

# 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研究

雷明\*, 于怀勇, 方圆, 吴衍记, 冯喆, 张丽哲

北京自动化控制设备研究所惯性技术国家重点实验室, 北京 100074

**摘要** 针对目前谐振式光纤陀螺中存在的跟踪失锁问题开展研究, 分析了频率跟踪失锁原因及机理, 研究表明频率跟踪同步过程中的电流变化以及背向散射、偏振耦合等非互易性噪声引起的谐振峰对称性改变是导致尖峰脉冲和零偏变化的主要原因; 随后, 提出了基于半导体激光器温度闭环反馈的失锁控制方案, 通过温度闭环实现激光器中心频率对光纤谐振腔单个谐振频率的长期跟踪同步, 消除频率跟踪失锁引入的陀螺输出误差; 对失锁控制总体技术方案、信号处理流程及实现方法进行了详细叙述; 最后, 成功搭建陀螺原理样机, 对采用频率跟踪失锁方案前后的陀螺静态性能进行实验测试, 测试表明频率跟踪失锁控制方案将陀螺输出脉冲幅值突变量从 3000 (°)/h 降低到 200 (°)/h, 陀螺输出零偏变化从 600 (°)/h 降低到 0, 完全消除了频率二次锁定过程中的零位变化, 陀螺精度大幅降低到 4.9 (°)/h (100 s 平滑积分时间)。

**关键词** 光纤光学; 光纤光学传感器; 谐振式光纤陀螺; 跟踪同步; 频率失锁; 温度闭环

中图分类号 TN253; V241.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0106002

## Out-of-Lock Frequency-Tracking Control of Resonant Fiber-Optic Gyro

Lei Ming\*, Yu Huaiyong, Fang Yuan, Wu Yanji, Feng Zhe, Zhang Lizhe

National Key Laboratory of Inertial Technology, Beijing Institute of Automatic Control Equipment,  
Beijing 100074, China

**Abstract** Herein, we study the out-of-lock frequency-tracking problem in a resonant fiber-optic gyro (RFOG). First, we analyze the reason and mechanism of out-of-lock frequency tracking, and find that the change of the current in frequency-tracking synchronization and the symmetry change caused by non-reciprocal noises, such as backscatter and polarization coupling, are the main reasons for the peak pulse and zero-bias change, respectively. Second, we propose a scheme for out-of-lock frequency-tracking control of the RFOG based on temperature closed-loop feedback of the semiconductor laser. The long-term tracking synchronization of the laser central frequency with the fiber resonator's single-resonant frequency can be realized by temperature closed-loop control; thus, the gyro output error caused by out-of-lock frequency tracking is eliminated. The overall technical scheme, signal processing flow, and implementation method of out-of-lock control are described in detail. Finally, we construct a successful RFOG prototype and test the static performance of the RFOG both before and after implementing the out-of-lock control. The test results show that this out-of-lock frequency-tracking control scheme can reduce the output pulse amplitude mutation of the RFOG from 3000 (°)/h to 200 (°)/h and the output zero-bias change of the RFOG from 600 (°)/h to 0 (°)/h, which completely eliminates the zero-position change in the frequency secondary locking process; consequently, the gyro precision is significantly reduced to 4.9 (°)/h (for 100-s smooth integration time).

**Key words** fiber optics; fiber optics sensors; resonant fiber-optic gyro; tracking synchronization; out-of-lock frequency; temperature closed-loop

**OCIS codes** 060.2370; 060.2310; 060.2800; 140.4780

## 1 引言

随着导航定位系统的广泛应用和航天、航空高新技术的快速发展, 高精度、小型化光纤陀螺惯性器

件已经成为我国重大科技计划中的重要研究方向。随着光纤陀螺技术逐渐取得突破性进展, 其逐步向小型化、集成化和多元化方向发展<sup>[1-3]</sup>。基于谐振频差检测原理的谐振式光纤陀螺(RFOG)采用几米光

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-08-20; 录用日期: 2019-09-06

\* E-mail: 15210985670@163.com

纤甚至厘米级光波导,就能达到导航级精度,因此具有高精度、小型化的技术优势。此外,谐振式光纤陀螺采用的光纤很短,能够很好地解决由传感环圈温度特性引入的陀螺漂移问题,具有温度适应性好的特点<sup>[4-5]</sup>。综上所述,谐振式光纤陀螺具有广阔的应用前景,目前已经成为新一代惯性传感器的前沿研究热点。

