

## 基于 DSP 的 MEMS 陀螺去噪算法研究\*

杨娟 马建仓 李俊杰

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

**摘要:** 作为惯导系统的重要传感器,陀螺仪的精度直接影响到导航定位的精确性,而随机噪声是影响其精度的重要因素。对随机漂移进行建模并在系统中加以补偿是提高陀螺及其导航系统精度的关键。本文对 MEMS 陀螺的信号进行分析,对高于通频带的噪声用切比雪夫低通滤波器进行滤波,对带内的噪声运用改进的中值滤波进行处理。DSP 仿真结果表明,该方法能在保证实时性的情况下降低陀螺噪声误差对系统精度的影响,可以将信号的信噪比提高 8 dB。

**关键词:** MEMS 陀螺; 消噪处理; IIR 数字滤波器; FMH 滤波器

**中图分类号:** TM932

**文献标识码:** A

## Research of De-noise algorithms in MEMS gyroscope based on DSP

Yang Juan Ma Jiancang Li Junjie

(Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, xi'an 710072)

**Abstract:** The accuracy of navigation orientation is directly affected by the accuracy of gyroscope, as it is one of the most important sensors. And stochastic noise is an important factor affecting its accuracy. Modeling random drift and compensating it in navigation system is the key point in gyro. In this paper, signal of MEMS gyroscope in time domain and frequency domain was analyzed, a Chebiv low-pass filter has been employed on the noise with frequency beyond passed-band, and the noises in the pass-band are processed by an improved median-filtering. The result based on DSP simulation indicates that this method can improve the SNR to 8 DB, and it also can improve the accuracy of MEMS gyroscope effectively while keeps filtered signal track in real-time.

**Keywords:** MEMS gyroscope; noise eliminating; IIR digital filter; FIR-median hybrid filter

## 0 引言

近年来随着 MEMS 技术的迅猛发展,基于 MEMS 技术的微机械陀螺应运而生,它给陀螺领域注入了新的血液。微机械陀螺是典型的惯性导航器件,它体积小、重量轻、性能稳定、抗干扰能力强、易集成、成本低,在各个领域都有广泛的应用<sup>[1]</sup>。尤其在对重量、尺寸要求很高的航空、航天、军事、消费等领域, MEMS 陀螺具有绝对的优势。陀螺仪是为捷联系统提供信息的重要传感器,它的精度将直接影响捷联惯导系统的导航精度。目前国内市场上 MEMS 陀螺芯片的精度还比较低,属于中低精度范畴,应用有效的降噪方法改善陀螺的性能,以满足较高精度应用,是目前研究的关键问题。本文在这方面进行了有效的尝试。

MEMS 陀螺仪输出信号不仅包含敏感角速率的信息,

还包含有各种随机误差,其中噪声是影响陀螺精度的一个重要因素。除继续改进微机械陀螺的结构外,采用有效的数字信号处理方法对陀螺信号进行处理,并对漂移进行补偿,可以大大降低随机误差对精度的影响,提高陀螺的测量精度。本文对 MEMS 陀螺在运动条件下的实测信号和信号频谱进行分析,采用 IIR 数字低通滤波器结合改进的 FMH 混合滤波器对输出信号进行滤波处理,对滤波前后的均值和均方差进行比较,证明了算法的有效性,并将算法移植到 DSP 上。结果表明,该算法满足实时性的要求,能够较好地适用于 MEMS 陀螺的实时在线滤波处理。

1 MEMS 陀螺信号及噪声分析<sup>[2]</sup>

通常陀螺漂移可分为系统漂移和随机漂移 2 种类型。只要建立的数学模型足够精确,通过漂移补偿计算就可以消除系统漂移对精度的影响。然而随机漂移若是非线性

\* 基金项目:西北工业大学创新种子基金(06017)资助项目

的,慢时变的,同时受外部环境噪声等不确定因素的影响,就不能用简单的方法来补偿。一般来说,角速率陀螺的误差可能有角度随机游走、角速率随机游走、闪烁噪声(零偏稳定度)、速率斜坡、速率量化噪声、正弦噪声、马尔科夫噪声等,其中角度随机游走和零偏不稳定度占主要因素。

