

文章编号: 0258-7025(2007)06-0814-06

谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术

杨志怀, 马慧莲, 郑阳明*, 金仲和

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

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测量旋转角速率的一种新型光学传感器。利用数字调制、解调技术实现陀螺系统的闭环锁定,可以克服模拟电路的热漂移,使系统更加简单灵活。以谐振频率偏差作为研究对象,提出了一阶惯性环节的最简闭环锁定分析模型。利用该简化模型,对数字闭环系统中的频率反馈跟踪技术进行了研究,得到了在一定积分时间常数下环路的最佳增益系数,实现了环路的快速、稳定锁定,并在实验中得到进一步的验证。

关键词 光电子学;谐振式光纤陀螺;数字闭环系统;频率锁定技术

中图分类号 TN 911.74; TN 815; TP 212.14 **文献标识码** A

Frequency Locking Technique in Digital Closed-Loop Resonator Fiber Optic Gyro

YANG Zhi-huai, MA Hui-lian, Zheng Yang-ming, JIN Zhong-he

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Resonator fiber optic gyro (R-FOG) is a novel optical sensor whose resonant frequency is changed due to the Sagnac effect. The digital closed-loop operation can eliminate the thermal drift in analog circuits and it will make the R-FOG system more flexible. Taking the resonant frequency deviation as the research object, a simple analytical model for the closed-loop locking technique is presented based on one-order inertial loop operation. Frequency locking technique in the digital closed-loop operation system is then studied. The optimum loop gain is achieved under a certain integral time constant. Using above optimum parameters, the loop is locked quickly and stably. Furthermore, the analysis is verified by experiments.

Key words optoelectronics; resonator fiber optic gyro; digital closed-loop system; frequency locking technique

1 引言

谐振式光纤陀螺(R-FOG)是基于光学 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]。在谐振式光纤陀螺中,光纤环形谐振腔(以下简称谐振腔)是其核心敏感部件,由于 Sagnac 效应是一种极其微弱的效应,由旋转角速率引起的谐振腔顺时针(CW)和逆时针(CCW)光路的谐振频率差(ΔF)极其微小。如当谐振腔直径为10 cm,工作波长为1.55 μm 时,1°/h的旋转角速率引起的谐

振频率差仅为0.2 Hz左右,而激光器的输出光频率高达 10^{14} Hz。因此,在谐振式光纤陀螺系统中,直接对顺时针/逆时针光路的谐振频率差进行测量较困难。解决方法是通过输入谐振腔顺时针/逆时针光路的光信号进行调制,利用解调信号分别反馈控制相位调制器的调制频率和激光器频率,以跟踪谐振腔顺时针/逆时针光路谐振频率的变化。

新的高性能光纤陀螺普遍倾向于采用数字闭环检测方案^[2~4],相对于模拟检测技术,数字检测技术可以克服模拟检测的热漂移,使系统更加灵活。对

收稿日期:2006-11-08;收到修改稿日期:2007-01-26

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20060335064)资助项目。

作者简介:杨志怀(1982—),男,天津人,博士研究生,目前主要从事数字信号处理方面的研究。

导师简介:金仲和(1970—),男,浙江人,教授,博士生导师,主要从事惯性传感器及微小卫星方面的研究。

E-mail:jinzh@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:zhengyimsun@163.com

于干涉式光纤陀螺(I-FOG),为了达到高精度(比如导航级应用),需要的光纤环长度在1 km以上,较长的光纤会导致系统温度漂移噪声的增大,而达到同样精度的谐振式光纤陀螺在理论上只需使用5~10 m长的光纤环,从而可以降低系统的温度漂移噪声^[3]。谐振式光纤陀螺的难点在于实现对谐振腔顺时针和逆时针光路谐振频率的精确跟踪锁定,这也是检测 ΔF 的关键。利用双频率组合调制技术,Hotate等^[3]提出了数字调制、解调的数字谐振式光纤陀螺系统构架,沈庆等^[5,6]对数字谐振式光纤陀螺系统中的谐振频率跟踪和反馈算法进行了研究,然而对于如何设计和优化反馈控制环路参数,未有针对性的研究。论文对谐振式光纤陀螺数字闭环系

