

引用格式: LEI Ming, FANG Yuan, YU Huai-yong, *et al.* Scale Factor Test of Resonance Fiber Optic Gyroscope Based on Biased Sawtooth Wave [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3):0306003

雷明, 方圆, 于怀勇, 等. 基于锯齿波偏频的谐振式光纤陀螺标度因数测试[J]. *光子学报*, 2020, 49(3):0306003

基于锯齿波偏频的谐振式光纤陀螺标度因数测试

雷明, 方圆, 于怀勇, 杨烽, 向强, 张丽哲

(北京自动化控制设备研究所 惯性技术国家重点实验室, 北京 100074)

摘 要:针对转台测试谐振式光纤陀螺标度因数时存在的测试精度受限于转台性能影响的问题, 提出一种基于锯齿波等效输入的陀螺标度因数测试方法. 通过在相位调制器上叠加锯齿波偏频信号用于模拟角速度输入, 分析了实际转台输入和模拟角速度输入下谐振式光纤陀螺闭环传递函数, 推导了偏频锯齿波信号参数与实际输入角速度的对应关系, 理论证明了其技术可行性. 搭建了基于锯齿波偏频的陀螺标度因数测试系统, 对研制的陀螺样机进行了标度因数及非线性度测试, 基于锯齿波偏频方法测得的陀螺标度因数与实际转台测试结果基本一致, 且标度因数非线性度从 0.42% 优化到 0.26%. 研究表明基于锯齿波偏频的谐振式光纤陀螺标度因数快速标定测试方法不仅可以精确测得标度因数, 还可有效抑制转台振动等环境干扰引入的测量误差.

关键词:谐振式光学陀螺; 光纤光学陀螺; 锯齿波偏频; 标度因数; 非线性; 全光纤; 光纤光学

中图分类号: TN911.3; TN815

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204903.0306003

Scale Factor Test of Resonance Fiber Optic Gyroscope Based on Biased Sawtooth Wave

LEI Ming, FANG Yuan, YU Huai-yong, YANG Yi, XIANG Qiang, ZHANG Li-zhe
(National Key Laboratory of Inertial Technology, Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to solve the problem that the accuracy of scale factor measurement of Resonance Fiber Optic Gyroscope (RFOG) is limited by the performance of turntable, a new method based on sawtooth equivalent input was proposed. By adding sawtooth wave to the RFOG's phase modulator, which works as equivalent input angular velocity, the RFOG closed-loop transfer functions under turntable input and equivalent input were analyzed, relationship between the parameter of sawtooth and equivalent input angular velocity was given, the scale factor and non-linearity were obtained by the scale factor test system. The scale factor is basically identical to the test result on the turntable, and the non-linearity is also improved from 0.42% to 0.26%. The test results demonstrate that the scale factor test system based on sawtooth equivalent input can accurately measure the scale factor of RFOG, and effectively eliminate the measurement errors due to the vibration and imperfect precision of the turntable.

Key words: Resonator optic gyroscope; Fiber optic gyroscope; Biased sawtooth wave; Scale factor; Nonlinear; All fiber; Fiber optics

OCIS Codes: 060.2370; 230.5298; 140.4780; 060.2310

0 引言

谐振式光纤陀螺(Resonance Fiber Optic Gyroscope, RFOG)综合了光学陀螺无运动部件、敏感环圈尺

基金项目: “十三五”装备预先研究课题(No.71314078)

第一作者: 雷明(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为光纤陀螺. Email: 15210985670@163.com

收稿日期: 2019-10-28; 录用日期: 2019-11-27

<http://www.photon.ac.cn>

寸小等技术优势^[1-3],具备同时实现系统微型化和性能高精度的潜力^[4-6],已成为国内外惯性角速度传感器研究的一个主要方向^[7-8].

