

集成光学器件对光纤陀螺稳定性影响的研究*

李绪友¹ 王长伟² 邹继斌¹

(1 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要 通过对集成光学器件调制特性的研究分析, 指出了其调制特性影响光纤陀螺稳定性的主要原因, 研究并设计了对集成光学器件调制度不稳定性进行实时跟踪补偿的方法, 并对设计方案进行了实验, 得到较好的实验效果, 提高了光纤陀螺的稳定性.

关键词 调制度; 漂移; 非线性; 稳定性

中图分类号 U666.12⁺³ **文献标识码** A

0 引言

光纤陀螺作为一种新型的角速率传感器, 具有体积小、重量轻、耐冲击、精度高、寿命长等特点, 自问世以来便受到广泛的重视, 在航空、航天及舰船的控制及导航系统中具有广泛的应用. 因此光纤陀螺的研究在一些大学、国家实验室和公司中迅速的开展起来, 随着研究的不断深入, 对光纤陀螺的精度及稳定性的要求也随之提高, 但光纤陀螺的稳定性的问题一直以来是影响光纤陀螺进一步发展的重要因素, 特别是陀螺的随环境温度变化的长期稳定性问题, 已经严重影响了陀螺在船用导航系统中的应用. 以集成铌酸锂集成光学器件(俗称 Y 波导)为核心的数字闭环光纤陀螺, 是目前研制高精度光纤陀螺的重要途径之一. Y 波导集光耦合器、光起偏器和电光相位调制器为一体, 是数字闭环光纤陀螺中的核心器件, 其性能对光纤陀螺的精度及稳定性影响极大^[1~5]. 本文主要分析了 Y 波导电光相位调制特性对光纤陀螺稳定性的影响, 研究了对其不稳定因素进行跟踪补偿的方法, 对研究高精度光纤陀螺, 提高光纤陀螺稳定性具有重要的意义.

1 数字闭环光纤陀螺 Y 波导调制的基本原理

数字闭环光纤陀螺的原理框图如图 1, 阶梯波调制原理如图 2, 由图 1 和图 2 可看出, 此方案的主要特点是通过集成光学器件(Y 波导)对 Sagnac 干涉仪加入调制信号阶梯波和方波, 阶梯波的一个阶梯的宽度等于光在光纤环中的传输时间 τ , 方波的周期为 2τ , 阶梯波用于抵消 Sagnac 相移, 从而形成

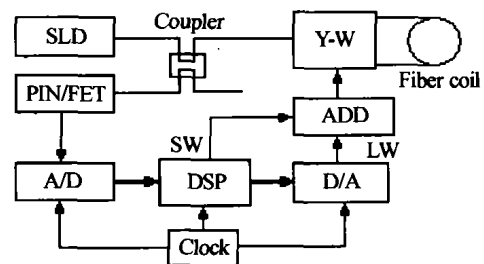


图 1 数字闭环光纤陀螺的原理框图
Fig. 1 Schematic of all digital closed-loop FOG

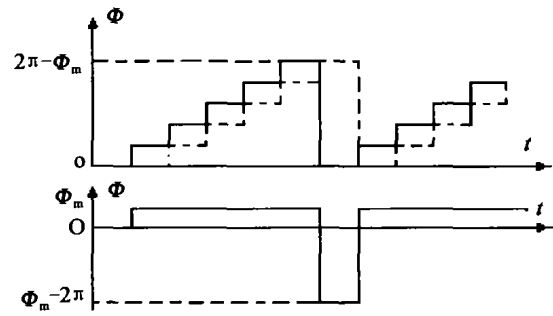


图 2 阶梯波调制原理图
Fig. 2 Principle diagram of ladder wave modulate

闭环负反馈控制, 方波信号做为偏置信号, 使 Sagnac 干涉仪输出的干涉信号与相移信号呈线性关系, 则阶梯波的阶梯高度值就是我们所要测量的 Sagnac 相移, 即角速率信号. 此方案中除了探测器输出信号、阶梯波和方波驱动信号外, 其主要的信号处理过程都是数字信号, 避免了电路噪声的影响, 提高了系统的测试精度, 因此该方案也是中、高精度光纤陀螺信号处理系统的主要方案之一.

