

谐振式光纤陀螺克尔效应误差的抑制

雷兴, 胡强, 李俊, 王珂

中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 光纤克尔效应是影响谐振式光纤陀螺(RFOG)性能提升的重要因素之一。以光纤克尔效应为基础, 结合 Sagnac 效应, 建立 RFOG 克尔效应零偏误差的理论模型, 分析谐振腔内顺、逆时针光路中输出耦合器的耦合比之差以及谐振腔两臂长度差对陀螺零偏误差的影响, 提出结合 RFOG 结构设计的光强控制方案, 并通过 4 轮实验验证该方案的有效性。结果表明, 该方案能有效抑制克尔效应, 零偏误差从 $0.150 (^{\circ})/s$ 降低至 $0.017 (^{\circ})/s$, light path 零偏稳定性从 $1300 (^{\circ})/h$ 提升至 $140 (^{\circ})/h$, 陀螺样机性能提升近 1 个数量级。

关键词 光纤光学; 谐振式光纤陀螺; 克尔效应; 动态反馈; 光强控制

中图分类号 O436.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100606

Suppression of Kerr-Effect-Induced Bias for Resonator Fiber Optic Gyroscope

Lei Xing, Hu Qiang, Li Jun, Wang Ke

Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Kerr effect is one of the key factors limiting the performance of the resonator fiber optic gyroscope (RFOG). Based on the Kerr effect and Sagnac effect, we establish a theoretical model of gyroscope Kerr effect bias error of RFOG, and analyze the influence of difference of coupling ratio of the output couplers in clockwise and counter-clockwise beam paths in fiber resonator and the difference of lengths of two resonant cavity arms on the performance of the gyroscope. In addition, we also present a scheme to suppress the Kerr effect bias error by coupling light intensity control and structure design of the RFOG. After 4 runs of individual experiments, it is shown that the proposed scheme can effectively suppress the Kerr effect. The gyroscope bias is reduced from $0.150 (^{\circ})/s$ to $0.017 (^{\circ})/s$, and the bias stability is increased from $1300 (^{\circ})/h$ to $140 (^{\circ})/h$. The gyroscope performance can be improved by nearly one order of magnitude.

Key words fiber optics; resonator fiber optic gyroscope; Kerr effect; dynamic feedback; light intensity control

OCIS codes 060.2800; 190.4380

1 引言

谐振式光纤陀螺(RFOG)结合了干涉式光纤陀螺(IFOG)和激光陀螺的优点,能够在小体积内实现高精度,满足导航系统小型化、低成本的需求,是角速率传感器研究的重点内容^[1-3]。高精度的 RFOG 需要高相干度的光源,激光线宽越窄,陀螺可达到的检测精度越高^[4]。然而与光纤有关的克尔效应、瑞利背向散射、偏振效应以及舒珀效应等因素会随着光束相干度提升而增强,限制陀螺性能。

克尔效应是指光纤折射率随所传播光束光强改变而发生变化的非线性光学效应。由于检测原理不同, RFOG 无法像 IFOG 一样使用宽带光源消除克尔效应,必须采取其他措施。针对该问题, Takiguchi 等^[5]对光强进行缓慢正弦调制,分离克尔效应,通过调整 2 路光强消除克尔效应误差。该方法操作简单,但是需要在光路中加入光强调制信号以及光衰减器,增加了系统的复杂性。姚琼等^[6]利用方波频率调制消除克尔效

收稿日期: 2017-04-06; 收到修改稿日期: 2017-05-19

作者简介: 雷兴(1987—),男,硕士,工程师,主要从事新型传感器开发方面的研究。

E-mail: yiyehiqiu_30@163.com

应,该方法无需额外的光学器件,对强度调制器的调制频率要求低,但是无法区分克尔效应误差和其他效应产生的非互易误差,可能出现过补偿等现象。针对实心光纤中克尔效应难以完全被消除的问题,研究者们新近开始尝试利用保偏空芯带隙光子晶体光纤搭建 RFOG 谐振腔^[7],但尚未见可用的空芯光纤耦合器^[8],仅能通过空间耦合进行谐振腔搭建,且搭建的谐振腔损耗大,陀螺精度低。

