

文章编号: 0258-7025(2004)07-0848-03

相位调制非线性对开环光纤陀螺工作点 测量与信号解调的影响

谢元平, 宋章启, 姚 琼, 胡永明

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 在全光纤开环光纤陀螺中, 利用压电陶瓷调制器可以为光纤陀螺提供互易性正弦相位偏置, 但相位调制中的寄生非线性会对陀螺测量产生影响。从理论上给出了二倍频非线性相位调制情况下开环光纤陀螺输出信号的一、二、四次谐波表达式, 分析了相位调制非线性对陀螺工作点测量与信号解调的影响, 实验验证了相关结果。实验结果与理论分析表明在陀螺应用中必须采取措施抑制非线性相位调制的幅度。

关键词 光电子学; 相位调制非线性; 光纤陀螺; 工作点

中图分类号 V241.5⁺58; O 437 **文献标识码** A

Influence of Phase Modulator Non-Linearities on Measurement of Work Point and Signal Demodulation in Open-Loop Fiber Optic Gyroscope

XIE Yuan-ping, SONG Zhang-qi, YAO Qiong, HU Yong-ming

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Piezoelectric transducer (PZT) are often used for providing reciprocal sine phase modulation in all-fiber optic gyroscope (FOG) and its non-linearities can affect the accuracy of FOG. In this article, expressions of the first, second and fourth harmonic components of the FOG signal are derived theoretically providing that the second harmonic phase modulation exists in open loop FOG. Influences of phase modulator non-linearities on measurement of work point and signal demodulation are analyzed theoretically and tested by experiments. Both experimental results and theoretic analyses indicate that steps must be taken to decrease the amplitude of non-linearities in phase modulation.

Key words optoelectronics; phase modulator non-linearities; fiber optic gyroscope; work point

1 引 言

光纤陀螺作为角速度传感器具有其独特的优势, 是目前国际上重点研究的光纤传感器之一。全光纤的开环光纤陀螺是干涉型光纤陀螺中应用较为成熟的方案^[1~3], 常用的信号解调方案是利用压电陶瓷调制器为光纤陀螺提供互易性相位偏置, 从探测器输出的陀螺信号^[1]

$$I(t) = P_0 \{1 + \cos[\Delta\Phi_s + \phi_m \sin(\omega_m t)]\} \quad (1)$$

中提取一次、二次、四次谐波幅度

$$S_1 = P_0 J_1(\phi_m) \sin(\Delta\Phi_s) \quad (2)$$

$$S_2 = P_0 J_2(\phi_m) \cos(\Delta\Phi_s) \quad (3)$$

$$S_4 = P_0 J_4(\phi_m) \cos(\Delta\Phi_s) \quad (4)$$

其中, P_0 为光功率, $\phi_m \sin(\omega_m t)$ 为压电陶瓷相位调制器产生的正弦相位调制, ϕ_m 为相位调制深度或者叫陀螺的工作点, $\Delta\Phi_s$ 为输入的角速度引起的陀螺 Sagnac 相移, $\Delta\Phi_s = K \cdot \Omega$ (Ω 为角速度; K 为陀螺刻度因素)。转速信号 $\Delta\Phi_s$ 可根据下式得出^[2]

$$\Delta\Phi_s = \arctan \left[\frac{J_2(\phi_m) S_1}{J_1(\phi_m) S_2} \right] \quad (5)$$

式中 $J_2(\phi_m)/J_1(\phi_m)$ 不能直接测得, 要通过其他方法来获得。一种方法是将在预先设定的某一特定值上, 以该值为贝塞尔函数的宗量计算得到; 另一种方法是通过 $S_4/S_2 = J_4(\phi_m)/J_2(\phi_m)$ 计算得到 ϕ_m , 再计算 $J_2(\phi_m)/J_1(\phi_m)$ 。 ϕ_m 的测量是否准确, 对陀螺信号的解算有着直接的影响。

