

数字闭环光纤陀螺的无纹波最小拍控制

徐金涛 田爱玲

Ripple free minimum beat control for digital closed-loop fiber optic gyroscopes

XU Jintao, TIAN Ailing

引用本文:

徐金涛, 田爱玲. 数字闭环光纤陀螺的无纹波最小拍控制[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 693–698. DOI: 10.5768/JAO202344.0308002

XU Jintao, TIAN Ailing. Ripple free minimum beat control for digital closed-loop fiber optic gyroscopes[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 693–698. DOI: 10.5768/JAO202344.0308002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0308002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

谐振式光纤陀螺背向散射噪声抑制研究

Research on backscatter noise suppression for resonator fiber optic gyro

应用光学. 2018, 39(2): 290–294 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0208002>

高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究

Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro

应用光学. 2020, 41(1): 220–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108001>

一种耐静压分布反馈式光纤激光水听器探头设计

Design of resistant static pressure probe for DFB fiber laser hydrophone

应用光学. 2020, 41(2): 428–434 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0208002>

Y波导调制器残余强度调制研究

Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator

应用光学. 2017, 38(6): 974–978 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0605002>

加速度场下陀螺光纤环形变的影响分析

Analysis of influence of acceleration field on deformation of gyro fiber-optical ring

应用光学. 2021, 42(2): 360–370 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0208001>

地面最小操纵速度试飞光电测试方法

Photoelectric test method for ground minimum control speed flight test

应用光学. 2021, 42(6): 1072–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0693-06

数字闭环光纤陀螺的无纹波最小拍控制

徐金涛^{1,2}, 田爱玲¹

(1. 西安工业大学 光电工程学院 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 71002;

2. 西安中科华芯测控有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要: 针对数字闭环光纤陀螺控制系统采样频率抖动引起的输出纹波现象, 基于离散控制系统理论建立了四态方波调制下数字闭环光纤陀螺的理论模型。研究了控制系统的稳定条件、稳态误差和频率响应特性, 提出了数字闭环光纤陀螺无纹波最小拍控制方案。通过实验与原有控制系统进行对比, 结果表明, 无纹波最小拍控制有效消除了数字闭环光纤陀螺控制系统中采样频率抖动引起的输出纹波现象, 并有效提高了数字闭环光纤陀螺的精度, 零偏稳定性提高约30%。

关键词: 光纤光学; 光纤陀螺; 数字闭环; 方波调制; 最小拍控制

中图分类号: TN253; U666.12

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0308002

Ripple free minimum beat control for digital closed-loop fiber optic gyroscopes

XU Jintao^{1,2}, TIAN Ailing¹

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic

Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Sino Huaxin

Measurement and Control Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

Abstract: For the output ripple phenomenon caused by sampling frequency jitter of digital closed-loop fiber optic gyroscope control system, based on the discrete control system theory, the theoretical model of digital closed-loop fiber optic gyroscope under four-state square wave modulation was established. The stability conditions, steady-state errors and frequency response characteristics of the control system were studied, and the ripple free minimum beat control scheme of digital closed-loop fiber optic gyroscope was proposed. Through comparison with the original control system by experiments, the results show that the ripple free minimum beat control effectively eliminates the output ripple caused by sampling frequency jitter in the digital closed-loop fiber optic gyroscope control system, effectively improves the accuracy of the digital closed-loop fiber optic gyroscope, and the bias stability is improved by about 30%.

Key words: fiber optics; fiber optic gyroscope; digital closed loop; square wave modulation; minimum beat control

引言

干涉式光纤陀螺仪(interferometric fiber-optic gyroscopes, IFOG)是一种基于Sagnac效应的角速度传感器, 具有全固态、抗冲击、成本低、体积小等优点, 在航天、航空、航海、石油探井等领域得到了广泛的应用^[1-2]。数字闭环IFOG根据反馈信号进行相位调制, 消除由转速引起的相移, 改善了

IFOG的动态范围大和比例因子线性度, 是目前中高精度IFOG的主流方案^[3-4]。在数字闭环光纤陀螺中需要根据本征频率进行控制, 不同光纤陀螺本征频率存在差异, 通常采用锁相环等技术产生本征频率^[5]。然而, 系统时钟会存在随机波动, 锁相环产生的频率也存在起伏, 这将导致控制系统输出中存在纹波干扰, 严重影响数字闭环光纤陀

