

偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究

李子忠¹ 李志宏^{2,3} 姚晓天^{2,3,4} 李果华^{1*}

¹ 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122; ² 天津大学精密仪器与光电工程学院, 天津 300129
³ 苏州光环科技有限公司, 江苏 苏州 215123
⁴ General Photonics Corporation, California 91710, USA

摘要 针对保偏光纤陀螺静态参数受光路偏振串扰误差的影响而使陀螺精度受到制约的问题,从实际应用的角度,研究了保偏光纤陀螺光路中由于各光学器件不理想和熔接点对轴角度误差等因素引起偏振串扰误差的机制。基于琼斯矩阵和相干矩阵,并引入随温度变化的保偏光纤双折射变量,建立了变温环境下保偏光纤陀螺的光路传输模型,对变温环境下偏振串扰误差对保偏光纤陀螺零漂和随机游走的影响进行了理论分析和估算。同时开展了变温环境下光纤环偏振串扰对其静态参数影响的相关实验。实验结果与模型分析结果基本一致,表明该模型是合理的。

关键词 光通信; 光纤陀螺; 偏振串扰; 静态参数

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1206001

Research on Influence of Polarization Crosstalk on the Zero Drift and Random Walk of Fiber Optic Gyroscope

Li Zizhong¹ Li Zhihong^{2,3} Steve Yao^{2,3,4} Li Guohua¹

¹ School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

² College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300129, China

³ Suzhou Optoring Technology Co. Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China

⁴ General Photonics Corporation, California 91710, USA

Abstract To solve the problem of the restricted accuracy of the polarization maintaining fiber optic gyroscope (PM-FOG), whose static parameters are influenced by its optical path polarization crosstalk errors, from the view of practical applications, the mechanism of polarization crosstalk errors in light path caused by unsatisfactory optical devices and fused points' axis angle errors is studied. Based on the Jones matrix and correlation matrix, the PM fiber's birefringence variable which varies with temperature change is introduced, the optical transmission model of PM-FOG in variable temperature fields is built, and the effect of polarization crosstalk errors on PM-FOG zero drift and random walk in variable temperature fields is analyzed and estimated. Meanwhile, the related experiments are carried out to study the effect of fiber coils polarization crosstalk on its static parameters in variable temperature fields. The experimental results and analysis results of model are in agreement, which shows that the model is reasonable.

Key words optical communications; fiber optic gyroscope; polarization crosstalk; static parameters

OCIS codes 060.2370; 060.2420; 060.2800

1 引言

干涉式光纤陀螺(FOG)是一种用于惯性导航的角速度传感器,在惯性制导、车辆定位、地下探测

等诸多军用和民用领域中都有着广泛的发展和前景。在实际生产和应用过程中,由于光源偏振度波动^[1],光路中各器件尾纤之间的熔接点缺陷,Y波

收稿日期: 2014-06-19; **收到修改稿日期**: 2014-07-14

作者简介: 李子忠(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤陀螺技术方面的研究。E-mail: lizizhong0807@163.com

导师简介: 姚晓天(1955—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺光纤环检测技术、光纤相干层析技术、光线偏振传感技术等方面的研究。E-mail: steveyao888@yahoo.com

* **通信联系人**。E-mail: guohuali@jiangnan.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

导消光比不理想以及保偏(PM)光纤环中存在的大量偏振串扰点,并且随着外界环境温度的改变,这些偏振串扰点的强度和位置也会随之改变等,使得保偏光纤陀螺(PM-FOG)光路中引入了不可忽视的偏振串扰误差,极大地制约了其精度的提高^[2]。因此,对保偏光纤陀螺光路传输模型进行建模,特别是在变温度环境下分析偏振串扰误差对其静态参数如零偏稳定性、随机游走系数等的影响很有必要。

本文结合实际应用,针对保偏光纤陀螺光路中的偏振串扰误差问题,综合考虑导致光路偏振串扰误差的几种因素,包括温度干扰等条件,建立了保偏光纤陀螺的光路传输模型,并进行了理论分析和估算;实验上研究了变温环境下,偏振串扰误差对保偏

光纤陀螺静态参数的影响,证明了模型的合理性。

2 偏振串扰误差建模分析

2.1 偏振串扰误差建模

典型的干涉式光纤陀螺的光路原理图如图1所示,图中光源为超辐射发光二极管(SLD),PIN为光电探测器,P表示起偏器,a1、a2、a3、b1、b2是各器件尾纤之间的熔接点,m1、m2、m3是集成光学芯片内部的熔接点。 δ_i 和 δ_{i+1} 分别表示保偏光纤环中第*i*、*i*+1个熔接点, ΔL_i 和 ΔL_{i+1} 分别表示第*i*和第*i*+1个熔接点之间以及第*i*+1和第*i*+2个熔接点之间保偏尾纤的长度。

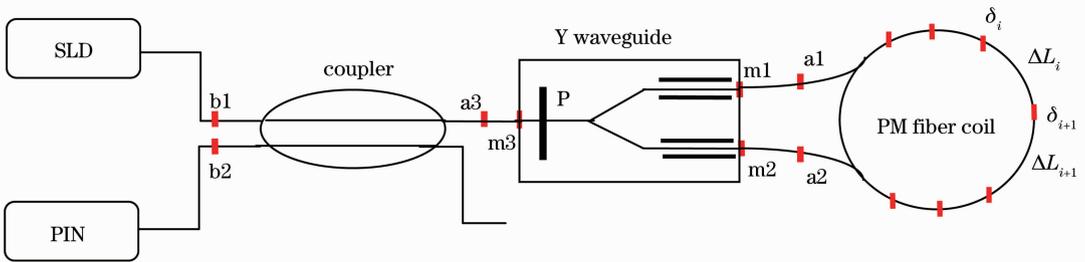


图1 保偏光纤陀螺的光路原理图

Fig.1 Schematic of PM-FOG

考虑从实际光源发出的光为部分偏振光,光路中各器件尾纤之间的熔接点存在对轴角度误差,使得光信号传输至熔接点处将发生偏振串扰现象。即使光信号经过Y波导中的起偏器进行起偏后,但因起偏器的消光比并不理想,这种偏振串扰仍会存在。当光信号在保偏光纤环内传播时,由于工艺或者外界因素等原因,保偏环内存在着大量的随机分布的偏振串扰点,光信号经过这些串扰点时会发生多点耦合或多次耦合现象,并且当保偏光纤双折射^[3]随

温度等外界因素变化时,这种偏振模式耦合也会随之变化,这将导致光纤陀螺的输出信号的漂移,进而影响精度。

为分析偏振串扰误差对保偏光纤陀螺性能的影响,现对各光学器件建模如下:

1) 光源

将光源发出的光当作部分偏振的准单色光来处理,其输出光的相干矩阵^[4]表示如下:

$$\mathbf{J}_{\text{source}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} \begin{bmatrix} 1 + P \cos(2\zeta) \cos(2\xi) & P[\sin(2\zeta) \cos(2\xi) + j \sin(2\xi)] \\ P[\sin(2\zeta) \cos(2\xi) + j \sin(2\xi)] & 1 - P \cos(2\zeta) \cos(2\xi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 I_{in} 表示输入光信号的总光强, P 表示偏振度, ζ 和 ξ 分别表示完全偏振光的方位角和椭圆度角。以上参量均可由相关仪器测出。