以某型测量范围 $\pm 150^\circ/\text{s}$ 、带宽 40 Hz、偏置电压  $2.5\text{ V}\pm 0.1\text{ V}$ 、输出电压  $0\sim 5\text{ V}$  的 MEMS 陀螺作为研究对象,转台静止,以 1 000 Hz 的采样频率记录。MEMS 陀螺原始输出测试曲线如图 2 所示。

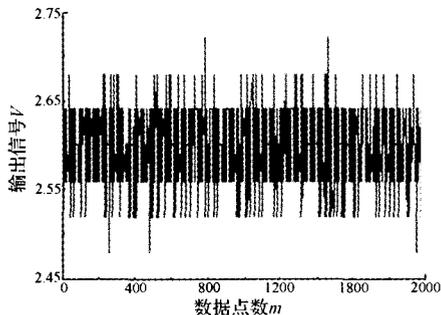


图1 MEMS陀螺原始输出测试曲线

输出信号不仅包含敏感角速率的有用信息,还包含有各种随机误差,对该信号进行功率谱分析,发现有用信号的功率谱密度集中在一个较小的频带,主要集中在 40 Hz 带宽以内。

## 2 陀螺信号的降噪处理

对陀螺信号进行处理的常见算法有小波变换和卡尔曼滤波。小波变换具有多分辨率分析的特点,在时-频 2 域均具有表征信号局部特征的能力,对高频噪声的消除很有效,但是小波变换的卷积运算不具备实时性,用于陀螺实时在线降噪存在局限。很多文献中提到用卡尔曼滤波降低陀螺输出信号中不同频率成分的扰动信号,提高精度,

$$H(Z) = \frac{0.0014 - 0.0046Z^{-1} + 0.0080Z^{-2} - 0.0092Z^{-3} + 0.0080Z^{-4} - 0.0046Z^{-5} + 0.0014Z^{-6}}{1.0000 - 4.9200Z^{-1} + 10.1689Z^{-2} - 11.2903Z^{-3} + 7.0966Z^{-4} - 2.3928Z^{-5} + 0.3380Z^{-6}} \quad (2)$$

滤波器的频率响应如图 2 所示,经过低通滤波器后陀螺的输出信号测试曲线如图 3。

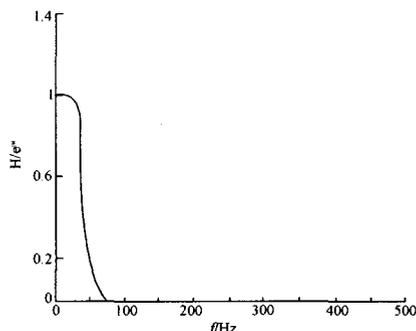


图2 滤波器频率响应特性曲线

但是应用卡尔曼技术必须建立较准确的系统状态方程。而对外部信号来说,其变化规律是随机性的,这就给建立定常的状态方程带来了很大的困难;并且陀螺随机漂移中含有较多的有色噪声,采用卡尔曼技术会增加处理的复杂性并可能引入其他噪声。下面介绍的 2 种滤波算法建模简单,具有较小的时间延迟,初始过渡过程较短,可以实时在线滤波。