由 Sagnac 光纤干涉仪输出的干涉信号为

$$I = A[1 + \cos(\Phi_s + \Phi_m + \Phi_f + \Phi_e)] \quad (1)$$

式中 A 为干涉信号幅度系数; Φ_s 为 Sagnac 相移, Φ_m 为阶梯波信号所产生的相移(如图 2), Φ_f 为方波信号所产生的相移, Φ_e 为在 A/D、D/A 和方波信号中所产生的电路噪声所产生的相移.

方波信号在正负半周所产生的相移为 $\pm\pi/2$, 我们将在方波正半周和负半周所检测的信号相减可得

* 国家武器装备预研基金资助课题

(编号: 51409040103CB0106)

Tel: 0451-82588407 Email: lixuyou@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2004-11-08

$$\Delta I = A[\cos(\Phi_0 + \Phi_s + \Phi_m + \pi/2) - \cos(\Phi_0 + \Phi_s + \Phi_m - \pi/2)] = -2A \sin(\Phi_0 + \Phi_s + \Phi_m) \quad (2)$$

由于所加阶梯波信号是用来抵消 Sagnac 相移 Φ_s 的, 所以 Φ_s 和 Φ_m 总是近似相等的, 且符号相反, Φ_0 是由电路噪声产生的相移是一个很小的相移, 通过滤波可消除, 因此 $\Phi_s + \Phi_m$ 是一个近似为零的相移, 则有

$$\Delta I \approx -2A \sin(\Phi_0 + \Phi_m) = -2A \sin(\Delta\Phi) \approx -2A\Delta\Phi \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 要使 Φ_m 完全抵消 Φ_s , 必须使 $\Delta I \approx 0$, 如果 $\Delta I \neq 0$, 则表明阶梯波产生的相移, 还没有完全抵消角速率产生的相移, 应通过闭环控制改变阶梯波的阶梯高度信号, 来抵消未被抵消的相移. 当数字闭环控制系统达到平衡时即 $\Delta I \approx 0$, 阶梯波的阶梯高度所产生的相移就等于被测的转速信号产生的相移, 因此阶梯波的阶梯高度值同被测角速率信号成正比.

2 集成光学器件对光纤陀螺稳定性的影响

根据光纤陀螺数字闭环调制的基本原理可看出, 阶梯波递增(或递减阶段)所产生的相移等于一个阶梯高度的变化量产生的相移 Φ_m , 而在复位阶段产生的相移却与阶梯波的整体高度有关. 为了保证得到的干涉信号不出现跳变, 在阶梯波的复位周期中, 要求所产生的相移应为 $\Phi_m - 2\pi$, 否则在复位周期中检测的 ΔI 值会出现一个大的跳变(如图 4), 从而导致整个闭环出现不稳定现象, 使得陀螺输出信号的噪声增大, 同时也会严重影响光纤陀螺的标度因数的稳定. 要保证复位周期内产生的相移为恰好等于 $2\pi - \Phi_m$, 即要求阶梯波产生最大相移(即 $\Phi_m = 0$ 时)应等于 2π , 为此除要求调制信号稳定外, 还要求 Y 波导的调制度稳定, 调制度的稳定一般用 Y 波导的半波电压表示, 半波电压可写为

$$V_{\pi} = \frac{d\lambda}{n_e^3 \gamma_{33} L \Gamma} \quad (4)$$

式中 d 为电极间的间距, n_e 为铌酸锂晶体波导的折射率, γ_{33} 为电光系数, L 为调制波导长度, Γ 为光场与电场的有效重叠系数, λ 为波长.

由式(4)可见, Y 波导的半波电压主要与铌酸锂晶的材料特性和制作工艺有关, 随温度变化特性是由晶体材料本身特性所决定的, 器件本身无法克服, 因此要保证在阶梯波, 梯波在复位周期的相移为 $2\pi - \Phi_m$, 必须对 Y 波导的调制度随温度的漂移进行实时跟踪补偿.

