

文章编号: 0258-7025(2009)08-2083-06

谐振式光纤陀螺环形谐振腔的偏振问题

张旭琳¹ 周柯江²

(¹ 深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)
² 浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027

摘要 谐振式光纤陀螺(R-FOG)中,偏振波动引起的检测信号漂移对陀螺系统的检测精度有重要影响。通过矩阵法,分析系统中光纤耦合器不同偏振本征态(ESOPs)的耦合系数差异,与所引起的系统零偏的关系,得到其与两个偏振本征态耦合系数以及光纤环形谐振腔参数间的解析表达式。利用该解析表达式,求解系统零偏为极值时,耦合器不同偏振本征态的最佳耦合系数;该最佳耦合系数仅与光纤环形谐振腔的损耗参数有关。通过 Matlab 软件进行数值拟合,得到不同偏振本征态耦合系数与系统零偏之间的关系曲线。从理论上建立耦合器耦合系数偏振相关引起的噪声模型。利用该理论模型,对已报道的 R-FOG 开环实验系统中偏振波动引起的系统零偏进行了估算。

关键词 传感器;谐振式光纤陀螺;偏振本征态;偏振波动;零偏

中图分类号 TN256;TN815

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093608.2083

Polarization-Fluctuation in Resonator of Resonator Fiber-Optic Gyro

Zhang Xulin¹ Zhou Kejiang²

¹ Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology,
College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China
² Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract In the resonator fiber-optic gyro (R-FOG), the detection precision of the system is influenced by the polarization-fluctuation deeply. Using the Jones matrix, the relationship between the drift caused by the polarization-fluctuation and the difference in the coupling ratios of the two eigenstates of polarization (ESOPs) is derived. To make the drift margin, the optimized coupling ratios of the two ESOPs are gotten. These optimized coupling ratios are only related to the loss parameters of the resonator in R-FOG. By the numerical simulation in Matlab, the curves between the drift and the coupling ratios of the two ESOPs are attained, respectively. The polarization-fluctuation error model about the correlation between the coupling ratios of the two ESOPs is set up. Based on the theoretical model above, the drift induced by the polarization-fluctuation is estimated in the reported open-loop experiment of R-FOG. It's the theoretical base to overcome the polarization-fluctuation and do the experiments in R-FOG system.

Key words sensors; resonator fiber-optic gyro; eigenstate of polarization; polarization-fluctuation; drift

1 引 言

谐振式光纤陀螺(Resonator fiber-optic gyro, R-FOG)是基于光学 Sagnac 效应^[1]来测量旋转角速度的一种新型传感器。与目前已产品化的干涉式光纤陀螺相比,具有理论精度高等特点^[2,3]。与干涉式光纤陀螺类似,R-FOG 系统中的实际检测精度受到各种噪声因素的影响^[4~6],其中,偏振波动是系统中主要的噪声源之一^[7,8]。K. Iwatsuki 等^[7]对 R-FOG 中的偏振问题进行了分析,但未考虑实际光纤

耦合器中两个偏振本征态(Eigenstates of polarization, ESOPs)的耦合系数存在差异。王世军等^[8]在光学偏振特性的分析过程中考虑到耦合器中两个 ESOPs 耦合系数的不同,但只针对环形谐振腔的传递函数进行分析,而且在数值模拟时未将两个 ESOPs 耦合系数不相等的情况进行拟合,同时未进一步分析偏振波动引起的系统噪声。根据波导耦合方程,耦合器的耦合系数与光传播常数有关,由于光纤中存在的两个 ESOPs 对应的传播常数不相等,造

收稿日期: 2009-02-27; 收到修改稿日期: 2009-04-28

基金项目: 深圳市微纳光子信息技术重点实验室开放课题(2000812)和深圳大学科研基金(200867)资助项目。

作者简介: 张旭琳(1980—),女,讲师,博士,主要从事集成光学和微系统集成方面的研究。E-mail: zxlin@szu.edu.cn.

