

改进的小波阈值去噪方法在 MEMS 陀螺上的应用

吴 锐, 周守东

(安徽工业经济职业技术学院, 合肥 230051)

摘 要:针对 MEMS 陀螺由于结构瑕疵和信号处理技术的不足而导致存在较大的随机误差,采用改进的小波阈值去噪方法以提高 MEMS 陀螺测量精度。通过对软阈值函数和硬阈值函数的缺陷进行分析,设计了改进的阈值函数。改进的阈值函数相对于硬阈值函数具有连续性的优势,相对于软阈值函数可以减小常值误差。根据不同阈值去噪方案在陀螺静态数据上的去噪效果,确定了最终的阈值去噪方案。将此方案应用在 MEMS 陀螺的动静态数据中,实验结果表明:MEMS 陀螺输出信号的标准差减小了一个数量级,平均值更加接近真实值,所提出的采用改进的小波阈值去噪方法取得了很好的去噪效果。

关键词:小波阈值降噪;改进的阈值函数;MEMS 陀螺;随机误差

中图分类号:TN911.73

文献标志码:A

引 言

随着微电子技术和集成电路的发展,MEMS 陀螺朝着小型化、低功耗、高可靠性的方向发展。MEMS 陀螺在自动化、航空航天和武器制导等军民领域得到广泛应用^[1-4]。但是由于结构的瑕疵和信号处理技术的不足,MEMS 陀螺的噪声和漂移很大,这是阻碍其实用的最大因素。噪声覆盖了陀螺输出的真实特性,所以必须采取措施提高信噪比,为 MEMS 的随机漂移建模和补偿打下基础^[5-8]。

陀螺仪在惯性导航组件中起到传感器的作用,敏感平台的转动趋势,然后通过平台稳定系统将平台稳定在惯性空间中,所以陀螺的精度决定了导航的精度。相对于转子陀螺、光学陀螺,MEMS 陀螺仪具有体积小、成本低、功耗低等诸多优势,近几年也随着集成能力的进步而获得了较大发展。但是由于生产水平有限,导致目前 MEMS 陀螺的精度偏低,这是限制其广泛进行应用的最主要因素^[9-12]。因此在当前生产水平下,寻找提高 MEMS 陀螺精度的方法非常必要。MEMS 陀螺的噪声主

要是随机噪声,它由外界环境的不确定因素引起的。简单的去噪方法难以将噪声从信号中滤除掉,最基本的信号处理方法是傅里叶变换,但是傅里叶变换是全局变换,无法反应出信号局部的频率特点^[4]。常使用小波变换时频域分析的优势来解决这一问题。小波分析窗的尺寸固定但形状可变,根据时域中样本频率的不同来调整采样步长。小波变换的去噪方法中,小波阈值去噪具有相对简单、运算量小等特点,可以获得很好的去噪效果^[7,13-14]。

本文提出了改进的小波阈值函数,并设计了相应的小波阈值降噪方案,并用此方法来处理 MEMS 陀螺动静态条件下的输出信号,取得了很好的去噪效果。

1 MEMS 陀螺的 Allan 方差分析

Allan 方差法首先应用于原子钟的频率波动特性分析,由于陀螺的随机误差与原子钟非常相近,因此 Allan 方差法被 IEEE 推荐为陀螺随机误差辨识的标准方法。Allan 方差可以将陀螺随机误差分为五类:量化噪声 (Q)、角度随机游走 (N)、零偏不稳定性 (B)、角速率

收稿日期:2016-06-20

基金项目:安徽高校自然科学研究项目(KJ2015A381)

作者简介:吴 锐(1978-),男,安徽合肥人,讲师,硕士,主要从事计算机网络、物联网方面的研究,(E-mail)ruiwu@qq.com

随机游走 (K) 和速率斜坡 (R)。Allan 方差分析就是辨识出这五类误差的大小^[5]。

将恒温箱温度设置为 23 °C, MEMS 陀螺在恒温箱内保温 30 min 后采集陀螺输出, 采样频率为 1000 Hz, 采样时间为 1 h, 陀螺 Allan 方差分析结果见表 1。

表 1 MEMS 陀螺 X 轴的 Allan 方差分析

Q	N	B	K	R
2.1423	3.2066	0.4913	0.0644	0.0520

从表 1 中可以看出, 在 X 轴的随机误差中, 量化噪声和角度随机游走是其主要组成部分, 另外两个轴也具有相同的结论。

2 小波阈值降噪

2.1 小波阈值的选取原则

根据文献[6]可知, 噪声信号的数学模型为:

$$s(k) = f(k) + \varepsilon \cdot e(k) \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中: $s(k)$ 为含噪信号, $f(k)$ 为有用信号, $e(k)$ 为噪声信号。对信号 $s(k)$ 进行小波变换, 可以将此信号分为有用信号 $f(k)$ 和噪声信号 $e(k)$ 。工程实践表明, 噪声信号是高频信号, 而有用信号是相对稳定的低频信号。因此在小波变换中它们的统计特性不同, 有用信号的小波变换幅值较大, 而噪声信号的小波变换幅值较小。因此可以找到合适的阈值, 当小波分解系数大于阈值时, 认为此部分为有用信号; 当小波分解系数小于阈值时, 认为此部分为噪声信号, 将此系数置 0。然后通过小波重构获得降噪后的信号。小波阈值降噪可以具体为以下三步:

