

doi:10.3788/gzxb20144312.1214002

高 Q 光纤环谐振腔陀螺角速度传感研究

闫树斌^{1,2}, 安盼龙^{1,3}, 郑永秋^{1,2}, 李小枫^{1,2}, 赵瑞娟³,
张成飞², 薛晨阳^{1,2}, 刘俊^{1,2}

(1 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(2 中北大学 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

(3 中北大学 理学院, 太原 030051)

摘 要:模拟仿真了谐振式光纤环腔的透射谱线以及鉴频曲线, 得透射谱线最低谷值对应为调制谐振点, 鉴频曲线的线性区为陀螺的工作范围区, 线性区中点对应谐振点, 可作为标度因数最大值. 为了实现谐振点的高精度锁频和稳频, 设计了谐振式光纤陀螺角速率测定方案, 使用比例积分反馈电路实施锁频, 利用正弦波扫描窄线宽激光器(线宽小于 1 kHz)的压电转化模块, 使激光器谐振腔长发生变化, 从而改变其输出频率, 对谐振光纤环腔随外界环境变化同时进行跟踪和锁定. 利用线宽法测试并计算出光纤环形谐振腔的品质因数值为 10^7 , 对比分析了光纤环腔在谐振点和非谐振点锁定情况下的光电探测实时输出, 并通过转动测试, 得到两种情况下锁定后陀螺的连续转动效果. 计算了光纤陀螺系统理论检测灵敏度, 结果表明: 谐振点锁定后转动效果对应的陀螺输出电平值为锁定非谐振点转速电平的 3 倍, 验证了谐振式光学陀螺谐振点锁频的重要性.

关键词:谐振式光学陀螺; 阶梯效应; 锁频; 谐振点; 非谐振点

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1214002-6

High-Q Optical Ring Resonator Gyro Angular Rate Sensor

YAN Shu-bin^{1,2}, AN Pan-long^{1,3}, ZHENG Yong-qiu^{1,2}, LI Xiao-feng^{1,2}, ZHAO Rui-juan³,
ZHANG Cheng-fei², XUE Chen-yang^{1,2}, LIU Jun^{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, North University of China,
Taiyuan 030051, China)

(3 School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The transmission spectrum and demodulation curve of the fiber ring resonator were simulated. As can be seen, the lowest value of transmission spectrum was corresponding to the modulation resonance point, the linear zone of demodulation curve was the dynamic range of gyroscope, the midpoint of the linear region was corresponds to the resonance point and it could be used as the maximum of scale factor. In order to achieve the high accuracy and steady frequency locked of the resonance point, resonant gyroscope angular velocity measurement scheme was designed, which used proportional integral circuit to lock the resonant frequency and sine wave to scan the piezoelectric transducer of narrow linewidth laser (linewidth is less than 1 kHz), so that the length of laser resonant cavity was changed to adapt the changes of the fiber ring resonator which real-time tracked and locked with the external environment.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61275166, 61178058)、国家自然科学基金杰出青年基金(No. 51225504)、国家自然科学基金重大项目(No. 91123036)和山西省自然科学基金(No. 2010011003-2)资助

第一作者: 闫树斌(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为微纳米技术及微纳米传感器件中的光学问题. Email: shubin-yan@nuc.edu.cn

收稿日期: 2014-03-24; 录用日期: 2014-07-11

<http://www.photon.ac.cn>

Through the method of linewidth, calculated quickly that the quality value of fiber ring resonator was 10^7 . The real-time output of the fiber ring cavity in resonant and non-resonant points frequency locked were compared and analyzed, the continuous rotation in the two kinds condition was obtained by rotation test. The detection sensitivity of fiber optic gyro system in the theory was calculated finally. The results show that the output level of the gyro value in the resonant point is 3 times than the non-resonant point, which proves the importance of the resonator fiber optic gyroscope resonant frequency locking.