本文基于光纤克尔效应的基本理论,结合 RFOG 的测角原理,建立 RFOG 中克尔效应零偏误差的理论模型,分析光纤谐振腔结构对克尔效应误差的影响,提出利用光强控制结合陀螺结构设计抑制克尔效应零偏误差的方案。实验结果表明,陀螺性能可提升近 1 个数量级。

2 克尔效应对谐振式光纤陀螺零偏误差的影响

RFOG 的一般结构如图 1 所示。激光器输出光被耦合器 1 分为 2 束,其中一束经过相位调制器 PM1 和声光移频器 AOM1 之后被输入耦合器 2 耦合,进入谐振腔以逆时针方向传输,该路光通过输出耦合器 3 耦合输出并被光电二极管 PD1 探测;另一束经过相位调制器 PM2 和声光移频器 AOM2 之后被输入耦合器 2 耦合,进入谐振腔以顺时针方向传输,该路光通过输出耦合器 3 耦合输出并被光电二极管 PD2 探测。谐振腔内顺、逆时针传输的光功率分别用 I_{cw} 、 I_{ccw} 表示。PD1 输出信号经控制电路 1 处理之后,将误差信号反馈至激光器控制电路,实现逆时针光路的稳频;PD2 输出信号经控制电路 2 处理之后,将误差信号反馈至 AOM2 控制电路,实现顺时针光路的稳频,该误差信号为陀螺输出信号。

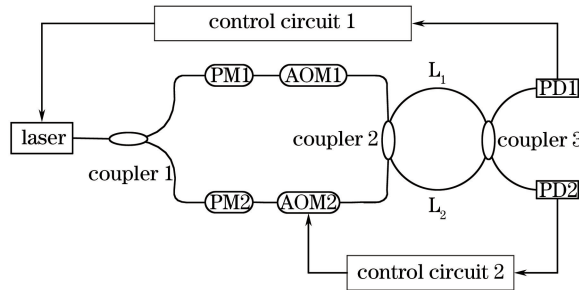


图 1 RFOG 结构图

Fig. 1 Structure of RFOG

光纤克尔效应是一种与光纤纤芯中光功率密度相关的非线性效应,在 RFOG 中,相干光干涉导致谐振腔内光纤纤芯光功率密度很大,折射率发生明显变化,若谐振腔内顺、逆时针方向光强不同,光束之间产生明显的非互易相差。结合图 1 分析光纤克尔效应对 RFOG 性能的影响,在谐振腔中,顺、逆时针传播的光经过光纤时,腔内某一点产生的非线性折射率为^[9]

$$\begin{cases} \Delta n_{NLcw} \approx \frac{n_2}{A} (|E_{cw}|^2 + 2|E_{ccw}|^2) = \frac{n_2}{A} (I_{cw} + 2I_{ccw}) \\ \Delta n_{NLccw} \approx \frac{n_2}{A} (|E_{ccw}|^2 + 2|E_{cw}|^2) = \frac{n_2}{A} (I_{ccw} + 2I_{cw}) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\Delta n \approx \frac{n_2}{A} (I_{ccw} - I_{cw}), \quad (2)$$

式中 Δn_{NLcw} 、 Δn_{NLccw} 分别为克尔效应导致的顺、逆时针光路附加非线性折射率, A 为光纤中功率传输的有效面积, n_2 为与光纤材质相关的非线性折射率系数, $|E_{cw}|$ 、 $|E_{ccw}|$ 为谐振腔内顺、逆时针光束电场强度。对于石英光纤, $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