为提升陀螺性能,目前各研究机构主要是对谐振式光纤陀螺的噪声问题进行研究,主要包括偏振噪声<sup>[6]</sup>、背散噪声<sup>[7]</sup>、Kerr 噪声<sup>[8]</sup>以及激光器频率噪声<sup>[9]</sup>等。由于谐振式光纤陀螺的稳定工作是以激光器中心频率对谐振腔谐振频率的稳定跟踪锁定作为前提条件,激光器频率与谐振腔谐振频率无法同步稳定跟踪,会严重影响陀螺稳定输出,因此频率跟踪失锁问题是谐振式光纤陀螺研制过程中的重难点问题。

为实现谐振式光纤陀螺的小型化,需要采用小型化窄线宽半导体激光器作为系统光源,通过驱动电流调谐实现激光器中心频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定。驱动电流调谐将会引起激光器输出光强变化,在陀螺输出上产生伴幅强度调制。针对伴幅强度调制,Lei 等<sup>[10]</sup>提出采用数字电路相减方式消除驱动电流引起的陀螺输出误差,但受限于信号检测电路的输出电压范围和激光器正常工作电流范围,需要进行驱动电流复位,复位过程中陀螺输出变化较复杂,通过简单的相减方式已经无法有效抑制伴幅强度调制效应。浙江大学的 Ying 等<sup>[11]</sup>在基于正弦波调制解调的陀螺信号检测中通过对正弦波频率的二次谐波进行解调,补偿陀螺输出,明显降低了

调谐电流复位引起的陀螺输出跳变,取得了明显的陀螺失锁控制效果,但是该方案并不适用于基于三角波调制解调的谐振式光纤陀螺中。

本文针对目前谐振式光纤陀螺中存在的跟踪失锁问题开展研究,首先分析了频率跟踪失锁原因及机理;提出了基于半导体激光器温度闭环反馈的失锁控制方案,消除频率跟踪失锁引入的陀螺输出误差;对失锁控制总体技术方案、信号处理流程及实现方法进行了详细的叙述;最后搭建了陀螺原理样机,对采用频率跟踪失锁方案前后的陀螺静态性能进行了实验测试,测试表明该失锁控制方案可显著降低频率二次锁定过程中的零位变化,提升陀螺精度。

## 2 频率跟踪失锁现象及机理分析

谐振式光纤陀螺系统结构如图 1 所示,从半导体激光器 SL 发出的激光经光学隔离器 ISO 实现单向光传输,经起偏器起偏后进入多功能集成光学调制器,经 Y 波导分光形成两束功率相等的线偏光,然后通过耦合器 C1 耦合进入光纤环形谐振腔 (FRR),两束光在谐振腔中分别沿顺时针 (CW) 和逆时针 (CCW) 方向传输。在 FRR 中传输不同圈数的各光束出射后,在 C2 的两个出射端口形成多光束干涉,经两个光隔离器 (ISO) 后分别到达光电探测器 PD1 和 PD2,将光强信号转化为电信号并输入到数字闭环处理电路 (DCP) 中。根据 CW 光路电信号,通过驱动控制电路 (DCC) 反馈控制激光器的驱动电流和温度,实现激光器出射光频率对 CW 光路谐振频率的跟踪同步锁定,而 CCW 光路电信号经电路信号处理后通过端口实现角速度输出。

