T 型反馈网络在谐振式光纤陀螺频率锁定中的应用

李圣昆[1,2],郑永秋[1,2],安盼龙[1,2],李小枫[1,2],陈 浩[1,2],焦新泉[1,2,3],刘 俊[1,2],闫树斌[1,2]

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验,山西 太原 030051;
2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051;
3. 北京理工大学 自动化学院,北京 100081)

摘 要:谐振式光纤陀螺(R-FOG)的频率锁定是陀螺信号检测的关键技术,尤其在长时间的测试中,谐振频率的锁定稳定度决定了陀螺的输出性能。根据光纤环形谐振腔的传输理论,分析了其谐振特性及其一次谐波特性;搭建了 R-FOG 测试系统,采用正弦波相位调制解调技术实现谐振谱线一次谐波的输出;在分析由运算放大器构成的传统模拟比例积分(PI)电路的漂移误差源的基础上,给出了可以有效抑制漂移误差的 T 型反馈网络,应用到谐振式光纤陀螺的谐振频率锁定中,得到了较好的锁定效果,经 Allan 方差分析,谐振频率长时间(4000 s)的锁定稳定度优于 9×10^{-12}。

关键词:谐振式光纤陀螺; 频率锁定稳定度; 温度漂移; T 型反馈网络
中图分类号:TN219; TN815 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)04-1162-05

T-type feedback network applied in resonance frequency locking of resonator fiber optic gyro

Li Shengkun[1,2], Zheng Yongqiu[1,2], An Panlong[1,2], Li Xiaofeng[1,2], Chen Hao[1,2], Jiao Xinquan[1,2,3], Liu Jun[1,2], Yan Shubin[1,2]

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For resonator fiber optic gyro (R-FOG), resonance frequency locking is a key technique at detecting the gyro signal. The stability of resonance frequency locking determines the output performance of the gyro, especially in the long-term test. According to the transmission theory of fiber ring resonator (FRR), the resonance characteristics and the first harmonic were analyzed; the R-FOG system was set up. The first harmonic demodulation signal derive from the experiments using the sine wave phase modulation technique; the drift errors of traditional analog proportional-integral PI consisting of operational amplifiers were analyzed. On this basis, T-type feedback network was applied in resonance frequency locking of R-FOG. The drift error was suppressed effectively and better result

收稿日期:2013-08-06; **修订日期**:2013-09-08
基金项目:国家杰出青年科学基金(51225504);国家自然科学基金(91123036,61178058,61275166);总装基金(51309060101)
作者简介:李圣昆(1980-),男,讲师,主要从事数据采集、传感测试方面的研究。Email:lishengkun@nuc.edu.cn
通讯作者:闫树斌(1975-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光 MEMS 传感器件方面的研究。Email:shubin_yan@nuc.edu.cn

was obtained. The stability of resonance frequency locking for 4 000 s is superior to 9×10^{-12} by Allan variance analysis.

Key words: resonator fiber optic gyro; frequency locking stability; temperature drift; T-type feedback network

0 引　言

谐振式光纤陀螺(R-FOG)是基于 Sagnac 效应的高精度惯性器件。由载体旋转引起的谐振频差极其微弱,而其动态范围谐振频差都很大,在大动态范围的谐振频差下实现高精度的频差检测较困难[1-3]。如当光纤环形谐振腔直径为 15 cm、工作波长为 1 550 nm、动态范围谐振频差为 1 MHz 时,1°/h 的旋转角速率引起的谐振频率差仅为 0.32 Hz, 在 1 MHz 的动态跨度下直接检测 0.32 Hz 的微弱频差是相当困难的。目前,常用的解决方法是通过锁定光纤环形谐振腔内顺逆时针传输的光路中的一路信号,利用相关检测技术实现对另一路微弱信号的提取,因此,对光纤环形谐振腔频率的锁定技术的研究显得尤为重要[4-6]。

对 R-FOG 谐振频率的跟踪和锁定,采用数字锁频技术增加了设计的难度, 如采用嵌入式微处理器及相关语言加采集卡开发,成本高、开发周期长[7-8]。文中对传统模拟比例积分(PI)控制电路进行了改进,采用 T 型反馈电阻网络构成 PI 控制电路,反馈控制激光器的输出光波频率,与传统的模拟 PI 控制电路相比,克服了传统模拟电路的热漂移,有效抑制了 PI 反馈控制过程中的输出漂移, 获得了较为理想的锁频效果。且与数字环路锁频技术相比, 电路结构简单,整定参数易于控制,可以满足 R-FOG 系统的测试需求。

