

谐振式光学微腔陀螺锁频及误差反馈技术研究^{*}李溢凡^{1,2} 白禹² 张仕泽^{1,2} 卜韩² 刘文耀^{1,2}

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030000; 2. 中北大学极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 太原 030000)

摘要: 针对谐振式光学微腔陀螺(RMOG)因环境温度与振动等因素导致的谐振频率漂移问题,本文提出了一种基于FPGA的高精度数字锁频及误差反馈技术研究方案。系统通过FPGA实现双相位调制与频差信号处理,结合20位数模转换器AD5791生成高精度反馈信号,利用PI控制器完成激光器频率对光波导谐振腔的实时追踪锁定,并引入基于误差反馈的实时输出补偿算法动态修正输出环路偏差。实验结果表明,该锁频系统响应时间为17.50 ms,锁频精度达48.51 Hz,显著提升了陀螺系统的动态性能与稳定性。相较于传统16位DAC方案,新系统在响应速度与锁频精度上分别提升了49.28%与72.10%,验证了数字化架构与双相位调制技术在抑制噪声和优化频谱分离中的有效性,为谐振式光学微腔陀螺的实用化提供了可靠的技术支持。

关键词: 谐振式光学陀螺;FPGA;数字锁频;双相位调制;AD5791;PI控制器;误差反馈

中图分类号: TN29;TN79+2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on frequency locking and error feedback technology of resonant optical microcavity gyro

Li Yifan^{1,2} Bai Yu² Zhang Shize^{1,2} Bu Han² Liu Wenyao^{1,2}

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030000, China; 2. National Key Laboratory of Optoelectronic Dynamic Testing Technology and Instrumentation for Extreme Environments, North University of China, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Aiming at the problem of resonant frequency drift of Resonant Micro-optical Gyros (RMOG) due to factors such as ambient temperature and vibration, this paper proposes a high-precision digital frequency locking and error feedback technology research program based on FPGA. The system realizes dual-phase modulation and frequency difference signal processing through FPGA, combines 20-bit digital-to-analog converter AD5791 to generate high-precision feedback signals, uses PI controller to complete real-time tracking and locking of laser frequency to the resonant cavity of the optical waveguide, and introduces real-time output compensation algorithm based on the error feedback to dynamically correct the output loop deviation. The experimental results show that the response time of the frequency locking system is 17.5 ms, and the frequency locking accuracy reaches 48.51 Hz, which significantly improves the dynamic performance and stability of the gyro system. Compared with the traditional 16-bit DAC scheme, the new system improves the response speed and frequency locking accuracy by 62.3% by 56.0%, which verifies the effectiveness of the digital architecture and the dual-phase modulation technique in suppressing the noise and optimizing the spectral separation, and provides reliable technical support for the practical application of the resonant optical microcavity gyro.

Keywords: resonant optical gyro; FPGA; digital frequency locking; dual-phase modulation; AD5791; PI controller; error feedback

0 引言

谐振式光学微腔陀螺(resonant micro-optical gyros,

RMOG)基于Sagnac效应,通过检测光波导谐振腔中顺、逆时针光束的谐振频率差实现角速度测量^[1]。相较于传统干涉式光纤陀螺,其凭借光波导谐振腔的局域场增强特性,可

在毫米级尺寸下实现高灵敏度检测,具有小体积、高灵敏度等优点,在惯性导航、姿态控制等领域具有广阔的应用前景^[2]。然而,由于环境温度变化、应力等因素的影响,光波导谐振腔的谐振频率容易发生漂移,导致陀螺性能下降。以 Q 值为 4×10^7 光波导谐振腔为例,当旋转角速度为 $1^\circ/\text{s}$ 时,光波导谐振腔内 CW 方向和 CCW 方向的谐振频率差为 539 Hz ^[3],而当光波导谐振腔的温度变化 0.1°C 时,腔谐振频率漂移为 110 MHz ,由此可见,与 Sagnac 效应引起的频差相比,这种变化是非常巨大的,严重影响了频率锁定环路的精度^[4-5]。因此,如何通过高精度锁频技术抑制环境扰动引起的频偏,成为 RMOG 实用化的核心挑战。

