

基于波长调制的谐振式光纤陀螺检测研究

赵猛, 石邦任, 陈晨, 郭丽君, 孔梅

(长春理工大学, 长春, 130022)

摘要: 基于 Sagnac 效应的光纤陀螺通常可分为干涉式光纤陀螺 (IFOG) 和谐振式光纤陀螺 (RFOG)。IFOG 现在已完全产品化, 其角速度传感精度已接近激光陀螺 (LG)。而 RFOG 使用 5-10m 长的光纤环即可达到 1km 长 IOG 的传感精度, 这使得 RFOG 成为未来高精度、低价格光学陀螺的一个发展方向。根据 Sagnac 效应及谐振腔理论, 谐振式光纤陀螺的核心角速度敏感器件光纤环的顺逆时针方向的谐振频率差正比于陀螺角速度的大小, 因此精确的检测与跟踪顺逆时针谐振点即为谐振式光纤陀螺角速度检测的基本原理。目前, 谐振式光纤陀螺检测方法主要集中在基于相位调制器的调相谱 (PM) 法, 且取得了较大的进展, 而调相谱法的调制系数约等于 1, 从调制原理上属于频率调制范畴, 与频率调制相对应的另一种调制方法即波长调制方法未见深入研究。本论文从理论上研究了波长调制情况下的谐振式光纤陀螺检测方法, 给出了解调曲线的数值描述公式, 通过实验得到 1Hz 锁频精度, 需要保证 0.1uV 的电压检测灵敏度。

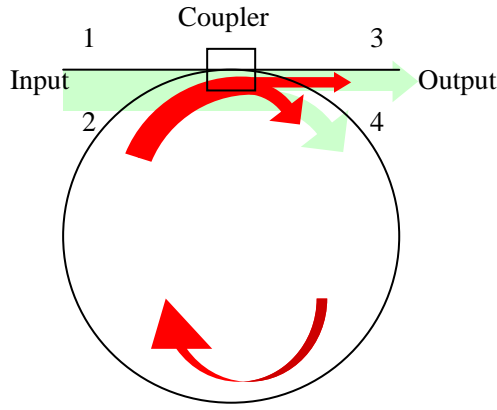
关键词: 波长调制 谐振式光纤陀螺

1、引言

基于 Sagnac 效应的光纤陀螺通常可分为干涉式光纤陀螺 (IFOG) 和谐振式光纤陀螺 (RFOG)。IFOG 现在已完全产品化, 其角速度传感精度已接近激光陀螺 (LG)。而 RFOG 使用 5-10m 长的光纤环即可达到 1km 长 IOG 的传感精度, 这使得 RFOG 成为未来高精度、低价格光学陀螺的一个发展方向。根据 Sagnac 效应及谐振腔理论, 谐振式光纤陀螺的核心角速度敏感器件光纤环的顺逆时针方向的谐振频率差正比于陀螺角速度的大小, 因此精确的检测与跟踪顺逆时针谐振点即为谐振式光纤陀螺角速度检测的基本原理。目前, 谐振式光纤陀螺检测方法主要集中在基于相位调制器的调相谱 (PM) 法, 且取得了较大的进展, 而调相谱法的调制系数约等于 1, 从调制原理上属于频率调制范畴, 与频率调制相对应的另一种调制方法即波长调制方法未见深入研究。本论文从理论上研究了波长调制情况下的谐振式光纤陀螺检测方法, 给出了解调曲线的数值描述公式, 通过实验得到 1Hz 锁频精度, 需要保证 0.1uV 的电压检测灵敏度。

2、理论

RFOG 的基本原理是基于 Sagnac 效应和谐振腔理论。当谐振环处于静止时, 其顺逆时针 (CW and CCW) 谐振频率相同, 当谐振环以一定角速度沿对称轴进行旋转时, 由于角速度改变了 CW 与 CCW 方向的等效腔长, 导致两方向的谐振频率出现分离。图 1 所示为谐振环静态传输特性的光场叠加原理。