成了耦合器中两个 ESOPs 的耦合系数也不相同;耦合器中耦合系数的偏振相关是实际器件中普遍存在的现象。耦合器中两个 ESOPs 的耦合系数存在差异,使得系统的检测信号存在偏移;而这一耦合系数的差异又会随着时间的推移而改变,即引起偏振波动,进而造成系统零偏产生波动,引起系统零漂。

本文利用矩阵法,建立光纤耦合器两个 ESOPs 的耦合系数与偏振相关的系统零偏之间的解析表达式。根据极值求解法,得到系统零偏达到极值时两个 ESOPs 耦合系数的最佳值与环形谐振腔参数之间的关系式。通过 Matlab 软件,对系统零偏与耦合系数的解析表达式进行数值拟合,分析 R-FOG 系统中,偏振波动引起的系统检测信号的漂移与偏振相关参数、环形谐振腔参数间的关系。同时,将数值拟合时采用的系统参数代入上述最佳耦合系数表达式,所得结果与数值模拟曲线中系统零偏达到极值时对应的最佳耦合系数值一致。并且在上述理论分析的基础上,对已报道的 R-FOG 开环实验系统中的偏振波动噪声进行估算,从理论上验证上述分析的正确性。

2 理论分析

2.1 光纤环形谐振腔中的偏振特性分析

光纤环形谐振腔的结构示意图如图 1 所示。其中,Laser 为输入光源,C 表示光纤耦合器,PD 为光探测器。 E_i ($i=1,2,3,4$) 分别表示耦合器的输入、输出端的电场量, F_b 表示环形谐振腔内的传输矩阵。

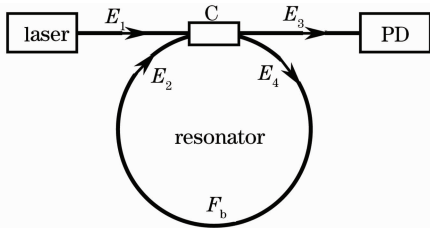


图 1 环形谐振腔结构

Fig. 1 Diagram of resonator

一般 R-FOG 系统中存在两个正交的 ESOPs,光纤耦合器 C 的输入、输出电场可表示为

$$\mathbf{E}_i = \begin{pmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (1)$$

其中 1 表示环形谐振腔外输入端口的矢量;2 是环形谐振腔内输入端矢量;3 是环形谐振腔外输出端矢量;4 是环形谐振腔内输出端口矢量。假设光纤耦合器 C 中两个 ESOPs 的附加损耗一致,则每个端口的矢量关系用 Jones 矩阵^[7]表示

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{E}_4 \end{bmatrix} = e^{(-\frac{\alpha_c}{2})} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_r & \mathbf{c}_t \\ \mathbf{c}_t & \mathbf{c}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{c}_r 和 \mathbf{c}_t 是 2×2 矩阵,表示光纤耦合器 C 的光波场反射和透射耦合系数, α_c 是光纤耦合器 C 的附加损耗。

$$\mathbf{c}_r = \begin{bmatrix} r_x & 0 \\ 0 & r_y \end{bmatrix}, \quad (3a)$$

$$\mathbf{c}_t = \begin{bmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{bmatrix}, \quad (3b)$$

其中 r_x, t_x 分别为光纤耦合器 C 中一个 ESOP 的光波场反射和透射耦合系数; r_y, t_y 则分别为光纤耦合器 C 中另一个 ESOP 的光波场反射和透射耦合系数。一般情况下, $r_x \neq r_y, t_x \neq t_y$

$$r_x = |r_x| e^{j\theta_1}, \quad (4a)$$

$$r_y = |r_y| e^{j\theta_2}, \quad (4b)$$

$$|r_x|^2 + |t_x|^2 = 1, \quad (4c)$$

$$|r_y|^2 + |t_y|^2 = 1, \quad (4d)$$

根据环形谐振腔中输入、输出端口的传输关系,以及各个端口间的能量关系,光探测器 PD 的输入光功率 I_D 可表示为

$$I_D = e^{-\alpha_c} \mathbf{E}_1^+ \left\{ \mathbf{I} - \mathbf{c}_t^+ \left[\sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\frac{\alpha_c}{2}} \mathbf{c}_r \mathbf{F}_b)^n \right]^+ \times \right. \\ \left. \left[\mathbf{I} - e^{-\alpha_c} \mathbf{F}_b^+ \mathbf{F}_b \right] \left[\sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\frac{\alpha_c}{2}} \mathbf{c}_t \mathbf{F}_b)^n \right] \mathbf{c}_t \right\} \mathbf{E}_1, \quad (5)$$

