Research on Crosstalk Auto Detection of High Precision Fiber Optic Gyroscope Detection Circuit*

CAI Meifang*
(School of Artificial Intelligence, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang Jiangxi 330038, China)

Abstract: In the application of fiber optic gyro detection circuit, due to the influence of self detection scheme, there are many test vectors required for crosstalk fault detection. Therefore, a method of crosstalk self detection of high-precision fiber optic gyro detection circuit is proposed. The digital closed-loop detection principle of fiber optic gyroscope is analyzed, and the crosstalk characteristics of the detection circuit are extracted. According to the continuous signal differential equation of the closed-loop circuit, the equivalent analog input speed is calculated. Combined with the digital step wave algorithm, the circuit crosstalk detection scheme is designed. The dead zone measurement result of the earth angle crosstalk component is obtained. The simulation results show that the number of vectors of the proposed crosstalk self detection method is 46, when the crosstalk fault coverage is 80%, compared with the calculation method of crosstalk uncertainty of embedded "reflector" new resonant gyroscope and multi conductor transmission line, which reduces the cost of self-test.

Key words: fiber optic gyroscope; detection circuit; crosstalk; self detection; digital step wave; dead zone measurement
EEACC: 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.012

高精度光纤陀螺检测电路串扰自检测研究*

蔡美芳*
(南昌工学院人工智能学院学院, 江西 南昌 330038)

摘 要: 光纤陀螺检测电路应用过程中, 受到自检测方案的影响, 导致串扰故障检测所需测试矢量较多。因此, 提出高精度光纤陀螺检测电路串扰自检测研究。分析光纤陀螺数字闭环检测原理, 并提取检测电路串扰特征。根据闭环电路的连续信号微分方程, 计算等效模拟输入转速。结合数字阶梯波算法, 设计电路串扰检测方案。再计算地球自转角速率的分量测量死区, 得到电路串扰测量结果。仿真结果表明: 与嵌入式"反射器"的新型谐振陀螺仪和多导体传输线串扰不确定性问题的计算方法相比, 当串扰故障覆盖率为 80%, 所提出的串扰自检测方法的矢量数量为 46 个, 降低了自测试所需的成本。

关键词: 光纤陀螺; 检测电路; 串扰; 数字闭环; 数字阶梯波; 死区测量
中图分类号: V241.5+9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2023)01-0068-06

随着科技水平的进步, 研制出以 Sagnac 效应为核心的光纤陀螺。由于结构简单的特性, 光纤陀螺开始应用于航空、兵器等多个领域。分立光学器件之间需要采用光互联工艺导致生产过程复杂[1], 随着光纤陀螺应用范围的扩大, 光纤陀螺的设计均有精度、尺寸约束。光纤陀螺需要保持高效性和可靠性[2], 为了确保光纤陀螺的良好运行, 检测电路是其中不可缺少的组件之一, 随着高精度光纤陀螺向着小型化发展, 检测电路却开始呈现出显著的串扰与噪声问题。国内对光纤陀螺仪的研究多以干涉型光纤陀螺为主, 但高精度干涉式陀螺由于其光纤环是由米的保偏光纤组成, 光纤环受温度等外界因素的影响较大, 直接影响到陀螺的稳定性。国外的研究方案中采用的都是对单路的泵浦光进行稳频, 这同样会给未稳频控制的另一路泵浦光带来失谐对陀螺的影响, 对此, 本章提出了对泵浦光双光路进行稳频的方案, 从根本上消除失谐对陀螺的影响, 并结合稳频方案给出了信号检测方法。针对串扰检测问题, 无数研究人员展开了串扰自检测研究, 但所提出的检测方法均无法满足越来越高的检测要求。文献[3]提出了一种带有嵌入式"反射器"的新型谐振陀螺仪, 并进行了原理证明。我们的共振陀螺仪非传统地利用光强度的变化来测量角速度。在这项工作中, 设计并实现了一种利用光纤尾纤法拉第旋转器

项目来源: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ191096)
收稿日期: 2021-12-06 **修改日期**: 2022-06-26

