

基于对称方波调制的光纤陀螺本征频率自动测试方法

周友伟, 刘铁根, 李茂春, 侯丽丽, 姚晓天

(天津大学精仪学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:从光纤陀螺的调制原理出发, 采用频率为光纤环本征频率的 $1/2$ 的对称方波对 Y 波导进行调制, 分析光纤陀螺的输出信号, 得到输出的方波信号的占空比与调制频率的对应关系, 通过数据采集卡将占空比转化为方波上下峰值点数差的问题, 并以此点数差作为反馈量调节对 Y 波导的调制频率实现对本征频率的自动锁定。该方法已在工程实践中得到应用, 试验结果表明该测试方法可在几秒中之内完成而且测试精度可达 0.01kHz 。与已有的测量方法相比, 基于对称方波调制的测试方法具有更高的精度、高速、数字化和易于实现自动测量。

关键词: 光纤陀螺; 本征频率; 对称方波调制; 占空比

中图分类号: TM935.1

文献标识码: A

Auto-test Method for FOG Eigenfrequency Based on Symmetric Square Wave Modulation

ZHOU You-wei, LIU Tie-gen, LI Mao-chun, HOU Li-li, YAO Xiao-tian

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A new approach was presented to solve the problem of fiber optic gyro (FOG) eigenfrequency auto measuring. Based on the modulation-demodulation theory, the paper adopted symmetric square-wave to modulate Y-waveguide and analyze the demodulated signal. Then the relationship between the modulation frequency and duty cycle of demodulated signal is got. To the duty cycle as a feedback to adjust modulation frequency, when the duty cycle is 50% the modulation frequency is half of eigenfrequency. And this method is applied in our test system, which shows that accuracy is about 0.01kHz , and auto-test can finished in several seconds. Compared with existing methods this auto-test method is more accurate, rapid and easy to implement automatic digital measurement.

Key words: FOG; eigenfrequency; symmetric square-wave modulation; duty cycle

1 前言

现在国内外研制并已获得应用的干涉式光纤陀螺仪, 其实质就是一个环形萨格奈克 (Sagnac) 干涉仪。它利用固态的全光纤结构实现载体自转角速度的测量, 具有结构简单、寿命长、启动快、无加速度漂移、体积小、成本低、耐冲击等优点, 广泛应用于航海、航空、导航等领域。

光波在光纤陀螺敏感线圈中传播时间的倒数的 $1/2$ 称为本征频率。在光纤陀螺调制电路中采用固定的本征频率, 当调制频率偏移本征频率时会引入调制误差并影响陀螺的零偏, 所以精确测量光纤陀

螺的本征频率对制作高精度光纤陀螺具有重要意义^[1-3]。然而目前还没有专用于本征频率测试的设备而是采用手动测试方法, 很难在大规模生产中应用且无法保证精度。虽然有些文献也提出了一种光纤环本征频率的自动测量方法但是在实际应用中不易实现且测量成本较高。本文首次提出了基于对称方波调制法, 利用数据采集卡对陀螺输出方波进行

作者简介: 周友伟 (1983 -), 男, 硕士, 目前研究领域为光纤陀螺光纤环检测。E-mail: zhoupower@tom.com

收稿日期: 2008-03-11

采集,以输出方波上下峰值点数差作为负反馈自动调节调制频率实现本征频率的自动、高速、高精度测量,且该方法已在工程实践中得到应用^[4-6]。

2 光纤陀螺光纤环本征频率的测试方法

2.1 手动测试方法

目前在大规模的光纤陀螺生产中还没有专门的本征频率测试设备,通常是在静态常温下采取手动测试方法。首先根据光纤环的长度推算出本征频率的理论值,然后在该值附近改变调制频率,观察陀螺输出。当陀螺输出的零偏最小时,以此调制频率作为该光纤陀螺的本征频率。该方法受人为因素影响较大,测量结果误差较大。

