

消偏光纤陀螺偏振串扰误差分析及实验研究

李子忠¹ 李志宏^{2,3} 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

摘要 以琼斯矩阵为基础,建立了双消偏光纤陀螺(DFOG)系统的光路传输模型,推导出偏振串扰误差的理论表达式。仿真分析了消偏器的45°角误差,偏振串扰点功率耦合,Y波导有限消光比以及环内偏振旋转角对消偏光纤系统偏振串扰误差的影响。实验验证了两消偏器45°角之间的相对偏差以及温度对陀螺零漂的影响。结果表明,两消偏器45°角之间的相对偏差越大、温度梯度越大,对陀螺精度的影响越大。

关键词 光通信;光纤陀螺;琼斯矩阵;消偏器;偏振串扰

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.060604

Analysis of Depolarized Fiber Optical Gyro's Polarization Crosstalk Error and Experimental Research

Li Zizhong¹ Li Zhihong^{2,3} Li Guohua¹

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

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

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

Abstract Based on the Jones matrix, the optical transmission model of dual depolarized fiber optical gyros (DFOGs) is built and the theoretical expression of polarization crosstalk error is derived. The effect of the polarization crosstalk error caused by the 45° angle error of depolarizer, the power coupling of polarization crosstalk point, the limited Y waveguide chip extinction ratio and the angle of polarization rotation of the fiber coil on DFOG are simulated and analyzed. Experiments demonstrate the effect of 45° angle relative error between two depolarizers and temperature on DFOG zero drift. Results show that the greater the 45° angle relative error between two depolarizers changes and the higher temperature gradient is, the greater influence on the precision of DFOG will become.

Key words optical communications; depolarized fiber optic gyro; Jones matrix; depolarizer; polarization crosstalk

OCIS codes 060.2370; 060.2800; 260.2430

1 引言

干涉式光纤陀螺是一种用于测量物体方位和姿态的角速度传感器^[1],在航空、航天、航海等诸多军用领域以及民用领域中^[2]都有着极其重要的地位。干涉式光纤陀螺可分为保偏型和消偏型^[3]。保偏光纤陀螺中,光波具有很好的线偏振态保持性,能够有效降低系统偏振串扰误差,因而精度高,但其成本也高。消偏光纤陀螺(DFOG)在成本上占据了很大的优势,但其系统中偏振串扰误差较为复杂,对光纤陀螺的零偏及零偏稳定性有很大的制约性^[4]。因此,在节约成本的前提下,必须抑制光路中的偏振串扰误差,才能制作性能优良

收稿日期: 2013-12-24; 收到修改稿日期: 2014-01-25; 网络出版日期: 2014-05-20

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: guohua_li55@yahoo.com

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

的消偏光纤陀螺。

目前关于消偏光纤陀螺系统偏振误差已有诸多报道^[5-7],本文在已有研究的基础上,结合理论和实验,对系统偏振串扰引起的相位误差进行了仿真和实验验证,对今后消偏光纤陀螺的研究和制作具有一定的理论和实际意义。

2 理论分析

2.1 工作原理

如图1所示,消偏光纤陀螺系统的光路主要由超辐射发光二极管(SLD)、耦合器、Y波导、消偏环和光电二极管(PD)组成,其中消偏环由消偏器(图中红色部分)和单模光纤环组成,图中1,2,6,8,9,11,12是器件之间的熔接点,3,4,5是Y波导内部的熔接点,7,10分别对应消偏器1和消偏器2的45°角熔接点,P表示集成在Y波导内部前端的起偏器。

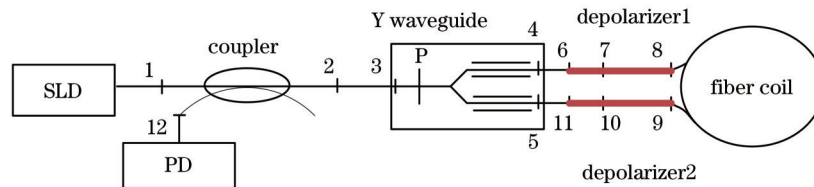


图1 消偏光纤陀螺的光路原理图

Fig.1 Schematic of depolarized gyros

其工作原理是,光源射出的光信号经光纤耦合器进入集成光学芯片,通过起偏器起偏并在Y分支处分成两束光,分别经过两端消偏器45°角时,输入波列沿正交主轴等量分布,当光程大于消偏长度时,输出波列的两种正交偏振态从时域上被拉开而不再发生重叠,这样就减少了耦合波列之间的相干度。若消偏器中两段保偏光纤双折射主轴以45°角理想对准时,将使出射光的相干度为零。但实际光路中因Y波导的有限消光比以及尾纤之间熔接点总会存在对准角度误差,使得波列在传输过程中发生偏振串扰,导致主波列之间、耦合波列之间以及耦合波列与主波列之间发生干涉,进而引起偏振串扰误差,这样就极大地制约了消偏光纤陀螺系统的精度。

