

小型化高精度光纤陀螺的检测电路串扰自检测

陈和宇¹, 郑月^{2*}, 孔令海¹, 孟照魁¹

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

²北京航空航天大学物理学院, 北京 100191

摘要 在高精度光纤陀螺小型化过程中,检测电路串扰问题越发严重,在复杂应用环境下难以采用基于转台的传统方法测试光纤陀螺串扰在输出中的表现。基于此,提出一种基于施加模拟转速阶梯波的测试方法。该方法使用专用电路生成台阶高度人为可控的阶梯波,利用加法电路将其与闭环阶梯波叠加接入 Y 波导,通过测试陀螺响应,可确定串扰大小。对该方法进行相关实验验证,实验结果表明:该方法能在不依赖于转台的条件下实现光纤陀螺检测电路串扰的自检测,提升了应用系统的设计与测试效率。

关键词 测量; 光纤陀螺; 小型化; 串扰; 死区

中图分类号 V241.5+9

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0104005

Self-Inspection of Detection Circuit Crosstalk of Miniaturized High-Precision Fiber-Optic Gyroscopes

Chen Heyu¹, Zheng Yue^{2*}, Kong Linghai¹, Meng Zhaokui¹

¹School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China;

²School of physics, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The crosstalks in detection circuits in the process of miniaturization for high-precision fiber-optic gyroscopes (FOG) become increasingly serious. In complex application conditions, it is difficult to measure crosstalks in the FOG output using traditional methods based on turntables. In this paper, we propose a method for measuring crosstalks based on simulated rotation rate phase ramp. We implement a specially designed circuit to generate a controllable phase ramp, combine it with a closed-loop phase ramp, and then connect the Y-waveguide using an adding circuit. This method can correctly estimate the crosstalk magnitude by testing gyroscope response. Related experiments are conducted, and experimental results show that the proposed method can realize the self-inspection of crosstalk in FOG detection circuits without turntables and improve the design and test efficiencies for application systems.

Key words measurement; fiber-optic gyroscope; miniaturization; crosstalk; dead band

OCIS codes 120.3688; 060.2370; 060.2800

1 引 言

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的光纤角速度传感器,具有结构简单可靠、无动态部件、精度覆盖范围广等优点^[1],已成为航空、航天、航海、兵器、能源等领域的主流惯性器件^[2]。目前,应用系统对光纤陀螺精度的要求不断提升,同时对光纤陀螺的尺寸、体积和重量提出了严格的限制^[3]。用小

尺寸来实现高精度,这给光纤陀螺设计带来了挑战,也为光纤陀螺相关的光电器件及技术带来了跨越式的发展^[4-5]。随着小型化光学器件(如细径保偏光纤、小尺寸 Y 波导等)的日渐成熟,光纤陀螺的高精度性能在光路小型化后得以保持。目前,限制光纤陀螺兼备小型化与高精度性能的一个主要因素为信号检测电路小型化后的串扰与噪声变得十分显著,检测信噪比受到严重影响。

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-09-12; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 航空科学基金(20170851009)

* E-mail: zhengyue@buaa.edu.cn

光纤陀螺检测电路尺寸不断缩小的过程中会面临许多问题^[6-7],集中表现为干扰增加、“死区”严重、小转速下的检测精度劣化明显。“死区”现象是电路串扰的极端体现^[8],国内外研究机构对此进行了大量的理论研究,并提出多种抑制串扰的方法。方法基本可分为三类:第一类是从电路板出发,通过对电子元器件和布局布线的优化,降低串扰的影响^[7];第二类是采用随机调制的方法^[9-10],用随机态代替确定的调制状态来去除调制模拟电压和解调信号相关性;第三类是加入额外抖动信号^[11-12],人为施加外部激励,强制阶梯波发生变化,破坏“死区”形成条件。

