

谐振式光学陀螺的激光频率锁定技术设计

李鑫¹, 郑永秋^{1,2}, 唐军¹, 刘俊^{1,2}, 张杨¹

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 测试技术及仪器国家级实验教学示范中心(中北大学), 太原 030051)

摘要:对谐振式光学陀螺系统构建及原理进行了分析设计, 并对该陀螺在国内外的研究现状进行了相应的介绍。同时针对谐振式光学陀螺的激光频率锁定这一问题, 提出了叠加式的数字锁频算法, 与比例积分(PI)控制器构成的锁频回路相比, 能够提高频率锁定反馈响应, 减小系统功率消耗。对该陀螺系统进行转动测试, 并利用 Allan 方差进行一小时的零偏稳定性拟合计算, 证明了设计的数字锁频算法能够满足谐振式光学陀螺系统测试需求, 锁频精度达到了预期目标。

关键词:谐振式光学陀螺; 激光频率锁定; 叠加式; 数字锁频; Allan 方差

中图分类号: TN913.8; TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0022-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.006

Design of laser frequency lock for resonant optical gyro

LI Xin¹, ZHENG Yongqiu^{1,2}, TANG Jun¹, LIU Jun^{1,2}, ZHANG Yang¹

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Measuring Technology and Instruments Education (North University of China), Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper, the construction and principle of resonant optical gyro system are analyzed and designed, and the current research status of the gyro is introduced. At the same time, this paper presents a superposition digital locking algorithm for the laser frequency locking of resonant optical gyro, with the proportion integral (PI) controller, compares to the frequency lock loop can improve the frequency locking feedback response, reduces the system power consumption. Through the rotation test of gyro system, and the Allan variance fitting calculation of an hour of zero-bias stability, proves that the article designed digital lock frequency algorithm can meet the demand of resonant optical gyro system testing, and the accuracy of laser frequency locking has reached the expected goal.

Key words: resonant optical gyro; laser frequency locking; superposition; digital lock frequency; Allan variance

0 引言

谐振式光学陀螺是一种基于 Sagnac 效应的新型角速度传感器, 因其功率消耗低、检测精度高和易于集成等优势, 已成为各大科研机构的研究重点。目前, 该陀螺还处于试验室探索阶段, 北京航空航天大学在

收稿日期: 2017-10-10。

基金项目: 国家自然科学基金(51225504, 61640601)资助; 中北大学校科研基金(XJJ2016030)资助。

作者简介: 李鑫(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事谐振式光学陀螺光信号采集、处理以及传输方面的研究。

2012 年完成了自己的谐振式光学陀螺系统搭建, 并在实验室测得其零偏稳定性为 2484°/h。Ciminelli.C 团队在 2013 年设计了基于脊形波导腔的谐振式光学陀螺系统, 利用理论推导得到零偏稳定性为 10°/h。2015 年, 东南大学对自己设计的谐振式光学陀螺系统进行转动测试, 测得其零偏稳定性达到了 3240/h^[1,2]。针对谐振式光学陀螺的激光频率锁定这一问题, 本文提出基于叠加式的数字锁频技术设计, 通过累加累减的方式将激光频率进行锁定。

1 谐振式光学陀螺系统原理

图1为谐振式光学陀螺系统原理图,窄线宽激光器(Laser)发出的激光进入分束器C1后形成功率相等的两束光波。这两束光波分别经过相位调制器PM1和PM2进行正弦波相位调制后进入耦合器C2和C3,再由耦合器C4耦合进入环形谐振腔形成顺时针(CW)和逆时针(CCW)两路光信号。其中,CW路信号经过C2后到达光电探测器PD1形成电信号输出,CCW路信号经过C3后到达光电探测器PD2形成电信号输出。DM1与DM2是以FPGA为核心的逻辑解算电路,分别采集PD1与PD2输出的信号进行解调、滤波和放大等处理。FBC为数字反馈电路,通过将DM1输出的信号反馈到激光器扫描端口,从而将激光器输出光频率锁定在CW路的谐振频率上。DM2作为陀螺的信号输出端。

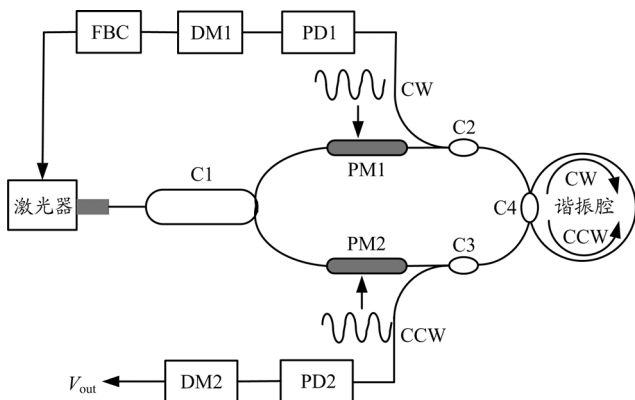


图1 谐振式光学陀螺系统

当该陀螺系统以一定的角速度 Ω 旋转时,根据sagnac效应,由耦合器C4耦合进入环形谐振腔的两路(CW与CCW)光信号之间将产生一个正比于旋转角速度 Ω 的谐振频差 Δf ,可以用式(1)表示^[4]:

$$\Delta f = D\Omega / n\lambda \quad (1)$$

其中, D 为环形谐振腔直径, n 为谐振腔折射率, λ 为激光器输出光波长。由式(1)可知,通过对谐振腔中两路光信号的谐振频差 Δf 进行检测,便可得到该陀螺系统的角速度输出。因此,将激光器输出光频率锁定在环形谐振腔CW路的谐振频率上,此时谐振腔中两路光信号的谐振频差 Δf 可单独用CCW路光信号所对应的电压输出进行表示,通过对该电压值进行解算,从而得到陀螺的输出角速度。

