

基于光开关抑制背向散射噪声的谐振式微光学陀螺

钱伟文, 吴传斌, 林伊, 马慧莲*

浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310027

摘要 为了提高系统的互易性及有效抑制背向散射噪声对 RMOG 检测精度的影响, 提出一种基于光开关抑制背向散射噪声的谐振式微光学陀螺。首先分析和测试实际 RMOG 系统中背向散射噪声的影响; 然后对顺、逆时针两路光波信号进行同频调制, 并利用 1×2 光开关施加时分复用信号使得激光信号在顺、逆时针两个方向来回切换, 在时间上分离信号光和背向散射光, 用于减小背向散射噪声对 RMOG 检测精度的影响; 分析光开关的信道串扰、切换时间对背向散射噪声的抑制作用。实验结果表明, 光开关能够减小背向散射噪声, 减小程度受开关串扰的制约, 开关切换时间需结合光波导环形谐振腔的时间常数及环路锁定时间进行优化设计。

关键词 传感器; 谐振式微光学陀螺; Sagnac 效应; 背向散射噪声; 时分复用技术; 光开关

中图分类号 TN256; TN815

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1010003

Resonant Micro-Optical Gyroscope Based on Optical Switch to Suppress Backscattering Noise

Qian Weiwen, Wu Chuanbin, Lin Yi, Ma Huilian*

School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract To improve the reciprocity of the system and effectively suppress the influence of backscattering noise on resonant micro-optical gyroscope (RMOG) detection accuracy, an optical switch-based RMOG is proposed. First, we analyze and test the influence of backscattering noise in the actual RMOG system; the same frequency modulation is performed on both clockwise and counterclockwise lightwave signals, which are time-division multiplexed using a 1×2 optical switch to alternate the laser output between clockwise and counterclockwise separating the signal and backscattered light in time and reducing the influence of backscattering noise on RMOG detection accuracy; furthermore, the channel crosstalk of the optical switch and the effect of switching time on backscattering noise are analyzed. The experimental results show that the optical switch can reduce the backscattering noise, and the degree of reduction is limited by the switch crosstalk. The switching time of the switch needs to be optimized for the time constant of the optical waveguide-ring resonator and the loop lock time.

Key words sensors; resonant micro-optical gyroscope; Sagnac effect; backscattering noise; time division multiplexing technique; optical switch

OCIS codes 280.1350; 060.2370; 060.2800; 130.4815; 290.5870

1 引 言

谐振式微光学陀螺(RMOG)是谐振式光学陀螺的一种,其能够有效解决环形激光陀螺(RLG)体积大、造价昂贵且闭锁等问题,又能够避免像干涉式光纤陀螺(IFOG)一样使用成百上千米的光纤,并且具有理论灵敏度高和抗振动等优点,为此正受到世界上多个研究机构的高度关注^[1-6]。

RMOG 是利用由光学萨格纳克(Sagnac)效应产生的谐振频率差来测量旋转角速度,瑞利背向散射^[7]是制约其精度进一步提高的最主要噪声因素之一。研究表明,使用损耗相对较大的硅基二氧化硅波导环形谐振腔(WRR)研制的 RMOG 在不采取抑制措施的情况下,背向散射噪声高达 $4500 (^{\circ})/s$ ^[8]。RMOG 中背向散射噪声的产生可以这样理解:当顺时针(CW)与逆时针(CCW)方向的

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-05-25; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61675181, 61377101)

* E-mail: mahl@zju.edu.cn

两束光波同时在谐振腔内传输时,CCW 方向的背向散射光沿着 CW 方向传输。因此,CCW 方向的背向散射光对于 CW 方向的信号光来说是一种干扰;同样,CW 方向的背向散射光对于 CCW 方向的信号光来说也是一种干扰。简而言之,背向瑞利散射噪声是由同一时刻并同时含有 CW 和 CCW 两个反向的光波在谐振腔内传输时所产生的。