提供非互易偏置的新方法,以提高陀螺仪的灵敏度。我们还使用薄膜沉积在谐振器内创建了一个串联反射器,以稳定和增强反射率,但是,该方法检测时间较长。文献[4]方法提出一种多导体传输线串扰不确定性问题的计算方法,该方法首先通过建立参数不确定的多导体传输线模型,依据多导体传输线理论,考虑模型具有安全阈值,结合基于最可能失效点的随机响应面法完成对多导体传输线模型失效概率的计算。通过比较,该方法得到的模型失效概率与蒙特卡罗法的计算结果基本一致,但其计算效率得到了大幅提升,并且能方便地得到模型串扰的统计矩,从而实现对汽车等复杂系统中的线束或电路板微带线等传输线电磁兼容性能的高效准确预测。但是,该检测方法所需的测量矢量较多。本文针对高精度光纤陀螺,提出一种基于检测电路串扰检测的方法。通过验证可知,所提出的检测方法与传统方法相比,应用过程中所需的测量矢量得到极大减少,降低了检测成本。

1　高精度光纤陀螺检测电路串扰自检测方法设计

1.1　提取检测电路串扰特征

高精度光纤陀螺内,最常用的是数字闭环检测电路,本文以该检测电路为基础,分析检测电路串扰特征和主要故障类型,构建检测电路串扰模型。缩短了芯片之间的互连线长度,降低了延迟与功耗,实现了高密度集成[5],数字闭环检测电路的工作原理如图 1 所示。

图 1 中,$\Delta\phi_s$ 表示转速引起的相位差,$\Delta\phi_m$ 表示信号调制造成的相位差,$\Delta\phi_f$ 表示闭环反馈相位差,$\Delta\phi_e$ 表示闭环误差变量,k 表示串扰等效比例系数。需要注意的是,高精度光纤陀螺检测电路串扰故障发生时,串扰大小与阶梯波幅值呈正比例关系。

针对光纤陀螺数字闭环检测电路,分析导致串扰问题出现的主要因素,陀螺光路或电路的故障一般会表现为前向增益的显著变化[6],经过简化合并

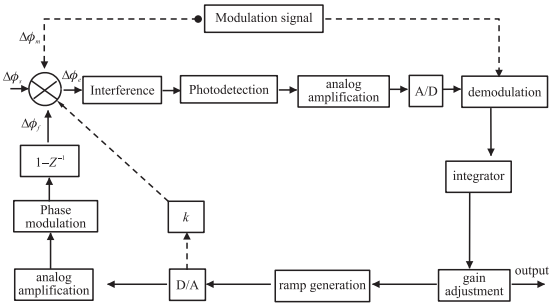


图 1　光纤陀螺闭环工作原理

处理,明确串扰故障的主要类型,最终得到下降延迟、上升延迟故障和正跳变、负跳变故障四种,将其描述为图 2。

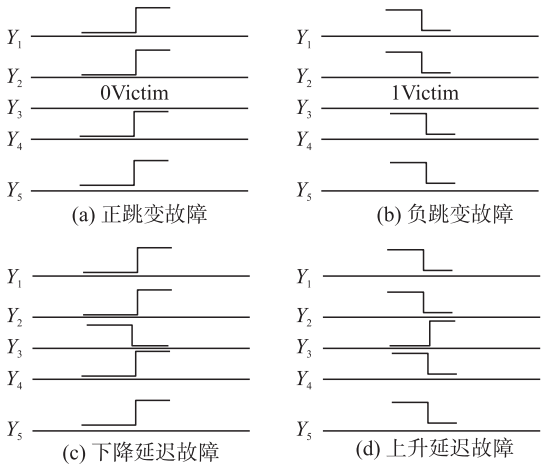


图 2　串扰故障主要类型

本文利用无线传感器采集串扰信号,考虑到多种因素干扰都会引起串扰信号采集结果的变化。为了消除检测电路采集信号中的干扰噪声,本文应用傅立叶变换方法处理串扰信号,获取去除噪音后的串扰信号。电路内串扰现象出现后,分析光纤陀螺检测电路内信号波动情况,并将相应的频段信号能量充当该串扰故障类型的特征向量。

1.2　计算等效模拟输入转速

以串扰故障特征为基础,本文设计施加模拟转速阶梯波的方式获取自检测结果。用等效转速信号的阶梯波人为可控,可以便捷地模拟不同的转速输入[7],依托于图 1 所示的工作原理图,获取光纤陀螺闭环电路的连续信号微分方程,表达公式为:

$$\tau\frac{\phi_f}{t}+\Delta\phi_s+e(\phi_f)=0 \tag{1}$$

式中:τ 表示光在光纤环上的渡越时间,ϕ_f 表示阶梯波调制相位,t 表示光纤陀螺运行时间,e 表示串扰解调后闭环误差项。其中,反馈相位差与转速的输出量保持一致,而误差项则与串扰等效比例系数相同。