统的频率反馈跟踪技术进行了研究,在分析闭环控制系统模型的基础上,提出了利用一阶惯性环节实现的最简闭环锁定方案。反馈参数的优化是环路锁定的关键,通过对系统环路的仿真和分析,优化了系统的反馈参数,应用于基于数字信号处理器(DSP)的光纤陀螺系统中,实现了环路的快速、稳定锁定。

2 检测原理

图1是基于双频率锯齿波组合调制的谐振式光纤陀螺数字系统结构框图。由激光器发出的激光(频率为 f_{laser})经Y分支器分成功率相等的两束光,这两束激光分别经过相位调制器 PM_2 和 PM_1 进行

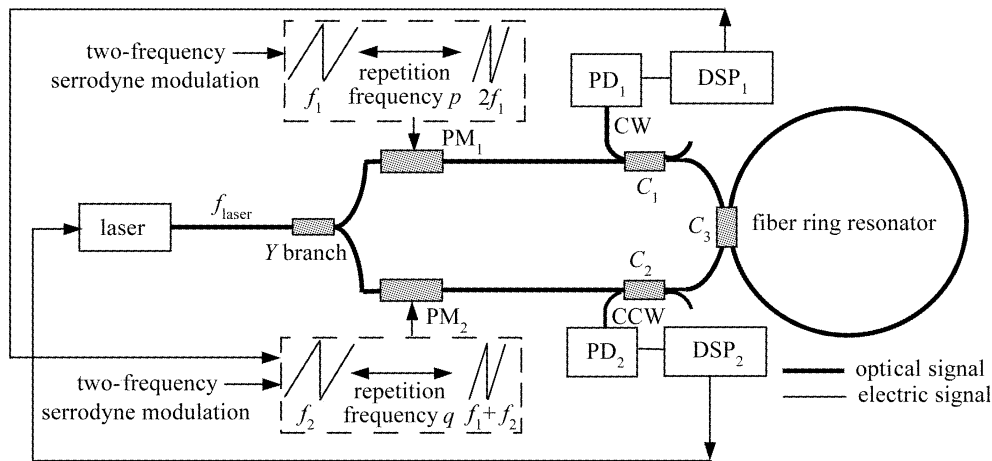


图1 谐振式光纤陀螺数字系统结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of the digital serrodyne modulation R-FOG system

移频,再由谐振腔耦合器 C_3 耦合进入谐振腔,形成顺时针和逆时针的两个谐振光束,分别由耦合器 C_1 和 C_2 耦合到光电探测器 PD_1 和 PD_2 。根据Sagnac效应,当谐振腔相对于惯性参照系转动时,腔内顺时针和逆时针方向传播的光束会产生正比于旋转角速度 Ω 的谐振频率差^[1]

$$\Delta F = F_r^{\text{CW}} - F_r^{\text{CCW}} = \frac{D}{n\lambda}\Omega, \quad (1)$$

式中 F_r^{CW} 和 F_r^{CCW} 分别为顺时针和逆时针光束的第 r (r 为整数)次谐振频率, D 为谐振腔直径, n 为光纤折射率, λ 为工作波长。施加在相位调制器 PM_1 和 PM_2 上的控制信号是采用两种频率的锯齿波组合调制,其中施加在 PM_1 上的是频率为 f_1 和 $2f_1$ 的组合调制信号,施加在 PM_2 上的是频率为 f_2 和 $f_1 + f_2$ 的组合调制信号,这两种组合调制信号的重复频率分别为 p 和 q ,如图1所示。其中,调制频率 f_1 为固定频率,调制频率 f_2 则反映旋转角速度 Ω 的变化。