2.2 基于不对称方波调制法^[7]

从光纤陀螺本征频率的测试机理出发,采用不对称方波对 Y 波导进行调制,分析解调信号,得到相邻脉冲宽度差值的绝对值与调制频率的关系,当改变调制频率使相邻脉冲宽度差值为零时,此时的调制频率即为光纤陀螺的本征频率。

设不对称方波调制相位角为:

$$\phi_m(t) = \begin{cases} \phi_{m1} & kT < t < (k + \varepsilon)T \\ \phi_{m2} & (k + \varepsilon)T < t < (k + 1)T \end{cases} \quad (1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n$$

式中, T 是调制周期; ε 是占空比 (取 $\varepsilon < 0.5$)。不对称方波通过调制 Y 波导 (集成光学调制器) 对光纤环中正向和反向传播的光信号进行相位调制,正反两束光相干后进入光电探测器,当陀螺静止时 $\Delta\phi_R = 0$, 有:

$$V(t) = V_0 [1 + \cos\Delta\phi_m(t)] = \begin{cases} V_0 [1 + \cos(\phi_{m1} - \phi_{m2})] & kT < t \leq (k + \varepsilon)T \\ 2V_0 & (k + \varepsilon)T < t \leq kT + 1/(2f_e) \\ V_0 [1 + \cos(\phi_{m1} - \phi_{m2})] & kT + 1/(2f_e) < t \leq (k + \varepsilon)T + 1/(2f_e) \\ 2V_0 & (k + \varepsilon)T + 1/(2f_e) < t \leq (k + 1)T \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, V_0 为两束光完全不相干时探测器的输出电压; $\Delta\phi_R$ 为旋转引起的相位差; $\Delta\tau_g$ 为光在光纤环中的度越时间; $f_e = 1/(2\Delta\tau_g)$ 为本征频率。输出信号由宽度均为 $(1 - 2\varepsilon)/2f_e$ 的脉冲组成由公式 (2) 可知输出信号一个脉冲变窄而另一个变宽。图 1(a)、图 1(b) 分别为 $f_d < f_e$ 和 $f_d > f_e$ 时的输出信号。当改变调制频率的大小使相邻脉冲宽度的差值的绝对值 $K \rightarrow 0$ 时有调制频率 f_d 趋近本征频率 f_e 。但是这种测试本征频率方法的精度依赖于脉冲宽度的精确测量,然而要精确测量两相邻脉冲宽度需要很高速的数据采集卡才能做到,这样就大大增加了测量成本,而且更重要的是根据模拟仿真,基于不对称方波测

试本征频率的方法的精度仅能达到 0.1kHz,不利于满足光纤陀螺的工程化及研制高精度光纤陀螺的要求,所以必须有一种新的更加快速、自动、精确的本征频率测试方法。

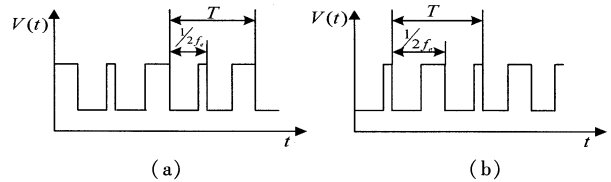


图1 $f_d \neq f_e$ 时解调信号输出

3 基于对称方波调制的光纤陀螺光纤环本征频率测试法

为了改变以往的光纤环本征频率测试精度不高、测试成本高昂的问题,我们提出了一种新的、快速、精确、自动且测量成本低廉的本征频率测试方法:基于对称方波调制的光纤陀螺光纤环本征频率测试方法。

当调制方波的频率小于光纤环的本征频率时,方波调制相位角为:

$$\phi_m(t) = \begin{cases} \phi_{m1} & kT < t < (k + \frac{1}{2})T \\ 0 & (k + \frac{1}{2})T < t < (k + 1)T \end{cases} \quad (3)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n$$

