

文章编号: 0258-7025(2003)08-0731-04

激光器线宽对光纤环形谐振腔 谐振特性的影响

马慧莲, 金仲和, 丁纯, 王跃林

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

摘要 采用光波场叠加的方法计算了谐振腔光纤陀螺的核心敏感部件——光纤环形谐振腔(FRR)的传递系数, 详细分析了激光器光谱线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响, 并进一步分析了在一定激光器光谱线宽条件下, 由光探测器散弹噪声所限制的谐振腔光纤陀螺极限灵敏度和光纤环形谐振腔光路参数之间的关系, 从而为谐振腔光纤陀螺的优化设计提供了理论基础。

关键词 光电子学; 光纤环形谐振腔; 光谱线宽; 谐振腔光纤陀螺

中图分类号 V 241.5⁺58; TN 815 **文献标识码** A

Influence of Spectral Linewidth of Laser on Resonance Characteristics in Fiber Ring Resonator

MA Hui-lian, JIN Zhong-he, DING Chun, WANG Yue-lin

(Department of Information & Electronic Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A simple optical field overlap method is reported to calculate the transfer coefficient of fiber ring resonator, the heart of the resonator fiber optic gyro. The results are applied to the investigation of influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator. Furthermore, analysis has been made of relationship between the shot-noise-limited sensitivity of resonator fiber optic gyro and optical parameters in fiber ring resonator under some spectral linewidth of the laser conditions. The results are provided to theoretical basis for optimization design of resonator fiber optic gyro.

Key words optoelectronics; fiber ring resonator; spectral linewidth; resonator fiber optic gyro

1 引言

光纤陀螺是基于光学 Sagnac 效应来敏感测量旋转体旋转角速度的一种高精度的惯性传感器件^[1,2]。谐振腔光纤陀螺(R-FOG)采用光纤环形谐振腔(FRR)作为核心敏感部件,通过测量 FRR 中顺时针(CW)和逆时针(CCW)两路行波中心频带分裂量,得到转动的角速率。由于 CW, CCW 本征模的谐振曲线有一定的谱线宽度,这将会给中心频率差值的测量带来误差。因此,从原理上讲, FRR 的谐

振谱线宽度越小,频率测量越准确^[3]。

在谐振腔光纤陀螺中,半导体激光光源具有有限的时域相干性,具体体现在其输出光谱具有一定的线宽。在激光器的作用下, FRR 表现的谐振谱特性实质上是激光器谱特性和 FRR 本身谱特性的卷积。因此,当激光器线宽与 FRR 的本征谱线宽度相当时,在分析 FRR 的谐振特性时,必须考虑到光源相干性的影响。

收稿日期: 2003-01-27; 收到修改稿日期: 2003-03-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999033110)和浙江省教育厅科研项目(20020723)资助课题。

作者简介: 马慧莲(1975—),女,浙江大学信息与电子工程系讲师,博士,主要从事微光机电系统和光纤传感的研究。E-mail: mahl@zju.edu.cn

2 FRR 的基本原理

根据激光的相干理论,激光器的相干性可以理解为输出光的时域相干性^[4]。考虑到半导体激光光源有限的时域相干性,光纤环形谐振腔的输入光波可表示如下

$$E(t) = E_0 \exp\{i[\omega_0 t + \phi(t)]\} \quad (1)$$

虽然光波的振幅随时间也有起伏,但是对频谱的影响很小,一般可以假定光波场的幅度稳定,这对于工作在阈值以上的单模激光器来说是合理的。因此(1)式中光波幅度用 E_0 表示,式中 $\phi(t)$ 表示光波随机变化的相位部分, ω_0 为激光器输出光波的中心角频率。利用激光器相位波动和其输出光谱展宽间的关系^[4],光波随机变化的相位满足如下的时间平均关系

$$\overline{\exp[i\phi(t)] \cdot \exp[-i\phi(t-\tau)]} = \exp(-\pi\Delta f\tau) \quad (2)$$

