

文章编号: 1002-2082(2010)04-0626-06

干涉式光纤陀螺光路系统的物理模型

韩彪, 刘继芳, 马琳, 孙艳玲

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 光路系统的偏振误差极大地制约着光纤陀螺精度的提高。利用相干矩阵和琼斯矩阵对光纤陀螺中光学器件和熔接点的光学参数进行描述, 建立了干涉式光纤陀螺光路系统的物理模型。与之前相关文献报道相比, 该模型所表达的光路系统更加接近于工程实际。在此基础上, 提出一种分析光学器件和熔接点缺陷, 以及光路损耗对光纤陀螺偏振误差影响的新方法。该方法可以有效地分析光路系统缺陷对零偏和标度因数的影响, 在工程上可作为评价干涉式光纤陀螺光路系统性能的一个途径。

关键词: 光纤陀螺; 偏振误差; 相干矩阵; 琼斯矩阵

中图分类号: TN253; TP212.14

文献标志码: A

Physical model of optical system in interferometric fiber-optic gyro

HAN Biao, LIU Ji-fang, MA Lin, SUN Yan-ling

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The polarization error of optical system limits the accuracy of fiber-optic gyro. The models of optical devices and fused points in fiber-optic gyro are described using coherent matrix and Jones matrix. The physical model of the optical system in interferometric fiber-optic gyro is established. Compared with the former reports, the optical system described in this model is more engineering oriented. A new method is presented to analyze the polarization error caused by optical devices, fused points and the losses through the optical path. This method could analyze the influence of optical system flaws on bias and scale factor effectively, which can be used to evaluate the property of the optical system in interferometric fiber-optic gyro.

Key words: fiber optical gyro (FOG); polarization error; coherent matrix; Jones matrix

引言

光纤陀螺因具有无转动器件、无须预热、结构简单、动态范围广、启动时间短、抗电磁干扰和抗震动冲击能力强、制造成本低、体积小、质量轻、功耗低等优点^[1], 自其诞生之日起一直是导航等领域研究的重点。目前研究最为成熟的是干涉式光纤陀螺(I-FOG)。光路中的偏振误差是制约光纤陀螺精度提高的主要因素之一。因此, 建立一种适用于光纤陀螺光路系统的物理模型十分必要。目前虽然已有

一些分析光路系统偏振误差的文献报道, 但对于光纤陀螺光路系统整体模型缺乏系统的描述, 并且对光学器件和熔接点建立的模型存在不同的缺陷。文献[1]中应用琼斯矢量表示光源, 不能完整地描述光源特性。文献[2-4]虽然用相干矩阵表示光源, 但对光学器件的描述并不完全, 忽略了一些器件引起的光波相位偏差。另外, 以往文献在建立光学器件和熔接点的物理模型时, 并没有考虑光波沿不同方向经过光学器件和熔接点时, 所表现出的光学参

收稿日期: 2009-11-29; 修回日期: 2010-01-19

基金项目: 航空科学基金(20070881001)

作者简介: 韩彪(1987-), 男, 陕西武功人, 硕士, 主要从事光电子技术及非线性光学的研究工作。

E-mail: hanbiao@xidian.edu.cn

数的不同;并且在应用这类模型对某个误差影响因素进行分析时,大都假设其他影响因素处于理想状态。这些都与工程应用存在偏离。本文的主要工作是:在充分考虑光学器件和熔接点缺陷,以及光波沿不同方向经过光路时光学参数存在差异的情况下,用相干矩阵表示光波特性和琼斯矩阵表示光路的传输特性,建立一种适用于工程分析的干涉式光纤陀螺光路系统的物理模型,并在此基础上,提出一种以“系统”的观点分析偏振误差的新方法。