在考虑克尔效应导致的非线性相移时,如图 1 所示,谐振腔被输出耦合器分成两部分,即谐振腔两臂,分别用 L_1 、 L_2 表示,其长度分别用 L_1 、 L_2 表示。在 L_1 中,顺时针光束光强为 $I_{cw}^{\text{out}}/\beta_{3,cw}$,逆时针光束光强为 $I_{ccw}^{\text{out}}(1-\beta_{3,ccw})/\beta_{3,ccw}$;在 L_2 中,顺时针光束光强为 $I_{cw}^{\text{out}}(1-\beta_{3,cw})/\beta_{3,cw}$,逆时针光束光强为 $I_{ccw}^{\text{out}}/\beta_{3,ccw}$, I_{cw}^{out} 、 I_{ccw}^{out} 分别表示谐振腔顺、逆时针光路的输出光强, $\beta_{3,cw}$ 、 $\beta_{3,ccw}$ 分别表示耦合器 3 在顺、逆时针光路中的输出耦合比,由此可知,谐振腔内顺、逆时针光路中克尔效应导致的非线性光程差为

$$\Delta L_{NL} = \frac{n_2}{A} \left[\frac{I_{ccw}^{out}}{\beta_{3,ccw}} - \frac{I_{cw}^{out}(1-\beta_{3,cw})}{\beta_{3,cw}} \right] L_2 + \frac{n_2}{A} \left[\frac{I_{ccw}^{out}(1-\beta_{3,ccw})}{\beta_{3,ccw}} - \frac{I_{cw}^{out}}{\beta_{3,cw}} \right] L_1 = \frac{n_2}{A} (L_1 + L_2) \left(\frac{I_{ccw}^{out}}{\beta_{3,ccw}} - \frac{I_{cw}^{out}}{\beta_{3,cw}} \right) + \frac{n_2}{A} (L_2 I_{cw}^{out} - L_1 I_{ccw}^{out}), \quad (3)$$

考虑谐振腔光程与相位的可知,克尔效应导致的陀螺顺、逆时针相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_2 (L_1 + L_2)}{\lambda} \left(\frac{I_{ccw}^{out}}{\beta_{3,ccw}} - \frac{I_{cw}^{out}}{\beta_{3,cw}} \right) + \frac{2\pi n_2}{\lambda} (L_2 I_{cw}^{out} - L_1 I_{ccw}^{out}), \quad (4)$$

相应的频差为

$$\Delta f = \frac{cn_2}{n\lambda A} \left[\left(\frac{I_{ccw}^{out}}{\beta_{3,ccw}} - \frac{I_{cw}^{out}}{\beta_{3,cw}} \right) + \frac{1}{L} (L_2 I_{cw}^{out} - L_1 I_{ccw}^{out}) \right], \quad (5)$$

式中 λ 为激光波长, c 为光速, n 为光纤折射率, $L = L_1 + L_2$ 为光纤环长度。根据 Sagnac 原理,克尔效应导致的陀螺零偏误差为^[10-11]

$$\Omega = \frac{c}{n\lambda} n_2 \left[\left(\frac{I_{ccw}^{out}}{\beta_{3,ccw}} - \frac{I_{cw}^{out}}{\beta_{3,cw}} \right) + \frac{1}{L} (L_2 I_{cw}^{out} - L_1 I_{ccw}^{out}) \right] \left(\frac{d}{\lambda n} \right)^{-1}, \quad (6)$$

式中 d 为谐振腔直径。一般地,可通过光强控制模块使 $I_{ccw}^{out} = I_{cw}^{out} = I^{out}$ 来进行克尔效应零偏误差抑制^[5],此时(6)式可简化为

$$\Omega = \frac{c}{n\lambda} n_2 I^{out} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta_3} + \frac{\Delta L}{L} \right) \left(\frac{d}{\lambda n} \right)^{-1}, \quad (7)$$

式中 $\beta_3 = (\beta_{3,ccw} + \beta_{3,cw})/2$, $\Delta\beta = (\beta_{3,ccw} - \beta_{3,cw})/\beta_3$ 表示顺、逆时针光路中耦合器 3 输出耦合比之差, $\Delta L = L_2 - L_1$ 为图 1 中谐振腔两臂长之差。