光纤陀螺的“死区”测试在串扰抑制方法研究中必不可少,是实际抑制效果的直接判据,同时也是光纤陀螺及系统特性的判定标准。“死区”测试通常通过转台完成^[13],但基于转台的测试方法会存在一定的局限性和不便捷性。首先,光纤陀螺在温度、振动、磁场等环境下,往往无法利用转台对串扰大小进行便捷评估;其次,光纤陀螺装入应用系统后,受到系统复杂电磁环境的影响,陀螺检测电路的串扰特性会发生改变,而应用系统受限于体积重量等原因,可能无法在转台上进行测试,这大大降低了系统的设计效率;此外,对于贮存期内的应用系统,如果利用转台测试标定陀螺“死区”,需要将陀螺从系统上

拆卸,造成极大的不便捷,无法满足整贮整测免拆卸标定的要求。

本文设计了一种新型的检测电路串扰测试方法,在电路中产生一个等效转速阶梯波信号来代替转台角速度输入,实现光纤陀螺的“死区”测试。用来等效转速信号的阶梯波人为可控,可以便捷地模拟不同的转速输入,实现不同精度的“死区”测试,便于光纤陀螺在各种场合和条件下准确评估检测电路串扰量级。测试结果中的“死区”大小代表检测电路中的串扰大小,与光路因素无关,便于对光纤陀螺中的光路和电路误差因素进行分离。此方法可极大提升检测电路串扰的测试与评估效率,为光纤陀螺及其系统的研发、生产与改进提供了高效的测试方法与评估依据。

2 等效输入转速的产生原理

数字闭环检测是目前国内外光纤陀螺的主流方案^[1]。光纤陀螺闭环工作原理如图 1 所示。其中: $\Delta\phi_s$ 为转速引起的 Sagnac 相位差; $\Delta\phi_m$ 为调制信号产生的相位差; $\Delta\phi_f$ 为闭环反馈相位差,无串扰影响时与待跟踪的 $\Delta\phi_s$ 等值反号; $\Delta\phi_e$ 为闭环误差,闭环工作时近似为 0;串扰大小可近似为与生成的阶梯波幅值成正比,其中 k 为串扰等效比例系数。

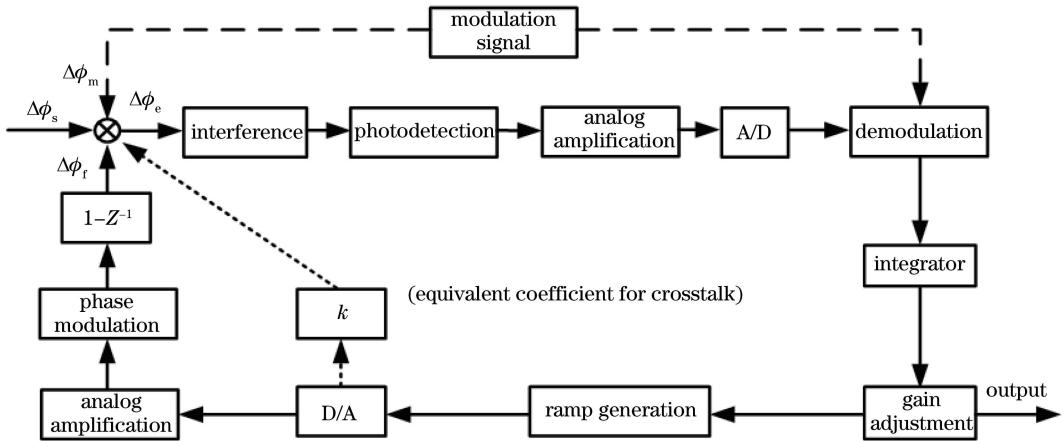


图 1 光纤陀螺闭环工作原理

Fig. 1 Principle of closed-loop operation of fiber optic gyroscope

光纤陀螺系统闭环到零的连续信号微分方程可表示为

$$\tau \frac{d\phi_f}{dt} + \Delta\phi_s + e(\phi_f) = 0, \quad (1)$$

式中: τ 表示光通过整个光纤环的渡越时间; ϕ_f 表示阶梯波产生的调制相位, ϕ_f 的微分部分表示反馈相位差($\Delta\phi_f$),用来补偿 $\Delta\phi_s$,同时也是转速的输出量; $e(\phi_f)$ 表示串扰解调后参与闭环的误差项,由于串扰

