

调相谱检测技术下光纤环腔的谐振特性

李小枫¹, 郑永秋¹, 安盼龙¹, 张建辉¹, 陈浩¹, 薛晨阳^{1,2}, 刘俊^{1,2}, 闫树斌¹

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051,

2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 调相谱检测技术是谐振式光学陀螺信号检测的重要手段。根据贝塞尔函数展开与光场叠加原理, 理论分析了光纤环形谐振腔的传输特性; 搭建了谐振特性测试系统, 采用 LiNbO₃ 相位调制, 针对不同调制频率与调制电压条件下光纤环的谐振特性和解调曲线特性开展了实验, 对实验结果进行分析, 得到了调制频率、调制电压与光纤环形谐振腔谐振信号及解调信号之间的关系, 实验结果与理论分析相符; 并对调制过程中出现的谷裂现象进行了测试与分析, 通过实验数据拟合, 得到了产生谷裂现象的临界调制频率与调制电压值之间的关系。

关键词: 光纤环形谐振腔; 谐振特性; 相位调制; 信号检测

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3394-05

Resonant characteristics of fiber ring resonator with phase modulation spectroscopy

Li Xiaofeng¹, Zheng Yongqiu¹, An Panlong¹, Zhang Jianhui¹, Chen Hao¹, Xue Chenyang^{1,2},
Liu Jun^{1,2}, Yan Shubin¹

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Phase modulation spectroscopy is an important method of signal detection in resonator optic gyro. By the use of expansion of Bessel function and optical field overlapping method, the transmission properties of optical fiber ring resonator was analyzed. A testing system of resonant properties was set up. Based on the LiNbO₃ phase modulation, the experiments to research resonant characteristics and demodulation curve features was carried out under different frequencies and voltages of modulation, and the experimental result was analyzed, then the relation of frequency and voltage of modulation and resonant and demodulation signal of fiber ring resonator was obtained. The splitting phenomenon of resonance dips during the experiment was measured and analyzed. By fitting the data, the relation of critical frequency and voltage of modulation of splitting phenomenon of resonance dips occurs was obtained.

Key words: fiber ring resonator; resonant characteristics; phase modulation; signal detection

收稿日期: 2014-02-05; 修订日期: 2014-03-10

基金项目: 国家杰出青年基金(51225504); 国家自然科学基金(91123036, 61178058, 61275166); 总装基金(51309060101)

作者简介: 李小枫(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光学传感测试方面的研究。Email: lxf9624@163.com

导师简介: 闫树斌(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光 MEMS 传感器件方面的研究。Email: shubin_yan@nuc.edu.cn

0 引言

近年来,以光纤环形谐振腔作为 Sagnac 敏感部件的谐振式光纤陀螺^[1-3](ROG)由于在高精度和小型化方面具有明显的优势,引起了世界上众多研究机构的关注。在谐振式光纤陀螺系统中,光信号处理是一项非常重要的技术手段。

激光调制解调技术是实现光信号处理的重要手段,其中外调制方法不受半导体器件的特性限制,具有比内调制更高的调制速率与调制带宽,在光通信及光信息处理中应用广泛。相位调制是外调制方法的一种,它将调制信号和反馈信号分开检测,减小了信号之间的串扰,提高了陀螺信号的检测精度。1997年,日本东京大学 K.Hotate 教授创新性的提出了数字线性斜波进行光相位调制,达到移频效果,实现了谐振点的跟踪锁定^[4]。2007年,浙江大学金仲和教授带领的研究小组^[5-7]针对数字线性斜波调制方法存在的复位脉冲问题,提出了基于数字三角波调制的相位调制方法,使陀螺的零偏稳定性达到了 0.012 rad/s。2011年,北京航空航天大学^[8]针对波导谐振腔微光学院陀螺采用数字三角波调制,得到 0.07 (°)/s 的频率锁定精度。

文中采用正弦波信号对 LiNbO₃ 相位调制器进行调制,这种调制方法消除了线性斜波引起的复位脉冲以及三角波引起的瞬态响应。理论上分析了正弦波调制频率、调制电压对光纤环形谐振腔输出光强、解调信号的影响,并针对不同调制幅度和调制频率进行实验研究,为确定谐振式光纤陀螺系统的最佳调制参数提供了参考。

