

实时小波滤波方法在硅微陀螺仪中的应用研究

夏敦柱, 周百令, 王寿荣

(东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

摘要: 采用实时小波滤波技术构建硅微陀螺仪数字化平台, 对快速的 Mallat 算法选用何种小波基, 是否采用软硬阈值处理以及选用何种尺度和采样点数进行深入分析。考虑到滤波效果即陀螺仪输出信号滤波前后 Allan 方差改进情况和硬件处理的实时性, 通过比较最终选择 3 尺度 16 点软阈值 db2 小波 Mallat 快速算法。仿真计算和实验结果表明该滤波方法对改善微机械陀螺仪的零偏稳定性有一定的实用价值。

关键词: 硅微陀螺仪; Mallat 小波算法; Allan 方差; 零偏稳定性

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Application of wavelet's real-time filter in silicon micromachined gyroscope

XIA Dun-zhu, ZHOU Bai-ling, WANG Shou-rong

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The paper presented a real-time wavelet filter technology for constructing digital platform, and analyzed which wavelet basis to select, whether to apply soft or hard threshold processing, and what scale and sampling sample numbers to select. Considering the filter effect (i.e. the Allan variance improvement extent before and after the filter processing, including the real time and high effective algorithm capability of hardware processing), the db2 wavelet mallat fast algorithm with 3 level scale and 16 points was selected by comparison. The computation simulation and experiment results show that this filter processing method is much practical and valuable to improve the zero bias stability of micromachined gyroscope.

Key words: silicon micromachined gyroscope; Mallat wavelet algorithm; Allan variance; zero bias stability

硅微陀螺仪是采用微机械加工技术制造出来的微型角速度传感器,是集微型精密机械、微电子学、半导体集成工艺等新技术于一体的智能传感系统。它以体积小、价格低、性能可靠等特点为惯性器件研发开辟了新的研究方向。目前我国的 MEMS 陀螺仪制造精度尚不高,所以通过智能信号处理的办法来补偿其误差可提高其精度和稳定性。

在硅微陀螺仪的误差中,影响陀螺仪精度的一个主要原因是陀螺漂移误差。如何降低陀螺漂移误差,尤其是其中的随机漂移误差,成为提高陀螺仪精度的关键。陀螺随机漂移误差易受内部元器件参数变化、温度场波动和外部环境噪声干扰等不确定因素的影响,其非平稳性、弱非线性、慢时变的特性不能用简单的方法加以补偿。因此,寻求适当的信号处理方法是提高测量精度的一个不可或缺的过程。小波变换以其优良的多分辨率特性特别适合非平稳信号的处理,而且随着其在信号处理中的广泛应用,小波去噪理论亦日趋完善。将它用于陀螺信号的去噪处理过程中已取得较好的去噪效果^[1-3]。

本文基于 TMS320F2810 高性能 DSP 器件设计了硅微陀螺随机漂移信号处理电路,利用小波分析方法对 MEMS 陀螺仪输出信号进行处理,并对该方法进行仿真、评估和最终硬件实现。

收稿日期: 2006-10-31; **修回日期:** 2006-12-15

基金项目:“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2002AA812038);“十五”计划国防预研资助项目(41308050109)

作者简介:夏敦柱(1978—),男,博士生,研究方向为微型机电系统理论及应用。Email: xiadz_1999@163.com

联系人:周百令(1939—),男,教授、博士生导师。电话:025-83793644

1 硅微陀螺仪方案及漂移模型

本文所设计的硅微陀螺仪方案如图1所示,包括 MEMS 陀螺模拟部分、高精度低噪声的调理电路、满足带宽要求的高精度 A/D 转换器、高性能 DSP 器件(采用 TI 公司的 TMS320F2810)以及满足用户更新速率要求的高速串口。

一般认为,硅微陀螺漂移主要由常值分量、周期分量和随机漂移组成,其陀螺漂移模型为^[4]:

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

式中, E_0 为陀螺常值零偏; A 为周期分量的幅值; f 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; R 为噪声方差。

