

谐振式光纤陀螺双光路调相谱最优参数确定方法

焦新泉^{1,2,3}, 郑永秋^{2,3}, 安盼龙^{2,3}, 李小枫^{2,3}, 陈浩^{2,3}, 陈家斌¹, 刘俊^{2,3}, 闫树斌^{2,3}

(1. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081;

2. 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;

3. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 调相谱检测技术是谐振式光纤陀螺(R-FOG)角速率信号提取的关键技术,通过选取合适的调制参数,可大大提升陀螺的综合性能。利用相位调制频谱展开式,依据调相谱载波分量和调制信号的幅度关系,提出了双光路调相谱最优参数的确定方法,该方法在保证陀螺最佳灵敏度工作点的同时,有效地抑制了背向散射噪声的影响;在正弦波调相谱下,采用自外差法实测了相位调制器的半波电压,得到了调相谱载波分量与调制电压幅度的关系曲线,与理论分析相符;以长度为 12 m 的保偏光纤熔接环为敏感谐振腔,直径为 0.15 m,耦合系数为 50%,进行了不同角速率的转动测试,得到了动态范围为 ± 480 ($^{\circ}$)/s、非线性度为 3%的转动结果。

关键词: 谐振式光纤陀螺; 背向散射噪声; 相位调制; 载波抑制

中图分类号: TN219; TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0239-05

Method for determining optimized phase modulation parameters in resonator fiber optic gyro

Jiao Xinquan^{1,2,3}, Zheng Yongqiu^{2,3}, An Panlong^{2,3}, Li Xiaofeng^{2,3}, Chen Hao^{2,3},

Chen Jiabin¹, Liu Jun^{2,3}, Yan Shubin^{2,3}

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

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

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

Abstract: The phase modulation technique is the key technique to obtain the angular rate in resonator fiber optic gyro (R-FOG). Adopting the appropriate modulation parameters, the performance of the gyro can be greatly improved. Based on the phase modulation spectroscopy expression, and the relationship between the amplitude of modulated carrier signal and the amplitude of phase modulation voltage, the method for determining the optimized phase modulation parameters was proposed. Using the method, the backreflection noise can be effectively suppressed, while the optimized sensitivity of the gyro can also be ensured; The half-wave voltage of the modulator was measured using the self-heterodyne interferometer technique with sine wave phase modulation. And the relationship between the amplitude of modulated

收稿日期: 2014-05-10; 修订日期: 2014-06-12

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

作者简介: 焦新泉(1978-), 男, 副教授, 主要从事微惯性器件的设计与测试方面的研究。Email: jiaoxinquan@nuc.edu.cn

通讯作者: 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

carrier signal and the amplitude of phase modulation voltage was obtained, which was consistent with the theoretical analysis; The fiber ring resonator (FRR) was composed of a 12 m length polarization maintaining fiber and a polarization maintaining fiber coupler with the coupling ratio 50%. The diameter of the resonator was 0.15 m. The rotation experiments under various angular rates were conducted, and the dynamic range and output nonlinearity of the R-FOG were ± 480 ($^{\circ}$)/s and 3%, respectively.

Key words: resonator fiber optic gyro; backreflection noise; phase modulation; carrier suppression

0 引言

基于 Sagnac 效应的光学陀螺是一种高灵敏度惯性器件,相比于传统的机械陀螺,具有全固态、启动时间短、高可靠性等优点^[1-2]。干涉式光纤陀螺已经成为一种成熟的惯性器件,广泛应用于惯性导航、制导与控制领域,然而其几百米甚至上千米长度的光纤环限制了体积的进一步减小,以及由光纤环温度分布不均所引起的噪声,限制了灵敏度的提高;谐振式光纤陀螺可以采用较短的光纤环(几米到十几米),通过多光束干涉,可以达到长度 100 倍的干涉式光纤陀螺性能,在体积、灵敏度、集成化方面有着潜在的发展优势^[3-4]。

谐振式光纤陀螺通过检测 Sagnac 效应引起的谐振腔中相向传输两束光之间的频率差来得到旋转角速度信号,由于所检测的是一种微弱信号,通过对输入谐振腔相向传输光束进行调制,并利用相关检测原理进行同步解调,可提高陀螺系统的检测灵敏度^[5]。然而,在光信号调制解调过程中,光纤腔内的背散射光引入的背景噪声,降低了陀螺输出的线性度,此外,背散射光与光纤腔内传输的主信号光发生的寄生干涉,可以降低陀螺的分辨率,因此,背散射噪声成为影响陀螺性能最大的噪声因素,有效地抑制调制解调过程的背散射噪声成为谐振式光纤陀螺性能优化的关键技术^[6]。

