

应用于 MEMS 陀螺仪的 SoC 设计

刘昊哲, 任 臣, 王 晓, 杨拥军

(中国电子科技集团 第 13 研究所, 石家庄 050051)

摘要: 为了解决微电子机械系统 (MEMS) 陀螺仪体积较大、冗余的计算资源浪费等问题, 对 Cortex-M3 内核的数据处理能力 & 总线架构进行了研究, 设计了一款应用于 MEMS 陀螺仪的智能化、小型化、低功耗的片上系统 (SoC); 通过分析温度对陀螺输出信号的影响, 对 MEMS 陀螺温度误差的智能化补偿方式进行了研究, 采用以 Cortex-M3 为核心与电容/电压转换电路、模数转换器 (ADC) 等模块进行集成化设计的方法, 在实现同样功能的情况下减小了陀螺体积; 结合 MEMS 陀螺仪对信号处理资源的要求对存储空间及通信接口进行配置, 采用 0.18 μm BCD 加工工艺对 SoC 进行设计制作; 测试结果表明, 针对 MEMS 陀螺仪进行匹配设计的 SoC 对陀螺输出信号进行温度补偿处理后, 全温度区间 ($-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$) 零偏变化量由 $3.147^\circ/\text{s}$ 降低到 $0.035^\circ/\text{s}$, 显著提升了 MEMS 陀螺仪的全温测量精度。

关键词: 微电子机械系统 (MEMS); 陀螺; Cortex-M3; 集成化; 片上系统 (SoC)

SoC Design in the Application of MEMS Gyroscope

LIU Haozhe, REN Chen, WANG Xiao, YANG Yongjun

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to solve the problems of large volume and redundant computing resource waste of micro-electromechanical system (MEMS) gyroscope, the data processing capability and bus architecture of Cortex-M3 core are studied, and an intelligent, miniaturized and low-power system-on-chip (SoC) for MEMS gyroscope is designed; By analyzing the influence of temperature on the output signal of the gyroscope, an intelligent compensation method of the temperature error of the MEMS gyroscope is studied. The integrated design with Cortex-M3 as the core, capacitance/voltage conversion circuit, analog-to-digital converter (ADC) and other modules is adopted to reduce the volume of the gyroscope with the same function; The storage space and communication interface are configured according to the requirements of MEMS gyroscope for signal processing resources, a 0.18 μm BCD processing technology is used to design and manufacture the SoC; The test results show that the temperature compensation processing output signal of the gyroscope after the matching SoC design, the zero deviation variation is reduced from $3.147 \text{ }^\circ/\text{s}$ to $0.035 \text{ }^\circ/\text{s}$ in full temperature range ($-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$), significantly improving the full temperature measurement accuracy of the MEMS gyroscope.

Keywords: MEMS (micro-electromechanical system); gyroscope; Cortex-M3; integration; SoC

0 引言

MEMS 陀螺仪相对于传统陀螺仪具有体积小、智能化、功耗低、成本低以及可批量生产的优势, 在汽车电子、消费电子和轨道交通等领域广泛应用^[1]。随着 MEMS 陀螺仪设计的不断优化和完善, 成为微型惯性系统的核心和导航系统进一步发展的关键器件, 正逐步取代传统陀螺仪的地位。

MEMS 陀螺仪的性能指标包括量程、零偏稳定性和速率精度等^[2], 其中零偏稳定性是对 MEMS 陀螺仪的精度起着重大影响, 是 MEMS 陀螺仪性能优劣的重要评价标准。现有的 MEMS 陀螺仪产品一般为 MEMS 敏感结构、专用集成电路 (ASIC, application specific integrated circuit) 硬

件逻辑处理电路、印刷电路板 (PCB, printed circuit board) 供电电路及通用微控制器模块组成的三级架构。PCB 板上的微控制器模块负责对经过 C/V、ADC 和多级滤波器处理后的信号的补偿和存储^[3], 因此从 ASIC 芯片到 PCB 板的数据传输过程需要满足低延迟、低噪声、低抖动以及高速率的要求。当前主要采用的方式为串行外围设备接口 (SPI, serial peripheral interface) 协议的信号传输, 对陀螺输出的角速度信号存在着一定的失真^[4], 且选择通用的微控制器对陀螺信号进行处理和存储难免存在微控制器数据处理能力和存储空间大小与实际需求不匹配, 无法实现陀螺仪的最优性能或产生一定的资源浪费现象。

因此, 为了解决 MEMS 陀螺仪集成度不高、制造步骤

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-02-14。

作者简介: 刘昊哲 (1999-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事数字集成电路设计方向的研究。

通讯作者: 杨拥军 (1970-), 男, 河北行唐人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事 MEMS 技术方向的研究。

引用格式: 刘昊哲, 任 臣, 王 晓, 等. 应用于 MEMS 陀螺仪的 SoC 设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 295-300.

