

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.02.004

谐振式光纤陀螺系统建模及其应用研究

邹康, 曲天良, 郑畅, 张熙, 王晨晟

(华中光电技术研究所, 武汉 430223)

摘要:谐振式光纤陀螺作为高精度角速度传感器,以其集成度高、成本低以及抗干扰性强等独有优势,逐渐成为下一代光学陀螺研究发展的热点。通过对谐振式光纤陀螺工作原理的分析,建立了陀螺数字信号处理系统可视化模型,并对系统谐振曲线和同步解调曲线等开环输出以及锁频反馈下闭环输出进行了模拟仿真。利用仿真模型分析了正弦波调制下谐振谱分裂现象,并搭建实验装置对其进行了验证。结果表明,实验中正弦信号调制频率高于系统谐振输出半高全宽一半,即对应2 MHz时,谐振谱分裂会导致同步解调输出线性区域出现明显失真,严重恶化了标度因数线性度。因此,搭建的谐振式光纤陀螺仿真模型能够准确而有效地模拟系统的工作状态,在系统噪声抑制和精度提升方面具有指导性意义。

关键词:谐振式光纤陀螺;系统建模;谐振谱分裂;正弦调制;噪声抑制

中图分类号:TN248.4

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2024)02-0035-11

Research on modeling and application of resonant optical gyroscope

ZOU Kang, QU Tianliang, ZHENG Chang, ZHANG Xi, WANG Chensheng

(Huazhong Institute of Optoelectronic Technology, Wuhan 430223, China)

Abstract: As high-precision angular velocity sensors, resonant optical gyroscopes have gradually become a hot spot in the research and development of the next generation of optical gyroscope due to its unique advantages in integration, low-cost and anti-interference. Based on the analysis of the principle of the resonant optical gyroscope, the visual model of the gyro digital signal processing system is established, and the open-loop output such as the resonance curve and the synchronous demodulation curve as well as the closed-loop output under the frequency-locked feedback are simulated. The simulation model is used to analyze the resonance spectrum splitting phenomenon under sinusoidal wave modulation. An experimental device is built to verify it. The result shows that when the modulation frequency of the sinusoidal signal in the experiment is higher than half of the full width at half maxima (FWHM), referring to 2 MHz, the resonance spectrum splitting leads to obvious distortion in the linear region of the synchronous demodulation output, which seriously deteriorates the linearity of the scale factor. Therefore, the simulation model of resonant optical gyroscope can accurately and effectively simulate the working state of the system, which has guiding significance in noise suppression and accuracy improvement of the system.

Key words: Resonant optical gyroscope; System modeling; Resonance splitting; Sinusoidal modu-

收稿日期:2023-11-25;修订日期:2024-02-06

作者简介:邹康(1995—),男,博士,工程师,主要从事微型惯性器件方面的研究。

通信作者:曲天良(1983—),男,博士,研究员,主要从事惯性导航及光子学器件等方面的研究。

lation; Noise suppression

0 引言

谐振式光纤陀螺(resonant fiber optic gyroscope, RFOG)是一种基于检测 Sagnac 效应而产生的谐振频率差来实现角速度高精度测量的角速率惯性传感器[1]。相较于目前应用最广泛的干涉式光纤陀螺, RFOG 系统中光路在谐振腔内循环传输, 形成谐振增强效应, 因而采用单圈谐振腔环路代替多圈干涉环, 在长度大大缩小的同时仍能实现与干涉式光纤陀螺相同的性能指标[2], 在减小系统体积、降低成本的同时也能够降低由于压力和温度不均匀性所引起的非互易性误差[3-4], 逐渐成为了近几年集成化微光学陀螺发展的热点[5-6]。

在谐振式光纤陀螺系统中, 外界角速度所引起的顺逆时针方向谐振频率频差往往是一个微弱信号(通常小于 1 Hz[7]), 另外光电探测器以及谐振腔等核心器件易受外界环境干扰而引入噪声。为实现陀螺系统高精度检测, 提升信噪比, 需要对输入的光束进行相位调制, 并利用锁相放大器(lock-in amplifier, LIA)解调出相应的有用信号, 即为调相谱技术[8]。常见的相位调制波形有锯齿波、三角波和正弦波, 锯齿波调制方案中由于复位引起的脉冲噪声及相位台阶时间误差会产生振荡噪声, 从而影响系统闭环锁频精度[9], 三角波调制存在频率转折点的问题[10], 因此, 正弦调制成为目前调相谱技术中应用较为广泛的一种调制方式。

针对正弦调制技术下的谐振式光纤陀螺, 需要将激光器输出中心频率实时跟踪锁定到谐振腔一路传输光波谐振频率上[11], 另一路解调信号则作为陀螺系统检测输出[12]。因此, 为了获得更高的锁频精度, 需要保证 LIA 解调输出的灵敏度尽可能的高, 即是同步解调输出曲线零点处斜率值最大[13]。陀螺系统正常工作时需要实时进行闭环反馈, 通过数学公式及数值仿真无法对其工作机理进行动态模拟分析。另外, 随着直接数字合成技术的成熟及数字解调技术的发展, RFOG 系统中正弦调制频率可达到 MHz 量级以获得更大解调斜率的解调输出[14]。随着调制频率的增加, 出现了很多问题, 谐振谱分裂现象则是其中之一[15]。因此, 为了更为准确地对 RFOG 闭环工作过程及谐振谱分裂等复杂物理现象进行仿真分析, 可利用 Simulink 仿真平台

对系统环路进行建模, 为陀螺系统参数合理选取和优化提供理论和数据支撑[16]。

本文首先通过对谐振式光纤陀螺系统组成及数字信号检测原理进行阐述, 推导了正弦信号调制以及 LIA 同步解调下的光场表达式, 为模型的搭建提供了理论基础; 随后搭建了陀螺数字信号处理系统 Simulink 仿真模型, 并对系统谐振曲线和同步解调曲线等开环输出以及锁频反馈下闭环输出进行仿真, 复现了陀螺实现角速度探测的过程; 利用仿真模型分析了正弦波调制下谐振谱分裂现象, 并搭建了开环实验系统对其进行了有效验证。搭建的谐振式光纤陀螺仿真模型能够对系统工作状态进行准确而有效的模拟, 对正弦调制信号频率的合理选取和系统性能提升具有指导性作用。