2.2 模型建立

以琼斯矩阵为基础,系统地建立了消偏光纤陀螺光路传输模型。不计光路损耗,假设进入Y波导之前的光波为单色光^[8],其偏振度为 d ,则输入光波归一化琼斯矢量表示为

$$\mathbf{E}_0(t) = \begin{bmatrix} \sqrt{(1+d)/2} \\ \sqrt{(1-d)/2} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

考虑到实际耦合器不够理想^[9],则对于透射波和耦合波的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{C}_{Ti} = (1-\gamma)^{\frac{1}{2}}(1-\chi)^{\frac{1}{2}} \exp\left(j\frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_{Ci} = (1-\gamma)^{\frac{1}{2}}\chi^{\frac{1}{2}} \exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 γ 和 χ 分别表示耦合器的损耗和实际分光比,式中 i 取1和2,分别表示光源耦合器和Y波导中的分光耦合器。

Y波导中起偏器的琼斯矩阵为 \mathbf{P} ,表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 ε 表示Y波导的振幅消光系数,Y波导消光比 $\eta = -10 \lg \varepsilon^2$ (dB),理想情况下, $\varepsilon = 0$ 表示起偏器的消光比为无穷大。

假设光在单模光纤环中传播时,光波偏振面旋转角为 α ,则光纤环的偏振旋转矩阵 \mathbf{F}_{coil} 表示为

$$\mathbf{F}_{\text{coil}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

考虑到光路中各器件之间有很多的熔接点,当光波经过这些熔接点时将发生偏振串扰,对应的琼斯矩阵 R_i ($i=1\sim 12$)表示为

$$R_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix}. \quad (6)$$

忽略保偏光纤快慢轴之间的平均相移^[10],消偏器 1 沿顺时针和逆时针的传输矩阵分别为

$$T_{1cw} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\beta L_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i2\Delta\beta L_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \exp(-i2\Delta\beta L_1) \\ -\sin \theta_1 \exp(-i\Delta\beta L_1) & \cos \theta_1 \exp(-i3\Delta\beta L_1) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$T_{1ccw} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i2\Delta\beta L_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\beta L_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \exp(-i\Delta\beta L_1) \\ \sin \theta_1 \exp(-i2\Delta\beta L_1) & \cos \theta_1 \exp(-i3\Delta\beta L_1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

同理对消偏器 2,沿顺时针和逆时针的传输矩阵分别表示为:

$$T_{2cw} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i2\Delta\beta L_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\beta L_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \exp(-i\Delta\beta L_2) \\ \sin \theta_2 \exp(-i2\Delta\beta L_2) & \cos \theta_2 \exp(-i3\Delta\beta L_2) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$T_{2ccw} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\beta L_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i2\Delta\beta L_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \exp(-i2\Delta\beta L_2) \\ -\sin \theta_2 \exp(-i\Delta\beta L_2) & \cos \theta_2 \exp(-i3\Delta\beta L_2) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

保偏光纤中快慢轴的传播常数不同^[11-12],式中 $\Delta\beta$ 表示保偏光纤中快慢轴的传播常数之差,实验证明,其大小与外界环境温度成线性关系^[13]; L_1 和 L_2 分别表示消偏器 1 和消偏器 2 中第一段保偏光纤的长度; θ_1 和 θ_2 分别表示消偏器 1 和消偏器 2 中两段保偏光纤双折射主轴之间的夹角,理想情况下, $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 。

