谐振式光纤陀螺闭环锁频系统

闫树斌 1.2, 陈 浩 1.2, 郑永秋 1.2, 李小枫 1.2, 安盼龙 1.2, 张斌珍 1.2, 薛晨阳 1.2

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051; 2. 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要:谐振式光纤陀螺(R-FOG)是基于 Sagnac 效应产生的谐振频率差来检测旋转角速率的一种新型光学传感器。利用闭环锁频系统可以减小光纤环形谐振腔受温度、应力等外界环境变化的影响,提高陀螺性能。提出了数字与模拟相结合的闭环锁频系统方案设计,克服了模拟锁频电路带来的电路温漂,采用模拟解调技术来降低了对系统 A/D 转换器的转换速度的要求,同时无需对复杂数字解调算法的研究。闭环锁频系统应用于陀螺测试系统中,实验测得 10 s 时间内的锁频精度为 2.15 (°)/s。

关键词:谐振式光纤陀螺; 锁频; 零漂稳定性

中图分类号: TN815 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-4061-05

Closed loop frequency locking resonator fiber optic gyro systems

Yan Shubin^{1,2}, Chen Hao^{1,2}, Zheng Yongqiu^{1,2}, Li Xiaofeng^{1,2}, An Panlong^{1,2}, Zhang Binzhen^{1,2}, Xue Chenyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Resonator fiber optic gyro (R -FOG) is a novel optical sensor whose resonant frequency changes due to the Sagnac effect. The closed loop frequency locking system can decrease the effect of temperature stress and other external environmental changes on fiber ring resonator and so improve the performance of the gyroscope. The design of closed loop frequency locking system where digital circuits and analog circuits were combined was proposed. It overcame the temperature drift in analog circuits, reduced A/D converter converting speed of system, also did not need complex digital demodulation algorithm. Using this design, locking frequency accuracy of 2.15 (°)/s can be obtained in 10 s.

Key words: resonator fiber optic gyroscope; frequency locking; zero drift stability

收稿日期:2014-04-11; 修订日期:2014-05-13

基金项目:国家自然科学基金重大研究专项(91123036);国家自然科学基金(61178058,61275166); 国家杰出青年科学基金(51225504);归国留学基金

作者简介: 闫树斌(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光 MEMS 传感器件、光量子器件等领域方面的研究。 Email:shubin_yan@nuc.edu.cn

0 引 言

谐振式光纤陀螺(R-FOG) 是利用光学 Sagnac效应实现对转动信号进行检测的一种高精度惯性传感器件^[1-3]。谐振式光纤陀螺(RFOG)的敏感元件是一个光纤环形谐振腔,它通过一定频率的光波在光纤环中循环传输产生多光束干涉,只有满足一定光频率的光波才会产生谐振,故称为谐振式光纤陀螺。谐振式光纤陀螺的光源位于谐振腔外面,作为谐振腔的光纤环内部并没有增益介质。当光纤环旋转时,顺时针光波和逆时针光波的谐振频率变得不同,通过检测光纤环中的谐振频率之差得到角速度。谐振式光纤陀螺的最大优点是可以采用很短的光纤,因而谐振式陀螺在高精度、集成化和小型化方面具有潜在的优势,有望成为新一代光学惯性器件^[4]。

在谐振式光纤陀螺系统中,精确检测由于旋转引起的谐振频差是谐振式陀螺系统实现的关键[5-7]。由于光纤环形谐振腔对外部环境非常敏感,温度的轻微改变、转台的转动等都会导致光纤环形谐振腔谐振频率的剧烈变化,从而对陀螺转台信号的采集造成很大影响。闭环锁频系统通过对透射谱信号进行调制和解调得到鉴频信号,对鉴频信号进行处理,一路光路的谐振频率与激光器的输出频率做对比,发现有频率差,则反馈到激光器的输出频率做对比,发现有频率差,则反馈到激光器的输出频率做对比,按现有频率差,则反馈到激光器的输出频率做对比,