1 RFOG 工作原理

1.1 系统组成

Sagnac 效应是法国科学家 Sagnac 在 1913 年提出的, 它构成了现代光学陀螺(干涉式光纤陀螺、激光陀螺和谐振式光纤陀螺)的理论基础。对于任意形状的闭合环路, 当环路静止时, 顺/逆时针两方向传播的光束从环路任一位置出发, 各自传输一周后到达原点, 两束光的光程差为 0; 假设闭合环路相对于惯性系存在 Ω 的角速度转动, 则两方向光束传输一圈到达原点时存在谐振频率差 Δf , 可表示为

$$\Delta f = \frac{D}{n\lambda_0} \cdot \Omega \quad (1)$$

其中, D 为环路直径; n 为环路介质折射率; λ_0 为激光器输出中心波长。

陀螺系统中由角速度所产生的谐振频率差信号较小, 同时由于光学系统易受到外部环境如温度、振动等的干扰, 引入相应噪声。因此, 在系统中需要引入互易正弦调制光学系统和数字信号处理系统来提高信号检测能力, 同时减小噪声干扰。图 1 给出了基于互易正弦调制技术的 RFOG 系统, 系统主要由可调谐激光器模块(tunable laser)、铌酸锂相位调制器(phase modulation, PM)、光电探测器(phase detector, PD)、光纤耦合器(C1、C2、C3、C6)、光纤环形器(C4、C5)、强度调制器(IM1、IM2)、光纤谐振腔(fiber ring resonator, FRR)、数字锁相放大器(digital lock-in amplifier, DLIA)和比例积分 PI 反馈模块构

成,其中 DLIA 包含了相敏检测器(phase sensitive detector, PSD)和低通滤波器(low-pass filter, LPF)。光纤谐振腔作为角速度敏感单元,可将外界转速信号转换成 Sagnac 频率差;强度调制器(IM1、IM2)结合光纤耦合器 C2 和 C3 以及光电探测器 PD1 和 PD3 可对顺/逆时针光路光功率进行反馈补偿,有效抑制光学克尔噪声。相位调制器 PM0、PM1 和 PM2 构成了互易正弦调制方案^[7],通过相位调制器 PM0 施加互

易正弦调制信号用于解调,相位调制器 PM1 和 PM2 施加不同的低频正弦调制,用来抑制背向散射噪声。实验中,光纤耦合器 C6 分束比通常选择为 90/10,即光束 10% 能量耦合进入谐振腔内,可调谐激光器模块为窄线宽半导体激光器,采用电流调谐方式,调谐系数为 20 MHz/mA,可通过改变光源驱动电流实现输出频率调谐。

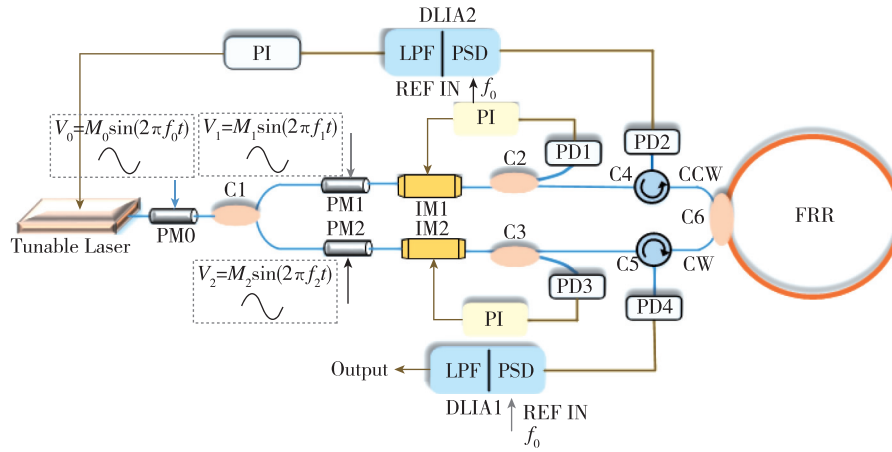


图 1 基于互易正弦调制技术的谐振式光纤陀螺系统

Fig. 1 RFOG system based on reciprocal sinusoidal modulation technique

1.2 数字信号检测原理

RFOG 中数字信号检测系统主要包括正弦调相谱模块、同步解调模块以及频率闭环反馈模块,其中正弦相位调制是目前应用在调相谱技术中最为广泛的一种调制方式,在相位调制器上施加正弦电压信号对输入光场相位进行调制,调制后光场为^[17]

$$E_m = E_0 \cdot e^{i[2\pi f_0 t + M \sin(2\pi f_M t) + \varphi_0]} \quad (2)$$

其中, E_0 , f_0 和 φ_0 分别为输入光场的初始幅值、频率和相位; f_M 为正弦信号调制频率; M 为正弦信号调制系数,表示为 $\pi V_M / V_\pi$ 。

利用贝塞尔级数对式(2)进行展开,得到经过谐振腔后输出光场为^[18]

$$E_{out} = E_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(M) e^{i[2\pi(f_0 + n f_M)t + \varphi_0]} h_n(\Delta f) e^{i\varphi_n(\Delta f)} \quad (3)$$

其中, $J_n(M)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数; $h_n(\Delta f)$ 为谐振腔关于光信号与谐振频率差 Δf 的 n 阶载波幅度响应函数; $\varphi_n(\Delta f)$ 为谐振腔关于频率差的 n 阶载波相位响应函数。光电探测器将输出光信号转

换为电压信号,可表示为

$$\begin{aligned} V_{out} &= P \cdot \langle E_{out} \cdot E_{out}^* \rangle \\ &= P \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_n(M) \cdot J_m(M) \cdot e^{i[2\pi(n-m)f_M t]} h_n(\Delta f) \cdot h_m(\Delta f) e^{i[\varphi_n(\Delta f) - \varphi_m(\Delta f)]} \end{aligned} \quad (4)$$

两函数满足 $h_n(\Delta f = 0) = h_{-n}(\Delta f = 0)$, $\varphi_n(\Delta f = 0) = -\varphi_{-n}(\Delta f = 0)$,而当 $\Delta f \neq 0$,上述两式等号不成立。当光信号频率锁定在谐振点处时(频率差为 0),光电探测器接收到谐振输出仅包含调制频率 f_M 的二倍频分量 $2f_M$,而当输入角速度产生 Sagnac 频差 Δf 时,光电探测器输出信号出现调制频率一倍频分量 f_M ,且一倍频分量大小与 Sagnac 频差成正比关系。因此,可利用 LIA 提取输出信号中一倍频分量解算出角速度输出,即是正弦调相谱技术的解调原理。

LIA 通过设置参考信号可以提取出输入信号不同级次的载波分量信息,可通过嵌入式编程算法实现高度集成化的 DLIA,是 RFOG 系统理想的解调执行器。LIA 原理如图 2 所示。