文中以光信号调相谱理论为基础,从光信号调相谱展开式,得到了各调制载波分量的幅度表达式,确定了用以最大化抑制载波分量的调制信号的幅度,通过对两路光信号施加不同的调制信号幅度,使两路中的载波分量均得到最大化抑制,两路光信号由于调制幅度的不同导致最佳灵敏度工作点的调制频率不同,因此,背散射光引起的背景噪声及其与主信号光发生的寄生干涉噪声均得到了很好地抑制。

在所搭建的实验平台上,得到了动态范围为 480 ($^{\circ}$)/s、非线性度为 3% 的转动结果。

1 基本理论

谐振式光纤陀螺系统由窄线宽激光器、光纤环形谐振腔、LiNbO₃ 相位调制器、光电探测器、信号检测模块等组成,系统工作原理图如图 1 所示。分布式反馈光纤激光器 FL 发出光源,通过 3 dB 耦合器 C1 分成功率相等的两束光,分别通过含有 LiNbO₃ 晶体的相位调制器 PM1、PM2 调相谱后,由耦合器 C4 耦合进入光纤环形谐振腔(FRR),在谐振腔中形成逆时针(CCW)和顺时针(CW)相向传播的两个光束,多光束干涉输出到光电探测器 PD1、PD2。其中,CCW 方向传输的光束经 PD1 转换为电信号后经锁相放大器 LIA1 解调输出,用于反馈控制 FL 输出光波频率,并锁定在谐振腔 CCW 方向的谐振频率点处,CW 方向的谐振光束经 PD2 给锁相放大器 LIA2 解调输出即为开环的陀螺输出信号。

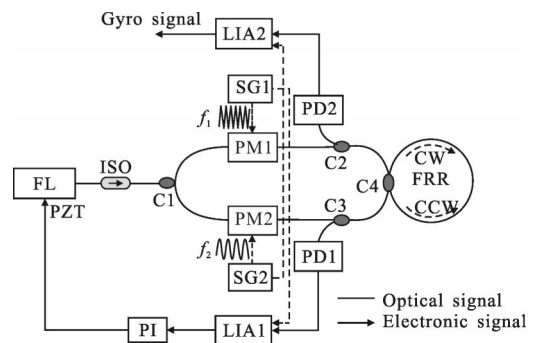


图 1 谐振式光纤陀螺系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of R-FOG system

在 FRR 内,由光纤介质密度和折射率分布的不均匀性导致传输光产生瑞利散射,瑞利散射光波和输入光波具有同样的光频,向前的散射光波是互易的,不产生任何寄生效应,而向后的散射光和由熔接

点引起的反射成为背向散射噪声的两个主要来源。背向散射噪声对陀螺性能的影响可以分为两类,第一类为背向散射光引入的背景噪声,可以降低陀螺输出的线性度,第二类为背向散射光与主信号光发生的寄生干涉,可以降低陀螺的分辨率。分别对两路光路选择合适的调制参数,可以最大限度地抑制两类背散射噪声,提高陀螺的输出性能。

用于驱动相位调制器 PM1、PM2 的信源均为正弦波,两光路具有相同的调制形式,以 PM1 调制为例,激光进行正弦波相位调制频谱展开式可以表示为^[7-8]:

$$E_{in}(t) = \frac{\sqrt{(1-\alpha_{c1})(1-\alpha_{c3})(1-\alpha_{pm2})}}{2} E_0 \cdot \exp\left\{j\left[2\pi f_0 t + \frac{\pi}{V_\pi} V_M \sin(2\pi F_M t) + \phi_0\right]\right\} \quad (1)$$

式中: V_M 、 F_M 分别为正弦波的幅度和频率。将公式(1)用贝塞尔函数展开后,可以表示为:

$$E_{in}(t) = \frac{\sqrt{(1-\alpha_{c1})(1-\alpha_{c3})(1-\alpha_{pm2})}}{2} E_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[j(2\pi F_M t + 2\pi f_0 t + \phi_0)] \quad (2)$$