繁琐、产品体积偏大等问题,本文提出一种新的设计思路来解决这些问题。通过为 MEMS 陀螺仪设计专用的 SoC,依据陀螺仪对微处理器数据处理能力、存储模块大小、数据传输速率和位数的需求对 SoC 的组成模块进行定制设计^[5],在提升陀螺仪的性能的同时丰富陀螺仪的应用场景。本文基于 ARM 的 Cortex-M3 内核针对应用于 MEMS 陀螺仪的 SoC 进行了集成设计,通过软硬件协同设计的方式,将 SoC 芯片所需功能的实现方式划分为软件实现和硬件实现两部分^[6],对 MEMS 陀螺仪数据实时带宽有限、体积较大、存在处理资源浪费等问题进行解决。

1 MEMS 陀螺仪的智能化需求分析

本文的研究对象为硅 MEMS 振动式陀螺,其敏感结构采用双质量框架,选用静电驱动、变间距电容检测工作方式,基于体硅 SOI 和圆片级真空封装工艺加工而成。MEMS 陀螺仪的检测电路原理如图 1 所示,驱动环路采用四阶带通 Sigma-Delta 数字闭环结构、检测通路选用开环检测的工作方式^[7]。

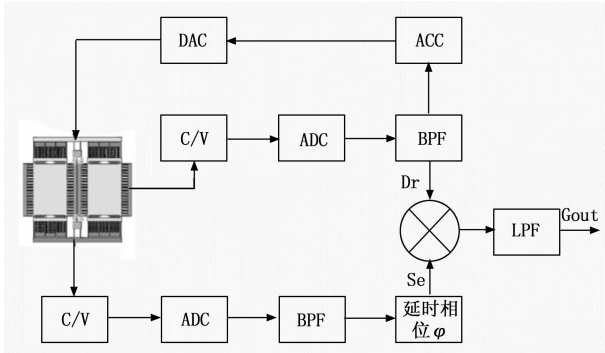


图 1 MEMS 陀螺仪基本工作原理

图 1 中, C/V 单元将外界加速度导致的陀螺仪敏感单元所产生的差分电容的变化转换成模拟电压信号。ADC 模块采用斩波 (CS) 技术和相关双采样 (CDS) 技术,有效抑制了低频噪声和中频段噪声,更高精度的完成模拟量到数字量的转换。BPF 模块为带通滤波器,有效滤除干扰信号。AAC 为自动增益控制模块,实现驱动振幅稳定控制。DAC 模块完成对 MEMS 结构的驱动反馈,实现驱动闭环,使得 MEMS 结构保持谐振。检测通路为开环结构,由 C/V、ADC、BPF 和延时相位模块组成。 φ 为检测通路的延时相位,为检测信号,为驱动信号。LPF 模块为低通滤波器,有效滤除干扰信号。经过对驱动信号和检测信号的相干解调并经过低通滤波后得到陀螺仪角速度输出信号。

由于 MEMS 陀螺芯片的主要制作材料单晶硅对温度较为敏感,其机械和物理参数如杨氏模量和应力受温度影响较大,进而对陀螺的谐振频率和系统刚度产生影响,导致陀螺产生输出温度漂移。另一方面, MEMS 陀螺生产过程中经过了刻蚀和高温键合等工艺,在结构中不可避免的产生了残余应力; MEMS 陀螺封装过程中,由于陶瓷管壳、

粘接胶和 MEMS 芯片之间的热膨胀系数的不一致,同样会产生应力,导致陀螺温度漂移的出现^[8]。综上可知 MEMS 陀螺仪不可避免的会出现温度漂移,传统的解决方案为在 PCB 板级供电电路上连接一个通用的微控制器对陀螺温漂进行补偿,同时将陀螺仪输出数据进行存储并打包发送到上位机,产品整体尺寸达到 $22\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,如图 2 所示。



图 2 组合通用单片机的陀螺仪

然而,在 PCB 上进行 MEMS 陀螺仪数据处理需要使用 SPI 通信协议将 ASIC 上的数据传输到片外微控制器,这一过程需要在不断采集新的数据的同时将数据进行串行传输具有一定的风险且向上位机传输需要再次进行串行同步传输,影响陀螺稳定性的同时限制了数据处理速率,直接影响 MEMS 陀螺仪的性能。因此本文提出设计 MEMS 陀螺仪专用 SoC 芯片推动 MEMS 陀螺仪的集成化和智能化,来解决传统 ASIC 和单片机组合方式存在的固有问题,实现 MEMS 陀螺仪的智能高精度控制。