2 数字锁频设计

陀螺系统中PD1、PD2输出的电压信号即为环形

谐振腔单路的谐振谱线,其中谐振腔的传递函数可用式(2)表示^[5]:

$$H(\Delta f) = (1 - \alpha_c) \left[1 - \rho \cdot \frac{(1 - Q)^2}{(1 - Q)^2 + 4Q \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot \Delta f}{FSR} \right)} \right] \quad (2)$$

式(2)中, $\rho = 1 - \frac{(U - UQ - R)^2}{(1 - \alpha_c)(1 - Q)^2}$, $U = \sqrt{1 - k_c} \sqrt{1 - \alpha_c}$,

$R = k_c(1 - \alpha_c) \sqrt{1 - \alpha_L}$, $Q = \sqrt{1 - \alpha_L} \sqrt{1 - k_c} \sqrt{1 - \alpha_c}$, FSR

为环形谐振腔的自由谱宽, k_c 、 α_c 分别为C4的耦合系数和损耗系数, α_L 为光在谐振腔内传输一次的损耗系数。我们对式(2)进行仿真可得到谐振腔单路谐振谱线如图2所示。

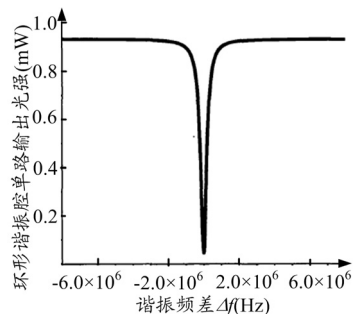
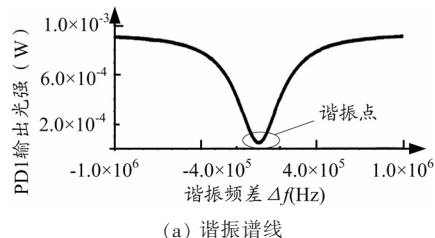


图2 谐振腔单路谐振谱线

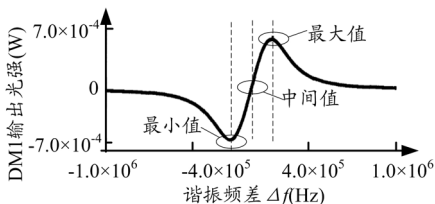
根据式(2),激光光波经过PM2进行正

弦波相位调制后进入环形谐振腔所形成的CW路光信号谐振谱线如图3(a)所示,图中圈出部分即为CW路光信号所对应谐振腔的谐振点。利用逻辑解算电路DM1对CW路光信号的谐振谱线进行同步解调,得到相应的解调曲线(即鉴频曲线)如图3(b)所示,图中中间值即为CW路光信号频率在谐振点处的解调值^[6]。同理,对CCW路光信号进行相同处理。

激光频率锁定是谐振式光学陀螺系统中比较重要的一部分,它通过控制激光器的扫描端口使



(a) 谐振谱线



(b) 解调曲线

图3 环形谐振腔CW路谐振谱线与解调曲线

陀螺系统是否稳定工作。本文以FPGA逻辑解算电路为基础,通过对解调曲线进行采集分析,设计出了一

种叠加式的数字频率锁定算法。与比例积分(Proportion Integration, PI)控制器构建的频率锁定回路相比,该算法具有消除积分时间延迟,提高系统锁频响应速率的作用,同时也能减少系统对模拟器件的需求,从而降低系统功率消耗^[7,8]。

如图1所示,FBC是以FPGA为核心的数字锁频反馈回路,FBC上电输出三角波电压信号 V_{out} 对激光器进行扫描,当完成一个周期的三角波电压扫描后,开始进行频率跟踪锁定,其锁定算法状态流程如图4所示。该算法是基于图3中解调曲线进行设计的,逻辑电路上电初始化后,开始对解调信号进行最大值(max)与最小值(min)的选定,选取完成后便利用公式 $mid=(max+min)/2$ 得到中间值,该值便是CW路光信号在环形谐振腔谐振点处所对应的解调值。此时逻辑电路继续采集DM1的输出电压值 $data$,并在每个时钟跳变沿判断 $data$ 是否等于 mid ,如果 $data>mid$,则对应的扫描输出电压 V_{out} 就逐次减1,直到 $data$ 等于 mid 时停止;反之,如果 $data<mid$,则对应的扫描输出电压 V_{out} 就逐次加1,直到 $data$ 等于 mid 时停止。完成以上累减累加计算后,通过将当前值 $data$ 所对应的扫描电压 V_{out} 反馈到激光器的扫描输入端口,便可将激光器输出光频率锁定在环形谐振腔CW路的谐振频率上,从而完成谐振式光学陀螺数字锁频反馈控制。