针对陀螺信号带宽较窄的特点,设计了 IIR 低通数字滤波器<sup>[3]</sup>,对通频带内的噪声信号,采用改进的 FMH 滤波器,设计如下所述。

### 2.1 IIR 低通滤波

在惯性导航系统的运用中,许多载体姿态运动的频带宽度并不大,而噪声的带宽较大,为了去除高于载体姿态运动频带宽度的噪声,同时又要保证陀螺的输出带宽,可采用具有零阶保持器特性的无线冲击响应(IIR)低通滤波器。对频率高于 40 Hz 的频率滤波<sup>[3]</sup>,本滤波器采用六阶 chebyshevII 型,滤波器的采样频率为 1 000 Hz,通带上限截止频率为 40 Hz,阻带下限截止频率为 80 Hz,通带最大衰减=0.3 dB,阻带最小衰减为=60 dB。

用差分方程的形式描述数字滤波器,差分方程的一般表达式为:

$$y[n] = - \sum_{k=1}^N a_k y[n-k] + \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (1)$$

一般在 MATLAB 中设计滤波器的参数,并验证算法,再将此参数应用到 DSP 程序中,从而缩短开发时间。经计算,滤波器的参数为( $M=N=6$ ):

$$b = [0.0014 \quad -0.0046 \quad 0.0080 \quad -0.0092 \quad 0.0080 \quad -0.0046 \quad 0.0014]$$

$$a = [1.0000 \quad -4.9200 \quad 10.1689 \quad -11.2903 \quad 7.0966 \quad -2.3928 \quad 0.3380]$$

可得六阶 chebyshevII 型低通滤波器的转移函数为:

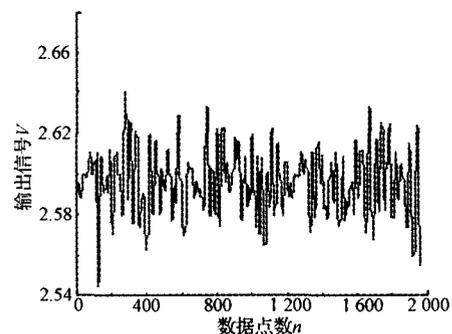


图3 滤波后陀螺输出测试曲线

由图 3 可以看出,经过上述低通滤波后,陀螺输出信

号性能得到了很大的改善,对于 2 000 个数据点,滤波器存在 100 个点左右的延时。IIR 滤波器由于存在着输出对输入的反馈环节,使得其滤波器效果十分明显,在相同技术指标下,IIR 滤波器的阶数远远小于 FIR 滤波器,能较好地适用于 MEMS 陀螺的实时滤波处理。本设计中,滤波器以差分方程的形式给出,实现方法简单,便于工程运用。IIR 低通滤波是经典的数字滤波器,经典滤波器假设信号和噪声在不同的频率范围,但对于噪声谱和信号谱混叠的情况,经典滤波器无能为力,于是进一步设计了基于中值滤波的 FMH 滤波器。

2.2 基于中值滤波的 FMH 滤波

中值滤波是以设计的滤波窗口中的中值来替代局部平均值的滤波方法,这种方法对于清除数据中的高频随机脉冲噪声非常有效,它是一种非线性滤波方法。滑动加权平均的基本思想是采用二项式系数加权进行滤波。通过逐次二项式加权滤波,可以使随机性噪声逐渐得到消除,有效信号的规律性逐渐呈现出来。该方法与加权低通滤波类似,无论滑动区间大小,所求得的滑动加权平均值均具有明显的“滤波作用”。综合应用中值滤波和滑动加权平均法的 FMH(FIR median hybrid)<sup>[6]</sup>滤波可以取得更为明显的效果。FMH 滤波的主要思路是把先前的陀螺信号乘以相应的权重来预测当前时刻的陀螺信号,FMH 的算法如下:

$$\left. \begin{aligned} y_0(n-p) &= x(n-p) \\ y_l(n-p) &= \Gamma_l(x(n-p), y_{l-1}(n-p)) \\ y_{FMH}(n-p) &= y_l(n-p) \\ l &= \min(p, M) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $M$  是滤波器包含的子单元数。

滤波器总的延迟是  $2M+1$ ,  $M$  阶数越大,滤波的效果越好,但是阶数过大的同时也会加大滤波过程的计算量。3 阶 FMH 滤波器结构如图 4 所示。

