

混合结构的闭环光纤陀螺研究*

叶 炜 周柯江 秦 炜 程上彝 杨国光

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 提出并研制了混合结构的闭环光纤陀螺系统。详细分析了该系统的结构特点、信号检测方法以及反馈信号对系统的影响。该系统具有低损耗、长期低漂移特性。实现了 300 deg./s 的动态范围及小于 300×10^{-6} 的线性误差。

关键词 闭环, 光纤陀螺, 调制器。

1 引 言

光纤陀螺(FOG)作为一种全固态的陀螺,具有质量轻、耗电省、成本低、长寿命、加速度不敏感、体积小、无运动部件、以及优良的偏置稳定性和低刻度因子误差,因此在航空、航天、航海等领域中具有广阔的应用前景^[1]。基于 Sagnac 效应的干涉型光纤陀螺已经开始进入实用化阶段。在光纤陀螺的研制过程中,由于国产 Y 型集成光学器件工艺水平的限制,导致器件损耗大且偏振器消光比不高,相位调制器存在着寄生调制,光学系统损耗在 30 dB 以上,因此实际制作的闭环陀螺系统往往难以达到预期的大动态范围和低刻度因子误差。实验发现:采用单波导调制器和压电陶瓷调制器构成混合光学结构可较好地降低光学系统损耗,提高信号能量。实现了长期低漂移特性,300 deg./s 的动态范围及小于 300×10^{-6} 的线性误差。

2 混合结构的闭环光纤陀螺基本原理

2.1 陀螺方案与信号分析

图 1 为混合结构的闭环光纤陀螺原理框图。 C_1 、 C_2 表示光纤定向耦合器, P 表示光纤起偏器。当入射光 $E_i(t) = E_i \exp(i\omega t)$, 则接收光为:

$$E_o(t) = E_i(1/2) \exp[i\omega(t + \tau_{m1cw} + \tau_s + \tau_f + \tau_{m2cw})] + E_i(1/2) \exp[i\omega(t + \tau_{m1ccw} - \tau_s + \tau_f + \tau_{m2ccw})] \quad (1)$$

式中 τ_f 为光渡越光纤环的时间, Φ 为 Sagnac 相移, τ_s 为 Sagnac 半时间差, 是非互易的, τ_{m1cw} 、 τ_{m1ccw} 为压电陶瓷调制器对顺时针和逆时针光波的时间延时, τ_{m2cw} 、 τ_{m2ccw} 为铌酸锂调制器对顺时针和逆时针的时间延时。此时输出光强可表示为:

$$I_o(t) = |E_o(t)|^2 = |E_i(t)|^2(1 + \cos \Delta\Phi)/2 \quad (2)$$

* 国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1996 年 10 月 31 日; 收到修改稿日期: 1997 年 1 月 2 日

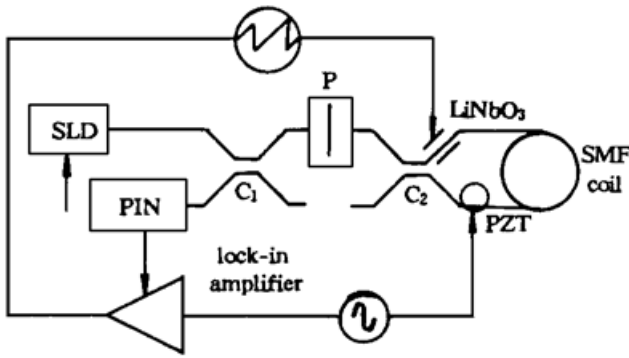


Fig. 1 The scheme of closed loop FOG with hybrid structure

其中： $\Delta\varphi = \varphi_s + \Delta\varphi_{m1} + \Delta\varphi_{m2}$ ， $\varphi_s = \omega 2\tau_s = (2\pi L D / \lambda c) \Omega$ (3)
 $\Delta\varphi_{m1}$ 、 $\Delta\varphi_{m2}$ 为由压电陶瓷和铌酸锂调制器引起的位相差。

