

谐振式光学陀螺环形谐振腔内背向反射研究

张旭琳 徐平

(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)

摘要 背向反射是谐振式光学陀螺(ROG)中的主要噪声之一。通过光波场叠加的方法,建立了环形谐振腔内的单点反射模型,得到系统中背向反射噪声引起的系统标度因子误差与环形谐振腔内反射参数的解析表达式。利用该表达式,通过 Matlab 进行数值拟合,分别对谐振式光纤陀螺系统(R-FOG)和谐振式微光学陀螺系统(R-MOG)中的背向反射噪声进行理论分析和比较。实验中,通过一定的措施抑制了系统中的背向反射噪声,分别得到 R-FOG 和 R-MOG 系统的开环输出信号。通过理论分析和实验验证背向反射噪声在 R-MOG 中的影响较大。为 ROG 中背向反射噪声的抑制及 ROG 系统的搭建提供了理论和实验依据。

关键词 谐振式光学陀螺; 背向反射; 标度因子; 开环输出信号

中图分类号 TN815; TN911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2302

Investigation of Back-Reflection of Ring Resonator in Resonator Optic Gyro

Zhang Xulin Xu Ping

(Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Back-reflection is one of the important noise sources in the resonator optic gyro (ROG). Using optical field overlapping method, the single-reflection-model inside the ring resonator was set up and the relation between the scale-factor error and the parameters about reflection noise was gotten. By the numerical analysis in Matlab, the back-reflection noise in the resonator fiber-optic gyro (R-FOG) and the resonator micro-optic gyro (R-MOG) was analyzed and compared in theory. The open-loop output signal in ROG was detected by taking some countermeasure to overcome the noise caused by the backscattering. It was proved theoretically and experimentally that the noise caused by the back-reflection influences the R-MOG more severely.

Key words resonator optic gyro; back-reflection; scale factor; open-loop output signal

1 引 言

基于光学 Sagnac 效应^[1]的谐振式光学陀螺 (Resonator optic gyro, ROG) 是用来测量旋转角速度的一种新型光学传感器。与目前技术成熟的干涉式光学陀螺相比, ROG 具有理论精度高, 易于集成化等特点^[2], 成为新一代传感器的代表。ROG 系统中, 信号检测的精度会受到多种噪声因素的影响^[3,4], 背向反射噪声是其中主要的噪声因素之一。

本文利用光场叠加的方法, 分析 ROG 系统中背向反射噪声的影响。以环形谐振腔中存在的单点

反射模型为例, 得到背向反射系数与系统标度因子误差间的表达式。通过 Matlab 软件数值模拟, 对以光纤组成的环形谐振腔为核心部件的谐振式光纤陀螺系统 (Resonator fiber optic gyro, R-FOG) 和以集成光波导组成的环形谐振腔为核心部件的谐振式微光学陀螺系统 (Resonator micro-optic gyro, R-MOG) 进行比较分析。并且在实验中通过两光路中采用不同频率的信号调制来抑制背向反射噪声的影响, 得到开环输出信号。为 ROG 系统中背向反射噪声分析以及系统搭建提供了理论和实验基础。

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-03-24

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, 主要从事集成光学与微系统集成等方面的研究。E-mail: zxlin@szu.edu.cn

2 理论分析

ROG 系统结构示意图如图 1 所示。光源输出光经过 Y 型相位调制器均分成功率相等的两束光，并分别被相位调制器 PM1 和 PM2 调制。调制后的顺时针 (Clockwise, CW) 和逆时针 (Counterclockwise, CCW) 方向光波分别经过 50% 耦合器 C1 和 C2 后进入由耦合器 C 组成的环形谐振腔。两方向的光场分别被光电探测器 PD1 和 PD2 探测。其中, 环形谐振腔中存在随机分布的反射机制。为简化计算, 将这些反射机制等效成环中单点引起的反射, 如图 1 的 Q 点。定义图 1 中 CCW 方向为 z 轴, P 点 $z = 0$, Q 点 $z = z_s$ 。