1 基本原理

1.1 谐振腔传输特性

图 1 给出了谐振式光纤陀螺系统结构框图。由激光器 Laser 发出的光通过光隔离器 ISO 经 50%耦合器 C1 分成功率相等的两束光,这两束光各自通过含有 $LiNbO_3$ 晶体的相位调制器 PM1、PM2 调相后进入耦合器 C2、C3, 再由谐振腔耦合器 C4 耦合进入光纤环形谐振腔 (FRR), 在谐振腔中形成逆时针(CCW)和顺时针(CW)相向传播的两个光束,通过耦合器 C4 耦合输出,和相应的输入光束发生多光束干涉后, 经耦合器 C3、C2 耦合到光电探测器 PD1、PD2。其中,CCW 方向传输的光束经 PD1 转换为电信号后经锁相放大器 LIA1 解调输出,得到用于反馈控制激光输出光波频率的误差信号, 该误差信号输入给比例积分(PI)模块,在 PI 的反馈控制下,最终的结果使误差信号为零, 此时的激光输出光波频率被锁定在 FRR 的 CCW 方向的谐振频率点处。此时 CW 方向的谐振光束经 PD2 给锁相放大器 LIA2 解调输出即为陀螺信号。其中信号发生器 SG1 和 SG2 分别产生不同频率的正弦波用来调制 PM1 和 PM2。

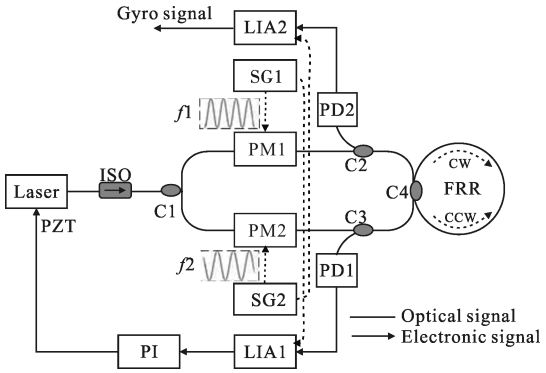

图 1 谐振式光纤陀螺系统结构框图

Fig.1 Schematic diagram of R-FOG system

为简化模型, 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[9-10]:

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

式中:Δf 为激光输出光波中心频率与光纤环形谐振腔谐振频率之差;FSR 为光纤环形谐振腔的自由谱宽;其他参数如下。

$$\begin{cases}\rho=1-\dfrac{(U-UQ-R)^2}{(1-\alpha_C)(1-Q)^2}\\ U=\sqrt{1-k_C}\sqrt{1-\alpha_C}\\ R=k_C(1-\alpha_C)\sqrt{1-\alpha_L}\\ Q=\sqrt{1-\alpha_L}\sqrt{1-k_C}\sqrt{1-\alpha_C}\end{cases} \quad (2)$$

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。

由于反馈信号利用的是传输函数的一次谐波分量，对公式求导可得解调信号。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 所示。

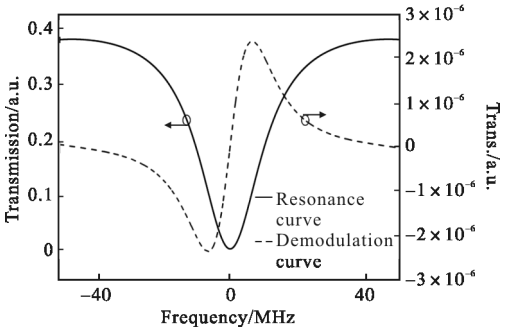

图 2 光纤环形谐振腔的仿真曲线

Fig.2 Simulated curves of FRR

图 2 中实线为光纤环形腔传输谱线，虚线为相应的解调曲线，其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，该实验系统正是将该解调曲线作为扫描激光器 PZT 的误差信号输入给 PI 反馈控制电路来进行谐振频率的跟踪和锁定的[11-12]。