该算法设计简单,算法快捷,延迟较小,能实时地完成数据净化。这种方法既能抑制随机干扰,又能滤除明显的脉冲干扰,滤波效果比较明显。

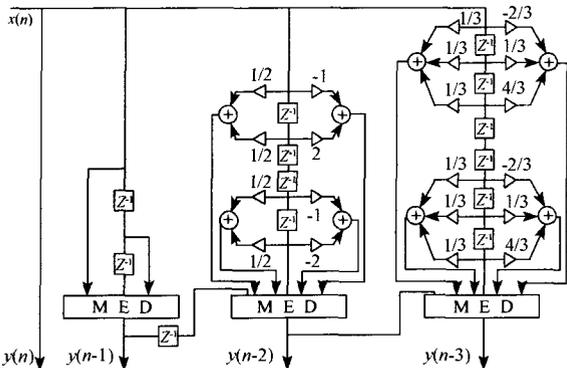


图 4 中值滤波器的结构图

本文采用级联的三阶 FMH,经过低通滤波的信号再

经过 FMH 滤波后,陀螺的输出信号测试曲线如图 5 所示。

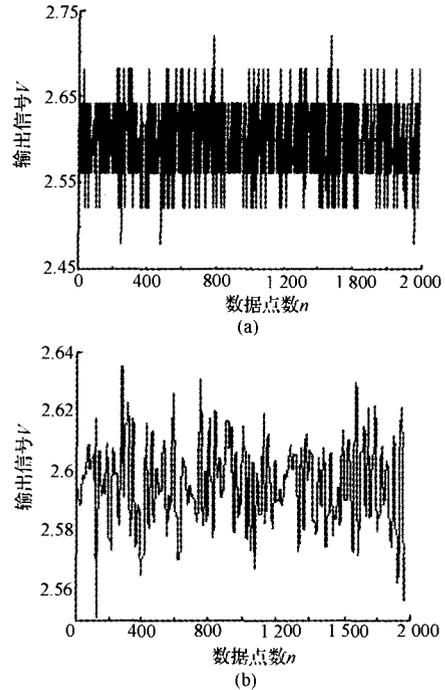


图 5 FMH 滤波前后陀螺输出测试曲线

2.3 滤波效果比较

表 1 对滤波前后信号的均值和均方差进行计算和比较,从数据上可以看出,混合滤波后信号的均方差大幅度减小,由此可见,上述滤波算法对陀螺静态降噪处理是有效的。

表 1 滤波前后均值和均方差比较

	原始数据	低通滤波	混合滤波
均值	2.595 7	2.595 5	2.595 7
均方差	0.034 6	0.014 3	0.008 6

3 算法的实时实现

MEMS 陀螺和高效信号处理系统之间的结合对于获得导航应用中所需的技术指标是至关重要的。本文选用 TI 公司的信号处理器 TMS320F2812 作为系统核心芯片<sup>[4]</sup>。该 DSP 片上集成大量对外器件与接口,方便系统扩展,同时提高了运算的精度(32 位),具有较高的主频(150 MHz)和很好的运算性能(每时钟周期完成 2 次 16 位乘法),可以保证系统的实时性和可靠性。而 DSP 的集成开发环境 CCS 大大缩短了开发周期。

本文在 MATLAB 里面通过验证的算法编写成 C 语言程序移植到 CCS 下面,上述 IIR 滤波算法执行 256 点需要 864 000 个指令周期, F2812 的指令周期为 6.67 ns, 运算 256 点需要的执行时间为 5.76 ms, 算法执行时间小于

(下转第 28 页)

