

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.020

# 谐振式光纤陀螺单边信号检测方法的研究

杨 柳, 朱运飞, 李 宁, 张勇刚

(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:**热致偏振耦合噪声、背向散射噪声和非线性克尔噪声等因素严重制约了谐振式光纤陀螺的发展,降低噪声的影响对提高谐振式光纤陀螺的精度具有重要的研究意义。本文设计了一种双环腔谐振式光纤陀螺结构,并通过理论分析热致偏振噪声对谐振曲线的影响,提出了一种新的信号检测方法。该检测方法可以判断出谐振曲线受偏振噪声影响小的一边,并利用单边检测方法降低偏振噪声对陀螺精度的影响,双环腔结构也可以有效抑制背向散射噪声。仿真分析表明,在温度变化 $0.002^{\circ}\text{C}$ 时,检测的归一化幅值误差由0.2261降低到0.0327,单边检测方法可以明显地降低偏振波动噪声带来的影响。

**关键词:**谐振式光纤陀螺;信号检测;光纤环形谐振腔;偏振波动噪声

中图分类号:TN249

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2020)04-0151-06

## Research on Single Side Signal Detection Method of Resonant Fiber Optic Gyroscope

YANG Liu, ZHU Yun-fei, LI Ning, ZHANG Yong-gang

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The development of resonant fiber optic gyroscope is seriously restricted by thermally induced polarization coupling noise, backscattering noise and nonlinear Kerr noise. Suppressing the influence of noise for improving accuracy of resonant fiber optical gyro is of great significance. A new signal detection method with constructing a double-fiber-ring structure is proposed by analyzing the influence of polarization noise on resonance curve theoretically. The detection method can judge the side of resonance curve which is less affected by polarization noise and use unilateral detection method to reduce the influence of polarization noise on gyro precision. With the double-fiber-ring structure, the backscattering noise can also be effectively suppressed. The simulation results show that the normalized amplitude error is decreased from 0.2261 to 0.0327 when the temperature changes  $0.002^{\circ}\text{C}$ , which greatly reduces the influence of polarization fluctuation noise.

**Key words:** Resonant fiber optic gyroscope; Signal detection; Fiber ring resonator; Polarization fluctuation noise

收稿日期:2019-05-30;修订日期:2019-06-26

基金项目:国家自然科学基金(11804066);中央高校基本科研业务费专项资金(3072020CF0401);黑龙江省自然科学基金(LH2019A005)

作者简介:杨柳(1988-),女,讲师,主要从事惯性器件等方面的研究。E-mail:lyang@hrbeu.edu.cn

## 0 引言

从20世纪80年代美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的S. Ezekiel等首次提出了谐振式光纤陀螺(Resonant Fiber Optic Gyroscope, R-FOG)模型开始,对R-FOG的研究掀起了一阵热潮<sup>[1-2]</sup>。R-FOG通过检测光纤环形谐振腔(Fiber Ring Resonator, FRR)内2个相反方向谐振频率之差来完成对旋转引起的Sagnac效应的检测<sup>[3]</sup>。较干涉式光纤陀螺(Interference Fiber Optic Gyroscope, I-FOG)而言,R-FOG在小型化、低成本、高精度方面极具优势。但是经过30多年的发展,R-FOG并没有实现工程化应用,仍然停留在实验室研制阶段,其主要原因可以归结为:器件指标难以达到R-FOG工程化需求<sup>[4]</sup>,以及FRR内存在多种光学噪声<sup>[5-8]</sup>(由光纤介质分布不均匀引起的背向散射噪声<sup>[7]</sup>、耦合器偏振轴存在对准角度误差及温度波动引起的偏振波动噪声<sup>[8]</sup>、耦合器分光比不一致造成的克尔效应等)。当外界环境如温度、压力等发生波动时,保偏光纤2个偏振轴的折射率会发生变化,FRR内将会同时激励起2个本征偏振态(Eigenstate of Polarization, ESOP),并产生2条谐振曲线,其中次偏振态(Secondary ESOP, S-ESOP)的出现会引起主偏振态(Primary ESOP, P-ESOP)对应的谐振曲线两边不对称<sup>[9-10]</sup>。采用信号调制解调技术进行信号检测,当谐振曲线左右不对称时,在信号处理阶段会引入非常大的误差,是由偏振波动噪声引起的;并且在R-FOG中,高相干光源的使用,使得FRR中存在的光学噪声大大增加<sup>[11]</sup>,极大地限制了信号检测精度。

