

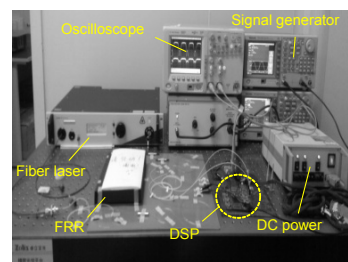


DOI: 10.12086/oe.2020.190523

基于温度和 PZT 协同控制的激光器频率锁定技术研究

雷明*, 于怀勇, 方圆, 向强, 杨恽, 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: 本文针对谐振式光纤陀螺应用需求, 提出一种基于激光器温度和 PZT 协同控制的频率跟踪锁定控制方案, 综合利用激光器温度调谐所具有的大范围、PZT 电压调谐的高精度高动态技术优势, 实现光纤激光器中心频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定。进行了透射式谐振信号的数学仿真, 对温度和 PZT 协同控制方案进行了硬件设计和算法仿真, 重点分析了频率跟踪锁定方案中控制参数对锁定稳定性的影响情况。完成了激光器频率锁定系统的研制, 实现了激光器中心频率对谐振腔谐振频率的高精度、长时间跟踪锁定, 常温条件下 1 h 频率跟踪锁定精度为 4.8×10^{-9} , 变温条件下 5.5 h 频率跟踪锁定精度低至 9.74×10^{-8} 。上述研究工作为谐振式光纤陀螺长期性能提升奠定了重要的技术基础。

关键词: 谐振式光纤陀螺; 频率锁定; 温度调谐; PZT 控制

中图分类号: TN253; V241.5

文献标志码: A

引用格式: 雷明, 于怀勇, 方圆, 等. 基于温度和 PZT 协同控制的激光器频率锁定技术研究[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190523

Research on laser frequency locking technology based on temperature and PZT control

Lei Ming*, Yu Huaiyong, Fang Yuan, Xiang Qiang, Yang Yi, Zhang Lizhe

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

Abstract: Aiming at the application requirement of resonator fiber optic gyroscopes, a frequency tracking and locking control scheme based on laser temperature and PZT control is proposed in this paper. By taking advantages of the large range of laser temperature tuning as well as the high precision and high dynamicity of PZT tuning, tracking of the fiber laser's central frequency to the fiber ring resonator's resonance frequency is realized. Typical transmission resonant curve is simulated by mathematical methods. Hardware design, algorithm simulations of temperature and PZT control scheme are carried out. The influence of control parameters on tracking stability is analyzed. The development of laser frequency tracking systems is assembled. The high-precision and long-time tracking of laser's central frequency to resonance frequency is realized successfully. The locking precision is low to 4.8×10^{-9} over one hour under room temperature. The locking precision is low to 9.74×10^{-8} over 5.5 hours under variable temperature. This work has laid an important foundation for improving the long-term performance of resonator fiber optic gyroscopes.

Keywords: resonator fiber optic gyroscope; frequency locking; temperature tuning; PZT control

收稿日期: 2019-09-08; 收到修改稿日期: 2019-11-18

基金项目: “十三五”装备预先研究课题

作者简介: 雷明(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事谐振式光纤陀螺、集成光学陀螺方面的研究。E-mail: 15210985670@163.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

Citation: Lei M, Yu H Y, Fang Y, et al. Research on laser frequency locking technology based on temperature and PZT control[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190523