Key words: Resonant optical gyroscope; Ladder effect; Locked; Resonance point; Non-resonant point

OCIS Codes: 140.3370; 040.5160; 060.2390; 060.2800; 120.4640

0 引言

陀螺仪是惯性系统的核心部件,利用它可以测知运动载体相对惯性空间的角运动情况,对惯性系统的性能起着重要的作用.目前,陀螺的小型化、集成化、低功耗和高灵敏度研究成为普遍关注的焦点问题^[1-2].谐振式光纤陀螺(Resonator Fiber Optic Gyro, RFOG)具有高精度、集成化和小型化等优点,引起了广泛关注,有望成为新一代光学惯性器件.谐振式陀螺基于光学 Sagnac 原理,精确检测由于旋转顺时针引起的谐振频差^[3].1977年 S. Ezekiel 和 S. k. Balsmo 首次提出谐振式光纤陀螺模型^[4],引起惯性技术发达国家的重视并不断改进结构设计并进行光电噪声的抑制.1983年, R. E. Meyer 和 S. Ezekiel 首次实现了 3.1 m 长单模光纤组成光纤环型谐振腔的光纤陀螺,讨论并分析了产生噪声因素和抑制措施,实现了 $0.5^\circ/\text{h}$ 的零漂^[5].1988年美国 Honeywell 公司提出了采用保偏光纤基于 LiNbO₃ 相位调制器的谐振式光纤陀螺检测方案^[6].1990年 K. Hotate 研究小组提出了利用抑制载波的方法来减小背散射的噪声并于 1997 年又提出基于数字锯齿波相位调制的全数字闭环检测陀螺系统^[7-8].鉴于谐振式陀螺系统的复杂性,其结构和性能现在还未达到工程化水平,目前样机零漂可以达到 $0.4^\circ/\text{h}$ ^[9].国内对于 RFOG 的研究报道的最好结果为零偏稳定性 $28^\circ/\text{h}$ ^[10],且转台在谐振腔锁频状态下连续旋转的实现并未见相关报道.对于谐振式陀螺来讲,其核心敏感单元环形谐振腔易受外界环境和自身因素的影响,锁频后长时间稳频比较困难,数据处理一般需要分阶段重新锁频并转动采集进行统计.

本文设计的陀螺信号检测系统,从光纤环腔的透射谱和解调原理入手,实现谐振式光纤环腔陀螺阶梯效应的连续转动测试与锁频状态下长时间稳频.研究了光学陀螺在谐振点和非谐振点两种锁定情况下陀螺转动输出的不同效果,通过实验直观深入地比较了两者的不同之处.

1 环形谐振腔光传输基本原理

图 1 给出了谐振式光纤陀螺的核心敏感部件环

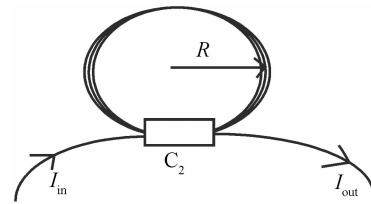


图 1 核心敏感单元光纤环腔

Fig. 1 Core unit of fiber ring resonance

谐振腔简图.光纤环形腔的半径为 R ,窄线宽激光器发出激光从输入端 I_{in} 输入,经过光纤耦合器 C_2 ,一路送入环形腔进行多次循环并在腔内形成谐振;另一路经过输出端口直接输出.所以总的输出端口 I_{out} 光强为从谐振腔内经过多次谐振透射出的光强与直接输出光强的叠加^[11-13].光纤环腔的透射谱函数可采用洛伦兹函数来近似表示,光纤环形谐振腔的传递函数为^[14]

$$T(\Delta f) = (1 - \alpha_c) \left\{ 1 - \rho(1 - M)^2 / [(1 - M)^2 + 4M \sin^2(\pi \cdot \Delta f / \text{FSR})] \right\} \quad (1)$$