2) 熔接点

考虑到实际中光纤陀螺各器件保偏尾纤之间的熔接点存在对轴角度误差,并且对轴角度误差在一定范围内是可控的。光信号在光路中传播经过这些熔接点时将会发生偏振模式耦合。假设光路中各器件保偏尾纤之间的熔接点处的对轴误差角度为 θ_x ($x =$

a1, a2, a3, b1, b2, m1, m2, m3),则光信号沿顺向和逆向传播经过熔接点处的琼斯矩阵分别表示如下:

$$\mathbf{R}(\theta_x) = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}^T(\theta_x) = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中T表示矩阵的转置。

3) 相邻熔接点之间保偏尾纤

设相邻的两个熔接点之间保偏尾纤的长度为

l_x , 忽略两正交偏振态之间的公共相移^[5], 则相邻两熔接点之间保偏尾纤的琼斯矩阵表示如下:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-\frac{2\pi\Delta n'(T)l_x}{\lambda}\right] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\Delta n'(T)$ 表示变温下保偏光纤的双折射率差, 在实际中, 由于受外界环境温度变化的影响, 保偏光纤的双折射也将随之改变, 其变化关系为: $\Delta n'(T) = -(5.72 \times 10^{-7})T(t)$ ^[6]; λ 表示光源工作波长, $T(t)$ 表示随时间不断变化的温度。

4) 耦合器

考虑到实际耦合器不够理想, 则光顺向传播时, 透射光和耦合光的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{K}_{iT} = (1 - \gamma_i)^{1/2} (1 - \kappa_i)^{1/2} \exp\left(j \frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{iC} = (1 - \gamma_i)^{1/2} \kappa_i^{1/2} \exp\left(-j \frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

光逆向传播时, 透射光和耦合光的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{K}_{iT}^T = (1 - \gamma_i)^{1/2} (1 - \kappa_i)^{1/2} \exp\left(j \frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_{iC}^T = (1 - \gamma_i)^{1/2} \kappa_i^{1/2} \exp\left(-j \frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 i 取 1 和 2, 分别对应光源耦合器和 Y 波导中的分光耦合器; γ_i 和 κ_i 分别表示耦合器的附加损耗和实际分光比。

5) 起偏器

假设 Y 波导中起偏器的振幅消光比系数为 ϵ , 则其琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix}, \quad (9)$$

6) 保偏光纤环

光纤环的性能是影响干涉式光纤陀螺的精度的重要因素之一。对保偏光纤环而言, 在实际绕制过程中, 由于光纤扭曲、应力干扰、固胶工艺^[7]等因素的影响, 使得整个保偏环中存在大量的随机分布的偏振串扰点。保偏环内部的偏振串扰是由美国 General Photonics 公司提供的 PXA-1000 (分布式偏振串扰分析仪) 测量得到的, 该仪器具有光纤环缺陷点的准确定位及缺陷大小检测、保偏光纤环的双折射测量等基本功能。图 2 为 PXA-1000 测试示意图及其测得某个保偏光纤环内偏振串扰点的位置分布图, 右图中红色箭头表示高串扰点。

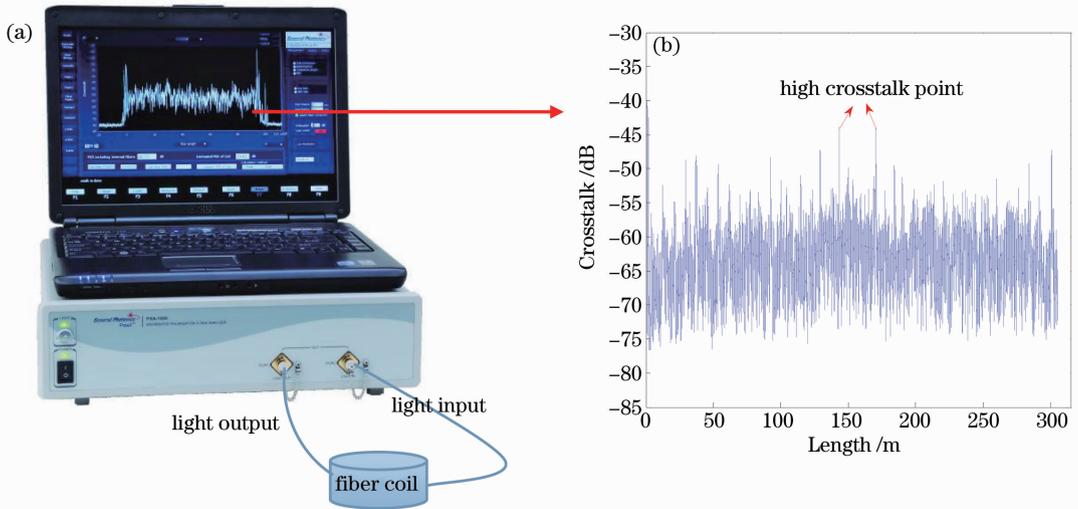


图 2 (a) PXA-1000 测试示意图及(b)其测得的某保偏光纤环内偏振串扰点的位置分布

Fig. 2 (a) Schematic diagram of PXA-1000 test and (b) distributions of polarization crosstalk points in a PM fiber coil measured by using PXA-1000

PXA-1000 测得某保偏光纤环内偏振串扰点的分布情况如表 1 所示, Fiber length 表示偏振串扰点分布的位置, Crosstalk 表示偏振串扰点的串扰强度。以往文献在建立光纤环的物理模型时, 总是假设保偏光纤环内存在一个串扰点, 或者没有考虑温度变化对保偏环内串扰点分布的影响, 故建立的模

型不切合实际。针对这种情况, 本文作如下处理: 假设光纤环中存在 N 个串扰强度不同的偏振串扰点^[8], 同时引入随外界温度变化而变化的因子 $\Delta n'(T)$, 依次将每个偏振串扰点等效为熔接点, 将每两个偏振串扰点之间的保偏光纤长度等效为每两个熔接点之间的保偏光纤长度, 建模如下:

$$\mathbf{T}_{\text{Coil}_{\text{CW}}} = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-i \frac{2\pi\Delta n'(T) \cdot l_i}{\lambda}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-i \frac{2\pi\Delta n'(T) \cdot (l_{i+1} - l_i)}{\lambda}\right] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & \sin \theta_{i+1} \\ -\sin \theta_{i+1} & \cos \theta_{i+1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-i \frac{2\pi\Delta n'(T) \cdot (L - l_N)}{\lambda}\right] \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{\text{Coil}_{\text{CCW}}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-i \frac{2\pi\Delta n'(T) \cdot (L - l_N)}{\lambda}\right] \end{bmatrix} \times \prod_{i=N}^1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-i \frac{2\pi\Delta n'(T) \cdot (l_{i+1} - l_i)}{\lambda}\right] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & \sin \theta_{i+1} \\ -\sin \theta_{i+1} & \cos \theta_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[-i \frac{2\pi\Delta n'(T) \cdot l_i}{\lambda}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad (11)$$