由(7)式可知,即使 $I_{ccw}^{out} = I_{cw}^{out} = I^{out}$,但如果 $\Delta\beta \neq 0$ 或者 $\Delta L \neq 0$,克尔效应并没有被消除。这是因为此时 L_1 (或 L_2) 中顺、逆时针光强密度是不同的,分别为 $I^{out}/\beta_{3,cw}$ 和 $I^{out}(1-\beta_{3,ccw})/\beta_{3,cw}$ [或 $I^{out}(1-\beta_{3,cw})/\beta_{3,cw}$ 和 $I^{out}/\beta_{3,ccw}$],克尔效应导致的相位差与光强差和光纤长度的乘积相关。光强差由输出耦合器 3 在顺、逆时针方向上耦合比的差异表征。鉴于此,可将克尔效应导致的陀螺零偏误差分为两部分:一部分与谐振腔输出耦合器 3 耦合比之差 $\Delta\beta$ 相关,另一部分则与谐振腔两臂长度之差 ΔL 相关。

透射式 RFOG 中输出光强与输入光强之间的关系为

$$\begin{cases} I_{ccw}^{out} = I_{ccw}^{in} \rho_{ccw} \frac{1}{1 + \left(\frac{2F_{ccw}}{\pi} \right) \sin^2 \left(\frac{\omega\tau}{2} \right)}, \\ I_{cw}^{out} = I_{cw}^{in} \rho_{cw} \frac{1}{1 + \left(\frac{2F_{cw}}{\pi} \right) \sin^2 \left(\frac{\omega\tau}{2} \right)}, \end{cases} \quad (8)$$

式中 ρ_{ccw} 为谐振腔逆时针传输方向的谐振深度, $\rho_{ccw} = \alpha_{3,ccw} \alpha_{3,ccw} \beta_{2,ccw} \beta_{2,ccw} \eta^{1/2} / (1 - Q_{ccw})^2$, F_{ccw} 为谐振腔逆时针传输方向的精细度, $F_{ccw} = \pi \sqrt{Q_{ccw}} / (1 - Q_{ccw})$, Q_{ccw} 为谐振腔逆时针传输方向的单程损耗, $Q_{ccw} = \sqrt{\alpha_{2,ccw} \alpha_{3,ccw}} \cdot \sqrt{(1 - \beta_{2,ccw})(1 - \beta_{3,ccw})} \eta^{1/2}$, $\alpha_{2,ccw}$ 和 $\alpha_{3,ccw}$ 分别为耦合器 2、3 在谐振腔逆时针传输光路中的插入损耗, η 为谐振腔内其他损耗(包括熔接损耗、光纤自身损耗以及腔内谐振控制器件的损耗等)。 ρ_{cw} 、 F_{cw} 分别为谐振腔顺时针传输方向的谐振深度和精细度,其表达式只须将 ρ_{ccw} 、 F_{ccw} 表达式中的 ccw 换成 cw 。根据(8)式可仿真分析在特定光纤器件参数下谐振腔的输出光强。结合(6)式可进行陀螺克尔效应零偏误差的仿真。

假定耦合器 2、耦合器 3 的分光比 β_2 、 β_3 约为 1%,插入损耗 $\alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$ dB,光纤熔接点损耗为 0.01 dB,光纤损耗为 0.5 dB/km,模场直径为 10.6 μm ,光纤环长度为 20 m,陀螺敏感环直径为 0.15 m,谐振腔输入光强控制在 10 mW 左右。基于上述参数,作如下理论分析。

1) 谐振腔两臂长度之差(ΔL)对克尔效应零偏误差的影响

假设输出耦合器 3 为理想耦合器,其耦合性能在顺、逆时针光路中保持一致。在光纤环长度不变的情况下,改变 ΔL 的值。如图 2 所示,随着谐振腔两臂长度差的增大,克尔效应零偏误差逐渐增大,当长度差为 0.5 m 时,陀螺零偏误差为 0.0006 ($^\circ$)/s。

2) 输出耦合器 3 在顺、逆时针光路中耦合比之差($\Delta\beta$)对克尔效应零偏误差的影响

假设陀螺谐振腔对称,即 $L_1=L_2$,保持 $\beta_3=0.01$ 不变,分析 $\Delta\beta$ 对陀螺克尔效应零偏误差的影响。如图 3 所示,随着顺、逆时针光路中耦合器 3 输出耦合比之差增大,克尔效应零偏误差增大。当 $\Delta\beta=0.1$,即 $\beta_{3,cw}=0.0105$ 、 $\beta_{3,ccw}=0.0095$ 时,克尔效应导致的陀螺零偏误差为 0.24 ($^\circ$)/s,远超导航级以及战术级陀螺精度要求。