式中, $\Delta f = f_0 - f_R$, 为激光输出光波中心频率 f_0 与光纤环形谐振腔谐振频率 f_R 之差, FSR 为光纤环形谐振腔的自由谱宽(Free Spectral Range, FSR),其它参数设置为

$$\begin{cases} \rho_K = 1 - \frac{(U - UM - R)^2}{(1 - \alpha_c)(1 - M)^2} \\ U_K = \sqrt{1 - k_c} \sqrt{1 - \alpha_c} \\ R_K = k_c(1 - \alpha_c) \sqrt{1 - \alpha_L} \\ M = \sqrt{1 - \alpha_L} \sqrt{1 - k_c} \sqrt{1 - \alpha_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_c 和 α_c 分别为光纤定向耦合器的耦合系数和损耗系数; α_L 为光纤环形谐振腔内激光传输一次的损耗系数; ρ_K 可认为一传输参数; U 为输入光场 E_{in} 直接耦合到输出光场 E_{out} 的传输系数; R_K 为输入光场 E_{in} 耦合到环腔内并传输一周后耦合到输出光场 E_{out} 的传输系数; M 表示谐振腔内光场绕环腔传输一周的传播系数.

对激光器实行反馈技术来锁定环腔受外界环境的波动变化^[15-17].由于反馈信号利用的是传输函数的一次谐波分量,对式(1)求导可得解调信号.光纤环形谐振腔的传输谱线及其一次谐波解调曲线仿真如图 2.图 2 中光纤环形腔传输谱线和相应的解调曲线在一定谐振频率差范围内保持线性变化关系,该线性区就是谐振式光纤陀螺的线性工作区间.实验系统将该解调

曲线作为扫描激光器压电转化模块 (Piezoelectric Transducer, PZT) 的误差信号输入给比例积分 (Proportional Integral, PI) 反馈控制电路,来进行谐振频率的跟踪和锁定。

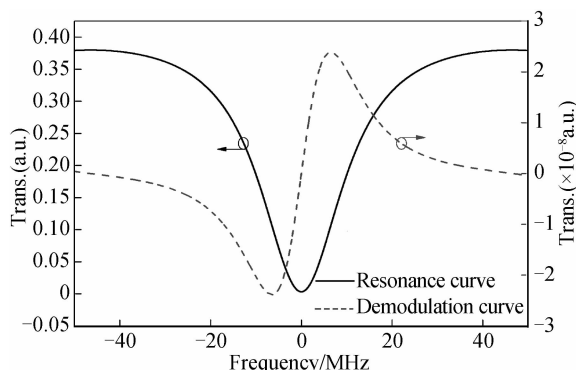


图 2 光纤环形谐振腔的仿真曲线
Fig. 2 Simulated curves of FRR

2 系统平台设计与搭建

实验系统如图 3,激光器采用丹麦 NKT Photonics 公司 1 550 nm 窄线宽半导体光纤激光器(线宽小于 1 kHz),相位调制器型号为 Thorlabs 公司 LN65S,带宽 10 GHz. 光纤环形谐振腔放置于泡沫盒中隔热,光纤环由保偏光纤耦合器与保偏光纤组成,耦合分光比为 50 : 50,偏振消光比 20 dB、光纤环腔直径 D 为 15 cm,锁相放大器(Lock-In Amplifier, LIA)采用斯坦福 SR844 带宽为(25 kHz~200 MHz)数字锁相放大器,在锁频环路中对相位调制器(Phase Modulator, PM)采用正弦波调制^[18-19]可以克服三角波调制中的瞬态响应以及锯齿波调制中存在复位脉冲的影响^[20],其调制电压为 4 V,调制频率为 900 kHz. 具体过程为,窄线宽激光器发出激光经过 LiNbO₃ 相位调制器再进入光纤环,从环腔出来的光经过光电探测器分为两路,一路送入示波器用来观测透射谱,另一路送到锁相放大器的信号输入端,频率为 900 kHz,电压为 2 V 的相位调制器使用信号发生器对激光载波进行调制,并把其同步方波信号送至锁相放大器作为参考信号,锁相放大器输出端接 PI 锁频电路,最后利用另一频率为

