

## 基于 SOPC 的单轴陀螺驱动环路设计

周文闻, 张 嵘, 周 斌, 陈志勇

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:** 传统的微机械陀螺驱动环路采用模拟电路来实现, 为了进一步改善陀螺的性能, 设计出了基于 SOPC (可编程片上系统) 的数字驱动环路。采用 FPGA 为硬件基础, 架构可编程片上系统, 扩展 ADC、DAC、RS422 及 EEPROM 等相关外设接口, 并嵌入软核 CPU 来处理相关算法。软件算法包括多路信号解调、数字滤波器及多个闭环控制。详细讨论了驱动轴频率控制环路和幅度控制环路的作用及其对微机械陀螺性能的影响。针对软核 CPU 的性能, 对整个算法进行了优化, 最终在软件计算时间和资源使用上都留有一定裕度, 有利于后续加入更多功能。最终的实验表明, 所设计的数字系统在  $-40^{\circ}\text{C}$  到  $+85^{\circ}\text{C}$  范围内正常工作, 满足工业级的使用要求, 实际使用过程比模拟的驱动环路更加方便, 实现了微机械陀螺驱动环路的数字化。

**关键词:** 微机械陀螺; 驱动环路; 可编程片上系统; 知识产权核

**中图分类号:** U666.1

**文献标志码:** A

## Drive loop design of single axis gyroscope based on SOPC

ZHOU Wen-wen, ZHANG Rong, ZHOU Bin, CHEN Zhi-yong

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Traditional drive loop of MEMS gyroscope is based on analog circuit. For the improvement of MEMS gyroscope, a new digital drive loop of gyro based on SOPC(System on Programmable Chip) was designed. The SOPC was constructed with FPGA and several peripherals. Related IP cores are designed, such as the interface of ADC, DAC, RS422, and EEPROM. Signal demodulation, digital filters and control loops were involved in algorithm. The theory and realization of algorithm were introduced, especially the functions and effects of frequency close loop and amplitude close loop of drive axis. The characters of the CPU IP core were taken into account, and the whole algorithm was optimized. Therefore, the margin of time and hardware resource was available for adding more functions. The measurement results demonstrate that the digital system can work from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ , achieving industrial performance. Further more, compared with analog drive loop, the digital drive loop is much more convenient.

**Key words:** MEMS gyroscope; drive loop; system on programmable chip; intellectual property core

对于微机械陀螺而言, 驱动信号直接影响陀螺的标度因子、零偏稳定性等性能。本文设计出一种利用 SOPC 来生成高精度陀螺驱动信号的方法, 通过闭环控制使陀螺驱动轴处于谐振状态, 获得最大的振幅。

### 1 设计方案

图 1 为陀螺数字系统的框图, 其工作流程大致如下: 四路模拟信号 (驱动信号、驱动轴检测信号、敏感轴检测信号和力平衡信号) 通过 A/D 采集到 FPGA 当中。每路信号的采样率为 48 kHz, 因此总的采样率为  $48\text{ kHz} \times 4 = 192\text{ kHz}$ 。通过 FPGA 来控制 A/D 的转换信号。信号被采样进 FPGA 以后, 首先进行高通滤波, 去除因为 A/D 转换器零位漂移所引入的直流分量。然后对每路信号分别进行解调, 通过基准信号生成模块产生与被解调信号同相的基准信号。驱动轴检测信号的正交分量反映陀螺驱动信号的幅值信息, 通过 PI 控制, 可将陀螺驱动信号的幅度稳定在设定值, 以保持陀螺输出标

**收稿日期:** 2008-09-23; **修回日期:** 2008-11-27

**基金项目:** 国防预研项目基金资助 (9140A09020507JW0107)

**作者简介:** 周文闻 (1984—), 男, 博士生, 研究方向为微机械陀螺。E-mail: 520zww@gmail.com

**联系人:** 张嵘 (1969—), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: rongzh@mail.tsinghua.edu.cn

度因子的稳定性；驱动轴检测信号的同相分量反映陀螺本身的相位信息，通过 PI 控制，可将陀螺驱动信号与驱动轴检测信号的相位差稳定在  $90^\circ$ ，使陀螺始终工作在谐振状态，用较低的驱动电压使陀螺达到较大的振幅。以上闭环控制信号共同进入正弦波生成模块，用于产生校正以后的陀螺驱动信号。敏感轴检测信号的同相分量反映输入角速率的大小，经 Butterworth 低通滤波后，从 RS422 串口输出到上位机。

