

doi:10.3788/gzxb20144310.1019001

不同相位调制波形对背向散射噪声的抑制

闫树斌, 李小枫, 郑永秋, 安盼龙, 张成飞, 陈浩, 刘俊, 薛晨阳

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室; 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

摘 要: 谐振式光纤陀螺系统中, 背向散射噪声成为制约其系统精度的重要因素之一. 对陀螺双路系统其中一路光波信号进行研究, 利用相位调制频谱展开及光场叠加的方法, 对光纤环形谐振腔输出光场进行理论分析. 理论上载波分量的出现会在系统中引入背向散射噪声, 因此仿真分析引入载波分量的幅度, 得到采用三角波调制比正弦波更有利于抑制载波分量. 以抑制载波分量为目标, 搭建自外差载波抑制测试平台, 对相位调制器施加三角波与正弦波两种波形调制, 得到采用三角波调制时载波抑制比最高可达 64.3 dB, 比正弦波调制时高出 6 dB, 与理论分析相符; 在陀螺系统应用中, 采用三角波调制时陀螺输出信号载波抑制程度更大, 波动更小, 更加稳定.

关键词: 谐振式光学陀螺; 谐振腔; 相位调制; 背向散射; 载波

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1019001-5

Backscattering Noise Suppressed by Different Phase Modulation Waveform

YAN Shu-bin, LI Xiao-feng, ZHENG Yong-qiu, AN Pan-long, ZHANG Cheng-fei,

CHEN Hao, LIU Jun, XUE Chen-yang,

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Backscattering noise is an important factor to restrict the accuracy of resonator fiber optic gyroscope. The investigation on the lightwave signal in one loop of the gyro system was conducted. According to the expansion of phase modulation spectrum and optical field overlapping method, the transmission characteristics of fiber ring resonator were analyzed. The carrier component could introduce backscattering noise in the gyro system. The amplitudes of carrier component were simulated and analyzed, which showed that triangular wave modulation was superior to sinusoidal wave modulation. To suppress carrier component, the self-heterodyne carrier suppressed system was set up. The triangular wave and sinusoidal wave were applied to the phase modulator, respectively. The experiments show that carrier suppressed ratio of triangular wave modulation could reach 64.3 dB, which is 6 dB higher than sinusoidal wave modulation. The experimental results are consistent with the theory. Applied to the gyro system, carrier suppressed degree of the output signal is bigger, the fluctuation is smaller, and the gyro output is more stable using triangle wave modulation.

Key words: Resonant optic gyroscope; Resonant cavities; Phase modulation; Backscattering; Carrier

OCIS Codes: 190.2640; 060.2310; 060.2840; 060.3510; 060.2630

0 引言

以 Sagnac 效应为基本原理的谐振式光纤陀螺^[1-2] (Resonator Fiber Optic Gyro, RFOG) 凭借其小体积、

高灵敏度、高稳定性等特性, 成为下一代惯性器件的发展方向. 由于 Sagnac 效应是一种极其微弱的光学效应, 除了要选择合适的调制^[3] 与解调方式, 克服系统光路中存在的噪声也是解决问题的关键. 据调查分析, 背

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 91123036, 61178058, 61275166)、国家杰出青年基金 (No. 51225504) 和国家自然科学基金项目科学仪器基础研究 (No. 61127008) 资助

第一作者: 闫树斌 (1975—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光 MEMS 传感器件. Email: shubin_yan@nuc.edu.cn

收稿日期: 2014-05-07; **录用日期:** 2014-08-08

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

向散射噪声已成为进一步提高 RFOG 系统精度的主要影响因素。

瑞利背向散射噪声主要分为两类^[4-6]：第一类是由背向散射本身的光强引起的，第二类是由反射光与信号光之间的干扰引起的。为消除第一类散射光的影响，可以采取对两路光波施加不同频率的调制信号来加以调制；为克服第二类散射光的影响，可以采取抑制载波的方法。1990 年，K. Hotate 等利用声光调制器 (Acousto-Optical Modulators, AOM) 来实现载波抑制^[7]，但是 AOM 需要的驱动功率较大，不利于 RFOG 的微型化。2008 年，应迪清等提出利用在 LiNbO₃ 相位调制器上施加三角波^[8]，可提高载波抑制比，抑制系统背向散射噪声。2011 年，毛慧等提出基于正弦波的双相位调制技术，抑制背向散射噪声^[9-10]。

