

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514488

基于自适应相位调制的光纤陀螺动态误差抑制研究*

谿子婧¹, 刘欣², 徐江燕², 杨柳¹, 郜中星¹, 张勇刚¹

(1. 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院 哈尔滨 150001; 2. 青岛智腾微电子有限公司 青岛 266000)

摘要:针对目前光纤陀螺(FOG)在大动态条件下存在动态误差进而影响其动态性能的问题,提出了一种基于自适应相位调制的光纤陀螺动态误差抑制方法。首先,对 FOG 闭环工作系统进行原理分析与系统建模,推导出 FOG 闭环系统的开环与闭环传递函数,得出 FOG 跟踪角加速度输入的跟踪误差较大;其次,通过随机游走系数分别分析了 FOG 输出信号噪声及带宽与相位调制深度的关系;然后,建立相位调制深度与角加速度的自适应关系模型,并按照该自适应关系模型搭建 FOG 闭环工作系统的仿真模型,对自适应相位调制方法进行仿真验证与分析。最后,按照建立的相位调制深度与角加速度的自适应关系模型,在 FOG 样机上实现该自适应相位调制方法,并与传统的固定相位调制方法进行对比,对 FOG 样机分别施加两种不同的相位调制方法,进行静态和动态的指标测试及分析。实验结果表明:施加自适应相位调制方法与施加传统相位调制方法的随机游走系数均为 $0.006^\circ/\sqrt{\text{h}}$,且对角加速度输入的跟踪误差降低约 66.73%。该方法不仅可以实现在保证 FOG 静态性能的同时有效提升动态性能,而且能够满足不同动态情况下的带宽要求,对提升 FOG 在复杂环境下的适用性具有重要的理论指导意义与工程应用价值。

关键词: 光纤陀螺;自适应相位调制;动态误差;随机游走系数

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on dynamic error suppression method of fiber optic gyroscope based on adaptive phase modulation

Huo Zijing¹, Liu Xin², Xu Jiangyan², Yang Liu¹, Gao Zhongxing¹, Zhang Yonggang¹

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Qingdao Zhiteng Microelectronics Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: To address the error degradation of fiber-optic gyroscopes (FOGs) under high-dynamic conditions, which adversely impacts their performance, this study proposes an adaptive phase-modulation based dynamic error suppression method. Firstly, the principal analysis and system modeling of the FOG closed-loop operating system are conducted to derive the open-loop and closed-loop transfer functions, revealing significant tracking errors for angular acceleration inputs. Secondly, the relationships between the output signal noise, bandwidth of the FOG, and phase modulation depth are analyzed using the random walk coefficient. Subsequently, an adaptive relationship model between phase modulation depth and angular acceleration is established, and a simulation model of the FOG closed-loop operating system is constructed based on this model to validate and analyze the adaptive phase modulation method through simulation. Finally, the adaptive phase modulation method is implemented on a FOG prototype according to the established model and compared with the traditional fixed phase modulation method. Static and dynamic performance tests and analyses are conducted on the FOG prototype under these two different phase modulation methods. The experimental results demonstrate that both the adaptive and traditional phase modulation methods yield a random walk coefficient of $0.006^\circ/\sqrt{\text{h}}$, while the adaptive method reduces the tracking error for angular acceleration inputs by approximately 66.73%. This approach not only effectively enhances the dynamic performance of the FOG while maintaining its static performance but also meets the bandwidth requirements under various dynamic

收稿日期: 2025-09-11 Received Date: 2025-09-11

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3906400)、国家自然科学基金(62273115)、山东省重点研发计划(2022CXGC020408)项目资助

conditions, offering significant theoretical guidance and engineering application value for improving the adaptability of FOG in complex environments.

Keywords: FOG; adaptive phase modulation; dynamic error; RWC

0 引言

光纤陀螺(fiber optic gyroscope, FOG)作为惯性导航系统的核心传感器,凭借纯固态无运动部件、工艺简单、精度覆盖范围广、动态范围大、启动快、寿命长等优点^[1],已成为航空航天、国防装备等高精度定位领域的关键器件^[2-3]。近年来,光纤陀螺在高精度、可靠性和小型化方面取得了显著进展^[4-7]。然而,高机动性光纤陀螺惯性导航系统的机动性强、动态范围大,其角速度跟踪误差较大,导致长时间累积角误差较大,陀螺整体动态性能不足,传统的相位调制方法不能满足大动态光纤惯导系统的精度要求^[8-9]。

在惯性器件领域,相关学者针对动态性能提升的问题,开展了基于自适应策略的相关研究。例如,文献[10]针对时栅角位移传感器提出了一种基于自适应卡尔曼滤波的动态误差抑制方法,有效抑制了动态谐波误差。文献[11]分析了全角半球谐振陀螺闭环控制回路的系统带宽对动态特性的影响。文献[12]将离散滑模控制应用于振动陀螺中,减小了驻波进动角的漂移误差和标度因数误差。文献[13]利用改进的 Sage-Husa 滤波算法对微机电系统(micro electro mechanical, MEMS)陀螺阵列的输出信号进行降噪。文献[14]提出了一种基于小波变换的光纤陀螺去噪算法来自适应地校准阈值,无需预先了解动态特性即可实时运行。