(1) 原始信号的小波分解。基于信号的特性选择小波函数和分解阶数, 对信号进行小波分解。

(2) 通过高频小波系数量化阈值或阈值函数, 按照给定的规则将噪声信号系数置 0。

(3) 将处理后放入信号进行重构获得滤波后的信号。

2.2 选择小波基函数和分解层次

在小波变换中, 小波函数有很多种, 分析同一个问题时所使用的小波基函数不同, 结果也就不同, 因此选择小波基函数非常重要。当前主要通过处理信号的误差和结果确定小波函数, 所选基函数要具有规则、消失矩、对称等特点。通过比较不同的小波函数, 选取 Coif2 为基小波, 分解层次为 9。

2.3 小波阈值的选取和量化

在小波阈值降噪的过程中, 最重要的就是阈值的选择和量化, 阈值的选取直接决定了降噪的质量。

对于阈值的选择, 常用的有两种方法: 一是基于信噪比选择阈值, 二是基于信号的无偏风险估计。阈值主要包括固定阈值 (Sqrtwoolog)、Stein 无偏似然估计 (Rigrsure)、Heursure 阈值 (Heursure)、Minimax 阈值 (Minimax)。本文根据不同阈值的去噪效果来决定阈值的选取。

选取小波阈值以后, 重要的事情是阈值函数的使用和阈值的量化。目前常用的 Donoho 硬阈值函数为:

$$\hat{w} = \begin{cases} w & |w| \geq \lambda \\ 0 & |w| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

软阈值函数为:

$$\hat{w} = \begin{cases} \text{sign}(w) (|w| - \lambda) & |w| \geq \lambda \\ 0 & |w| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

两种阈值函数在直线上的应用结果如图 1 所示。

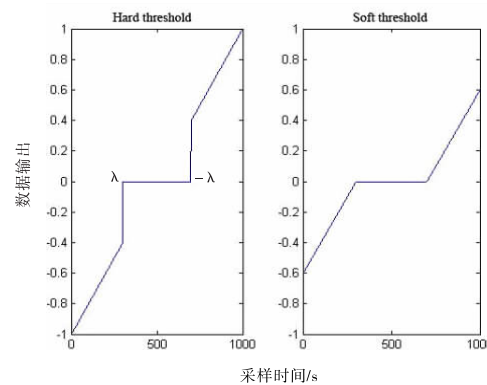


图 1 硬阈值和软阈值在直线上的应用效果

图 1 展示了当阈值为 0.4 时, 软阈值和硬阈值在直线上的应用效果。从图中可以看出, 硬阈值函数在 λ 和 $-\lambda$ 点不连续, 这会导致信号滤波后的突变, 这是硬阈值函数派生出的计算问题。而且硬阈值函数只将比阈值小的系数置 0, 而不处理比阈值大的系数, 这种方法过于绝对。虽然软阈值的连续性很好, 但是使用软阈值函数降噪后, 去噪后的信号和原始信号存在常值偏差。

为了克服硬阈值函数不连续和软阈值函数存在常值偏差的缺陷, 本文提出了改进的软阈值函数。首先将软阈值函数(3)改写为

$$\hat{w} = \begin{cases} \lambda \cdot \text{sign}(w) \left(\frac{|w|}{\lambda} - 1 \right) & \frac{|w|}{\lambda} \geq 1 \\ 0 & \frac{|w|}{\lambda} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

当 $\frac{|w|}{\lambda} \leq 1$ 时, 认为该系数由噪声引起的, 可以被忽略;

