光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021051204

基于固定频率激光器的低成本闭环谐振陀螺系统仿真

贺　洋[1,2]，张志鑫[1*]，索鑫鑫[2]

（1. 北京航天控制仪器研究所，北京 100039；2. 北京航天时代光电科技有限公司，北京 100094）

摘　要： 提出了一种使用固定频率窄线宽激光器作为干涉光源的闭环谐振式光纤陀螺系统。该系统利用相位调制器对干涉光进行移频控制，完成对谐振腔逆时针方向谐振频率的跟踪和锁定。建立了陀螺系统 Simulink 模型并仿真研究了不同速率点下的陀螺输出特性，结果表明，±200(°)/s 速率范围内逆时针谐振频率锁定时间小于 15 ms，陀螺标度因数非线性为 2.41×10^{-4}。与采用传统频率可调谐窄线宽激光器的闭环谐振式光纤陀螺系统相比，两者锁频时间和标度因数非线性基本一致。该研究为低成本闭环谐振式光纤陀螺系统的实现提供了理论和数据支撑。

关键词： 固定频率激光器；谐振式光纤陀螺；相位调制器；Simulink 仿真；锁定时间；标度因数非线性

中图分类号： TN253；V241.5　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0646－06

Simulation Research on Low-cost Closed-loop Resonator Gyro System Based on Fixed Frequency Laser

HE Yang[1,2], ZHANG Zhixin[1], SUO Xinxin[2]

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Instruments, Beijing 100039, CHN;
2. Beijing Aerospace Times Optoelectronics Technology Co. Ltd., Beijing 100094, CHN)

Abstract: A closed-loop resonant fiber optic gyroscope system using a fixed frequency narrow linewidth laser as the interference light source is proposed. The system uses a phase modulator to perform frequency shift control of the interference light to complete the tracking and locking of the resonant frequency in the counterclockwise direction of the resonant cavity. In this paper, a Simulink model of the gyro system was established and the output characteristics of the gyro were simulated at different speed points. The results show that the lock time of the counterclockwise resonance frequency in the range of ±200(°)/s is less than 15 ms, and the gyro scale factor nonlinearity is 241 ppm. Compared with the closed-loop resonant fiber optic gyroscope system using traditional frequency tunable narrow linewidth lasers, the frequency lock time and scale factor nonlinearity of the two systems are basically the same. This research provides theoretical and data support for the realization of low-cost closed-loop resonant fiber optic gyroscope system.

Key words: fixed frequency laser; resonant fiber optic gyroscope; phase modulator; Simulink simulation; lock time; scale factor nonlinearity

0　引言

谐振式光纤陀螺(Resonant Fiber Optic Gyro, RFOG)是利用光纤谐振腔增强因旋转产生的 Sagnac 效应，将产生的光程差转化为谐振频率差来检测外界旋转角速度的光学惯性器件。谐振式光纤陀螺能用较短的光纤得到较高的测量精度，有利于降低干涉型光纤陀螺由于长光纤所带来的 Shupe 误差[1-2]。

谐振式光纤陀螺稳定工作的前提条件是输入谐

收稿日期：2021－05－12.

* 通信作者：张志鑫

振腔中的光波频率能够对谐振腔的谐振频率实现稳定跟踪锁定[3]，陀螺性能与激光器的频率调谐系数和可调谐范围密切相关[4]。目前各研究机构通常采用窄线宽频率可调谐激光器作为 RFOG 系统光源，通过驱动电流调谐方式实现谐振频率跟踪锁定[5-7]。然而，高性能频率可调谐窄线宽激光器的成本往往很高，不利于谐振式光纤陀螺的工程产业化。

本文提出一种基于固定频率窄线宽激光器的低成本闭环谐振式光纤陀螺系统，在介绍 RFOG 闭环系统结构的基础上，根据其工作原理建立了 Simulink 模型，并进行仿真研究。结果表明，与采用传统频率可调谐窄线宽激光器的闭环谐振式光纤陀螺系统相比，在 ±200(°)/s 范围内两者的锁频时间和标度因数非线性基本一致。

