DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607103

双片集成数字硅陀螺接口 ASIC 的设计与测试

学

报

强^{1,2}.陈伟平^{1,2}.闫菁敏¹,尹 亮^{1,2},刘晓为^{1,2} 什

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心,哈尔滨 150001; 2. 微系统与微结构教育部重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150001)

摘 要:为实现 MEMS 陀螺高精度、数字化和小型化,适应惯性导航和测量等领域的应用要求,采用双片集成方式,基于 0.5 um的 N 阱 CMOS 工艺,设计并实现了一款实用化的 MEMS 陀螺接口电路.设计了基于高频载波的闭环自激驱动电路和低 噪声差分敏感检测模拟前级电路,高频信号将敏感信号调制到高频后与闪烁噪声相加,经过开关相敏解调以及低通滤波后得 到低噪声模拟角速度输出,并由集成的高分辨率四阶单环一位 sigma delta ADC 将模拟信号转化成为数字信号,实现数字化输 出的硅陀螺接口电路.测试结果表明:sigma delta调制器的动态范围达到 130 dB,陀螺整机量程为±200 °/s,带宽为 60 Hz,刻度 因子为46.45 LSB/((°)·s⁻¹);线性度为342×10⁻⁶,输出噪声为0.004(°)·s⁻¹/Hz^{1/2},零偏稳定性为3.4°/h.通过电路集成实 现了小型化、低成本和角速度数字化精确输出,测试结果与其他相关研究对比表明该结构可以得到很好的性能, 关键词:数字化系统;硅陀螺;sigma delta ADC;ASIC;低噪声

中图分类号: TN492 文献标志码:A 文章编号: 0367-6234(2017)10-0090-05

Design and test of the interface of the dual-chip integrated digital silicon gyroscope ASIC

FU Qiang^{1,2}, CHEN Weiping^{1,2}, YAN Jingmin¹, YIN Liang^{1,2}, LIU Xiaowei^{1,2}

(1.MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2.Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing of Ministry of Education (Harbin Institute of Technology), Harbin 150001, China)

Abstract: In order to realize the high precision, digital and miniaturization of MEMS gyroscope, which is the application requirements of the field of inertial navigation and measurement, this paper designs and implements a practical MEMS gyroscope interface circuit which adopts the process of dual-chip integration, integrated based on N-well CMOS process of 0.5 µm. The paper introduces the design of analog front-end circuit which contains closedloop self-exciting driving structure based on high-frequency carrier and low noise differential sensitive detection circuit. The high frequency signal modulates the sensitive signal to the high frequency and adds the flicker noise. Through the phase sensitive demodulation and low-pass filtering, the low noise analog angular speed output is obtained. The circuit converts analog signal into digital signal by an integrated high-resolution sigma delta four-order single ring one bit ADC, achieving an interface circuit of silicon gyroscope with digital output. Test results show that the dynamic range of the modulator which bandwidth and scale factor are 60 Hz and 46.45 LSB/(°) \cdot s⁻¹, respectively, is up to 130 dB, and the measuring range of gyroscope is ±200 °/s. The linearity of the modulator with the noise of 0.004 (°) $\cdot s^{-1}/Hz^{1/2}$ is 340×10^{-6} , and the stability of the zero bias is 3.4 °/h. It enables miniaturization, low cost and precise digital output of angular speed through integrated circuit. Comparison of the test results with other related research also confirms that the structure can achieve good performance. Keywords: digitalized system; silicon gyroscope; sigma delta ADC; ASIC; low noise

硅陀螺角速度传感器作为一种 MEMS(微机电 系统)传感器在最近的几年受到越来越多的关注.它 不仅能够应用于惯性导航和航空航天,还能够应用 于消费产品中,例如数码摄像机和手机等,为了满足 惯性导航的高精度的要求,对硅陀螺传感器接口电 路的性能提出了更高的要求[1-2].过去对接口电路的

- 基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2015052) 作者简介: 付 强(1979—), 男, 博士研究生;
 - 陈伟平(1966--),男,教授,博士生导师; 刘晓为(1955--),男,教授,博士生导师
- 通信作者: 陈伟平, qiangfhit@ sina .com

研究主要侧重于模拟前置电路,国内很少有单位开 展数字输出陀螺工作,而且大部分是在 PCB 基础上 通过分立器件实现,这不仅需要更大的体积,而且很 难降低成本.本文提出了一种高集成度、高精度的数 字化接口电路,这种接口电路可方便的应用于角度 信号的处理[3].

