

高辉, 马家君, 徐榆鑫, 等. 基于 FPGA 的光纤陀螺本征频率自动测量[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 126-129. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240516

基于 FPGA 的光纤陀螺本征频率自动测量

高辉, 马家君, 徐榆鑫, 白仕才, 徐文正, 孟 鋈

(贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 为实现光纤陀螺本征频率的高精度自动测量, 本文基于 FPGA 提出了一种本征频率自动测量算法。理论研究了方波调制信号与光强信号之间的关系, 获得了光纤陀螺本征频率测量误差信号, 根据自动控制原理, 通过闭环测量系统将本征频率测量误差信号积分进而实时跟踪光纤陀螺本征频率, 当测量误差信号为 0, 方波调制频率即为光纤陀螺本征频率。实验结果表明, 该算法可以实现光纤陀螺本征频率的高精度自动测量。与其他算法相比, 本文提出的算法测量精度达到 1 Hz, 具有高精度、速度快、易实现等优点。

关键词: 光纤光学; 光纤陀螺; 频率跟踪; 本征频率

中图分类号: TN248

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)05-0126-04

Automatic measurement of fiber optic gyroscope frequency based on FPGA

GAO Hui, MA Jiajun, XU Yuxin, BAI Shicai, XU Wenzheng, MENG Jun

(College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to realize the high-precision automatic measurement of the eigen frequency of fiber optic gyroscope, this paper proposes the measurement method of eigen frequency based on FPGA. The relationship between the square wave modulation signal and the light intensity signal is theoretically studied, and the measurement error signal of the eigen frequency of the fiber optic gyroscope is obtained. According to the principle of automatic control, the eigen frequency measurement error signal is integrated by the closed-loop measurement system to track the eigen frequency of the fiber optic gyroscope in real time. When the measurement error signal is zero, the square wave modulation frequency is the eigen frequency of the fiber optic gyroscope. The experimental results show that this method can realize the high-precision automatic measurement of the eigen frequency of the fiber optic gyroscope. Compared with other methods, the measurement accuracy of the method proposed in this paper reaches 1 Hz, which has the advantages of high-precision, fast speed and easy to implement.

Key words: fiber optics; fiber optic gyroscope; frequency tracking; eigen frequency

0 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的角速率传感器, 具有体积小、全固态结构、可靠性高等优点^[1-4]。光纤陀螺一般采用数字闭环结构, 数字闭环光纤陀螺通常需要用与本征频率同频的方波偏置调制信号进行调制, 方波偏置调制信号的频率偏离本征频率会降低光纤陀螺的精度^[5-9]。因此有必要研究光纤陀螺高精度的本征频率的跟踪算法。

目前的本征频率测量算法分为 3 类, 分别是方波

调制的测量算法、锯齿波调制的测量算法和正弦波调制的测量算法。宋凝芳等学者^[10]采用了不对称方波的调制方法, 将本征频率的测试转化为极值搜索问题, 其测量精度达到了 0.1 kHz。周友伟等学者^[11]提出了基于对称方波调制算法, 该方法通过测量输出光强占空比时, 使用了等间距连续采样多周期法确定方波占空比降低了测量成本, 研究测量精度达到了 0.01 kHz。王曦等学者^[12]采用频率为本征频率 2 倍的方波进行测量, 该方法可以直接通过示波器观测光电探测器的输出来确定本征频率, 其测量精度达到

基金项目: 国家自然科学基金(62163006, 61605153); 贵州省科技厅自然科学基金基础研究计划(黔科合 LH 字[2017]7224 号); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]107)。

作者简介: 高辉(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 光纤陀螺研究。

通讯作者: 马家君(1988-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 激光陀螺, 光纤陀螺研究。Email: jjma3@gzu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-03