标度因数是 RFOG 的一个主要性能指标,定义为陀螺输出量与输入角速率的比值,在许多应用领域都要求陀螺在大的动态范围内具有较高的精度,即 RFOG 要有一个稳定或恒定的标度因数^[9-10].通常的标度因数测试采用将陀螺固定在速率转台上^[11-12],通过改变转台速率大小得到陀螺输出,根据所得的输出/输入数据采用最小二乘法进行线性拟合得到标度因数.采用速率转台测试 RFOG 陀螺标度因数时,不仅操作繁琐,而且还需要进行滑环接口重新设计,陀螺动态范围测试受转台最大转速限制,转台自身振动和精度也会产生标度因数测量误差.

本文针对 RFOG 采用转台测试标度因数时存在的上述问题,通过在 RFOG 中的相位调制器上施加偏频锯齿波信号来等效输入角速度,通过比较转台角速度输入和模拟角速度输入时的闭环传递函数,验证了采用锯齿波偏频信号模拟角速度输入实现标度因数检测的可行性.针对模拟角速度输入测试 RFOG 标度因数时需要实时调整模拟角速度输入的需要,建立了锯齿波信号参数与等效输入角速度的对应关系,并应用于搭建的标度因数测试系统,最终完成了 RFOG 标度因数及标度因数非线性度测试,测试结果表明:基于模拟角速度输入的标度因数测试系统测得的标度因数数值与转台测试结果基本一致,并且标度因数稳定性明显优于后者,采用该系统能够实现 RFOG 标度因数及标度因数非线性度的快速、准确测试.

1 设计与仿真

图 1 为基于锯齿波偏频等效输入时 RFOG 标度因数测试系统原理图.由窄线宽半导体激光器(Laser Diode, LD)发出的光首先经过起偏器 P,在 Y 分支分光成两束,并分别受相位调制器(Phase Modulator, PM)PM1 和 PM2 的相位调制,通过光纤耦合器 C1 的两个端口耦合进入光纤环形谐振腔(Fiber Ring Resonator, FRR),形成沿谐振腔顺时针(Clockwise, CW)和逆时针(Counter-clockwise, CCW)方向传播的两束光,然后分别经 C2 的两个端口到达探测器(Photodetectors, PD)PD1 和 PD2.为隔离探测器端面反射光对信号光的影响,在进入 PD1 和 PD2 之前增加两个光隔离器(Isolator, ISO)以确保单向光传输,随后进入数字信号处理电路(Digital Signal Processor, DSP)进行信号处理,根据 CW 路输出光信号反馈作用于驱动控制电路(Driving Control Circuit, DCC)控制激光器,使出射光频率跟踪锁定 CW 光路的谐振频率点,此时 CCW 路输出光信号反映转动角速度.

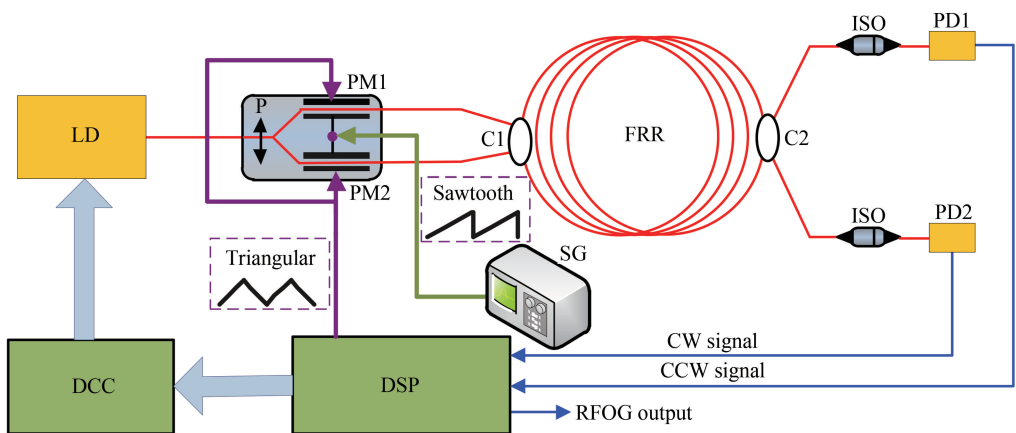


图 1 基于频偏锯齿波输入的 RFOG 标度因数测试系统

Fig.1 Schematic illustration of the scale factor test system based on biased sawtooth wave input