其中 \mathbf{I} 为 2×2 的单位矩阵,+ 表示矩阵复共轭转置。

假设光纤环形谐振腔中两个 ESOPs 正交,则

$$\mathbf{F}_b = \begin{bmatrix} e^{-\alpha_l L/2 + j\beta_1 L} & 0 \\ 0 & e^{-\alpha_l L/2 + j\beta_2 L} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 β_1, β_2 分别表示两个 ESOPs 在光纤环形谐振腔中的传播常数, α_l 表示光在光纤环形谐振腔中的单位传输损耗, L 表示光纤环形谐振腔的总长度。将 (3a)~(4d) 式及 (6) 式代入 (5) 式,则考虑两个 ESOPs 耦合系数不同后的 I_D 表示为

$$I_D = \exp(-\alpha_c) \left\{ \left\{ 1 - \frac{(1-t_x^2)|t_x|^2}{(1-|r_x||t_f|^2) + 4|r_x||t_f|\sin^2[(\beta_1 L + \theta_1)/2]} \right\} |\mathbf{E}_{1x}|^2 + \right. \\ \left. \left\{ 1 - \frac{(1-t_y^2)|t_y|^2}{(1-|r_y||t_f|^2) + 4|r_y||t_f|\sin^2[(\beta_2 L + \theta_2)/2]} \right\} |\mathbf{E}_{1y}|^2 \right\}, \quad (7)$$

其中,

$$t_f = \exp[-(\alpha_c + \alpha_1 L)/2]. \quad (8)$$

2.2 R-FOG 系统中的偏振特性分析

图 2 给出了由光纤环形谐振腔组成的 R-FOG 系统的主体光路结构^[9~11]。其中 C_1, C_3, C_4 表示光功率分束比为 1:1 的光纤耦合器, C_2 为组成光纤环形谐振腔的光纤耦合器。PD₁, PD₂ 为光探测器。

根据(7)式, 可以写出图 2 所示的顺时针(CW)光路和逆时针(CCW)光路, 光探测器 PD₁, PD₂ 的

输入光功率 I_{PD_1}, I_{PD_2} 分别表示为

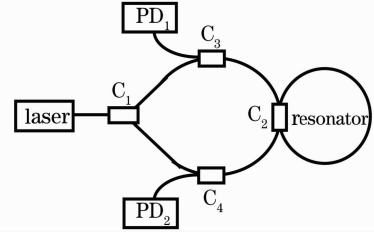


图 2 R-FOG 中的光路结构

Fig. 2 Optical setup in R-FOG

$$I_{PD_1} = \frac{e^{-\alpha_c}}{2} \left\{ (1 - K_1) \left[1 - \frac{(1 - t_f^2) |t_x|^2}{(1 - |r_x| t_f)^2 + 4 |r_x| t_f \sin^2(\pi \tau_0 x)} \right] + K_1 \left[1 - \frac{(1 - t_f^2) |t_y|^2}{(1 - |r_y| t_f)^2 + 4 |r_y| t_f \sin^2(\pi \tau_0 x - \Delta/2)} \right] \right\} I_0, \quad (9a)$$

$$I_{PD_2} = \frac{e^{-\alpha_c}}{2} \left\{ (1 - K_2) \left[1 - \frac{(1 - t_f^2) |t_x|^2}{(1 - |r_x| t_f)^2 + 4 |r_x| t_f \sin^2(\pi \tau_0 y)} \right] + K_2 \left[1 - \frac{(1 - t_f^2) |t_y|^2}{(1 - |r_y| t_f)^2 + 4 |r_y| t_f \sin^2(\pi \tau_0 y - \Delta/2)} \right] \right\} I_0, \quad (9b)$$

其中,

$$x = \frac{\beta_1 L + \theta_1}{2\pi\tau_0} + \frac{\Delta F_s}{2} + \Delta F_p, \quad (10a)$$

$$y = \frac{\beta_2 L + \theta_2}{2\pi\tau_0} - \frac{\Delta F_s}{2}, \quad (10b)$$

$$\Delta = (\beta_1 - \beta_2)L + (\theta_1 - \theta_2), \quad (10c)$$

$$\tau_0 = \frac{nL}{c}, \quad (10d)$$

K_1, K_2 分别为每个光路中两个 ESOPs 的光功率激励比。 θ_1, θ_2 为(4a)式, (4b)式中所示参数。 β_1, β_2 为(6)式中所示参数。 ΔF_s 表示陀螺转动引起的 Sagnac 频差, ΔF_p 表示两个 ESOPs 耦合系数差异引起的两

