

谐振型光纤陀螺的灵敏度分析

蒋治国, 胡宗福

同济大学电子与信息工程学院, 上海 201806

摘要 谐振型光纤陀螺(RFOG)因具有敏感光纤短和体积小等优点而备受关注。分析了激光线宽、光纤环形谐振腔(FRR)及检测技术对 RFOG 灵敏度的影响。依据 RFOG 信号检测方法,推导出受光电检测器灵敏度限制的 RFOG 灵敏度公式,并给出了考虑激光线宽和腔内偏振轴 90° 旋转的 RFOG 灵敏度修正公式。基于多光束干涉原理,分析了数字调相电压的误差和噪声对灵敏度的影响。仿真结果表明,为获得高灵敏度,针对不同的激光线宽应选取不同的 FRR 腔长,偏振轴 90° 旋转熔接的两边长度差应为保偏光纤半拍长的奇数倍,数字调相电压的噪声方均根值应小于 0.22 V 。该工作为高精度 RFOG 的设计提供了理论指导。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 光纤环形谐振腔; 灵敏度; 激光线宽

中图分类号 TP212.1; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0706001

Analysis on Sensitivity of Resonant Fiber Optic Gyro

Jiang Zhiguo, Hu Zongfu

College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201806, China

Abstract Resonant fiber optic gyro (RFOG) has attracted many attentions due to its advantages such as short-sensitive fiber and small size. The influences of laser linewidth, fiber ring resonator (FRR) and detection technology on the sensitivity of RFOG are analyzed. According to the detection method for RFOG signal, a formula of RFOG sensitivity limited by photoelectric detector sensitivity and a correction formula of RFOG sensitivity considering laser linewidth and 90° polarization-axis rotated splice are derived. The sensitivity influenced by error and noise of digital phase modulation voltage is studied based on multi-beam interference principle. The simulation results show that, in order to get high sensitivity, the length of FRR should be selected according to laser linewidth, and the length of two sections of fibers in both sides of 90° polarization-axis rotated splice should be set as odd times of the half-beat length of polarization maintaining fiber. Additionally, the root-mean-square of digital phase modulation voltage noise should be less than 0.22 V . The work provides theoretical guidance for the design of high precision RFOG.

Key words fiber optics; fiber optic gyro; fiber ring resonator; sensitivity; laser linewidth

OCIS codes 060.2310; 060.2800; 060.2370; 060.2630

1 引 言

谐振型光纤陀螺(RFOG)是实现高精度、小型化和低成本光纤陀螺的重要途径^[1]。与干涉型光纤陀螺相比,同样灵敏度下的 RFOG 光纤长度仅为几米至几十米,热致非互易性得到大幅降低。高精度 RFOG 亟待突破的关键技术包括窄线宽低相位噪声光源^[2]、单偏振态高精细度环形腔^[3-4]和高精度调制与解调技术^[5]。光纤陀螺的零偏稳定性和随机游走系数^[6]是突破关键技术中需改善的两个重要指标。随机游走系数在工程上可表征陀螺角速度输出白噪声的大小^[7],白噪声的大小决定了陀螺的灵敏度,从某种意义上讲,随机游走系数体现了陀螺仪的灵敏度水平。因此,研究光源、环形腔和检测技术的特性,对研究陀螺灵敏度的

收稿日期: 2017-02-13; **收到修改稿日期:** 2017-03-16

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2015076)

作者简介: 蒋治国(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: xidianzhiguo@163.com

导师简介: 胡宗福(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和微波光子学方面的研究。

E-mail: huzongfu@tongji.edu.cn(通信联系人)

影响机理至关重要^[8-9]。

RFOG 的光路和光电检测过程中均会产生噪声,从而影响灵敏度。本文分析了光源线宽、环形腔偏振轴 90°旋转熔接、相位调制器的误差以及噪声对光纤陀螺灵敏度的影响,给出了 RFOG 的灵敏度与光电检测器灵敏度、光纤环形谐振腔(FRR)的特性、光源线宽、偏振轴 90°旋转熔接、数字相位调制信号误差以及噪声之间的关系。

