

文章编号: 0258-7025(2006)06-0814-05

谐振式光纤陀螺调相谱检测技术中的光克尔效应

张旭琳, 马慧莲*, 丁 纯, 金仲和

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

摘要 谐振式光纤陀螺(R-FOG)是基于 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测量旋转角速率的一种新型光学传感器。信号检测技术和系统中存在的各种噪声对系统的检测精度有着重要的影响。基于调相谱检测技术的谐振式光纤陀螺系统中,除顺时针(CW)和逆时针(CCW)光路传播的光强不均匀会引入非互易相位差,使系统出现零漂外,顺时针和逆时针光路的调制系数也会引入系统零漂。光克尔效应引入的系统零漂与系统的真实旋转在测量时是无法区分的,因此成为主要的噪声之一。通过光波场叠加原理,推导得到调相谱检测方案下的谐振式光纤陀螺系统中,光克尔效应引起的系统零漂的解析表达式。依据光克尔效应产生的零漂不随陀螺转速的改变而变化,利用简单的开环系统,对光克尔效应引入的陀螺零漂进行了测试。

关键词 光电子学;谐振式光纤陀螺;调相谱检测技术;光克尔效应

中图分类号 TN 629.1;TN 911.74;TP 212.14 **文献标识码** A

Optical Kerr Effect in Phase Modulation Spectroscopy Resonator Fiber Optic Gyro

ZHANG Xu-lin, MA Hui-lian, DING Chun, JIN Zhong-he

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Resonator fiber optic gyro (R-FOG) is a novel optical sensor whose resonant frequency is changed due to the Sagnac effect. The detection technique and system noises affect the detection precision greatly. In the R-FOG based on the phase modulation spectroscopy technique, not only the optical power difference between the clockwise (CW) and counterclockwise (CCW) light waves induces the bias drift, but also the two different modulation indexes do. The bias drift caused by optical Kerr effect is indistinguishable from the rotational-induced Sagnac frequency shift. Using the optical field overlapping method, the analytical expression for the rotation-rate error due to the optical Kerr effect is derived. For the bias drift caused by the optical Kerr effect does not change with the rotation-rate, using a simple open-loop operation, the drift caused by the optical Kerr effect is observed in the gyro output curve.

Key words optoelectronics; resonator fiber optic gyro; phase modulation spectroscopy technique; optical Kerr effect

1 引 言

谐振式光纤陀螺(R-FOG)系统的检测方式主要有三种:光纤环腔长调制方式、激光器频率调制^[1, 2]和相位调制方式。其中调相谱检测方式将调

制信号和反馈信号分开,减小了两者之间的影响,并且采用铌酸锂相位调制器有利于谐振式光纤陀螺的集成化^[3]。因此,带有铌酸锂相位调制器的调相谱检测方式^[4]是谐振式光纤陀螺检测方式中比较理想的一种检测技术。与干涉式光纤陀螺(I-FOG)一

收稿日期:2005-09-21;收到修改稿日期:2006-02-21

基金项目:教育部“优秀青年教师资助计划”(教人司(2003)355号)资助项目。

作者简介:张旭琳(1980—),女,福建古田人,浙江大学信息学院微电子与固体电子学专业博士研究生,主要从事传感器与微系统集成技术方面的研究。E-mail:zxling2002@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:mahl@zju.edu.cn

样,谐振式光纤陀螺中存在着各种噪声因素,如偏振态的波动^[5]、瑞利背向散射^[6]以及光克尔效应^[7]等。其中,光克尔效应就是比较重要的噪声因素之一。

迄今为止,已有多家研究机构对谐振式光纤陀螺系统中光克尔效应的影响进行了分析^[7],然而对基于调相谱检测技术的谐振式光纤陀螺系统,少有针对性的研究。本文利用光场叠加方法和非线性光学中由光克尔效应引入的传播系数变化的表达式,对光克尔效应引起的陀螺零漂进行了分析测试。