锁频技术的核心在于通过调制与反馈控制实现激光频率对谐振腔频率的实时追踪。在调制方法方面, Pound-Drever-Hall (PDH) 技术通过高频相位调制生成误差信号,成为主流的锁频解调方案^[6-7]。针对传统 PDH 技术单一高频调制导致的背散射噪声频谱重叠问题,国内外学者提出了多种改进方案: Wang 等^[8]提出用同相三角相位的调制技术来改善调制波形以抑制背反噪声; Ying 等^[9]提出基于数字双极性 serrodyne 和正弦相位的调制技术,用来抑制陀螺在转动的过程中两路光信号因为频谱交叠导致的背散噪声; Wang 等^[10]提出了一种高低频调制方案,区别于其他方案的对称调制,该方案通过一路只添加高频调制另一路只添加低频调制来抑制背散射噪声; Guo 等^[11]提出了一种四态调制技术,该方法通过增加调制信号的复杂程度来实现更好的噪声抑制。这些研究表明,复合调制策略能够有效提升锁频系统的噪声抑制能力,但其硬件实现复杂度高,且缺乏对调制参数协同优化的系统性研究^[12]。传统 PDH 技术通常采用的调制系数可以最大化一阶贝塞尔函数 $J_1(M)$ 的幅值,但其解调曲线斜率受限于 $J_0(M) \cdot J_1(M)$ 的乘积特性,难以实现灵敏度最优。通过理论推导证明该系统选择的调制系数可使解调曲线的斜率达到最大值,为高灵敏度锁频奠定基础。这一优化策略不仅克服了传统调制参数下灵敏度不足的缺陷,还为噪声抑制提供了更高的误差信号动态范围。且针对硬件复杂度较高的问题,本系统选择用 Y 波导代替前端的耦合器以及相位调制器,为谐振式光学陀螺的小型化提供更多可能。

在数字锁频电路设计方面,高精度数模转换器 DAC 的分辨率直接决定了锁频环路的调谐精度^[13]。传统 16 位 DAC 的最小频率分辨率难以补偿微小频偏,无法满足陀螺日益增长的精度要求。随着 20 位 DAC 的普及,其频率分辨率的提升为高精度锁频提供了硬件基础。此外,为了进一步提高谐振式光学陀螺的锁频精度,通过 FPGA 优秀的并行计算能力与灵活的可编程特性^[14-17],为后续对陀螺输出误差信号进行实时补偿与实时控制提供了理想的实现平台。然而,现有研究多聚焦于单一技术环节的改进,缺乏对复合调制、高精度反馈与输出补偿的协同设计,导致系统整体性能受限。

基于上述背景,本文提出一种基于 FPGA 与 AD5791 的数字锁频系统,通过双相位调制技术优化频谱分离,结合 20 位 DAC 实现高精度调谐^[18]。系统利用 DDS 技术生成相位协同的复合调制信号,在保留 PDH 高灵敏度的同时,通过频谱搬移抑制背散射噪声。硬件设计采用 LT1807 与 LTC6409 构建高信噪比前端调理电路^[19],结合 AD5791 与低噪声运放实现 20 位高精度反馈;软件算法通过 FPGA 实现双相位调制、数字 PI 控制与实时误差补偿的并行处理。本文通过理论建模、电路设计与实验验证,系统研究了调制参数优化、时序匹配与噪声抑制机制,为高精度 RMOG 锁频系统的工程化提供了完整的解决方案。

1 频率锁定环路模型和需求分析

1.1 频率锁定环路模型

图 1 给出了基于调相谱检测技术的谐振式光学微腔陀螺系统结构图。由窄线宽激光器输出的光经过 Y 波导分束与调制后,分别进入光波导谐振腔形成 CW 和 CCW 方向上的两个谐振光束。其中 CW 方向的光波在出谐振腔之后由光电探测器转化成电信号输出至 FPGA,该信号所携带有两路光的谐振频率差信息,经解调滤波后作为陀螺信号输出; CCW 方向的光波经过信号转换以及解调滤波之后,再通过 PI 控制器将解调信号反馈到激光器,使激光器频率始终跟踪 CCW 方向的波导腔的谐振频率。因反馈控制的误差,实际上 CCW 方向始终存在与波导腔谐振频率的误差,记为 Δf_{CCW} ,实际解调滤波后的陀螺信号携带的频率差为 $\Delta f + \Delta f_{\text{CCW}}$ 。其中, Δf 是转动引起的频差,可以表示为: $\Delta f = \frac{2R}{n\lambda}\Omega$, 式中: R 为谐振腔的半径, n 为谐振腔的折射率, λ 为光波波长, Ω 为转动角速度。

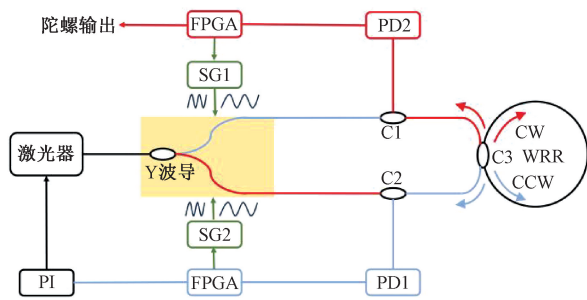


图1 基于调相谱检测技术的谐振式光学微腔陀螺系统结构图
Fig. 1 Resonant optical microcavity gyro based on tuning spectrum detection technology system structure diagram

基于调相谱检测技术,频率锁定环路的工作原理可以描述为一个典型的闭环控制系统,其锁频模型如图2所示。

图2中 f_0 为激光器的初始输出中心频率; K_m 为激光器的频率调制系数,系统所用的窄线宽激光器的调制系数在扫描波频率为百赫兹量级时对应为 150 MHz/V ; V_F 为 PI 控制器反馈至激光器的电压值,以此实现锁频系统实时调整 V_F 的值来保证激光器的中心频率与光波导谐振腔的