假设 Sagnac 相移为 φ_s ,进行偏置相移为 $\pi/2$ 的相位调制时,得到光波沿光路顺时针和逆时针传播时总的传输矩阵分别表示如下:

$$E_{cw} = R_{12}^T C_{c1} R_2^T R_3^T P C_{c2} R_5^T R_{11}^T T_{2cw} R_9^T F_{coil} R_8 T_{1cw} R_6 R_4 C_{T2} P R_3 R_2 C_{T1} R_1 E_0(t) \exp(j\pi/4) = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$E_{ccw} = R_{12}^T C_{c1} R_2^T R_3^T P C_{T2} R_4^T R_6^T T_{1ccw} R_8^T F_{coil} R_9 T_{2ccw} R_{11} R_5 C_{c2} P R_3 R_2 C_{T1} R_1 E_0(t) \exp(j\varphi_s) \exp(-j\pi/4) = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \exp(j\varphi_s). \quad (12)$$

式中 S_1 和 S_2 分别表示矩阵 E_{cw} 的两个元素, D_1 和 D_2 分别表示矩阵 E_{ccw} 的两个元素。

根据干涉理论,整个系统的输出干涉光强为

$$I = (E_{cw} + E_{ccw})^* (E_{cw} + E_{ccw}) = I_0 + I_c \sin(\phi_s + \varphi_e), \quad (13)$$

式中*为矩阵的共轭转置, I_0 为常数项, I_c 为干涉引起的光强变化, φ_e 为因偏振串扰引起的相位误差。

$$I_c = |S_1^* D_1 + S_2^* D_2|, \quad (14)$$

$$I_0 = |S_1^* S_1 + D_1^* D_1 + S_2^* S_2 + D_2^* D_2|, \quad (15)$$

$$\varphi_e = \arg(S_1^* D_1 + S_2^* D_2), \quad (16)$$

式中 D_1^* 和 D_2^* 分别为矩阵 E_{ccw} 的共轭转置矩阵 E_{ccw}^* 的两个元素。

由于 φ_e 的展开式比较繁杂,在此不再赘述。

3 仿真分析

3.1 两消偏器 45°角之间的相对偏差对相位误差的影响

图 2 中给出了在不同消光比下,两消偏器 45°角之间的相对偏差 ($\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$) 对相位误差影响的情况,图中横坐标表示消光比,纵坐标表示相位误差。

假设光源输出偏振度(DPP)为 0.9,消偏环中引入偏振旋转角 α 为 0.1°,起偏器的消光比在 15~60 dB 之间变化,两消偏器 45°角之间的相对偏差在 $\pm 0.2^\circ \sim \pm 0.6^\circ$ 之间波动,由图 2 可知,当消光比一定时,系统的相位误差随两消偏器 45°角之间的相对偏差的增大而增大;当两消偏器 45°角之间的相对偏差一定时,系统的相位误差随消光比的增大而缓慢减小,并且当消光比大于 60 dB 以后,产生的相位误差趋于零。因此,在制作消偏器时,严格控制消偏器的 45°角对准误差,尽量减小两个消偏器的 45°角之间的相对偏差,同时使用消光比更高的 Y 波导,可以大大降低系统中的相位误差

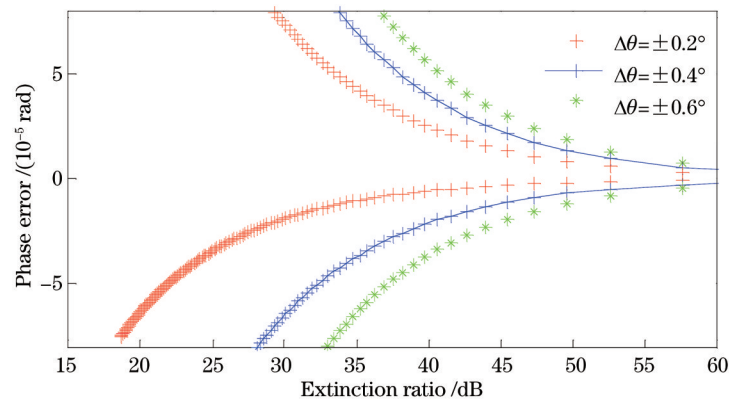


图2 消偏器45°角相对误差引起的相位误差

Fig.2 Phase error caused by 45° angle relative error of depolarizer

3.2 消偏环内偏振旋转角对陀螺相位误差的影响

图3为消光比 E 取不同值且消偏环内光波偏振旋转角在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 之间变化时,消偏光纤陀螺相位误差的变化情况。由图3可知,当 E 值一定时,相位误差随光波偏振旋转角的增大而减小,在偏振旋转角介于 $25^\circ\sim 45^\circ$ 之间,相位误差与偏振旋转角几乎成线性递减关系。当环内光波偏振旋转角一定时, E 值越大,系统内产生的相位误差越小。因此单模环对系统相位误差的影响很大,在绕制过程中应尽量减小光纤受外界影响以及因光纤层与层之间的相互干扰而引入的串扰误差。