背向散射噪声对 RMOG 检测精度的影响包含背向散射光和信号光之间的干涉光以及散射光本身的光强。为了减少干涉光的影响,需要抑制 CW 和 CCW 两个方向光波的载波分量;为了抑制背散射光强的影响,通常采用不同的频率对 CW 和 CCW 两个方向的光波进行相位调制。然而,采用不同的频率对光波进行相位调制会破坏系统的互易性,并引入相位调制器的残余强度来调制噪声。2018 年,加州理工学院在《Nature Photonics》期刊上报道的硅基光学陀螺仪应用了时分复用的方案,并利用 Mach-Zehnder 干涉仪实现了 CW 和 CCW 两个反向光波的路径切换,极大地提升了检测方案的互易性^[9]。2020 年,同济大学在谐振式光纤陀螺(RFOG)中采用一个 2×2 的 Mach-Zehnder 干涉仪型光开关,实现了时分复用并错开传输谐振腔中的两束光波,减小了背向散射噪声对 RFOG 检测精度的影响^[10]。

为了提高系统的互易性以及抑制背向散射噪声,本文提出一种基于同频调制的时分复用技术。首先在分析和测量实际 RMOG 系统中背向散射噪声的基础上,使用光开关实现时分复用,保证在同一时刻内仅有 CW 或 CCW 方向的光波在 WRR 内传输,减小背向散射噪声对 RMOG 检测精度的影响。然后分析光开关信道串扰和切换时间对系统性能的影响,最后给出实验结果。

2 基本原理

为了分析和测试 WRR 中的背向散射噪声,建立的测试系统^[1]如图 1 所示,其中 E_{main} 为正向传输的光场幅度, E_{R} 为背向散射的光场幅度。将信号发生器(SG)输出的锯齿波信号施加在激光器(laser)的频率调谐端,实现激光的线性扫频;输出的激光经过隔离器(ISO)后到达环形器 CIR 1 的端口 1,经过端口 2 后入射至 WRR。正向传输的光经过多圈干涉环后输出至 WRR,经过环形器 CIR 2 的端口 2 输出后由光电探测器 2(PD 2)转换成电信号并在示波器上显示。WRR 内的背向散射光经过多圈干涉环后输出至谐振腔,再输入到环形器 CIR 1 的端口 2,由其端口 3 输出至 PD 1,最后和 WRR 的正向谐振曲线一起显示在示波器上。

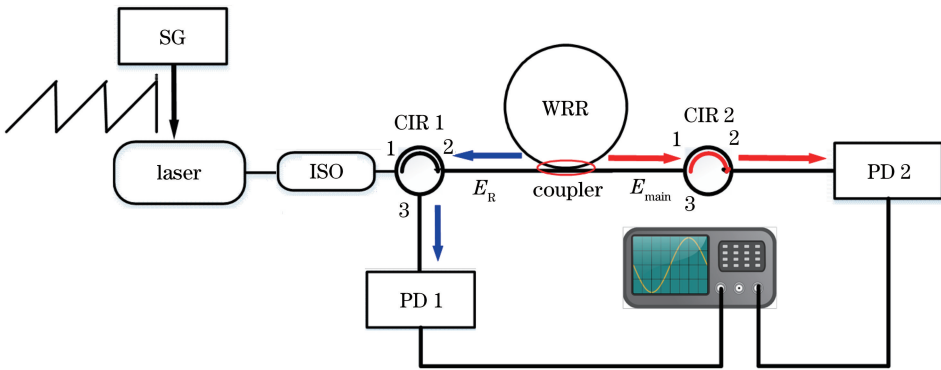


图 1 瑞利背向散射的测试系统^[1]

Fig. 1 Rayleigh backscatter test system^[1]

实验测试使用的 WRR 是基于硅基二氧化硅光波导制作的,腔长 $L = 15.9 \text{ cm}$,直径 $D = 5 \text{ cm}$,清晰度 $F = 140$,二氧化硅光波导的传输损耗 $\alpha_0 = 0.0088 \text{ dB/cm}$ 。SG 输出锯齿波扫频信号的频率为 1 Hz ,由于背向散射的光强相对较小,实验中将 PD 1 的增益设置为 PD 2 的 10 倍,测试结果如图 2 所示。其中 resonance curve 表示 PD 2 探测到的信号,峰值幅度约为 1.32 V ;backscatter curve 表示 PD 1 探测到的信号,考虑到两个探测器的增益差

异,实际的背向散射峰值幅度约为 2.1 mV 。根据文献^[11],背向散射干涉项噪声与载波抑制比满足

$$\delta_{\text{oi}} = \frac{c\lambda\sigma_{\text{R}}}{(2\pi)^2 DL} R^N, \quad (1)$$

