

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.03.016

## 谐振式光纤陀螺用光源模块实验研究

李建华, 于怀勇, 雷明, 方圆, 冯喆

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:**基于多光源结构的谐振式光纤陀螺(R-FOG)是一种小型、高精度惯性传感器。研究了谐振式光纤陀螺的光源模块方案,选用小型可调谐的窄线宽半导体激光器,并对光源中心波长、光功率进行测量,以建立光源的最优工作区域,在此基础上对光源之间的拍频进行静态测试,测试过程中的频率最小值为53Hz、最大值为25.9225MHz。该方案具有分辨率高与动态范围大的潜在优势,在拍频测试中,陀螺测量分辨率和动态范围分别可达 $9.13 \times 10^{-4} (^{\circ})/h$ 、 $\pm 4.56 \times 10^7 (^{\circ})/h$ 。

**关键词:**R-FOG;光源结构;光源选型与测试;拍频测试

中图分类号:TN629

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2019)03-0119-06

## Experimental Research on Multi-Light Source Module of R-FOG

LI Jian-hua, YU Huai-yong, LEI Ming, FANG Yuan, FENG Zhe

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The resonator fiber optical gyro (R-FOG) based on multi-light source structure is a miniaturized and high-precision inertial sensor. By studying the light source module scheme of R-FOG, a miniaturized and tunable narrow line width semiconductor laser is proposed, and the center wavelength and optical power of the light source are measured. On the basis of the optimal working area established, the static test of beat frequency between different light sources is carried out, the minimum frequency is 53Hz and the maximum frequency is 25.9225MHz. With the potential advantage of high resolution ratio and large dynamic range, the gyro resolution ratio and dynamic range of the beat frequency test are  $9.13 \times 10^{-4} (^{\circ})/h$  and  $\pm 4.56 \times 10^7 (^{\circ})/h$  respectively.

**Key words:** R-FOG; Light source structure; Light source model selection and test; Beat frequency test

### 0 引言

随着惯性导航领域应用的发展,对小型化下高精度光纤陀螺提出了新的需求,迫切需要一种新型的小体积、高精度光纤陀螺产品。谐振式光纤陀螺原理上利用长度仅为几米至十几米的光纤谐振腔就可以实现高精度,成为光纤陀螺兼顾小型化与高精度方向发展的潜力方案之一,引起了研究者的广

泛关注<sup>[1-3]</sup>。但国内外研究单位30多年的研究表明:非线性克尔噪声、热致偏振耦合噪声及背向散射噪声等因素严重制约了谐振式光纤陀螺的技术发展,其性能还不能满足应用需求<sup>[4-6]</sup>。

随着谐振式光纤陀螺(Resonator Fiber Optic Gyro, R-FOG)技术的不断进步,多光源结构的R-FOG凭借其低噪声的突出优势越来越受到人们的重视,为提高R-FOG的输出精度提供了一条崭新的技

收稿日期:2018-07-28;修订日期:2018-10-22

作者简介:李建华(1990-),男,硕士,主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail:15710065879@163.com

术途径。多光源结构的优势在于能够有效克服背向散射噪声对 R-FOG 的影响,但与此同时多光源结构的 R-FOG 存在相对频率噪声的制约,因此仍需要通过设计相位锁定环路来抑制相对频率噪声的影响<sup>[7]</sup>。2005年, Honeywell 公司首次提出了采用多光源结构,预测采用该光源模块能够显著提升谐振式光纤陀螺的整体性能,已经将相关研究成果申请了专利<sup>[8]</sup>。2008年, Honeywell 公司的 Grenville Hughes, Glen A. Sanders 及 Lee K. Strandjord 等在总结前期工作的基础上设计出三光源模块结构的谐振式光纤陀螺,并研制出小型化谐振式光纤陀螺,预计零偏误差达到  $0.01(^{\circ})/h$ , 随机游走系数达到  $0.001(^{\circ})/h^{1/2}$ <sup>[9]</sup>。2013年7月,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)将小型化、高精度谐振式光子晶体光纤陀螺列入支持项目,并制定详细的研究计划,预计达到陀螺体积为  $1\text{cm}^3$  时零漂  $<0.01(^{\circ})/h$ , 陀螺体积为  $1\text{inch}^3$  时零漂  $<0.001(^{\circ})/h$  的研制目标<sup>[10]</sup>。