解调结果与阶梯波产生的绝对相位近似成线性, $e(\phi_f)$ 可近似表示为 $k\phi_f$ 。因此(1)式变为

$$\tau \frac{d\phi_f}{dt} + \Delta\phi_s + k\phi_f = 0, \quad \phi_f(t=0) = 0. \quad (2)$$

(2)式的解为

$$\phi_f = -\frac{\Delta\phi_s}{k} + \frac{\Delta\phi_s}{k} \exp\left(-\frac{k}{\tau}t\right). \quad (3)$$

对应的输出转速为

$$\tau \frac{d\phi_f}{dt} = -\Delta\phi_s \exp\left(-\frac{k}{\tau}t\right). \quad (4)$$

ϕ_f 的初始值为 0, ϕ_f 等于 -2π 时, 由(3)式可求得对应的时间。因此, ϕ_f 从 0 到 -2π 复位所需的时间为

$$T = -\frac{\tau}{k} \ln\left(\frac{-2\pi}{\Delta\phi_s/k} + 1\right). \quad (5)$$

将(5)式代入对应的输出转速表达式[(4)式], 得到复位时的输出转速为 $-\Delta\phi_s + 2\pi k$ 。从 $t=0$ 到复位时刻, 输出转速从 $-\Delta\phi_s$ 到 $-\Delta\phi_s + 2\pi k$ 变化, 变化的函数为(4)式, 表现为输出转速的周期性振荡, 如图 2(a)所示, 其振荡频率与阶梯波相同, 如图 2(b)所示。在这个复位周期 T 内, 输出转速的平均值约为

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T -\Delta\phi_s \exp\left(-\frac{k}{\tau}t\right) dt &= \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{-2\pi k}{\Delta\phi_s} + 1\right)} \approx \\ &= \frac{2\pi k}{\frac{-2\pi k}{\Delta\phi_s} - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi k}{\Delta\phi_s}\right)^2} = -\frac{\Delta\phi_s^2}{\Delta\phi_s + \pi k}. \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可知, 受到干扰项的影响, 输出平均转速的绝对值将小于 $\Delta\phi_s$, 且串扰造成的附加零偏大小与输入转速有关。当敏感的转速 $\Delta\phi_s < 2\pi k$ 时, 当阶梯波调制相位增长到 $\phi_f = -\Delta\phi_s/k$ 时, 串扰在闭环中的解调结果 $k\phi_f$ 与转速相位差 $\Delta\phi_s$ 之和为零, ϕ_f 停止变化, 输出转速变为零, 如图 2(c)所示, 阶梯波保持电平不变, 如图 2(d)所示。此时光纤陀螺进入“死区”, 表现为不敏感输入的小转速 ($\Delta\phi_s < 2\pi k$)。

