

文章编号:1004-4213(2010)06-1116-4

# 一种多算法融合的实时滤波在光纤陀螺中的应用\*

刘颖<sup>1,2</sup>, 李言<sup>1</sup>, 徐金涛<sup>2</sup>

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

**摘 要:**根据光纤陀螺输出信号的特点和应用环境的要求,在 Mallat 小波变换的基础上,研究了一种多算法融合的实时滤波算法.该算法在光纤陀螺刚启动,数据量偏少时,通过 IIR 滤波器进行滤波;采样数据量足够多时,通过施加滑动数据窗来实现小波实时去噪,采用周期对称延拓的方法去除小波去噪的边界问题,可有效去除光纤陀螺输出信号中高频部分的噪音,提高滤波效果,抑制陀螺的随机漂移.通过实验验证了该方法对陀螺输出信号进行滤波的可行性和有效性.

**关键词:**光纤陀螺;小波变换;实时滤波;IIR 滤波器

**中图分类号:**U666.1

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103906.1116

## 0 引言

光纤陀螺(Fiber Optic Gyroscope, FOG)是一种基于 Sagnac 效应的角速度传感器<sup>[1]</sup>,是构成惯性导航系统的核心器件.在惯性导航系统中,影响其准确度的主要因素是光纤陀螺的漂移误差<sup>[2]</sup>.光纤陀螺的漂移是一个典型的非平稳随机过程,分为系统性漂移和随机漂移两类.对于系统性漂移可建立精确的数学模型,在惯性导航系统标定中进行补偿;而随机漂移受环境因素影响,表现出时变与弱非线性,很难建立起准确理想的数学模型.因此选用有效的滤波方案,减小光纤陀螺随机漂移是提高系统准确度的关键.

小波去噪是近二十年来信号处理领域的一个研究热点,具有广泛的函数适应性和最优的自适应滤波能力,小波变换多分辨率分析的特点,在时频两域具有表征信号局部特征的能力,是一种时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法,在诸多研究领域得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>.然而由于小波变换的非因果性及不具备平移不变性,使小波变换难以实现递推计算,影响了小波去噪的在线实时应用<sup>[5]</sup>.目前的小波去噪方法也几乎都是基于对测量数据的离线批量处理,以有效清除噪音为目标,滤波的实时性研究很少,在很大程度上降低了小波滤波的工程应用价值.

本文采用施加滑动数据窗的方式实现了小波去噪的在线实时滤波,并通过 IIR 滤波器与小波去噪

相结合的方法,规避了小波去噪的盲区,保证了在线实时滤波的一致性和完整性.并实验验证了多算法融合技术在光纤陀螺去噪处理的可行性和有效性.

## 1 小波去噪

### 1.1 Mallat 算法

实时去噪处理必须兼顾去噪效果和信号处理速度.小波去噪速度取决于小波分解及其重构的速度,因此实时小波去噪应优先采用快速离散小波变换,也就是 Mallat 多尺度小波变换算法. Mallat 提出了快速分解算法,大大改善了小波变换计算量大的缺点,其分解算法为

$$\begin{cases} c_{j-1,k} = \sum_l h_{l-2k} c_{j,l} \\ d_{j-1,k} = \sum_l g_{l-2k} c_{j,l} \end{cases} \quad (1)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{cases} C_{j-1} = HC_j \\ D_{j-1} = GC_j \end{cases} \quad (2)$$

式中的变换矩阵  $H, G$  相当于信号处理中的低通滤波器和带通滤波器.则重构算法可表示为

$$C_j = H^* C_{j-1} + G^* D_{j-1} \quad (3)$$

式中  $H^*, G^*$  分别为  $H, G$  的共轭转置矩阵.

Mallat 算法揭示了小波多尺度分析与滤波器之间的内在联系,具有重要的理论和应用价值,广泛应用于基于小波去噪信号处理中<sup>[6]</sup>.

### 1.2 小波去噪的步骤

根据光纤陀螺输出信号的噪音和有用信号在各分解尺度上的分布情况,采用自适应的阈值去噪方法,具体步骤如下:

步骤 1: 选择合适的小波基对原始信号进行小

波变换,得到小波系数  $d_{j,k}$ ,这里选择 dB4,取  $J=4$ . 选择合适的小波基和小波分解的尺度对去噪效果也有着重要的影响<sup>[5,7]</sup>.