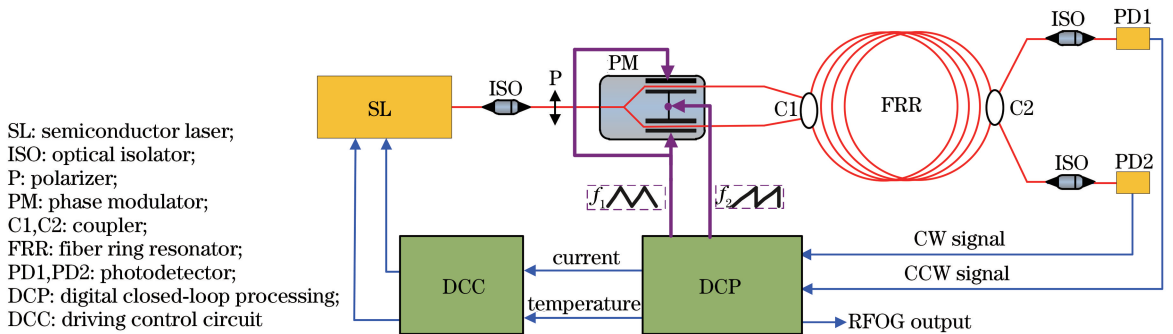


图 1 谐振式光纤陀螺系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of RFOG system

通过对激光器的中心频率进行调谐,实现激光器频率对 FRR 谐振频率的跟踪锁定是谐振式光纤陀螺稳定工作的前提条件。窄线宽半导体激光器的频率调谐方式有两种:驱动电流调谐方式和管芯温

度调谐方式,FRR 的温度系数在 GHz/°C 量级,而激光器驱动电流的调谐系数通常为几十 MHz/mA,管芯温度的调谐系数在 GHz/°C 量级,由于激光器的温度调谐响应慢,在控制上严重滞后于因温度引起

的谐振腔快速频率变化,而驱动电流的调谐带宽高达20 kHz,可以满足频率快速调谐需求,目前各研究机构通常采用激光器驱动电流调谐方式实现频率跟踪锁定<sup>[12-14]</sup>,而采用驱动电流闭环反馈调谐时其调谐范围有限,驱动电流必然存在复位,复位过程中激光器输出光功率变化较大。图2给出了扫频过程的谐振信号变化情况,从图中可见:随着扫频电压的增大,驱动电流逐渐增大,激光器实现了线性扫频控制。在此过程中,从探测器端观察到了谐振峰信号。进一步分析发现扫频过程中谐振峰信号的最高电压值发生了明显的改变,其最大电压变化量高达630 mV,而且并不是随着扫频电压的变化而逐渐增大或减小,其变化无明显规律性。

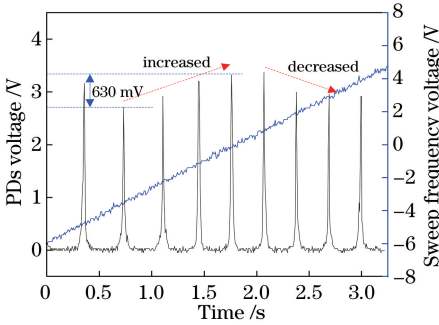


图2 扫频过程中谐振信号变化

Fig. 2 Change of resonant signal in frequency sweep process

多个谐振信号存在显著差异,主要表现为光强的变化和对称度的差异。从对谐振传递函数和影响对称度的关键因素出发,得到了导致谐振峰信号差异的主要原因包括两个方面:1)驱动电流线性扫频过程中激光器输出光功率变化引起入腔光强变化,从而导致谐振信号峰峰值整体抬升;2)腔内的背向散射、偏振噪声,以及激光器在不同频率段的频率噪声不仅影响到谐振信号的高度,而且还会影响到谐振信号的对称性。上述两方面的影响均会使陀螺性能劣化,造成陀螺输出误差。

驱动电流调谐过程中激光器的输出光强发生变化,引起的陀螺输出误差可表示为<sup>[15]</sup>

$$\Omega_{\text{laser}} = \frac{\sigma I_{\text{laser}} \Omega_{\text{bias}}}{I_{\text{laser}} \sqrt{N}}, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{laser}}$ ,  $\sigma I_{\text{laser}}$  分别为激光器的光强和波动标准差; $\Omega_{\text{bias}}$  为谐振式光纤陀螺的固定零偏; $N$  为采样点个数。激光器光功率与驱动电流之间的功率-电流曲线如图3所示。可见在0~70 mA的驱动电流段,电流与光功率的变化并非呈线性关系,而当驱动电流高于70 mA时,光功率与驱动电流表现为明显的线性关系。