本文利用相位调制频谱展开及光场叠加的方法理论分析了经过光纤环形谐振腔后输出的光场变化，并给相位调制器施加三角波与正弦波调制后系统载波分量的变化，针对不同波形调制进行抑制载波抑制实验，为消除 RFOG 系统噪声提供了参考。

1 理论分析

谐振式陀螺系统原理如图 1，主要分为 CCW 锁频回路和 CW 测试回路两路，图中虚线一路为陀螺输出信号测试回路。激光从激光器发出经过分束器 C₁ 分成两束功率相同光，分别经过相位调制器 PM₁、PM₂ 再经过环形器 CIR₁、CIR₂ 进入光纤谐振腔，形成 CW、CCW 两个方向的光，最后分别经过环形器 CIR₁、CIR₂ 进入光电探测器 PD₁、PD₂ 进行光电转换，其中 CCW 方向的光进入锁相放大器 LIA₂ 进行解调，输出的解调信号通过 PI 电路并反馈到激光器上，将激光器的中心频率锁定在 CCW 的谐振频率上。CW 方向光的输出信号经过锁相放大器 LIA₁ 进行解调，该解调信号作为陀螺的开环信号。光传播过程中，CCW 方向的光波进入谐振腔内会产生 CW 方向的背向散射光波，与 CW 方向的光信号发生干涉，共同形成陀螺输出信号。

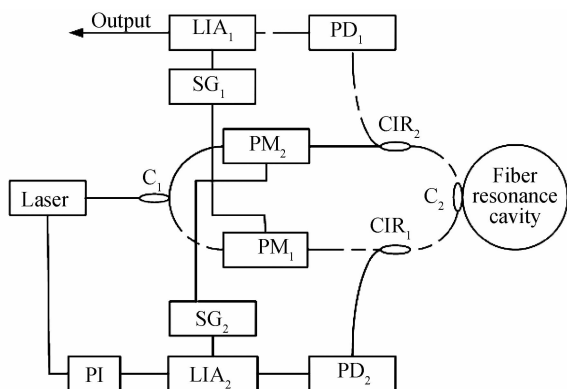


图 1 谐振式系统原理

Fig. 1 The principle diagram of RFOG

针对陀螺系统逆时针一路信号进行分析，光纤激光器输出光场^[11]表示为

$$E_{\text{laser}} = E_0 e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0)} \quad (1)$$

式中， E_0 为激光器输出光强度， f_0 为激光中心频率， φ_0 为初始相位。

1.1 三角波调制

当对相位调制器施加三角波相位调制时^[12-13]，光纤环形谐振腔光场表示为

$$E_{\text{tri}} = \frac{\sqrt{(1-\alpha_{c_1})(1-\alpha_{\text{PM}})(1-\alpha_{\text{CIR}_2})}}{2} E_0 \cdot \exp \{j[2\pi f_0 t + \pi U_m / V_\pi + \varphi_0]\} \quad (2)$$

式中， α_{c_1} 分别为光纤分束器 C₁ 的损耗系数， α_{CIR_2} 是光纤环形器 CIR₂ 的损耗系数， α_{PM} 为相位调制器 PM 的插入损耗系数， V_π 为相位调制器 PM 的半波电压， U_m 为驱动相位调制器 PM 的三角波电压信号。

将式(2)通过傅里叶级数展开可以表示为

$$E_{\text{tri}} = \frac{\sqrt{(1-\alpha_{c_1})(1-\alpha_{\text{PM}})(1-\alpha_{\text{CIR}_2})}}{2} E_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{n,\text{tri}} \exp [j(n2\pi f_{\text{tri}} t + 2\pi f_0 t + \varphi_0)] \quad (3)$$

式中， $A_{n,\text{tri}}$ 可以表示为

$$A_{n,\text{tri}} = \begin{cases} \frac{1}{2} e^{(3jM_n)}, & (n = -2M_{\text{tri}}/\pi) \\ \frac{1}{2} e^{(-jM_n)}, & (n = 2M_{\text{tri}}/\pi) \\ \frac{2M_{\text{tri}} j [e^{(-jM_n)} - e^{(jM_n - n\pi)}]}{4M_{\text{tri}}^2 - n^2 \pi^2}, & (\text{other}) \end{cases} \quad (4)$$