1 引言

谐振式光纤陀螺(Resonator fiber optic gyro, RFOG)是一种基于 Sagnac 效应引起谐振频率偏差变化实现角速度检测的新型惯性传感器, 凭借其精度高、体积小、重量轻的技术优势, 已经成为目前陀螺惯性器件的重要发展方向和研究热点^[1-3]。根据 RFOG 传递函数可计算得到 1 °/s 的陀螺转动对应的谐振频率变化通常在 1 kHz 以下, 而激光器稳定状态下的自身频率漂移高达几十 MHz 以上^[4], 谐振腔谐振频率受温度影响更是高达 GHz/°C 量级。因此, RFOG 的稳定工作以激光器中心频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定作为前提条件, 陀螺跟踪锁定精度和稳定度将会直接决定陀螺性能^[5]。激光器的频率跟踪锁定方法包括: 激光器中心频率调谐法^[6]、相位调制器锁频控制法^[7]和谐振腔谐振频率调谐法^[8]。采用相位调制器锁频控制主要是基于相位调制器的移频功能, 具有高调谐带宽, 但频率调谐量低, 频率跟踪长期稳定性差。谐振腔谐振频率调谐法是将光纤谐振腔缠绕在压电陶瓷(PZT)上, 通过逆压电效应引起的形变改变谐振腔腔长, 实现谐振腔谐振频率对激光器中心频率匹配, 该方法响应速度快, 调谐范围大, 但是需要将谐振腔均匀绕制于 PZT 上, 对缠绕精度提出了很高的要求。激光器中心频率调谐法通过控制激光器温度、电流或者激光器内部 PZT 电压等方式实现激光器中心频率闭环控制, 具有调谐范围宽、响应速率快等技术优势。

本文针对基于光纤激光器的 RFOG, 提出一种基于激光器温度和 PZT 协同控制的频率跟踪锁定技术方案, 综合利用激光器温度调谐所具有的大范围、PZT 电压调谐的高精度高动态技术优势, 以实现光纤激光

器中心频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定。本文进行了透射式谐振信号的数学仿真, 对温度和 PZT 协同控制方案进行了硬件设计和算法仿真, 重点分析了频率跟踪锁定方案中控制参数对锁定稳定性的影响情况。完成了激光器频率锁定系统的研制, 实现了激光器中心频率对谐振腔谐振频率的高精度、长时间跟踪锁定, 为谐振式光纤陀螺长期稳定性优化奠定了重要的技术基础。

2 系统设计与理论仿真

2.1 总体方案设计

激光器频率锁定系统如图 1 所示, 其中由窄线宽光纤激光器 FL 发出的激光经光隔离器 ISO 后, 进入起偏器 P 进行偏振光起偏, 经相位调制器 PM 后通过光纤耦合器 C1 耦合进入光纤环形谐振腔(fiber ring resonator, FRR)进行顺时针光传输, 经多圈光传播后经耦合器 C2 耦合输出, 在 C2 输出端口发生多光束干涉, 经探测器 PD 进行光电信号转换形成透射式谐振峰信号, 数字信号处理器 DSP 发生调制器信号施加到 PM 上, 并进行频差信号解调, 然后通过控制 FL 的温度和 PZT 端口进行光频率调谐, 实现 FL 输出光频率对 FRR 谐振频率的闭环跟踪锁定。

光纤环形谐振腔 FRR 作为激光器频率锁定控制的核心部件, 其输出特性决定频率锁定效果, 图 1 中透射式结构 FRR 的输出光强表示如下^[9]:

$$I = \frac{\kappa^2 \alpha_c^2 \alpha_1}{1 - 2(1 - \kappa) \sqrt{\alpha_c} \sqrt{\alpha_1} \cos(\omega_0 \tau) + (1 - \kappa)^2 \alpha_1 \alpha_c} \cdot |E_0|^2, \quad (1)$$

其中: E_0 为入射光电场, κ , α_c 分别为耦合器 C1/C2 的耦合系数与插入损耗, α_1 为 FRR 的传输损耗, ω_0 为入

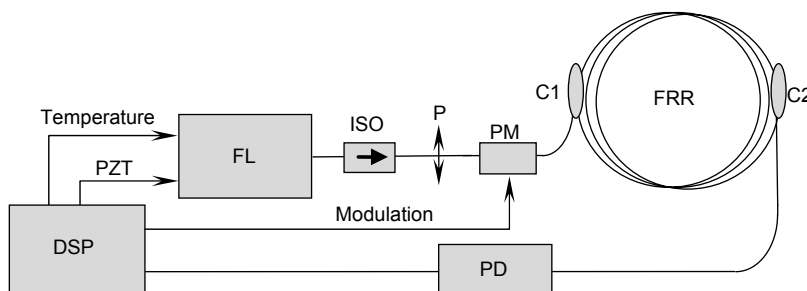


图 1 光纤激光器频率锁定系统示意图

Fig. 1 Diagram of the frequency locking system for fiber lasers

射光的角频率, τ 为光纤环圈的渡越时间。对透射式谐振腔的输出光强进行仿真分析, 如图 2 所示。谐振曲线表现为暗背景下的亮条纹, 在激光器中心频率等于谐振腔的谐振频率时, 谐振腔输出具有最大的光强输出。