2 SoC 电路设计

2.1 SoC 总体架构

本文对应用于 MEMS 陀螺仪的 SoC 进行了设计,其中硬件电路部分的设计优势在于对特定功能实现速度快,可以达到十倍、百倍的速度提升;降低了对处理器复杂度的要求,简化系统设计;减少相应的软件程序设计时间^[9]。SoC 设计过程考虑到 MEMS 陀螺仪使用过程中低功耗和高速处理复杂任务的需求,选择 Cortex-M3 内核作为核心处理单元^[10],SoC 运行过程中需要对数据采集模块所采集数据进行打包、存储并设计软件算法进行补偿、滤波,以提高 MEMS 陀螺仪的数据精度,因此使用高级微控制器总线结构 (AMBA, advanced microcontroller bus architecture) 进行 SoC 的架构设计^[11]。不同于通用的微控制器,集成设计的 SoC 中的微控制器模块结构选用由设计需求决定,例如本设计中考虑到其主要服务于内部模块信息的处理,因此未添加通用输入输出接口模块 (GPIO, general-purpose input/output),节约了芯片的面积,使得芯片结构更为合理。SoC 整体架构如图 3 所示,SoC 系统主要由 Cortex-M3 微处理器、SRAM、ROM、数据采集模块、系统时钟模块以及外围通信接口组成。

为了解决传统装配方式对 MEMS 陀螺仪 ASIC 输出处理不够及时的问题,本文提出了将数据采集模块直接作为高性能总线 (AHB, advanced high-performance bus) 的从

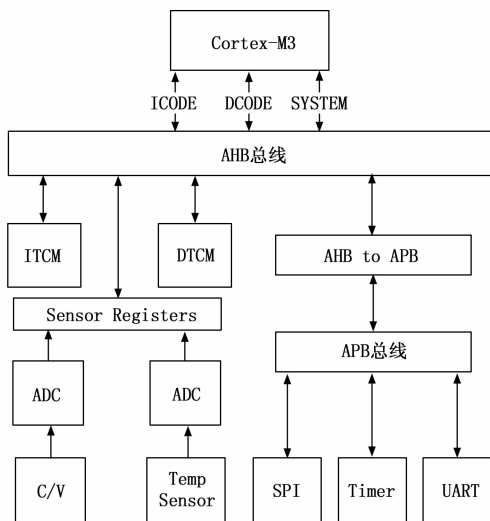


图 3 SoC 整体架构

机进行集成设计的 SoC 总线架构, 通过微电容检测和模数转换器的组合设计, 将外界惯性信息转换为数字形式的电信号后, 经过 AHB 总线通信输入微处理器内核进行数字信号处理和存储操作。不同于传统的 SPI 串行数据传输模式, 本设计中数据采集模块直接通过 AHB 总线接口进行 32 位并行数据传输的模式在减小数据丢包风险的同时有效提高了数据传输效率。

在 SoC 的设计中, 需要对数据采集模块、数据存储单元、外围通信接口等外设进行寻址访问, 外围设备所上传的数据也需要暂时存放在指定的存储单元中, 所设计的软件程序同样需要在 Cortex-M3 内核的寻址空间中搭载存储单元进行存储^[12]。根据 ARM 对 Cortex-M3 内核应用程序、数据存储、片上外设、片外外设以及供应商定义等地址使用类型的粗略划分, 本设计在 Cortex-M3 处理器的 4 GB 寻址空间中实际使用的存储空间地址设计如表 1 所示。

表 1 SoC 部分寻址空间使用情况

存储区域	实际使用	描述
Code	0x00000000~0x0000FFFF	64 kB, 存储程序
SRAM	0x20000000~0x2000FFFF	64 kB, 存储数据
外设	0x4FFF0000~0x4FFF7FFF	32 kB, 数据采集模块接口地址
设备	0x60000000~0x600FFFFF	1 MB, 片外外设地址

为了实现数据采集模块的高速数据传输、微处理器对数据采集模块的基本控制以及 SoC 系统与上位机的数据通信等要求, 本研究通过 IP 复用技术对系统总线、存储单元、数据采集模块、外围通信接口等模块进行了设计, 通过单个 SoC 芯片的设计替代了原有 ASIC 芯片和单片机的组合。本 SoC 系统相比于传统的 MEMS 陀螺仪板级数据处理模式明显的减少了组件数目、大幅度地缩减了数据处理单