## 1 基于多光源结构的 R-FOG 检测原理

R-FOG 的检测原理为光学 Sagnac 效应,主要是通过敏感顺、逆时针两方向的频率差  $\Delta f$  来实现旋转角速度  $\Omega$  的检测。谐振频率差  $\Delta f$  正比于旋转角速度,表示为

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

其中,  $D$  为环形谐振腔的直径,  $n$  为光纤折射率,  $\lambda$  为输入光的工作波长。

图 1 给出了基于多光源结构的 R-FOG 系统框图,与传统单光源 R-FOG 不同,该 R-FOG 系统采用 3 个激光光源构成窄线宽光源模块来完成角速度信号的检测。其具体的检测过程为:在谐振腔顺时针方向上,谐振腔的输出光信号通过光电探测器转化为电信号,经过解调滤波之后作为主光源驱动电路的输入,其输出用来调节主激光器的激光光束中心频率;在谐振腔逆时针方向上,从激光器的驱动电路有两路输入信号,一路来自主光源和从激光器的拍频信号,另一路来自谐振腔逆时针方向光电探测器的输出电信号,综合这两路信号共同控制驱动电路输出电流,实现从光源对谐振频率的跟踪。

基于三光源结构陀螺输出测量时,将主光源频率锁定在顺时针方向上的谐振频率  $f_{\text{CW}}$ ,将从光源 1 的频率锁定在逆时针方向上距  $f_{\text{CW}}$  一个自由谱范

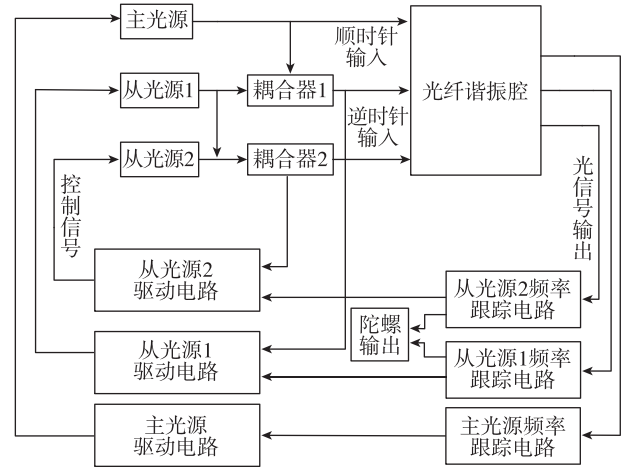


图 1 基于多光源结构 R-FOG 系统框图

Fig. 1 Structure of R-FOG based on multi-light source structure

围 ( $f_{\text{FSR}}$ ) 的谐振频率  $f_{\text{CCW1}}$ , 如图 2 所示, 2 个光源之间的频率差为

$$\Delta f_1 = f_{\text{CW}} - f_{\text{CCW1}} = f_{\text{FSR}} - \Delta f \quad (2)$$

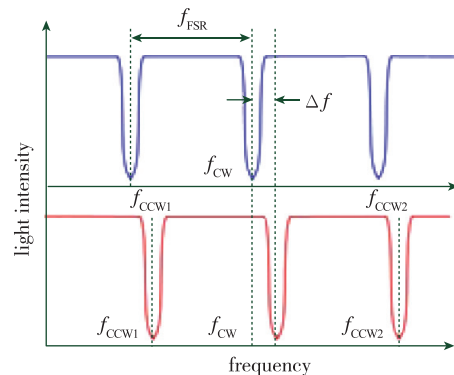


图 2 顺逆时针光强波形示意图

Fig. 2 Light intensity of CW and CCW

将从光源 2 的频率锁定在逆时针方向上距  $f_{\text{CW}}$  一个自由谱范围的谐振频率  $f_{\text{CCW2}}$ , 2 个光源之间的频率差为

$$\Delta f_2 = f_{\text{CCW2}} - f_{\text{CW}} = f_{\text{FSR}} + \Delta f \quad (3)$$