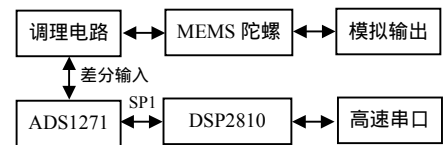


图1 硅微陀螺仪方案
Fig.1 The scheme of MEMS gyroscope

2 Mallat 算法及其应用

2.1 Mallat 分解算法

Mallat 分解算法可以归纳为下列公式:

$$a_n^j = \sum_{k \in Z} \overline{h_{k-2n}} \cdot a_k^{j-1} \quad (2)$$

$$d_n^j = \sum_{k \in Z} \overline{g_{k-2n}} \cdot a_k^{j-1} \quad (3)$$

式中, $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 表示输入序列个数; a_n^j 表示分解后的低频分量, d_n^j 表示分解后的高频分量; j 表示第 j 级小波分解, $j = 0$ 时表示 a_k^0 就是原始输入信号序列; $\overline{h_{k-2n}}$ 是多分辨率分析的尺度系数, $\overline{g_{k-2n}}$ 是多分辨率分析的小波系数。尺度系数可以理解为分解的低通滤波器系数, 小波系数可以理解为分解的高通滤波器系数。

2.2 Mallat 重构算法

同理, 分解算法的逆过程即为重构算法, 其计算公式为:

$$a_n^{j-1} = \sum_{k \in Z} h_{k-2n} \cdot a_k^j + \sum_{k \in Z} g_{k-2n} \cdot a_k^j \quad (4)$$

式中各变量及标号与分解算法相同。

综合上述小波的 Mallat 快速算法的分解和重构, 可以概括如下: 小波分解和重构过程如图2所示, 其中, $\overline{H(\omega)}$ 和 $\overline{G(\omega)}$ 分别是分解用的低通和高通滤波器, 而 $H(\omega)$ 和 $G(\omega)$ 分别是重构用的低通和高通滤波器。它们一般采用线性相位

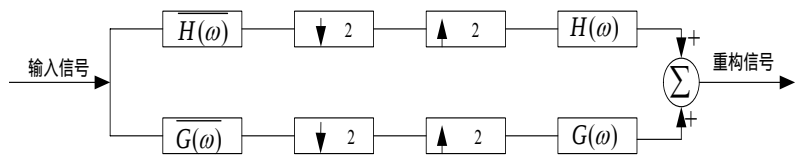


图2 小波分解和重构示意图
Fig. 2 The decomposition and reconstruction of wavelet

滤波器, 可有效减少信号的重构误差, 保留正交小波频带间相干性好的优点, 使各个尺度上的小波系数之间基本没有冗余信息。例如采用 FIR 滤波器可以精确重构原来的信号, 如果需要有效地处理信号, 可采用双正交小波通过使用小波和对偶小波来达到信号的分解和重构的目的。

3 实验仿真与数据处理

在本文中, 对 MEMS 陀螺静态零偏电压信号进行了多种小波信号处理分析比较, 其操作步骤如下: 首先, 对已采集到的一组陀螺输出电压信号, 分别采用 haar 小波、db2 小波、coif2 小波、sym2 小波和 bior1.5 小波进行 5 尺度分解, 然后分别进行软阈值去噪和硬阈值去噪处理, 结果如表1所示。

采用各种小波软阈值滤波前后效果表明: haar 小波虽然滤波后均方差最大, 而且曲线光滑性较差, db2 小波和 sym2 小波滤波所得曲线光滑较好。所以小波基的选取在 db 小波和 sym 小波中进行。考虑到后面要对陀螺输出信号进行实时滤波, 而在实时处理速度的情况下, 具有正交和紧支撑性质的 Haar 小波和 Daubechies 小波比较适合实时小波降噪要求。因为两种类型小波的小波变换及其逆变换都可以用矩阵形式的线性正交变换简洁地解释, 用有限的离散卷积计算完成, 很适用于嵌入式系统在线编程计算。

综合上述考虑, 本文选用 db2 小波。且对任一种小波基而言, 采用软阈值滤波后信号的均方差明显小于采用硬阈值

表 1 五种小波采用软/硬阈值滤波前后均方误差比较

Table 1 The comparison of five wavelets with soft and hare threshold methods

小波类型 零偏电压	Haar	Db2	Coif2	Sym2	Bior1.5
滤波前 (V)	8.2879e-009	8.2879e-009	8.2879e-009	8.2879e-009	8.2879e-009
软阈值滤波后 (V)	8.1968e-009	7.2620e-009	7.3817e-009	7.2620e-009	7.2677e-009
硬阈值滤波后 (V)	8.4225e-009	7.4546e-009	7.4008e-009	7.4546e-009	7.5734e-009