光路谐振频率偏移, n 表示光纤折射率, c 表示真空中的光速。

假设光纤环形谐振腔中只有 CW 方向的光路中有偏振激励, 即 $K_1 = \Delta K, K_2 = 0$, 在使用起偏器的情况下可以满足。CW 光路中, 假设其中一个 ESOP 处于谐振谷附近, 则由(9a)式可知, 另一个 ESOP 与谐振谷之间存在 Δ 的偏差。

为简化计算, 假设光纤环形谐振腔中 CW 光路的两个 ESOPs 都十分靠近谐振谷, 即 $x - \Delta \ll 1, x \ll 1$ 。将(9a), (9b)式分别对 x, y 求导, 谐振谷处导数为零, 则

$$x = \frac{\Delta}{2\pi\tau_0} \frac{1}{(1/\Delta K - 1) [(1 - |r_y| t_f)/(1 - |r_x| t_f)]^4 |t_x|^2/|t_y|^2 \times |r_x|/|r_y| + 1}, \quad (11a)$$

$$y = 0, \quad (11b)$$

当 R-FOG 静止, 即 $\Delta F_s = 0$ 时, $\Delta F_p = x \cdot y$ 即为偏振噪声引起的谐振频率偏移。因此

$$\Delta F_p = \frac{\Delta}{2\pi\tau_0} \frac{1}{(1/\Delta K - 1) [(1 - |r_y| t_f)/(1 - |r_x| t_f)]^4 |t_x|^2/|t_y|^2 \times |r_x|/|r_y| + 1}, \quad (12)$$

根据光学 Sagnac 效应^[1], 则偏振噪声引起的系统零偏表示为

$$\Omega_p = \frac{\lambda c}{2\pi L D} \frac{\Delta}{(1/\Delta K - 1) |r_x|/|r_y| (1 - |r_x|^2)/(1 - |r_y|^2) [(1 - |r_y| t_f)/(1 - |r_x| t_f)]^4 + 1}, \quad (13)$$

(13)式中利用了(4c), (4d)和(10d)式。其中, D 为环形谐振腔直径, λ 为光源的输出光波长。由(13)式可知, 当 $\Delta = 0$ 时, 由偏振噪声引起的系统零偏为零。但是, Δ 会随着时间而变化, 从而引起系统零偏

的变化, 产生零漂。

将(13)式对 $|r_y|$ 求导, 令导数为零, 可以得到 Ω_p 为极值时, $|r_y|$ 的最佳取值 $|r_y|_0$, 表示为

$$t_f = \frac{3(|r_y|_0)^2 - 1}{|r_y|_0[3 - (|r_y|_0)^2]}, \quad (14a)$$

同理,将(13)式对 $|r_x|$ 求导,可得相应的最佳值 $|r_x|_0$,为

$$t_f = \frac{3(|r_x|_0)^2 - 1}{|r_x|_0[3 - (|r_x|_0)^2]}, \quad (14b)$$

从(14a),(14b)式中可知,当 Ω_p 达到极值时,对应的两个 ESOPs 的光波场反射耦合系数的最佳值

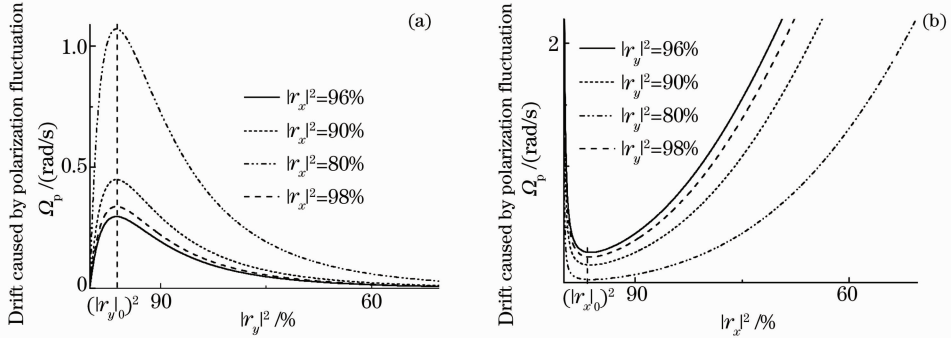


图 3 Ω_p 与耦合系数与 $|r_y|^2$ (a) 及 $|r_x|^2$ (b) 的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the drift Ω_p and the coupling ratios $|r_y|^2$ (a) and $|r_x|^2$ (b)