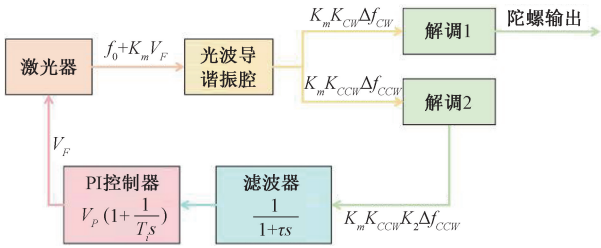


图 2 谐振式光学微腔陀螺的频率锁定环路模型

Fig. 2 Frequency-locked loop modeling of a resonant optical microcavity gyro

谐振频率一致; K_{CW} 与 K_{CCW} 是CW和CCW光路对应的可变增益; $K_2/(1+\tau s)$ 为解调信号经滤波后的传递函数,其中 K_2 表征解调增益, τ 为低通滤波的时间常数;闭环控制环路中,PI控制器的传递函数可表述为 $K_P/(1+\frac{1}{T_i s})$,其中 K_P 为比例系数, T_i 为积分时间常数。

令 $K = K_m K_{CCW} K_2 K_P$,可得系统开环传递函数为:

$$H_o(s) = K \frac{1}{1 + \tau s} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (1)$$

1.2 电路设计需求分析

在频率锁定环路中,对激光器的反馈信号是由D/A芯片输出的,因此模拟信号输出的最小控制电压是决定激光器调谐精度的关键。最小控制电压又称为电压分辨率,可以表示为:

$$V_{LSB} = \frac{V_{DA}}{2^{bit}} \quad (2)$$

式中: V_{DA} 是D/A芯片的满量程输出电压。

D/A芯片的频率分辨率可表示为:

$$\Delta f_{DAC} = K_M \cdot V_{LSB} \quad (3)$$

通过上述分析可知,锁频工作主要是减少频偏 Δf_{CCW} 给系统带来误差,因此位数越高的数模转换芯片越可以提供更精细的频率调谐,越能够精确补偿由环境扰动引起的

微小频偏 Δf_{CCW} ,降低失锁风险,提高频率锁定环路稳定性。

2 硬件电路设计

系统硬件结构采用基于FPGA的信号处理平台,集成了高精度模数转换与数模转换接口,形成数模协同处理体系。硬件架构的各组成部分如图3所示。该电路平台的接口设计涵盖了模拟信号采集通道、控制信号生成通道、可编程逻辑的可扩展IO接口,以及RS232串行通信接口。

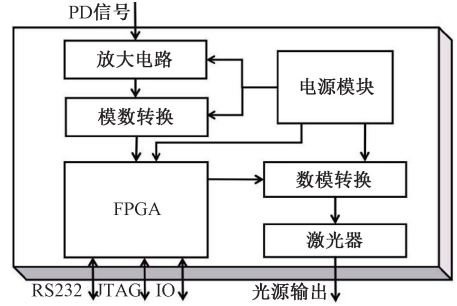


图 3 硬件架构结构

Fig. 3 Hardware circuit structure

2.1 模数转换前端放大电路

为满足系统对信号放大精度与噪声抑制的需求,设计采用LT1807作为PD信号放大电路的核心芯片,搭配LTC6409实现单端至差分信号转换,构建高信噪比的前端信号调理链路。

在放大电路中,LT1807分别配置为跟随器与同相放大器,通过精密电阻网络实现4倍固定增益,确保信号动态范围最大化,为后续处理提供高幅值、低噪声的模拟信号。

LTC6409作为信号调理链路的第二级,通过内部差分转换模块将接收到的放大后的单端信号生成相位互补的差分输出。此外,LTC6409内置输出缓冲电路与阻抗匹配网络,能够隔离前后级电路间的负载效应,减少信号反射与串扰,确保信号传输的稳定性,电路图如图4所示。