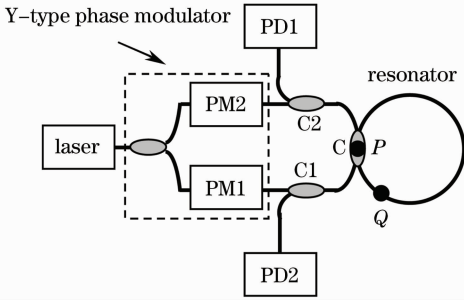


图 1 ROG 中环谐振腔内单点反射特性示意图

Fig. 1 Diagram of one-dot reflection in the resonator of ROG

背向反射光在 ROG 系统中引起的噪声可分为两类, 一是背向反射光本身引入的噪声, 另一类是反射光与信号光之间的干扰引入的噪声^[5]。后一种噪声引起系统零漂, 通过控制两光路光波场相位可以有有效的抑制这一噪声^[6]。本文中, 考虑的是背向反射光本身引起的噪声。同时, 由于 ROG 系统中使用的是高相干光源, 所以在分析中不考虑激光器线宽对环形谐振腔谐振特性的影响^[7], 并且, 假设系统中两光路光传输损耗一致。环形谐振腔内的单点反射主要是端面的菲涅尔反射, 入射光波场与反射光波场间的相位差为 π ^[5,6]。

根据光场叠加法^[6,7], 考虑背向反射光本身的影响后, 光探测器 PD1, PD2 的输入光功率为

$$I_{PD1} = \{ (1 - \alpha_C) [1 - \rho L(\psi_B)] + H_1 L(\psi_A - 2\pi\Delta F\tau) L(\psi_A) \} \frac{I_0}{2}, \quad (1)$$

$$I_{PD2} = \{ (1 - \alpha_C) [1 - \rho L(\psi_A)] + H_2 L(\psi_B) L(\psi_B + 2\pi\Delta F\tau) \} \frac{I_0}{2}, \quad (2)$$

其中

$$H_1 = \frac{\alpha_R [1 - \alpha_1 (L - z_s)]^2 [k(1 - \alpha_C)]^2}{(1 - Q')^4}, \quad (3)$$

$$H_2 = \frac{\alpha_R (1 - \alpha_1 z_s)^2 [k(1 - \alpha_C)]^2}{(1 - Q')^4}, \quad (4)$$

$$L(\psi) = \frac{(1 - Q')^2}{(1 - Q')^2 + 4Q' \sin^2(\psi/2)}, \quad (5)$$

$$\rho = 1 - \frac{T^2 (1 - Q')^2 - 2TR'(1 - Q') + (R')^2}{(1 - Q')^2 (1 - \alpha_C)}, \quad (6)$$

$$\psi_A = \omega_0 \tau + \pi\Delta F\tau, \quad (7)$$

$$\psi_B = \omega_0 \tau + 2\pi\Delta F_b \tau - \pi\Delta F\tau, \quad (8)$$

$$T = \sqrt{(1 - k)(1 - \alpha_C)}, \quad (9)$$

$$Q' = T \sqrt{(1 - \alpha_1 L)(1 - \alpha_R)}, \quad (10)$$

$$R' = k(1 - \alpha_C) \sqrt{(1 - \alpha_R)(1 - \alpha_1 L)}, \quad (11)$$

式中, I_0 和 ω_0 分别表示激光器输出光功率和中心角频率; k , α_C 和 α_1 分别表示环形谐振腔耦合器 C 的耦合系数、附加损耗及环形谐振腔内单位长度的光传输损耗; α_R 为 Q 点引起的光功率反射系数; τ 为光沿环形谐振腔传输一周的时间; L 是环形谐振腔总长度; ΔF 表示系统转动引起的 Sagnac 频偏, 而 ΔF_b 则表示背向反射引起的频率波动。