跟踪补偿的基本原理如图 3. 图中 SWD 为干

涉信号在在方波正负半周的差值信号, RS 为阶梯波复位周期的差值信号, CS 为阶梯波正常周期的差值信号, RM 为复位周期的的标志信号, 可判断是否为复位周期, DLW 为数字阶梯波信号, IDM 为阶梯波递增与递减性的检测, LWD 为控制阶梯波调制信号幅度的控制器. Y 波导随温度漂移的补偿, 首先要判断调制度是否出现了漂移, 根据以上对 Y 波导调制解调原理的分析, 可以通过检测复位周期输出的干涉信号在方波的正、负半周中的差值的大小, 可检测出是否出现漂移及漂移的大小如图 4. 同时考虑到数字闭环在控制过程中, 瞬间的角加速度所造成干涉信号的幅度瞬间增大, 从而影响对调制度漂移信息的检测, 因此检测到复位周期的干涉信号后, 再将此信号与邻近正常周期的信号相减, 便可消除瞬间角加速度对漂移检测的影响. 在高精度光纤陀螺中对系统的标度因数的稳定性要求很高, 调制度微小的变化都会造成标度因数的变化, 因而对调制度的控制精度要求很高, 同时考虑到电路中噪声对检测信号的影响, 又由于调制度漂移是一个慢变化过程, 因此对阶梯波幅度的控制是将检测后的漂移信号经过累加器的累加后, 再经过 D/A 转换后生成控制信号, 对阶梯波的幅度进行控制. 为了减小干涉信号中噪声的影响, 累加器的位数应高于检测信号的位数, 并保证不会出现溢出, 输出的控制信号只输出累加器的高位即可, 而不用输出低位信号, 这样当有漂移出现时便可将漂移信号累加平均, 并控制阶梯波的幅度, 当没有漂移时, 漂移信号为零, 累加器输出值保持不变. 但累加器的位数也不要过大, 否则会使得控制反应速度过慢影响对漂移的补偿精

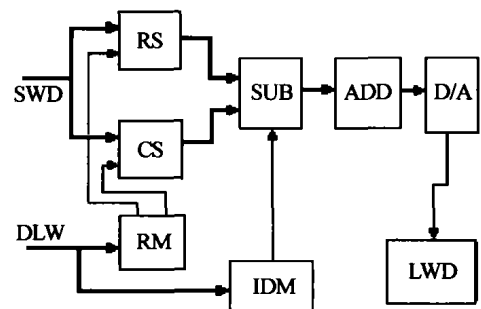


图 3 Y 波导调制度漂移补偿原理框图
Fig. 3 Principle diagram of Y waveguides modulate degree's drift compensation

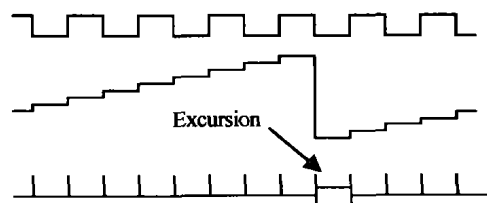


图 4 调制度漂移时的干涉信号及阶梯波波形
Fig. 4 Intervene signal and ladder wave when modulate degree has drifted

度. 采用累加器来生成漂移的控制信号, 不仅可以有效地滤除电路噪声地影响, 而且可以提高对调制度的控制精度. 生成的控制信号可以直接控制阶梯波的 D/A 转换器的转换幅度控制端, 达到对阶梯波幅度的控制目的.