图 2 中的横坐标 FSR 为谐振腔的自由谱线宽度, 定义为两个相邻的谐振信号频差 (ΔF_{FSR}), 表达式^[10]:

$$\Delta F_{FSR} = \frac{c}{nL}, \quad (2)$$

其中: c 为真空中的光束, L 为光纤谐振腔所用光纤长度, n 为光纤折射率。

2.2 频率跟踪锁定方案设计

系统光源采用丹麦 NKT 公司生产的可调谐 DFB 光纤激光光源, 激光器中心频率为 1550.12 nm, 带有 PZT 调谐模块和温度调谐模块。综合激光器的频率调谐参数以及信号检测电路输出电压大小, 得到频率调谐参数及指标大小如表 1 所示^[11]。

根据式(2), 20 m 长光纤谐振腔的自由谱线宽度为 10.3 MHz。仅采用激光器 PZT 调谐方式时, 1 V 的电压变化即可检测到一个完整的谐振曲线, 在此过程中通过单独的 PZT 闭环, 即可实现激光器频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定。

在激光器频率控制速度方面, 由于 PZT 的速度响应特点, 使用 PZT 闭环反馈控制能够满足频率跟踪的快速响应需求, 而温度的响应速度相对慢得多, 但具有调节范围大的优势, 因此采用温度控制作为 PZT 的信号补偿。在激光器频率控制精度方面, PZT 电压是通过 16 位的并行 D/A 来实现的, 24 V 电压调谐范围对应的最小调节频率为 $(24 \text{ V}/65536) \times 16.3 \text{ MHz/V} = 5.97 \text{ kHz}$, 通过多点采样平滑输出, 可进一步

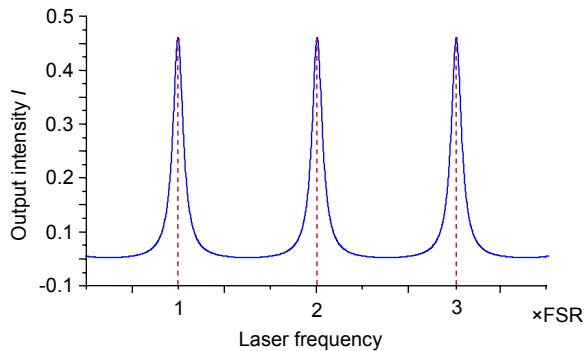


图 2 典型的透射式谐振输出曲线

Fig. 2 Typical transmission resonant curve of the fiber ring resonator

提高频率跟踪锁定精度。在激光器频率控制范围方面, PZT 可实现 391.2 MHz 的频率控制, 而谐振腔受环境温度的影响高达 GHz/°C 量级。如果单独采用 PZT 闭环控制, PZT 控制电压容易溢出, 导致频率跟踪失锁, 因此必须在激光器频率控制中引入温度控制环节。根据表 1 中的温度调谐范围以及温度调谐系数, 可以计算得到采用温度控制可补偿的激光器频率范围可达 57.05 GHz, 远高于 PZT 可控制的 391.2 MHz 频率范围。

在激光器频率锁定控制算法上, 首先对频差信号进行解调, 得到激光器频率与谐振腔谐振频率的频率偏差信号。将频率偏差信号经过多次累加处理后, 反馈控制 PZT 电压输出, 以实现频率的快速跟踪锁定, 同时对温度进行控制, 以确保锁定的长期稳定性。