1　相位调制器的移频原理

相位调制器(Phase Modulator，PM)是光学系统中的一类常用器件，能够对光波的相位特性进行调整。铌酸锂($LiNbO_3$，LN)相位调制器具有响应速度快、调制带宽大、易于集成等优点，在光纤系统中得到了广泛的应用[8]。图 1 是一个 LN 相位调制器包含电极的端面图，偏振光在波导中传播，在图中 z 轴方向施加线性时变外电场，电光效应将引起偏振光相位线性变化，实现移频功能[8]。

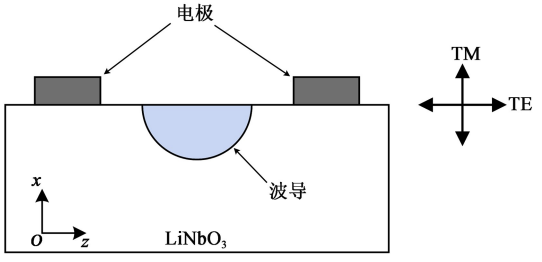


图 1　LN 相位调制器截面图

设输入铌酸锂相位调制器的光场幅度为 E_0，频率为 f_0，初始相位为 φ_0，则输入相位调制器的光场可以表示为

$$E_{\text{in}}(t)=E_0\exp(\text{j}(2\pi f_0 t+\varphi_0)) \tag{1}$$

对相位调制器施加线性相位调制信号 $V(t)=kt$，则输出光波的相位变化量为

$$\Delta\varphi(t)=\frac{\pi n_e^3\gamma_{33}\Gamma Lk}{\lambda G}t=\frac{\pi k}{V_\pi}t \tag{2}$$

式中，λ 为输入光的波长，G 为电极间隙宽度，n_e 为非常光折射率，γ_{33} 为电光系数，Γ 为表示光波场与外加电场相互作用强弱的叠加因子，L 为电极长度。$V_\pi=\lambda G/(n_e^3\gamma_{33}\Gamma L)$，为相位调制器的半波电压。

此时相位调制器输出的光场可表示为

$$E_{\text{out}}(t)=E_0\exp\left\{\text{j}\left[2\pi\left(f_0+\frac{k}{2V_\pi}\right)t+\varphi_0\right]\right\} \tag{3}$$

比较式(3)和式(1)可知，对 LN 相位调制器进行线性相位调制的等效移频量 f_Δ 为 $k/(2V_\pi)$。

受相位调制器工作电压范围等条件制约，线性相位调制信号的电压存在上限，所以本文采用锯齿波调制信号来实现等效移频，图 2 为锯齿波相位调制移频原理示意图[9]。文献[10]中指出，在锯齿波幅度为相位调制器的全波电压 $2V_\pi$ 时移频效果最佳，当调制信号幅度小于 $2V_\pi$ 时输出端会产生凸脉冲，大于 $2V_\pi$ 时输出端将产生凹脉冲，均不能实现理想的移频功能。本文固定锯齿波的幅度为 $2V_\pi$，设定锯齿波频率为 f_{sw}，则光波的等效移频量 f_Δ 为

$$f_\Delta=\frac{k}{2V_\pi}=\frac{2V_\pi}{2V_\pi}f_{\text{sw}}=f_{\text{sw}} \tag{4}$$

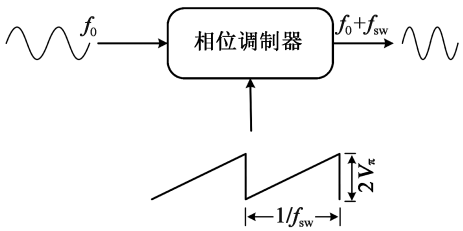


图 2　锯齿波相位调制移频原理示意图

2　基于固定频率窄线宽激光器的 RFOG 闭环系统

图 3 给出了基于固定频率窄线宽激光器的谐振式光纤陀螺闭环系统结构简图。固定频率窄线宽激光器(Laser)产生波长为 1 550 nm 的光波，经过相位调制器 PM_0，由分光比为 50/50 的耦合器 C_0 分成功率相等的两束光，分别经过相位调制器 PM_1，PM_2 进入光纤环形谐振腔(Fiber Ring Resonator，FRR)，沿逆时针(Counterclockwise，CCW)和顺时

