

文章编号: 0258-7025(2010)04-1064-04

谐振式微光学陀螺最佳灵敏度调节的研究

冯 翔 马迎建 于怀勇 杜新政

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要 介绍了谐振式微光学陀螺(ROG)的基本原理与结构,对采用三角波频率调制的陀螺灵敏度进行了理论分析。以调频光谱测量原理为基础,把环形谐振腔视为具有洛伦兹型吸收谱的介质,推导出了谐振式微光学陀螺在最大灵敏度时输出的光强与谐振腔谐振特性曲线的对应关系,提出了一种谐振式微光学陀螺最佳灵敏度的调节方法,结合陀螺系统信号的调制与解调,简化了陀螺系统最佳灵敏度的调节过程,给出了实际陀螺系统的灵敏度的测试实验。实验结果表明,此调节方法能够将谐振式微光学陀螺系统调节到最佳灵敏度,适合在实际的谐振式陀螺系统调试中运用。

关键词 集成光学;谐振式微光学陀螺;最佳灵敏度;调制频率

中图分类号 TN629.1;TN911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1064

Investigation on the Modulation of the Optimized Sensitivity for the Resonator Optic Gyroscope

Feng Xiang Ma Yingjian Yu Huaiyong Du Xinzheng

(School of Instrument Science & Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract The method of optimized sensitivity modulation for the resonator optic gyroscope (ROG) is introduced. ROG is a novel optical rotation sensor whose resonant frequency is changed due to the Sagnac effect. The limited sensitivity of ROG should be obtained while the modulating frequency is optimized according to frequency-modulation spectroscopy. This adjusting method which is based on the theory of modulation frequency simplifies the process of optimized sensitivity modulation in ROG system. The theory and the structure of ROG system are analyzed. The modulation method of the optimized sensitivity based on modulation frequency is presented. The actual experiment results have proved that the method can modulate ROG to the optimized sensitivity and can apply in the adjustment of ROG system.

Key words integrated optics; resonator optic gyroscope; optimized sensitivity; modulation frequency

1 引 言

在光学技术与实际需求的推动下,微光学陀螺已在惯性制导与导航的许多领域成为一项关键技术,其轻型的固态结构使之具有可靠性高、寿命长、耐冲击振动、动态范围大、带宽大、瞬间启动、功耗低等特点^[1,2]。谐振式微光学陀螺(ROG)是利用 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测量旋转角速度的惯性传感器件,它利用环形谐振腔来增强旋转引起的 Sagnac 效应,基本工作原理是多光束干涉。这样的工作机理使得谐振式微光学陀螺只需要较短的

谐振腔长度就可以达到很高的精度要求,因此,谐振式微光学陀螺一直被视为光学陀螺微型化的发展方向^[3]。

由于 Sagnac 效应产生的谐振频率差是极其微小的,如谐振腔的腔长为 10 cm,面积为 12.5 cm²,折射率为 1.45,输入光波长为 1.55 μm 时,1 (°)/h 的旋转角速率引起的谐振频率差仅为 0.1 Hz 左右^[4]。因此在谐振式微光学陀螺中,直接对频率差进行测量是十分困难的,需要对输入谐振腔的光信号的频率进行调制^[5],利用解调信号反馈控制光源频率,以

收稿日期:2009-05-26;收到修改稿日期:2009-07-13

作者简介:冯翔(1986—),男,硕士研究生,主要从事谐振式陀螺软硬件优化方面的研究。

E-mail:fengxiang@aspe.buaa.edu.cn

导师简介:杜新政(1949—),女,高级工程师,主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail:dxzbh@yahoo.com.cn

跟踪谐振腔谐振频率的变化,而调制频率对陀螺灵敏度有着重要影响。本文从谐振式微光学陀螺频率调制的原理出发,结合陀螺系统的信号调制与解调,提出一种简单直观的谐振陀螺最佳灵敏度的调节方法,并在陀螺灵敏度的测试中验证了该方法。