PZT 控制的数学模型可以表示为一个比例环节, 闭环传递控制函数表示为

$$G_{close}(z) = \frac{G_{open}(z)}{1 - k_1 G_{open}(z)} = \frac{k_0 z^{1-n}}{1 - z - k_0 k_1 z^{1-n}}, \quad (3)$$

其中: G_{open} 为控制开环传递函数, z^{1-n} 为系统的传输和数据处理延迟, k_0 为数字信号处理内部通过累加除法而引起的增益系数, k_1 为开环传递函数的比例环节增益系数。由传递函数可见, 影响锁定精度和稳定性因素的因素为 n 和 $k_0 k_1$ 。

n 值反映延迟时间和数据累加过程中的数字延迟。 n 越大, 系统频率锁定的响应速率就越快, 但也越容易出现超调, 当延迟时间过长时, 系统将不再稳定。在数字信号处理器内部通过控制累加时间有效避免系统超调。 $k_0 k_1$ 影响频率锁定速度和稳定程度, 在调节 $k_0 k_1$ 实现锁频时, 随着 $k_0 k_1$ 的增加, 系统的响应速度越来越快, 继续增大将会导致系统超调甚至震荡。 k_1 是固定值, k_0 通过数字信号处理器的移位次数进行

表 1 光纤激光器频率调谐参数

Table 1 Frequency tuning parameters of fiber laser

Parameter name	Index
PZT tuning voltage range/V	-12~12
PZT tuning ratio/(MHz/V)	16.3
PZT tuning bandwidth/kHz	20
Temperature tuning range/°C	15~50
Temperature tuning ratio/(MHz/°C)	-1.63×10 ³

调节。

温度控制模型为一阶系统，可表示如下：

$$G = \frac{k}{Ts+1}, \quad (4)$$

其中时间常数 T 是惯性环节的主要参数，定义为以初始速度等速上升至稳态值所需时间。 T 越大，温度响应速度越慢，目前光纤激光器温度响应在秒量级。

采用 Matlab 中的 Simulink 模块来完成基于温度和 PZT 协同控制实现激光器频率锁定仿真。Simulink 建立的仿真模型如图 3 所示，用阶跃信号 Step 表示陀螺角速度变化，一定角速度下 FRR 通过内部增益 Gain3 产生与陀螺转速成正比的光频移 f ，经过光电探测器内部增益 Gain1 将光频移 f 转换为反应频偏的方波电压差，通过 AD 转换为数字量并通过零阶保持器得到解调数字信号 data_jt，随后采用数字累加方式实现积分运算，积分后的数字信号 data_PZT 通过 DA 增益项控制 PZT 电压实现激光器频率控制，形成 Out1，其中 z^{-12} 表示累加运算带来的数字延迟， k_0 为附加增益，后端通过并行 DA 实现数模转换产生电压信号 PZT_voltage，并根据激光器接口电路构成形式和 PZT 调谐系数，进行延迟和增益转换，在 Gain 环节实现电压-频率转换。另一路上，data_jt 的值经过低频采样得到 data_PZT，通过零阶保持器并送给温度控制环节，产生温度设定信号 T_set，形成 Out2。温度环节通过一个一阶系统进行延迟和转换后经过 SDA 构成的 Gain4 增益项转成模拟量，并通过运算放大 Gain2 施加到激光器的温度控制端，实现激光器频率补偿。在此过程中不断将激光器实测温度 T_act 传递给控制系

