

光纤陀螺标度因数的自标定方法

张 思, 吴 磊, 薛 冰

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:基于数字闭环光纤陀螺的阶梯波调制原理, 该文提出了一种光纤陀螺标度因数的自标定方法, 旨在提高光纤陀螺的标定效率。在陀螺的数字信号处理部分即现场可编程门阵列(FPGA)上加入等幅度递增的数字阶梯波信号, 通过Y波导改变两光之间的相位差, 用这种方法模拟转台角速度的输入, 静基座条件下即可拟合标度因数及计算其非线性误差。通过实验验证了光纤陀螺的自标定方法的可行性, 并对其适用范围进行研究。

关键词:阶梯波调制; 自标定; 分立式标定; 闭环工作; 光纤陀螺

中图分类号: TN911.3; U666.12+3 **文献标识码:** A

Self-calibration Method for FOG Scale Factor

ZHANG Si, WU Lei, XUE Bing

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the principle of ladder wave modulation of digital FOG, a self-calibration method of scale factor aimed at improving the efficiency of fiber optic gyro calibration was proposed. The equal amplitude increased digital ladder wave signal was added into the digital signal processing section of gyro FPGA. The difference of phase between the two light was changed by Y waveguide. Then the angular velocity of the input of turntable was simulated to fit the scale factor and calculate the nonlinearity error under the static conditions. Test result verified the feasibility of the self-calibration of fiber optic gyro and its application scope was also studied.

Key words: ladder wave modulation; self calibration; discrete calibration; closed-loop operation; fiber optic gyro

0 引言

现阶段光纤陀螺标度因数的标定主要是通过转台速率实验完成, 此标定方法原理简单, 在实验室易实现。该方法通过分析惯性组件的误差方程, 建立其输入与输出的关系, 通过分析, 设计合理的标定路径以激励出误差方程中的各项参数^[1-2]。在惯导系统的实际工作过程中, 将标定所得结果进行补偿以提高系统的导航精度。目前实验中存在的问题有:

- 1) 转台输入角速率太小, 会使陀螺处于非线性区, 标定出来的标度因数精度不高。
- 2) 转台输入角速率太大, 增加了对转台的难度要求。
- 3) 采样点太密, 则时间成本高。
- 4) 采样点太疏, 则测量误差风险增大。
- 5) 这种标定方法基于转台, 必须在实验室中进行, 在实际应用中不能有效提高工作效率。

因此, 本文提出一种新的方法以提高光纤陀螺的标定效率。

1 数字闭环光纤陀螺的阶梯波调制原理

数字闭环光纤陀螺的光路部分包括光源、探测器、光纤环、光纤耦合器、Y波导及光电转换器等其他光学元件。电路部分包括时序控制电路、前置放大器、A/D转换器、D/A转换器和以现场可编程门阵列(FPGA)为核心的数字信号处理电路^[3-5]。

当光纤环敏感到角速度时, 光纤环路中传输方向不同的两束光将产生正比于旋转速率 Ω 的Sagnac相位差 Φ_s ^[6]为

$$\Phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

式中: λ 为光的波长; c 为光速; L 为光纤长度; D 为光纤环直径。

阶梯波加在Y波导的相位调制器上, 引起的两束光之间的相位差为

$$\Phi_j = \Phi_m(t) - \Phi_m(t-\tau) \quad (2)$$

式中: $\Phi_m(t)$ 为阶梯波调制造成顺时针传输的光产

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 黑龙江省青年科学基金资助项目(QC2013C069)

作者简介: 张思(1992-), 女, 湖北襄阳人, 硕士生, 主要从事导航制导与控制的研究。吴磊(1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 主要从事捷联式惯导系统、基于惯性技术的结构体监测、惯性设备可靠性评估技术及工程研制工作。

生的附加相移; $\Phi_m(t-\tau)$ 为阶梯波调制造成逆时针传输的光所产生的附加相移。

偏置信号是用方波,该方波信号的周期为 2τ ,方波调制信号作为偏置信号,在正负半周产生的相移为 $\Phi_f = \pm \pi/2$ 。则阶梯波和方波,在 Sagnac 干涉仪中产生的非互易相移^[7]为

$$\Delta\Phi = \Phi_s + \Phi_j + \Phi_f \quad (3)$$

式中: Φ_s 为 Sagnac 相移; Φ_j 为阶梯波的附加相移; Φ_f 为方波的附加相移。

这时 Sagnac 干涉仪的输出信号为

$$I = A \cdot [1 + \cos(\Phi_s + \Phi_j + \Phi_f)] \quad (4)$$

式中: A 为干涉信号幅度系数。

在方波的正半周,Sagnac 干涉仪的输出信号为

$$I = A \cdot [1 - \sin(\Phi_s + \Phi_j)] \quad (5)$$

在方波的负半周,Sagnac 干涉仪的输出信号为

$$I = A \cdot [1 + \sin(\Phi_s + \Phi_j)] \quad (6)$$

将方波正半周和负半周输出的信号相减,可得正负半周输出信号差值

$$\Delta I = -2A \sin(\Phi_s + \Phi_j) \quad (7)$$

由式(7)可看出,若要保证 Sagnac 干涉仪工作在零相位附近,即保持 $\Delta I \approx 0$,则要保证 $\Phi_s + \Phi_j \approx 0$,当 $\Delta I \neq 0$ 时,便可用 ΔI 作为反馈量控制阶梯波高度,使 $\Phi_s + \Phi_j \approx 0$ 。因此,在数字闭环光纤陀螺系统中,阶梯高度就是陀螺输出的角速率信号^[8]。

