

基于混合型光子晶体光纤谐振腔的谐振陀螺方案

索鑫鑫*, 李晶, 刘元元, 吴旭东

北京航天时代光电科技有限公司, 北京 100854

摘要 为抑制谐振陀螺的偏振波动噪声,提出了一体化谐振式光纤陀螺设计方案。基于特殊设计的光子晶体光纤和单偏振光纤研制了一种混合型光子晶体光纤谐振腔,该谐振腔同时具有较高的偏振消光比和良好的温度稳定性;为减小谐振腔损耗,优化了光子晶体光纤的模场直径,使其与单偏振光纤相一致,因此二者熔接损耗可被控制在 0.1 dB 以内,进而得到谐振腔精细度为 13.2;基于该谐振腔搭建了双闭环谐振陀螺系统。测试结果表明:双闭环谐振陀螺系统具有较小的偏振波动误差特性,在 300 s 积分时间内陀螺输出白噪声占主导地位,零偏稳定性达到 $0.25 (^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}$;在测量范围为 $-240\sim 240 (^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ 时,双闭环谐振陀螺系统的陀螺标度因数非线性度为 2.3×10^{-4} ,性能较单闭环陀螺系统有明显提升。

关键词 光纤光学; 谐振式光纤陀螺; 混合型光子晶体光纤谐振腔; 零偏稳定性; 单偏振光纤

中图分类号 V241.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1206003

Development of Resonant Fiber Optic Gyroscope Based on Hybrid Photonic Crystal Fiber Resonator

Suo Xinxin*, Li Jing, Liu Yuanyuan, Wu Xudong

Beijing Aerospace Times Optical-Electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100854, China

Abstract In this study, an integrated resonant fiber optic gyroscope (R-FOG) scheme that employs a hybrid photonic crystal fiber (PCF) resonator is proposed to suppress the polarization-fluctuation noise of R-FOG. The hybrid PCF resonator, which exhibits a high polarization extinction ratio and good temperature stability, is primarily composed of a specially designed PCF and single polarization fiber (SPF). To reduce the resonator loss, the mode field diameter of PCF is modified to become consistent with that of SPF. Further, the fusion loss of the two types of fibers is controlled within 0.1 dB. In addition, the fineness of the hybrid PCF resonator is 13.2. A double closed-loop R-FOG system is set up based on the hybrid PCF resonator, and its performance is experimentally studied. The results denote that the R-FOG system exhibits small polarization-fluctuation error characteristics. The white noise dominates the output at an integration time of 300 s when a bias stability of $0.25 (^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}$ is achieved. Within the dynamic range from $-240 (^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ to $240 (^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$, the scale-factor nonlinearity of the double closed-loop R-FOG system is observed to be 2.3×10^{-4} . The performance of the double closed-loop R-FOG system is better than that of a single closed-loop R-FOG system.

Key words fiber optics; resonant fiber optic gyroscope; hybrid photonic crystal fiber resonator; zero-bias stability; single polarization fiber

OCIS codes 060.2310; 060.2800; 060.2420; 060.2340

1 引言

基于谐振腔中相向传输光波的谐振频率偏差正比于角速度的原理,谐振式光纤陀螺(R-FOG)能够实现对旋转角速度的测量。与干涉式光纤陀螺(I-

FOG)相比,R-FOG 在高精度、小型化方面更具优势,因此引起全球科研机构及人员的广泛关注^[1-2]。

目前,噪声问题已成为制约 R-FOG 性能的关键因素之一。R-FOG 的噪声主要包括瑞利背向散射噪声^[3-4]、光学克尔噪声^[5-6]和偏振波动噪声^[7-8],

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-08-15; 录用日期: 2019-08-22

基金项目: 预研项目(41417010104,30508040203)