收稿日期: 2003-01-14; 收到修改稿日期: 2003-06-13

作者简介: 谢元平(1971—), 男, 主要从事光电子技术领域的研究工作。E-mail: xyuanping@hotmail.com

为了设计一种高性能的光纤陀螺，在解调陀螺信号时必须考虑各种因素对陀螺信号解算的影响。由调制器引入的非线性相位调制影响 ϕ_m 测量的准确性，这种影响是如何以及在多大程度上影响陀螺工作点的测量必须加以考虑^[4,5]。本文从理论上分析了二倍频非线性相位调制对陀螺工作点测量与信号解调的影响，通过数值模拟与实验结果的对比，验证了理论分析的正确性。

2 理论分析

在理想情况下，对陀螺的相位调制只有基频项 $\Delta\phi_m(t) = \phi_m \sin(\omega_m t)$ ，但是由于施加在调制器上电子信号发生器的非线性、调制器本身缺陷引起的非线性效应等原因，使得光纤陀螺在调制频率的倍频上存在一定幅度的相位调制。考虑最低阶的近似情况，陀螺中存在二倍频相位调制 $\phi_{m2} \sin(2\omega_m t - \theta)$ ， ϕ_{m2} 为二倍频相位调制的幅度，探测器输出的陀螺信号为^[4]

$$I(t) = P_0 \{ 1 + \cos[\Delta\Phi_s + \phi_m \sin(\omega_m t) + \phi_{m2} \sin(2\omega_m t - \theta)] \} \quad (6)$$

在实际应用中一般有 $|\phi_{m2}| \ll 1$ ，取一阶近似，按贝塞尔函数展开，提取信号的一、二、四次谐波分别为

$$S_1 = -2P_0 J_1(\phi_m) \sin\Delta\Phi_s \sin\omega_m t - 2P_0 J_1(\phi_{m2}) [J_1(\phi_m) - J_3(\phi_m)] \cos\Delta\Phi_s \sin\theta \sin\omega_m t - 2P_0 J_1(\phi_{m2}) [J_1(\phi_m) + J_3(\phi_m)] \cos\Delta\Phi_s \cos\theta \cos\omega_m t \quad (7)$$

$$S_2 = 2P_0 J_2(\phi_m) \cos\Delta\Phi_s \cos 2\omega_m t - 2P_0 J_1(\phi_{m2}) [J_0(\phi_m) - J_4(\phi_m)] \sin\Delta\Phi_s \cos\theta \sin 2\omega_m t + 2P_0 J_1(\phi_{m2}) [J_0(\phi_m) + J_4(\phi_m)] \sin\Delta\Phi_s \sin\theta \cos 2\omega_m t \quad (8)$$

$$S_4 = 2P_0 J_4(\phi_m) \cos\Delta\Phi_s \cos 4\omega_m t - 2P_0 J_1(\phi_{m2}) [J_2(\phi_m) - J_6(\phi_m)] \sin\Delta\Phi_s \cos\theta \sin 4\omega_m t + 2P_0 J_1(\phi_{m2}) [J_2(\phi_m) + J_6(\phi_m)] \sin\Delta\Phi_s \sin\theta \cos 4\omega_m t \quad (9)$$

分析以上三式，当陀螺工作在低转速下时， $\sin\Delta\Phi_s \approx 0$ ， $\cos\Delta\Phi_s \approx 1$ ，二倍频非线性相位调制对二、四次谐波几乎没有影响，即陀螺工作点的计算是准确的；但是对陀螺信号一次谐波的影响最大，而且随着 θ 的变化这种影响也会周期性变化，从而导致陀螺输出零偏的不稳定；随着转速的增加，二倍频相位调制对一次谐波的影响逐渐减小，当 $\Delta\Phi_s$ 趋于 $\pi/2$ 时， $\sin\Delta\Phi_s \approx 1$ ， $\cos\Delta\Phi_s \approx 0$ ，二倍频相位调制对一次谐波的测量几乎没有影响，但对二、四次谐波的