步骤 2:确定小波阈值,小波阈值  $\lambda$  在不同的尺度取同一值,不能够很好反应噪音在小波变换各尺度上的传播特性,去噪效果差,这里采用一种随尺度改变的阈值确定方法

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \log_2 N / \ln(j+1)} \quad (4)$$

用经验公式  $\sigma_j^2 = \frac{1}{N} \sum_k |d_{j,k}|^2$  计算每尺度小波系数的均方误差.

步骤 3:通过软硬阈值折中法估计每尺度的小波系数  $\hat{d}_{j,k}$

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \cdot (|d_{j,k}| - \alpha\lambda), & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

该方法介于软阈值和硬阈值之间,思路简单,去噪效果好. $\alpha$  可在 0 和 1 之间调整,根据经验,一般取 0.4~0.8 之间,下面实验中取 0.6.

步骤 4:对估计后的小波系数  $\hat{d}_{j,k}$  根据式(3)进行重构,得到的信号,就是去除噪音后的信号.

## 2 IIR 滤波器

常用的数字滤波器可分为 IIR(无限冲击响应)滤波器和 FIR(有限冲击响应)滤波器<sup>[8-9]</sup>. 在采样系统中常用的滤波器为中值滤波器和低通滤波器. 中值滤波器的准确度一般与采样数量有关,数据越多,准确度越高,实时性差. FIR 滤波器是非递归型的,没有极点,只有零点,系统稳定,在相同滤波指标下, FIR 滤波器的阶数远远高于 IIR 滤波器,计算量大,实时性差,响应延迟比较严重. IIR 滤波器具有零极点,可以用较小的阶数达到较好的滤波效果,且计算量较小,带来的信号延迟小,实时性好.

## 3 多算法融合的实时去噪算法

实验中,光纤陀螺采样频率为 100 Hz,样本长度为 1 800. 图 1 为光纤陀螺输出数据的功率谱,光纤陀螺输出信号的低频部分是有用信号,而高频部分则主要是噪音信号.

这里采用 IIR 带通滤波器对采样值进行去噪,结合试验用的光纤陀螺技术参数,为了保证两种算法滤波效果的一致性,这里以两种算法滤波前后的信噪比(公式(6))为 106.8 左右为依据,将通带的频率设计为 20 Hz,阻带截止频率为 30 Hz,通带最大衰减量为 1 dB,阻带最小衰减量为 30 dB. 采用该滤

波器事先对光纤陀螺静态离线测试数据进行分析,得到低通数字滤波器的传递函数,为后续的实时滤波提供依据.

$$\text{SNR} = 10 \log \left[ \frac{\sum_n x^2 n}{\sum_n [x(n) - \hat{x}(n)]^2} \right] \quad (6)$$

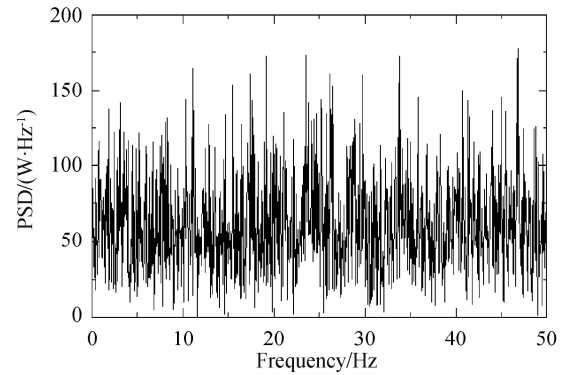


图 1 原始信号的功率谱

Fig. 1 Frequency spectrum of original signal

### 3.1 多算法融合算法的主要步骤

设小波多尺度分解所需要的最小数据量为  $2^{j_0}$ , 其中  $j_0 \in N$ . 记  $k$  时刻测量时可已获得的实时测量数据序列为  $a_1, a_2, \dots, a_k$ . 实时去噪的基本流程如图 2 所示.