1 光学器件的物理模型

干涉式光纤陀螺原理图如图1所示。图中节点1,2,5,6,8是器件之间的熔接点,节点3,4,7是Y

波导(虚线所画范围)内的熔接点,节点2和3之间是偏振器,3和4(7)之间是分光耦合器,4和5,7和6之间为相位控制器,对应的电极分别为UP和DOWN。为了便于说明,作以下规定:光朝着光纤环方向传播时,认为是顺向传播;反之,是逆向传播。在建模过程中不考虑电路系统对光路相位误差的补偿。

1) 光源

考虑到从光源发出的光波是部分偏振光,并且完全偏振部分不一定是线偏振,偏振方向也不一定与光源尾纤(保偏光纤制成)本征轴重合,因此以尾纤本征轴为坐标轴,用相干矩阵将光源输出光表示为^[5]

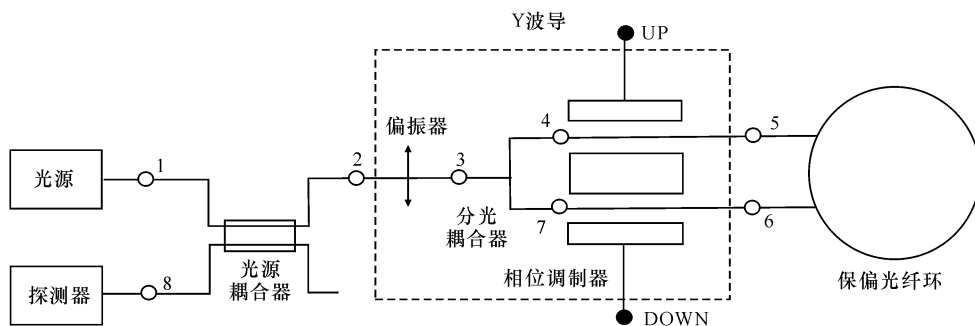


图1 干涉式光纤陀螺结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of interferometric fiber-optic gyro (I-FOG)

$$J_s = \frac{I_0}{2} \begin{bmatrix} 1 + P \cos(2\Psi) \cos(2\chi) & P[\sin(2\Psi) \cos(2\chi) - j \sin(2\chi)] \\ P[\sin(2\Psi) \cos(2\chi) + j \sin(2\chi)] & 1 - P \cos(2\Psi) \cos(2\chi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_0 表示光波的总光强; P 表示偏振度; Ψ 和 χ 分别表示完全偏振部分的方位角和椭圆度。

2) 熔接点

在忽略光波模式纵向分量的情况下,光波的传输特性可以用琼斯矩阵表示^[6]。假设:被熔接的2段保偏光纤之间充满折射率匹配液。2段保偏光纤的本征轴之间夹角为 θ_i ($i=1, 2, \dots, 8$)。在熔接点2端,分别以保偏光纤的本征轴为坐标轴建立坐标,考虑熔接过程中的损耗和模式耦合,则熔接点处光顺向和逆向以及理想情况下传播时的琼斯矩阵分别表示为

$$R(\theta_i) = \alpha_i \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R(-\theta_i) = \alpha_{iF} \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: α_i 和 α_{iF} 分别表示连接时顺向和逆向光波振幅的转移系数,为实数,取值在0和1之间,理想情况下为1。与功率损耗系数 γ_{mi} 和 γ_{mFi} 的关系为: $\gamma_{mi} = 1 - \alpha_i^2$, $\gamma_{mFi} = 1 - \alpha_{iF}^2$ 。

3) 保偏光纤耦合器

假设保偏光纤耦合器的附加损耗和分光比与光的偏振态无关,但与光波的传播方向有关。光顺向传播时,透射光和耦合光的琼斯矩阵分别为

$$K_{Ti} = (1 - \gamma_i)^{\frac{1}{2}} (1 - k_i)^{\frac{1}{2}} \exp(j \frac{\pi}{4}) \begin{bmatrix} h_{iA} & h_{iB} \\ h_{iB}^* & h_{iA}^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_{Ci} = (1 - \gamma_i)^{\frac{1}{2}} k_i^{\frac{1}{2}} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \begin{bmatrix} h_{iC} & h_{iD} \\ h_{iD}^* & h_{iC}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