(1) 式和 (2) 式的第一项表示不考虑背向反射的光强 (即检测信号的光强) 表达式, 第二项表示背向反射本身的光强表达式。ROG 系统的解调输出信号近似于对 (1) 式, (2) 式求导, 则

$$-(1 - \alpha_C) \rho L'(\psi_B) + H_1 L'(\psi_A - 2\pi\Delta F\tau) \times L(\psi_A) + H_1 L(\psi_A - 2\pi\Delta F\tau) L'(\psi_A) = 0, \quad (12)$$

$$-(1 - \alpha_C) \rho L'(\psi_A) + H_2 L'(\psi_B) L(\psi_B + 2\pi\Delta F\tau) + H_2 L(\psi_B) L'(\psi_B + 2\pi\Delta F\tau) = 0. \quad (13)$$

考虑到系统的动态范围, 若 $\Psi \ll 1$, 则 $\sin^2(\Psi/2) \approx (\Psi/2)^2$, (12) 式, (13) 式可分别改写为

$$\psi_A = \frac{2H_1}{2H_1 + \rho(1 - \alpha_C)} \cdot (\pi\Delta F\tau), \quad (14)$$

$$\psi_B = -\frac{2H_2}{2H_2 + \rho(1 - \alpha_C)} \cdot (\pi\Delta F\tau), \quad (15)$$

联立 (7) 式, (8) 式两式, 则

$$\Delta F_b = \Delta F - \frac{1}{2\pi\tau} (\psi_A - \psi_B) \equiv (1 - \epsilon) \Delta F, \quad (16)$$

式中 ϵ 表示背向反射噪声引起的系统标度因子误差, 反映背向反射噪声对 ROG 系统影响。

将 (14) 式, (15) 式两式代入 (16) 式, 则系统标度因子误差 ϵ 可改写为

$$\epsilon = \frac{H_1}{2H_1 + \rho(1 - \alpha_C)} + \frac{H_2}{2H_2 + \rho(1 - \alpha_C)}. \quad (17)$$

上式中, H_1, H_2 与环形谐振腔内光功率反射系数 α_R 成正比; H_1 与反射点位置 z_s 成正比, H_2 与反射点位置 z_s 成反比。由(17)式可知, 当环形谐振腔的结构参数, 即 k, α_C, α_1 和 L 确定后, 背向反射噪声引起的标度因子误差 ϵ 随着 α_R 的增大而增大, 而 ϵ 与 z_s 之间存在一个最佳关系, 即随着 z_s 由 0 变化到 L 时, ϵ 会出现一个极小值。

3 数值分析

利用 Matlab 对上述理论分析进行数值计算, 对 R-FOG 和 R-MOG 系统中背向反射噪声的影响进行研究。

首先, 以 R-MOG 系统为例, 分析单光路中背向反射光本身对检测信号光的影响。集成微光学环形谐振腔耦合器的附加损耗 α_C 为 0.1 dB, α_1 为 0.01 dB/cm, k 为 0.06, L 为 6.28 cm, 环形谐振腔的直径 D 为 2 cm。假设系统中两光路的光传输损耗一致, 且 α_R 为 40 dB, z_s 为 $L/2$ 。将上述参数代入(1)式和(2)式, 可以求得两光路中背向反射噪声对检测信号的影响, 如图 2 所示。

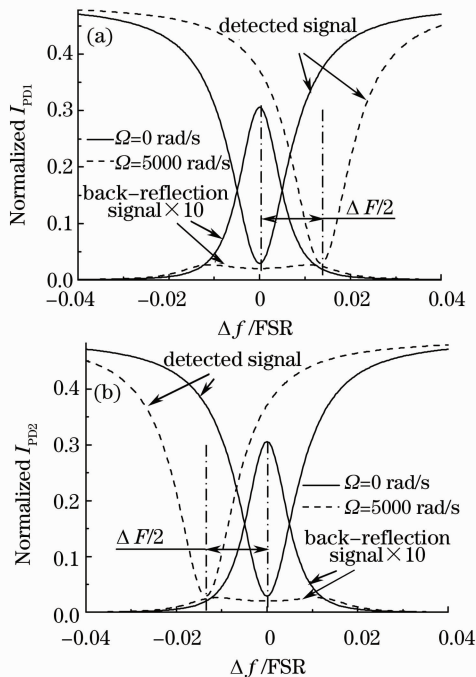


图 2 R-MOG 系统中背向反射噪声信号对检测信号的影响。(a)对 I_{PD1} 的影响; (b)对 I_{PD2} 的影响

Fig. 2 Influence of the backreflection noises in R-MOG on test signal. (a) on I_{PD1} ; (b) on I_{PD2}

