

Analysis on Digital Automatic Gain Control of MEMS Gyro Driven-Loop Circuit*

QIU Yi-wen, WU Chang-ju*, WANG Hao, JIN Zhong-he, WANG Yue-lin
(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper presents a digital AGC of high control-precision, which is applied in the driven-loop of vibrating MEMS gyroscope. The vibrating amplitude stability of the mass in driven mode affects the precision and stability of the angle-velocity detection in the vibrating MEMS gyroscope. A new digital AGC algorithm is proposed in order to improve the stability of driving mode amplitude, and examined in the end. Its controlling precision is improved much higher than the one before and performances effectively in stability and precision of the driving loop circuit.

Key words: MEMS gyroscope; digital automatic gain control (AGC); driven-loop circuit; control precision
EEACC: 7320E; 7630

振动式微机械陀螺驱动环路数字自动增益控制研究*

邱奕文, 吴昌聚*, 王昊, 金仲和, 王跃林

(浙江大学信电系微电子学与光电子学研究所, 杭州 310027)

摘要: 对微机械陀螺系统的自激驱动环路进行了分析, 并对数字处理电路中自动增益控制 (AGC) 模块进行了深入研究, 给出了一种高控制精度的定点数字 AGC 算法。通过理论分析和模型仿真, 结果表明 AGC 控制精度得到很大的提高, 对陀螺驱动输出信号的幅度具有很好的控制效果, 从而可以大大减小陀螺温漂及其他一些因素引起的不稳定性。最后给出了算法的直线逼近近似实现方法, 能在的定点 DSP 当中很方便的实现。

关键词: 微机械陀螺; AGC; 自激驱动环路; 控制精度

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)08-1366-04

微机械陀螺具有尺寸小、重量轻、可靠性高、功耗和成本低等优点, 自诞生以来得到很快的发展, 在航空航天等领域中有很大的应用前景。但目前微机械陀螺精度和稳定性还不高, 使其在许多应用领域中的应用得到限制。影响测量精度和稳定度的因素主要有器件加工工艺的不理想导致的结构不对称性和质量块的偏移, 以及温度等外界环境因素^[1]。不少研究人员采用环路反馈控制陀螺驱动的方法来抑制此类因素导致的测量误差^[2-6]。数字化处理电路能够避免模拟电路复杂、不灵活、误差补偿困难及抗干扰能力不强等缺点, 对于提高微机械陀螺系统的精度和稳定性是可取的研究方向, 但是在数字的自激驱动处理电路中缺乏高控制精度的自动增益控制算法。

本文在对陀螺系统驱动环路的的研究基础上, 对数字自动增益控制 (Automatic Gain Control, AGC) 进行了改进, 使它具有很高的控制精度, 把陀螺驱动输出信号的幅度变化控制在极小的范围内, 能有效降低温度等外界因素对陀螺系统精度和稳定性的影响。

1 振动式微机械陀螺工作原理

本文采用上海微系统所制作的电磁驱动、电容检测振动式微机械陀螺, 结构如图 1 所示^[7]。基本工作原理为陀螺驱动质量块在驱动信号作用下作简谐振动, 当 Z 方向有角速度输入时, 在科里奥利力 (Coriolis) 的作用下, 检测质量块会在与驱动方向相垂直的方向上发生与驱动信号相同频率的振动, 该

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目资助 (973 项目) (2006CB300405); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助 (NCET-06-0514)

收稿日期: 2008-01-29 **修改日期:** 2008-03-11

振动的幅度与 Z 轴输入的角速度信号大小成正比,与驱动质量块振动的幅度成正比。两质量块振动分别引起与相应固定电极之间电容的变化,检测出的电容变化反映两质量块的振动。利用驱动输出信号与检测输出信号相乘解调来得到所要检测的角速度信号,保持驱动质量块振动幅度的稳定对陀螺系统的性能起非常重要作用。