式中: A_n 为各载波分量的幅度。设正弦波相位调制系数为:

$$M = \frac{V_M}{V_\pi} \pi \quad (3)$$

则 $A_n = J_n(M)$ 。

由相关检测原理知,锁相放大器只对与参考输入信号相同频率的信号进行解调输出,所以,对第一类背向散射噪声可以通过对两路光波施加不同的调制频率来加以抑制,而对于第二类背向散射噪声,由于光波受调制后频谱分量 A_0 的出现,仍会与主光波信号发生干涉,可以通过调制信号的幅度来抑制频谱分量 A_0 来加以抑制。 A_0 的归一化幅度与调制系数 M 的关系如图 2 所示。由图 2 可看到,使得载波分量

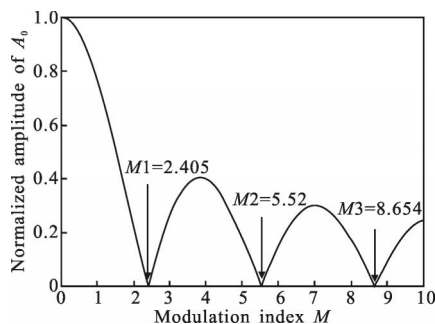


图 2 载波分量和调制系数的关系

Fig.2 Relationship between carrier component and modulation index

A_0 幅度最小的调制系数有多个值,依次为 2.405、5.52、8.654 等,为了电路设计上的方便,以尽量取较小的调制系数为宜。

由 Sagnac 效应引起的陀螺信号极其微弱,系统结构参数确定后,存在一最佳的调制参数,可以使陀螺灵敏度获得最大值。在陀螺结构设计中,为了使两路参数达到最大化的互易性,两光路均采用具有相同调制特性的同一型号相位调制器。调制系数取决于调制信号的幅度和相位调制器的半波电压,两路相位调制器的半波电压具有很高的一致性,可以认为相同,这样为了使载波分量幅度 A_0 抑制到最小,两路调制系数均取 2.405 时^[9],所对应的最佳调制频率却相同,这样反而不利于抑制第一类背散射噪声,如果将其中一路调制系数设在 2.405,而另一路的调制频率设在 5.52,则可以很好地将两路的最佳调制频率避开,这样,既可以很好地抑制第一类背散射噪声,又能抑制第二类背散射噪声。以谐振点处解调曲线的斜率来表征陀螺的工作灵敏度^[10-11],图 3 给出了调制系数分别为 2.405 和 5.52 时谐振点处解调曲线斜率与调制频率的关系,显然,调制系数不同时,最佳灵敏度的调制频率也不同,为两光路选择不同的调制系数提供了理论支撑。

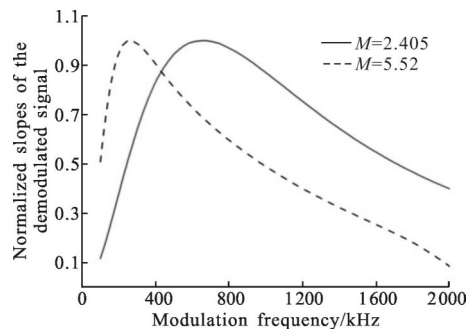


图 3 谐振点处解调信号斜率与调制频率的关系

Fig.3 Slopes of the demodulated signal at resonant point versus modulation frequency

因此,为得到谐振式光纤陀螺系统最佳灵敏度工作点和最大背散射载波抑制比,可以先确定两光路最大载波抑制比的调制幅度,再确定最大灵敏度时的调制频率,以实现陀螺的综合性能的最优化。

2 实验与讨论

基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺,载波抑制

主要通过调整相位调制器上的调制信号幅度来实现,实现较高的载波抑制比,需要准确测定调制系数 M ,即调制信号幅度。采用自外差法,将光谱信号下变频到电子频谱分析仪的测试带宽范围内,可以实现光学载波的测试,测试方案如图 4 所示。

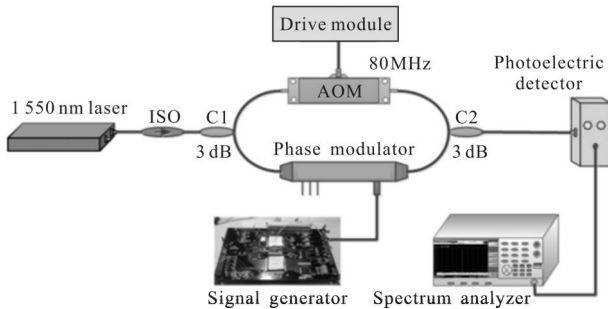


图 4 自外差法载波抑制测试原理图

Fig.4 Testing schematic diagram of carrier suppression using self-heterodyne interferometer technique