* E-mail: suoxinxin111111@163.com

其中,与温度相关的偏振波动噪声是影响 R-FOG 长期稳定性的主要噪声因素^[9-10]。为解决 R-FOG 的偏振波动噪声问题,研究人员搭建了基于单点 90°^[11]和双点 90°^[12]偏振轴旋转熔接的光纤谐振腔,通过补偿双折射相位差来降低陀螺的偏振噪声。然而,单点 90°和双点 90°熔接方案只能降低谐振腔的温度敏感性,并不能完全抑制偏振波动引入的噪声。在谐振腔两臂分别插入起偏器可以在一定程度上提高谐振腔中干涉光的消光比,从而在一定程度上抑制谐振陀螺的偏振噪声^[13];然而,受目前偏振器件的制备工艺水平限制,偏振器件的起偏效果有限,同时谐振腔中分立元器件亦不利于 R-FOG 小型化设计和性能的进一步提升。随着特种光纤技术的不断发展,新型光纤的出现为谐振陀螺的设计提供了新思路。带隙光子晶体光纤(PBF)是一种新型的微结构光纤,光子带隙效应使得光被限制在低折射率的空气纤芯中传播,利用带隙光子晶体光纤研制谐振腔,可以从噪声产生根源上抑制由导光介质缺陷而引入的各种非互易噪声。然而,目前谐振式带隙光子晶体光纤陀螺方面的研究仍处于起步阶段,国内高性能带隙光子晶体光纤的拉制工艺及带隙光子晶体光纤谐振腔技术发展水平相对滞后,带隙光子晶体光纤的潜在优势尚未得到充分开发^[14-16]。2016年,浙江大学严昱超^[17]采用熔接方式搭建了反射式带隙光子晶体光纤谐振腔,测试得到陀螺零偏稳定性仅为 0.007 (°)·s⁻¹。与带隙光子晶体光纤相比,实心光子晶体光纤(PCF)拉制技术成熟,结构灵活多变,光纤本身亦具有较高的温度稳定性。单偏振光纤(SPF)只支持一个偏振态的低损耗传输,其他偏振态都会在传输的过程中被衰减。采用 PCF 和 SPF 作为谐振腔主体,可以很大程度上抑制偏振波动噪声,降低对陀螺检测精度的影响,从而使得将陀螺偏振噪声抑制到极限灵敏度以下成为可能。

本文提出一种采用混合型光子晶体光纤谐振腔的一体化谐振式光纤陀螺设计方案。利用经过特殊设计的光子晶体光纤和单偏振光纤研制一种透射式混合型光纤谐振腔,该谐振腔具有较高的偏振消光比和良好的温度稳定性;基于该混合型光子晶体光纤谐振腔搭建了双闭环谐振式光纤陀螺样机;最后进行实验测试。结果表明,陀螺的长期工作稳定性较好,在 300 s 积分时间内陀螺输出白噪声占主导地位,零偏稳定性达 0.25 (°)·h⁻¹,同时对陀螺样机进行了速率标定实验,在测量范围为 -240~240 (°)·s⁻¹时,

陀螺标度因数非线性度达 2.3×10⁻⁴。

2 混合型光子晶体光纤谐振腔设计

2.1 偏振波动噪声引起的陀螺测量误差机理

一般谐振腔由普通保偏光纤(PMF)构成,由于光纤具有双折射效应,光纤中支持两个本征偏振态(ESOPs)传输。谐振腔输出端光信号除了包含能量较大的主偏振态(P-ESOP)以外,还包含了能量较小的次偏振态(S-ESOP)。因此,在 R-FOG 系统中,光电探测器实际检测到的谐振腔总输出光强信号 I 表示为

$$I = [\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}} + \mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}][\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}^H + \mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}^H] = |\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}|^2 + |\mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}|^2 + 2\text{Re}[\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}^H \mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}], \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}$ 为 P-ESOP 光波光场, $|\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}|^2$ 为 P-ESOP 谐振曲线的光强; $\mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}$ 为 S-ESOP 光波光场, $|\mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}|^2$ 为 S-ESOP 谐振曲线的光强;上标 H 表示复共轭; $2\text{Re}[\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}^H \mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}]$ 表示对 $2[\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}^H \mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}]$ 取实部,为 P-ESOP、S-ESOP 谐振曲线之间的干涉项光强。谐振腔中,P-ESOP 谐振曲线的光强 $|\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}|^2$ 用于陀螺信号的检测, $|\mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}|^2$ 以及主次偏振态间干涉光强 $2\text{Re}[\mathbf{E}_{\text{P-ESOP}}^H \mathbf{E}_{\text{S-ESOP}}]$ 则会影响 P-ESOP 对应谐振频率点的检测精度,从而在 R-FOG 输出端产生偏振噪声测量误差。偏振波动频差可表示为^[9]