元所占用的板级空间, 在满足陀螺仪输出信号的补偿、存储和通信需求的同时大大提升了系统的集成度。

2.2 数据采集模块专用接口设计

数据采集模块的主要由微电容检测模块和模数转换器模块组成, 是 MEMS 智能传感器采集外界信息的关键模块。本设计选择通过 MEMS 敏感结构将外界的变化转变为微电容形式的电信号^[13], 是由于电容式传感器在应对复杂的温度、湿度以及磁场环境的不敏感性可以提高陀螺仪的基础测量精度, 降低环境因素的干扰。微电容检测模块对检测电容的大小进行测量, 将其转换为等效的电压信号, 模数转换器模块对模拟形式的电压信号进行采样、量化后转换为数字信号^[14], 数据采集模块良好的温度特性和 BCD 工艺兼容性可以很好地与后续数字信号处理部分的电路兼容, 符合 SoC 设计整体要求。

在 SoC 系统中, 数据采集模块作为自定义外设, 其设计过程首先需要在 Cortex-M3 内核的寻址空间中定义外设地址, 本设计在 Cortex-M3 处理器用于片上外设的 512 MB 寻址空间中 0x4FFF0000~0x4FFF7FFF 区域内 32 kB 的地址空间设置为数据采集模块外设寄存器的地址映射区域。为了实现微处理器主机对 AHB 总线从机的控制, 需要微处理器通过地址译码器对自定义外设寻址空间生成总线选择信号, 根据具体地址对该地址上的外设寄存器进行读写操作, 进而实现对自定义外设的控制^[15]。

本设计对数据采集模块的设计需要实现数据采集模块与处理器模块的高速数据传输以及微处理器对数据采集模块的参数控制, 因此本次数据采集模块专用接口的设计需要设计专用总线接口与数据采集模块的顶层端口一一对应, 同时将 Cortex-M3 核内部的嵌套中断向量控制器 (NVIC, nested vectored interrupt controller) 模块接口与外设输出中断信号接口相连接, 使得微处理器可以对数据采集模块的中断请求做出响应并执行相应的中断服务程序 (ISR, interrupt service routines)。基于以上需求, 整个数据采集模块专用接口的结构如图 4 所示。

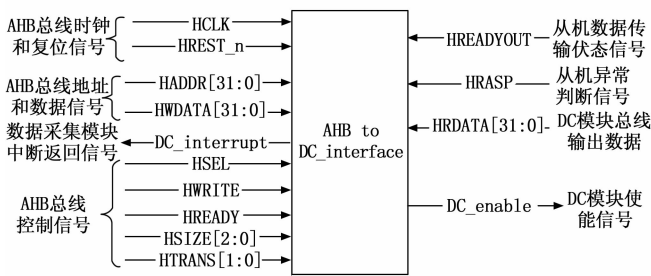


图 4 数据采集模块专用接口设计

图 4 中, 左半部分主要为 AHB 总线与主设备输入接口部分, HADDR 信号经过总线地址译码器选中数据采集模块的控制寄存器, 再通过 AHB 总线控制信号对数据采集模块进行行为控制, 如发出读写访问、产生使能信号、传递

中断信号等。主机控制和数据传输过程按照 AHB 总线协议在片内进行，可以降低信号传输过程中的丢包率，微处理器对数据采集过程的控制也更为灵活。

图 4 中右半部分主要为从机对 AHB 总线传输的反馈信号和输出数据信号，HREADYOUT 信号向主机反馈当前传输是否完成，高电平有效；HRESP 信号则是判断从机是否正常工作，当其为高电平时触发从机中断信号，中断会传递给微处理器中的 NVIC 模块进入对应中断服务程序，微处理器将对数据采集模块进行复位操作。数据采集模块最终得到的数字形式 MEMS 陀螺仪输出角速度信号将按照 32 位的数据格式通过 HRDATA 数据总线传输到微处理器模块进行数据处理和存储。

当 MEMS 陀螺仪正常工作时，微处理器模块将不断向数据采集模块发送读指令^[16]，即将控制信号写入数据采集模块对应的控制寄存器中，而陀螺仪所采集的陀螺角速度信号也将通过移位寄存器读出到数据总线 HRDATA，这一过程中的关键信号时序如图 5 所示。