2 基本原理

光克尔效应是一种由非线性光学克尔效应引起的非互易性误差。当光纤直径很小时,纤芯中的光功率密度很大,光的折射率将发生变化,引起光的非线性传播,使正反方向传播的光波的功率出现不平衡,产生一个小的非互易频率差,从而使系统输出出现零漂。同时,耦合器分光比的缓慢变化也会直接转化为输出漂移,影响系统的检测精度。

图 1 给出了基于调相谱检测技术的谐振式光纤陀螺系统结构示意图。从光纤激光器(FL)输出的光束被 50% 保偏耦合器 C1 分成沿顺时针(CW)方向和逆时针(CCW)方向传播的两束光,两束光分别经过相位调制器 PM1, PM2 和保偏耦合器 C3, C2 进入光纤环。组成光纤环的保偏耦合器记为 C4。

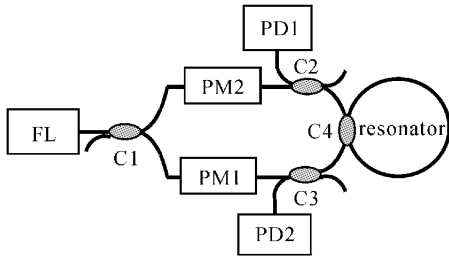


图 1 谐振式光纤陀螺结构示意图

Fig. 1 Conceptual diagram of resonator R-FOG

沿顺时针、逆时针方向传播的光波由光克尔效应引入的传播系数的变化量 $\Delta\beta_{cw}$, $\Delta\beta_{ccw}$ 可分别表示为^[8]

$$\Delta\beta_{cw} = \frac{\omega n_2}{cA} (I_{cw} + 2I_{ccw}), \quad (1a)$$

$$\Delta\beta_{ccw} = \frac{\omega n_2}{cA} (I_{ccw} + 2I_{cw}), \quad (1b)$$

式中 n_2 , ω , c , A 分别表示光纤中由光克尔效应引起的非线性折射率、工作角频率、真空中的光速以及光纤传输的有效截面积, I_{cw} , I_{ccw} 分别表示在某一位

置沿顺时针、逆时针方向传播的光强的大小。

利用光场叠加原理^[9],在光纤环内沿逆时针方向离耦合器 C4 距离为 z 处,沿顺时针方向和沿逆时针方向传输的光强可分别表示为^[7]

$$I_{cw}(z) = \frac{k}{(1-Q)^2} \cdot L(\Delta f_{cw} + \Delta f_{Kerr}^{CW}) \cdot (1-\alpha_c) \cdot [1-\alpha_1(l-z)] \cdot I_{in}^{CW}, \quad (2a)$$

$$I_{ccw}(z) = \frac{k}{(1-Q)^2} \cdot L(\Delta f_{ccw} + \Delta f_{Kerr}^{CCW}) \cdot (1-\alpha_c) \cdot [1-\alpha_1(l-z)] \cdot I_{in}^{CCW}, \quad (2b)$$

式中

$$L(\Delta f_i + \Delta f_{Kerr}^i) = \frac{(1-Q)^2}{(1-Q)^2 + 4Q \cdot \sin^2[\pi\tau(\Delta f_i + \Delta f_{Kerr}^i)]}, \quad (i = CW, CCW) \quad (3)$$

$Q = \sqrt{(1-k)(1-\alpha_c)(1-\alpha_1 \cdot l)} \cdot \exp(-f_s \cdot \tau)$, 其中 f_s 为激光器线宽; τ 为光在光纤环中传输一周的渡越时间; k , α_c 分别为耦合器 C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的耦合系数和插入损耗; α_1 为单位长度光纤的传输损耗; l 为光纤环总长度。 I_{in}^{CW} 和 I_{in}^{CCW} 分别表示光纤环在顺时针和逆时针方向的输入光强, Δf_{Kerr}^{CW} , Δf_{Kerr}^{CCW} 分别为顺时针、逆时针方向传播光束中由光克尔效应引入的等效频移, Δf_{cw} 和 Δf_{ccw} 分别为光束在顺时针、逆时针路径传播时产生的等效频移。