目前,针对大动态环境下光纤陀螺的角运动测量误差较大的问题,相关学者^[15]提出了回路校正技术,但该技术会产生振动零偏效应,通过约束回路增益降低振动零偏效应的方法在一定程度上限制了光纤陀螺的带宽。而对于增加比例-积分控制器的回路校正技术^[16],会由于执行器或积分器饱和而导致稳态误差无法消除,且系统对比例-积分控制器参数的选择极为敏感,若参数选择不当,会导致系统稳定性、动态性能和鲁棒性下降,需频繁调整参数以平衡稳定性和动态性能。

该研究针对大动态工作环境下的光纤陀螺,提出了一种基于自适应相位调制的误差抑制方法。传统的相位调制方法对于不同的工作环境均采用固定的相位调制深度,当调制相位较小时,陀螺在静态下输出信号的噪声较大;当调制相位较大时,则陀螺动态下输出信号的跟踪误差较大且带宽较小。该自适应相位调制方法实现以角加速度为参考,实时自适应调整相位调制深度,以适应不同的动态情况,满足静态时输出信号噪声小而动态时跟踪

误差小、带宽大的需求。

综上所述,与传统的相位调制方法相比,该自适应相位调制方法的优势在于:1) 根据光纤陀螺的动态环境自适应调整相位调制深度,能够有效降低光纤陀螺的动态误差,有效提升需长时间运行的光纤惯导系统的测量精度;2) 在保证光纤陀螺静态仍处于较低噪声水平的同时,有效减小大动态环境下光纤陀螺的跟踪误差并提升带宽,解决了传统方法无法兼顾静态性能与动态性能的问题;3) 本研究所提出的技术适用性强,无需增加额外器件和复杂算法,能够在抑制动态误差的同时,满足光纤陀螺的集成化、小型化需求。

1 光纤陀螺大动态环境下的误差分析

光纤陀螺闭环工作系统的基本结构如图 1 所示。光纤陀螺分为光路和电路两部分,其中光路部分包括光源、耦合器、Y 波导、光纤环和光电探测器;电路部分包括前置调理电路(主要由前置放大器和滤波器组成)、信号处理单元、高精度模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)、数模转换器(digital-to-analog converter, DAC)以及后向驱动电路。根据光纤陀螺的基本结构和工作原理,将整个闭环工作系统分解为功能独立的子模块,采用等效法分别计算每个子模块的传递函数,再根据各个模块在回路中的前后连接关系,推导出光纤陀螺闭环系统的开环及闭环传递函数。

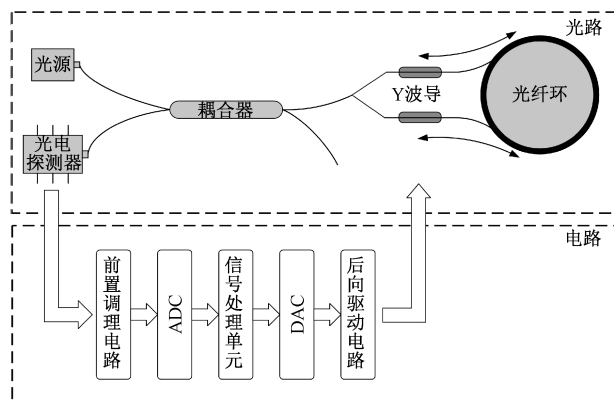


图 1 光纤陀螺闭环工作系统结构

Fig. 1 The illustration fog closed loop working system

1.1 光纤陀螺原理分析

光纤陀螺的工作原理基于 Sagnac 效应,所产生的 Sagnac 相移 $\Delta\varphi_s$ 转化为干涉信号,再通过探测器转化为

电信号,经过后续处理即可得到旋转角速度。

$$\Delta\varphi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

$$I = I_0(1 + \cos\Delta\varphi_s) \quad (2)$$

其中, L 为光纤环的长度; D 为光纤环直径; λ 为光源的平均波长; c 为真空中的光速; Ω 为陀螺的旋转角速度; I 为干涉光强; I_0 为相位差为0时对应的干涉光强的1/2。

光纤陀螺电路部分的信号检测基于方波偏置调制技术和闭环反馈控制技术。给Y波导加上方波信号以便在光路中引入恒定的非互易相移 φ_b ,该互易性相移 φ_b 即为相位调制深度。因此,根据式(2)可以得出,当载体旋转时,所加入的方波的两端调制态之差为:

$$\Delta I(\Delta\varphi_s, \varphi_b) = I_0[\cos(\Delta\varphi_s - \varphi_b) - \cos(\Delta\varphi_s + \varphi_b)] = 2I_0\sin\varphi_b\sin\Delta\varphi_s \quad (3)$$

