

光纤陀螺基于 SNR 检测的 EMD 滤波方法

姬忠校^{1,2}, 马彩文¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 光纤陀螺的输出信号是一种非线性、非平稳的随机信号。针对光纤陀螺信号的特点采用经验模分解 (EMD) 滤波法对陀螺输出信号进行滤波存在一个如何重构信号的问题, 为此提出了基于信噪比检测的 EMD 滤波法。该方法通过连续检测相邻两个重构信号信噪比提高的程度来确定滤波后的输出信号。实验结果表明, 该法能有效消除光纤陀螺信号中的噪声, 并为 EMD 滤波法重构信号提供了一个客观的判断方法, 且无需任何先验知识。

关键词: 光纤陀螺; 经验模分解; 信噪比; 重构信号; 随机信号

中图分类号: TN911.74 **文献标识码:** A

Filtering Method with EMD Based on SNR Testing in FOG

Ji Zhongxiao^{1,2}, Ma Caiwen¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China,

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The output signal of fiber-optic gyroscope (FOG) is a kind of nonlinear, nonstationary random signal. How to reconfigure the signal is a problem for the output signal being filtered with empirical mode decomposition (EMD) filtering method, therefore the filtering method with EMD based on SNR testing is proposed in this paper. The filtered output signal is determined by testing continuously the enhanced grade of SNR between the two adjacent reconfiguration signal. The experimental results shows that this method can efficiently eliminate the noise in the output signal of FOG, and is an objective judgment means for the reconfiguring signal of EMD filtering method without any prior knowledge about noise in FOG.

Key words: fiber-optic gyroscope; empirical mode decomposition; SNR; reconfiguring signal; random signal

0 引言

光纤陀螺是一种基于光学 Sagnac 效应的新型全固态角速率传感器, 是构成惯性导航与姿态控制系统的核心部件。光纤陀螺输出信号中的随机噪声和漂移是影响光纤陀螺性能的主要因素, 其中随机噪声主要表现为白色高斯噪声, 而漂移部分在输出信号中表现为趋势性变化, 是典型的非平稳随机过程^[1]。受器件非线性作用的影响, 光纤陀螺的输出信号具有弱非线性、非平稳随机信号的统计特性^[2]。采用滤波技术消除噪声是提高陀螺精度的重要技术手段。

传统的滤波方法是基于数学建模(如 ARMA 模型)的卡尔曼滤波^[3-4]法和基于小波变换^[5]或小波包^[6]的滤波方法。由于光纤陀螺信号中漂移和噪声

的统计特性是随时间和非线性变化的, 因此难以建立起准确理想的数学模型; 而基于小波滤波方法的缺点是其小波基函数一经选定就固定不变, 不能有效适应所有类型信号的变化^[7]。

经验模分解 (EMD) 滤波技术是一种新的适合非线性、非平稳随机信号的自适应滤波方法。该方法将信号中不同时间尺度的振动或趋势逐级分解, 产生一系列具有不同时间尺度的数据序列, 每一级序列代表一个本征模函数 (IMF), 选择连续不同的 IMF 进行线性组合可以得到不同频段的滤波数据。该方法的关键在于如何选择合适的连续 IMF 进行组合重构信号, 目前主要依靠主观经验来进行选择^[7]。为此提出了基于信噪比 (SNR) 检测的 EMD 滤波方法, 该方法为 EMD 滤波重构信号提供了一

收稿日期: 2011-11-17

作者简介: 姬忠校 (1977-), 男, 河南安阳人, 工程师, 博士生, 主要从事光纤陀螺系统及其信号处理的研究。E-mail: jzx1230@sina.cn

个客观的判断方法且无需任何先验知识。

1 EMD 滤波原理

1.1 IMF 的定义

EMD 将信号分解为若干 IMF,不同 IMF 表示了信号中不同时间尺度的局部特征,而每一级 IMF 必须满足以下两个条件^[7]:

1) 在整个信号范围内,函数的极大、极小值点的数目与过零点的数目相等或至多相差一个。

2) 在任何时刻,函数极大值构成的信号包络线与极小值构成的信号包络线的均值必须为 0。

满足条件的 IMF 代表了信号内在的一种振动模式。

1.2 EMD 分解过程

EMD 分解信号的本质是在不同时间尺度上筛选 IMF 的过程。设原始信号为 $x(t)$,则 IMF 筛选过程的步骤^[8]为:

1) 确定 $x(t)$ 所有局部极大值和极小值,用 3 次样条函数分别对极大值和极小值作曲线拟合,得到 $x(t)$ 的上、下包络线,从 $x(t)$ 提取出上下包络线的均值曲线 m_1 ,即

$$x(t) - m_1 = h_1 \tag{1}$$

若残余信号 h_1 满足 IMF 的条件,则 h_1 记为 c_1 ;若 h_1 不满足 IMF 条件,则把 h_1 作为新的原始信号,重复 k 次步骤 1) 过程得到新的均值曲线 m_{1k} ,每次判断新的残余信号 h_{1k} 是否满足 IMF 的条件。

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \tag{2}$$

直到 h_{1k} 满足 IMF 的条件,此时将 $c_1 = h_{1k}$ 作为信号 $x(t)$ 的第 1 级 IMF 分量,其包含了信号中最小时间尺度的振动模式,表示信号 $x(t)$ 中的高频部分。

2) 将 c_1 从 $x(t)$ 分离出来得到一个余项 r_1 。

$$r_1 = x(t) - c_1 \tag{3}$$

余项 r_1 包含了信号 $x(t)$ 中相对低频的部分。

3) 将余项 r_1 作为原始信号,不断重复步骤 1)、2) 过程,即

$$r_n = r_{n-1} - c_n \tag{4}$$

直到余项 r_n 为一个单调函数,最后整个筛选过程停止,此时可获得 n 个 IMF (c_1, c_2, \dots, c_n)。最终原始信号 $x(t)$ 可表示为 r_n 与 c_i 的线性组合,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \tag{5}$$

式中 r_n 为原始信号中的趋势项,而各个 IMF 分量 (c_1, c_2, \dots, c_n) 则分别包含了原始信号中从高到低不

同频率段的成分。

1.3 EMD 滤波法

从 IMF 筛选的过程看,EMD 分解过程总是不断提取信号中的高频部分,即 c_i 总是包含比 c_{i-1} 更低的频率部分,因此通过选择不同连续的 IMF 进行线性组合可得到不同频段的信号,所以 EMD 滤波法可等效为不同带宽的滤波器组^[9]。在这一意义下,高通滤波器表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^k c_i \quad 1 \leq k < n \tag{6}$$

带通滤波器表示为

$$x(t) = \sum_{i=k_1}^{k_2} c_i \quad 1 < k_1 < k_2 < n \tag{7}$$

低通滤波器表示为

$$x(t) = \sum_{i=k}^n c_i + r_n \quad 1 < k \leq n \tag{8}$$

由于 EMD 分解过程并非正交分解,式中参数 k, k_1, k_2 的选择需要根据具体信号的特征凭主观经验选定,这也是经验模分解名称的由来。

2 基于 SNR 检测的 EMD 滤波法

设陀螺信号中的噪声是一加性白色噪声,则光纤陀螺输出信号的模型可表示为

$$y(t) = s(t) + n(t) + B \tag{9}$$

式中: $s(t)$ 为反映陀螺动态特征的期望信号; $n(t)$ 为陀螺信号中的噪声; B 为陀螺零偏。信号 $y(t)$ 的变化趋势主要取决于期望信号 $s(t)$ 的变化,而噪声 $n(t)$ 表现为在期望信号 $s(t)$ 上的波动, $s(t)$ 的变化相对 $n(t)$ 是一低频信号。因此在 EMD 分解过程中,期望信号 $s(t)$ 的能量更多地集中在 k 级表示低频部分的 IMF 中,而噪声 $n(t)$ 能量则更多地集中在 $k-1$ 级表示相对高频部分的 IMF 中,所以重构信号 $x_k(t)$ 应比重构信号 $x_{k-1}(t)$ 具有更高的 SNR,即

$$SNR(x_k) > SNR(x_{k-1}) \tag{10}$$

计算相邻两个重构信号的均方误差 MSE,采用 $d_{k-1,k}$ 来检测信噪比提高的程度,即

$$d_{k-1,k} \triangleq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_{k-1}(t_i) - x_k(t_i)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [c_k(t_i)]^2 \tag{11}$$

式中 N 为信号的数据长度。式(11)表明当 $d_{k-1,k}$ 达到最大值时,重构信号 $x_k(t)$ 应具有最大的信噪比。因此重构信号 $x_k(t)$ 的等级 k 可按下式来确定:

$$k = \arg \max \{d_{k-1,k}\} \quad 1 \leq k \leq n \quad (12)$$

式(11)、(12)表明,期望信号 $s(t)$ 的能量主要集中在一定时间尺度内振动模式最大的 IMF 中,因此式(11)提供了确定重构信号 $x_k(t)$ 的 IMF 等级 k 的方法。通过确定 k 值即可按照式(8)重构陀螺的输出信号,从而实现信号的滤波功能。