$$\Delta f \approx \frac{B^2 |\mathbf{v}_{\text{S-ESOP}}|^2 (\Gamma_{\text{P-ESOP}} \Gamma_{\text{S-ESOP}})^2}{8A^2 |\mathbf{v}_{\text{P-ESOP}}|^2 f_d^3} - \text{Re}\left(\frac{B\mathbf{v}_{\text{P-ESOP}}^H \mathbf{v}_{\text{S-ESOP}} \Gamma_{\text{P-ESOP}} \Gamma_{\text{S-ESOP}}}{2A |\mathbf{v}_{\text{P-ESOP}}|^2 f_d}\right), \quad (2)$$

式中: A 和 B 分别为 P-ESOP 和 S-ESOP 谐振峰峰值幅度; $\Gamma_{\text{P-ESOP}}$ 和 $\Gamma_{\text{S-ESOP}}$ 分别为 P-ESOP 和 S-ESOP 谐振峰的半峰全宽; $\mathbf{v}_{\text{P-ESOP}}$ 和 $\mathbf{v}_{\text{S-ESOP}}$ 分别为 P-ESOP 和 S-ESOP 谐振峰本征矢量; f_d 为 P-ESOP 和 S-ESOP 谐振峰间距。

由(2)式可知,偏振波动误差与谐振腔中主次偏振态对应谐振峰的幅度、半峰全宽和间距有关。通过提高谐振腔中干涉光的消光比,最大程度地减小 S-ESOP 光波能量,有望将偏振噪声抑制到陀螺极限灵敏度以下。

2.2 混合型光子晶体光纤谐振腔的结构

混合型光子晶体光纤谐振腔的结构如图 1 所示,谐振腔主体部分由 SPF 和保偏光子晶体光纤(PM PCF)构成。为了提升谐振腔消光比,在保偏光纤耦合器尾纤上各熔接一段 SPF;SPF 型号为

HB1550Z,由Fibercore公司提供,在光路中可提供消光比大于45 dB的干涉光。PM PCF结构经过特殊优化设计,其光纤端面如图1插图所示。SPF和PM PCF的具体参数如表1所示。

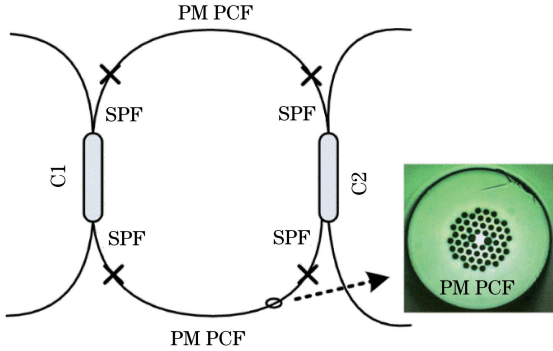


图1 混合型光子晶体光纤谐振腔结构及PM PCF端面(插图)
Fig. 1 Detailed structure of hybrid PCF resonator and cross-section of PM PCF (inset)

表1 SPF和PM PCF参数

Table 1 Parameters of SPF and PM PCF

Fiber type	Coating diameter / μm	Cladding diameter / μm	Attenuation at 1550 nm / (dB·km)	MFD / μm	Beat length at 1550 nm / mm
SPF	244.8	125.5	2.45	11.4	1.54
PM PCF	246.5	125.1	0.92	10.6	1.63