设置相位调制器上信号源接线如图 1,系统采用三角波调制解调方式^[13-14],调制三角波由 DSP 发生,用于模拟转台输入的偏频锯齿波的频率和幅度由信号发生器(Signal Generator, SG)进行设置和在线修改,方便模拟不同的转速大小.三角波信号和锯齿波信号串联,信号负端相连并接地,三角波信号的正端连接到 PM1 的上电极和 PM2 的下电极,锯齿波信号的正端连接到 PM1 的下电极和 PM2 的上电极.因此在同一时刻, CW 和 CCW 光路受到幅值相等,相位相反的相位调制,一方面能够有效抑制背向散射光本身光强对信

号光的影响,另一方面相反的相位调制对应反向的频率偏置,刚好对应角速度引起的 CW 光路和 CCW 光路频率的反向变化。

图 2(a)为 RFOG 闭环频率控制回路结构框图,其中 f_0 为半导体激光器输出光频率, K_i 为激光器电流-频率调制系数, i 为反馈控制激光频率的电流,为锯齿波产生的等效频移, K_{cw} 和 K_{ccw} 分别为 CW 和 CCW 方向光解调曲线在谐振点附近近似线性工作区间的斜率, Δf_{cw} 和 Δf_{ccw} 分别为旋转时 CW 和 CCW 方向光谐振频率偏移量,为 $1/(1+\tau s)$ 为数字累加滤波器的传递函数, τ 为时间常数, $K_p(1+\tau_1 s)$ 为 PI 控制器传递函数, K_p 和 τ_1 分别为比例系数和积分时间。

图 2(b)为 RFOG 的简化动态模型图, $R(s)$ 和 $R'(s)$ 分别为 RFOG 的转台角速度输入和模拟角速度输入, $U(s)$ 为 RFOG 输出, K_1 和 K_1' 分别为 RFOG 的 Sagnac 增益和等效输入环节增益。

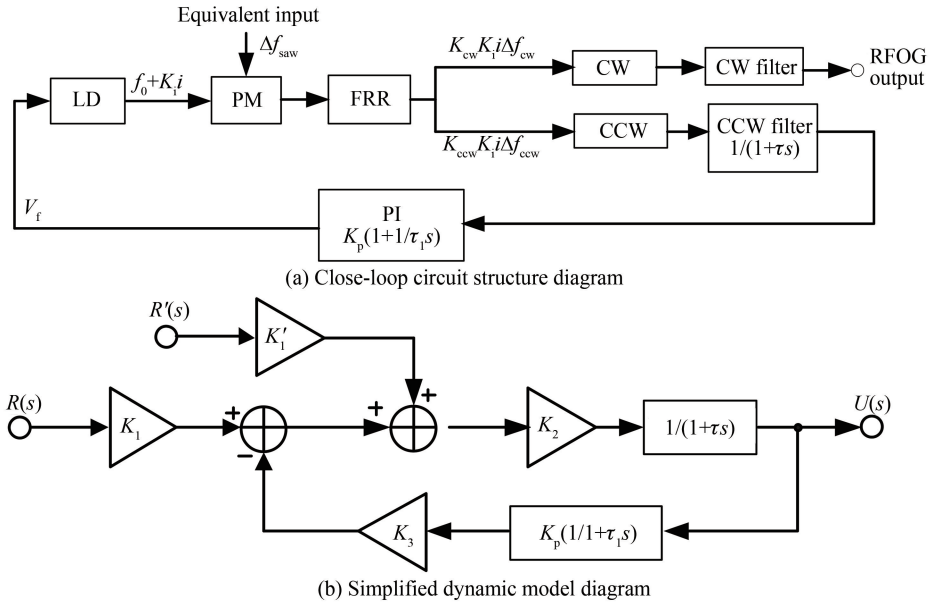


图 2 RFOG 闭环控制仿真分析

Fig.2 Simulation analysis of RFOG closed-loop control

转台输入下系统闭环传递函数可表示为

$$H(s) = \frac{U(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_2 \tau_1 s}{K_2 K_3 K_p (1 + \tau_1 s) + \tau_1 s (1 + \tau s)} \quad (1)$$