其中, φ_b 的波动范围为 $[\pi/2, \pi)$,因此,相位调制深度越大,两种调制态之差越小,干涉光强越小,光电转换后的电压越小。

1.2 系统建模及误差分析

在载体加速和减速的过程中,光纤陀螺闭环控制回路的跟踪误差无法直接从陀螺的输出中分离出,因此对跟踪误差的标定和补偿存在困难。通过对闭环工作状态下的光纤陀螺系统进行分析与建模,推导出其传递函数,可以从理论上分析跟踪误差的机理,进而对系统的性能进行评估和预测。由式(1)易知可将Sagnac效应看作比例系数为 K_1 的比例环节。光电探测器模块实现光电转换,可看作比例环节。由式(3)易知可将方波偏置调制模块看作比例环节。前置调理电路及后向差分放大电路为放大器,故等效为比例环节。ADC模块与DAC模块实现数字量与模拟量的转换,考虑到电路延迟,故均看作比例环节与延迟环节的叠加。因此,对光纤陀螺闭环控制系统建模框图如图2所示。

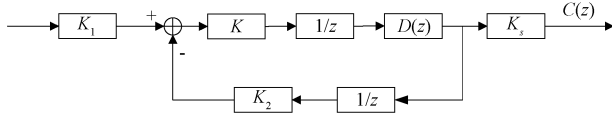


图2 光纤陀螺闭环控制系统模型

Fig. 2 FOG closed-loop control system model

由等效可计算得到光纤陀螺的闭环传递函数为:

$$\Phi(z) = \frac{K_1 K_s K z D(z)}{z^2 - z + K K_2 D(z)} \quad (4)$$

其中, $K_1 = 2\pi LD/\lambda c$ 为Sagnac效应等效比例环节的比例系数; K_s 为后向差分放大电路比例系数; K 为方波偏置、探测器、前置放大及ADC采样模块的整合系数; K_2 为比例系数,其包含两部分:1)从数字量到模拟电压信号的转换系数;2)从电压到对应的相位差的转换比例。

$D(z)$ 为数字控制器,由于光纤陀螺采用的是比例-积分控制器,因此数字控制器表示为:

$$D(z) = \frac{K_3 z}{z - 1} \quad (5)$$

其中, K_3 为积分系数。相应的开环传递函数为:

$$G(z) = \frac{K K_2 D(z)}{z^2} = \frac{K K_2 K_3}{z(z - 1)} \quad (6)$$

由该开环传递函数在 $z = 1$ 处有一个极点可以得出光纤陀螺控制系统为I型系统,而I型系统跟踪角加速度输入存在跟踪误差,如图3所示。当光纤陀螺处于大动态工作环境下时,其输入角速度呈现快速时变特性,光纤陀螺的输出信号无法快速跟踪,导致跟踪误差随时间的推移逐渐增大,对大动态环境下光纤陀螺的输出精度产生较大影响。

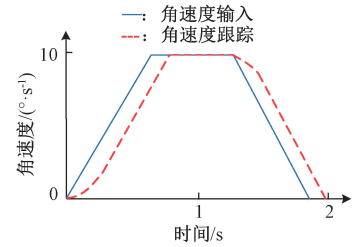


图3 I型系统跟踪误差

Fig. 3 Tracking error of type I system

2 基于自适应相位调制的光纤陀螺分析

2.1 相位调制深度与噪声关系分析

随机游走系数(random walk coefficient, RWC)是表征光纤陀螺中白噪声大小的一项技术指标,它表征由白噪声产生的随时间积累的陀螺仪输出误差系数。随机游走系数越小,噪声越小,反之则噪声越大。针对方波调制的闭环光纤陀螺,在其光路方面影响随机游走系数的主要噪声包括热噪声、散粒噪声和光源相对强度噪声;而在其电路方面,信号的各个调整环节会引起系统噪声,由于可以选取低噪声元件来降低该种噪声,并且在经过跨阻抗增益级后信噪比大大提高,所以一般由这些环节引起的噪声很小。因此,对光纤陀螺光路的噪声展开分析。光纤陀螺光路的总噪声可表示为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{RIN}^2 + \sigma_{SN}^2 + \sigma_{TN}^2} \quad (7)$$

其中, σ_{TN} 为热噪声; σ_{SN} 为散粒噪声; σ_{RIN} 为光源相对强度噪声,可分别表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{TN} = RR_D P_D \sqrt{\Delta f \lambda^2 / \Delta \lambda c} \\ \sigma_{SN} = \sqrt{2e \Delta f R^2 (R_D P_D + i_{dark})} \\ \sigma_{RIN} = \sqrt{4k_B \Delta f TR} \end{cases} \quad (8)$$