1.2 运放漂移误差

利用解调曲线作为激光器的频率反馈控制信号，采用比例积分(PI)结构电路可实现该功能，用于 R-FOG 谐振频率锁定的传统模拟 PI 电路，其比例(P)部分和积分(I)部分的电路结构如图 3 所示。

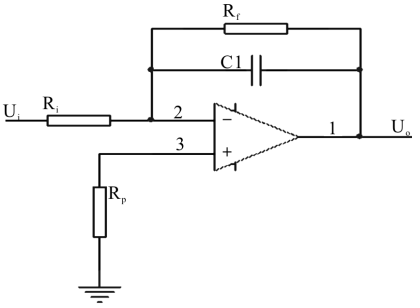

图 3 传统模拟比例(积分)电路结构

Fig.3 Traditional analog P or I circuit

在实际应用中，运算放大器的性能不能完全达到理想的特性，即由于输入偏置电流 I_{IB}、失调电流 I_{I0}、失调电压 U_{I0} 以及温度漂移的影响而产生误差，导致由运放构成的 PI 反馈控制电路输出漂移误差，影响谐振频率的锁定稳定度，尤其需要在长时间测试过程中的频率锁定。运放温度漂移误差分析模型如图 4 所示。

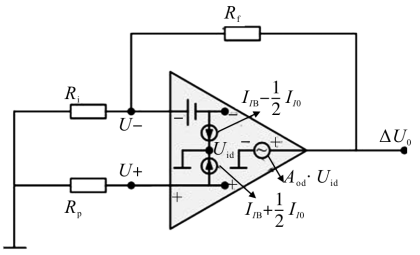

图 4 运放漂移误差分析模型

Fig.4 Analysis model for drift error of operational amplifier

通过令平衡电阻 $R_p=R//R_f$，和调零电路来消除由 I_{IB}、I_{I0} 和 U_{I0} 所带来的误差，则由失调电压温度漂移 ΔU_{I0} 和失调电流温度漂移 ΔI_{I0} 所引起的误差就成为 PI 漂移误差的主要来源，输出误差为[13]：

$$\Delta U_0=\left(1+\frac{R_f}{R}\right)(\Delta U_{I0}-R'\Delta I_{I0}) \tag{3}$$

式中：$\Delta U_{I0}=\frac{d\Delta U_{I0}}{dT}\Delta T$，$\Delta I_{I0}=\frac{d\Delta I_{I0}}{dT}\Delta T$。

整理上式，得最大误差电压值为：

$$\Delta U_{0max}=\left(1+\frac{R_f}{R}\right)\left|\frac{d\Delta U_{I0}}{dT}\Delta T\right|+R_f\left|\frac{d\Delta I_{I0}}{dT}\Delta T\right| \tag{4}$$

由上式可知，减少漂移误差的方法除选择失调漂移较小的运算放大器以外，还可以选用温度漂移较小的电阻。一般情况下较小阻值的电阻温度稳定性较好，但在实际应用中，为了提高电路获取信号的能力，输入电阻 R_i 的阻值应比较大，不能通过降低 R_i 的阻值来减小温度漂移误差，由于 R_f 的阻值一般大于 10 倍的 R_i，较大的阻值稳定性较差，长期的比例积分过程仍会产生较大的输出漂移，导致谐振频率锁定稳定度变差。改用 T 型反馈网络的比例积分电路如图 5 所示。

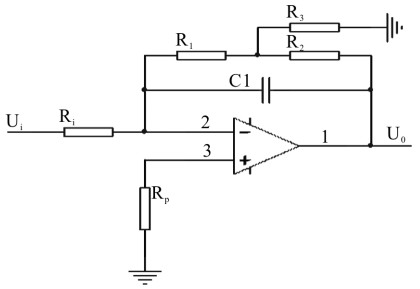

图 5 T 型反馈网络模拟比例(积分)电路结构

Fig.5 T-type feedback network for analog P or I circuit

由 Y-Δ 变换公式可得等效反馈电阻为：$R_f=R_1+R_2+\frac{R_1R_2}{R_3}$，可实现较小阻值电阻等效较大阻值电阻进行反馈，且 T 型电阻反馈网络提供了快速充放电的通道，在提高 PI 动态响应能力的同时可有效消除 PI 作用过程中长期累积的漂移误差，提高激光频率长期锁定的稳定度。