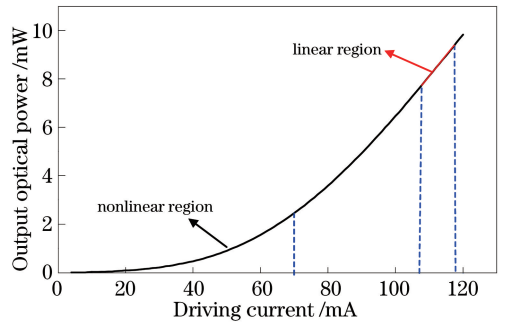


图3 激光器光功率与电流间对应关系

Fig. 3 Corresponding relation between output optical power and driving current of laser

在驱动电流复位过程中,为了增大稳定工作范围,设计驱动电流的偏置电流为112 mA,而调谐范围为±5 mA,即陀螺工作于如图3红色所示的线性调谐区内。

线性调谐区(107~117 mA)的光强和驱动电流*i*满足如下关系<sup>[16]</sup>:

$$I_{\text{laser}} = 0.18i - 8.8. \quad (2)$$

根据(1)式和(2)式,当固定零偏 $\Omega_{\text{bias}}$ 为500 (°)/h(目前实测值)时,在驱动电流从107 mA调谐到117 mA的过程中,光强变化引入的陀螺偏置变化为96 (°)/h。

实际在电流复位过程中,激光器的频率发生明显变化,导致无法对同一谐振峰信号实现不间断实时跟踪锁定,即二次锁定时会锁定于其他谐振信号之上,而从图中可见不同的谐振信号具有不同的电平电压和对称度,引起零位变化。

背向散射引入的陀螺输出偏置误差可表示为<sup>[17]</sup>

$$\Omega_{\text{rb}} = \frac{c\lambda R_b}{8\pi^2 L\alpha} \left( \frac{\Delta V}{V} \right)^M, \quad (3)$$

式中: $c$  为真空中的光速; $\lambda$  为输入光的中心波长; $\alpha$  为FRR的半径; $L$  为FRR的长度; $R_b$  为谐振腔的瑞利背向散射系数; $M$  为载波抑制个数; $\Delta V/V$  为调制波峰峰值与最大载波电压之间的相对偏差。

偏振耦合引起的陀螺输出偏置误差为

$$\Omega_p = \frac{c\lambda}{4\pi L\alpha} \frac{2[1 - r t_i \exp(-2\pi\Delta f_1 \tau_0)]}{\pi \sqrt{r t_i \exp(-2\pi\Delta f_1 \tau_0)}} \cdot (\Delta\nu^2 - \Delta\theta^2 \cos^4 \nu), \quad (4)$$

式中: $\theta$  和 $\nu$  分别为输入光本征偏振态相位和角度; $r$  为分束比; $t_i$  为耦合器C1和C2的透射率; $\Delta f_1$  为激光器线宽; $\tau_0$  为渡越时间。

复位过程中引入的陀螺零位变化会严重影响陀螺性能,该零位的变化与背向散射系数、光强大小、

对轴角度等多个参量相关,而且容易受温度等环境因素的影响。

### 3 基于温度闭环的频率跟踪失锁控制方案

为了解决频率跟踪失锁引入的尖峰和台阶跳变,实现对同一个谐振峰信号的稳定同步锁定,设计基于温度闭环控制的失锁控制方案,具体结构如图4所示。相较于前述文献中的恒温调流控制方案,本文将激光器的温度作为另一个闭环控制环节,实现了电流和温度的双闭环控制。

通过在相位调制器上施加“三角波+锯齿波”的

混合波形实现信号调制,有效抑制谐振式光纤陀螺中的背向散射噪声,提升陀螺信噪比。其中利用解调1模块对探测器 PD2 探测到的 CW 信号进行解调处理,得到激光器频率与 CW 谐振信号的频率偏差,随后对目前的工作区间进行判定以进行接下来的电流控制和温度控制。利用电流控制的快调谐、高动态特点实现激光器频率对谐振腔谐振频率的闭环控制,同时利用温度控制的大范围特点增大激光器的频率控制范围,最终实现激光器频率对谐振腔谐振频率的高精度跟踪同步。为了降低激光器和谐振腔相对频率噪声对陀螺性能的影响,采用 CW 信号和 CCW 信号的共模信号作为陀螺输出,进一步提升陀螺性能。