2 原 理

谐振式微光学陀螺系统的结构模块组成如图 1 所示^[6~8]。陀螺的光路部分主要由可控光源, Y 波导相位调制器(Y-branch PM), 环形波导谐振腔(resonator)和光电探测器(detector)组成,检测电路部分主要由模数(AD)转换模块、可编程逻辑芯片(FPGA)、调制三角波发生模块和数模(DA)转换模块组成。光源发出的光频率可由温度模块(TEC)和压电陶瓷模块(PZT)控制改变^[9]。

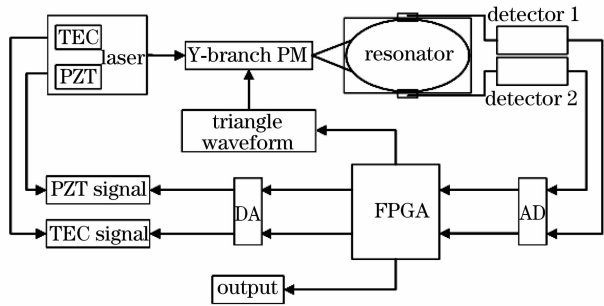


图 1 谐振式微光学陀螺结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of ROG

光源输出的光通过 Y 波导相位调制器分成两束,分别沿谐振腔顺时针和逆时针方向传播,这两路光都经过相位调制器加以三角波进行频率调制,之后经过耦合器输出到探测器端。设光源发出的光频率为 f , 三角波正负半轴的频率调制量分别为 $\pm \Delta f$, 则调制后的两路光信号频率分别为 $f + \Delta f$ 和 $f - \Delta f$ 。当光源频率锁定在谐振谷中心,同时陀螺也处于静止状态时,若假设谐振特性曲线完全对称,则 $f + \Delta f$ 和 $f - \Delta f$ 这两种频率的光信号经过谐振腔后输出的光强值相等,此时光电转换后输出的电信号为一直流量,如图 2 所示。

当陀螺转动时, Sagnac 效应使谐振腔的相对腔长发生变化,即光在谐振腔中的光程发生变化,谐振谷曲线会产生一个偏移。此时 $f + \Delta f$ 和 $f - \Delta f$ 两种频率的调制信号对应的光强值不同,输出为一方波信号。方波的幅值反映了 Sagnac 效应引起的偏移量,也即反映了陀螺的旋转角速度。通过检测方波的幅值,并进行一定的信号处理和数学运算,就可以解算出陀螺的旋转角速度。

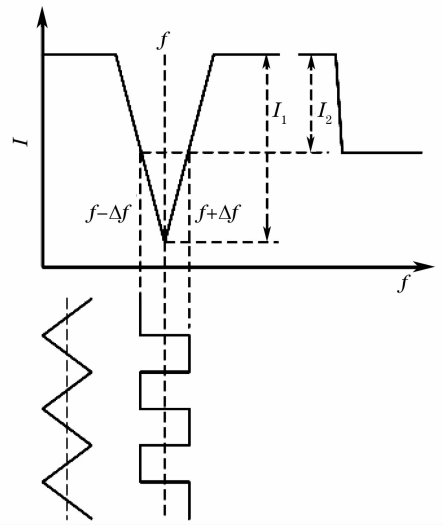


图 2 谐振式微光学陀螺锁频控制示意图

Fig. 2 Frequency locking control diagram of ROG

3 最佳灵敏度的调节方法

根据耦合模理论,反射式环形谐振腔具有洛伦兹型谐振特性曲线。在近谐振条件下,即 $|f - f_0| \ll f_{\text{FSR}}$ 时, f_{FSR} 为环形谐振腔的自由谱宽,反射式环形谐振腔的谐振特性曲线可以近似地以光强传递函数形式表示为^[10~14]

$$I(f - f_0) = 1 - \rho \cdot \frac{\Gamma_c^2}{(f - f_0)^2 + \Gamma_c^2}, \quad (1)$$

