

数字闭环光纤陀螺动态模型研究

王夏霄¹ 张 猛¹ 李传生¹ 王爱民² 彭志强²

(¹北京航空航天大学惯性技术重点实验室, 北京 100083)
(²湖北三江航天洪峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要 由于角振动台测试方法的局限性,难以全频带验证数字闭环光纤陀螺动态模型的正确性。针对此问题,提出了基于 Faraday 效应的动态特性评估测试方法,采用正弦电流激励下的 Faraday 相位差等效 Sagnac 相位差,解决了激励信号输出频率有限的问题。由动态模型推导出传递函数,仿真光纤陀螺的频率特性,仿真结果与实验结果相一致。分析了该动态模型各个参数与闭环带宽的关系,结论与实验拟合结果相同。从以上两个方面验证了该数字闭环光纤陀螺动态模型的正确性,为优化动态特性的研究提供了一定的参考。

关键词 光纤光学;光纤陀螺;Faraday 效应;动态特性评估;动态模型

中图分类号 U666.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0205002

Research on Dynamic Model of Digital Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope

Wang Xiaoxiao¹ Zhang Meng¹ Li Chuansheng¹ Wang Aimin² Peng Zhiqiang²

(¹Key Laboratory on Inertial Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)
(²Hong Feng Control Company Limited of Sanjiang Astronautics, Xiaogan, Hubei 432000, China)

Abstract It is difficult to verify the dynamic model of the digital closed-loop fiber optic gyroscope (FOG) due to the limitation of the turntable's output frequency. To solve this problem, a novel evaluation method based on the magneto-optic Faraday effect is developed. The Sagnac phase difference is substituted by the Faraday phase difference induced by alternating current (AC) to eliminate the limitation of stimuli. Based on the dynamic system model of the FOG, the relationship between bandwidth and the parameters is analyzed and the system transfer function is obtained. The frequency response characteristic of the gyro is simulated via the obtained transfer function. Finally, some experiments are conducted to investigate the dynamic performance of the gyro. The experimental data are in agreement with the theoretical findings, which demonstrates the correctness of the dynamic model and provides the groundwork for optimizing dynamic characteristics.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; Faraday effect; dynamic characteristic test; dynamic model

OCIS codes 060.2310; 060.2800; 230.2240

1 引 言

光纤陀螺(FOG)是基于 Sagnac 效应的新型角速度传感器^[1],具有无转动部件的全固态结构、动态范围大、带宽大、功耗低、抗冲击振动、体积小、无启动过程、寿命长等突出优点。它在军事及民用领域得到广泛的应用,目前各国都非常重视高性能光纤陀螺的研制。数字闭环检测方案是中、高精度光纤陀螺的主流方案,具有动态范围大、标度因数误差小

等优点^[2,3],对数字闭环光纤陀螺动态模型的研究是光纤陀螺重要的关键技术。但由于角振动台带宽测试方法的局限性,无法在全频带内测试光纤陀螺闭环动态特性,难以验证动态模型的正确性^[4]。针对该问题,本文提出了基于 Faraday 效应的光纤陀螺动态特性评估测试方法,通过频率特性和闭环带宽实验验证了动态模型的正确性,为优化动态特性的研究提供了一定的参考。

收稿日期: 2012-09-04; 收到修改稿日期: 2012-10-09

作者简介: 王夏霄(1977—),男,博士,讲师,主要从事光纤陀螺和光纤传感方面的研究。

E-mail: wangxiaoxiao@buaa.edu.cn

2 数字闭环光纤陀螺的动态模型

数字闭环光纤陀螺的基本原理^[5]:通过闭环反馈,在光纤环中人为地引入与 Sagnac 相移 φ_S 大小相等、方向相反的非互易补偿相移 φ_R ,使二者抵消,光纤陀螺始终处在固定的工作点, φ_R 由数字阶梯波驱动 Y 波导产生,光纤陀螺的输出可由 φ_R 经输出算法处理后获得。检测过程:在光纤环中以相反方向传输的两束光产生与旋转角速度 Ω 成正比的 φ_S ,干涉后转换为光强的变化,由光电转换器变为电压

