

# 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究

洪灵菲 张春熹 冯丽爽 雷 明 马迎建

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院微纳测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 谐振式微光学陀螺(RMOG)是利用光学 Sagnac 效应和微电子机械系统(MEMS)加工工艺实现的一种新型角速度惯性传感器。为了减小光学器件受温度、应力等外界环境变化的影响,提高陀螺性能,快速精确的频率跟踪与锁定技术是非常必要的。提出了两种应用于 RMOG 的频率跟踪与锁定方法:单路光路(单路模式)和两相向传输光路(双路共模模式);分析比较了两种方案应用于 RMOG 中所得到的陀螺性能。单路模式由于受光路非互易性噪声的影响较小,锁频精度高;双路共模模式频率跟踪速度快,动态响应性能好。对 RMOG 的测试表明,对应于单路模式和双路共模模式,分别可以得到 $0.07^\circ/\text{s}$ 的频率锁定精度和 $0.09\text{ ms}\cdot[(^\circ)/\text{s}]^{-1}$ 的频率跟踪速度。

**关键词** 光纤光学;谐振式微光学陀螺;频率跟踪与锁定;单路模式;共模模式

**中图分类号** TN629.1;V241.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0905003

## Frequency Tracking and Locking Methods in Resonator Micro-Optic Gyro

Hong Lingfei Zhang Chunxi Feng Lishuang Lei Ming Ma Yingjian

(Key Laboratory of Micro-nano Measurement-Manipulation and Physics, Ministry of Education, School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** As one of the new rotation rate sensing devices, resonator micro-optic gyro (RMOG), incorporating optical Sagnac effect and micro-electromechanical systems (MEMS) fabrication technique, makes essential sense in promoting miniaturized and sensitive gyros. Fast and accurate frequency tracking and locking technique is quite important to suppress the drift induced by environmental temperature and mechanical variations. Two frequency tracking and locking methods, based on single light path (single mode) and common part of both counter-propagating light paths (common mode), are presented and applied on established RMOG system. For the single mode method, signal from single light path is detected to feedback and control the light frequency, where the influence of nonreciprocal optical noise is neglectable. However, in the latter case, the common mode of the two counter-propagating lights is used, which is a constant during the rotating state variation, representing fast frequency tracking speed. Testing results show that the frequency tracking time of  $0.09\text{ ms}\cdot[(^\circ)/\text{s}]^{-1}$  under rotation rate variation and frequency locking precision of  $0.07^\circ/\text{s}$  for over 1h by single mode and common mode frequency tracking and locking methods for the RMOG system, respectively.

**Key words** fiber optics; resonator micro-optic gyro; frequency tracking and locking; single mode; common mode

**OCIS codes** 060.2370; 060.2800; 280.4788

## 1 引 言

光学陀螺,尤其是干涉式光纤陀螺(IFOG)和激光陀螺(LG),由于具有全固态结构、动态范围大、体积小以及启动时间短等优势,已经被广泛应用于惯性导航、制导与控制系统中<sup>[1~4]</sup>。作为继 IFOG 和

LG 之后的新一代高精度角速度光学传感器,谐振式微光学陀螺(RMOG)克服了 IFOG 和 LG 中存在的很多固有技术问题<sup>[5]</sup>。与 IFOG 相比,谐振式工作原理使光在敏感谐振腔中多圈传播,增强了 Sagnac 效应,使用较短的敏感环就能得到环长长

收稿日期:2011-04-06;收到修改稿日期:2011-05-27

基金项目:国家自然科学基金(50875015)资助课题。

作者简介:洪灵菲(1983—),女,博士研究生,主要从事微机电系统和光学传感方面的研究。E-mail:lingfeihong@gmail.com

导师简介:张春熹(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光学惯性器件方面的研究。E-mail:zchunxi@hotmail.com

100 多倍的 IFOG 的性能。大大缩短的敏感环极大地降低了温度分布不均匀引起的噪声,降低了对谐振腔构造的要求<sup>[6]</sup>。另外,RMOG 中使用高相干激光光源取代了 IFOG 中的宽谱光源,从而降低了强度噪声并改善了系统稳定性<sup>[7]</sup>。与 LG 相比,RMOG 采用无源谐振腔结构,避免了有源腔中的闭锁现象<sup>[8]</sup>。此外,硅基二氧化硅波导谐振腔和集成光学相位调制器的应用为进一步的器件单片集成提供了条件<sup>[9]</sup>。