0.05 kHz。以上有关光纤陀螺本征频率测量的方法均基于方波调制实现。相对于方波调制,陈宇中等学者^[13]提出的正弦波调制法,是把方波改为正弦波,通过测量输出光强的二次谐波来确定本征频率,其测量精度达到了2 Hz。王翔等学者^[14]设计的锯齿波测量法,是把方波形改为锯齿波,根据误差信号的大小判断锯齿波调制信号偏离本征频率的程度,其测量精度达到1Hz。代琪等学者^[15]设计的锯齿波和方波分时复用调制本征频率的方法,实现了本征频率在线跟踪,跟踪精度达到了3 Hz。国外有通过基于偶数倍本征频率的正弦波本征频率测量法,其解调过程类似于锯齿波调制^[16]。然而,以上基于方波的测量方法大多采用信号发生器使得测量本征频率的过程较为繁琐,其测量精度也较低,基于锯齿波和正弦波的测量方法虽然可以在FPGA中实现,但是相较于方波而言,其在FPGA实现要更为复杂。

为此,本文研究了输出光强误差、本征频率、调制方波频率三者之间的关系,提出了一种基于FPGA的本征频率自动测量算法,通过对相位调制器施加方波信号,将输出的光强信号解调进而得到误差信号,根据误差信号实时调整方波信号的频率,以实现光纤陀螺本征频率的实时跟踪。最后结果表明,通过该算法实现了光纤陀螺本征频率高精度的自动测量。

1 本征频率测量理论分析

光纤陀螺主要由宽谱光源、耦合器、Y波导、光纤环和控制电路组成,光在光纤环中传播的时间 τ_e 为渡越时间,则光纤陀螺本征频率为:

$$f_e = \frac{1}{2\tau_e} = \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

其中, n 表示光纤的折射率, L 表示光纤长度。方波调制相位信号 $\varphi_m(t)$ 为:

$$\varphi_m(t) = \begin{cases} \varphi_m, & kT \leq t \leq kT + \tau/2 \\ 0, & kT + \tau/2 \leq t \leq kT + 2\tau \end{cases} \quad (2)$$

其中, k 表示整数; $T = 2\tau$ 表示调制周期; φ_m 表示调制深度。当调制频率小于本征频率时,正反两束光的相位差 $\Delta\varphi_m(t)$ 为:

$$\Delta\varphi_m(t) = \begin{cases} \varphi_m, & kT \leq t \leq kT + \tau/2 \\ 0, & kT + \tau/2 < t \leq kT + \tau_e \\ -\varphi_m, & kT + \tau_e < t \leq kT + \tau_e + \tau/2 \\ 0, & kT + \tau_e + \tau/2 < t < kT + 2\tau \end{cases} \quad (3)$$

研究得到的光相位差波形如图1所示。

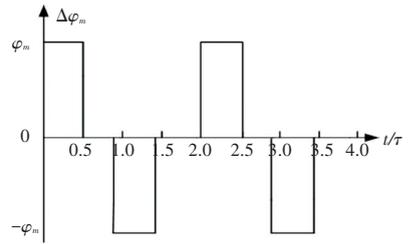


图1 光相位差图

Fig. 1 Diagram of optical phase difference

光波相干后探测器的接收到的光强信号 I 为:

$$I = I_0 [1 + \cos(\varphi_s + \Delta\varphi_m)] \quad (4)$$

其中, I_0 表示入射光强, φ_s 表示由旋转引起的相位差。当陀螺静止时, $\varphi_s \rightarrow 0$,输出光强信号为:

$$I = \begin{cases} I_0 \cos(\varphi_m), & kT \leq t \leq kT + \tau/2 \\ I_0, & kT + \tau/2 < t \leq kT + \tau_e \\ I_0 \cos(\varphi_m), & kT + \tau_e < t \leq kT + \tau_e + \tau/2 \\ I_0, & kT + \tau_e + \tau/2 < t < kT + 2\tau \end{cases} \quad (5)$$