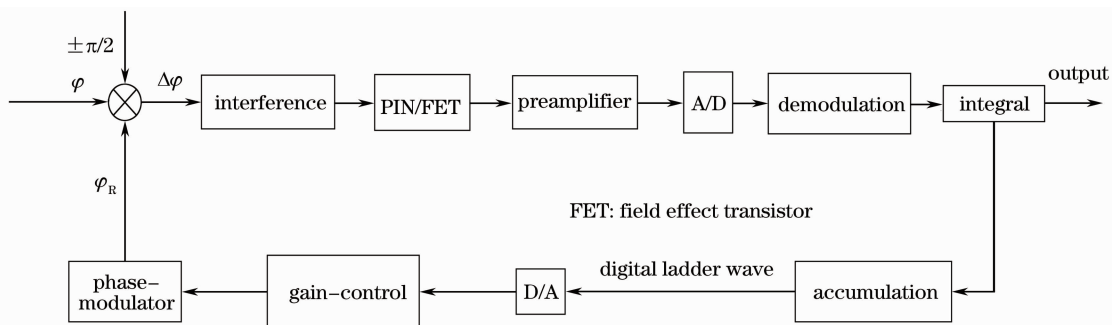


图 1 数字闭环光纤陀螺原理框图

Fig. 1 Schematic of digital closed-loop FOG

根据光纤陀螺的原理框图,进行简化处理得到光纤陀螺的动态模型图^[6],如图 2 所示,其中 K 是以延迟时间 τ 为时间间隔的离散变量。 G 表示前向通道增益,取决于干涉的光强、偏置调制深度、光电转换、前放增益、A/D 转换增益、数字解调增益等。 H 为反馈回路增益,取决于 D/A 转换增益、反馈增益控制电路、相位调制 2π 的电压等。 D 为延迟单位时间的算子符号。 M 为光纤陀螺 Sagnac 效应传感系数, $M = \frac{4\pi RL}{\lambda c}$,其中 L 为光纤长度, R 为光纤环的半径, λ 为光的波长, c 为真空中的光速。

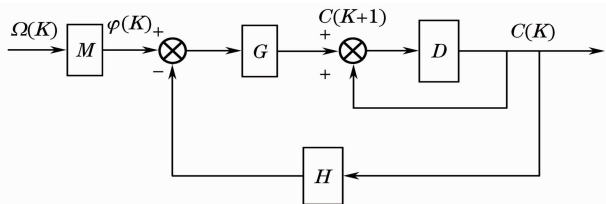


图 2 简化的闭环光纤陀螺动态模型

Fig. 2 Simplified dynamic model of closed-loop FOG

根据上面光纤陀螺的动态模型图进行理论推导得出

$$C(K+1) + (GH - 1)C(K) = GM\Omega(K), \quad (1)$$

对(1)式进行变换得到光纤陀螺的传递函数

$$F(s) = \frac{GM}{T_s + GH} = \frac{M}{H} \cdot \frac{1}{T_c s + 1} = k \frac{1}{T_c s + 1}, \quad (2)$$

的变化。前置放大电路对该信号进行和放大,模数转换器(A/D)进行高速采样并转换为离散的数字量,数字信号处理电路完成数字解调。目前的数字闭环光纤陀螺主要采用积分控制算法,根据积分控制算法形成反馈数字阶梯波,由数模转换器(D/A)和驱动电路加在 Y 波导上,产生 φ_R 实现系统闭环工作。数字信号处理电路同时还要形成调制方波,使系统有合适的工作点。根据光纤陀螺的结构得到的原理框图如图 1 所示。