3 实验

实验中采用某型光纤陀螺动态情况下的输出信号作为滤波实验的对象。图 1 为陀螺动态输出信号。采用 EMD 分解后的 IMF、残余项如图 2 所示。

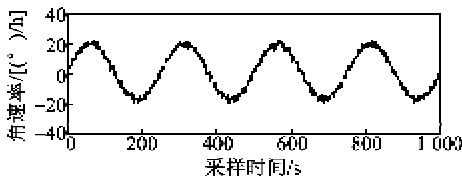


图 1 陀螺动态输出信号

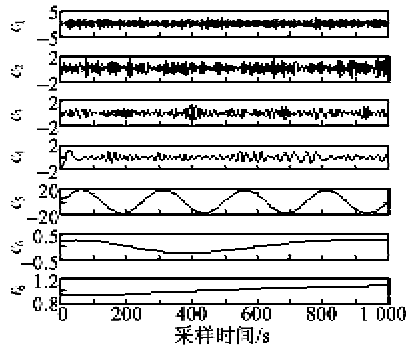


图 2 陀螺动态信号的 EMD 分解

采用式(11)检测到的相邻两个重构信号信噪比提高程度 d 的变化,如图 3 所示。图中表明反映陀螺动态特征的期望信号能量主要集中在第 5 级 IMF 中。

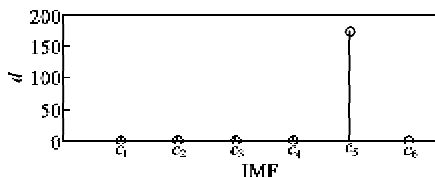


图 3 相邻两个重构信号 d 的变化

按照式(8)重构的陀螺输出信号如图 4 所示。通过对比图 1、4 可以看出,滤波后的信号与陀螺的动态特征非常接近。

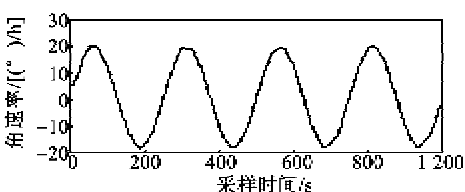


图 4 基于 SNR 检测的 EMD 滤波后的动态信号

图 5 为滤波前后陀螺信号功率谱密度 (PSD) 的变化。由图可见,滤波后的信号在中高频的噪声下降约 20 dB,提高了陀螺信号的信噪比。

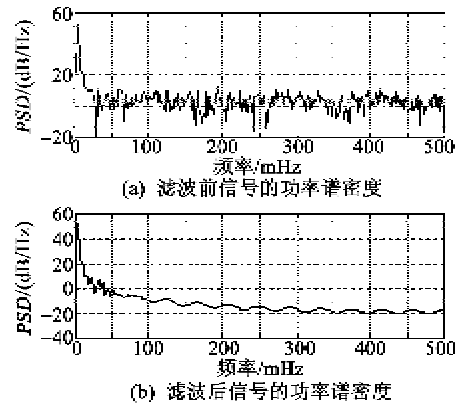


图 5 滤波前后信号的功率谱密度对比

4 结束语

基于 SNR 检测的 EMD 滤波方法为如何选择 IMF 重构信号提供了一个客观的判断方法。由于 EMD 分解过程和 SNR 检测过程完全由信号内在的一定时间尺度振动模式 IMF 决定,因此该过程无需任何关于信号的先验知识,是一种完全由数据驱动的自适应滤波算法。从陀螺输出信号的滤波效果来看,该方法能有效地区别陀螺输出中的期望信号和噪声,对提高光纤陀螺的精度作用显著。

参考文献:

- [1] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 刘颖, 李言, 徐金涛. 一种多算法融合的实时滤波在光纤陀螺中的应用[J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1116-1119.
LIU Yin, LI Yan, XU Jintao. Application of a multi-algorithm fusion real time filter in FOGs[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(6): 1116-1119.
- [3] 徐帆, 马广富. 基于 ARMA 模型的光纤陀螺随机漂移滤波方法研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(2): 31-36.
XU Fan, MA Guangfu. Investigation on filter method of FOG drift data based on ARMA model[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(2): 31-36.
- [4] 王新龙, 陈涛, 杜宇. 基于 ARMA 模型的光纤陀螺漂移数据建模方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 5-11.
WANG Xinlong, CHEN Tao, DU Yu. The drift method of fiber optic gyros based on the ARMA model[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 5-11.

(下转第 838 页)