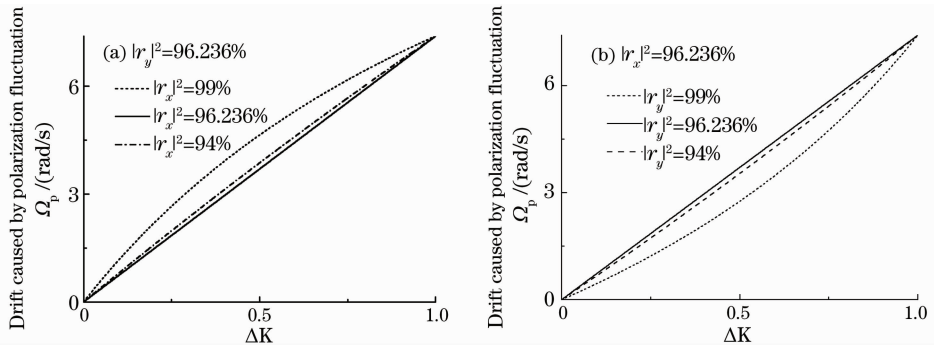


图 4 不同条件下 Ω_p 与 ΔK 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the drift Ω_p and ΔK in different cases

3 数值模拟及讨论

在上述理论分析的基础上,利用 Matlab 软件对(13)式进行数值拟合。假设,光纤环形谐振腔的 L 为 5 m, D 为 0.1 m,损耗参数: α_c 为 0.4 dB, α_l 为 0.02 dB/m; Δ 为 0.05 rad, ΔK 为 0.04。观察 Ω_p 与 $|r_y|^2$, $|r_x|^2$ 的关系。

从图 3(a)中可知,当 $\Delta, \Delta K$ 确定后,无论 $|r_x|^2$ 为何值,使 Ω_p 达到极大值的 $(|r_y|_0)^2$ 是确定的,都为 96.236%;从图 3(b)中可知,对于任一确定的 Δ 和 ΔK 值,无论 $|r_y|^2$ 为何值, $|r_x|^2$ 都存在一个确定的最佳值 $(|r_x|_0)^2$ (为 96.236%),使 Ω_p 达到极小值。将图 3 中的系统损耗参数分别代入(14a),(14b)式,求解得到 $(|r_y|_0)^2 = (|r_x|_0)^2 = 96.236\%$,与图 3 中的数值模拟结果一致。从理论

$|r_y|_0$ 及 $|r_x|_0$ 都只与 t_f 有关。由(8)式可知, t_f 仅是与光纤环形谐振腔中耦合器的附加损耗 α_c ,以及光纤环形谐振腔中的光传输损耗 $\alpha_l L$ 相关的参量。因此,在设计一个 R-FOG 系统时,为了能够有效地控制偏振噪声的影响,使系统的检测精度达到一定的量级,光纤环形谐振腔中损耗参数的合理选取尤为重要。

上验证了(14a),(14b)式的正确性。

在图 3 的基础上,当 $\Delta=0.05$ rad,分析 $|r_x|^2$ 或 $|r_y|^2$ 取值不同时, Ω_p 与 ΔK 的关系曲线,如图 4(a),图 4(b)所示,R-FOG 系统的参数与图 3 中一致。

从图 4(a),(b)中可知,在 ΔK 的有效取值范围内(0~1 之间),在一定的 $|r_x|^2$ 和 $|r_y|^2$ 情况下, Ω_p 随着 ΔK 的增大而增加。但是,对于不同的 $|r_x|^2$ 或 $|r_y|^2$ 值, Ω_p 随 ΔK 的变化趋势有所改变。

由于 Δ 值的变化,会引起系统零偏的变化;因此,下面对 Ω_p 与 Δ 之间的关系进行数值分析。根据(13)式求解过程中的假设,确定 Δ 的取值范围在 0~0.1 rad 之间, $\Delta K = 0.004$ 。R-FOG 系统的参数与图 3 中的相同。