1 基本原理

谐振式光纤陀螺的基本原理如图 1 所示,主要分为 CCW 锁频回路和 CW 测试回路两路,图中虚线一路为陀螺输出信号测试回路。激光从激光器发出经过分束器 C1 分成两束功率相同光,分别经过相位调制器 PM1、PM2 再经过环形器 CIR1、CIR2 进入光纤谐振腔,形成 CW、CCW 两个方向的光,最后分别经过环形器 CIR1、CIR2 进入光电探测器 PD1、PD2 进行光电转换,其中 CCW 方向的光进入锁相放大器 LIA2 进行解调,输出的解调信号通过 PI 电路

并反馈到激光器上,将激光器的中心频率锁定在 CCW 的谐振频率上。CW 方向的光的输出信号经过锁相放大器 LIA1 进行解调,该解调信号作为陀螺的开环信号。

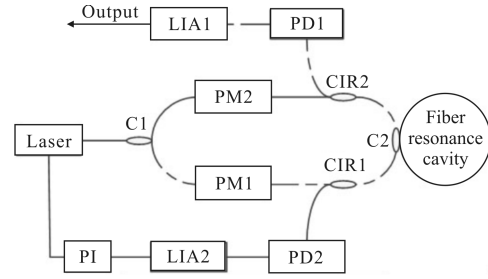


图 1 谐振式光纤陀螺简化系统图

Fig.1 Simplified system diagram of R-FOG

以下主要针对 CCW 方向锁频回路进行分析,谐振式光纤陀螺的锁频回路激光输出光场为:

$$E_{\text{laser}} = E_0 e^{j(2\pi f t)} \quad (1)$$

式中: E_0 为激光器输出光强度; f 为激光中心频率。

对相位调制器施加频率为 f_m , 幅值为 V_1 的正弦波调制时,利用贝塞尔函数展开及光场叠加原理^[9-10],得到激光经过光纤环形谐振腔的输出光场强度为:

$$E_{\text{sin-out}} = 0.5 \sqrt{(1-\kappa_{c1})(1-\kappa_{c2})} E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(M) e^{j2\pi n f t} A_n e^{i\varphi_n} \quad (2)$$

其中

$$A_n = (1-\kappa_{c2}) \left(\frac{1-p(1-Q)^2}{[(1-Q)^2 + 4Q \sin^2[\pi(\Delta f + n f_m)/\text{FSR}]]} \right)^{1/2}$$

$$p = 1 - [T - (TQ + R)^2] / [(1-\kappa_{c2})(1-Q)^2]$$

$$\varphi_n = \arctan \left\{ \frac{R \sin[2\pi(\Delta f + n f_m)/\text{FSR}]}{[(1+Q)^2 T + RQ - (2TQ + R) \cos(2\pi(\Delta f + n f_m)/\text{FSR})]} \right\}$$

$$\begin{cases} T = (1-\alpha)^{1/2} (1-\kappa_{c2})^{1/2} \\ Q = (1-\kappa_{c2})^{1/2} (1-\kappa_t)^{1/2} (1-\alpha)^{1/2} \\ R = \alpha (1-\kappa_{c2}) (1-\kappa_t)^{1/2} \end{cases}$$

式中: A_n 表示传递函数的幅度部分; p 表示谐振腔的谐振深度; φ_n 表示传递函数的相位部分; T 表示光波直接耦合输出系数; R 表示谐振腔交叉耦合系数; Q 表示谐振腔单圈耦合系数; α 为谐振腔耦合系数, κ_{c1} , κ_{c2} 为光纤耦合器损耗系数; κ_t 为光纤环形谐振腔损耗系数。

光信号经过光电探测器进入锁相放大器,其中输入解调 LIA2 的光信号与 PM2 调制信号同步,利用贝塞尔函数展开,可得到解调信号输出为:

$$V_{\text{error}} = PD \sum_n J_n(M) J_{n+1}(M) [A_n A_{n+1} \sin(\varphi_{n+1} - \varphi_n) - A_{-n} A_{-(n+1)} \sin(\varphi_{-n} - \varphi_{-(n+1)})] \quad (3)$$