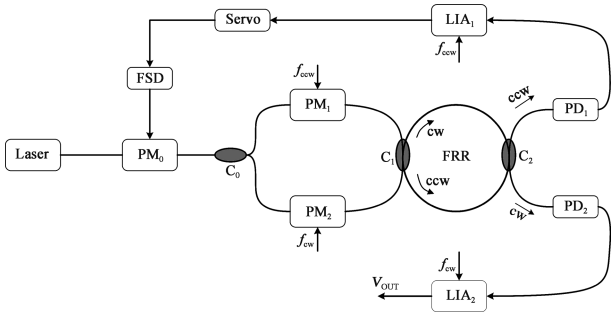


图 3　基于固定频率窄线宽激光器的 RFOG 结构简图

针(Clockwise,CW)方向在腔内多圈传输后分别入射到光电探测器(Photodetector,PD)PD_1 和 PD_2。PD_1 输出的信号经锁相放大器(Lock-in Amplifier,LIA)LIA_1 完成解调后,通过伺服控制器 Servo 和锯齿波移频驱动模块(Frequency Shift Driver,FSD)作用于相位调制器 PM_0 对光波进行移频,使输入耦合器 C_0 的光波频率锁定到 FRR 逆时针方向的谐振频率上;PD_2 输出的信号经过锁相放大器 LIA_2 解调后作为陀螺的输出信号 V_{OUT}。