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2023-01-02

基金项目: 陕西省“两链”融合光子集成与光子制造重点专项(2021LLRH-03-3-3)

作者简介: 徐金涛(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事惯性传感与测量研究。Email: xujintao@opt.ac.cn

通信作者: 田爱玲(1964—), 女, 教授, 主要从事光学监测技术研究。Email: tian21964@sohu.com

螺的精度。

王夏宵等根据 Faraday 效应对数字闭环 IFOG 的动态特性进行了测试,克服了角振动台测试的局限性^[6-10]。王妍等提出了将正弦波信号叠加到反馈解调波中,实现在高带宽下 IFOG 动态性能的测试^[11-15]。赵政鑫等通过在 Y 波导上叠加正弦电压来等效角振动,增大了 IFOG 的带宽测试范围^[16]。以上研究主要在数字闭环 IFOG 的频率特性的测试上取得了很好的成果,但对数字闭环 IFOG 控制系统缺乏较为深入的研究。

为了提高数字闭环 IFOG 的可靠性和适应性,本文在四态方波调制解调原理的基础上,建立了数字闭环 IFOG 理论模型,分析了数字闭环 IFOG 的稳定工作条件和动态性能,指出了原有 IFOG 数字闭环光纤陀螺控制系统的不足,并提出了无纹波最小拍的优化控制方案。通过实验对比了优化前后数字闭环光纤陀螺的性能,结果表明,方案优化后陀螺的零偏稳定性等性能指标得到了明显提升。

1 理论模型

数字闭环 IFOG 结构如图 1 所示,主要包括光源、耦合器、相位调制器(Y 波导)、光纤环、光电探测器、前置放大器、模/数转换器(ADC)、数字逻辑处理器、数/模转换器(DAC)和输出缓冲放大器。光源、耦合器、相位调制器和光纤环构成 Sagnac 干涉仪。当光纤环旋转时,环路中相向传播的两束光波产生的相位差 ϕ_s 与旋转速率 Ω 成正比,比例系数为

$$K_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \quad (1)$$

式中: L 为光纤长度; D 为光纤环直径; λ 为光波长; c 为真空中的光速。

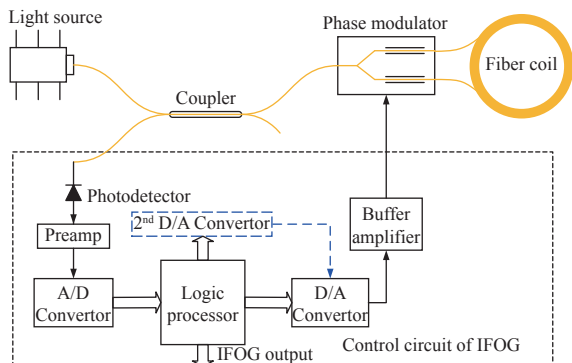


图1 数字闭环 IFOG 结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of digital closed-loop IFOG

在数字闭环 IFOG 中,光电探测器探测到的光强与相向行波相位差的函数关系为

$$I_D = \frac{1}{2} \eta I_0 (1 + \cos \phi_s) \quad (2)$$

式中: I_0 为光源光强; η 为光电探测器响应度。为了提高检测灵敏度,通常采用方波调制使 IFOG 工作在光强与相位差函数曲线的较大斜率处,并通过反馈阶梯波信号使数字闭环 IFOG 总相位差为零,形成数字闭环光纤陀螺一次闭环。另外,由于相位调制器的电光系数依赖于温度,因此,需要通过第二闭环来稳定相位调制器的增益。对于方波调制,只能在阶梯波复位时才能检测相位调制器增益误差信号。然而,阶梯波复位频率取决于转速,从而导致方波调制的第二闭环不稳定,为了避免这一问题,工程实际中通常采用四态方波调制来提高第二闭环回路的控制效率,其原理如图 2 所示。