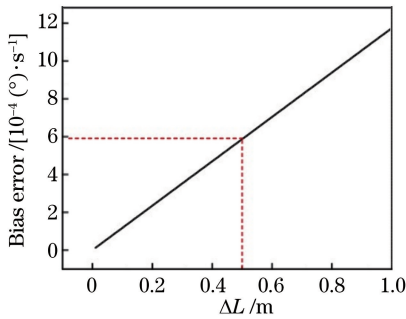


图 2 陀螺克尔效应零偏误差与 ΔL 的关系($\Delta\beta=0$)
Fig. 2 Relationship between gyroscope Kerr effect bias error and ΔL ($\Delta\beta=0$)

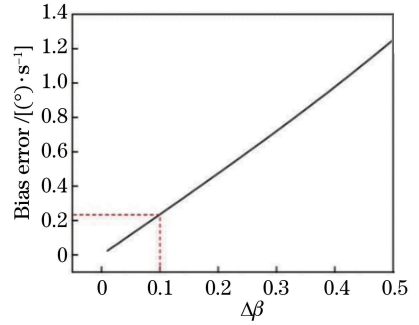


图 3 陀螺克尔效应零偏误差与 $\Delta\beta$ 的关系($L_1=L_2$)
Fig. 3 Relationship between gyroscope Kerr effect bias error and $\Delta\beta$ ($L_1=L_2$)

上述分析表明,若 $\Delta\beta \neq 0$ 或 $\Delta L \neq 0$,即使通过光强控制模块使得 $I_{ccw}^{out} = I_{cw}^{out} = I^{out}$,仍无法实现对克尔效应零偏误差的抑制,相反可能会使陀螺的零偏误差更大,其中, $\Delta\beta$ 的影响比 ΔL 明显。为此,基于(6)式提出新的控制方案,使得

$$I_{ccw}^{out} / \beta_{3,ccw} - I_{cw}^{out} / \beta_{3,cw} = 0, \quad (9)$$

$$L_2 I_{cw}^{out} - L_1 I_{ccw}^{out} = 0, \quad (10)$$

从而实现对克尔效应零偏误差的抑制。然而在现实情况中,通过光功率控制以及谐振腔两臂长控制并不能保证上述两部分严格为零,可通过适当降低陀螺输入光强抑制[(9)式]非零导致的陀螺零偏误差,增加光纤环长度抑制[(10)式]导致的陀螺误差。本文提出的克尔效应误差抑制方案为:首先在实验中测量所涉 $\beta_{3,ccw}$ 、 $\beta_{3,cw}$ 的实际值,在陀螺谐振腔搭建时控制谐振腔两臂的长度,确保(10)式为零。在陀螺样机搭建成功之后,通过光强控制模块调整稳频时陀螺谐振腔顺、逆时针输出光强,确保(9)式为零。下文将通过实验验证该方案的有效性。

3 实验方法及结果

按照图 4 搭建陀螺样机。与图 1 相比,谐振腔输入端口之前插入可变光衰减器(VOA),可通过调整 VOA 的控制电压改变经过其尾纤的光强。经测量可知,谐振腔输出耦合器 3 的性能参数 $\beta_{3,ccw}=1.18\%$, $\beta_{3,cw}=1.11\%$ 。