其中, P 为施加调制相位前到达探测器的光功率, $P_d = P \cdot [1 + \cos(\Delta\varphi)]/2$ 为施加调制相位后到达探测器的光功率; R 为探测器跨阻抗; R_d 为探测器的响应度; Δf 为输出频率; $\Delta\lambda$ 为光源谱宽; e 为电子电荷; i_{dark} 为探测器暗电流; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。则噪声所产生的非互易相移可表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{\sigma}{RR_d P_d \sin(\varphi_b)} \quad (9)$$

随机游走系数可表示为:

$$RWC = \frac{\lambda c \Delta\varphi}{2\pi LD \sqrt{\Delta f}} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3\,600 (^\circ/\sqrt{\text{h}}) \quad (10)$$

因此,在光路器件的参数确定后,随机游走系数与调制相位的关系如图 4 所示。

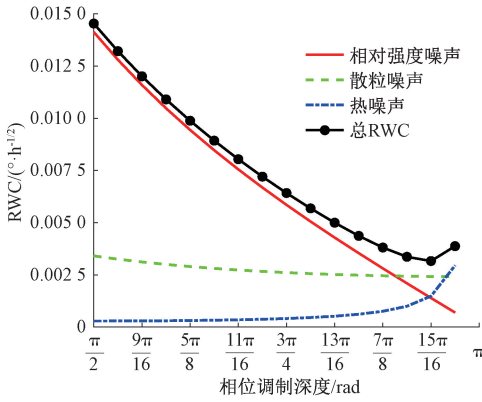


图 4 RWC 与调制相位的关系

Fig. 4 The relationship between RWC and modulation phase

可以看出,当相位调制深度从 $\pi/2$ 到 $15\pi/16$ 逐渐增大时,光纤陀螺光路的总随机游走系数逐渐减小,即光路的总噪声逐渐减小。

2.2 相位调制深度与带宽关系分析

光纤陀螺相位调制深度变化范围为 $[\pi/2, \pi)$, 结合式 (1)、(3) 及 (6) 可知,当光纤陀螺光路与电路器件参数不变时,其带宽与调制相位的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,光纤陀螺闭环工作系统的带宽与相位调制深度呈负相关,即相位调制深度越大,带宽越小,反之则带宽越大。

2.3 自适应相位调制实现方法

基于上述分析,当光纤陀螺的调制深度 φ_b 越大,调制态之差越小,等效的比例系数越小,开环增益越小,带宽越小,则跟踪误差越大,但此时对应的 RWC 越小,噪声越小。光纤陀螺静态时所需带宽较小,对灵敏度要求较高,需降低输出信号的噪声;而对于大动态光纤陀螺,其跟踪误差较大,且所需带宽较大。

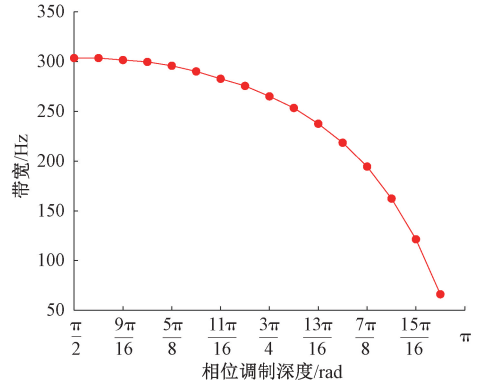


图 5 带宽与调制相位的关系

Fig. 5 The relationship between bandwidth and modulation phase

针对大动态工作环境下的光纤陀螺,提出了一种基于自适应相位调制的动态误差抑制方法,该方法能够满足动态范围较大的光纤陀螺在不同条件下的需求,具体实现方法为:

经信号处理单元解调出的光纤陀螺第 1 闭环输出量即为此时的旋转角加速度 Ω_a ,对 Ω_a 与相位调制深度 φ_b 进行拟合,拟合关系如式 (11) 所示。

$$\varphi_b = \begin{cases} -\frac{7\pi}{1\,600} \cdot |\Omega_a| + \frac{15\pi}{16}, & |\Omega_a| < 100^\circ/\text{s}^2 \\ \frac{\pi}{2}, & |\Omega_a| \geq 100^\circ/\text{s}^2 \end{cases} \quad (11)$$

当载体的角加速度为 $0^\circ/\text{s}^2$ 时,即光纤陀螺处于静态环境下时,相位调制深度自适应为 $15\pi/16$,此时,陀螺的开环增益、带宽及输出噪声均较小;当角加速度的绝对值从 $0^\circ/\text{s}^2$ 到 $100^\circ/\text{s}^2$ 变化时,相位调制深度从 $15\pi/16$ 到 $\pi/2$ 自适应变化,则陀螺开环增益和带宽逐渐增大,跟踪误差逐渐减小;当角加速度的绝对值超过 $100^\circ/\text{s}^2$ 时,调制深度恒为 $\pi/2$,此时陀螺的开环增益和带宽均较大,跟踪误差较小。