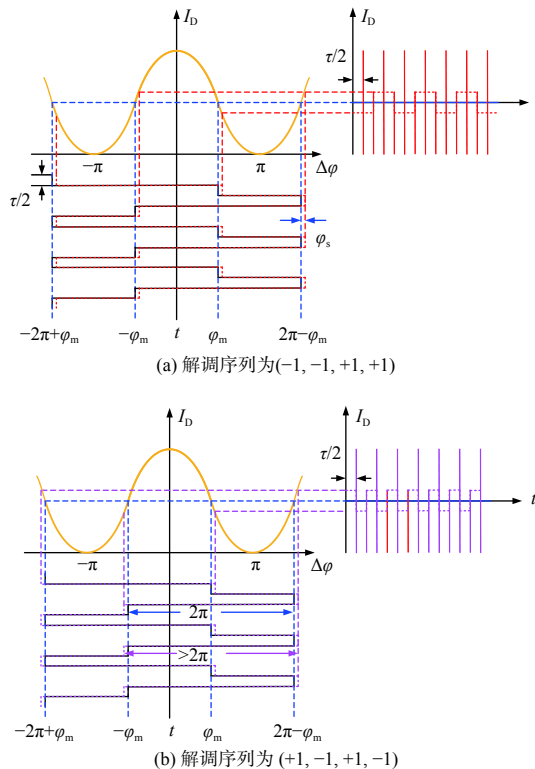


图2 四态方波调制原理

Fig. 2 Schematic of four-state square wave modulation

图 2 中,四态方波调制序列为 $(-2\pi + \varphi_m, \varphi_m, 2\pi - \varphi_m, -\varphi_m)$,状态持续时间为 $\tau/2$, τ 为光纤环渡越时间, φ_m 为调制深度。在四态方波调制下,对应的转速解调序列为 $(-1, -1, +1, +1)$,如图 2(a)所示;对应的调制器增益误差的解调序列为 $(+1, -1, +1, -1)$,如图 2(b)所示。因此,在本征频率下,可以同

时获得转速误差信号和调制器增益误差信号, 提高了第二闭环的控制效率。

在四态方波调制的数字闭环 IFOG 中, Sagnac 效应可以等效为比例环节, 比例系数为 K_s 。闭环控制使光纤陀螺工作点稳定在光强相位曲线较大的斜率点上, 因此, 干涉效应可以等效为比例环节, 比例系数 $K_1 = \eta I_0 \sin(\phi_s)/2$ 。光电探测器、前置放大器、A/D 转换器均可等效为比例环节, 比例系数分别为 K_2 、 K_3 、 K_4 ; 数字解调是在 2τ 的时间内对旋转误差进行采样, 传递函数可以表示为 $K_5 z^{-1}$; 采样误差经过控制器比例放大并累加, 对应的传递函数为 $K_6/(1-z^{-1})$; 控制器输出信号再经过累加形成阶梯波信号, 其传递函数为 $K_7/(1-z^{-1})$; 阶梯波信号经过 D/A 转换及缓冲器放大, 相应的传递函数可以表示为 K_8 ; 在相位调制器中阶梯波信号被延迟的时间为 τ , 并与原有信号相加, 其传递函数为 $K_7/(1-z^{-1})$ 。根据以上分析可得: 四态方波调制下数字闭环 IFOG 的控制系统框图如图 3 所示。

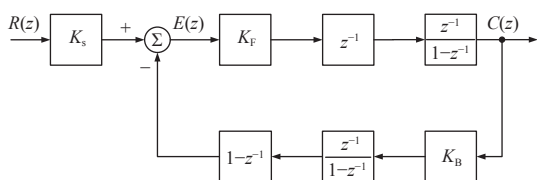


图 3 数字闭环 IFOG 系统框图

Fig. 3 Block diagram of digital closed-loop IFOG system

令 $K_F = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6$ 为前向增益, $K = K_7 K_8$ 为反馈增益, $K = K_F K_B$ 为开环增益。系统开环传递函数中包含 1 个 $z=1$ 的极点, 因此该控制系统为 I 型系统。根据自动控制理论, IFOG 的闭环传递函数为

$$\Phi(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{K_s K_F z}{z^3 - z^2 + K} \quad (3)$$

