

# 高准确度光纤陀螺中相位调制的控制研究\*

肖 文 伊小素

(北京航空航天大学仪器与光电工程学院,北京 100083)

**摘 要** 在相位调制器基础上,提出了围绕干涉型光纤陀螺的闭环控制方案.对高准确度光纤陀螺中 Y 波导集成光学器件的调制特性及系统测试方法进行了研究,对其应用及光路各环节配合的技术进行了探讨,对该器件在光纤陀螺系统中的特性和测试系统进行讨论.在高准确度光纤陀螺中取得明显效果.目前,工程样机的零偏稳定性已达到  $0.02^\circ/\text{h}$ .

**关键词** 光纤陀螺;Y 波导集成光学器件;IOC  
**中图分类号** V241.5 **文献标识码** A

**文章编号** 1004-4213(2007)01-0043-4

## 0 引言

随着惯性技术的发展和光纤陀螺应用领域的不断扩展,对光纤陀螺准确度的要求不断提高.高准确度( $0.01^\circ/\text{h}$  以上)光纤陀螺已成为高准确度陀螺仪极具潜力的竞争者,其准确度和稳定性是应用中非常关注的性能指标.高准确度光纤陀螺均采用基于集成光学器件的闭环控制信号处理方案.作为其中的关键技术-Y 波导集成光学器件的性能对光纤陀螺达到上述目标非常重要<sup>[1-3]</sup>.

本文针对高准确度光纤陀螺 Y 波导集成光学器件调制特性和测试方法,结合光路中各环节配合技术进行了研究,从而实现了最佳配合,工程样机的零偏稳定性已达到  $0.02^\circ/\text{h}$ .

## 1 Y 波导集成光学器件的特性

光纤陀螺中的 Y 波导集成光学器件(IOC)是整个系统中的核心器件,是信号处理的基础.图 1 为 Y 波导集成光学器件组成干涉型光纤陀螺的结构图<sup>[4-7]</sup>.该器件将光束分/合、光的调制和光的起偏/检偏多项功能集为一体,实现闭环控制及最小的互易结构<sup>[8-9]</sup>.

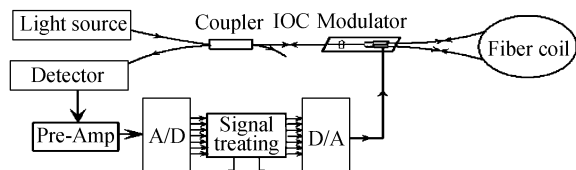


图 1 Y 波导集成光学器件在陀螺中的工作原理  
Fig. 1 The operation principle figure of Y-waveguide integrated optic component

由于 Y 波导集成光学器件是电光作用器件,光纤陀螺应用不仅对它的光学性能有较高的要求,而

且对它的电特性也提出了特别的要求.Y 波导性能参量中被定义为系统特性参量的有:波导调制响应度和波导调制响应的线性度.该器件这两个参量和系统中其它参量的配合将影响光纤陀螺的整体性能.图 2 为工作波长为 1300 nm 的铌酸锂 IOC 的方波响应曲线.从图中可以明显看出,这只  $\text{LiNbO}_3$  波导的电响应有过冲现象.这对光纤陀螺的性能会产生影响.

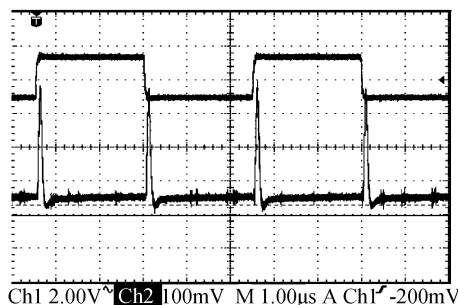


图 2  $\text{LiNbO}_3$  集成光学对方波的响应曲线  
Fig. 2 The response curve of  $\text{LiNbO}_3$  modulator to square wave

$\text{LiNbO}_3$  (LN)集成光学器件是基于晶体的电光效应,给晶体上制作出的光波导施加电场,导致波导的折射率发生改变,从而影响通过该波导的光波传输特性.光纤陀螺中采用 LN 集成光学器件改变通过它的光相位,实现光纤陀螺的闭环控制.通常 LN 晶体的电光响应时间为  $10^{-15}$  s,因此,从电光转换的角度可以忽略其相应的延迟时间.调制过程是一个外加电场建立和撤销的过程,调制可认为是线性的,因此 Y 波导集成光学器件可以视为一个高频带通滤波器,主要特点为大电阻、小电容.分布参量主要由 IOC 波导中的  $\text{SiO}_2$  层和金属电极所决定.当调制频率不太高时,可以认为光波越过调制区时调制电场是常量,因此,频率不高时可把调制器看作具有集总参量的元器件<sup>[1]</sup>.