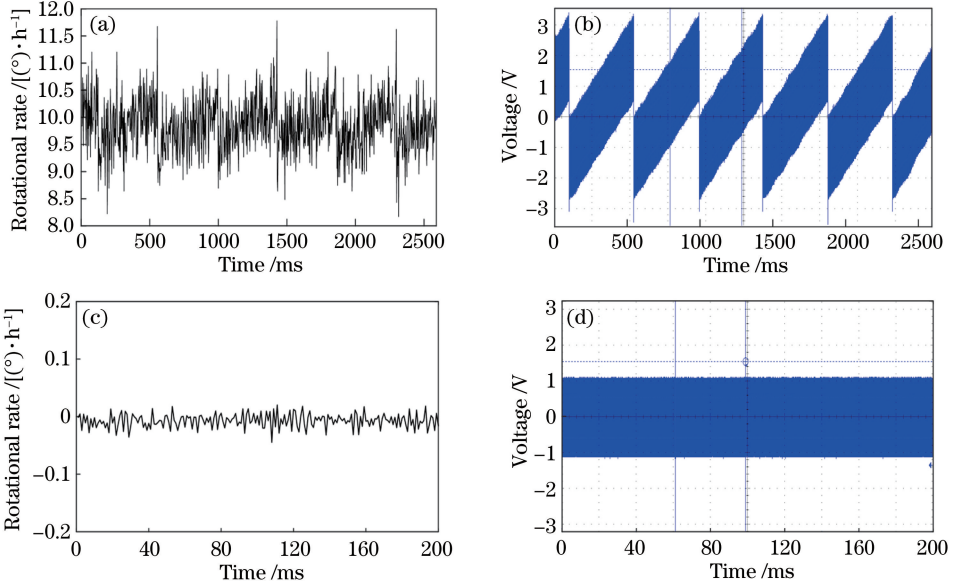


图 2 FOG 输出和叠加了调制信号的阶梯波。(a) $\Delta\phi_s > 2\pi k$ 时的 FOG 输出; (b) $\Delta\phi_s > 2\pi k$ 时的阶梯波(叠加了调制信号); (c) $\Delta\phi_s < 2\pi k$ 时的 FOG 输出; (d) $\Delta\phi_s < 2\pi k$ 时的阶梯波(叠加了调制信号)

Fig. 2 Output of FOG and phase ramp after adding modulation signal. (a) Output of FOG when $\Delta\phi_s > 2\pi k$; (b) phase ramp after adding modulation signal when $\Delta\phi_s > 2\pi k$; (c) output of FOG when $\Delta\phi_s < 2\pi k$; (d) phase ramp after adding modulation signal when $\Delta\phi_s < 2\pi k$

由以上分析可知, 在小转速下, 阶梯波复位时间逐渐增加, 串扰在输出中的表现越发明显, 最终表现为输出为零的“死区”, 因此测试“死区”必须给出足够小的转速输入。在数字闭环光纤陀螺方案中, 转速信号的闭环依靠数字阶梯波来实现, 数字阶梯波的台阶高度与转速值相对应, 因此可以在 Y 波导相位调制器上人为施加不同台阶高度的阶梯波来实现不同大小的转速叠加。设数字阶梯波位数为 N , 阶梯波数字量为 2^N 时(复位时刻)对应的相位差正好为 2π 。反馈阶梯波的最小台阶高度为数模转换器(DA)的 1 个最低有效位(1LSB)对应的相位差 $\Delta\phi_{1LSB} = 2\pi/2^N$ 。根据

Sagnac 效应, 1LSB 和转速的对应关系为

$$\Omega_{1LSB} = \frac{\lambda c}{2\pi LD} \frac{2\pi}{2^N}, \quad (7)$$

式中: D 表示光纤环的直径, L 表示光纤陀螺中光纤环的长度, c 表示真空中的光速, λ 表示平均波长。

但是, 对于高精度陀螺, Ω_{1LSB} 一般为每小时几度量级, 远大于“死区”测试所需的转速量级, 无法满足测量精度要求。借助光纤陀螺中的数字闭环原理, 为实现小于 1LSB 对应的输入转速, 阶梯波台阶高度在一段时间内可设为 0, 在另一段时间内可设为 1LSB。施加转速的大小等于台阶高度的平均值, 可表示为

$$\Omega_{\text{input}} = \frac{m}{n} \Omega_{\text{LSB}}, \quad (8)$$

式中： m 表示 n 个阶梯波台阶中 1LSB 的个数，其余台阶高度为 0。此方法可实现任意大小的等效平均转速输入。以一个典型的高精度光纤陀螺为例，数字阶梯波寄存器的位数为 $N = 15$ ，光纤环直径约 120 mm，光纤长度约 2200 m，平均波长约 1550 nm，则 Ω_{LSB} 约为 11 ($^\circ$)/h。当需要模拟小转速输入，如 0.11 ($^\circ$)/h 时，需要每 100 个 τ 中的阶梯波台阶，有 1 个为 1LSB，其他为 0。

3 串扰模拟测试方案设计

为避免模拟转速测试方法对光纤陀螺的反馈通道(实际产生串扰的源头)产生额外影响，模拟转速用的阶梯波由一块单独的电路板产生，如图 3 所示。产生模拟转速阶梯波的电路时序与光纤陀螺信号检测