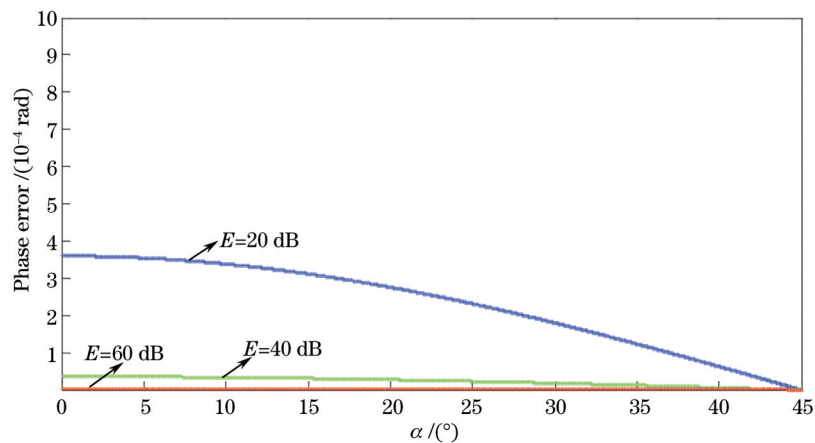


图3 相位误差与偏振旋转角的关系

Fig.3 Relationship between phase error and angle of polarization rotation

3.3 偏振串扰点的功率耦合对陀螺相位误差的影响

图4是熔接点2处的功率耦合与相位误差的关系图。由图2可知,当 E 值一定时,系统相位误差随功率

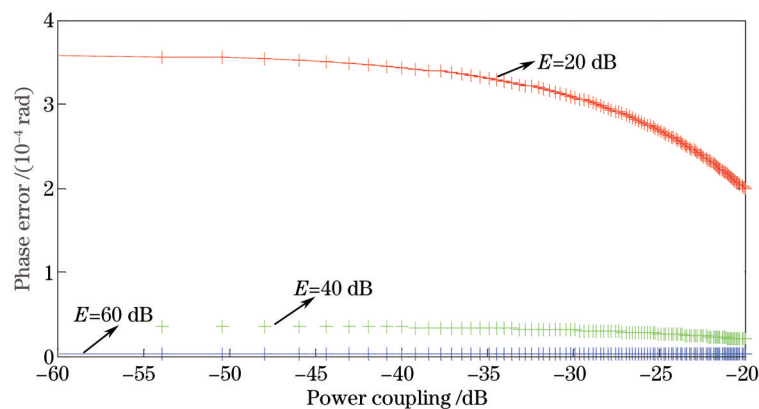


图4 相位误差与偏振串扰点功率耦合的关系

Fig.4 Relationship between phase error and power coupling of polarization crosstalk point

耦合的增大而减小;当熔接点2的耦合功率一定时, E 值越大,产生的相位误差就越小。所以为了减少这种因素所带来的影响,一方面在熔接两段保偏光纤时,应严格控制其对轴精度,最大限度地减小对轴角度误差,另一方面提高Y波导消光比可以有效抑制因熔接而引入的串扰误差。

4 实 验

4.1 消偏器的45°角误差对消偏光纤陀螺性能影响的验证

消偏器的性能直接决定着消偏光纤陀螺的零偏精度^[14]。实验尝试对消偏器的45°角误差对消偏光纤陀螺零偏及零偏稳定性的影响进行验证。

实验时选用工作波长为1550 nm,偏振度为98.4%~99.2%的SLD光源。首先制作三支消偏器,分别为消偏器1(5 m, 10 m),消偏器2(10 m, 20 m)和消偏器3(10 m, 20 m)。制作时,光源设定恒功率模式输出,输出光功率为0.93 mW。熔接时,消偏器1和消偏器2的45°角误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 内,消偏器3的45°角误差控制在 $\pm 2^\circ$ 内。熔接后,在室温下分别对3个消偏器的偏振度进行7 h的长时间测试,取均值(实际测得的偏振度会有微小波动),计算出它们各自的实际熔接角度分别为 44.95° 、 44.93° 和 43.70° 。图5~7分别表示消偏器1、消偏器2和消偏器3的45°角实际对准角度随采样时间的波动情况。由此可见,消偏器1和消偏器2的对准角度误差较小,消偏器3的对准角度误差较大。