MEMS 硅陀螺原理 1

图1为微机械陀螺仪的机械结构,它包含了驱 动端和敏感端^[4].陀螺具体的微机械工作原理详见 文献[4].

收稿日期: 2016-07-22



图1 微机械陀螺仪结构

Fig.1 Structure of micro mechanical gyroscope

当 x 方向的驱动力为 $F_d = F_0 \cos(\omega_d t)$ 时,驱动 方向上的速度 $v_x(t)$ 的稳态解为

$$v_{x}(t) = V_{0}\cos(\omega_{d}t),$$

式中 V₀为谐振速度幅值.

当z方向有 Ω 大小的角速度输入时,在陀螺敏 感的y方向将产生大小为 $k\Omega V_0 \cos(\omega_d t)$ 的哥氏力, k为与结构参数相关的常数,哥氏力引起在检测y 方向形成受迫振动,位移 y 的稳态解为

$$y(t) \approx k_{\rm s} \Omega \cos(\omega_d t)$$
,

式中 k_s为与结构参数相关的常数.敏感端的谐振位 移改变质量与检测电极之间的电容值,当质量块上 加载固定电压时,电容上的电荷就会发生如上式所 示的周期性变化,利用电学方法检测出该电荷变化 量,就能够得到输入角速度^[5].

2 MEMS 硅陀螺接口电路设计

图 2 为 MEMS 陀螺接口电路,主要由两部分组 成:前级模拟电路和高精度 Sigma Delta ADC.其中前 级模拟电路实现陀螺的闭环自激驱动、低噪声差分 检测以及用于降低低频噪声的高频调制模块,从而 得到角速度输出的模拟量.ADC 实现将模拟输出转 化为数字输出^[6-7].之所以采用双片集成是因为对于 集成电路而言,数模电路共用衬底,数字电路的时钟 对用于微弱信号检测的模拟电路噪声影响较大,难 以克服,而双片对于面积的开销增加不是十分显著, 可以接受.以上也是目前多数数字陀螺研究采用双 片集成的原因.





Fig.2 Digital gyroscope integrated circuit

2.1 模拟前级电路设计

模拟前级包括闭环自激驱动电路和低噪声检测 电路.在驱动电路中,上电加载饱和直流驱动电压, 由于噪声扰动,质量块开始振荡,电荷放大器将质量 块位移信号转化为电压信号,相位转换电路对该信 号精确移相 90°以抵消驱动力和位移之间的相位 差,从而满足谐振条件.相位调整后,由峰值检测电路计算前级电压信号幅值,通过 PID 控制与参考电压比较后积分,得到动态变化的直流积分电压,将该直流电压叠加峰值检测前的交流信号作为驱动信号,完成正反馈自激振荡^[8].这样,既能保证交流驱动信号幅值稳定又能动态调整直流驱动,保证驱动

位移恒定.敏感检测电路主要考虑低噪声性能,采用 差分低噪声电荷放大器保证噪声性能,后级采用相 敏解调和低通滤波得到角速度信号.

在本电路设计中,采用在质量块上加载高频调制的方法实现低噪声设计.图 2 中高频正弦信号由 有源稳幅 RC 振荡器产生.图 3 解释了该原理降噪过 程,电荷放大器在低频处的 1/f 噪声功率高于信号 功率,白噪声功率则低于信号功率.陀螺谐振信号被 调制到高频处,与噪声是叠加关系.解调时,调制后 的信号被解调至陀螺谐振频率,而放大器的 1/f 噪 声被调制至高频处.然后通过低通滤波器消除高频 处的 1/f 噪声,剩下了低功率的白噪声和真正的信 号在低频处,从而实现降低噪声的目的^[9].