为了消除或减弱FRR内存在的各种光学噪声的影响,研究人员已经先后提出了通过对两路光波进行不同相位调制和载波抑制等手段来消除背向散射噪声<sup>[12]</sup>,反馈式数字频率跟踪锁定谐振频率、谐振腔内偏振轴单点或双点90°旋转熔接等技术手段对偏振噪声进行抑制<sup>[13]</sup>。虽然这些方法对噪声的抑制产生了一定效果,但是噪声在FRR内并不独立存在,它们是共同作用并相互影响的。在抑制某个噪声的同时会对FRR内其他性能产生影响,例如,采取最佳相位调制系数对载波抑制效果最好,但是这样做的结果就意味着系统解调曲线零点处的斜率变小,陀螺的动态范围逐渐减小,降低了系

统的检测灵敏度<sup>[14]</sup>。

本文首先设计了一种双光纤环形谐振腔的R-FOG结构,随后通过理论分析背向散射噪声和偏振噪声的产生机理,基于该双环腔结构提出了一种新的信号检测方法——单边信号检测方法,并详细论述了该检测方法的工作原理,从而有效抑制了光学噪声对R-FOG精度的影响,最后通过数值仿真计算论证了该检测方案对热致偏振噪声的抑制效果。

## 1 基于双环腔结构的R-FOG系统

### 1.1 双环腔R-FOG系统的结构组成

如图1所示,新型双腔R-FOG系统主要由两部分构成:1)光路部分,该部分主要包括连续可调窄线宽激光器,2个50/50分光比的光学耦合器(Optical Coupler, OC)、1个马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)、1个相位调制器(Phase Modulator, PM)、4个光纤环形器(Circulator, Cir)和2个FRR;2)电路部分,该部分主要完成调制信号的产生、锁相放大解调、PI数字控制器激光器的频率锁定<sup>[15]</sup>和陀螺信号的输出,而光电探测器(Photodetector, PD)作为光路与电路部分之间的桥梁完成光电信号之间的转换。窄线宽激光器输出的光经过PM后由MZI传输进环形谐振腔内,MZI可使2个环形谐振腔内的光波方向发生周期性改变。在FRR1内传输的光波经过谐振和多波干涉后输入PD,由光信号转化成电信号,并进一步进行锁相同步解调<sup>[16]</sup>。根据解调出的信号通过伺服回路控制调节激光器输出的中心频率,使其锁定在FRR1内光波的谐振频率上。FRR2内传输的光波,同样经由电路解调后直接作为R-FOG的输出信号。

### 1.2 双环腔R-FOG结构对背向散射噪声的抑制

传统R-FOG结构只有一个FRR。在一个FRR内同时传播顺时针(Clockwise, CW)和逆时针(Counterclockwise, CCW)方向两路光波,其中一路光波反馈至激光器用于频率锁定,另一路光波用于解调输出。在谐振腔内产生的背向散射光对传输的信号光波无任何影响,但会对另一路传输的光波产生干扰。传统R-FOG在结构上避免了非互易性误差,但是背向散射噪声会严重影响其精度。