2 标度因数的自标定原理

光纤陀螺标度因数自标定是一种在标定方法上改进的标定方案,旨在提高光纤陀螺的标定效率。其原理图如图 1 所示。当在 FPGA 上编写 VHDL 程序加入阶梯波后,光纤环中便会产生非互易相移,陀螺静态时,用这种方法模拟陀螺角速度输入。

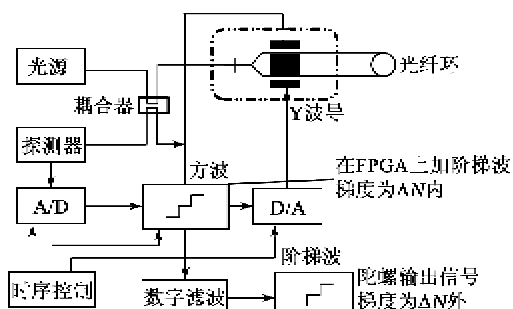


图1 光纤陀螺标度因数的自标定原理

在闭环电路的数字信号处理部分加入可控的递增阶梯波,通过 Y 波导改变光纤环中两束光之间的相位差^[9],用这种方法模拟转台角速率输入,静基座

条件下即可拟合标度因数及计算非线性误差。在电路中加入的阶梯波,其阶梯波的台阶高度对应相应的角速率信号。根据数字闭环光纤陀螺中反馈阶梯波和 Sagnac 相移的关系,阶梯波梯度对应陀螺输出的角速率信号。同理,在数字信号处理部分加入递增阶梯波也可模拟相应的输入角速率。只要找到加入的数字阶梯波信号和对应拟合的输入角速度间的关系,即找到了输入与输出间的对应关系,便能求出陀螺的标度因数。利用这种方法可任意控制采样速率点密度,既节省了时间,又提高了测量效率^[10-11]。

3 数字阶梯波信号与拟定输入角速率对应关系实验

为实现用自标定方法计算出标度因数,首先需找到 FPGA 上所加数字阶梯波信号台阶高度的数字量与其所模拟的陀螺输入量间的对应关系。通过现有方法可看出,输入角速率在 $20 (^{\circ})/s$ 左右时的标度因数线性度好,且标定精度高。因此,以 $20 (^{\circ})/s$ 的转速为基准分别以 $0.01 (^{\circ})/s$ 、 $0.1 (^{\circ})/s$ 、 $1 (^{\circ})/s$ 为步长设计实验。现通过转台速率试验,分别测量 $20 (^{\circ})/s$ 、 $20.01 (^{\circ})/s$ 、 $20.1 (^{\circ})/s$ 、 $21 (^{\circ})/s$ 这几种角速率输入情况下,陀螺输出数字量间的差,即:

在转台以 $20 (^{\circ})/s$ 转动时,测出陀螺输出数字量 $N_{外20 (^{\circ})/s}$,此时认为 $N_{外20 (^{\circ})/s} = N_{内20 (^{\circ})/s}$ 。转台以 $20.01 (^{\circ})/s$ 转动时,测出陀螺输出数字量 $N_{外20.01 (^{\circ})/s}$,此时认为 $N_{外20.01 (^{\circ})/s} = N_{内20.01 (^{\circ})/s}$ 。则有

$$\Delta N_{内0.01 (^{\circ})/s} = N_{内20.01 (^{\circ})/s} - N_{内20 (^{\circ})/s} = N_{外20.01 (^{\circ})/s} - N_{外20 (^{\circ})/s} \quad (8)$$

同理以 $20.1 (^{\circ})/s$ 、 $21 (^{\circ})/s$ 的角速率转动时可得

$$\Delta N_{内0.1 (^{\circ})/s} = N_{内20.1 (^{\circ})/s} - N_{内20 (^{\circ})/s} = N_{外20.1 (^{\circ})/s} - N_{外20 (^{\circ})/s} \quad (9)$$

$$\Delta N_{内1 (^{\circ})/s} = N_{内21 (^{\circ})/s} - N_{内20 (^{\circ})/s} = N_{外21 (^{\circ})/s} - N_{外20 (^{\circ})/s} \quad (10)$$