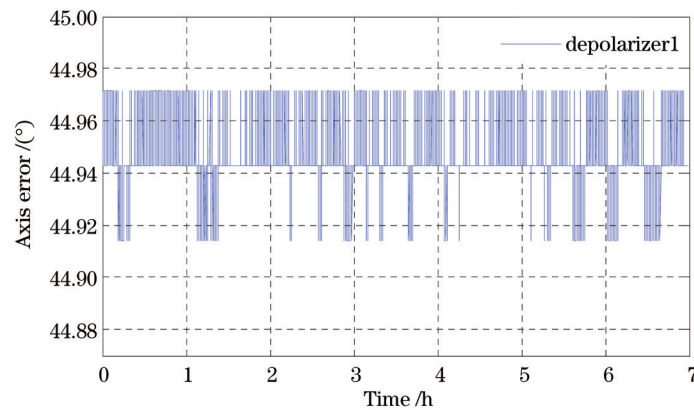


图5 消偏器1的45°角误差随时间波动情况

Fig.5 Fluctuation of depolarizer one's depolarizers' 45° alignment error with time

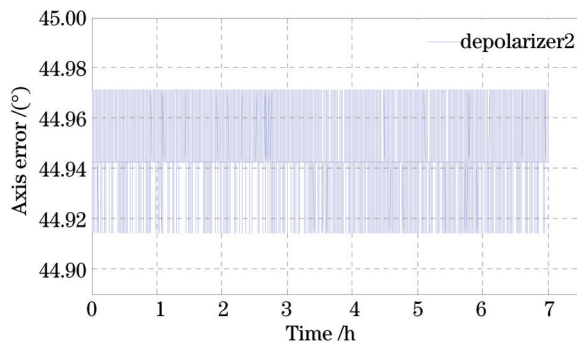


图6 消偏器2的45°角误差随时间波动情况

Fig.6 Fluctuation of depolarizer two's depolarizers' 45° alignment error with time

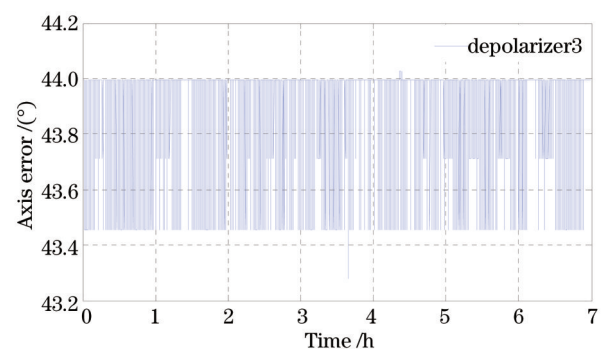


图7 消偏器3的45°角误差随时间波动情况

Fig.7 Fluctuation of depolarizer three's depolarizers' 45° alignment error with time

将消偏器1和消偏器2分别与某单模环两端相熔接,接入系统构成消偏光纤陀螺1。熔接时,对轴误差严格控制在 0.1° 以下,熔接损耗小于0.1 dB。恒温下采集陀螺静态零偏数据,采集时间为13 h。对零偏数据进行处理,标度因子取0.857,计算其静态零偏值为 $3.0727^\circ/\text{h}$,对零偏数据分别进行1、10、100 s平滑处理,如图8所示,SM表示平滑处理。