图 2 中 FSR 表示环形谐振腔的自由谱宽。从图 2 中(a), (b)两图的检测信号光可知, 当陀螺转动时, 两光路的谐振频率差即为由转动引起的 Sagnac

频差 ΔF 。而图 2 中, 每个光路的背向反射光都是谐振峰; 并且在陀螺旋转时, 会产生对应于 ΔF 的峰值分裂。由于这一分裂是相对于静止时的谐振频率, 而且每个光路都产生。因此, 背向反射噪声使实际检测信号得到的频差比真实信号对应的频差小。同时由于背向反射光在陀螺转动时产生的谐振峰分裂值为 ΔF , 所以, 实际检测信号中由背向反射噪声产生的影响与 ΔF 相关, 如(16)式所示。

同时, 当反射点的位置 z_s 为 $L/2$ 时, 对于 CW 方向和 CCW 方向传播的光束中存在的背向反射信号是一致的, 如图 2(a), (b)中的背向反射信号所示, 因此, 由背向反射噪声引起的两传播方向光束的谐振谷点(即谐振频率)偏移是一致的, 进而由背向反射噪声引起的两光路谐振谷频差的偏移为最小。

将 R-MOG 和 R-FOG 的参数代入(17)式, 可得背向反射参数与 ϵ 的关系, 如图 3、图 4 所示。其中, R-MOG 的参数如图 2 所示; R-FOG 的参数为: 光纤环形谐振腔的 α_C 为 0.4 dB, α_1 为 0.02 dB/m, k 为 0.1, L 为 5 m, D 为 0.1 m。

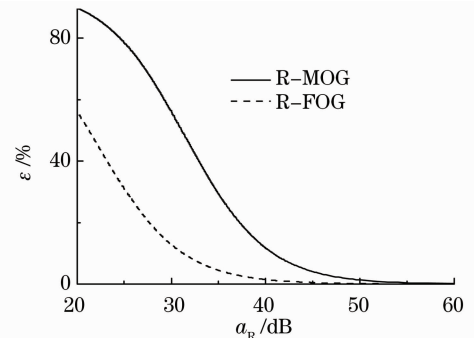


图 3 标度因子误差 ϵ 与 α_R 的关系曲线

Fig. 3 Relation curve between ϵ and α_R

图 3 表示背向反射噪声引起的系统标度因子误差 ϵ 与环形谐振腔内单点反射系数 α_R 的关系。此时, 两个系统中反射点的位置 z_s 都为 $L/2$ 。从图 3 中可知, 对于两个系统, 当 α_R 减小时, ϵ 都随之增大。当两个陀螺系统的 α_R 相同时, R-FOG 的 ϵ 相对小, 即背向反射噪声对 R-MOG 的影响大于对 R-FOG 的影响。例如, 为了使系统中的 ϵ 控制在 10%, R-MOG 中 α_R 应小于 40.8 dB; 而对于 R-FOG 系统, α_R 只要小于 31.2 dB 即可。在 R-FOG 中, 要将光纤环形谐振腔中的反射系数控制在 30 dB 量级是可以做到的, 目前比较通用的做法就是利用带倾角的物理连接器(APC)连接; 而在 R-MOG 中, 要将集成光波导环形谐振腔内的反射系数控制在 40 dB 量级, 对于目前的工艺水平要求较高。

