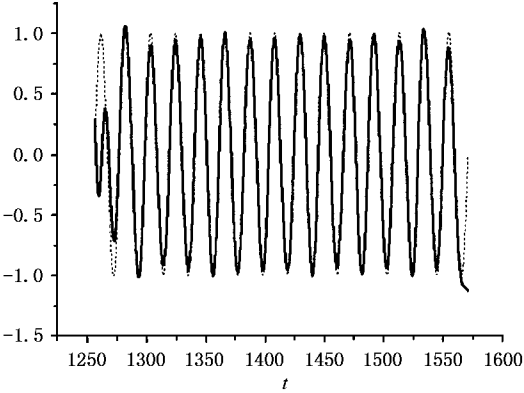


图 6 输入的谐波信号 y 和分解后的谐波信号 c_3 图注同图 4

通过上述三个实验,我们发现分解后的信号 c_3 总是能够与输入的谐波信号 y 对应,究其原因,是因为通过 EMD,可以将多分量信号分解成单分量信号.对应的 IMF 通常从高频到低频分布,而在本文中输入的谐波信号的频率要低于混沌信号的中心频率范围.因此通过 EMD,头两个 IMF (c_1 和 c_2) 反映

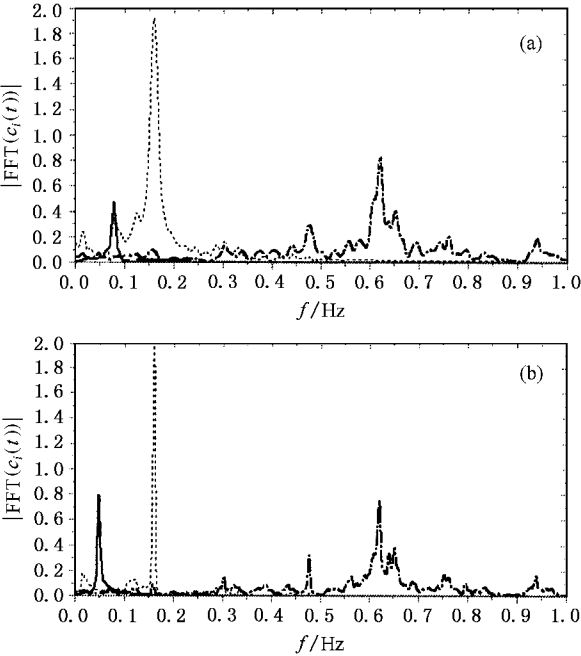


图 7 实验 1 和实验 3 中 c_1 (---), c_2 (.....) 和 c_3 (——) 的谱图

代表该混沌信号的特征,而 c_3 则代表了输入谐波信号的特征.在图 7 中可以看出以上特点.输入的谐波分量的频率小于该混沌信号的频率分布范围,则通过分解后, c_3 可对应应该输入的谐波信号.另外从图 7 也可以看出,实验 3 的输入谐波的圆频率为 0.3Hz,实验 1 的输入谐波的圆频率为 0.5Hz,实验 3 分离出来的 c_3 效果更加理想.

4. 结 论

本文基于 EMD 理论,依据任何信号由不同的固

有简单振动模态组成的概念,将由混沌信号和谐波信号组合而成的复杂信号分离为不同的 IMF,并从中分解出谐波信号.本文所提出的算法具有实现简单、算法鲁棒的优点.在仿真数据的验证中,利用 Duffing 振子在不同参数下产生的混沌信号对谐波信号进行屏蔽,然后利用 EMD 方法提取谐波信号.研究表明,当输入的谐波分量的频率小于该混沌信号的频率分布范围,通过使用 EMD 方法,分解出来的 c_3 对应该输入的谐波信号.

[1] Kuang J Y , Deng K and Huang R H 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 1856
(in Chinese) 匡锦瑜、邓 昆、黄荣怀 2001 物理学报 **50** 1856]

[2] Yang T and Shao H H 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 742 (in Chinese)
[杨 涛、邓惠鹤 2002 物理学报 **51** 742]

[3] Leung H and Huang X P 1996 *IEEE Trans . Sig . Proc .* **44** 2456

[4] Haykin S and Li X B 1995 *Proc . IEEE* **83** 94

[5] Short K M 1994 *Int . J . Bif . Chaos* **4** 957

[6] Short K M 1996 *Int . J . Bif . Chaos* **6** 367

[7] Short K M 1997 *Int . J . Bif . Chaos* **7** 1579

[8] Wang F P , Guo J B , Wang Z J , Xiao D C and Li M T 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 1019 (in Chinese) 汪芙平、郭静波、王赞基、萧达川、李茂堂 2001 物理学报 **50** 1019]

[9] Wang F P , Wang Z J and Guo J B 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 474
(in Chinese) 汪芙平、王赞基、郭静波 2002 物理学报 **51** 474]

[10] Huang N E *et al* 1998 *Proc . Roy . Soc . London A* **454** 899

[11] Huang N E *et al* 1999 *Annu . Rev . Fluid Mech .* **31** 417

Harmoic signal extraction from chaotic interference based
on empirical mode decomposition^{*}

Li Hong-Guang Meng Guang

(State Key Laboratory of Vibration , Shock and Noise , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200030 , China)

(Received 15 August 2003 ; revised manuscript received 18 November 2003)

Abstract

An approach of the harmonic signals extraction from chaotic interference is proposed. Based on empirical mode decomposition and the concept that any signals are composed of a series of the simple intrinsic modes , and the chaotic interference signals are decomposed to a series of intrinsic mode functions , the harmonic signals can be extracted. Simulation results show the approach is satisfactory.

Keywords : empirical mode decomposition , chaos , signal processing

PACC : 0540 , 0545

^{*} Project supported by the Foundation for Key Science and Technology Problems in the “ Tenth Five-Year Plan ” of China(Grant No. 2001BA204B05-KHKZ0009) ,the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50335030) ,and the Doctorate Foundation from the Ministry of Education of China.