

一种光纤陀螺干涉仪光纤长度误差量测量方法

单联洁^{1,2}, 马玉洲², 梁迎春¹

- (1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 北京航天时代光电科技有限公司, 北京 100094)

摘要: 为提高光纤陀螺干涉仪保偏光纤长度误差量的测量精度, 提出了一种基于四态方波调制的新的解决方法, 将对光纤陀螺 Sagnac 干涉仪光纤长度误差量的测量转化为对探测器响应信号中尖峰脉冲的测量, 并利用调制频率倍频技术实现了对尖峰脉冲的精细化测量。依据该方法设计制作了一套可检测光纤长度误差量的系统, 达到了 0.2 m 的测量精度(2 000 m 光纤)。实验结果表明, 与普通保偏光纤测量方法相比, 该方法测量精度高、速度快, 为光纤陀螺的工程化装配提供了保障。

关键词: 光纤陀螺; 干涉仪; 光纤长度误差量; 四态方波; 倍频

中图分类号: V448.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1574-05

An approach to fiber length error measuring of the Sagnac interferometer used in IFOG

Shan Lianjie^{1,2}, Ma Yuzhou², Liang Yingchun¹

- (1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Aerospace Times Optical-electronic Technology Co., Beijing 100094, China)

Abstract: A novel approach to PM fiber length error measuring of IFOG's Sagnac interferometer was proposed according to the FOG manufacturing process. Basing on the state four square wave mechanism, the measurement of fiber length error was conversed into the measurement of peak pulses in the detector's response signal. Meanwhile, fine measurement of the peak pulse was accomplished by modulation frequency multiplying technique. A fiber length error measuring system was developed on the basis of this approach, which achieved the measuring precision of 0.2 m (2 000 m fiber). The experimental results show that a higher precision and a faster measuring speed than original methods, which can increase the efficiency of FOG's engineering assembly.

Key words: fiber optic gyroscope(FOG); interferometer; error of fiber length;
the state four square wave; frequency multiplying

0 引言

光纤陀螺作为一种新型惯性仪表，自问世以来便受到了国内外的高度重视，经过 30 余年的发展，已经广泛应用在制导武器和航天导航系统中。随着当前惯性导航系统的不断发展，光纤陀螺精度的要求越来越高，根据光纤陀螺的工作原理，干涉仪光纤长度要精确控制才能确保光纤陀螺具有较高的精度，否则将造成调制频率与本征频率不相等，产生调制误差^[1-6]，还会造成陀螺输出干涉信号中产生寄生相位偏置^[7]，引起陀螺零偏绝对值变大以及零偏重复性的劣化，影响精度性能^[8]。

光纤陀螺电路中一般采用固定设置本征频率，通过改变调制频率实现频率对准，但该方法调制频率难以连续改变，会造成较大的误差，对电路设计的可靠性和电磁兼容性要求也较高。而原有方法中通过光时域反射计测量干涉仪光纤长度计算误差量的方法又受保偏光纤一致性、对轴偏差及设备精度的影响，精度低，速度慢，难以满足工程化生产的要求。

文中针对上述问题，基于四态方波调制解调原理，引入基于数字锁相环的调制频率倍频技术，提出了一种新颖的干涉仪光纤长度误差量测量方法，并研制了一套专用检测系统，实现了光纤陀螺干涉仪光纤长度误差量的快速、准确测量，解决了光纤陀螺装配中干涉仪光纤长度误差量难以精确控制的问题。

1 基于四态方波调制解调的干涉仪误差量测量原理

四态方波调制通过调制 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，得到正反两束光的调制相位差。两束相干光经光电探测器后的输出信号是两束光不相干时探测器的输出电压，四态方波实现 2π 复位控制，可以不受复位次数的限制，在任意时刻均可获得 2π 复位调制通道增益的误差，实现调制通道增益控制，对小角速率输入的情况作用尤其重要，还有利于解决 Y 波导的温度稳定性问题和电子线路漂移问题。