IOC 在光纤陀螺系统中的电光调制是对系统的闭环反馈信号的响应,其中包括了偏置方波和闭环

\*国防预研项目(51409050104HK0102)资助  
Tel:010-82316906 Email:xiaow@buaa.edu.cn  
收稿日期:2005-07-14

反馈的阶梯波. 系统的信号则来自于方波的半周期(由光在光纤环中的传输时间来决定)的光干涉信号之差. 所以,对IOC施加的调制必须有足够的带宽和稳定的响应,并且和光纤陀螺系统的解调电路参量匹配;同时,调制器在调制相位过 $\pi$ 时,采用复位技术,调制电压须从 $V_\pi$ 调到 $V_{\pi/2}$ ,系统的电路性能也会直接对IOC的电光响应产生影响.

1.1 集成光学器件的集总参量

图3为IOC等效参量示意图. 图中左边为芯片中电阻、电容的分布情况;其中 $R_s$ 为信号源内阻, $R_e$ 为电极引线电阻, $R$ 为电极间的绝缘电阻, $C$ 为芯片的分布电容. 调制器芯片上的电压为

$$V = \frac{V_s}{\left[ \left( \frac{R_s}{R} \right) + \left( \frac{R_e}{R} \right) + 1 \right]^2 + \omega_s^2 C^2 (R_s + R_e)^2 }^{1/2}$$

式中 $\omega_s$ 为调制频率, $R \gg R_s, R_e$ ,图3中间为等效的集成光学器件的集总参量. RL为负载电阻. Y波导集成光学器件电极层的均匀性、附着性会对分布电容产生影响,而单从器件的标称参量上无法反映出器件的这一调制特性. 该分布电容变化,会对调制器的带宽产生影响. 一般情况下C的大小为10 pF,目前变化范围在5~15 pF之内. 当负载电阻为50  $\Omega$ 时,产生的带宽会在640~240 MHz范围变化. 这一带宽范围可以满足光纤陀螺信号处理的要求. 但是不同的分布电容与信号处理电路的匹配将直接影响陀螺的准确度<sup>[5]</sup>.

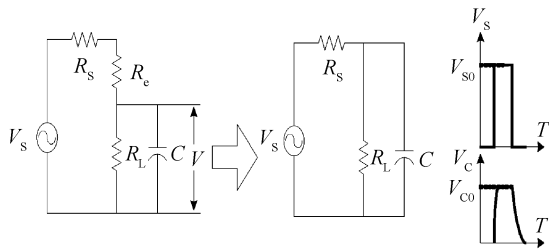


图3 LN-IOC等效参量示意图及对方波信号的响应曲线  
Fig.3 Schematic of LN-IOC equivalent parameters

1.2 集成光学器件的响应分析

在输入电压波形为方波时,对图3中间的等效参量电路进行输出电压和频谱的数值分析. 电压动态方程为

$$RC \frac{dV}{dt} + V(t) = V_s(t)$$

式中 $V_s(t)$ 为调制信号电压, $V(t)$ 为施加到集成光学器件的电压.

对式进行拉氏变换,得到输出的频谱为

$$V(s) = V_{s0} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s+1/RC} \right) (1 - e^{-s\tau})$$

对式进行反变换得到集成光学器件输出电压的波形与时间的关系式为

$$V_c(t) = V_{c0} (1 - e^{-t}) V(t) - V_{c0} [1 - e^{-(t-\tau)}] V(t-\tau)$$

由于电路对方波的响应有一个放电过程,将此过程与IOC的过冲结合,就可以得到一个理想的响应曲线. 要获得这样的理想曲线,必须通过Y波导电特性参量与陀螺本身电路参量的匹配来达到.

1.3 调制响应对光纤陀螺的影响

干涉型光纤陀螺是通过检测光纤环路形成的Sagnac相位差得到光纤环路转动的角速度. 集成光学器件在光路中加入相位调制,实现:1)将工作点移到灵敏度高的地方;2)确定转动方向;3)实现光学闭环控制(工作点不变).