2 FRR 的特性

FRR 的结构示意图如图 1(a)所示,FRR 的带阻(或带通)特性如图 1(b)所示,图中 R_{FSR} 为自由光谱宽度($R_{\text{FSR}}=1/\tau$)。设构成 FRR 的耦合器的耦合系数、环程插入损耗和环程时间分别为 K 、 γ 和 τ 。假设输入光为理想的单频激光,则光波场可表示为

$$E(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t + i\varphi_0), \quad (1)$$

式中 E_0 、 ω_0 和 φ_0 分别为激光的幅值、角频率和初相位。

不计光纤的传输损耗,则具有带阻与带通特性的 2,4 端口的输出 $E_2(t)$ 和 $E_4(t)$ 可分别表示为

$$E_2(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t + i\varphi_0) \{ \sqrt{\gamma(1-K)} + \gamma K \exp[i(-\omega_0 \tau + \pi)] + \gamma K \sqrt{\gamma(1-K)} \exp[i(-2\omega_0 \tau + \pi)] + \gamma K [\sqrt{\gamma(1-K)}]^2 \exp[i(-3\omega_0 \tau + \pi)] + \dots \}, \quad (2)$$

$$E_4(t) = E_0 \sqrt{\gamma K} \exp(i\omega_0 t + i\varphi_0 + \pi/2) \{ 1 + \sqrt{\gamma(1-K)} \exp(i\omega_0 \tau) + [\sqrt{\gamma(1-K)}]^2 \exp(-i2\omega_0 \tau) + [\sqrt{\gamma(1-K)}]^3 \exp(-i3\omega_0 \tau) + \dots \}. \quad (3)$$

FRR 的 2,4 端口输出的光强度 I_2 和 I_4 可分别表示为

$$I_2 = \gamma \left\{ 1 - \frac{K(1-\gamma)}{[1 - \sqrt{\gamma(1-K)}]^2 + 4\sqrt{\gamma(1-K)} \sin^2(\omega_0 \tau/2)} \right\}, \quad (4)$$

$$I_4 = \frac{\gamma K}{[1 - \sqrt{\gamma(1-K)}]^2 + 4\sqrt{\gamma(1-K)} \sin^2(\omega_0 \tau/2)}. \quad (5)$$

FRR 的有效精细度 F 可表示为

$$F = \frac{\pi[\gamma(1-K)]^{1/4}}{1 - \sqrt{\gamma(1-K)}}. \quad (6)$$

设 RFOG 中 FRR 的腔长为 L ,自由光谱范围 $\Delta\nu_{\text{F}} = c/nL$, n 为光纤折射率, c 为真空中光速,则 FRR 的带宽 $\Delta\nu_{\text{R}} = c/(nLF)$ 。

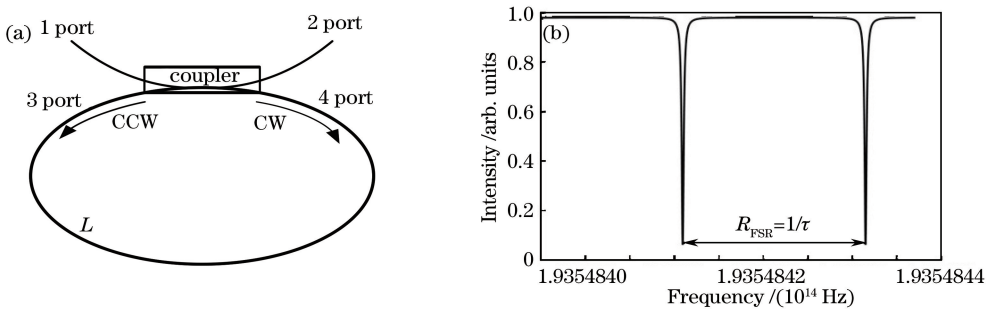


图 1 (a) FRR 结构示意图;(b) FRR 的带阻(或带通)特性

Fig. 1 (a) Schematic of FRR structure; (b) band stop (band pass) characteristic of FRR

3 光电检测器限制的灵敏度公式

通常,RFOG 的信号检测方法是将顺时针(CW)[或逆时针(CCW)]方向光锁定在 FRR 谐振频率上,检测另一方向 CCW(或 CW)的谐振频率,最后根据 CW 与 CCW 谐振频率差计算转动角速度。采用双频调制实现 RFOG 谐振频率的检测,即对 CW 和 CCW 输入光进行双频数字相位斜波调制。对于闭环 RFOG,假