当 $\tau \geq 0$ 时

其中 Δf 为光源的谱线宽度,定义为激光器输出光谱幅度降低为其最大值一半时所对应的频带宽度, τ 为时间间隔。

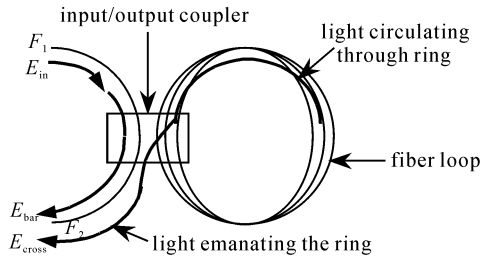


图 1 光纤环形谐振腔的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber ring resonator

图 1 给出了 R-FOG 中 FRR 的结构示意图。它是由两段入口光纤 F_1 和 F_2 , 一个输入/输出光纤耦合器和 N 圈单模光纤环组成。输入光从光纤 F_1 进入并耦合到输入/输出光纤耦合器,部分光直接从耦合器的直通端口耦合到输出光纤 F_2 , 把这部分不经过光纤环传输的光记做 E_{bar} ; 另有部分光从耦合器的交叉端口耦合到 FRR, 这部分光在光纤环内绕环传输, 每经过输入/输出光纤耦合器一次(恰好绕环一周), 就有部分光从光纤耦合器的交叉端口耦合出光纤环构成 E_{cross} , 因此, E_{cross} 是一系列从光纤环耦合出来的光波场的叠加。根据以上分析, E_{bar} 和 E_{cross} 可分别表示如下

$$E_{\text{bar}} = E_0 e^{i\omega t} e^{i\phi(t)} C_{\text{bar}} \sqrt{1-\alpha_C} \quad (3)$$

$$E_{\text{cross}} = E_0 \sum_{m=1}^{\infty} \left[e^{i\omega(t-m\tau)} e^{i\phi(t-m\tau)} C_{\text{bar}}^{m-1} (\sqrt{1-\alpha_C})^m \times (\sqrt{1-\alpha_L})^m \right] C_{\text{cross}} \sqrt{1-\alpha_C} \quad (4)$$

进一步整理(4)式,可以得到

$$E_{\text{cross}} = E_0 \cdot C_{\text{cross}}^2 \cdot (1-\alpha_C) \cdot \sqrt{1-\alpha_L} \cdot e^{i\omega t} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} C_{\text{bar}}^{m-1} (\sqrt{1-\alpha_C})^{m-1} (\sqrt{1-\alpha_L})^{m-1} \cdot e^{-i\omega m\tau} e^{i\phi(t-m\tau)} \quad (5)$$

(3) ~ (5) 式中各参数定义如下: ω 为输入光波的角频率; C_{bar} 为光纤耦合器在直通端口的光场耦合系数; C_{cross} 为光纤耦合器在交叉端口的光场耦合系数; α_C 为光纤耦合器损耗; α_L 为光纤环总损耗(包括光纤传输损耗和成环时的接头损耗); τ 为输入光绕光纤环总长度 L 一周的时间($\tau = Ln/c$, n 为光纤折射率, c 为真空中光速); m 为绕光纤环的次数。

为简化起见,令

$$\begin{aligned} T &= C_{\text{bar}} \sqrt{1-\alpha_C} \\ R' &= C_{\text{cross}}^2 (1-\alpha_C) \sqrt{1-\alpha_L} \\ Q' &= \sqrt{1-\alpha_L} C_{\text{bar}} \sqrt{1-\alpha_C} \end{aligned} \quad (6)$$

则 E_{bar} 和 E_{cross} 可简化为

$$E_{\text{bar}} = E_0 \cdot T e^{i\omega t} e^{i\phi(t)} \quad (7)$$

$$E_{\text{cross}} = E_0 \cdot R' \cdot e^{i\omega t} \sum_{m=1}^{\infty} (Q')^{m-1} e^{-i\omega m\tau} e^{i\phi(t-m\tau)} \quad (8)$$

