

## The Research of Modulation Technology Detected Signal for the Resonator Gyro \*

ZHANG Jianhui, XU Pengfei, MA Kezhen, XUE Chenyang, ZHANG Wendong, YAN Shubin \*

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Resonator Fiber Optic Gyro (R-FOG) is a novel optical sensor whose resonant frequency is changed due to the Sagnac effect. The different influence of three kinds of waveforms on the SNR of resonant signal is analyzed including the reset pulse problem in sawtooth wave and transient response in triangle wave. The sine wave is chosen as the optimized modulation signal by improving the SNR of system design. The demodulation curve is obtained by sine wave modulation and demodulation for Pound-Drever-Hall (PDH) method which proved the feasibility and superiority of sine wave modulation technique in R-FOG.

**Key words:** fiber optics; R-FOG; phase modulation; signal to noise ratio; demodulation curve

EEACC: 2370; 2800; 5060

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.009

## 谐振式陀螺检测信号调制技术研究 \*

张建辉, 徐鹏飞, 马可贞, 薛晨阳, 张文栋, 闫树斌 \*

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 谐振式光纤陀螺 R-FOG (Resonator Fiber Optic Gyro) 是基于 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测试旋转角速率的一种新型传感器。实验对比了三种调制波形对谐振信号信噪比的影响, 分析了锯齿波调制中复位脉冲问题以及三角波调制中的瞬态响应问题, 确定了正弦波为最佳调制波形, 提高了谐振信号的信噪比。在陀螺系统的锁频环路中, 通过正弦波调制、解调得到了用于边带锁频 (PDH) 技术稳频的解调曲线, 验证了正弦波调制方法的可行性及优越性。

**关键词:** 光纤光学; 谐振式陀螺; 相位调制; 信噪比; 解调曲线

中图分类号: V241.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-0946-04

谐振式陀螺在高精度、集成化和小型化方面具有潜在的优势, 有望成为新一代光学惯性器件<sup>[1]</sup>。基于 Sagnac 效应, 精确检测由于旋转引起的谐振频差是谐振式陀螺系统实现的关键<sup>[2-4]</sup>。随着波导光学及单片集成技术的发展, 小型化、集成化的陀螺系统成为研究热点, 需要检测的谐振频差极其微小, 对陀螺微弱信号的精确检测提出了更高的要求。

对于直径 2.5cm 的波导谐振腔, 为获得 1°/h 的分辨率, 需要检测 0.05 Hz 的频差, 直接检测很困难。需要对进入谐振腔的光信号进行调制, 利用解调信号通过陀螺系统中的锁频环路实现谐振点的跟踪与锁定, 进而实现谐振频差的精确检测。调制技术对谐振点跟踪锁定效果、信号检测精度以及陀螺灵敏度均有重要影响, 研究最佳调制方案是提高陀螺性能的关键环节。

1981 年, G. A. Sanders 和 S. Ezekiel 等在谐振式陀螺系统中采用声光调制器 AOM (Acousto-Optical Modulator) 实现光信号的频率调制, 而 AOM 所需调制

信号频率较高, 同时体积较大, 不利于小型化和集成化<sup>[5]</sup>。1997 年, K. Hotate 等人提出了基于铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 相位调制器的数字锯齿波调制方案<sup>[6]</sup>, 基于 LiNbO<sub>3</sub> 材料的相位调制器在单片集成与小型化、批量化生产等方面有显著优势, 成为陀螺系统中首选的光信号处理器件。而数字锯齿波调制方案存在两个主要问题: 一方面复位脉冲导致信号信噪比降低; 另一方面数字锯齿波阶梯持续时间必须与光在谐振腔中传播一圈的时间相同, 这在以波导谐振腔为核心的微光学谐振式陀螺系统中难度极大。2007 年, 马慧莲等提出了三角波调制方案<sup>[7-8]</sup>, 消除了复位脉冲的影响, 取得了良好的调制效果, 而三角波调制中存在的瞬态响应需要借助额外的信号调理电路进行抑制和处理<sup>[9]</sup>, 增加了系统设计的复杂度。本文对线性斜波调制方法进行了对比分析, 提出并采用了正弦波调制方案, 在陀螺系统中进行了试验, 得到了用于边带锁频技术稳频的解调曲线, 验证了正弦波调制方法的可行性及优越性。

项目来源: 国家自然科学基金项目(91123036, 61178058, 61275166); 山西省自然科学基金项目(2010011003-2)