时序同步，模拟转速阶梯波代表的转速大小由一段时间内阶梯波台阶中 1LSB 和 0 的个数比值决定，通过改变一段时间内 1LSB 和 0 的比值，可以产生任意变化的等效转速输入。生成模拟转速阶梯波的电路和陀螺信号处理电路对各自阶梯波的后处理电路配置完全一致，以保证两块电路的数字增益和模拟增益均相同，实现模拟转速用阶梯波对 Y 波导半波电压的准确跟踪，这样可提升不同环境下(如温度、长时间等)的测试精度。在实际应用中，电子器件不一致性的影响相比于 Y 波导半波电压的影响可忽略。最终施加到 Y 波导上的信号为调制信号、反馈阶梯波和模拟转速阶梯波三者之和。为将模拟转速阶梯波接入 Y 波导中，需要在 Y 波导之前增加一个加法电路。整体工作方式如图 3 所示，其中 FPGA 为现场可编程逻辑门阵列，SDA 为串行数模转换器，OPA 为运算放大器，cm 为设置输出共模电压的引脚。

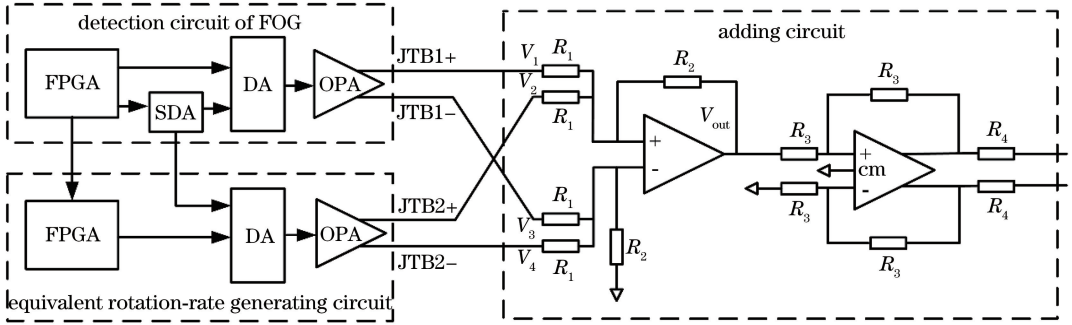


图 3 串扰模拟测试中的电路工作方式

Fig. 3 Circuit operation for crosstalk measurement

加法电路板具体包含两个部分。第一部分为加法器，用于实现光纤陀螺实际闭环产生阶梯波的差分信号(JTB1+, JTB1-)和转速模拟阶梯波的差分信号(JTB2+, JTB2-)的相加。在加法器电路中，有

$$V_{\text{out}} = -\frac{R_2}{R_1}(V_1 + V_2 - V_3 - V_4). \quad (9)$$

因此，加法器输出电压可实现闭环阶梯波与转速模拟阶梯波的相加。第二部分为单端信号到差分信号的转换，并将差分信号作用于 Y 波导的两个电极。实际阶梯波信号如图 4 所示。

为实现光纤陀螺在应用系统内的免拆卸自标定，可将转速模拟阶梯波生成部分和加法电路部分集成到光纤陀螺信号检测电路板中，各部分的地和供电隔离，保证互不影响。模拟转速阶梯波的产生可由外部的标定指令进行控制。

另外，对于惯性测量单元中更为常用的三轴一体化光纤陀螺，由于检测电路中有三路 DA，此模拟测试方案可直接且便捷地移植到三轴一体化信号检

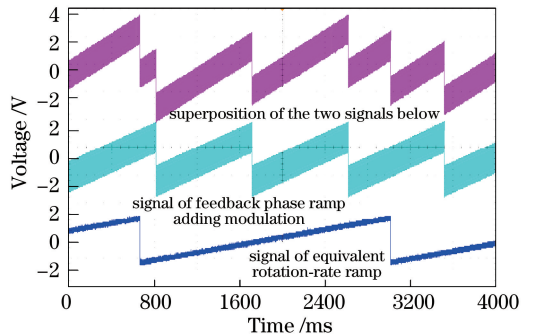


图 4 电路中的实际信号

Fig. 4 Actual signals in circuits

测电路板中，如图 5 所示。

在测量三轴一体信号检测板中某一轴的串扰时，其他任意一个轴的 DA 及驱动部分可充当产生模拟转速的电路部分。将闭环阶梯波与其他轴生成的模拟转速阶梯波叠加，测量得到的串扰结果则代表了电路中的轴间串扰大小。测试采用的模拟转速阶梯波的生成方式与单轴检测电路板相同。