式中: δ_{oi} 为背向散射干涉项噪声; c 为真空光速; λ 为波长; R 为单个载波抑制比; N 为载波抑制的路数; σ_{R} 为背向散射系数^[12],计算公式为

$$\sigma_{\text{R}} = F(1 - 10^{-\alpha_0 L})(\theta_0/n)^2/2\pi p, \quad (2)$$

式中: θ_0 为数值孔径; n 为波导的折射率; p 由

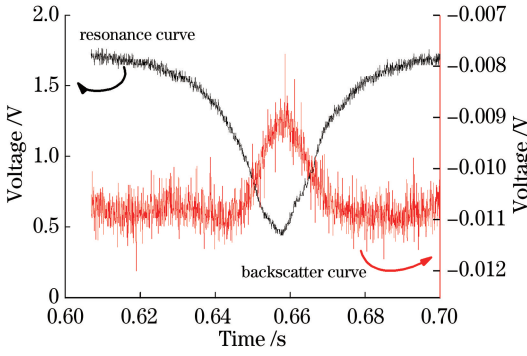


图 2 二氧化硅 WRR 的谐振曲线与背散射曲线测试结果
Fig. 2 Test results of resonance curve and backscatter curve of silicon dioxide WRR

WRR 波导的结构参数决定,此处取 4.55。

将 WRR 的实际参数代入(1)式和(2)式,计算得到 σ_R 值为 0.3%。当不采取载波抑制技术时, δ_{Ω} 值为 254 ($^\circ$)/s。由文献[9]可知,将 WRR 作为 RMOG 的核心敏感元件,在 1 mW 的检测功率下,其理论灵敏度为 2.62 ($^\circ$)/h。若采取载波抑制技术,则至少需要 110 dB 的载波抑制才能使陀螺探

测不到背向散射干涉项噪声。

为了提高系统的互易性并有效抑制背向散射噪声,基于光开关抑制背向散射噪声的 RMOG 系统,如图 3 所示,其中 f 为主调制频率。窄线宽激光器发出的光束首先使用相位调制器(PM)对同频相位进行调制,以此来提高系统的互易性;然后采用 1×2 光切换开关在 CW 和 CCW 两个方向进行时分复用。当 $L2$ 路连通时,光束经过 CIR 2 后进入 WRR 内并沿 CW 方向传输,当 $L1$ 路连通时,光束经过 CIR 1 后进入 WRR 内并沿 CCW 方向传输,这从时间上避免其中一个方向的背向散射光波对另一反向传输的信号光产生干扰。CW 方向的光束经过 PD 2 输出后在解调模块 2(DM 2)上进行解调,DM 2 输出的误差信号经过比例积分控制器(PI)后反馈到激光器的频率调谐端,调整激光器的中心频率锁定在谐振腔 CW 方向的谐振频率上。CCW 方向的光波经过 PD 1 输出后在 DM 1 上进行解调,解调输出信号可以反映陀螺的转动角速率。

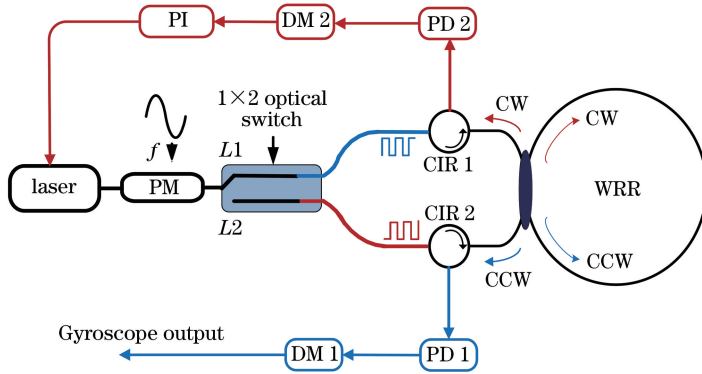


图 3 基于光开关抑制背向散射噪声的 RMOG

Fig. 3 RMOG based on optical switch to suppress backscattered noise

当 RMOG 实际工作时,谐振腔会受到光开关有限信道串扰的影响,在切断的通道上仍有残余光信号,使得谐振腔内并非只有一个方向的光波,因此仍然存在残余的背向散射噪声,残余噪声的大小直接取决于光开关在两个信道间串扰信号的强度。此外,光波在谐振腔中具有绕腔多次传输的特性,当激光信号从一个方向切换到另一方向时,切换方向后的光束能量并非直接消失而是呈指数衰减,即光路切换后影响仍存在,因此谐振腔的时间常数在时分复用 RMOG 系统中有着重要的影响,下面分别进行讨论。