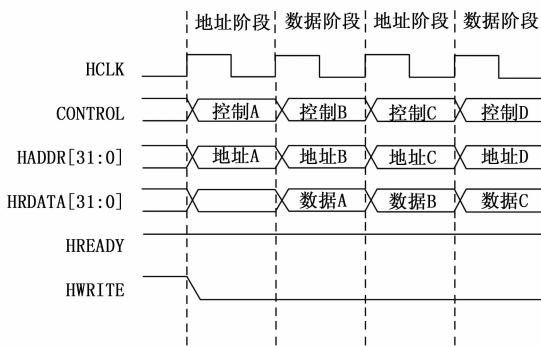


图 5 AHB 总线从机数据读取时序图

在这一读传输过程中采用了流水线的工作模式，在 HWRITE 信号确定了数据传输方向为总线从机到总线主机之后，每一个时钟周期中在确定总线可以进行传输的信号 HREADY 高电平有效时从上一时钟周期确定的地址中读取一次数据^[17]。每一次读取的数据在放入处理器默认寄存器后，放入处理器专门放置数据采集模块数据的存储单元进行后续的信号处理和上位机传输工作。

3 SoC 软件环境搭建及测试程序设计

SoC 软件部分的设计主要包括软件开发环境的搭建和应用程序的开发，其优势主要在于软件开发成本较低，受芯片销量影响很小，可以在其他设备上应用；软件辅助设计工具较便宜；调试简单，不需要考虑设计时序、功耗等问题。

本文是基于 ARM 公司的 Cortex-M3 内核进行 SoC 的设计，因此使用 ARMCortex 微控制器软件的接口标准 (CMSIS, Cortex microcontroller software interface standard) 进行软件系统环境的搭建，通过标准化的函数定义简化软件环境搭建步骤，提高应用程序的可移植性^[18]。CM-

SIS 的定义主要分为内核访问层、设备外设访问层和外设访问函数三大部分，由于本设计硬件部分主要对 MEMS 陀螺仪的数据采集模块与 Cortex-M3 内核进行集成设计，因此相应部分软件环境搭建主要通过 CMSIS-Core 对内核的外设访问函数进行标准化定义，对处理器内部寄存器进行地址定义并建立统一的系统时钟，其程序如图 6 所示。

```

224 void ssp_init(MPS2_SSP_TypeDef *ssp, unsigned int master)
225 {
226     //Disable serial port operation
227     ssp->CR1 = 0;
228     // Set serial clock rate, Format, data size
229     // SPI0->CR0 = SSP_CR0_SCR_DFLT | SSP_CR0_FRF_MOT | SSP_CR0_DSS_8;
230     ssp->CR0 = ((7ul << 0) | /* 8 bit data size */
231               (0ul << 4) | /* Motorola frame format */
232               (0ul << 6) | /* CPOL = 0 */
233               (0ul << 7) | /* CPHA = 0 */
234               (7ul << 8) ); /* Set serial clock rate */
235     // Clock prescale register set to 8, with SCR gives 0.7MHz SCLK
236     // SPI0->CPSR = SSP_CPSR_DFLT;
237     ssp->CPSR = (2ul << 0); /* set SSP clk to 6MHz (6.6MHz max) */
238     // Mask all FIFO/IRQ interrupts apart from the Tx FIFO empty interrupt
239     ssp->IMSC = 0x6;
240     if(master)
241     {
242         // Enable serial port operation
243         ssp->CR1 |= SSP_CR1_SSE_Msk;
244     }
245     else
246     {
247         // Enable slave mode
248         ssp->CR1 |= SSP_CR1_MS_Msk;
249         // Enable serial port operation
250         ssp->CR1 |= SSP_CR1_SSE_Msk;
251     }
252     // Clear existing IRQ's
253     ssp->ICR = 0x3;
254 }

```

图 6 标准化外设和系统时钟初始化函数

完成软件环境的搭建之后，根据硬件电路对数据采集模块的设计，在相应软件部分对外设寄存器组函数进行分配设计，实现对数据采集模块的软件控制和数据读取。为了验证 SoC 软硬件协同设计的效果，测试应用程序针对 MEMS 陀螺仪温度漂移的特点进行温度补偿程序的设计。

本设计将分段线性插值法的软件算法应用到 SoC 上进行对 MEMS 陀螺仪输出角速度信号的温度补偿，首先通过变温法采集 MEMS 陀螺仪在全温度区间 (-40~85 °C) 的零偏变化量，之后将陀螺的零偏特性曲线等比例的分若若干个单调区间，计算每个区间对应的温补参数^[19]。由于同一个陀螺具有较好的温度曲线重复性，因此可以根据区间对应温补参数在陀螺零偏-温度曲线的每个单调区间内分别进行线性插值补偿，降低陀螺温度漂移现象对陀螺输出的影响。