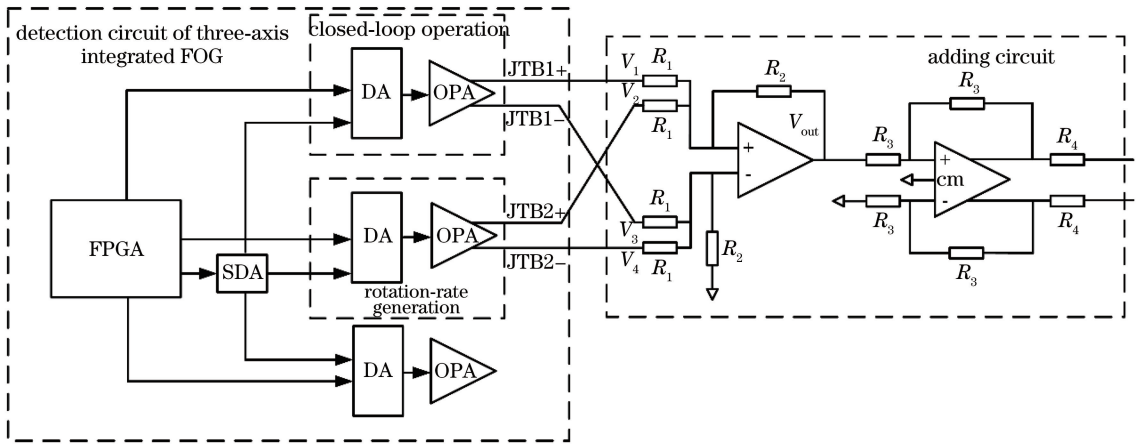


图 5 三轴一体化光纤陀螺信号检测板的串扰模拟测试

Fig. 5 Measurement of simulated crosstalk in electronic circuits of three-axis integrated fiber optic gyroscopes

4 电路串扰测试实验

采用传统的转台对光纤陀螺电路串扰的测试过程如下。陀螺敏感轴朝向水平,位于东(西)向附近,采用一个小转速使转轴缓慢扫过正东(西)方向。实验中选取一只单轴小型化高精度光纤陀螺进行测试。转台以 $0.001 (^{\circ})/s$ 的速率转动,测试结果如图 6(a)所示。测试结果表明该高精度陀螺输出为 0 的时间约为 580 s,对应正东方向 $\pm 0.29^{\circ}$,根据地球转速分量计算式,有

$$\Omega_{\text{deadband}} = \Omega_e \cos \theta \sin \alpha, \quad (10)$$

式中: Ω_e 表示地球转速; θ 表示地区纬度; α 表示光纤陀螺敏感轴向与正东(正西)方向的夹角。实验地点纬度为 39.98° ,可计算出该陀螺的死区范围为 $\pm 0.06 (^{\circ})/h$ 。

为了验证模拟转速方法的效果,需模拟一个线性变化的转速并与以上结果进行对比。模拟转速方法对光纤陀螺的位置和敏感轴朝向没有严格限制,通过设定模拟转速的范围,可将轴向敏感的地球转速分量抵消。测试结果如图 6(b)所示,根据设置的模拟转速变化情况,可得到死区范围约为 $\pm 0.09 (^{\circ})/h$ 。