式中， M_{tri} 为三角波调制时的调制系数，根据式(4)，可推导得到当采用三角波相位调制时的归一化载波分量可表示为

$$|A_{0,\text{tri}}| = \left| \frac{\sin(M_{\text{tri}})}{M_{\text{tri}}} \right| \quad (5)$$

根据式(5)发现当相位调制系数为 π 的整数倍时，载波分量为 0。所以，采用三角波相位调制时，能够最大程度抑制载波分量的调制系数为 π 的整数倍。

1.2 正弦波调制

当对相位调制器施加正弦波相位调制时^[14-15]，光纤环形谐振腔光场表示为

$$E_{\text{sin}} = \frac{\sqrt{(1-\alpha_{c_1})(1-\alpha_{\text{PM}})(1-\alpha_{\text{CIR}_2})}}{2} E_0 \cdot \exp \{j[2\pi f_0 t + \pi U_{\text{sin}} / V_\pi \sin(2\pi f_{\text{sin}} t) + \varphi_0]\} \quad (6)$$

式中， U_{sin} 为驱动相位调制器 PM 的正弦波电压信号。 f_{sin} 为正弦波电压信号的频率，将式(6)用贝塞尔函数展开后得到

$$E_{\text{sin}} = \frac{\sqrt{(1-\alpha_{c_1})(1-\alpha_{\text{PM}})(1-\alpha_{\text{CIR}_2})}}{2} E_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{n,\text{sin}} \exp [j(n2\pi f_{\text{sin}} t + 2\pi f_0 t + \varphi_0)] \quad (7)$$

式中， $A_{n,\text{sin}}$ 可以表示为

$$A_{n_sin} = J_n(M_{sin}) \quad (8)$$

根据式(8)可以得到当采用正弦波相位调制时的归一化载波分量幅度表达式为

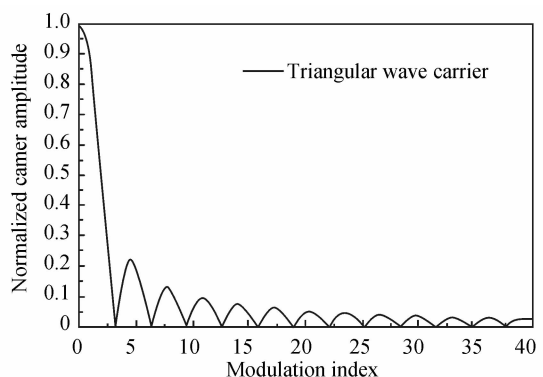
$$|A_{0_sin}| = |J_0(M_{sin})| \quad (9)$$

由式(9)可以看出,当相位调制系数为一阶 Bessel 函数的零点时,载波分量幅度为 0,此时相位调制系数达到最佳值。

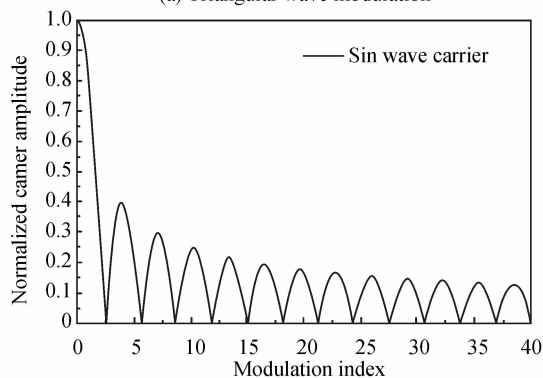
根据式(5)和式(9),进行 Matlab 仿真得到分别施加三角波与正弦波调制之后的载波分量幅度的变化曲线,如图 2 所示,可以看出载波分量只与调制系数有关,而调制系数与调制电压成正比关系,即载波分量大小只与调制电压有关,表达式为

$$M = U\pi/V_\pi \quad (10)$$

由图 2 中还可以看出,随着相位调制系数的增加,载波分量的大小是呈现不断衰减趋势,但是三角波调制状态下的衰减速度更快,也就是说三角波调制状态下载波抑制的程度更大,更有利于减小第二类背向散射噪声。