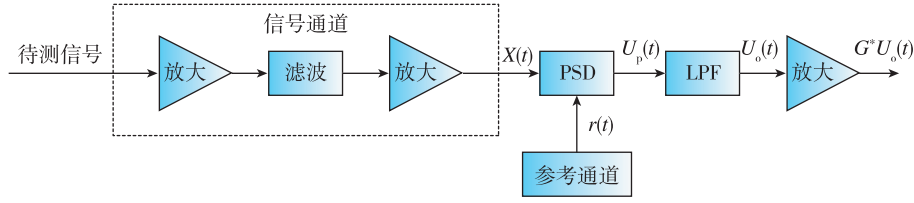


图2 LIA结构

Fig. 2 Structure of LIA

LIA 主要由前置放大器、相敏检测器以及低通滤波器构成。其中,参考通道的参考信号应为与调制信号同频同相的正弦信号,PSD 实现乘法器的功能,LIA 输出值为解调输出,反映了检测角速度大小。

利用 LIA 对谐振输出一次谐波分量进行解调,得到解调后输出信号 V_D

$$V_D = P_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(M) J_{n+1}(M) h_n(\Delta f) \cdot h_{n+1}(\Delta f) \cos[\varphi_{n+1}(\Delta f) - \varphi_n(\Delta f)] \quad (5)$$

根据式(5),可由解调后输出信号 V_D 解算出角速度所引起的 Sagnac 频率差 Δf ,并由式(1)计算得出转速 Ω 。

2 RFOG 仿真模型

谐振式光纤陀螺系统中调制解调的数学原理较为复杂,为更直观地对其进行分析,基于第1章中理论分析,利用 Simulink 仿真平台搭建了 RFOG 系统环路模型,并对系统谐振曲线和同步解调曲线等开环输出以及锁频反馈下闭环输出进行仿真。

搭建的 RFOG 系统 Simulink 仿真模型如图 3 所示,模型中主要包括可调谐激光器 Laser、 2×2 耦合器 C1,相位调制器 PM1 和 PM2、光纤谐振腔、顺逆两路光电探测器、顺逆两路 LIA 以及 PI 锁频反馈模块。激光器模型参数包含输出光功率(设置为 1 mW),中心波长(设置为 1 550 nm)以及频率调谐参数;PI 频率反馈模块有两种工作模式,其一是输出三角波信号控制激光器扫频观测系统开环输出,其二是根据解调输出结果控制激光器进行闭环反馈;相位调制器内调制波形可设置为正弦波以及锯齿波,相应地可以修改其调制系数和调制频率,保证系统工作在最大探测灵敏度处;光纤谐振腔作为系统核心模块,其设计原理是基于式(4)中贝塞尔级数各项分量的叠加,模块输入参量包括谐振腔参数、顺时针方向输入光场、逆时针方向输入光场、外界角速度输入以及频率反馈量,模块输出为相位调制下顺逆时针两方向光场;光电探测器将光信号转换成电信号,转换系数为 K ;转换后信号输入到 LIA 模块中进行同步解调,顺时针 (clockwise, CW) 方向解调结果作为闭环反馈输入量,逆时针 (co-

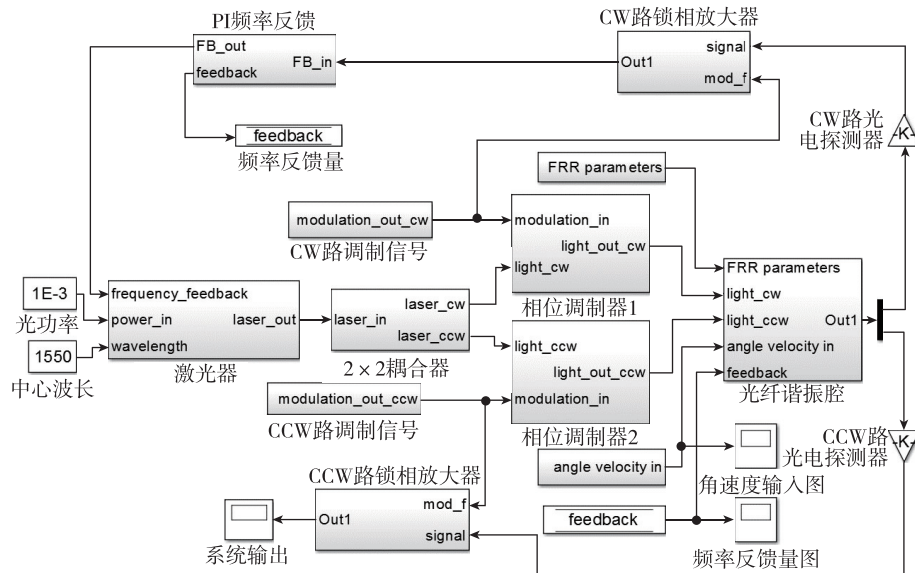


图3 RFOG 系统 Simulink 仿真模型

Fig. 3 Simulink simulation model of RFOG system

unter-clockwise, CCW)方向解调结果则作为系统输出。LIA 中包含参考信号、乘法器和低通滤波器,用于解调出加载在正弦调制信号上的待测信号。图 4 给出了 DLIA 的模型构成。

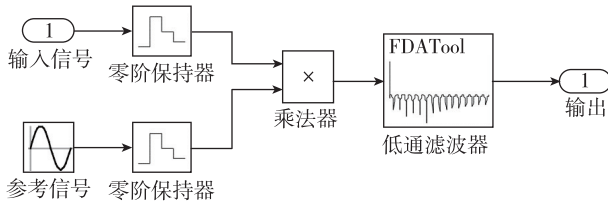


图 4 DLIA 模型

Fig. 4 Model of DLIA

表 1 给出了搭建的陀螺系统仿真模型初始参数,主要包括激光器中心波长、激光器光功率、FRR 有效折射率、FRR 传输损耗、耦合损耗、耦合系数、谐振腔长度以及谐振腔直径等,上述参数仅为初始化参数,用户可根据需要自行修改。

表 1 RFOG 系统 Simulink 仿真模型参数

Tab. 1 Simulink simulation model parameters of RFOG system

仿真参数	参数符号	数值
激光器中心波长	λ	1 550 nm
激光器光功率	I_0	1 mW
FRR 有效折射率	n_{eff}	1.45
FRR 传输损耗	α_L	0.5 dB/km
耦合损耗	α_c	0.3 dB
耦合系数	κ_c	0.9
谐振腔长度	L	2.5 m
谐振腔直径	D	0.1 m