FRR 的总输出光场 E_{out} 是 E_{bar} 和 E_{cross} 的矢量和, 在谐振状态时, E_{bar} 和 E_{cross} 的相位相差 π , 以产生最佳相消干涉^[5]。因此 E_{out} 的标量部分可表示为

$$E_{\text{out}} = E_0 e^{i\omega t} \left[T e^{i\phi(t)} - R' \sum_{m=1}^{\infty} (Q')^{m-1} e^{-i\omega m\tau} e^{i\phi(t-m\tau)} \right] \quad (9)$$

由光波强度正比于光波场标量平方的时间平均, 可以得到 FRR 的总输出光强为

$$I_{\text{out}} = c \epsilon_0 \overline{E_{\text{out}} \cdot E_{\text{out}}^*} = c \epsilon_0 \langle E_{\text{out}} \cdot E_{\text{out}}^* \rangle \propto \langle |E_{\text{out}}|^2 \rangle \quad (10)$$

(10) 式上面的横线表示取时间平均, * 表示取复数共轭, $\langle \rangle$ 表示整体平均。式中利用了对于遍历随机过程, 时间平均和整体平均是相等的^[4]。结合(9)和(10)式可以得到 FRR 传递系数 T_{FRR} 与光路参数间的关系式

$$\begin{aligned} T_{\text{FRR}} &= \frac{I_{\text{out}}}{I_0} = \frac{\langle |E_{\text{out}}|^2 \rangle}{E_0^2} = \\ &= T^2 - \frac{2TR(\cos\omega\tau - Q)}{1 + Q^2 - 2Q\cos\omega\tau} + \\ &= \frac{(R')^2}{1 - (Q')^2} \cdot \frac{1 - Q^2}{1 + Q^2 - 2Q\cos\omega\tau} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 I_0 为输入光强度。参数 R, Q 分别定义如下

$$R = R' e^{-\pi \Delta f \tau}, \quad Q = Q' e^{-\pi \Delta f \tau} \quad (12)$$

3 FRR 谐振特性分析

3.1 激光器线宽对 FRR 谐振谱线宽度的影响

FRR 的特性参数主要有自由谱域 (Free Spectral Index, FSR)、谐振谱线宽度和谐振清晰度 F 。对于给定长度的光纤环, 谐振清晰度 F 可以表征 FRR 的谐振谱线宽度

$$F = \text{FSR}/\Gamma \quad (13)$$

式中 FSR 是指相邻两个谐振频率的间距, $\text{FSR} = c/nL$; Γ 为谐振谱线宽度。

改写(11)式

$$T_{\text{FRR}} = \frac{2T(TQ+R) \cdot [(Q')^2 - 1] \cdot \cos\omega\tau + \text{const}}{[1 - (Q')^2] \cdot [1 + Q^2 - 2Q\cos\omega\tau]} \quad (14)$$

式中 const 是与 $\omega\tau$ 无关的常数项, 由 T, Q, R, Q' 和 R' 的定义可知, $0 < T, Q, R, Q', R' < 1$, 因此 T_{FRR} 是 $\cos\omega\tau$ 的减函数。所以有

当 $\cos\omega\tau = -1$ 时, T_{FRR} 取最大值, 即

$$T_{\text{FRR}}^{\max} = T^2 + \frac{2TR}{1+Q} + \frac{(R')^2}{1-(Q')^2} \cdot \frac{1-Q}{1+Q} \quad (15)$$

当 $\cos\omega\tau = 1$ 时, T_{FRR} 取最小值, 即

$$T_{\text{FRR}}^{\min} = T^2 - \frac{2TR}{1-Q} + \frac{(R')^2}{1-(Q')^2} \cdot \frac{1+Q}{1-Q} \quad (16)$$