调制相位为 $\Delta\Phi_m \propto KV_c(t)$ .  $K$ 为比例系数. 方波调制时有

$$\Delta\Phi_m(t) = \begin{cases} \pi/2 & t = 2N\Delta\tau \\ -\pi/2 & t = 2(N+1)\Delta\tau \end{cases} \quad N \text{ 为正整数}$$

式中: $\Delta\tau$ 为光在光纤环中的传输时间. 每一个周期内,信号系统经历一个从最大到工作点的过程,出现一个尖峰,如图4. 每一尖峰之间的数据,通过A/D采样平均得到 $P_1$ 和 $P_2$ ,其差值 $\Delta P = P_1 - P_2$ 作为系统检测转动的信号. 一般情况A/D采样点为 $\tau$ 周期内均匀分布. 高准确度光纤陀螺的本征周期由于较长的光纤而变大<sup>[4]</sup>,因此有较长的峰值间隔,A/D采样的选择为调制控制的核心,而IOC的稳定性将直接影响调制的稳定性和陀螺准确度.

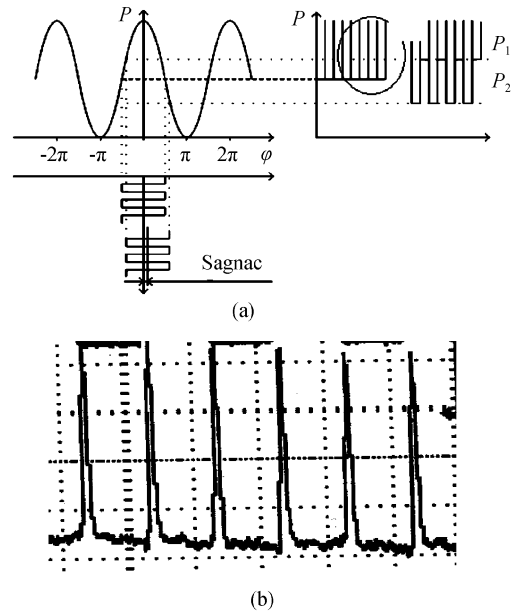


图4 (a)LN方波调制的原理;(b)陀螺静止时LN调制的响应曲线,对应(a)中圆环中部分  
Fig.4 (a)The modulated diagram of LN square-wave; (b)The response curve of LN modulation when gyro is at rest

可以看出,调制器的调制响应会直接影响 $P_1$ 和 $P_2$ 的准确度, $P_1$ 和 $P_2$ 的误差使得反馈信号不稳定,因此影响陀螺的零偏稳定与测量准确度.

## 2 调制器的调制特性及测试

高准确度光纤陀螺的相位调制控制是通过调制器的特性分析与测试,确定调制采样点的时间延迟,从而获得最佳的稳定性,达到高准确度的指标. 其中,对 IOC 的实际调制性能必须实际测量出来. Y 波导集成光学器件陀螺测试系统可对 Y 波导集成光学器件进行其在系统中的性能进行检测. 通过在实际的系统中调试施加于 IOC 的阶梯波和方波,考核器件的回扫宽度、半波电压、和稳定幅度,确定 IOC 调制的稳定参量  $\tau_0$ ,以此调整采样时序.

### 2.1 调制控制测试

测试系统与完整的光纤陀螺系统相同. 采用外加方波、阶梯波的外解调系统模拟陀螺的工作过程. 图 5 为测试系统得到的 Y 波导集成光学器件对方波和阶梯波的响应. 由此可以看出: IOC 的回扫宽度  $\tau_1$  比方波半宽  $\tau$  的 1/5 还小;通过压窄这一宽度,可显著的提高系统的偏置稳定性和零偏大小.

$$\tau = \tau_0 + \tau_1$$

A/D 采样的时间可通过逻辑控制器件(FPGA)的时

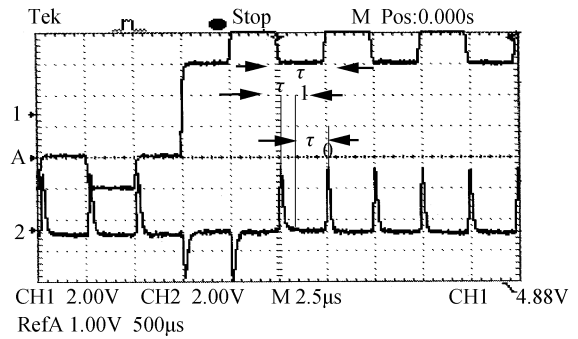


图 5 Y-IOC 测试系统得到的方波和阶梯波的响应曲线  
Fig. 5 The square wave and step wave response curve from Y-IOC test system

序控制进行延迟. 对于高准确度光纤陀螺的调制器有  $\tau_0 \gg \tau_1$ , 实际有  $\tau_0 = 5 \sim 10\tau_1$ , 使得采样位置时间延后  $\tau_1$ .

