

# 双路闭环谐振式微光学陀螺

王文怡 王慧泉\* 陈妍 马慧莲 金仲和

(浙江大学微小卫星研究中心, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 通过建模仿真,从改善陀螺输出带宽以及提高互易性噪声抑制能力出发,对单路闭环谐振式微光学陀螺(R-MOG)和双路闭环 R-MOG 进行了分析研究。相比于单路闭环 R-MOG,双路闭环 R-MOG 在抑制互易性噪声的同时,能较好地改善输出带宽,并进一步提高陀螺系统的线性度。在此基础上,搭建了双路闭环 R-MOG 的实验系统,并进行了陀螺零偏稳定性以及输出响应特性测试。实验结果表明,陀螺 1 h 的零偏稳定性为  $0.53^\circ/\text{s}$ ,在  $\pm 1000^\circ/\text{s}$  转速范围内,陀螺系统的线性度为 99.995%。

**关键词** 传感器;谐振式微光学陀螺;双路闭环;互易性噪声;带宽

**中图分类号** TN629.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1208003

## Double Closed-Loop Resonator Micro Optic Gyro

Wang Wenyi Wang Huiquan Chen Yan Ma Huilian Jin Zhonghe

(Micro-Satellite Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A simulation model is setup to analyze the reciprocal noises reduction and the improvement of the gyro bandwidth of the single closed-loop and double closed-loop resonator micro optic gyro (R-MOG). Simulation results show that the double closed-loop R-MOG can inhibit the reciprocal noises and enhance the output bandwidth. Furthermore, the double closed-loop R-MOG can improve the gyro linearity. Based on the work mentioned above, an experimental system of the double closed-loop R-MOG is set up. The bias stability and gyro output are tested. Experimental results show that the bias stability of the R-MOG is  $0.53^\circ/\text{s}$  over an hour and the linearity of the R-MOG is 99.995% over the range of  $\pm 1000^\circ/\text{s}$ .

**Key words** sensors; resonator integrated optic gyro; double closed-loop; reciprocity noise; bandwidth

**OCIS codes** 060.2800; 120.5790; 140.4780; 130.6010

## 1 引言

谐振式光学陀螺是基于光学 Sagnac 效应实现对转动信号进行检测的一种高精度惯性传感器件<sup>[1]</sup>。根据敏感结构的不同,可分为以光纤环形谐振腔为核心敏感元件的谐振式光纤陀螺<sup>[2,3]</sup>和以光波导环形谐振腔(WRR)为敏感元件的谐振式微光学陀螺(R-MOG)<sup>[4~8]</sup>。集成化的 R-MOG 具有理论精度高、体积小和抗震能力强等优点。在 R-MOG 中,转动角速度是通过检测由 Sagnac 效应引起的 WRR 顺时针(CW)与逆时针(CCW)方向光波的谐振频率差得到。通常 WRR 的直径仅为  $2\sim 3\text{ cm}$ <sup>[4~6]</sup>,由

Sagnac 效应引起的谐振频率差是极其微小的。为有效抑制 R-MOG 中各种噪声因素和误差<sup>[4,5,7]</sup>,R-MOG 不适宜采用全开环的信号检测方式。一般的,R-MOG 采用单路闭环的检测方案,将激光器输出光中心频率跟踪锁定到 WRR 其中一个方向光波的谐振频率上,通过解调激光器与另一个方向光波的谐振频率差来得到陀螺信号。在单路闭环 R-MOG 中,需通过提高锁定环路增益和减小开环路带宽的方法来抑制互易性噪声<sup>[9,10]</sup>,因此,为了提高陀螺的检测精度,单路闭环的 R-MOG 的输出带宽通常较小。基于上述问题,提出了双路闭环检测方

收稿日期: 2012-07-04; 收到修改稿日期: 2012-09-04

基金项目: 2010 年度留学人员科技活动项目择优资助(J20110017)资助课题。

作者简介: 王文怡(1988—),女,硕士研究生,主要从事传感器信号处理方面的研究。E-mail: angela19880211@163.com

导师简介: 马慧莲(1975—),女,副教授,硕士生导师,主要从事光学传感器及传感器信号处理等方面的研究。

E-mail: mahl@zju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: hqwang@zju.edu.cn