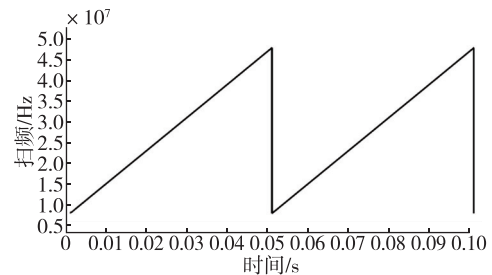
利用上述搭建的陀螺系统仿真模型和初始化参数可对系统输出进行模拟,主要包括正弦调制下谐振输出曲线和同步解调输出等开环特性,以及频率闭环反馈下频率反馈、谐振曲线及解调曲线动态变化特性,可对不同光学参数及调制参数下陀螺输出性能进行评估和优化。

2.1 RFOG 仿真模型开环输出

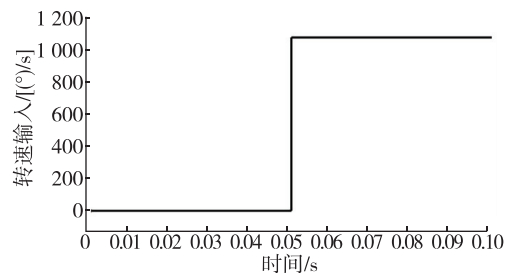
系统谐振曲线和同步解调等开环输出对谐振腔性能的评价以及调制参数的选取具有指导意义。利用所构建的 RFOG 系统 Simulink 仿真模型模拟正弦调制下的开环输出,即系统中不进行锁频反馈,具体操作为:将仿真系统模型中 PI 频率反馈模块输出置为 0,并设置其输出为三角波扫频模式。

顺时针方向(CW 方向)光路正弦调制频率设置为 100 kHz,调制系数为 2.405,逆时针方向(CCW 方向)光路正弦调制频率设置为 80 kHz,调制系数为 2.405。正弦调制频率选取为 100 kHz 量级主要有两个原因,其一是实际应用中信号处理电路数模转换器产生高频正弦信号容易失真(如实验中选用的一款 10 MHz 刷新率的数模转换器无法准确生成 MHz 量级调制信号),其二是调制信号不应高于谐振腔半高全宽的一半(实验中为 1 MHz 左右),否则会引入谐振谱分裂等现象,因此选取 100 kHz 调制频率较为稳妥,需要注意的是,两路调制频率错开是为了抑制两方向背向散射信号相互干扰。调制系数选取为 2.405 能够保证零级载波分量幅值最小,此时载波抑制比最大,能够最大限度地抑制第二类背向散射噪声。

系统中仿真时长为 0.1 s,采样率为 10 MHz,设置激光器扫频范围为[8,48] MHz,扫频周期为 0.05 s,为了观察到明显的 Sagnac 频移,仿真中在 0.05 s 时引入 1 080($^{\circ}$)/s 的角速度输入,输入信号波形如图 5 所示。



(a) 激光器扫频信号

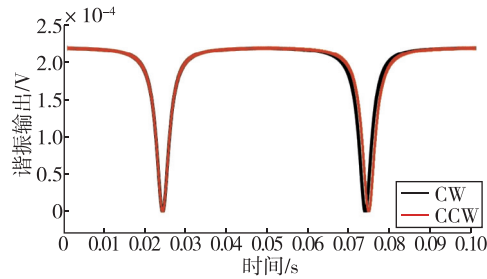


(b) 角速度输入

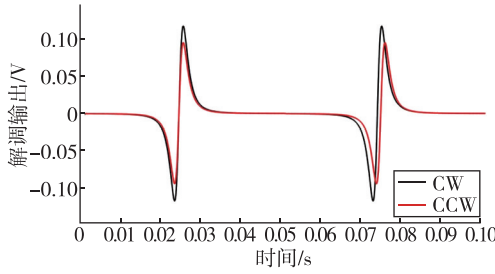
图 5 开环仿真输入条件下的激光器扫频信号和角速度输入

Fig. 5 Laser frequency sweep signal and angular velocity input under open-loop simulation condition

在上述仿真条件下,得到了 CW 和 CCW 两方向上正弦调制下谐振输出以及同步解调结果,如图 6 所示。



(a) 谐振输出



(b) 同步解调输出

图6 正弦调制下的谐振输出和同步解调输出

Fig. 6 Resonance output and synchronous demodulation output under sinusoidal modulation

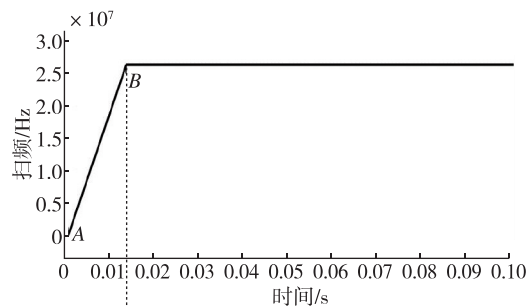
由图6可知,在 $[0, 0.05]$ s时间内,角速度输入为 $0 (^{\circ})/s$,因此扫频下谐振输出及解调输出中心处重合,未出现频移。需要注意的是,图6(a)中正弦调制下谐振曲线并不是光滑的曲线,而是包含了调制频率的各谐波分量。与此同时,由于CW和

CCW两路调制频率不同,因此对应图6(b)中解调输出曲线中心处斜率也不相同,表明选取合适的调制参数可以提高解调输出曲线斜率,进而提升系统检测灵敏度。在 $[0.05, 0.1]$ s时间内,由于引入了角速度,顺逆两方向光路产生Sagnac频移,因此CW和CCW两路谐振峰以及解调输出中心点产生了频率间隔,且间隔大小与引入的角速度成正比。

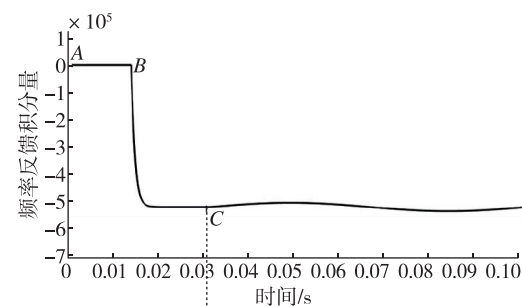
2.2 RFOG 仿真模型闭环输出

仿真模型CW方向光路中LIA解调输出结果输入至PI反馈模块进行频率闭环反馈,使得光路中传输光频率锁定在CW方向谐振频率处。系统启动阶段,谐振输出通常不在谐振峰处,因此首先需要通过设置激光器频率调谐进行粗调,使得工作频率快速移动至谐振峰内,随后由状态判断程序进行粗调到精调的状态切换,最后由PI反馈模块将工作频率精确锁定在谐振峰处,即解调输出零点上。RFOG系统经过启动阶段完成稳定锁频后即可进行角速度检测工作。

