

全数字化激光陀螺控制系统设计

李 哲

(西安邮电学院电子工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要 提出全数字化激光陀螺控制方案, 并实现了全数字控制的激光陀螺——数字陀螺。对比分析了正在使用的模拟控制激光陀螺和数字激光陀螺原理及结构, 介绍了数字陀螺的优点和关键技术, 给出了抖动驱动为脉宽调制方式实现的波形图和数字陀螺图形化测试数据。实验结果表明, 数字陀螺符合激光陀螺发展方向, 提高了调试和生产效率, 简化了对导航系统的设计和调试要求。

关键词 环形激光陀螺; 数字陀螺; 抖动驱动; 脉宽调制

中图分类号 V241.5 OCIS 140.3370 140.3538 文献标识码 A

Design of Control System for All-Digital Ring Laser Gyro

Li Zhe

(School of Electronic Engineering, Xi'an Institute of Posts & Telecommunication, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract The control scheme of all-digital laser gyro is presented, and the laser gyro of the full digital control, digital ring laser gyro, is implemented. The principle and structure between the analog laser gyro and digital laser gyro are compared, and the advantages and key technologies of digital gyro are described in detail. In particular, jitter-driven pulse-width modulation waveform and graphical test data of the digital gyro is given. It is proved that the digital gyro direction of development in line with the ring laser gyro, improves debugging and production efficiency, and simplifies the requirements for navigation systems.

Key words ring laser gyroscope; digital ring laser gyro; jitter-driven; pulse-width modulation

1 引言

激光陀螺是现代惯性导航系统的关键部件之一, 广泛应用于航空、航天和兵器等移动目标的定位。其主要由光路系统和电路系统组成, 电路控制系统是否优化直接影响激光陀螺性能^[1]。目前, 从已有报道看国内激光陀螺光程长控制、光强控制、跟踪谐振频率的锁相环、抖动驱动、角位置驱动及角位置谐振频率解调使用的基本都是模拟电路实现^[2], 有些仅仅局部实现了数字化, 而欧美和俄罗斯等国家激光陀螺基本实现了全数字化^[3]。要实现高精度、小型化、低功耗激光陀螺, 全数字电路控制是行之有效的解决方案。本文是在充分研究国外数字激光陀螺的基础上, 尝试全数字化激光陀螺设计、实现, 通过实验得到实测数据, 达到设计要求。

2 模拟激光陀螺存在的问题

国产激光陀螺和正在研制的激光陀螺由于多种原因, 基本都采用图 1 所示方式。激光陀螺仪自身主要由基座、谐振腔、抖动杆、光电转换、角位置传感器、前置放大电路、光强控制电路、光路程长控制电路等组成^[4], 如图 1 左侧所示。激光陀螺必须的引燃电路、跟踪谐振腔谐振频率的锁相环控制电路、伪随机

收稿日期: 2009-08-08; 收到修改稿日期: 2009-11-02

作者简介: 李 哲(1963—), 男, 教授, 主要从事嵌入式系统和激光陀螺等方面的研究。E-mail: zheli@xupt.edu.cn

序列发生器、加噪电路、抖动驱动电路、角位置驱动电路、谐振频率解调电路、陀螺输出整形、脉冲计数电路由外部提供^[5]，如图 1 右侧所示。生产调试期间需要专用测试台、实际应用右侧控制模块由导航系统提供。除了脉冲计数电路外，所有电路均为模拟器件实现。

