

保圆光纤陀螺的误差分析

郭玉东^{1,2} 季敏宁^{1,2}

¹上海大学光纤研究所, 上海 201800

²上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

摘要 借鉴线偏干涉型光纤陀螺系统的理论方法,分析了圆偏振光陀螺系统的光源偏振度、传感环中的耦合点、反射点以及轴对不准所带来的误差对系统的影响。理论研究表明,在线偏振系统中易于造成偏振误差的反射点和轴对不准,在圆偏振系统下不再导致系统偏振误差;而由于圆偏振光陀螺系统中耦合偏振误差随损耗系数呈指数变化,故选择高性能的单圆偏振保持光纤对于减小偏振误差至关重要。

关键词 光纤光学;陀螺;圆偏振;偏振误差;圆保偏光纤

中图分类号 U666.12: TN911.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.010602

Error Analysis of Circular Polarization Maintaining Optical Fiber Gyroscope

Guo Yudong^{1,2} Ji Minning^{1,2}

¹Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China

²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Referring to the theoretical analysis method of the interference fiber optic gyroscope (FOG) based on linear polarization, the polarization error resulted from the circular polarization degree, coupling or reflex points, and misalignment of the butt-joint in a circular polarization maintaining optical fiber gyroscope is analyzed. The result shows that the reflex points and the misalignment which easily cause polarization error in a linear polarization system do not make influence in a circular polarization FOG. As the coupling polarization error from coupling points changes exponentially with the loss coefficient, electing a high quality single circular polarization maintaining optical fiber is significant for reducing the polarization error.

Key words fiber optics; gyroscope; circular polarization; polarization error; circular polarization maintaining fiber

OCIS codes 060.2800; 060.2370; 060.2300

1 引言

光纤陀螺(FOG)是惯性测量组合的核心精密器件,在工程和军事上都有重要的用途。干涉式光纤陀螺目前技术发展最为成熟,工程应用非常广泛,其发展的两大方向便是降低成本和提高精度。但是目前的光纤陀螺研究都只关注线偏振光系统或者消偏光系统,本质上线偏振光是两种正交圆偏振光的合成,而线偏系统的有些误差造成的原因是由于某种因素导致其左右旋圆折射率的改变^[1]。1990年,邓飞帆^[2]提出了在光纤陀螺中采用圆偏振光的概念,此后圆偏振保持光纤的研制一直是主要研究课题。2004年,Kopp等^[3]提出通过高速旋转双折射光纤,可获得具有偏振和波长选择特性的光纤光栅,但是高性能的圆偏振保持光纤目前尚无成熟的制备工艺。王许旭^[4]研究了圆偏振光在激光陀螺中的运用,提出了在环形腔内使用圆偏振光可以有效减少后向反射耦合,肖悦娣等^[5]提到将圆偏光用于光纤电流传感器,但未结合圆偏光特殊性质进行分析。

本文提出应用圆偏振光作为输入和传感信号光,考虑到3×3光纤耦合器固有的 $2\pi/3$ 输出相移,使得系统不需要相位偏置也能达到较好的检测灵敏度,光路系统采用基于3×3光纤耦合器搭建了一种低成本的开

收稿日期: 2015-08-21; 收到修改稿日期: 2015-10-24; 网络出版日期: 2015-12-28

基金项目: 上海市教委创新基金项目(09YZ31)

作者简介: 郭玉东(1988—),男,硕士研究生,从事特种光纤和光纤陀螺方面的研究。E-mail: 769253362@qq.com

导师简介: 季敏宁(1964—),男,博士,教授,主要从事特种光纤理论与技术方面的研究。E-mail: jmn2001@shu.edu.cn

环干涉型光纤陀螺^[6-7]。结合圆偏振光具有的特殊性质^[4],并借鉴线偏振的分析方法^[8-10],对圆偏振陀螺系统误差进行理论分析,为新型干涉型光纤陀螺的研制提供了参考依据。

2 开环陀螺结构

采用3×3耦合器的开环光纤陀螺系统如图1所示,主要光路结构是由放大自发射(ASE)光源、圆起偏器(CP)、3×3光纤耦合器、单圆保偏光纤环、以及两个光电探测器组成。