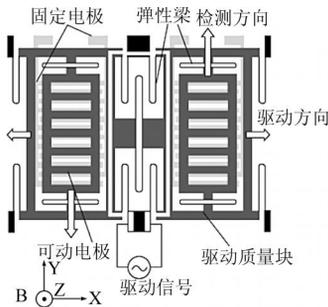


图 1 MEMS 陀螺器件结构图

为了保证陀螺振动在固有频率上,采用自激环路驱动。自激环路主要有功率放大电路、陀螺器件、高增益放大电路、高通滤波器、自动增益控制模块和相移模块^[7]。图 2 所示为带外界因素影响的微机械陀螺驱动环路框图,假设环路中各线性部分提供的增益不变化,外界因素导致线性部分增益变化以信号的形式乘在环路上,图中 $e(t)$ 所示,其形式为 $e(t) = 1 + E(t)$ 。在陀螺数字处理系统中,框图中高通滤波器、自动增益控制模块及环路相移模块均在 DSP 中完成。

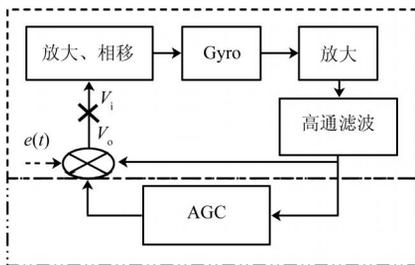


图 2 外界因素变化下驱动环路框图

驱动环路中 AGC 根据信号幅度的变化改变其增益,保持环路增益为 1,维持环路自激振荡幅度稳定,这就是 AGC 的基本作用^[8-9]。外界因素的变化影响陀螺器件及电路中各种元器件的性能变化,导致驱动环路中线性部分幅度增益发生变化,从而影响系统线性度及精度。为了提高陀螺驱动输出信号幅度的稳定性,AGC 必须具有很高的控制精度,为了进一步提高 AGC 的控制精度下面提出了一种新的数字 AGC 算法。

2 数字 AGC 算法

根据陀螺驱动系统对 AGC 的要求,本文提出

了一种新的 AGC 算法:

$$G(A_{in}) = \begin{cases} \frac{K}{A_{in} - R + K'G} & A_{in} \geq R \text{ 时} \\ \frac{K \cdot (G^2)}{A_{in} - R - K \cdot G'G} + (G+1)G & A_{in} \leq R \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为陀螺稳定工作时 AGC 的输入幅度值, G_0 为在稳定工作点上 AGC 需产生的增益值; K 、 G 为可调的控制参数, K 控制 AGC 在稳定工作点的增益的导数的大小, K 值越小则增益的导数就越大, G 控制 AGC 在小的输入振幅时增益的起始值的大小, G 值越大则对应的起始增益就越大。

微机械陀螺的参数为 $R = 0.3314V$, $G_0 = 0.4668$, 当选取 $K = 0.001$, $G = 3$, 则可得到 AGC 的性能曲线如图 3 所示。

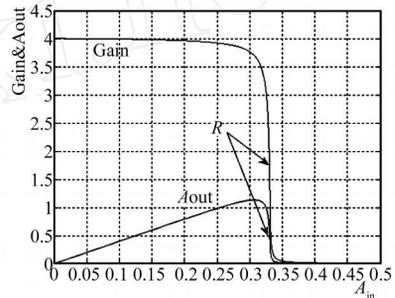


图 3 本文 AGC 算法的性能曲线

由于陀螺环路中的 AGC 是要保证 AGC 输入信号幅度稳定,与普通 AGC 工作方式不一样。根据环路控制原理,定义 AGC 输入控制精度

$$= \frac{A_{in}}{E(t)} \quad (2)$$

它的大小反映了 AGC 控制陀螺驱动输出信号幅值稳定的能力,其中 $E(t)$ 为外界因素改变导致驱动环路线性部分增益的变化量, A_{in} 为相应的 $E(t)$ 作用下环路达到稳定时 AGC 输入幅值的变化量。再定义 AGC 增益输出动态范围 $e(t)$,它是一个区间范围,反应驱动输出信号幅度在允许的范围变化时对应的线性环路上增益的变化范围。