将(2a), (2b)代入(1a), (1b)两式,并且将式(1a), (1b)对 z 积分,则分别得到光波绕光纤环一周时由光克尔效应引入的顺时针、逆时针方向的等效频移

$$\Delta f_{Kerr}^{CW} = \frac{1}{2\pi\tau_0} \int_0^l \Delta\beta_{cw} dz = \frac{\Delta}{2\pi\tau} [I_{in}^{CW} L(\Delta f_{cw} + \Delta f_{Kerr}^{CW}) + 2I_{in}^{CCW} L(\Delta f_{ccw} + \Delta f_{Kerr}^{CCW})], \quad (4a)$$

$$\Delta f_{Kerr}^{CCW} = \frac{1}{2\pi\tau_0} \int_0^l \Delta\beta_{ccw} dz = \frac{\Delta}{2\pi\tau} [I_{in}^{CCW} L(\Delta f_{ccw} + \Delta f_{Kerr}^{CCW}) + 2I_{in}^{CW} L(\Delta f_{cw} + \Delta f_{Kerr}^{CW})], \quad (4b)$$

式(4a), (4b)中

$$\Delta = \frac{\omega n_2}{cA} \cdot \frac{k}{(1-Q)^2} \cdot \left(l - \frac{\alpha_1 l^2}{2}\right) \cdot (1-\alpha_c). \quad (5)$$

当系统工作在谐振状态时,探测器上的输出光

强为最小^[9],即(3)式中函数值最大($L_{\max} = 1$)时,光纤环发生谐振。因此,谐振时顺时针、逆时针方向谐振频率的总偏移满足条件

$$\Delta f_i^0 + \Delta f_{\text{Kerr}}^i = m/\tau, \quad (i = \text{CW}, \text{CCW} \quad m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中 $\Delta f_i^0, \Delta f_{\text{Kerr}}^i$ 分别表示谐振时 $\Delta f_i, \Delta f_{\text{Kerr}}^i$ 的值。

实验中,采用调相谱技术实现信号检测,在两光路中加入频率不同的正弦波调制信号,此时

$$\Delta f_{\text{CW}}^0 = \frac{\pi m}{\tau} - \frac{\Delta}{2\pi\tau} [I_{\text{in}}^{\text{CW}} \cdot \overline{L(\phi_1 \sin\omega_1 t)} + 2I_{\text{in}}^{\text{CCW}} \cdot \overline{L(\phi_2 \sin\omega_2 t)}], \quad (7a)$$

$$\Delta f_{\text{CCW}}^0 = \frac{\pi m}{\tau} - \frac{\Delta}{2\pi\tau} [I_{\text{in}}^{\text{CCW}} \cdot \overline{L(\phi_2 \sin\omega_2 t)} + 2I_{\text{in}}^{\text{CW}} \cdot \overline{L(\phi_1 \sin\omega_1 t)}], \quad (7b)$$

式中的横线表示对时间取平均。 ϕ_1, ϕ_2 分别表示顺时针、逆时针光路上的调制系数, ω_1, ω_2 分别表示顺时针、逆时针光路上的调制角频率。

由于谐振式光纤陀螺的旋转角速度 Ω 与 Sagnac 产生的频移 Δf 之间存在如下关系

$$\Omega = \frac{n\lambda}{D} \Delta f, \quad (8)$$

其中 n 表示光纤折射率, λ 表示光纤激光器的工作波长, D 表示光纤环的直径。因此,由光克尔效应引入的系统零漂可表示为

$$\Omega_k = \frac{n\lambda}{D} (\Delta f_{\text{CW}}^0 - \Delta f_{\text{CCW}}^0) = \frac{n\lambda\Delta}{2\pi D\tau} \cdot [I_{\text{in}}^{\text{CW}} \cdot \overline{L(\phi_1 \sin\omega_1 t)} - I_{\text{in}}^{\text{CCW}} \cdot \overline{L(\phi_2 \sin\omega_2 t)}]. \quad (9)$$