- 1、耦合器强度耦合系数为 k_c
- 2、耦合器插入损耗为 α_c dB
- 3、波导的传播损耗为 α_L dB
- 4、波导的损耗系数 α_0 dB/cm
- 5、波导为单偏振
- 6、不考虑激光器线宽
- 7、不考虑背向散射、反射

图1 谐振环静态传输特性

激光从耦合器 1 端口入射，从 3 端口出射，部分光从 4 端口耦合到谐振环内，沿环形光路传播，经过时间 τ ($\tau = \frac{nL}{c}$, n 为波导折射率, L 为波导环周长, c 为真空中光速。)传播一周后从耦合器 2 端口入射，部分光从 3 端口出射，另一部分再次经 4 端口进入环形光路。最终 3 端口输出光由多个光束干涉叠加而成。

谐振环的透过率可以表示为：

$$T(\omega) = \left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \alpha_c \left[1 - \frac{k_c (1 - \alpha_c \alpha_L)}{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(\phi)} \right] \quad (1)$$

$$\lambda = \sqrt{1 - k_c} \sqrt{\alpha_c} \sqrt{\alpha_L}$$

$$\phi = \omega\tau$$

式中 k_c 是耦合系数, α_c 是耦合器损耗, α_L 是环形波导总损耗, 由环长与波导损耗系数决定, 即 $\alpha_L = 10^{-\alpha_0 L}$, α_0 是波导损耗系数。

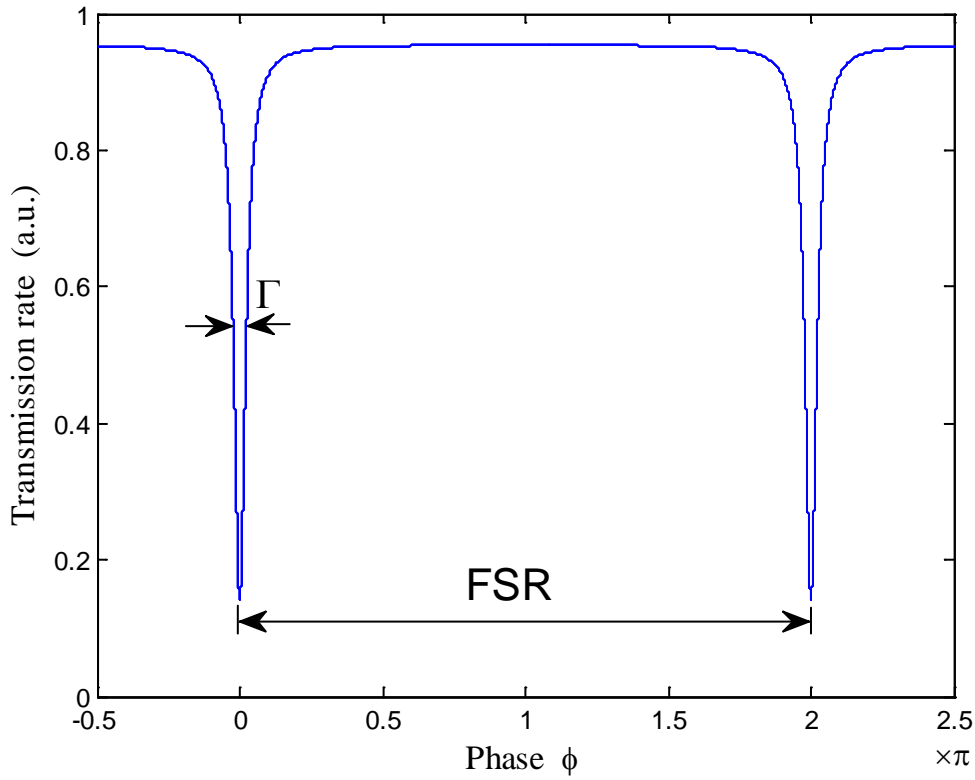


图2 谐振环透过率 T 与延迟相位 $\omega\tau$ 之间的关系

图2给出了谐振环透过率与延迟相位之间的关系，从图中可以看出，当延迟相位是 2π 的整数倍时，谐振环具有最小的透过率，此处即为谐振环的谐振点，其对应的频率即为谐振频率。