设输入光频率为 ν_0 , 在频率 f_{cw} 和 $2f_{\text{cw}}$ 的调制下, 当输出的光功率为常数而非方波时, 该方向的谐振频率为 $\nu_0 + 3f_{\text{cw}}/2$; 同样地, 可获得另一方向的谐振频率为 $\nu_0 + 3f_{\text{ccw}}/2$, 转动角速度正比于频差 $1.5(f_{\text{cw}} - f_{\text{ccw}})$ 。由于谐振频率是通过直接检测带通(或带阻)输出特性来确定的, 因此 RFOG 的灵敏度直接受限于光电检测灵敏度。

设 FRR 的带阻(或带通)特性上的最大和最小输出光功率分别为 P_{max} 和 P_{min} , 如图 1(b) 所示。在双频调制中, RFOG 通常工作在最大斜率附近, 根据 FRR 的带阻特性可以得到输出光功率随频率的变化率近似为 $(P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) / \Delta\nu_{\text{R}}$ 。设光电检测能检测到的最小光功率变化量即光电检测器的灵敏度为 P_s , 则 RFOG 能检测到的谐振频率变化 $\Delta\nu_s$ 满足 $\Delta\nu_{\text{R}} / (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) = \Delta\nu_s / P_s$, RFOG 转动角速度与频移的关系满足 $\Delta\nu = D\Omega_s / (n\lambda_0)$, 其中 Ω_s 为 RFOG 的灵敏度, D 为传感线圈直径, λ_0 为输入激光的中心波长。令 $\Delta\nu_s = \Delta\nu$, 可得到受光电检测器灵敏度限制的 RFOG 灵敏度为

$$\Omega_s = \frac{\Delta\nu_{\text{R}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \frac{n\lambda_0}{D} P_s = \frac{P_s}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \frac{\lambda_0 c}{LDF} \quad (7)$$

由(7)式可知, RFOG 的灵敏度与光电检测过程中可检测到的灵敏度成正比, 与环形腔的最大与最小输出光功率差成反比, 与传感线圈直径、长度和环形腔精细度也成反比。

4 灵敏度的修正公式

4.1 激光线宽限制的灵敏度

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, 因此激光器的线宽将直接影响精细度 F 的测量值^[10], 从而影响 RFOG 的灵敏度。设输入单频激光的线宽为 $\Delta\nu_{\text{L}}$, 光波场表达式如(1)式所示。

随机初相位 $\varphi(t)$ 的自相关函数对应激光线宽, 当光源的谱分布为洛伦兹型时, 有 $\langle \exp\{i[\varphi(t) - \varphi(t - \tau)]\} \rangle = \exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})$, $\langle \rangle$ 表示统计平均。采用与第 3 节中相同的方法可以得到光源线宽为 $\Delta\nu_{\text{L}}$ 时 FRR 的 2、4 端口的输出光强度 I_2 和 I_4 分别为

$$I_2 = \gamma \left\{ 1 - \frac{K(1-\gamma)[1-\gamma(1-K)\exp(-2\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})]}{[1-\gamma(1-K)][1-\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})^2 + 4\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})\sin^2(\omega_0\tau/2)]} \right\}, \quad (8)$$

$$I_4 = \frac{\gamma K}{1-\gamma(1-K)} \frac{1-\gamma(1-K)\exp(-2\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})}{[1-\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})]^2 + 4\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})\sin^2(\omega_0\tau/2)} \quad (9)$$

光源线宽为 $\Delta\nu_{\text{L}}$ 时, FRR 的有效精细度可表示为

$$F_e = \frac{\pi\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})}{1-\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}})} = \frac{\pi\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\Delta\nu_{\text{L}}/\Delta\nu_{\text{F}})}{1-\sqrt{\gamma(1-K)}\exp(-\pi\Delta\nu_{\text{L}}/\Delta\nu_{\text{F}})} \quad (10)$$

显然, 有 $\lim_{\Delta\nu_{\text{L}} \rightarrow 0} \exp(-\pi\tau\Delta\nu_{\text{L}}) = 1$, 因此 FRR 的精细度 $F = \pi[\gamma(1-K)]^{1/4} / [1 - \sqrt{\gamma(1-K)}]$ 。考虑激光线宽影响下的 RFOG 的灵敏度为

$$\Omega_s^e = \frac{P_s}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \frac{\lambda_0 c}{LDF_e} \quad (11)$$

