

压电振动陀螺仪实时小波滤波方法研究

刘宇,段耀宇,曾燎燎,胡少伟,张小林,贺涛

(重庆邮电大学 光纤通信重点实验室,重庆 400065)

摘要:针对压电振动陀螺仪在工程中应用的需求,对压电振动陀螺仪输出信号中的噪声特点进行了分析,提出一种由无限冲击响应数字低通滤波(IIR)和实时小波滤波相结合的实时滤波方法。该小波算法的正逆变换算法的空间复杂度从 384 降到 360,半软阈值算法时间复杂度从 4 096 降到 4 032。应用 MATLAB7.1 对实验数据和完整算法程序的仿真表明,该方法能实时有效地抑制陀螺仪噪声,提高其输出稳定性,且其完整的滤波算法程序的运行时间明显减少。

关键词:压电振动陀螺仪;噪声抑制;实时小波滤波;无限冲击响应数字低通滤波(IIR)

中图分类号:TM22;V241.5

文献标识码:A

Study on Wavelet's Real-time Filter in Piezoelectric Gyroscope

LIU Yu, DUAN Yaoyu, ZENG Liaoliao, HU Shaowei, ZHANG Xiaolin, HE Tao

(Key Lab. of Optical Fiber Communication Technology, The Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: According to the requirements of the engineering application, the noise characteristics of the output signals of piezoelectric gyroscope were analyzed in this paper. A real-time filtering method combined the IIR low-pass filtering and real-time wavelet filtering was proposed. The computing complexity of wavelet's direct and inverse transformation has been reduced from 384 to 360, and the complexity of half soft threshold has been reduced from 4 096 to 4 032. The simulation result of experiment data and fully-formed program of algorithm by using MATLAB 7.1 has been showed that this method can restrain the noise of gyroscope in real-time, and the time of fully-formed program of algorithm is obviously reduced while the gyroscope's output stability has been enhanced.

Key words: piezoelectric gyroscope; noise restrain; real-time wavelet filtering; IIR

0 引言

陀螺仪是惯性导航和姿态测量中必不可少的器件之一^[1]。陀螺仪的种类很多,包括机电式、激光式、光纤式、压电式和微机械式等。压电陀螺仪因具有耐冲击,寿命长,质量轻,成本低,供电方便,测量范围宽,启动快和可靠性高等显著特点,在航空航天、武器制导、机器人姿态稳定控制、组合导航和井下随钻测量等领域得到广泛应用。在实际应用中,压电陀螺存在弱非线性、非平稳、满时变的随机误差,且信号的输出还受外部环境不确定因素的影响,这些影响要求必须对压电陀螺的输出信号进行滤波处理,提高压电陀螺的输出稳定性^[2-3]。

目前,提高压电振动陀螺仪输出精度和稳定性的技术途径主要有两种:

1) 硬件优化法。其优点是可提高陀螺仪自身精度;不足是研制经费高,周期长,且提高精度和稳定性的空间非常有限。

2) 软件补偿法。其优点是成本低,周期短,且精度提高的余地也较大^[4]。其中,当前应用于陀螺仪输出信号滤波的算法有卡尔曼滤波、粒子滤波、小波滤波等。在实际应用中,卡尔曼滤波常由于其不满足假定条件或计算方法的限制造成滤波器发散,使滤波结果最终失真^[5];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。很多研究者对上述算法的改进来弥补其不足,但都是以牺牲其滤波效果和增加算法复杂度为代价^[6]。具有“数学显微镜”美誉的小波滤波技术已成功应用于各种信号滤波领域,但由于选择小波无统一的框架,算

收稿日期:2011-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10926072);重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTG2007BB2448);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,主要从事惯性传感系统及信号处理的研究。E-mail:liuyu_cqupt@yahoo.com.cn。