式中 $2\Gamma_c$ 为环形谐振腔谐振特性曲线的半峰全宽(FWHM); ρ 为谐振深度,取值范围为 $0 < \rho \leq 1$; f_0 为环形谐振腔的谐振频率。 Γ_c, f_0 取决于腔长、折射率、波导传输损耗等谐振腔结构参数。

当光源频率锁定在谐振谷中心,即等于谐振频率时,设三角波调制信号对光频率的偏移量为 $\pm \Delta f$,由于谐振特性曲线的对称性,仅对频率偏移量为 $+\Delta f$ 进行分析。由(1)式可得调制光强 I 与频率偏移量 Δf 关系为

$$I(\Delta f) = 1 - \rho \cdot \frac{\Gamma_c^2}{\Delta f^2 + \Gamma_c^2}, \quad (2)$$

将(2)式中的调制光强 I 对频率偏移量 Δf 微分,可得斜率 K 的表达式为

$$K = \frac{dI(\Delta f)}{d\Delta f} = \frac{2\Gamma_c^2 \rho \cdot \Delta f}{(\Delta f^2 + \Gamma_c^2)^2}, \quad (3)$$

再将(3)式中的斜率 K 对频率偏移量 Δf 微分可得

$$K' = \frac{2\Gamma_c^2 \rho \cdot (\Gamma_c^2 - 3\Delta f^2)}{(\Delta f^2 + \Gamma_c^2)^3}. \quad (4)$$

令(4)式中 $K' = 0$, 可得 $\Delta f = \Gamma_c / \sqrt{3}$ 时斜率 K 取得极值。由于谐振谷曲线存在唯一的最大斜率,因

此该 Δf 点即为斜率最大点,此时对应的调制频率即为理论最佳调制频率。

将 $\Delta f = \Gamma_c/\sqrt{3}$ 代入(2)式中,可得理论最佳调制频率对应的光强与谐振谷中心光强的比值为

$$\frac{I(\Gamma_c/\sqrt{3})}{I(0)} = \frac{1 - \rho \cdot \frac{\Gamma_c^2}{(\Gamma_c/\sqrt{3})^2 + \Gamma_c^2}}{1 - \rho} = \frac{1 - \frac{3}{4}\rho}{1 - \rho} \quad (5)$$

在实际的谐振式微光学陀螺系统静态调试中,设谐振谷曲线的光强跨度为 I_1 ,锁频前后光强跨度为 I_2 ,如图 2 所示。可按如下方法把陀螺调节至最佳灵敏度:首先让光源扫频,测出谐振谷曲线的光强跨度 I_1 ,然后让光源频率稳定锁定在谐振谷中心,保持三角波频率不变,并手动调节三角波的峰-峰值,即可调节输出直流量的幅值以改变光强跨度 I_2 ,根据(5)式使 I_1 和 I_2 满足

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 - \left(1 - \frac{3}{4}\rho\right)}{1 - (1 - \rho)} = \frac{3}{4} \quad (6)$$

此时该陀螺系统即达到最佳灵敏度的状态,在相同转速作用下对应的谐振频率变化得到的光强变化达到最大值。

4 陀螺灵敏度的测试

谐振式微光学陀螺灵敏度的测试框图如图 3 所示。Y 波导相位调制器的一端输入三角波,另一端叠加锯齿波,即可对顺、逆两路光中的一路施加固定的频率偏移,相当于模拟一个固定转速,此时陀螺会输出一个代表角速度信号的数字量。调节不同的三角波幅值,并将输出的角速度信号通过 RS232 接口传输到上位机中存储,即可比较不同三角波调制频偏下的陀螺灵敏度。