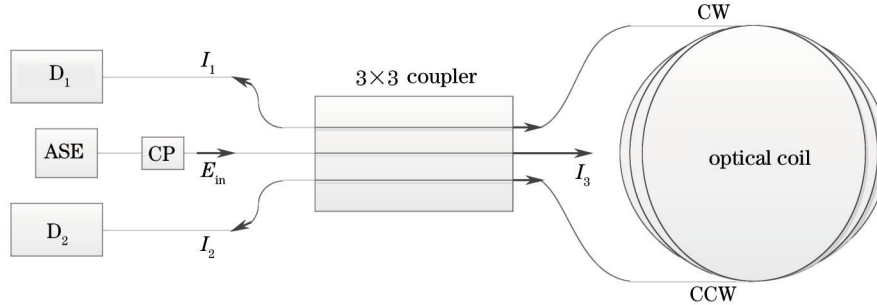


图1 开环光纤陀螺系统结构图

Fig.1 Structure diagram for open loop FOG system

假设图1中的耦合器为理想分光比1:1:1且无损的情形,传感环为左旋圆偏振保持光纤,输入为理想的左旋圆偏振光 E_{in} :

$$E_{in} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

光经耦合器分光后分别沿着顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向进入光纤环。为了便于分析,用线偏振的琼斯矩阵形式来描述圆保偏光纤传感环的圆偏传输性质^[11]:

$$J = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp[(j\beta_+ - \alpha_+)L] & 0 \\ 0 & \exp[(j\beta_- - \alpha_-)L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{1}{3} |E_{in}|^2 = \frac{1}{3} I_0, \quad (3)$$

$$I_1 = \left| \frac{1}{3} \exp \left[j \left(\frac{4}{3} \pi + \theta \right) \right] J E_{in} + \frac{1}{3} \exp \left(j \frac{2}{3} \pi \right) J E_{in} \right|^2 = \frac{2}{9} I_0 \left[1 + \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right], \quad (4)$$

$$I_2 = \left| \frac{1}{3} \exp \left[j \left(\frac{2}{3} \pi + \theta \right) \right] J E_{in} + \frac{1}{3} \exp \left(j \frac{4}{3} \pi \right) J E_{in} \right|^2 = \frac{2}{9} I_0 \left[1 + \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \right], \quad (5)$$

$$R = I_2 - I_1 = \frac{2}{9} |E_{in}|^2 \left[\cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) - \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] = \frac{4}{9} I_0 \sin \left(\frac{2}{3} \pi \right) \sin \theta, \quad (6)$$

式中 I_0 为输出光强度平均值, θ 为Sagnac效应引起的相位差, β_+ 、 α_+ 和 β_- 、 α_- 分别表示左、右旋圆偏振光在光纤中的传播常数和传输损耗。假设无损且 $\beta_+ = \beta_-$ 时,有(4)式和(5)式可见,用两路信号相减可以很简单地求出Sagnac信号。由于 $dR/d\theta$ 正比于 $\cos\theta$,即当 $\theta=0$ 时, $dR/d\theta$ 可以取到最大值。另一输出端口的信号 I_3 可以用做 I_1 和 I_2 信号的基准标定信号,对 R 进行修正。

3 误差模型分析

在偏振光学中,线偏振光可以分解为两个正交圆偏振光矢量和的形式,圆偏振光也可以用正交线偏振光来描述,本文利用偏振光学中不同偏振态的矢量关系,同时借鉴线偏振光的分析方法,分析圆偏振光的偏振度以及圆偏振光在经过系统耦合点、反射点和轴对不准时对保圆光纤陀螺系统的影响。

3.1 注入光的偏振度引起的误差

由于任意线偏振都可以分解成两个正交圆偏振态的形式。借鉴线偏振对于偏振度^[9]的定义,以同样的方式定义圆偏振的偏振度 d ,其中 E_+ 和 E_- 分别表示单位左右旋圆。

$$E_{in} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1+d}{2}} E_+ \\ \sqrt{\frac{1-d}{2}} E_- \end{bmatrix}, \quad (7)$$

写成线偏的形式如下:

$$E_{in} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{1+d} + \sqrt{1-d}}{2} \\ j \left(\frac{\sqrt{1+d} - \sqrt{1-d}}{2} \right) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将 E_{in} 带入(4)、(5)式,考虑含损耗情形,可得输出信号:

$$R = 2I_0 \left[\frac{1+d}{9} \exp(-2\alpha_+ L) + \frac{1-d}{9} \exp(-2\alpha_- L) \right] \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) \sin\theta. \quad (9)$$