当光克尔效应引入的频偏在系统的线性工作区内时, Ω_k 可表示为

$$\Omega_k \approx \frac{n\lambda\Delta}{2\pi D\tau} \cdot \left[\Delta I_{\text{in}} + \frac{Q\bar{\phi}}{4(1-Q)^2} \cdot \Delta\phi \right], \quad (10)$$

其中, $\Delta I_{\text{in}} = I_{\text{in}}^{\text{CW}} - I_{\text{in}}^{\text{CCW}}, \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2, \bar{\phi} = \phi_1 + \phi_2$ 。

由(10)式可得 Ω_k 与光纤环总长度之间的关系曲线,如图2所示。图2中的系统参数为:光纤环直径为0.1 m;耦合器 C4 的耦合系数为 10%, C4 的插入损耗为 0.5 dB。从图中可以知道:在光纤环总长度不变的情况下,光克尔效应的影响随光纤激光器线宽 f_s 的增大而减小;在光纤激光器线宽不变的情况下,光克尔效应引入的系统零漂随着光纤环总长度的增大而减小。

图3给出了在不同激光器线宽情况下,由光散粒噪声引起的陀螺系统极限灵敏度^[6]与光纤环总长度之间的关系;图3中的参数与图2相同。从图3

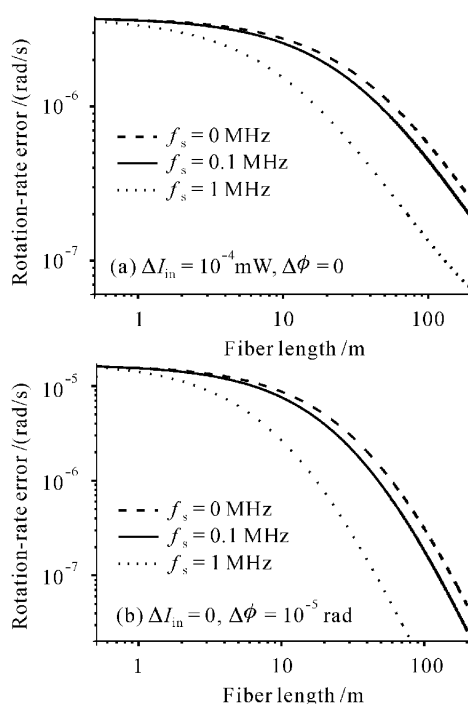


图2 Ω_k 与光纤环总长度之间的关系

Fig. 2 Relationship between Ω_k and fiber length

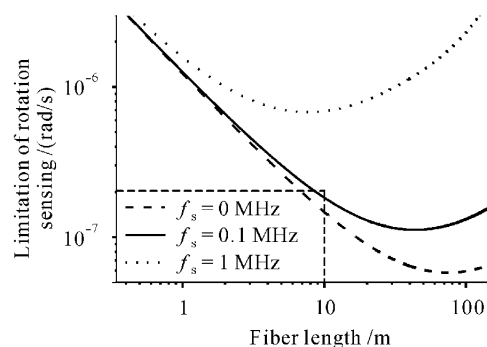


图3 散粒噪声引起的极限灵敏度与光纤环总长度的关系曲线

Fig. 3 Shot-noise-limited rotation-rate sensitivity versus the resonator length

中可以知道,极限灵敏度随着光纤环长度的增加会出现一个极小值,但却随着光纤激光器线宽的增加而增大。因此,将图2,图3相比较可以看出:对于低性能的光纤陀螺,光克尔效应引起的漂移低于陀螺的极限灵敏度,因而没有必要采取措施消除它;而对于高性能的光纤陀螺,光克尔效应引起的漂移则远大于光子散粒噪声的极限漂移,必须在尽量控制两光路光强差和调制系数差的情况下,采取适当的抑制措施。