误差传递函数为

$$\Phi_e(z) = \frac{E(z)}{R(z)} = \frac{z^3 - z^2}{z^3 - z^2 + K} \quad (4)$$

根据以上分析建立数字闭环 IFOG 控制系统的理论模型, 下面将在该理论模型的基础上对控制系统性能进行分析, 并提出数字闭环 IFOG 的优化控制方案。

2 性能分析与优化

2.1 控制系统性能分析

根据数字闭环 IFOG 的传递函数, 可得其特征方程为

$$z^3 - z^2 + K = 0 \quad (5)$$

令 $z = (w+1)/(w-1)$, 可得:

$$Kw^3 + (2-3K)w^2 + (4+3K)w + (2-K) = 0 \quad (6)$$

根据劳思稳定判据, 满足系统稳定的不等式组为

$$\begin{cases} K > 0 \\ 2-3K > 0 \\ \frac{(2-3K)(4+3K)-K(2-K)}{2-3K} > 0 \\ 2-K > 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过求解不等式组, 可得数字闭环 IFOG 控制系统的稳定性条件为

$$0 < K < (\sqrt{5}-1)/2 \approx 0.618 \quad (8)$$

由于控制系统为 I 型系统, 在单位阶跃输入下, 其位置误差为 0。在单位斜坡输入下, 根据终值定理, 可知其稳态误差为

$$e_{ss}(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1}) \Phi_e(z) R(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{Tz^2}{z^3 - z^2 + K} = \frac{T}{K} \quad (9)$$

式 (9) 表明, 当数字闭环 IFOG 在角加速度输入下, 其稳态误差不为零, 该稳态误差与角加速度成正比, 与开环增益成反比。当 $K = 0.05$ 、 0.15 、 0.30 、 0.45 时, 数字闭环 IFOG 的幅频相频特性如图 4 所示。

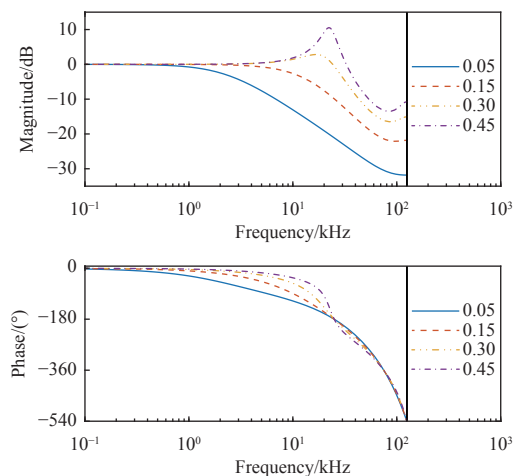


图 4 数字闭环 IFOG 的幅频相频特性

Fig. 4 Characteristics of amplitude frequency and phase frequency of digital closed-loop IFOG

图 4 中, 数字闭环 IFOG 频率带宽随开环增益 K 的增大而增大, 当开环增益大于 0.2 时, 在高频段, 增益大于 1。为了获得较大的带宽及稳定控制, 0.2 开环增益为最佳开环增益。

2.2 闭环控制系统优化

IFOG 控制系统性能分析表明, 其控制系统为

I 型系统,在角加速度输入下存在稳态误差。在积分器和阶梯波的设计中引入的采样器增大了系统超调量,并降低了系统的稳定性。为了提高数字闭环光纤陀螺的稳定性,在积分控制及阶梯波生成过程中,从缓存区前级输出,可以消除两个采样器。根据二阶无纹波最小拍系统控制设计方法,对原有 IFOG 控制器进行修正,消除在斜坡输入下的静态误差,获得优化后的数字闭环 IFOG 无纹波最小拍控制系统,如图 5 所示。

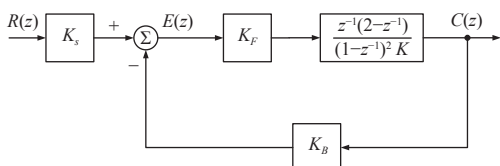


图 5 数字闭环 IFOG 无纹波最小拍控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of ripple-free minimum beat control for digital closed-loop IFOG

优化后的数字闭环 IFOG 控制系统传递函数为

$$\Phi'(z) = 2z^{-1} - z^{-2} \quad (10)$$

误差传递函数为

$$\Phi_e(z) = (1 - z^{-1})^2 \quad (11)$$

由于该控制系统为 II 型系统,在单位阶跃及单位斜坡输入下,其误差均为 0。

3 实验与结果分析

根据数字闭环 IFOG 无纹波最小拍控制系统框图,可得控制器输入输出关系为

$$y(k) = y(k-1) + [y(k-1) - y(k-2)] + x(k-1) + [x(k-1) - x(k-2)] \quad (12)$$

式中: $x(k)$ 为 k 时刻的误差量; $y(k)$ 为 k 时刻的输出量。以上分析表明,可以在 FPGA 中通过寄存器将输出误差量和输出量分别延迟两个控制周期,用减法器获取误差量的变化和输出量的变化,并将其用于积分控制,从而在 FPGA 中实现无纹波最小拍系统控制。