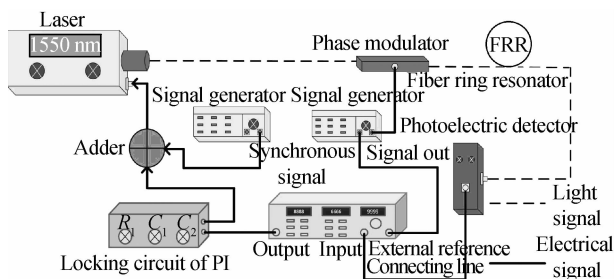


图 3 高 Q 光学微腔角速度传感系统
Fig. 3 Schematic diagram of high Q Fiber ring resonator angular rate sensing system

20 Hz、电压为 1 V 的信号发生器和 PI 的输出接加法器(起选通的作用)把反馈信号输出至激光器 PZT。

3 实验测试

光纤环腔的谐振透射谱及与之对应的谐振谱线的解调曲线如图 4,该解调曲线在谐振频率点处幅值为零,随着谐振频率的偏离,解调曲线在一定谐振频率差范围内保持线性变化。

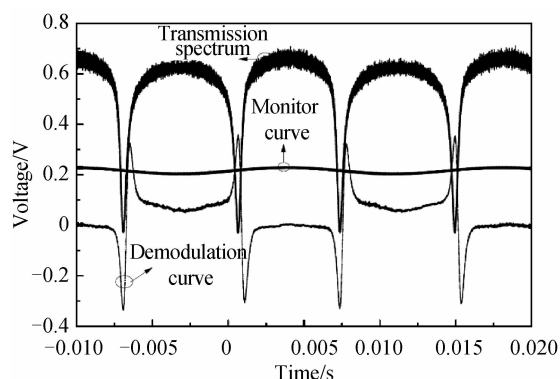


图 4 光纤环腔透射谱及鉴频实测曲线
Fig. 4 Transmission spectrum and discriminator curve of fiber ring resonator

实验系统将解调曲线作为扫描激光器 PZT 的误差信号 V_{error} 输入给 PI 反馈控制电路,来进行谐振频率的跟踪和锁定,锁频精度为 600 kHz. 当输入光源的频率开始进入谐振谷时,由于产生的误差信号经 PI 反馈控制电路后改变 PZT 扫描电压,使这种误差信号减小,只要有误差信号,反馈控制作用就一直进行,最终使得误差信号为零,此时光源频率也被牢牢锁定在谐振频率点处. 当光纤环腔谐振频率随外界环境影响漂移时,扫描激光器 PZT 的电压跟踪其变化,通过测量该电压的变化可以得到谐振频率的变化量,从而评估外界环境参数的变化量。

3.1 谐振光纤环腔 Q 值测定

经测试光纤环腔透射谱半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)对应的扫描时间 $\Delta t = 592.0 \mu s$,信号发生器加在 PI 扫描频率 f 为 70 Hz,扫描电压 V 为 1 V,示波器显示的经由高压放大器输出监控电压峰峰值为 $V_{pp} = 27.53 \text{ mV}$,输出除以 100,激光器 PZT 对应的扫频参数为 15 M/V,可由线宽法计算其 Q 值,即

$$\Delta t / (f \times 2)^{-1} = \Delta \nu / V \times 15 \text{ MHz/V}$$

代入数据有 $\Delta \nu = 3.4225 \times 10^6 \text{ Hz}$,则 Q 值为

$$Q = \frac{\nu}{\Delta \nu} = \frac{193 \times 10^{12}}{3.4225 \times 10^6} = 5.64 \times 10^7 \quad (3)$$

或由示波器直接读出透射谱左右半高全宽两点位置光标所对应的两点扫频正弦波的电压差为 $\Delta \nu = 2.266 \text{ mV}$,即可快速求得 Q

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{193 \times 10^{12}}{2.266 \times 10^{-3} \times 15 \times 10^6 \times 100} = 5.68 \times 10^7 \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以看出使用两种测线宽方法求得的Q值相同,说明光纤环腔的Q值很大,可达到 10^7 .

3.2 光纤环腔连续转动台阶效应及拟合

图5给出了锁定谐振点的示意图及示波器锁频前和锁频后的光电探测传输至示波器的图像显示,可以看到,锁定后透射谱的谷底被稳稳拉成一条直线,证明谐振点锁定成功.