当调制频率等于本征频率时，利用此四态方波对光纤环中的两束光进行调制，得到两束光的相位差^[4]为：

$$\Delta\varphi(t)=\varphi(t)-\varphi(t-\tau) \quad (1)$$

四态方波调制的工作原理如图 1 所示，调制信号采用的是本征频率：

$$f_p=\frac{1}{2\tau} \quad (2)$$

陀螺静止时，输出是一条直线(通常含有频率为 $\frac{1}{\tau}$ 的大的尖峰脉冲)。

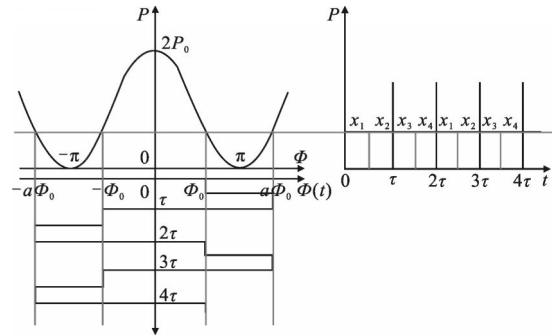


图 1 四态方波调制工作原理图

Fig.1 Principle for four state square the wave modulation

记四态方波信号为 $\varphi(t)$ ，则偏置调制产生的两束光波之间的相位差为 $\Delta\varphi_m(t)=\varphi_m(t)-\varphi_m(t-\tau)$ 。偏置调制产生的两束光之间的相位差四个状态为 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ 、 $-\pi/2$ 、 $-3\pi/2$ (图 2)，每个状态持续周期为渡越时间 τ 的一半，即

$$\Delta\varphi_m(t)=\begin{cases} \frac{\pi}{2}, & 0 \leq t < \frac{\tau}{2} \\ -\frac{3\pi}{2}, & \frac{\tau}{2} \leq t < \tau \\ -\frac{\pi}{2}, & \tau \leq t < \frac{3\tau}{2} \\ \frac{3\pi}{2}, & \frac{3\tau}{2} \leq t < 2\tau \end{cases} \quad (3)$$

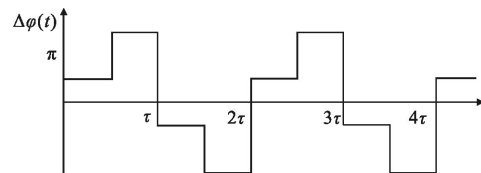


图 2 四态方波产生相位差示意图

Fig.2 Phase difference caused by the four state square wave

闭环光纤陀螺相干光经探测器输出信号为：

$$V(t)=V_0\{1+\cos[\Delta\varphi_R+\Delta\varphi_m(t)+\Delta\varphi_b]\} \quad (4)$$

式中： V_0 为两束光完全不相干时光电探测器组件的

输出电压; $\Delta\varphi_R$ 为旋转引起的相位差; $\Delta\varphi_m(t)$ 为偏置调制相移; $\Delta\varphi_{fb}$ 为反馈相移。则有:

$$V(t) = V_0 \{1 + \cos[\Delta\varphi_m(t) + \Delta\varphi_{fb}]\} = \begin{cases} V_0 \left\{1 + \cos\left[\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, 0 \leq t < \frac{\tau}{2} \\ V_0 \left\{1 + \cos\left[\left(\frac{3\pi}{2}\right) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, \frac{\tau}{2} \leq t < \tau \\ V_0 \left\{1 + \cos\left[\left(-\frac{\pi}{2}\right) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, \tau \leq t < \frac{3\tau}{2} \\ V_0 \left\{1 + \cos\left[\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, \frac{3\tau}{2} \leq t < 2\tau \end{cases} = \begin{cases} V_0 \{1 - \sin[\Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\}, 0 \leq t < \frac{\tau}{2} \\ V_0 \{1 + \sin[\Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\}, \frac{\tau}{2} \leq t < \tau \\ V_0 \{1 - \sin[\Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\}, \tau \leq t < \frac{3\tau}{2} \\ V_0 \{1 + \sin[\Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\}, \frac{3\tau}{2} \leq t < 2\tau \end{cases} \quad (5)$$

设 f_p 为光纤陀螺本征频率, 调制频率为 f_m , 则

$$f_m = \frac{1}{T} \quad (6)$$

$$f_p = \frac{1}{2\tau} \quad (7)$$

上式为 $f_m = f_p$, 在理想情况下, $\tau = \frac{T}{2}$, 此处不妨设

$f_m < f_p$, 即 $\tau < \frac{T}{2}$, 则公式(5)变为:

$$V(t) = V_0 \{1 + \cos[\Delta\varphi_m(t) + \Delta\varphi_{fb}]\} = \begin{cases} V_0 \left\{1 + \cos\left[\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, 0 \leq t < \tau \\ V_0 \left\{1 + \cos[(-\pi) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\right\}, \tau \leq t < \frac{T}{2} \\ V_0 \left\{1 + \cos\left[\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, \frac{T}{2} \leq t < \tau + \frac{T}{2} \\ V_0 \left\{1 + \cos[(-2\pi) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\right\}, \tau + \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (8)$$