基于 MEMS 陀螺仪的工作温度分析，将温度区间按 ΔT 平均分为 n 个区间，通过插值法计算各个区间端点的平均零偏变化量，在单个温度区间内建立陀螺零位输出和温度相关的线性模型，可得：

$$U_i = U_{i0} + U_{i1} T_{ij} \quad (1)$$

式 (1) 中， U_i 为第 i 个温度区间的陀螺零位输出； T_{ij} 为第 i 个温度区间中的第 j 个温度点； U_{i0} 和 U_{i1} 为第 i 个温度区间内陀螺温补参数。将全温度区间采集到的 MEMS 陀螺仪的零偏数据通过 MATLAB 进行拟合，获得 n 个温度区间内的陀螺温补参数，以表的形式嵌入到 MEMS 陀螺仪的软件算法中。

不同于传统的陀螺温度补偿模式的纯硬件逻辑处理或者经过低频数据接口到板级 PCB 上进行数据的转换和处理^[20]，本文所设计的 SoC 通过软硬件相结合的模式实现陀

螺输出角速度信号的内部温度补偿处理。通过软件程序向数据采集模块的控制寄存器写入控制指令^[21], 将 MEMS 陀螺仪采集到的外界惯性信息从数据存储寄存器发送到 SoC 内部存储单元, 经过分段线性插值温度补偿处理后整理成上位机所要求的数据格式后通过 SPI 接口实现上位机通信。

4 SoC 性能测试及结果分析

在设计电路的实现过程中, 考虑到本 SoC 芯片中既有数字逻辑处理电路也有模拟电路, 为了更好地发挥 SoC 芯片的综合性能, 选用 $0.18 \mu\text{m}$ BCD 加工工艺对 SoC 电路进行设计并加工, 通过对 RTL 级电路设计的逻辑综合和物理设计, 得到整个电路的版图如图 7 所示, 版图尺寸为 $3.885 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。

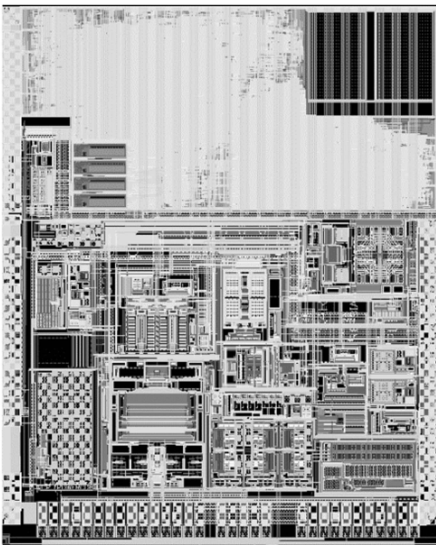


图 7 SoC 版图设计

将物理验证后的二进制 GDSII 版图文件交付到某芯片制造厂流片可得到所设计的 SoC 电路芯片, 将 SoC 芯片与 MEMS 陀螺表头进行金丝键合并封装得到可测试的集成 MEMS 陀螺仪, 相比于 ASIC 芯片和单片机组成的陀螺形式, 有效地减小了陀螺仪的体积, 丰富了陀螺仪的应用场景。为了对 SoC 的设计功能和性能进行验证, 选择对陀螺仪的输出温度漂移误差进行数字补偿测试, 通过 SoC 芯片对 MEMS 陀螺输出信号进行温度补偿前后陀螺仪输出的全温零偏变化量的优化效果来验证 SoC 芯片的信号处理性能。

首先对没有烧写温度补偿程序的陀螺静态温度漂移情况进行测试, 将待测陀螺静置在温箱中, 设定温箱先缓慢降温至低温段 ($-40 \text{ }^\circ\text{C}$) 后在两个小时内匀速升温至高温段 ($85 \text{ }^\circ\text{C}$), 保持高温两个小时以后以与升温时相同的速度降至低温段并保持两个小时完成一次温度循环, 这一温度循环在测试过程中连续进行。测试的初始温度为室温, 当陀螺温度稳定后, 从升温过程开始对陀螺的输出信号进行采