由线性相位斜波调制技术^[3]可知,由于频率可看作相位的一次导数,当施加在相位调制器上的锯齿波复位电压等于相位调制器产生 2π 相移时的调制电压时,相位斜波调制等同于一频移,并且频移量等于该锯齿波的斜率除以 2π 。因此对逆时针光束来说,这种调制方式将使激光依次产生 f_1 及 $2f_1$ 的移频。反馈调节激光器频率,使逆时针光束处于谐振状态,探测器 PD_2 输出一直流信号,如图2虚线所示。此时逆时针光路的谐振频率 F_r^{CCW} 满足

$$F_r^{\text{CCW}} = f_{\text{laser}} + \frac{f_1 + 2f_1}{2}, \quad (2)$$

(2)式称为逆时针光束的锁定条件。当谐振频率偏差 $\Delta f = F_r^{\text{CCW}} - (f_{\text{laser}} + \frac{3}{2}f_1) \neq 0$ 时, PD_2 输出为一方波信号,如图2实线所示,方波幅度反映 $(f_{\text{laser}} + \frac{3}{2}f_1)$ 偏离 F_r^{CCW} 的程度。

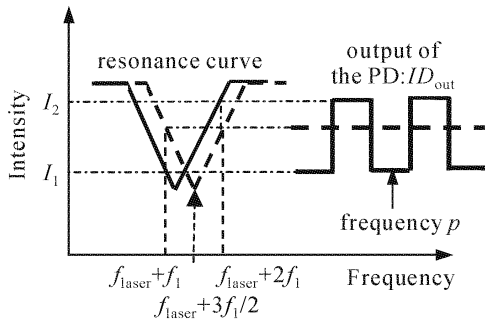


图 2 探测器输出波形

(实线和虚线分别表示处于谐振非锁定状态和谐振锁定状态)

Fig. 2 Photodiode output

(the solid and broken lines indicate the unlock and lock to the resonance point respectively)

改变施加在 PM₂ 上的锯齿波调制频率 f_2 , 使顺时针光路也处于谐振状态, 则顺时针光路的谐振频率 F_r^{CW} 满足

$$F_r^{CW} = f_{laser} + \frac{(f_1 + f_2) + f_2}{2}, \quad (3)$$

(3)式称为顺时针光束的锁定条件。同理 PD₁ 输出的方波幅度反映 $(f_{laser} + \frac{2f_1 + f_2}{2})$ 偏离 F_r^{CW} 的程度。

从 PD₂ 和 PD₁ 出来的方波信号分别通过 DSP₂ 和 DSP₁, 提取各自谐振频率偏差 Δf 用以控制激光器输出频率 f_{laser} 和调制频率 f_2 的大小, 从而使逆时针和顺时针光路锁定在各自的谐振频率上, 此时顺时针和逆时针光束的谐振频率差可表示为

$$\Delta F = F_r^{CW} - F_r^{CCW} = f_2 - f_1. \quad (4)$$

由(4)式可知, 通过检测 f_2 的大小, 就可以获得谐振腔旋转角速度 Ω 。在锁定谐振频率的过程中, 不同的反馈参数将产生不同的谐振频率跟踪锁定效果。如何优化反馈系统参数是实现闭环系统频率跟踪锁定的关键。

3 建模仿真

图 3 给出了在一个自由频谱(FSR)范围内, 探测器归一化输出方波幅度与谐振频率偏差 Δf 的关

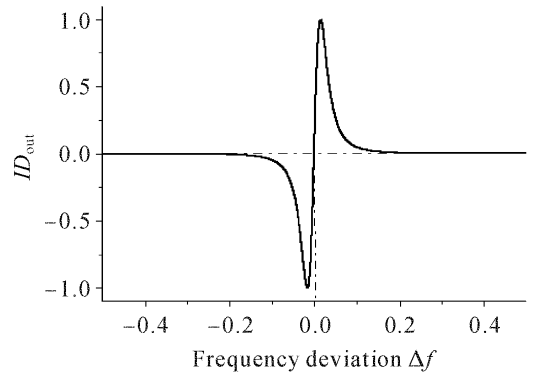


图 3 探测器归一化输出方波幅度与谐振频率偏差的关系

Fig. 3 Relationship between the unitary PD output and the resonance frequency deviation