第 1 个拍频  $\Delta f_1$  是由主光源和从光源 1 产生, 第 2 个拍频  $\Delta f_2$  是由主光源和从光源 2 产生。这 2 个拍频由陀螺旋转引起的  $\Delta f$  和  $f_{\text{FSR}}$  决定, 通过做差得到  $\Delta f$  的表达式

$$2\Delta f = \Delta f_2 - \Delta f_1 \quad (4)$$

由式(1)和式(4)可得, 旋转角速度  $\Omega$  的输出表达式

$$\Omega = \frac{n\lambda \Delta f}{D} = \frac{n\lambda (\Delta f_2 - \Delta f_1)}{2D} \quad (5)$$

结合 Sagnac 效应和多光源模块差频的工作原理,得到多光源谐振式光纤陀螺的输出表达式,在此基础上展开旋转角速度的测量。

## 2 多光源 R-FOG 方案分析

光源是谐振式光纤陀螺的核心器件之一,对谐振式光纤陀螺的性能有着至关重要的影响。在谐振式光纤陀螺发展的早期阶段,传统单光源模块的结构设计方案无法实现背向散射噪声的有效抑制,加之非线性克尔噪声、热致偏振耦合噪声的存在,使得谐振式光纤陀螺的性能很难提升到理想的精度。多光源模块的出现为光源的结构设计提供了新的思路,为设计高性能谐振式光纤陀螺提供了理论支持,其在抑制背向散射噪声和高中心波长控制精度方面具备优势,但目前无法回避成本高、体积相对大的缺点。

此外,多光源模块结构的设计方式在抑制背向散射噪声的同时会引入相对频率噪声。对于多频激光器模块需要采用 2 个或多个激光光源,光源之间产生的相对频率噪声会严重影响陀螺零偏稳定性,降低对旋转角速率的测量精度。光源之间的相对频率噪声以白噪声为主,光谱噪声密度是不随频率变化的常值。相对频率噪声光谱密度  $S_f^*$  与环路增益  $G$  的平方成反比,如下所示<sup>[6]</sup>

$$S_f^* = \frac{S_f}{G^2} \quad (6)$$

其中,  $G$  为环路增益幅值,  $S_f$  为在激光光源的固有频率噪声光谱密度,由激光器线宽决定

$$S_f = \frac{\Delta\omega}{\pi} \quad (7)$$

由式(6)与式(7)可得

$$S_f^* = \frac{\Delta\omega}{\pi G^2} \quad (8)$$

环路增益是频率的函数。对于一阶环路来说,频率每降低 10 倍频程环路增益会增加 20dB,频率噪声会随着频率的降低而减小。通过对频率带宽和环路增益的设计,减小可控相对频率噪声光谱密度对陀螺零偏稳定性的影响,提升整机性能。

## 3 光源选型与实验

### 3.1 光源的选型

R-FOG 用激光器的性能选择至关重要,主要要求激光器具有以下特性:1)具备窄线宽的特点,线

宽限制在几千赫兹以内;2)可以通过激光器的注入电流或者温度的控制,实现光频率的可调谐。

#### (1)窄线宽的要求

谐振式光纤陀螺要求光源为高相干的窄线宽激光器,陀螺的谐振谱宽与光源线宽之间的关系为

$$\delta f = \Delta f_R + \Delta f_L \quad (9)$$

其中,  $\delta f$  为光纤环谐振曲线实测半高全宽,由光纤环物理参数决定的半高全宽  $\Delta f_R$  及  $\Delta f_L$  为激光器线宽<sup>[11]</sup>。R-FOG 谐振特性是其工作的关键,必须在谐振腔精细度高的情况下完成对旋转角速度的测量。通过式(9)可知,激光器半高全宽对实际测量的光纤环谐振曲线的半高全宽有着很大的影响,当激光器半高全宽的数量级甚至与光纤环物理参数决定的谐振曲线半高全宽的数量级相当时,就会得到展宽的谐振腔谐振谱,从而导致谐振现象消失,不能观察到谐振曲线,这就破坏了陀螺对旋转角速度的测量前提。因此,这就要求激光器具备窄线宽的特点。

#### (2)可调谐的要求

根据 R-FOG 的工作原理,当谐振腔相对于惯性空间旋转时,激光器的中心频率与谐振频率会出现偏差,这就要求激光器的中心频率跟踪上谐振频率(顺时针或者逆时针之一的方向)。当激光器的中心频率与谐振频率出现偏差时,通过光电探测器获得相应的电流信号作为激光器中心频率的控制信号,这就要求激光器能够实现电流可调谐。激光器中心波长具有温度敏感性,当外界温度变化时会引起激光器中心波长大幅度的波动,这就需要激光器能够实现温度可调谐。