设压电陶瓷调制器调制信号是圆频率为 ω_m 的正弦波，则

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{m1} &= \varphi_{m1cw} - \varphi_{m1ccw} \\ &= \mathcal{Q}[\sin \omega_m t - \sin \omega_m(t - \tau)] \\ &\equiv \mathcal{Q}' \cos \omega_m t' \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $t' = t - \tau/2$ ， $\mathcal{Q}' \equiv 2\mathcal{Q} \sin(\omega_m \tau/2)$ 。铌酸锂

调制器调制信号为斜坡(或锯齿)信号，可起到移频作用，用于抵消或部分抵消 Sagnac 相移^[2, 3]，设：

$$\Delta\varphi_{m2} = \varphi_{m2ccw} - \varphi_{m2cw} = \Delta\omega(t - \tau) - \Delta\omega t = -\Delta\omega\tau \quad (5)$$

其中对不同的 φ_s ， $\Delta\omega$ 可以调节，则由式(2)、(3)、(4)、(5)式可得：

$$\frac{2I_0(t)}{|E_i|^2} = i_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} i_k \cos k\omega_m t' \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} i_0 &= 1 + J_0(\mathcal{Q}') \cos(\varphi_s - \Delta\omega\tau) \\ i_{2k} &= (-1)^k J_{2k}(\mathcal{Q}') \cos(\varphi_s - \Delta\omega\tau) \\ i_{2k+1} &= (-1)^{k+1} J_{2k+1}(\mathcal{Q}') \sin(\varphi_s - \Delta\omega\tau) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 J_i 为 i 阶第一类贝塞耳函数。则解调 ω_m 的前二次谐波为：

$$S_1(t) : -J_1(\mathcal{Q}') \sin(\varphi_s - \Delta\omega_m \tau) \cos \omega_m t' \quad (8)$$

$$S_2(t) : -J_2(\mathcal{Q}') \cos(\varphi_s - \Delta\omega_m \tau) \cos 2\omega_m t' \quad (9)$$

2.2 混合结构原理

在闭环光纤陀螺研制过程中，发现采用传统的国产 Y 型集成光学调制器，给系统带来几方面的不利影响。由于铌酸锂(LiNbO₃)波导与光纤耦合折射率不匹配，国产器件耦合效果欠佳，导致了铌酸锂调制器的损耗较大，而 Y 型铌酸锂集成光学调制器是被串在光路之中，沿顺时针及逆时针传播的两束光都将两次经过 Y 型铌酸锂调制器，这将给光纤陀螺系统带来 10 dB 以上的损耗，使信号能量大大降低，也降低了系统的灵敏度；同时由于集成在国产铌酸锂调制器中的起偏器的质量不如分立元件质量高，因此由铌酸锂调制器组成的系统性能不如分立元件系统。考虑到以上两方面的不利因素，采用单波导铌酸锂调制器作为斜坡信号相位调制器，沿顺时针及逆时针传播的两束光只经过铌酸锂调制器一次，这样可以比 Y 型铌酸锂调制器损耗降低一倍以上，结合分立元件的起偏器，同时以压电陶瓷调制器作为偏置调制器构成混合结构的闭环系统，可以提高信号能量和系统的灵敏度。

2.3 信号锁相检测方法

在图 1 所示光纤陀螺系统中，若考虑到调制器存在寄生调制，在 $\omega_m \tau \ll \pi$ 的条件下，(8) 式中 $S_1(t)$ 即基频分量应修改为：

$$I_{\omega_m} \propto -J_1(\mathcal{Q}') \sin(\varphi_s - \Delta\omega_m \tau) \cos \omega_m t' + K_n \sin \omega_m t' \quad (10)$$

其中 K_n 正比于噪声系数，从(10)式可以看出，信号的组成为相互正交的两项，前者为信号项，后者为噪声项。锁相检测的参考信号采用互相正交的两个弦波： $x = \cos(\omega_m t + \alpha)$ ， $y =$

$\sin(\omega_m t + \alpha)$, 其与(10)式进行相关检测, 经低通滤波器后输出的直流信号为:

$$X = [-J_1(\Phi) \sin(\Phi - \Delta\omega_m \tau_f) \cos \alpha + K_n \sin \alpha]/2 \quad (11)$$

$$Y = [J_1(\Phi) \sin(\Phi - \Delta\omega_m \tau_f) \sin \alpha + K_n \cos \alpha]/2 \quad (12)$$