系仿真曲线。在谐振点 ($\Delta f = 0$) 附近, 曲线具有很好的线性, 这是谐振式光纤陀螺的工作区间, 称为近似线性工作区。对于谐振频率偏差 Δf 位于近似线性工作区外的情况, 经过环路多次反馈可将频差 Δf 拉入近似线性区^[6]。

3.1 数字闭环系统模型

谐振式数字闭环光纤陀螺是一个离散控制系统, 需用离散传递函数的方法描述其系统特性。图 4 给出了闭环逆时针支路的功能结构框图。激光器输出频率由初始输出频率 f_0 加上反馈频移 $k_1 V_F$ (k_1 为激光器频率调制系数, V_F 为解调反馈电压) 后变为 $f_0 + k_1 V_F$, 经过 PM₁ 受到周期为 p 的双频率组合锯齿波调制后进入谐振腔, 最终在光电探测器 PD₂ 处得到含噪声的方波信号, 方波信号幅度反映谐振频率偏差 Δf 的大小。该方波信号经过前置放大器 (amplifier)、带通滤波器 (band pass filter) 进行预放大、消除高频噪声和低频漂移, 使之满足模数转换器 A/D 的采样要求。在数字信号处理器内部采用幅度为 ± 1 的同步方波解调采样方波, 得到反映被测方波幅度大小的参量 $\Delta I, \Delta I$ 经过数字控制器 (digital controller)、数模转换器 D/A 和比例积分器 PI 转换为控制电压 V_F , 将 V_F 反馈回激光器, 控

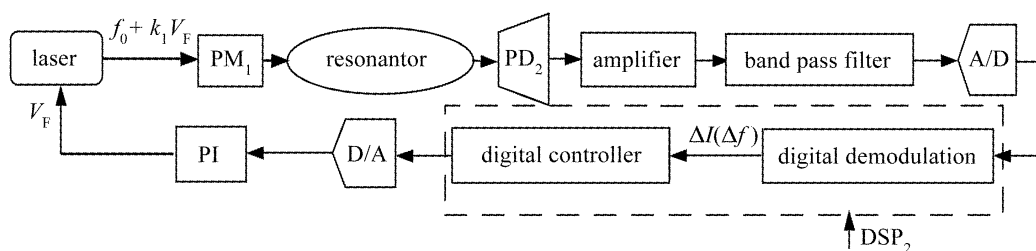


图 4 逆时针支路数字闭环反馈控制结构框图

Fig. 4 Schematic diagram of digital closed-loop feedback in counter clockwise (CCW) circuit

制激光器进行频移使得 $\Delta f \rightarrow 0$, 从而实现环路谐振频率锁定。综上所述, 环路的解调过程对于反馈参量 Δf 而言, 可以综合为一个比例环节 k , 即为环路总增益系数。

用一阶惯性环节代替环路中的比例积分器 (PI), 此惯性环节的传递函数为

$$F(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (5)$$

式中 τ 为积分时间常数。应用带虚拟零阶保持器的 Z 变换法^[7], 取采样时间为 T_0 , 得到激光器离散脉冲传递函数

$$F(z) = Z\left(\frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} \frac{1}{\tau s + 1}\right) = \frac{(1 - e^{-T_0/\tau})}{(z - e^{-T_0/\tau})}. \quad (6)$$

将环路在光路传输部分的延迟、数字控制器计算时间延迟以及其他硬件延迟综合成一个单位延迟环节 z^{-1} , 图 5 给出了数字闭环逆时针支路的传递函数框图。利用图 5, 可以进一步得到逆时针支路总的闭环传递函数和误差脉冲传递函数

$$G(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{kz^{-2}D(z)F(z)}{1 + kD(z)F(z)z^{-2}}, \quad (7)$$