#### (3)其他要求

R-FOG 的优势之一体现在小型化方面,这就要求激光器具备小型化可集成的特点;激光器在使用过程中可能会遭遇机械抖动等外界环境变化,这就要求激光器具有可靠性及稳定性的特点。

RIO 公司研发出世界上线宽最窄的半导体激光器,输出线宽小于 3kHz( $6 \times 10^{-9}$  nm),且具备小型化可调谐的优点,本文选用该公司的激光器作为谐振式光纤陀螺用窄线宽半导体激光器。

## 3.2 多光源模块的测试

### (1)光源性能测试

为了评估光源的性能指标,为谐振式光纤陀螺的设计提供参数指导,实验室建立谐振式光纤陀螺用窄线宽激光器自动化测试平台如图 3 所示,利用

该平台可完成光源中心波长、光功率及中心波长、光功率稳定性的测试。

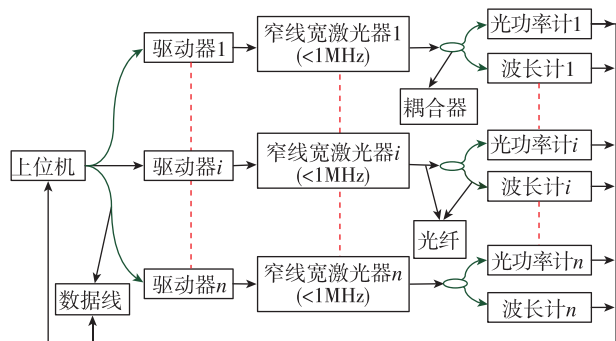


图3 激光器性能测试平台示意图

Fig. 3 Schema of laser performance test platform

利用该平台对3个光源中心波长、光功率随温度、控制电流变化的情况展开测试,统计结果如表1所示。多光源模块R-FOG通过拍频检测的方式来实现旋转角速度测量,首先要求2个激光器中心波长差控制在 $\pm 4.10\text{pm}$ 内<sup>[11]</sup>,据此可算出各个激光器的温度和电流最佳工作区域:激光器1的温度最优工作区域为 $(30.5 \pm 0.22)^\circ\text{C}$ ,电流最优工作区域为 $(110 \pm 10)\text{mA}$ ;激光器2的温度最优工作区域为 $(26 \pm 0.22)^\circ\text{C}$ ,电流最优工作区域为 $(113 \pm 5)\text{mA}$ ;激光器3的温度最优工作区域为 $(21 \pm 0.20)^\circ\text{C}$ ,电流最优工作区域为 $(114 \pm 5)\text{mA}$ 。

表1 激光器光功率/中心波长分析

Tab. 1 Analysis of laser light power/center wavelength

	激光器 1	激光器 2	激光器 3
电流温度最佳工作点/(mA, °C)	(110, 30.5)	(113, 26)	(114, 21)
最佳工作点处中心波长/nm	1550.15013	1550.14790	1550.14795
最佳工作点处的光功率/mW	11.391	11.634	9.801
光功率随电流变化率/(mW/mA)	0.18	0.17	0.29
光功率随温度变化率/(mW/°C)	0.25	0.39	0.65
中心波长随电流变化率/(pm/mA)	0.11	0.20	0.30
中心波长随温度变化率/(pm/°C)	13.31	13.31	13.82

(2)光源之间的拍频测试

在洁净间的环境下对多组激光器之间的拍频频率进行了测量,选取其中一组数据进行分析,其具体测试情况为激光器稳定工作后,在主激光器与从激光器1最佳工作点处调节控制温度与驱动电流

至拍频频率小于1MHz,此后保持激光器工作状态不变,利用自动化测试平台开展24h(当日17点至次日17点)拍频稳定性测试,采样间隔0.1s,测试结果如图4所示,其中中间阶段(当日21点至次日7点)测试环境稳定,两侧阶段存在温度波动。分析全天测试结果可知,拍频最大值为25.9225MHz,最小值为53Hz,频率的大范围平漂移主要是由环境波动及光源自身频率噪声引起的,可通过改善环境稳定性及激光器控制精度来提高拍频的稳定性。