滤波后信号的均方差；采用软阈值滤波所得曲线光滑性优于采用硬阈值滤波，通过上述比较，本文选用 db2 软阈值滤波。

从实时性和高效性综合方面出发对db2小波的分解尺度级数进行最佳选择。通过对db2小波不同尺度（均采用软阈值滤波）后均方误差比较，考虑采用软阈值滤波后噪声的均方差明显小于采用硬阈值滤波后的均方差，且所得曲线光滑性前者优于后者。

表 2 db2 小波不同分解尺度滤波后均方误差比较

Table 2 The comparison of db2 wavelet method with different decomposition scales

分解尺度	均方误差 (V)	分解尺度	均方误差 (V)
2	7.7365e-009	7	7.1485e-009
3	7.5599e-009	8	6.9965e-009
4	7.4089e-009	9	6.5404e-009
5	7.2620e-009	10	6.1421e-009
6	7.0702e-009	11	6.1117e-009

对已采集到的一组陀螺输出信号，采用 db2 小波进行各种多尺度分解，进行软阈值去噪处理后计算输出均方误差。数据处理结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，在所取的尺度内，滤波后均方差随分解尺度的增大而减小（个别尺度除外），但当尺度继续增加时，硬件实现困难且改善不再明显。综合考虑滤波效果和最终在 DSP 中实现，分解尺度取为 3。

综上所述，本文采用 db2 小波，三尺度分解的方法对陀螺输出信号进行滤波。样本长度分别取为 16 点、512 点、1024 点，滤波前后均方误差比较见表 3。

表 3 滤波前后对比

Table 3 The contrast before and after filtering

样本长度	均值 (V)	均方差 (V)
16点滤波前	-0.0677	1.0742e-009
16点滤波后	-0.0677	5.4434e-010
512点滤波前	-0.0682	8.2879e-009
512点滤波后	-0.0682	7.5599e-009
1024点滤波前	-0.0680	4.3600e-008
1024点滤波后	-0.0680	4.2904e-008

由上表可以看出，在本文所取的尺度内，滤波后均方差随样本点数的增大而减小（个别尺度除外）。但当点数继续增加时运算量太大，硬件实现困难且改善不再明显。

综上所述，本文设计的硅微陀螺漂移数据处理系统采用 db2 小波、三尺度分解、16 点采样样本的方法对陀螺输出信号进行滤波。在 Matlab 仿真下性能改善明显，达到了预期的效果；在 DSP 芯片 TMS320F2810 中实时运行正常，满足陀螺性能指标的要求，且与仿真结果一致。

4 利用最小二乘法辨识 Allan 方差误差系数

4.1 ALLAN 方差的定义

设陀螺的采样时间为 T ，共采集了 N 个点，将整个采样数据分成 K 个组， $K = N/M$ ，每组 M 个采样点， $M < N/2$ ，每一组的平均值的计算公式如下所示：

$$\bar{\omega}_k(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \omega_{(k-1)M+i} \quad k = 1, 2, \dots, K \tag{5}$$

Allan 方差定义为：

$$\sigma_A^2(\tau_M) = \frac{1}{2} \langle [\bar{\omega}_{k+1}(M) - \bar{\omega}_k(M)]^2 \rangle \cong \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} [\bar{\omega}_{k+1}(M) - \bar{\omega}_k(M)]^2 \tag{6}$$

式中， $\langle \rangle$ 为总体平均值， $\tau_M = M \cdot T_s$ 。

假设现存随机过程在统计上都是独立的，那么在任意给出的 τ 域中，Allan 方差均为存在于这一 τ 域中的不同随机过程导致的Allan 方差之和^[5]，即：

$$\sigma_{\text{tot}}^2(\tau)=\sigma_{\text{ARW}}^2(\tau)+\sigma_{\text{quant}}^2(\tau)+\sigma_{\text{BianInst}}^2(\tau)\dots=\frac{3Q^2}{\tau^2}+\frac{N^2}{\tau}+\frac{2}{\pi}\ln 2\cdot B^2+\frac{K^2}{3}\tau+\frac{R^2}{2}\tau=\sum_{n=-2}^2A_n\tau^n\tag{7}$$

