

# 保偏光纤干涉型陀螺的磁场误差分析与抑制方法

胡宗福 姜润知 周 剑

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201806)

**摘要** 基于保偏光纤的琼斯矩阵,建立了保偏光纤线圈的 Faraday 非互易相移模型,利用该模型进行计算发现:线圈保偏光纤的慢轴与快轴的 Faraday 非互易相移大小近似相等,但符号相反。并进一步提出了偏振环行干涉型保偏光纤陀螺(PCPM-IFOG),它能使顺时针(CW)和逆时针(CCW)光在保偏光纤线圈中沿慢和快轴分别传输一次,因此顺时针和逆时针光总的 Faraday 非互易相移等于 0,实现了 Faraday 非互易相移的完全抑制。500 m 保偏光纤线圈的偏振环行干涉型保偏光纤陀螺的实验结果显示其输出与地球磁场无关,而对于相同传感线圈的干涉型保偏光纤陀螺,当磁场方角发生变化时,陀螺有约  $\pm 0.3^\circ/\text{h}$  的 Faraday 零偏漂移。

**关键词** 光学器件;光纤陀螺;保偏光纤;Faraday 非互易相移;偏置漂移;偏振环行

**中图分类号** V241.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0606003

## Magnetic Error Analyzing and Suppressing on a Polarization-Maintaining Interferometric Fiber-Optic Gyroscope

Hu Zongfu Jiang Runzhi Zhou Jian

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201806, China)

**Abstract** Based on the Jones matrix of polarization-maintaining fiber, a model of Faraday nonreciprocal phase shift of a polarization-maintaining fiber coil is established. Calculation results show that the Faraday nonreciprocal phase shifts of the fiber coil have opposite polarity in the fiber's slow and fast axes, but are equal in size. A polarization alternately circulation polarization-maintaining interferometric fiber-optic gyroscope (PCPM-IFOG) is introduced that allows for the clockwise (CW) and counter clockwise (CCW) lights circle propagating around the coil once in the fiber's slow and fast axes separately. So the total Faraday nonreciprocal phase shift is zero and complete suppression on the effects of the Faraday nonreciprocal phase shift is achieved. Experiment results show the output of PCPM-IFOG with 500 m polarization-maintaining fiber coil, has no relation with the earth magnetic field. In contrast, the output Faraday bias drift of a polarization-maintaining interferometric fiber-optic gyroscope (PM-IFOG) with the same polarization-maintaining fiber coil is about  $\pm 0.3^\circ/\text{h}$  when PM-IFOG azimuth angle is changed.

**Key words** optical devices; fiber optic gyroscope; polarization-maintaining fiber; Faraday reciprocal phase shift; bias drift; polarization circulation

**OCIS codes** 060.2800; 060.2370; 060.2420

## 1 引 言

随着惯性系统的发展,光纤陀螺以其在精度、抗冲击、价格、尺寸、重量以及长寿命上所具有的明显优点,适合规模化生产,在工业与军事应用中拓展了许多较新的用途,并成为目前发展最为迅速的惯性器件之一。全保偏光纤陀螺,在很大程度上解决

了光纤陀螺的信号衰减和非互易性偏振误差抑制问题,已成为高精度光纤陀螺的最佳选择方案。全保偏光纤陀螺存在的偏置漂移问题,主要是受多功能集成光学器件(Y波导)<sup>[1]</sup>、环境温度<sup>[2]</sup>、磁场 Faraday 效应等因素影响。早期实验研究指出地球磁场的 Faraday 非互易相移可达到  $10^{-4} \text{ rad}^{[3]}$ 。

收稿日期: 2014-01-12; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(60972002)

作者简介: 胡宗福(1959—),男,博士,教授,主要从事光载无线通信、光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: huzongfu@tongji.edu.cn