1 基本原理

1.1 光纤环形谐振腔

光纤环形谐振腔[®]是一个由光纤环形腔和耦合器构成的闭合导波光路,结构如图 1 所示。

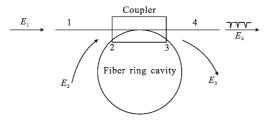


图 1 光纤环形谐振腔示意图

Fig.1 Schematic fiber ring resonator

入射光波从端口1经环耦合器后分成两束,一束光波从端口4直接输出,另一束由端口2再次进入耦合器,其中一部分光波在环形谐振腔中传播一

周后从端口 4 输出, 余下的一部分光波从端口 3 进入谐振腔,继续在腔内传播,如此循环往复,每在谐振腔传播一周,都有一部分光波从耦合器的端口 4 输出,这样端口 4 的输出实际上是一种多光束干涉光波。光纤环型谐振腔的各端口输出可表示为:

$$E_4 = \sqrt{k} \sqrt{1-\delta} E_1 + e^{i\pi/2} \sqrt{1-k} \sqrt{1-\delta} E_2$$
 (1)

$$E_3 = e^{j\pi/2} \sqrt{1-k} \sqrt{1-\delta} E_1 + \sqrt{k} \sqrt{1-\delta} E_2$$
 (2)

$$E_2 = e^{-\alpha L/2} E_3 e^{-j\omega \tau} \tag{3}$$

式中:k 是耦合器的功率耦合系数; δ 是耦合器的损耗;L 是光纤环长度; α 为光纤衰减; ω 为谐振腔中光波的角频率; τ =nL/c,为光在谐振腔中的传输时间。

光波的能量守恒表示为:

$$|E_3|^2 + |E_4|^2 = (1 - \delta)(|E_1|^2 + |E_2|^2)$$
 (4)
由公式(1)~(4)可以得到:

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = (1 - \delta) \frac{(\sqrt{k} - \sqrt{k_r})^2 + 4\sqrt{kk_r} \sin^2(\omega \tau/2)}{(1 - \sqrt{kk_r})^2 + 4\sqrt{kk_r} \sin^2(\omega \tau/2)}$$
(5)

式中: k_r=(1-δ)e^{-d/2}。公式 (5) 的输出结果可以通过 MATLAB(耦合系数和损耗分别为 5%和 1%,传输损耗为 1.5%,光纤谐振腔半径为 500 μm),仿真得到如图 2 所示曲线,产生一个谐振响应:大部分光通过环形谐振腔到达端口 4,只有满足一定光频率的光在腔内产生谐振,在端口 4 的输出曲线呈现为向下的透射谱。

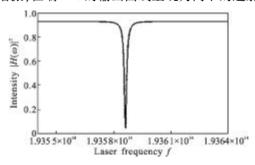


图 2 光纤谐振腔谐振曲线

Fig.2 Fiber cavity resonance curve

1.2 谐振式光纤陀螺结构组成和信号检测

谐振式光纤陀螺的基本结构如图 3 所示。从激光器 Laser 发出的光由耦合器 C0 分成两束,然后借助耦合器 C3 沿相反方向注入谐振腔中。谐振腔中逆时针光波的谐振频率,通过耦合器 C1 由探测器 PD1 检测,顺时针光波的谐振频率,通过耦合器 C2 由探测器 PD2 检测,最终转化成电压信号输出。其中,光电探测器 PD1 和 PD2 输出信号通过模拟解调电路进行解调;数字锁频电路根据解调电路 LIA2 输出的解调信号实现激光器输出激光频率对顺时针光路谐

振点频率的跟踪锁定,LIA1 对逆时针的解调信号输出了角速度信号,包括幅度和方向。

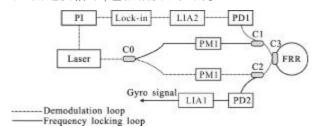


图 3 谐振式陀螺系统结构示意图

Fig.3 Schematic of resonator gyro system

2 系统实现方案

闭环锁频系统框图如图 4 所示,电路系统包括模拟解调电路、A/D 转换电路、数字 PI 算法、数字滤波和 D/A 转换电路。光电探测器输出信号为加载高频正弦波信号相位调制过的透射谱信号,经过模拟解调电路解调输出鉴频曲线,鉴频曲线通过 A/D 转换为数字量,传递给 FPGA。根据转换后的数字量,在 FPGA 内部构建数字 PI 算法对数据进行处理输出反馈修正量。修正量再通过数字低通滤波器,进行数字滤波后进入 D/A,最终转换为模拟量作为对激光器频率进行调节的反馈信号。