式中 $k = \frac{M}{H}$ 为稳态输出标度因数; $T_c = \frac{\tau}{GH}$ 为陀螺的时间常数, τ 为控制周期即延迟时间, GH 为总的增益。通过传递函数表达式可以看出陀螺系统为典型的一阶惯性系统。

根据传递函数 $F(s) = k \frac{1}{T_c s + 1}$ 可以得到幅频特征、相频特征和 -3 dB 带宽分别为

$$A(\omega) = k \frac{1}{\sqrt{(\omega T_c)^2 + 1}}, \quad (3)$$

$$\phi(\omega) = -\arctan(\omega T_c), \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{2\pi T_c} = \frac{GH}{2\pi\tau}. \quad (5)$$

通过动态模型的建立,可以得到传递函数和误差传递函数,分析动态特性的影响因素,为确定光纤陀螺的最佳性能打下了基础。但由于角振动台带宽测试方法的局限性,无法在全频带内测试动态特性,难以实验验证动态模型的正确性。因此,提出了基于 Faraday 效应的动态特性评估测试方法,成功实现了动态模型的验证。

3 基于 Faraday 效应的光纤陀螺动态特性评估测试方法

目前主要的评估带宽测试方法是角振动台法,但角振动台的输出频率一般仅有 200~300 Hz^[7,8]。

光纤陀螺的带宽远超过 500 Hz,因此角振动台测试方法远不能满足数字闭环光纤陀螺全带宽测试的要求。本文提出了基于 Faraday 效应的光纤陀螺动态特性评估测试方法。

3.1 基于 Faraday 效应的动态特性评估测试方法

Faraday 效应是闭合光路中一种重要的非互易效应,通过交变磁场引起的光纤 Faraday 效应,用交变的磁场代替角振动台来模拟交变的角速率输入变化,来测试光纤陀螺闭环检测电路的动态特性。交变的磁场能够产生高频输入信号,克服角振动台输出频率低的缺点。

光纤陀螺中的光纤环一般采用保偏光纤,抑制了光纤中的 Faraday 效应^[9],因此评估方法借鉴光纤电流互感器光路^[10]设计了对 Faraday 效应敏感的传感光路,用来敏感交变电流。如图 3 虚线框所示,传感光路包括超辐射发光二极管(SLD)光源、环形器、Y 波导、偏振分束器(PBS)、1/4 波片、传感光

纤、反射镜以及不同长度的延迟光纤环。其敏感光路基本工作原理如下:由光源发出的光经过一个单模环形器后进入 Y 波导器件,Y 波导器件实现偏振起偏和相位调制。偏振光由偏振分束器的两个尾纤耦合后注入保偏光纤环,分别沿保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输,经过 1/4 波片后,分别变为左旋和右旋的圆偏振光,并进入传感光纤。由于激励交变电流产生磁场,在传感光纤中产生 Faraday 磁光效应,使这两束圆偏振光的相位发生变化($\Delta\varphi_F = 2VNI$,其中 $\Delta\varphi_F$ 为 Faraday 相位差, V 为 Verdet 常数, I 为导线中电流强度, N 为环绕导线的光纤匝数)并以不同的速度传输,在镜面处反射后,两束圆偏振光的偏振模式互换,再次穿过传感光纤,并经历 Faraday 效应使两束光产生的相位加倍($2F = 4VNI$)。这两束光再次通过 1/4 波片后,恢复为线偏振光,然后两束线偏振光发生干涉。最后,携带相位信息的光由单模环形器进入探测器。