集, 获得陀螺的输出曲线如图 8 所示。

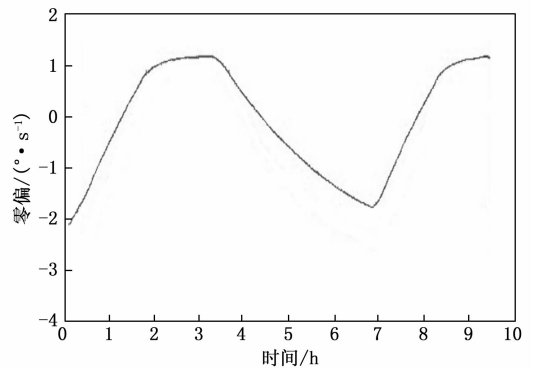


图 8 温补前陀螺输出零偏曲线

根据陀螺输出零偏曲线的起伏变化可以看出, 该陀螺的零偏漂移量与外界温度变化量大致呈现出正比态势。为了更为直观地表征出陀螺仪的输出零偏漂移和外界温度的关系, 将温度传感器随时间的输出变化即实际测量温度数据作为横坐标, 将 MEMS 陀螺仪全温度区间的零偏变化量作为纵坐标, 可以得到如图 9 所示的陀螺零偏变化量随温度变化的试验曲线。

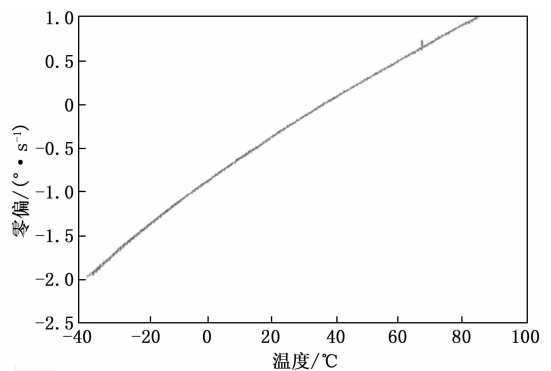


图 9 温补前陀螺零偏—温度曲线

温度补偿前的陀螺零偏—温度曲线可以近似认为是一条倾斜的直线, 具有较好的线性度, 因此适合进行线性拟合, 当将其分为若干个相同大小的温度区间, 单个温度区间的线性度将更为突出, 温度补偿处理的效果也会更好。

测试过程中采用分段线性插值法对 MEMS 陀螺仪在全温度区间的零偏温度漂移进行分段线性拟合, 根据 SoC 性能验证需要及该陀螺温补前零偏—温度曲线良好线性度的实际情况, 将温度按照每 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 为一个温度区间进行划分, 根据式 (1) 计算可以获得各温度区间的温补参数, 该陀螺仪的具体温补参数如表 2 所示。

为了验证 SoC 在实际工作中对 MEMS 陀螺仪性能的提升, 将写入温补参数的陀螺放入温箱中, 设定温箱固定温度循环流程运行, 采集温度补偿后的陀螺仪输出, 测试补偿后陀螺的全温度区间输出特性。集成有 SoC 的 MEMS 陀螺仪进行温度补偿后陀螺零偏的改善效果如图 10 所示。将

表 2 陀螺零偏温度补偿参数

$T_{ij}/^{\circ}\text{C}$	$U_{i0}/(^{\circ})\text{os}^{-1}$	U_{i1}
-40~-30	-1.193 31	0.025 18
-30~-20	-1.146 81	0.02673
-20~-10	-1.150 81	0.026 53
-10~0	-1.136 51	0.027 96
0~10	-1.136 51	0.026 30
10~20	-1.127 81	0.025 43
20~30	-1.132 81	0.025 68
30~40	-1.153 21	0.026 36
40~50	-1.129 21	0.025 76
50~60	-1.097 21	0.025 12
60~70	-1.086 41	0.024 94
70~85	-1.161 34	0.026 01

同一陀螺在相同温度变化情况下的测试结果进行对比可得, 温度补偿前 MEMS 陀螺仪的全温度区间零偏变化量为 $3.147^{\circ}/\text{s}$, 温度补偿后全温度区间零偏变化量降低到 $0.035^{\circ}/\text{s}$, SoC 对 MEMS 陀螺仪输出角速度信号的补偿效果明显, 有效提升了陀螺仪的性能。