光逆向传播时,透射光和耦合光的琼斯矩阵表

示为

$$\mathbf{K}_{TiF} = (1 - \gamma_{iF})^{\frac{1}{2}} (1 - k_{iF})^{\frac{1}{2}} \exp(j \frac{\pi}{4}) \cdot \begin{bmatrix} h_{iAF} & h_{iBF} \\ h_{iBF}^* & h_{iAF}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_{CiF} = (1 - \gamma_{iF})^{\frac{1}{2}} k_{iF}^{\frac{1}{2}} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \cdot \begin{bmatrix} h_{iCF} & h_{iDF} \\ h_{iDF}^* & h_{iCF}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

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 和 k 分别对应整体附加损耗和分光比; h 参数是复数, 表征光波在器件中传播时模式间的耦合。矩阵中假设 2 种偏振模式自耦合项的模相等, 对其取共轭关系是考虑到快慢轴存在相位差, 若忽略二者间的平均相移, 则它们将呈现共轭关系; 互耦合项之间, 也是基于类似的考虑。以下器件的琼斯矩阵中, 均作了类似处理。

理想情况下的透射波和耦合波矩阵分别为^[7]

$$\mathbf{K}_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j \frac{\pi}{4}) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_C = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4) 偏振器

假设偏振器的琼斯矩阵与入射光的偏振情况无关, 但与传播方向有关。考虑附加损耗 γ_P (γ_{PF})、振幅消光系数 ϵ (ϵ_F) 和附加相位差 φ_P (φ_{PF}), 则起偏器顺向、逆向以及理想情况下的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{P} = (1 - \gamma_P)^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \exp(j\varphi_P) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_F = (1 - \gamma_{PF})^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon_F \exp(j\varphi_{PF}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

5) 保偏光纤环

考虑保偏光纤环中的非互易相移和损耗, 顺时针和逆时针光路的转移矩阵分别为

$$\mathbf{S}_{CW} = (1 - \gamma_s)^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \alpha_{s1} & \alpha_{s2} \\ \alpha_{s2}^* & \alpha_{s1}^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_{CCW} = \exp(j\varphi_s) (1 - \gamma_{sF})^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \alpha_{s3} & \alpha_{s4} \\ \alpha_{s4}^* & \alpha_{s3}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: α_{si} ($i=1, 2, 3, 4$) 为模式间的耦合系数; γ_s 和 γ_{sF} 分别为顺时针和逆时针功率损耗系数; φ_s 为 Sagnac 相移。

6) 相位调制器

光波经过保偏光纤环的时间为 τ , 考虑损耗和

附加相位, 光顺向传播时 4-5 和 7-6 之间因相位调制而引起的转移矩阵可分别表示为

$$\mathbf{M}_{UP}(t) = \exp[j\varphi_{up}(t)] \begin{bmatrix} b_{C1} & 0 \\ 0 & b_{C4} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{M}_{DOWN}(t) = \exp[j\varphi_{down}(t)] \begin{bmatrix} b_{W1} & 0 \\ 0 & b_{W4} \end{bmatrix} \quad (17)$$

逆向传播时 4-5 和 7-6 之间因相位调制而引起的转移矩阵可分别表示为

$$\mathbf{M}_{UPF}(t) = \exp[j\varphi_{up}(t)] \begin{bmatrix} b_{C1F} & 0 \\ 0 & b_{C4F} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{M}_{DOWNF}(t) = \exp[j\varphi_{down}(t)] \begin{bmatrix} b_{W1F} & 0 \\ 0 & b_{W4F} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中 b 参数为复数, 表征调制时的附加振幅调制和相位调制。由于相位调制过程中的偏振耦合和损耗已经被包含在 Y 波导中的分光耦合器中, 因此公式中忽略了这些。 φ_{up} 和 φ_{down} 对应理想情况下的调制相位。