RMOG 通过检测在谐振敏感环中相向传播的两束光之间的谐振频率差来测量转动角速度。多个研究小组提出了不同的 RMOG 方案,并对系统设计、调制方案、信号检测以及噪声抑制等方面进行了研究<sup>[10]</sup>。其中 Ma 等<sup>[11~13]</sup>对 RMOG 中存在的主要光学噪声进行分析与抑制,并提出数字线性相位调制和检测技术。Jin 等<sup>[14]</sup>提出了采用数字三角波相位调制技术来消除传统双频率锯齿波调制引入的脉冲噪声。然而到目前为止,还没有对在保证陀螺精度中起很大作用的频率跟踪与锁定技术的详细研究与讨论。

本文提出并比较了两种应用于 RMOG 系统的频率跟踪与锁定技术:基于单路光路(单路模式)和两相向传输光路(双路共模模式)的频率跟踪与锁定方法。分别采用单路光的输出信号和两相向传输光的共模信号作为光源出射光频率反馈控制信号,单路模式和双路共模模式可分别得到高的频率锁定精度和快的频率跟踪速度。

## 2 频率跟踪与锁定原理

图 1 给出了基于方波频率调制的 RMOG 的系统框图,光纤激光器发出的窄线宽激光经集成光学调制器(IOM)上 Y 分支(分光比 50:50)分成功率相等的两束光并分别经过两臂上的相位调制器 PM1 和 PM2,由集成光学谐振腔(IOR)芯片上的谐振腔

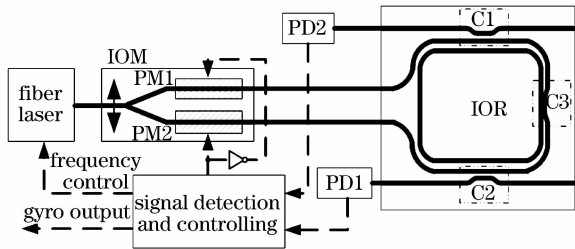


图 1 RMOG 系统结构框图

Fig. 1 Schematic illustration of resonator micro-optic gyro

耦合器 C3 耦合进入谐振腔,两束光分别在谐振腔中沿顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向传输,又通过 C3 耦合出射后经 C1 和 C2 到达光电探测器 PD1 和 PD2。通过相位调制器 PM1 和 PM2 分别对所经过的光进行反相的模拟三角波形式的相位调制,选择波形参数使陀螺工作在最佳灵敏度状态<sup>[15]</sup>。反相的三角波调制产生等值反相的方波频率调制,同一时刻对应正反方向传输的光频率不同,对背向散射噪声有一定的抑制作用<sup>[16]</sup>。RMOG 基于光学 Sagnac 效应:当陀螺静止时,CW 和 CCW 方向光的谐振频率相等;当陀螺转动时,两谐振频率向两个方向发生等值偏移。通过检测谐振频率差

$$\Delta f = \frac{4A}{n\lambda L} \Omega \quad (1)$$

可以得到陀螺的转动角速度  $\Omega$ ,式中  $A, L$  分别为环形腔所包围的面积和腔长, $n$  为谐振腔传输介质折射率, $\lambda$  为工作波长。

为了克服温度、应力等环境因素引起的陀螺漂移,必须引入具有频率跟踪与锁定功能的频率控制环路。所提出的单路模式和双路共模模式即为实现频率跟踪与锁定的方法,区别在于将单路光路信号(以 CCW 光为例)还是两相向传输光路的共模信号作为基准信号。对于单模模式(或双路共模模式),通过检测探测器输出得到反映光源频率偏离 CCW 光路谐振频率(或双光路谐振频率共模量)的差值信号,经过信号检测控制系统中的相关解调和数字信号处理模块,得到输出信号作为反馈回路的误差信号控制激光器输出光频率。当相关解调模块存在输出值时,反馈控制将一直进行,直到激光器出射光频率锁定在 CCW 光路的谐振频率(或双光路谐振频率共模量)上,对应相关解调输出为零,而 CW 光路(或双光路差模量)的解调输出便给出了陀螺转动角速度信号。