Hotate 等<sup>[4]</sup>给出了光纤陀螺 Faraday 非互易相移的理论模型,分析了 Faraday 非互易相移与保偏光纤扭转率、双折射、外磁场强度等之间的关系。考虑到光纤的扭转是随机的,Saida 等<sup>[5]</sup>给出了光纤陀螺 Faraday 非互易相移统计描述公式,并讨论了可能的抑制方法。实际上,径向磁场、轴向磁场以及直流和交变磁场均会对小型化光纤陀螺产生 Faraday 非互易相移误差<sup>[6-7]</sup>。另一方面,Faraday 非互易相移也可被用来替代角振动台,用于测试数字闭环光纤陀螺的动态特性<sup>[8]</sup>。本文利用保偏光纤琼斯矩阵建立保偏光纤线圈的 Faraday 非互易相移模型,提出了 Faraday 非互易误差的抑制方法,并进行了初步实验验证。

## 2 保偏光纤陀螺中的 Faraday 非互易相移

当一束线偏振光通过非旋光性材料时,若在材料中沿光传播方向外加磁场,则光通过材料后,光的偏振平面将转过一个角度,旋转角与沿光传播方向的磁场分量成正比,这就是 Faraday 效应。当磁场沿着扭转的保偏光纤轴向均匀分布时,入射光波和出射光波之间的关系由琼斯矩阵给出:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \exp(-i\beta_{sv}z) \cdot \mathbf{C}(t_w, \theta_R) \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\beta_{sv} = \frac{\beta_x + \beta_y}{2}$ ,  $\beta_x$  和  $\beta_y$  分别是保偏光纤  $x$  (慢轴) 和  $y$  (快轴) 线偏振光的传播常数,  $\mathbf{C}(t_w, \theta_R)$  是长度为  $z$  的任一段保偏光纤的琼斯矩阵,可表示为

$$\mathbf{C}(t_w, \theta_R) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中琼斯矩阵元素分别为

$$\begin{cases} C_{11} = C_{22} = \cos(\eta z) - i \frac{\Delta\beta}{2\eta} \sin(\eta z) \\ C_{12} = -C_{21} = \frac{t_w - \theta_R}{\eta} \sin(\eta z) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\eta = \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 + (t_w - \theta_R)^2}$ ,  $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$ ,  $t_w$  和  $\theta_R$  分别为单位长度上的线性双折射、光纤扭转率和法拉第磁光旋转率,单位是 rad/m。在这些公式中,坐标  $(x, y)$  对应着保偏光纤的慢轴和快轴,并随着保偏光纤的扭转而旋转。

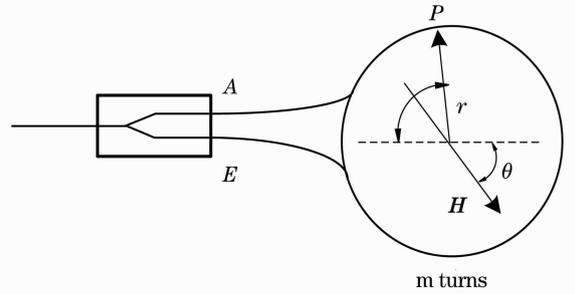


图 1 保偏光纤干涉型光纤陀螺示意图  
Fig. 1 Schematic of a PM-IFOG

图 1 是保偏光纤干涉型光纤陀螺 (PM-IFOG) 结构示意图,  $\mathbf{H}$  为径向磁场,  $\theta$  为磁场方向角。对圆形保偏光纤传感线圈 (不计 Y 波导尾纤长度), 假设保偏光纤线圈一匝中半圈扭转方向与另半圈反向, 且总和为 0, 则顺时针 (CW) 和逆时针 (CCW) 光经过一匝保偏光纤的琼斯矩阵为

$$\mathbf{C}^{CW} = \begin{cases} \mathbf{C}\left[t_w, \theta_R \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \widehat{AP}/r\right)\right], & 0 < \widehat{AP}/r \leq \pi \\ \mathbf{C}\left[-t_w, \theta_R \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \widehat{AP}/r\right)\right], & \pi < \widehat{AP}/r \leq 2\pi \end{cases}, \quad (4)$$