假设 $E(t)$ 为阶跃信号,在 $t = t_0 (t_0 > 0)$ 时系统达到平衡状态, $E(t)$ 由 0 跳变到 E_0 (不妨假设其值为正数)。按照前面的定义,计算本文 AGC 算法的控制精度。根据 AGC 的增益函数式(1)及自激环路工作的特性,可以得到控制的精度为:

$$= \frac{A_{in}}{E_0} = \frac{K}{G_0} \quad (3)$$

上式表明精度的大小只与参数 K 相关, K 值越小则精度越高。

假设陀螺驱动输出信号幅度允许的变化范围为

$[R - A_{in}, R + A_{in}]$, 根据 AGC 的增益函数式(1)可求出 AGC 输出增益的动态范围为 $e(t) = [e_{min}(t), e_{max}(t)]$, 其中:

$$e_{min}(t) = \frac{1}{G+1} + \frac{G}{1 + \left(1 + \frac{1}{G}\right) \times G_0 \times \frac{A_{in}}{K}} \quad (4)$$

$$e_{max}(t) = 1 + G_0 \times \frac{A_{in}}{K} \quad (5)$$

从上两式的形式可知, 对于一定的 A_{in} 值, 其动态范围与参数 G 和 K 都相关, G 越大则动态范围越大, K 越小则动态范围越大。

美国宇航局喷气推进实验室(JPL)研究的微机械陀螺所用的 AGC 算法^[2] 经过转化后可表示为:

$$G(t) = G_0 + K_p \times (R - A_{in}) \quad (6)$$

其中, R 为陀螺稳定工作时 AGC 的输入幅度值, A_{in} 为当前输入信号的幅度值; G_0 为当 AGC 工作在稳定工作点时需要提供的增益; K_p 为可调参数, 其值影响 AGC 控制精度、动态范围等性能。

根据前面的定义可求得该算法的控制精度为:

$$= \frac{|A_{in}|}{E(t)} = \frac{G_0}{K_p \cdot (1 + E_0)} \quad (7)$$

与前面相同的条件与方法计算该 AGC 增益输出动态范围 $e(t) = [e_{min}(t), e_{max}(t)]$, 其中:

$$e_{min}(t) = \frac{1}{1 + \frac{K_p}{G_0} \times A_{in}} \quad (8)$$

$$e_{max}(t) = \frac{1}{1 - \frac{K_p}{G_0} \times A_{in}} \quad (9)$$

由此可知 K_p 越大则控制精度越小, 动态范围越大。为了使陀螺驱动输出信号的幅度越稳定则应使 K_p 的值越大。

但是在定点数字系统中, 由于系统字长的限制, 一个字所能表示的数值范围和数据精度是一对矛盾的量。陀螺的定点数字处理系统, 在满足 AGC 增益数据精度要求的情况下, 限制了增益的数值范围。在 JPL 的算法中增益的最大值为 $G_{max} = G_0 + K_p \times R$, 定点系统中可表示的增益数值范围限制了 K_p 的值, 从而限制了此种算法的控制精度。本文提出的 AGC 算法在起振时 AGC 的增益也就是最大的增益值只与参数 G 和 G_0 相关, 并不限制参数 K 的值, 而其控制精度的高低与动态范围的大小主要与参数 K 的值, 并且在设计时可以通过适当调整 K 和 G 的值就能达到所需的精度与理想的 AGC 起振初始增益。