式中:调制系数 M 与调制电压有关; A_n, φ_n 与调制频率有关,根据公式(3)可得出影响解调曲线信号的因素有两种:正弦波调制信号的调制频率与调制电压。由上述公式仿真得到光纤环形谐振腔输出谐振曲线与解调曲线如图 2 所示。

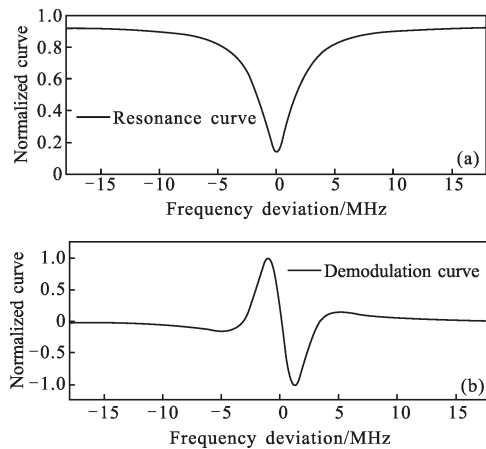


图 2 谐振信号、解调信号与谐振频率差的关系

Fig.2 Resonance signal and demodulated signal versus resonance frequency deviation

评估解调曲线优劣的一项重要指标是解调曲线的斜率,这是影响陀螺信号灵敏度高低的一个重要指标,将公式(3)对 Δf 求导并令 $\Delta f=0$ 可得解调信号输出曲线在谐振点的斜率表达式^[11],其表达式如下:

$$k = \left. \frac{dV_{\text{out}}}{d\Delta f} \right|_{\Delta f=0} \quad (4)$$

图 3 给出了解调信号斜率与调制频率之间的关系,当调制电压一定时,解调信号斜率随着调制频率的增加而增加,最后逐渐趋于稳定。

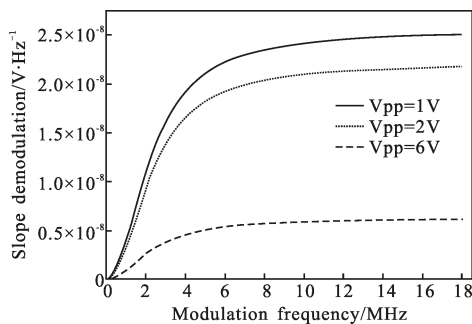


图 3 调制频率对解调信号斜率的影响

Fig.3 Slope of demodulated signal versus modulation frequency

2 实验

实验中,光纤环形谐振腔长为 1.5 m,谐振腔耦合系数为 0.1,损耗系数(包括传输损耗)为 0.07;激光器为 Koheras 公司型号为 K80-150-14 超窄线宽激光器,中心波长为 1550 nm,激光器线宽小于 100 Hz,扫频系数为 15 MHz/V;相位调制器为 Thorlabs 公司 LN-65S 型的 LiNbO₃ 相位调制器,带宽为 10 GHz;信号发生器为斯坦福 Model DS345,可产生最高频率为 30 MHz 的正弦波;光电探测器为 New Focus 公司 2053 可调谐光电探测器,带宽为 10 MHz,光电转换系数为 18.8×10^6 V/W;锁相放大器为斯坦福 SR844 型号,参考输入信号频率为 25 kHz~200 MHz。

在实验过程中将 PM1 的调制频率和调制电压分别设置为 500 kHz、4 V,改变 PM2 的调制信号的调制电压与调制频率,对光纤环形谐振腔输出信号进行测试与分析。