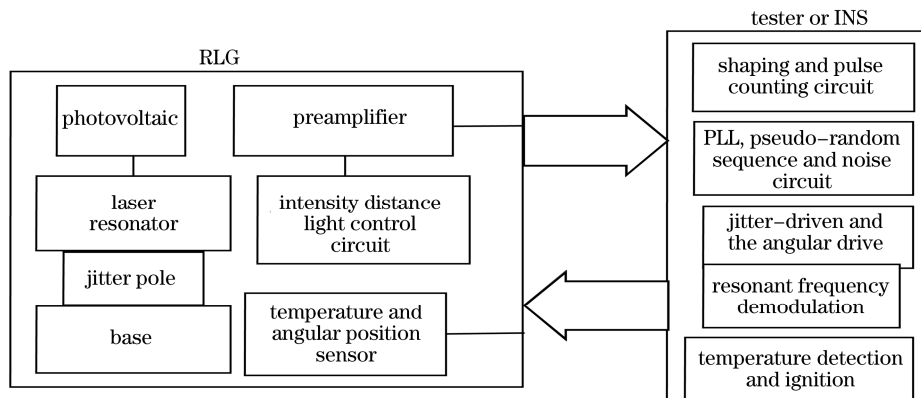


图1 模拟激光陀螺及应用
Fig.1 Simulated laser gyro and its application

由此产生两个问题：1) 模拟电路器件数量多，体积不易缩小造成陀螺体积大；模拟器件参数受温度影响大，高低温或变温时陀螺零偏漂移变化大；随着使用或者存储时间变化，模拟器件易老化，陀螺零偏及零偏稳定性也会发生变化，使其性能下降；模拟器件数量多，参数分散，调试难度大；连接线多装配复杂、易受干扰。2) 如图 1 所示，有很多电路由导航系统提供，不仅加大了导航系统设计难度和调试难度，更主要的是，若导航系统提供的电路与陀螺制造商测试台电路不完全一样时，难以发挥陀螺的性能。

随着微电子和计算机技术的迅猛发展，可编程逻辑器件(PLD)的出现和使用，改变了传统逻辑电路的设计方法，尤其是现场可编程门阵列(FPGA)集成度高使用方便灵活，给数字系统的整个设计和实现过程带来了革命性的变化，也给激光陀螺全数字化控制提供了条件^[6]。

3 全数字激光陀螺

全数字陀螺基本思想是将必需的控制电路全部集中在陀螺内部，与导航系统连接只有通信串口 RS422 和 ARINC429，调试、测试全部功能方法由外部计算机专用软件与陀螺通过串口交互实现。图 2 所示为导航计算机仅提供串口与数字激光陀螺连接，简化了系统设计及调试。

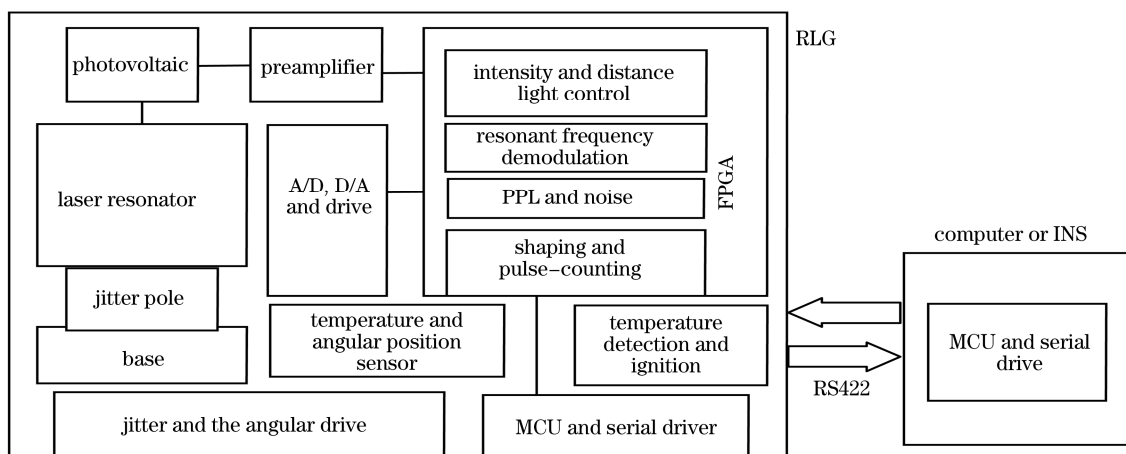


图 2 数字激光陀螺及应用
Fig.2 Digital laser gyro and its application

在数字化设计中，将前置放大器输出的模拟信号和角位置输出的模拟信号通过模数(A/D)转换器转化成数字信号，送到 FPGA 内部处理，将 FPGA 输出的光强、光路程长控制信号通过 D/A 转换器转化成模拟信