RFOG 的波长调制检测方法是使用一个正弦信号对激光器的 PZT 进行调制，激光器输出频率随之发生周期性的变化，若激光器的中心频率落在谐振环谐振点附近时，波动的激光频率会导致输出光强的变化，光强信号与调制信号通过锁相放大器进行解调得出激光中心频率偏离谐振点的大小与方向。

调制后的激光瞬时频率为：

$$\omega_t = \omega_c + \omega_A \cos(\omega_m t) \quad (2)$$

根据 Amdt 的波长调制理论，输出信号可以表示成调制频率 ω_m 的各次谐波的叠加，即：

$$I_{out} = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n \cos(n\omega_m t) \int_{-1}^{+1} dx T(\omega_c \tau - \omega_A \tau x) \frac{T_n(x)}{\sqrt{1-x^2}} \quad (3)$$

式中 $T_n(x)$ 为 n 阶切比雪夫多项式， $x = \frac{\omega}{\omega_A}$ ， $\varepsilon_0 = 1$ ， $\varepsilon_n = 2$ ($n = 1, 2, 3 \dots$)

考虑到最后锁相放大器 (LIA) 检测输出信号中的一次谐波分量，则 LIA 输出的解调信号为：

$$V_{out} = -\frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^k \frac{\pi}{k} T[\omega_c \tau - \omega_A \tau \cos(\frac{2i-1}{2k} \pi)] \cos(\frac{2i-1}{2k} \pi) \quad (4)$$