本文根据 GJB2426A-2004 光纤陀螺仪测试方法,通过对比原有控制与无纹波最小拍控制在光纤陀螺零偏稳定性、角随机游走、标度因数非线性度等主要指标上的差异来评估无纹波最小拍控制方法的优劣。具体步骤如下,在常温下对 70 型光纤陀螺分别采用原有控制方法和无纹波最小拍控制方法,进行 1 h 的性能指标测试,实验过程中,光纤陀螺中光纤环长为 800 m,光纤环平均直径为 70

mm,光源为超辐射发光二极管,光波长为 1 310 nm,ADC 位宽为 12 bit,DAC 位宽为 16 bit。测试结果如图 6 所示。

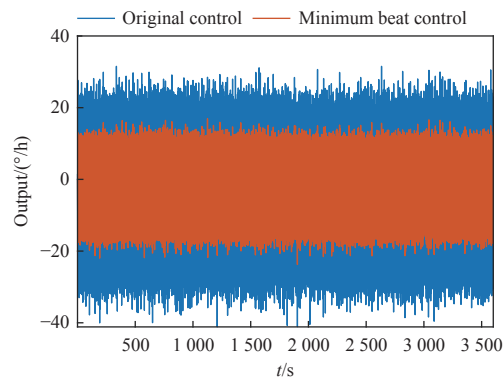


图 6 不同控制方法测试结果对比

Fig. 6 Comparison of test results of different control methods

测试结果表明,无纹波最小拍控制下光纤陀螺输出噪声明显降低,说明原有控制系统由于控制纹波的影响导致了较大的输出噪声。为了进一步评估无纹波最小拍控制的性能,对测试结果进行 Allan 方差分析,结果如图 7 所示。

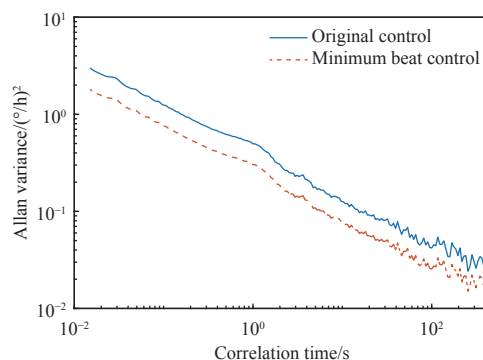


图 7 不同控制方法 Allan 方差结果对比

Fig. 7 Comparison of Allan variance results of different control methods

分析结果表明,无纹波最小拍控制下光纤陀螺性能得到了明显提升,表 1 给出了在不同温度下无纹波最小拍控制与原有控制方法在零偏稳定性、角随机游走、标度因数非线性度上的结果对比。

从表 1 可以看出,相比于原有控制系统,无纹波最小拍控制系统增加了误差变化量和输出信号变化量的控制,因此能更好地跟踪载体角运动,减小跟踪误差。零偏稳定性提高约 30%,角随机游走和标度因数非线性度均得到了提高。

表 1 原有控制与无纹波最小拍控制性能对比

Table 1 Comparison of performances between original control and ripple-free minimum beat control

Temperature / °C	Original control			Minimum beat control		
	bias stability / (°/h)	Angular random walk / (°/h) ^{1/2}	Scale factor nonlinearity / 10 ⁻⁶	bias stability / (°/h)	Angular random walk / (°/h) ^{1/2}	Scale factor nonlinearity / 10 ⁻⁶
-40	0.1317	0.0162	55	0.0791	0.0097	33
25	0.1251	0.0154	53	0.0763	0.0094	24
60	0.1298	0.0160	46	0.0785	0.0097	28

4 结论

从理论上分析了四态方波调制下 IFOG 数字闭环的理论模型, 指出原有控制系统为 I 型系统, 在积分控制和阶梯波生成过程中产生的两级延迟降低了系统可靠性, 并在角加速度输入下产生了与加速度大小成正比, 与开环控制增益成反比的稳态误差。为了消除稳态误差的影响, 设计了数字闭环光纤陀螺无纹波最小拍控制系统, 从原理上消除了数字闭环 IFOG 由采用频率引起的纹波误差。实验测试结果表明, 无纹波最小拍控制有效提高了数字闭环 IFOG 的性能。

参考文献:

[1] 史文策, 许江宁, 林恩凡. 陀螺仪的发展与展望[J]. 导航定位学报, 2021, 9(3): 8-12.
SHI Wence, XU Jiangning, LIN Enfan. Development and prospect of gyroscope[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(3): 8-12.

