

基于多核技术的三轴陀螺数字测控系统
3-axis MEMS gyro system based on SOPC multi-core technique
(清华大学) 严杰 周斌 张嵘 YAN Jie ZHOU Bin ZHANG Rong

基金颁发部门: 中国人民解放军总装备部

项目申请人: 周斌

项目申请时间: 2007 年 1 月 31 日

摘要: 本文首次介绍了一种基于 SOPC 多核技术的三轴一体化 MEMS 陀螺数字测控系统。系统通过进行驱动频率闭环、驱动幅度闭环控制,使三只陀螺驱动轴稳定地工作在各自谐振点上且幅度稳定,同时对陀螺敏感轴信号进行解调,实时输出三轴同步的角速度信息。本文采用 SOPC 多核协调同步、多总线控制、并行计算、数字闭环控制等技术,创新性的构建了单片 FPGA 内集成多个计算内核的三轴实时并行计算系统,与传统的 FPGA+DSP 数字控制系统相比显示出小体积、低功耗、低成本、完全可重构、高并行处理能力等优势,同时为今后系统 ASIC 化打下基础,具有很好的应用前景。

关键词: 微机械陀螺仪; 片上系统; 多核协调同步; 数字闭环控制

中图分类号: TP273+.5

文献标识码: A

Abstract: This dissertation introduces a novel 3-axis MEMS gyro system based on SOPC multi-core technique. Firstly three gyros are made to work on the resonant frequency of their own by means of frequency closed-loop control. Then the amplitudes of the drive signals are set to the desired values by means of amplitude closed-loop control. At the same time the signals in the sense direction are demodulated. At last 3-axis real-time angular velocity message is transmitted to pc. In this dissertation some topical techniques like multi-core synchronous computation, multi-bus control, digital closed-loop control etc. are discussed. Innovatively a one-chip FPGA multi-core system is architected who has three computing cores and several auxiliary cores. Compared with the FPGA+DSP method in traditional digital control system the new one is smaller, cheaper, and more flexible with completely re-architected ability and parallel computation ability. We also consider it as a foundation of ASIC in the future. It has high value and broad prospect in application.

Keywords: MEMS gyroscope; SOPC; Multi-core synchronization; Digital closed-loop control

1 引言

随着制导武器向微型化、低成本、高可靠性、高精度、强抗干扰能力的方向发展, MEMS 惯性仪表在现代战争中显示出愈来愈强的生命力。MEMS 陀螺仪是 MEMS 惯导系统的重要组成部分,以前主要用模拟电路对其进行外围信号处理,近年来出现的数字陀螺系统体现出高精度、高稳定性、设计灵活、抗干扰能力强等优势,已可取代模拟外围信号处理电路,国外一些机构也有关于单轴数字陀螺的相关报道,但目前三轴一体化的数字外围信号处理系统还没有研发出来,本文属首创。为了进一步减小数字陀螺系统的体积,降低系统功耗,希望将 xyz 三轴陀螺放在同一个数字系统中来处理,但是,它要求单个处理器的复杂度更大,流水级数更多,要在规定周期内完成计算需要的系统频率也更高,在此基础上做进一步努力所能取得的回报越来越少,功耗更随着频率的提升成指数增长。与此同时,数字陀螺系统中正弦波发生模块会占用大量的计算资源,即使是在高速的单核 DSP 芯片中,陀螺控制算法的计算资源也非常紧张。本文采用 SOPC 多核协调同步、多总线控制、并行计算、数字闭环控制等技术,设计了一种三轴一体化 MEMS 陀螺数字测控系统。它创新性的构建了单片 FPGA 内集成多个计算内核的三轴实时并行计算系统,与传统的 FPGA+DSP 数字控制系统相比显示出小体积、低功耗、低成本、完全可重构、高并行处理能力等优势,从本质上解决了数字

陀螺系统中正弦波发生模块占用大量计算资源的问题。同时为今后的 ASIC 化打下基础，具有很强的应用价值和前景。

2 系统硬件方案设计

多核处理器一般有同构多核与异构多核两种结构。同构多核处理器的各个计算核一般执行同类线程，设计的重点在于核间同步、cache 共享；异构多核处理器的各个计算核执行不同线程，每个核都需要单独设计，其设计重点在于不同线程的调度机制与通讯方式。本文系统使用 xilinx 公司出品的 FPGA 芯片 XC3S1600E，内部硬件结构采用同构方式构建，如图 1 所示。