收稿日期: 2013-03-20 修改日期: 2013-06-09

## 1 谐振式陀螺系统结构与传输特性

开环谐振式陀螺系统如图 1 所示,由激光器发出的光经过 50:50 的光纤分束器 C0 分成功率相等的两束光,这两束光分别经过相位调制器 PM1 和 PM2 进行调制后通过耦合器 C1 和 C2,再由耦合器 C3 进入光纤环形谐振腔,沿顺时针和逆时针的两个方向传播,经过谐振腔之后分别由光电探测器 PD1 和 PD2 转化成电信号输出。然后,通过锁相放大器 (Lock-in) 和解调电路 (Demodulation Circuit) 对光电探测器 PD1 和 PD2 测得的信号进行解调,利用 PID 锁频电路实现对谐振点的跟踪锁定。大体上系统包含锁频环路与解调环路两部分,锁频环路通过调制解调实现对谐振点的跟踪锁定,为陀螺信号检测提供稳定的频率参考。解调环路通过信号解调输出正比于旋转角速度的陀螺信号。调制技术是陀螺信号处理的核心技术,影响环路锁频的精度和信号解调输出的灵敏度。

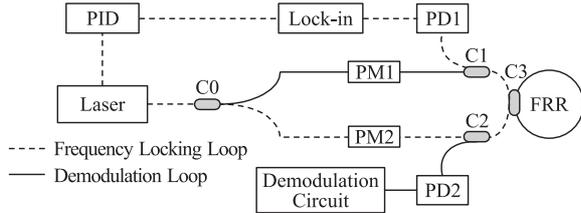


图 1 谐振式陀螺系统结构示意图

对于系统中的光纤环形谐振腔,光信号从输入端口经过耦合器进入谐振腔,在谐振腔中传播数圈后在输出端形成多光束叠加输出<sup>[10]</sup>。设谐振腔的输入光场为:

$$E_{\text{Laser}} = E_0 e^{i(\omega t + \varphi_0)} \quad (1)$$

式中,  $E_0$  为光场幅度,  $\varphi_0$  为初始相位。

根据光波场叠加原理,谐振腔的输出光场可以表示为:

$$E_{\text{out}} = E_0 e^{i(\omega t + \varphi_0)} \left[ U - R \sum_{n=1}^{\infty} Q^{n-1} e^{-i(n\omega\tau)} \right] \quad (2)$$

式中,  $U = (1 - k_c)^{1/2} (1 - \alpha_c)^{1/2}$  为直接耦合输出系数;  $R = k_c (1 - \alpha_c) (1 - \alpha_l)^{1/2}$  为交叉耦合系数;  $Q = (1 - k_c)^{1/2} (1 - \alpha_c)^{1/2} (1 - \alpha_l)^{1/2}$  为单圈传播系数,  $\tau$  为光在谐振腔中传播一圈所需要的时间,  $k_c$  为耦合系数,  $\alpha_c$  为耦合器的损耗系数,  $\alpha_l$  为光纤环的损耗系数。

则谐振腔的输入光场与输出光场之间的关系可以表示为:

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{Laser}}} = U - R \frac{1 - Q^n e^{-i(n\omega/\text{FSR})}}{1 - Q e^{-i(\omega/\text{FSR})}} e^{-i(\omega/\text{FSR})} \quad (3)$$

## 2 正弦波调制与仿真

在锁频环路中,采用频率为  $f_m$  的正弦波作为调

制信号,则激光通过相位调制器 PM2 后,输出光场可表示为:

$$E_{\text{PM}} = (1 - \alpha_{\text{PM}})^{1/2} E_0 e^{i(\omega t + \varphi_0 + B \sin \Omega t)} \quad (4)$$

式中,  $B$  为相位调制系数。对式 (4) 进行贝塞尔函数展开得到:

$$E_{\text{PM}} = (1 - \alpha_{\text{PM}})^{1/2} E_0 e^{i(\omega t + \varphi_0)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(B) e^{i(n\Omega t)} \quad (5)$$

根据光场叠加方法,谐振腔的输出光场可以表示为:

$$E_{m\text{-out}} = (1 - \alpha_{\text{PM}})^{1/2} E_0 e^{i(\omega t + \varphi_0)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(B) e^{i(n\Omega t)} H(\omega + n\Omega) \quad (6)$$