表 1 某保偏光纤环内偏振串扰点的位置分布
Table 1 Distributions of polarization crosstalk points in a PM fiber coil

Fiber length /m	Crosstalk /dB
0.740	-68.660
0.744	-69.166
0.748	-69.730
0.753	-70.313
0.757	-70.887
⋮	⋮
143.135	-43.979
143.139	-43.896
143.143	-43.851
143.147	-43.838
143.164	-44.147
⋮	⋮
305.402	-65.331
305.406	-65.564
305.410	-65.921
305.414	-66.390
305.418	-66.932

式中 $\mathbf{T}_{\text{Coil}_{\text{CW}}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{Coil}_{\text{CCW}}}$ 分别表示光信号在保偏光纤环中沿顺时针和逆时针传播时的传输矩阵; θ_i 和 θ_{i+1} 分别表示光纤环中第 i 个和第 $i+1$ 个偏振串扰点所对应的等效对轴误差角度; l_i 和 l_{i+1} 分别表示光纤环中第 i 个和第 $i+1$ 个偏振串扰点的分布位

置; l_n 表示光纤环中最后一个串扰点到光纤环末端的位置; L 表示光纤环的长度。

7) 相位调制器

当光信号经过相位调制器时,假设其在快轴和慢轴所具有的相位调制分别为 ϕ_{mf} 和 ϕ_{ms} ,则对于顺向传输的光波而言,相位调制器的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{CW}} = \begin{bmatrix} \exp[j\phi_{\text{mf}}(t)] & 0 \\ 0 & \exp[j\phi_{\text{ms}}(t)] \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由于相向传输的光信号各自经过相位调制器的时间差正好是它们在光纤环中的渡越时间,设这一时间为 τ ,那么对于逆向传输的光信号而言,相位调制器的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{CCW}} = \begin{bmatrix} \exp[j\phi_{\text{mf}}(t - \tau)] & 0 \\ 0 & \exp[j\phi_{\text{ms}}(t - \tau)] \end{bmatrix}. \quad (13)$$

通常器件的参数都是固定的,但受到外界温度影响,这些参数可能会发生变化,以致造成保偏光纤陀螺的漂移。以上各光学器件模型建立完成,那么进入 Y 波导前的总的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{H}_{\text{in}} = \mathbf{R}(\theta_{\text{m}3})\mathbf{F}_{\text{a}3-\text{m}3}\mathbf{R}(\theta_{\text{a}3})\mathbf{K}_{\text{rT}}\mathbf{R}(\theta_{\text{b}1}), \quad (14)$$

结合光信号在光路中传播时的路径,可以得到光信号顺向传输时总的琼斯矩阵为

$$\mathbf{G}_{\text{CW}} = \mathbf{R}^T(\theta_{\text{b}2})\mathbf{K}_{\text{rC}}^T\mathbf{F}_{\text{a}3-\text{m}3}^T\mathbf{R}^T(\theta_{\text{m}3})\mathbf{K}_{\text{rC}}^T\mathbf{M}_{\text{CW}}\mathbf{P}\mathbf{F}_{\text{m}2-\text{a}2}^T\mathbf{R}^T(\theta_{\text{a}2})\exp\left(\frac{j\phi_{\text{s}}}{2}\right)\mathbf{T}_{\text{Coil}_{\text{CW}}}\mathbf{R}(\theta_{\text{a}1})\mathbf{F}_{\text{m}1-\text{a}1}\mathbf{R}(\theta_{\text{m}1})\mathbf{K}_{\text{rT}}\mathbf{P}\mathbf{H}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \exp\left(\frac{j\phi_{\text{s}}}{2}\right), \quad (15)$$

式中 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ 分别表示光信号顺向传播时总琼斯矩阵 \mathbf{G}_{CW} 的 4 个元素, ϕ_{s} 为 Sagnac 相移。

光信号逆向传输时总的琼斯矩阵为

$$\mathbf{G}_{\text{CCW}} = \mathbf{R}^T(\theta_{b2}) \mathbf{K}_{iC}^T \mathbf{F}_{a3-m3}^T \mathbf{R}^T(\theta_{m3}) \mathbf{K}_{iT}^T \mathbf{P}^T \mathbf{F}_{m1-a1}^T \mathbf{R}^T(\theta_{a1}) \exp\left(\frac{-j\phi_s}{2}\right) \mathbf{T}_{\text{Coil_CCW}} \mathbf{R}(\theta_{a2}) \mathbf{F}_{m2-a2} \mathbf{R}(\theta_{m2}) \mathbf{M}_{\text{CCW}} \mathbf{K}_{iC} \mathbf{P} \mathbf{H}_{\text{in}} =$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \exp\left(\frac{-j\phi_s}{2}\right), \quad (16)$$

式中 $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ 分别表示光波逆向传播时总琼斯矩阵 \mathbf{G}_{CCW} 的 4 个元素。

对保偏光纤陀螺而言,光路中在光源和探测器之间的光信号的传输矩阵表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_{\text{CW}} + \mathbf{G}_{\text{CCW}} = \begin{bmatrix} S_{11} \exp\left(\frac{j\phi_s}{2}\right) + T_{11} \exp\left(\frac{-j\phi_s}{2}\right) & S_{12} \exp\left(\frac{j\phi_s}{2}\right) + T_{12} \exp\left(\frac{-j\phi_s}{2}\right) \\ S_{21} \exp\left(\frac{j\phi_s}{2}\right) + T_{21} \exp\left(\frac{-j\phi_s}{2}\right) & S_{22} \exp\left(\frac{j\phi_s}{2}\right) + T_{22} \exp\left(\frac{-j\phi_s}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

从而得到进入光电探测器的光强为

$$I_{\text{Out}} = \text{Tr}[\mathbf{G} \mathbf{J}_{\text{source}} \mathbf{G}^H], \quad (18)$$

式中 \mathbf{H} 表示矩阵的共轭转置, $\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹, $\mathbf{J}_{\text{source}}$ 表示光源的相干矩阵。

若在相位调制器中施加 $\pi/2$ 相位调制,光信号在经过相位调制器时,其在快轴和慢轴得到的相位调制满足关系:

$$\phi_{\text{mf}}(t) - \phi_{\text{mf}}(t - \tau) = \pi/2, \quad (19)$$

此时保偏光纤陀螺系统光路输出的光强表达式为

$$I_1 = I_0 + N \sin \varphi_s - M \cos \varphi_s = I_0 + I_p \sin(\phi_s + \varphi_e), \quad (20)$$