目前较为常用的相位调制方法是方波调制, 调制信号的半周期等于光在光纤环中的传播时间。相位调制使得 2 束光之间产生一个相位差, 满足:

$$\varphi_{up}(t) + \varphi_{down}(t + \tau) = -[\varphi_{down}(t) + \varphi_{up}(t + \tau)] = \pm \frac{\pi}{4} \quad (20)$$

需要指出的是, 一般情况下光纤陀螺系统的相位调制器只对主波产生调制^[8], 此处的相位调制器模型与传统的不同: 调制器不但对主波进行调制, 对耦合波也进行调制。这是从理论上对光纤陀螺系统的一种改进。从后面的分析中可以看到, 这种改进可以使光纤陀螺在方波的 2 种调制下, 形式更加具有对称性。

相位调制器在理想情况下的琼斯矩阵为

$$\mathbf{M}_{UP}(t) = \exp[j\varphi_{up}(t)] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{M}_{DOWN}(t) = \exp[j\varphi_{down}(t)] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

以上模型中的参数都是可测的。以保偏光纤环为例, 分别测出偏振光波经过保偏光纤环前后的光功率、相位差、椭圆度等参数, 联立求解, 即可得到矩阵元素的值。

2 光路系统模型

依据上述模型, 结合光波在光路系统中传播时的路径, 可以得到顺向和逆向传播时总的琼斯矩阵分别为

$$G_{CW} = R(-\theta_8) \cdot K_{C1F} \cdot R(-\theta_2) \cdot P_F \cdot R(-\theta_3) \cdot K_{C2F} \cdot R(-\theta_7) \cdot M_{DOWNF}(t+\tau) \cdot R(-\theta_6) \cdot S_{CW} \cdot R(\theta_5) \cdot M_{UP}(t) \cdot R(\theta_4) \cdot K_{T2} \cdot R(\theta_3) \cdot P \cdot R(\theta_2) \cdot K_{T1} \cdot R(\theta_1) = n \cdot A \cdot \exp[j(\varphi_{down}(t+\tau) + \varphi_{up}(t))] \quad (23)$$

$$G_{CCW} = R(-\theta_8) \cdot K_{C1F} \cdot R(-\theta_2) \cdot P_F \cdot R(-\theta_3) \cdot K_{T2F} \cdot R(-\theta_4) \cdot M_{UPF}(t+\tau) \cdot R(-\theta_5) \cdot S_{CCW} \cdot R(\theta_6) \cdot M_{DOWN}(t) \cdot R(\theta_7) \cdot K_{C2} \cdot R(\theta_3) \cdot P \cdot R(\theta_2) \cdot K_{T1} \cdot R(\theta_1) = n \cdot B \cdot \exp(j\varphi_s) \exp[j(\varphi_{up}(t+\tau) + \varphi_{down}(t))] \quad (24)$$

式中:

$$n = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_{2F} \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_{3F} \cdot \alpha_{8F} \cdot (1-\gamma_{1F})^{\frac{1}{2}} \cdot k_{1F}^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_1)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-k_1)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_P)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_{PF})^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$$A = \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_{6F} \cdot \alpha_{7F} \cdot (1-\gamma_{2F})^{\frac{1}{2}} \cdot k_{2F}^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-k_2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_s)^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta_8 & -\sin\theta_8 \\ \sin\theta_8 & \cos\theta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1CF} & h_{1DF} \\ h_{1DF}^* & h_{1CF}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon_F \exp(j\varphi_{PF}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{2CF} & h_{2DF} \\ h_{2DF}^* & h_{2CF}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_7 & -\sin\theta_7 \\ \sin\theta_7 & \cos\theta_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{W1F} & 0 \\ 0 & b_{W4F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{s1} & \alpha_{s2} \\ \alpha_{s2}^* & \alpha_{s1}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & \sin\theta_5 \\ -\sin\theta_5 & \cos\theta_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{C1} & 0 \\ 0 & b_{C4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & \sin\theta_4 \\ -\sin\theta_4 & \cos\theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{2A} & h_{2B} \\ h_{2B}^* & h_{2A}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \exp(j\varphi_P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1A} & h_{1B} \\ h_{1B}^* & h_{1A}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$B = \alpha_{4F} \cdot \alpha_{5F} \cdot \alpha_6 \cdot \alpha_7 \cdot (1-\gamma_2)^{\frac{1}{2}} \cdot k_2^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_{2F})^{\frac{1}{2}} \cdot (1-k_{2F})^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\gamma_{sF})^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta_8 & -\sin\theta_8 \\ \sin\theta_8 & \cos\theta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1CF} & h_{1DF} \\ h_{1DF}^* & h_{1CF}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon_F \exp(j\varphi_{PF}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{2AF} & h_{2BF} \\ h_{2BF}^* & h_{2AF}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{C1F} & 0 \\ 0 & b_{C4F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{s3} & \alpha_{s4} \\ \alpha_{s4}^* & \alpha_{s3}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & \sin\theta_6 \\ -\sin\theta_6 & \cos\theta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{W1} & 0 \\ 0 & b_{W4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_7 & \sin\theta_7 \\ -\sin\theta_7 & \cos\theta_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{2C} & h_{2D} \\ h_{2D}^* & h_{2C}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \exp(j\varphi_P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1A} & h_{1B} \\ h_{1B}^* & h_{1A}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad (27)$$

光路系统总的琼斯矩阵是顺时针和逆时针琼斯矩阵之和:

$$G = G_{CW} + G_{CCW} \quad (28)$$

因此经过整个光路后,输出光波可以用相干矩阵表示为

$$J_{out} = G \cdot J_s \cdot G^H \quad (29)$$

式中H表示转置共轭。依据相干矩阵与光强间的关

系^[5],进入探测器的信号为

$$I = \text{tr}[J_{out}] \quad (30)$$

当相位调制器满足:

$$\begin{aligned} \varphi_{up}(t) + \varphi_{down}(t+\tau) = \\ -[\varphi_{down}(t) + \varphi_{up}(t+\tau)] = \frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (31)$$

此时G表示为

$$G = n \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \exp(j \frac{\pi}{4}) + n \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \exp(\varphi_s) = n \begin{bmatrix} A_{11} \exp(j \frac{\pi}{4}) + B_{11} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \exp(\varphi_s) & A_{12} \exp(j \frac{\pi}{4}) + B_{12} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \exp(\varphi_s) \\ A_{21} \exp(j \frac{\pi}{4}) + B_{21} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \exp(\varphi_s) & A_{22} \exp(j \frac{\pi}{4}) + B_{22} \exp(-j \frac{\pi}{4}) \exp(\varphi_s) \end{bmatrix} \quad (32)$$

联立(1),(29),(30),(32)式,经计算整理,输出光强表达式为

$$I_1 = I_0 + I_C \sin(\varphi_8 + \varphi) \tag{33}$$

$$I_0 = n^2 \{ (A_{11}A_{11}^* + A_{21}A_{21}^* + B_{21}B_{21}^* + B_{11}B_{11}^*)C_{xx} + (A_{12}A_{12}^* + A_{22}A_{22}^* + B_{12}B_{12}^* + B_{22}B_{22}^*)C_{yy} + (A_{12}A_{11}^*C_{yx} + A_{11}A_{12}^*C_{xy}) + (B_{12}B_{11}^*C_{yx} + B_{11}B_{12}^*C_{xy}) + (A_{22}A_{21}^*C_{yx} + A_{21}A_{22}^*C_{xy}) + (B_{22}B_{21}^*C_{yx} + B_{21}B_{22}^*C_{xy}) \} \tag{34}$$