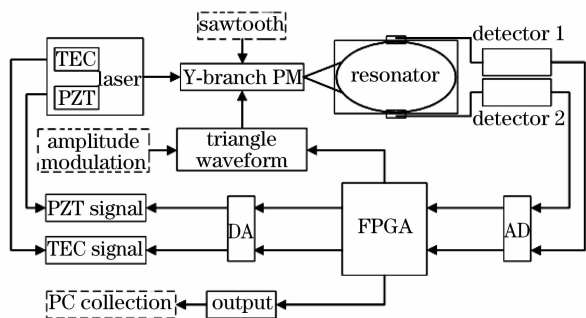


图 3 谐振式微光学陀螺灵敏度测试

Fig. 3 Sensitivity test system of ROG

谐振式微光学陀螺系统光路和检测电路硬件平台如图 4 所示。系统实现用到的各器件为:丹麦

KOHERAS 的可调谐分布反馈式 (DFB) 光纤激光光源, Y 波导多功能集成光学相位调制器, 北京航空航天大学光电技术研究所自行设计的波导谐振腔以及武汉电信器件有限公司的光电探测器等。



图 4 谐振式微光学陀螺实物图

Fig. 4 Picture of ROG system

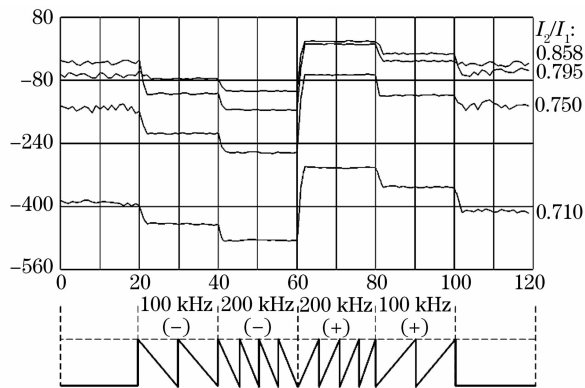


图 5 锯齿波模拟转速下陀螺输出数字量

Fig. 5 ROG output in saw-tooth wave simulation

按照 3 节中介绍方法分别对比值为 $I_2/I_1 = 0.858, 0.795, 0.750$ 和 0.710 的 4 种情况下的陀螺灵敏度进行测试,通过叠加锯齿波模拟转速,锯齿波峰-峰值为 10 V,频率依次为 100 kHz(斜率为负), 200 kHz(斜率为负), 200 kHz(斜率为正), 100 kHz(斜率为正)。每个阶段叠加的锯齿波持续 20 s,总共测试时长为 120 s。陀螺输出的数字量如图 5 所示。

从图 5 中模拟转速下陀螺输出的数字量可以看出,当三角波调制的频偏越大时,输出数字量的零偏也越大,为了对比 4 种情况下的陀螺灵敏度,消除相应的零偏后取锯齿波频率为 200 kHz 的正负斜率的两阶段输出数字量,比较结果如图 6 所示,可以看出

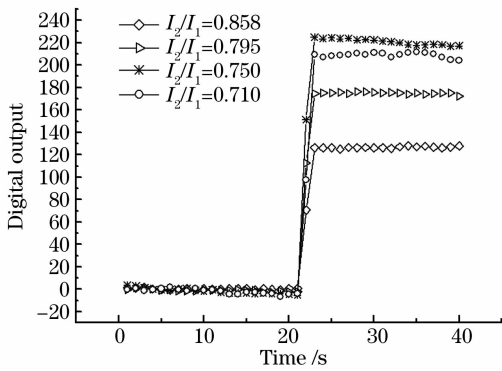


图6 陀螺灵敏度对比

Fig. 6 Sensitivity comparison of ROG

当 $I_2/I_1 = 0.750$ 时陀螺灵敏度最高, 与理论分析一致。

综上所述, 当谐振式微光学陀螺稳定锁频后, 通过改变三角波斜率调节调制频率, 使锁频前后的光强跨度满足(6)式时, 陀螺就达到了最灵敏的状态。相对于通过相位调制器的半波电压计算最佳调制频率的方法, 这种调节方法不仅简单实用, 而且消除了相位调制器参数引入的误差^[15]。