统，同时考虑温度系统的响应延时，避免温度稳态控制误差，实现温度控制的精确性和可靠性。

基于 Simulink 仿真模型，对阶跃输入条件下控制系统的 PZT 控制信号 Out1 和温度控制信号 Out2 进行仿真分析。可以调整的控制参数有增益项 DA、SDA 和数字延迟(Integer delay)，在 FPGA 内部改变上述参数以获得不同的控制结果。对参数不断优化调整，当设定 Gain6 和 Gain4 增益分别为 0.005、300，Integer delay 为 12 时，PZT 和温度控制信号的仿真结果为图 4 所示，分别为下方曲线和上方曲线所示。可见，当转速发生变化而产生频率偏差时，PZT 电压和温度电压会向相反方向变化以实现激光器中心频率对 FRR 谐振频率的跟踪同步控制。在控制前期，电压幅度会迅速增大到极点以实现激光器频率的快速调谐，由于激光器的温度响应慢，在控制后期 PZT 和温度电压会逐渐回调以确保频率的稳定，在此过程中电压的变化幅度会逐渐减小，最终达到频率锁定的稳定状态，整个稳定锁定时间大约在 3 ms 以内，待到频率稳定后 PZT 和温度控制电压的变化逐步趋于稳定，从而最终达到平衡状态。

3 系统搭建及测试

搭建了如图 5 所示的光纤激光器频率锁定系统，采用保偏光纤进行光纤谐振腔绕制，光纤长度 20 m。采用基于 FPGA 的硬件处理电路进行频差信号解调、激光器温度/PZT 电压闭环反馈、频率锁定控制以及锁定精度输出等功能。

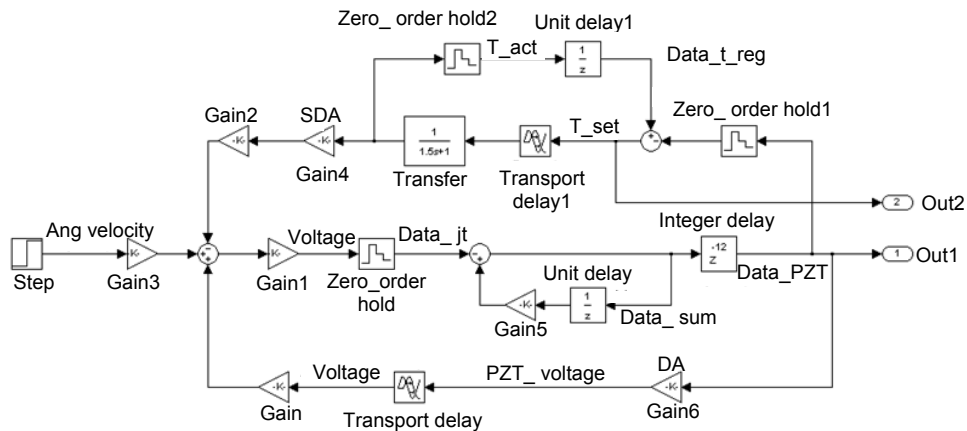


图 3 基于温度和 PZT 协同控制的 Simulink 仿真模型图

Fig. 3 Simulation model based on temperature and PZT control

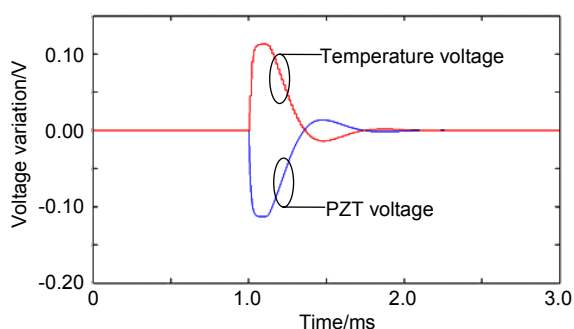


图 4 基于温度和 PZT 协同控制的 Simulink 仿真结果
Fig. 4 Simulation results based on temperature and PZT control