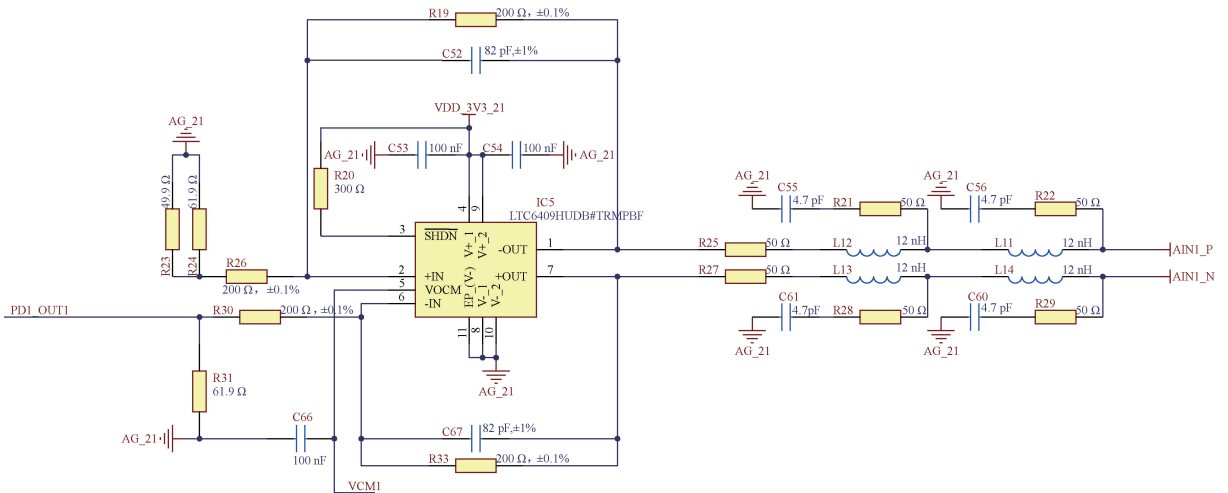


图 4 单端转差分电路

Fig. 4 Single-ended to differential circuit

2.2 数模转换电路

根据第 1 节的计算分析,数模转换电路主要由 20 位

的超高精度数模转换芯片 AD5791 构成。AD5791 的应用电路图如图 5 所示。

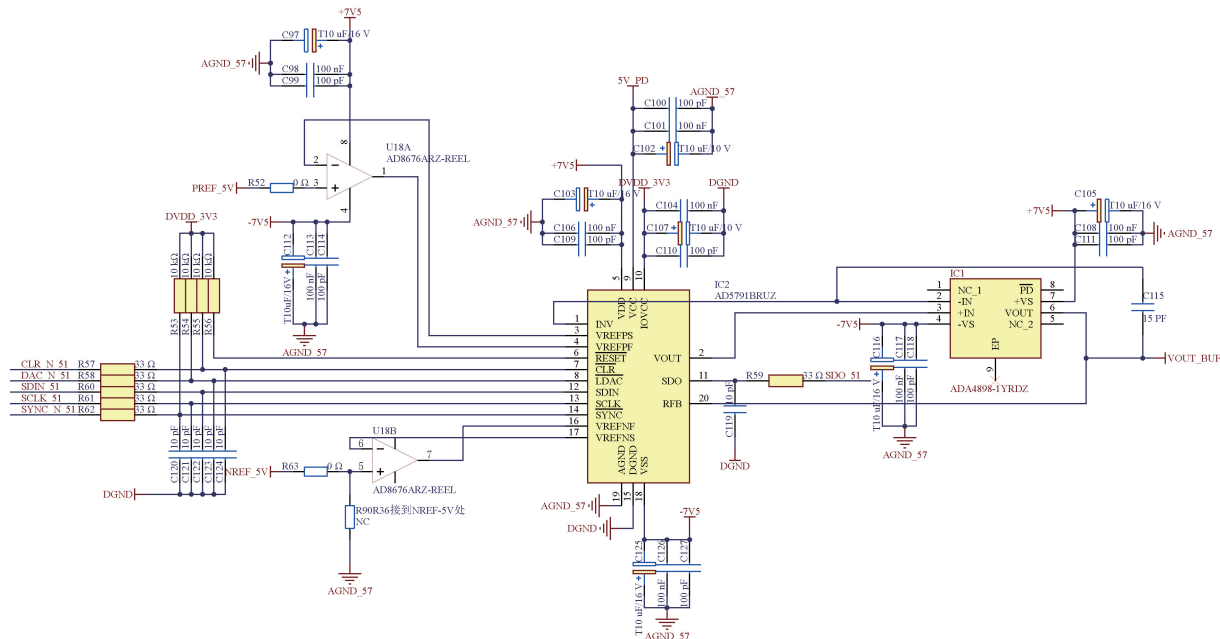


图 5 AD5791 应用电路图

Fig. 5 AD5791 application circuit diagram

电路图中,AD8676 作为基准电压缓冲器,利用其轨到轨输出摆幅和低噪声特性,将 AD5791 的基准电压信号进行缓冲和隔离,确保基准电压的稳定性和低阻抗输出,避免负载变化对基准源的影响;ADA4898 作为输出缓冲器,凭借其超低噪声和失真特性,将 AD5791 输出的高精度模拟信号进行放大和驱动,提供足够的电流驱动能力,同时抑制输出信号的噪声和失真,确保信号在传输到后续电路时保持高精度和低失真。两者的协同工作有效提升了数模转换电路的动态范围、噪声性能和信号完整性。

3 系统设计

传统 PDH 方案仅采用单一高频调制,虽能有效生成误差信号,但对背散射噪声的抑制存在固有局限。本系统将低频调制与 PDH 技术进行融合,构建了双相位调制体系,从而在保持 PDH 技术优势的基础上,进一步提升了系统的噪声抑制能力。同时利用 PI 控制器和误差补偿算法实现激光器对谐振腔频率的实时追踪与低噪声输出。

