

文章编号:1004-2474(2012)03-0359-03

基于提升小波的 MEMS 陀螺去噪方法研究

刘宇,贺涛,段耀宇,李静,曾燎燎

(重庆邮电大学 光纤通信重点实验室,重庆 400065)

摘要:微机电系统(MEMS)陀螺的随机漂移误差是传感器的主要误差,传统硬、软阈值去噪法在去噪效果和实时性方面存在不足。该文从提升小波变换的基本理论出发,分析了提升小波阈值去噪原理,提出了基于提升小波的改进阈值去噪算法,并结合 MEMS 陀螺输出数据,并对硬、软阈值去噪法与改进阈值去噪法的仿真实验进行比较分析。仿真结果表明,改进阈值去噪法获得了更高的信噪比 83.5327 dB,其去噪效果明显优于硬、软阈值,且运算速度较快,更适合实际运用。

关键词:微机电系统(MEMS)陀螺仪;提升小波;改进阈值;去噪

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Study on De-noising Method in MEMS Gyroscope Based Lifting Wavelet

LIU Yu, HE Tao, DUAN Yaoyu, LI Jing, ZENG Liaoliao

(Key Lab. of Optics Fiber Communication, Chongqing University of posts and telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The random shift error of MEMS gyroscope is the main error of this kind of sensor and the conventional de-noising method with the hard and soft threshold has some shortages in the de-noising effect and the real-time ability. In this work, the de-noising principle of the lifting wavelet threshold has been analyzed based on the basic theory of the lifting wavelet transform and an improved threshold de-noising method based on the lifting wavelet has been proposed. Combining with MEMS gyroscope output data, the simulation experiments of the de-noising method with hard and soft threshold and the improved threshold de-noising method have been compared and analyzed. The results showed that the higher signal-noise ratio of 83.5327 dB has been obtained by using the improved threshold de-noising method. Moreover, the method proposed in this work has better de-noising effect and faster process speed comparing with the conventional de-noising method with the hard and soft threshold, thus is more suitable for the applications.

Key words: MEMS gyroscope; lifting wavelet; improved threshold; de-noising

0 引言

微机电系统(MEMS)陀螺仪具有体积小,质量轻,成本低,可靠性高,易于智能化和集成化等一系列优点,在军用和民用都得到了广泛应用。在实际应用中,大多数 MEMS 陀螺仪都属于中低精度器件,主要原因是输出信号中随机噪声含量较大^[1]。MEMS 陀螺随机漂移误差主要受弱非线性,慢时变性,且极易受外部环境等不确定性因素的影响,不能用简单的方法进行补偿^[2]。当前, MEMS 陀螺去噪法有卡尔曼滤波、粒子滤波、小波滤波等。卡尔曼滤波常因误差模型建立的不准确而使系统的滤波精度不高,甚至造成滤波器发散,使滤波结果最终失真^[3];粒子滤波可很好地抑制信号中非线性噪声,但却存在粒子退化现象;小波变换以其优良的多分辨

率特性而适合非平稳信号的降噪处理,特别是利用小波滤波不需要建立系统的误差模型,这使其在理论上非常适合于 MEMS 陀螺仪信号处理^[4]。与传统小波相比,提升小波具有计算方法更简单,不需要额外内存,可实现整数小波变换等特点,在实现信号去噪处理方面速度更快^[5]。针对传统小波阈值去噪法的不足,本文提出了基于提升小波变换的改进型阈值去噪方法,通过实验数据仿真分析,获得了较好的降噪效果和实时性。

1 MEMS 陀螺仪的数学模型

通常, MEMS 陀螺漂移主要由常值分量、周期分量和随机漂移组成,其漂移模型为

$$E(t) = E_0 + A \sin(ft + B_0) + \sigma n(t) \quad (1)$$

式中: E_0 为陀螺常值零偏; A 为周期分量的幅值; f

收稿日期:2011-09-21

基金项目:重庆市教委科研基金资助项目(KJ110507)

作者简介:刘宇(1972-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事惯性传感器和导航系统的研究。E-mail:liuyu_cqupt@yahoo.com.cn.