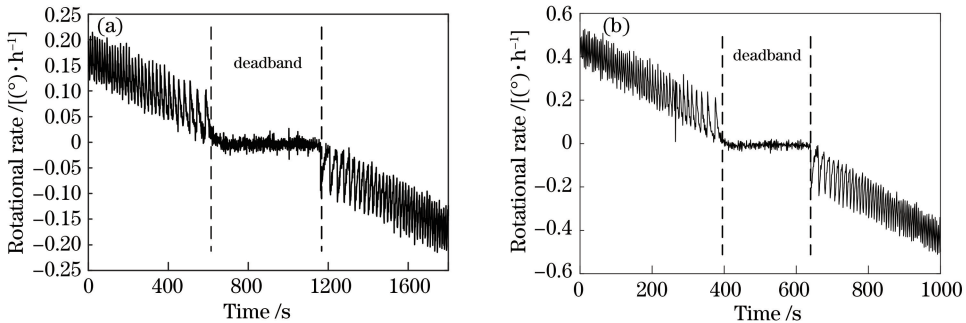


图 6 测试数据。(a)用转台测试;(b)用模拟转速方法测试

Fig. 6 Test data. (a) Test with turntable; (b) test with simulated rotation rate

通过对比测试结果可以看出,模拟测试方法所得数据与实际转台测试数据形状一致,死区的量级相当,因此该方法对于定量分析串扰有重要的参考意义。但是模拟转速测试方法得到的结果仍然存在着一定的误差,这可能是由测试电路和陀螺反馈电路的不一致、陀螺光路的影响等导致。测试方案需要在此基础上进行进一步优化。

5 结 论

提出一种通过施加模拟转速来评估光纤陀螺

电路串扰量级的方法。采用人为产生的阶梯波信号来等效转速输入,再通过加法器与光纤陀螺正常闭环的阶梯波叠加,实现模拟转速测试。通过对常规转台测试方法与模拟转速测试方法得到的实验结果进行对比,证明了本文方法的正确性和可行性。此方法简单便捷,可通过程序设定控制测试参数,适用于各种复杂环境。本文为评估光纤陀螺串扰大小提供了一种新的方法,对小型化高精度光纤陀螺的设计与优化具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. 2nd ed. London: Artech House Publishers, 2014: 23-41.
- [2] Paturel Y, Couderette A. High performance FOG: an industrial feedback from mass production[C] // 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (SISS) Proceedings, March 23-26, 2015, Hapuna Beach, HI, USA. New York: IEEE, 2015: 15112563.
- [3] Wu J W, Miao L J, Xu G, et al. Technology of miniature tri-axis FOG [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 950-953, 984.
吴军伟, 缪玲娟, 许刚, 等. 微小型三轴光纤陀螺技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 950-953, 984.
- [4] Sheng Z Y, Zhou K J, Ye W. The miniaturization techniques of fiber optic gyro (FOG) [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(1): 53-55.
盛钟延, 周柯江, 叶炜. 光纤陀螺(FOG)小型化技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(1): 53-55.
- [5] Feng L S, Xu X B, Zhang C X. Miniaturization optical techniques of fiber optical gyro[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(4): 49-52.
冯丽爽, 徐小斌, 张春熹. 光纤陀螺光路小型化技术[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 49-52.
- [6] Kurbatov A M, Kurbatov R A. Methods of improving the accuracy of fiber-optic gyros [J]. Gyroscopy and Navigation, 2012, 3(2): 132-143.
- [7] Honthaas J, Buret T, Paturel Y, et al. High performance FOG: one design, no limit yet! [C] // Optical Fiber Sensors, October 23-27, 2006, Cancún, Mexico. Washington, D. C.: OSA, 2006: ME3.
- [8] Wang W, Fu T G. Analysis on dead-band mechanism of digital closed-loop FOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 105-107.
王巍, 付铁刚. 数字闭环光纤陀螺死区机理分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 105-107.
- [9] Jin J, Li M, Song N F, et al. Random modulation for fiber optic gyroscope based on four-states Markov chain [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 769-772.
金靖, 李敏, 宋凝芳, 等. 基于4态马尔可夫链的光纤陀螺随机调制[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 769-772.
- [10] Zhang X, Pan X, Zhang C X. Theory analysis and experiment of random modulation in FOG [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 195-198.
张晞, 潘雄, 张春熹. 光纤陀螺随机调制的理论分析及实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 195-198.
- [11] Song N F, Wang X X, Wu Z J. Method for eliminating the deadband of FOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(4): 53-55, 66.
宋凝芳, 王夏霄, 邬战军. 消除光纤陀螺死区的方法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 53-55, 66.
- [12] Yu T, Qing L, Wu Y J. FOG deadband reason analysis and error compensation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(3): 363-365.
余涛, 卿立, 吴衍记. 光纤陀螺死区的原因分析及误差补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(3): 363-365.
- [13] Chen C J. Interferometric fiber optic gyroscope dead band suppression [J]. Applied Physics Express, 2008, 1(7): 072501.