(a) Triangular wave modulation



(b) Sinusoidal wave modulation

图 2 归一化载波分量理论值

Fig. 2 Simulation of normalized carrier component

2 实验

为了研究调制波形对背散射噪声抑制的影响,搭建了载波抑制比测试实验平台,如图 3 所示,系统中,激光器为 Koheras 公司的超窄线宽激光器,中心波长为 1 550 nm,激光器线宽小于 100 Hz,扫频系数为

15 MHz/V;相位调制器为 Thorlabs 公司的 LiNbO₃ 相位调制器,带宽为 10 GHz,半波电压为 4 V;声光调制器采用的是 Gooch and housego 公司 80 MHz 的调制器;频谱分析仪为安捷伦公司 PXA Signal Analyzer N9030A 型带宽为 3 Hz~26.5 GHz 高性能频谱分析仪。

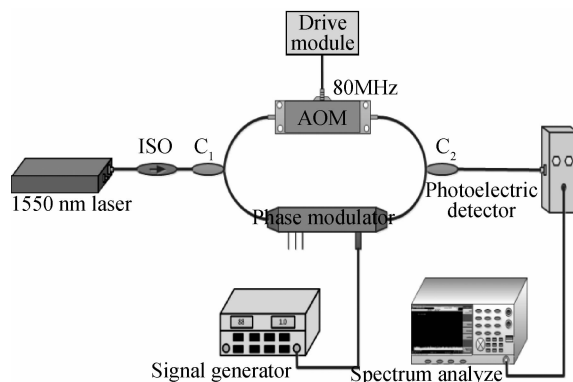


图 3 载波抑制比测试系统

Fig. 3 Measure carrier suppressed ratio system

实验过程中,激光器输出的光波经过光纤隔离器,再由光纤分束器 C₁ 分成功率相等的两束光波,一路光信号经过 80 MHz 的声光调制器进行移频,另一路光信号经过相位调制器,输出的两路光波通过光纤合束器 C₂ 进行拍频,形成拍频信号,通过光电探测器进行光电转换并由频谱仪检测其输出信号,其中给相位调制器分别施加调制频率为 100 kHz 的正弦波与三角波调制.当相位调制器与信号发生器 2 断开时,即相位调制器未施加调制信号时,频谱仪上显示 80 MHz 处的波形如图 4(a)所示,之后在相位调制器上施加正弦波相位调制,使得 80 MHz 处的载波分量达到最小,如图 4(b)所示,当在相位调制器施加三角波调制也会出现相同的现象.该系统主要目的是通过改变施加在相位调制器上的调制电压,从而改变调制系数的大小,使得拍频形成的 80 MHz 处的光信号载波分量最小,达到最大的载波抑制比,这样更有利于第二类背向散射噪声的抑制。

在频谱仪上观察到 80 MHz 处的功率大小与载波分量 A 的关系为

$$P(\text{dBm}) = 10 \lg [KA^2] \quad (11)$$

式中, K 是和光电探测器的电压响应度以及两路功率相关的参数,读出频谱仪上 80 MHz 处的功率大小,结合式(5)、(9),可以标定 K 的大小.针对正弦波调制与三角波调制进行不同的实验,标定得到 K 值分别为 0.274 4 和 0.403 4.

实验过程中,相位调制器的调制频率保持 100 kHz 不变,调制电压从 0 V 开始不断增加到 10 V,频谱仪上 80 MHz 处的载波功率值不断发生变化,每一个电压值进行多次测试,取平均值得到功率值即是载波分量

的功率大小,将实验值与理论值相对比,如图 5. 从图中可以看出,当调制系数(即调制电压)不断增大时,80 MHz处载波分量功率值出现先减小后增大的趋势,但是随着调制电压的进一步增大,载波分量功率又出现了另一个低谷.在理论分析中,随着调制系数的增大,会出现许多个载波分量为 0 的点,在实验过程中,即是会出现许多个载波分量功率的相对最小值,这与理论分析相符.