案,在单路闭环的基础上,加入第二锁定环路。经仿真分析可知,双路闭环 R-MOG 能在抑制互易性噪声的同时改善陀螺的输出带宽。在此基础上,建立了双路闭环 R-MOG 实验系统,测试得到,在理论带宽为 25 rad/s 的情况下,陀螺系统的零偏稳定性为 0.53 °/s。此外,由于双路闭环 R-MOG 是通过直接读取频率量来获得陀螺信号的,避免了单路闭环 R-MOG 需进行标度因素转换带来的非线性影响,能够提高陀螺的线性度。

## 2 双路闭环 R-MOG 的基本原理

为有效抑制 R-MOG 中各种噪声因素和误差,R-MOG 必须至少锁定 WRR 其中一个方向的光波,使其始终处于谐振状态,而不适宜采用全开环的信号检测方式。在基于相位调制技术的单路闭环 R-MOG<sup>[4,5]</sup>中,通过正弦波调制的相位调制器(PM)对激光器(LD)输出光进行调制,利用锁相放大器(LIA)对光电探测器(PD)输出信号进行解调,解调输出信号输入到比例积分控制器(PI)用来反馈控制激光器,调整激光器输出中心频率并跟踪锁定到 WRR 其中一个方向光波的谐振频率上,另一方向光波解调信号则作为 R-MOG 的开环转动信号。双路闭环系统是在上述开环系统基础上,在第二环路中引入移频器来实现。

图 1 为双路闭环 R-MOG 的系统原理图,其中的移频器件为声表面波声光移频器(AOFS),可利

用声光效应来改变光波频率。由图 1 可知,在反馈控制激光器频率实现 CCW 方向光波闭环基础上,CW 方向传播的光波信号经 LIA2 解调输出后,与 LIA1 的解调输出相减输入到 PI2,PI2 的输出反馈控制压控振荡器(VCO),VCO 输出驱动 AOFS2,完成线性移频,实现第二环路的闭环锁定。图 1 中 AOFS1 由频率固定的信号发生器(SG)SG3 驱动,引入一个固定频差,使 AOFS1 始终工作在移频器中心频率附近。陀螺转动信号直接由两个 AOFS 的驱动频率差输出,避免了单路闭环 R-MOG 中,需要通过将解调电压信号转换成频差信号的过程。