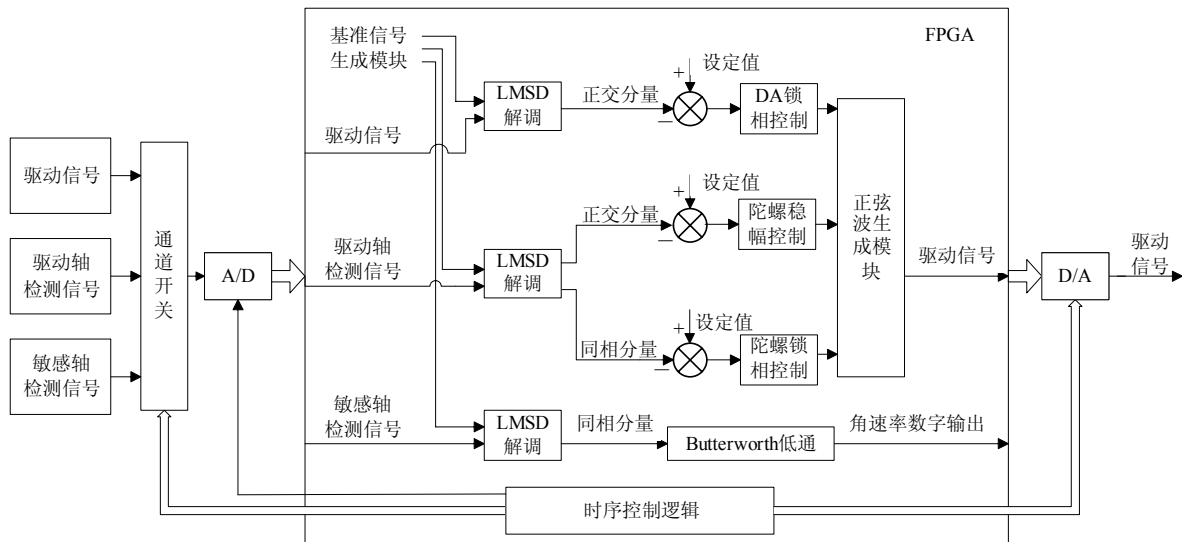


图 1 基于 SOPC 的 MEMS 陀螺数字系统框图

Fig.1 Block diagram of MEMS gyroscope digital system based on SOPC

## 2 陀螺驱动轴频率闭环

经过解调以后的信号，分成同相分量和正交分量两路。其中同相分量指的是相位与参考信号相位相同，它可以近似反映原信号的幅值信息；正交分量与同相分量之比可以近似反映原信号的相位信息。下面通过乘法解调加低通滤波的方法来推导上述结论。

假设参考信号为  $\sin \omega t$ ，待解调信号为  $A \sin(\omega t + \Delta \varphi)$ ，同相分量的乘法解调过程如式 (1) 所示：

$$A \sin(\omega t + \Delta \varphi) \sin \omega t = A(\sin \omega t \cos \Delta \varphi + \sin \Delta \varphi \cos \omega t) \sin \omega t = \frac{A}{2}(\cos \Delta \varphi - \cos \Delta \varphi \cos 2\omega t + \sin \Delta \varphi \sin 2\omega t) \quad (1)$$

将上述结果经过低通滤波器以后，2 倍频的分量已经去除，因此只剩下  $\cos \Delta \varphi$  一项，当  $\Delta \varphi$  为一个小量时， $\cos \Delta \varphi$  近似得 1，因此最后的结果只剩下原信号的幅值信息  $A/2$ 。

同样可推导正交分量的乘法解调过程：

$$A \sin(\omega t + \Delta \varphi) \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = A \sin(\omega t + \Delta \varphi) \cos \omega t = A(\sin \omega t \cos \Delta \varphi + \sin \Delta \varphi \cos \omega t) \cos \omega t = \frac{A}{2}(\cos \Delta \varphi \sin 2\omega t + \sin \Delta \varphi \cos 2\omega t + \sin \Delta \varphi) \quad (2)$$