$$\mathbf{C}^{CCW} = \begin{cases} \mathbf{C}\left[-t_w, \theta_R \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2} + \widehat{EP}/r\right)\right], & 0 < \widehat{EP}/r \leq \pi \\ \mathbf{C}\left[t_w, \theta_R \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2} + \widehat{EP}/r\right)\right], & \pi < \widehat{EP}/r \leq 2\pi \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $r$  为线圈半径,  $A$  为 CW 方向的起点,  $\widehat{AP}$  为一匝传感线圈上由起点到  $P$  点的弧长,  $\widehat{AP}/r$  就是  $\widehat{AP}$  对应的圆心角; 对 CCW 方向,  $E$  为 CCW 方向的起点,  $\widehat{EP}$  为一匝传感线圈上由 CCW 方向起点到  $P$  点的弧长,  $\widehat{EP}/r$  就是  $\widehat{EP}$  对应的圆心角。

假设 Y 波导分束器的分光比为 1:1。每匝分成  $n$  段, 当  $n$  足够大时, 线圈任一匝 CW 方向的入射光波和出射光波电场可表示为

$$\begin{bmatrix} E_x^{CW} \\ E_y^{CW} \end{bmatrix} = \mathbf{P} \mathbf{C}_1^{CW} \dots \mathbf{C}_i^{CW} \dots \mathbf{C}_n^{CW} \mathbf{P} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

同理, CCW 方向的入射光波和出射光波电场可表示为

$$\begin{pmatrix} E_x^{\text{CCW}} \\ E_y^{\text{CCW}} \end{pmatrix} = \mathbf{P} \mathbf{C}_1^{\text{CCW}} \dots \mathbf{C}_i^{\text{CCW}} \dots \mathbf{C}_n^{\text{CCW}} \mathbf{P} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \quad (7)$$

如果干涉型光纤陀螺(IFOG)的Y波导偏振器的传输轴与保偏光纤慢轴( $x$ 轴)一致,则 $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 。

将CW与CCW的输出慢光分别表示为: $E_x^{\text{CW}} = f_x^{\text{CW}}(t_w, \theta_R) \cdot E_x$ 和 $E_x^{\text{CCW}} = f_x^{\text{CCW}}(t_w, \theta_R) \cdot E_x$ ,则慢光经过一匝保偏光纤的Faraday非互易相移可表示为<sup>[4]</sup>

$$\varphi_x = \arg[f_x^{\text{CW}}(t_w, \theta_R)] - \arg[f_x^{\text{CCW}}(t_w, \theta_R)]. \quad (8)$$

如果IFOG的Y波导偏振器的传输轴与保偏光纤快轴( $y$ 轴)一致,则 $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。同理可以得到快光经过一匝保偏光纤的Faraday非互易相移可表示为<sup>[4]</sup>

$$\varphi_y = \arg[f_y^{\text{CW}}(t_w, \theta_R)] - \arg[f_y^{\text{CCW}}(t_w, \theta_R)]. \quad (9)$$

根据地球磁场强度,对平均波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 光源,法拉第磁光旋转率为 $\theta_R = 0.000043 \text{ rad/m}$ 。实验陀螺的保偏光纤线圈长度约为 $500 \text{ m}$ ,平均直径为 $80 \text{ mm}$ 。假设光纤扭转率为 $t_w = 0.1 \text{ rad/m}$ (相当于每匝绕线与/或光纤制造产生的扭转角为