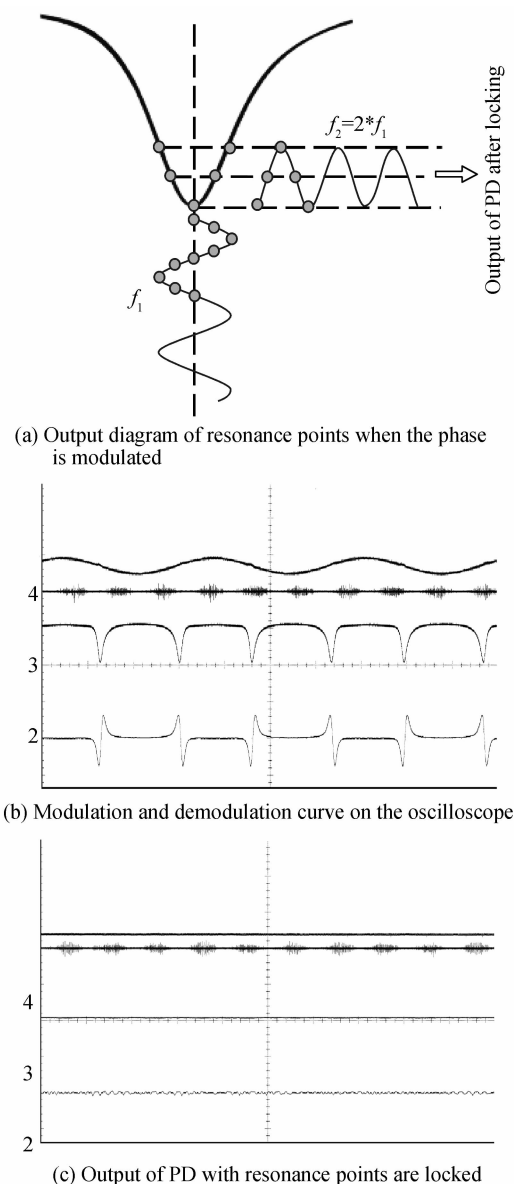


图5 谐振点正弦波调制输出示意及锁定后光电探测输出实测

Fig. 5 Schematic diagram of signal output modulated sine wave and the outputs of photoelectric detection with resonator points are locked

图6给出了锁定非谐振点的示意图及示波器锁频前和锁频后的光电探测传输至示波器的图像显示.可

以看到,锁频后透射谱并没有在谷底成为一条直线,而是锁在了谱线的半腰上,此时并没有锁在透射谱线的谐振点上.