RFOG 灵敏度与输入激光线宽的关系如图 2 所示, FRR 的参数为: $D=0.1 \text{ m}$, $P_m=1 \text{ mW}$, $P_s=10 \text{ pW}$, $\lambda_0=1.55 \text{ }\mu\text{m}$, $\gamma=0.98$, $K=0.02$ 。在传感线圈直径确定的情况下, 当激光线宽为 0 Hz 时, 腔长越长, 灵敏度越高。实际上, 激光必然存在一定线宽, 线宽会影响 F_e 和 $P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$, 因此并非腔长越长则灵敏度越高。图 2(a) 为在传感线圈直径为 0.1 m 的条件下, 腔长分别为 1, 10, 25 m 时激光线宽与 RFOG 灵敏度的关系。由图可见, 当激光线宽小于 83 kHz 时, 腔长为 25 m 的 RFOG 灵敏度最高; 当激光线宽达到 418 kHz 时, 腔长为 1 m 的 RFOG 灵敏度最高。

图 2(b) 为不同激光线宽下 RFOG 灵敏度随腔长的变化曲线。由图可见, 当激光线宽为 450 kHz 时, 并

非腔长越长灵敏度就越高,此时腔长为 2.9 m 时灵敏度最高。由(11)式分析可知,当激光线宽为 450 kHz 时,25 m 腔长对应的有效精细度为 16, $P_{\max} - P_{\min}$ 为 0.1 mW; 1 m 腔长对应的有效精细度为 115, $P_{\max} - P_{\min}$ 为 0.73 mW, 1 m 腔长的 RFOG 灵敏度高于 25 m 腔长的 RFOG 灵敏度。因此,合理地选择腔长、使其与激光线宽相匹配是非常重要的。

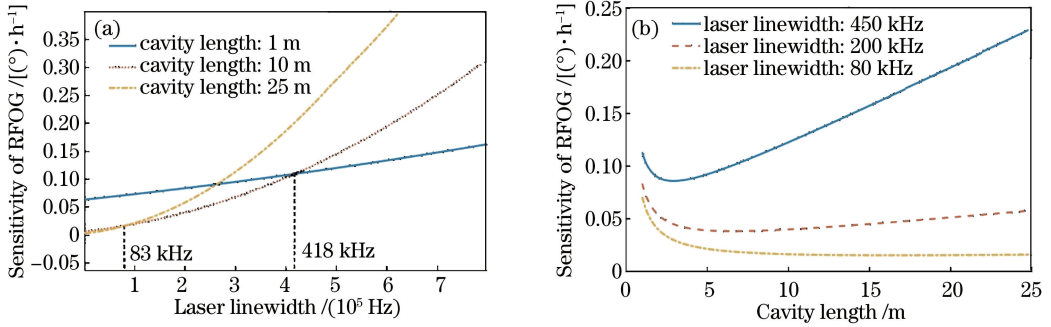


图 2 (a)不同腔长时 RFOG 灵敏度与激光线宽的关系;(b)不同激光线宽时 RFOG 灵敏度与腔长的关系
Fig. 2 (a) Relationship between RFOG sensitivity and laser linewidth under different cavity lengths;
(b) relationship between RFOG sensitivity and cavity length under different laser linewidths

4.2 偏振轴 90° 旋转限制的灵敏度

腔内中点偏振轴 90° 旋转熔接的保偏 FRR 是目前较为实用可行的 RFOG 环形腔方案。偏振轴 90° 旋转熔接极大地降低了 RFOG 温度相关的强度型偏振误差,但该方案中的 90° 旋转位置会影响 $P_{\max} - P_{\min}$, 从而影响 RFOG 的灵敏度,下面分析 90° 旋转位置对灵敏度的影响。图 3 为偏振轴 90° 旋转熔接 FRR 示意图, FRR 腔内中点附近位置偏振轴 90° 旋转熔接,设两边长度差为 ΔL , 则光在 FRR 中传输一圈的传递矩阵为