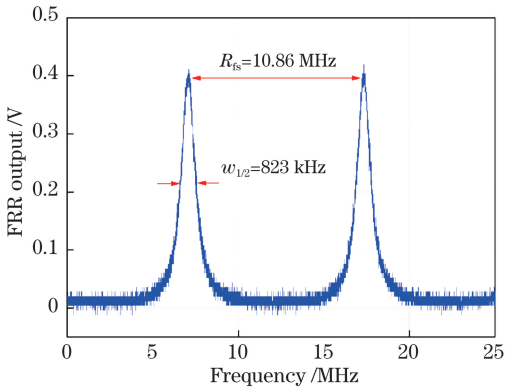


图2 混合型光子晶体光纤谐振腔谐振曲线
Fig. 2 Resonant curve of hybrid PCF resonator

由散粒噪声决定的谐振陀螺极限灵敏度表达式为^[18]

$$\Omega_{\min} \approx \frac{2\lambda \cdot c}{L \cdot F \cdot D} \sqrt{\frac{e}{\pi \cdot R_D \cdot P_{PD} \cdot \tau}}, \quad (3)$$

式中: c 为真空中光速; P_{PD} 为到达探测器的平均光功率;电子电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C,探测器响应度 $R_D = 0.9$ mA/mW;工作波长 $\lambda = 1550$ nm;谐振腔直径 D 为15 cm;腔长 L 为18.8 m;耦合器C1和C2分光比均为4%;插入损耗约0.2 dB。设谐振腔输入光功率 $P = 1$ mW,积分时间 τ 取1 s时,计算得出 $\Omega_{\min} \approx 0.2$ (°)/h。

低损耗谐振腔对提高谐振腔的精细度有着积极的作用。混合型光子晶体光纤谐振腔中不同类型的光纤熔接时,各种光纤间模场直径不匹配是导致光纤熔接损耗较大的主要原因。本研究采用的SPF在1550 nm波段模场直径(MFD)为11.4 μm ,为降低谐振腔光路中各种光纤的熔接损耗,设计保偏耦合器尾纤、PM PCF模场直径尽量与SPF模场直径相一致,此时,谐振腔内各熔点熔接损耗可被控制在0.1 dB以内,谐振腔总损耗为1.1 dB。谐振腔直径 D 为15 cm,腔长 L 为18.8 m。利用频率为1 Hz、峰-峰值为1 V的锯齿波对激光器中心频率进行扫描,得到混合型光子晶体光纤谐振腔(FRR)谐振曲线,如图2所示。从图中可以看到P-ESOP对应的谐振曲线,S-ESOP被很好地抑制。测试谐振腔自由谱宽 R_{fs} 为10.86 MHz,半峰全宽 $w_{1/2}$ 为823 kHz,计算得到谐振腔精细度系数 F 为13.2。

3 实验及分析

3.1 双路闭环谐振陀螺实验系统

为进一步验证混合型光子晶体谐振腔性能,基于该谐振腔搭建了双路闭环谐振陀螺实验系统,结构如图3所示。光源选用RIO(Redfern Integrated Optics)半导体激光器模块,中心波长为1550 nm,线宽小于3 kHz,调谐系数为60 MHz/V。激光器输出信号光经由Y分支(Y branch)分为功率相等的两部分,这两部分光分别经过相位LiNbO₃调制器PM1和PM2调制。谐振腔顺时针(Clockwise, CW)输出的光信号与逆时针(Counter Clockwise, CCW)输出的光信号分别被光电探测器PD1和PD2检测。PD2的输出信号通过锁相放大模块LIA2与伺服模块PI1反馈控制激光器频率,使激光器的中心频率锁定在CCW路的谐振频率上,同时降低了激光器的频率噪声;该回路构成谐振陀螺系统的第一闭环。CW方向上的LIA1对PD1后的输出进行同步解调,通过伺服模块PI2产生频率控制字(FCW),FCW作用于移频驱动模块(FSD)生成锯齿波信号驱动相位调制器PM3,用于移频,使CW路光频率锁定在该方向上的谐振频率上;该回