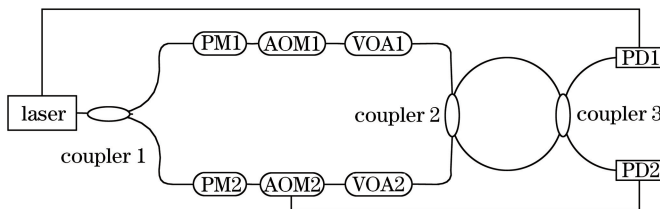


图 4 引入可变光衰减器的 RFOG 结构

Fig. 4 Structure of RFOG with variable optical attenuator

为验证理论分析的正确性以及抑制方法的有效性,进行 4 轮验证实验,每轮验证皆进行两次实验测量以保证结果的可靠性。

1) 第 1 轮实验

陀螺谐振腔两臂长度 $L_1=9$ m、 $L_2=11$ m,VOA 不对谐振腔光纤进行控制,测量陀螺中克尔效应零偏

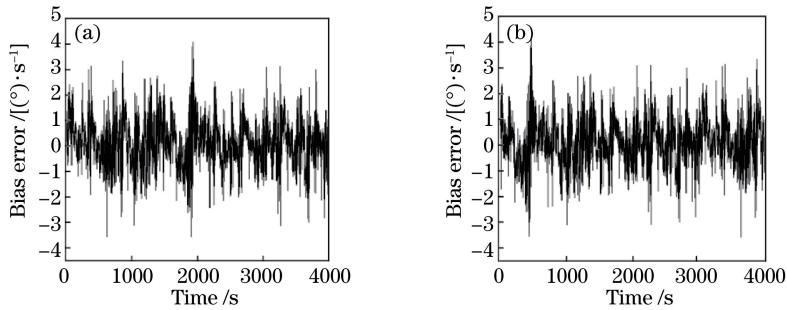


图 5 未进行光强控制时 RFOG 样机零偏输出。(a)第 1 次测量结果;(b)第 2 次测量结果

Fig. 5 Output bias of RFOG without light intensity control. (a) The 1st measurement; (b) the 2nd measurement

误差的量级,结果如图 5 所示,陀螺零偏误差峰峰值小于 $8\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 。图 5(a)中陀螺零偏误差平均值为 $0.14\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性为 $1328\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$;图 5(b)中陀螺零偏误差平均值为 $0.12\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性为 $1332\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。两次测量数据吻合较好,陀螺零偏误差平均值为 $0.13\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性约为 $1300\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。

2) 第 2 轮实验

在第 1 轮实验基础上,利用 VOA 控制陀螺稳频时 PD1、PD2 的监测信号,即谐振腔输出光强,保证二者相等,测量受控之后的陀螺零偏误差。如图 6 所示,陀螺零偏峰峰值小于 $6\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 。图 6(a)中陀螺零偏误差平均值为 $0.093\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性为 $1031\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$;图 6(b)中陀螺零偏误差平均值为 $0.107\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性为 $927\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。由此可见,利用光强控制模块保证谐振腔顺、逆时针输出光强相等能够改善陀螺零偏,但是效果不明显,与理论仿真结果一致。此时陀螺零偏误差约为 $0.1\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性约为 $1000\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。

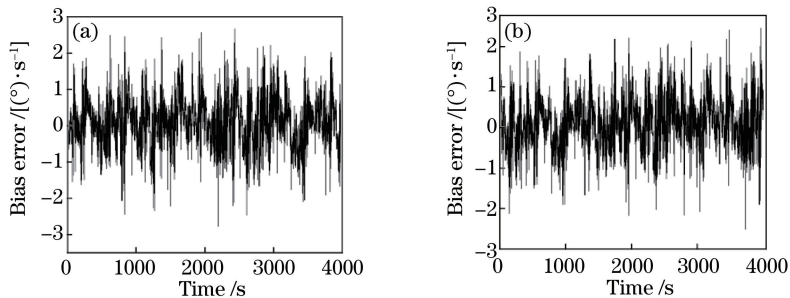


图 6 经 VOA 光强控制后 RFOG 样机零偏输出 ($I_{ccw}^{out} = I_{cw}^{out}$)。(a)第 1 次测量结果;(b)第 2 次测量结果

Fig. 6 Output bias of RFOG with light intensity control ($I_{ccw}^{out} = I_{cw}^{out}$). (a) The 1st measurement; (b) the 2nd measurement

3) 第 3 轮实验

在第 1 轮实验的基础上,控制 PD1、PD2 输出信号,使其恒等于 $\beta_{3,ccw}/\beta_{3,cw}$,即满足(9)式为零,测量陀螺零偏误差。如图 7 所示,两次测量陀螺零偏峰峰值均小于 $2\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 。图 7(a)中陀螺零偏误差平均值为 $0.019\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性为 $150\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$;图 7(b)中陀螺零偏误差平均值为 $0.20\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,1 h 零偏稳定性为 $136\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。