法复杂度高等原因,很多应用研究都还停留在仿真试验阶段;在信号滤波的实际工程应用中其优点并没有得到很好的体现^[7]。

针对上述情况,本文提出一种由无限冲击响应数字低通滤波(IIR)和一种实时小波滤波相结合的组合式实时滤波方法,其小波正逆变换的算法复杂度从 $O(n\log_2^n)$ (O 为对括号内数值取整数, n 为数据采样率)降低了 $O(\sqrt{n}J/2)$ (J 为小波分解的最大尺度),半阈值算法复杂度从 $O(n^2)$ 降低了 $O(n)$ 。通过实验数据的仿真分析,该方法在提高小波滤波实时性的同时有效地抑制了陀螺仪的输出噪声,提高了陀螺仪的输出稳定性,具有较好的工程应用前景。

1 压电振动陀螺仪噪声分析

由于受噪声和漂移的影响,压电陀螺仪的输出测量信号常会有很大的误差;而噪声普遍存在于整个系统的电路中,成为影响输出信号质量的主要因素。压电陀螺仪噪声的产生根源按噪声源可分为内部噪声和外部噪声。内部噪声包括来自敏感器件和电路的噪声;而外部噪声是由人为或自然干扰造成的;同时系统中的模数部分有公共接地、公共电源时,数字信号的频繁电流变化在模拟电路中产生噪声,它们通过静电耦合、电磁耦合和漏电流等存在于陀螺仪的电路中。上述噪声可在短时间内描述为如下输出误差模型:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + A \sin(\omega t + \theta_0) + \sigma n(t) + w(t) \quad (1)$$

式中: ε_0 为陀螺常值零偏; A 为周期分量的幅值; ω 为角频率; θ_0 为初始相位; $\sigma n(t)$ 为高斯白噪声; σ 为其噪声强度; $w(t)$ 为有色噪声^[8-9]。

由以上对陀螺输出信号误差影响因素的分析可知,用单一滤波法抑制陀螺仪的输出噪声效果并不理想。为此,本文提出利用最优低通滤波和一种实时小波滤波结合的实时滤波方法。仿真实验表明,该法在不牺牲滤波效果的同时,实时性有了显著提高。

2 滤波理论分析

2.1 IIR 数字滤波器的设计

对美国俄亥俄州立大学卫星定位和惯性导航实验室的车载 IMU 实验得到的大量陀螺仪输出数据进行频谱分析可得到陀螺输出中信号主要集中在几十赫兹的低频部分。本文构造一种切比雪夫逼近的低通 IIR 滤波器,滤除陀螺仪信号中的高频噪声,其设采样频率 1 kHz,阻带边缘 100 Hz,衰减为 80 dB,滤波器阶数 $M=16$ 。

2.2 实时小波滤波算法

小波分析是近十几年兴起的一个信号分析的数

学分支,并在很多领域得到广泛应用;但小波分析不具备平移不变性和因果性的特点使小波滤波过程不能递推进行,从而影响了小波滤波的实时性。在实际工程应用中实时信号处理是很重要的一个环节,能构造一种实时的小波算法在工程应用中有很重要的意义。