$$I_C = 2n^2 | B_{12}A_{11}^*C_{yx} + B_{11}A_{12}^*C_{xy} + B_{11}A_{11}^*C_{xx} + B_{12}A_{12}^*C_{yy} + B_{22}A_{21}^*C_{yx} + B_{21}A_{22}^*C_{xy} + B_{21}A_{21}^*C_{xx} + B_{22}A_{22}^*C_{yy} | \tag{35}$$

$$\varphi_8 = \arg(B_{12}A_{11}^*C_{yx} + B_{11}A_{12}^*C_{xy} + B_{11}A_{11}^*C_{xx} + B_{12}A_{12}^*C_{yy} + B_{22}A_{21}^*C_{yx} + B_{21}A_{22}^*C_{xy} + B_{21}A_{21}^*C_{xx} + B_{22}A_{22}^*C_{yy}) \tag{36}$$

同理,当相位调制器满足

$$\begin{aligned} \varphi_{up}(t) + \varphi_{down}(t + \tau) &= -[\varphi_{down}(t) + \varphi_{up}(t + \tau)] \\ &= -\frac{\pi}{4} \end{aligned} \tag{37}$$

此时的输出光强为

$$I_2 = I_0 - I_C \sin(\varphi_8 + \varphi) \tag{38}$$

因此解调之后输出的信号,即2种调制下的输出光强之差为^[9]

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 2I_C \sin(\varphi_8 + \varphi) \tag{39}$$

3 偏振误差分析方法

(39)式给出了干涉式光纤陀螺最终输出信号的表达形式。其中 φ_8 即为偏振引起的相位误差,将直接存在于相位中,大小与陀螺的零偏成正比; I_C 作为输出信号的幅度将影响标度因数(由于光纤陀螺一般工作在0点附近,因此标度因数与 I_C 近似成正比关系),进而影响陀螺的精度。因此只针对这2个因数进行分析。(35)式和(36)式分别给出了2个参数的表达形式。

从表达式中可以看到,光纤陀螺中的偏振误差是光路中的损耗、各个光学器件和熔接点缺陷引起的振幅偏差和相位偏差、以及光波沿不同方向经过光路时这些因素表现出的差异性共同作用的结果。因此在分析某个偏振影响因素对偏振误差的影响时,应该将光纤陀螺作为一个有机整体,将各个因素综合考虑,以此为基础进行分析。现有的文献在做类似分析时,大都假设其他影响因素处于理想状态,这与实际工程应用存在偏离。

本文的处理方法是:以上述光纤陀螺光路系统模型为基础,将光纤陀螺作为一个整体,以待分析的影响因素为变量,根据实际情况设置除此之外的其他参数值,在此情况下分析该变量与 φ_8 和 I_C 的关系。

下面通过以2种简单情况下, I_C 随光源耦合器正向分光比 k_1 的变化情况为例进行说明。

情况一:光源偏振度 $P=0.6$,光强为单位光

强;偏振器顺向和逆向的消光系数 $\epsilon = \epsilon_F = 0.0009$;保偏光纤环的传输矩阵中 $\alpha_{s1} = \alpha_{s3} = 1, \alpha_{s2} = \alpha_{s4} = 0$;其他参数均为理想值。

情况二:光源偏振度 $P=0.4$,光强为单位光强;偏振器顺向和逆向的消光系数 $\epsilon = \epsilon_F = 0.0003$;光源耦合器逆向分光比 $k_{1F} = 0.55$;分光耦合器顺向和逆向的分光比 $k_2 = 0.53, k_{2F} = 0.49$;保偏光纤环的传输矩阵中 $\alpha_{s1} = \alpha_{s3} = 1, \alpha_{s2} = \alpha_{s4} = 0$;其他参数均为理想值。