当陀螺静止时 $\Delta\varphi_R \approx 0$, 取 $\Delta\varphi_{fb} = 0$, 则有

$$V(t) = \begin{cases} V_0 \left\{1 + \cos\left[\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, 0 \leq t < \tau \\ V_0 \left\{1 + \cos[(-\pi) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\right\}, \tau \leq t < \frac{T}{2} \\ V_0 \left\{1 + \cos\left[\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}\right]\right\}, \frac{T}{2} \leq t < \tau + \frac{T}{2} \\ V_0 \left\{1 + \cos[(-2\pi) + \Delta\varphi_R + \Delta\varphi_{fb}]\right\}, \tau + \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} =$$

$$\begin{cases} V_0, 0 \leq t < \tau \\ 2V_0, \tau \leq t < \frac{T}{2} \\ V_0, \frac{T}{2} \leq t < \tau + \frac{T}{2} \\ 2V_0, \tau + \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (9)$$

输出信号中出现宽度均为 $\frac{1}{2}T - \tau$ 的脉冲, 如图3所示。同理, 当 $f_m > f_p$ 时输出信号出现宽度均为 $\tau - \frac{1}{2}T$ 的脉冲。当调制频率不等于本征频率时, 在调制方波的一个周期内有两段时间在光功率响应的信号中表现为尖峰脉冲, f_m 与 f_p 相差越多, 则从图3的采集窗口中所得的尖峰脉冲宽度越大, 当 $f_m = f_p$ 时, 尖峰脉冲变得非常窄, 达到一个最小值。

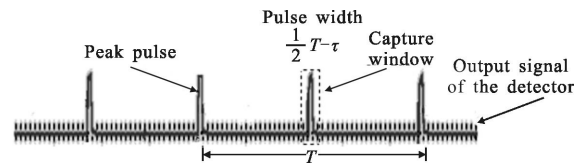


图3 四态方波调制下探测器信号尖峰脉冲示意图

Fig.3 Signal pulse of the detector at four state square wave modulation

3 干涉仪光纤长度误差量测量方法分析

光电探测器组件转化后的电压信号中出现的尖峰脉冲可以测量出其脉冲宽度, 如图2所示。由上部分内容可得:

$$\Delta t = \frac{1}{2}T - \tau = \frac{2M}{f} - \frac{nl}{c} = \frac{2M}{f} - \frac{n(l' + \Delta l)}{c} \quad (10)$$

式中: f 为陀螺晶振时钟频率; M 为调制频率对应的分频数; c 为真空光速; nl 为陀螺干涉仪光纤长度; n 为光纤折射率; l 为干涉仪光纤实际长度; l' 为干涉仪光纤长度理想长度; Δl 为干涉仪光纤长度误差量。即脉冲宽度与干涉仪光纤长度误差量成正比。因此, 可通过测量脉冲信号宽度由公式(10)得到干涉仪光纤长度误差量。

相关验证试验也表明, 该尖峰脉冲信号的脉冲宽度可作为干涉仪光纤长度是否精确控制的量化判定依据, 如图4所示。

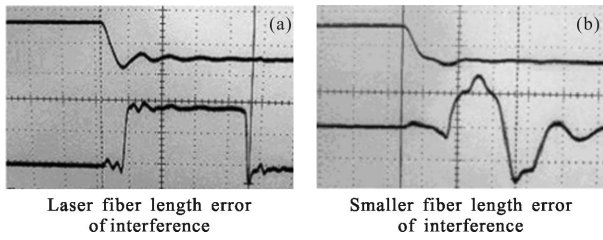


图 4 探测器信号尖峰脉冲实测现象截图(上为调制波形)

Fig.4 Signal pulse of the detector observed phenomenon screenshots (as measured above the modulation waveform)

对采集到的尖峰脉冲信号进行测试，根据第 2 节中脉冲信号宽度与干涉仪光纤长度误差量的数学关系：

$$\Delta t = \frac{1}{2} T - \tau = \frac{2M}{f} - \frac{nl}{c} = \frac{2M}{f} - \frac{n(l' + \Delta l)}{c} \quad (11)$$

可知， f 越大，尖峰脉冲宽度越小。若采取措施对晶振频率进行精细化分频，得到更加精细的尖峰脉冲，可提高光纤长度误差量的测量精度。

光纤干涉仪光纤长度误差量：

$$\Delta l = \frac{c}{n} \left(\frac{2M}{f} - \Delta t \right) - l' \quad (12)$$

可见，若精确测出尖峰脉冲宽度，便可精确测出干涉仪光纤长度误差量。文中采用基于全数字锁相环的调制频率倍频技术对晶振频率进行了精细化分频，实现了光纤长度误差量的精确测量。

4 基于全数字锁相环的调制频率倍频技术

全数字锁相环实现调制频率倍频与传统的模拟电路实现的锁相环(PLL)技术相比，具有精度高、不受温度和电压影响的优点，其环路带宽和中心频率编程可调，易于构建高阶锁相环，并且在数字系统中应用时无需 A/D 和 D/A 转换。