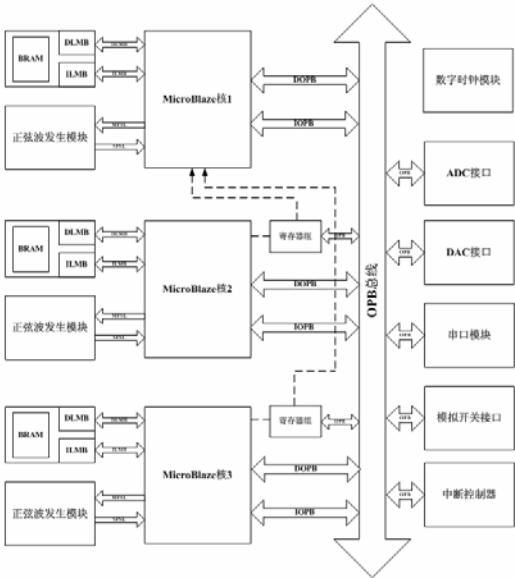


图 1 系统总体结构框图

其中 MicroBlaze 为 FPGA 内的嵌入式软核，用于运算处理，在每个中断周期内 MicroBlaze2 和 MicroBlaze3 会将计算好的数据存入为它们设计的寄存器组内供 MicroBlaze1 读取，进行数据组合，再通过 RS422 传送给上位机。MicroBlaze 核 1 负责响应中断和中断标志位的清除，MicroBlaze 核 2 和 MicroBlaze 核 3 只响应中断而不对中断进行操作，以避免中断控制寄存器在同一时间被多个程序修改而产生冲突。在中断模块初始化后三核都进入空循环，等待外部中断的到来。当外部中断产生以后，三核同时进入中断服务程序，进入以后 MicroBlaze 核 1 首先要清除中断信号，确保能再次进入中断，然后三核同时并行的开始计算。

MicroBlaze 内部的 BRAM 用于存储数据和指令。LMB 称为本地存储器总线，MicroBlaze 分别通过 DLMB 和 ILMB 完成与 BRAM 之间数据和指令的传输。FSL 称为快速单工连接，MicroBlaze 通过 MFSL 和 SFSL 完成与协处理器之间的通信，正弦波生成模块是算法中比较常用且复杂的部分，因此将其编写成协处理器形式的 IP 核，通过硬件来完成计算。OPB 称为片上外设总线，MicroBlaze 通过 DOPB 和 IOPB 完成与外设之间数据和指令的传输。ADC 接口核将 OPB 总线与 ADC 相连，模拟开关接口核用于控制模拟开关各通道间的自动切换，DAC 接口核将 OPB 总线与 DAC 相连，OPB 中断控制器用于控制 OPB 总线上的中断信号，系统中还用到了数字时钟处理模块，将输入 FPGA 的时钟信号倍频以后供各总线使用。

3 系统软件与算法设计

算法大概可以分为以下几个模块：低通和高通滤波、LMSD 解调、基准正弦波生成、陀螺驱动信号频率闭环、陀螺驱动信号幅度闭环、角速度信号读出、信号按协议往上位机发送等。本文重点介绍数字陀螺的闭环控制算法。

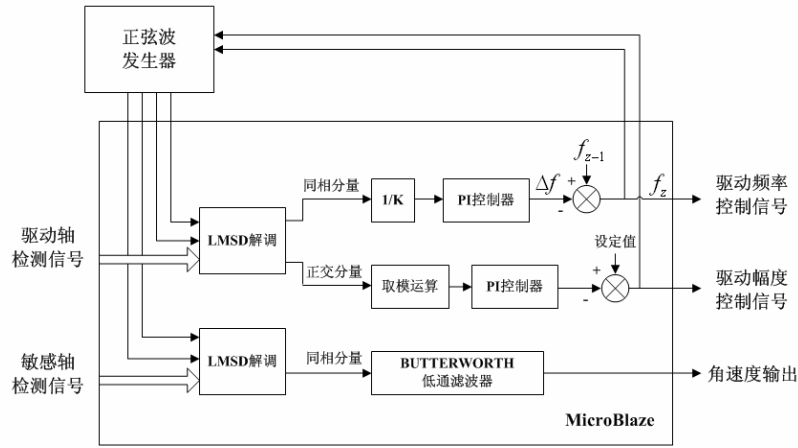


图 2 MicroBlaze 内部算法框图

如图 2 所示，算法首先是针对两路采集进来的信号生成两路解调需要使用的基准正弦波，接着生成陀螺驱动的数字信号，送到 DAC 的接口。从 ADC 接口读取陀螺驱动轴检测信号，进行滤波和解调，将解调后的同相分量用于闭环控制，调整驱动频率，使陀螺始终工作在谐振点上。将正交分量用于闭环控制，稳定驱动信号的幅度。从 ADC 的接口读回陀螺敏感轴检测信号，进行滤波和解调，同相分量即为角速度输出信号。最后 MicroBlaze 核 1 读取 MicroBlaze 核 2 和 MicroBlaze 核 3 的输出的陀螺频率、驱动幅度、敏感轴检测信号的同相分量和正交分量，将 12 路信号数据拼接成一帧数据，通过串口发送给上位机。