图 3 高频调制信号的功能



2.2 高精度 ADC 设计

为了将模拟输出转换为数字输出,需要一个高 精度的 ADC.在所有的 ADC 中,sigma delta ADC 通 过低带宽的过采样和噪声整形技术可以达到高精度 要求,这种 ADC 由 sigma delta 调制器和数字抽取滤 波器组成.本设计采用了四阶单环一位的 sigma delta 调制器,因为该结构的调制器比级联结构能够承受 更大的工艺误差,而且一位量化使得电路的复杂度 低于多位量化的复杂度.第1级积分器的输入信号 只有量化噪声,而且输入幅度比其他类型的要小许 多,积分器的输出摆幅相对较小有利于低失调^[10].

图 4 显示了在 0.5 um 的 CSMC 工艺下的调制器 电路.全差分电路的精度比单端电路要高 3 dB,而且 能够消除谐波失真并且具有低失调特点.硅陀螺的模 拟信号对带宽的要求较低,一般输出带宽在 100 Hz 以内,在 sigma delta 调制器的噪声源中,1/f 噪声是重 要的组成部分,它能显著的降低转换精度.因此,在 第 1 级积分器中采用斩波技术来降低 1/f 噪声^[11].







sigma delta 调制器输出的一位比特流信号,很 难被信号处理系统直接处理,而且,高输出频率会使 得数字电路的功耗增加.所以,数字抽取滤波器被用 来滤除信号带宽外的噪声并使得采样频率降低.在 本文中,数字抽取滤波器通过单片机实现,然后 sigma delta ADC 以 Nyquist ADC 形式工作,并且具 有 18 位的精度.

2.3 晶体管级设计

除了电路拓扑结构以外,电路模块自身的设计 对陀螺的噪声、稳定性、线性度以及温度特性也起到 至关重要的影响,其中最重要的就是运算放大器的 设计.由于采用高频调制原理降低噪声,对放大器的 带宽有较高要求,需要设计一款大带宽、低噪声、低 失真的运算放大器.本文采用二级运放,前级采用套 筒式运放满足高带宽、低噪声,输出级共源级运放实 现大摆幅输出.运放结构如图 5 所示,采用米勒补偿 提高运放速度.该运放增益带宽积正比于跨导,通过 设计恒定跨导偏置电路就可以增加跨导,进而增大 带宽并实现带宽恒定.该运放的噪声取决于输入管 和负载管的热噪声和 1/f 噪声,而高跨导共源共栅 结构的负载管噪声远小于输入管噪声,运放噪声为

$$\bar{V}_N^2 = \frac{16kT}{3g_{m1,2}} + \frac{2K_P}{(WL)_{1,2}C_{off}}$$

式中:右侧第1项为输入管热噪声,第2项为1/f噪 声;k为玻尔兹曼常数;T为绝对温度;g_m为输入管 跨导;K_p为1/f噪声系数;W、L分别为输入管的宽和 长;C_{ox}为氧化层电容;f为频率.可以看出,热噪声水 平随着跨导的增加而降低,1/f噪声随着输入管面 积的增加而降低,据此可以优化运放噪声^[12].



图 5 低噪声恒定跨导运算放大器

Fig.5 Low noise constant transconductance operational amplifier 相敏解调是另一个重要电路模块,本设计采用 开关相敏解调,用比较器控制 CMOS 传输门开关实 现,其优点是电路结构简单、开关导通电阻低、转换 速率快,易于实现高速低失真要求.

3 测试结果

如图 6 所示为 MEMS 陀螺测试系统, 陀螺结构 采用真空封装, 接口电路采用模拟前级和高精度调 制器双片集成方式, 数字滤波器由单片机实现. 样机 整机尺寸为 2.5 mm×3.0 mm×2.5 mm, 实现了小型化 目的.