在设定的工作点中, 阶梯波在复位周期产生的相移为 $\Phi_m - 2\pi$, 则复位周期干涉信号的输出值同其它周期一样. 但由三角函数的可知

$$\sin(\Phi_m - 2\pi) = \sin(-\Phi_m - \pi) \quad (5)$$

因此当阶梯波复位周期产生的相移为 $-\Phi_m - \pi$ 时, 复位周期干涉信号的输出值同其它周期也一样, 使得控制闭环仍然可以达到平衡, 而此时陀螺的标度因数却增加一倍. 一般电路中开机时各芯片状态的随机性较大, 无法保证系统一定稳定在相移为 2π 的工作点处, 为保证数字闭环控制工作点稳定, 对阶梯波幅度的控制必须在工作点附近一定的范围之内, 其控制范围应使阶梯波的产生相移的变化量在 $\pm\pi/2$ 之间, 考虑到由 Y 波导调制度漂移产生的相移变化并不大, 因而补偿的控制范围还可以减小, 从而不仅保证闭环控制工作点的稳定, 而且还可以在不变 D/A 转换器精度的条件下, 提高对阶梯波幅度控制精度.

同时根据 Y 波导调制解调过程可看出, 阶梯波在递增情况下, 在复位周期的检测信号为

$$\Delta I = -2A \sin(\Phi_s + \Phi_m + \Delta\Phi_p - 2\pi) \quad (6)$$

式中: $\Delta\Phi_p$ 为 Y 波导漂移产生的相移, 由于 Φ_m 是抵消 Φ_s 的, 因此 $\Phi_m + \Phi_s \approx 0$, 则有

$$\Delta I \approx -2A \sin(\Delta\Phi_p - 2\pi) \approx -2A \Delta\Phi_p \quad (7)$$

而阶梯波在递减情况下则有

$$\Delta I \approx -2A \sin(2\pi - \Delta\Phi_p) \approx 2A \Delta\Phi_p \quad (8)$$

阶梯波在递增和递减情况下所得到的检测信号符号相反, 而所对应的 Y 波导的漂移的大小是同样的, 所以对阶梯波幅度的控制必须在阶梯波递增情况下和阶梯波递减情况下相反, 否则就会产生在阶梯波递增或递减情况下形成正反馈, 导致控制自激, 反而加大了漂移的影响.

3 集成光学器件调制度非线性对陀螺的影响

根据对数字闭环光纤陀螺的调制解调原理的分析可知, 在数字闭环的调制解调方式中, 对相位调制器 Y 波导的稳定性及线性要求非常高, 对于中高精度的光纤陀螺其最小可检测相移在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 弧度, 相位调制器微小的变化都会对陀螺的稳定性产生较大的影响. 因此 Y 波导的调制特性的稳定性将严重影响陀螺的稳定性. Y 波导的调制特性如图

5, 其中 a 为理想特性曲线, b 为有非线性的调制特性曲线, 由于非线性的存在, 使得在阶梯波作用下输出的干涉信号出现一个斜坡如图 6.

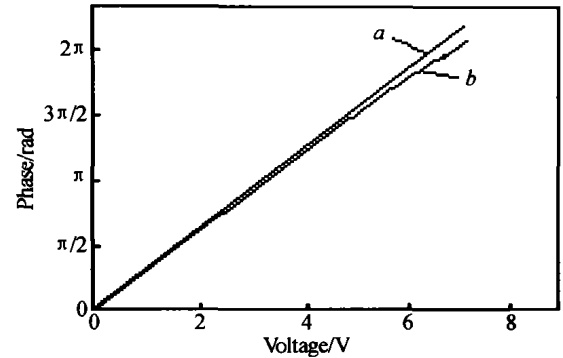


图 5 Y 波导调制特性曲线

Fig. 5 Y waveguide modulating characteristic curve

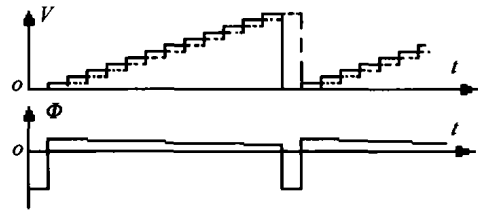


图 6 调制度非线性 Y 波导的相位调制特性曲线

Fig. 6 Non-linear modulating degree Y waveguide phase modulating characteristic curve