当 $\frac{|w|}{\lambda} > 1$ 时, 认为该系数是由信号产生的, 应该被保

留。因此为了更好地区分噪声和信号,可以把 $\frac{|w|}{\lambda}$ 当成判断指标。改进后的阈值函数为

$$\hat{w} = \begin{cases} \text{sign}(w) (|w|^n - \lambda^n)^{\frac{1}{n}} & |w| \geq \lambda \\ 0 & |w| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中 $n \geq 1$ 。选择真实信号函数为 $f(w) = w$, 对于连续增涨的自变量 w , 改进的小波阈值函数 \hat{w} 可以无限接近真实值 $f(w)$, 因此解决了软阈值函数中 \hat{w} 和真实值 w 有常值偏差这一问题。当 $n = 1$ 时,改进的阈值函数回归到软阈值函数;而当 $n \rightarrow \infty$ 时,改进的阈值函数又变为了硬阈值函数;当 n 介于 1 与无穷之间时,改进的阈值函数就介于硬阈值函数和软阈值函数之间,同时具有两种阈值的优点。因此可以通过选择合适的参数 n 来获得更好的降噪效果。设置阈值为 0.4,硬阈值函数、软阈值函数和改进阈值函数在直线上的去噪效果如图 2 所示。

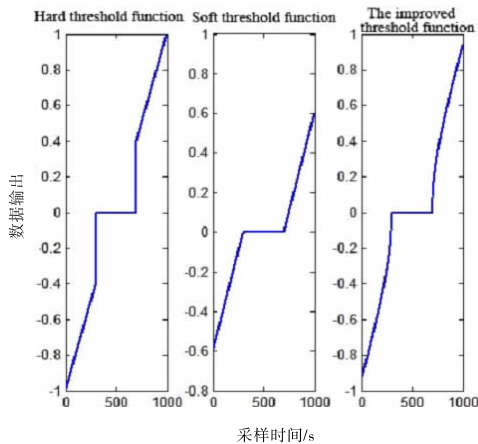


图 2 三个阈值函数在直线上的应用

从图 2 中可以看出,改进的阈值函数相对于硬阈值函数具有连续性的优势,相对于软阈值函数减小了固定偏差。因此,改进的阈值函数相对于软阈值函数和硬阈值函数都具有进步意义。

3 小波阈值方案的确定和验证

3.1 小波阈值降噪方案的确定

为了确定最终的小波阈值降噪方案,将上文中提到的小波阈值估计方法应用到三种阈值函数中,对陀螺的静态输出数据进行小波阈值降噪,来对比各种方案下的降噪效果,计算滤波后数据的标准差,以此为标准来确定最终的滤波方案。数据处理的结果见表 2。

通过表 2 中数据的对比,可以看出小波阈值为 Birge - Massart 准则确定的阈值、阈值函数使用改进的阈值函数时,取得了最好的去噪效果。

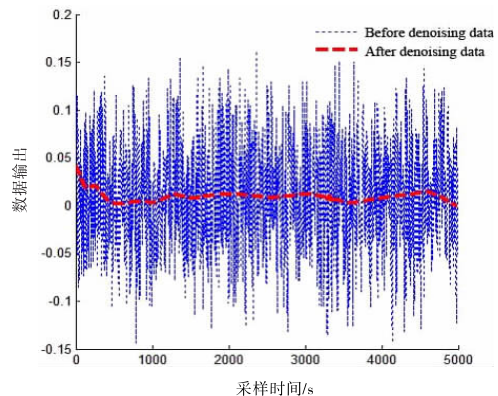
表 2 各种阈值方案的去噪结果

	Hard threshold	Soft threshold	Impr. threshold
Penalty	0.0329	0.0145	0.0115
Birge - Massart	0.0094	0.0046	0.0040
The default threshold	0.027	0.0097	0.0072
Rigrsure	0.0167	0.0057	0.0047
Sqtwolog	0.0045	0.0047	0.0043
Heursure	0.0045	0.0047	0.0044
Minimaxi	0.0046	0.0043	0.0042

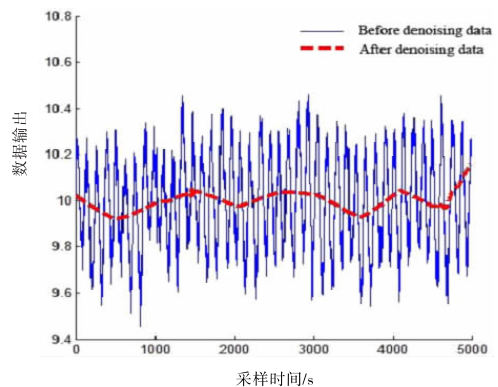
综上所述,最终选取 Coif2 为小波函数,对原始信号分解到 9 阶,Birge - Massart 准则为阈值评估准则,改进的阈值函数为最终使用的阈值函数。此方案即为最终设计的降噪方案。

3.2 小波阈值降噪验证和信号重建

以上的阈值降噪方案是通过对陀螺静态数据的分析获得的,为了验证此降噪方案的有效性,将此方案分别应用在其他静态数据和动态数据中。动态测试在常温条件下进行,将陀螺固定在转台上,使其输入轴平行于转台轴,将转台转速设置为 $10^\circ/\text{s}$,等转速稳定以后开始测试数据。设计的阈值降噪方案在动静态数据中的去噪效果如图 3 所示。