4) 第 4 轮实验

改变陀螺谐振腔两臂长度,使得 $L_1 = 10.3\text{ m}$, $L_2 = 9.7\text{ m}$,控制 PD1、PD2 的输出信号,使其恒等于 $\beta_{3,ccw}/\beta_{3,cw}$,此时同时满足 $I_{ccw}^{out}/\beta_{3,ccw} - I_{cw}^{out}/\beta_{3,cw} = 0$ 和 $L_2 I_{cw}^{out} - L_1 I_{ccw}^{out} = 0$ 。在此控制方案下测量陀螺零偏误差。如图 8 所示,两次测量陀螺零偏误差峰峰值均小于 $2\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,100 s 零偏误差平均值分别为 $0.017\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 和 $0.022\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$,陀螺零偏稳定性分别为 $140\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 和 $181\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。

比较图 6 与图 5 可见,通过控制光强使 $I_{ccw}^{out} = I_{cw}^{out}$ 的方案能够降低克尔效应导致的零偏误差,但效果并不明显,零偏稳定性从 $1300\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 降低至 $1000\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。考虑谐振腔内输出耦合器在顺、逆时针光路中耦合比的不同表现时,陀螺零偏降低至 $136\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ (图 7),陀螺精度提升明显。在考虑谐振腔两臂长与腔内光强的配合之后(图 8),陀螺精度较前一轮实验(图 7)并无明显提升。由之前的理论分析可知,谐振腔两臂长度之差对陀螺零偏误差的影响较小。如图 2 所示,当两臂长度差为 0.5 m 时,陀螺零偏误差为 $0.0006\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 。由

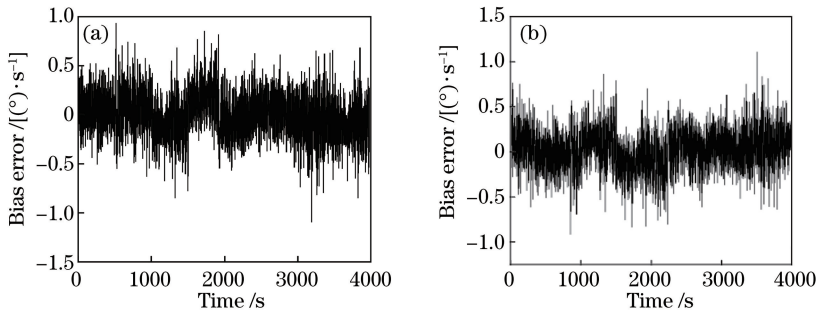


图 7 经 VOA 光强控制之后 RFOG 样机零偏输出 ($I_{ccw}^{out}/I_{cw}^{out}=\beta_{3,ccw}/\beta_{3,cw}$)。(a) 第 1 次测量结果;(b) 第 2 次测量结果

Fig. 7 Output bias of RFOG with light intensity control ($I_{ccw}^{out}/I_{cw}^{out}=\beta_{3,ccw}/\beta_{3,cw}$).

(a) The 1st measurement; (b) the 2nd measurement

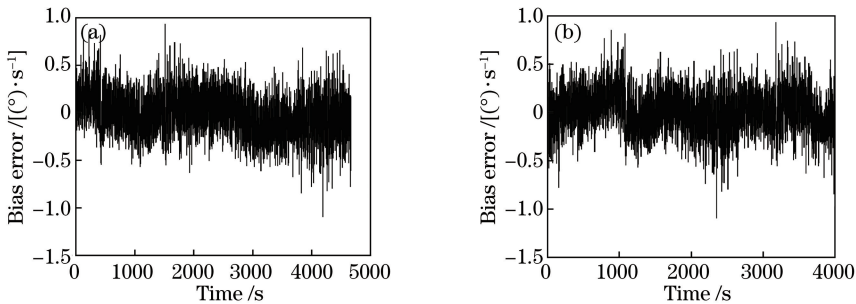


图 8 控制 VOA 光强及谐振腔臂长后 RFOG 样机零偏输出 ($I_{ccw}^{out}/I_{cw}^{out}=\beta_{3,ccw}/\beta_{3,cw}$,

$$L_2 I_{ccw}^{out} = L_1 I_{ccw}^{out}$$

Fig. 8 Output bias of RFOG with light intensity control and resonant cavity arm length control