模拟角速度输入下闭环传递函数可表示为

$$H(s) = \frac{U(s)}{R'(s)} = \frac{K_1' K_2 \tau_1 s}{K_2 K_3 K_p (1 + \tau_1 s) + \tau_1 s (1 + \tau s)} \quad (2)$$

式中, $K_2 = K_{ccw} K_{PD} K_{op1} K_{AD1} K_{FPGA}$, K_{PD} 、 K_{op1} 、 K_{AD1} 和 K_{FPGA} 分别为光电探测器、前置放大器、AD 和 FPGA 内部解调环节增益, $K_3 = K_{DA} K_{op2} K_m$, K_{DA} 和 K_{op2} 分别为 DA 转换器和输出放大器增益。

通过比较式(1)和(2)可知,转台输入与模拟输入下的传递函数仅相差一个比例系数 K_1/K_1' ,因此可以通过采用在相位调制器上叠加偏频锯齿波方式与实际转台转动是等效的,采用该方式可进行 RFOG 标度因数测试,等效输入测试 RFOG 标度因数时,需要实时调整锯齿波参数以模拟不同的输入角速度,其关键是建立锯齿波参数与输入角速度之间的对应关系以满足 $K_1 = K_1'$ 。

根据 Sagnac 效应,转动引起的频偏表示为^[1]

$$\Delta f = \frac{4A}{n\lambda L} \Omega \quad (3)$$

式中, Ω 为输入角速度, λ , n , L 和 A 分别为光波长、光纤折射率、谐振腔长和面积。

单周期内 t 时刻锯齿波电压表示为

$$V(t) = V_{saw} f_{saw} t \quad (4)$$

式中, V_{saw} 和 f_{saw} 分别为锯齿波峰峰值和频率,对应的相位调制大小表示为

$$\varphi(t) = \frac{\pi V(t)}{V_{\pi}} \quad (5)$$

式中, V_{π} 为相位调制器的半波电压.

根据相位和角频率的关系

$$\omega = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\pi V_{\text{saw}} f_{\text{saw}}}{V_{\pi}} \quad (6)$$

得到锯齿波引入的频偏为

$$f_{\text{tri}} = \frac{V_{\text{saw}} f_{\text{saw}}}{2V_{\pi}} \quad (7)$$

为了使锯齿波和实际转动引起的频偏一致,需要满足 $\Delta f = f_{\text{tri}}$,即满足

$$\frac{4A}{n\lambda L} \Omega = \frac{V_{\text{saw}} f_{\text{saw}}}{2V_{\pi}} \quad (8)$$

式(8)即为锯齿波信号参数与等效输入角速度的对应关系,可以看出,只需改变叠加的锯齿波电压峰峰值和频率即可实现 RFOG 动态范围内任意角速度的等效.实际测试系统中为了获得最大的载波抑制比进而有效抑制背散光对陀螺输出影响,设定 $V_{\text{saw}} = 2V_{\pi}$,此时通过改变锯齿波的 f_{saw} 来改变模拟角速度大小.

2 实验性能测试

搭建的基于锯齿波偏频的 RFOG 标度因数测试系统如图 3,包括中心波长为 1 550.12 nm、谱线宽度为 5 kHz 的半导体激光器,腔长为 20 m、直径为 0.105 m 的光纤谐振腔,数字闭环处理电路发生 50 kHz 调制三角波信号,施加在相位调制器其中一个电极上.另外一个电极连接信号发生器以产生偏频锯齿波,由于相位调制器的半波电压为 6.84 V,因此固定锯齿波峰峰值为 13.68 V,而通过改变锯齿波频率大小实现不同模拟转速输入.