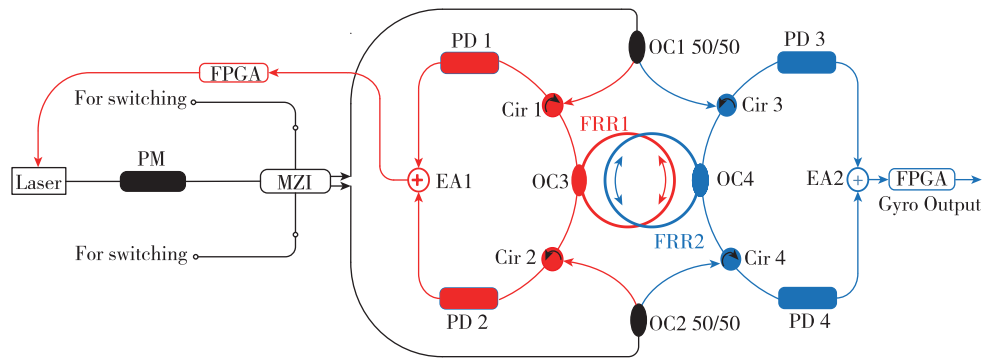


图 1 双环腔 R-FOG 系统结构

Fig. 1 Resonant fiber optic gyroscope with double-ring structure

本文提出的双环腔结构与传统结构相比的主要特点是:同一时刻,一个 FRR 内只有一路光波进行传输。激光器中心频率锁定其中一个 FRR 内的谐振频率,而另一个腔内光信号用于解调作为 R-FOG 输出信号。这里可设定其核心敏感部件性能一致,即 2 个环形谐振腔半径尺寸相同且采用同批次相同长度的光纤;并且,2 个光纤环形谐振腔上下平行叠放在一起,保证受温度波动影响一致<sup>[17]</sup>。这就从系统结构特性上完全抑制了背向散射噪声。

## 2 新型 R-FOG 的信号检测方法

### 2.1 偏振噪声对传统 R-FOG 信号检测的影响

首先简单介绍了传统结构 R-FOG 的信号检测原理。以三角波频率调制为例,使用 PM 通过线性相位调制对光信号进行周期性等效移频,频移量为  $\pm 2f_m$ ,如图 2 所示。根据传统 R-FOG 系统的工作原理可知,通过闭环反馈,激光器中心频率  $f_0$  始终锁定 CW 方向的谐振频率,当 FRR 敏感角速率为 0 时,CW 和 CCW 方向的谐振频率相等,  $f_0 + 2f_m$  和  $f_0 - 2f_m$  对应的光强相等,此时光电探测器

输出一条幅值不变的水平电压信号;当 FRR 相对惯性空间旋转时,  $f_0 + 2f_m$  和  $f_0 - 2f_m$  处对应的光强不再相等,此时光电探测器输出一条频率与三角波调制频率相同的方波电压信号。其中方波的幅度在一定中心区域内与 Sagnac 效应引起的频移  $\Delta f$  成线性关系,经过解调可以得到载体的旋转角速率。

理想状况下,窄线宽激光器输出的光波在保偏光纤中传输时应始终保持其偏振态为线偏振光,但是由于各光学器件存在偏振轴对轴误差,以及外界环境(温度、光纤扭曲等)的变化会导致入射的线偏振光变成部分偏振光。同时,由于 2 个偏振轴的折射率发生改变,使得 2 个本征偏振态间的相位差  $\Delta\beta L$  ( $\Delta\beta$  是指 2 个本征偏振态的传播常数差)不固定,从而发生偏振波动。

由于温度波动产生的偏振波动是影响 R-FOG 性能的主要噪声之一,此处主要分析偏振噪声对传统检测方法的影响。当温度发生波动的情况下,谐振腔内 2 个本征偏振态谐振中心频率间隔接近 0 时,总谐振曲线的线型严重扭曲变换,使 R-FOG 信号检测产生误差。当激光器中心波长  $\lambda = 1550\text{nm}$ ,光纤环长  $L = 10\text{m}$ ,耦合系数  $k_c = 0.06$ ,耦合器损耗  $\alpha_c = 0.12\text{dB}$ ,耦合器偏振轴熔接角度误差约为  $6^\circ$ ,  $\Delta\beta L = \pi/60$  时,FRR 内实际谐振曲线与理想谐振曲线仿真如图 3 所示,谐振曲线的谐振深度和对称度较理想情况均会发生变化。

根据 R-FOG 调相谱检测动态特性分析可知,  $\Delta f \ll 2f_m$ ,  $f_0 + 2f_m$  和  $f_0 - 2f_m$  分别检测谐振曲线的两端。当光纤陀螺相对惯性空间静止时,由于谐振曲线一侧严重畸形,此时  $f_0 + 2f_m$  和  $f_0 - 2f_m$  对应的光强不再相等,陀螺输出误差。从图 3 中可以看出,当系统中存在偏振波动噪声时,只会影响谐振曲线一侧发生严重畸形,无法进行信号检测;

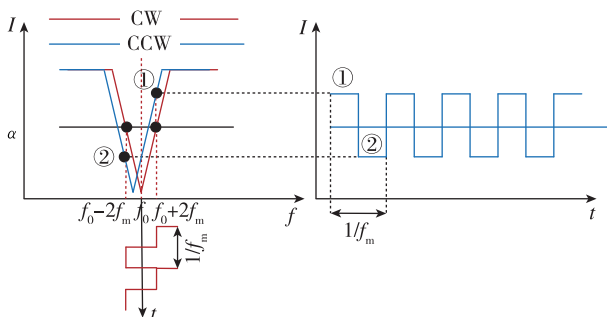


图 2 三角波调制检测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of triangular wave modulation detection