$$G_e(z) = \frac{E(z)}{R(z)} = \frac{1}{1 + kD(z)F(z)z^{-2}}. \quad (8)$$

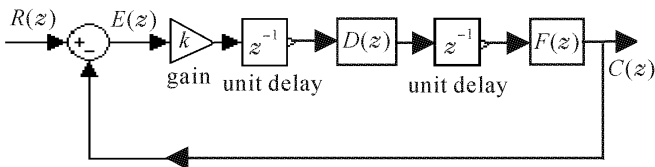


图 5 数字闭环逆时针支路传递函数框图

Fig. 5 Block diagram of transfer function CCW digital closed-loop

3.2 环路参数分析

由自动控制理论^[8]可知, 在反馈控制环路中加入积分环节可以获得较好的动态性能, 同时可克服系统的稳态误差。对于一阶惯性环节 $F(s)$, 积分时间常数 τ 反映积分能力, 同时还将影响系统的跟踪速度和滤波性能。 τ 越小跟踪速度越快, 但对应低通滤波器截止频率就高, 噪声抑制能力相应减弱。因此环路跟踪速度和噪声抑制能力是一对矛盾, 需要合理选择 τ 的大小。

取数字控制器 $D(z) = 1$, 积分时间 $\tau = 1$ s, 采样时间 $T_0 = 1/80$ kHz, 代入(7)式, 得到系统开环离散传递函数为

$$G_k(z) = kD(z)F(z)z^{-2} = \frac{k(1 - e^{-T_0})}{(z^3 - z^2 e^{-T_0})}. \quad (9)$$

图 6 为根据(9)式画出的反映闭环系统极点随环路增益系数 k 变化的轨迹图, 称为根轨迹^[7]。由图 6 可知, 根轨迹分支数为 3, 分别为 p_1 , p_2 和 p_3 。随着环路增益系数 k 由 0 趋于 ∞ , p_3 由原点沿负实轴趋于 ∞ ; p_1 和 p_2 的起点分别为 $(e^{-T_0/\tau}, 0)$ 和原点, p_1 , p_2 沿正实轴相向变化, 相交于实轴点 $P_0(0.667, 0)$ 后, 离开实轴分别由不同方向趋于 ∞ 。

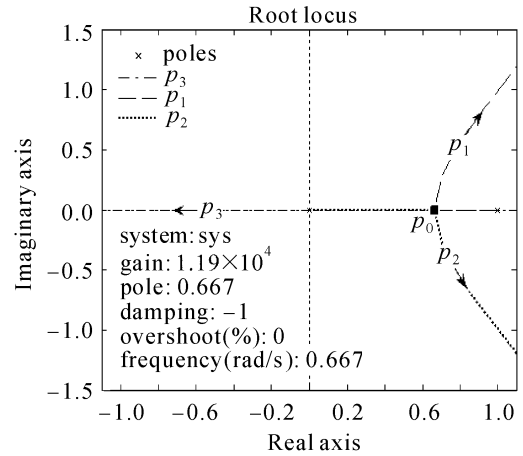


图 6 系统根轨迹图

Fig. 6 Root locus of system

对于稳定的线性数字控制系统, 其闭环特征方程的根应位于 Z 平面的单位圆内。由数字控制理论可知^[7], Z 平面单位圆内正实轴上的极点对应的暂态分量单调衰减, 且越靠近原点衰减越快; 离开实轴的极点, 其暂态响应将出现衰减的欠阻尼振荡; 单位圆内负实轴上极点的暂态分量为正负交替衰减的振荡, 离原点越近衰减越快。由图 6 可知, 根轨迹 p_1 , p_2 分支在实轴交点 P_0 处的增益系数为 1.19×10^4 。因此, 为减小系统暂态分量, 环路增益系数 k 应小于 P_0 处的增益系数, 相应地, 称 P_0 处的增益系数为阈值点增益系数。

图 7 给出了不同增益系数和积分时间常数情况下, 环路锁定过程的阶跃响应仿真结果。其中图 7(a)为积分时间 $\tau = 1$ s, k 分别为 15000, 3000 和 1000 时的环路锁定过程; 图 7(b)为 $k = 3000$, τ 分别为 0.5 s 和 1 s 时的锁定过程。由图 7 可见, 环路增益系数 k 越大, 积分时间常数 τ 越短, 环路锁定越快; 当环路增益系数 k 大于阈值点增益系数时, 系统锁定过程出现了超调现象。