这里忽略高阶边频,取贝塞尔函数的 -1、0 和 1 阶边频进行近似运算,则上式可以简化为<sup>[11]</sup>:

$$E_{m\text{-out}} \approx (1 - \alpha_{\text{PM}})^{1/2} E_0 e^{i\varphi_0} [J_0(B) H(\omega) e^{i\omega t} + J_1(B) H(\omega + \Omega) e^{i(\omega + \Omega)t} + J_{-1}(B) H(\omega - \Omega) e^{i(\omega - \Omega)t}] \quad (7)$$

对上式求模平方,可以得到对应的输出光强为:

$$I = (1 - \alpha_{\text{PM}}) (I_0 |H(\omega)|^2 + I_1 [ |H(\omega + \Omega)|^2 + |H(\omega - \Omega)|^2 ] + 2(P_0 P_1)^{1/2} \{ \text{Re} [ H(\omega) H^*(\omega + \Omega) - H^*(\omega) H(\omega - \Omega) ] \cos \Omega t + I_m [ H(\omega) H^*(\omega + \Omega) - H^*(\omega) H(\omega - \Omega) ] \sin \Omega t \} + F(2\Omega)) \quad (8)$$

式中,正弦项描述色散特性,余弦项描述吸收特性。当调制频率较低时 ( $\Omega \geq \text{FSR}/F$ ,  $F$  为谐振谱线的精细度),呈现吸收特性;当系统调制频率较高时 ( $\Omega \leq \text{FSR}/F$ ),呈现色散特性。对于长度为 1.1 m、 $k_c$ 、 $\alpha_c$ 、 $\alpha_l$  分别为 5%、7%、1.2% 的谐振腔,当调制频率为 900 kHz 时仿真的解调曲线如图 2(a) 所示。当调制频率增加为 20 MHz 时调制曲线出现边带,其解调曲线如图 2(b) 所示。

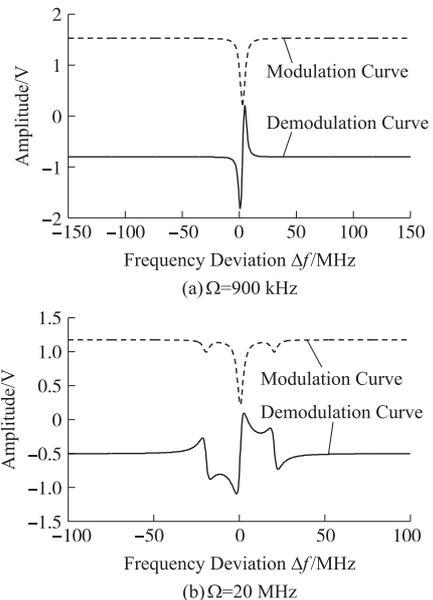


图 2 调制频率为 900 kHz 和 20 MHz 时的仿真解调曲线

### 3 实验与分析

在图 1 所示的系统中,激光器采用 NKT Photonics 1 550 nm 超窄线宽激光器(线宽小于 1 kHz),相位调制器 PM 为 Thorlabs LN65S 10 GHz 相位调制器,光纤环形谐振腔由耦合系数为 5%、长度为 1.1 m 的 2×2 耦合器构成,锁相放大器 Lock-in 采用斯坦福 SR844 高频(20 kHz ~ 200 MHz)数字锁相放大器。在锁频环路中通过对 PM2 施加不同的调制信号分析测试了线性斜波与正弦波的调制特性,确定了正弦波调制方案,并得到了用于边带锁频技术稳频的解调曲线,为利用 PID 控制电路进行谐振点的跟踪与锁定提供了前提条件。

#### 3.1 线性斜波调制实验

在图 1 所示的锁频环路中,采用峰峰值为 4 V,频率为 100 kHz 的锯齿波进行调制,在探测器 PD1 处得到的谐振谱线如图 3 所示。锯齿波复位脉冲的影响导致谐振信号出现大量毛刺,信噪比大大降低。在复位过程中,调制信号变化率很大,使光信号发生较大的频移,从而在谐振谱线中产生大量毛刺噪声。如图 4,实验测试了 100 kHz、900 kHz 和 5 MHz 的锯齿波在不同幅值时,谐振信号的信噪比变化情况。对于特定频率的锯齿波,其复位时间相同,随着信号幅值的增大,复位过程的变化率变大,导致毛刺噪声增大,谐振信号信噪比下降。而对于不同频率的锯齿波,复位时间与信号发生器的性能有关,不一定相同。因此,调制频率与信噪比之间的关系并不确定。