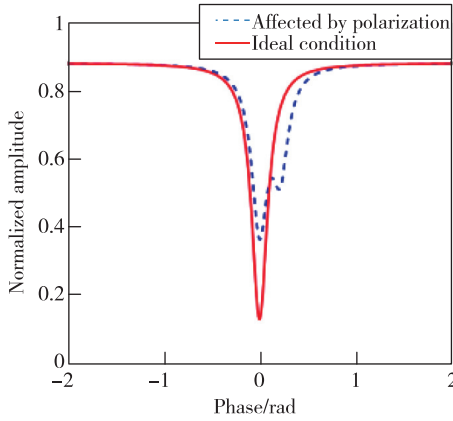


图3 无偏振波动与存在偏振波动时的谐振曲线对比

Fig. 3 Comparison of resonance curves with and without polarization fluctuation

而另外一侧的谐振曲线与理想谐振曲线斜率几乎完全一致,可以用于信号检测。

## 2.2 一种新的信号检测方法——单边信号检测法

基于上述特性,提出了一种新的信号检测方法,利用谐振曲线中未被偏振波动影响的一边进行信号检测,以降低偏振波动噪声带来的影响。

首先,该信号检测方法需要判断谐振曲线受偏振影响小的一边,通过对比曲线两边斜率与理想值,即  $[I(f_0 + 2f_m + f_{\text{applied}}) - I(f_0 + 2f_m - f_{\text{applied}})]$  的光强幅度差和  $[I(f_0 - 2f_m - f_{\text{applied}}) - I(f_0 - 2f_m + f_{\text{applied}})]$  的光强幅度差较理想值差异小的一侧可以用来进行信号检测,其中,  $f_{\text{applied}}$  为设置的频率偏置。

MZI可以改变2个FRR内光波传输的方向,设置其频率为相位调制器频率的2倍。在三角波调制第1/4个周期内,激光器中心频率  $f_0$  锁定 FRR1 内 CW 方向光波的谐振频率,同时检测 FRR2 中  $f_0 + 2f_m$  频率点处对应传输的 CCW 方向光波的光强;在第2/4个周期内,由于MZI方向的改变,使得2个FRR内传输的光波方向发生改变,此时,激光器中心频率锁定 FRR1 内 CCW 方向光波的谐振频率,同时检测 FRR2 中  $f_0 + 2f_m$  频率点处对应传输的 CW 方向光波的光强;在第3/4个周期内,激光器中心频率锁定 FRR1 内 CW 光波的谐振频率,同时检测 FRR2 中  $f_0 - 2f_m$  频率点处对应传输的 CCW 方向光波的光强;在第4/4个周期内,激光器中心频率锁定 FRR1 内 CCW 传输光波的谐振频率,同时检测 FRR2 中  $f_0 - 2f_m$  频率点处对应传输的 CW 传输光波的光强。

所以,在一个完整的三角波调制周期内,分别检测①、②、③、④处的光强,检测的方波如图4所示。

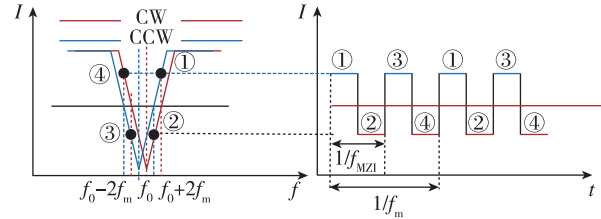


图4 新型三角波调制检测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of triangular wave modulation detection

从图4中可以得到,在一个三角波调制周期内,可以检测2次方波幅度。在三角波调制的前半个周期,检测 FRR2 内 CW 和 CCW 方向谐振曲线的右侧;而在三角波调制的下半个周期,检测 FRR2 内 CW 和 CCW 方向谐振曲线的左侧。通过上述方法,判断并选取受偏振波动影响较小的谐振曲线的一边来完成信号的检测。