全数字锁相环的基本结构如图 5 所示，它主要由鉴相器、变模可逆计数器、脉冲加减电路和除 N 计数器四部分构成。变模计数器的控制参数为倍频因子 m ，脉冲加减电路的控制参数为分频因子 n ，一般情况下 m 和 n 不大于 32。全数字锁相环的输出频率 f_{out} 可以表示为： $f_{out} = f_{in} \times m/n$ ，其中， f_{in} 为全数字锁相环的输入频率，即电路的晶振频率。利用 FPGA 的全数字锁相环技术将输入的晶振频率进行倍频，并产生加载到 Y 波导上的高频调制信号，可得到更加精细化的尖峰脉冲。

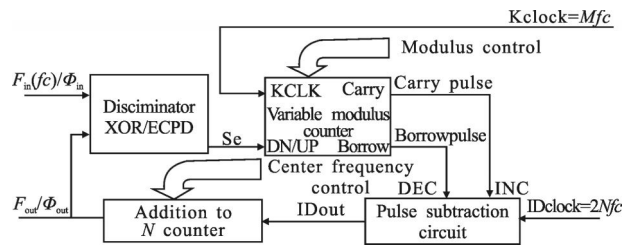


图 5 全数字锁相环的基本结构图

Fig.5 Basic structure of all digital phase locked loop

5 干涉仪光纤长度误差量检测系统

利用文中介绍的方法制成一台能够快速测量误差量的仪器，包括内部电路及光路装置，最后的测试结果通过仪器自带显示器显示出来。

使用文中阐述的测量方法，其中光纤长度误差量测量精度达到 0.2 m(2 000 m 光纤)，测量精度比原方法提高将近 10 倍，但是受到尖峰脉冲的规则程度的影响比较大，可从两个方面进行改进：(1) 采用跨阻较小的探测器和带宽较低的运算放大器，以尽量不使原始信号失真；(2) 合理选择倍频数。影响测量精度的主要方面是倍频数的选择。较小的倍频数会有较大的调制死区，对提高检测精度意义不大；过大的倍频数又会造成大的电磁干扰，影响测试，经过试验可得，选择 10~20 倍频数较为合适。

6 结论

文中针对传统方法测量干涉仪光纤长度精度低、效率差的问题，提出了一种能够精确测量干涉仪光纤长度误差量的简单、可行的方法。从四态方波调制机理出发，将对干涉仪光纤长度误差量的测量转化为对探测器输出信号中尖峰脉冲的测量，并利用调制信号倍频技术提高了测量精度，效果显著。结果证明，利用该测试方法得到的干涉仪光纤长度误差量的测量精度可达 0.2 m。

参考文献：

[1] Wang Xi, Gao Yanbin, Huo Liang. Low cost method for FOG eigenfrequency based on double-eigenfrequency square wave modulation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(4): 477-481. (in Chinese)
王曦, 高延滨, 霍亮. 基于 2 倍本征频率调制的光纤陀螺

- 本征频率测量方法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, 2011, 19(4): 477-481.
- [2] Zhang Jinbao, Song Ningfang, Ma Dongying, et al. Measurement method for FOG loop eigenfrequency and half-wave voltage[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(7): 17-20. (in Chinese)
张金保, 宋凝芳, 马东营, 等. 光纤陀螺本征频率和半波电压测量方法研究[J]. 光电与控制, 2009, 16(7): 17-20.
- [3] Tian Haiting, Zhang Chunxi, Jin Jing, et al. Effect of modulation frequency fitter on coherent detection and its elimination algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 604-610. (in Chinese)
田海亭, 张春熹, 金靖, 等. 调制频率抖动对相干检测的影响及消除算法 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(4): 604-610.
- [4] Song Ningfang, Zhang Jinbao, Ma Dongying, et al. Test method for FOG loop eigenfrequency[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 318-321. (in Chinese)
宋凝芳, 张金保, 马东营, 等. 光纤陀螺本征频率的测量方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 318-321.
- [5] Song Ningfang, Lv Fengjian, Zhao Hui, et al. Auto-test method for FOG eigenfrequency based on asymmetric square wave modulation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(4): 494-496. (in Chinese)
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.
- [6] Zhou Youwei, Liu Tiegeng, Li Maochun, et al. Auto-test method for FOG eigenfrequency based on symmetric square wave modulation [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38 (7): 676-679. (in Chinese)
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.
- [7] Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 115. (in Chinese)
王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 115.
- [8] Zhou Kejiang, Liu Shujun. Research on scale factor of closed-loop depolarized fiber gyroscope [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(3): 286-290. (in Chinese)
周柯江, 刘树俊. 退偏光纤陀螺刻度因数研究 [J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 286-290.