由(9)式可以看出,偏振度 d 和保圆光纤的偏振损耗并未引起系统相位误差;当传感环的传输损耗 α_+ 和 α_- 为 0(即无损)或者相等时,陀螺系统灵敏度 R 与偏振度 d 无关;当传感环的保偏光纤为单一左旋圆偏振保持光纤时,由于系统中右旋圆偏振几乎被损耗掉,此时灵敏度仅与偏振度 d 和左旋圆的损耗有关。左旋圆偏振度越高,系统灵敏度越高,引起的灵敏度误差也越小;左旋圆偏振损耗越小,则灵敏度越高,引起的误差也越小。

3.2 传感环耦合点引起的误差

在线偏振光纤陀螺系统中,耦合点的耦合偏振误差^[8,11-14],包括振幅型和强度型偏振误差,是系统误差的重要来源,它们都与线偏振系统的偏振消光比 ϵ 有关。

如图 2 所示,在光纤环的 M 处有一耦合点,它距离光纤环出入口 A 的近端距离为 L_M , 光纤环总长为 L (设 $L \gg L_M$)。对于线偏振光,有图 3 所示的耦合关系,即在耦合点处会有模式间的转换。 E_{11} 和 E_{22} 是未发生耦合的部分, E_{12} 代表由模式 1 耦合到模式 2 的部分, E_{21} 同理。虽然发生了模式间的耦合,但在耦合前后其总的光功率是不变的。由于圆偏振也可以表示成线偏振态矢量和的形式,将圆偏振的耦合等效于其线偏分量的分别耦合,计算推导圆偏振耦合率与线偏振耦合率的关系。

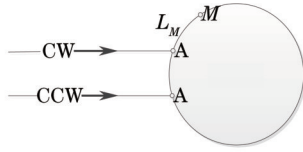


图2 光纤环中存在耦合点 M

Fig.2 Coupling point M in optical ring

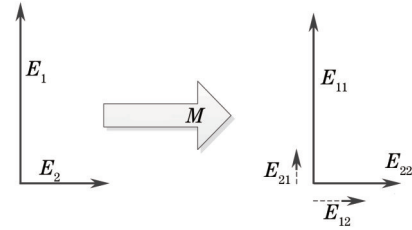


图3 点 M 处耦合示意图

Fig.3 Coupling map at point M

线偏振:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^{\text{point } M} \rightarrow \sqrt{1-\Delta} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sqrt{\Delta} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ j \end{bmatrix}^{\text{point } M} \rightarrow \sqrt{1-\Delta} \begin{bmatrix} 0 \\ j \end{bmatrix} + \sqrt{\Delta} \begin{bmatrix} j \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

(10)式表明线偏 X 轴部分能量 Δ 经过耦合点 M 时被耦合到 Y 轴上, (11)式同理。将(10)和(11)式相加减得

$$\begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}^{\text{point } M} \rightarrow \sqrt{1-\Delta} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} + \sqrt{\Delta} \begin{bmatrix} j \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}^{\text{point } M} \rightarrow \sqrt{1-\Delta} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} + \sqrt{\Delta} \begin{bmatrix} -j \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

(12)和(13)式表明,圆偏振在经过耦合点 M 后,会有一部分耦合为其对应的正交圆偏振态,其圆偏振光的耦合率与线偏振光的耦合率相等,统一记为 ρ 。

$$\frac{|E_{12}|^2}{|E_{22}|^2} = \frac{|E_{21}|^2}{|E_{11}|^2} = \frac{\Delta}{1-\Delta} \approx \Delta, \quad (14)$$

$$\rho = \rho_{\text{er/time}} = \rho_{\text{er/circle}} = \Delta. \quad (15)$$

对于保圆光纤,由于损耗 $\alpha_+ \ll \alpha_-$,若令 $\alpha = \alpha_+$, $\alpha_- = 0$, E_{11} 代表未发生耦合的主波-左旋圆偏振光分量, E_{22} 是光源中混入的右旋圆偏振光分量未发生耦合部分, E_{21} 是耦合到左旋圆偏振光部分。对于 E_{22} , 由于右旋圆损耗 α 较大, 当传感环光纤 L 足够长时, 几乎全部被损耗掉, 故其对系统造成的误差可以忽略不计。由于顺、逆时针(CW/CCW)耦合时间不同造成的非互易性相位差和损耗差, E_{21} 会对主波干涉造成影响。