## 3 仿真验证

温度变化导致保偏光纤折射率发生变化,同时对快慢轴的折射率变化呈现不一致,从而带来双折射率差随温度变化的规律,即材料的热致效应。入射激光绕环形谐振腔传输一周后,主、次偏振态所经历的相位差可表示为

$$\Delta\varphi_{\Delta T} = \Delta\beta L - \Delta\beta L|_{T_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\Delta\eta}{\Delta T} \right) \cdot \Delta T L \quad (1)$$

其中,  $\Delta\eta/\Delta T$  表示 FRR 的保偏光纤双折射率差温度系数。从式(1)可以看出,主、次偏振态两谐振谷的相对位置将随温度呈周期性变化,这会导致谐振曲线线型扭曲程度发生变化,从而影响信号检测。

为了验证单边信号检测方法可以有效地减弱偏振波动带来的影响,本文在不同温度下,通过将传统信号检测方法检测的方波幅度与新的检测方法检测的方波幅度较理想情况下进行对比,进一步验证新提出的方法的有效性,如图5所示。这里采用三角波调制,仿真参数主要如下:调制频率为200kHz,旋转角速率为1rad/s,初始相位  $\Delta\beta L|_{T_0} = 0$ ,  $\Delta\eta/\Delta T$  约为  $2.48 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ <sup>[18]</sup>,其他参数与图3仿真参数一致。从此对比结果可以看出,当温度发

生波动时引起保偏光纤双折射率差变化,偏振波动噪声对传统方法信号检测的影响非常大,而单边信号检测方法可以很大程度上避免偏振噪声的影响。

为进一步展示,偏振波动噪声对传统方法检测的影响以及单边检测方法的优点,给出了不同温度条件下的具体数值分析,如表 1 所示。当  $\Delta\beta L$  靠近  $\pi$  时,S-ESOP 对 P-ESOP 的影响几乎可以忽略不计,此时,无论采用传统的信号检测方法还是采用新型的信号检测方法,都不会对信号的检测精度产生影响;当  $\Delta\beta L$  接近 0 时,此时总谐振曲线一侧的线型将会发生严重畸变,此时若采用传统信号检

测方法,陀螺会输出非常大的误差,而采用新的单边检测方法对信号进行检测,可以将误差降低 1 个数量级左右。

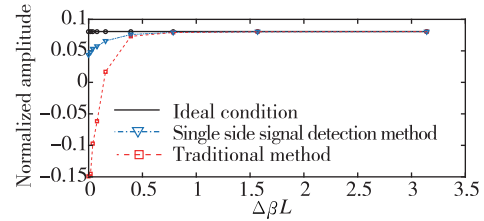


图 5 传统信号检测方法与单边检测方法方波幅度对比图  
Fig. 5 Comparison of traditional signal detection method and unilateral detection square wave amplitude

表 1 传统信号检测方法与单边检测方法对比

Tab. 1 Comparison of traditional signal detection methods and unilateral detection methods

温度波动情况 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	双折射导致相位差 $\Delta\beta L$ 变化情况	传统方法检测的 方波幅度	与理想方波幅度的 差值	单边检测方法的 方波幅度	与理想方波幅度的 差值
—	无偏振波动	0.0807	—	0.0807	—
0.32	$\pi$	0.0805	0.0002	0.0805	0.0002
0.16	$\pi/2$	0.0803	0.0004	0.0803	0.0004
0.08	$\pi/4$	0.0792	0.0015	0.0793	0.0014
0.04	$\pi/8$	0.0731	0.0076	0.0760	0.0047
0.016	$\pi/20$	0.0169	0.0638	0.0658	0.0149
0.008	$\pi/40$	-0.0618	0.1425	0.0573	0.0234
0.004	$\pi/80$	-0.0972	0.1779	0.0535	0.0272
0.002	$\pi/180$	-0.1454	0.2261	0.0480	0.0327

#### 4 结论

本文针对谐振腔内存在的光学噪声,基于双环腔 R-FOG 结构提出了一种单边信号检测方案。通过分析该新型 R-FOG 结构及其检测方法表明:

1)在目前器件指标难以满足 R-FOG 系统高精度要求的情况下,该系统结构光路中,每一时刻只有单一方向光传输,能够从根本上消除背向散射噪声的影响,为后续抑制噪声提供了新的思路。

2)在双腔 R-FOG 系统结构中,基于三角波信号调制,提出了一种全新的信号检测方法,该检测方法可以减弱偏振波动噪声带来的影响,并能够有效地提高信号检测精度,为后续工程上设计 R-FOG 光路结构提供了新思路。