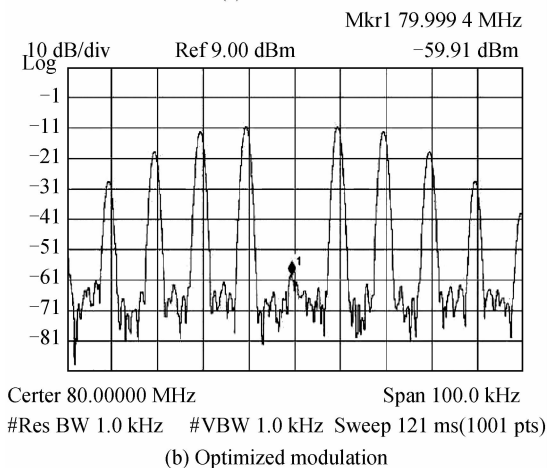
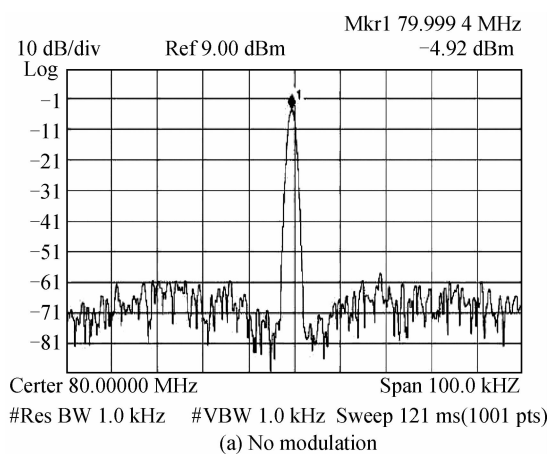


图 4 频谱仪上显示波形
Fig. 4 The spectrum in the SA

观察图 5 中正弦波与三角波调制时,载波分量的变化的理论值,可发现三角波调制时相比于正弦波调制时,载波功率可达到的最小值更小,即载波抑制的程度更大,载波抑制比更大.经过实验验证,得到当给相位调制器施加正弦波调制时,调制系数 $M=2.405$ 时,载波抑制比可达到 50.8 dB,当 $M=5.52$ 时,载波抑制比可达到 58.3 dB;当给相位调制器施加三角波调制时,调制系数 $M=\pi$ 时,载波抑制比可达到 53.9 dB,相较于正弦波调制时载波分量第一个功率谷处的载波抑制比高出 3.1 dB,当 $M=2\pi$ 时,载波抑制比可达到 64.3 dB,相较于正弦波调制时载波分量第二个功率谷处载波抑制比高出 6 dB,这一现象与理论分析相符,说明三角波调制比正弦波调制更有利于提高载波抑制比,抑制背向散射噪声.

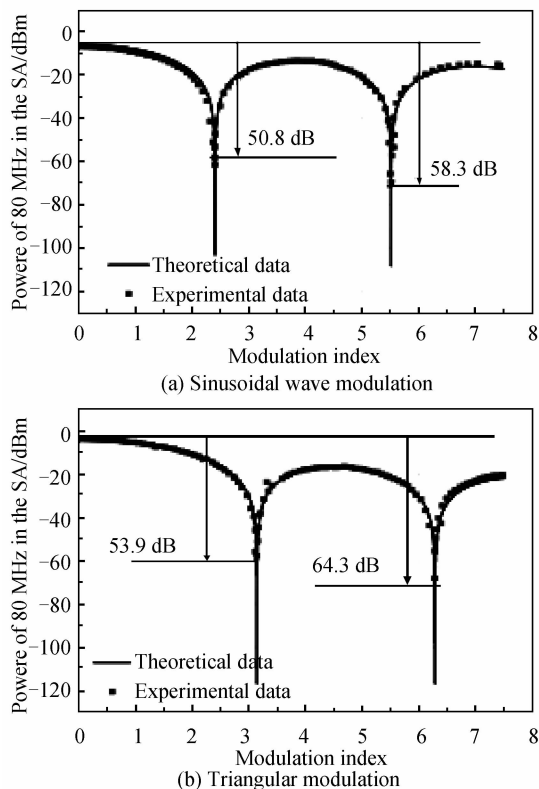


图 5 载波抑制比理论和实验的曲线
Fig. 5 The oretical and experimental curve of carrier suppressed ratio

根据图 1 所示谐振式陀螺系统,锁定一路信号,观察另一路陀螺输出信号,陀螺输出信号包含有本身的主信号与背散射信号两种光信号.实验中,在锁定一路的相位调制器上分别施加调制频率为 1 MHz,调制电压为 5 V 的正弦波与三角波信号,另一路的相位调制器上施加调制频率为 90 kHz,调制电压为 1 V 的调制信号,观察陀螺动态输出信号如图 6.从图中可明显看出在相同情况下,采用三角波调制时比采用正弦波调制时,锁定信号的波动更小,即系统背向散射噪声的抑制效果更好.