3.1 基于 PDH 技术的双相位调制

PDH 技术通过相位调制生成误差信号,利用波导谐振腔的滤波特性分离载波与边带信号。调制后的光场进入谐振腔,反射光场经光电探测器转换为电信号,其功率谱包含载波与边带分量。通过锁相放大器提取误差信号,其表达式为:

$$V_{error} = K_D \cdot \text{Im}[F(\omega_0) \cdot F^*(\omega_0 + \Omega) - F^*(\omega_0) \cdot F(\omega_0 - \Omega)] \quad (4)$$

其中, K_D 为鉴频系数, $F(\omega_0)$ 为谐振腔传递函数, Ω 为调制频率。当调制频率 $\Omega \gg FWHM$ (谐振腔半高全宽) 时, 误差信号主要反映载波与边带的相位差, 其灵敏度与解调曲线斜率 $K_{slope} = \frac{8P_0 J_0(M) J_1(M)}{FWHM}$ 成正比, 其中, $J_n(M)$ 为第 n 阶贝塞尔函数。 $J_0(M) \cdot J_1(M)$ 与调制系数 M 的仿真如图 6 所示。因此当 $M=1.08$ 时 K_{slope} 最大。同时要求 FPGA 发生的调制波形的幅值要满足调制系数:

$$V = \frac{MV_{\pi}}{\pi} \quad (5)$$

其中, V 为调制信号的幅值, V_{π} 为 Y 波导半波电压。

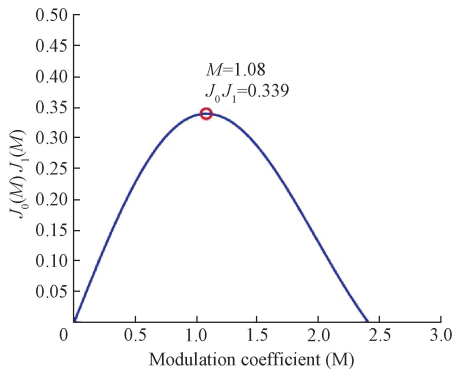


图 6 贝塞尔函数仿真图

Fig. 6 Bessel function simulation graph

但单一高频调制无法解决背散射光与信号光在基带的重叠干扰问题,因此系统在 PDH 调制基础上叠加低频

相位调制。此时复合光场为:

$$E_{dual}(t) = E_0 e^{j[M_h \sin(2\pi f_m t) + M_l \sin(2\pi f_l t)]} \quad (6)$$

通过选择, $f_l > 3\tau$ (谐振线宽) 可使 CW 与 CCW 两路光的背散射噪声频谱产生 $\Delta f = 2f_l$ 的频移。此时, 信号光与背散射噪声在频域上解耦, 通过带通滤波器可有效抑制第 2 类背散射噪声。数学上, 光电探测器输出信号经解调后为:

$$V_{out} \propto \sum_k J_k(M_h) J_{k+1}(M_h) \cdot \operatorname{Re}[H(f_0 + kf_h) H^*(f_0 + (k+1)f_h)] \quad (7)$$

其中, $H(f_0)$ 为谐振腔传递函数, 当 $f_h \gg \tau$ 时, 高阶边带远离谐振峰, 仅保留 $K=0$ 与 $K=-1$ 边带的贡献, 此时解调信号线性度最佳, 且背散射噪声被压制在通带外。

在 FPGA 中, 通过 DDS (直接数字频率合成) 技术实现双相位调制的精准协同, 其核心组件包括相位累加器: N 位累加器按频率控制字 (FTW) 递增, 生成离散相位序列; 相位-幅度转换: 通过查找表 (LUT) 将相位值映射为波形幅度值 (如正弦波、方波等); 数模转换 (DAC): 将数字幅度转换为模拟信号。

其输出频率公式为:

$$f_{out} = \frac{FTW \cdot f_{clk}}{2^N} \quad (8)$$

式中: f_{clk} 为系统时钟频率, N 为累加器位数。

本文通过选择高频调制系数 $M=1.08$, 使得贝塞尔函数 $J_0(M) \cdot J_1(M)$ 达到最大值, 从而最大化解调曲线斜率。这一设计使锁频环路能够快速捕捉微小频差变化, 同时结合低频调制的载波抑制特性, 有效分离信号与噪声频谱分量。二者在时域叠加后形成复合调制信号, 既保留了高频灵敏度优势, 又通过低频段的频谱搬移规避了共模噪声。调制系数的优化与波形协同设计, 为环境扰动下的稳定锁频提供了双重保障, 上位机采得双相位调制波形叠加示意图如图 7 所示。