$0.9^\circ$ ),每匝的法拉第非互易相移相等,且磁场方向角 $\theta = 0$ 。将一匝分为 $360$ 子段(相当于每子段的圆心角是 $1^\circ$ )。由(8)、(9)式计算得到的实验陀螺的Faraday非互易相移随保偏光纤双折射的变化如图2所示,其中虚线是保偏光纤慢轴( $x$ 方向偏振光)的Faraday非互易相移;点线是保偏光纤快轴( $y$ 方向偏振光)的Faraday非互易相移;中间实线是 $x$ 与 $y$ 方向偏振光Faraday非互易相移之和。因为 $x$ 与 $y$ 方向偏振光的Faraday非互易相移是大小近似相等,但符号相反,故中间实线是相移为 $0$ 的直线。这一结果是由保偏光纤的对称性决定的, $x$ 方向偏振光沿慢轴传输,Faraday旋转使其偏离慢轴而相位超前,相反地, $y$ 方向偏振光沿快轴传输,Faraday旋转使其偏离快轴而相位滞后,所以 $x$ 与 $y$ 偏振光的Faraday非互易相移大小近似相等,但符号相反。从图2中看到,在光纤的双折射大于 $1500 \text{ rad/m}$ 后,双折射的增加对相移的大小影响不大。实验陀螺保偏光纤的双折射 $\Delta\beta$ 约为 $2500 \text{ rad/m}$ ,Faraday非互易相移达到 $4.4 \mu\text{rad}$ 左右。

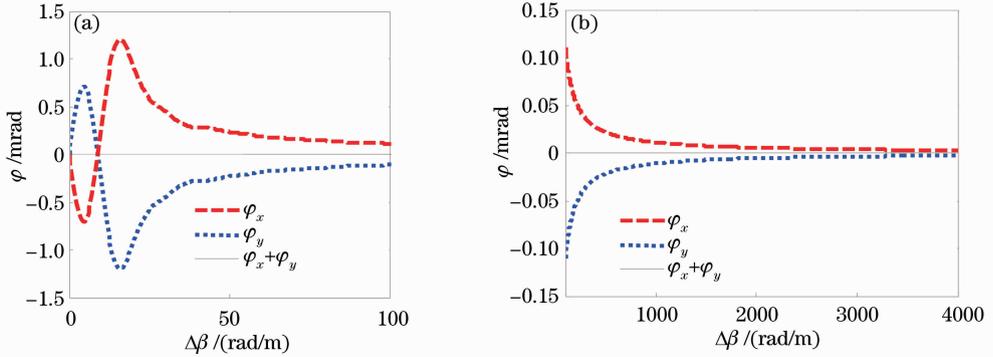


图2 Faraday相移随保偏光纤双折射的变化

Fig. 2 Relationship between Faraday phase shift and the fiber birefringence

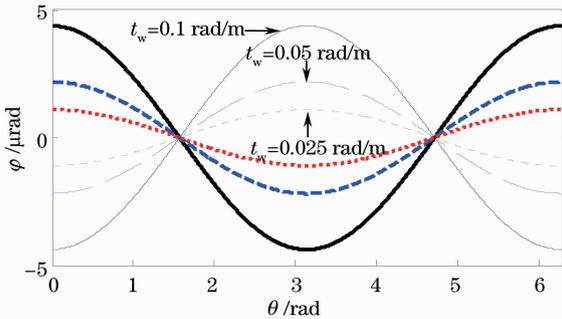


图3 Faraday相移随磁场方位角的变化( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\beta = 2500 \text{ rad/m}$ ,  $\theta_R = 0.000043 \text{ rad/m}$ )

Fig. 3 Relationship between Faraday shift and  $\theta$  ( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\beta = 2500 \text{ rad/m}$ ,  $\theta_R = 0.000043 \text{ rad/m}$ )