为进一步研究环路增益系数对锁定时间的影响, 图 8 给出了当积分时间常数 τ 分别为 0.4 s, 1 s 和 2 s 时环路锁定时间 t_s 和环路增益系数 k 的关系。由图 8 可知, 当环路增益系数 k 较小时, 锁定时间 t_s

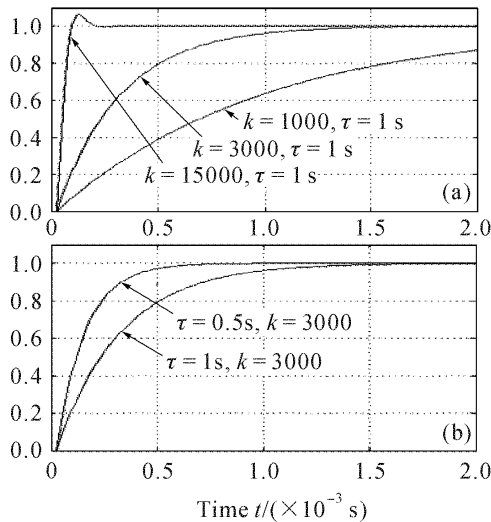
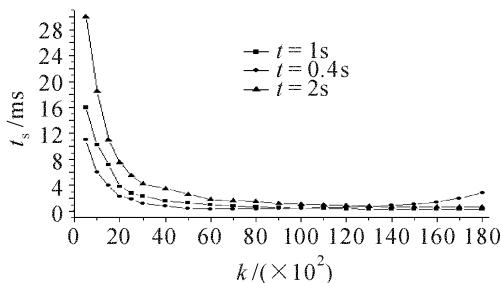


图7 闭环锁定过程仿真

Fig. 7 Simulation of locking process in closed loop

图8 环路锁定时间 t_s 和环路增益系数 k 的关系Fig. 8 Relationship between locked time t_s and loop gain k

将随环路增益系数 k 的增加而迅速减小;当环路增益系数 k 增大到一定值后,积分时间 t_s 随 k 的增大而变化缓慢;当继续增大环路增益系数 k 时,其中 $\tau = 0.4$ s 的锁定时间首先出现了 t_s 随 k 增大而增大的现象。这是由于随着环路增益系数 k 的增大,积分时间常数较小的系统即 $\tau = 0.4$ s 的系统首先出现超调现象,从而导致了锁定时间的增大。因此环路增益系数 k 的选择要结合积分时间常数 τ 进行优化,在保证系统锁定时间满足要求的情况下,尽量选择较小的 k 值,以保证环路稳定。

在谐振式光纤陀螺系统中,系统误差的产生有诸多因素,如背向散射、偏振态、克尔(Kerr)效应和锯齿波 2π 调制电压不精确等引起的系统误差^[9~12]。根据以上对反馈环路的分析,可以求出单位阶跃输入条件下的控制系统稳态误差。单位阶跃函数为

$$R(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}, \quad (10)$$

根据终值定理,阶跃响应稳态误差为

$$e_{ss}(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) \cdot \frac{1}{1 + G_k(z)} \cdot R(z), \quad (11)$$

将(9),(10)式代入(11)式,可得

$$e_{ss}(\infty) = \frac{1}{1 + k}, \quad (12)$$

由(12)式可知,环路增益系数 k 越大,系统稳态误差越小。在稳态误差满足系统要求的情况下,结合对 k 值选取的分析,就可以确定环路增益系数 k 的优化值。

4 实验测试

当对激光器输出光频率进行扫描时,用示波器分别在 PD_2 和 DSP_2 处观察逆时针支路的谐振曲线和解调曲线。取 $\tau = 1$ s 条件下,用幅度为 220 mV 的 1 Hz 锯齿波扫描激光器,得到逆时针支路的谐振曲线和开环解调曲线,如图 9(a) 所示。扫描锯齿波斜率为 220 mV/Hz,测得解调曲线线性区斜率约为 6.4×10^5 mV/Hz,此时系统环路增益系数 k 为 2909,图 9(b) 给出了逆时针支路的锁定过程,实际锁定时间约为 2.3 ms。对比图 7 的仿真结果,当 $k = 3000, \tau = 1$ s 时环路锁定时间约为 1.9 ms,实验测试和仿真结果基本相吻。