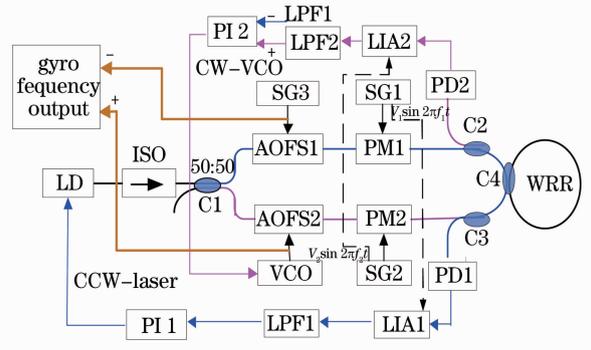


图 1 双路闭环 R-MOG 结构框图

Fig. 1 Schematic of the double closed-loop R-MOG

## 3 双路闭环 R-MOG 的性能分析

为了便于仿真分析,图 1 中的各部件均等效为数学表达式,得到如图 2 所示的双路闭环 R-MOG 的等效分析模型。以 CCW 方向光波为第一闭环

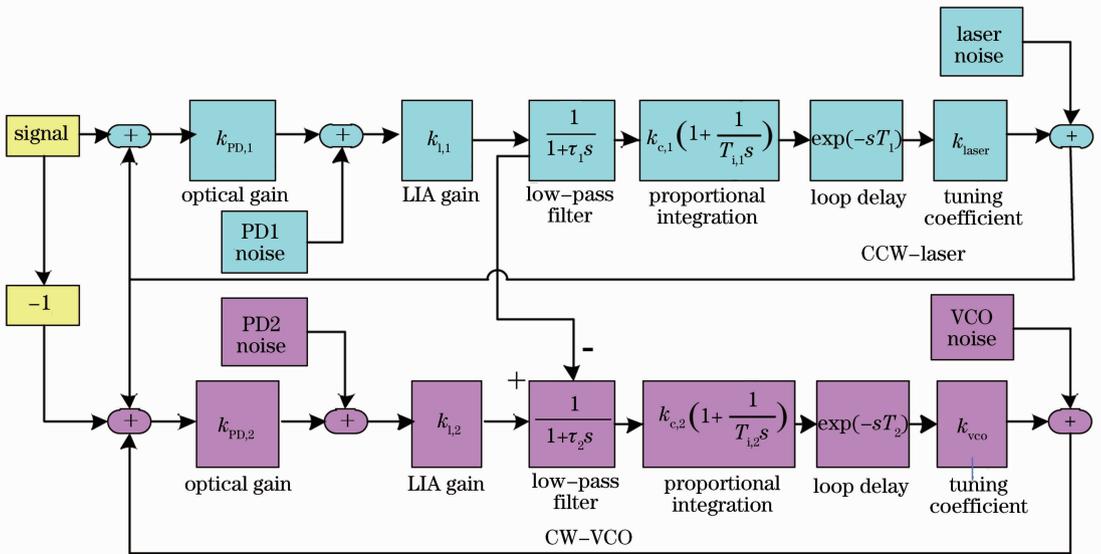


图 2 双路闭环 R-MOG 等效模型

Fig. 2 Equivalent simulation model of double closed-loop R-MOG

路、CW 方向光波为第二闭环路。其中  $k_{PD,1}$  和  $k_{PD,2}$  分别为 CCW 和 CW 环路中单位电路增益下的光路增益； $k_{i,1}$  和  $k_{i,2}$  分别为 CCW 和 CW 环路中 LIA1 和 LIA2 的放大倍数； $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为 CCW 和 CW 环路中低通滤波器(LPF)LPF1 和 LPF2 的时间常数； $k_{c,1}$ 、 $k_{c,2}$  和  $T_{i,1}$ 、 $T_{i,2}$  分别代表 CCW 和 CW 环路 PI 的比例增益和积分时间； $k_{laser}$  为 LD 的频率调谐系数； $k_{VCO}$  为 VCO 的压频转换系数。在实际系统中，由于器件延时的存在，需在模型中加入延时模块，其中  $T_1$  为 CCW 环路的延迟， $T_2$  为 CW 环路的延迟。laser noise、VCO noise、PD1 noise 和 PD2 noise 分别为 LD 噪声模块、VCO 模块噪声、PD1 噪声模块和 PD2 的噪声模块，signal 为由转动引起的 CCW 环路谐振频率的变化，-signal 表示由转动引起的 CW 环路谐振频率的变化，因此由转动引起的 CW/CCW 环路谐振频率差为 2 倍 signal。从图 2 可知，陀螺的输出由 CCW 和 CW 环路共同影响，其中激光器输出端是两个环路的连接点。根据此模型，可仿真得到陀螺对互易性噪声抑制能力以及频率响应特性。

在 R-MOG 系统中，最主要的互易性噪声就是

激光器的频率噪声，图 3 为 R-MOG 在单路闭环和双路闭环下的对激光器频率噪声抑制能力的对比，由图 3(a)可知，单路闭环 R-MOG 中，CCW 闭环路对激光器频率噪声呈高通特性，CW 开环路对激光器频率噪声呈低通特性。为了减小激光器频率噪声对陀螺系统影响，需增大闭环路的带宽，减小开环路输出带宽。而闭环路的带宽受限于环路延时，不能无限增大<sup>[10]</sup>，因此，需通过减小开环路的带宽进行高频噪声的抑制。由图 3(b)可知，双路闭环 R-MOG 在 CCW 与 CW 环路增益相同的情况下，具有全频带内完全抑制激光器噪声的能力。但是，在实际系统中，是无法保证两路增益完全一致的，图 3(c)和 (d)为两路增益不相同，双路闭环 R-MOG 对激光器噪声的抑制能力，由图 3 可知，当两路增益不同时，系统在带宽内对激光器频率噪声有较好的抑制，但是在带宽外的抑制能力较差。图 4 为 R-MOG 的频率响应特性。由图 4 可知，不管是单路闭环 R-MOG 还是双路闭环 R-MOG，陀螺的输出带宽都由 CCW 路和 CW 路共同决定，且受限于其中带宽较小的一路。由前面的分析可知，单路闭环 R-MOG 需减小开环路的输出带宽来抑制激光器