低通滤波器滤除 2 倍频分量以后，只剩下  $\sin \Delta \varphi$  一项。将滤波以后的正交分量除以滤波以后的同相分量：

$$\sin \Delta \varphi / \cos \Delta \varphi = \tan \Delta \varphi \approx \Delta \varphi \quad (3)$$

因此，正交分量与同相分量之比  $\tan \Delta \varphi$  在  $\Delta \varphi$  较小的时候，可以近似等于  $\Delta \varphi$ ，反映出原信号与参考信号之间的相位差。

通过相位闭环控制来实现陀螺驱动轴谐振的原理如下：对于一般的线振动微机械陀螺而言，质量块在驱动轴方向上都可以看作是典型的质量弹簧系统，即是一个典型的二阶系统。当二阶系统工作在谐振频率处时，系统引入的相位变化为  $-90^\circ$ 。因此可以通过闭环控制来调节驱动信号的频率，目标是使驱动轴的输出信号与输入信号之间的相位差为  $-90^\circ$ ，这样就可以保证陀螺的驱动模态始终工作在谐振点处。

驱动轴频率闭环方框图如图 2 所示。图中首先给出陀螺驱动轴谐振频率的初始估计值，每个陀螺驱动轴的谐振频率均不相同，实际的谐振频率离初始值越近，则环路的稳定时间越快。驱动信号经过陀螺的驱动轴以后，相位会滞后  $90^\circ$ 。

当 A/D 转换将驱动轴的输出信号采集到 FPGA 中进行解调, 实际被解调信号和基准信号是有  $90^\circ$  的相位差, 因此对于解调的结果而言, 正交分量表示的是驱动轴输出信号的幅值信息, 同相分量表示的是驱动轴输出信号的相位信息。如果同相分量等于 0, 则表示驱动轴输出信号和基准信号的相位差恰好为  $90^\circ$ , 陀螺驱动轴工作在谐振点上。

图 2 中的  $1/K_f$  为同相分量到频率差  $\Delta f$  的比例系数, 具体推导过程如下:

根据式 (3) 可知, 解调结果中反映相位信息的分量比上反映幅值信息的分量, 得到的是被解调信号和基准信号之间的相位差  $\Delta\varphi$ , 对于陀螺驱动轴而言, 驱动轴检测信号与基准信号之间的相位差就是  $90 + \Delta\varphi$ 。从相位差  $\Delta\varphi$  到频率差  $\Delta f$  之间的关系  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta f T$  有  $\Delta f = \frac{\Delta\varphi}{2\pi T} = \frac{1}{2\pi T} \cdot \frac{\text{同相分量}}{\text{正交分量}}$ , 所以

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{2\pi T K_a} \quad (4)$$

其中,  $T$  为采样间隔时间,  $K_a$  为理论的解调幅值。

PI 控制器的连续形式如式 (5) 所示:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

在时域中的模拟算法如式 (6) 所示:

$$y(t) = K_p x(t) + K_i \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (6)$$

将比例环节和积分环节离散化:

$$y_p(k) = K_p x(k), \quad y_i(k) = y_i(k-1) + \frac{K_i T}{2} [x(k) + x(k-1)] \quad (7)$$

因此可以得出:

$$y(k) = y_p(k) + y_i(k) = y_i(k-1) + K_p x(k) + \frac{K_i T}{2} [x(k) + x(k-1)] \quad (8)$$

其中  $y_i(k-1) = y(k-1) - y_p(k-1)$ , 代入式 (8) 可得:

$$\begin{aligned} y(k) &= y(k-1) - y_p(k-1) + K_p x(k) + \frac{K_i T}{2} [x(k) + x(k-1)] = \\ &= y(k-1) + K_p [x(k) - x(k-1)] + \frac{K_i T}{2} [x(k) + x(k-1)] = \\ &= y(k-1) + K_0 x(k) + K_1 x(k-1) \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $K_0 = K_p + \frac{K_i T}{2}$ ,  $K_1 = -K_p + \frac{K_i T}{2}$ 。具体的控制器参数需要针对不同的陀螺, 在调试过程中修改。