3.1 陀螺驱动频率闭环算法

系统的主要控制对象是线振动微机械陀螺，工作时在一个方向上施加交变驱动力，使质量块拥有驱动方向的线速度为 \vec{V} ；当陀螺载体有垂直于纸面的角速度 $\vec{\Omega}$ 输入时，根据科氏原理：

$$\vec{F} = 2m\vec{\Omega} \times \vec{V}$$

质量块将受到纸面内与驱动方向相垂直的惯性力作用而振动，这个方向的振动模态叫检测模态，检测模态的运动通过检测梳齿电容的变化转换成电信号，这个信号实际上是以驱动信号为载波，角速度 $\vec{\Omega}$ 信号为被调信号的调幅波，解调后即可得到角速度信息。驱动模态与检测模态在较为理想的情况下均为线性二阶系统。

为了提高检测灵敏度，运动梳齿和检测质量块的振幅越大越好。与此同时系统需要实现稳定的谐振，因此必须对驱动轴的信号进行频率闭环。既然线振动微机械陀螺是一个线性二阶系统，则它工作在谐振频率处时，系统引入的相位变化为 -90° 。可以通过相位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° ，这样就可以保证陀螺的驱动模态始终工作在谐振点处。设驱动信号 $u \sin \omega t$ ，驱动轴检测信号 $A \sin(\omega t + \varphi)$ ，用与驱动信号同相的信号 $\sin \omega t$ 去解调驱动轴检测信号。相敏解调原理为：

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

经过低通滤波后，二倍频分量被滤去，只剩下包含相位信息的部分 $\frac{A}{2} \cos \varphi$ 。当 $\varphi = -90^\circ$ 时该部分为零，因此把该部分的值作为反馈量通过控制器后形成闭环。控制器部分由一个比例调节器和一个 PI 控制器组成。

PI 控制器的连续形式为：

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$$

在时域中可写成：

$$y(t) = K_p x(t) + K_I \int_0^t x(\tau) d\tau$$

将比例环节和积分环节离散化：

$$y_p(k) = K_p x(k)$$

$$y_i(k) = y_i(k-1) + \frac{K_I T}{2} [x(k) + x(k-1)]$$

整理可得：

$$y(k) = y(k-1) + K_0 x(k) + K_1 x(k-1)$$

其中：

$$K_0 = K_p + \frac{K_I T}{2} ; \quad K_1 = -K_p + \frac{K_I T}{2}$$

3.2 陀螺驱动幅度闭环算法

质量运动速度的稳定性直接决定了角速度测量的稳定性。根据科氏原理，交变的速度实际上对被测角速度起到了调制作用，稳定测量实际上是要求交变的振动速度信号具有稳定的幅值。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幅度闭环。用与驱动信号正交的信号 $\cos \omega t$ 去解调驱动轴检测信号。相敏解调原理为：

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

经过低通滤波后，二倍频分量被滤去，且如果此时 $\varphi \approx -90^\circ$ ，原式只剩下包含幅度信息的 $-A/2$ ，将其取模再通过 PI 控制器后反馈形成闭环，修正驱动信号到设定的幅度。可以看到，整个过程实际上是通过驱动轴检测信号的幅度，来控制驱动信号幅度。其中一个很重要的条件是 $\varphi \approx -90^\circ$ ，也就是说两个闭环算法同时进行，计算的初值不能离系统驱动轴的谐振频率太远。因此在闭环之前，对 xyz 轴的三支陀螺分别进行了扫频实验，谐振频率在 3100Hz~3300Hz。将计算的初值设定至各自的谐振频率附近，这样的设定保证了算法的收敛，加快了调整速度。角速度信号的读出原理与其类似，所不同的是后者是对检测轴信号进行相敏解调。

4 实验结果与结论

以 x 轴陀螺驱动信号和驱动检测信号为例。如图 3 所示驱动检测信号相位被锁定在落后于驱动信号 90 度处，驱动频率被锁定在 3174Hz。驱动检测信号峰峰值被锁定在 5V 左右，与设定值相符。