首先对 sigma delta 调制器进行测试.当输入的 信号的直流电压为 50 mV 时,数字输出信号的功率 谱密度如图 7 所示,噪底接近-140 dB.

当采样频率为 2.5 MHz 时,该调制器能够得到 10 kHz 的带宽和 130 dB 的 1 Hz 动态范围,满足接



图 7 sigma delta 调制器的输出功率谱密度

Fig. 7 Output power spectrum density of the sigma delta modulator

整机测试中,首先测试刻度因数及线性度,将陀 螺固定在转台上,施加从±0.1 °/s 到±200 °/s 不同 的输入角速度,sigma delta ADC 的输出信号为 18 位.图 8 为数字硅陀螺系统的输入和输出线性拟合 曲线,在测量范围为±200 °/s 以内,可以计算出刻度 因数为46.45 LSB/((°) · s⁻¹),线性度为 342 ×10⁻⁶.



Fig.8 Linear fitting curve of digital gyroscope input and output

对硅陀螺进行 1 h 短期稳定性测试,图 9 为通 过 Allan 方差方法得出的零偏稳定性分析图.实验结 果表明,短期稳定性能够达到 3.4 °/h,该接口电路 在 60 Hz 的 带 宽 内, 噪 声 功 率 谱 密 度 为 0.004 ((°) \cdot s⁻¹)/Hz^{1/2}.

表1将本文中设计的高精度数字化陀螺接口电路与近几年有代表性的研究机构和企业所研究的陀螺性能做了对比.与其他高性能模拟、数字接口电路相比,本设计能够精确的输出数字信号,线性度和稳定性达到高性能应用水平.



Fig.9 Allan variance results of gyroscope output

Tab.1 Performance comparison of typical gyroscope					
性能指标	UCBerkeley ^[13] 2008	Ghent University ^[14] 2008	STIM202	东南大学[15] 2015	本设计 2016
输出类型	模拟	数字	数字	数字	数字
刻度因子	_	7.73 LSB/ ((°) $\cdot s^{-1}$)	0.25 ((°) ⋅ s ⁻¹) / LSB	94.00 LSB/ ((°) $\cdot s^{-1}$)	46.45 LSB/ ((°) $\cdot s^{-1}$)
测量范围	—	>±1 100 °/s	±400 °/s	±300 °/s	±200 °/s
输出噪声	0.004 ((°) ⋅ s ⁻¹)/ √Hz	0.025 ((°) · s ⁻¹)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.003 ((°) ⋅ s ⁻¹)/ √Hz	$\begin{array}{c} 0.005 \ (\ (\ ^\circ\) \ \cdot \ {\rm s}^{-1}\)/\\ \sqrt{\rm Hz} \end{array}$	0.004 ((°) ⋅ s ⁻¹)/ √Hz
带宽	50 Hz	>100 Hz	262 Hz	75 Hz	60 Hz
非线性度	_	—	200.0×10 ⁻⁶	83.1 ×10 ⁻⁶	342.0×10 ⁻⁶
零偏稳定性	—	—	0.50 °/s(1σ)	2.94 °/h	3.40 °/h
电路形式	集成芯片	分立芯片	分立芯片	分立芯片	集成芯片

表1 典型陀螺的性能对比

4 结 论

1)基于高频载波原理实现的闭环驱动、低噪声 检测模拟电路可有效降低低频噪声,传感器输出噪 声功率谱密度为 0.004((°) · s⁻¹)/√Hz.

2) 基于 Σ-Δ 调制器的高精度 ADC, 可以达到 10 kHz的带宽和 130 dB 的动态范围, 满足实用化需求.

3)采用标准 0.5 um 的 N 阱 CMOS 工艺实现了电路 集成化,实现了对分立器件电路的高精度数字化、小型化 设计目标.