路构成谐振陀螺系统的第二闭环。第二闭环用来完成角速度的测量,伺服模块 PI2 产生的正比于 FCW

的移频量即为两路的谐振频率差,通过低通滤波器 LPF3 后作为陀螺转动输出信号。

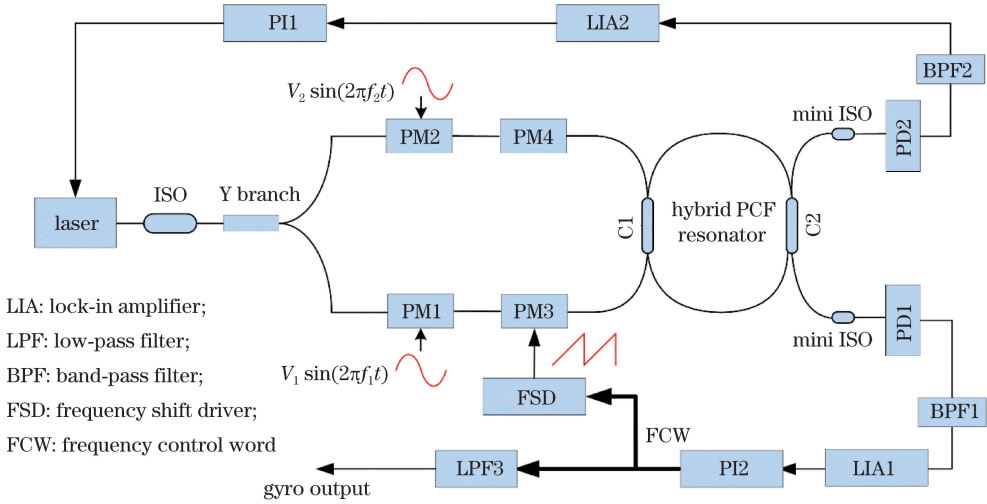


图 3 双路闭环谐振陀螺系统方案

Fig. 3 Scheme of double closed-loop resonant gyroscope system

系统采用基于正弦相位调制解调技术的信号检测方案,两路调制频率 f_1 、 f_2 分别设定为 237 kHz 和 239 kHz,严格设定调制电压 V_1 、 V_2 以满足最佳载波抑制要求。为提高调制干涉光信号的信噪比,设计 BPF1、BPF2 分别对 PD1、PD2 探测器信号进行信号滤波处理。为减小陀螺光学克尔噪声,对构成谐振腔的各器件损耗参数和熔接损耗参数进行控制和匹配,使得谐振腔 CW 和 CCW 向传输光功率差小于 1%。隔离器 (ISO 和 mimi ISO) 用来减小背向反射信号对系统稳定性的影响。

3.2 测试结果及讨论

基于图 3 实验系统,利用锯齿波扫描激光器中心频率,得到进入锁相放大器的调制光信号和输出的解调信号曲线如图 4 所示,可以看到解调信号曲线在零点处具有良好的线性度。解调信号曲线零点处斜率代表谐振腔鉴频系数,当激光器中心频率落

在谐振点附近时,鉴频系数代表激光器频率抖动和解调电压幅度波动之间的关系。较大的鉴频系数可以提升双路闭环系统的锁频精度,是谐振腔性能的综合体现。为提高有用干涉光信号的信噪比以获得更大的鉴频系数,设计合适带宽的带通滤波器滤去探测器信号中傅里叶分量的直流部分和随机高频噪声部分,系统参数优化后,得到实验系统中 CW 和 CCW 两路解调信号曲线零点处鉴频系数最大值均约为 $0.965 \mu\text{V}/\text{Hz}$ 。

双路闭环工作时,LIA1 和 LIA2 解调输出在零值附近波动,此时,陀螺 CW 和 CCW 路光波能很好地跟踪各自光路的谐振峰。对两路解调输出进行 Allan 方差分析,在 10 s 积分时间下得到激光器残余频率噪声的等价旋转角速度约为 $0.5 (^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}$ 。为验证该混合型光子晶体光纤谐振腔的偏振波动噪声特性,测试了陀螺样机的长期稳定性,测试时间为 3600 s。图 5 (a)为静止状态下,积分时间为 1 s 时陀螺样机的输出;图 5(b)为陀螺输出的 Allan 方差分析结果,可以看到陀螺的长期漂移稳定性较好,在 300 s 积分时间内输出白噪声占主导地位,零偏稳定性达 $0.25 (^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}$,角随机游走 (ARW) 系数为 $0.082 (^{\circ})\cdot\text{h}^{-1/2}$ 。