在单路模式下(选定 CCW 方向光作为参考回路),为了将激光器输出光频率锁定在 CCW 方向光的谐振频率,需要检测 CCW 光路的输出信号,并对其进行解调、数据处理之后用于对激光频率的反馈控制。在这种情况下,CW 方向的光只用于陀螺输出,而与频率跟踪/锁定过程没有关系。也就是说,频率跟踪精度只取决于 CCW 方向的光信号。然而,在双路共模模式下,两相向传输光的共模信号用于激光频率的控制。相应地,控制精度与 CW 和 CCW 方向光以及它们之间的耦合都有关系。由于两路光之间非互易光学噪声的存在,使得双路共模

情况下的频率锁定精度不能达到单路模式的水平。图 2 给出了陀螺开始转动时两相向传输光路谐振曲线的偏离情况。CW 方向光的谐振频率随着陀螺转动角速度的变化而变化,使得单模模式下工作的陀螺在转动角速度变化时就要进行新的频率跟踪与锁定过程,需要相对较长的状态转换与频率跟踪时间。另外,由于两路光谐振曲线分别朝两个方向发生等值偏移,它们的共模部分保持不变。即双路共模模式下的参考频率是常值,因此一旦将光频率锁定在两路光的共模信号处,陀螺转动状态的改变将不会触发新的频率跟踪与锁定过程,显著提高了陀螺的实时响应能力。

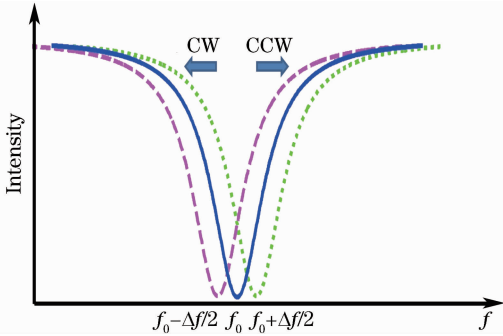


图 2 陀螺转动时 CW 和 CCW 光路谐振曲线的反向等值偏移

Fig. 2 Deviation of resonant curves for CW and CCW light path when the gyro rotates

图 3 给出了解调输出信号与光频率和基准参考频率的偏差  $\Delta f$  的关系曲线,在谐振点附近有一段很好的近似线性区,即为 RMOG 的线性工作区间,其斜率  $k$  可作为谐振腔的转换传输系数

$$k \approx 4(1 - \alpha_c)\rho C_0 \Delta f_m / (C_0^2 + \Delta f_m^2)^2, \quad (2)$$

式中  $\alpha_c$  为谐振腔耦合器的损耗,  $\rho$  为谐振深度,  $C_0$  为与输入光频率无关的常数,  $\Delta f_m$  为调制工作频率。

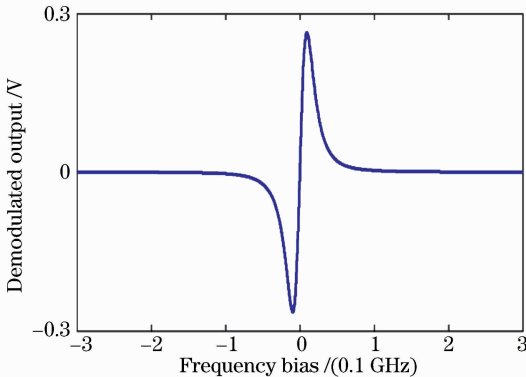


图 3 解调输出与频率偏移量的关系

Fig. 3 Demodulated signal versus resonant frequency deviation

### 3 环路模型与分析

对于单路模式和双路共模模式下工作的 RMOG,都可以用图 1 所示的结构框图表示,唯一的区别在于信号检测控制系统部分的结构,图 4 和图 5 分别给出了单路模式和双路共模模式下的闭环控制回路结构模型。其中  $K_m$  为激光器的频率调制系数,  $V_f$  为反馈控制激光频率的电压信号,  $K_{CW}$  和  $K_{CCW}$  分别为 CW 和 CCW 方向光的解调曲线在谐振点附近近似线性工作区间的斜率,  $K_1$  和  $K_2$  分别为两个支路的电路增益,  $\Delta f_1$  和  $\Delta f_2$  分别为 CW 和 CCW 方向光谐振频率的偏移量。系统的闭环传递函数表示为

$$H(s) = 1 / \left[ 1 + K \frac{1}{1 + \tau s} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \right], \quad (3)$$