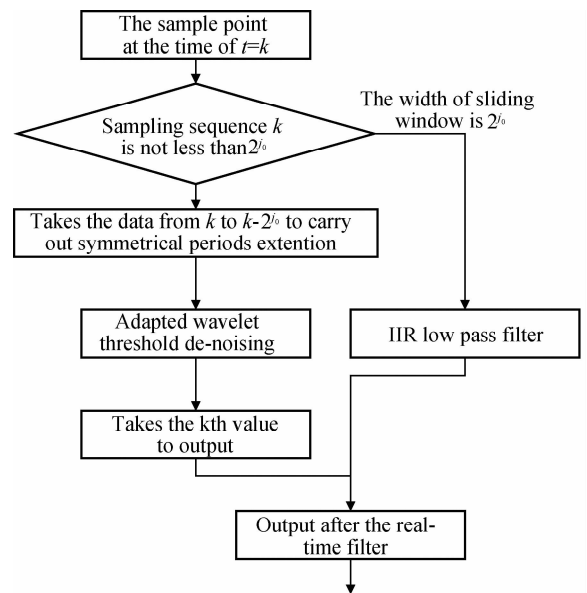


图 2 多算法融合的实时去噪流程图

Fig. 2 Multi-algorithm fusion real time de-noising

当  $k < 2^{j_0}$  时,采用 IIR 数字滤波器对输出数据进行滤波输出. 当  $k$  增长到  $2^{j_0}$  时,先对数据序列进行对称周期延拓,得到一个长度为  $2^{j_0+1}$  的数据序列,然后按照 1.2 中的自适应阈值去噪算法,进行去噪处理,得到去噪后的数据序列,记为  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_{2^{j_0}}, \dots, \hat{a}_{2^{j_0+1}}$ . 在实时情况下,仅输出  $\hat{a}_{2^{j_0}}$  作为  $k=2^{j_0}$  时刻的实时值输出;当在  $k=2^{j_0}+1$  时刻,取最新得到的  $2^{j_0}$  个采样值,即  $a_2, a_3, \dots, a_k$ ,进行对称周期

延拓后,去噪,取  $\hat{a}_{2^j_0+1}$  作为  $k=2^j_0+1$  时刻的输出,以此类推,用一个以宽度固定的滑动窗口实现了小波去噪的实时滤波.

### 3.2 算法分析

在采用自适应小波阈值去噪时,为了提高响应的速度,减少计算的时间,可事先对被测信号的离线数据的在各尺度中噪音的分布情况进行分析,确定各尺度上的阈值,在实时测量时,根据光纤陀螺测量数据的一致性和重复性,可直接使用离线时计算的阈值进行滤波去噪.表 1 为光纤陀螺输出信号的离散数据各尺度小波系数的均方误差和阈值.在对测量数据实时滤波时,可直接使用,该算法的滤波时间为 6.8 ms,在保证滤波效果的基础上,提高了滤波的实时性.

表 1 各尺度小波系数的均方误差和阈值

Table 1 The  $\sigma_j^2$  and  $\lambda_j$  in different dimension

	1	2	3	4
$\sigma_j^2$	2.715 9	2.727 3	2.175 1	2.134 7
$\lambda_j$	10.535 9	6.317 0	4.215 8	3.371 1

Mallat 小波分解和重构算法均假定数据是双向无限的,而实际中数据量是有限的,这样就会使变换中存在的边界效应和边界失真的问题<sup>[10]</sup>,因此要对边界进行延拓处理.小波边界延拓常用的方法有:重复延拓、周期延拓、对称延拓、零值填补等几种方法.其中对称周期延拓能较好地避免边界处理带来的高频噪音<sup>[9]</sup>.故这里采用对滑动窗口内的数据进行对称周期延拓的方法来改善滤波的效果.