根据式(8)并代入相关参数,确立锯齿波频率与模拟转速大小之间的关系如表 1,其中正负转速通过控制锯齿波的占空比进行设置.

表 1 锯齿波参数与等效转速对应关系

Table 1 Relationship between parameter of biased sawtooth wave and equivalent input angular velocity

Input angular velocity/($^{\circ} \cdot \text{s}^{-1}$)	Sawtooth wave parameters	
	Amplitude/V	Frequency/kHz
± 10	13.86	8.16
± 20		16.32
± 30		24.48
± 40		32.64
± 50		40.80

采用图 3 中的标度因数测试系统,进行了基于锯齿波偏频的陀螺模拟转速测试,陀螺零偏输出如图 4 (b)中虚线所示.进一步,将陀螺样机安装固定在旋转速度精确可调的速率转台上(现场测试照片如图 4(a)),通过控制转台的转动方向与速度,转台输入条件下的陀螺测试数据如图 4(b)中实线所示.从图中可知:在相同的模拟转速输入和转台输入时,两次测试得到的台阶变化方向和大小几乎一致.但是模拟转速输入时的陀螺输出抖动和漂移明显低于转台输入时的陀螺输出,说明转台实验时存在震动、离心力等外界因素将会影响到陀螺的稳定输出.

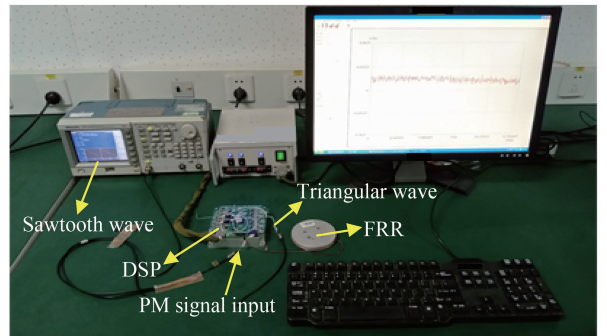
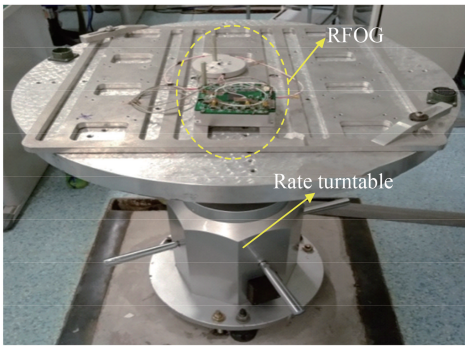
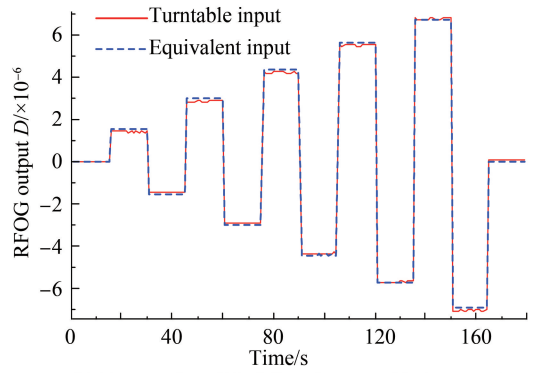


图 3 基于偏频锯齿波的 RFOG 标度因数测试系统

Fig.3 Scale factor test system based on biased sawtooth wave input



(a) Photograph of RFOG rate turntable test



(b) Test results of RFOG under turntable input and equivalent input

图4 RFOG 标度因数测试结果

Fig.4 Test results of the RFOG scale factor

采用线性拟合方法对模拟转速输入和转台输入时陀螺输出零偏值进行拟合,得到输入/输出关系曲线以及线性拟合公式如图5,可得偏频锯齿波实现等效角速度输入条件下 RFOG 标度因数为 141 005,而采用转台输入时的 RFOG 标度因数为 142 260.从测试结果对比可知:基于偏频锯齿波等效输入测得的标度因数与转台测试结果具有较好的一致性.