参考文献

- AALTONEN L, HALONEN K A I. Pseudo-continuous-time readout circuit for a 300° /s capacitive 2-axis micro-gyroscope [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(12): 3609-3620. DOI: 10.1109/JSSC.2009.2035554.
- [2] AALTONEN L, KALANTI A, PULKKINEN M, et al. A 2.2mA
 4.3mm² ASIC for a 1000°/s 2-axis capacitive micro-gyroscope [J].
 IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(7):1682-1692.
 DOI: 10.1109/JSSC.2011.2144170.
- [3] AALTONENL, KALANTI A, PULKKINEN M, et al. A 4.3 mm² ASIC for a 300°/s 2-axis capacitive micro-gyroscope//Proceedings of the 2010 Eur. Solid-State Circuits Conf. (ESSCIRC). Seville, Spain: IEEE, 2010: 286–289. DOI: 10.1109/ESSCIRC.2010.5619834.
- [4] SHARMA A, ZAMAN M F, AYAZI F. A 104-dB dynamic range transimpedance-based CMOS ASIC for tuning fork microgyroscopes
 [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(8):1790-1802. DOI: 10.1109/JSSC.2007.900282.
- [5] WANG Xiaolei, ZHANG Yinqiang, YANG Cheng, et al. Analysis and experiment of drive mode of silicon micro-gyroscope based on digital phased-locked loop control [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(4):747-752.DOI: 10.3969/ j.issn.1001-0505.2013.04.014.

[6] XIA Dunzhu, HU Yiwei, KONG Lun, et al. Design of a digitalized microgyroscope system using, modulation technology [J]. Journal IEEE Sensors, 2015, 15(7); 3793-3806. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2399435.

- [7] JIANG Xuesong, SEEGER J I, KRAFT M, et al. A monolithic surface micromachined Z-axis gyroscope with digital output[C]// 2000
 Symposium on VLSI Circuits. Honolulu, HI: IEEE, 2000: 16 19. DOI: 10.1109/VLSIC.2000.852839.
- [8] ENZ CC, TEMES G C. Circuit techniques for reducing the effects of op-amp imperfections: autozeroing, correlated double sampling, and chopper stabilization[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(11): 1584-1614.DOI: 10.1109/5.542410.
- [9] RAMAN J, CRETU E, ROMBOUTS P, et al. A digitally controlled MEMS gyroscope with unconstrained Sigma-Delta force-feedback architecture [C]//Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2006. MEMS 2006 Istanbul. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006; 710–713. DOI: 10.1109/ME-MSYS.2006.1627898.
- [10] ZHANG Chong, YIN Tao, WU Qisong, et al. A large dynamic range CMOS readout circuit for MEMS vibratory gyroscope [C]//Proceedings of the 2008 IEEE SENSORS. Lecce, Italy: IEEE, 2008:1123– 1126. DOI: 10.1109/ICSENS.2008.4716638.
- [11] PETKOV V, BOSER P B. A fourth-order interface for micromachined inertial sensors[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(8): 1602–1609. DOI: 10.1109/JSSC.2005.852025.
- [12] YUCETAS M, AALTONEN, HALONEN K.CMOS temperature sensor using periodic averaging for error reduction [C]//Proceedings of the 2008 NORCHIP. Tallin, Estonia: IEEE, 2008: 94–97. DOI: 10.1109/NORCHP.2008.4738290.
- [13] EZEKWE C D, BOSER B E. A mode-matching ΔΣ closed-loop vibratory gyroscope readout interface with a 0.004%/s/Hz, noise floor over a 50Hz Band [C]//2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, CA: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/ISSCC.2008.4523316.
- [14] RAMAN J, CRETU E, ROMBOUTS P, et al. A closed-loop digitally controlled mems gyroscope with unconstrained sigma-delta forcefeedback [J]. IEEE Sensors Journal, 2009,9(3):297-305.DOI: 10.1109/JSEN.2008.2012237.
- [15] XIA Dunzhu, YU Cheng, WANG Yuliang. A digitalized silicon microgyroscope based on embedded FPGA[J]. Sensors, 2012, 12(10):13150-13166. DOI: 10.3390/s121013150. (编辑 张 红)