由此得到的施加了相位差的输出光强波形如图2所示。

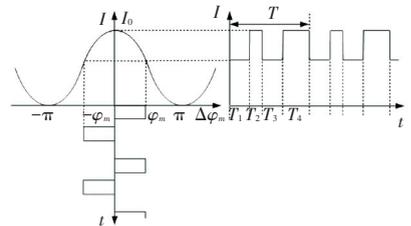


图2 施加了相位差的输出光强图

Fig. 2 Diagram of light intensity with phase difference

将一个周期 T 内光强的时间分别记为 T_1, T_2, T_3, T_4 ,只有光强为 I_0 的2段光强的时间不同,即 T_2 和 T_4 不同,则 T_2 和 T_4 之差 $Error$ 为:

$$Error = T_4 - T_2 = 2(\tau - \tau_e) = \frac{f_e - f}{f \times f_e} \quad (6)$$

因此,当调制频率小于本征频率时,在一个调制周期 T 内,输出光强为 I_0 的2段输出光强宽度 T_2 和 T_4 不同,则误差 $Error$ 不为零。同理,在调制频率大于本征频率时,在一个调制周期 T 内,输出光强为 I_0 的2段输出光强的宽度 T_2 和 T_4 不同,误差 $Error$ 也不为0。当调制频率等于本征频率时候,在一个调制周期 T 内,输出光强为 I_0 的2段输出光强宽度 T_2 和 T_4 相等,相减为0,则误差 $Error$ 为0。因此可以在一个调制周期 T 内,通过测量输出光强为 I_0 的宽度 T_2 和 T_4 是否相等来确定本征频率是否等于调制频率。

2 实验与结果分析

2.1 本征频率测量的算法实现

通过硬件开发工具 ISE, 使用 Verilog HDL 在 FPGA 中实现了本征频率测量算法。FPGA 顶层设计包括 5 个模块: 时钟模块、调制模块、温度模块、D/A 模块、串口发送模块。其中, 时钟模块生成各个模块需要的时钟, 温度模块实时检测陀螺的温度。仍需指出的是, 方波调制在调制模块中实现。在调制模块中, 通过设定小数分频系数来增加调制频率间隔达到 0.01 Hz, 进而提高本征频率的测量精度。方波幅度通过状态机 *state* 生成, 并对 4 个状态 (*state1*, *state2*, *state3*, *state4*) 进行设置, 除了 *state1* 的幅度为 φ_m 外, 其余状态的幅度均为 0, 依次输出各状态的幅度生成调制信号。将方波信号发送给 D/A 模块转换为调制电压, 然后施加给 Y 波导对光进行相位调制, 并对得到的光强信号进行误差解算, 设置计数器 *cont*, 当检测到光强边沿时进行计数, 将计数器值作为当前光强段的宽度, 经过一个调制周期后, 得到误差 *Error*。根据误差 *Error* 的大小调整调制频率的大小, 误差为 0 时调制频率为本征频率。将程序代码下载到陀螺仪中的 FPGA 进行实验, 通过串口将 FPGA 内的调制信号和误差信号同时传入计算机。各模块的 RTL 图如图 3 所示。