在数字闭环光纤陀螺中, 输出的干涉信号为

$$\Delta I \approx K \sin(\Phi_s + \Phi_m) \quad (9)$$

由于 $\Delta I \approx 0$ 因此有

$$\Phi_m \approx -\Phi_s \quad (10)$$

但是由于调制度非线性的影响, 使得 Φ_s 与 Φ_m 不再相等, 出现一个误差相移 $\Delta\Phi$, 则有

$$\Phi_m \approx -\Delta\Phi - \Phi_s \quad (11)$$

由式(10)可见, 虽然由于 $\Delta\Phi$ 的存在使得检测结果出现误差, 但如果 $\Delta\Phi$ 稳定不变, 这个误差只会影响陀螺的零偏, 对陀螺的关键指标精度及稳定性却没有任何影响. 然而如果 Y 波导调制度的非线性不稳定, 将直接影响到陀螺的精度和稳定性, 这种变化虽然很小, 但由于在中、高精度陀螺中, 信号检测精度很高, 调制度非线性很微小的变化也将导致陀螺的检测输出信号出现较大漂移. 造成 Y 波导非线性随温度漂移的主要原因是 Y 波导制作材料及工艺造成的, 具有较大的随机性. 而且 Y 波导非线性产生的误差与同陀螺产生的相移信号混在一起, 很难进行实时的检测, 因而也就很难对调制度非线性造成漂移进行跟踪补偿. 目前还没有更好的方法在电路来补偿调制度非线性不稳定对光纤陀螺稳定性的影响, 一般主要靠提高器件的稳定性来克服. 因此在中、高精度的光纤陀螺中, 必须严格测试 Y 波导调制度非线性随温度的变化特性, 淘汰性能低劣器件, 保证光纤陀螺的稳定. 对无法消除的调制度非线性微小变化带来的漂移, 一般可通过对陀螺系

统温度综合建模来补偿.

4 试验结果

采用 Y 波导作为相位调制器研制出数字闭环光纤陀螺,并对 Y 波导调制度的漂移进行了实时跟踪补偿,消除了调制度漂移产生影响,得到了很好的补偿效果,补偿前后的阶梯波与干涉信号波形图如图 7、图 8,图 9 为陀螺加速转动过程中的波形,由此可看出对调制度漂移的跟踪补偿不受陀螺转动的影响,取得了较好的补偿效果. 同时还对调制度的非线性及非线性随温度变化对光纤陀螺精度的影响进行了详细分析及实验. 调制度非线性测试一般采用直接加入线性阶梯波,检测光纤环输出的干涉信号的基线,基线出现斜坡或弯曲都表示调制度存在非线性,其稳定性可通过不同温度下曲线的变化来测定,实验测试波形如图 10. 通过试验得到了筛选 Y 波导的方法,提高了光纤陀螺的精度及稳定性.

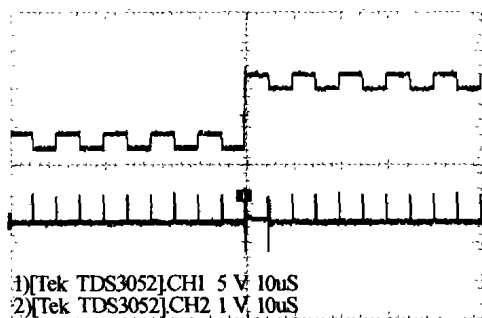


图 7 调制度产生漂移的阶梯波与干涉信号波形
Fig. 7 The result of intervene signal and ladder wave when modulate degree has drifted

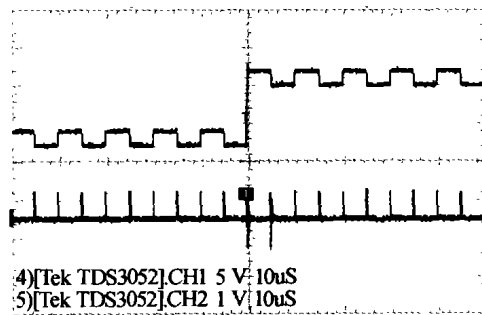


图 8 补偿后的阶梯波与干涉信号波形
Fig. 8 The result of intervene signal and ladder wave after compensation