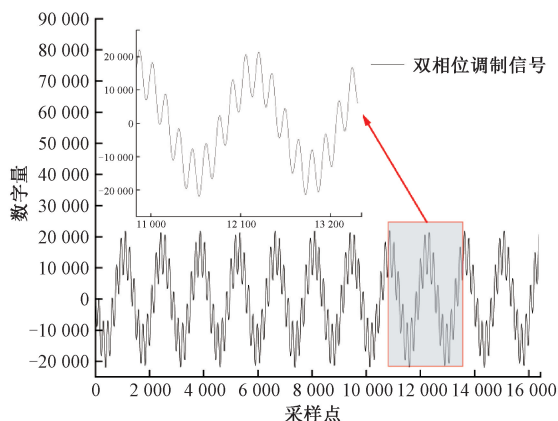


图 7 双相位调制信号波形

Fig. 7 Dual-phase modulation signal waveform

3.2 PI 控制与误差补偿算法

PI 控制模块是陀螺系统频率伺服反馈的重要环节, 主

要在 FPGA 上进行实现。控制器由比例支路与积分支路两个独立的部分构成: 比例支路将误差信号与 K_p 相乘后输出; 积分支路将误差信号与 K_i 相乘并对结果进行累加得到输出信号。最终控制量为两路输出之和, 其数学描述为:

$$u(k) = K_p [e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j)] = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{j=0}^k e(j) \quad (9)$$

式中: $K_i = K_p \cdot \frac{T}{T_i}$, T 为累加时钟周期。 $e(k)$ 为第 k 次采样的误差量。

为进一步实现谐振式光学微腔陀螺的高精度锁频, 提出了一种基于误差反馈的实时校正算法。该算法的核心思想是通过锁频环路的实际输出与理想输出之间的偏差, 动态修正陀螺输出信号中的系统误差。具体而言, 锁频环路的理想输出为谐振腔谐振谱的峰值处以及解调曲线的斜率最大处, 记为 G_i ; 实际输出为经 PI 控制器调整后的反馈信号 G_{CCW} , 二者间的误差定义为 E_G 。与此同时, 陀螺输出路通过解调滤波获取实际角速度对应的原始输出信号 G_{CW} , 其中包含了锁频环路误差引入的频偏分量。为消除这一误差对陀螺精度的影响, 最终输出 G_o 通过 $G_{CW} - E_G$ 的运算完成误差补偿。其表达式为:

$$G_o = G_{CW} - E_G = G_{CW} - (G_{CCW} - G_i) \quad (10)$$

在 FPGA 中, 该算法通过并行处理架构实现。算法流程嵌入至 FPGA 的时序控制模块中, 确保与双相位调制信号、PI 控制器的闭环反馈过程严格同步, 避免信号延迟导致的相位失配。该设计充分利用 FPGA 的并行计算能力与高精度数据接口, 在不引入额外硬件资源的前提下, 实现了对锁频误差的实时校正, 为谐振式光学微腔陀螺的高灵敏度检测提供了有效的软件支撑。

3.3 数模转换时序匹配

在本文中, 需要通过精准的时钟控制、均衡的信号传输与严格的噪声抑制实现时序匹配, 确保数字信号在时域上的精确对齐与频域上的纯净性。对于 AD5791 这类高分辨率 DAC, 时序失配会直接导致量化误差的累积, 进而影响锁频环路的调谐精度与稳定性。因此, FPGA 与 AD5791 之间的数模转换时序匹配是确保高精度信号输出的关键, 其核心在于数据同步、时钟抖动优化和接口延迟控制。首先, FPGA 作为主设备生成 SPI 时钟 SCLK 和同步信号 SYNC, AD5791 作为从设备在 SCLK 上升沿采样数据。为了减少时钟抖动, FPGA 使用全局时钟网络分配低抖动时钟信号, 时钟抖动控制在 ± 50 ps 以内, 并在 SCLK 信号路径上串联 33Ω 端接电阻以抑制反射噪声, 反射噪声降低至 -40 dB 以下。

此外, PCB 布局中 SCLK 与 SDIN 信号走线严格按照等长匹配, 长度误差控制在 ± 0.1 mm 以内, 并在信号旁添加接地过孔以抑制串扰, 串扰噪声降低至 -50 dB 以下。

通过上述设计 FPGA 与 AD5791 的时序匹配得以实现,确保数据传输的稳定性和可靠性。

4 实验测试及分析

为验证锁频电路的性能,搭建了如图 1 所示的实验测试平台。实验过程中,首先对光波导谐振腔进行初始频率扫描以确定谐振频率点,随后通过对比不同实验条件下的锁频效果,系统的评估所设计方案的性能优势。

4.1 新老电路对比试验

为验证新电路设计的有效性,在相同实验环境下与现有方法进行了对比。老版电路采用 16 位 DAC 芯片,两者均使用调制系数 $M=2.405$ 的双相位调制但不使用数字补偿算法。实验结果如图 8 所示,旧版锁频电路的锁频精度为 173.90 Hz;而新电路通过高精度 20 位 DAC 与 FPGA 并行处理技术,将锁频精度提升至 109.30 Hz。进一步分析表明,AD5791 的高分辨率输出有效抑制了微小频偏的累积误差,验证了新方案在动态响应与精度上的显著优势。