从图 5 中可得,当 Δ 为零时,偏振引起的系统零

偏也为零;在 Δ 一定的情况下, $|r_x|^2$ 的值越接近 96.236%(如图 5(a) 所示),同时 $|r_y|^2$ 的值与 $|r_x|^2$ 的值相差越大(如图 5(b) 所示),此时系统零

偏就越小。因为 $|r_y|^2$ 与 $|r_x|^2$ 之间的差值越大,光纤耦合器就越趋向于一个单偏振的耦合器,这样偏振波动也就相应减小。

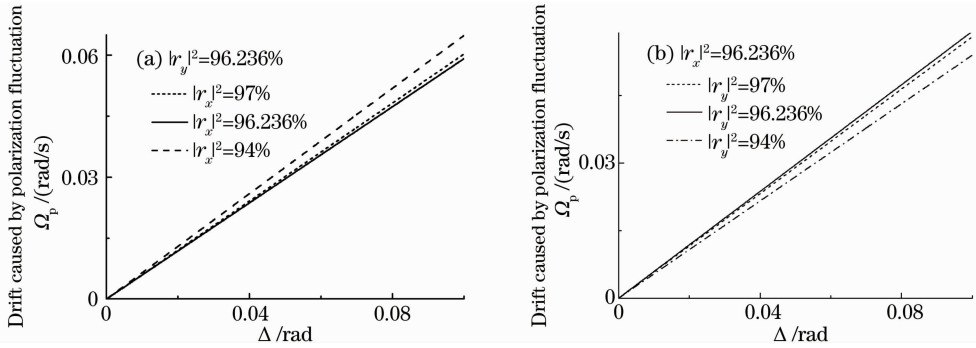


图 5 不同条件下, Ω_p 与 Δ 的关系曲线

Fig. 5 Relationship between the drift Ω_p and Δ in different cases

4 实验分析

文献[11]中,R-FOG 开环实验系统的主要光路如图 2 所示;光纤环形谐振腔的参数为: $L=5\text{ m}$, $D=0.1\text{ m}$,光纤耦合器耦合系数 $k=0.1$, $\alpha_c=0.5\text{ dB}$, $\alpha_l=0.01\text{ dB/m}$;R-FOG 系统的开环输出信号在 5 s 内的最大零偏为 0.01 rad/s ,系统的极限灵敏度为 $7\times 10^{-7}\text{ rad/s}$;两者之间存在如此大的差距,是由于系统中存在着各种噪声[4]。

光纤耦合器对两个 ESOP 的耦合系数与通常所说的耦合器耦合系数之间的关系可表示为

$$k = \frac{|r_x|^2 + |r_y|^2}{2}, \quad (15)$$

在后面的分析中,引入一个系数 η 表示耦合器中两个 ESOP 耦合系数的幅度之间的关系

$$\eta = \frac{|r_y|^2 - |r_x|^2}{1 - k}, \quad (16)$$

对于光纤激光器,一般情况下 $\Delta K \sim 0.004$ [8];同时,假设两个 ESOPs 在光纤环形谐振腔中的传播常数相等,即 $\beta_1 \approx \beta_2$,则 $\Delta = \theta_1 - \theta_2$ 。以目前光纤耦合器的制作工艺水平, η 可以控制在 -20% 到 $+20\%$ 之间,即以参考文献[11]中 k 的数值为参考, $|r_x|^2$ 与 $|r_y|^2$ 之间的最大差值可控制在 0.18;并且,耦合器中两个 ESOP 耦合系数的相差 Δ 可控制在 1% 以内,即 $\Delta < 0.01\text{ rad}$ 。根据上述参数,结合(13)式,对参考文献[11]所报道的 R-FOG 开环实验系统中由光纤耦合系数偏振相关引起的系统噪声进行估算,得到偏振噪声引起的系统零偏 Ω_p 与 Δ 之间的关系曲线,如图 6 所示。

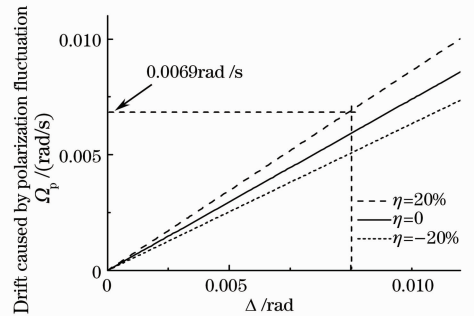


图 6 η 不同时 Ω_p 与 Δ 的关系曲线

Fig. 6 Relationship between the drift Ω_p and Δ with different values of η

的系统最大零偏约为 0.0069 rad/s ,由于光纤耦合器偏振相关参数会随着时间产生波动,进而引起系统零漂;根据前面的假设 Δ 的波动在 0.01 rad 范围内,而 η 变化范围在 $\pm 20\%$ 之间。因此,可以估算出该 R-FOG 系统中偏振波动引起的系统零漂为 0.0069 rad/s 。