影响却大大增加，此时计算得到工作点与实际工作点偏差较大，虽然在实际应用中 $|\Delta\Phi_s| < \pi/2$ ，但工作点测量的误差也不能忽视。

为了更加直观地了解二倍频非线性相位调制是如何以及在多大程度上影响开环光纤陀螺的工作点测量以及信号解调，根据式(6)，按照实际的信号解调方法，在计算机上进行了数值模拟。不考虑其他因素的影响，陀螺工作点 $\phi_m = 1.84$ ，并保持恒定，调制信号基频为 10 kHz，采样频率为 200 kHz，取二倍频相位调制系数 $\phi_{m2} = 0.001\phi_m \Delta\Phi_s$ 在 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 之间变化，利用数字相关检测技术从模拟陀螺信号中提取一、二、四次谐波的幅值，分别计算陀螺的工作点和 Sagnac 相移，与输入值进行比较。

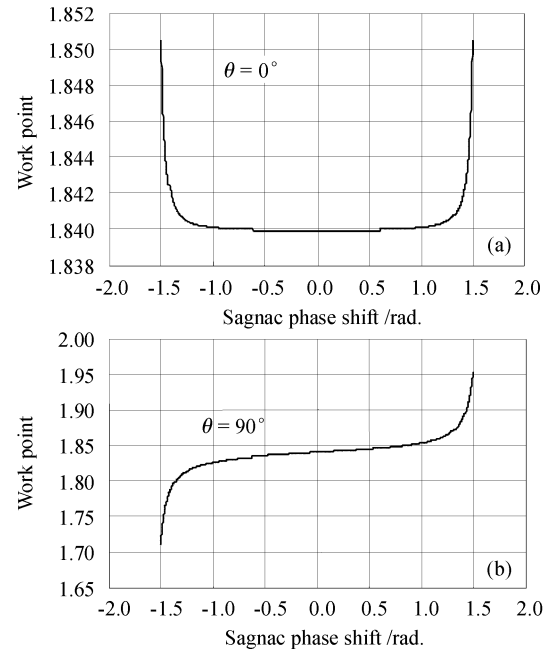


图 1 测量工作点随 Sagnac 相移(转速)的变化
Fig. 1 Measured work point vs Sagnac phase

图 1(a), (b) 分别为 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 两种极端情况下，解算出的陀螺工作点与输入 Sagnac 相移的关系。图 2(a), (b) 给出了两种情况下解算出的 Sagnac 相移与输入的 Sagnac 相移的误差曲线。比较结果可以看出：

1) 不同 θ 角对工作点测量影响的趋势不同、影响的程度也不同。从图 1 中可以看出当 $\theta = 0^\circ$ 时，对工作点测量的影响明显小于 $\theta = 90^\circ$ 的情况。模拟表明 θ 越接近 0，二倍频非线性调制对工作点的影响越小，故在选择陶瓷材料时应考虑使用 θ 值小的材料；
2) 非线性相位调制对最终的 Sagnac 相移解算有很大影响。图 2 表明 $\theta = 0^\circ$ 时解算 Sagnac 相移与实