式中  $\tau$  为滤波器时间常数,  $K$  为环路增益,  $T_i$  为积分时间。

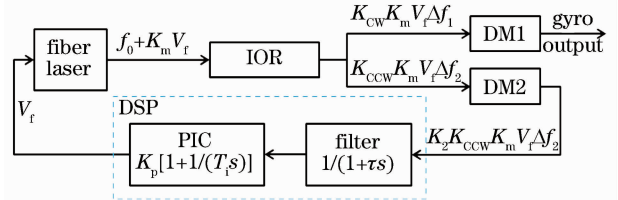


图 4 RMOG 中单路模式下的闭环频率跟踪锁定系统  
Fig. 4 Closed-loop frequency-tracking/locking system in single mode operation for RMOG

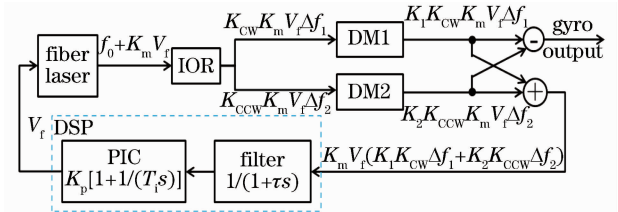


图 5 RMOG 中双路共模模式下的闭环频率跟踪锁定系统

Fig. 5 Closed-loop frequency-tracking/locking system in common mode operation for RMOG

当陀螺转动状态发生改变时, CW 和 CCW 方向光对应的频率偏差  $\Delta f_1$  和  $\Delta f_2$  发生阶跃变化。根据终值定理,环路阶跃响应的稳态误差为零。在锁频模型中引入互易性系统噪声时,由于锁频误差大小与环路增益  $K$  成负相关,在不考虑非互易光学噪声影响的情况下,仅由 Sagnac 效应引起的两路光频率偏差总是等值反向的,即  $\Delta f_1 = -\Delta f_2$ 。环路增益  $K = K_p K_m K_2 K_{CCW}$  (单路模式),  $K = K_p K_m |K_1 K_{CW} - K_2 K_{CCW}|$  (双路共模模式)。通常情况下  $K_p K_m |K_1 K_{CW} - K_2 K_{CCW}| < K_p K_m K_2 K_{CCW}$ ,

因此,单路模式将能实现较高的频率锁定精度。另一方面,若考虑理想状态下,将两路光及其相应的电路调整到一致,即  $K_1 K_{cw} = K_2 K_{ccw}$ ,则双路共模模式中的环路增益可表示为与单路模式相同。那么,在双路共模模式下,一旦陀螺处于锁定状态,由于输入信号 ( $\Delta f_1 + \Delta f_2 = 0$ ) 始终保持不变,其响应始终保持在最终稳定状态,换句话说,转动状态的改变不会影响环路状态,无需响应时间。而对应于单路模式,环路稳定状态将被破坏,需重新经过阶跃响应过程达到稳定状态。虽然通过优化环路参数,可以得到稳定无振荡、且过冲量和响应时间满足系统要求的环路响应,但是稳定状态的重新建立仍然需要一定的响应时间。同时,在实际系统中很难实现两支路光电参数完全对称,从而使得输入状态的改变也导致共模模式下环路的重新锁定。

#### 4 实验结果与讨论

按图 1 所示结构搭建了 RMOG 实验系统,包括一个长 12.8 cm 的硅基集成光学谐振腔、一个中心波长和谱线宽度分别为 1550 nm 和 30 kHz 的分布反馈式光纤激光器和一个 Y 分支集成光学调制器。光源中分别对应于温度和压电陶瓷 (PZT) 调节模块的频率调制系数为 1.625 GHz/K 和 16.25 MHz/V。在 RMOG 中,陀螺的启动过程中采用温度模块对光源出射光频率进行扫描,直至进入谐振状态,停止温度控制并触发 PZT 调节模块以达到更高的控制精度。另外,实验中采用两个反相的模拟三角波线性相位调制信号,分别加至集成光学调制器两分支的相位调制器上,实现双频率偏置调制并通过将两束光的频率朝相反方向移动而达到抑制背向散射噪声的目的。