[2] WU Weiran, XIAN Tuohua, HU Guodong, et al. Rapid and precise compensation of scale factor in a fiber-optic gyroscope with a twin-peaks source[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3107-3110.

[3] SONG Tianxiao, WANG Xueyun, LIANG Wenwei, et al. Improved motor control method with measurements of fiber optics gyro (FOG) for dual-axis rotational inertial navigation system (RINS)[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13072-13084.

[4] ZHU Xunmin, CHEN Xingfan, SHU Xiaowu, et al. Eigen frequency measurements of a fiber optic gyroscope based on a staircase waveform with large temperature range[J]. Applied Optics, 2019, 58(6): 1562-1568.

[5] YANG Yuanhong, YAN Han, LI Shuai, et al. Estimation of gyro bias drift due to distributed polarization cross coupling in the fiber coil[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 10247-10257.

[6] 王夏霄, 张猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 146-150.
WANG Xiaoxiao, ZHANG Meng, LI Chuansheng, et al. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 146-150.

[7] 王夏霄, 张猛, 李传生, 等. 基于Faraday效应的光纤陀螺频率特性评估方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 120-124.
WANG Xiaoxiao, ZHANG Meng, LI Chuansheng, et al. Evaluation method of frequency characteristic of fiber optic gyroscope based on magneto-optic Faraday effect[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 120-124.

[8] 邬战军, 张春熹, 王夏霄, 等. 光纤陀螺数字闭环控制系统模型实验研究[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1582-1586.
WU Zhanjun, ZHANG Chunxi, WANG Xiaoxiao, et al. Experiment study on control system model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(9): 1582-1586.

[9] WANG Lei, WANG Wei, ZHANG Qian, et al. Self-calibration method based on navigation in high-precision inertial navigation system with fiber optic gyro[J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 064103.

[10] 周闻青, 费宇明, 洪桂杰, 等. 高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 220-227.
ZHOU Wenqing, FEI Yuming, HONG Guijie, et al. Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(1): 220-227.

[11] 王妍, 张春熹, 刘镇平. 闭环光纤陀螺数字控制器的设计与仿真[J]. 光电工程, 2004, 31(增刊1): 108-110.
WANG Yan, ZHANG Chunxi, LIU Zhenping. Design and simulation of a digital controller for closed-loop fiber optic gyroscopes[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(S1): 108-110.

- [12] 吴衍记, 刘淑荣. 数字闭环光纤陀螺频率特性分析与测试[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 730-734.
WU Yanji, LIU Shurong. Testing and analyzing for frequency characteristics of digital closed-loop FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(6): 730-734.
- [13] 李绪友, 张娜, 张瑞鹏. 光纤陀螺在摇摆状态下的误差特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 843-849.
LI Xuyou, ZHANG Na, ZHANG Ruipeng. Error characteristic analysis of FOG on sway base[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 843-849.
- [14] 宋凝芳, 李洪全, 李敏, 等. 基于等效输入的光纤陀螺带宽自主测试方法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(1): 101-105.
SONG Ningfang, LI Hongquan, LI Min, et al. Self-test method for bandwidth of fiber optical gyroscope based on equivalent input[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(1): 101-105.
- [15] 周原, 孙丰元, 梁勇, 等. 闭环光纤陀螺死区及光功率交叉误差的研究[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 948-953.
ZHOU Yuan, SUN Fengyuan, LIANG Yong, et al. Research on dead zone of closed-loop fiber optic gyroscope and optic power crosstalk error[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 948-953.
- [16] 赵政鑫, 于海成, 李超, 等. 基于等效角振动的光纤陀螺带宽测试方法[J]. 导航与控制, 2016, 15(1): 99-102.
ZHAO Zhengxin, YU Haicheng, LI Chao, et al. A bandwidth test method for fiber optic gyroscope based on equivalent angular vibration[J]. Navigation and Control, 2016, 15(1): 99-102.