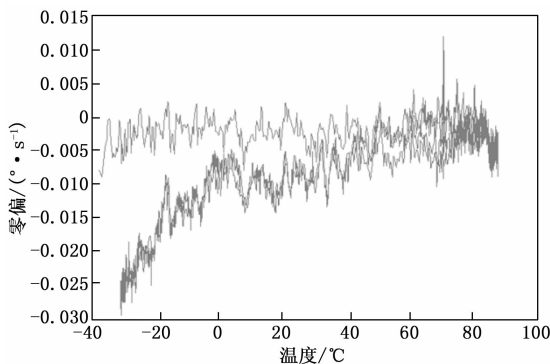


图 10 温补后 MEMS 陀螺仪全温零偏

5 结束语

本文针对传统 MEMS 陀螺仪 ASIC 和单片机组形式的数据处理模式, 设计了一种应用于 MEMS 陀螺仪的 SoC, 采用 $0.18\ \mu\text{m}$ BCD 加工工艺对电路进行设计和制作, 并配合自主设计的 MEMS 敏感结构进行测试。本 SoC 以 ARM-Cortex-M3 为基础, 对 SoC 的数据采集模块接口进行了集成设计, 将陀螺仪所采集的惯性数据直接通过 AHB 总线传输到微处理器中进行处理和存储, 实现了 MEMS 传感器的小型化、智能化、集成化和高精度设计。流片后的 SoC 芯片测试结果显示, MEMS 陀螺仪经过 SoC 的分段线性插值法温度补偿处理后, 全温区温度漂移减少了两个量级, 大幅提高了 MEMS 陀螺仪的温度特性, 证明了专用 SoC 芯片设计的可行性和有效性。本 SoC 对于应用于陀螺的信号滤波处理及上位机通信等方面的研究开发尚有不足, 接下来对于外围通信协议的开发以及数据采集模块的精确控制方向进行研究, 进一步地提升 MEMS 陀螺仪的性能。

参考文献:

- [1] AFRIDI M, HEFNER A, BERNING D, et al. MEMS-based embedded sensor virtual components for system-on-a-chip [J]. Solid-State Electronics, 2004, 48 (10/11): 1777-1781.
- [2] 程秀芹, 翁志能, 张建飞, 等. MEMS 陀螺主要性能指标研究 [J]. 电脑开发与应用, 2014, 27 (11): 61-63.
- [3] 任 臣, 杨 亮, 杨拥军. MEMS 陀螺驱动数字闭环 ASIC 设计 [J]. 半导体技术, 2015, 40 (8): 566-569.
- [4] 郭声彦. 高速 ADC 中 SPI 接口电路的研究与设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [5] 赵东升. 基于 ARM Cortex-M3 核 MCU 的设计与应用 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [6] 魏继增, 郭 炜, 史再峰. SoC 设计方法与实现 (第 4 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.
- [7] 王亚林, 杨拥军, 任 臣. MEMS 陀螺仪驱动接口 ASIC 设计 [J]. 微电子学, 2019, 49 (4): 529-533.
- [8] 许 鹏, 王 帆, 董冰玉. 一种低成本自适应的 MEMS 陀螺温度补偿方法 [J]. 微纳电子技术, 2016, 53 (8): 535-540.
- [9] LEAL R L, CASTILLO J M, LÓPEZ A G M, et al. Analysis of the development of smart sensors based on MEMS devices and smart sensor platform proposal [C] // Mexico: 2016 IEEE International Engineering Summit, 2016: 1-6.
- [10] 杨 斌, 韩瑞欣, 董苏惠. 基于 ARM Cortex-M3 的 SoC 系统设计 [J]. 电子产品世界, 2019, 26 (2): 55-58.
- [11] 沈文发, 王 维, 李景须. 航天 SoC 技术的发展态势与开发方法研究 [J]. 航天标准化, 2012 (3): 10-13.
- [12] 曹英姿. 基于 Cortex-M3 处理器的 eMMC 主机控制器接口的设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [13] 段王楠, 马宗方, 张兴成. 微机械电容式加速度计读出电路研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 233-237.
- [14] 魏业玖. MEMS 数字陀螺中开关电容检测电路的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [15] 高万里, 赵 诣, 刘 磊, 等. 基于 COTS SoC 的星载微型 GNSS 接收机硬件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 259-262, 266.
- [16] 黄 俊. MEMS 惯性传感器中通用数字信号处理芯片设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [17] 谭 盾. 基于 ARM Cortex-M0 核的 MCU 设计及应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [18] 朱传宏, 沈 严, 颜云松, 等. 基于 Cortex-M3 的引导程序分析与设计 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40 (10): 58-59.
- [19] 罗 华, 苟志平, 冉龙明, 等. 基于插值法的 MEMS 陀螺温度补偿方法 [J]. 压电与声光, 2021, 43 (4): 562-565.
- [20] 雷鸣远. MEMS 传感器和智能传感器的发展 [J]. 无线互联科技, 2020, 17 (6): 20-21.
- [21] 王升哲, 唐中和, 郭 航, 等. 基于 SOC 架构的智能图像处理和外设控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 90-94.