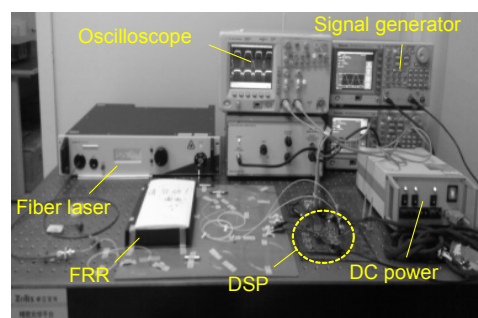


图 5 光纤激光器频率锁定系统实物
Fig. 5 Fiber laser frequency locking system

采用激光器频率锁定系统进行了频率跟踪锁定实验研究,测试结果如图 6 所示。从图中可见,其锁定过程如下:首先信号检测电路发生线性扫频锯齿波施加在激光器的 PZT 电压端,此时激光器的温度保持恒定,当激光器输出光频率线性扫频通过整个谐振信号时,从探测器输出上将会观察到明显的谐振峰信号,与图 2 中的仿真结果相吻合。当锁定控制信号到达时,再次接近谐振峰信号一侧时,激光器 PZT 电压不再线性增大,而是根据谐振频率偏差大小进行闭环反馈控制,从开始闭环到实现频率跟踪锁定(即探测器输出为直流电压信号)仅需要 10 ms 的时间。为确保锁定效果,激光器的温度设定电压也开始作用以补偿外界温度变化引起的 FRR 谐振频率漂移,最终通过激光器温度和 PZT 电压的复合控制,达到频率跟踪锁定的稳定状态。

为验证本文提出的频率跟踪锁定控制系统精度和长期稳定性,需要进行常温条件下激光器频率锁定精度测试。首先对陀螺的标度因数进行速率转台标定,

得到陀螺常温标度因数 K 为 $142260 \text{ } ^\circ/\text{s}$ 。随后进行常温条件下锁定输出测试,若系统稳定,则锁定后探测器端为持续稳定的直流电压,解调后的锁定偏置应该始终在零点附近,而且需要对锁定后波动标准差进行实时采样输出,以衡量常温下的锁定精度。图 7 给出了锁定路静态测试数据及锁定过程中的环境温度变化情况,其中前 1 h 和后 1 h 分别为频率锁定前和锁定后的输出数据,2 h 测试时间内外温度的最大变化量在 $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右。当激光器频率锁定控制命令到达前,一旦进入接近谐振中心频率,锁定路输出呈现完整的频率偏差解调曲线(如图中尖峰脉冲所示),当激光器频率锁定控制命令到达后,激光器频率被实时跟踪锁定于谐振腔的谐振频率上,此时锁定路输出并没有明显的尖峰脉冲和漂移,而是稳定地维持在 $0.56 \text{ } ^\circ/\text{h}$ 零偏附近,已经无限接近锁定零点位置。进一步可知,常温条件下激光器的频率锁定精度为 $4.3 \text{ } ^\circ/\text{h}$ (对应 4.8×10^{-9} 频率稳定度),能够满足中低精度谐振式光纤陀螺的频

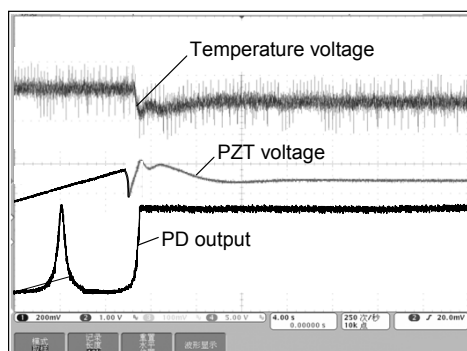


图 6 光纤激光器频率锁定过程
Fig. 6 Frequency locking process of fiber lasers

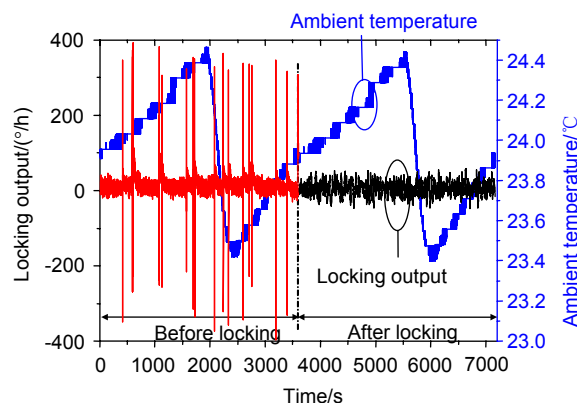


图 7 常温条件下激光器频率锁定输出测试结果
Fig. 7 Test results of fiber laser frequency locking under normal temperature