因为数字阶梯波在检测工作中具有绝对相位特点,可以确定输入转速与检测电路实际数据之间的串扰解调结果,具备线性关联。因此,可以将式(1)转变为:

$$\tau\frac{\phi_f}{t}+\Delta\phi_s+k(\phi_f)=0 \tag{2}$$

并有:

$$\begin{cases}\phi_f=0\\ t=0\end{cases} \tag{3}$$

针对公式(2)进行求解,可以得到求解公式:

$$\phi_f=-\frac{\Delta\phi_s}{k}+\frac{\Delta\phi_s}{k}\exp\left(-\frac{k}{\tau}t\right) \tag{4}$$

根据公式(4)得到的求解结果,获取检测电路串扰自检测过程中需要施加的等效模拟输入转速,计算公式表示为:

$$\tau\frac{\phi_f}{t}=-\Delta\phi_s\exp\left(-\frac{k}{\tau}t\right) \tag{5}$$

当模拟输入转速的初始值设置范围为[2π,-2π],得到复位时间计算公式:

$$T=-\frac{\tau}{k}\ln\left(\frac{-2\pi}{\Delta\phi_s/k}+1\right) \tag{6}$$

式中:T 表示复位周期,ln 表示指数函数。将公式(6)计算结果代入公式(5),获取复位时的输出转速。为了避免输出转速出现周期性振荡问题,影响串扰自检测准确率,本文分析输入转速的振荡频率,并计算复位周期内平均输出转速,计算公式为:

$$\frac{1}{T}\int_0^T-\Delta\ \phi_s\exp\left(-\frac{k}{\tau}t\right)=\frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{-2\pi k}{\Delta\ \phi_s}+1\right)}\approx$$

$$\frac{2\pi k}{\frac{-2\pi k}{\Delta\ \phi_s}-\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi k}{\Delta\ \phi_s}\right)^2}=-\frac{\Delta\ \phi_s^2}{\Delta\ \phi_s+k} \tag{7}$$

根据公式(7)可知,平均输出转速的计算受到干扰项的直接影响,并且限制等效模拟输入转速的绝对值总是低于转速引起的相位差。通过分析可知,高精度光纤陀螺检测电路内串扰大小,引起附加零偏值的变化,间接改变输入转速值。设置阶梯波调制相位增长公式为:

$$\phi_f=\frac{-\Delta\phi_s}{k} \tag{8}$$

当检测电路中闭环解调结果与转速相位差相加结果为 0 时,输出转速也为 0,该状态下阶梯波的波动大幅度减小,形成光纤陀螺的“死区”。

等效转速输出结果内包含的串扰信息越大,自检测结果表现出的“死区”会显示为 0。因此,在施加等效模拟输入转速时,主要确保转速输入足够小。

1.3 设计数字阶梯波检测方案

根据闭环光纤电流传感器原理,可得到整个系统的动态模型[8],数据闭环检测电路运行时,数字阶梯波是不可或缺的组成结构,具有促进转速信号闭环的功能。而且,数字阶梯波的台阶高度设置,依托于输入转速值大小,二者之间具有强关联性。自检测方案设计过程中,为了保证等效模拟输入转速符合串扰故障自检测需求,实时改变阶梯波台阶高值。干扰源 A 点的波形可近似表示为梯形波[9]。针对数字阶梯波的数量和位数进行设置,计算不同复位时刻下,阶梯波所对应的相位差。分析将数模转换器内部的 1 个最低有效位,充当反馈阶梯波最小台阶高度,获取该台阶高度下相位差计算公式:

$$\Delta\phi_{\mathrm{LSB}}=\frac{2\pi}{2^N} \tag{9}$$

式中:LSB 表示最低有效位,$\Delta\phi_{\mathrm{LSB}}$ 表示最低有效位的相位差,N 表示数字阶梯波位数。

结合光纤陀螺的 Sagnac 效应,得到 1 个最低有效电位和转速之间的对应关系:

$$\Omega_{\mathrm{LSB}}=\frac{\lambda c}{2\pi LD}\cdot\frac{2\pi}{2^N} \tag{10}$$