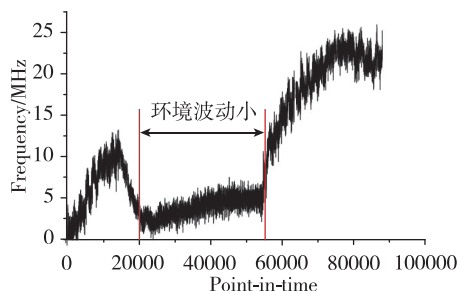


图4 主光源与从光源拍频频率数据采集分析图

Fig. 4 Analysis of main-slave laser beat frequency data

分析不同光源之间3组拍频数据,通过数据取样发现,在短时间0.1s内频率变化的平均值分别为141.9kHz、273.8kHz、163.6kHz,表明光源拍频频率变化较快,主要影响因素是光源自身线宽特性、光源驱动控制精度、光路互易性及外界环境波动等。总的来说,光源之间的拍频频率短期内无明显的漂移方向,随机的增大或减小,但长期随着外界温度的波动呈现增大或减小的方向性,因此需要屏蔽外界环境的变化对拍频频率检测的干扰。

本实验室采用的谐振腔直径为0.07m,激光器的波长为1550nm,根据式(1)可知,拍频测试过程中的频率最小值53Hz、最大值25.9225MHz对应的谐振腔相对于惯性空间的旋转速度分别为 $6.72 \times 10^{-2}(\text{°})/\text{s}$ 、 $32890.10(\text{°})/\text{s}$ ,表明在外界环境波动的干扰下激光器会发生中心频率的漂移,导致拍频频率变大。此外,陀螺极限灵敏度与拍频频率的分辨率有关,而频率计具备在从光源之间频率差为100kHz时优于0.0002Hz的测量分辨率,对于同样的谐振腔可得陀螺的测量分辨率为 $9.13 \times 10^{-4}(\text{°})/\text{h}$ ,动态范围高达 $\pm 4.56 \times 10^7(\text{°})/\text{h}$ 。由此分析可知,基于拍频测试方案的谐振式光子晶体光纤陀螺具有高分辨率与大动态范围的潜在优势。

此外,通过示波器对光源拍频进行测试,得到的波形如图5所示,其中(a)、(b)与(c)分别对应拍



频频率为 1MHz、10MHz 时的拍频波形图及拍频实测图。分析拍频波形图可知,主从光源之间能够产生明显的拍频现象,通过测量二者拍频频率实现从光源对主光源频率的跟踪与锁定。对比分析图 5(a)与(b)可知,在不同的拍频频率下形成的波形图有相同的偏置,均位于 2.8V 附近,但波形幅度由 2.1V 衰减为 1.0V,由此可知波形幅度随着拍频频率的增大而衰减,直至无法实现拍频高频段的测量,可通过调节主从光源的输入光强,保持两路光束光强的一致性,以增加高频段的波形幅度,提高拍频频率的测量能力。