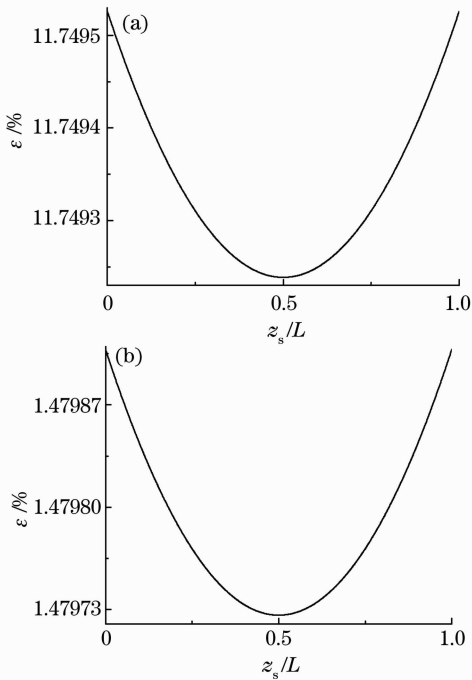


图 4 标度因子误差 ϵ 与 z_s 的关系曲线。(a)R-MOG;
(b)R-FOG

Fig. 4 Relation curve between ϵ and z_s .
(a) R-MOG; (b) R-FOG

图 4(a), 图 4(b) 分别为 R-MOG 系统, R-FOG 系统中背向反射噪声引起的标度因子误差 ϵ 与环形谐振腔内反射点位置 z_s 的关系。图中系统参数与图 3 中的一致, α_R 为 40 dB。

从图 4 中可知: 在其他参数不变的情况下, ϵ 随着 z_s 从 0 至 L 变化时, 先减小后增大。当 $z_s=0$ 或 L 时, 系统中背向反射信号本身的影响最大; 当 $z_s=L/2$ 时, 背向反射信号本身的影响最小。由光波场叠加原理可知^[6,7], CW 方向和 CCW 方向的检测信号, 即谐振信号, 是多光束干涉叠加形成的; 当反射点存在时, 使得这些相干光束的反射光加入到原有的干涉光束中, 造成检测信号中谐振频率的移动。这一关系等同于(1)式, (2)式中, 第二项(背向反射光信号)对第一项(检测信号)的影响。当反射点在环形谐振腔中心($L/2$)时, 加入到 CW 方向和 CCW 方向的各反射光的大小和光程都相同, 引起的两方向传输光束的谐振频率移动也相同; 因此, 由背向反射引起的两光路谐振频率差的移动也就达到最小。这一变化规律反映出 ROG 系统中, 两方向传播光束的互易性。图 4 中得到的分析结果与图 2 中一致, 两幅图从不同的角度分析背向反射在系统中的影响, 图 2 直观地显示各个光路中背向反射光对该光路中检测信号谐振频率的影响, 而图 4 则是从系

统的角度, 分析背向反射噪声对系统标度因子这一参数的影响。所以, 在构建 R-FOG 系统时, 光纤环形谐振腔中的熔接点要尽量在环的中点, 这不仅对抑制偏振波动引起的噪声有利^[3], 而且对于减小背向反射噪声也起到重要作用。

然而, 从图 4 中可知, 总体上随 z_s 的不同而引起的标度因子误差值的变化不大; 同时, 对于相同的 z_s , R-MOG 中的 ϵ 值比 R-FOG 中的增加近一个数量级。

从图 3 和图 4 的分析中可知, 在相同的反射条件下, 背向反射噪声对 R-FOG 的影响比其对 R-MOG 的影响小。因此, 在后面的实验中, 为了得到 ROG 的开环响应信号, 需要采取一定的抑制背向散射噪声的措施; 而且 R-MOG 中所采取的抑制背向反射噪声的措施会比 R-FOG 的要求高。

4 实验分析

由前一部分的理论分析可知, 在相同的反射条件下, R-FOG 中的标度因子误差比 R-MOG 中的小。所以, 在后面进行的 ROG 开环响应信号测试的初步实验中, R-FOG 中采取的抑制背向反射噪声的措施会比 R-MOG 的要求低。