3 基于固定频率窄线宽激光器的 RFOG 闭环系统仿真研究

3.1 仿真模型

基于固定频率窄线宽激光器的谐振式光纤陀螺闭环系统 Simulink 仿真模型如图 4 所示。

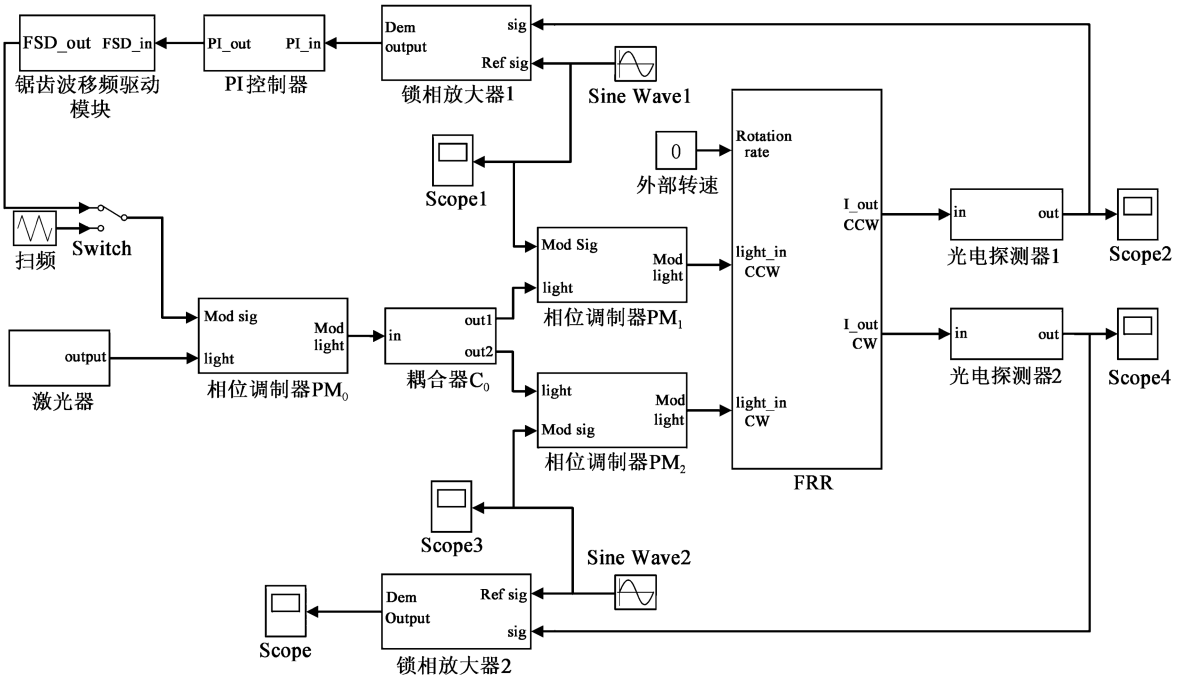


图 4 基于固定频率窄线宽激光器的 RFOG 仿真模型

忽略相对强度噪声和频率噪声,激光器模块的输出是光强 I 和频率 f 组合而成的向量。耦合器 C_0 是分光比为 50/50 的光耦合器。调制信号发生模块采用 Simulink 中自带的正弦信号发生器,其发出的信号进入相位调制器的 Mod sig 输入端。

光纤环形谐振腔 FRR 的 Simulink 仿真模型主要由子模块 Frequency Calculate 和 H_f 组成,如图 5 所示。子模块 Frequency Calculate 根据光纤环直径 D、光纤折射率 n_0、光波长 λ、光速 c、光纤总长度 L 以及转动角速度 Ω 计算得出转动状态下谐振腔顺逆时针方向的谐振频率。定义顺时针为转动正方向,由转动角速度引起的频率变化 Δf 计算式如下:

$$\Delta f=\frac{D}{n_0\lambda}\Omega \tag{5}$$

以静止时谐振腔的谐振频率为基础,与 $\Delta f/2$ 求和与作差,分别得到旋转状态下谐振腔逆时针方向谐振频率 f_CCW 和顺时针方向谐振频率 f_CW[11]。根据 FRR 内耦合器 C_1,C_2 的耦合系数 k,插入损耗 α_C 和光在谐振腔内传输一周的传输损耗 α_L,得到谐振腔的传递函数为[9,11]

$$H(\Delta f_L)=\frac{k(1-\alpha_C)\sqrt{(1-\alpha_L/2)}\cdot\exp(-j\pi\Delta f_L\tau)}{1-(1-k)(1-\alpha_C)\sqrt{(1-\alpha_L)}\cdot\exp(-j2\pi\Delta f_L\tau)} \tag{6}$$

式中,Δf_L 为输入光频率和 FRR 谐振频率之间的频率差,渡越时间 $\tau=n_0L/c$。子模块 H_f 将顺逆时针谐振频率与调制后激光器频率的频差 df_CW,df_CCW 分别替代 Δf_L 代入式(6)中,再根据顺逆时针输入光强 I_inCW 和 I_inCCW,计算得到输出光强 I_outCW 和 I_outCCW,计算式为

$$\begin{cases}\text{I_outCW}=\text{I_inCW}\cdot|H(\text{df_CW})|^2\\ \text{I_outCCW}=\text{I_inCCW}\cdot|H(\text{df_CCW})|^2\end{cases} \tag{7}$$

解调模块采用的是锁相放大器,它有两个输入

端，一个输入光电探测器输出的电压信号，另一个输入与调制信号相同的正弦信号作为参考信号。锁相放大器对参考信号进行延时调整，再利用相关检测原理提取出有用的微弱信号，完成对频差信号的同频同相解调。PI 控制器通过调节比例系数 K_p 和积分系数 K_i 产生移频控制信号，后接锯齿波移频驱动模块。锯齿波移频驱动模块的 Simulink 仿真模型如图 6 所示，FSD 根据输入和锯齿波基础频率的乘积来控制输出锯齿波的频率，按式(4)所述直接将移频量 f_Δ 叠加在光频率上。