式中 I_0 为常数项, I_p 表示因干涉引起的光强变化, φ_e 表示偏振串扰引起的相位误差, M, N 则分别表示 I_p 的两个模分量。其中,

$$I_0 = (S_{11} S_{11}^* + S_{21} S_{21}^* + T_{21} T_{21}^* + T_{11} T_{11}^*) C_{xx} + (S_{12} S_{11}^* + T_{12} T_{11}^* + S_{22} S_{21}^* + T_{22} T_{21}^*) C_{yx} +$$

$$(S_{11} S_{12}^* + T_{11} T_{12}^* + S_{21} S_{22}^* + T_{21} T_{22}^*) C_{xy} + (S_{12} S_{12}^* + S_{22} S_{22}^* + T_{12} T_{12}^* + T_{22} T_{22}^*) C_{yy}, \quad (21)$$

$$M = (S_{11} T_{11}^* + T_{11} S_{11}^* + S_{21} T_{21}^* + T_{21} S_{21}^*) C_{xx} + (S_{12} T_{11}^* + T_{12} S_{11}^* + S_{22} T_{21}^* + T_{22} S_{21}^*) C_{yx} +$$

$$(S_{11} T_{12}^* + T_{11} S_{12}^* + S_{21} T_{22}^* + T_{21} S_{22}^*) C_{xy} + (S_{12} T_{12}^* + T_{12} S_{12}^* + S_{22} T_{22}^* + T_{22} S_{22}^*) C_{yy}, \quad (22)$$

$$N = i(-S_{11} T_{11}^* + T_{11} S_{11}^* - S_{21} T_{21}^* + T_{21} S_{21}^*) C_{xx} + (-S_{12} T_{11}^* + T_{12} S_{11}^* - S_{22} T_{21}^* + T_{22} S_{21}^*) C_{yx} +$$

$$(S_{11} T_{12}^* + T_{11} S_{12}^* - S_{21} T_{22}^* + T_{21} S_{22}^*) C_{xy} + (S_{12} T_{12}^* + T_{12} S_{12}^* - S_{22} T_{22}^* + T_{22} S_{22}^*) C_{yy}, \quad (23)$$

$$I_p = |(T_{11} S_{11}^* + T_{21} S_{21}^*) C_{xx} + (T_{12} S_{11}^* + T_{22} S_{21}^*) C_{yx} + (T_{11} S_{12}^* + T_{21} S_{22}^*) C_{xy} +$$

$$(T_{12} S_{12}^* + T_{22} S_{22}^*) C_{yy}|, \quad (24)$$

$$\varphi_e = \arctan\left(\frac{M}{N}\right) = \arg[(T_{11} S_{11}^* + T_{21} S_{21}^*) C_{xx} + (T_{12} S_{11}^* + T_{22} S_{21}^*) C_{yx} + (T_{11} S_{12}^* + T_{21} S_{22}^*) C_{xy} +$$

$$(T_{12} S_{12}^* + T_{22} S_{22}^*) C_{yy}]. \quad (25)$$

(21)、(22)、(23)、(24)、(25) 式中的 $T_{11}^*, T_{12}^*, T_{21}^*, T_{22}^*$ 以及 $S_{11}^*, S_{12}^*, S_{21}^*, S_{22}^*$ 分别对应 $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ 以及 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ 的共轭转置。

(25) 式给出了变温下保偏光纤陀螺光路偏振串扰误差的形式表达式。由于其展开结果复杂,在此不再赘述。

2.2 变温下偏振串扰误差对零漂及随机游走的分析

由(20)式可知,变温下由偏振串扰引起的相位误差 φ_e 对造成保偏光纤陀螺零漂有着直接的贡献,这主要归因于光路系统损耗、各器件保偏尾纤之间熔接点对轴角度误差和器件不理想以及光信号在光路中分别沿顺向和逆向传播时,各因素差异性集中

体现的结果^[2]。

根据 GJB2426A-2004《光纤陀螺仪测试方法》中对零漂的定义^[9],如(26)式,可以计算出变温下保偏光纤陀螺光路中因偏振串扰误差而引起的陀螺零漂。

$$B_s = \frac{1}{K} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi})^2 \right]^{1/2}, \quad (26)$$

式中 B_s 表示保偏光纤陀螺仪的零漂,单位为 $(^\circ)/\text{h}$, n 为采样点数, $K = 2\pi LD/(\bar{\lambda}c)$ 为标度因数,其中 L, D 分别表示光纤环的长度和直径, $\bar{\lambda}$ 表示光源平均波长, c 表示真空中的光速; $\bar{\phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_i$ 是输出相位 ϕ_i 的平均值。

由于系统光路偏振串扰的存在,使得光源光功率率发生变化,导致光电探测器探测到的光功率率会发生变化,进而会对光纤陀螺的随机游走系数(RWC, C_{RW})产生影响,另外光路偏振串扰对光源平均波长

和光谱宽度^[10]也会产生一定的影响,从而会对RWC产生间接的影响作用。利用(27)式可以大致估算出光路偏振串扰对RWC的影响。

$$C_{RW} = \frac{\bar{\lambda}c}{R_D P_0 \sin(\varphi_b) 2\pi LD} \cdot \sqrt{\frac{4k_B T}{R} + 2e[i_{\text{dark}} + R_D P_0 (1 + \cos \varphi_b)] + \frac{R_D^2 P_0^2 (1 + \cos \varphi_b)^2 \lambda^2}{c\Delta\lambda}}, \quad (27)$$

式中 k_B 表示玻尔兹曼常数, e 表示电子电量, T 表示温度, R_D 表示探测器响应度, R 表示探测器跨阻抗, i_{dark} 表示探测器暗电流, P_0 表示到达探测器功率, φ_b 表示相位偏置工作点, $\Delta\lambda$ 表示光谱宽度。在实验室中可用 AQ6317C 光谱分析仪测量光谱宽度变化量,用 YL3200 手持式光功率计测量光功率变化量。

3 实验结果及分析

温度的变化是造成陀螺零漂的重要因素^[11-12]。当温度变化时,保偏光纤折射率、光纤环骨架的热膨胀系数以及光纤环内部固胶的杨氏模量均会受到影响而发生改变^[13],特别是在保偏环内,由于温度的变化会引起环内热应力的二次分布,造成环内偏振串扰点的二次分布,当光信号在环内传输时,将会影响光信号的传输偏振态,进而对光纤陀螺精度造成影响。

为验证上述模型的合理性,本实验针对 4 个保偏环在全温范围内进行实测,分别测得 4 个保偏环在全温范围($-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$)每隔 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 一个温度

点下的偏振串扰和零偏数据,然后将偏振串扰数据分别代入到上述模型进行计算得到各个温度点下的静态参数(零偏稳定性与随机游走系数),然后与利用相应零偏数据进行 Allan 方差分析法拟合^[5]得到的静态参数进行比较,以期达到验证的目的。

3.1 全温下偏振串扰测试及估算

将 4 个保偏环分别放置在温箱内,设置温箱温度从 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 开始,每隔 $10\text{ }^\circ\text{C}$,待温箱温度稳定后,利用 PXA-1000 分别测试并保存 4 个保偏环的偏振串扰数据,直至温箱温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时结束,这样就得到在不同温度点下各保偏环的偏振串扰数据。图 3 为保偏环 A 在高、低温及常温下偏振串扰的对比图,从图 3 可知,相对于常温,在高温或低温时,保偏环 A 出现了个别高串扰点,这样就拉高了整体的偏振串扰强度。这是由于在高低温下光纤环内部固胶的性能发生了改变,使得光纤环中的应力出现了二次分布,这样就造成了个别高串扰点的存在。