(a) 静态数据的去噪效果



(b) 动态数据的去噪效果

图 3 动静态数据的去噪效果

下面从平均值和标准差两个方面对比降噪前后的效果,具体数据见表 3。

表3 降噪前后数据的对比

	Static data		Dynamic data	
	降噪前	降噪后	降噪前	降噪后
平均值	0.0094	0.0087	9.9946	9.9976
标准差	0.0473	0.0052	0.2034	0.0397

从图3可以看出,不管动态数据还是静态数据,经过小波降噪,数据的稳定性都有了很大提高。从表3中可以看出,滤波后的平均值也更加接近真实值,标准差也降低了一个数量级。通过上面的分析可以看出,本文设计的阈值降噪方案应用在MEMS陀螺的动静态数据中,不仅极大地提高了数据稳定性,也使数据平均值更加接近真实值,证明了此降噪方案的有效性。

4 结束语

本文首先分析了软阈值函数和硬阈值函数的缺陷,然后设计了改进的阈值函数。改进的阈值函数相对于硬阈值函数具有连续性的优势,相对于软阈值函数可以减小常值误差。根据不同阈值去噪方案在陀螺静态数据上的去噪效果,确定了最终的阈值去噪方案。将此方案应用在MEMS陀螺的动静态数据中,将输出信号的标准差减小了一个数量级,平均值更加接近真实值,取得了很好的去噪效果。

参考文献:

- [1] 王新龙,李娜.MEMS陀螺随机误差的建模与分析[J].北京航空航天大学学报,2012,38(2):170-174.
- [2] 王伟,杜东贞,周佳欣,等.MEMS三轴陀螺仪中不匹配干扰抑制方法[J].系统工程与电子技术,2016,38(7):1638-1643.
- [3] 陈殿生,邵志浩,雷旭升,等.MEMS陀螺仪随机误差滤波[J].北京航空航天大学学报,2009,35(2):246-250.
- [4] 宋丽君,秦永元,杨鹏翔.小波阈值去噪法在MEMS陀螺仪信号降噪中的应用[J].测试技术学报,2009,23(1):33-36.
- [5] XUE L,JIANG C Y,CHANG H L,et al.A novel Kalman filter for combining outputs of MEMS gyroscope array[J].Measurement,2012,45(4):745-754.
- [6] 吴焕铭,尹韬,杨海钢,等.基于双通道解调相位校准技术的MEMS陀螺仪接口电路芯片[J].中国惯性技术学报,2015,23(6):806-810.
- [7] 高伟伟,王广龙,高凤岐,等.一种基于DAVAR的FOG随机信号处理新方法[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2014,15(4):330-334.
- [8] 何鲲鹏,程万娟,高延滨,等.虚拟陀螺技术在MEMS惯性导航系统中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2009,30(10):1123-1128.
- [9] CHANG H,XUE L,QIN W,et al.An integrated MEMS gyroscope array with higher accuracy output[J].Sensors,2008,8(4):2886-2899.
- [10] 吉训生,王寿荣.硅微陀螺阵列信号处理研究[J].宇航学报,2009,30(1):235-239.
- [11] 皱学锋,卢新艳.基于Allan方差的MEMS陀螺仪性能评价方法[J].微纳电子技术,2010,47(8):490-493.
- [12] 于丽杰,高宗余.MEMS传感器随机误差分析[J].传感器与微系统,2012,31(3):63-65.
- [13] 程旭维,汤霞清,黄湘远.基于#1理论方差的光学陀螺长期随机误差分析[J].中国激光,2014,41(10):10005003.1-10005003.8.
- [14] RILEY W J.Techniques for Frequency Stability Analysis[C]//Proceeding of IEEE International Frequency Control Symposium,Tampa,FL,May 4-8,2003:1-10.

Application of Improved Wavelet Threshold Denoising Method for MEMS Gyroscop

WU Rui,ZHOU Shoudong

(Anhui Technical College of Industry and Economy, Hefei 230051, China)

Abstract: Due to structure defects and limited signal processing technology, MEMS gyro has there exists great random error in MEMS gyro. To increase measurement accuracy of MEMS gyro, wavelet threshold denoising method is applied. Firstly, the component of random error in gyro output is analyzed. Then shortcomings of hard threshold and soft threshold function are found through contrast. To solve these shortcomings, improved threshold function is constructed, and through derivation, it can be seen that hard threshold and soft threshold is special case of improved threshold. At last, wavelet threshold denoising scheme is designed and applied in static and dynamic data of MEMS. The result indicates that stability of gyro output increases a degree of magnitude, and the average value is more close to the true value. The proposed the improved wavelet threshold denoising method has good denoising effect.

Key words: wavelet threshold denoising; improved threshold function; MEMS gyro; random error