3)本文中所提到的双腔 R-FOG 结构较传统 R-FOG 结构更复杂,2 个 FRR 需满足完全互易性,光

纤耦合器需满足完全互易性,且在光纤尾纤长度及熔接点的熔接精度上需保持一致来提高系统整体的互易性,因此,该模型结构需要进一步完善。

#### 参考文献

[1] 李建华, 于怀勇, 雷明, 等. 谐振式光纤陀螺用光源模块实验研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(3): 119-124.  
Li Jianhua, Yu Huaiyong, Lei Ming, et al. Experimental study on light source module for resonant fiber optic gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(3): 119-124(in Chinese).

[2] Strandjord L K, Qiu T, Wu J, et al. Resonator fiber optic gyro progress including observation of navigation grade angle random walk[C]// Proceedings of OFS2012 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors. International Society for Optics and

- Photonics, 2012; 842109-5.
- [3] Wang X, He Z, Hotate K. Rotation experiment of ring resonator fiber optic gyroscope with a digital controller[J]. IEICE, 2008, 53(7): 65-70.
- [4] Wang Z, Zhang H, Li H, et al. All-fiber ring fiber structure fused-type mode selective coupler with polarization-maintaining and wide bandwidth[C]// Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Optical Communication and Networks(ICOCN), 2019.
- [5] 田军, 王茁, 王国臣, 等. 谐振式光子晶体光纤陀螺谐振腔优化技术研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 92-97.  
Tian Jun, Wang Zhuo, Wang Guochen, et al. Research on resonant cavity fiber optic gyro resonant cavity optimization technology[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 92-97(in Chinese).
- [6] Liu N, Niu Y, Feng L. Passive compensation of intensity and polarization-induced noise by a quadrature demodulation technique in a resonator optic gyroscope[J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8711-8719.
- [7] Ma H, He Z, Hotate K. Reduction of backscattering induced noise by carrier suppression in waveguide-type optical ring resonator gyro[J]. Journal of Light-wave Technology, 2011, 29(1): 85-90.
- [8] 张婷, 郑华, 杜建功, 等. 谐振式光纤陀螺偏振波动噪声的温度特性[J]. 传感技术学报, 2016, 29(12): 1815-1821.  
Zhang Ting, Zheng Hua, Du Jiangong, et al. The temperature characteristics of polarized wave noise of resonant fiber optic gyro[J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(12): 1815-1821(in Chinese).
- [9] Li Z, He N, Sun X, et al. Analysis of resonance asymmetry phenomenon in resonant fiber optic gyro[J]. Sensors, 2018, 18(3): 696.
- [10] Yu X, Ma H, Jin Z. Improving thermal stability of a resonator fiber optic gyro employing a polarizing resonator[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 358-369.
- [11] Zhang G, Yu Z, Xu Z, et al. Laser frequency noise measurement in a resonant fiber optic gyro [J]. Optik, 2018, 175: 296-303.
- [12] Ying D, Ma H, Jin Z. Resonator fiber optic gyro using the triangle wave phase modulation technique[J]. Optics Communications, 2008, 281(4): 580-586.
- [13] Zhang H, Chen X, Shu X, et al. Fiber optic gyroscope noise reduction with fiber ring resonator[J]. Applied Optics, 2018, 57(25): 7391-7397.
- [14] Hong L, Zhang C, Feng L, et al. Effect of phase modulation nonlinearity in resonator micro-optic gyro[J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 62-65.
- [15] 李建华, 于怀勇, 吴衍记, 等. 谐振式光纤陀螺用激光器最优工作区间探究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 107-112.  
Li Jianhua, Yu Huaiyong, Wu Yanji, et al. Research on laser optimum work area of resonator fiber optical gyroscope[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 107-112(in Chinese).
- [16] Strandjord L K, Sanders G A, Ho W. Systems and methods for resonance seitching resonator fiber optic gyroscopes (RFOGs) with feed-forward processing [P]. U. S. Patent 9772189, 2017.
- [17] Yu X, Ma H, Jin Z. Improving thermal stability of a resonator fiber optic gyro employing a polarizing resonator[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 358-369.
- [18] 杨志怀. 谐振式光纤陀螺光学噪声分析与信号检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
Yang Zhihui. Research on optical noise analysis and signal detection technology of resonant fiber optic gyroscope[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010 (in Chinese).