平滑处理结果如表1所示,其中Bias表示陀螺零偏,Bs表示陀螺零偏稳定性即零漂,Original表示平滑处

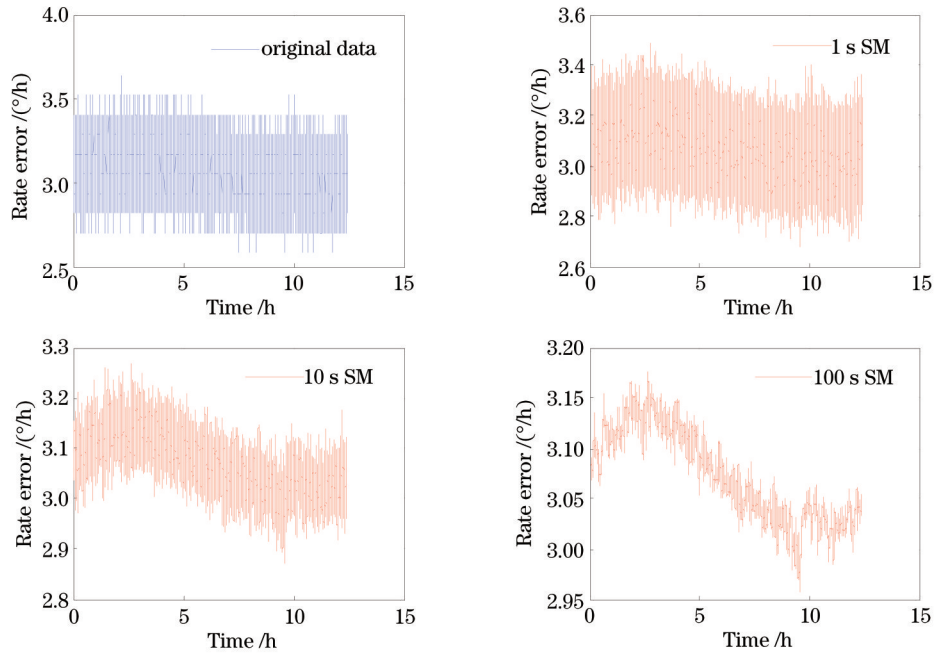


图8 消偏陀螺1零偏平滑处理

Fig.8 Bias data for smoothing of DFOG one

表1 消偏陀螺1零偏平滑处理结果

Table 1 Result of Bias data for smoothing of DFOG one

	Original	1 s	10 s	100 s
Bias /[(°)/h]	3.0727	3.0727	3.0727	3.0727
Bs /[(°)/h]	0.1177	0.0950	0.0550	0.0448

然后将消偏器1和消偏器3分别与上述同一个单模环的两端相熔接,接入系统构成消偏光纤陀螺2。熔接时,对轴误差严格控制在 0.1° 以下,熔接损耗小于0.1 dB。同样在恒温下采集陀螺静态零偏数据,采集时间同样为13 h。对零偏数据进行处理,标度因子取0.857,计算其静态零偏值为 $8.9337^\circ/\text{h}$,对零偏数据分别

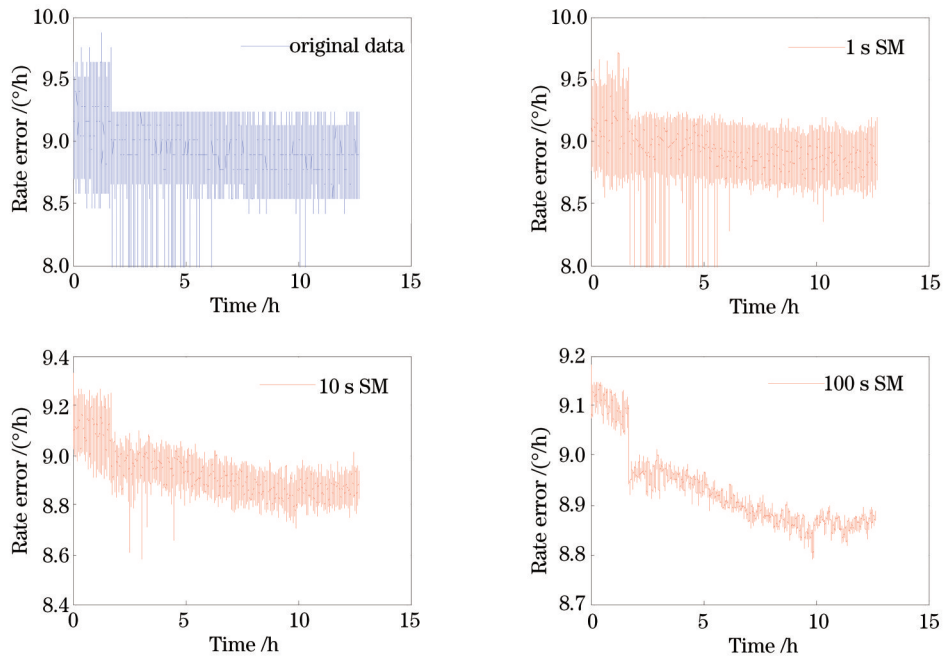


图9 消偏陀螺2零偏平滑处理

Fig.9 Bias data for smoothing of DFOG two

进行1、10、100 s平滑处理,如图9所示。

平滑处理结果如表2所示。

表2 消偏陀螺2零偏平滑处理结果

Table 2 Result of Bias data for smoothing of DFOG two

	Original	1 s	10 s	100 s
Bias /[(°)/h]	8.9337	8.9337	8.9337	8.9337
Bs /[(°)/h]	0.1663	0.1335	0.0927	0.0843