($I_{ccw}^{out}/I_{cw}^{out}=\beta_{3,ccw}/\beta_{3,cw}$, $L_2 I_{ccw}^{out}=L_1 I_{ccw}^{out}$). (a) The 1st measurement; (b) the 2nd measurement

于目前的陀螺样机精度较差,因此,实验中该方面的影响并没有体现出来(如图 7 与图 8 的对比所示,第 3 轮与第 4 轮的测量结果并无明显区别)。这也从另一方面验证了理论分析的合理性。若要进一步提升陀螺精度,谐振腔两臂之差对克尔效应零偏误差的影响尤须注意。

综上,本文提出的抑制方案能有效降低克尔效应导致的陀螺零偏误差,与谐振腔内输出耦合器在顺、逆时针光路中耦合比之差 $\Delta\beta$ 相比,谐振腔两臂长度不匹配对克尔效应误差的贡献较小。当陀螺精度较低时,应重点关注(9)式对陀螺性能的影响,当陀螺精度提升之后,再着重考虑谐振腔两臂长度不匹配所引起的克尔效应零偏误差。实验证实了理论分析的合理性,为工程应用中降低克尔效应零偏误差提供了理论基础。

4 结 论

基于谐振式光纤陀螺的基本原理,完善了谐振式光纤陀螺中克尔效应零偏误差的理论模型,分析了克尔效应影响陀螺零偏的两个来源,提出结合陀螺结构以及谐振腔内输出耦合器在顺、逆时针光路中实际耦合输出性能的光强控制方案,抑制克尔效应误差。验证实验显示,陀螺性能提升明显。今后的工作中,应考虑耦合器性能参数受温度、振动等影响而随时间改变的问题,提升光功率反馈的有效性,进一步抑制克尔效应误差,加快 RFOG 工程化应用的进程。

参 考 文 献

- [1] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L L, *et al.* Fiber optic gyro development at honeywell[C]. SPIE, 2016, 9852: 985207.
- [2] Ying D Q, Wang Z Y, Jin Z H. An open-loop RFOG based on harmonic division technique to suppress LD's intensity modulation noise[J]. Optics Communications, 2016, 378: 10-15.
- [3] Wang X J, He Z Y, Hotate K. Automated suppression of polarization fluctuation in resonator fiber optic gyro with twin

- 90° polarizaiton-axis rotated splices[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(3): 366-374.
- [4] Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Effect of raylight backscattering in an optical passive ring-resonator gyro[J]. Applied Optics, 1984, 23(21): 3916-3924.
- [5] Takiguchi K, Hotate K. Method to reduce the optical-Kerr-effect induced bias in an optical passive ring resonator gyroscope[J]. Photonics Technology Letters, 1992, 4(2): 203-206.
- [6] Yao Qiong, Hu Yongming, Song Zhangqi, *et al.* Study on Kerr-effect-induced bias reduction method for resonator fiber optic gyroscope[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(9): 1320-1323.
姚琼, 胡永明, 宋章启, 等. 谐振式光纤陀螺克尔效应误差消除方法研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1320-1323.
- [7] Li Xuyou, Xu Zhenlong, Yang Hanrui, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core phonic bandgap fiber[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0405003.
李绪友, 许振龙, 杨汉瑞, 等. 保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405003.
- [8] Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.* Single-polarization directional coupler based on dual-core photonic bandgap fiber[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0906003.
李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 单偏振双芯光子带隙光纤定向耦合器[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0906003.
- [9] Wang Wei. Interferometric fiber optic gyroscope technology[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 151-154.
王巍. 干涉型光纤陀螺技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 151-154.
- [10] Post E J. Sagnac effect[J]. Review of Modern Physics, 1967, 39(2): 475-493.
- [11] Yu Xiujian, Liao Yanbiao, Zhang Min, *et al.* Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core phonic band-gap fiber[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 430-435.
于秀娟, 廖延彪, 张敏, 等. 谐振式空心光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 430-435.