实时小波滤波算法^[7]的过程:设用小波进行多分辨率分解所需的最小数据数量为 2^{J_0} ,其中 $J_0 \in N, J_0 \geq 1$ 。再记 k 测量时刻已获得的实时测量数据序列为 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k$,则实时小波滤波可这样完成:在 $k < 2^{J_0}$ 期间,由于所得到的采样数据数量太少,无法进行小波变换及滤波,因此,直接输出 k 时刻的实时采样值 a_k 。当 $k = 2^{J_0}$ 时,进行第一次小波滤波处理,得到 1 个长度为 2^{J_0} 的降噪后数据序列,暂记为 $a_1^*, a_2^*, a_3^*, \dots, a_{2^{J_0}}^*$,这个数据序列是对整个序列 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{2^{J_0}}$ 的小波滤波,在实时情况下,仅输出 $a_{2^{J_0}}^*$ 作为 $k = 2^{J_0}$ 时刻的实时滤波值,其他点的滤波后取值 $a_1^*, a_2^*, a_3^*, \dots, a_{2^{J_0}-1}^*$,可简单地抛弃或作为 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{2^{J_0}-1}$ 的平滑取值留作它用。当下一个采样值 $a_{2^{J_0}+1}$ 到来时,再用最新得到的 2^{J_0} 个采样值,即 $a_2, a_3, \dots, a_{2^{J_0}+1}$,进行小波滤波计算,然后将滤波所得的最后一个值,即 $a_{2^{J_0}+1}^*$ 作为 $k = 2^{J_0} + 1$ 时刻的实时滤波输出。这种计算伴随 k 的增加继续进行,构成一个以宽度固定的滑动窗口内采样数据为输入的处理过程,滑动窗口总是只包含 2^{J_0} 个最新采样数据,直到 $k = 2^{J_0} + 1$ 时刻为止。当 $2^{J_0} \leq k \leq 2^{J_0+1}$ 时,改变滑动窗口的宽度,使之包含 2^{J_0+1} 个最新采样数据,滤波处理后也只输出最后一个值。依次类推,当 $2^J \leq k < 2^{J+1}$ 时(其中 $J > J_0$),取活动窗口的宽度,使之包含 2^J 个最新的采样数据,然后对该窗口内的数据进行小波滤波处理,输出最后一个滤波值。显然为了实时计算速度,系统中上述滑动窗口的宽度不能随采样数据量的不断增加而无限扩大,故当 $k \geq 2^J$ 时(其中 J 与采样速率、被采样信号的截止频率、实时数据更新率及处理器运算速度等有关),滑动窗口的宽度可保持为包含最新 2^J 个采样数据而不再变化。

2.3 小波基和阈值的选择

相对而言,在所有小波基中,能很好地应用于实时滤波的是具有正交和紧支撑性质的 Haar 小波和 Daubechies 小波,但由于 Haar 小波的实际应用价值不大,所以在本文选择 Daubechies 小波。

在众多的小波滤波算法中,实现最简单,计算量最小和应用最广泛的小波阈值滤波最适合实时滤波;而在其实际阈值选取中,硬阈值法和软阈值法常

因分别有较大的方差和偏差而未能达到很好的滤波效果;半软阈值法又因算法相对复杂而未能得到很好的应用。文献[10]应用模糊贴近度理论对半软阈值法中的下阈值进行改进,在具有良好滤波效果的前提下,降低了算法的复杂度,能很好地应用于实时小波滤波中。其算法实现过程如下:

1) 计算欧几里得贴近度。

$$N_E(A^*, B^*) = 1 -$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\mu_{A^*}(x_i) + \mu_{B^*}(x_i)]^2} \quad (2)$$

式中 $\mu_{A^*}(x_i)$ 和 $\mu_{B^*}(x_i)$ 分别为近似系数模糊集 A^* 和细节系数模糊集 B^* 的隶属度。

2) 选取隶属函数及其参数的确定。根据小波域阈值滤波理论,小波函数系数值越大,它由信号所产生的细节概率越大,因此其隶属函数可选成下型:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x < c \\ \frac{1}{1 + [a(x-c)]^b} & x \geq c \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a > 0, b < 0$ 。参数 a, b, c 可根据具体模糊集确定。其中参数 c 可取小波系数最小值的绝对值。设某一层系数的细节部分中系数的绝对值最大隶属度为 1, 最小隶属度为 0, 这样就可确定 a 和 b 。可以看出各层隶属函数的参数不同, 这样也更符合实际。

3) 算法的确立。半软阈值滤波过程中, 下阈值 t_1 选取一般遵循这样的原则: 信号细节较多时将其取小, 这样有利于保留信号细节; 信号细节较少时将其取大, 这样有利于去噪。基于这样的原因, 改进后的 t_1 取为:

$$t_1 = Ct_2 \quad 0 \leq C \leq 1 \quad (4)$$

式中 $C = 1 - N_E(A^*, B^*)$ 。因此改进后的半软阈值函数为

$$\theta_{j,i}^* = \begin{cases} 0 & |\theta_{j,i}| \leq t_1 \\ \text{sgn}(\theta_{j,i}) \frac{(|\theta_{j,i}| - Ct_2)}{1 - C} & t_1 < |\theta_{j,i}| \leq t_2 \\ \theta_{j,i} & |\theta_{j,i}| > t_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_1, t_2 分别为下阈值和上阈值; $\text{sgn}(\theta_{j,i})$ 为符号函数; j 为分解尺度, $1 \leq i \leq N$ 为小波系数位置, $\theta_{j,i}$ 为真实信号在尺度 j 上的第 i 个小波系数。