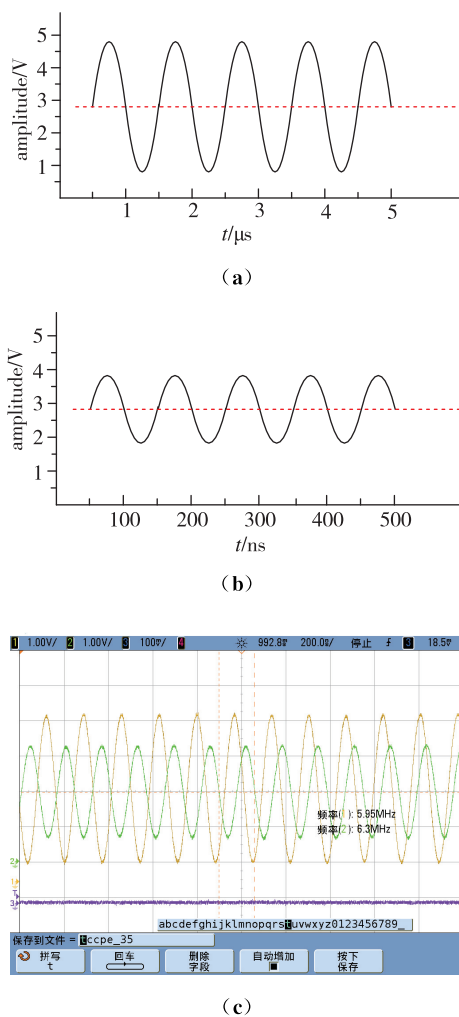


图 5 主从激光器拍频结果示意图

Fig. 5 Results of main-slave laser beat frequency

#### 4 结论

本文分析了多光源方案的谐振式光纤陀螺,建立了光源的选型标准,对激光器的性能进行测试并建立了最优工作区域,激光器 1 的温度最优工作区域为  $(30.5 \pm 0.22)^\circ\text{C}$ , 电流最优工作区域为  $(110 \pm$

$10)\text{mA}$ ; 激光器 2 的温度最优工作区域为  $(26 \pm 0.22)^\circ\text{C}$ , 电流最优工作区域为  $(113 \pm 5)\text{mA}$ ; 激光器 3 的温度最优工作区域为  $(21 \pm 0.20)^\circ\text{C}$ , 电流最优工作区域为  $(114 \pm 5)\text{mA}$ ; 对激光器之间的拍频进行了测试与分析,测试过程中未对激光器进行控制的情况下拍频频率的最小值为 53Hz、最大值为 25.9225MHz。此外,该型陀螺理论上的测量分辨率和动态范围分别为  $9.13 \times 10^{-4} (^\circ)/\text{h}$ 、 $\pm 4.56 \times 10^7 (^\circ)/\text{h}$ , 具有高精度与大动态范围的潜在优势。

然而,在实际应用过程中,拍频频率的快速漂移与波形幅度随拍频频率增加而衰减的特性等不利于拍频频率的检测,且目前尚未能将该光源模块与陀螺整机进行联调,无法检测从光源利用拍频对主光源频率的跟踪效果,后续将继续开展从光源对主光源频率跟踪和拍频测量的研究,直至搭建出基于多光源方案的陀螺,发挥出该方案的潜在优势,实现陀螺性能的提升。

#### 参考文献

- [1] 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 1-20.  
Zhang Weixu. Fiber optic gyroscope and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1-20(in Chinese).
- [2] 李建华, 于怀勇, 吴衍记, 等. 谐振式光纤陀螺用激光器性能研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(4): 71-76.  
Li Jianhua, Yu Huaiyong, Wu Yanji, et al. Study on performance of resonant fiber optic gyro laser [J]. Navigation Positioning and Timing, 2016, 3(4): 71-76(in Chinese).
- [3] 郑辛, 吴衍记, 于怀勇. 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用现状及关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 1-8.  
Zheng Xin, Wu Yanji, Yu Huaiyong. Application status and key technologies of photonic crystal fiber in fiber optic gyro [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 1-8(in Chinese).
- [4] Sanders G A, Strandjord L K, Qiu T. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing [C]// Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 2006: 1-2.
- [5] Liu N, Niu Y, Feng L, et al. Suppression of back-scattering induced noise by the sideband locking technique in a resonant fiber optic gyroscope [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 010608.

- [6] Li Z, He N, Sun X, et al. Analysis of resonance asymmetry phenomenon in resonant fiber optic gyro [J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 696.
- [7] Strandjord L K, Sanders G A, Ho W. Systems and methods for resonance switching resonator fiber optic gyroscopes (RFOGs) with feed-forward processing; U. S. Patent 9772189[P]. 2017-09-26.
- [8] Hughes G, Sanders G A, Strandjord L K. Optical resonator gyro with integrated external cavity beam generator; U. S. Patent 7463360[P]. 2008-12-09.
- [9] Sanders G A, Strandjord L K. System and method for stabilizing light sources in resonator gyro; U. S. Patent 7372574[P]. 2008-05-13.
- [10] www.darpa.mil.
- [11] 张旭琳 周柯江. 谐振式光纤陀螺的系统分析[J]. *半导体光电*, 2009, 30(3):464-468.  
Zhang Xulin, Zhou Kejiang. Analysis of resonator fiber optic gyro system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(3):464-468(in Chinese).
- [12] 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).