首先讨论光开关的信道串扰对背向散射噪声抑制效果的影响。将图 3 中的光开关更换为一个

50%的分束器,此时探测器探测到的信号包含三个部分,分别为信号光强 $|E_T|^2$ 、背散光强 $|E_R|^2$ 和二者的干涉信号 I_1 ,可表示为

$$I_{PD} = |E_T|^2 + |E_R|^2 + I_1 = |E_T|^2 + |E_R|^2 + 2|E_T E_R| \cos \theta_{TR}, \quad (3)$$

式中: θ_{TR} 为信号光场与背散光场的相位差。

在时分复用 RMOG 系统中,当光开关切换至 $L1$ 路时,PD 1 处接收到的光强信号可以表示为

$$I'_{PD} = |E_T|^2 + \alpha_{ER} |E_R|^2 + 2\sqrt{\alpha_{ER}} |E_T E_R| \cos \theta_{TR}, \quad (4)$$

式中: α_{ER} 为信道串扰。RMOG 系统中的背向散射噪声包括背散光强度项以及信号光和背散光之间的干涉项。由(4)式可知,时分复用系统对强度项噪声

的抑制程度正比于 α_{ER} , 而对于干涉项噪声的抑制作用和 α_{ER} 成平方根的关系。

在时分复用 RMOG 系统中, 当光开关从 $L1$ 路切换至 $L2$ 路时, 谐振腔内 CCW 方向的光波能量并非立即消失而是呈指数衰减, 可表示为

$$I_{CW}(t) = I_0 \exp(-t/\tau_R), \quad t \geq 0, \quad (5)$$

式中: I_0 为切换瞬间腔内传输的信号光能量; τ_R 为谐振腔的时间常数, 表示腔内光强衰减到其初始值的 $\exp(-1)$ 的所需时间; t 为光波在谐振腔的传输时间。 τ_R 与谐振腔的品质因数 Q 值相关, 可表示为

$$\tau_R = Q/\omega = F\tau/2\pi, \quad (6)$$

式中: ω 为激光角频率; τ 为渡越时间, $\tau = cn/L$, n 为二氧化硅光波导的折射率。

信道关闭后, 腔内绕腔多次传输的光波能量随时间的变化曲线, 如图 4 所示, 实验中已对光信号能量作归一化处理。在时分复用 RMOG 系统中, 若使陀螺探测不到背向散射干涉项噪声, 则腔内的能量至少需要衰减掉 110 dB。从图 4 可以看到, 当光开关切换时间为 $25.3\tau_R$ ($0.402 \mu s$) 时, 腔内的能量能够衰减掉 110 dB。实验中所用的光开关切换速率为 $500 \mu s$, 因此满足载波抑制的要求, 所需的衰减时间仅占 0.08%, 故时间常数带来的影响可以忽略。

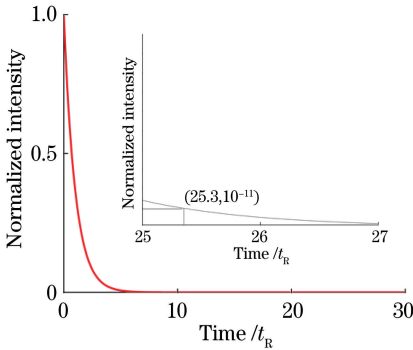


图 4 光波能量与时间的关系曲线(插图为局部放大图)

Fig. 4 Relationship between light wave energy and time (illustration is partial enlarged view)

需要注意的是, 在时分复用 RMOG 系统中, 光开关是来回切换的, 理论上是在同一时刻腔内只有一个方向的光信号进行传输。这种工作方式与传统 RMOG 不同, 因此需要对信号的处理方式进行调整。

时分复用 RMOG 系统的信号处理过程, 如图 5 所示。光开关以恒定速率来回切换, 该过程可以看成是一个方波信号, 如图 5(a) 所示。当检测到光开关的上升沿时, 对应回路的解调模块开始对输入的信号进行同步解调, 以产生频差信号; 当检测到光开