### 3 陀螺驱动轴幅度闭环

MEMS 陀螺属于闭环振荡系统, 对于一个闭环振荡系统而言, 稳定振荡的范围是一个点而非一个范围, 但是对于实际系统来说, 是不可能稳定保持在一个点上的, 所以必须通过闭环控制来实现。更重要的是, 由哥式振动陀螺的基本原理公式  $F_c = 2mV \times \Omega$  可以得出, 质量的运动速度的稳定性直接决定了对角速度测量的稳定性。在振动陀螺中, 交变的速度实际上对被测角速度起到了调制作用, 因而要求稳定的测量实际上是要求交变的振动速度具有稳定的幅值。因此为了达到上述目的, 必须对振动幅度进行闭环控制, 即对陀螺的驱动轴进行稳幅闭环。

具体的稳幅算法实现如图 3 所示, 驱动轴输出信号被 A/D 转换成数字量, 经过 LMSD 解调以后的正交分量代表驱

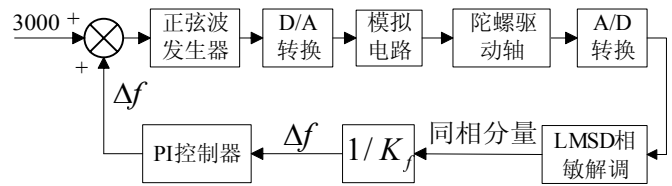


图2 驱动轴频率闭环方框图

Fig.2 Close loop of frequency signal of drive axis

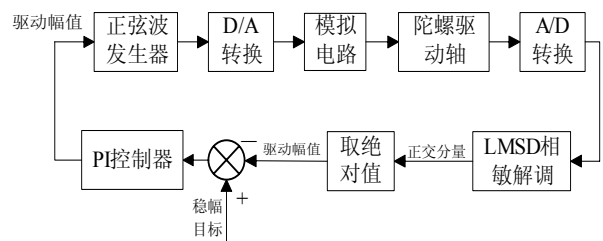


图3 驱动轴幅度闭环方框图

Fig.3 Close loop of amplitude signal of drive axis

动信号的幅值, 该幅值信号取绝对值以后就是驱动幅值, 然后与稳幅目标比较以后, 送到 PI 控制器, PI 控制器的输出就是经校正以后的驱动幅值。

驱动轴稳幅闭环中的 PI 控制器连续形式与式 (5) 相同, 离散形式与式 (9) 相同。

#### 4 仿真与实验对比

解调之前的驱动轴输出信号是被驱动信号所调制的正弦波, 相位比驱动信号滞后  $90^\circ$ 。图 4 为基准信号、驱动信号和驱动轴输出信号的 MATLAB 仿真图, 其中蓝色图线为基准信号, 红色图线为驱动信号, 黑色图线为驱动轴