$$\varphi_{21\text{CW}} = \beta_- L_M + (L - L_M)\beta_+, \quad (16)$$

$$\varphi_{21\text{CCW}} = \beta_+ L_M + (L - L_M)\beta_-. \quad (17)$$

则有

$$\Delta\varphi_{21} = (\beta_- - \beta_+)(2L_M - L), \quad (18)$$

$$\begin{aligned} I(\phi_{e1}) = & \left| E_{11} \exp(i\theta) + E_{11} + E_{21} \exp(-\alpha L_M) \exp[i(\theta + \Delta\varphi_{21})] + E_{21} \exp[\alpha(L_M - L)] \right|^2 = 2|E_{11}|^2 + |E_{21}|^2 \\ & \exp[2\alpha(L_M - L)] + |E_{21}|^2 \exp(-2\alpha L_M) + 2E_{11}^H E_{21} \left\{ \exp(-\alpha L_M) \cos \Delta\varphi_{21} + \exp[\alpha(L_M - L)] \right\} + \\ & 2 \left\{ |E_{11}|^2 + E_{11}^H E_{21} \exp[\alpha(L_M - L)] + \left[|E_{21}|^2 \exp(-\alpha L) + E_{11}^H E_{21} \exp(-\alpha L_M) \right] \cos \Delta\varphi_{21} \right\} \cos \theta + \\ & 2 \left[|E_{21}|^2 \exp(-\alpha L) + E_{11}^H E_{21} \exp(-\alpha L_M) \right] \sin \Delta\varphi_{21} \sin \theta \end{aligned} \quad (19)$$

由于不影响误差分析结果, 同时为了表达方便, (19) 式中未考虑 3×3 耦合器引入的 $2\pi/3$ 相移, 其中 H 表示共轭转置。由后两项可得最大偏振误差:

$$\begin{aligned} \phi_{e1} = \arctan & \left\{ \frac{\left[|E_{21}|^2 \exp(-\alpha L) + E_{11}^H E_{21} \exp(-\alpha L_M) \right] \sin \Delta\varphi_{21}}{\left[|E_{11}|^2 + E_{11}^H E_{21} \exp[\alpha(L_M - L)] + \left[|E_{21}|^2 \exp(-\alpha L) + E_{11}^H E_{21} \exp(-\alpha L_M) \right] \cos \Delta\varphi_{21}} \right\} \leq \\ & \frac{|E_{21}|}{|E_{11}| \exp(\alpha L_M)} = \frac{|E_{22}| |E_{21}|}{|E_{11}| |E_{22}|} \exp(-\alpha L_M) \approx \sqrt{\frac{1-d}{1+d}} \sqrt{\rho} \exp(-\alpha L_M) \end{aligned} \quad (20)$$

由(20)式可以看出, 右旋圆偏振耦合到左旋圆偏振引起的偏振误差与光源偏振度、耦合点的耦合率以及损耗和耦合点距入射点的距离有关。且 L_M 越小, 造成的误差越大, L_M 最小可取零, 也即当耦合点在入射点处时造成的偏振误差最大; 而 L_M 取传感环中点即 $L/2$ 时, 偏振误差最小。这类误差在线偏振中被称为振幅型偏振误差。

E_{12} 是由左旋光耦合到右旋光的部分, 由于左右旋光相互正交, 故不会发生干涉, 但依然会造成一定的输出功率波动误差。同理应有

$$\Delta\varphi_{12} = (\beta_+ - \beta_-)(2L_M - L) = -\Delta\varphi_{21}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} I(\phi_{e2}) = & \left| E_{11} \exp(i\theta) + E_{11} \right|^2 + \left| E_{12} \exp[\alpha(L_M - L)] \exp[i(\theta + \Delta\varphi_{12})] + E_{12} \exp(-\alpha L_M) \right|^2 = \\ & 2|E_{11}|^2 + |E_{12}|^2 \exp[2\alpha(L_M - L)] + |E_{12}|^2 \exp(-2\alpha L_M) + 2|E_{12}|^2 \exp(-\alpha L) \sin \Delta\varphi_{12} \sin \theta + \\ & [2|E_{11}|^2 + 2|E_{12}|^2 \exp(-\alpha L) \cos \Delta\varphi_{12}] \cos \theta. \end{aligned} \quad (22)$$