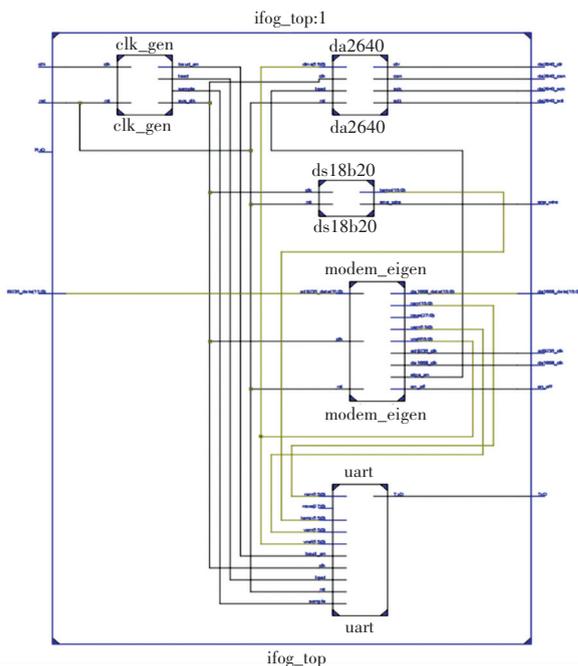


图3 各模块 RTL 图

Fig. 3 RTL view of the modules

光纤陀螺本征频率自动跟踪过程中, 其调制解调可以等效为比例环节, 根据自动控制原理, 本征频

率闭环控制系统框图如图 4 所示。

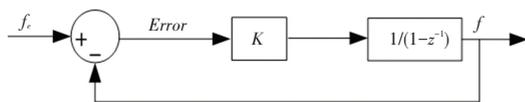


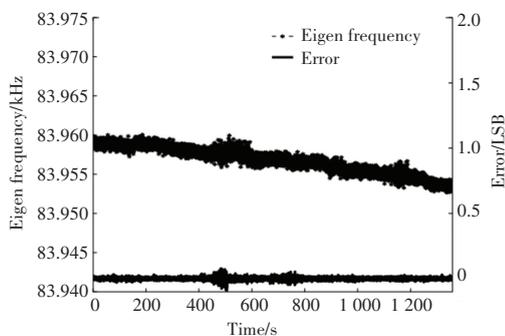
图4 闭环测量传递函数框图

Fig. 4 Block diagram of closed-loop measurement transfer function

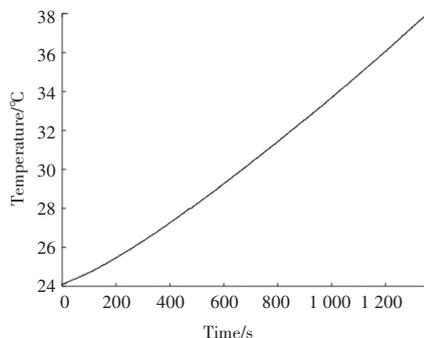
在图 4 中, 本征频率 f_e 为被控对象, 将输出调制频率 f 相减后得到本征频率控制误差 *Error*, K 为增益系数, 将误差积分后获得调制频率 f 。

2.2 实验结果及分析

实验中对型号为 FOG-98 型光纤陀螺进行本征频率测试, 其光源为超辐射发光二极管, 发出的光波长 λ 为 1 310 nm, 光纤长度为 1 275 m, 光纤直径为 85 μm 。实验过程使用的其他硬件设备包括温箱、APS3005S-3D 电源。根据式 (1) 将调制信号频率初始值设置为 84 kHz。将光纤陀螺放置在温箱中, 并设置温箱温度线性升高。通过本算法获得的测试结果如图 5 所示。



(a) 测试结果 1



(b) 测试结果 2

图5 本征频率测试结果

Fig. 5 Results of eigen frequency testing

图 5 中, 图 5(a) 为本征频率测量结果, 图 5(b) 为温度随时间线性增加的曲线。由图 5(a) 可以看出, 本征频率在最开始就实现了追踪锁定, 由于光纤陀螺受到温度的影响导致误差在 0 上下波动。由图

5(b)可以看出,温度随时间增加,对应在图5(a)中,本征频率则随温度逐渐下降。

在常温下对陀螺的本征频率进行多次测量,每次测量5 min,本征频率的实验结果见表1。对陀螺进行了6次测量,6次的平均值为83.96 kHz,6次测量的方差为 0.012 Hz^2 ,可以看到测量结果小数点后三位保持不变,因此本文提出的测量算法精度达到了1 Hz。将本文提出的本征频率测量算法精度与其他方法测量精度对比,实验结果见表2。由表2分析可知,本文提出的算法使方波测量的精度达到较高的数量级。