陀螺输出特性的逐点非线性偏差公式^[15]为

$$\alpha_j = \frac{\hat{F}_j - F_j}{|F_m|} \quad (9)$$

式中, F_j 和 \hat{F}_j 分别为第 j 个转速输入下的陀螺实测输出和拟合输出数据. $|F_m| = \max(|F_1|, |F_{2n+1}|)$, 为输入最大角速度时陀螺输出绝对值的最大值,其中 F_1 和 F_{2n+1} 分别为 $50^\circ/\text{s}$ 和 $-50^\circ/\text{s}$ 转速输入时的实测输出数据.

标度因数非线性度表示为

$$K_m = \max|\alpha_j| \quad (10)$$

将图(4)中的实测数据代入式(9)和式(10),可知偏频锯齿波实现等效角速度输入条件下 RFOG 标度因数非线性度为 0.27%.

为进一步验证本文提出的基于锯齿波偏频实现 RFOG 标度因数测试的有效性,进行了第 2 组和第 3 组等效转速输入和转台输入测试,三组测试数据对比如表 2.

表 2 等效输入和转台输入测试数据对比

Table 2 Test results under equivalent input and turntable input

Team	Equivalent input		Turntable input	
	Scale factor	Scale factor non-linearity	Scale factor	Scale factor non-linearity
1	141 005	0.27%	142 260	0.41%
2	141 612	0.21%	142 712	0.44%
3	141 961	0.29%	142 912	0.4%
Average	141 526	0.26%	142 628	0.42%

从表 2 中测试数据可知:基于偏频锯齿波等效输入测得的标度因数与转台输入时陀螺测试结果基本一致,其偏差仅为 0.77%,造成测试差异性的原因主要在于在进行偏频锯齿波参数和等效转速解算时存在因谐振腔结构偏差而引起的计算误差.等效转速输入下测得的陀螺标度因数非线性度为 0.26%,而转台输入下的标度因数非线性度为 0.42%.可见等效角速度输入时的标度因数非线性度明显优于转台输入,原因主要是基于偏频锯齿波等效输入实现陀螺标度因数测试是将 RFOG 样机安装在大理石平台上进行测试,可以有效

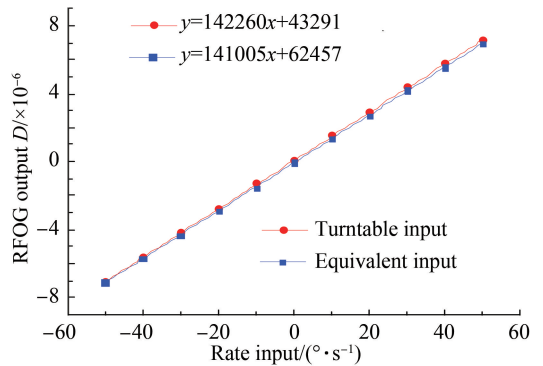


图5 转台输入和等效输入下陀螺线性拟合曲线

Fig.5 RFOG fitting lines under turntable and equivalent input

消除转台振动和环境因素引入的标度因数测量误差.

3 结论

本文提出一种基于锯齿波等效输入的 RFOG 标度因数测试方法,分析了外部输入和等效输入下的闭环传递函数,推导了锯齿波信号参数与等效输入角速度的对应关系,搭建了标度因数测试系统,最终对 RFOG 标度因数及标度因数非线性度进行了测试.测试结果表明:基于等效输入的标度因数测试系统不仅能够实现 RFOG 标度因数的准确测量,且该测试方法能够有效消除转台自身振动等环境因素产生的标度因数测量误差.采用基于锯齿波等效输入的 RFOG 标度因数非线性度明显优于转台输入时的标度因数非线性度.转台测试中的振动等外界环境因数会对光纤谐振腔的谐振特性造成一定的影响,引入标度因数非线性,为了使 RFOG 得以应用,必须对谐振腔等核心敏感器件进行有效隔振封装以隔绝外界环境引入的扰动.目前,陀螺在偏频锯齿波模拟转动条件下的标度因数距离惯导系统实际应用还存在一定差距,其主要原因在于陀螺采用的是开环输出方式,标度因数存在固有非线性,后期拟实现陀螺的闭环输出,并针对谐振曲线自身性能进行分段线性化拟合,以进一步提升陀螺的标度因数性能,满足惯性导航系统对于谐振式光纤陀螺的应用需求.