### 2.2 测试系统对 IOC 测试与分析

针对高准确度光纤陀螺的调制要求,目前产品化的 IOC 必须根据光纤陀螺的系统要求进行测试,确定实际的调制参量  $\tau_1$ ,对多个 Y-IOC 器件样品在系统上测试,几种典型的结果如图 6. 可以看出器件的分布参量由于制造工艺不同,其在系统光纤陀螺

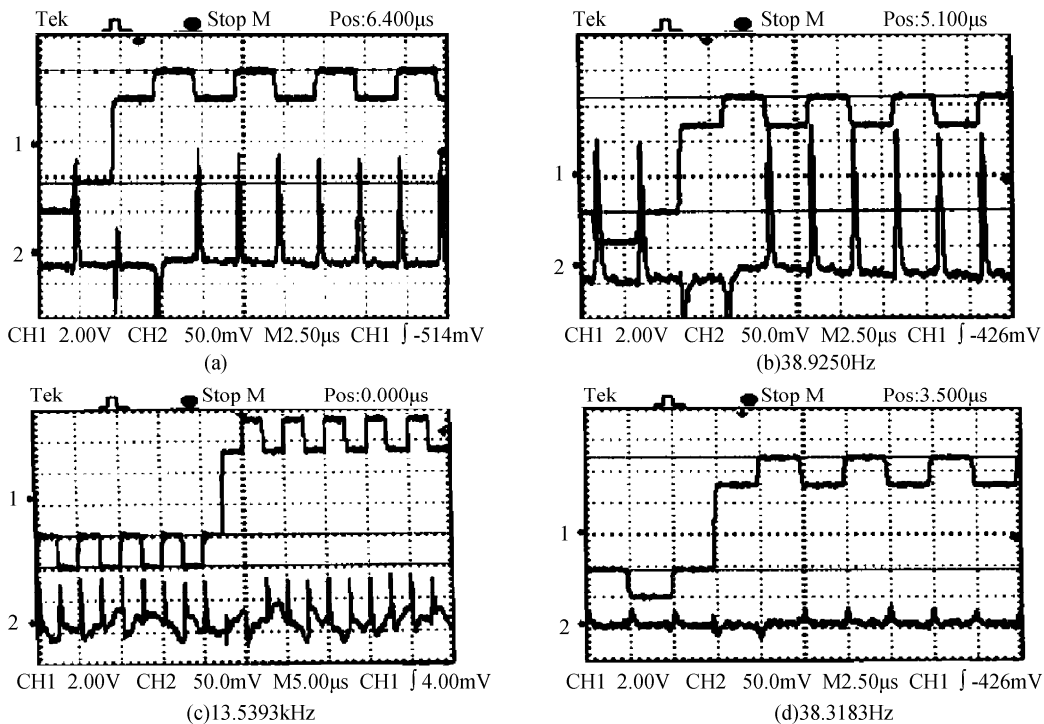


图 6 多个 Y-IOC 样品在测试系统得到的方波和阶梯波的响应曲线  
Fig. 6 The multi square and step wave response curves of Y-IOC in test system

中的表现也会有较大的不同.

图 6 中(a)曲线为一个很好的器件,尖峰幅度很大而底线基本为一水平线;(b)曲线与(a)相比底线不是一个很好的水平线,信号处理上要加二次闭环控制;(c)曲线所代表的器件基本无法在系统中应

用,其底线变化很大;(d)曲线虽然底线为水平,但尖峰基本不存在,说明器件的调制性能较差或者损耗很大,系统也是无法使用的. 通过测试的器件能够适应高准确度光纤陀螺的调制器要求,陀螺的零偏稳定性优于  $0.02^\circ/h$ ,如图 7.