图3给出了Faraday非互易相移与磁场方向角 $\theta$ 的关系。其中粗线是 $x$ 偏振;细线是 $y$ 偏振; $x$ 与 $y$ 偏振光的Faraday非互易相移也是大小相等,符号相反。在保偏光纤扭转率分别为 $t_w = 0.1, 0.05, 0.025 \text{ rad/m}$ 时,最大Faraday非互易相移分别为 $4.4, 2.2, 1.1 \mu\text{rad}$ ,即Faraday相移与光纤扭转率成正比。对长度为 $L = 500 \text{ m}$ 保偏光纤陀螺,当光纤扭转率为 $0.025 \text{ rad/m}$ 时(相当于每匝绕线与/或光纤制造产生的扭转角为 $0.225^\circ$ ),由Faraday非互易相移产生的零偏为

$$\Omega_F = \frac{\lambda c}{2\pi L D} \varphi_x \approx \frac{1.3 \times 3 \times 10^8}{2\pi \times 500 \times 80 \times 10^{-3}} \times 1.1 \approx 1.71 \mu\text{rad/s} \approx 0.35^\circ/\text{h}. \quad (10)$$

在 IFOG 使用中,当磁场方向角发生变化时, Faraday 非互易相移引起的偏置漂移就可能达到  $\pm 0.35^\circ/\text{h}$ 。所以高精度 IFOG 必须抑制磁场 Faraday 非互易相移引起零偏的影响。

### 3 新型偏振环行干涉型保偏光纤陀螺

实验上提出的能完全抑制 Faraday 零偏的偏振环行干涉型保偏光纤陀螺(PCPM-IFOG)结构如图 4 所示。与现有保偏光纤陀螺相比,偏振环行陀螺在 Y 波导与保偏光纤传感线圈之间插入了偏振环行器。偏振环行器的两输入端口(A 与 B)与 Y 波导输出尾纤保偏对接,两输出端口(C 与 D)与保偏光纤传感线圈保偏对接。偏振环行器的特性如下:

1) 垂直线偏振光 A 端口输入,则 C 端口输出平行线偏振光;

2) 平行线偏振光 A 端口输入,衰减大于 60 dB,输出近似为 0;

3) 垂直线偏振光 B 端口输入,则 D 端口输出垂直线偏振光;

4) 平行线偏振光 B 端口输入,衰减大于 60 dB,输出近似为 0;

5) 垂直线偏振光 C 端口输入,则环行到 D 端口输出平行线偏振光;

6) 平行线偏振光 C 端口输入,则 A 端口输出垂直线偏振光;

7) 垂直线偏振光 D 端口输入,则 B 端口输出垂直线偏振光;