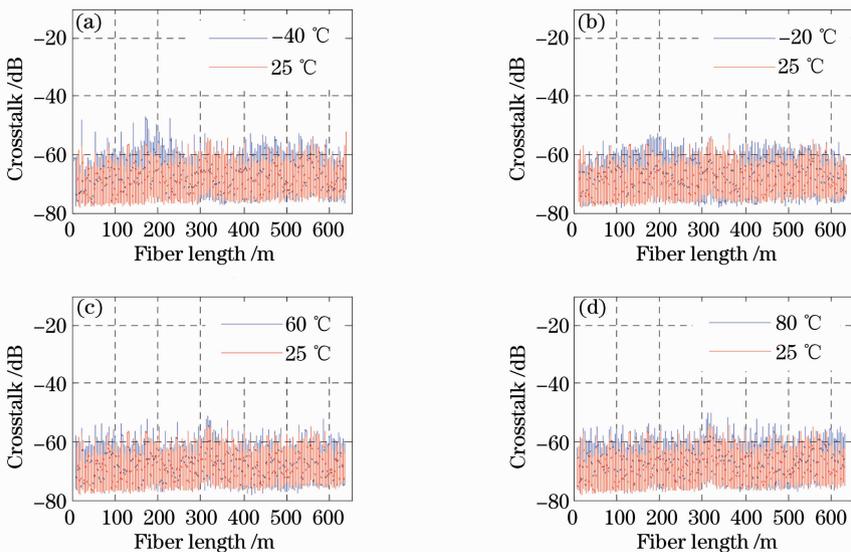


图 3 高、低温及常温下保偏环 A 偏振串扰的对比

Fig. 3 Comparison of crosstalk of PM fiber coil A under high and low temperatures and room temperature

表 2 为不同温度点下保偏环 A 的偏振串扰情况,可以看出高温($60\text{ }^\circ\text{C} \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$)、低温($-40\text{ }^\circ\text{C}$)下

偏振串扰的均值明显比常温下高。并且串扰点强度 $I_{\text{crosstalk}}$ 超过 -55 dB 的个数也增加了很多。

表 2 在不同温度点下保偏光纤环 A 的偏振串扰情况
Table 2 Polarization crosstalk of PM fiber coil A in different temperatures

Temperature / °C	Crosstalk average /dB	Crosstalk maximum / dB	$I_{\text{crosstalk}} > -55 \text{ dB}$	$I_{\text{crosstalk}} > -50 \text{ dB}$
25	-69.00	-54.18	9	0
-40	-66.59	-47.05	69	9
-30	-66.87	-51.25	29	0
-20	-66.86	-52.90	24	0
-10	-66.65	-50.95	30	0
0	-66.41	-50.61	41	0
10	-65.90	-51.56	39	0
20	-66.64	-51.79	27	0
30	-67.41	-52.51	12	0
40	-67.48	-51.88	17	0
50	-67.85	-51.93	21	0
60	-67.36	-51.09	29	0
70	-67.13	-49.42	44	4
80	-66.54	-50.03	44	0

在不同温度点下, 4 个环偏振串扰强度的均值

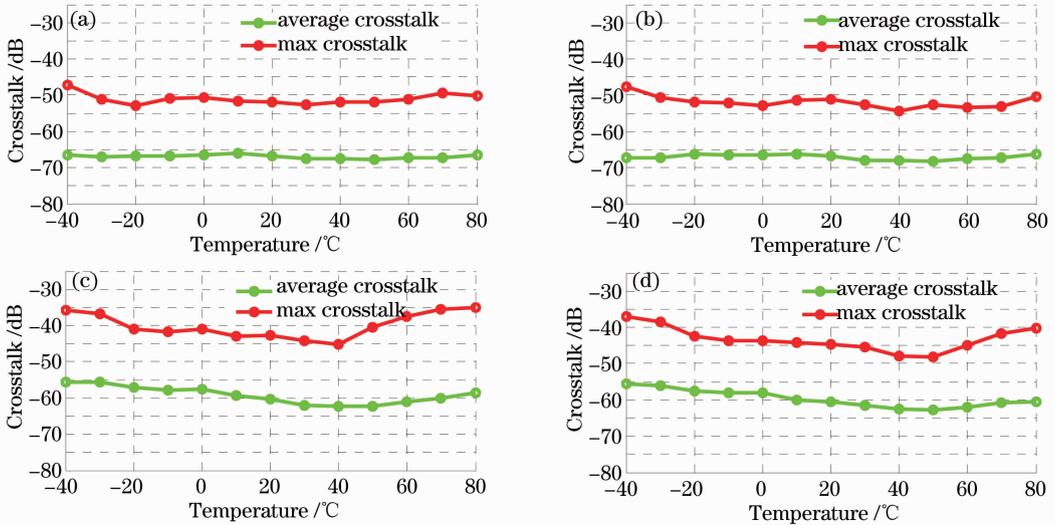


图 4 全温下 4 个保偏环串扰平均值(绿色)与串扰最大值(红色)的变化

Fig. 4 Changes of the average value(green) and maximum value(red) of polarization crosstalk of four PM fiber coils under full temperatures

表 3 变温下 4 个保偏光纤环的零漂及随机游走系数的估算

Table 3 Estimation of zero drift and RWC of four PM fiber coils in variable temperature fields

Temperature / °C	A		B		C		D	
	Bias / [(°)/h]	RWC / [(°)/√h]						
-40	0.044	0.0049	0.045	0.0046	0.079	0.012	0.093	0.0098
-20	0.046	0.0047	0.044	0.0053	0.064	0.0056	0.073	0.0084
0	0.045	0.0048	0.045	0.0049	0.054	0.0042	0.064	0.0086
20	0.045	0.0052	0.045	0.0052	0.033	0.0082	0.043	0.0085
40	0.043	0.0053	0.040	0.0048	0.034	0.0063	0.041	0.0063
60	0.047	0.0052	0.039	0.0054	0.056	0.0062	0.034	0.0078
80	0.045	0.0057	0.046	0.0039	0.042	0.0081	0.043	0.0059

和最大值也将有所变化,如图 4 所示。并且在高温和低温下,4 个环内会出现个别串扰强度较高的点,如图 5 所示,在低温 -40 °C 附近,串扰强度超过 -55 dB 的个数明显比其他温度区间内的多,从高温 60 °C 开始偏振串扰出现恶化趋势,串扰强度超过 -55 dB 的个数开始爬升。原因是高温或者低温时,光纤环内部固胶的杨氏模量存在较大的突变,固胶膨胀或者收缩作用^[7]产生的应力影响了光纤环的弯曲半径^[14],致使环内引入高串扰点,这样环内偏振串扰强度整体的均值和最大值将会发生变化,总体呈现升高趋势。

变温下保偏光纤陀螺偏振串扰对其零漂及随机游走的估算:将 4 个保偏环在 -40 °C, -20 °C, 0 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C 下测得的偏振串扰数据分别代入到上述模型进行计算,假设当光源偏振度为 0.9,输入光强度为 1,光源耦合器和 Y 波导耦合器分光比均为 0.5:0.5, Y 波导消光比取 35 dB,