从时间复杂度的角度来看, 上述改进后的阈值函数算法的复杂度从原来 $O(n^2)$ 降低了 $O(n)$ 。

3 实验结果与仿真

利用美国俄亥俄州立大学卫星定位与惯性导航

实验室的车载 IMU 实验采集到的一段陀螺输出数据验证本文所构造的实时滤波方法。样本长度为 2 000, 采样时间间隔 1 s。图 1 为原始数据的波形图。应用 MATLAB 软件中数据处理工具箱构造的 IIR 对信号进行低通滤波, 滤掉信号中的高频噪声。图 2 为经低通滤波后的波形图, 由图 1、2 对比可看出, 尽管高于 100 Hz 的噪声被很好地抑制, 但信号中仍有大量低频噪声存在, 这些噪声仍然影响着陀螺的输出精度。

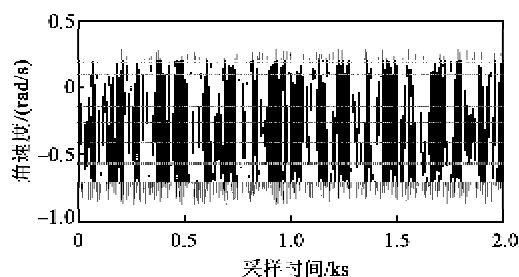


图1 原始信号

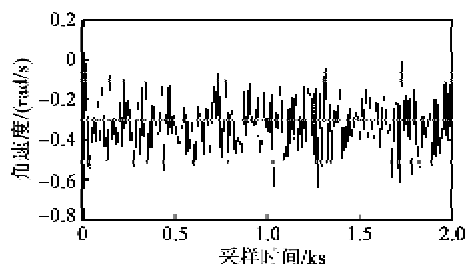


图2 低通滤波后的信号

根据实际应用, 结合 DSP 的存储空间和运算速度, 同时为了更好的在硬件中实现实时性和多尺度分析, 实时小波滤波处理时采用了 64 个点的数据利用窗口进行实时滤波。利用 MATLAB7.1 对低通滤波后的信号进行实时小波滤波, 结果如图 3 所示。

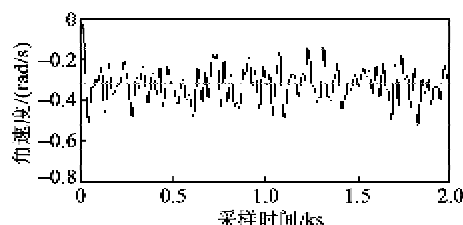


图3 实时小波滤波后的信号

由图 3 可知, 采用本文所构造的低通滤波和实时小波滤波算法结合的滤波方法对某跑车车载 IMU 陀螺仪输出数据滤波处理后, 有效的抑制了陀螺仪输出信号中的噪声, 提高了陀螺仪的输出稳定性。

图 4 为原有的小波阈值滤波后的信号图。比较

图3和图4可知,其滤波效果和稳定性几乎没有区别,即说明本论文所构造的实时小波滤波法在提高实时性的同时并未牺牲滤波精度。

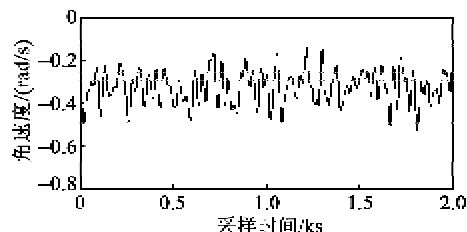


图4 小波阈值滤波后的信号

表1为原始数据和各种滤波后的数据比较。由表可知,本文所构造的实时滤波法与一般的小波阈值滤波法相比,其结果基本相同。本文所构造实时小波滤波不但有很好的实时性,且能在工程中得到很好的应用。