2 实验与讨论

按图1 所示搭建谐振式光纤陀螺测试系统，其中，激光器 Laser 为 NKT 公司的 Basik Module E15 模块，中心波长为 1 550 nm，线宽小于 1 kHz，PZT 扫描系数为 15 MHz/V；光电探测器 PD1、PD2 为 New Focus 公司的可调光电探测器 Model 2053，带宽为 10 MHz，最大转换增益为 18.8×10^6 V/W；采用 $LiNbO_3$ 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 Vpp。以锁定 CCW 方向的谐振频率为例，光纤环形谐振腔实测曲线如图 6 所示，其中，图 6(a)为由 PD1 探测到的谐振谱线，图 6(b)为其一次谐波解调曲线。

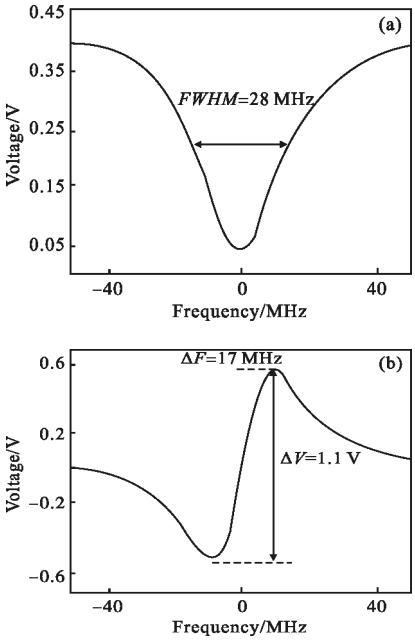

图 6 光纤环形谐振腔实测曲线

Fig.6 Measured curves of FRR

分别采用传统 PI 环路锁频技术和改进后 T 型反馈网络 PI 锁频技术对光纤环形腔谐振频率锁定测试，测试时间为 4 000 s，测试结果如图 7 所示，图 7(a)为传统模拟环路锁频结果，图 7(b)为改进后的 T 型反馈网络模拟环路锁频结果。可以看出，传统的环路锁频技术稳定度差，长时间测试出现失锁现象；而改进后的 T 型反馈网络锁频稳定度较高，长时间测试无失锁现象。

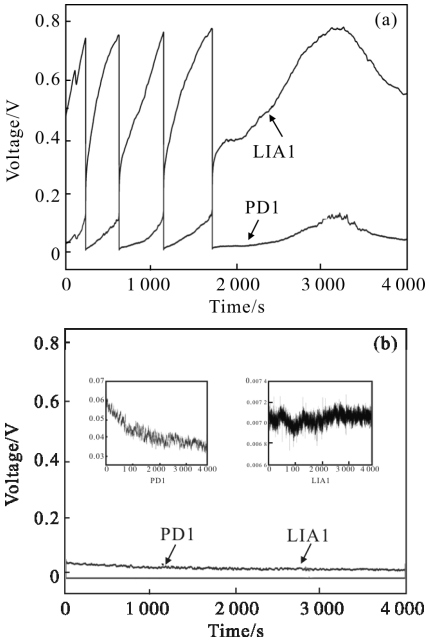

图 7 两种电路结构下 4 000 内锁频结果

Fig.7 Results of frequency locking using two circuit structures

锁定后的激光频率相对中心频率的起伏表征了激光器频率锁定的稳定度，以此作为误差项，采用 Allan 方差方法对锁频状态下的频率稳定性进行描述和分析。如图 8 所示，表征了受控激光器在传统模拟 PI 锁频状态下与 T 型反馈网络模拟 PI 锁频状态下的频率稳定度，其所用数据为受控激光器在锁定状态下 4 000 s 内的频率起伏变化。

由图 8 可以看出，两种 PI 结构电路在刚锁定的

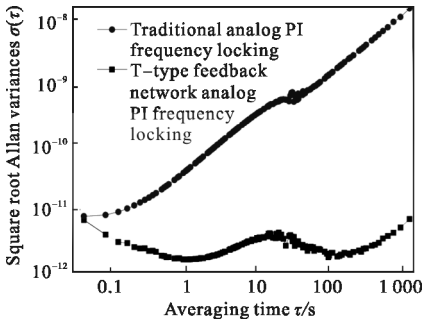

图 8 传统模拟 PI 与 T 型反馈网络模拟 PI 对谐振频率的锁定稳定度

Fig.8 Locking stability of traditional analog PI and T-type feedback network analog PI