式中, T 为调制周期; $\Delta\tau_g$ 为光在光纤环中的度越时间;方波通过调制 Y 波导对通过光纤环的正向与反向传播的光信号进行调制,得到正反两束光的调制相位差为:

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta\tau_g) \quad (4)$$

所以当调制方波的频率小于本征频率时引起的光纤陀螺两臂的相位差为:

$$\Delta\phi_m(t) = \begin{cases} \phi_{m1} & kT < t < kT + \Delta\tau_g \\ 0 & kT + \Delta\tau_g < t < kT + \frac{T}{2} \\ -\phi_{m1} & (k + \frac{1}{2})T < t < (k + \frac{1}{2})T + \Delta\tau_g \\ 0 & (k + \frac{1}{2})T + \Delta\tau_g < t < (k + 1)T \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

光波相干后探测器输出的信号为:

$$V(t) = V_0 \{1 + \cos[\Delta\phi_R + \Delta\phi_m(t)]\} \quad (6)$$

式中, V_0 为两束光完全不相干时探测器的输出电压; $\Delta\phi_R$ 为旋转引起的相位差。当陀螺静止时 $\Delta\phi_R = 0$, 有:

$$V(t) = V_0 [1 + \cos\Delta\phi_m(t)] =$$

$$\begin{cases} V_0[1 + \cos\Delta\phi_m(t)] & kT < t < kT + \Delta\tau_g \\ 2V_0 & kT + \Delta\tau_g < t < kT + \frac{T}{2} \\ V_0[1 + \cos\Delta\phi_m(t)] & (k + \frac{1}{2})T < t < (k + \frac{1}{2})T + \Delta\tau_g \\ 2V_0 & (k + \frac{1}{2})T + \Delta\tau_g < t < (k + 1)T \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

由式(7)可见,光纤陀螺输出信号为周期为 $\frac{T}{2}$ 的方波;此方波的下峰值宽度为 $\Delta\tau_g$;上峰值宽度为 $\frac{T}{2} - \Delta\tau_g$;当调制频率较低($T > 4\Delta\tau_g$)时,如图2所示,陀螺输出方波上峰值宽度大于方波下峰值宽度,即 $\frac{T}{2} - \Delta\tau_g > \Delta\tau_g$;此时方波占空比大于50%;当调制频率等于本征频率的1/2时,如图3所示,此时 $T = 4\Delta\tau_g$,所以 $\frac{T}{2} - \Delta\tau_g = \Delta\tau_g$,方波占空比等于50%;当调制频率较大,即 $T < 4\Delta\tau_g$ 时,如图4所示,所以 $\frac{T}{2} - \Delta\tau_g < \Delta\tau_g$,方波占空比小于50%。综上所述,只需调节对Y波导的调制方波的频率使陀螺输出的方波占空比为50%时,此时的调制频率即为本征频率的1/2,这样就达到了精确测量本征频率的目的。