$$\mathbf{S}_{90} = \exp(i\varphi) \sqrt{\gamma(1-K)} \begin{bmatrix} \sin \theta \exp\left(i\Delta\beta \frac{\Delta L}{2}\right) & \cos \theta \exp\left(-i\Delta\beta \frac{\Delta L}{2}\right) \\ -\cos \theta \exp\left(i\Delta\beta \frac{\Delta L}{2}\right) & \sin \theta \exp\left(-i\Delta\beta \frac{\Delta L}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 θ 为保偏耦合器偏振串扰角, $\Delta\beta$ 为水平和垂直方向传播常数的差, φ 为环形一圈的相移。根据矩阵性质, (12) 式中的传递矩阵具有两个本征值和两个本征向量[即 FRR 的两个本征态(ESOP)^[11]的本征值和两个本征向量]。两个本征值分别为 $\lambda_1 = A \exp(i\theta_1)$ 和 $\lambda_2 = A \exp(i\theta_2)$, 两个本征向量分别为 $[1 \ b_1]^T$ 和 $[1 \ b_2]^T$ 。

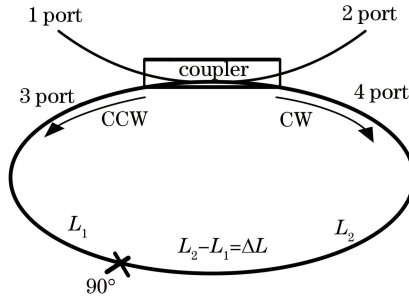


图 3 偏振轴 90° 旋转熔接 FRR 示意图

Fig. 3 Schematic of FRR with 90° polarization-axis rotated splice

输入电场分解到本征向量为

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{//} \\ E_{\perp} \end{bmatrix} = X_1 \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix} + X_2 \begin{bmatrix} 1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 $E_{//}$ 和 E_{\perp} 分别为输入到保偏光纤快轴和慢轴的电场强度。

$$b_1 = \frac{\lambda_1 - \exp(i\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta}{\exp(-i\Delta\beta\Delta L/2) \cos \theta}, \quad (14)$$

$$b_2 = \frac{\lambda_2 - \exp(i\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta}{\exp(-i\Delta\beta\Delta L/2) \cos \theta}, \quad (15)$$

$$\lambda_k = \cos(\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta \pm i\sqrt{1 - [\cos(\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta]^2}, \quad k=1,2, \quad (16)$$

$$X_1 = \frac{(E_{//} \sin \theta - E_{\perp} \cos \theta) \exp(-i\Delta\beta\Delta L/2) \cos \theta + (E_{//} \cos \theta + E_{\perp} \sin \theta) [\lambda_1 - \exp(i\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta]}{-2i\sqrt{1 - [\cos(\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta]^2}}, \quad (17)$$

$$X_2 = \frac{-(E_{//} \sin \theta - E_{\perp} \cos \theta) \exp(-i\Delta\beta\Delta L/2) \cos \theta - (E_{//} \cos \theta + E_{\perp} \sin \theta) [\lambda_2 - \exp(i\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta]}{-2i\sqrt{1 - [\cos(\Delta\beta\Delta L/2) \sin \theta]^2}}. \quad (18)$$

两个本征态的输出强度分别为

$$I_1 = \left\{ -\frac{K\sqrt{\gamma}}{\sqrt{1-K}} \frac{\sqrt{\gamma(1-K)} A \exp[-i(\varphi - \theta_1)]}{1 - \sqrt{\gamma(1-K)} A \exp[-i(\varphi - \theta_1)]} + \sqrt{\gamma(1-K)} \right\}^2 X_1 X_1^* \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$I_2 = \left\{ -\frac{K\sqrt{\gamma}}{\sqrt{1-K}} \frac{\sqrt{\gamma(1-K)} A \exp[-i(\varphi - \theta_2)]}{1 - \sqrt{\gamma(1-K)} A \exp[-i(\varphi - \theta_2)]} + \sqrt{\gamma(1-K)} \right\}^2 X_2 X_2^* \begin{bmatrix} 1 \\ b_2 \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} 1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