图4给出了光克尔效应引起的系统零漂和两路光强差之间的关系曲线,图5给出的是光克尔效应

引起的系统零漂和两光路调制系数差之间的关系曲线。光纤环的总长度为10 m,其他参数同图2。对比图3,图4和图5,当激光器线宽为100 kHz时,由图3可知,10 m光纤环由散粒噪声引起的系统极限灵敏度为 1.9×10^{-7} rad/s,此时两路光光强差需要控制在7 nW以下,同时两路光的调制系数需要控制在 2×10^{-7} rad。在现有的元器件水平下,是很难实现的,因此对光克尔效应引入的陀螺误差需要采取合适的抑制措施。

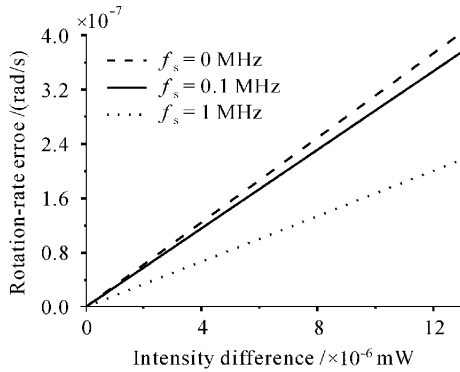


图4 Ω_k 和光强差的关系曲线

Fig. 4 Ω_k as a function of intensity difference

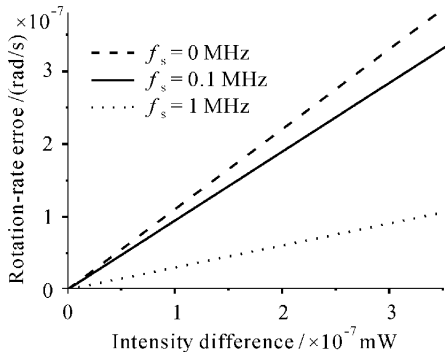


图5 Ω_k 和调制系数差的关系曲线

Fig. 5 Ω_k as a function of modulation depth difference

3 实验

光克尔效应引入的系统零漂将叠加在陀螺转动输出信号中。依据陀螺输出信号会随陀螺转速的改变而变化,但是光克尔效应引入的系统零漂是不变的,从而可以利用比较简单的开环系统,对光克尔效应引入的系统零漂进行测试。

测试系统如图1所示,利用耦合系数可调的保偏耦合器代替图1中的光纤耦合器C1,通过改变可调耦合器的耦合系数,就可以控制两路光的光强差。实验中逆时针光束的输出信号经过解调电路后反馈到光纤激光器,将光纤激光器的频率锁定在逆时针

光束的谐振频率上,则顺时针方向的解调输出信号即为陀螺的开环响应信号。

图6(a),(b)分别给出了当可调耦合器的耦合比为50:50和55:45时陀螺的开环响应输出信号。当耦合比为55:45时,对应的两路光光强差为0.8 mW。图6中下一条曲线为环路锁定后逆时针光路的光电探测器(PD)输出曲线,上一条曲线为顺时针光路的解调输出曲线。当环路静止时,顺时针解调输出为一直线;当环路有一转动速度时,顺时针解调输出信号幅度将随转速大小变化,同时输出信号的符号随转动方向的改变而变化。由图6(a),(b)顺时针解调输出信号的平均值之差可以得到由光克尔效应引起的系统零漂。由光克尔效应引起的陀螺零漂对应的电压输出幅度为100 mV左右;实验中,该电压对应的转速为0.03 rad/s。从图4的理论分析中可知,当两光路光强差为0.8 mW时,光克尔效应对应的系统零漂为0.023 rad/s。因此,由实验结果与理论结果相比较可以知道,实验结果的偏差为30%。这是由于在实验系统中还存在其他噪声因素,如背向散射^[6]等,会在系统中引入系统零漂。