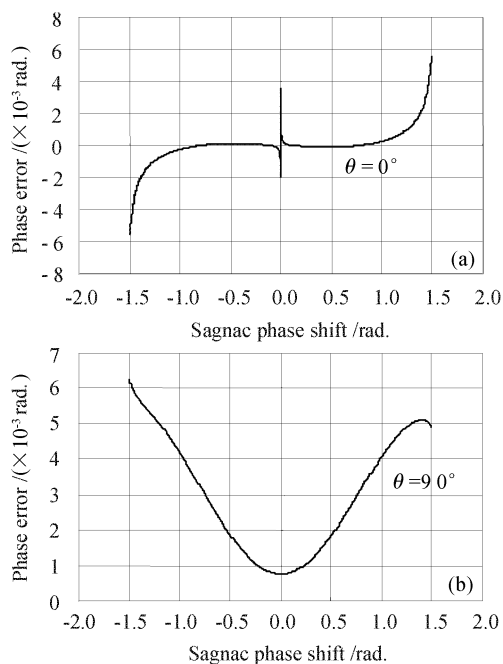


图2 解算 Sagnac 相移与实际 Sagnac 相移之差随 Sagnac 相移(转速)的变化

Fig. 2 Measured phase error vs Sagnac phase shift

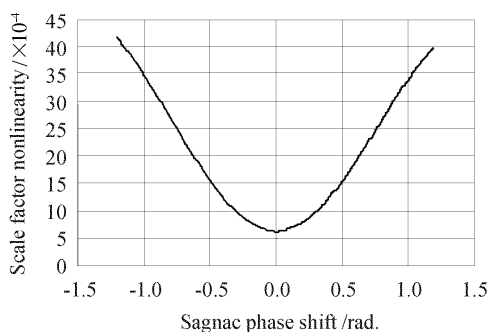


图3 由非线性相位调制引起的刻度因素非线性

Fig. 3 Scale factor nonlinearity vs Sagnac phase shift

际 Sagnac 相移之差明显小于 $\theta = 90^\circ$ 时情形;3) 非线性相位调制引起的解算相差导致陀螺刻度因素非线性与正反不对称度增加。图 3 给出了 $\theta = 90^\circ$, Sagnac 相移在 ± 1.2 rad 之间变化时因非线性相位调制导致的刻度因素非线性。由于该刻度因素非线性超出了陀螺应用中的误差,因此必须消除非线性相位调制的影响。

3 实验结果与结论

实验中采用了多个光纤陀螺,这些陀螺的信号

处理部分已经全部数字化,可以直接向计算机输出工作点与转速(或 Sagnac 相移)。将陀螺安装在转台上,陀螺开机稳定一段时间后,保持环境相对稳定,转台从静止状态以 $5^\circ/\text{s}$ 加速到正向某一大角速度(该角速度由陀螺动态范围决定),然后减速到 0,再反向加速、减速,记录整个加速、减速过程中陀螺输出的工作点和角速度,可以得到类似图 1,2 的图形,这说明实验结果与理论分析是吻合的。同时,实验还表明,由于二倍频非线性相位调制的影响,在陀螺 Sagnac 相移达到 1 rad 时,测量转速与实际转速相对误差就超过了 2×10^{-3} ,不能满足应用需要。通过适当的信号处理方法,可以大大减小二倍频非线性相位调制的影响。图 4 是通过信号处理消除主要的非线性相位调制影响后,一光纤陀螺的刻度因素测量结果。由图可见在 $\pm 300^\circ/\text{s}$ 大转速时,相对误差或刻度因素非线性度仍小于 3×10^{-4} ,大大改善了陀螺的性能。

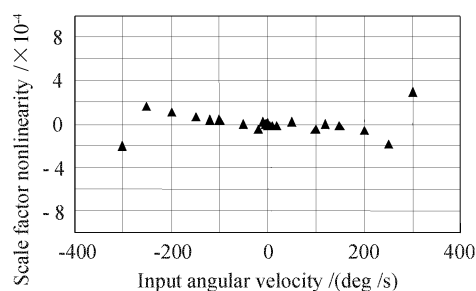


图4 消除非线性相位调制影响后的陀螺刻度因素非线性

Fig. 4 Scale factor nonlinearity after phase modulator nonlinearity being removed

参 考 文 献

- 1 Leferve Herve. The Fiber-optic Gyroscope [M]. Norwood, MA: Artech House, 1993. 32~33
- 2 Chang Shengli, Song Zhangqi, Song Jun *et al.*. The design of signal processing in open-loop fiber optic gyroscope [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3):48~50
常胜利,宋章启,宋俊等.实用中低精度光纤陀螺的信号处理设计[J].*激光杂志*, 2002, **23**(3):48~50
- 3 Sheng Zhongyan, Zhou Kejiang. A differential optic phase tracing method in fiber optic gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):352~356
盛钟延,周柯江.光纤陀螺中一种光相位差跟踪方法[J].*光学学报*, 2001, **21**(3):352~356
- 4 Sidney L. A. Carrara. Drift caused by phase modulator nonlinearities in fiber gyroscopes [C]. *SPIE*, 1990, **1267**:187~191
- 5 B. Y. Kim, H. C. Lefevre, R. A. Bergh *et al.*. Response of fiber gyros to signals introduced at the second harmonic of the bias modulation frequency [C]. *SPIE*, 1983, **425**:86~89