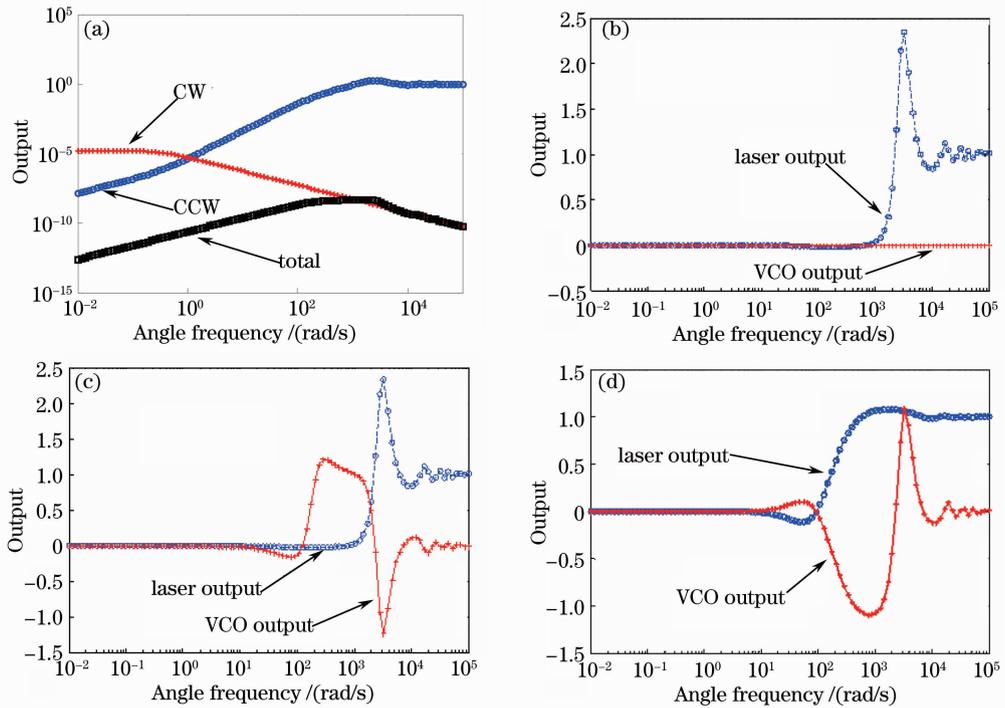


图 3 激光器频率噪声输出响应。(a)单路闭环 R-MOG；(b)双路闭环 R-MOG，具有相同增益；(c) 双路闭环 R-MOG，CCW 路增益较大；(d)双路闭环 R-MOG，CW 路增益较大

Fig. 3 Output response of the laser frequency noise. (a) Single closed-loop R-MOG; (b) double closed-loop R-MOG with the same gain; (c) double closed-loop R-MOG with a higher gain applied to the CCW loop; (d) double closed-loop R-MOG with a higher gain applied to the CW loop

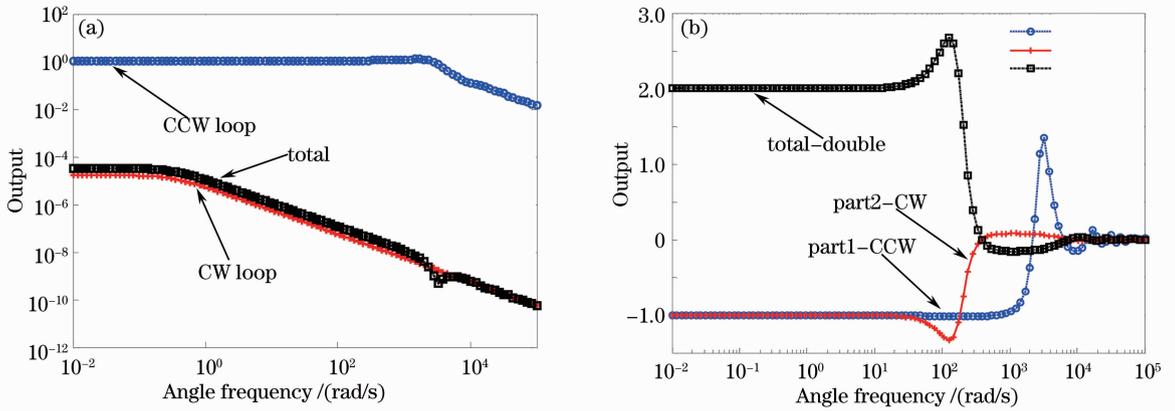


图 4 (a)单路闭环 R-MOG 的频率响应；(b)双路闭环 R-MOG 的频率响应

Fig. 4 (a) Frequency response of single closed-loop R-MOG; (b) frequency response of double closed-loop R-MOG