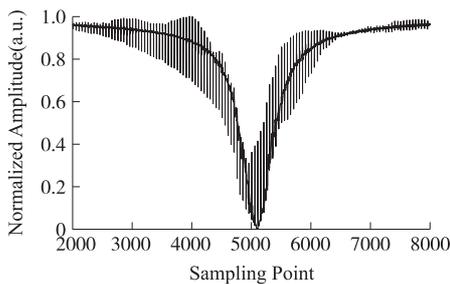


图 3 锯齿波调制谱线图

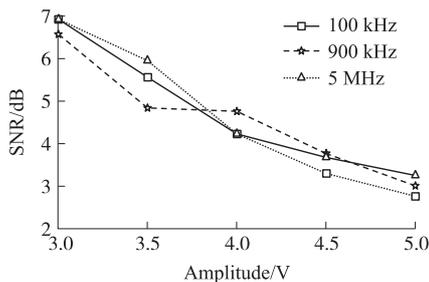
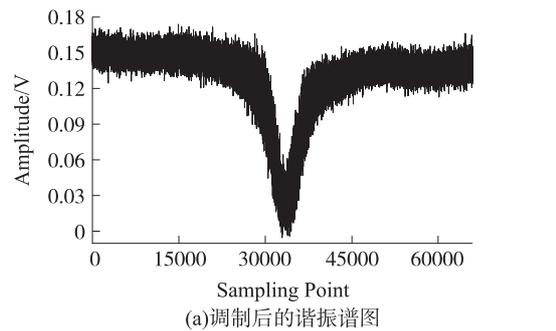


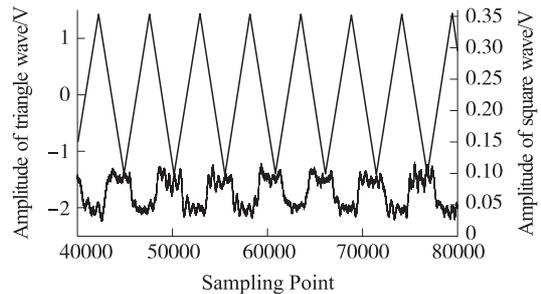
图 4 信噪比与调制信号强度的关系曲线

在实验系统中使用峰峰值为 3 V、频率为 1 MHz 的三角波进行调制,得到如图 5(a)所示的谐振谱

线。对其进行局部放大可以看到,对应于三角波调制信号,谐振谱线中有如图 5(b)所示的方波信号,这与线性斜波调制原理相符合<sup>[12]</sup>。但在激光频率的变化过程中会产生多余的频率分量,当多种频率分量进入谐振腔后会改变谐振输出状态,导致调制后得到的方波信号在上升沿或下降沿存在过冲等瞬态响应。需要对调制后的信号进行多次采样取平均才能抑制或消除瞬态响应对解调检测的影响,这增加了系统信号处理的复杂度。



(a)调制后的谐振谱图



(b)局部放大的谐振谱线与调制信号

图 5 谐振谱图

#### 3.2 正弦波调制实验

采用峰峰值为 4 V、频率为 900 kHz 的正弦波调制时得到的谐振谱线与相应的解调曲线如图 6 所示。对比了锯齿波、三角波和正弦波三种调制信号在 900 kHz 时的调制效果。图 7 显示,三种波形在幅值增大时,均会导致谐振信号信噪比降低。其中,由于复位脉冲影响,锯齿波调制的信噪比最低,而正弦波调制以相位调制为基础,不存在三角波调制中的瞬态响应问题,且不受复位脉冲影响,调制效果略优于三角波。