T_{FRR} 的半高值为

$$T_{\text{FRR}}^{\text{half}} = \frac{T_{\text{FRR}}^{\max} + T_{\text{FRR}}^{\min}}{2} = T^2 - \frac{2TR}{1-Q^2} + \frac{(R')^2}{1-(Q')^2} \cdot \frac{1+Q^2}{1-Q^2} \quad (17)$$

令 $T_{\text{FRR}} = T_{\text{FRR}}^{\text{half}}$, 可得 FRR 谐振谱线宽度的表达式 $\Gamma =$

$$\cos^{-1} \left\{ \frac{2TRQ[1 - (Q')^2] - 2(R')^2 Q^2}{(TRQ^2 + TR) \cdot [1 - (Q')^2] - (R')^2 Q(1 + Q^2)} \right\} \tau \pi \quad (18)$$

3.2 R-FOG 的极限灵敏度

R-FOG 中, 由光探测器散弹噪声决定的极限灵敏度为^[1]

$$\delta\Omega \approx \frac{\lambda P}{4A} \frac{\sqrt{2}\Gamma}{\text{SNR}} \quad (19)$$

式中 P 为单圈光纤周长, A 为单圈光纤环包围的面积, SNR 为测试系统的信噪比, 可表示如下

$$\text{SNR} = \sqrt{\frac{\eta t_0 I_0}{2h\nu}} \frac{T_{\text{FRR}}^{\max} - T_{\text{FRR}}^{\min}}{\sqrt{T_{\text{FRR}}^{\max}}} \quad (20)$$

式中 η 为光探测器的量子效率, h 为普朗克常数, ν 为 FRR 输入光频率, t_0 为光探测器的积分时间。

3.3 数值计算

以上采用光波场叠加的方法, 给出了激光器线宽对 FRR 谐振特性影响的计算公式, 下面将结合 R-FOG 的极限灵敏度, 对 FRR 的光路参数进行优化设计。

图 2 给出了激光器光谱线宽对 FRR 传递系数的影响, 对应光纤环总长度为 5 m, 输入光波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 光纤环总损耗为 0.05 dB, 光纤耦合器损耗为 0.2 dB, 光纤耦合器交叉端的耦合系数为 5%。从图 2 可以看出, 激光器光谱线宽对 FRR 谐振曲线斜率的影响十分明显。

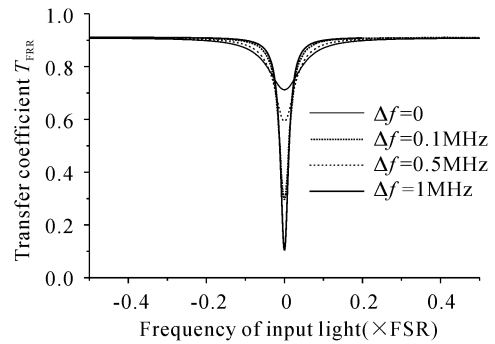


图 2 激光器光谱线对 FRR 传递函数的影响
Fig. 2 Influence of spectral linewidth of laser on transfer coefficient in FRR

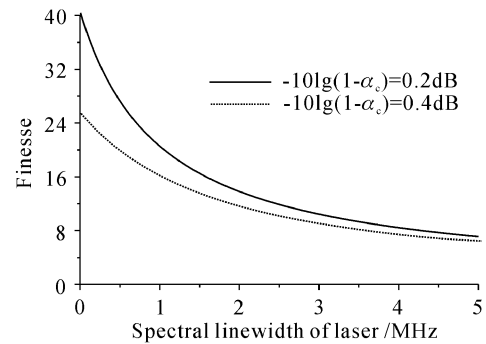


图 3 激光器光谱线宽与谐振清晰度的关系
Fig. 3 Relationship between finesse in FRR and spectral linewidth of laser