计算 $20 (^{\circ})/s$ 、 $20.01 (^{\circ})/s$ 、 $20.1 (^{\circ})/s$ 、 $21 (^{\circ})/s$ 的标度因数,并用原实验室法计算陀螺的标度因数及非线性度等。并将所得结果对比分析得出结论。

4 实验结果分析

实验以陀螺 x 轴为例进行分析。图 2 为用实验室方法标定结果,标度因数 K 为 $-823.186\ 333$ 。图 3 为加入阶梯波后陀螺输出。

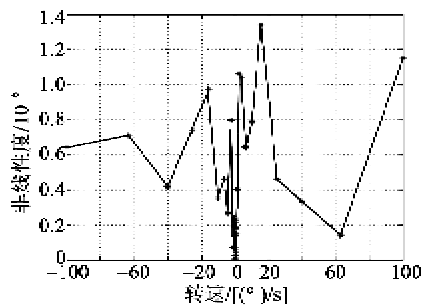


图2 x轴非线性偏差曲线

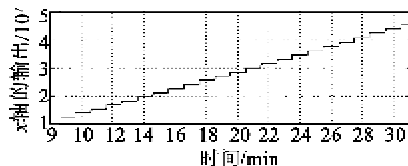
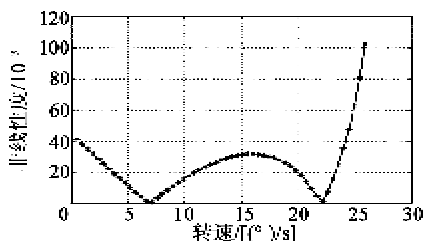


图3 加入数字阶梯波后x轴输出

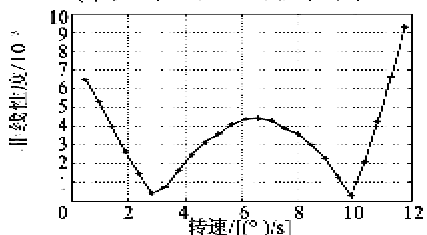
由图3可看出,输出数据呈阶梯状,所以认为该数据能反映输出与输入之间的线性关系。截取每段台阶中间部分的数据求均值,使每一个拟合的输入角速率点 ω_i 都有对应的输出 N_i 。再用最小二乘法将陀螺的输入、输出拟合一条直线,算出 K 。截取部分实验数据,分别计算了取不同速率点个数时的 K 值,计算结果如表1所示,其非线性偏差曲线如图4所示。

表1 实验结果

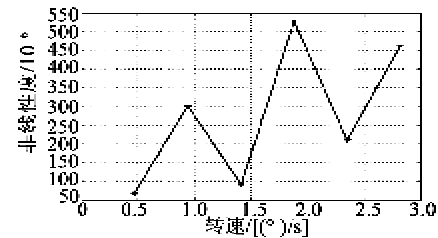
取速率点个数	$K(x轴)$
55	1 021.565 972
45	933.074 765
35	885.694 428
25	856.618 706
15	838.598 396
10	832.254 999
6	829.095 731



(a) 取55个速率点时的非线性度偏差曲线



(b) 取25个速率点时的非线性度偏差曲线



(c) 取6个速率点时的非线性度偏差曲线

图4 非线性偏差曲线

由以上取不同速率点个数(55、25、6个速率点)的标度因数与非线性偏差曲线的对比可看出,所取速率点个数越少,标定出的标度因数越接近真实值,且相应的非线性度也会越小。所以认为这种方法只在小范围内适用。

5 误差分析

未加阶梯波的情况下,陀螺始终稳定的工作在闭环状态下,即使外界转速加到 $100(^{\circ})/s$,陀螺仍能稳定工作。因为光纤环中的Sagnac相移与反馈阶梯波产生的相移能够抵消,使Sagnac干涉仪始终工作在零点附近。进而使后续的光电转换器、前置放大器及A/D转换器中的工作信号都是小信号。

在FPGA中加数字阶梯波的自标定方法只适用于小速率范围内,因为静基座条件下Sagnac相移是一个恒定值,附加的阶梯波信号只是通过Y波导改变相位。导致整个电路不工作在零点附近。当阶梯波信号逐渐增高后,经前置放大器的信号是一个大信号,阶梯波的高度累加到一定值时晶体管会处于饱和截止的状态,此时运放工作在非线性区,使整个系统工作在不稳定的状态,从而会使输出结果产生误差。

6 结束语

本文提出了在FPGA上加入阶梯波信号的自标定方法,通过设计实验,并对采样的数据进行分析,取不同采样点个数分别计算此时的标度因数及标度因数非线性度。结果表明,所取速率点个数越少,标定结果越接近分立式标定的结果。说明自标定方法只适应于小速率范围。

参考文献:

- [1] 曹通. 光纤陀螺捷联惯导系统在线对准及标定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 高伟, 林星辰, 王秋莹, 等. CCD星敏感器辅助光纤陀螺在线标定技术[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(8): 1680-1684.

(下转第843页)