该测试结果和预期基本吻合,混合型谐振腔主体由光子晶体光纤和单偏振光纤代替普通保偏光纤,光子晶体光纤具有优异的温度稳定性,单偏振光纤提供消光比大于 45 dB 的干涉光,从而很好地抑制了 S-ESOP 带来的偏振波动噪声,使得陀螺的长期工作稳定性较好。由 (3) 式可知,陀螺由散粒噪声

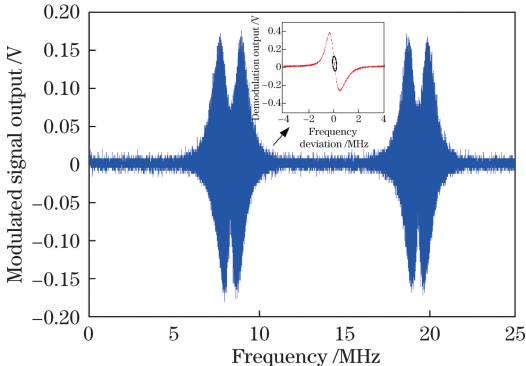


图 4 调制和解调信号

Fig. 4 Modulated and demodulated signals

决定的极限灵敏度在 1 s 积分时间下可达 $0.2 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$, 远优于陀螺的短期测试精度, 这可能是由系统采用的半导体激光器频率噪声较大所致。后

续研究中, 拟对系统第一闭环 PI 环路参数进行进一步优化, 以增强对激光器频率噪声的抑制作用, 期望获得更高的陀螺短期测试精度。

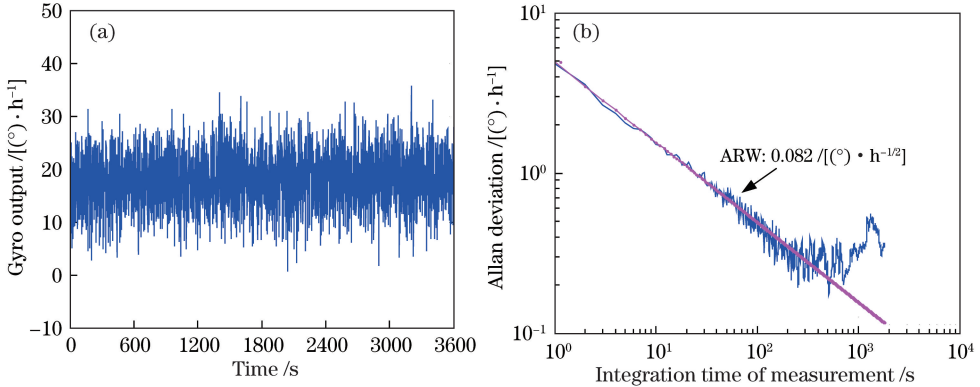


图 5 测试结果。(a)陀螺输出;(b) Allan 方差分析

Fig. 5 Experimental results. (a) Output of FOG; (b) Allan deviation

同时, 对陀螺样机进行了速率标定实验, 测试速率点选取 $\pm 1, \pm 2, \pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 50, \pm 100, \pm 150, \pm 200, \pm 240 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 。图 6 为谐振陀螺的转动测试结果, 将陀螺输出进行线性拟合, 计算得到在 $\pm 240 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 速率范围内陀螺标度因数非线性度为 2.3×10^{-4} 。

声。随后测试了陀螺样机的长期工作稳定性, 测试时间为 3600 s, 结果表明, 在 300 s 积分时间内陀螺输出白噪声占主导地位, 零偏稳定性达 $0.25 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$, 角随机游走系数为 $0.082 (^{\circ}) \cdot h^{-1/2}$ 。标定实验表明, 在测量范围 $-240 \sim 240 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 内陀螺标度因数非线性度为 2.3×10^{-4} , 双闭环谐振陀螺系统的性能较单闭环陀螺系统有明显提升。