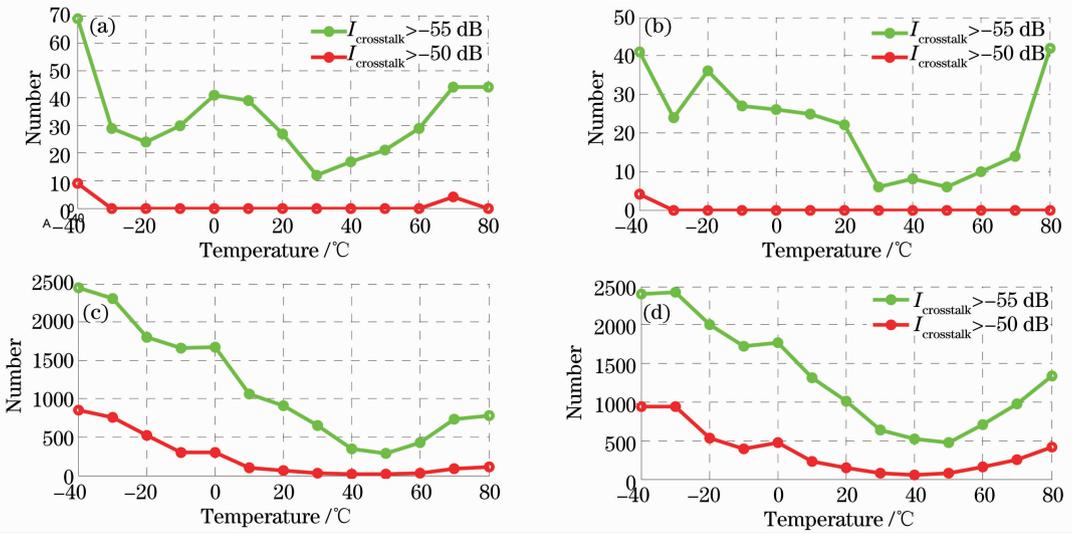


图 5 全温下 4 个保偏环偏振串扰超过阈值点 (-55 dB 和 -50 dB) 个数的变化

Fig. 5 Changes of the number of polarization crosstalk which exceeds a threshold point (-55 dB and -50 dB) of four PM fiber coils under full temperatures

各器件保偏尾纤之间的熔接点对轴误差角度均取 1° , 各保偏尾纤长度均为 1 m, 光源工作波长为 1550 nm, 仿真温度分别为 -40 $^{\circ}\text{C}$, -20 $^{\circ}\text{C}$, 0 $^{\circ}\text{C}$, 20 $^{\circ}\text{C}$, 40 $^{\circ}\text{C}$, 60 $^{\circ}\text{C}$, 80 $^{\circ}\text{C}$, 为符合实际情况, 假设每个温度在自身上下随机浮动, 保偏光纤双折射随温度变化系数取 -5.72×10^{-7} 时, 计算出变温下 4 个 (分别编号为 A、B、C、D) 保偏光纤环的零漂及随机游走系数值如表 3 所示, 其中从表 3 的结果来看, 保偏环 A 和 B 在全温下的性能比保偏环 C 和 D 的好, 而对于保偏环 C 与保偏环 D, 前者性能也比后者好。

3.2 变温下光纤陀螺零偏测试

3.2.1 温度梯度对陀螺性能的影响

将 4 个光纤环分别放置在温箱内, 不启动温箱, 常温下分别采集 4 个保偏光纤环的零偏数据如图 6 所示, 常温下 4 个保偏环的测试静态参数如表 4 所示, Bias stability (Std) 表示标准差分析得到的零偏稳定性, Bias stability (Allan variance) 表示 Allan 方差分析法拟合得到的零偏稳定性; 调节温箱温度从 -40 $^{\circ}\text{C}$, 然后再阶梯升温至 60 $^{\circ}\text{C}$ 停止, 实验过程持续了近 5 h. 启动陀螺系统, 分别采集了变温下 4 个

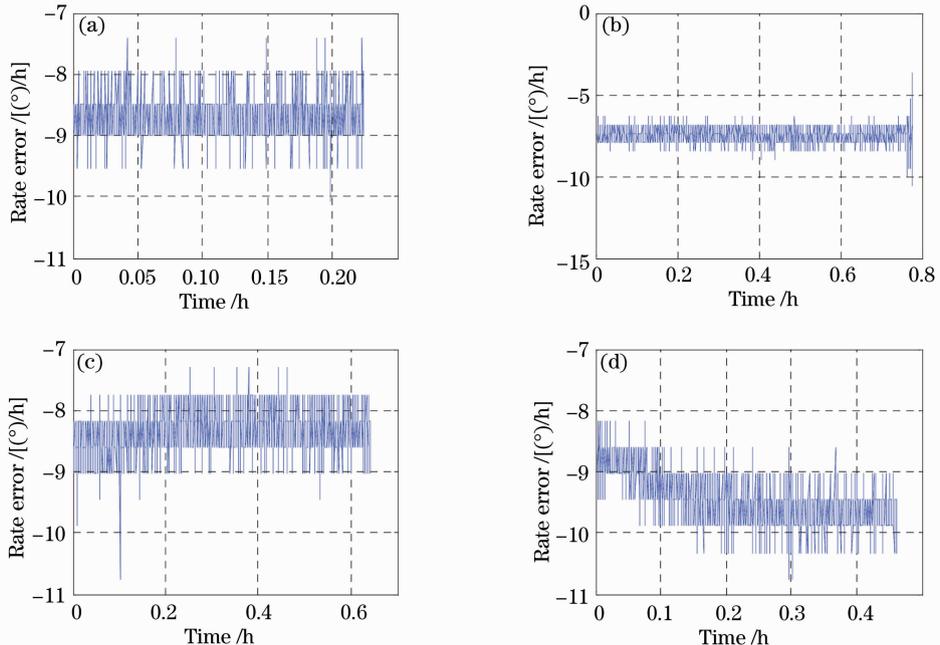


图 6 常温下 4 个保偏环的零偏测试结果

Fig. 6 Bias test results of four fiber coils at room temperature

保偏光纤环的零偏数据,图 7 表示零偏与温度的变化关系,其中红线表示温度,蓝线表示速率误差(零偏)。受温度梯度的影响,光纤环的输出将发生变化,图 8 给出了 4 个保偏环的零偏随温度梯度的变化关系,其中红线表示温度梯度 ΔT ,蓝线表示速率误差。由图 8 中可见,当温度梯度出现骤变时,陀螺的零偏也会随之骤变(图中绿色线圈标示),如果陀

螺的性能不好,那么在大的温度梯度冲击下,陀螺零偏稳定性将会恶化,如图 8 中保偏环 D 所示,此环性能较差。具体测试静态参数如表 5 所示。对比表 4 和表 5 可以发现,变温下 4 个保偏环静态参数明显比常温下的差。主要的原因是变温下保偏环内部固胶受到温度的影响,特别是在高、低温下,固胶会发生热膨胀和收缩,使得光纤环内部产生了额外