关的下降沿时, 对应回路的解调模块需停止对输入信号进行解调。从图 5(b) 可以看到, 解调模块的输出结果可以看作解调输出信号与方波信号的乘积。当利用解调输出信号作为误差信号输入到 PI 控制器时, 会降低激光频率的锁频精度。为了改善锁频精度与陀螺的输出特性, 需要采用高阶的滤波器对解调输出中的光开关切换频率进行滤除, 经过高阶低通滤波器后的输出信号如图 5(c) 所示。

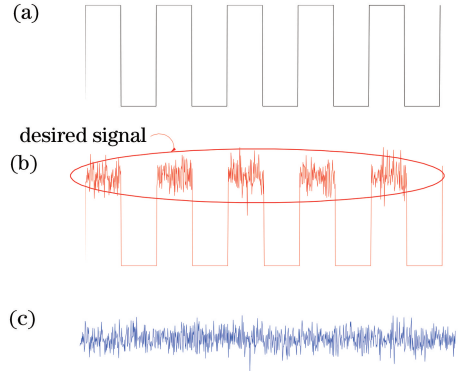


图 5 时分复用 RMOG 的信号处理结果。(a) 光开关切换信号; (b) 滤去谐波分量的解调输出; (c) 经过低通滤波器后的理想输出

Fig. 5 Time division multiplexed RMOG signal processing results. (a) Optical switch switching signal; (b) demodulation output filtered out of harmonic components; (c) ideal output after low-pass filter

3 实验测试

实验选用切换时间为 $500 \mu s$ 、信道串扰约为 50 dB 的光开关和图 3 搭建的 RMOG 系统, 对解调曲线、激光频率锁定回路和陀螺的输出特性进行测试并分析结果。

3.1 解调曲线的测试

利用信号源对激光器进行线性扫频, 施加在 PM 上的正弦波信号的调制频率为 2.67 MHz, 为了获得较大的解调曲线斜率, 调制系数设为 $1.08^{[13]}$ 。LIA 中的滤波器采用一阶无限脉冲响应(IIR)数字滤波器, 带宽为 41.04 Hz, 测试结果如图 6(a) 所示。从图 6(a) 可以看到, 解调曲线中明显存在 1 kHz 的噪声信号, 因光开关的切换时间为 $500 \mu s$, 因此切换周期为 1 kHz。为了更好地滤除 1 kHz 的噪声信号, 将两个一阶 IIR 滤波器进行级联, 解调曲线测试结果如图 6(b) 所示。从图 6(b) 可以看到, 经过二阶滤波解调的曲线比较平滑, 明显不存在 1 kHz 的噪声信号。

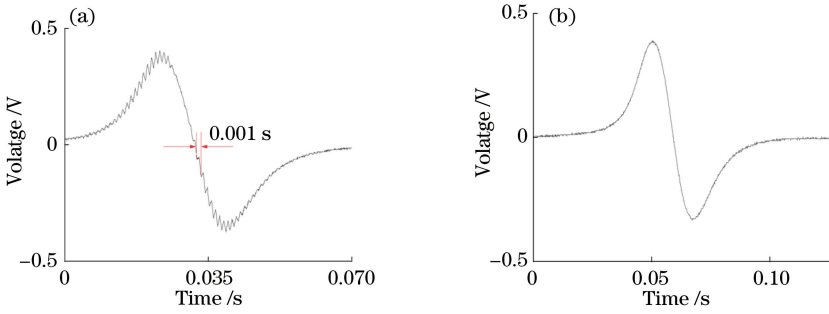


图 6 不同情况下解调曲线的结果。(a) 1 阶 IIR; (b) 2 阶 IIR

Fig. 6 Results of demodulation curves in different situations. (a) 1st order IIR; (b) 2nd order IIR

3.2 激光频率锁定回路的测试

激光频率锁定回路的时间与精度直接影响 RMOG 系统的检测精度。在时分复用 RMOG 系统中,当激光频率锁定于谐振腔 CW 方向光波的谐振频率时,PD 2 输出频率为调制频率的 2 倍,因此可以使用二倍频信号来判断激光锁定回路的工作情况。

在时分复用 RMOG 系统中,由于光束来回切换,激光反馈回路的输入存在一段空白区域。若此时 WRR 内温度发生改变,CW 方向光束的谐振频率与激光器的中心频率的频率差不再为 0,此时环路出现失锁的现象。当光束切换回来时,激光反馈环路将重新锁定。将系统放置在室温($20 \pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$)环境中来观察 PD 2 的输出信号,测试激光频率锁定回路的锁定时间,测试结果如图 7 所示。从图 7 可以看到,锁定时间约为 $8.1 \text{ } \mu\text{s}$,远小于开关的切换时间($500 \text{ } \mu\text{s}$)。从锁定时间可以看到,时分复用 RMOG 系统可以正常工作。对激光锁定回路的精度进行具体测试,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,经过 1800 s 的测试,等效的锁定精度(1σ)为 $0.0161 \text{ } (^\circ)/\text{s}$ 。