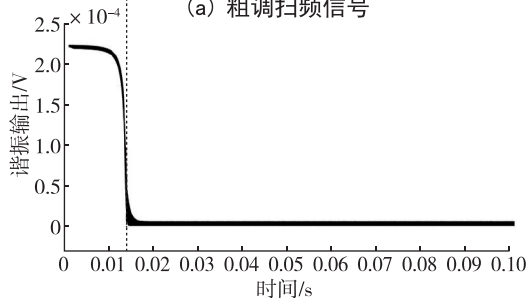
图7给出了闭环锁频下仿真模型4种典型输出信号,设置系统启动阶段为 $[0, 0.03]$ s,在该时间段内系统处于静止状态,即无角速度输入,此时间段内频率反馈模块要完成粗调到精调等精确锁频;随后系统进入角速度检测阶段,设置输入角速度为幅值 $50 (^{\circ})/s$ 、周期为 0.07 s的正弦信号,通过系统闭环反馈检测出角速度输出。



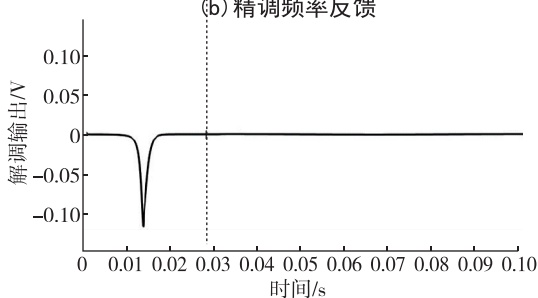
(a) 粗调扫频信号



(b) 精调频率反馈



(c) 谐振输出锁零



(d) 解调输出锁零

图7 闭环锁频下仿真模型4种典型输出信号

Fig. 7 Four typical output signals of the simulation model under frequency locking

图 7(a)中 AB 段对应了锁定过程中粗调阶段,此时激光器通过扫频使得谐振输出快速定位至谐振峰内,对应图 7(c);随后进入精调阶段,此时 PI 反馈模块将光信号快速精确锁定在谐振点上,对应图 7(b)中 BC 段,此时 CW 方向(锁定路)同步解调输出锁定至零点。

3 正弦调制谐振谱分裂研究

3.1 正弦调制谐振谱分裂仿真

在传统双锯齿波调制下,谐振输出会产生谱分裂现象,即谐振峰底部出现多个峰,且谐振谷分裂所对应的扫频量等于双锯齿波调制频率之差^[14]。造成此现象的原因是双锯齿波调制时会产生 2 个频

率分量,当对激光器频率进行线性扫频时,每一个频率分量对应着一组谐振峰,且 2 个频率分量扫过谐振峰时间有先后,因此在时域上反映出一个等于调制频率之差的谐振谱分裂现象。

本节将结合前文建立的仿真模型对正弦调制下的谐振谱分裂现象以及机理进行研究,并搭建实验装置进行验证。将调制信号设置为正弦波,仿真了 6 组调制频率下谐振输出及同步解调输出,分别为:200 kHz,500 kHz,1 MHz,2 MHz,5 MHz,10 MHz,6 组调制系数均为 2.405。利用图 3 中 RFOG 系统仿真模型得到 6 组正弦波调制下的谐振和同步解调输出,结果如图 8 所示。