表 4 常温下 4 个保偏环的静态参数

Table 4 Static parameters of four fiber coils at room temperature

	A	B	C	D
Bias stability (Std) / [°/h]	0.406	0.441	0.433	0.421
Bias stability (Allan variance) / [°/h]	0.021	0.038	0.068	0.045
RWC / [(°)/√h]	0.003	0.003	0.004	0.004

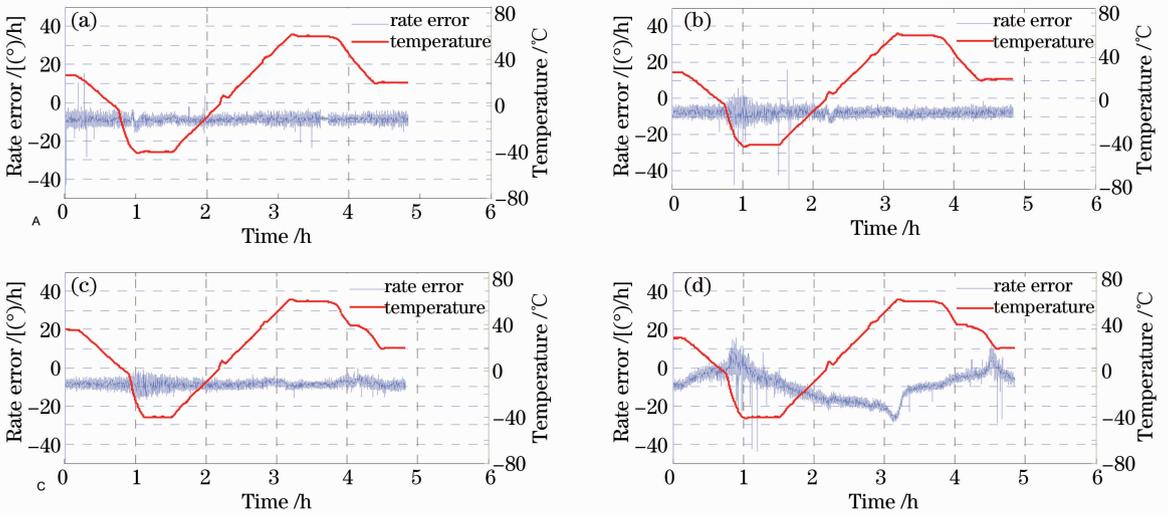


图 7 变温下 4 个保偏环的零偏测试结果

Fig. 7 Bias test results of four fiber coils in variable temperature fields

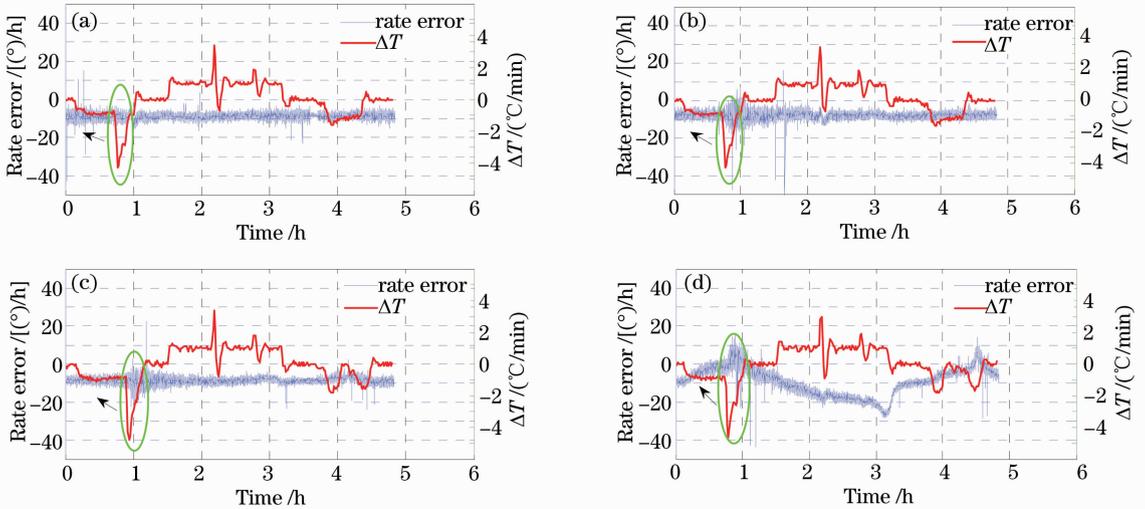


图 8 4 个保偏光纤环零偏随温度梯度的变化

Fig. 8 Changes of four fiber coils bias with temperature gradient

应力,改变了光纤的弯曲半径^[14],保偏环内部的串扰点也将重新分布,并且在应力大的地方呈现高串扰点,当光在保偏环内部传输时,在高串扰点处光的传输偏振态将发生大的改变,这样就影响了陀螺的输出,进而会对陀螺的性能产生影响。

对比表 5 中变温下 4 个保偏环的静态参数,保偏环 A 的性能最好,保偏环 D 的性能最差,原因可能是保偏环 D 在绕制工艺及涂胶的均匀度上可能存在一定的问题。

表 5 变温下 4 个保偏环的静态参数

Table 5 Static parameters of four fiber coils in variable temperature fields

	A	B	C	D
Bias stability (Std) /[(°)/h]	1.605	1.885	2.952	7.303
Bias stability (Allan variance) /[(°)/h]	0.342	0.446	0.363	0.909
RWC /[(°)/√h]	0.023	0.054	0.059	0.072

3.2.2 全温下光纤陀螺零偏采集

将 4 个保偏环依次接入系统后分别放置在温箱内,设置温箱温度从-40 °C 开始,每隔 10 °C,待温箱温度稳定后,开始采集并保存 4 个保偏环的零偏数据,直至温箱温度为 80 °C 时结束,每个温度点下

采集时间为 1 h,这样就得到在不同温度点下各保偏环的零偏数据。利用 Allan 方差分析法对零偏数据进行拟合计算出 4 个保偏环的零偏稳定性及随机游走系数如表 6 所示。

表 6 全温下 4 个保偏环的静态参数

Table 6 Static parameters of four fiber coils under full temperatures

Temperature / °C	A		B		C		D	
	Bias / [(°)/h]	RWC / [(°)/√h]						
-40	0.349	0.0058	0.356	0.0059	0.994	0.0166	1.021	0.0170
-20	0.360	0.0060	0.353	0.0059	0.736	0.0123	0.806	0.0134
0	0.358	0.0060	0.359	0.0060	0.699	0.0116	0.749	0.0125
20	0.355	0.0059	0.356	0.0059	0.528	0.0088	0.540	0.0090
40	0.341	0.0057	0.346	0.0058	0.442	0.0074	0.453	0.0076
60	0.345	0.0057	0.347	0.0058	0.457	0.0076	0.502	0.0084
80	0.361	0.0060	0.357	0.0059	0.521	0.0087	0.658	0.0110

对比表 3 和表 6 及图 9(图中 Allan 表示 Allan 方差拟合结果,Sim 表示仿真结果)可以看出,仿真结果比 Allan 方差拟合出来的结果小,原因是在实际测试过程中可能还存在其他因素的影响,比如其