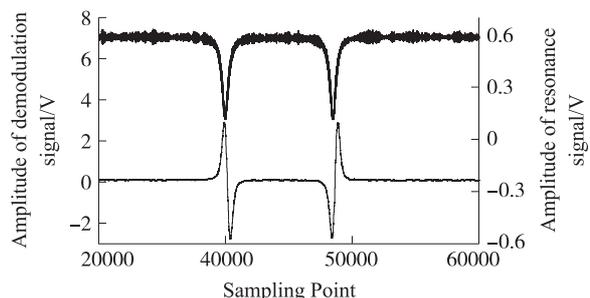


图 6 正弦波调制解调曲线图

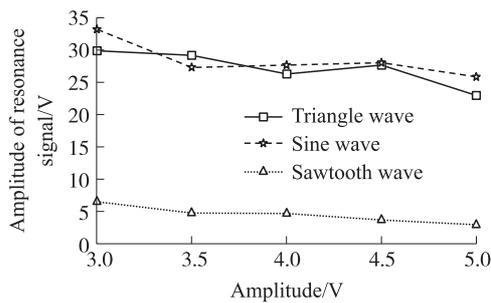


图7 不同调制信号对信噪比的影响

为进一步验证正弦波调制的可行性与优势,在陀螺系统的锁频环路中应用正弦波调制解调方法得到了用于边带锁频的解调曲线。边带锁频技术是一种先进的频率跟踪锁定方法,具有控制范围宽、锁频精度高等优点<sup>[13-14]</sup>。将其应用于陀螺系统中,可以提高锁频环路的稳定性以及陀螺信号检测精度。但由于传统线性斜波调制方法在高频调制时信噪比差,边带信号被噪声淹没,难以实现边带锁定。如图8所示,采用峰峰值为4 V、频率为15 MHz的正弦波进行调制,则可以得到含有边带的调制谱线与解调曲线。高频正弦波调制下谐振信号的高信噪比是实现边带信号检测解调的关键。

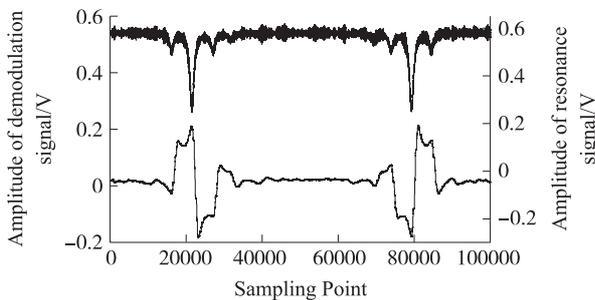


图8 边带锁频调制曲线及解调曲线

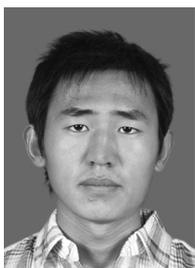
## 4 结论

在谐振式陀螺信号检测系统中,通过对锯齿波、三角波和正弦波三种不同波形调制方法的实验结果对比分析,最终选择了正弦波调制方案,提高了调制

后谐振信号的信噪比。同时,在谐振式陀螺信号检测系统锁频环路中得到了用于边带锁频技术稳频的解调曲线,验证了正弦波调制技术的可行性及优越性,为提高陀螺信号检测精度奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] Neil Barbour, George Schmidt. Inertial Sensor Technology Trends [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.
- [2] 马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 谐振腔光纤陀螺信号检测方法的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 1001-1005.
- [3] 洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光学院陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905003-1-0905003-5.
- [4] 张旭琳, 马慧莲, 丁纯, 等. 谐振式光纤陀螺调相谱检测分析[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1529-1533.
- [5] Sanders G A, Prentiss M G, Ezekiel S. Passive Ring Resonator Method for Sensitive Inertial Rotation Measurements in Geophysics and Relativity[J]. Optics Letters, 1981, 6(11): 569-571.
- [6] Kazuo Hotate, Michiko Harumoto. Resonator Fiber Optic Gyro Using Digital Serrodyne Modulation [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(3): 466-473.
- [7] Ying Diqing, Ma Huilian, Jin Zhonghe, et al. Dynamic Characteristics of R-FOG Based on the Triangle Wave Phase Modulation Technique [J]. Optics Communications, 2008, 281: 5340-5343.
- [8] Jin Zhonghe, Yang zhihui, Ma Huilian et al. Open-Loop Experiments in a Resonator Fiber-Optic Gyro Using Digital Triangle Wave Phase Modulation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1685-1687.
- [9] Ma Huilian, Chen Yan, Li Mucheng, et al. Transient Response of a Resonator Fiber Optic Gyro with Triangular Wave Phase Modulation [J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6253-6263.
- [10] 马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 731-734.
- [11] Eric D Black. An Introduction to Pound-Drever-Hall Laser Frequency Stabilization [J]. Am J Phys, 2001, 69(1): 79-87.
- [12] 冯丽爽, 洪灵菲, 杜哲峰, 等. 微光学院陀螺双频率调制理论与实验研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(2): 341-345.
- [13] 孙旭涛, 陈卫标. 基于法珀标准具的激光稳频方法理论研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(12): 2219-2222.
- [14] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Resonator [J]. Appl Phys B, 1983, 31: 97-105.



张建辉(1986-),男,河南太康人,在读硕士,主要从事光纤传感、光学谐振腔方面的研究工作, zhangjianhui\_you@126.com;



闫树斌(1975-),男,山西交城人,博士,硕导,山西省优秀青年学术带头人,主要从事光 MEMS、集成光学传感、量子光学器件等研究工作。