8) 平行线偏振光 D 端口输入,则环行到 C 端口输出垂直线偏振光。

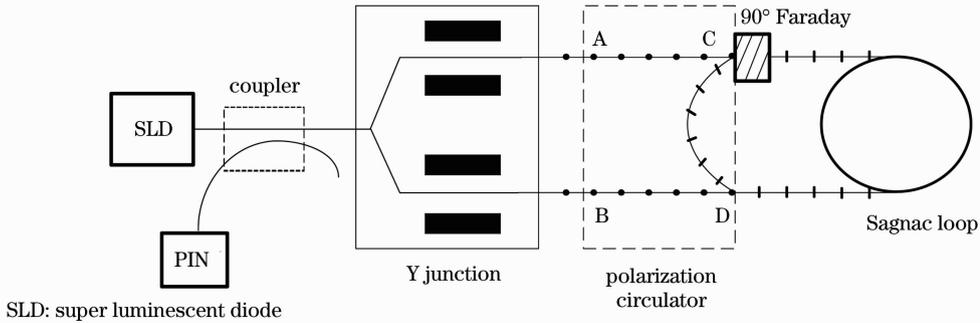


图 4 偏振环行干涉型保偏光纤陀螺结构示意图

Fig. 4 Configuration of the PCPM-IFOG

对新型偏振环行光纤陀螺, Y 波导上分支尾纤输出的垂直线偏振光由 A 端口输入时,偏振环行器 C 端口输出平行线偏振光进入传感线圈保偏光纤慢轴,在线圈的另一端输出平行线偏振光。根据偏振环行器的特性 8),平行线偏振光 D 端口输入,则环行到 C 端口输出垂直线偏振光,再次进入传感线圈保偏光纤快轴传输到偏振环行器的 D 端口;根据偏振环行器的特性 7),环行器的 B 端口输出垂直线偏振光,再由 Y 波导下分支尾纤返回形成 CW 光,对 Y 波导下分支尾纤输出的垂直线偏振光,从偏振环行器的 B 端口输入, D 端口输出进入传感线圈沿快轴传输到环行器的 C 端口;根据偏振环行器的特性 5),则环行到 D 端口输出平行线偏振光;再次进入传感线圈光纤慢轴传输到环行器的 C 端口;根据偏振环行器的特性 6),环行器的 A 端口输出垂直线偏振光,再由 Y 波导上分支尾纤返回形成 CCW 光。所以, CW 和 CCW 光都是分别沿保偏光纤慢轴和快轴各传输一次。根据保偏光纤 Faraday 非互易相

移分析计算结果,保偏光纤慢轴和快轴的 Faraday 非互易相移大小相等,符号相反,这样 CW 和 CCW 光两次经过陀螺线圈的总 Faraday 非互易相移就是慢轴和快轴的 Faraday 非互易相移的和,所以总 Faraday 相移等于 0。即提出的偏振环行保偏光纤陀螺能完全抑制磁场 Faraday 非互易相移的影响。另一方面, CW 和 CCW 光都两次通过传感线圈,所以,等效传感线圈的长度就是实际长度的两倍。

为了实验验证 PCPM-IFOG 对 Faraday 零偏的抑制作用,进行了 PCPM-IFOG 与 PM-IFOG 在地球磁场环境下的比较实验测试,结果如图 5 所示。实验数字闭环 PM-IFOG 的线圈长约为 500 m,将它放在水平测试平台上,在水平面内慢慢转动陀螺使其输出达到最大时开始记录,如图 5(a) 左边部分,输出的偏置约为  $-7.5^\circ/\text{h}$ ,记录时间大约 15300 s 后,将实验陀螺水平转动  $180^\circ$  到最小输出位置,如图 5(a) 右边部分,输出的偏置约为  $-8.1^\circ/\text{h}$ 。由于上海地区的地球转速水平分量约为  $-7.8^\circ/\text{h}$ ,所以地磁场引起的

实验陀螺偏置漂移为 $\pm 0.3^\circ/\text{h}$ 。由于 Faraday 相移与保偏光纤的扭转率成正比,根据该实验结果可以推断,实验线圈的扭转率可能约为 $0.0214 \text{ rad/m}$ (相当于绕线与/或光纤制造产生的扭转角只有约为 $0.225^\circ$ )。在实验 PM-IFOG 的 Y 波导与线圈之间加入偏振环行器,调制周期增加一倍,再次进行实验,结果如图 5(b)所示,输出基本稳定在 $-7.8^\circ/\text{h}$ ,其中在 16000 s 处的脉冲是由 $180^\circ$ 转动引起的。为了确证 PCPM-IFOG 的 Faraday 非互易零偏抑制能力,在 22000 s 处又将陀螺在水平面内转动一下(也引起一个输出脉冲),输出仍然稳定在 $-7.8^\circ/\text{h}$ 。初步对比实验结果表明:PCPM-IFOG 几乎能完全抑制 Faraday 非互易零偏。另外,图 5(b)的角度随机游走明显小于图 5(a),这是因为 PCPM-IFOG 的等效传感线圈长度是实际长度的两倍,所以有更高的灵敏度。综上理论分析与初步实验结果,PCPM-IFOG 不仅能几乎完全抑制 Faraday 非互易相移的影响,而且能使等效传感线圈光纤长度加倍,明显降低角度随机游走系数。