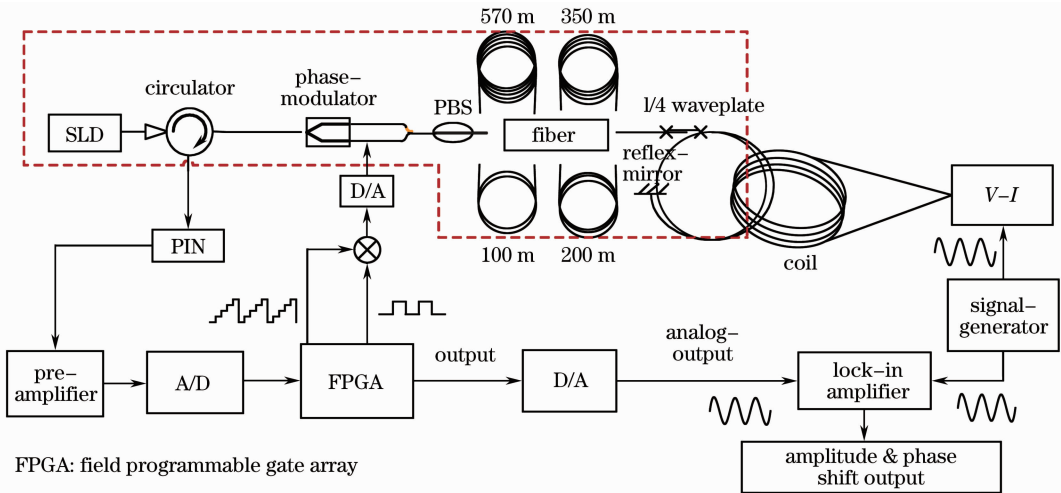


图 3 基于 Faraday 效应的动态特性评估测试方法结构示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the dynamic characteristic test scheme based on Faraday effect

信号发生器的正弦信号经过 V-I 转换电路后产生交变电流,通过缠绕在传感光纤上的线圈,感应力 Faraday 效应相位差。此光路中返回探测器的光只携带了由于 Faraday 效应产生的非互易相位差^[10]。用该 Faraday 效应相位差替代角振动台旋转产生的 Sagnac 效应,然后进入光纤陀螺的信号检测系统,实现了基于 Faraday 效应的动态特性的准确评估测试。

3.2 等效性分析

利用角振动台的频率特性测试方法是基于光纤陀螺的 Sagnac 效应。旋转角速率使正反向传播的两束光之间产生光程差,从而产生 Sagnac 相位差。Sagnac 相位差与角速度成正比,并有一个光纤环渡

越时间的延迟。角振动台能够产生按正弦规律变化的角速度。带宽测试时,用光纤陀螺测量该角速度,同时采集光纤陀螺和角振动台的输出,经过数据处理后,得到光纤陀螺的频率特性曲线。

本频率特性评估方法是基于传感光纤的 Faraday 效应。Faraday 效应对左旋或右旋圆偏振光的效果是使一束光传播速度加快,另一束减慢,从而形成相位差,根据以上光纤的 Faraday 效应理论可知,Faraday 相位差与激励电流成正比,由于采用反射式的光路结构,延迟光纤环的长度只要为被评估光纤陀螺光纤环长度的一半即可使延迟时间相同。因此该方法具有与光纤陀螺仪相同的干涉仪输出信号特征。对于检测电路来说,Sagnac 相位差

$\Delta\varphi_S$ 和 Faraday 相位差 $\Delta\varphi_F$ 是不同效应引入的具有相同特征的输入信号,所以此评估方法与角振动台测试方法是等效的。

4 实验研究

采用基于 Faraday 效应的动态特性评估测试方法,对数字闭环光纤陀螺动态模型进行验证实验。从以下两个方面进行实验:1) 通过频率特性测试,验证光纤陀螺为一阶惯性系统;2) 通过实验得到各个工作参数与闭环带宽的拟合曲线,进一步验证动态模型的正确性。

4.1 一阶惯性系统的实验验证

针对某型号光纤陀螺的工作参数,其前向通道增益 $G=1.92 \times 2^{20}$, 反馈回路增益 $H=2\pi \times 2^{-15}$, 延迟时间 $\tau=6.84 \mu s$ 。根据传递函数进行频率特性仿真,仿真结果如图 4 所示,闭环带宽为 8.94 kHz。