由表1和表2可知,陀螺1零偏为 $3.0727^{\circ}/\text{h}$,陀螺2零偏为 $8.9337^{\circ}/\text{h}$ 。对比平滑处理前和1、10、100 s平滑处理后,陀螺1相比于陀螺2,其零偏及零漂较小,性能更好。由此可知,消偏器的对准角度误差越大,消偏光纤陀螺的性能越差,反之就越好。应将消偏器的对准角度误差控制在 $\pm 0.5^{\circ}$ 范围内。

4.2 温度对消偏光纤陀螺零漂影响的验证

温度对陀螺精度有很大的影响^[15]。在环境温度变化的情况下,光纤环的轴向方向会产生空间温度梯度,光纤中的应力双折射将发生变化,当应力双折射与光纤的本征双折射不匹配时^[16],将导致光纤环内光的偏振态发生变化,进而会对光纤陀螺的性能产生影响。为了验证温度对消偏光纤陀螺零漂的影响,做了一组实验进行对比。实验前,将消偏光纤陀螺系统中的光纤环放置在温箱中。在实验1中,首先设置温箱温度为 25°C ,然后同时打开温箱运行按钮与陀螺光源开关。保持温箱温度一段时间,待陀螺输出稳定后,再使温箱处于加热状态,直至其温度升到 60°C ,保持温箱温度稳定。此过程对消偏光纤陀螺系统采集零漂结果,如图10所示。图中ab段表示温度突变过程,a'b'段表示消偏光纤陀螺零漂突变过程。由图10可知,温箱温度突变导致消偏光纤陀螺零漂发生突变,两者几乎同时发生,待温箱温度稳定后,陀螺零漂也趋于稳定。

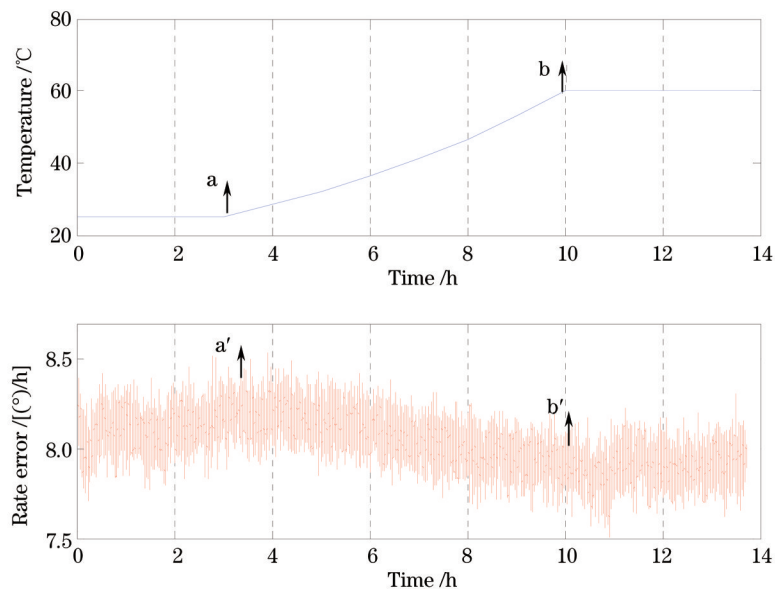


图10 温度变化引起消偏光纤陀螺零漂变化

Fig.10 Change of DFOG zero drift caused by temperature change

在实验2中,设置温箱温度为 25°C ,当温箱温度处于平衡后,对消偏光纤陀螺采集零漂结果,如图11所示。由图11可知,温箱温度稳定时,消偏光纤陀螺的零漂也有了很大的改善。

对比实验1和实验2可以发现,温度变化会对消偏光纤陀螺的零漂产生很大的影响。

5 结 论

从工程应用的角度出发,系统建立了双消偏光纤陀螺系统的数学模型,给出了系统光路偏振串扰误差的理论推导式。仿真分析了消偏器的 45° 角误差,偏振串扰点功率耦合,Y波导有限消光比以及环内偏振旋转角对消偏光纤系统偏振串扰误差的影响;并通过实验验证了双消偏光纤陀螺光路中两消偏器的 45° 角之间的相对偏差以及温度对陀螺系统零漂的影响,对以后研究和制作消偏光纤陀螺具有很好的指导意义。