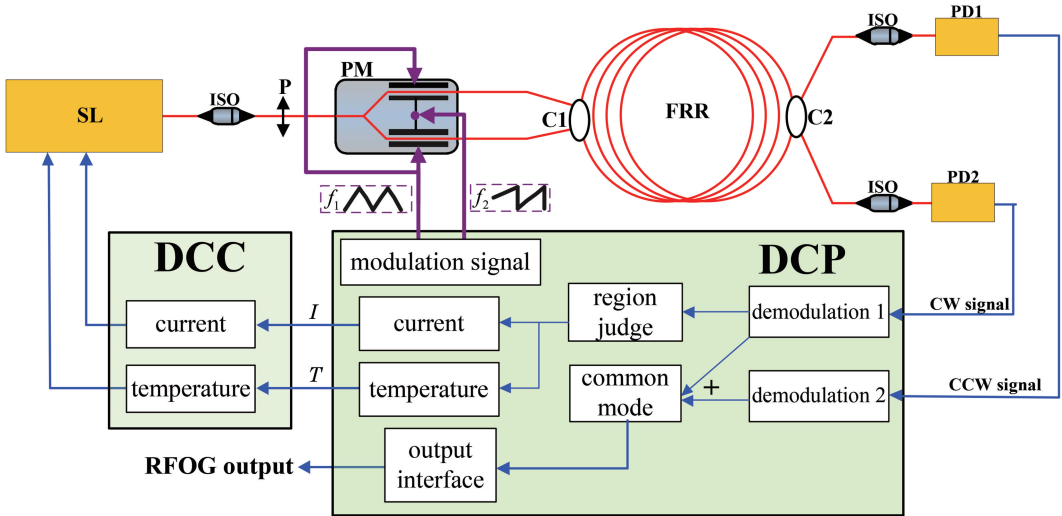


图 4 基于温度闭环的跟踪失锁控制方案

Fig. 4 Out-of-lock frequency-tracking control scheme of RFOG based on temperature closed-loop feedback

在数字闭环处理电路 DCP 内部对信号处理电路的 DAC(digital-to-analog converter)控制范围进行数字划分,如图 5 所示。设定数字量 62536 和 3000 分别为上、下工作极值点,设定数字量 3000~62536 为电流线性调谐区,对应大约 -250~250 MHz 的频率调谐范围,数字量 0~3000 为温度下反馈区,数字量 62536~65536 为温度上反馈区,分别对应 -10~-0.25 GHz 和 0.25~10 GHz 的频率调谐范围。精确细分电流和温度调谐区间过程,综合利用了驱动电流的高精度和快响应频率调谐特性,以及管芯温度的大范围调谐优势。

电流只在线性扫频区实现扫频和控制,电流线性调谐区内激光器温度维持稳定。当接近谐振峰信号时,驱动电流闭环反馈控制激光器频率跟踪锁定于谐振腔中心频率。随着外界温度的变化,驱动电流开始接近温度反馈区,一旦进入温度上、下反馈区,激光器温度控制模块开始工作,通过调节反馈参

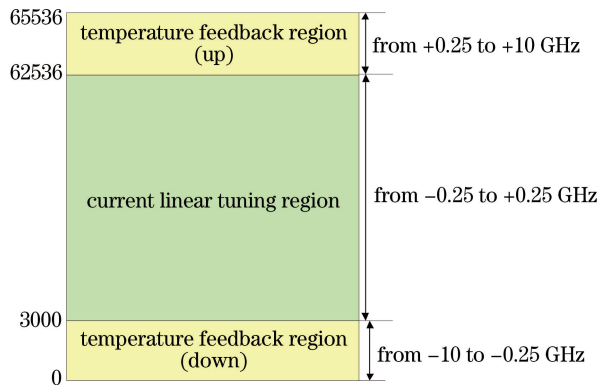


图 5 失锁控制方案中 FPGA 数字工作区间划分  
Fig. 5 Division of FPGA digital working region in out-of-lock control scheme

数和方向,将激光器频率回拉到电流线性调谐区中,在此过程中,激光器频率调节连续,因此能够始终跟踪锁定于同一个谐振峰信号上,有效避免了二次锁定误差。在控制过程中,确保激光器温度调