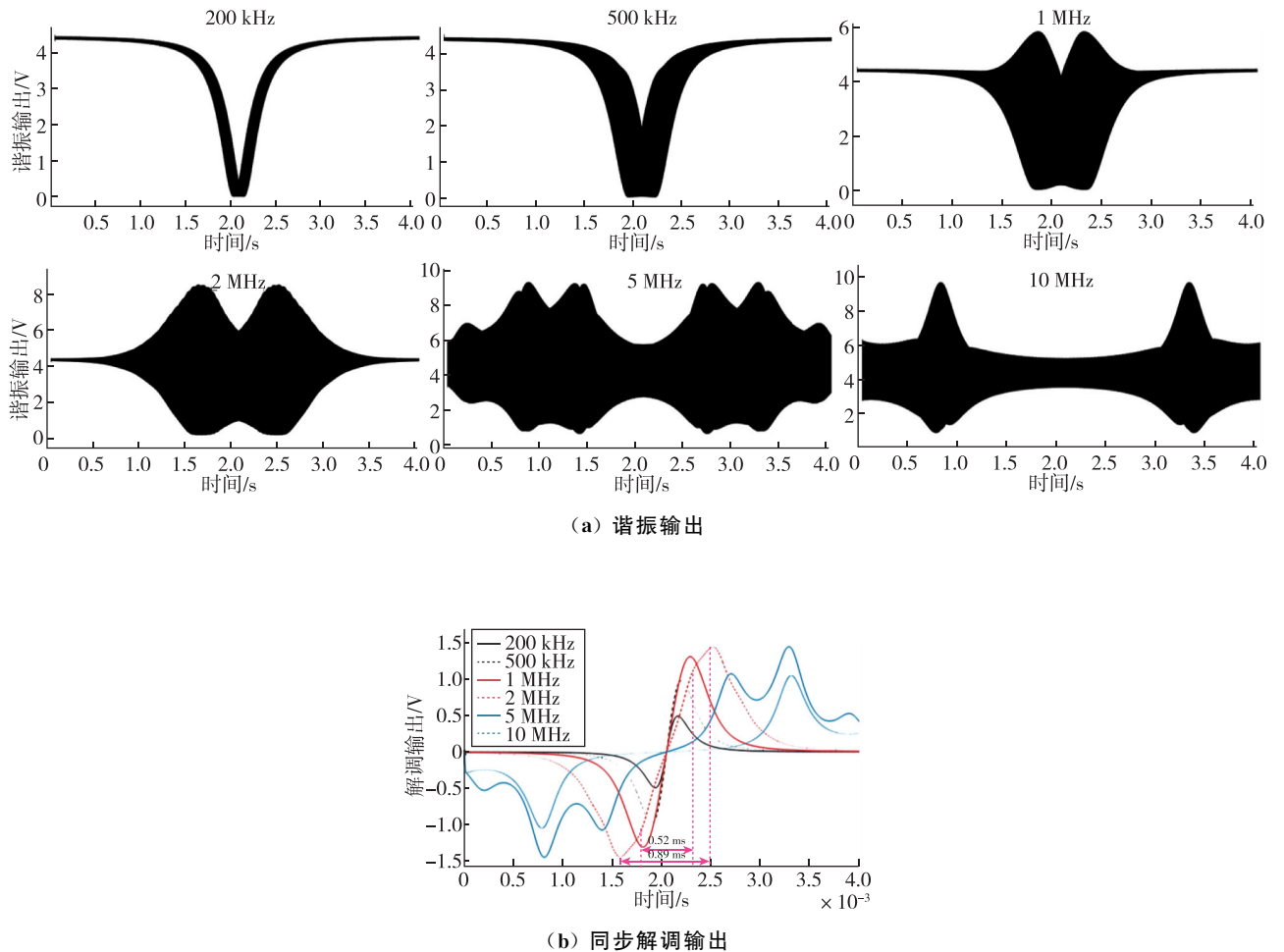


图 8 不同正弦调制频率下谐振和同步解调输出

Fig. 8 Resonance and demodulation output under different sinusoidal modulation frequencies

随着正弦调制频率的增大,谐振输出曲线中谱分裂现象越来越明显,当调制频率增加到 2 MHz (大于谐振峰半高全宽的一半)时,完全分裂成 2 个

峰,此时会造成解调曲线线性区严重失真,对应图 8 (b)所示。为准确对解调曲线线性区失真这一现象进行量化分析,可利用线性解调区范围变化来表述

失真程度,在线性频率扫描下即是对应扫描时间的改变,当调制频率为 2 MHz 时,由图 8(b)中可得线性区范围由 0.89 ms 减小到 0.52 ms,线性区范围缩小至原来的 58.4%。因此,在实际应用中,若想获得完整的谐振峰,正弦调制频率的选取不应高于谐振峰半高全宽的一半。

3.2 正弦调制谐振谱分裂实验验证

仿真结果表明,针对正弦调制下的 RFOG 系统,当调制频率增大到半高全宽时,谐振输出出现明显的谱分裂,并且线性解调区域出现失真。为验证上述分析的正确性,搭建了谐振式光纤陀螺实验系统,如图 9 所示,其中环形器 C4、C5 固定在探测器 PD2 和 PD4 背面,耦合器 C6 集成在谐振腔工装内。为探究正弦调制谐振谱分裂对系统输出的实际影响,本实验中,陀螺系统仅需要开环工作,即激光器施加三角波扫频信号,频率闭环和光功率反馈模块均不开启。

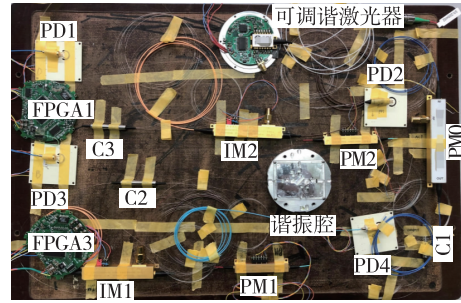
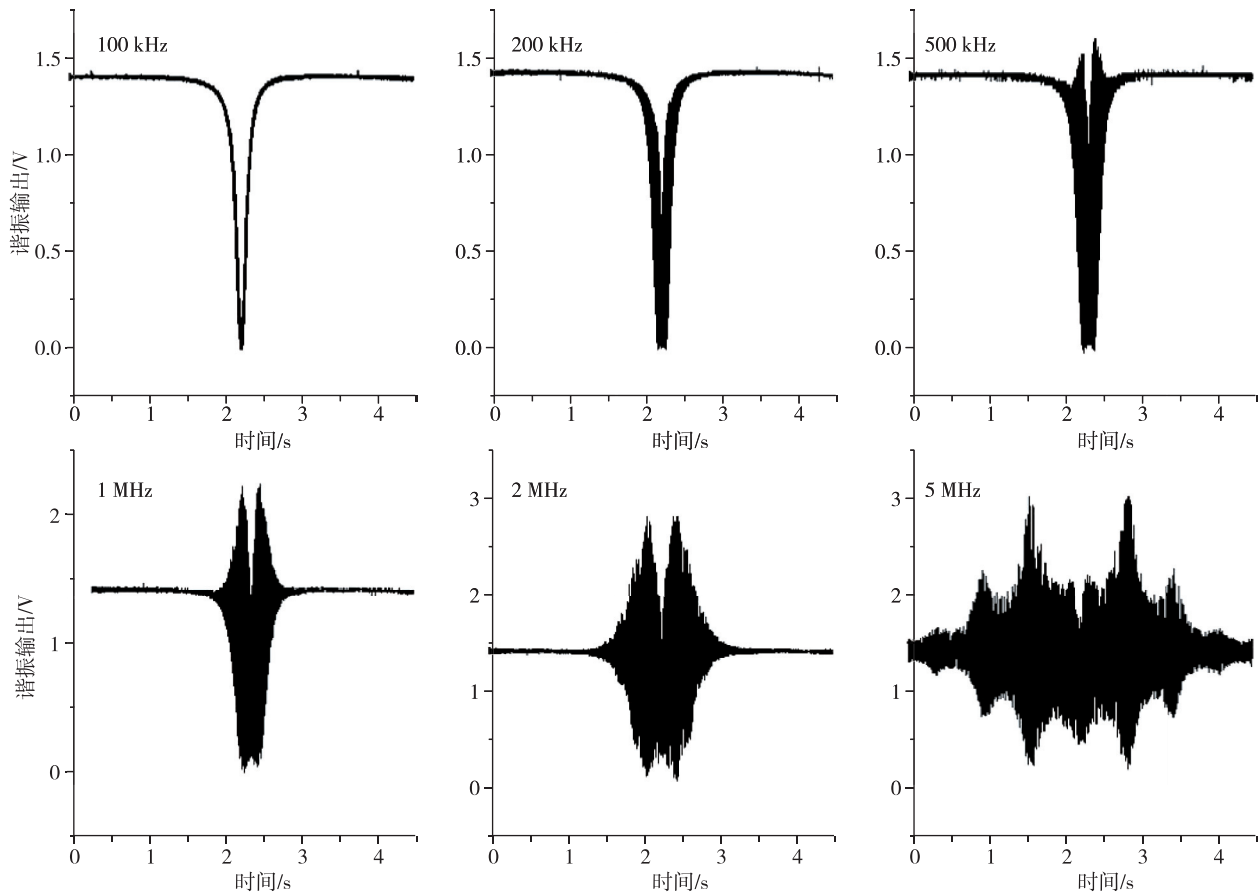