解调曲线如图 4 所示。

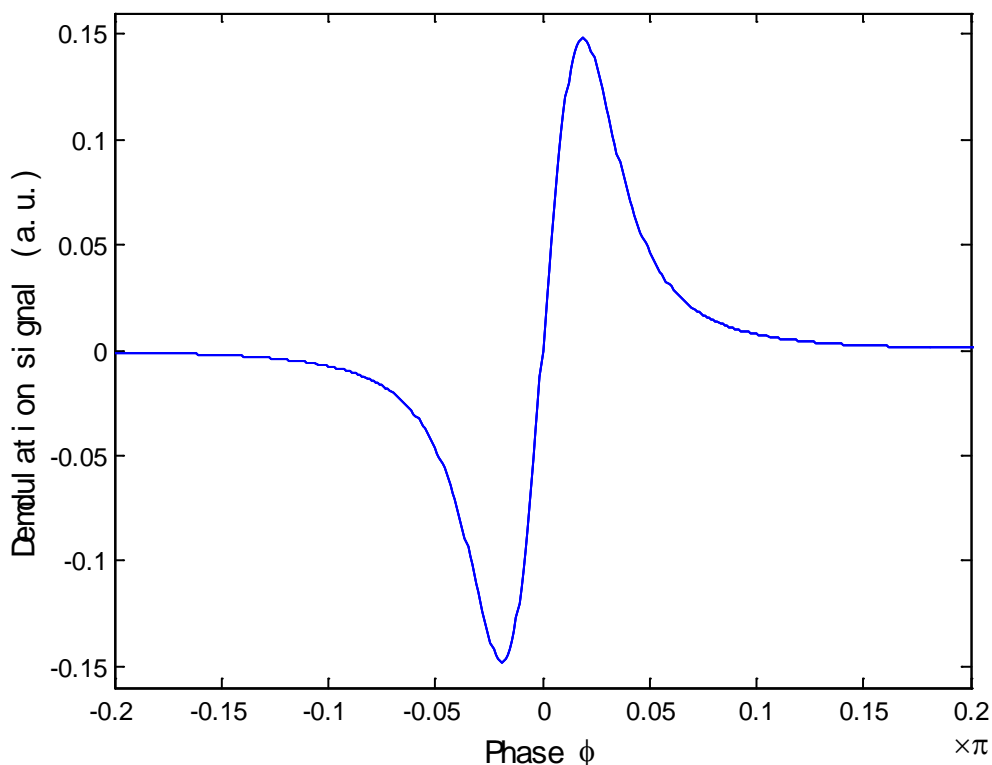


图 3 LIA 的解调曲线

4、实验和讨论

采用波长调制法检测谐振环的谐振频率，其原理如图 4 所示。

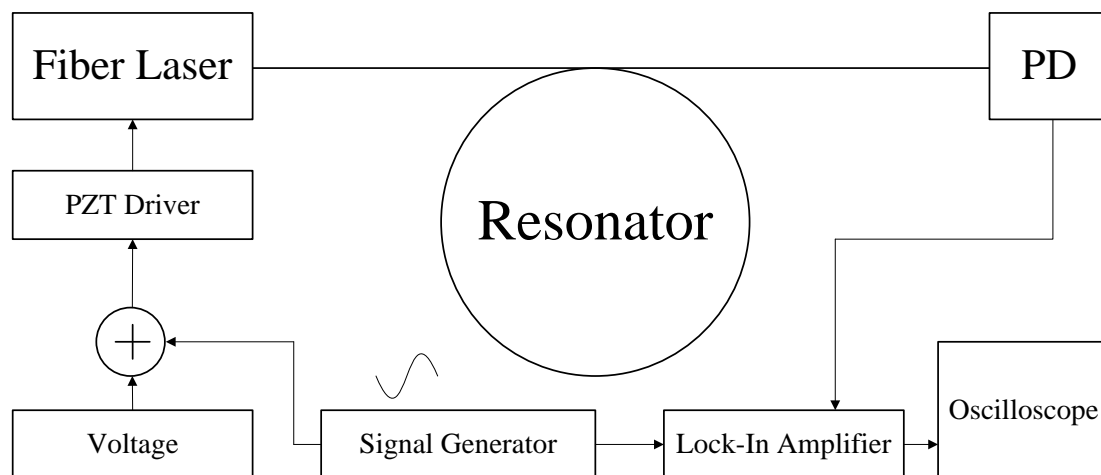


图 4 波长调制检测方法结构图

激光波长调制方法如图 4 所示。信号发生器（Signal Generator）生成 1KHz 的正弦波，通过加法器送到 PZT 驱动器（PZT Drive）上，对光纤激光器的频率进行调制。光电探测器（PD）上接收到的光信号送给锁相放大器与信号发生器给出的参考信号进行相关检测，从而检测出光信号中 1 次谐波分量，其结果图 5 所示。