通过改变数字信号处理模块中的程序便可实现单路模式和双路共模模式的转化,而无需改变 RMOG 系统的硬件结构。图 6(a) 和 (b) 给出了 1 h 内陀螺处于静止状态时频率跟踪与锁定回路的输出,积分时间选为 10 s 时,对应于单路模式和双路共模模式下频率锁定精度分别为  $0.07^\circ/\text{s}$  和  $0.31^\circ/\text{s}$ 。另外,图 6 中两种工作模式下输出零偏的差异来源于系统中调制信号加载方式以及双路共模模式下输出差模信号的方向选取的不同,可以通过优化系统设计来消除该差异。

测试了转动状态改变时 RMOG 的输出,将系统重新稳定的总时间减去由于转台加速所消耗的时

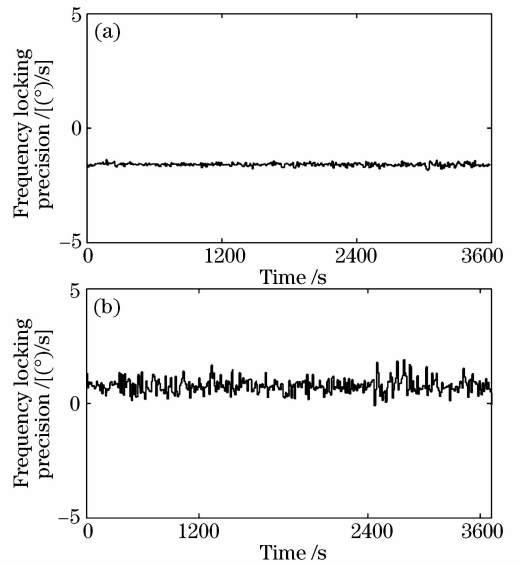


图 6 陀螺静止时,单模模式(a)和双路共模模式(b)下陀螺频率跟踪与锁定回路的输出

Fig. 6 Outputs of frequency-tracking/locking loops in (a) single mode and (b) common mode when the gyro is at rest

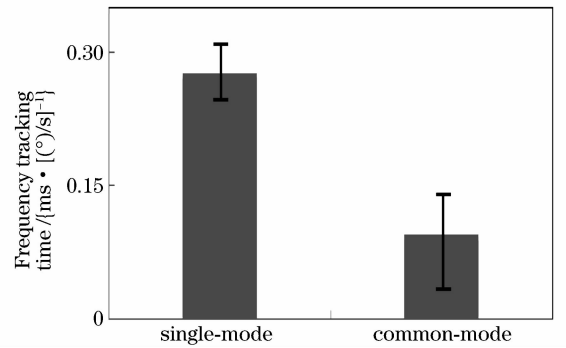


图 7 单模/双路共模模式下的频率跟踪响应时间

Fig. 7 Frequency-locking times for the rotation rate variation under single mode and common mode

间,得到转动状态改变频率跟踪所需要的时间,如图 7 所示。单模模式和双路共模模式的单位转动角速度改变所需的响应时间分别为  $0.27 \text{ ms} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$  和  $0.09 \text{ ms} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ 。可见,在实际测试中,双路共模模式仍存在转动状态改变的响应时间,究其原因,是由于双路结构的不完全对称性,即  $K_1 K_{cw} \neq K_2 K_{ccw}$ 。

从上述测试结果中,可以看出单路模式和双路共模模式分别对应了较高的频率锁定精度和较快的频率跟踪速度。可以认为,由于对频率控制的精确性,单路模式适用于温度等环境因素变化较大的场合,因为精确的频率控制能力能使激光频率锁定在谐振频率点,从而排除外界因素的影响;而双路共模

模式则更适用于待测角速度变化较快的场合,以确保对变化速度的快速跟踪。同时,也得到了 RMOG 的动态响应,图 8 给出了转动角速度从  $-500 \sim +500 \text{ }^\circ/\text{s}$  变化时的陀螺输出,得到了小于 1% 的动态范围非线性度。