5 结 论

介绍了谐振式微光学陀螺的基本结构及其原理, 说明了最佳灵敏度调节的重要性。从调制频率的原理出发, 结合陀螺系统的信号调制与解调, 提出了一种简单直观的最佳灵敏度调节方法, 并通过实际陀螺系统的灵敏度测试验证了该方法的正确性, 适用于实际谐振式陀螺系统最佳灵敏度的调试。

参 考 文 献

- Herve C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. First edition. Zhang Guicai, Wang Wei transl.. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 172
Herve C. Lefevre. 光纤陀螺仪[M]. 第一版. 张桂才, 王巍译. 北京: 国防工业出版社, 2002. 172
- Dang Shuwen, Tian Weifeng, Qian Feng. De-noising fractional noise in fiber optic gyroscopes based on lifting wavelet [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 625~629
党淑雯, 田蔚风, 钱峰. 基于提升小波的光纤陀螺分形噪声滤除方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 625~629
- Yu Xiujuan, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core photonic band-gap fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 430~435
于秀娟, 廖延彪, 张敏等. 谐振式空心光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 430~435
- Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Research on signal

- detection method of resonator fiber optical gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1001~1005
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
- Peng Bo, Yang Zhihui, Ma Huilian *et al.*. Digitalization of the detection circuit for resonator fiber optic gyro based on the phase modulation spectroscopy technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1479~1483
彭博, 杨志怀, 马慧莲等. 基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺检测电路数字化研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1479~1483
- Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. SiO₂ waveguide resonator used in an integrated optical gyroscope [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(5): 054210
- Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Analysis of Rayleigh backscattering noise in micro-optical resonance gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 799~804
于怀勇, 张春熹, 冯丽爽等. 硅基微光学谐振式陀螺瑞利背向散射噪声分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 799~804
- Yu Huaiyong, Feng Lishuang, Hong Lingfei *et al.*. Optimal design, fabrication and experiment of optical waveguide resonator for IORG [C]. *Sixth Conference of Chinese Inertial Technology*, 2008. 352~355
于怀勇, 冯丽爽, 洪灵菲等. 集成光学谐振陀螺谐振腔设计加工及实验分析[C]. *中国惯性技术学会第六届学术会议论文集*, 2008. 352~355
- Feng Lishuang, Hong Lingfei, Du Zhefeng *et al.*. Research on the theory and experiment of double-frequency modulation for MOG [J]. *Chinese J. Sensors Actuators*, 2008, **21**(2): 341~345
冯丽爽, 洪灵菲, 杜哲峰等. 微光学陀螺双频调制理论与实验研究[J]. *传感技术学报*, 2008, **21**(2): 341~345
- G. C. Bjorklund. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(1): 15~17
- G. C. Bjorklund, M. D. Levenson, W. M. Lenth *et al.*. Frequency modulation (FM) spectroscopy: theory of line shapes and signal-to-noise analysis [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **32**(3): 145~152
- Yoshihiro Ohtsuka. Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope: dependence on resonator parameters and light-source coherence [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(2): 378~383
- Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral line-width of laser on resonator characteristics in fiber ring resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 731~734
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
- Wang Mahua, Cui Yiping, Zhang Tong. Investigation on the determination of the optimized modulating frequency for R-IOG [J]. *Chinese J. Electron Devices*, 2007, **30**(6): 2291~2293
王马华, 崔一平, 张彤. 集成光学陀螺最佳调制频率确定的研究[J]. *电子器件*, 2007, **30**(6): 2291~2293
- Hu Zongfu. Effects of residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1924~1929
胡宗福. 光纤陀螺调制器的残余强度调制影响与消除[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1924~1929