2.1 调制信号对谐振曲线的影响

为了研究调制信号对谐振曲线的影响,选取不同调制频率、调制电压进行正弦波相位调制,得到如图 4 图形。图中曲线分别是调制电压为 4 V、调制频率为 1 MHz、4 MHz、12 MHz 的谐振曲线图,从图中可看出当调制频率增大时,谐振曲线深度明显减小,且当调制频率为 12 MHz 时,谐振谷底处发生形变,不再是光滑的曲线。为进一步研究谐振深度的变化趋势,针对上述调制频率进行实验,得到其谐振深度变化趋势如图 5 所示。当调制频率一定时,谐振曲线谐振深度随着调制电压的增大而减小,且调制频率越大,其减小的幅度越大。当调制频率为 1 MHz、4 MHz、12 MHz 时,谐振曲线谐振深度平均变化率为 0.01/V、0.054/V、0.1/V。

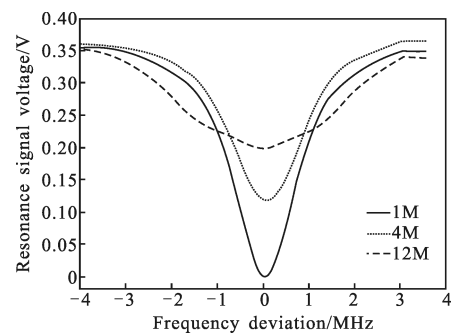


图 4 不同调制频率的谐振曲线

Fig.4 Resonance curve of different modulation frequencies

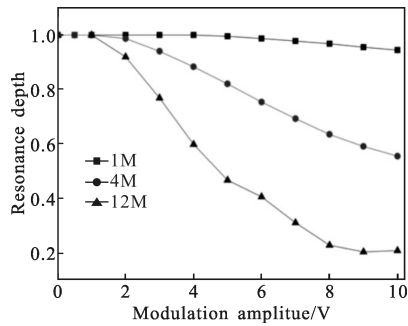


图 5 谐振深度与调制频率、调制电压的关系

Fig.5 Resonance depth versus modulation frequency and voltage

理论分析中谐振曲线的谐振深度不受调制频率与调制电压的影响,但经过上述实验得到谐振曲线谐振深度与调制频率、调制电压存在一定的关系。分析原因如下:(1) 光学器件的参数本身存在一定的偏差,且在光路中会受到温度、湿度等各类环境因素的影响,会导致谐振腔的耦合系数、损耗系数的进一步偏移;(2) 光路连接过程中,会用到法兰、光纤适配器等连接器件,由于连接处激光会发生反射、折射、干涉等现象,导致光强的不同程度损耗,从而影响谐振曲线谐振深度。

2.2 调制信号对解调曲线的影响

图 6 为解调曲线斜率随调制频率变化的关系图,当调制频率不断增大时,从图中可看出当调制电压为 1 V、2 V 时,解调信号斜率变化与理论分析相符,处于不断增大且趋于稳定的状态,当调制电压为 6 V 时,在调制频率为 6 MHz 处,解调信号斜率发生突变,随着调制频率的增大,解调信号斜率不断的跳变。

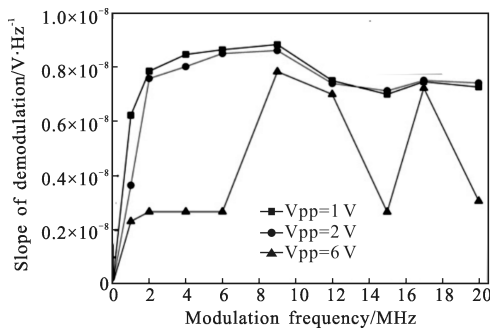


图 6 解调信号斜率与调制频率的关系

Fig.6 Slope of demodulation signal versus modulation frequency

分析调制频率为 6 MHz、调制电压为 6 V 时的输出信号,如图 7 所示,从图中可看出谐振曲线谷底

出现谷裂现象,失去了调制前光滑对称的特性。谐振曲线谷底的变化导致解调信号斜率发生变化,这是影响解调信号的主要原因。

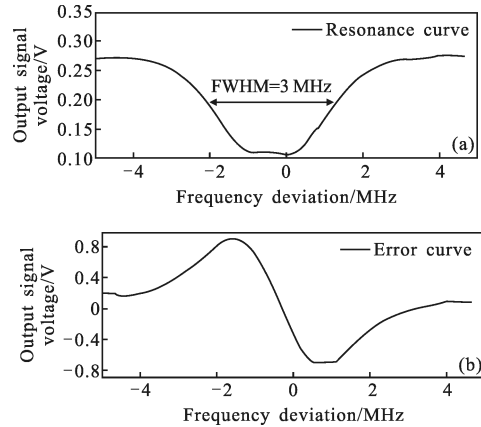


图 7 $f_m=6 M$ 、 $V_{p-p}=6 V$ 时的输出信号

Fig.7 Output signal ($f_m=6 M$, $V_{p-p}=6 V$)