式中 θ_1, θ_2 为本征值的相角, X_1^*, X_2^* 分别为 X_1, X_2 的共轭。由(19)式和(20)式可知, FRR 的两个本征态在谐振曲线中的谐振谷位置分别由本征值的相角 θ_1 和 θ_2 决定, 两个相角之差即为相邻谐振谷的距离。温度变化引起 $\Delta\beta$ 的变化, 从而引起 S_{90} 的变化, 进而引起相角差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 的变化。图 4(a) 为相角差与温度的关系, 耦合器偏振串扰角为 8° , 由图可见, 腔内中点偏振轴 90° 旋转熔接后, 两个本征态对应的谐振谷的相对位置保持在一定范围(即 π 附近波动), 图中各模拟参数为保偏光纤快轴和慢轴折射率 $n_{//}$ 和 n_{\perp} 分别为 1.46 和 1.4605, $\partial(n_{//} - n_{\perp})/\partial T = 7 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由(14)~(18)式可知, ΔL 影响 X_1, X_2, b_1 和 b_2 , 即 ΔL 会影响输入光波能量在两个本征态之间的分配, 进而影响 I_1 和 $P_{\max} - P_{\min}$, 最终影响灵敏度。由(7)式可知, 偏振轴 90° 旋转的 RFOG 相对灵敏度为

$$\frac{\Omega_s^{90}}{\Omega_s^g} = \frac{1}{|X_1|^2 (1 + |b_1|^2)}. \quad (21)$$

图 4(b) 为偏振轴 90° 旋转熔接 FRR 的两边长度差 ΔL 与相对灵敏度 Ω_s^{90}/Ω_s^g 的关系, 其中耦合器偏振串扰角为 8° 。由图 4(b) 可知, 当 ΔL 等于半拍长的奇数倍时, 偏振轴 90° 旋转的 RFOG 灵敏度最高。

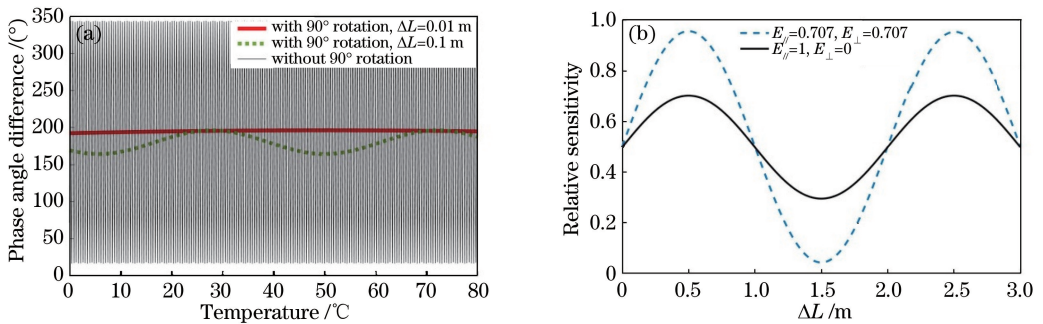


图 4 偏振轴 90° 旋转熔接 FRR 的特性。(a) 相角差与温度的关系; (b) ΔL 与相对灵敏度的关系
Fig. 4 Characteristics of FRR with 90° polarization-axis rotated splice. (a) Relationship between phase angle difference and temperature; (b) relationship between ΔL and relative sensitivity

4.3 电光调制信号误差与噪声限制的灵敏度

双频数字相位调制和解调技术是实现谐振频率锁定与检测的有效方法, 但实际数字相位调制信号的误差和噪声会影响 RFOG 的灵敏度。RFOG 的数字调相移频具有 2π 的复位精确度与易实现等优点, 目前主要利用集成 Y 波导调制器的两臂来实现数字调相, 该方法要求数字调相信号的台阶时间宽度 t 等于 FRR 的环形时间 τ 。实际上, 受数字时钟、数模转换精度以及温度引起噪声的影响, 台阶时间宽度 t 会有误差, 同时, 数字调相电压必然存在噪声^[12], 误差和噪声可能会影响基于多光束干涉原理的 FRR 的谐振曲线形状,