3.3 陀螺的输出特性

室温下对 RMOG 系统的输出特性进行实际测

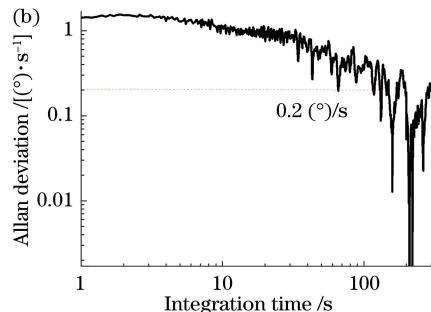
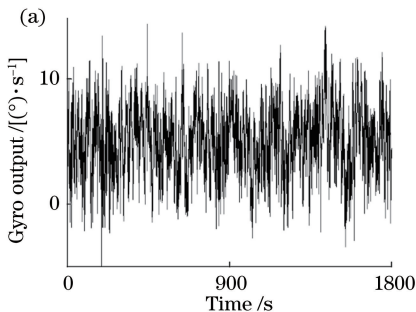


图 9 输出特性分析结果。(a)陀螺输出数据;(b) Allan 方差分析结果

Fig. 9 Output characteristic analysis results. (a) Gyroscope output data; (b) Allan variance analysis result

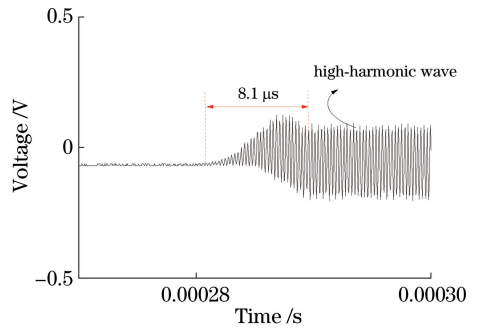


图 7 锁定时间的测试结果

Fig. 7 Test result of lock time

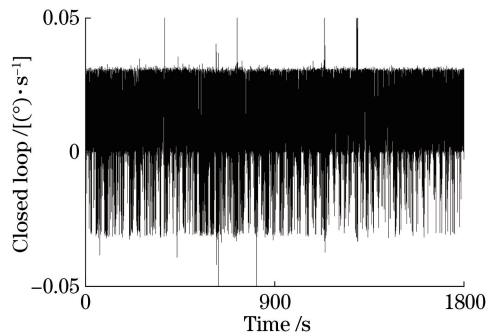


图 8 锁定精度的测试结果

Fig. 8 Locking accuracy test results

试,测试时间为 1800 s,采样带宽为 8 Hz,陀螺输出数据如图 9(a)所示,对陀螺数据作 Allan 方差分析,

结果如图 9(b)所示。从图 9 可以看到,当积分时间为 1 s 时,陀螺零偏稳定性为 1.8 (°)/s;当积分时间为 161 s 时,零偏稳定性为 0.2 (°)/s。

从图 9 可以看到,相比于未采取抑制措施的背向散射噪声,时分复用 RMOG 系统对背向散射噪声的损耗约为 20.3 dB,远没有达到理论灵敏度的指标(110 dB),说明系统中仍存有大量的残余背向散射噪声。考虑到目前商用光切换开关的信道

串扰很难达到 110 dB,说明因此基于单个光开关的时分复用系统 RMOG 的精度难以继续提升。未来可以结合 Y 波导相位调制器^[14]的载波抑制与 2×2 光开关切换器的时分复用共同抑制背向散射噪声,系统框图如图 10 所示。其中 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 为额外施加的小调制频率,用于抑制背向散射干涉项噪声^[15],2×2 光开关用于抑制背散射强度项噪声。