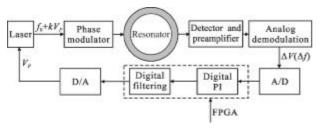


图 4 闭环锁频系统框图

Fig.4 Block diagram of closed loop frequency locking system

2.1 模拟锁相放大器模块设计

为了实现高品质微腔谐振频率的跟踪与锁定,需要获得用于谐振频率锁定的鉴频曲线。因此,必须对调制过的光信号进行解调处理。锁相放大器的核心是相关检测,相关检测使锁相放大器的信噪比提高了好几个数量级^[9],信号解调的方法采用锁相放大器(Lock-in Amplifier,LIA)对信号进行解调处理。利用模拟锁相放大器芯片 AD831 搭建模拟锁相放大器模块对调制信号频率为 900 kHz 幅值 V_{PP} 的正弦波信号进行相关检测,能够实现解调功能,模拟锁相放大器模块的结构如图 5 所示。

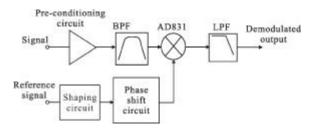


图 5 模拟锁相放大器结构框图

Fig.5 Block diagram of analog lock-in amplifier

根据 R-FOG 输出特点,信号微弱,频率高,所以选择的运算放大器需要有高增益带宽积和低噪声等特点。运算放大器 AD8032 具有 80 MHz 的-3 dB 带宽以及低噪声高速双运算放大器,集成度高。因此采用 AD8032 为前置放大电路的核心芯片。后级带通滤波器采用 2 阶巴特沃兹带通滤波器。整形电路将参考信号整形为占空比为 50%的同步方波,由于电路传输延时,后面添加了移相电路,调制参考信号相位与信号输入的同频分量信号保持很好的同相性。原始信号经过前置放大和带通滤波后与同步方波通过 AD831 进行乘法运算,最终滤掉高频分量,直流量输出就是解调信号输出。

2.2 模数转换电路

采用 AD7667 对模拟解调输出鉴频曲线进行模数转换。AD7667 为 16 位采样,满偏电压为 2.5 V,根据 AD 转换后的数据可由以下对应关系计算出输入信号的电压值。

$$\frac{65\,535}{2.5\,V} = \frac{16\,\dot{\Omega}\,\dot{\Omega}\,\dot{\Lambda}\,\dot{\Omega}\,\dot{M}\,\dot{R}}{U_{i}}$$
 (6)

AD 转换过程的时序图如图 6 所示。CONVST

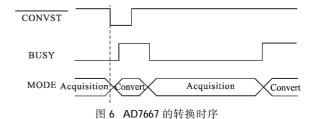


Fig.6 AD7667 conversion timing

为转换开始启动位,一旦启动转换在转换过程中就无 法终止或重新开始。当 BUSY 和信号都为低电平时, AD 处于数据获取阶段,同时自动启动一个新的转换 过程。保持低电平的时间内,AD7667 自动保持转换。

2.3 数字锁频算法设计

由于微分控制对干扰噪声敏感,使系统抑制干扰的能力降低,针对谐振式光纤陀螺系统的特性,文

中采用了 PI 控制器,即微分系数为 0 的 PID 控制器。相比于传统模拟电路克服了热漂移,有效抑制了 PI 反馈控制过程中的输出漂移[10]。

数字 PI 算法结构图如图 7 所示,包括比例和积分两个独立的部分。比例部分将模块输入信号乘以比例系数得到比例部分输出信号。比例项没有延迟,只要误差一出现,比例部分就会立即起作用,但是单纯的比例控制很难保证调节得恰到好处,完全消除误差。进而引入积分部分,积分控制相当于根据当时的误差值,周期性地微调,每次调节的增量值与当时的误差值成正比。因此,只要解调电路输出存在解调信号,反馈伺服将一直进行^[11],直到激光器频率锁定在顺时针光路的谐振频率上,达到环路平衡态,对应解调输出为 0 V。