式中:Ω 表示最低有效位和转速的关系,D 表示高精度光纤陀螺内光纤环直径,L 表示光纤环长度,λ 表示光纤平均波长,c 表示真空光速。

考虑到高精度光纤陀螺的构造特点[10-11],仅依靠最低有效位和转速之间的对应关系进行串扰检测,无法得到高精度检测结果。为了提升测量精度要求,本文结合数字闭环原理设置等效模拟输入转速与 1 个最低有效位相对应。初始自检测阶段可以将阶梯波台阶高度设置为 0,但是随着自检测时间的增长,需要保证平均台阶高度与 1 个最低有效位施加转速相同,具体表达公式为:

$$\Omega_{\mathrm{input}}=\frac{m}{n}\Omega_{\mathrm{LSB}} \tag{11}$$

式中:Ω_{input} 表示阶梯波台阶高度,m 表示每个台阶中最低有效位数量,n 表示阶梯波台阶数量。

通过数字阶梯波检测方案完成输入转速的实时按需调整。再结合高精度光纤陀螺工作原理[12],分别设置阶梯波寄存器位数、平均波长、模拟小转速输入值等参数信息,不需要较高的检测成本就可以得到串扰检测结果。

1.4 获取电路串扰测量结果

本文采用敏感地球自转角速率分量的方式,进行高精度光纤陀螺的死区检测。从干涉式光纤陀螺电路串扰信号中提取特征[13],以地轴为中心,根据地球自转角速度判断检测电路串扰测量区域的地理位置,采用地理经纬度将其描述出来。光纤线圈直接连接到多功能集成光学芯片,以减少不稳定性和反射[14]。将高精度光纤陀螺水平放置于仿真环境中,设置光纤陀螺敏感轴指向上方,生成地球自转角速率计算公式:

$$\omega_d=\omega\sin\varphi \tag{12}$$

式中:ω_d 表示地球自转角速率,ω 表示自转角速度,

φ 表示所处地理位置,sin 表示正弦函数。

高精度光纤陀螺内部的光纤环处于竖直状态时,敏感轴为东西方向水平状态,用于补偿光电探测器上影响测量通道的光信号的恒定分量[15]。经过验证可知,这两个指向的地球自转角速率输出结果为 0,表明东西方向没有分量。因此,本文在串扰检测过程中调整敏感轴方向。将光纤陀螺敏感轴设置为向北指向,可得出北向分量:

$$\omega_\delta = \omega\cos\varphi \tag{13}$$

式中:δ 表示倍向分量,cos 表示余弦函数。之后,再一次改变敏感轴方向,使其指向南方,得到该状态下地球自转角速度的南向分量,具体计算公式为:

$$\omega_\psi = -\omega_\delta = -\omega\cos\varphi \tag{14}$$

式中:ψ 表示南向分量。

参考上述计算公式,本文设计的串扰自检测方法将敏感轴指向起始点设置为正南,并进行匀速旋转,得到存在死区的串扰检测正弦曲线,如图 3 所示。

根据图 3 所示的存在死区的输出曲线,重点分析图上标注区域,判断高精度光纤陀螺死区的具体范围,从而完成检测电路的串扰自检测。

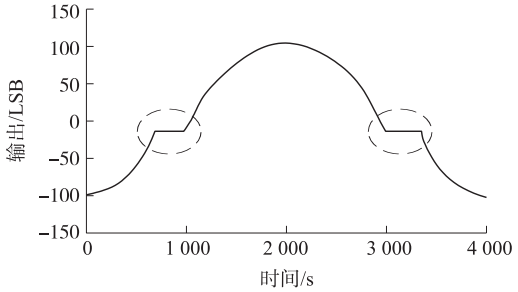


图 3　存在死区的输出曲线

2　仿真

本文以高精度光纤陀螺为研究对象,针对其检测电路的串扰故障进行分析,建立一种新的自检测方法。为了验证所提出自检测方法的应用优势,根据光纤陀螺检测电路工作模式,建立仿真所需的模拟电路。运用本文提出的方法,检测模拟电路中存在的串扰问题,展示所提出方法的有效性。

2.1　建立模拟电路

为了确保仿真分析顺利进行,本次仿真在专业的仿真室内展开,采用优化的 Pound-Drever-Hall 伺服锁定方案探测反射腔[16]。建立光纤陀螺检测电路串扰故障自检测模拟电路。本文提出的自检测方法,以模拟转速阶梯波为核心,为了避免所提出的自检测方法对串扰产生源头产生影响,本次仿真采用一块单独的电路板设计检测所需的阶梯波,形成图 4 所示的串扰检测模拟电路图。