由于此处仅估算了系统中偏振波动可能引起的零漂,因此,发现 0.0069 rad/s 这一数值与参考文献[11]中所报道的开环输出信号 5 s 内的零漂值 0.01 rad/s 之间存在一定的差距。这主要是由于 R-FOG 系统中除了偏振波动噪声外,还存在克尔效应[6, 12]、背向反射噪声[13, 14]、法拉第效应[15]等。不过,由上述两个数值的比较中也可以看出,偏振波动引起的噪声在 R-FOG 系统的总噪声中占有较大的比重。

5 结 论

通过矩阵分析法,对光纤耦合器中两个 ESOPs

由图 6 可知,该 R-FOG 系统中偏振波动引起

的耦合系数差异与其引起的系统零偏进行分析,得到系统零偏与两个 ESOPs 的耦合系数, R-FOG 中光纤环形谐振腔的结构参数 (L, D)、损耗参数 (α_c, α_l) 等的解析表达式。通过对系统零偏表达式求导, 所得的最佳耦合系数仅与环形谐振腔损耗参数相关。利用 Matlab 软件进行数值拟合, 得到偏振波动引起的系统零偏与各参数间的关系曲线, 从中分析得到的系统零偏为极值时的最佳耦合系数与零偏表达式求导得到的结果相符。并且利用该理论分析, 对已报道的 R-FOG 开环实验系统进行了偏振波动噪声引起的系统零偏的估算。

参 考 文 献

- 1 E. J. Post. Sagnac effect [J]. *Review of Modern Physics*, 1967, **39**: 475~493
- 2 K. Hotate. Fiber sensor technology today [J]. *Optical Fiber Technology*, 1997, **3**(4): 356~402
- 3 Neil Barbour, George Schmidt. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, **1**(4): 332~339
- 4 K. Hotate, K. Takiguchi. Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro[C]. *SPIE*, 1991, **1585**: 116~127
- 5 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Research on signal detection method of resonator fiber optical gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1001~1005
马慧莲, 金仲和, 丁 纯 等. 谐振腔光纤陀螺信号检测方法的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 1001~1005
- 6 Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Optical Kerr effect in phase modulation spectroscopy resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 814~818
张旭琳, 马慧莲, 丁 纯 等. 谐振式光纤陀螺调相谱检测技术中的光克尔效应[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 814~818
- 7 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(15): 2606~2612
- 8 Wang Shijun, Ma Huilian, Jin Zhonghe. The analysis of the polarization characteristic in optic ring resonator [J]. *Highlights of Sciencepaper Online*, 2008, **1**(7): 759~762
王世军, 马慧莲, 金仲和. 光学环形谐振腔的偏振分析[J]. *中国科技论文在线精品论文*, 2008, **1**(7): 759~762
- 9 Zhang Xulin, Ma Huilian, Zhou Kejiang *et al.*. Experiments by PM spectroscopy in resonator fiber optic gyro [J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, **13**(2): 135~138
- 10 Yang Zhihui, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 814~819
杨志怀, 马慧莲, 郑阳明 等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 814~819
- 11 Zhang Xulin, Ma Huilian, Jin Zhonghe *et al.*. Open-loop operation experiments in a resonator fiber-optic gyro using the phase modulation spectroscopy technique [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 7961~7965
- 12 Yu Xiujuan, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core photonic band-gap fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 430~435
于秀娟, 廖延彪, 张 敏 等. 谐振式空心光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 430~435
- 13 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21): 3916~3924
- 14 Zhang Xulin, Xu Ping. Influence of back-reflection of the ring resonator in resonator optic gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8)(accepted)
张旭琳, 徐 平. 谐振式光学陀螺环形谐振腔内背向反射研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8)(待发表)
- 15 K. Hotate, K. Tabe. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect; experiment [J]. *J Lightwave Technol.*, 1987, **5**(7): 997~1001