为周期分量的频率; B_0 为初始相位; $n(t)$ 为零均值, 方差为 1 的高斯白噪声; σ 为其强度。

2 提升小波变换原理

提升算法的基本思想是, 将现有的小波滤波器分解成基本的构造模块, 分步骤完成小波变换。即一个完整的提升小波变换过程由分解、预测和修正 3 个步骤组成^[6-7]。

2.1 分解过程

分解过程是将数据集合 s 按照奇偶采样点分成两个互不相交的子集:

$$s_o(k) = s(2k+1) \quad k \in Z \quad (2)$$

$$s_e(k) = s(2k) \quad k \in Z \quad (3)$$

分解方式较多, 采用不同的分解方式也就相当于采用了不同小波基。

2.2 预测过程

由于数据集合 s 的各采样点间存在一定的相关性, 因此可通过偶数采样点估计奇数采样点, 即

$$s_o(k) = P(s_e(k)), \quad (4)$$

这就是小波提升中的预测。如果信号间相关性很大, 那么预测效果会很好, 用 $s_e(k)$ 粗略地表示 s 不会丢失很多信息, 即可忽略一部分信息。为了完全重建信号 s , 只能扔掉包含在 $s_o(k)$ 中的关于 $s_e(k)$ 的那部分信息, 而保留二者的差值部分 $d(k)$, 即

$$d(k) = s_o(k) - P(s_e(k)) \quad (5)$$

式中 $d(k)$ 所对应的是原始信号 s 的高频部分。

2.3 修正过程

保留预测过程中的差值部分 $d(k)$, 可能会丢失信号的某些有用特征。为了恢复这些特征, 在提升小波中引入了修正操作 U , 即用新得到的 $\gamma(k)$ 来修正 $s_e(k)$, 修正结果用 $\lambda(k)$ 来表示, 即

$$\lambda(k) = s_e(k) + U(d(k)) \quad (6)$$

式中 $\lambda(k)$ 所对应的是原始信号的低频部分。

图 1 为提升小波变换和重构步骤。图 1(b) 为图 1(a) 的逆过程。

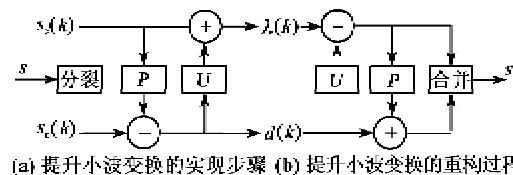


图 1 提升小波变换和重构步骤

3 提升小波去噪

3.1 提升小波去噪原理

假设有长度 N 的 MEMS 陀螺信号:

$$X_n = f_n + e_n \quad (7)$$

式中: f_n 为原始信号; e_n 为噪声。对 X_n 连续做 N 次提升小波分解后, 由 f_n 所对应的小波系数 $w_{j,k}$ 在某些特定的位置有较大的值, 这些点对应 f_n 的奇变位置和重要信息。对于 e_n 所对应的 $w_{j,k}$ 在每一尺度上是均匀分布的, 值也较小, 并随着尺度的增加其幅值减小。通过选择合适的阈值 λ , 去掉低于 λ 的 $w_{j,k}$, 保留高于 λ 的 $w_{j,k}$, 从而得到估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 。利用经过阈值量化处理后的各层细节系数和第 N 层近似系数进行提升小波重构, 得到去噪后的信号 \hat{f}_n 。

3.2 常用阈值法

提升小波去噪法的核心是确定合适的阈值或称小波系数的估计。常用的小波阈值处理方法有硬阈值法和软阈值法, 即

硬阈值法:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

软阈值法:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda) & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

从式(8)、(9)可知, 在使用硬阈值处理时, 保留较大的小波系数, 而将较小的系数置 0; 在使用软阈值时, 将较小的小波系数置 0, 而将较大的系数进行收缩。

软、硬阈值法虽然在实际中得到了广泛的应用, 也取得了较好的效果, 但这些方法本身还存在一些不足^[4-5,8]:

1) 在硬阈值处理过程中, 由于 $\hat{w}_{j,k}$ 在 λ 处的不连续性, 使重构信号存在振荡的可能性。

2) 在软阈值处理过程中, 虽然 $\hat{w}_{j,k}$ 整体连续性好, 但估计出来的 $|\hat{w}_{j,k}|$ 总比 $|w_{j,k}|$ 小 λ , 从而影响重构精度。

3.3 改进阈值法

针对以上方法的不足, 本文采用“折衷法”提出了一种改进的阈值函数, 其表达式为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k}) \sqrt{|w_{j,k}|^2 - |w_{j,k}| \lambda}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

当 $|w_{j,k}| \geq \lambda$ 时,

$$|w_{j,k}| - \lambda \leq \sqrt{|w_{j,k}|^2 - |w_{j,k}| \lambda} \leq |w_{j,k}| \quad (11)$$

由式(11)可得, 这种改进型算法估计出的 $\hat{w}_{j,k}$

介于硬阈值和软阈值之间。当 $|w_{j,k}|$ 不断增大时,估计的 $\hat{w}_{j,k}$ 越接近于 $w_{j,k}$ 。改进阈值函数使处理后的小波系数在不丢失由信号分解出的小波系数的前提下,尽量减少由噪声引起的小波系数,从而更接近真实的小波系数。