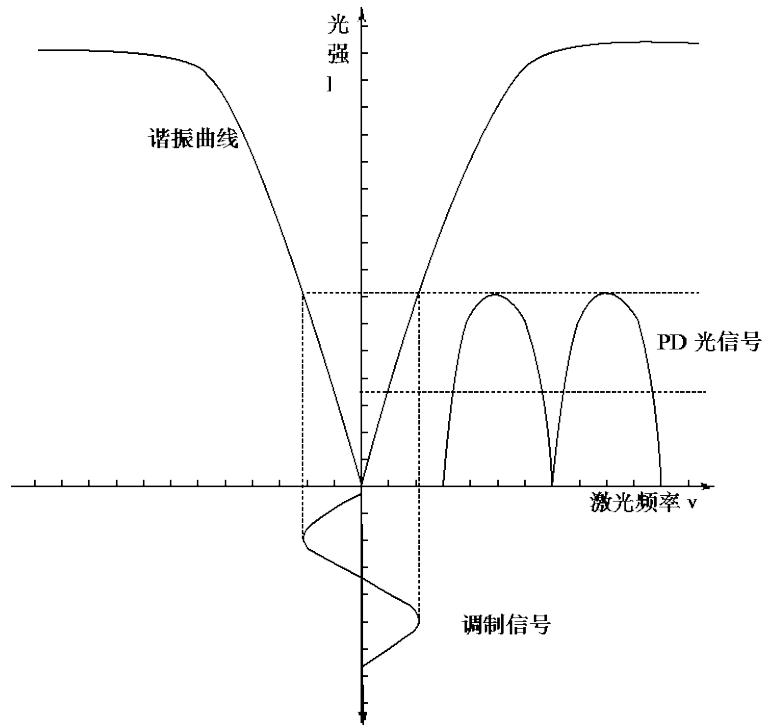


图 5 调制后的输出信号（谐振点处）

图 5 中激光器输出的中心频率等于谐振环的谐振频率，当调制信号围绕着谐振点上下波动时，PD 上得到的光信号中 1 次谐波完全消失，锁相放大器检测不到光信号中与调制信号同频的 1 次谐波，其输出电压为 0。

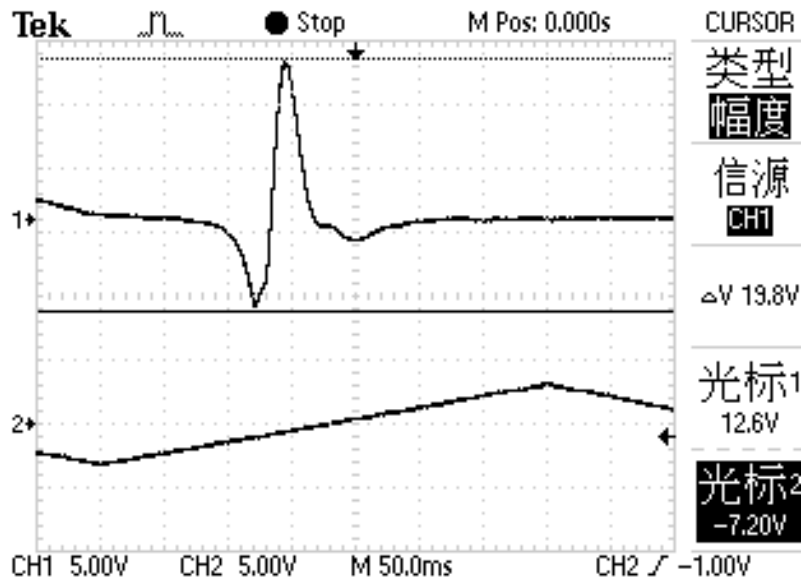


图 6 三角波扫描周期内一个谐振点的情况

1 通道接锁相放大器输出，2 通道接三角波发生器

从图 6 可以看出锁相放大器输出线性区幅值接近 20V。线性区对应的光频率宽度约为半高全宽 FWHM，实验中测得 FWHM 为 64MHz，则锁相放大器的输出电压每伏对应的光频率变化量为

$$\frac{64\text{MHz}}{20\text{V}} = 3.2\text{MHz/V}$$

实验中使用的声光移频器为中心频率 55MHz，调频范围±3MHz。从上述条件可以看出 6MHz 的频率变化范围对应锁相放大器输出电压变化范围为 0.66V，对应每赫兹需要检测的电压为 0.1uV/Hz。

5、结论

使用多光束叠加原理，本文理论分析了激光波长调制解调过程，给出了解调信号表达式，并通过实验得到为得到 1Hz 的锁频精度，必须保证电压测量需要达到 0.1uV 的电压精度。

参考文献

- [1] E. J. Post, "Sagnac effect", Rev. Mod. Phys. 39, 475–493 (1967).
- [2] N. Barbour and G. Schmidt, "Inertial sensor technique trends", IEEE Sens. J 1, 332–339 (2001).
- [3] K. Suzuki, K. Takiguchi, and K. Hotate, "Monolithically integrated resonator micro-optic gyro on Silica planar lightwave circuit", J. Lightwave Technol. 18, 66–72 (2000).
- [4] H. Ma, X. Zhang, Z. Jin and C. Ding, "Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique", Opt. Eng. Lett. 45(8), 2006
- [5] X. Zhang and K. Zhou, "Open-loop operation experiments in a resonator fiber-optic gyro using the phase modulation spectroscopy technique", Appl. Opt. 45, 7961-7965(2006)