由式(7)可以看出，陀螺的误差之和是关于自变量 t 的多项式。其系数可以根据陀螺输出数据由最小二乘法拟合得到：

$$A_{-2}=3Q^2\text{ , }Q=\sqrt{A_{-2}/3}\text{ ; }A_{-1}=N^2\text{ , }N=\sqrt{A_{-1}}\text{ ; }A_0=\frac{2}{\pi}\ln 2\cdot B^2\text{ , }B=1.505\sqrt{A_0}\text{ ;}$$
$$A_1=K^2/3,K=\sqrt{3A_1}\text{ ;}$$
$$A_2=R^2/2,R=\sqrt{2A_2}$$

4.2 MEMS 陀螺 ALLAN 方差的拟合结果

Allan 方差对滤波前后的数据的拟和分析，经过 Matlab 软件对系数的拟合，C 语言滤波前后的数据比较如表 4 和表 5。

从滤波前后的数据比较中可以看出，滤波后量化噪声，角度随机游走几乎完全消除，偏值不稳定性减小，速率随机游走系数、速率斜坡系数有所增大。总之，小波去噪的效果还是比较明显的，但是它不能完全消除噪声和补偿由于温度影响所导致的漂移趋势，只是对不同的噪声的去噪水平表现不同。

5 结 论

本文采用 TI 的高性能 DSP 构建 MEMS 陀螺信号处理平台，并就选择何种小波基 Mallat 算法对陀螺输出信号进行滤波处理、是否进行软硬阈值处理以及选择几级分解方案做了详细的分析探讨，先后通过 MATLAB 仿真和 C 语言编程对选择的小波进行滤波前后的 ALLAN 方差比较，通过大量数据实验得出了采用 db2 小波的 3 尺度分解和重构算法能对陀螺降噪和实现实时高效处理是目前最优选择，且在硬件中实现了实时处理验证，目前运行情况良好。

参考文献：

[1] GUO Jiang-chang, TENG Jian-fu, LI Qiang, Zhang Ya-qi. The de-nosing of gyro signals by bi-orthogonal wavelet transform[J]. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 2003: 1985-1988.

[2] LI Qiang, TENG Jian-fu, ZHANG Ya-qi, GUO Jiang-chang. Research of gyro signal de-noising with stationary wavelets transform[J]. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 2003: 1989-1992.

[3] Wan Yan-hui, Pei Ting-guo, Dai Shi-rong. Appliccolim of digital Filter in micromechanical gyro system[J]. Journal of Transducer Technology, Sep. 2003, 22(9): 56-57.

[4] 李广辉，张兴会，麦继平，等. 小波变换在陀螺信号去噪中的应用[J]. 仪器仪表学报，2005，26(8)：506-507.

LI Guang-hui, ZHANG Xing-hui, MAI Ji-ping. Application of wavelet transform in gyro signal de-noising[J]. Chinese Journal of scientific Instrument, 2005, 26 (8): 506-507.

[5] 黄磊，王巍. 闭环光纤陀螺的输出误差特性研究[J]. 中国惯性技术学报，2005，13(3)：52-55.

HUANG Lei, WANG Wei. Output error characteristics of closed-loop FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(3): 52-55.

表 4 滤波前后的拟合系数比较

Table 4 The fitting coefficient comparison of polynomial terms before and after filtering

拟和多项式的系数	小波滤波前	小波滤波后
τ^{-2}	0.0002 e-008	0.0000 e-006
τ^{-1}	-0.0007 e-008	-0.0000 e-006
τ^{-0}	0.0399 e-008	0.0003 e-006
τ^1	-0.2372 e-008	-0.0090 e-006
τ^2	-0.2372 e-008	0.1151 e-006

表 5 滤波前后的拟合噪声项比较

Table 5 The fitting coefficient comparison of noise term before and after filtering

拟合噪声项	小波滤波前	小波滤波后
量化噪声系数Q	8.1650e-007	趋于 0
角度随机游走系数N	2.6458e-006	趋于 0
偏值不稳定性系数 B	3.0062e-005	2.6067e-005
速率随机游走系数K	8.4356e-005	1.6432e-004
速率斜坡系数 R	6.8877e-005	4.7979e-004