率跟踪锁定需求。

为了验证环境温度变化对激光器频率跟踪锁定效果的影响,将光纤谐振腔置于硅油循环浴中进行变温条件下频率锁定输出测试。设定硅油循环浴的温度变化范围为 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,温变过程中激光器的温度及频率锁定输出测试结果如图 8 所示。从图中可见:在 5.5 h 测试时间内,激光器频率跟踪锁定输出稳定,未出现明显的频率跟踪失锁现象,测试激光器频率锁定精度为 $87.6\text{ }^{\circ}\text{h}$ (对应 9.74×10^{-8} 频率稳定度),说明基于温度和 PZT 协同控制的频率锁定方案同样可以实现变温条件下激光器频率对谐振腔谐振频率的长期同步跟踪锁定。

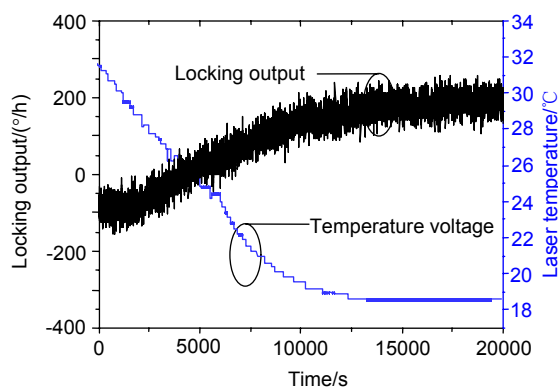


图 8 变温条件下激光器频率锁定输出测试结果

Fig. 8 Test results of fiber laser frequency locking under variable temperature

4 结 论

本文针对谐振式光纤陀螺应用需求,提出一种基于激光器温度和 PZT 协同控制的频率跟踪锁定控制方案,综合利用激光器温度调谐所具有的大范围、PZT 电压调谐的高精度高动态技术优势,实现光纤激光器中心频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定。并进行了透射式谐振信号的数学仿真,对温度和 PZT 协同控制方案进行了硬件设计和算法仿真,重点分析了频率跟踪锁定方案中控制参数对锁定稳定性的影响情况。完成

了激光器频率锁定系统的研制,实现了激光器中心频率对谐振腔谐振频率的跟踪锁定,常温条件下 1 h 测试时间内的频率稳定度为 4.8×10^{-9} ,变温条件同样可以实现激光器中心频率对谐振腔谐振频率稳定跟踪锁定,5.5 h 测试时间内的频率稳定度低至 9.74×10^{-8} 。