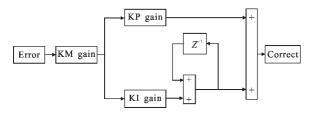


图 7 数字 PI 算法结构图

Fig.7 Digital PI algorithm structure diagram

2.4 数字滤波模块设计

由于激光器为 NKT Photonics 超窄线宽激光器, PZT 的电压控制端口的最高频率为 10 kHz, 所以数字 反馈控制信号频率需要小于 10 kHz, 故设计FIR 数字 低通滤波器,滤波系数可以利用 MATLAB 设计生成,通过利用 FDAFOOL 工具可以非常方便的设计出 FIR 数字低通滤波器的系数。文中利用 FDAFOOL工具设计的 FIR 低通滤波器的指标为:模拟信号采样频率 F_s=800 kHz,通带截止频率 F_c=10 kHz。

该电路的设计思路是:通过模拟锁相放大电路解调输出的陀螺信号,经 A/D 转换后,被送到FPGA 中进行 PI 算法,修正量进行数字滤波由于滤波过程有乘法和加法运算,输入的 16 位数字信号经过滤波后,FPGA 的输出 16 位信号仍为数字信号。经过滤波后的 16 位数字信号通过 D/A 转换后输出,作为最终的陀螺反馈到激光 PZT。

2.5 数模转换电路

为了实现锁频电路的高精度反馈输出,必须选用分辨率高的 DAC。AD768 具有 16 位分辨率,精度为 1/2¹⁶ ~ 0.002%,能够满足高精度的控制要求,并且有低干扰、直流精度高、支持的最大更新速率可以达

到 40MSPS 等优点。

由于 AD768 数模转换芯片为电流输出型,所以在后端运用 AD811 实现电流到电压的转换。当参考输出电压 REF_{OUT} 端接地时, AD768 处于电流输出模式, 输出电流 I_{OUTA} 与参考电流 I_{REFIN} 的关系式为:

I_{OUTA}=(DCODE/65536)×I_{REFIN}×4 (7) 式中:DCODE 是 16 位数字输入码,文中设计的 I_{REFIN} 为 5 mA, 输出电流经过运算差分放大器 AD811 缓冲放大后,电压与编码对应的关系为当 DCODE 编码范围由 0000~FFFF 对应得到的输出电压范围为-2.5~2.5 V。

数模转换模块作用接受 FPGA 通过 PI 算法后得到的修正量的编码,将数字量转换为幅值量输出,控制激光器的 PZT 端口相应的电压变化使输出激光频率改变,来跟踪锁定顺时针光纤谐振腔的谐振频率点。

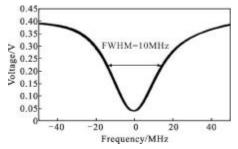
3 实验与讨论

按照图 3 所示搭建实验测试系统平台,其中,激光器 Laser 型号为 NKT 公司的 Basik Module E15 模块,中心波长为 1550 nm,线宽为 1 kHz,PZT 扫描系数 15 MHz/V;相位调制器采用 Thorlab 公司铌酸锂相位调制器;光电探测器为 Model2053 探测器,其增益、滤波可调,带宽为 10 MHz;调制信号频率为800 kHz,峰峰值为 4 V_{po} 。采用 LiNbO₃ 相位调制器PM1、PM2 对输入光源进行调制,调制带宽达10 GHz,半波电压为 4 V_{po} 。以顺时针方向为例,光纤环形谐振腔实测曲线如图 8 所示,图 8(a)为由 PD1 探测到的谐振谱线,图 8(b)为模拟锁相放大器 LIA2 输出的解调曲线。

分析数字滤波器的阶数对信噪比的影响, 信噪比的计算用 $p=(mean(y)^2)+var(y)$; 计算信号功率 p_x 和噪声功率 p_n ,那么信噪比为 $SNR=10*lg(p_x/p_n)$ 。分别采用不用阶数的 FIR 数字滤波器对数字 PI 算法的输出信号进行数字低通滤波, 其分别对应的信噪比如图 9 所示,在 FIR 数字滤波器设计中,除了要满足性能指标的滤波系数,还要尽可能减少和节约所需的硬件资源,最终采用 N=100。