可以得到这2种情况下 I_C 随 k_1 的变化规律,如图2所示。从图中可以看到,同样是分析光源耦合器正向分光比 k_1 对 I_C 的影响,虽然2种情况下曲线的变化趋势相同,但其绝对大小是不同的。因此只有根据工程实际,将整个光路系统作为一个整体进行分析,得到的结果才会更精准。

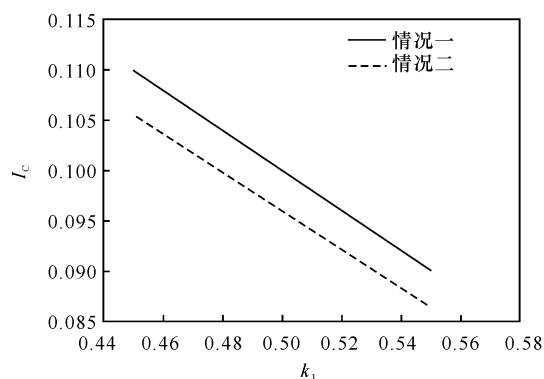


图2 I_C 随 k_1 变化的曲线

Fig. 2 The variation curve of I_C with k_1

4 结论

本文以相干矩阵和琼斯矩阵为工具,考虑了干涉式光纤陀螺光路中所有可能存在的缺陷,在已有研究的基础上,建立了一种适用于工程应用的干涉式光纤陀螺光路系统的物理模型。并提出了一种分析光路偏振误差的新方法。该方法将光路系统作为一个整体,研究光路中的偏振误差以及偏振误差与光路系统中缺陷之间的关系。这种模型和方法在工

程上可作为评价干涉式光纤陀螺光路系统性能的一个途径。

参考文献:

- [1] 王新,陈淑芬,方伟.干涉式光纤陀螺光路偏振特性的理论分析[J].光学技术,2005,31(2):187-189.
WANG Xin, CHEN Shu-fen, FANG Wei. Analysis of optical path polarization characteristic of interferometric fiber-optic gyroscope [J]. Optical Technique, 2005,31(2):187-189. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 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.
LI Xu-you, 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. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 秦一帆,胡志雄,葛春风,等.干涉式光纤陀螺的偏振噪声分析[J].光电子技术,2006,26(3):181-184.
QIN Yi-fan, HU Zhi-xiong, GE Chun-feng, et al. An analysis on the polarization noise of the interferometric fiber gyroscope[J]. Opto-Electronic Technology, 2006,26(3):181-184. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 王小宁,许家栋.光纤陀螺的光路偏振噪声的理论分析[J].西北工业大学学报,2000,18(3):425-428.
WANG Xiao-ning, XU Jia-dong. An analysis of the optical path's polarization noise of fiber gyroscopes [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2000,18(3):425-428. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 马科斯·波恩,埃米尔·沃尔夫.光学原理(第七版)[M].杨葭荪,译.北京:电子工业出版社,2006.
BORN M, WOLF E. Principles of optics (seventh (expanded) edition)[M]. Translated by YANG Jia-sun. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [6] 石顺祥,刘继芳,孙艳玲.光的电磁场理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006.
SHI Shun-xiang, LIU Ji-fang, SUN Yan-ling. Electromagnetic field theory of optical wave [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006. (in Chinese)
- [7] PAVLATH G A, SHAW H J. Birefringence and polarization effects in fiber gyroscopes[J]. Applied Optics, 1982,21(10):1752-1757.
- [8] 张延顺.干涉式光纤陀螺(IFOG)漂移特性的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2002:37-46.
ZHANG Yan-shun. The research on drift characteristics of interferometric fiber-optic gyro IFOG[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002:37-46. (in Chinese)
- [9] LEFEVRE H C. 光纤陀螺仪[M].张桂才,王巍,译.北京:国防工业出版社,2002.
LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Translated by ZHANG Gui-cai, WANG Wei. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)