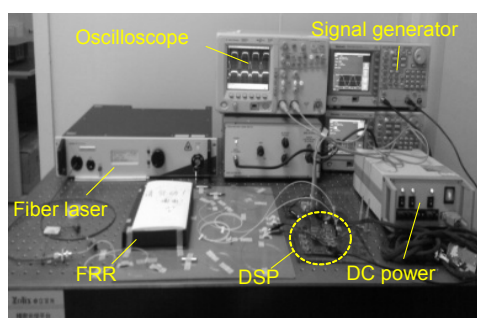
参考文献

- [1] Sanders G A. Critical review of resonator fiber optic gyroscope technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10266**: 102660A.
- [2] Wang L L, Li H Z, Zhang J J, et al. Optimization of the sinusoidal phase modulation technique in resonant fiber optic gyro[J]. *Optics Communications*, 2017, **387**: 18–23.
- [3] 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.
- [4] Duan H C, Wu J, Zhao Z L, et al. Frequency drift measurement on single-frequency laser by short fiber delayed self-heterodyne[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(7): 0702008.
段洪成, 吴谨, 赵志龙, 等. 短光纤延时自外差测量单频激光器频率漂移[J]. *中国激光*, 2015, **42**(7): 0702008.
- [5] Zheng Y Q, An P L, Zhang W Y, et al. Frequency locking in resonator fiber optic gyro with analog loop circuit[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, **38**(10): 14–17.
郑永秋, 安盼龙, 张蔚云, 等. 模拟环路实现谐振式光纤陀螺的频率锁定[J]. *光通信技术*, 2014, **38**(10): 14–17.
- [6] Lei M, Feng L S, Zhi Y Z, et al. Current modulation technique used in resonator micro-optic gyro[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(2): 307–313.
- [7] Feng Z H, Fu S N, Tang M, et al. Investigation on agile bias control technique for arbitrary-point locking in lithium niobate mach-zehnder modulators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 66–71.
冯振华, 付松年, 唐明, 等. LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器任意偏置工作点锁定技术的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 66–71.
- [8] Duan R, Feng L S, Jiao H C, et al. Research on reducing the influence of laser frequency noise on resonator optical gyro[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(8): 2422–2427.
- [9] Jiao H C, Feng L S, Wang K, et al. Analysis of polarization noise in transmissive single-beam-splitter resonator optic gyro based on hollow-core photonic-crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(22): 27806.
- [10] Lefevre H C. The Fiber-optic Gyroscope[M]. Artech house, 2014.
- [11] Fiber pigtail S. FIBER LASER-NKT Photonics CO[DB/OL]. www.photonics.com/

Research on laser frequency locking technology based on temperature and PZT control

Lei Ming*, Yu Huaiyong, Fang Yuan, Xiang Qiang, Yang Yi, Zhang Lizhe

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



Fiber laser frequency locking system

Overview: Resonator fiber-optic gyro (RFOG) is a high-accuracy inertial rotation sensor based on the Sagnac effect, which can achieve tactical applications by using tens of meters or even a few meters of optical fibers. RFOG has attracted much attention for broad application prospects in high precision, miniaturization, and ultra-stability, and it could enable a new generation of optical inertial sensors. The central frequency of the laser to track the resonance frequency of the fiber ring resonator (FRR) is indispensable for a high-performance RFOG. However, the drift of the resonance frequency arising from FRR temperature fluctuation must be eliminated to maintain tracking accuracy, which is achieved by resonant frequency servo loop. In order to improve the frequency servo loop, PI controller, double integral term combined with traditional PI controllers, a multilevel laser frequency lock-in technique is proposed to improve the tracking accuracy. Several frequency locking schemes, based on the acousto-optic frequency shifter (AOFS) and piezoelectric (PZT) cylinder, are proposed to solve the frequency lock-in problems in RFOG. The studies mentioned above are aimed at the tracking accuracy. Actually, the tracking range is also important for RFOG. For example, resonance frequency of the FRR is greatly affected by ambient temperature. Typical temperature coefficient of FRR is up to $\sim\text{GHz}/^\circ\text{C}$. However, the temperature tuning response of the laser is too slow to satisfy the rapid change of the resonance frequency. For this reason, the PZT is used to realize the fast frequency tuning because of the high bandwidth, which can meet the need of fast frequency tuning. The laser temperature tuning ratio can up to $\sim\text{GHz}/^\circ\text{C}$ to satisfy the requirement of high bandwidth.

Aiming at the application requirement of resonator RFOG, a frequency tracking and locking control scheme based on laser temperature and PZT control is proposed in this paper. By taking advantages of the large range of laser temperature tuning as well as the high precision and high dynamicity of PZT tuning, the resonator frequency of the resonator cavity is realized by the central frequency of the fiber laser. Transmission resonator signal is simulated by mathematical methods. Hardware design and algorithm simulations of temperature and PZT control scheme are carried out. The influence of control parameters on locking stability in frequency tracking is analyzed. The development of laser frequency locking systems is assembled. The high-precision and long-time tracking of laser central frequency to resonator frequency of resonator cavity is realized, successful. The locking precision of frequency tracking is as low as 4.8×10^{-9} over one hour under normal temperature. The locking precision of frequency tracking is as low as 9.74×10^{-8} over 5.5 hours under variable temperature. The above research work has laid an important foundation for improving the long-term performance of resonator fiber optic gyroscopes.

Citation: Lei M, Yu H Y, Fang Y, *et al.* Research on laser frequency locking technology based on temperature and PZT control[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190523

Supported by Equipment Pre-research Project

* E-mail: 15210985670@163.com