导致 RFOG 的灵敏度降低。

经数字调相移频,图 1 中 2 端口的输出电场可表示为

$$\begin{aligned} dE_2(t)/dt = & E_0 \exp(i\omega_0 t + i\varphi_0) \{ \sqrt{\gamma(1-K)} \exp[i\Delta\varphi(t)] + \gamma K \exp[i(-\omega_0\tau + \pi)] \exp[i\Delta\varphi(t-\tau)] + \\ & \gamma K \sqrt{\gamma(1-K)} \exp[i(-2\omega_0\tau + \pi)] \exp[i\Delta\varphi(t-2\tau)] + \\ & \gamma K [\sqrt{\gamma(1-K)}]^2 \exp[i(-3\omega_0\tau + \pi)] \exp[i\Delta\varphi(t-3\tau)] \}, \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $\Delta\varphi(t)$ 为调制相移。

台阶时间宽度 t 与 FRR 环行时间 τ 不相等的误差对 FRR 输出特性的影响如图 5 所示。图 5(a)给出了有误差时的 $\Delta\varphi$ 随 t 的变化。图 5(b)给出了不同误差下的 FRR 带阻输出特性,横坐标是光频变化量,实线对应台阶时间宽度精确等于 FRR 的环行时间,红色虚线对应台阶时间宽度与腔的环行时间比为 2050:2000,黑色点线对应台阶时间宽度与腔的环行时间比为 1950:2000。由图 5 可见,数字相位调制信号变化率与环形腔的特征频率失谐对最大与最小输出功率差没有明显影响,由(7)式可知,失谐不影响 RFOG 的灵敏度,但谐振中心频率偏移会影响 RFOG 的精度。

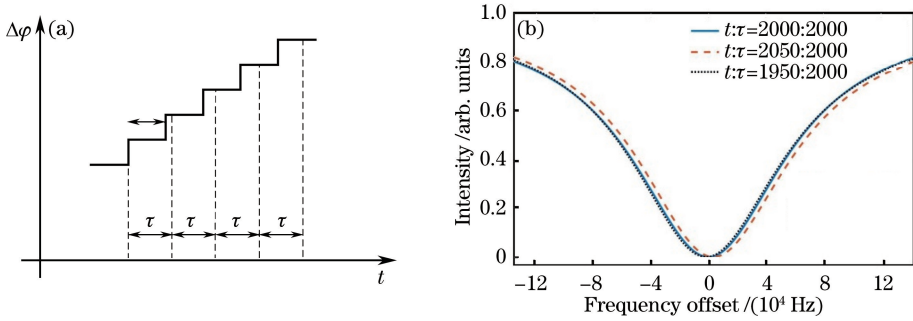


图 5 (a)受误差影响后 $\Delta\varphi$ 随 t 的变化;(b)受台阶时间宽度 t 不精确影响的环形腔的带阻输出特征
Fig. 5 (a) Variation in $\Delta\varphi$ with t influenced by error; (b) band stop output characteristics of FRR influenced by inaccuracy of step time width t

分析相位调制电压信号噪声对灵敏度的影响,图 6 为相位调制电压噪声对光纤环形谐振腔输出特性的影响。图 6(a)为受噪声影响后 $\Delta\varphi$ 随 t 的变化,图 6(b)为受相位调制电压噪声影响的环形腔的带阻输出特性。图 6(b)中特性曲线的噪声方均根值(RMS)分别为 0.2,0.1,0 rad。由图 6 可见,相位调制电压噪声会对基于多光束干涉原理的环形谐振腔谐振曲线的形状产生影响,从而影响灵敏度。相位调制电压的噪声方均根值小于 0.1 rad(5.7°)时,输出特性近似不变。目前,双极性 Y 分支波导调制器的半波电压通常为 7.0 V 左右,即 2π 复位的最高电压为 14 V 左右,因此要求相位调制电压的噪声方均根值小于 0.22 V,这是完全能达到的。