表1 本征频率多次测量结果

Table 1 Multiple measurement results of eigen frequency

Test	result /kHz
1	83.958 079 5
2	83.958 003 2
3	83.958 148 1
4	83.958 132 9
5	83.958 270 2
6	83.958 293 1
Average	83.958 154 5
Variance	0.012 000 0

表2 不同本征频率测量方法对比

Table 2 Accuracy comparison among different eigen frequency measuring methods

测量方法	Accuracy
不对称方波测量法 ^[10]	100
对称方波测量法 ^[11]	10
两倍本征频率测量法 ^[12]	50
正弦波测量法 ^[13]	2
锯齿波测量法 ^[14]	1
本文提出的方法	1

3 结束语

针对目前本征频率测量方法精度较低和实现方法较为复杂的问题,本文研究了输出光强误差、本征频率和调制方波频率之间的关系,提出了一种基于FPGA的本征频率自动测量算法。通过对相位调制器施加方波信号,将输出的光强信号在FPGA中解调进而得到误差信号,根据误差信号实时调整方波

频率,以实现闭环测量。当误差信号为0,方波频率即为本征频率。实验结果表明,通过FPGA、该算法在FOG-98型号的光纤陀螺实现了光纤陀螺的本征频率高精度自动测量,且本征频率测量精度达到了1 Hz,实现了光纤陀螺本征频率快速且高精度测量。

参考文献

- [1] LEFEVRE H. The fiber-optic gyroscope [M]. 3rd ed. Norwood, USA: Artech House, 2022.
- [2] 王媛,马家君,李冬伟,等. 基于Simulink的数字闭环光纤陀螺频率响应特性研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(9): 1-5.
- [3] LEFEVRE H. The fiber optic gyro "adventure" at Photonics iXsea and now iXblue[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2020, 11405:10-29.
- [4] KORKISHKO Y N, FEDOROV V A, PRILUTSKIY V E, et al. Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000[C]//2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). Karlsruhe, Germany: dblp, 2017: 1-23.
- [5] 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.
- [6] PAN Xiong, WANG Lei, ZHANG Shaobo, et al. Effect of digital-to-analog converter glitch on the modulation and demodulation of a digital closed-loop fiber-optic gyroscope [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 19(47): 43-50.
- [7] LEFEVRE H. The fiber-optic gyroscope [M]. London: Artech House, 1993.
- [8] TIAN Haiting, ZHANG Chunxi, JIN Jing, et al. Effect of modulation frequency jitter on coherent detection and its elimination algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(4): 604-610.
- [9] LEFEVRE H C. Comments about fiber-optic gyroscopes [C]// Proceedings of SPIE. Los Angeles, USA: The International Society for Optical Engineering, 1988, 838: 86-97.
- [10] 宋凝芳,吕峰建,赵慧,等. 基于不对称方波调制的光纤陀螺本征频率测试方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(4): 494-496.
- [11] 周友伟,刘铁根,李茂春,等. 基于对称方波调制的光纤陀螺本征频率自动测试方法[J]. 激光与红外, 2008, 38(7): 676-679.
- [12] 王曦,高延滨,霍亮,等. 基于两倍本征频率调制的光纤陀螺本征频率测量方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(4): 477-481.
- [13] 陈宇中,宋章启,张学亮. 正弦波调制的光纤环本征频率测量方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6): 193-196.
- [14] 王翔,王夏霄,于佳,等. 基于锯齿波调制的光纤陀螺本征频率跟踪测量[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 153-158.
- [15] 代琪,宋凝芳,王夏霄,等. 光纤陀螺本征频率高精度在线自动跟踪技术研究[J]. 激光杂志, 2019, 40(4): 31-35.
- [16] STANDJORD L K, DOHENY D A. Eigen frequency detector for Sagnac interferometers: USA, US7038783 [P]. 2006-05-02.