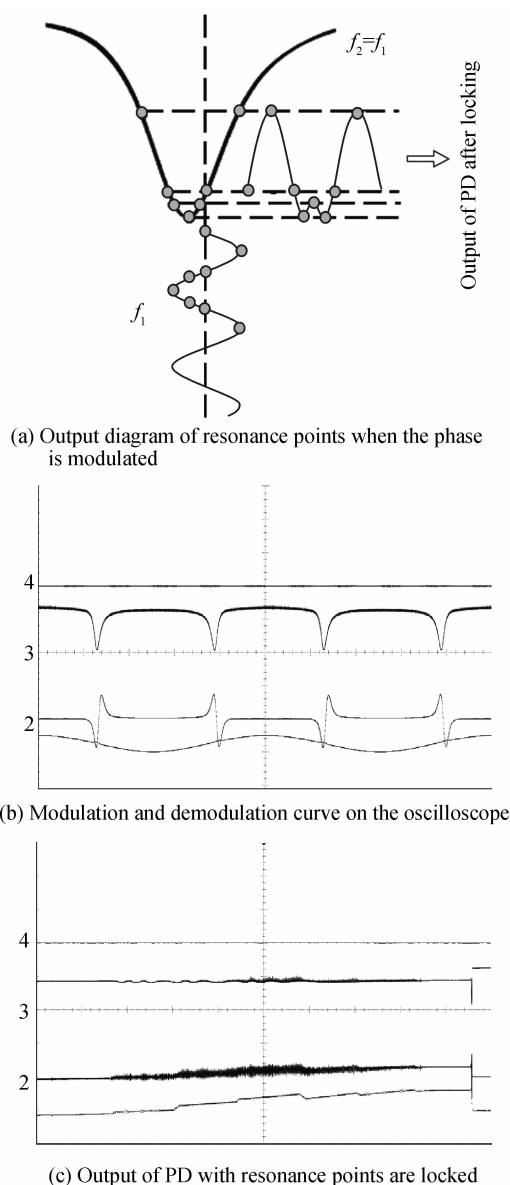


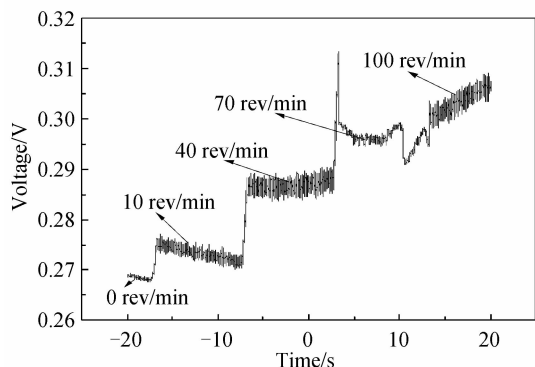
图6 非谐振点正弦波调制输出示意及锁定后光电探测输出实测

Fig. 6 Schematic diagram of signal output modulated sine wave and the outputs of photoelectric detection with non-resonator points are locked

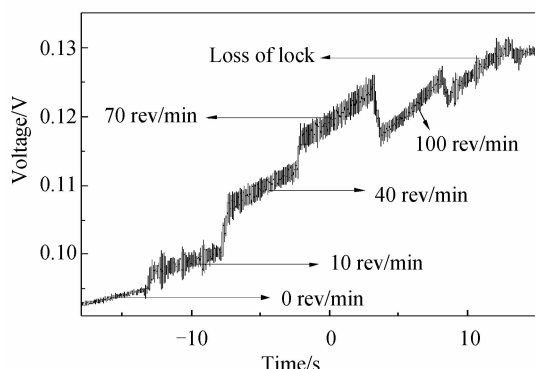
使用精密单轴光学平台实现过程设计语言(Procedure Design Language, PDL)编程连续转动. 设定程序分别以 10 rev/min, 40 rev/min, 70 rev/min, 100 rev/min 四种不同的速度连续转动平台进行测试, 得到谐振点锁定和非谐振点锁定的两组数据.

从图7中可以看出陀螺台阶效应比较明显,能清楚分辨出不同转速所对应不同的解调输出高低电平,当转速较高的时候,由于所用旋转关节标定最大转速为 50 rev/min,因此数据最后阶段有所偏差,但整体趋

势阶梯效果明显.



(a) Continuous rotation curve after locking resonant point



(b) Continuous rotation curve after locking non-resonant point

图 7 单轴谐振光纤陀螺转动台阶效应

Fig. 7 Rotation step effect of uniaxial resonator fiber optic gyro

3.3 台阶效应拟合与标定

表 1 和表 2 分别给出了锁定谐振点和非谐振点两种情况下,陀螺转动不同转速下对应的鉴频信号数据选点并取平均值.

表 1 锁定谐振点转动台阶效应区域数据选点均值

Table 1 The average data points of Rotating stair effect regional level with the resonance points are locked

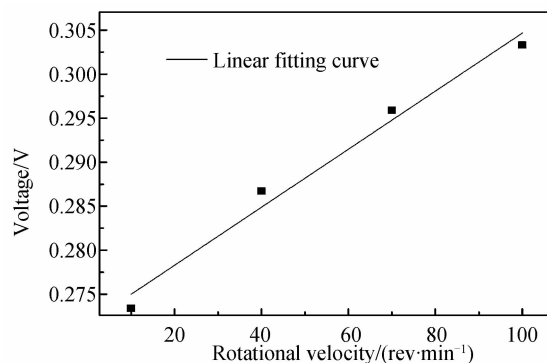
Rotational speed/ (rev · min ⁻¹)	10	40	70	100
Voltage/V	0.273 4	0.286 7	0.295 9	0.303 31