图9

(a) 逆时针支路的谐振曲线和解调曲线;
(b) 实验测得的逆时针支路的锁定过程

Fig. 9

(a) resonance and demodulation curves for CCW lightwave;
(b) measured locking process for CCW lightwave

5 结 论

通过建立离散系统的简化控制模型,分析了闭环系统的传递函数,提出了利用一阶惯性环节实现积分作用的谐振式光纤陀螺数字闭环锁定方案,该方案简单易行,只需调制很少的参数就能够实现环路的快速锁定。通过仿真,优化了系统参数,选择合适的环路增益系数和惯性环节积分时间常数,应用于实际谐振式光纤陀螺系统,顺利实现了谐振频率的快速稳定锁定。

参 考 文 献

- Hervé C. Lefèvre. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. Zhang Guicai, Wang Wei translated. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 107~125
Hervé C. Lefèvre. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王巍译. 北京: 国防工业出版社, 2002. 107~125
- Shen Qing, Yu Faxin, Ma Huilian *et al.*. All digital close-loop operation of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(3):810~813
沈庆, 郁发新, 马慧莲 等. 谐振式光纤陀螺全数字闭环方案 [J]. 传感技术学报, 2006, **19**(3):810~813
- Kazuo Hotate, Michiko Harumoto. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(3): 466~473
- Mauricio Ribes, Guenter Spahlinger, Manfred Kemmler. 0.1 deg/h DSP-controlled fiber optic gyroscope [C]. *SPIE*, 1996, **2837**:199~206
- Shen Qing, Ma Huilian, Zhou Kejiang *et al.*. Study of algorithm for all digital close-loop resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **26**(8): 143~146
沈庆, 马慧莲, 周柯江 等. 谐振式光纤陀螺全数字闭环方案的算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(8):143~146
- 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):1001~1105
马慧莲, 金仲和, 丁纯 等. 谐振腔光纤陀螺信号检测方法的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(8):1001~1005
- Lü Shuping, Li Wenxiu. Digital Control System[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2002. 71~74
吕淑萍, 李文秀. 数字控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002. 71~74
- Mei Xiaorong. Principles of Automatic Control [M]. Beijing: Science Press, 2002. 149~154
梅晓榕. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 149~154
- Kazuo Hotate, Koichi Takiguchi, Akira Hirose. Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(1):75~77
- Kazuo Hotate. Polarization problem and countermeasures in passive/active resonator fiber optic gyros [C]. *SPIE*, 1994, **2292**:227~239
- Katsumi Iwatsuki, Kazuo Hotate, Minoru Higashiguchi. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(6):645~651
- Lee K. Strandjord, Glen A. Sanders. Effects of imperfect serrodyne phase modulation in resonator fiber optic gyroscopes [C]. *SPIE*, 1994, **2292**:272~282



• 广告 •

最佳全球供应商



LBO 专利号: 4,826,283 美国专利号
881,02084.2 中国专利号
2023845 日本专利号



我司提供以下类型晶体:

- 非线性光学晶体
- 激光晶体
- 声光及电光晶体
- 双折射晶体
- 光折变晶体
- 晶体组件
- X-射线晶体
- 光学件



BBO



BIBO



KTP



Nd:YVO₄



胶合晶体



键合晶体



蓝光组件



光胶晶体

福建福晶科技股份有限公司

FUJIAN CASTECH CRYSTALS, INC.

地址:福建省福州市杨桥西路155号 邮编:350002
TEL:86-591-83710533 FAX:86-591-83711593
http://www.castech.com E-mail:sales@castech.com