图 9 RFOG 实验系统

Fig. 9 RFOG experimental system

开环 RFOG 实验系统不包含闭环锁频和光功率反馈模块,系统相位调制器半波电压为 3.8 V,带宽为 40 GHz,光电探测器响应度为 0.86 A/W,光纤谐振腔环长为 2.5 m,直径为 10 cm。利用半导体激光器模块的波长调谐功能进行扫频获取正弦调制下谐振输出信息,结果如图 10 所示。

光电探测器 PD1 和 PD2 谐振输出通过锁相放大器模块 LIA1 和 LIA2 进行同步解调,实验中得到



(a) 谐振输出

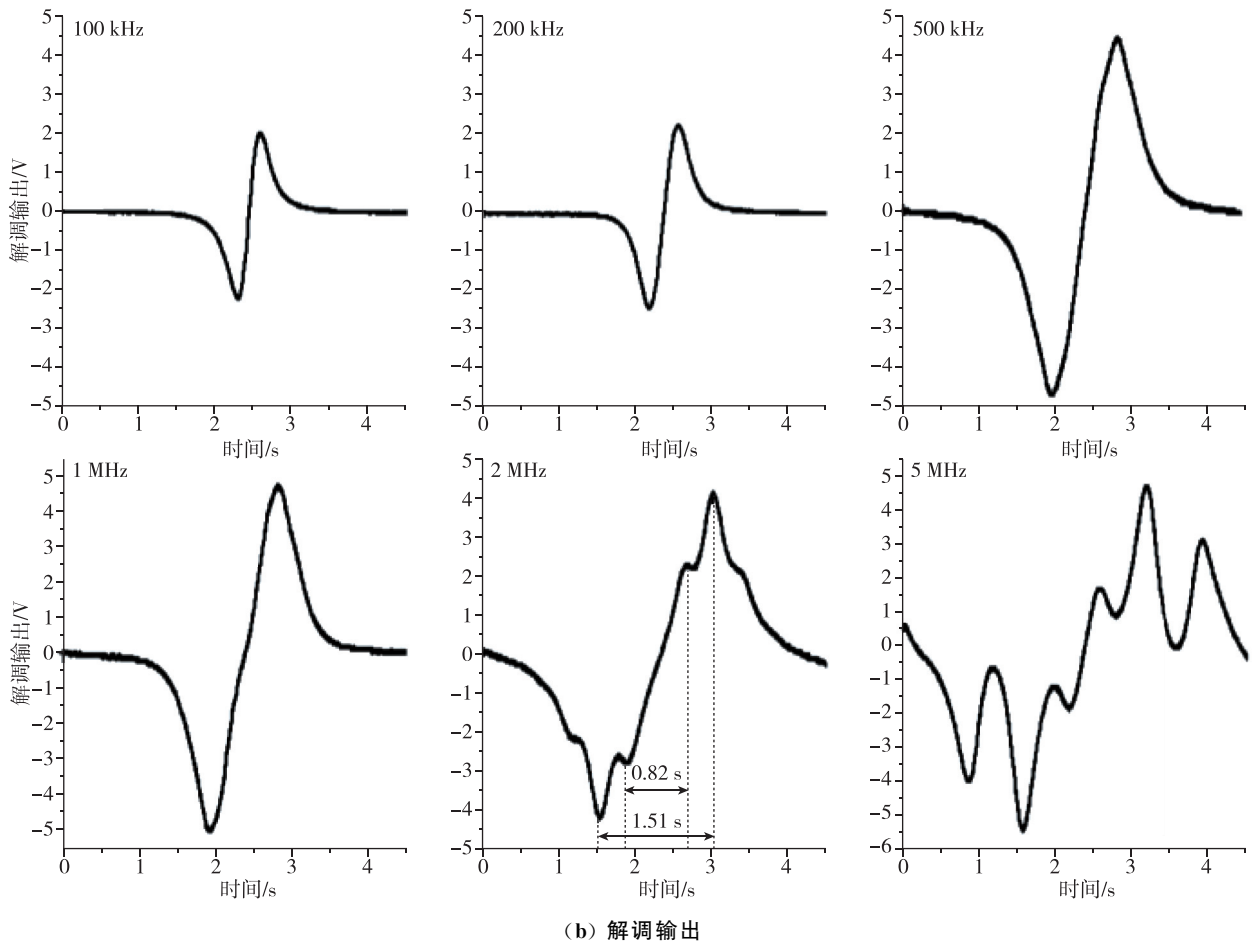


图 10 不同正弦调制频率下的谐振输出和解调输出

Fig. 10 Resonance output and demodulation output under different sinusoidal modulation frequencies

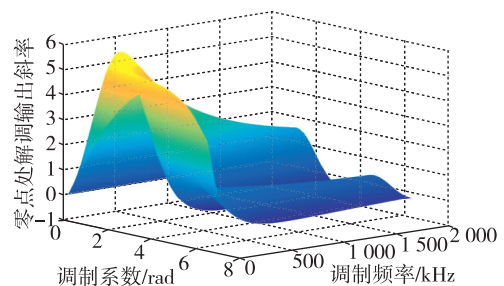
的不同正弦调制频率下谐振和解调输出结果如图 10 所示,当正弦调制频率大于 2 MHz(对应系统谐振峰半高全宽的一半)时,谐振输出表现出了明显的谐振谱分裂现象,实验结果与图 8 中仿真模型输出一致。与此同时,对应同步解调输出结果中线性区域出现明显失真,劣化了标度因数线性度,对应 2 MHz 调制频率下,解调线性区范围由 1.51 s 减小到 0.82 s,线性区范围缩小至原来的 54.3%。因此,在实际正弦调制频率的选取中应保证小于系统谐振峰半高全宽的一半。

3.3 正弦调制最优调制参数实验验证

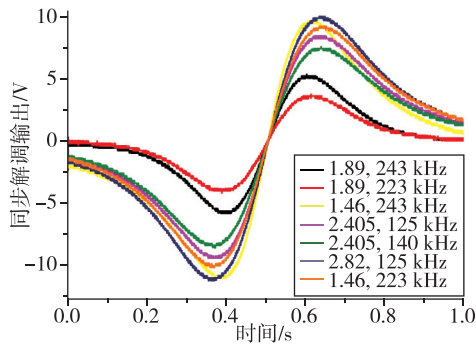
正弦调相谱技术作为谐振式光纤陀螺中应用最为广泛的一种调制方案,实际应用中,可将实验系统光源功率、中心波长、调谐系数以及谐振腔长等参数写入文中搭建的仿真平台。通过对不同正弦调制信号频率和幅值下同步解调输出曲线斜率以及线性度进行分析,可获得一组最优调制系数,使得线性解调区无明显失真且灵敏度最大,在有效抑制系统背向散