激光发出的光,经 3 dB 耦合器分成功率相等的两束光,一路经过声光移频器(AOM),移频值为 80 MHz,一路经相位调制器,两路光信号再经 3 dB 耦合器合束拍频,经光电探测器光电转换后输入给频谱分析仪(SA),即可测得不同调制幅度下电信号的功率,而在整个测试过程中,调制信号的频率对信号功率测试的影响可以忽略,这也保证了在确定调制信号幅度过程中参量变化的唯一性。

实验中,两路光的光程相等,无光纤延迟,经拍频后的光电流功率谱密度函数可以表示为^[12-13]:

$$S(\omega) = K_1 \frac{2/\tau_c}{(2/\tau_c)^2 + (\omega - \Omega)^2} + K_2 \delta(\omega - \Omega) \quad (4)$$

式中: K_1 、 K_2 为与系统参数相关的常量; τ_c 为激光器的相干时间; Ω 为声光移频器的移频值 80 MHz。可以看出,自外差法得到的频谱是以 Ω 为中心频率的近似洛伦兹线型,正弦波相位调制后的激光频率的基波分量 A_0 对应的功率,可以在频谱仪的中心频率处的功率读出,通过改变调制信号幅度来改变调制系数,实现载波频率分量 A_0 的最大抑制。

正弦波信号电压幅度从零开始,不断加大,先后得到了两次载波抑制最低点,分别对应电压幅度为 2.682 5 V 和 6.162 0 V,分别对应于图 2 贝塞尔函数幅值理论曲线的 $M1$ 点的 2.405 和 $M2$ 点的 5.52,由公式(3)可求得两个不同调制电压下的半波电压均为 3.5 V,测试结果与相位调制器规格要求小于 4 V

相符。再由公式(3)将调制信号电压转换为调制系数,可以得到载波分量 A_0 对应的功率随调制电压幅度的变化关系,其实测曲线和理论曲线如图 5 所示。

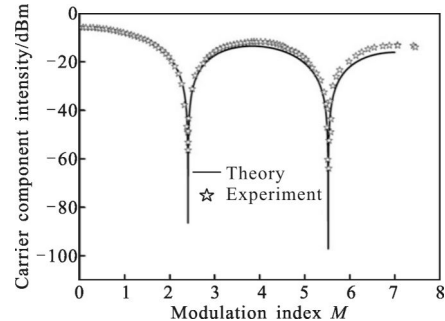


图 5 不同调制系数下的载波分量功率值

Fig.5 Carrier component intensity versus different modulation indexes

基于上述测试结果,R-FOG 系统中的两路光路,一路用于调制的正弦波电压幅度设为 2.682 5 V,另一路用于调制的正弦波电压幅度设为 6.162 0 V,改变两路正弦波的频率,使两路解调信号的斜率均达到最大值,这样,对陀螺系统背向散射噪声最大化抑制的情况下,其最大灵敏度也能够得到保证。采用这种方法,确定了 R-FOG 系统的最佳调制参数,对大动态陀螺系统进行转动实验,实验中所用到的光纤环由 12 m 的全保偏光纤熔接,耦合系数为 50%,半高全宽达 4.94 MHz,可实现更大角速率的测量。

实验中,通过可以调节旋转角速度的高精密机械转台来对陀螺系统的实际输出信号进行标定,表 1 给出了不同旋转角速度下的陀螺输出信号。

表 1 不同旋转角速度下的陀螺输出信号

Tab.1 R-FOG output of different angular velocities

Angular velocity /($^{\circ}$) \cdot s $^{-1}$	Gyro signal /mV	Angular velocity /($^{\circ}$) \cdot s $^{-1}$	Gyro signal /mV
-480	-314.930	480	297.366
-420	-276.976	420	264.183
-360	-241.853	360	234.333
-300	-208.875	300	189.373
-240	-173.009	240	152.379
-180	-130.197	180	114.461
-120	-91.905	120	79.438
-60	-48.469	60	41.842
0	-1.516	-	-

图 6 给出了最小二乘法拟合下不同旋转角速率的输入输出关系曲线,动态范围在 ± 480 ($^{\circ}$)/s 的非线

性度为 3%。除光路背向散射噪声,光路中的克尔效应、偏振噪声、温度漂移及电路噪声也是影响 R-FOG 系统的重要因素,仍需要采取有效的措施进行抑制,以达到散粒噪声决定的极限灵敏度。