3 仿真实验与分析

3.1 系统仿真模型搭建与自适应相位调制的仿真实现

首先,按照光纤陀螺样机光路与电路的实际参数,搭建传统固定相位调制深度的光纤陀螺闭环工作系统仿真模型。该模型严格按照样机的实际结构与参数设计,包含了光源、Y 波导、光电探测器等光路模块,以及 ADC、前置调理、数字处理器、比例-积分控制器、DAC 模块等电路模块。然后,按照图 6 所示的基于自适应相位调制的光纤陀螺闭环控制系统框图,根据式 (11) 所拟合的相位调制深度与角加速度的关系,对仿真模型增加了自适应相位调制方法的仿真模块。

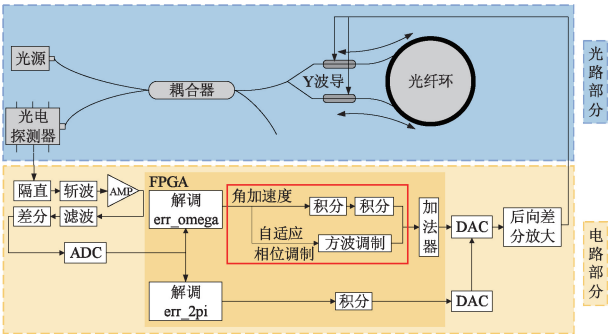


图 6 基于自适应相位调制的光纤陀螺闭环控制系统
Fig. 6 Diagram of FOG closed-loop control system based on adaptive phase modulation

仿真系统加入自适应相位调制方法后,可实现根据角加速度实时自适应地调整相位调制深度,且所建立的相位调制深度与角加速度的关系模型能够适应于所有的动态情况。当输入信号是幅值为 $100^{\circ}/\text{s}^2$ 的正弦信号时,系统输出的角加速度如图 7(a) 所示,自适应相位调制深度如图 7(b) 所示。可以看出,仿真系统的相位调制深度与角加速度的关系满足式 (11) 所建立的关系,能够实时且准确地自适应于所有的动态情况。

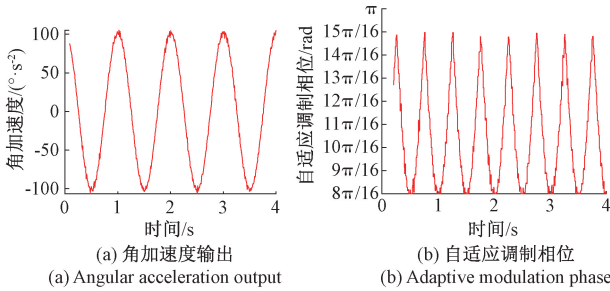


图 7 自适应相位调制仿真实现

Fig. 7 Simulation of adaptive phase modulation

3.2 仿真验证

对光纤陀螺闭环系统仿真模型进行静态环境下的仿真分析。将固定相位调制仿真模型和自适应相位调制仿真模型的输入角速度设置为 $0^{\circ}/\text{h}$, 分别计算输出信号的噪声的标准差。仿真结果表明: 基于自适应相位调制的光纤陀螺系统的静态输出噪声与固定 $15\pi/16$ 相位调制的光纤陀螺系统的静态输出噪声相当, 均保持在较低水平。

对光纤陀螺闭环系统仿真模型进行动态环境下的仿真分析。设定系统的输入角速度以恒定的加速度从 $0^{\circ}/\text{h}$ 提升至 $3.6 \times 10^5^{\circ}/\text{h}$, 将传统的固定相位调制深度仿真模型的调制相位分别固定为 $\pi/2$ 和 $15\pi/16$, 分别计算输出信号对输入信号的跟踪误差, 即输出相对于理想输入偏差的标准差。对自适应相位调制仿真模型进行仿

真, 同样设定与固定相位调制方法一致的角加速度信号, 计算该输入下自适应相位调制方法的跟踪误差, 并与固定相位调制方法的跟踪误差进行对比。不同相位调制方法下输入与输出的对比如图 8 所示, 跟踪误差的对比结果如表 1 所示。

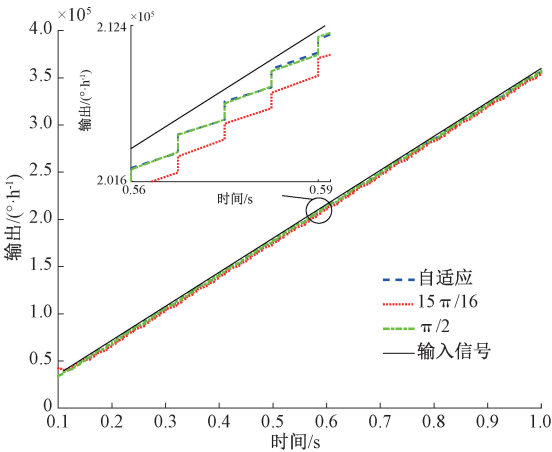


图 8 不同相位调制方法下的输入输出对比

Fig. 8 Comparison of input and output under different phase modulation methods

表 1 不同相位调制方式下的动态跟踪误差对比
Table 1 Comparison of dynamic tracking errors under different phase modulation methods