可得其最大误差为

$$\phi_{e2} = \arctan \left[\frac{|E_{12}|^2 \exp(-\alpha L) \sin \Delta\varphi_{12}}{|E_{11}|^2 + |E_{12}|^2 \exp(-\alpha L) \cos \Delta\varphi_{12}} \right] \approx \frac{|E_{12}|^2 \exp(-\alpha L) \sin \Delta\varphi_{12}}{|E_{11}|^2} = \rho \exp(-\alpha L) \sin \Delta\varphi_{12} \leq \rho \exp(-\alpha L). \quad (23)$$

从(23)式可以看出, 偏振误差的最大值仅与耦合点的耦合率和右旋圆偏振的损耗有关。对于左旋圆单偏振保持光纤, 由于右旋圆偏振的损耗较大, 此类偏振误差很小, 通常可以忽略不计, 这种误差在线偏系统中被称为强度型偏振误差。

由(20)式和(23)式可得总的最大偏振误差为

$$\phi_e = \phi_{e1} + \phi_{e2} = \sqrt{\frac{1-d}{1+d}} \sqrt{\rho} \exp(-\alpha L_M) + \rho \exp(-\alpha L). \quad (24)$$

假设取 L 为 1 km 的保圆光纤, 偏振度 d 取 0.9, 取 $\Delta\varphi_{12} = -\Delta\varphi_{21} = \pi/3$, 对 ϕ_{e1} 、 ϕ_{e2} 、 ϕ_e 进行数值模拟, 如

图 4~6 所示。由(20)式和(23)式可知两种误差的光程差大小相等、符号相反,所以造成两类误差的符号相反,可以相互抵消一部分,且选用不同损耗的保圆光纤,其效果明显不同。图 5 中,传感环右旋圆损耗 $\alpha=0.001$ 时,误差 ϕ_{e2} 大小为 10^{-3} 量级;而 $\alpha=0.01$ 时,误差大小为 10^{-7} 量级。从图 4 和图 6 可知,偏振误差基本与耦合率的平方根成线性关系,当损耗 α 较高时, ϕ_{e2} 对总的误差输出影响很小。分析(24)式可见,由于耦合引起的偏振误差与损耗系数 α 成指数关系,故选用高性能的单圆偏振态保持光纤至关重要,若要进一步降低偏振误差,可通过提高注入光 E_m 的偏振度,减小闭合回路的偏振交叉耦合,加大光纤长度实现。