- Electromagnetic transmission through narrow-slot apertures in thick conducting screens [J]. IEEE trans. Electromagnetic Compatibility, 1980, 28(5): 616-622.
- [5] BUTLER C M, UMASHANKAR K R. Electromagnetic excitation of a wire through an aperture-perforated conducting screen [J]. IEEE trans. Electromagnetic Compatibility, 1976, 24(4): 456-462.
- [6] GEORGAKOPOULOS S V, BIRTCHER C R, BALANIS C A. HIRF penetration through apertures: FDTD versus measurements [J]. IEEE trans. Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(3): 282-293.
- [7] LI M. An EMI estimate for shielding-enclosure evaluation [J]. IEEE Trans. Electromagnetic compatibility, 2001 43(3): 295-304.
- [8] ROBINSON M P. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures [J]. IEEE Trans. Electromagnetic compatibility, 1998, 40(3): 240-247.
- [9] DIXSON D S. Finite-element analysis as EMC prediction tool. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(2): 241-248.
- [10] WARNE L K, CHEN K C. Slot apertures having depth and losses described by local transmission line theory [J]. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 1990, 32(3): 185-196.
- [11] WARNE L K, CHEN K C. A simple transmission line model for narrow slot apertures having depth and loss [J]. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 1992, 34(3): 173-182.
- [12] JEDLICKA R P. Electromagnetic coupling into complex cavities through narrow slot apertures having depth and losses [D]. Klipsch School Elect. Comput. Eng, New Mexico State Univ., Las Cruces, NM. 1995.

#### 作者简介



邓云,男,1978年出生,博士研究生,主要研究方向为电磁兼容。

地址:上海浦东新区银霄路100弄10号201室;邮编:201204

许家栋,男,1948年出生,教授,博导,主要从事电磁场与微波技术及目标特性

方面的教学与科研工作。

(上接第10页)

10 ms。改进的FMH滤波算法执行256点需要2 505 000个指令周期,执行时间为16.7 ms。由于F2812为32位定点处理芯片,而滤波器系数和陀螺实测信号都为浮点,在定点DSP上运行浮点算法大大加重了运算负担,延长了计算时间。可以采用Q定标,将浮点运算改成定点运算,转化成定点后,IIR滤波算法执行256点需要151 650个指令周期,执行时间为1.011 ms。FMH滤波算法执行256点需要870 000个指令周期,执行时间为5.8 ms,而为了保证实时性,要求算法处理时间不超过10 ms。比较可知,定点运算比浮点节约指令周期,能满足应用于实时处理场合的要求。

#### 4 结束语

本文详细介绍了IIR低通滤波和基于中值滤波的FMH非线性滤波器的设计方法,并用上述滤波器对MEMS陀螺的实测数据滤波,Allan方差分析了滤波结果,并和目前常用的滤波算法进行了比较。最后将算法移植到DSP,仿真结果表明,算法实时性较好,适合工程运用,能运用于陀螺的在线滤波。

#### 参考文献

- [1] 刘俊,石云波,李杰.微惯性技术[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 傅建国,王孝通,李博,等. MEMS陀螺随机误差模型

研究[J]. 传感器技术, 2005, 24(3): 75-77.

- [3] 吕妍红,崔中兴. 环形激光陀螺信号分析与处理[J]. 传感技术学报, 2004; 17(2): 249-251.
- [4] 张怡,金杰. 干涉型光纤陀螺实验方案[J]. 电子测量技术, 2004, 27(5): 17-18.
- [5] 苏奎峰,吕强. TMS320F2812原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [6] NIEMIMEN A, NEUVO Y and MITRA U. Algorithms for real-time trend detection [J]. Signal Processing, Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1998 International Conference on, 1998, 3: 1530-1533.
- [7] WICHMAN R, HEINONEN P, NEURO Y. FIR-Median Hybrid Filters with Excellent Transient Response in Noisy Conditions [C]. Digital Signal Process, Sep. 1987: 171-175.
- [8] 汪安民,程昱. DSP应用开发实用子程序[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

#### 作者简介



杨娟,女,1981年出生,硕士,主要从事信号与信息处理、DSP开发运用等的研究。