相位调制方法	角加速度输入跟踪误差
固定 $\pi/2$	$7.269\ 6^{\circ}/\text{h}$
固定 $15\pi/16$	$19.181\ 5^{\circ}/\text{h}$
自适应相位调制	$7.370\ 0^{\circ}/\text{h}$

仿真结果表明: 基于自适应相位调制方法的光纤陀螺对角加速度输入信号的跟踪误差与固定 $\pi/2$ 调制相位方法相当, 与固定 $15\pi/16$ 调制相位的方法相比减小了约 61.58%。

4 实验验证

在搭建的光纤陀螺样机系统上对上述自适应相位调制方法进行验证, 光纤陀螺的样机系统如图 9 所示, 包括光纤陀螺光路部分、电路部分、测试用的单轴转台、隔振台以及数据采集上位机。其中, 陀螺光路部分光纤环的长度为 545 m, 电路部分包括 ADC 电路、现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 电路、DAC 电路、滤波电路等, 与光纤陀螺光路相连, 主要用于实现陀螺的调制解调等工作。测试所用的单轴转台充当陀螺载体, 向陀螺施加外界旋转角速度。隔振台用于对陀螺进

行静态下的指标测试。数据采集软件可以将光纤陀螺的测试过程中所采集到的各项数据显示于上位机界面,并实时绘制光纤陀螺各项参数的变化曲线。

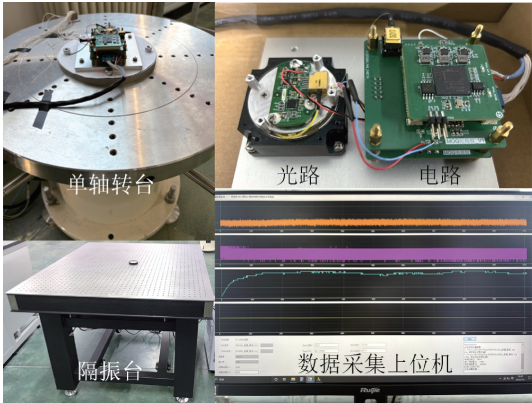


图 9 实验装置实物

Fig.9 Physical drawing of experimental device

针对图 9 所示的光纤陀螺样机系统,基于 FPGA 和嵌入式软核设计实现了固定相位调制算法和自适应相位调制算法,按照式 (11) 所建立的相位调制深度与角加速度的自适应关系模型,实现了光纤陀螺不同动态情况下的自适应相位调制。在室温下用图 9 所示的单轴转台对预热后的光纤陀螺样机系统进行自适应相位调制算法的实验验证:将输入角速度设置为 $\gamma = 16\sin(2\pi t)^\circ/\text{s}$ 的正弦信号,以遍历式 (11) 所示的相位调制深度自适应变化过程,光纤陀螺系统解算出当前的旋转角加速度,并按照式 (11) 由旋转角加速度自适应调节光纤陀螺的相位调制深度。实验对应的光纤陀螺输出、自适应相位调制深度以及角加速度如图 10 所示(截取 20 s 数据段)。

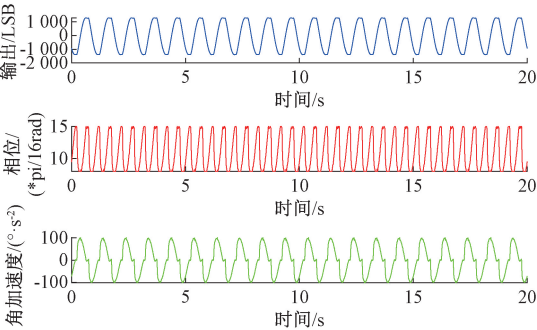


图 10 自适应相位调制方法实验结果

Fig. 10 Experimental results of adaptive phase modulation method

可以看出,在角加速度输入下,光纤陀螺样机系统能够准确敏感出旋转角速度并实时输出对应的旋转角加速度,且该光纤陀螺样机能够根据实时敏感出的旋转角加

速度实现该研究所提出的自适应相位调制方法;当角加速度的绝对值接近 $0^\circ/\text{s}^2$ 时,光纤陀螺能够自适应调节相位调制深度为 $15\pi/16$;当角加速度的绝对值从 $0^\circ/\text{s}^2$ 到 $100^\circ/\text{s}^2$ 变化时,相位调制深度从 $15\pi/16$ 到 $\pi/2$ 自适应变化,符合式 (11) 所建立的自适应相位调制深度与角加速度的关系模型。