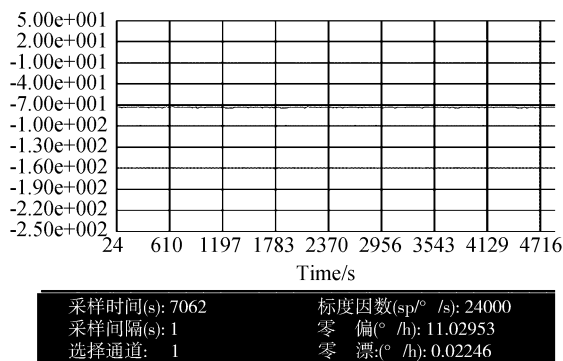


图7 高精度光纤陀螺偏置漂移测试曲线(优于 $0.02^\circ/\text{h}$ )  
Fig. 7 The high precision FOG testing curves better than  $0.02^\circ/\text{h}$

### 3 结论

高精度光纤陀螺中铌酸锂集成光学调制器 (IOC) 的闭环控制, 对该器件的调制特性提出了新的要求, 对陀螺系统的调制过程、闭环控制过程均有配合上的要求。除了要保证 Y 波导集成光学器件的光学特性及稳定性外, 其电特性也应该得到满足。Y-IOC 的电光响应特性可以通过系统的各个环节加以调整, A/D 采样的延时控制的实现, 使陀螺的零偏得到明显的改善。对该器件建立一套标准的检测系统, 可以对不同的 IOC 电特性进行评估, 调制器与系统的电参数的良好匹配可对陀螺的最终性能产生积极的影响。

#### 参考文献

- [1] CAI Bo-rong. Integrate optics[M]. Chengdu: UESTCP, 1990. 119-121.  
蔡伯荣. 集成光学[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990. 119-121.

- [2] WANG Ddong-yun, MAO Cai-hong, ZHU Hui, *et al.* The impact of e-o modulator harmonic response in I-FOG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1053-1055.  
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] YE Wei, NI Yong-feng, ZHAO Wei-dang, *et al.* Research on digital signal detecting method in closed loop fiber gyros [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(4): 334-337.  
叶伟, 倪永峰, 赵为党, 等. 闭环光纤陀螺全数字式信号检测方法研究[J]. 光子学报, 1998, **27**(4): 334-337.
- [4] LEFEVRE H C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope [J]. *Optical Review*, 1997, **4**(1): 20-27.
- [5] NAPOLITANO F, GAIFFE T, COTTREAU Y, *et al.* Phins: the first high performances inertial navigation system based on fiber optic gyroscopes [C], in: Peshekhonov V G. Proceedings of St-Petersburg Conference on Navigation Systems, St-Petersburg: State Research Center of Russia Elektropribor, 2002. 10-5.
- [6] GARY A, MICHAEL G. Fiber optic gyro based precision navigation for submarines [C], AIAA 2000 : 4384, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 14-17 Aug. 2000/ Denver, CO.
- [7] WU Xiang-qi. Signals, system and signal treatment [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 1999. 89-90.  
吴湘淇. 信号、系统与信号处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999 年第二版, 89-90.
- [8] EBERG A, SCHIFFNER G. Closed-loop fiber-optic gyroscope with a sawtooth phase-modulated feedback [J]. *Opt Lett*, 1985, **10**(6): 300-302.
- [9] DAI Xu-han, ZHOU Ke-jiang, LIU Cheng, *et al.* General comments on signal processing scheme for fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **28**(11): 1043-1048.  
戴旭涵, 周柯江, 刘承, 等. 光纤陀螺的信号处理方案评述 [J]. 光子学报, 1999, **28**(11): 1043-1048.

## Research on the Modulation of $\text{LiNbO}_3$ Integrated Optic Chip in High Precision Fiber Optic Gyro

XIAO Wen, YI Xiao-su

(College of Instrumentation and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Received date: 2005-07-14

**Abstract** The square-wave modulation response parameters of the  $\text{LiNbO}_3$  Integrated Optic Chip (IOC), which plays multi-functions in the fiber optic gyro (FOG) system as one of the key elements, and the optic phase control technique have been discussed. It is shown that the total equivalent parameters of the IOC needed to match the modulation/demodulation system and to test the response characters in order to reach the better performances of the FOG. The optical characteristics and the electrical characteristics of Y-IOC as well as the matching the electrical characteristics between the IOC and the FOG system play some important part in achieving the high accuracy of the FOG. The device test system has been set up and the IOC in high precision FOG (bias error less than  $0.02^\circ/\text{h}$ ) are evaluated.

**Key words** Fiber optic gyro; Integrated optic chip; Modulator



**XIAO Wen** A Professor of the College of the Instrumentation and Opto-Electrical Engineering, Beihang University. He has begun the research works on the FOG since 1995 and has been working in the CALT for many years. His main interests are fiber optical sensors, devices and modules, especially fiber optic gyros and its application.