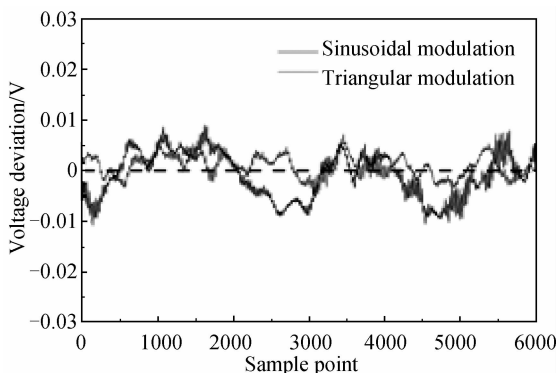


图 6 陀螺输出信号
Fig. 6 The output signal of gyro

3 结论

本文通过自外差法,分别采用正弦波与三角波调制进行载波抑制比实验,正弦波调制时,实测最大的载波抑制比为 58.3 dB,三角波调制时,实测最大载波抑制比为 64.3 dB,发现相比于正弦波调制而言,三角波调制拥有更大的载波抑制比,更能有效地抑制系统的背向散射噪声,与理论分析相一致.而且随着调制电压的不断增大,在信号发生器电压的可调范围之内,会出现两个较好的载波抑制比.通过对陀螺输出信号的测试,得到三角波调制时,陀螺输出信号更加稳定.为以后陀螺系统中背向散射噪声的抑制提供了参考.

参考文献

- [1] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2001, **1**(4): 322-339.
- [2] EZEKIEL S, BALSAMO S, STOWE D W. Passive fiber optic ring resonator for rotation sensing [J]. *Journal Optics Letters*, 1983, **8**(12): 644-646.
- [3] WANG Dong-yun, MAO Cai-hong, ZHU Hui. The impact of E-O modulator harmonic response in I-FOG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1053-1055.
王冬云, 毛彩虹, 朱辉, 等. 电光相位调制器谐波响应对光纤陀螺的影响[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1053-1055.
- [4] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [5] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 1版. 北京: 国防工业出版社, 2008, 63-76.
- [6] KAISER T J, CARDARELLI D, WALSH J. Experimental developments in the RFOG[C]. SPIE, 1990, **1367**: 121-126.
- [7] HOTATE K, TAKIGUCHI K, HIROSE A. Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, **2**(1): 75-77.
- [8] YING Di-qing, MA Hui-lian, JIN Zhong-he. Resonator fiber optic gyro using the triangle wave phase modulation technique [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(4): 580-586.
- [9] MA Hui-lian, HOTATE K. Sensitivity improvement of waveguide optical passive ring resonator gyroscope by carrier suppression[C]. 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2009, 750353-1.
- [10] MA Hui-lian, HE Zu-yuan, HOTATE K. Reduction of backscattering in waveguide-type optical ring resonator gyro [J]. *Journal Lightwave Technology*, 2011, **29**(1): 85-90.
- [11] YAO Qiong, SONG Zhang-qi, XIE Yuan-ping, et al. Study on the characteristics of fiber optic resonator ring for resonator fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 676-680.
姚琼, 宋章启, 谢元平, 等. 谐振腔光纤陀螺光纤谐振环特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 676-680.
- [12] YAO Qiong, HU Yong-ming, XIE Yuan-ping, et al. Study on the influence of phase reset error on resonator fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 851-855.
姚琼, 胡永明, 谢元平, 等. 谐振腔光纤陀螺相位调制复位误差影响的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 851-855.
- [13] JIN Zhong-he, YANG Zhi-huai, MA Hui-lian, et al. Open-loop experiments in resonator fiber optic gyro using digital triangle wave phase modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(20): 1685-1687.
- [14] IWATSUKI K, HOTATE K, HOGASHIGUEHI M. Resonance characteristics of backscattering in optical passive-ring resonator gyro: Experiment [J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(23): 4448-4451.
- [15] IWATSUKI K, HOTATE K, HOGASHIGUEHI M. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(21): 3916-3924.