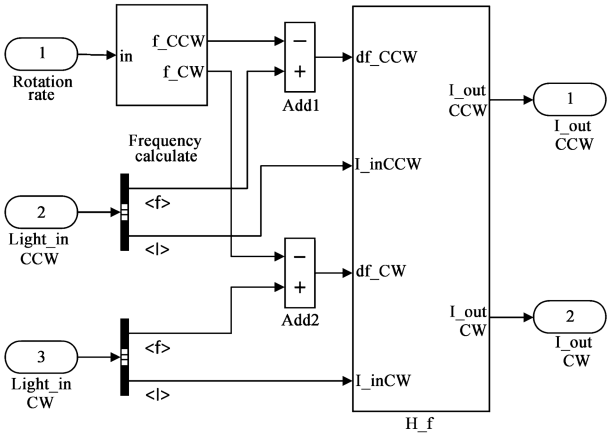


图 5　光纤环形谐振腔 FRR 仿真模型

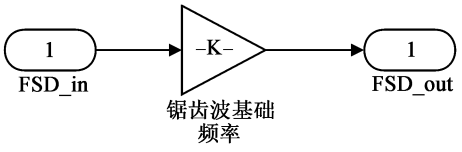


图 6　锯齿波移频驱动模块

3.2　仿真参数设置

FRR 是 RFOG 的核心敏感器件，模型中 FRR 环长为 16 m，直径为 0.1 m，详细参数如表 1 所示。

表 1　FRR 常量参数

参数	值
光纤环直径 D/m	0.1
光纤长度 L/m	16
光纤折射率 n_0	1.455
光波长 λ/nm	1 550
光速 c/(m/s)	3×10^8
耦合器 C_1，C_2 耦合系数 k	0.05
耦合器 C_1，C_2 插入损耗 α_C/dB	0.22
光传输一周损耗 α_L/dB	0.006

激光器输出光的中心波长为 1 550 nm，光强为 10 mW；顺时针调制频率为 238 kHz，逆时针调制频率为 235 kHz；光电探测器的电压响应度为 15 V/mW；PI 控制器的比例系数 K_p 取为 0.025，积分系数 K_i 取为 0.001，详细参数设置如表 2 所示。

表 2　仿真参数

参数	参数值
激光器波长/nm	1 550
激光器输出光强/mW	10
顺/逆时路针调制频率/kHz	238/235
光电探测器通带频率范围/kHz	200～500
光电探测器电压响应度/(V·mW^{-1})	15
锁相放大器 1 参考信号延时/μs	3.31
锁相放大器 2 参考信号延时/μs	3.15
锁相放大器滤波器截止频率/Hz	500
PI 控制器比例系数 K_p	0.025
PI 控制器积分系数 K_i	0.001
锯齿波基础频率/MHz	1

3.3　谐振曲线和解调曲线

将图 4 中的开关(Switch)置于下端，接三角波扫频模块，仿真研究了 RFOG 系统的谐振曲线和解调曲线。通过改变施加在 PM_0 上的锯齿波频率，对激光器的中心频率进行扫频，谐振腔顺时针方向谐振曲线如图 7 所示。FRR 的谐振曲线符合洛伦兹线型，从图 7 可知，光纤环形谐振腔的自由谱宽 FSR 为 12.88 MHz，半高全宽(Full with at Half Maximum，FWHM)为 806.14 kHz，谐振腔精细度 F 约为 16。