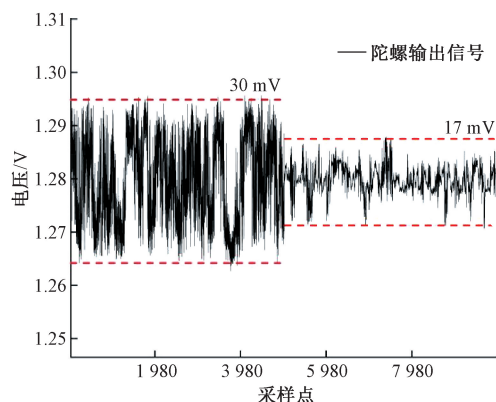


图 8 新老电路陀螺输出信号对比

Fig. 8 Comparison of gyro output signals from old and new circuits

4.2 不同调制系数的对比试验

为探究不同调制系数下的双相位调制对锁频性能的影响,分别测试了新电路在不同调制参数时的双相位调制下的锁频效果。实验结果如图 9 所示,在 $M=2.405$ 时,系统锁频精度为 109.30 Hz。而当 $M=1.08$ 时,锁频精度提升至 84.89 Hz。这是因为当调制系数为 1.08 时,解调曲线的斜率可以达到最大,使得锁频工作的线性工作范围变大。这个设计使锁频环路能够快速捕捉微小频差变化,同时结合低频调制的载波抑制特性,有效分离信号与噪声频谱分量。该对比实验证实了之前的理论推导。

4.3 输出补偿算法的对比实验

为进一步优化锁频精度,在双相位调制的基础上引入了基于误差反馈的实时校正算法。实验对比采用双相位调制与叠加算法后的锁频效果。实验结果如图 10 所示,未加入算法时,系统锁频精度为 84.89 Hz,而叠加算法后,精度进一步提升至 48.51 Hz。算法通过动态修正锁频环路输出与理想值的偏差,有效抑制了由光路噪声引起的残

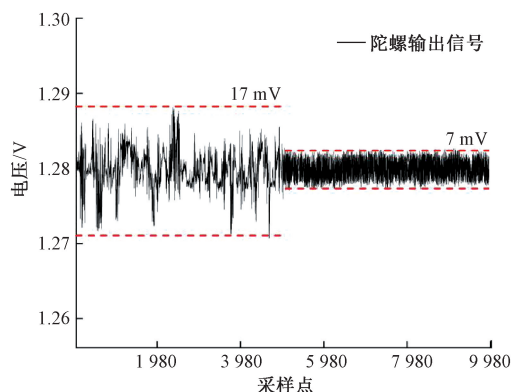


图 9 有无双相位调制的陀螺输出信号对比

Fig. 9 Comparison of gyro output signals with and without dual-phase modulation

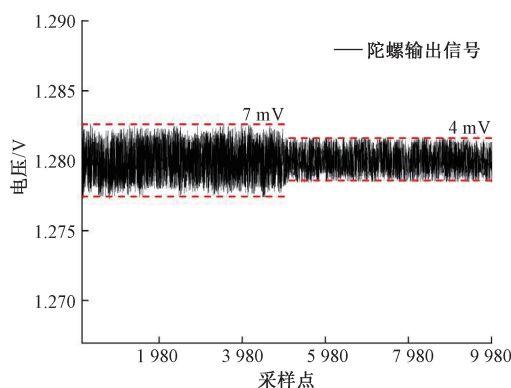


图 10 有无补偿算法的陀螺输出信号对比

Fig. 10 Comparison of gyro output signals with and without compensation algorithm

余频偏。

最后对新老系统进行锁频实验,实验结果如图 11 所示,通过双相位调制技术与陀螺输出补偿算法,结合 20 位 DAC 实现的高精度调谐可以将锁频响应时间从 34.50 ms 提升至 17.50 ms。

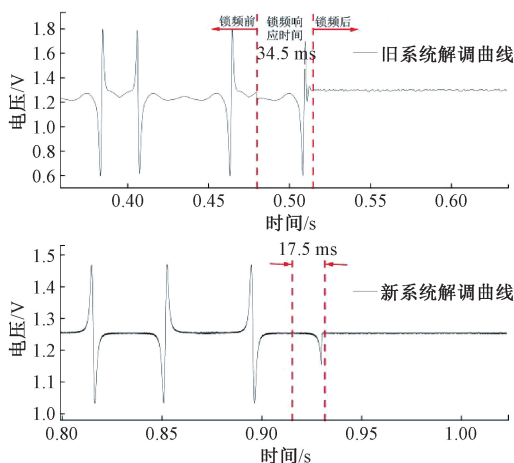


图 11 新老系统锁频过程对比

Fig. 11 Comparison of old and new system locking process

综上,实验结果表明,新电路通过数字化架构、双相位调制与实时算法的协同设计,显著提升了谐振式光学微腔陀螺的锁频性能,为其高精度应用提供了可靠的技术支撑。后续通过优化光路设计及引入光强反馈等技术可进一步提升性能。