首先, 进行 R-FOG 开环信号的检测。实验框图在图 1 的基础之上, 增加了反馈回路^[8,9]。探测器 PD1 的输出信号经过解调电路解调之后, 再经由反馈电路反馈到光源, 另一路探测器 PD2 的输出信号经过解调之后, 其输出信号即为 R-FOG 的开环输出信号^[10,11]。调相器 PM1, PM2 上施加频率数值不同且互质的调制信号^[6], 来抑制系统中的背向反射光本身引入的噪声。系统参数与图 3 中 R-FOG 的参数一致。该系统所能达到的极限灵敏度为 2.73×10^{-7} rad/s^[6]。当陀螺的转速沿 CW 方向由 0 逐步增加到 0.1 rad/s 再减小到 0, 接着, 陀螺沿 CCW 方向从静止增大到 0.1 rad/s, 再到静止, 得到如图 5 所示的开环输出信号。由于开环输出信号的幅度值在动态范围内可认为与系统转速成正比, 因此, 从图 5 静止部分的输出线形波动 Y_2 和系统最大转速 (0.1 rad/s) 对应的输出信号幅度 Y_1 的比值, 可以估算出 R-FOG 系统的检测精度为 0.01 rad/s。

接着, 进行 R-MOG 开环实验。除了在两光路施加频率不同且互质的调制信号外, 如图 1 所示 R-MOG 光路中, 在 PM2/C2 和 PM1/C1 间分别插入声光调制器 (Acoustic-optical modulator, AOM) AOM2 和 AOM1, 利用其上所施加的频移量来抑制

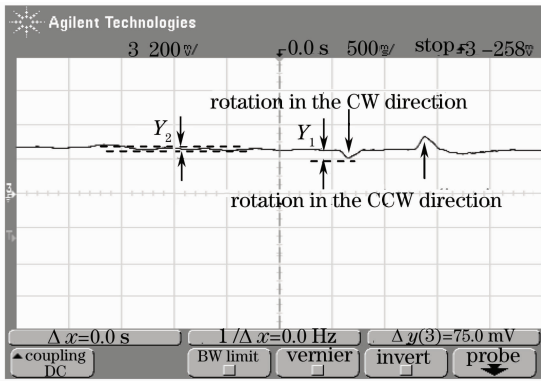


图 5 R-FOG 的开环输出信号

Fig. 5 Open-loop output signal in R-FOG

背向反射噪声以及改变两光路的工作频率,即保持 AOM1 上所施加的频移量恒定为 40 MHz,而 AOM2 的频移量从 40 MHz 突变为 39.5 MHz,再突变为 40 MHz,以此来等效于陀螺沿 CCW 方向转动;接着, AOM2 上的频移量从 40 MHz 突变为 40.5 MHz,再突变回 40 MHz,这一过程等效于系统沿 CW 方向转动^[12]。此时测试得到的对应模拟转动的开环输出信号,如图 6 所示。

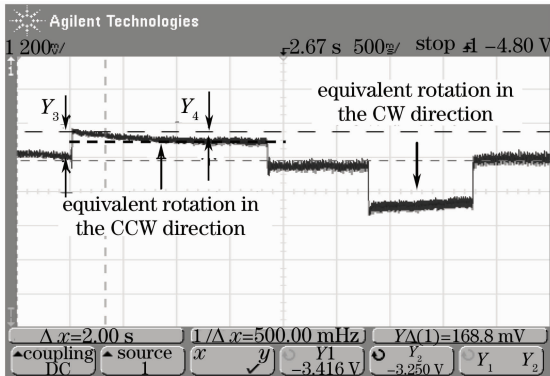


图 6 R-MOG 中的等效开环输出信号

Fig. 6 Open-loop output with equivalent rotation rate in R-MOG

图 6 中系统参数与图 3 中 R-MOG 的参数一致。由 Sagnac 效应^[1]可知,该系统中 0.5 MHz 频差对应的系统转速为 56 rad/s,同时,利用系统参数还可估算出其极限灵敏度为 4.42×10^{-5} rad/s^[6]。采用与图 5 相同的方法,利用图 6 中 Y_3 与 Y_4 的比值,可以估算出系统的检测精度为 24 rad/s。