3 系统仿真及分析

对图 2 所示的系统进行建模仿真, 输入的环境

影响信号 $e(t)$ 如图 4 所示, 当 $t = 1.5$ s 时, 信号发生一个阶跃, 值由 1 跳变成 1.2。选用上海微系统所制作的电磁驱动、电容检测振动式陀螺, 其对数字 AGC 要求的参数为

$$R = 0.3314 \text{ V}; G_0 = 0.4668/0.4635。$$

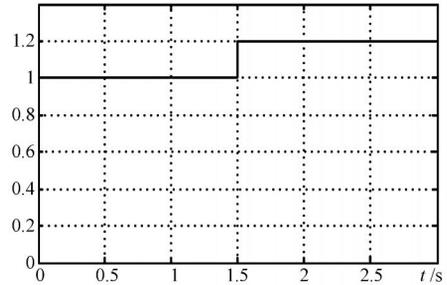


图 4 外界环境影响信号 $e(t)$

假设当系统对 AGC 增益的精度要求为 2^{-13} 时, 对于 16 位数字定点系统所能表示的最大增益值为 4。对于 JPL 给出的 AGC 算法, K_p 所能取得的 2.99, 其控制精度为 0.1347; 对于本文提出的算法, 当 $K = 0.01$ 时, G 值可取至 2.99, 其控制精度为 0.00993。

仿真所得陀螺驱动端的输出信号如图 5、图 6 所示, 当 $t = 1.0$ s 时, 陀螺驱动环路自激振荡幅度达到平横; 当 $t = 1.5$ s 时, 从仿真结果可以发现幅度在经过约为 0.125 s 的时间后达到重新稳定。根据理论计算, 控制精度达到 0.01, 驱动输出幅度的变化约为 0.012 V。在 $e(t)$ 跳变前后仿真出的幅度值基本没有变化, 驱动输出信号幅度值稳定得到很好的控制。

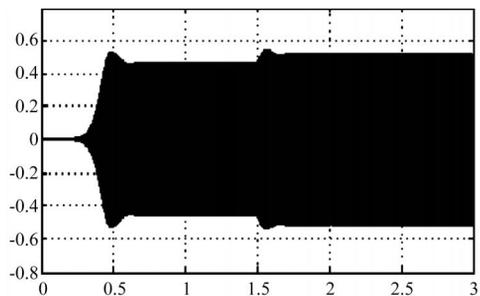


图 5 JPL 给出的算法下陀螺驱动输出

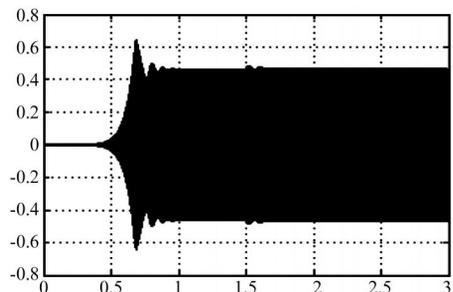


图 6 本文算法下陀螺驱动输出

对陀螺输入一定值角速度时,电路检测出角速度的变化曲线如图 7 和图 8 所示。

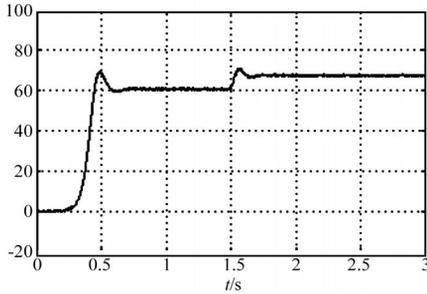


图 7 JPL 给出的算法下系统的角速度输出

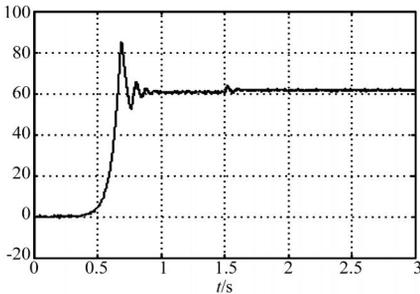


图 8 本文算法下系统的角速度输出

在 $t = 1\text{ s}$ 时,陀螺起振达到稳定驱动状态,在 $t = 1.5\text{ s}$ 时,一个突变的外界因素影响环路增益。可以发现在 1.5 s 后采用 JPL 给出的 A GC 算法工作的系统输出的角速度变化值达到了近 10 个单位,而采用本文提出的 A GC 算法时系统输出的角速度变化值在 1 个单位左右,可见该算法能够大大抑制外界环境引起输出角速度的漂移。