图 3 给出了对应于不同的光纤耦合器损耗, 激光器光谱线宽对 FRR 谐振清晰度的影响, 其他光路参数同图 2。从图 3 可以得到, 在光纤耦合器插入损耗为 0.2 dB (对应谐振腔的本征谱线宽度 1 MHz) 时, 激光器线宽为 1 MHz 时的谐振清晰度从零线宽时的 40.5 降低到 20.5; 在光纤耦合器损耗为 0.4 dB (对应谐振腔的本征谱线宽度 1.6 MHz) 时

时,激光器线宽为 1 MHz 时的谐振清晰度从零线宽时的 25.5 降低到 15.8。由此可见,光纤耦合器的插入损耗是影响谐振清晰度的主要因素,激光器光谱线宽也是影响谐振清晰度的重要因素,具体影响程度与激光器线宽及谐振腔本征谱线宽度间的相对大小有关。

图 4 给出了不同激光器光谱线宽下,R-FOG 的极限灵敏度随光纤耦合器交叉端耦合系数的变化情况。从图 4 可以得到以下三个结论:

1) 在 FRR 光路参数给定时,激光器光谱线宽越窄,R-FOG 的极限灵敏度越高。这说明激光器光

谱线宽是影响极限灵敏度的重要参数。

2) 在激光器光谱线宽较窄时,光纤耦合器存在一理想的耦合系数,使 R-FOG 的极限灵敏度最高,此时 FRR 的总损耗与光纤耦合器的耦合系数间满足最佳谐振条件,并且激光器光谱线宽越宽,最佳耦合系数也越大。

3) 在激光器光谱线宽较宽时,最佳谐振条件消失。这是因为当激光器光谱线宽展宽到一定程度时,受光谱色散的影响,谐振腔谱线宽度不再减小而是随耦合系数的增加而增加。

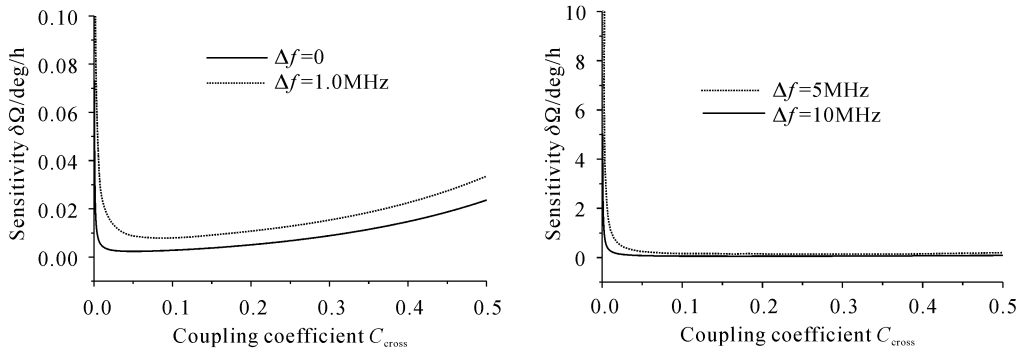


图 4 极限灵敏度与耦合系数的关系

Fig. 4 Relationship between sensitivity and coupling coefficient

4 结 论

以上分析可以表明,激光器光谱线宽是影响 FRR 谐振特性和 R-FOG 极限灵敏度的重要因素,并且激光器线宽将直接影响 FRR 的最佳谐振条件,从而影响 R-FOG 光路参数的优化设计过程。特别是当激光器光谱线宽与 FRR 的本征谱线宽度相当时,影响更为显著。

参 考 文 献

1 W. W. Chow, J. Gea-Banaciloche, L. M. Pedrotti *et*

al.. The ring laser gyro [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1):61~103

2 A. R. Marvern. Progress towards fiber optic gyro production [C]. *SPIE*, 1991, **1585**:48~64

3 F. Zarinetchi, S. Ezekiel. Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(6):401~403

4 Yoshihiro Ohtsuka. Optical coherence effects on a fiber-sensing Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(23):4316~4320

5 Lee K. Strandjord, Glen A. Sanders. Effects of imperfect serrodyne phase modulation in resonator fiber optic gyroscopes [C]. *SPIE*, 1994, **2292**:272~282