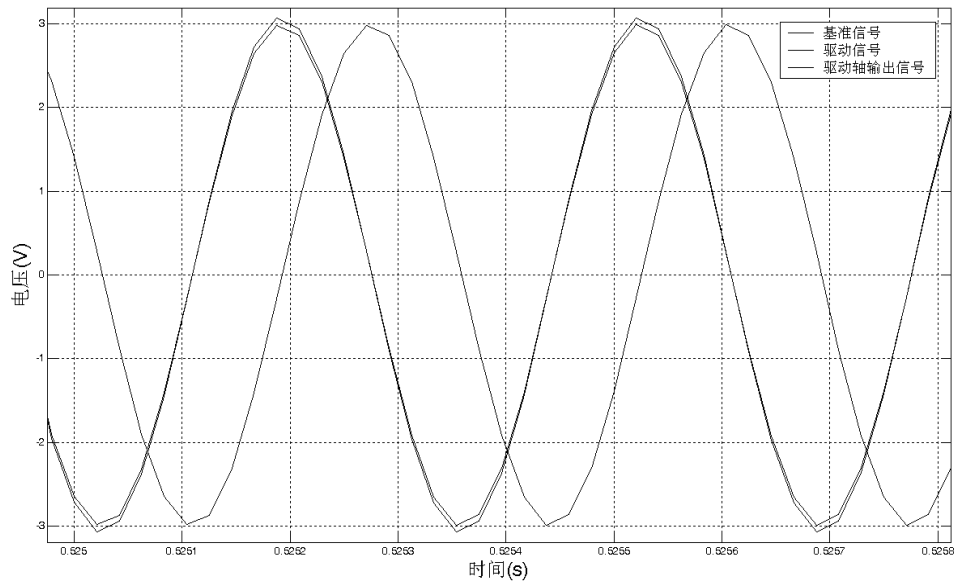


图4 基准信号、驱动信号与驱动轴输出信号仿真图

Fig.4 Simulation of reference signal, drive signal and output signal of drive axis

输出信号。由于驱动轴频率闭环的作用, 驱动轴输出信号与驱动信号之间的相位差锁定在  $90^\circ$ , 此时驱动轴谐振。由于驱动轴幅值闭环的作用, 驱动轴输出信号的幅值也稳定在设定值处。

图 5 中, 黄色图线表示实测的驱动信号, 蓝色图线表示实测的驱动轴输出信号。从实测图的波形也可以看出, 驱动轴信号比驱动信号滞后  $90^\circ$ , 而且也锁定了  $90^\circ$  的相位差。驱动轴的输出幅值也稳定在 1 V 左右。

#### 5 结论

经过多次实验验证, 论文所设计的系统可以给微机械陀螺提供精准的驱动信号, 而且在  $-40^\circ\text{C}$  到  $+85^\circ\text{C}$  的温度变化范围内正常工作, 满足工业级的使用要求。

#### 参考文献 (References):

- [1] 周斌, 高钟毓, 陈怀, 等. 微机械陀螺数字读出系统及其解调算法[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44(5): 637-640.  
ZHOU Bin, GAO Zhong-yu, CHEN Huai, et al. Digital readout system for a micro-machined gyroscope and its demodulation algorithm[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 2004, 44(5): 637-640.
- [2] Yen-Cheng Chen, M'Closkey T, Tran T A, et al. A control and signal processing integrated circuit for the JPL-Boeing micromachined gyroscopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(2): 286-300.
- [3] Rodjergard H, Sandstrom D, Pelin P. A novel architecture for digital control of MEMS gyros[J]. Sensors, 2004, 3: 1403-1406.
- [4] Keymeulen D, Ferguson M I, Breuer L. Tuning of MEMS gyroscope using evolutionary algorithm and "switched drive-angle" method[C]// Aerospace Conference, 4-11 March, 2006: 1-8.
- [5] JIAO Ji-wei, HAN Ming, WANG Xiang-li, et al. A digital demodulation solution to achieve stable driving for a micro-machined gyroscope with an AGC mechanism[J]. Sensors, 2004, 1: 429-432.
- [6] Oboe R. Control of a z-axis MEMs vibrational gyroscope[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(4): 364-369.
- [7] Nunzi E, Antonello R, Oboe R, et al. Design of a Delta-Sigma bandpass demodulator for a Z-axis MEMS vibrational gyroscope[C]// International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 24-28 July, 2005: 238-242.

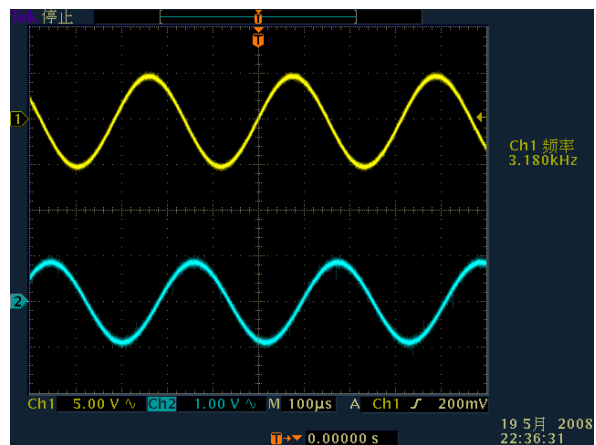


图5 驱动信号与驱动轴输出信号实测图

Fig.5 Test of drive signal and output signal of drive axis