实验过程中发现当调制频率与调制电压符合一定关系时,谐振谱线谷底会出现谷裂现象,且随着调制频率与调制电压的不断增大,这一现象会不断的加剧。分析出现谷裂现象的临界值,得到拟合曲线如图 8 所示,并得到调制频率 f_m 与调制电压 V 的拟合公式,见公式(5),对于已知调制频率值可计算得到谐振谱线出现谷裂的调制电压值,这样能够更好的把握调制信号参数,抑制谷裂现象的产生,为确定陀螺系统的最佳实验参数提供了参考。

$$V=217-109 \cdot \exp((f_m-24.7)^2/15417.7) \quad (5)$$

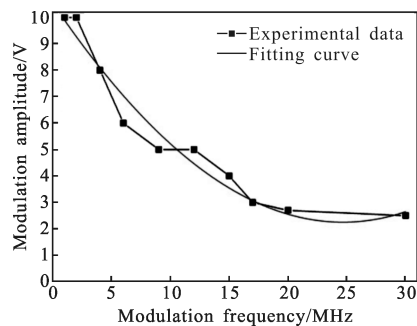


图 8 出现谷裂现象的临界条件

Fig.8 Critical condition of splitting phenomenon of resonance dips

3 结论

文中采用正弦波调制,针对不同调制频率和调制电压条件展开实验,得到如下结论:随着调制频率及电压的增大,谐振曲线的谐振深度逐渐减小,解调

信号的斜率逐渐增大,而当调制频率和调制电压达到一定的匹配度,谐振曲线就会发生形变,使得解调曲线的线性度发生改变,导致陀螺系统灵敏度降低,实验结果与理论分析相符。文中还得到谐振谱线出现形变的调制频率与电压的拟合曲线,确定了调制频率与调制电压的匹配度,有利于合理选取调制频率和电压,对陀螺系统参数的进一步优化提供了实验参考。

参考文献:

- [1] Neil Barbour, George Schmidt. Inertial sensor technology trends[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2001, 1(4): 322-339.
- [2] Ezekiel S, Balsamo S, Stowe D W. Passive fiber optic ring resonator for rotation sensing [J]. *J Optic Lett*, 1983, 8: 644-646.
- [3] Yoshihiro Ohtsuka. Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope dependence on resonator parameters and light-source coherence [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(2): 378-384.
- [4] Hotate K, Harumoto M. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15: 466-473.
- [5] Ying Diqing, Ma Huilian, Jin Zhonghe, et al. Dynamic characteristics of R-FOG based on the triangle wave phase modulation[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 5340-5343.
- [6] 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 Technique Lett*, 2007, 19(20): 1685-1687.
- [7] Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun, et al. Research on signal detection method of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, 31(8): 1001-1005. (in Chinese)
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.
- [8] Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang. Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, 38(9): 0905003-1-0905003-5. (in Chinese)
洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光学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.
- [9] Tang Quan'an, Ma Xinyu. Experimental study on fiber ring resonator in resonator fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(4): 33-36. (in Chinese)
汤全安, 马新宇. 谐振式光纤谐振腔的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 1998, 27(4): 33-36.
- [10] Xu Pengfei, Zhang Jianhui, Meng Xiangran, et al. Characteristics of fiber ring resonator dynamic response[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 599-604. (in Chinese)
徐鹏飞, 张建辉, 孟祥然, 等. 光纤腔动态谐振响应特性 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 599-604.
- [11] Zhang Xulin, Ma Huilian, Jin Zhonghe, et al. Open-loop operation experiments in a resonator fiber-optic gyro using the phase modulation spectroscopy technique [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(31): 7961-7965. (in Chinese)