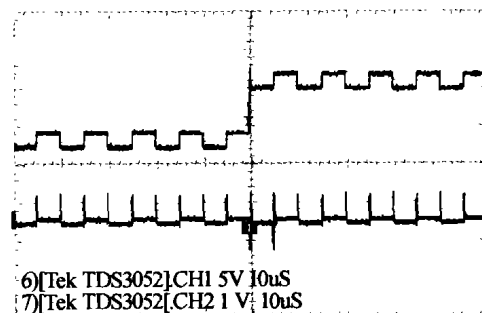


图 9 动态中的阶梯波与干涉信号波形
Fig. 9 Intervene signal and ladder wave in dynamic

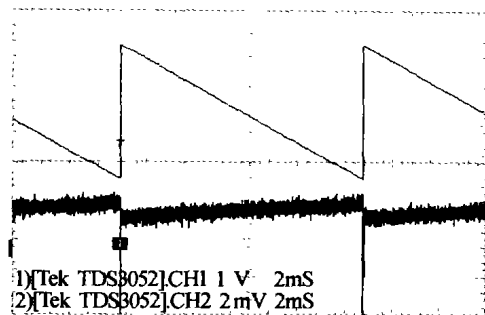


图 10 线性阶梯波与调制度非线性产生干涉信号
Fig. 10 Intervene signal when linear ladder wave and non-linear modulate degree

5 结论

Y 波导是数字闭环光纤陀螺中的核心器件,其性能的优劣将对高精度光纤陀螺的精度及稳定性产生较大的影响. 电光相位调制器是 Y 波导主要功能之一,其调制度随温度变化是铌酸锂晶体材料本身所造的,自身是无法克服的,要提高光纤陀螺的稳定性必须对其进行实时跟踪补偿. 本文着重对 Y 波导的调制度的稳定性及调制非线性进行了详细的分析研究,给出了 Y 波导调制度漂移的补偿方法,并进行了实验,取得较好的实验效果,并研制出漂移小于 $0.02^\circ/h$,标度因数非线性小于 50 ppm 的数字闭环光纤陀螺.

参考文献

- 1 沈映欣. 光纤陀螺用单 Y1. $3\mu\text{m}$ LiNbO₃ 集成光学器件. 半导体光电, 2000, 21(2): 107~110
Shen Y X. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, 21(2): 107~110
- 2 傅元良, 莫波. 光纤陀螺数字闭环处理技术. 战术导弹控制技术, 2003, (1): 37~41
Fu Y L, Mo B. *Tactical Missile Control Technique*, 2003, (1): 37~41
- 3 薛挺, 华勇, 杨德伟, 等. 周期极化铌酸 THz 波产生理论分析. 光子学报, 2004, 33(10): 1181~1186
Xue T, Hua Y, Yang D W. *et al. Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(10): 1181~1186
- 4 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. 光子学报, 2003, 32(9): 1053~1055
Wang D Y, Mao C H, Zhu H, *et al. Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1053~1055
- 5 崔建民, 冯立辉, 崔芳, 等. Ti: LiNdO₃ 波导的折射率计算与测量. 光子学报, 2002, 31(2): 211~216
Cui J M, Fen L H, Cui F, *et al. Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(2): 211~216

The Influence of Integrated Optic Device's Stability for Fibre Optic Gyroscopes

Li Xuyou¹, Wang Changwei², Zou Jibin¹

¹ *Electric Engineering And Automation College , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001*

² *Automation College , Harbin Engineering University , Harbin 150001*

Received date: 2004-11-08

Abstract This paper point out the main reason that integrated optic device's stability influences the stability of fiber optic gyroscopes , though the research of the integrated optic device's characteristic . The method is design to track and compensate instability of the integrated optic device modulate degree in real time . The design is qualified and proved its validity though plentiful experiment . It can improve the stability of fiber optic gyroscopes.

Keywords Modulate degree ; Excursion ; Non-linearing ; Stability



Li Xuyou A professor, was born in 1964. He received Ph. D. degree of navigation, guidance and control from Harbin Engineering University in 2002. From 2003, he has worked as a postdoctoral scholar in Harbin Institute of Technology. His main research interests are fiber optical gyroscope and inertial navigation system of fiber optical gyroscope.