图 5 中实测的开环信号检测精度 0.01 rad/s 远高于图 6 的 24 rad/s,而且在 R-MOG 系统采用了更多的抑制背向反射噪声的措施,说明在 R-MOG 系统中,其背向反射噪声的影响大于 R-FOG 中的影响,这与前面的数值分析结果一致。

通过上述实验,能够有效测得 ROG 系统中的

开环响应,但是无论是从图 5,还是图 6 中的开环输出信号都可知,目前的实验检测精度都远远低于理论上的极限灵敏度。这是由于目前仅是一个初步实验,实验中克服背向反射噪声的措施着重在抑制背向反射光本身^[6],即本文理论分析部分的重点,而背向反射光与信号光之间干扰所引入的另一类跟背向反射相关的噪声在此实验中没有得到有效抑制,因此影响了系统的检测精度,同时,系统中还存在背向反射之外的诸多噪声因素^[3,4,13~15]。

5 结 论

利用光波场叠加法,建立了环形谐振腔内单点反射模型,得到背向反射噪声引起的标度因子误差与环形谐振腔内的反射系数及反射点位置之间的关系。利用 Matlab 对上述关系式进行数值分析,从理论上证实,在相同的反射参数情况下,R-MOG 系统中背向反射噪声的影响大于 R-FOG 系统中的影响。在目前初步的 ROG 系统开环实验中,通过两光路中采用不同且互质的频率进行调制来抑制背向反射光本身引起的噪声,得到实测的系统开环输出信号。通过实验验证,在 R-MOG 系统中为了得到开环输出信号,其所采用的抑制噪声措施的要求高于 R-FOG 系统。实验结果与理论分析相符。同时通过实验中开环响应信号的获得进一步验证了抑制背向反射光本身引入的背向反射噪声措施的有效性,以及所搭建的 R-FOG 系统和 R-MOG 系统的可行性。实验中实测的开环信号检测精度与理论分析的极限灵敏度值之间存在的差距,可通过克服陀螺系统中包括背向反射噪声在内的各种噪声因素来进一步缩小,进而提高系统的检测精度。ROG 开环输出信号的精确测量,是直接测试背向反射噪声引起的标度因子误差的基础。

参 考 文 献

- 1 E. J. Post. Sagnac effect[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1967, **39**(2): 475~493
- 2 A. R. Malvern. Progress toward fiber optic gyro production[C]. *SPIE*, 1991, **1585**: 48~64
- 3 K. Hotate, K. Takiguchi. Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro[C]. *SPIE*, 1991, **1585**: 116~127
- 4 Liu Dewen, Xiao Wen, Wei Bo. Mechanism of radiation effects on fiber optic gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 419~422
刘德文,肖文,魏博. 光纤陀螺受辐照影响机理分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 419~422
- 5 Herve, C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Zhang Guicai, Wang Wei Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 61~70

- Herve, C. Lefevre 著. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王 巍 译. 北京: 国防工业出版社, 2002. 61~70
- 6 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
- 7 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 731~734
马慧莲, 金仲和, 丁 纯 等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 731~734
- 8 Xulin Zhang, Huilian Ma, Zhonghe Jin *et al.*. Open-loop operation experiments in resonator fiber optic gyro using PM spectroscopy technique [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 7961~7965
- 9 Zhang Xulin, Ma Huilian, Zhou Kejiang *et al.*. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 1529~1533
张旭琳, 马慧莲, 丁 纯 等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1529~1533
- 10 Xulin Zhang, Huilian Ma, Zhonghe Jin *et al.*. An open-loop test of a resonator fiber optic gyro[J]. *J. Semiconductors*, 2006, **27**(4): 688~691
- 11 Xulin Zhang, Huilian Ma, Kejiang Zhou *et al.*. Experiments by PM spectroscopy in resonator fiber optic gyro[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, **13**(2): 135~138
- 12 Huilian Ma, Xulin Zhang, Zhonghe Jin *et al.*. Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 080506
- 13 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
- 14 K. Hotate. Fiber sensor technology today [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1997, **3**(4): 356~402
- 15 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