号输出到驱动电路。本设计的核心电路为 FPGA, 选用 Altera 公司的 Cyclone II 系列器件 EP2C20Q240。FPGA 丰富的资源和强大的功能, 不仅可以实现简单的逻辑运算、计数、乘法运算, 而且能够实现数字滤波、傅里叶变换(FFT)、数字锁相环(DPLL)、比例微积分控制(PID), 信号发生器等复杂数字单元。FPGA 为纯硬件设计, 与数字信号处理器(DSP)比较, 运算速度快, 更适合于实时控制系统应用。

激光陀螺电路系统光强控制、光程长控制和抖动控制、角位置驱动与谐振频率检测为四个闭环控制回路; 温度检测、陀螺输出信号整形与计数为两个开环部分。为了实现上述功能, FPGA 内部算法设计应包括: 低通滤波器、带通滤波器、PID 控制器、门限受控积分器、正弦信号发生器、伪随机序列发生器、全数字锁相环、角位置信号解调乘法器、脉宽调制 PWM 抖动驱动信号发生器、陀螺输出脉冲计数器及 MCU 接口逻辑。由于光路和机械结构的差异性, 每个激光陀螺存在差异, 要使其正常工作, 需要调整电路控制系统的参数很多, 而且对每一个个体激光陀螺都要反复调试, 在模拟控制电路中, 通过更换电子元器件实现控制参数调整, 工作量非常大。在数字控制电路中, 只需要由计算机通过串口在线修改相关参数就可以调试激光陀螺, 同时, 测试软件直观监测到性能指标, 十分便利。

全数字激光陀螺主要优点: 1) FPGA 数字电路能够实现各种控制逻辑, 在线设计调试, 还可以实现模拟电路难以实现的控制算法。2) 所有控制检测都在陀螺内部, 仅通过标准串行接口, 简化激光陀螺自身调试, 提高生产效率, 同时也简化导航系统设计与调试。3) 避免了模拟电路控制分立元件多、器件易受温度影响、调试复杂、体积大等缺陷, 提高了高低温环境电路系统的适应性, 同时提高了激光陀螺生产效率和可维护性。4) 基于 FPGA 设计的数字激光陀螺采用硬件描述语言进行电路设计, 灵活性很大, 可以有针对性地对每个陀螺个体进行温度补偿, 提高陀螺精度, 具有模拟电路难以做到的优势。

激光陀螺控制、输出均为模拟信号, 实现数字化控制与检测, 必须通过 A/D, D/A 转换器, 这样会引入一定的量化误差; 采用 FPGA 实现数字滤波和数字 PID 控制, 系统实时性也会受到影响, 必须采取合理算法和器件选型。A/D, D/A 位数多, 可以降低量化误差, 但是增加了计算量, 实时性下降。综合考虑后选用 12 bit 的 A/D, D/A 转换器, 将不利因素降到合理范围之内, 充分发挥数字系统的优势。

4 关键技术及难点

由于激光陀螺的复杂性, 设计全数字化激光陀螺控制系统有许多不可预知的因素, 因此首先对全数字化控制系统评价, 分析有利因素和不利因素, 从理论上确信全数字化方案是可行的; 其次, 分析全数字化实现要解决的核心问题, 对可能遇到的不确切问题提出多种解决方案; 第三, 对国外相关研究及时跟踪, 在目标明确前提下, 确保不走或少走弯路。关键技术包括:

1) 控制系统数学模型建立。以模拟激光陀螺为原型, 细致分析各个控制单元原理, 建立数学模型。同时, 对数学模型进行仿真验证, 确定采用实时性比较高的数字实现方案——FPGA 数字化控制。

2) 解决小型化问题。将原模拟激光陀螺内部控制电路和外部驱动控制电路均在数字激光陀螺内部实现, 不是简单地数字化堆积。激光陀螺对温度、磁场等因素感应灵敏, 保证数字化后新增加的电路不仅体积要小, 而且温度、磁场影响因素不影响陀螺性能。

3) 参数可调, 提高激光陀螺调试、生产检测效率, 简化导航系统设计。分析影响陀螺的参数, 由上位计算机通过串口加载改变, 对外仅通过串口与导航计算机连接, 大大简化了导航系统设计。