## 4 实验

对某型号光纤陀螺进行试验,分别在静态和动态情况下进行滤波.在图 3(a)中,某型号光纤陀螺静态输出信号,采样频率为 100 Hz,采样点数为 1 800,用 Matlab 程序对光纤陀螺输出信号进行模拟仿真实时输出,采用文中滤波算法对光纤陀螺的输出信号进行实时去噪,滑动窗的宽度取为 128 点,滤波后的数据如图 3(b).实时滤波后的输出信号长

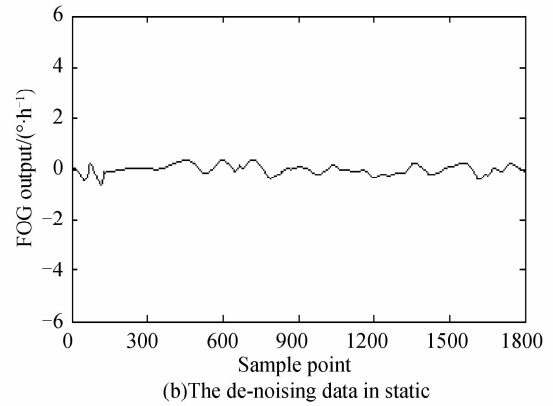
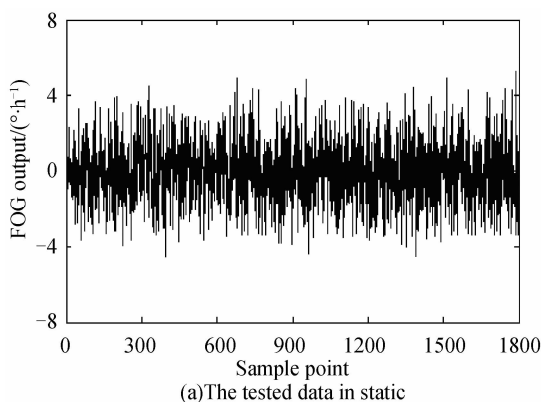


图 3 光纤陀螺静态输出数据

Fig. 3 The FOG output data in static

度小于滑动窗宽度 128 时,采用 IIR 滤波;大于等于 128 时,采用自适应阈值去噪.图 4(a)为光纤陀螺的动态输出的原始信号,图 4(b)为光纤陀螺动态滤波后的输出信号.

由仿真试验可知,通过多算法融合技术,可以实现对光纤陀螺信号的实时滤波,动静态滤波效果基本相同,滤波准确度接近离线滤波.

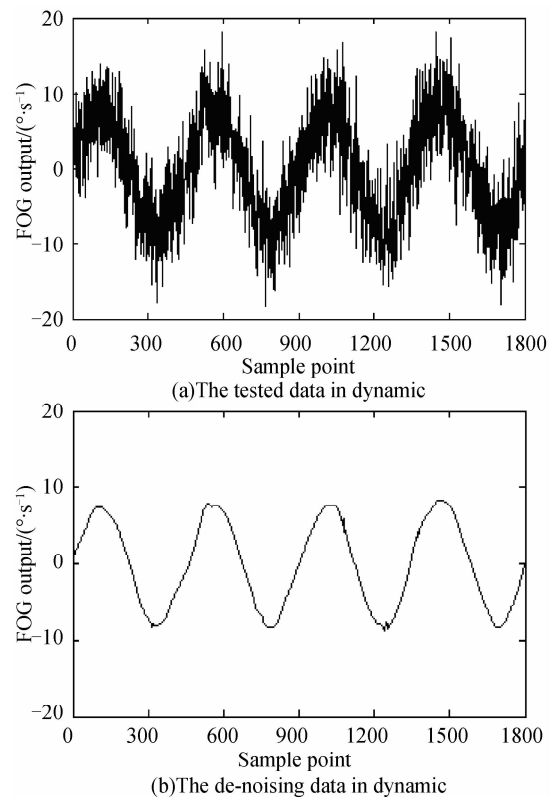


图 4 光纤陀螺动态输出数据

Fig. 4 The FOG output data in dynamic

## 5 结论

多算法融合技术,改善了小波滤波本身在数据量偏少时不能进行分解与重构的弊端,通过数据滑动窗的方法实现了递推运算和实时的数据更新,并通过对数据窗内数据进行周期对称延拓的方式解决

了滤波信号的边界问题. 试验证明了多算法结合的滤波效果好,以软件的方式实现光纤陀螺的实时滤波具有可行性,且具有成本低、可靠性高等优点,能很好的解决工程应用中面临的问题,拓展了小波滤波的应用.