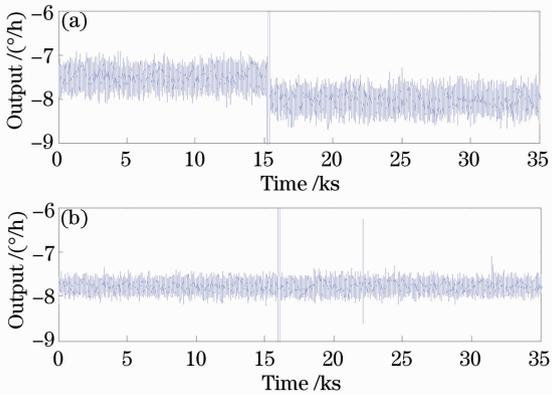


图 5 (a)干涉型保偏光纤陀螺和(b)偏振环行干涉型保偏光纤陀螺的实验结果

Fig. 5 Experimental results of (a) PM-IFOG and (b) PCPM-IFOG

## 4 结 论

基于保偏光纤琼斯矩阵,建立了保偏光纤线圈的 Faraday 非互易相移模型,利用该模型的数值分析结果发现:在保偏光纤陀螺传感线圈中,慢轴( $x$ 方向偏振光)与快轴( $y$ 方向偏振光)的 Faraday 非互易相移是大小近似相等,符号相反的。利用这一结果提出的 PCPM-IFOG 能使 CW 和 CCW 光在保偏光纤传感线圈中以慢轴与快轴分别传输一次,这样 CW 和 CCW 光的 Faraday 非互易相移就是传感

线圈保偏光纤中慢轴与快轴 Faraday 非互易相移的和(等于 0),即 PCPM-IFOG Faraday 非互易相移得到了完全抑制。保偏光纤线圈长约为 500 m 的 PCPM-IFOG,在地磁场环境下测试结果显示,PCPM-IFOG 的输出与陀螺的方位角无关,即 Faraday 非互易零偏得到了完全抑制;而相同保偏光纤线圈的 PM-IFOG 在方位角变化时有 $\pm 0.3^\circ/\text{h}$ 的 Faraday 非互易零偏。

**致谢** 在本文实验工作中,得到了上海航天局 803 所惯导部傅长松、姜辉、饶范钧、朱一等的大力支持,深表感谢!

## 参 考 文 献

- 1 Hu Zongfu. Effects of residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1924-1929.
- 2 胡宗福. 光纤陀螺调制器的残余强度调制影响与消除 [J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1924-1929.
- 3 Liu Jieyu, Yu Zhiyong, Ma Xuewen. Modeling and compensation of static temperature error synthetically for fiber optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0823005.
- 4 刘洁瑜, 余志勇, 马学文. 光纤陀螺静态温度综合误差建模及补偿 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0823005.
- 5 K Bohm, K Petermann, E Weidel. Sensitivity of a fiber-optic gyroscope to environmental magnetic fields [J]. Opt Lett, 1982, 7(4): 180-182.
- 6 Kazuo Hotate, Kunio Tabe. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect; influence of the earth's magnetic field [J]. Appl Opt, 1986, 25(7): 1086-1092.
- 7 T Saida, K Hotate. General formula describing drift of interferometer fiber-optic gyro due to Faraday effect; reduction of the drift in twin-depo-I-FOG [J]. J Lightwave Technol, 1999, 17(2): 222-228.
- 8 Wang Lihui, Xu Xiaosu, Liu Xixiang, et al.. Investigation on modeling methods of axial magnetic field error characteristics in small fiber optic gyroscope [J]. J Chinese Inertial Technology, 2012, 20(1): 84-89.
- 9 王立辉, 徐晓苏, 刘锡祥, 等. 小型化光纤陀螺的轴向磁场误差特性建模方法探讨 [J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 84-89.
- 10 Tan Xi, Liu Jun, Yin Jianling, et al.. Magnetic sensitivity studies of fiber optic gyroscope in direct and alternating current magnetic fields [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905006.
- 11 谭曦, 刘军, 殷建玲, 等. 光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905006.
- 12 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.
- 13 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.

栏目编辑: 王晓琰