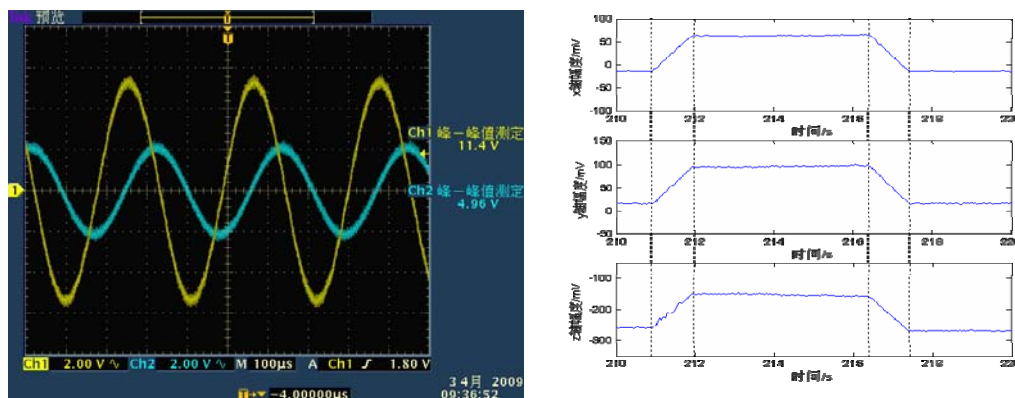


图 3 驱动双闭环后实测波形与三轴同步性测试

在实际应用的过程中,xyz 轴三只陀螺分别固定于空间三个互相垂直的平面内,敏感 xyz 三个方向的角速度。为了方便验证三轴同步性,实验时将 xyz 轴三只陀螺固定于同一转台平面上,使它们敏感同一方向的角速度,转台从静止匀加速至 $20^{\circ}/s$, 保持几秒后从 $20^{\circ}/s$ 匀减速至静止。实验结果如图 3 所示,xyz 轴三只陀螺角速率输出值同时进入加速和减速,同时达到稳定态,说明三轴同步性良好。

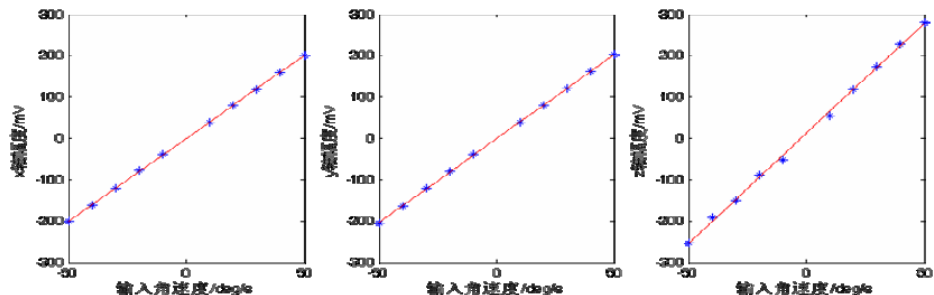


图 4 三轴陀螺系统标定实验结果

之后对三轴陀螺同时进行了标定, x 轴陀螺标度因子为 $4.0073mV/^{\circ}/s$, y 轴陀螺标度因子为 $4.0612mV/^{\circ}/s$, z 轴陀螺标度因子为 $5.3142mV/^{\circ}/s$ 。最后进行了温度实验,系统在 $-40^{\circ}C$ 到 $+85^{\circ}C$ 范围内正常工作,满足工业级的使用要求。

本文作者创新点:采用 SOPC 多核协调同步、多总线控制、并行计算、数字闭环控制等技术,构建了单片 FPGA 内集成多个计算内核的三轴实时并行计算系统。

参考文献:

- [1]周斌. 微机械陀螺数字化技术研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学精密仪器与机械学系, 2003
- [2]严春晓等. 基于 AD2S83 和 DSP 的感应同步器测角系统. 微计算机信息, 2008, 6-2: 6-8
- [3] H. Rodjergard, D. Sandstrom, P. Pelin. A novel architecture for digital control of MEMS gyros. Sensors, 2004, 3: 1403-1406
- [4] A. Gaisser, W. Geiger, T. Link, et al. New digital readout electronics for capacitive sensors by the example of micro-machined gyroscopes. Sensors and Actuators, 2002, A 97-98: 557-562
- [5] Roberto Oboe. Control of a Z-Axis MEMS Vibrational Gyroscope. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10: 364-369

作者简介: 严杰(1983-), 男, 汉族, 重庆人, 在读硕士研究生, 研究方向为导航与自动控制; 周斌(1976-), 男, 汉族, 江西人, 清华大学精密仪器与机械学系助理研究员; 张嵘(1969-), 男, 汉族, 湖北人, 清华大学精密仪器与机械学系研究员。

Biography: YAN Jie (1983-), male, postgraduate student in Department of Precision Instruments and Mechanology of Tsinghua University, research direction: navigation and automation.