4 实验结果与分析

为验证本文所构造滤波算法的可行性,利用某车载惯性测量单元 (IMU) 采集到的一段 MEMS 陀螺输出数据进行分析。数据样本长为 1 200,时间间隔为 1 s,图 2 为原始信号波形图。

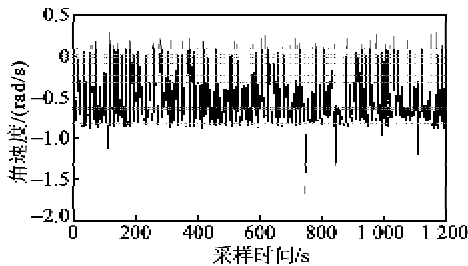


图 2 原始信号

考虑整个系统的降噪性能和实时性,本文采用具有正交和紧支撑性质的 Daubechies 小波对含噪信号进行 4 层提升小波分解和重构。图 3 为硬阈值函数去噪后的信号。图 4 为软阈值函数去噪后的信号。图 5 为改进阈值函数去噪后的信号。由图 3 可看出,硬阈值法处理后的信号失真较小,但信号有一定的振荡,视觉效果较粗糙;由图 4 可看出,软阈值法处理后的信号较光滑,振荡很小,但失真较大,有可能丢失信号中的某些有用成分。由图 5 可看出,利用改进的阈值法则很好地综合了二者的优势,在减小振荡的同时,尽量避免了有用成分的丢失,有效抑制了陀螺仪输出信号中的噪声。

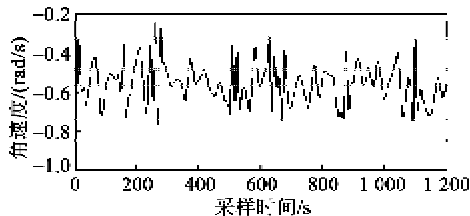


图 3 硬阈值去噪后的信号

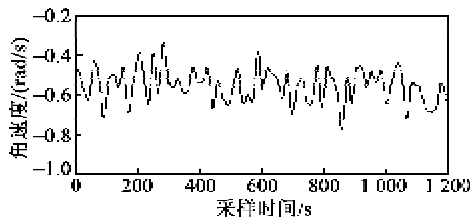


图 4 软阈值去噪后的信号

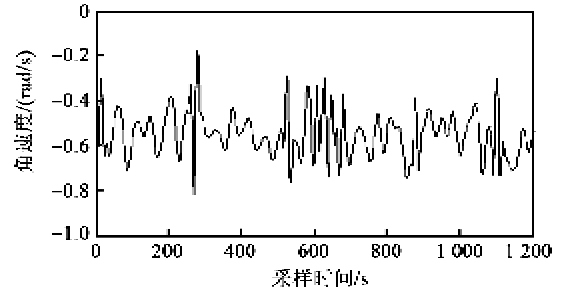


图 5 改进阈值去噪后的信号

对同一信号,经消噪处理后的均方误差越小,信噪比越大,消噪效果越好,本文从这两方面对 3 种阈值去噪法进行了定量分析,表 1 为 MEMS 陀螺输出信号经不同阈值处理后的均方误差和信噪比。从表 1 可看出,改进的阈值去噪性能,无论是从信噪比,还是均方误差方面均优于硬、软阈值去噪法。

表 1 各种阈值算法去噪结果

	信噪比/dB)	均方误差
硬 阈 值	80.712 8	0.033 8
软 阈 值	80.637 9	0.034 7
改进阈值	82.532 7	0.031 2

在实际运用中,系统对算法运算的实时性要求较高。仿真实验中,对 3 种阈值去噪法的运算时间进行了比较,如表 2 所示。由表可知,改进阈值降噪法的运算时间与硬阈值和软阈值降噪法基本相当。

表 2 各种算法运算时间

	硬 阈 值	软 阈 值	改进阈值
运算时间/s	0.081	0.082	0.081

从以上分析可得,基于提升小波的改进阈值降噪法与硬、软阈值降噪法相比,在提高降噪效果的同时,并没有牺牲实时性。

5 结束语

本文在现有阈值函数去噪法不足的基础上,提出了基于小波提升的改进阈值函数去噪方法,并结合 MEMS 陀螺输出数据,对提升小波变换的传统硬、软阈值与改进阈值方法的仿真实验进行比较,仿真结果表明,后者获得了更好的去噪效果和更高的信噪比,并且提升小波的去噪速度快,设计灵活,编程简单,易实现,且不需额外内存。因此,提升小波变换在 MEMS 陀螺实时信号去噪方面具有很好的应用前景。

(下转第 364 页)