5 结 论

本文提出一种面向谐振式光学微腔陀螺的数字化锁频系统,通过区别与传统高频调制系数的调制策略优化误差信号灵敏度,结合高分辨率数模转换器与实时控制算法,在环境扰动下实现激光频率对谐振腔的快速追踪锁定。实验表明,系统锁频响应时间缩短至 17.50 ms,精度达 48.51 Hz,较传统方案响应速度提升 49.28%、精度提升 72.10%,验证了其在动态噪声抑制与高频谱分离中的有效性,具有快速锁定、高精度的特点,能够提高谐振式光学微腔陀螺的精度和稳定性指标。未来研究将面向谐振式光学微腔传感进一步优化光路设计及算法,降低由光路带来的噪声,提高系统的抗干扰能力。

参考文献

- [1] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Artech House, 2022.
- [2] 邹康, 曲天良, 张熙. 集成微光学陀螺研究现状、发展趋势和挑战[J]. 飞控与探测, 2024, 7(2): 73-87.
ZOU K, QU T L, ZHANG X. Research status, development trend and challenges of integrated micro-optical gyro[J]. Flight Control & Detection, 2024, 7(2): 73-87.
- [3] 钱坤. 面向谐振式微光学陀螺的高 Q 平面光波导谐振腔研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
QIAN K. Research on the high Q planar light wave circuit resonator for resonant micro-optic gyroscope[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [4] 李昊天, 潘梓文, 刘文耀, 等. 谐振式光学陀螺数字锁频精度优化设计[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(12): 890-894.
LI H T, PAN Z W, LIU W Y, et al. Optimization design of digital frequency locking accuracy of resonant optical gyroscope [J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(12): 890-894.
- [5] 孙颖, 张成飞, 刘文耀, 等. 谐振式光学陀螺锁频偏差的消除方法研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(1): 102-105.
SUN Y, ZHANG CH F, LIU W Y, et al. Research on the elimination method of frequency locking deviation of resonant optical gyroscope [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(1): 102-105.
- [6] 卢莹. 基于 PDH 技术的短光纤谐振式光学陀螺[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
LU Y. Short fiber resonant optic gyroscope using the Pound-Drever-Hall technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [7] ZEYEN M, AFFOLTER L, AHMED M A, et al. Pound-Drever-Hall locking scheme free from Trojan operating points[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(1): 013001.
- [8] WANG J, FENG L, WANG Q, et al. Reduction of angle random walk by in-phase triangular phase modulation technique for resonator integrated optic gyro[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5463-5468.
- [9] YING D, XIE T, WANG Z, et al. Modulation spectrum analysis and optimization for closed-loop RFOG under dynamic condition [J]. Optics Communications, 2020, 466: 125659.
- [10] WANG H, LIU W, PAN Z, et al. Suppression of back scattering-induced noise in a resonator optic gyro by the dual-frequency modulation method[J]. Optics Communications, 2020, 459: 124766.
- [11] GUO F, ZHAO R, LI H, et al. Modulator coefficient tracking method of resonant integrated optical gyroscope based on novel four-state modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 3016-3021.
- [12] 王飞, 白禹, 卜韩, 等. 谐振式光学陀螺噪声抑制技术研究现状(特邀)[J]. 光子学报, 2024, 53(5): 44-61.
WANG F, BAI Y, BU H, et al. Research status of noise suppression technology for resonant optical gyro (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(5): 44-61.
- [13] 丁少轩. 谐振式光学陀螺光源驱动及信号处理电路的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2023.
DING SH X. Design and implementation of resonant optical gyro light source driver and signal processing circuit[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [14] 黄如, 徐磊. 一种基于 FPGA 的 CORDIC 算法的实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(5): 47-50.
HUANG R, XU L. An implementation of CORDIC algorithm based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(5): 47-50.
- [15] 沈辉, 薛兵, 唐朝阳, 等. 基于 DDS 技术的信号发生器设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 160-164.
SHEN H, XUE B, TANG CH Y, et al. Design of signal generator based on DDS technology [J]. Electronic Measurement Techniques, 2020, 43(20): 160-164.

- [16] 胡晓捷, 焦新泉, 贾兴中. 基于FPGA的高精度模拟量输出卡设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 156-160.
HU X J, JIAO X Q, JIA X ZH. Design of high precision analog output card based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13): 156-160.
- [17] 李浩, 王厚军, 肖磊, 等. 高速并行数字调制信号的产生与实现[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 110-118.
LI H, WANG H J, XIAO L, et al. The generation and implementation of high-speed parallel digital modulation signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 110-118.
- [18] 崔海朋. 基于STM32和AD5791的高精度数模转换

电路设计[J]. 电子产品世界, 2020, 27(6): 39-42.
CUI H P. Circuit design of High resolution DAC based on STM32 and AD5791 [J]. Electronic Engineering & Product World, 2020, 27(6): 39-42.

- [19] 华山. 一种单端转双端差分的高速模拟电路[J]. 通信电源技术, 2021, 38(4): 40-42.
HUA SH. A single-ended to double-ended differential high-speed analog circuit [J]. Telecom Power Technology, 2021, 38(4): 40-42.

作者简介

李溢凡, 硕士研究生, 主要研究方向为电路设计及系统应用。

E-mail: yifanli@163.com

白禹(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为微腔传感。

E-mail: baiyu654300@163.com