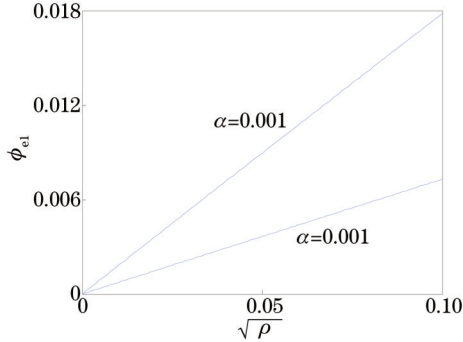


图 4 不同损耗下的偏振误差

Fig.4 Polarization error with different losses

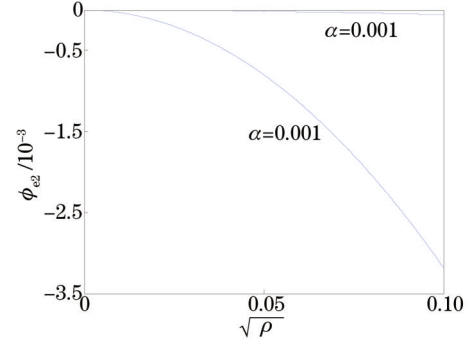


图 5 不同损耗下的偏振误差

Fig.5 Polarization error with different losses

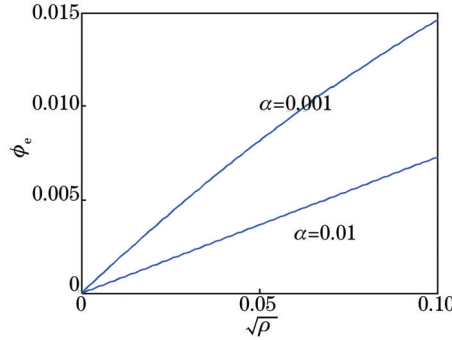


图 6 不同损耗下的总偏振误差

Fig.6 Polarization error with different losses

3.3 背向反射引起的误差

在光纤陀螺中,背向反射可能来源于器件与光纤连接的端面反射耦合,也可能来源于光纤两端不理想的融合点。在线偏振光纤陀螺系统中,这些反射波和主波都是相干波,会对系统输出造成一定的影响。在采用圆偏振光的系统中,同样需要分析系统中的背向反射,这里仅简要分析光纤线圈中的反射点(如图 2 点 M)。根据圆偏振光的特殊性质,圆偏振光在全反射后其旋转方向会发生改变,即左旋光 E_+ 会反射为右旋光 E_- ,且 $E_+^2 = E_-^2 = I_0$ 。对于自然旋光介质光纤,其圆双折射造成的相位差是互易的,即透射光由于反射而再次反向通过时偏振面将回到初始位置,不携带 Sagnac 相移^[4],反向传播的两反射波并无相位差,只有振幅损耗。设反射率为 δ ,有

$$\begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}^{\text{reflex point}} \rightarrow \sqrt{1-\delta} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} + \sqrt{\delta} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$I_1 = \frac{2(1-\delta)}{9} I_0 \left[1 + \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \right] + \frac{\delta}{9} I_0 \left\{ \exp(-2\alpha L_M) + \exp[2\alpha(L_M - L)] + 2 \exp(-\alpha L) \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right) \right\}, \quad (26)$$

$$I_2 = \frac{2(1-\delta)}{9} I_0 \left[1 + \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \right] + \frac{\delta}{9} I_0 \left\{ \exp(-2\alpha L_M) + \exp[2\alpha(L_M - L)] + 2 \exp(-\alpha L) \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right) \right\}, \quad (27)$$

$$R = I_2 - I_1 = \frac{4(1-\delta)}{9} I_0 \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) \sin \theta. \quad (28)$$

由(25)式和(28)式可以看出,由于圆偏光反射改变了其偏振状态的特性,以及系统两路探测器的特点,反射点对于输出信号的相位并无影响,只会导致输出信号强度的变化,但这可以通过第三路信号 I_3 来标定,

以求出反射率 δ 的值。

3.4 轴对准误差

耦合点误差和轴对准误差有很大的相似之处,但轴对准误差^[15-16]导致的耦合更像是偏振态的旋转。对于线偏振的旋转,会导致偏振态的明显变化,但是对于圆偏振来说,由于其本身就是旋转描述的,偏振态的旋转并不会改变其偏振状态,可以用琼斯矩阵来具体描述。

线偏:

$$\begin{bmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a \\ -\sin a \end{bmatrix}. \quad (29)$$

圆偏:

$$\begin{bmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a + j \sin a \\ -\sin a + j \cos a \end{bmatrix} = (\cos a + j \sin a) \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}. \quad (30)$$

由(29)式和(30)式可以明显看出,对于线偏振,由于其旋转后还要再次经过偏振器,也就是其中 Y 轴上的 $-\sin a$ 会被偏振器消光,而圆偏振经过旋转后仍然还是圆偏振,其在保圆光纤中传播也不会因为损耗而产生偏振误差。数值模拟结果如图7所示,系统的灵敏度确实不随对准角的变化而变化,即幅角方向轴对不准,不会引起偏振误差。