他类型的偏振误差、噪声(环境扰动、电路噪声等)造成零偏波动。但仿真结果可以大致反映保偏环的实际测试效果,即偏振串扰均值低,高串扰点少,往往可以得到较好的静态参数,反之得到的静态参数往

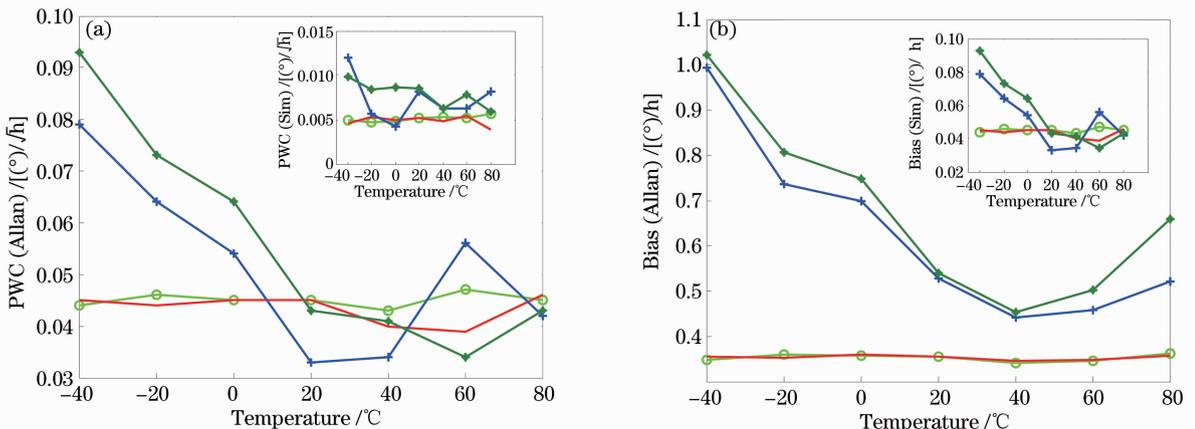


图 9 全温下 4 个环仿真结果与 Allan 方差拟合结果对比。(a) RWC; (b) Bias

Fig. 9 Simulation results compared with the Allan variance fitting results under full temperatures. (a) RWC; (b) Bias

往比较差,故该理论模型是合理性的。

4 结 论

针对保偏光纤陀螺光路偏振串扰误差对其静态参数影响的问题以琼斯矩阵和相干矩阵为基础,综合考虑导致光路偏振串扰误差的几种因素,并结合外界温度干扰因素,建立了保偏光纤陀螺的光路传输模型。实验研究了全温下保偏环的偏振串扰和静态参数之间的关系,并将偏振串扰带入模型进行仿真得到的静态参数与将全温下零偏数据进行拟合得到的静态参数进行了对比;研究了变温下保偏光纤陀螺的静态参数相对于常温下的变化情况。实验结果表明,高、低温下保偏环的偏振串扰的均值相对于常温时偏振串扰的均值会明显提高,并且会出现个别高串扰点。变温下保偏环的静态参数相对于常温会变差。对比结果表明,受其他不确定因素的影响,理论估算结果比实际测试结果小,但可以大致反映陀螺的性能,理论模型具有合理性。

致谢 感谢苏州光环科技有限公司对本文实验工作提供的支持与帮助。

参 考 文 献

- 1 Li Yan, Zhang Chunxi, Ou Pan, *et al.*. Research on the influence of the source degree of polarization on the bias stability of interference fiber optical gyroscope [J]. *Optical Technique*, 2006, 11(6): 893-899.
李彦,张春熹,欧攀,等.光源偏振度对光纤陀螺零漂影响的研究[J].*光学技术*, 2006, 11(6): 893-899.
- 2 Han Biao, Liu Jifang, Ma Lin, *et al.*. Physical model of optical system in interferometric fiber-optic gyro [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 626-631.
韩彪,刘继芳,马琳,等.干涉式光纤陀螺光路系统的物理模型[J].*应用光学*, 2010, 31(4): 626-631.
- 3 Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong, *et al.*. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0706003.
姜暖,李智忠,杨华勇,等.保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法对比研究[J].*光学学报*, 2012, 32(7): 0706003.

- 4 Li Xuyou, Zhang Chen, Zhang Yong. Research and realization on optical system of single axis fiber optic gyroscope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 52-55.
李绪友,张琛,张勇,等.单轴光纤陀螺光学结构的研究与实现[J].*光电工程*, 2009, 36(4): 52-55.
- 5 Wang Wei. *Interferometric Fiber Optical Gyroscope Technology* [M]. Beijing: Chinese Aerospace Press, 2010. 69-80.
王巍.干涉型光纤陀螺仪技术[M].北京:中国宇航出版社, 2010. 69-80.
- 6 Ding Zhenyang, Zhuo Meng, X Steve Yao, *et al.*. Accurate method for measuring the thermal coefficient of group birefringence of polarization-maintaining fibers [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(11): 2173-2175.
- 7 Yu Qiang, Zhang Chen, He Zhou, *et al.*. Influence of coating adhesive on thermal stress interference birefringence of optical fiber coil [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0205007.
于强,张琛,何周,等.固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响[J].*中国激光*, 2011, 38(2): 0205007.
- 8 Xiaobin Xu, Chunxi Zhang, Xiong Pan. Study of reflection error in closed-loop polarization-maintained interferometric fiber optic gyroscope [J]. *Optik*, 2009, 121(13): 1170-1175.
- 9 中华人民共和国国家军用标准. 光纤陀螺仪测试方法 GJB 2426A-2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- 10 Suo Xinxin, Yang Yuanhong, Yang Mingwei, *et al.*. Relative intensity noise characteristic of broadband sources and its effect on performance of closed-loop fiber optic gyroscope [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605009.
索鑫鑫,杨远洪,杨明伟,等.宽谱光源相对强度噪声及对闭环光纤陀螺影响研究[J].*中国激光*, 2014, 41(6): 0605009.
- 11 Wang Junpu, Jin Zhihua, Tian Weifeng. Multi-variable modeling strategy for the fiber optic gyro temperature-dependent drift [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(5): 66-69.
王俊璞,金志华,田蔚风.光纤陀螺温度漂移的多变量模型[J].*光电工程*, 2008, 35(5): 66-69.
- 12 Li Jichen, Gao Fengqi, Wang Guanglong, *et al.*. Analysis of dynamic Allan variance for fiber optic gyro under vibration and variable temperature conditions [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0908004.
李冀辰,高凤岐,王广龙,等.光纤陀螺振动和变温条件下的DAVAR分析[J].*中国激光*, 2013, 40(9): 0908004.
- 13 Li Xuyou, Zhang Chen, He Zhou, *et al.*. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 1053-1057.
李绪友,张琛,何周,等.基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J].*中国激光*, 2010, 37(4): 1053-1057.
- 14 Wu Changxin, Yang Mingwei, Yang Yuanhong, *et al.*. Effect of fiber bend on interferometric fiber optical gyroscopes performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0306005.
吴长莘,杨明伟,杨远洪,等.光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响[J].*光学学报*, 2014, 34(3): 0306005.

栏目编辑: 王晓珉