#### 参考文献

- [1] LEFEVER H C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope[J]. *Optical Review*, 1997, **4**(1A):20-27.
- [2] LI Ying, CHEN Xing-lin. Projection pursuit learning networks applying for eliminating noises of fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1):94-98.  
李颖,陈兴林. 投影寻踪网络用于光纤陀螺噪声消除的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1):94-98.
- [3] TAN Cheng-zhi, HU Gui-jun, SHI Xin-liang. Wavelet transform for analysis of semiconductor laser noise [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4):577-580.  
檀承志,胡贵军,史新亮. 小波变换用于半导体激光器噪声信号分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4):577-580.
- [4] JIANG Dong-fang, CHEN Ming. A Real-time wavelet Denoising algorithm [J]. *Chinese Journal Of Scientific Instrument*, 2004, **25**(6):781-783.  
蒋东方,陈明. 一种实时小波降噪算法[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(6):781-783.
- [5] WANG Wei, ZHANG Ying-tang, REN Guo-quan. Adaptive selection and simulation of optical decomposition level in threshold de-noising algorithm based on wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(3):526-529.
- 王维,张英堂,任国全. 小波阈值将噪算法中最优分解层数的自适应确定及仿真[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(3):526-529.
- [6] YUAN Rui-ming, WEI Xi-hua, LI Zi-yi, et al. De-noising algorithm for signal in FOG based on wavelet filtering using threshold value[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, **11**(5):43-47.  
袁瑞铭,伟锡华,李自怡,等. 基于小波阈值滤波的光纤陀螺信号消噪算法[J]. *中国惯性技术学报*, 2003, **11**(5):43-47.
- [7] CHEN Jiang-liang, LU Zhi-dong. Digital filter design based on matlab software and its application in SINS[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, **13**(6):10-12.  
陈江良,陆志东. 基于 Matlab 的数字滤波器设计及其在捷联惯导系统中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2005, **13**(6):10-12.
- [8] LIU Hui, ZHAO Zhong, CHENG Yao-qiang. Study on the signal spectrum analysis and filtering technology of FOG combination [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, **30**(3):268-271.  
刘辉,赵忠,程耀强. 光纤陀螺组合的信号频谱分析与滤波技术研究[J]. *压电与声光*, 2008, **30**(3):268-271.
- [9] ZHENG Li-ying, XIONG Jin-tao, LI Liang-chao, et al. Wavelet Border Processing and Real-Time Denoising [J]. *Radar science and technology*, 2005, **13**(6):10-12.  
郑丽英,熊金涛,李良超,等. 小波边界处理及实时去噪[J]. *雷达科学与技术*, 2007, **5**(4):300-303.
- [10] XU Wei-ye, YU Xiang-bin. Study on wavelet image border processing method [J]. *Computer Applications and Software*, 2003, **20**(3):35-37.  
徐伟业,虞相宾. 小波图像边界处理方法的研究[J]. *计算机应用与软件*, 2003, **20**(3):35-37.

## Application of a Multi-algorithm Fusion Real Time Filter in FOGs

LIU Ying<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, XU Jin-tao<sup>2</sup>

(1 Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, China)

**Abstract:** A method of multi-algorithm fusion real time filter was researched on the basis of the characteristic of the output signals of fiber optic gyros (FOGs), Mallat wavelet transform theory and the requirements of FOG in the application environment. The IIR filtering is adopted to deal with the signal while the data is few in the initial sample time, a moving window is adopted to realize the wavelet real time filter, and period symmetry extend method to eliminate the problem of the boundary. The method can eliminate the high frequency noise, and the random drift is restrained. Experimental results show the feasibility and efficiency of the method in FOGs signals de-noising.

**Key words:** Fiber optical gyroscope; Wavelet transform; Real time filter; IIR filtering



**LIU Ying** was born in 1979. She is a Ph. D. degree candidate at Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology. Her current research interests focus on fiber optic gyroscope and signal processing.



**LI Yan** was born in 1960. He is a professor and Doctoral Supervisor at Xi'an University of Technology. His research interests focus on fault diagnosis and advanced manufacturing technology.