的频率噪声,因此陀螺的带宽会较小,而双路闭环 R-MOG 则需尽可能地增大两路带宽来抑制激光器的频率噪声。因此,双路闭环 R-MOG 可以在抑制互易性噪声的同时改善陀螺的输出带宽。

### 4 实验结果

根据图 1 的系统原理图,搭建了基于 AOFS 的双路闭环 R-MOG 实验系统。半导体激光器中心波长为 1550 nm,线宽为 70 kHz,AOFS 的中心频率为 55 MHz,带宽为 10 MHz,相位调制器的半波电压为 3.25 V,PD 带宽为 1 GHz。基于此实验系统,进行了伪转动测试,得到了双路闭环 R-MOG 的线性度,同时测试了其 1 h 内锁定精度及零偏稳定性。

图 5 为双路闭环 R-MOG 的线性度测试结果,其标度因素为 200 Hz·s/(°)。通过改变 CCW 第一闭环路的 AOFS 的驱动频率来等效陀螺转动,得到图中每个点,由图 5 可知,在±1000 °/s 的转速范围内,双路闭环 R-MOG 能保持良好的线性输出,经计算,其线性度为 99.995%。

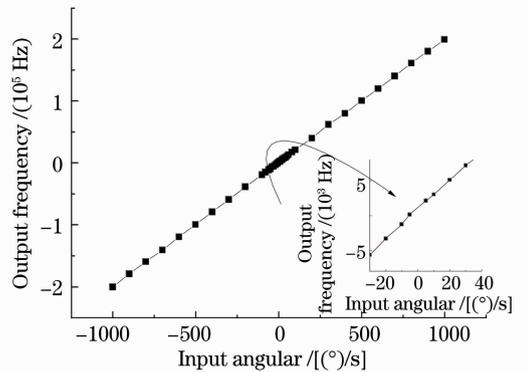


图 5 双路闭环 R-MOG 线性度测试

Fig. 5 Linearity test of double closed-loop R-MOG

图 6 为双路闭环 R-MOG 的锁定精度的测试结果及其 Allan 方差分析,CCW 和 CW 环路的锁定精度分别为 0.003 °/s(1σ)和 0.007 °/s(1σ),且 Allan 方差的结果表明锁定精度主要受短期噪声影响。图 7 为陀螺输出的零偏稳定性测试结果及其 Allan 方差分析,在理论带宽为 25 rad/s 的情况下,双路闭环 R-MOG 1 h 的零偏稳定性为 0.53 °/s(1σ)。

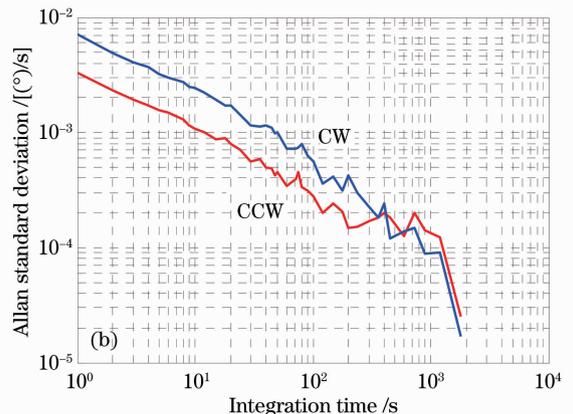
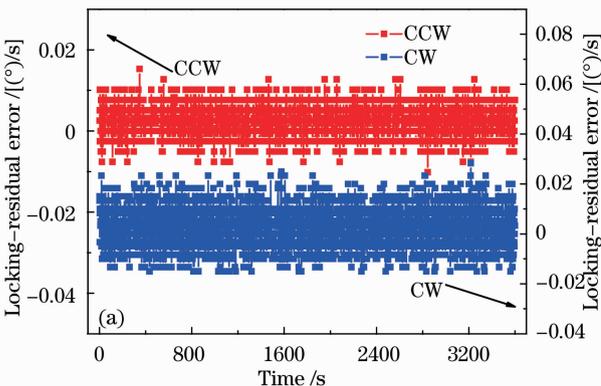


图 6 (a)双路闭环 R-MOG 锁定精度；(b) Allan 方差分析

Fig. 6 (a) Locking precision of double closed-loop R-MOG; (b) Allan variance analysis