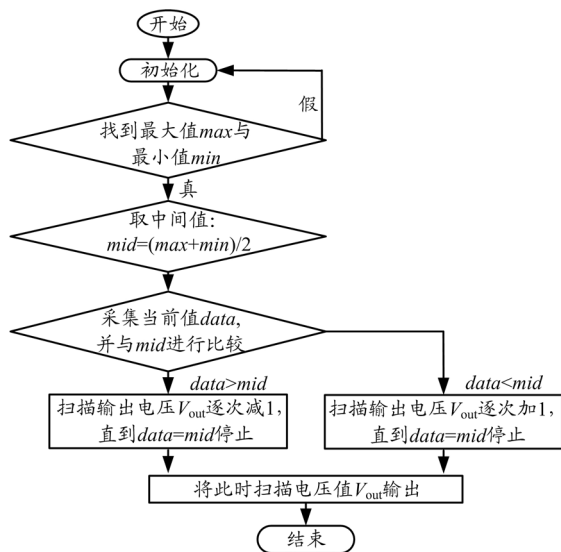


图4 数字频率算法流程图

3 实验测试

基于上述锁频算法对谐振式光学陀螺系统进行测试,系统中C1为50%的光纤分束器,C2、C3的耦合系数均为0.5,C4的耦合系数为0.05;谐振腔是用1.8m

长的光纤环绕而成,其 Q 值为 8.5×10^7 ,精细度为70。将激光器输出光频率锁定在谐振腔CW路的谐振频率上,文献[9]对该陀螺系统分别进行 $0^\circ/\text{s}$ 、 $-10^\circ/\text{s}$ 、 $-20^\circ/\text{s}$ 、 $-30^\circ/\text{s}$ 、 $-40^\circ/\text{s}$ 、 $-50^\circ/\text{s}$ 、 $10^\circ/\text{s}$ 、 $20^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$ 、 $40^\circ/\text{s}$ 和 $50^\circ/\text{s}$ 的转动测试,得到测试结果如图5(a)所示,图中可以看出

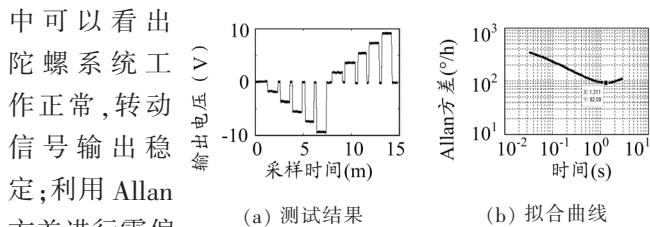


图5 陀螺测试结果与零偏稳定性拟合曲线

陀螺系统工作正常,转动信号输出稳定;利用Allan

方差进行零偏

稳定性计算,

得到1h测试

状态下的拟合曲线如图5(b)所示,其测试结果为 $92.09^\circ/\text{h}$,说明该陀螺系统锁频精度满足实验需求^[10]。

4 结束语

本文对谐振式光学陀螺系统原理进行了分析设计,并针对激光频率锁定技术这一问题,采用了叠加式的数字锁频跟踪算法,通过对陀螺系统进行转动测试,证明了该锁频算法达到了预期目标,满足谐振式光学陀螺在实验室测试条件下的各种需求。

参考文献:

- [1] 姚灵芝,马慧莲,金仲和. 基于单片FPAG的谐振式光纤陀螺数字系统设计与实现[J]. 传感技术学报,2011,24(9):1260-1264.
- [2] 冯丽爽,王潇,刘丹妮,等. 谐振式集成光学陀螺的一些近期发展情况[C]//中国惯性技术学会:光学陀螺及系统技术发展与应用研讨会. 北京:中国惯性技术学会,2016.
- [3] 杨婷,张成飞,郑永秋,等. 谐振式光学陀螺数字陀螺信号的提取技术[J]. 光通信技术,2016,40(12):1-4.
- [4] 孙众. 谐振式微光学陀螺双路闭环信号检测技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [5] 应迪清. 基于数字三角波相位调制的谐振式光纤陀螺[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [6] 仇海涛,闫树斌,张成飞,等. 应用于谐振式光学陀螺的正弦波调制解调技术[J]. 仪表技术与传感器,2016(3):90-92.
- [7] 鲍慧强. 谐振式光学陀螺频率锁定技术与FPGA实现[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [8] 马迎建,唐瑶. 谐振式光学陀螺小型化光源频率跟踪锁定研究[J]. 传感器与微系统,2012,31(1):35-37.
- [9] 洪灵菲,张春熹,冯丽爽,等. 谐振式微光学陀螺标度因数及其非线性度分析[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(8):1050-1064.
- [10] 鲍慧强,毛慧,马慧莲,等. 谐振式微型光学陀螺锁频精度分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(1):94-98.