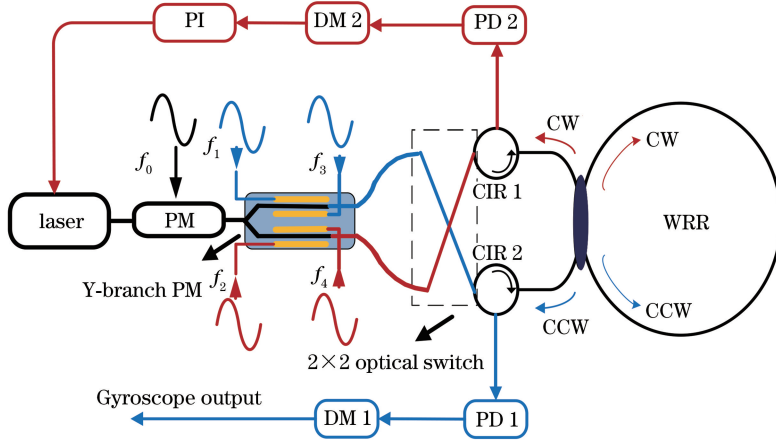


图 10 基于载波抑制与时分复用的 RMOG

Fig. 10 RMOG based on carrier suppression and time division multiplexing

4 结 论

为了改善系统的互易性以及有效抑制背向散射噪声,对基于光开关抑制背向散射噪声的谐振式微光学陀螺展开研究。测试实际研制的二氧化硅 WRR 背向散射噪声,并分析不采取任何抑制措施 RMOG 系统中背向散射噪声的大小;搭建实际时分复用 RMOG 系统,完成解调曲线、激光频率锁定回路和陀螺输出特性等测试;采用二阶低通滤波器实现激光频率的有效锁定,锁定时间约为 8.1 μ s,锁频精度为 0.0161 (°)/s;在此基础上,分析并验证时分复用 RMOG 系统对背向散射噪声的抑制作用。然而,受到光开关串扰的制约,研制的 RMOG 系统中仍存有大量的残余背向散射噪声,并给出今后的进一步优化方案。

参 考 文 献

[1] Ma H L, Jin Z H, Ding C, et al. Optimal design of ring resonator in silica optical waveguide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1330-1332.
马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 二氧化硅波导环形谐振腔[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1330-1332.
[2] Yang Y H, Yang F L, Lu L, et al. Research on

interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328004.

杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328004.

[3] Ma H L, Zhang J J, Wang L L, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3546-3554.

[4] Ciminelli C, Dellolio F, Campanella C, et al. Photonic technologies for angular velocity sensing[J]. Advances in Optics and Photonics, 2010, 2(3): 370-404.

[5] Wang Q W, Feng L S, Li H, et al. Enhanced differential detection technique for the resonator integrated optic gyro[J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2941-2944.

[6] Zhang J J, Ma H L, Li H Z, et al. Single-polarization fiber-pigtailed high-finesse silica waveguide ring resonator for a resonant micro-optic gyroscope[J]. Optics Letters, 2017, 42(18): 3658-3661.

[7] He Y M, Yang F H, Yan W, et al. Phase modulation techniques for suppressing backscattering noise in resonator integrated optic gyroscopes [J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1403-1417.

- 何玉铭, 杨富华, 颜伟, 等. 谐振式集成光学陀螺系统中用于抑制背散射噪声的相位调制技术[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1403-1417.
- [8] Ma H L, He Z Y, Hotate K. Reduction of backscattering induced noise by carrier suppression in waveguide-type optical ring resonator gyro [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(1): 85-90.
- [9] Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement[J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 671-675.
- [10] Hu Z F, Jiang Z G, Wang J F, et al. Resonator fiber optic gyros with light time-division input and multiplexing output in clockwise and counterclockwise directions [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(3): 030601.
- [11] Kaiser T J, Cardarelli D, Walsh J G. Experimental developments in the RFOG[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1367: 121-126.
- [12] Stokes L F. Single-mode optical-fiber resonator and applications to sensing [D]. Stanford: Stanford University, 1984.
- [13] Jin X J, Lin Y, Lu Y, et al. Short fiber resonant optic gyroscope using the high-frequency Pound-Drever-Hall technique[J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5789-5793.
- [14] Zou H H, Yao X T, Yu C, et al. Test method for LiNbO₃ integrated Y-waveguide based on polarization crosstalk analyzer[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0613001.
- 邹欢欢, 姚晓天, 于超, 等. 基于偏振串扰分析仪的 LiNbO₃ 集成 Y 波导的测试方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0613001.
- [15] Mao H, Ma H L, Jin Z H. Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4632-4643.