表 2 锁定非谐振点转动台阶效应区域数据选点均值

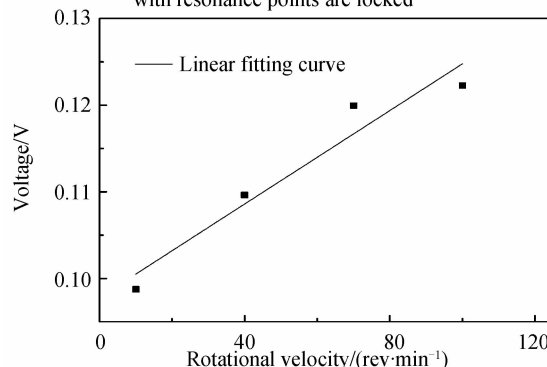
Table 2 The average data points of rotating stair effect regional level with the non-resonant points are locked

Rotational speed/ (rev · min ⁻¹)	10	40	70	100
Voltage/V	0.098 73	0.109 62	0.119 96	0.122 26

图 8 分别给出了锁定谐振点与非谐振点后,转动台阶效果的线性拟合曲线.由于转速设置的间距比较大,采样有效点较少,但可以看出不影响其整体线性趋势.



(a) Linear fitting curve when the turntable is rotating with resonance points are locked



(b) Linear fitting curve when the turntable is rotating with non-resonance points are locked

图 8 锁定谐振点和非谐振点连续转动电压和转速线性拟合关系

Fig. 8 The curves of voltage and speed linear fitting with Locking resonant and non-resonant points respectively when rotate the turntable continuously

谐振点直线拟合

$$V_{out} = 3.29737 \times 10^{-4} \omega + 0.271 69 \quad (5)$$

非谐振点直线拟合

$$V_{out} = 2.69746 \times 10^{-4} \omega + 0.097 81 \quad (6)$$

式中 V_{out} 为陀螺角速度监控电压曲线, ω 为转速,单位为 $\text{rev} \cdot \text{min}^{-1}$. 可以看出,窄线宽激光器的输出频率由 PI 电路实时跟踪锁定在谐振点上,输出电平要比在非谐振点锁定的电平高出近 3 倍.

表 3 中 B 为传感器带宽, η_{pd} 为光电探测器的量子效率, P_{pd} 为光电探测器的输入功率, h 为普朗克常量 $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $\hbar = h/2\pi$, ρ 为谐振深度, F 为精细度, FWHM 为透射谱半高全宽, f_{FSR} 为自由谱宽, N 为光纤环匝数.

表 3 测试计算用参数列表

Table 3 Tests and calculations with a parameter list

D/m	L/m	B/Hz	P_{pd}/mW	η
0.15	2	1	1	0.82
N	f_{FSR}/Hz	FWHM/Hz	ρ	F
4	2.856×10^8	24×10^6	0.919 8	11.875

如果不考虑光噪声如背散射、光克尔、偏振噪声和电噪声如光电探测器的等效输入噪声、锁相放大器的等效输入噪声以及各模拟器件等效噪声的影响,理论上受限光电探测器散热噪声的检测灵敏度为^[21-22]

$$\delta\Omega = \frac{\sqrt{2}c}{QDN} \sqrt{\frac{B\hbar\nu_0}{\eta_{pd}P_{pd}}} \left(\frac{3600 \times 180}{\pi} \right)^\circ/h \quad (7)$$

代入数据可得: $\delta\Omega = 0.0003^\circ/h$.

4 结论

设计了谐振式光学陀螺转动测试系统,使窄线宽激光器频率实时跟踪随外界因素不断变化的光纤环腔.分别使用PI反馈电路对谐振式光纤环谐振点和非谐振点进行频率锁定,利用PDL编程,连续转动精密光学运动平台,实现谐振式光纤陀螺锁频状态下的连续转动,得到陀螺的输出电压与转动角速率的线性关系,可得锁定谐振点和锁定非谐振点效果相差3倍.通过理论计算此陀螺系统的极限灵敏度为 $0.0003^\circ/h$,但研究过程中涉及到陀螺所用的锁频精度以及光学噪声等一系列问题将会在以后的研究中克服.本文为谐振式光学陀螺的下一步小型化、集成化提供实验支持.