参考文献

- [1] FENG Li-shuang, GAO Jing, JIAO Hong-chen, *et al.* Relative frequency noise suppression for multi-laser system in passive resonator fiber gyros[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(1): 0106001.
冯丽爽,高晶,焦洪臣,等. 谐振式光纤陀螺多激光器系统相对频率噪声抑制[J]. *光子学报*, 2019, **48**(1): 0106001.
- [2] YING Di-qing, YE Ke-bin, WANG Ze-yu, *et al.* Optimization of second-harmonic's quantization precision for intensity modulation noise suppressing in a digital RFOG[J]. *Optics Communications*, 2017, **405**: 114-119.
- [3] STRANDJORD L K, QIU Tie-qun, *et al.* Improved bias performance in resonator fiber optic gyros using a novel modulation method for error suppression[J]. *Optical Fiber Sensors*, 2018, ThD: ThD3.
- [4] SANDERS G A, STRANDJORD L K, WU Jian-feng, *et al.* Development of compact resonator fiber optic gyroscopes [C]. IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems, 2017.
- [5] JIAO Hong-chen, FENG Li-shuang, WANG Jun-jie, *et al.* Transmissive single-beam-splitter resonator optic gyro based on a hollow-core photonic-crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(15): 3016-3019.
- [6] PAN Zhi-wen, ZHANG Cheng-fei, XIE Cheng-feng, *et al.* Resonator integrated optic gyro based on multilevel laser frequency lock-in technique[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, **16**(04): 20-23.
- [7] LI Zhuo-yan, HE Lie, SUN Xu-qiang, *et al.* Analysis of resonance asymmetry phenomenon in resonant fiber optic gyro [J]. *Sensors*, 2018, **18**(3): 696.
- [8] DUAN Ran, FENG Li-shuang, JIAO Hong-chen, *et al.* Research on reducing the influence of laser frequency noise on resonator optical gyro[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(8): 2422-2427.
- [9] ZHANG Gui-cai. The fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [10] WU Jian-feng, SMICIKLAS M, STRANDJORD L K. Resonator fiber optic gyro with high backscatter-error suppression using two independent phase-locked lasers[C]. International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24), 2015.
- [11] JIAO Xin-quan, ZHENG Yong-qiu, AN Pan-long, *et al.* Method for determining optimized phase modulation parameters in resonator fiber optic gyro[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(1): 239-243.
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.
- [12] YING Di-qing, YE Ke-bin, WANG Ze-yu, *et al.* Optimization of second-harmonic's quantization precision for intensity modulation noise suppressing in a digital RFOG[J]. *Optics Communications*, 2017, **405**: 114-119.
- [13] LEI Ming, FENG Li-shuang, ZHI Yin-zhou. Current modulation technique used in resonator micro-optic gyro[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**: 307-313.
- [14] FENG Li-shuang, LEI Ming, LIU Huilan, *et al.* Suppression of backreflection noise in a resonator integrated optic gyro by hybrid phase-modulation technology[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(8): 1668-1675.
- [15] HONG Lin-fei, ZHANG Chun-xi, FENG Li-shuang, *et al.* Investigation on scale factor and output nonlinearity in resonator micro-optic gyro[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, **38**(8): 1046-1050.
洪灵菲,张春熹,冯丽爽,等. 谐振式微光学陀螺标度因数及其非线性度分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, **38**(8): 1046-1050.