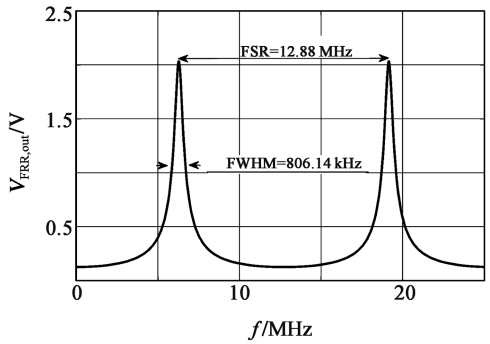


图 7　谐振腔顺时针方向谐振曲线仿真结果

解调曲线如图 8 所示，计算得到该陀螺的标度因数 K 为 −0.730 μV/Hz。

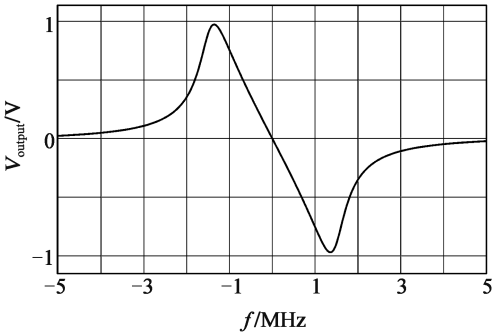


图 8　解调曲线

3.4 系统动态性能

将图4中的开关(Switch)置于上端,接PI控制部分,仿真研究了RFOG系统锁频时间和标度因数性能。设定外部转速典型值为10 (°)/s,由式(5)可知,光学Sagnac效应引起的谐振频率差为7.739 kHz,理论解调输出应为-5.649×10^{-3} V。系统实际解调输出如图9所示,仿真结果显示,陀螺在15 ms内完成锁频,解调输出为-5.644×10^{-3} V,和理论输出的相对误差小于0.1%。

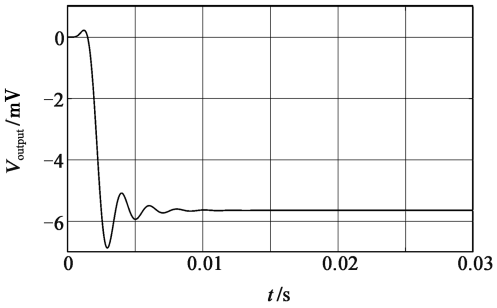


图9 RFOG输出波形

进一步仿真研究了系统的动态性能,在±200(°)/s范围内以20(°)/s为间隔选取速率点,陀螺转速与系统解调输出的关系如图10所示。在±200(°)/s范围内,陀螺在15 ms内完成锁频,输入输出近似线性关系,经计算,陀螺标度因数的非线性为2.41×10^{-4}。

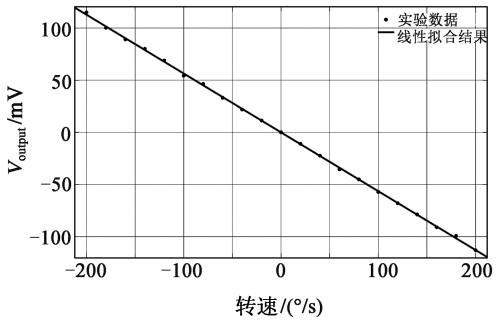


图10 基于中心频率固定激光器RFOG转动输出仿真结果

4 与基于频率可调谐激光器RFOG系统的仿真对比研究

将上述系统与基于频率可调谐激光器RFOG系统的动态性能进行了对比研究。基于频率可调谐激光器RFOG系统Simulink仿真模型如图11所示;激光器的参数设置参照Redfern Integrated Optics Inc (RIO)公司窄线宽频率可调谐激光器的实际性能,设定激光器调谐系数为50 MHz/V,其余仿真参数与基于固定频率窄线宽激光器的RFOG系统相同,具体如表1、表2所示。