令 $\Delta\omega_m \tau_f = \Phi_k$, 调整 $\alpha = 0$, 则:

$$X = -[J_1(\Phi) \sin(\Phi - \Phi_k)]/2, \quad Y = K_n/2 \quad (13)$$

这样, 可以使信号与噪声分离, 使信噪比提高。并且通过调整 α , 可以消除寄生调制带来的误差项, 从而降低系统的零漂。

2.4 反馈环节的斜坡信号分析

在闭环光纤陀螺系统中, 作为反馈环节的斜坡信号(锯齿波)将直接影响到光纤陀螺的动态范围、刻度因子的线性度^[4]。

设 τ_f 是光渡越光纤环的时间, 由(8)式可知: 如果 $\Phi - \Delta\omega_m \tau_f \rightarrow 0$, 输出 $S_1(t) \rightarrow 0$ 。因此当 $\Phi \neq 0$ (即陀螺转动时), 调整 $\Delta\omega_m \tau_f$ (即调整斜坡信号频率)保持输出 $S_1(t) \rightarrow 0$, 则转动速率与斜坡信号频率有一一对应关系。当 Sagnac 相移 $0 < \Phi < 2\pi$ 时, 斜坡信号最大频率应大于 $1/\tau_f$, 才可以确保在 2π 的范围内抵消 Sagnac 相移, 即频率范围决定了光纤陀螺的动态范围。

斜坡信号的幅度 (V) 会影响输出与转速的线性关系。理论和实验可以证明: 频率与转速的线性误差和斜坡信号幅度偏离调制器半波电压的误差电压的二次方成正比。因此, 当系统刻度因子的非线性度为 $\sim 10^{-5}$ 时, 此误差电压偏离不应超过 10^{-3} 。

斜坡信号的下降沿(回扫时间)对系统线性也有较大影响。下降沿时间越长, 对系统影响就越大。理论上要求斜坡信号回扫时间为零。这一要求工程上是无法达到的。当不考虑反馈部分时, 系统为一开环系统, 输出关系为: $X = A \sin \Phi$, 而当系统静止, 加入锯齿波反馈, 调整幅度为调制器半波电压时, 改变频率, 同样在输出端产生一正弦输出: $X = A \sin(\Phi - \Phi_k)$ 。在不转动的情况下($\Phi = 0$), 改变频率即改变反馈相位(Φ_k 改变), 测试的曲线如图 2 所示。

图 2(a)、(b)、(c) 分别为下降沿占 5%、20%、30% 的斜坡信号在上述开环系统中的测试结果。理想的输出曲线应为正弦曲线。可以看出: 下降沿占 5% 的输出曲线最接近正弦, 此时系统的线性度最佳, 20% 次之, 而 30% 最差。所以下降时间越大, 输出偏离正弦越大, 线性度变差。实际制作的斜坡信号发生器频率范围为 0.05 Hz~ 250 kHz、幅度稳定误差小于 5%、下降沿小于 16 ns。

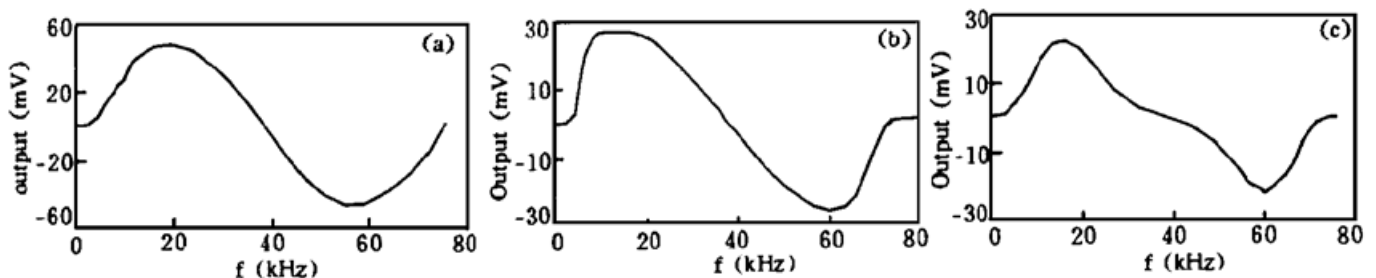


Fig. 2 Relation between frequency and output. Fall-time are 5%, 20%, 30% respectively