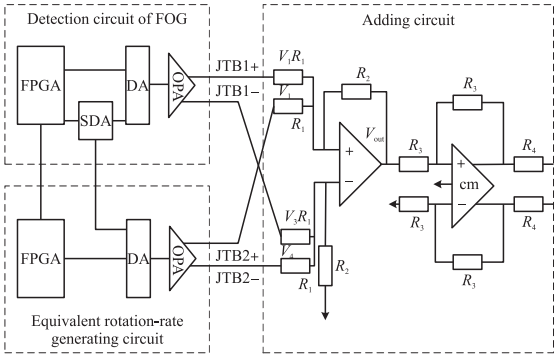


图 4　串扰检测模拟电路图

根据图 4 所示的电路图可知,等效模拟转速阶梯波的施加,与检测电路信号检测的时序完全相同。分析自检测周期内最低有效位与 0 的比例,手动改变二者之间的比例,完成输入转速的改变,将需要施加的等效转速值输入模拟电路内。

从阶梯波电路配置后续处理模式来看,高精度光纤陀螺信号处理与模拟转速生成具有较高的一致性。得到电路数字增益计算结果,也就明确了模拟增益值。在串扰故障自检测过程中,通过阶梯波施加模拟转速,明确检测电路的串扰状态。通过计算获取调制信号、模拟转速阶梯波以及反馈阶梯波的和,将其施加在波导信号上。并在施加操作进行之前,添加一个由可编程逻辑门阵列和等组件共同构成的加法电路,保证仿真顺利进行。

2.2　仿真分析

仿真所需的模拟电路设计完成后,单独运行该电路,获取图 5 所示的阶梯波信号图。

在模拟电路中,运用本文提出的串扰自检测方法,拟定一个线性变化的转速,结合串扰故障自检测所处实际地理位置,设置模拟转速施加范围。应用本文提出的自检测方法后,得到图 6 所示的串扰自检测结果。

根据图 6 可知,本文所提出的自检测方法应用

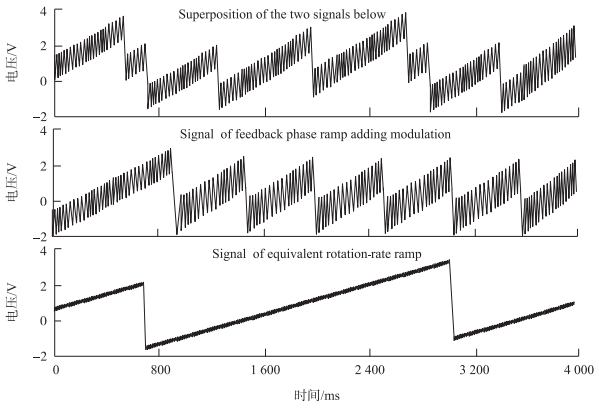


图 5　模拟电路中阶梯波信号图

后,得到光纤陀螺检测电路的死区范围大概在[0.07,-0.07]°/h,表明当前模拟电路中串扰发生的范围。综上所述,本文提出的自检测方法在实际应用中具有可行性。

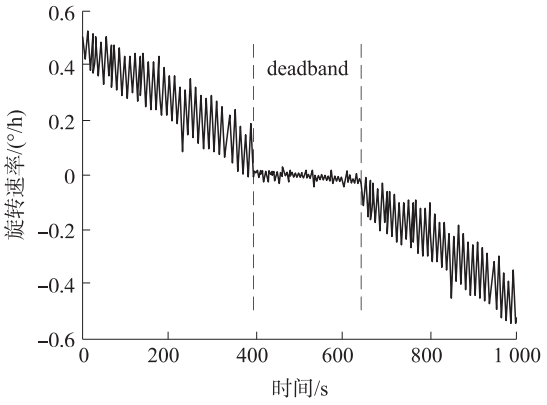


图 6 串扰自检测结果

2.3 方法性能对比

为了研究所提出串扰检测方法的应有优势,在同样的仿真环境中,运用文献[3]、文献[4]提出的方法进行串扰检测,对比不同方法的应用性能。因为光纤陀螺检测电路内部结构较为复杂,需要应用测试矢量才可以实现串扰自检测,这一环节是自检测过程中成本最高的环节。本次仿真以自检测所需测试矢量为判断指标,验证所提出自检测方法的应用效果,不同方法在串扰自检测过程中,所需的测试矢量数量对比结果如表 1 所示。