参考文献

- [1] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2001, **1**(4): 322-339.
- [2] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [3] GUSTAVSON T L, LANDRAGIN A, KASEVICH M A. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2000, **17**(12): 2385-2398.
- [4] EZEKIEL S, BALSAMOL S R. Passive ring resonator laser gyroscope[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, **30**(9): 478-480.
- [5] MEYER R E, EZEKIEL S. Passive fiber optic ring resonator for rotation sensing[J]. *Optics Letters*, 1983, **8**(12): 644-646.
- [6] SANDERS G A, ROUSE G F, STRANDJORD L K, et al. Resonator fiber optic gyro using LiNbO₃ integrated optics at 1.5 μm wavelength[C]. SPIE, 1988, **985**: 202-210.
- [7] HOTATE K, TAKIGUCHI K, HIROSE A. Adjustment free method to eliminate the noise induced by the back scattering in an optical passive ring resonator gyro [J]. *Photonics Technology Letters*, 1990, **2**(1): 75-77.
- [8] HOTATE K, HARUMOTO M. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(3): 466-473.
- [9] 彭博. 基于FPGA的谐振式光纤陀螺数字系统设计和实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 1-6.
- [10] 杨志怀. 谐振式光纤陀螺光学噪声分析与信号检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 1-9.
- [11] TANG Quan-an, MA Xin-yu. Experimental study on fiber ring resonator in resonator fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, **27**(4): 33-36. 汤全安, 马新宇. 谐振式光纤陀螺中环谐振腔的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 1998, **27**(4): 33-36.
- [12] XU Peng-fei, ZHANG Jian-hui, MENG Xiang-ran, et al. Characteristics of fiber ring resonator dynamic response [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(3): 599-604. 徐鹏飞, 张建辉, 孟祥然, 等. 光纤腔动态谐振响应特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(3): 599-604.
- [13] YAO Qiong, SONG Zhang-qi, XIE Yuan-ping, et al. Study on the characteristics of fiber optic resonator ring for resonator fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 676-680. 姚琼, 宋章启, 谢元平, 等. 谐振腔光纤陀螺光纤谐振环特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 676-680.
- [14] WANG K, FENG L, WANG J, et al. Alternative method for design and optimization of the ring resonator used in micro-optic gyro[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(7): 1481-1486.
- [15] HONG L, ZHANG C, FENG L, et al. Frequency tracking and locking method used in resonator micro-optic gyro[J]. *Sensor Letters*, 2012, **10**(1-2): 14-17.
- [16] SWAIM J D, KNITTEL J, BOWEN W P. Detection of nanoparticles with a frequency locked whispering gallery mode micro-resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(18): 183106.
- [17] HONG Ling-fei, ZHANG Chun-xi, FENG Li-shuang, et al. Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, **38**(9): 103-107. 洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 103-107.
- [18] YING D Q, MA H L, JIN Z G. Dynamic characteristics of R-FOG based on the triangle wave phase modulation technique [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(21): 5340-5343.
- [19] LI Jian, WU Ling-an. Phase modulation locked optical resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1641-1645. 李健, 吴令安. 相位调制锁定光学谐振腔[J]. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1641-1645.
- [20] YAO Qiong, HU Yong-ming, XIE Yuan-ping, et al. Study on the influence of phase reset error on resonator fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 851-855. 姚琼, 胡永明, 谢元平, 等. 谐振腔光纤陀螺相位调制复位误差影响的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 851-855.
- [21] CIMINELLI C, DELL'OLIO F, CAMPANELLA C E, et al. Photonic technologies for angular velocity sensing [J]. *Advances in Optics and Photonics*. 2010, **2**(3): 370-404.
- [22] FRANCESCO D, CATERINA C. Theoretical investigation of indium phosphide buried ring resonators for new angular velocity sensors[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(2): 1-7.