参 考 文 献

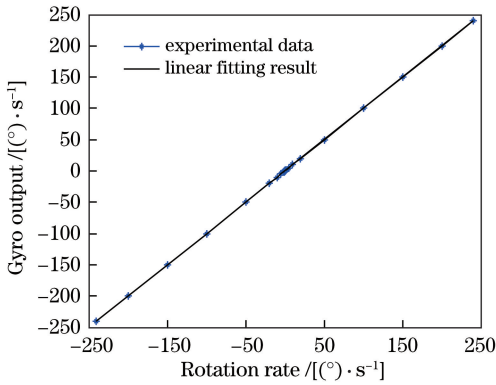


图 6 陀螺转动测量结果

Fig. 6 Rotation measurement results of FOG

前期工作中, 陀螺单闭环工作时 $\pm 240 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 速率范围内标度因数非线性度仅为 1.3×10^{-2} , 该陀螺系统标度因数非线性度指标较单闭环陀螺系统提升约 57 倍。

4 结 论

采用混合型光子晶体光纤谐振腔和双路闭环数字信号检测系统完成了一体化谐振式光纤陀螺样机制作。在陀螺样机的谐振腔主体中, 利用经特殊设计的保偏光子晶体光纤和单偏振光纤代替普通保偏光纤, 能够很好地抑制 S-ESOP 带来的偏振波动噪

[1] Zhang X L, Ma H L, Ding C, *et al.* Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro[J]. Chinese Journal of 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.

[2] Jiang Z G, Hu Z F. Analysis on sensitivity of resonant fiber optic gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0706001.
蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0706001.

[3] Aghaie K Z, Dignonnet M J F, Fan S H. Modeling loss and backscattering in a photonic-bandgap fiber using strong perturbation[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8632: 86320K.

[4] Ying D Q, Mao J M, Li Q, *et al.* A miniaturized compact open-loop RFOG with demodulation signal compensation technique to suppress intensity modulation noise[J]. Optics Communications, 2016, 359: 364-371.

[5] Li X H, Zhang J J, Ma H L, *et al.* Test and analysis of the optical Kerr-effect in resonant micro-optic gyros [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6 (5):

- 6601007.
- [6] Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(6): 645-651.
- [7] Strandjord L K, Sanders G A. Passive stabilization of temperature dependent polarization errors of a polarization-rotating resonator fiber optic gyroscope [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2510: 81-91.
- [8] Shi C X, Hotate K. Bias of a resonator fiber optic gyro composed of a polarization-maintaining fiber ring resonator with the photoinduced birefringent grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(9): 1853-1857.
- [9] Yu X H. Research on key devices in resonator fiber optic gyroscope [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 14-16, 57.
俞旭辉. 谐振式光纤陀螺关键器件研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 14-16, 57.
- [10] Li X Y, Xu Z L, Ling W W, *et al.* Single-polarization directional coupler based on dual-core photonic bandgap fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0906002.
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): 0906002.
- [11] Strandjord L K, Sanders G A. Resonator fiber optic gyro employing a polarization-rotating resonator [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1585: 163-172.
- [12] Wang X J, He Z Y, Hotate K. Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator with twin 90° polarization-axis rotated splices [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1677-1683.
- [13] Ma H L, Yu X H, Jin Z H. Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator integrating in-line polarizers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3342-3344.
- [14] Zheng X, Wu Y J, Yu H Y. Key technology & application status of the photonic crystal fiber used in fiber optic gyroscope [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(6): 1-8.
郑辛, 吴衍记, 于怀勇. 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用现状及其关键技术 [J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(6): 1-8.
- [15] Tian J, Wang Z, Wang G C, *et al.* The optimization of resonator for resonator optic gyro with photonic crystal fiber [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(6): 92-97.
田军, 王茁, 王国臣, 等. 谐振式光子晶体光纤陀螺谐振腔优化技术研究 [J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(6): 92-97.
- [16] Li X Y, Xu Z L, Yang H R, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber [J]. *Chinese Journal of 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.
- [17] Yan Y C. Polarization errors in resonator fiber optic gyroscopes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 91.
严昱超. 谐振式光纤陀螺偏振噪声研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 91.
- [18] Ma H L, Zhang J J, Wang L L, *et al.* Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5862-5865.