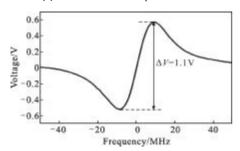
随着阶数的增加信噪比不断提高,但是 FPGA内部的资源有限,阶数不能无限大,由图 9 可知,当阶数 N>100 时,随阶数增加信噪比提高缓慢。

从图 10 可知, 当利用解调曲线进行锁频操作后,解调曲线被瞬间拉到 0V 左右摆动,即顺时针光



(a) PD1 透射谱曲线

(a) PD1 transmission spectrum curve



- (b) LIA2 的模拟解调输出曲线
- (b) LIA2 analog demodulation curve 图 8 光纤环形谐振腔测试

Fig.8 Test fiber ring resonator

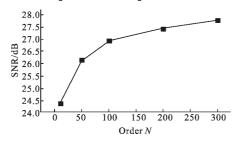


图 9 不同阶数的滤波器对应的信噪比

Fig.9 Filter corresponding SNR vs different orders

路的谐振频率处,并始终保持在最低点基本不变。实验证明,该锁频模块实现对激光器反馈控制和对谐振点跟踪锁定,将激光器频率始终锁定在谐振点处。在 10s时间里进行锁频实验,对零偏稳定性进行测试,测试鉴频曲线进行统计分析:精度为0.001 5 V,对应的频宽 $\Delta f = 2$ 488.63 Hz。零漂转换成转速为 $\omega = 2.15$ (°)/s。

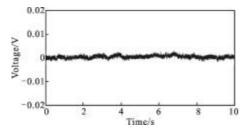


图 10 实验测得 10 s 的锁定过程

Fig.10 Experimentally measured 10 s locking process

4 结 论

文中介绍了谐振式光纤陀螺系统中的数字锁频与 模拟解调相结合的闭环锁频系统,概述了整个系统工 作原理,并对数字锁频闭环系统的几个重要部分进行 了分析介绍。实验结果证明,该数字锁频电路可以实现 对光纤谐振陀螺的顺时针光路的谐振频率进行跟踪锁 定的锁频要求。相比于单纯的模拟锁频电路能够克服 模拟电路带来的热漂移,使系统更加简单灵活,锁频速 度更快、精度更高和容易实现小型化。而模拟解调电路 可以避免使用高速 A/D 转换器和复杂数字解调算法 的研究开发,较容易实现,并且在高频解调环境下解调 效果更好,在实验中满足了锁频要求精度。

参考文献:

- [1] Chow W W, Gea Banaciloche J, Pedrotti L M. The ring laser gyro [J]. Rev Mod Phys, 1985, 57(1): 61-103.
- [2] Marvern A R. Progress towards fiber optic gyro production [C]//SPIE, 1991, 1585: 48-64.
- [3] Meyer R E, Ezekiel S, Stoweetal D W. Passive fiber optic ring resonator for rotation sensing[J]. Opt Lett, 1983, 8(12): 644-646.
- [4] Neil Barbour, George Schmidt. Inertial sensor technology trends [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.
- [5] Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun, et al. Research on signal detection method of resonator fiber optical gyro [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(8): 1001-1005. (in Chinese)
- [6] Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, et al. Frequency tracking and locking methods in resonator microoptic gyro [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38 (9): 0905003 -1 -0905003 -5. (in Chinese)
- [7] Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun, et al. Resonator fiber optic gyro phase modulation spectroscopy analysis [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(11): 1529-1533. (in Chinese)
- [8] Xu Pengfei, Zhang Jianhui, Meng Xiangran, et al. Characteristics of fiber ring resonator dynamic response[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 599-604. (in Chinese)
- [9] Zeng Qingyong. Weak Signal Detection [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994. (in Chinese)
- [10] Li Shengkun, Zheng Yongqiu, An Panlong, et al. T-type feedback network applied in resonance frequency locking of resonator fiber optic gyro [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1162-1166. (in Chinese)
- [11] Yang Xuefeng, Zheng Yangming, Ma Huilian, et al. Loop frequency locking technique in resonator fiber optic gyro [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20 (5): 990-993. (in Chinese)