射等光学噪声的同时提升系统探测灵敏度。

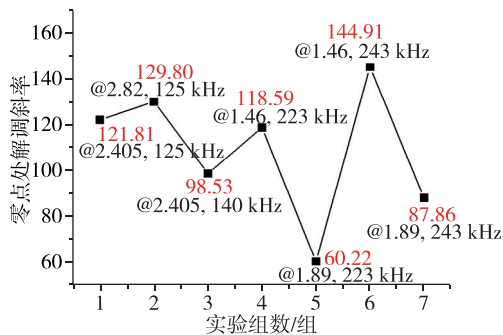
仿真中,设置正弦调制系数变化范围为 $[0, 2\pi]$,调制频率变化范围为 $[0, 2]$ MHz,对调制频率和调制系数进行扫描,利用模型求出不同调制参数组合下解调输出零点斜率的变化,即可反映系统探测灵敏度。图 11 给出了不同调制参数下零点处解调斜率仿真输出以及实验结果,其中图 11(a)仿真结果表明最佳调制频率为 243 kHz,调制系数为 1.46,图 11(b)给出了 6 组正弦调制参数下实验系统解调输出曲线,图 11(c)给出了 6 组正弦调制



(a) 仿真结果



(b) 实验系统解调输出曲线



(c) 零点处解调斜率实验结果

图 11 正弦调制最优调制参数验证实验

Fig. 11 Experiment of optimal modulation parameters under sinusoidal signal

参数下零点处解调斜率。结果表明,仿真得到的最优调制参数能够在实验中获得斜率最大的解调曲线,进一步验证了仿真模型的准确性。

4 结论

本文通过研究,得到如下结论:

1) 基于谐振式光纤陀螺正弦调相谱、同步解调以及频率闭环反馈等工作原理,成功搭建了数字信号处理系统 Simulink 仿真模型,并能够准确地对系统开环以及锁频反馈下闭环输出进行仿真。

2) 搭建的模型能够对正弦调制下谐振谱分裂现象进行仿真以及实验验证,结果表明,当调制频率大于半高全宽的一半时,系统同步解调输出线性区明显失真,劣化了标度因数线性度。

上述结论证明,搭建的 RFOG 模型能够对陀螺工作状态进行准确而有效地模拟,在系统参数选取、噪声抑制以及精度提升上具有指导性意义。

参考文献

[1] BERGH R A, ARNESEN L, HERDMAN C. Fiber

optic gyro development at Fibernetics[C]// Proceedings of SPIE Commercial+Scientific Sensing and Imaging, Fiber Optic Sensors and Applications XIII. Baltimore: SPIE, 2016: 90-108.

[2] 杨添舒, 费瑶, 李兆峰, 等. 干涉型与谐振型集成光学陀螺的比较[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 97-103.

YANG Tianshu, FEI Yao, LI Zhaofeng, et al. Comparison of interferometric and resonant integrated optical gyroscopes[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2016, 53(8): 97-103(in Chinese).

[3] SHUPE M. Fiber resonator gyroscope: sensitivity and thermal nonreciprocity[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 286-289.

[4] MA H, ZHANG J, WANG L, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3546-3554.

[5] NIU J, LIU W, PAN Z, et al. The noise suppression in resonant micro optical gyroscopes based on dual light sources method[J]. Optics Communications, 2021, 488: 126839.

[6] JIANG Z, CHEN R, HU Z. Residual intensity modulation induced error in resonator fiber optic gyroscopes with reciprocal detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 1-12.

[7] ZOU K, WANG L, CHEN K, et al. Optimization of reciprocal modulation parameters in resonant fiber optic gyro[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(17): 5669-5675.

[8] WU C, LIN Y, JIN X, et al. Synchronous in-phase and quadrature demodulation technique for resonant micro-optic gyroscope[J]. Applied Optics, 2019, 58(18): 5050-5056.

[9] 安盼龙, 赵瑞娟. 谐振式光学陀螺的两种相位调制波形比较[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 208-213.

AN Panlong, ZHAO Ruijuan. Comparison of two modulation waveforms in the resonator optic gyroscope[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(12): 208-213(in Chinese).

[10] HOTATE K, HARUMOTO M. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 15(3): 466-473.

[11] ZOU K, BI R, CHEN K, et al. Research on frequency stability of narrow linewidth laser in resonant optical gyro[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102403.

[12] 王文怡, 王慧泉, 陈妍, 等. 双路闭环谐振式微光学

- 陀螺[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 163-167.
- WANG Wenyi, WANG Huiquan, CHEN Yan, et al. Double closed-loop resonator micro optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 163-167(in Chinese).
- [13] 焦新泉, 郑永秋, 安盼龙, 等. 谐振式光纤陀螺双光路调相谱最优参数确定方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 239-243.
- JIAO Xinquan, ZHENG Yongqiu, AN Panlong, et al. Method of determining optimized phase modulation parameters in resonator fiber optic gyro[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 239-243(in Chinese).
- [14] JIN X, LIN Y, LU Y, et al. Short fiber resonant optic gyroscope using the high-frequency Pound-Drever-Hall technique[J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5789-5793.
- [15] ZOU K, CHEN K, SHEN H, et al. Research on resonance splitting under sinusoidal modulation in resonant optic fiber gyro[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107459.
- [16] 李霄, 李少伟, 蒋海, 等. 谐振式光学陀螺环路的建模与仿真[J]. 航天控制, 2018, 36(4): 77-81+93.
- LI Xiao, LI Shaowei, JIANG Hai, et al. Modeling and simulation of resonant optical gyro loop[J]. Aerospace Control, 2018, 36(4): 77-81+93(in Chinese).
- [17] WANG L, LI H, ZHANG J, et al. Optimization of the sinusoidal phase modulation technique in resonant fiber optic gyro[J]. Optics Communications, 2017, 387: 18-23.
- [18] 张旭琳, 马慧莲, 丁纯, 等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1529-1533.
- ZHANG Xulin, MA Huilian, DING Chun, et al. Phase modulation detection analysis of resonant fiber optic gyroscope[J]. China Laser, 2005, 32(11): 1529-1533(in Chinese).

(编辑:黄利华)