状态下,频率稳定度的 Allan 标准差数值相近,为 9×10^{-12},随着平均时间的累加,传统模拟 PI 电路对谐振频率的锁定稳定度逐渐降低,而 T 型反馈网络对频率的锁定状态比较稳定,频率锁定的稳定度最小值可达 1×10^{-12}。这样长时间的锁定稳定度达到了与数字环路锁频同等的锁定效果。

3 结 论

对用于谐振式光纤陀螺(R-FOG)反馈控制激光频率的误差信号进行了理论分析和仿真,在分析由运算放大器构成的 PI 控制电路温度漂移误差来源及抑制措施的基础上,采用 T 型反馈网络构成的模拟 PI 控制电路实现了 R-FOG 谐振频率长时间高稳定度的锁定。与传统模拟 PI 控制电路的锁定效果相比,T 型反馈网络有效克服了电路中的温度漂移噪声,抑制了 PI 反馈控制过程中的输出漂移,长时间(4 000 s)对谐振频率的锁定无失锁现象,频率稳定度优于 9×10^{-12}。受光路中噪声的影响,长期的锁定过程仍有一定的频率波动,这将给陀螺输出带来误差,需要在后续实验中优化光路,克服光路中瑞利背散射、光克尔等噪声,并对获取的数据进行算法补偿处理,以实现陀螺高灵敏度、高稳定性的输出。

参考文献:

[1] Ma Huilian, Lu Xiao, Yao Linzhi, et al. Full investigation of the resonant frequency servo loop for resonator fiber-optic gyro [J]. ***Applied Optics***, 2012, 51(21): 5178-5185.

[2] Lei Ya, Feng Lishuang, Zhi Yinzhou, et al. Current modulation technique used in resonator micro-optic gyro [J]. ***Applied Optics***, 2013, 52(2): 307-313.

[3] Yan Shubin, Zhao Min, Liu Zheng, et al. All-solid integrated optical waveguide gyro [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(5): 921-925. (in Chinese)
闫树斌, 赵敏, 刘正, 等. 芯片级全固化集成光波导陀螺[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 921-925.

[4] Suzuki K, Takiguchi K, Hotate K. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2000, 18(1): 66-72.

[5] 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)
杨雪锋, 郑阳明, 马慧莲, 等. 谐振式光纤陀螺环路锁频技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 990-993.

[6] Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, et al. Frequency tracking and locking method used in resonator micro-optic gyro [J]. ***Sensor Letters***, 2012, 10(1-2): 14-17.

[7] Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao, et al. Frequency stabilization of an external cavity diode laser based on LabVIEW [J]. ***Journal of Optoelectronics·Laser***, 2005, 16(3): 255-258. (in Chinese)
董磊, 马维光, 尹王保, 等. 基于 LabVIEW 的外腔二极管激光器稳频实验[J]. 光电子·激光, 2005, 16(3): 255-258.

[8] Ji Zhonghua, Zhang Ranran, Ma Jie, et al. Long-term frequeney stabilization with digital servo system [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2009, 36(4): 804-808. (in Chinese)
姬中华, 张冉冉, 马杰, 等. 数字伺服系统实现激光器频率长期锁定[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 804-808.

[9] 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)
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.

[10] Ying Diqing, Ma Huilian, Jin Zhonghe. Ringing phenomenon of the fiber ring resonator [J]. ***Applied Optics***, 2007, 46(22): 4890-4895.

[11] Black E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. ***American Journal of Physics***, 2001, 69(1): 79-87.

[12] Koichi Takiguchi, Kazuo Hotate. Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro [J]. ***IEEE Photonics Echnology Letters***, 1991, 3(7): 679-681.

[13] She Qianshun, Zhao Hongyun, Su Hong, et al. The development of a long-time current integration digitizer [J]. ***Nuclear Techniques***, 2010, 33(11): 867-870. (in Chinese)
佘乾顺, 赵红赟, 苏弘, 等. 长时间电流积分数字仪的设计[J]. 核技术, 2010, 33(11): 867-870.