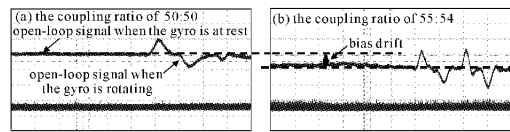


图6 (a),(b)两图上一条曲线给出了耦合器C1耦合比不同时的开环陀螺信号,下一条曲线为环路锁定后逆时针光路上光电探测器的检测信号

Fig. 6 (a),(b) upper curve is the open-loop signal versus the diverse coupling index; low curve is the output signal of the photodetector in the CCW way when the frequency of fiber laser is locked to the CCW resonance frequency

在干涉式光纤陀螺中可以利用低相干光源来减小光克尔效应引入的相位漂移^[10],但是对于谐振式光纤陀螺却不可行,原因在于谐振式光纤陀螺中必须采用高相干光源。目前克服光克尔效应的措施主要有以下两种:一种是用占空比为50%的方波对光源进行强度调制,并且光波在光纤环中传播一周的周期为方波周期整数倍^[11]。调制之后光克尔效应引起的系统零漂可以表示为

$$\Omega_k \approx \frac{n\lambda\Lambda}{2\pi D\tau} \left[\Delta I_{in} + \frac{Q\bar{\phi}}{4(1-Q)^2} \Delta\phi \right] \times \frac{I_0^2(t) - 2[I_0(t)]^2}{I_0(t)}, \quad (11)$$

式中 $I_0(t)$ 表示经过强度调制后的光源输出光强度。从(11)式可以看出,此法不限于方波,只要受到调制的光波强度的平均值等于其标准偏差,其他波形也适用。

另一种是采用比谐振点频率低得多的低频正弦波对激光器的输出光波进行强度调制,将同步检测信号反馈到其中的一束光波中,达到消除光克尔效应的目的^[12]。

上述两种方法中,第一种方法对光强度调制器带宽的要求相当严格,而且为了达到高性能谐振式光纤陀螺的要求,强度调制器的消光比也必须很高;但是第二种方法,由于光克尔效应引起的顺时针、逆时针两光路的光强差较小,只有在闭环检测中能够实现。因此,在开环谐振式光纤陀螺系统中,第一种方法是比较合适的。

4 结 论

对基于调相谱检测技术的谐振式光纤陀螺系统中光克尔效应的影响进行了详细分析,得到了系统零漂和两路光强差和调制系数的解析表达式。利用简单的开环谐振式光纤陀螺系统,对光克尔效应引入的系统零漂进行了测试,在误差范围内,实验结果与理论分析结果一致。

参 考 文 献

1 R. Carroll, C. D. Coccoli, D. Cardarelli *et al.*. The passive resonator fiber optic gyro and comparison to the interferometer fiber gyro [C]. *SPIE*, 1986, **719**:169~177

2 Tohru Imai, Ken-ichi Nishide, Hideo Ochi *et al.*. The passive ring resonator fiber optic gyro using modulatable highly coherent laser diode module [C]. *SPIE*, 1991, **1585**:153~162

3 K. Suzuki, K. Takiguchi, K. Hotate. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1):66~72

4 Zhang Xulin, Ma Hulian, Ding Chun *et al.*. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1529~1533
张旭琳,马慧莲,丁纯等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1529~1533

5 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(15):2606~2612

6 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21):3916~3924

7 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(6):645~651

8 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 27~30
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方,余震虹,谈斌等译. 北京:电子工业出版社,2002. 27~30

9 Ma Hulian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):731~734
马慧莲,金仲和,丁纯等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):731~734

10 R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler *et al.*. Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(11):563~565

11 K. Petermann. Intensity-dependent nonreciprocal phase shift in fiber-optic gyroscopes for light sources with low coherence [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(12):623~625

12 K. Takiguchi, K. Hotate. Method to reduce the optical Kerr-effect-induced bias in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(2):203~205