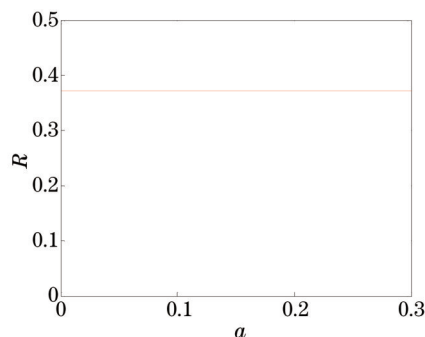


图7 输出信号 R 随对准角的变化

Fig.7 Change of output signal R with the misalignment

4 结 论

干涉型光纤陀螺在工程中有着广泛的应用,通过线偏陀螺系统的分析方法,根据偏振光学中线偏振与圆偏振的矢量关系,理论分析了应用圆偏振光作为陀螺干涉光源设计保圆光纤陀螺的可行性,并以圆偏振光的偏振特性为基础,分析了保圆光纤陀螺系统中的圆偏振度、耦合点、反射点以及轴对不准对于输出误差的影响。研究可知,在线偏陀螺系统中容易导致系统误差的偏振度,反射点以及轴对不准对于圆偏陀螺的偏振相位误差几乎没有影响。理论上,同等工作环境下圆偏陀螺系统灵敏度优于线偏陀螺系统。圆偏与线偏陀螺系统的最大区别在于耦合点的最大偏振误差,虽然都与耦合率和注入光的偏振度有关,但线偏陀螺的偏振误差主要由偏振器的消光比决定,而圆偏陀螺的偏振误差主要由保偏光纤的保偏损耗决定,因此选取高性能的单圆偏振保持光纤对于减小圆偏陀螺的系统误差至关重要。

参 考 文 献

- 1 Feng Weiwei, Song Lianke, Chen Ligang. The study of the relation between circularly polarized light's refractive rate and wavelength[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 639-640.
冯伟伟, 宋连科, 陈立刚. 旋光晶体中圆偏振光折射率与波长的关系探讨[J]. *激光技术*, 2004, 28(6): 639-640.
- 2 Deng Feifan. Using circularly polarized scheme in fiber optic gyroscope[C]. Chinese Institute of Electronics, the first national conference on optical fiber sensing technology, 1990.
邓飞帆. 在光纤陀螺中采用圆偏振光方案[C]. 中国电子学会首届全国光纤传感技术学术会议, 1990.
- 3 Kopp V I, Churikov V M, Singer J, et al.. Chiral fiber gratings[J]. *Science*, 2004, 305(5680): 74-75.
- 4 Wang Xuxu. Bidirectional Er-Doped Fiber Ring Laser With Circular Polarization For Gyroscope Application[D]. Hefei:

- University of Science and Technology of China, 2007: 44–56.
- 王许旭. 应用于陀螺的圆偏振双向掺铒光纤环形腔激光器[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 44–56.
- 5 Xiao Yueyu, Wang Hongwei, Yan Jinkui, *et al.*. Measurement of phase difference in 3×3 fiber of Chincoupler based on FOCT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1297–1300.
- 肖悦娱, 王洪伟, 颜锦奎, 等. 基于 FOCT 的 3×3 光纤耦合器相位差测量[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1297–1300.
- 6 Sheem S K. Fiber-optic gyroscope with [3×3] directional coupler[J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 37(10): 869–871.
- 7 Schliep F. Nonideal behaviour of singlemode fibre-optic 3×3 directional couplers[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(17): 1496–1498.
- 8 Xu Hongjie, Zhang Wenyan, Xu Xiaobin, *et al.*. Polarization bias error model and simulation of fiber optic gyroscope with double optical length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1006002.
- 徐宏杰, 张文艳, 徐小斌, 等. 双光程光纤陀螺偏振误差模型与仿真[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1006002.
- 9 Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010: 70–74, 84–85.
- 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 70–74, 84–85.
- 10 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.
- 11 Su Yang, Zhu Yong, Yi Xiaoxin, *et al.*. Transmission and polarization properties of circular-birefringence fiber gratings and their applications in magnetic-field sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0626001.
- 苏洋, 朱勇, 益晓新, 等. 圆双折射光栅的传输和偏振特性研究及磁场传感应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0626001.
- 12 Li Zizhong, Li Zhihong, Yao Xiaotian, *et al.*. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and random walk of fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206001.
- 李子忠, 李志宏, 姚晓天, 等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206001.
- 13 Wang Xiaoning, Xu Jiadong. An analysis of the optical path's polarization noise of fiber gyroscopes[J]. *Journal of North Western Poly Technical University*, 2000, 18(3): 425–428.
- 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.
- 14 Li Zizhong, Li Zhizhong, Li Guohua. Analysis of depolarized fiber optical gyro's polarization crosstalk error and experimental research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 42–50.
- 李子忠, 李志宏, 李果华. 消偏光纤陀螺偏振串扰误差分析及实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 42–50.
- 15 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.
- 16 Zhang Jinghua, Wang Chunhua, Huang Zhaoming. Application of white-light interference in measurement and principal axles alignment of polarization-maintaining fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(12): 1308–1311.
- 张靖华, 王春华, 黄肇明. 白光干涉在保偏光纤测量与对轴中的应用[J]. *光学学报*, 1994, 14(12): 1308–1311.

栏目编辑: 张雁