对固定相位调制算法和自适应相位调制算法下的光纤陀螺样机分别进行静态指标和动态指标测试,包括静态下输出信号的噪声和动态下角加速度输入的跟踪误差。对于静态噪声,分别绘制 Allan 标准差曲线并计算随机游走系数,结果如图 11 所示;对于动态误差,计算 $\gamma = 16\sin(2\pi t)^\circ/\text{s}$ 的正弦输入下对应的动态跟踪误差,结果如表 2 所示。

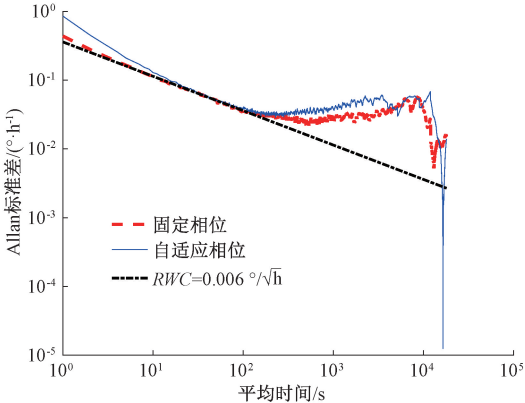


图 11 不同相位调制方法下的静态分析

Fig. 11 Allan variance under different phase modulation methods

表 2 光纤陀螺样机在固定相位调制与自适应相位调制下的动态误差对比

Table 2 Comparison of dynamic error of FOG prototype under fixed phase modulation and adaptive phase modulation

相位调制方法	角加速度输入跟踪误差
固定 $15\pi/16$	$12.4166^\circ/\text{h}$
自适应相位调制	$4.1312^\circ/\text{h}$

实验结果表明:在静态方面,自适应相位调制方法与固定相位调制方法下的随机游走系数均保持在 $0.006^\circ/\sqrt{\text{h}}$;在动态方面,与固定 $15\pi/16$ 调制相位的方法相比,基于自适应相位调制方法的光纤陀螺对角加速度输入信号的跟踪误差减小了约 66.73%,实验结果与仿真结果在静态噪声与动态跟踪误差上表现出良好的一致性,由于仿真建模时所估计的电路噪声大于实际的电路噪声,且实验中受温度、湿度等环境因素的影响,实际所用元器件由于非线性特性在特定工作点的性能更优,因此实验结果略优于仿真结果。

5 结 论

综上所述,该研究对光纤陀螺闭环工作系统进行了建模,分析了其角加速度输入下的跟踪误差,分别研究了光纤陀螺输出信号噪声和陀螺带宽与相位调制深度的关系,提出了一种基于自适应相位调制的光纤陀螺动态误差抑制方法,建立了相位调制深度与角加速度的关系模型,并搭建了光纤陀螺闭环工作系统的仿真模型,对所提出的方法进行仿真与分析,最终在光纤陀螺样机上设计实现了该自适应相位调制方法,并将该方法与传统的固定相位调制方法进行对比验证。实验结果表明:该研究所提出的自适应相位调制方法与固定相位调制方法下的随机游走系数均保持在 $0.006^{\circ}/\sqrt{h}$,同时,对角加速度输入信号的跟踪误差与固定 $15\pi/16$ 调制相位的方法相比减小了约 66.73%。

该研究提出的基于自适应相位调制的光纤陀螺闭环工作方案能够自适应于不同的动态情况,有效抑制大动态工作环境下光纤陀螺的动态误差,提升光纤陀螺的测量精度,且在光纤陀螺处于大动态时能够增大检测带宽,而在静态下时仍旧能够保持较低的噪声水平,满足光纤惯导系统静态时输出信号噪声小而动态时跟踪误差小、带宽大的需求,对提升光纤惯导系统在复杂环境下的适用性具有重要的理论和工程价值。此外,该方案依据光纤陀螺解调出的角加速度进行设计,无需增加复杂的器件,能够满足当下光纤陀螺的集成化、小型化设计需求。

参考文献

[1] 刘为任,李德春,李茂春,等.高精度航海用光纤陀螺惯性导航技术展望[J]. 导航与控制, 2022, 21(Z2): 241-249.
LIU W R, LI D CH, LI M CH, et al. Prospect of high precision marine FOG inertial navigation technology[J]. Navigation and Control, 2022, 21(Z2): 241-249.

[2] 刘鹏宇,冯立辉,吴尚保,等.集成光学陀螺技术研究进展综述[J]. 智能感知工程, 2025, 2(1): 23-37.
LIU P Y, FENG L H, WU SH B, et al. Review of the research progress in integrated optical gyroscope technology[J]. Intelligent Perception Engineering, 2025, 2(1): 23-37.

[3] 马烽原,洪伟,马彦武,等.空间任务中光纤陀螺的技术进展与应用综述[J]. 导航定位与授时, 2025, 12(5): 147-166.
MA F Y, HONG W, MA Y W, et al. Review of technological advancements and applications of fiber optic gyroscopes in space missions[J]. Navigation Positioning and Timing, 2025, 12(5): 147-166.