在算法实现中,需要进行一次高精度的定点除法,除法在 TMS320C5416 中所需的运算时间在 200 个周期以内。如果选取适当的数字处理芯片和进一步改进定点除法算法,那么该 A GC 算法则可更加有效的用于实际的处理电路中。在试验当中,采用三段直线和多段直线逼近近似实现了算法的功能,因此在实际的信号处理当中直线逼近是一种极为可取的做法。

4 结论

本文对振动式微机械陀螺的驱动环路进行了分

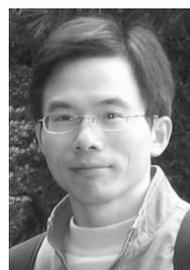
析,论证了 A GC 模块在保持陀螺驱动环路上驱动输出信号幅度值的稳定性和陀螺检测角速度信号的精度上的重要作用,并通过对数字 A GC 算法进行理论分析、改进和仿真。仿真结果表明,所设计的数字 A GC 算法能够使陀螺驱动环路中驱动输出信号幅度值达到很高的控制精度。最后,本文用直线近似的方法实现了所提出的 A GC 算法,实现方法简单可靠并可直接采用定点 DSP 完成。

参考文献:

- [1] Sungsu Park, Horowitz R, Chin-Woo Tan. Adaptive Controller Design of MEMS Gyroscopes[C]// Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE. 25-29 Aug. 2001 Page(s) :496-501.
- [2] 王存超,苏岩,王寿蓉. 硅微振动陀螺仪驱动器自激驱动研究[J]. 传感技术学报,2006,19(2) :364-366.
- [3] 吴学忠,肖定邦,李圣怡. 自动增益控制在振动式微陀螺驱动中的应用[J]. 传感技术学报,2006,19(3) :790-792.
- [4] M 'Closkey Robert T, Vakakis Alex. Analysis of a Microsensor Automatic Gain Control Loop[C]// Proceedings of the American Control Conference San Diego, California -June 1999. Volume 5,2-4 June 1999 Page(s) :3307 - 3311.
- [5] Douglasn. Green, Global Stability Analysis of Automatic Gain Control Circuits [J], IEEE Transactions on Circuits and Systems. FEBRUARY 1983,30(2) :78 - 83.
- [6] Jiao Jiwei, Han Ming, A Digital Demodulation Solution to Achieve Stable Driving for a Micro-machined Gyroscope with an A GC Mechanism [J]. Sensors, 2004. Proceedings of IEEE, 24-27 Oct. 2004,1 :429 - 432.
- [7] Wang Huiquan, Jin Zhonghe, Jiao Jiwei, Wang Yuelin. Analysis of a MEMS Gyroscope Interface Circuit[C]// Solid-State and Integrated Circuits Technology, 2004. Proceedings 7th International Conference on Volume 3,18-21, Oct. 2004 :1804-1807.
- [8] 袁孝康. 自动增益控制与对数放大器[M]. 国防工业出版社, 1987. 8.
- [9] 谢嘉奎. 电子线路(非线性部分)(第 4 版) [M]. 高等教育出版社,2000-05-01 :116-122.



邱奕文(1982-),男,浙江大学微电子学与固体电子学专业硕士研究生,主要从事微机械陀螺外围信号处理系统的数字化工作。qiuyiwen_1982@163.com



吴昌聚(1977-),男,浙江大学微电子学与固体电子学专业博士后。主要从事的方向是 MEMS 研究,包括微加速度计、微陀螺和微/纳流体。wuchangju@zju.edu.cn