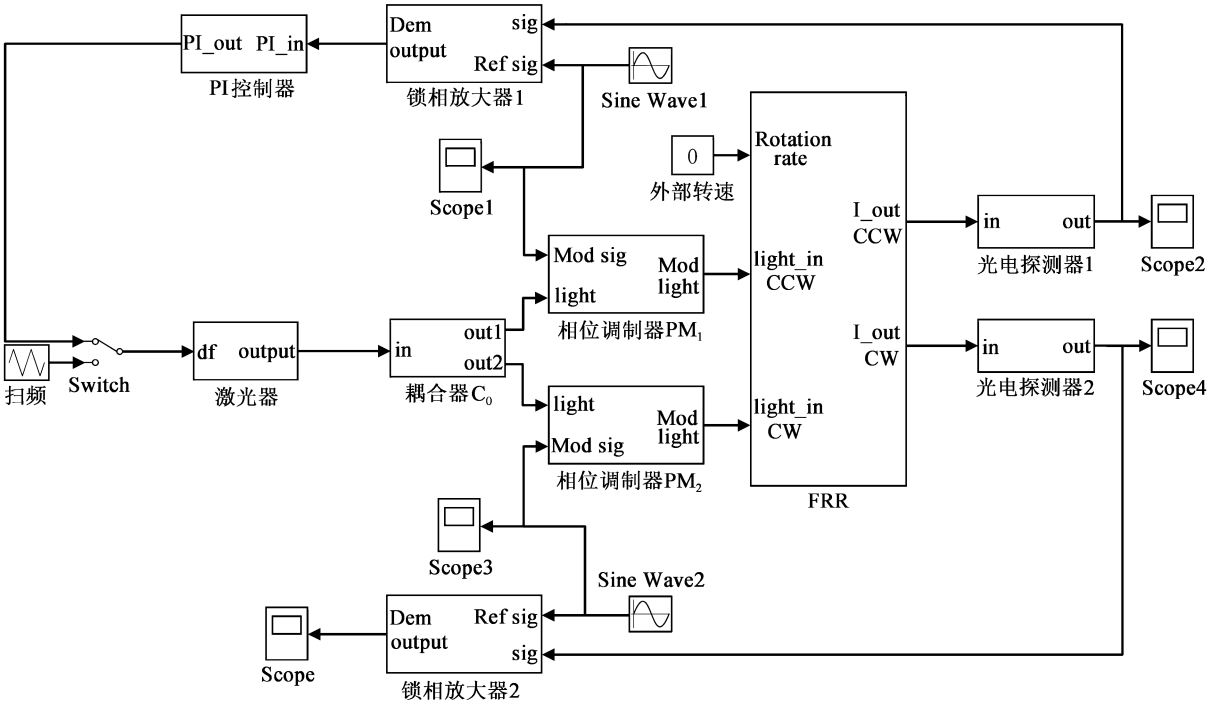


图11 基于频率可调谐激光器RFOG系统Simulink仿真模型

同样设定外部转速为10 (°)/s,陀螺能够在15 ms内完成锁频,解调输出为-5.645×10^{-3} V,

与理论输出的相对误差小于 0.1%。在±200(°)/s 范围内，以 20(°)/s 为间隔选取速率点，陀螺转速与系统解调输出的关系如图 12 所示。在±200(°)/s 范围内，陀螺能够在 15 ms 内完成锁频，输入输出近似为线性关系，经计算，此时陀螺标度因数的非线性度为 2.13×10^{-4}。

从仿真结果对比可以看出，在±200(°)/s 的外部转速范围内，基于固定频率窄线宽激光器的闭环 RFOG 系统和基于频率可调谐激光器构建的 RFOG 闭环系统锁频时间和标度因数的非线性基本相同。