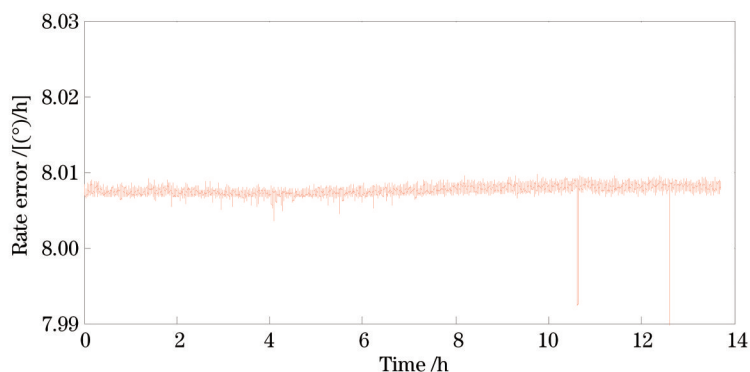


图 11 恒温下消偏光纤陀螺的零漂变化

Fig.11 Change of DFOG zero drift under the constant temperature

参考文献

- 1 Jin Jing, Wang Xueqin, Lin Song, *et al.*. Effect of radiation-induced mean wavelength shift in optical fiber on the scale factor of an interferometric fiber optic gyroscope at a wavelength of 1300 nm*[J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(9): 094220.
- 2 Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, *et al.*. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205002.
王夏霄, 张 猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205002.
- 3 Yang Xueli, Wang Xuefeng, Zhang Wei, *et al.*. Effect of the principal axes angle-offsets on fiber-optic gyroscope output [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1658-1661.
杨学礼, 王学锋, 张 蔚, 等. 对轴误差对光纤陀螺输出的影响[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1658-1661.
- 4 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.
- 5 Wang Lihui, Sun Feng, Li Xuyou. Principle and practical analysis of depolarized fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2004, 25(6): 705-708.
王立辉, 孙 枫, 李绪友. 消偏型光纤陀螺的原理及应用分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, 25(6): 705-708.
- 6 Zhang Yani. Study on polarization error in depolarized fiber optical gyroscope [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(7): 793-795.
张亚妮. 消偏型光纤陀螺偏振误差研究[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(7): 793-795.
- 7 Wang Shumin, Liu Cheng, Mou Xudong, *et al.*. Study on nonreciprocal phase error in depolarized gyros [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(5): 336-338.
王淑敏, 刘 承, 牟旭东, 等. 消偏光纤陀螺的非互易性相位误差的研究[J]. *激光与红外*, 2002, 32(5): 336-338.
- 8 Wang Wei. *Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology* [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010. 87-102.
王 巍. *干涉型光纤陀螺仪技术* [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 87-102.
- 9 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. 单轴光纤陀螺光学机构的研究与实现[J]. *光电工程*, 2009, 36(4): 52-55.
- 10 Zhang Guicai. *The Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 268-269.
张桂才. *光纤陀螺原理与技术* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 268-269.
- 11 Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong, *et al.*. Numerical dispersion compensation for polarization-mode coupling distributed fiber sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3159-3163.
陈信伟, 张红霞, 贾大功, 等. 偏振模耦合分布式光纤传感器的数值色散补偿[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3159-3163.
- 12 Zhang Hongxia, Ren Yaguang, Ye Wenting, *et al.*. Dynamic dispersion compensation for the polarization coupling measurement system of polarization maintaining fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0105001.
张红霞, 任亚光, 叶雯婷, 等. 保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0105001.
- 13 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.
- 14 Zhang Dengwei, Shu Xiaowu. Theory study on evaluating fiber-optic depolarized gyro with axial magnetic sensitivity [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(4): 813-815.
张登伟, 舒晓武. 轴向磁敏法评价消偏陀螺的性能[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(4): 813-815.
- 15 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Modeling of static temperature drift for fiber optic gyroscope based on wavelet network [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 2980-2985.
李家全, 许华龙, 何 婧. 光纤陀螺静态温度漂移的小波网络建模[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 2980-2985.
- 16 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.