节满足正确的方向和合适的步长,否则会导致驱动电流越过电流线性反馈区,引起激光器光强突变和频率跟踪失锁。

具体的控制过程如下:首先根据激光器自身特性对初始温度和电流进行复位设置以获得最佳的激光器性能;随后激光器线性扫频并通过电压比较器对是否接近谐振峰信号进行正确判定,若接近谐振峰则启动驱动电流闭环控制,实现激光器频率对FRR频率的跟踪闭环。在此过程中对激光器温度是否超限进行判定,超限值由激光器的工作范围所决定。若温度超限则实现激光器复位,重置温度和电流,若温度不超限则根据驱动电流值对是否进入温度反馈区进行判定,若进入温度下反馈区则启动温度上反馈,若进入温度上反馈区则启动温度下反馈,最终实现激光器的温度闭环控制。

#### 4 实验结果及分析

搭建了谐振式光纤陀螺原理样机,样机实物如图6所示,采用的半导体激光器中心波长是1550.12 nm,线宽小于5 kHz,作为核心敏感部件的谐振腔是20 m保偏光纤谐振腔,其测量清晰度为23。调制三角波的调制频率为50 kHz,偏置锯齿波频率为502.5 Hz。为消除调制引起的脉冲和拖尾,提高陀螺检测信噪比,设置三角波和锯齿波的幅度均为相位调制器的全波电压13.86 V。采用以FPGA作为控制核心的信号处理电路实现陀螺信号检测、频率跟踪失锁控制、陀螺数据输出以及谐振腔温度检测等功能。

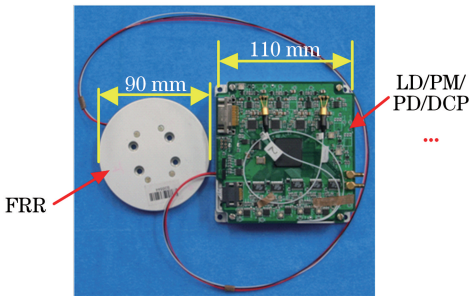


图6 谐振式光纤陀螺原理样机实物

Fig. 6 Photograph of RFOG prototype

对谐振式光纤陀螺原理样机进行室温条件下的零偏稳定性测试。设定测试时间为10 min,第一次测试不采用频率跟踪失锁控制方案,第二次测试采用频率跟踪失锁控制方案,重点比较采用频率跟踪失锁控制方案前后的陀螺输出。在两次测试期间受环境因素的影响,谐振腔温度分别改变了0.23 °C和

0.25 °C(测试结果如图7所示),因此可认为两次测试条件一致。

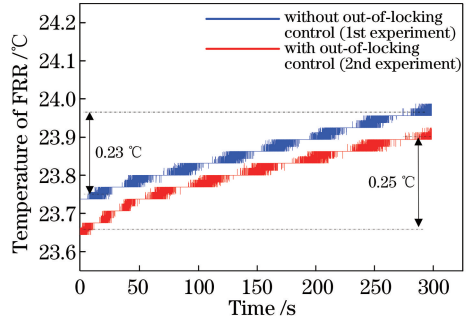


图7 受环境因素影响的谐振腔温度变化情况

Fig. 7 Temperature drift of resonator affected by environment

图8给出了陀螺采用失锁控制方案前后的零偏稳定性测试数据,从图8(a)中可见,在陀螺频率跟踪失锁瞬间,驱动电流(图中用驱动电路的闭环电压表示,闭环电压与驱动电流呈线性关系)经历了从极值点一侧跳变到另一侧的突变,突变期间陀螺输出呈现明显的尖峰信号,尖峰信号幅度高达3000 (°)/h。更为严重的是,在二次锁定后,激光器频率跟踪锁定于其他谐振峰信号,导致陀螺输出零偏变化高达600 (°)/h,而且零位变化趋势无明显规律性,因此频率跟踪失锁引入的尖峰毛刺和零偏变化将会严重影响陀螺性能。由图8(a)进一步可见,驱动电流跳变的两侧极值点分别对应激光器调谐电流的最大值和最小值,在两极值点之间,驱动电流呈线性变化,温度缓慢变化引入的线性漂移会对激光器中心频率和谐振腔谐振频率的相对变化量产生影响。闭环跟踪同步模块可通过反馈调谐电流消除这种影响。在此过程中陀螺输出稳定,并没有发生明显的跳变和漂移。图8(b)给出了采用频率跟踪失锁方案后的陀螺输出数据,因为采用了温度闭环,所以激光器中心频率不会二次锁定到其他谐振峰信号上,实现了对同一谐振峰信号的持续锁定。从图中可见,跟踪失锁和二次锁定引入的陀螺零偏变化得以完全抑制,而且失锁过程中陀螺尖峰毛刺也从3000 (°)/h大幅降低到200 (°)/h,这些毛刺在后期陀螺数据处理中通过均值滤波可完全消除,对陀螺性能的影响已经微乎其微。