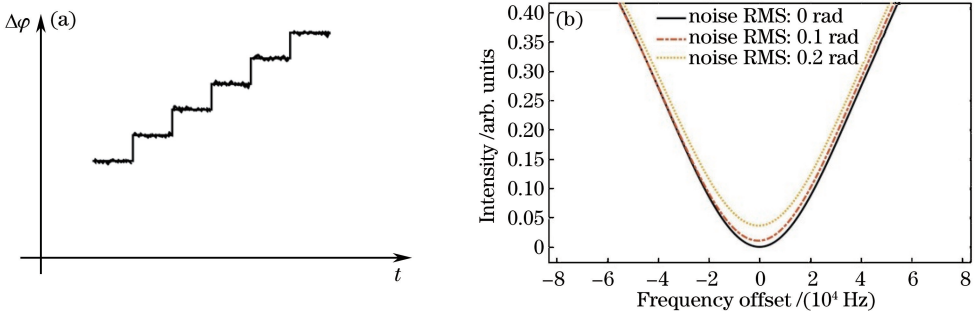


图 6 (a)受噪声影响后 $\Delta\varphi$ 随 t 的变化;(b)受相位调制电压噪声影响的环形腔的带阻输出特性
Fig. 6 (a) Variation in $\Delta\varphi$ with t influenced by noise; (b) band stop output characteristics of FRR influenced by phase modulation voltage noise

5 结 论

对 RFOG 的灵敏度影响机理进行了研究,分析了光源、环形腔和检测技术对 RFOG 灵敏度的影响。给

出了光电检测器限制的灵敏度表达式以及考虑了激光线宽、腔内偏振轴 90° 旋转后的 RFOG 灵敏度修正公式。分析结果表明:在一定条件下,数字调相信号误差与噪声对灵敏度的影响可忽略,但对精度有影响;环形腔偏振轴 90° 旋转熔接可使灵敏度降低为原来的 50%;若激光线宽与腔长未合理匹配,则灵敏度大幅降低;对于偏振轴 90° 旋转熔接的 RFF,两边长度差 ΔL 为半拍长的奇数倍时,灵敏度最高;台阶时间宽度与 FRR 环行时间失谐对 RFOG 灵敏度没有影响,但对 RFOG 的精度有影响;当数字调相电压的噪声方均根值小于 0.22 V 时,噪声对 RFOG 灵敏度的影响可忽略。该研究为高精度 RFOG 的设计提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] Ma H L, Zhang J J, Wang L L, *et al.* Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, PP(99): 2587667.
- [2] Ma H L, Yan Y C, Wang L L, *et al.* Laser frequency noise induced error in resonant fiber optic gyro due to an intermodulation effect[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25474-25486.
- [3] Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.* Single-polarization directional coupler based on dual-core photonic bandgap fiber[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0906002.
李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 单偏振双芯光子带隙光纤定向耦合器[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0906002.
- [4] Bobbili P R, Nayak J, Pinnoji P D, *et al.* Parameter optimization analysis to minimize the polarization error in a localized thermal tunable fiber ring resonator gyro[J]. Applied Optics, 2016, 55(8): 1996-2001.
- [5] Wang L L, Yan Y C, Ma H L, *et al.* Resonant fiber optic gyro based on a sinusoidal wave modulation and square wave demodulation technique[J]. Applied Optics, 2016, 55(12): 3274-3278.
- [6] Wang J J, Feng L S, Wang Q W, *et al.* Reduction of angle random walk by in-phase triangular phase modulation technique for resonator integrated optic gyro[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5463-5468.
- [7] Guattari F, Moluçon C, Bigueur A, *et al.* Touching the limit of FOG angular random walk: Challenges and applications[C]. Inertial Sensors and Systems, 2016: 16467083.
- [8] Li X Y, Xu Z L, Hong Y, *et al.* Comparative analysis of fiber ring resonator based on different fibers[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(5): 2954-2958.
- [9] Zhao X, Louveau J, Chamoun J, *et al.* Thermal sensitivity of the birefringence of air-core fibers and implications for the RFOG[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(14): 2577-2581.
- [10] Hu Zongfu, Qian Jingren, Shen Huiming. Light source effects on effective fineness of a fiber optic ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(5): 609-613.
胡宗福, 钱景仁, 沈会明. 光源的特性对光纤环形腔有效精细度的影响[J]. 光学学报, 1997, 17(5): 609-613.
- [11] Hotate K, Higashiguchi M. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro[J]. Applied Optics, 1986, 25(15): 2606-2612.
- [12] Yang Fuling, Yang Yuanhong, Han Zonghu, *et al.* Correlation on wavelength and temperature with the half-wave voltage for Y branch optical modulator[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0606002.
杨福铃, 杨远洪, 韩宗虎, 等. Y分支光学调制器半波电压与波长和温度相关性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0606002.