3 陀螺信号测试结果

如图 1 所示系统的零漂曲线如图 3 所示, 达到 0.5 deg./h。图 4 为陀螺转速和系统输出频率的关系曲线。由于实验室条件所限, 转台最大速率只达到 150 deg/s, 因此 150~ 300 deg/s 的范围内的测试数据是按照 2.4 节中所述的方法(加入斜坡信号反馈形成一开环系

统)、并对其输出数据用反正弦计算及最小二乘法拟合后所得结果。

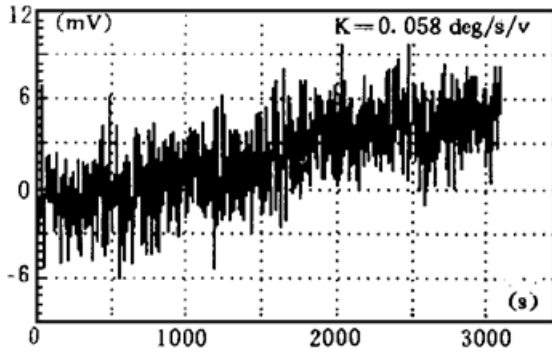


Fig. 3 Long-term drift of FOG

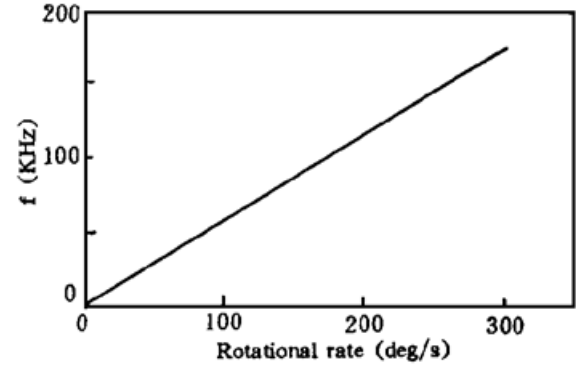


Fig. 4 Relation between frequency and rotation rate

结 论 在分析陀螺信号特征及器件特性的基础上, 提出混合结构的光学系统及信号锁相检测方法, 以提高信号能量, 改善系统信噪比; 同时详细分析了斜坡信号频率、幅度、下降沿对系统动态范围、刻度因子线性度的影响以提高斜坡信号质量。因此基于上述结构的闭环光纤陀螺系统具有低损耗、长期低漂移特性及 300 deg/s 的动态范围和小于 300×10^{-6} 的线性误差。

参 考 文 献

- [1] W. Auch, Progress in fiber optic gyro development and application. *Proc. SPIE*, 1993, **2070** : 104~112
- [2] C. J. Kay, Serrrodyne modulator in a fiber optic gyroscope. *IEE Proc. Part. J*, 1985, (5) : 259~ 264
- [3] R. Kaku, Amplitude variation effects of phase modulators in a serrrodyne fiber-optic gyroscope. *Proc. SPIE*, 1989, **1169** : 323~ 427
- [4] R. K. Bartman, B. R. Youmans, P. M. Salomon *et. al.*, Design and per formance of a fiber optic gyroscope using integrated optics. *Proc. SPIE*, 1989, **1169** : 310~ 322

Close Loop Fiber Optic Gyroscope with Hybrid Structure

Ye Wei Zhou Kejiang Qin Wei Cheng Shangyi Yang Guoguang

(The State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 31 October 1996; revised 2 January 1997)

Abstract A closed loop fiber optic gyroscope (FOG) system with hybrid structure is proposed and developed. The structure characteristic of the system and the signal detecting method and the influence of the system from feedback signal are analyzed. This system possesses low loss and long-term drift. The 300 deg/s dynamic range and less than 300×10^{-6} scale factor error can be realized.

Key words closed loop. fiber optic gyroscope. modulator.