对采用失锁控制方案前后的陀螺长期性能进行验证,将陀螺置于实验室桌面并进行常温条件下的陀螺静态性能测试,样机测试状态如图9(a)所示。测试时长为1 h,实测零偏稳定性数据如图9(b)所示,受环境温度的影响,1 h测试时间内环境温度缓

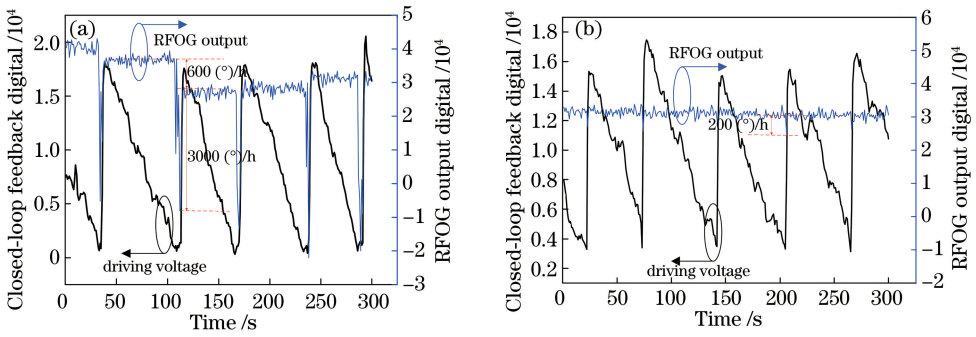


图 8 陀螺常温条件下输出对比。(a)采用失锁控制方案前；(b)采用失锁控制方案后

Fig. 8 Output comparison of RFOG at room temperature. (a) Before out-of-lock control; (b) after out-of-lock control

慢变化了 0.43 °C，而从陀螺输出端并未观察到明显的尖峰毛刺和台阶跳变，100 s 陀螺测试精度为 4.9 (°)/h。通过对测试数据进行进一步分析可得，陀螺输出主要表现为一定幅度的漂移，分析其原因主要有两点：1) 偏振噪声受环境温度的影响而发生变化，引起陀螺零偏改变；2) 在因陀螺跟踪失锁控制而进行管芯调温时，激光器输出光功率波动会导致

陀螺输出光功率变化，从而引起陀螺零偏漂移。针对第一种漂移，拟在腔内双 90°对轴基础上通过在谐振腔内增加起偏器/单偏振光纤以实现腔内单偏振态传输，从而提高谐振式光纤陀螺的温度适应性；针对第二种漂移，拟通过对激光器温度进行实时采样处理并在数字信号处理电路中进行有效补偿，以消除管芯温度改变引起的光强变化。

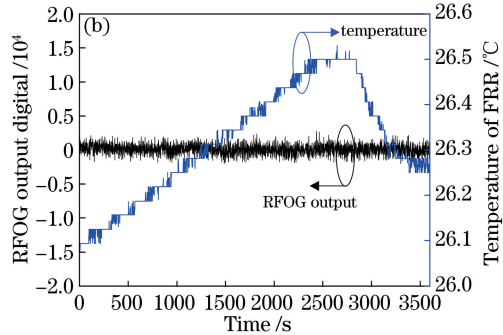
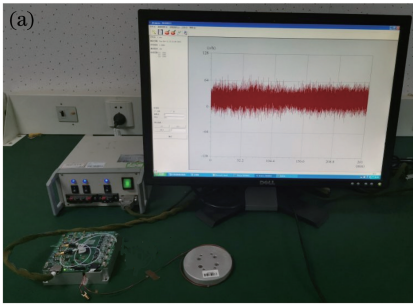


图 9 陀螺室温性能测试。(a)测试照片；(b) 1 h 静态测试结果

Fig. 9 Performance test of RFOG at room temperature. (a) Photograph of testing; (b) result of 1-h static test