数学模型建立和抖动驱动是设计前预计到的难点。首先, 没有合理的数学模型, 就无法实现数字化控制。有针对性地分析模拟陀螺控制电路, 建立数学模型, 以此为基础, 将分离元器件实现的信号发生器、滤波器、PID 等算法, 数字化后在 FPGA 中实现算法。进一步可以使用数字信号处理所特有的模拟电路难以完成的特性, 对算法进行优化。其次, 抖动驱动电路实现激光陀螺去锁区功能, 在传统方案中, 测试台

或导航系统中产生正弦波^[7]或者方波信号^[8,9]，通过变压器驱动，产生峰峰值 100 V 的交流驱动信号，加到抖动驱动杆的压电陶瓷上，实现抖动控制。这种方案由于变压器体积大无法放入陀螺内部，即使通过改变磁芯减小变压器体积，也不能放到陀螺内部，因为变压器会引入磁场，影响陀螺性能。通过研究，并借助国外经验，选用脉宽调制方式。实现 PWM 方式驱动不需要变压器，因此体积小，但需要仿真验证和测试验证。实验证明该方式可行。图 3(a)是没有负载、没有加噪时驱动电路输出，表明脉冲宽度和脉冲个数是可调的。图 3(b)为有负载、有加噪时驱动电路输出，表明驱动功率随伪随机噪声序列变化。可见，压电陶瓷抖动杆为容性负载，驱动脉冲加在抖动杆压电陶瓷片上后类似于充放电。

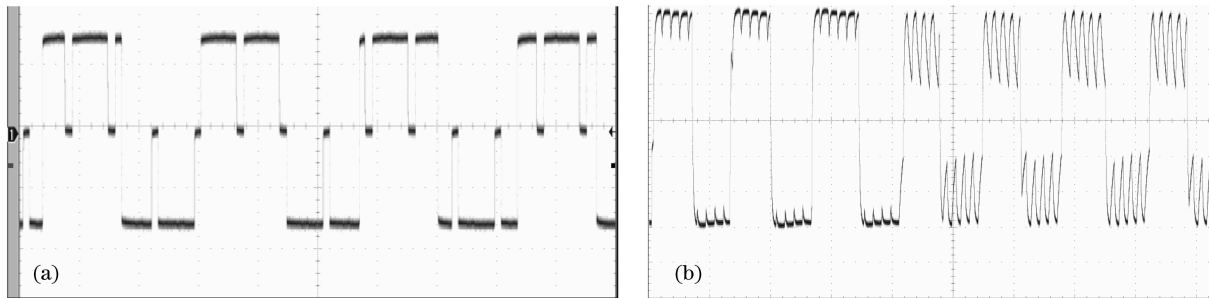


图 3 无负载、无加噪时 PWM 输出
Fig.3 PWM output without (a) and with (b) load and noise

5 测试结果

按照上述设计思想，实现了全数字化激光陀螺控制与检测系统，初步测试结果达到了预定目标。与模拟激光陀螺相比，全数字激光陀螺调试方便，简化了调试设备或导航系统电路设计。全数字激光陀螺采用 FPGA 可编程全数字设计方法便于新算法更新，同时内部有 A/D 转换器，实时检测温度变化，可以根据温度变化对输出信号做补偿，进一步提升测量精度。图 4 所示分别为全数字激光陀螺控制系统和模拟激光陀螺控制系统在 1.5 h 常温、静止环境下，100 s 采样得到的测试结果，前者测试仅需要一台装有专用测试软件的通用计算机，后者不仅需要一台装有专用测试软件的通用计算机，而且还需要一台专用测试台，实现图 1 右侧模块功能。

从图 4 可知，二者差别不是太大。图 4(a)为相对静止测试条件下的脉冲数，即零偏值，因此该计数值表现的是测试地点所在纬度下，地球自传给陀螺带来的脉冲输出。在 730 左右上下波动，测试数据表明最大波动脉冲数为 6 个，计算该陀螺的零偏稳定性(即计数脉冲的标准差)为 1.56%，陀螺的零偏稳定性也称为陀螺的精度。图 4(b)为在相同环境下的测试结果，陀螺脉冲数在 731 上下波动，而且有点上漂，测试数据表明最大脉冲波动数为 6 个，零偏稳定性为 1.61%。