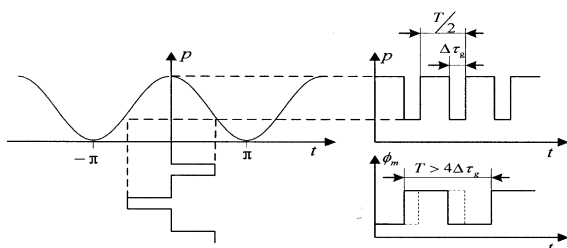


图2 方波调制周期大于 $4\Delta\tau_g$ 的输出

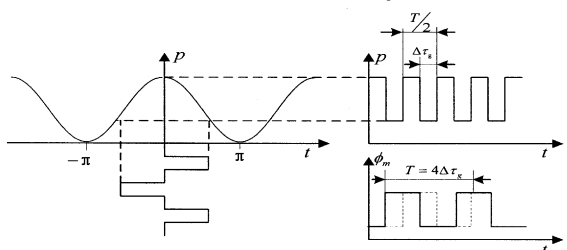


图3 方波调制周期等于 $4\Delta\tau_g$ 的输出

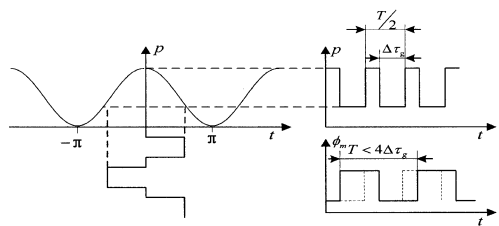


图4 方波调制周期小于 $4\Delta\tau_g$ 的输出

4 本征频率测试方法实现及试验研究

由前文对对称方波调制的光纤环的本征频率测

试方法的分析可知,要实现该测试方法可分为两个方面,一方面是具有一个频率可调的方波信号发生器,而且为了实现本征频率的自动锁定,达到自动化测量的目的,用于产生调制方波的信号发生器还应该具有远程控制接口,可以对调制频率实现实时控制。鉴于实验室条件采用带有 GPIB 接口的信号发生器产生调制方波。实现该测量方法的另一方面是如何精确测定陀螺输出方波的占空比及方波上下峰值的宽度差,并以此宽度差作为信号发生器的反馈信号调节对Y波导的调制频率使陀螺输出方波的占空比为50%以测得本征频率。然而以往为了精确测定方波的占空比,都是采用价格高昂的专用测试仪器,这违背了我们低成本、高精度测量的初衷,为了解决这一问题我们再一次提出了一种低成本、高精度测量方波占空比的方法:等间距连续采样多周期法。

4.1 等间距连续采样多周期法确定方波占空比

为了实现对光纤陀螺输出方波占空比的低成本、高精度测量,我们选用采样率较低的数据采集卡以固定的采样率连续采样方波信号很多周期的方法。如图5所示,以方波调制时陀螺输出方波的频率为 $\frac{2}{T}$,以采样率为 f ,且 $f > \frac{2}{T}$ 的数据采集卡对方波信号进行很多周期的连续采样 K 个点,采出的数据就像是对很多个周期的方波进行等间距抽样,当 K 值很大时,所有抽样点中处于上、下峰值的点数比从统计上就精确等于一个周期中的方波的占空比。

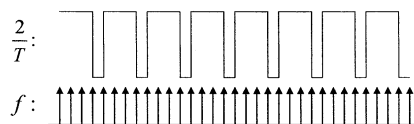


图5 多周期等间距采样

通过试验验证一系列频率90kHz且占空比为50.1%的方波,数据采集卡以330kHz的采样率采集100000个点作为样本时,以此样本的均值作为阈值,通过比较,样本中大于此阈值的点有50109个,50109:100000近似等于50.1%。由此可见这种确定方波占空的方法具有很高的精度,还可以通过进一步增加采样点数提高测试精度,而且这种测定方波占空比的方法与采集卡的采样频率无关,可以采用较低采样率的采集卡实现本征频率的测量,这有利于降低测量成本。

4.2 本征频率自动测量的试验

为了将该本征频率测试方法真正运用于工程实践,我们运用Labview软件编写自动测试程序,如图6所示自动测试的软件的人机界面,通过编程实现

了真正意义上的一键快速测量。通过 Labview 软件编程控制采集卡对陀螺输出方波一次采集 100000 个点,然后对这 100000 个点进行排序,用这 100000 个点的均值作为阈值,将排序后的采样点与此阈值进行比较,计算所有大于与小于该阈值的点的个数,并计算出大于阈值点个数与小于阈值点个数的差值。以此差值作为反馈量调节方波信号发生器的输出频率,当此差值小于零时,说明调制频率小于本征频率的 1/2,且此差值越小说明调制频率应该增大越多;当此差值大于零时,说明调制频率大于本征频率的 1/2,且此差值越大说明调制频率应该减小越多,随着调制频率的调节此差值将越来越小最终实现本征频率的自动锁定。