## 5 结 论

本文提出了一种基于半导体激光器温度闭环反馈的失锁控制方案，解决了谐振式光纤陀螺中普遍存在的频率跟踪失锁问题。分析表明激光器频率跟踪同步过程中的电流变化、背向散射、偏振耦合等非互易性噪声是导致陀螺尖峰脉冲和零位变化的主要原因；对失锁控制总体技术方案、信号处理流程以及 FPGA 实现方法进行了详细叙述；进行了光路和电路的总体装配，成功搭建谐振式光纤陀螺小型化原理样机。完成了常温条件下的陀螺静态性能测试，对采用频率跟踪失锁方案前后的陀螺输出进行了对比测试，采用频率跟踪失锁控制方案使陀螺输出脉冲幅值突变量从 3000 (°)/h 降低到 200 (°)/h，陀螺零偏变化从 600 (°)/h 降低到陀螺噪声水平以下，最终陀螺 1 h 静态测试精度显著提升到 4.9 (°)/h

(100 s 平滑)，上述研究成果为谐振式光纤陀螺的实用化提供了理论和实验方法支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Wang X J, He Z Y, Hotate K. Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator with twin 90° polarization-axis rotated splices [J]. Optics Express, 2010, 18 (2): 1677-1683.
- [2] Ma H L, Yu X H, Jin Z H. Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator integrating in-line polarizers [J]. Optics Letters, 2012, 37(16): 3342-3344.
- [3] Jiang Z G, Hu Z F. Analysis on sensitivity of resonant fiber optic gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0706001.  
蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0706001.

- [4] Sanders G A. Critical review of resonator fiber optic gyroscope technology [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 10266: 102660A.
- [5] Yang Z H, Ma H L, Zheng Y M, et al. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 814-819.  
杨志怀, 马慧莲, 郑阳明, 等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术 [J]. 中国激光, 2007, 34(6): 814-819.
- [6] Yu X H, Ma H L, Jin Z H. Improving thermal stability of a resonator fiber optic gyro employing a polarizing resonator [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 358-369.
- [7] Wu J F, Smiciklas M, Strandjord L K, et al. Resonator fiber optic gyro with high backscatter-error suppression using two independent phase-locked lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 96341O.
- [8] Ying D, Demokan M S, Zhang X, et al. Analysis of Kerr effect in resonator fiber optic gyros with triangular wave phase modulation [J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 529-535.
- [9] Feng L S, Zhi Y Z, Lei M, et al. Suppression of frequency locking noise in resonator fiber optic gyro by differential detection method [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 62: 109-114.
- [10] Lei M, Feng L S, Zhi Y Z, et al. Experiments on resonator micro-optic gyro using external cavity laser diode [J]. Optical Engineering, 2012, 51(10): 104602.
- [11] Ying D Q, Ye K B, Wang Z Y, et al. Optimization of second-harmonic's quantization precision for intensity modulation noise suppressing in a digital RFOG [J]. Optics Communications, 2017, 405: 114-119.
- [12] Su N, Feng L S, Lei M, et al. Analysis of triangle wave modulation error in integrated optical resonance gyroscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0805002.  
粟妮, 冯丽爽, 雷明, 等. 谐振式集成光学陀螺三角波调制误差分析 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805002.
- [13] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9852: 985207.
- [14] Lei M, Yu H Y, Li J H, et al. Research of signal detection and processing in resonance photonic crystal fiber optical gyroscope [J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(2): 89-94.  
雷明, 于怀勇, 李建华, 等. 谐振式光子晶体光纤陀螺信号检测及处理技术研究 [J]. 导航定位与授时, 2018, 5(2): 89-94.
- [15] Lei M, Feng L S, Zhi Y Z, et al. Effect of intensity variation of laser in resonator integrated optic gyro [J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4576-4581.
- [16] Li J H, Yu H Y, Wu Y J, et al. Research on laser optimum work area of resonator fiber optical gyroscope [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 107-112.  
李建华, 于怀勇, 吴衍记, 等. 谐振式光纤陀螺用激光器最优工作区间探究 [J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 107-112.
- [17] Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Rayleigh backscattering in optical passive ring-resonator gyro [J]. Proceedings of SPIE, 1984, 514: 313-316.