表 1 不同自检测方法所需测试矢量数量对比

串扰故障覆盖率/%	所需测试矢量/个		
	本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
10	8	32	37
20	12	46	53
30	16	60	75
40	20	69	88
50	25	77	105
60	33	90	127
70	38	102	141
80	46	123	168

根据表 1 可知,串扰自检测过程中,随着光纤陀螺检测电路内串扰故障覆盖率的提升,自检测所需的测试矢量随之增多。但是,本文设计的自检测方法所需的测试矢量数量远远低于文献[3]、文献[4]方法,当串扰故障覆盖率为 80%,本文方法的矢量数量为 46 个,文献[3]方法矢量数量为 123 个,文献[4]方法的矢量数量为 168 个,由此可知,采用本文方法可极大降低自测试所需成本。

3 结束语

本文针对光纤陀螺深入分析,明确其高精度发展后检测电路内串扰问题,并以串扰自检测为目的展开研究。本文分析串扰产生原理模型明确故障特征,并在电路中输入模拟转速阶梯波,再利用死区测量方法得到串扰自检测结果。通过仿真测试结果可知,所提出的串扰自检测方法极大降低了自检测所需的测试矢量个数,有效降低电路检测成本,促进光纤陀螺向着高精度发展。考虑到串扰自检测研究的主要目的是设计合理的容错控制方案,保证高精度光纤陀螺的良好运行。因此,未来将会针对串扰故障精确定位技术进行研究。

参考文献:

[1] 尚克军,雷明,向强,等. 一种基于集成光学芯片的微小型光纤陀螺[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(5):650-653.

[2] 王斌华,黄迟航,胡桥,等. 加速度场下陀螺光纤环形变的影响分析[J]. 应用光学,2021,42(2):360-370.

[3] Nandan R S,Srivastava S,Gowrishankar R. Non-Reciprocal Biasing for Performance Enhancement of the Resonant Fiber Gyroscope with 'Reflector' Using In-Line Faraday Rotators: Design, Analysis and Characterization [J]. Optical Fiber Technology,2019,53:102038.

[4] 杨开宇,刘伟,王天皓,等. 一种多导体传输线串扰不确定性问题的计算方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(2):747-753.

[5] 王秀云,刘军,任福继. TSVs 串扰故障分组测试和诊断策略[J]. 微电子学与计算机,2020,37(2):30-36.

[6] 张春熹,秦雪馨,郑月,等. 光纤陀螺环路增益高精度实时检测与闭环控制方法[J]. 中国惯性技术学报,2021,29(3):362-367,373.

[7] 陈和宇,郑月,孔令海,等. 小型化高精度光纤陀螺的检测电路串扰自检测[J]. 中国激光,2020,47(1):173-178.

[8] 李奇,李传生,赵叶铭,等. 闭环光纤电流传感器高阶动态模型及仿真[J]. 计量学报,2021,42(6):785-792.

[9] 袁义生,兰梦罗. 电力电子电路 PCB 电场串扰及屏蔽研究[J]. 电子器件,2020,43(6):1215-1221.

[10] 王磊,潘雄,张少博,等. 闭环光纤陀螺调制非线性度的测试方法研究[J]. 激光杂志,2019,40(3):55-59.

[11] 陈贤,杨建华,周一览,等. 一种低噪声开关电源在光纤陀螺系统中的应用[J]. 光电工程,2018,45(1):31-39.

[12] 王雪燃. 防强电干扰技术下电路弱电谐振抑制仿真[J]. 计算机仿真,2020,37(7):144-148.

[13] 朱锐. 干涉式光纤陀螺电路串扰的智能辨识技术[J].

激光杂志,2020,41(10):149-152.
[14] Morris T A,Digonnet M. Broadened-Laser-Driven Polarization-Maintaining Hollow-Core Fiber Optic Gyroscope[J]. Journal of Lightwave Technology,2020,38(4):905-911.
[15] Kurbatov A M,Kurbatov R A,Goryachkin A M. Fiber-Optic Gyroscope Accuracy Improvement by Suppressing the Parasitic Effects in Integrated Optic Phase Modulators [J]. Gyroscopy and Navigation,2019,10(4):256-267.
[16] Ravaille A,Feugnet G,Debord B,et al. Rotation Measurements Using a Resonant Fiber Optic Gyroscope Based on Kagome Fiber [J]. Applied Optics, 2019, 58 (9): 2198-2204.



蔡美芳(1983—),女,汉族,陕西咸阳人,副教授,研究方向:电子信息工程,caimeifang526@163.com。