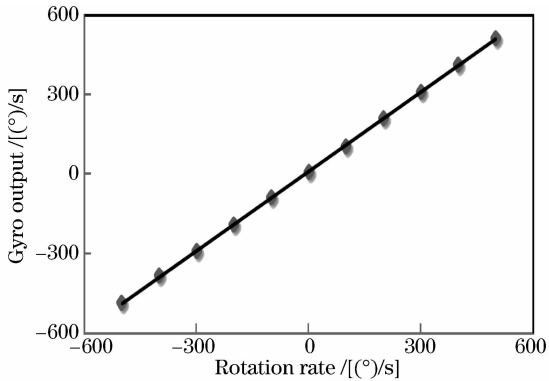


图 8 陀螺输出与转动角速度的关系曲线

Fig. 8 Relationship between gyro output and rotation rate

## 5 结 论

为了减小光学器件受温度、应力等外界环境变化的影响,提出了两种应用于 RMOG 的频率跟踪与锁定方案:分别基于单路光路输出信号(单路模式)和两相向传输光路共模信号(双路共模模式);分析比较了两种方案应用于 RMOG 中所具有的各自独特的优势:单路模式下光路非互易性噪声的影响较小,锁频精度高;双路共模模式频率跟踪速度快,动态响应性能好。对 RMOG 的测试表明,对应于单路模式和双路共模模式,分别可以得到  $0.07 \text{ }^\circ/\text{s}$  的频率锁定精度和  $0.09 \text{ ms} \cdot [(\text{ }^\circ)/\text{s}]^{-1}$  的频率跟踪速度。有效地解决了 RMOG 当前面临的快速频率跟踪与精确频率锁定的问题,实验表明此技术方案有效地提高了 RMOG 的输出精度,具有重要应用意义。但由于 RMOG 系统中存在偏振波动、克尔效应等光学非互易性噪声,还需研究相应的抑制措施以达到进一步提高陀螺精度的目的。并且环境变化导致谐振频率改变时单路模式的频率跟踪速度和两路光电器件参数的不一致也是下一步需要研究的问题。

## 参 考 文 献

- 1 R. Ulrich. Fiber optic rotation sensing with low drift [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(5):173~175
- 2 O. Celikel, S. E. San. Establishment of all digital closed-loop interferometric fiber-optic gyroscope and scale factor comparison for open-loop and all digital closed-loop configurations [J]. *IEEE Sensors J.*, 2009, **9**(2):176~186
- 3 C. H. Rowe, U. K. Schreiber, S. J. Cooper *et al.*. Design and operation of a very large ring laser gyroscope [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12):2516~2523
- 4 Shiqiao Qin, Zongsheng Huang, Xingshu Wang. Feature analysis of the scale factor variation on a constant rate biased ring laser gyro [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):138~141
- 5 S. Ezekiel, S. R. Balsamo. Passive ring resonator laser gyroscope [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(9):478~480
- 6 D. M. Shupe. Fiber resonator gyroscope: Sensitivity and thermal nonreciprocity [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2):286~289
- 7 Jian Mi, Chunxi Zhang, Zheng Li *et al.*. Bias phase and light power dependence of the random walk coefficient of fiber optic gyroscope [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7):379~381
- 8 D. A. Andrews, S. Roden, T. A. King. A model for lock-in growth in ring laser gyroscopes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(9):1709~1715
- 9 H. Yu, C. Zhang, L. Feng *et al.*. SiO<sub>2</sub> waveguide resonator used in an integrated optical gyroscope [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(5):054210
- 10 Peng Bo, Yang Zhihui, 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
- 11 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):1479~1483
- 12 H. Ma, Z. He, K. 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
- 13 K. Hotate, M. Harumoto. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(3):466~473
- 14 K. Hotate, K. Takiguchi, A. Hirose. Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(1):75~77
- 15 Z. Jin, Z. Yang, H. Ma *et al.*. Open-loop experiments in a resonator fiber-optic gyro using digital triangle wave phase modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(20):1685~1687
- 16 Feng Xiang, Ma Yingjian, Yu Huaiyong *et al.*. Investigation on the modulation of the optimized sensitivity for the resonator optic gyroscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4):1064~1067
- 17 冯 翔,马迎建,于怀勇等.谐振式微光学陀螺最佳灵敏度调节的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4):1064~1067
- 18 Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Analysis of Rayleigh backscattering noise in micro-optical resonance gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3):799~804
- 19 于怀勇,张春熹,冯丽爽等.硅基微光学谐振式陀螺瑞利背向散射噪声分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3):799~804