[4] 刘尚波,丹泽升,廉保旺,等.干涉式闭环光纤陀螺仪的 PSO-PID 控制优化方法[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 250-261.
LIU SH B, DAN Z SH, LIAN B W, et al. Optimization method of PSO-PID control for interferometric closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(3): 250-261.

[5] LI M CH, SUN Y ZH, GAO SH F, et al. Navigation-grade interferometric air-core antiresonant fibre optic gyroscope with enhanced thermal stability[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 3449.

[6] CAO Y, LI L J, LIANG SH. Temperature error compensation method for fiber optic gyroscope based on a composite model of k-means, support vector regression and particle swarm optimization[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2025, 36(2): 510-522.

[7] 谭彩铭,谢晓龙.基于单轴光学陀螺与 MEMS IMU 的室内移动机器人寻北[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 132-138.
TAN C M, XIE X L. Indoor mobile robot north-finding based on single-axis optical gyroscope and MEMS IMU[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 132-138.

[8] 苏晓东,宋蔚阳,吴昭辉,等.光纤陀螺跟踪角加速度模型建模与研究[J]. 电子技术与软件工程, 2019(5): 169-171.
SU X D, SONG W Y, WU ZH H, et al. Modeling and research of fiber optic gyroscope tracking angular acceleration model[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(5): 169-171.

[9] 李佳,孟晨,苏亚,等.开环光纤陀螺大动态范围正交解调算法的影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17): 115-122.
LI J, MENG CH, SU Y, et al. Influencing factors of open-loop fiber optic gyroscope with large dynamic range quadrature demodulation algorithm[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2022, 59(17): 115-122.

[10] 彭凯,许小虎,王合文,等.基于 AKF 滤波器的时栅角位移动态误差抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 259-270.
PENG K, XU X H, WANG H W, et al. Time-grating angular displacement dynamic error suppression method based on AKF filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 259-270.

[11] 南方伯,郜中星,徐睿东,等.全角半球谐振陀螺控制回路的动态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 42-49.
NAN F B, GAO ZH X, XU R D, et al. Research on

dynamic characteristics of whole-angle hemispherical resonator gyroscope control circuit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 42-49.

- [12] 郜中星, 彭斌, 陈小炜, 等. 振动陀螺椭圆参数的离散滑模控制[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(1): 226-232.

GAO ZH X, PENG B, CHEN X W. Discrete sliding mode control for ellipse parameters of vibrating gyroscope[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(1): 226-232.

- [13] 张佳宁, 李平华, 庄须叶. 基于改进的 Sage-Husa 滤波 MEMS 陀螺阵列降噪技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 54-60.

ZHANG J N, LI P H, ZHUANG X Y. Research on noise reduction technology based on improved Sage-Husa filtered MEMS gyroscope arrays[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 54-60.

- [14] NATALE T, NÚÑEZ P B, DINDELLI L, et al. Gyroscope real-time denoising by an adaptive threshold wavelet algorithm: Achieving over 12 dB SNR improvement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-11.

- [15] ZHANG G C, ZHANG SH Y, LIN Y, et al. Vibration induced bias drift of fiber optic gyro and improvement methods[C]. 2016 China International Conference on Inertial Technology and Navigation, 2016: 101-107.

- [16] 张桂才, 冯菁, 宋凝芳, 等. 抑制闭环光纤陀螺高动态角运动测量误差的校正回路设计[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(5): 650-654.

ZHANG G C, FENG J, SONG N F, et al. Design of correction loop for suppressing high dynamic angular motion measurement error of closed-loop FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(5): 650-654.

作者简介



豁子婧, 2019 年于常熟理工学院获得学士学位, 现为哈尔滨工程大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤陀螺及其应用。

E-mail: zijinghuo@163.com

Huo Zijing received her B. Sc. degree from Changshu Institute of Technology in 2019. She is currently a master's degree student at Harbin Engineering University. Her main research interest includes fiber optic gyroscope and its application.



徐江燕, 2010 年于安徽理工大学获得学士学位, 2013 年于河海大学获得硕士学位, 现为青岛智腾微电子有限公司高级工程师, 主要研究方向为极端环境用传感技术。

E-mail: project@qdzitn.com

Xu Jiangyan received her B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2010, her M. Sc. degree from Hohai University in 2013. She is currently a senior engineer at Qingdao Zhiteng Microelectronics Co., Ltd. Her main research interest includes sensing technology for extreme environments.



郜中星 (通信作者), 2012 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2017 年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为哈尔滨工程大学副教授, 主要研究方向包括哥式振动陀螺, 光纤陀螺及其在导航技术的应用。

E-mail: zhongxing1141@sina.com

Gao Zhongxing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Engineering University in 2012 and 2017, respectively. He is currently an associate professor at Harbin Engineering University. His main research interests include Coriolis vibrating gyroscope, fiber optic gyroscope, and their applications in navigation technology.