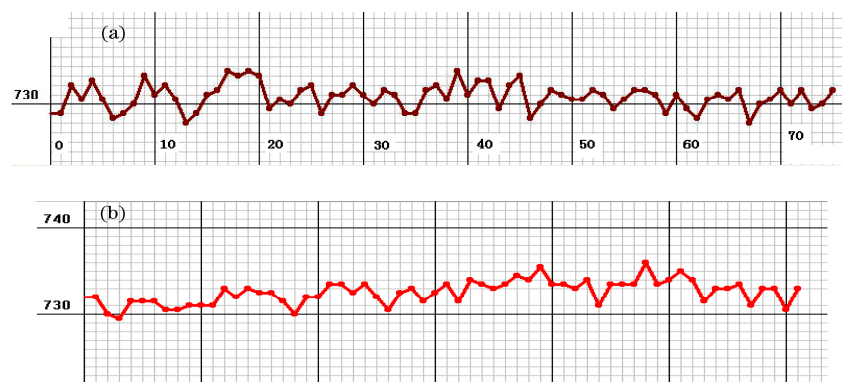


图 4 测试结果。(a) 全数字激光陀螺；(b) 模拟激光陀螺
Fig.4 Test results. (a) all-digital laser gyro; (b) analogic laser gyro

6 结 论

通过大量实验对正在使用的模拟控制激光陀螺和数字激光陀螺原理及结构进行对比分析,发现使用全数字化激光陀螺控制系统比模拟激光陀螺控制系统的零偏稳定性得到提高,调试更为方便,对导航系统要求简单。可以预测激光陀螺的发展方向为:高精度、小型化和低功耗。控制系统全数字化是其实现的手段,数字陀螺所具有的优势是模拟激光陀螺无法比拟的,必将成为研究的热点。

参 考 文 献

- 1 Yang Peigen, Gong Zhibing. Optical Inertial Technology[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1999. 56~58
杨培根, 龚智炳. 光电惯性技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999: 56~58
- 2 Zeng Qinghua, Liu Jianye. The latest developments in ring laser gyro[J]. *Sensor Technology*, 2004, **23**(11): 1~4
曾庆化, 刘建业. 环形激光陀螺的最新发展[J]. 传感器技术, 2004, **23**(11): 1~4
- 3 Qing Yongyuan. Inertial Navigation[M]. Beijing: Science Press, 2006. 43~48
秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 43~48
- 4 Xu Xin. FPGA-Based Embedded System Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005. 101~103
徐 欣. 基于FPGA的嵌入式系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 101~103
- 5 Jin Shilong, Long Xingwu. Laser gyro new optical long-distance control of mirror development[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 563~566
金世龙, 龙兴武. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制[J]. 光学学报, 2006, **26**(4): 563~566
- 6 Zhang Yan, Li Yanzhi, Luo Bing. High-accuracy signal demodulation for dithered laser gyros based on FPGA[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, **14**(7):950~952
张 岩, 李延志, 罗 兵. 基于FPGA的抖动偏频激光陀螺高精度信号解调[J]. 计算机测量与控制, 2006, **14**(7): 950~952
- 7 Tang Jianxun. Mechanical Jitter Laser Gyro Dither Research and Design[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2000
汤建勋. 机械抖动激光陀螺抖动偏频系统的研究与设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2000
- 8 Tang Jianxun, Wan Junli, Zhang Guangfa. A dither control method which tracks the drift of dither mechanism's nature frequency with a phase lock loop[J]. *Measurement and Control Technology*, 2000, **19**(8): 28~29
汤建勋, 万钧力, 张广发. 用锁相环跟踪抖动机构自然频率的抖动控制方法[J]. 测控技术, 2000, **19**(8): 28~29
- 9 Zhu Chunyun, Guo Yusheng. Harmonics analysis on square-wave driving signal of mechanically dithered RLG[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(6): 743~746
朱春云, 郭玉胜. 机抖激光陀螺方波驱动方式的谐波分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, **15**(6): 743~746
- 10 Pan Xianfei, Jiang Mingming. Research on control method and characteristics of RLG digital dither[J]. *J. National University of Defense Technology*, 2006, **28**(5): 99~103
潘献飞, 江明明. 激光陀螺数字抖动控制方法与特性[J]. 国防科技大学学报, 2006, **28**(5): 99~103