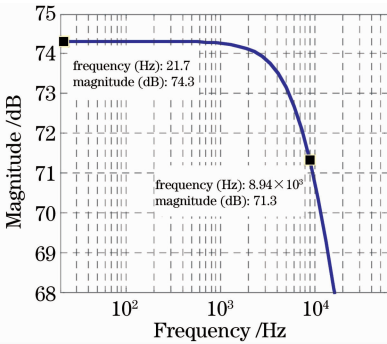


图 4 光纤陀螺的频率特性仿真图

Fig. 4 Simulation result of frequency characteristic of FOG

采用基于 Faraday 效应的带宽评估测试方法,对该型号光纤陀螺进行评估,加正弦交变电流进行扫频,记录正弦电流大小和光纤陀螺输出值,进行数据归一化处理,测试结果如图 5 所示。

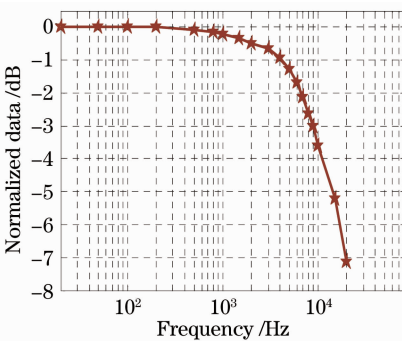


图 5 光纤陀螺幅频特性实验图

Fig. 5 Experimental result of frequency characteristic of FOG

通过对比得出:实验结果(图 5)与仿真结果(图 4)一致,均为一阶惯性系统的典型曲线,实验得出该型号光纤陀螺的闭环带宽约为 9 kHz,与动态模型得出的结论一致,验证了动态模型的正确性。

4.2 工作参数对带宽影响的分析验证

根据带宽动态模型(5)式得出,光纤陀螺闭环带宽与前向通道增益 G 成正比,与控制周期 τ 成反比。通过实验验证以上结论,进一步验证动态模型的正确性。

4.2.1 验证带宽与前向增益成正比

光纤陀螺的延迟时间 $\tau=6.84 \mu s$,反馈回路增益 $H=2\pi \times 2^{-15}$,且保持不变。保证光纤陀螺反馈闭环正常,测量不同前向增益时光纤陀螺的带宽,拟合实验结果,如图 6 所示,光纤陀螺的闭环带宽与前向通道增益成正比,实验结果与动态模型一致。所以,可以调节干涉的光强、偏置调制深度、光电转换、前放增益、A/D 转换增益、数字解调增益等来改变前向增益,达到优化动态性能的目的。

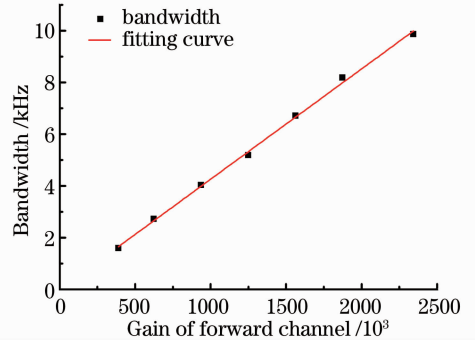


图 6 带宽与前向增益的关系

Fig. 6 Measured bandwidth versus gain of forward channel

4.2.2 控制时间 τ 对带宽影响的验证

光纤陀螺的前向通道增益 $G=1.92 \times 2^{20}$,反馈回路增益 $H=2\pi \times 2^{-15}$,且保持不变。保证光纤陀螺反馈闭环正常,测量不同控制周期时光纤陀螺的闭环带宽,拟合曲线图如图 7 所示,光纤陀螺的闭环带宽与控制周期成反比,实验结果与动态模型一致。