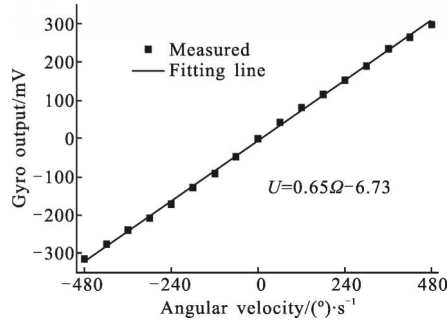


图 6 R-FOG 转动角速率与输出电压的线性拟合

Fig.6 Fitting line between gyro output velocity and angular velocities

3 结论

调相谱检测技术是实现陀螺微弱信号检测的有效手段,利用相位调制频谱展开式,依据载波分量和正弦波调制信号的幅度关系,提出了调相谱最优参数的确定方法,即先确定两光路的调制信号幅度,使得两光路最大载波抑制比的调制系数分别为载波分量的第一次谷底点和第二次谷底点,再确定两光路的最大灵敏度工作点的调制频率,这样在保证陀螺最佳灵敏度工作点的情况下,使得两光路的调制频率不同,有效抑制第一类背向散射噪声,同时每路的载波抑制比又得到最大,有效抑制第二类背向散射噪声,有效提高了陀螺输出性能。在所搭建的 R-FOG 实验平台上,得到了动态范围 ± 480 (°)/s、非线性度为 3%的转动结果。为 R-FOG 实验系统的设计及调制参数的确定提供了新的方法。

参考文献:

[1] Jin Z, Yu X, Ma H. Resonator fiber optic gyro employing a semiconductor laser[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(15): 2856-64.

[2] Monovoukas C, Swiecki A, Maseeh F. Integrated optical gyroscopes offering low cost, small size and vibration immunity [C]//Proceedings of the Symposium on Integrated Optoelectronics, 2000, 3936: 293-300.

[3] Sanders V E, Soohoo K L, Valle T J. Passive ring resonator gyroscope: US, 5118189[P]. 1992-06-02.

[4] Strandjord L K, Sanders G A. Resonator fiber optic gyro

employing a polarization-rotating resonator [C]//Proceedings of the Fiber Optic Gyros: 15th Anniversary Conf, 1992: 163-172.

- [5] Li Shengkun, Zheng Yongqiu, An Panlong, et al. T-type feedback network applied in resonance frequency locking of resonator fiber optic gyro [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1162-1166. (in Chinese)
李圣昆, 郑永秋, 安盼龙, 等. T型反馈网络在谐振式光纤陀螺频率锁定中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1162-1166.
- [6] Feng L, Lei M, Liu H, et al. Suppression of backreflection noise in a resonator integrated optic gyro by hybrid phase-modulation technology [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(8): 1668-1675.
- [7] Yi Y, Shi K, Lu W, et al. Phase modulation spectroscopy using an all-fiber piezoelectric transducer modulator for a resonator fiber-optic gyroscope [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(31): 7383-7386.
- [8] Zhang X L, Ma H L, Jin Z H, 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.
- [9] Ma H, He Z, Hotate K. Reduction of backscattering induced noise by carrier suppression in waveguide-type optical ring resonator gyro [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(1): 85-90.
- [10] Wang Mahua, Cui Yiping, Zhang Tong. Investigation on the determination of the optimized modulating frequency for the R-IOG [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, 30(6): 2291-2293. (in Chinese)
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.
- [11] Feng Xiang, Ma Yingjian, Yu Huaiyong, et al. Investigation on the modulation of the optimized sensitivity for the resonator optic gyroscope [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 1064-1067. (in Chinese)
冯翔, 马迎建, 于怀勇, 等. 谐振式微光学陀螺最佳灵敏度调节的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 1064-1067.
- [12] Richter L, Mandelberg H, Kruger M, et al. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(11): 2070-2074.
- [13] Xiao Huaju, Wang Xiang, Ma Yun, et al. Linewidth measurement of narrow fiber laser based on the DSHI [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(8): 57-61. (in Chinese)
肖华菊, 王翔, 马云, 等. 基于 DSHI 的窄线宽光纤激光器线宽测量[J]. *光电工程*, 2010, 37(8): 57-61.