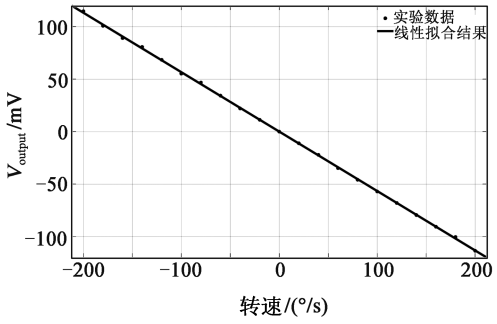


图 12　基于频率可调激光器系统 RFOG 转动输出仿真结果

5　结论

在分析相位调制器移频原理的基础上，介绍了基于固定频率窄线宽激光器的低成本闭环谐振式光纤陀螺系统工作原理及其组成，并建立了 Simulink 仿真模型。仿真结果表明，该结构的 RFOG 系统在外部转速处于±200(°)/s 范围内 CCW 方向谐振频率锁频时间小于 15 ms，陀螺标度因数非线性为 2.41×10^{-4}。基于频率可调谐窄线宽激光器的 RFOG 系统转速在±200(°)/s 范围内 CCW 方向谐振频率锁频时间小于 15 ms，标度因数非线性为 213 ppm，两个系统的锁频时间和标度因数非线性基本一致。本研究为基于固定频率窄线宽激光器的低成本闭环谐振式光纤陀螺系统的实现提供了理论和数据支撑。

参考文献：

[1] 王　巍. 干涉型光纤陀螺技术[M]. 北京：中国宇航出版社，2010.
Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2010.

[2] 王　巍，夏君磊，徐宇新. 集成光学陀螺技术研究[J]. 导航与控制，2009，8(4)：30-34.
Wang Wei, Xia Junlei, Xu Yuxin. Research on integrated optical gyroscope technology [J]. Navigation and Control, 2009, 8(4): 30-34.

[3] 雷　明，于怀勇，方　圆，等. 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研究[J]. 中国激光，2020，47(1)：228-234.
Lei Ming, Yu Huaiyong, Fang Yuan, et al. Resonance fiber optic gyroscope frequency tracking loss-of-lock control research [J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(1): 228-234.

[4] 洪灵菲，张春熹，冯丽爽，等. 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. 中国激光，2011，38(9)：103-107.
Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, et al. Research on frequency tracking and locking technology of resonant micro-optical gyroscope[J]. Chinese J. of Lasers, 2011, 38(9): 103-107.

[5] 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.
Yang Zhihuai, Ma Huilian, Zheng Yangming, et al. Digital closed loop system of resonant fiber optic gyroscope system frequency locking technology[J]. Chinese J. of Lasers, 2007, 34(6): 814-819.

[6] 粟　妮，冯丽爽，雷　明，等. 谐振式集成光学陀螺三角波调制误差分析[J]. 中国激光，2012，39(8)：114-119.
Su Ni, Feng Lishuang, Lei Ming, et al. Triangular wave modulation error analysis of resonant integrated optical gyroscope[J]. Chinese J. of Lasers, 2012, 39(8): 114-119.

[7] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell[J]. Proc. of SPIE, 2016, 9852: 985207.

[8] 李学鹏. 铌酸锂低半波电压调制器研究[D]. 成都：电子科技大学，2015.
Li Xuepeng. Research on lithium niobate low half wave voltage modulator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technol. of China, 2015.

[9] 卢　霄. 双路闭环谐振式光纤陀螺数字信号检测系统的设计与实现[D]. 杭州：浙江大学，2014.
Lu Xiao. Design and implementation of dual-circuit closed-loop resonant fiber optic gyroscope digital signal detection system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[10] Strandjord L K, Sanders G A. Effects of imperfect serrodyne phase modulation in resonator fiber-optic gyroscopes [J]. Proc. SPIE, 1994, 2292: 272-282.

[11] 贺　铭，王国臣，龙文强，等. 双闭环谐振式光纤陀螺的建模与仿真[J]. 光学与光电技术，2020，18(6)：98-105.
He Ming, Wang Guochen, Long Wenqiang, et al. Modeling and simulation of double closed loop resonant fiber optic gyro [J]. Opt. and Optoelectronic Technol., 2020, 18(6): 98-105.

作者简介：

贺　洋(1997－)，男，河南鹤壁人，硕士研究生，主要研究方向为光纤陀螺信号处理；

张志鑫(1964－)，男，研究员，研究生导师，主要从事光纤陀螺惯导及组合导航技术研究。