通过以上实验,验证了前向增益、控制时间与闭环带宽的关系,与动态模型带宽结论一致,进一步验证了动态模型的正确性。可以得出理论上控制周期越小,动态性能就会越好,所以在满足光纤陀螺整体性能的前提下,选择长度短的光纤环即小的控制周期,能达到更好的动态性能。

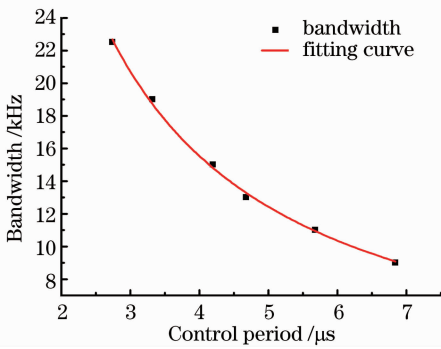


图7 带宽与控制周期的关系

Fig. 7 Measured bandwidth versus control period

5 结 论

从理论上推导了数字闭环光纤陀螺的动态模型,提出了基于 Faraday 效应的动态特性评估测试方法。对某型号光纤陀螺进行评估测试,实验结果与仿真结果一致,均为一阶惯性系统的典型曲线,实验闭环带宽与动态模型得出的结论一致。另外,分析并验证了动态模型的参数与闭环带宽的关系,进一步验证了该动态模型的正确性。根据该模型,可通过调节延迟时间和系统增益来优化动态性能。

参 考 文 献

- Leng Zongsheng. The evolving research of fiber optic gyroscopes and application[J]. *China Science and Technology Information*, 2006, (6): 53~55
冷宗圣. 光纤陀螺的研究发展及其应用[J]. *中国科技信息*, 2006, (6): 53~55
- Li Xuyou, Wang Changwei, Zou Jibin. The influence of integrated optic device's stability for fiber optic gyroscopes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 830~834

- 李绪友, 王长伟, 邹继斌. 集成光学器件对光纤陀螺稳定性影响的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 830~834
- Ba Xiaoyan, Zhang Guicai, Li Yongbing *et al.*. The influence of SLD's spectral modulation on the performance of fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 680~683
巴晓艳, 张桂才, 李永兵 等. SLD 光谱调制对光纤陀螺性能的影响[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 680~683
- Wang Yan, Zhang Chunxi. Investigation of testing dynamic characteristics of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. *Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, **30**(9): 818~821
王 妍, 张春熹. 数字闭环光纤陀螺动态特性测试研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, **30**(9): 818~821
- Zhang Chunxi, Song Ningfang, Du Xinzheng *et al.*. All digital DSP based closed-loop fiber optic gyroscope[J]. *J. Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 1998, **24**(6): 695~698
张春熹, 宋凝芳, 杜新政 等. 基于 DSP 的全数字闭环光纤陀螺[J]. *北京航空航天大学学报*, 1998, **24**(6): 695~698
- Ma Yingjian, Wang Zheng, Zhang Weixu *et al.*. Method of testing and calculating for frequency characteristics of digital closed-loop FOG[J]. *J. Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2002, **28**(6): 640~642
马迎建, 王 峥, 张维叙 等. 数字闭环光纤陀螺频率特性的计算和测试方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, **28**(6): 640~642
- A. Kim, M. F. Golnaraghi. Initial calibration of an inertial measurement unit using an optical position tracking system[C]. *IEEE 2004 Position Location and Navigation Symposium*, 2004. 96~101
- H. Rice, S. Kelmenson, L. Mendelsohn. Geophysical navigation technologies and applications[C]. *IEEE 2004 Position Location and Navigation Symposium*, 2004. 618~624
- Zhang Weixu. *Fiber Optic Gyroscope and Its Application*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 112~114
张维叙. *光纤陀螺及其应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 112~114
- Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang *et al.*. A new all digital closed-loop fiber optic current transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, **30**(16): 77~80
王夏霄, 张春熹, 张朝阳 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. *电力系统自动化*, 2006, **30**(16): 77~80

栏目编辑: 王晓琰