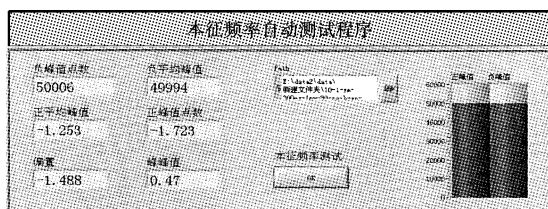


图6 软件试验平台人机界面

分别对两只陀螺的本征频率进行多次测量,本征频率测试实验结果如表 1 所示。通过试验数据可以看出本测试方法能够准确的测量光纤陀螺光纤环的本征频率,实验中整个锁定过程在几秒之内就可完成如图 7(a)、(b) 分别表示初始调制频率小于与大于本征频率时的锁定过程。

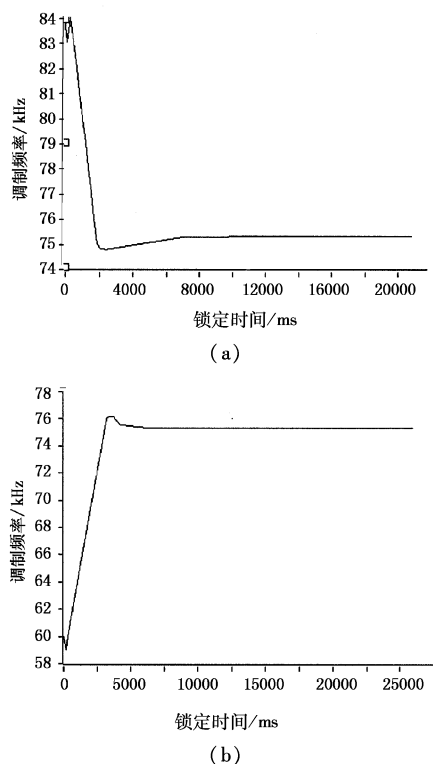


图7 锁定本征频率的过程

表1 对两只陀螺本征频率多次自动测量的结果

测试结果	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值	方差
陀螺1 /kHz	75.29	75.29	75.294	75.29	75.292	75.286	75.29	75.284	75.2895	0.0032
陀螺2 /kHz	82.748	82.744	82.74	82.74	82.744	82.748	82.744	82.74	82.7435	0.0033

5 结论

针对工程化过程中光纤陀螺本征频率测试不方便的问题,本文提出了一种基于对称方波调制原理实现本征频率自动测试的新方法。从光纤陀螺本征频率的调制原理出发,将本征频率的测试转化为方波占空比的测量问题,还提出了多周期连续采样精确测量方波占空比的方法,并以方波上下峰值采样点数差作为反馈的设计方案,结合 Labview 编程实现一键自动测量。试验结果表明,该测试方法的测试精度可保证 0.01kHz,与传统测量方式相比,该方法测试精度高、速度快,适合在大规模生产实践中应用。

参考文献:

- [1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. London: Artech House, 1993.
- [2] 王冬云,毛彩虹,朱辉,等. 电光相位调制器谐波响应对光纤陀螺的影响[J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1053 - 1055.
- [3] Tian Hai-ting. Effect of modulation frequency jitter on coherent detection and its elimination algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(4): 604 - 610.
- [4] Maochun Li, Tiegeng Liu, Youwei Zhou, et al. A 3-D model for analyzing thermal transient effects in fiber gyro coils [C]//Proceeding of SPIE, Advanced Sensor Systems and Applications III, 2007, 6830 - 6834.
- [5] 李茂春,刘铁根,江俊峰,等. 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测方法[J]. 光学学报, 2005, 28(3): 494 - 496.
- [6] 李茂春,刘铁根,侯丽丽,等. 光纤陀螺光纤环 Shupe 效应的三维有限元模型研究[J]. 天津大学学报, 已录用待发表.
- [7] 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.