表1 原始数据和滤波数据比较

	均值/(rad/s)	标准差/(rad/s)
原始信号	-0.324 7	0.401 10
低通滤波后	-0.322 3	0.112 00
实时小波滤波后	-0.322 3	0.077 68
小波阈值滤波后	-0.324 7	0.072 95

4 结束语

本文采用IIR低通滤波和改进半软阈值小波滤波法构造了一种实时滤波算法,小波正逆变换的算法复杂度从 $O(n\log^2)$ 降低了 $O(\sqrt{n}J/2)$,半软阈值算法复杂度从 $O(n^2)$ 降低了 $O(n)$ 。应用MATLAB7.1和美国俄亥俄州立大学卫星定位与惯性导航实验室的车载IMU采集到的数据对滤波算法进行了仿真验证。结果表明,在不影响陀螺仪其他输出参数的情况下,该方法在提高滤波实时性的同时,有效抑制了陀螺仪的输出信号中的噪声,提高了陀螺仪的输出稳定性。

参考文献:

- [1] 黄业绪,史忠科,赵青.减小速率积分陀螺漂移误差的方法[J].传感器技术学报,2005,18(3):607-610.
HUANG Yexu, SHI Zhongke, ZHAO Qing. Methods for decrease the drift error of rate integrating gyro[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(3):607-610.
- [2] 李杰,刘俊,张文栋,等. MEMS陀螺仪随机误差补偿方法研究[J].中北大学学报:自然科学版,2009,30(4):381-385.
LI Jie, LIU Jun, ZHANG Wengdong, et al. Research on random error compensating methods for MEMS gyro-
- [3] 章瑜,胡永胜,陶韬.压电陀螺信号处理与滤波技术研究[J].压电与声光,2009,31(4):464-466.
ZHANG Yu, HU Yongsheng, TAO Tao. Study on signal processing and filtering for piezoelectric gyroscope[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(4):464-466.
- [4] 胡士强,敬思良.粒子滤波算法综述[J].控制与决策,2005,20(4):361-366.
HU Shiqiang, JING Zhongliang. Overview of particle filter algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(4):361-366.
- [5] 潘泉,孟晋丽,张磊.小波滤波方法及应用[J].电子与信息学报,2007,29(1):236-242.
PAN Quan, MENG Jinli, ZHANG Lei. Wavelet filtering method and its application[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(1):236-242.
- [6] 王杰,谷宏强,刘佳佳.捷联惯导陀螺信号的小波实时滤波器设计[J].仪表技术,2009,39(3):39-41.
WANG Jie, GU Hongqiang, LIU Jiajia. Wavelet real time filter design of gyro signal for strap down inertial navigation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 39(3):39-41.
- [7] 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):781-784.
JIANG Dongfang, CHEN Ming. A real-time wavelet de-noising algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(6):781-784.
- [8] 姬伟,李奇,赵德安.光纤陀螺信号数字滤波算法研究[J].压电与声光,2009,31(2):179-182.
JI Wei, LI Qi, ZHAO Dean. Research on fiber optic gyro signal digital filtering algorithm[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(2):179-182.
- [9] 夏敦柱,周百令,王寿荣.实时小波滤波方法在硅微陀螺仪中的应用研究[J].中国惯性技术学报,2007,15(1):92-95.
XIA Dunzhu, ZHOU Bailong, WANG Shourong. Application of wavelet's real-time filter in silicon micromachined gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1):92-95.
- [10] 魏文畅,杨俊杰,蔡建立.基于小波变换的半软阈值滤波参数算法研究[J].计算机工程与应用,2009,45(1):73-76.
WEI Wenchang, YANG Junjie, CAI Jianli. Parameter's algorithm of semisoft shrinkage a base on wavelet transforms[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(1):73-76.