从 Allan 方差分析的结果可以看出,陀螺系统除了存在长期漂移外,还存在一定的短期噪声,引起短期

噪声的主要原因可能是两个环路存在增益和相位的差别,这还有待进一步研究。

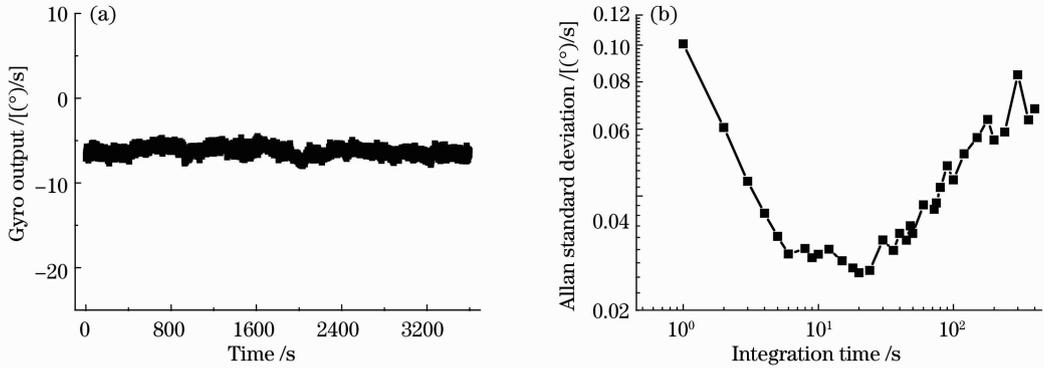


图 7 (a) 双路闭环 R-MOG 零偏稳定性测试; (b) Allan 方差分析

Fig. 7 (a) Bias stability of double closed-loop R-MOG; (b) Allan variance analysis

## 5 结 论

双路闭环 R-MOG 能在抑制互易性噪声的同时,增大陀螺的输出带宽,并且输出信号通过频率读取,避免了标度因素转换的过程,可改善陀螺输出的线性度。实验结果表明,在理论带宽为 25 rad/s 的情况下,双路闭环 R-MOG 1 h 内零偏稳定性为 0.53 °/s(1σ)。且在 ±1000 °/s 的转速范围内,双路闭环 R-MOG 的线性度可到 99.995 %。这是在同类 WRR 芯片上报道的双路闭环 R-MOG 最好的实测结果。

### 参 考 文 献

- 1 S. Ezekiel, S. K. Balsmo. Passive ring resonator laser gyroscope [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(9): 478~480
- 2 Z. H. Jin, X. H. Yu, H. L. Ma. Resonator fiber optic gyro employing a semiconductor laser [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(15): 2856~2864
- 3 Peng Bo, Yang Zhihuan, Ma Huilian *et al.*. Digitalization of the detection circuit for resonator fiber optic gyro based on the phase modulation spectroscopy technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1479~1483
- 彭 博, 杨志怀, 马慧莲 等. 基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺检测电路数字化研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1379~1483
- 4 H. L. Ma, Z. Y. He, K. Z. Hotate. Reduction of backscattering induced noise by carrier suppression in waveguide-

- type optical ring resonator gyro [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(1): 85~90
- 5 H. Mao, H. L. Ma, Z. H. Jin. Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 4632~4643
- 6 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Optimal design of ring resonator in silica optical waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1330~1332
- 马慧莲, 金仲和, 丁 纯 等. 二氧化硅光波导环形谐振腔 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1330~1332
- 7 Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Research on Kerr-effect-induced noise of integrated optical gyroscope based on silicon on SiO<sub>2</sub> waveguide resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013003
- 于怀勇, 张春熹, 冯丽爽 等. 谐振式硅基二氧化硅集成光学陀螺的克尔噪声研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1013003
- 8 Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Research on nonlinearity of phase modulation in resonator micro-optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105004
- 洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽 等. 谐振式微光学陀螺中相位调制非线性研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105004
- 9 Yang Zhihuai, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 814~819
- 杨志怀, 马慧莲, 郑阳明 等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 814~819
- 10 Y. Ren, Z. H. Jin, Y. Chen *et al.*. Optimization of the resonant frequency servo loop technique in the resonator micro optic gyro [J]. *J. Zhejiang University (Science C)*, 2011, **12**(11): 942~950

栏目编辑: 何卓铭