

谐振式光纤陀螺角度随机游走的分析与优化

李汉钊, 钱伟文, 刘路, 马慧莲*, 金仲和

浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310027

摘要 谐振式光纤陀螺(RFOG)是基于 Sagnac 效应产生的顺时针光路与逆时针光路的谐振频率差来测量旋转速率的光学传感器。由于 Sagnac 效应极为微弱, RFOG 常采用信号调制解调技术提高检测精度。首先介绍了基于正弦相位调制解调的 RFOG 的基本原理及衡量其性能的主要指标, 详细推导了基于正弦相位调制解调的 RFOG 系统受散粒噪声制约的理论角度随机游走(ARW)的表达式, 分析了调制参数包括调制频率和调制系数对理论 ARW 的影响。研究表明, 在给定的激光功率及光纤环形谐振腔条件下, 存在一组最佳的调制参数和解调相位, 用于实现 ARW 的最小化。以直径为 12 cm、总长为 29 m、测试清晰度为 14.7 的光纤环形谐振腔搭建了实际 RFOG 系统, 当调制频率分别为 1 MHz、600 kHz、240 kHz 时, 测试得到的陀螺 ARW 分别为 0.0124、0.0072、0.0052 ($^{\circ}$) \cdot h $^{-1/2}$ 。

关键词 光纤光学; 谐振式光纤陀螺; Sagnac 效应; 正弦调制解调; 角度随机游走

中图分类号 TN914.1; TN815; TN966

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0901002

1 引言

作为光学陀螺的一种, 谐振式光纤陀螺(RFOG)在使用同等光纤长度的情况下, 与干涉式光纤陀螺(IFOG)相比具有更高的灵敏度, 并且符合高精度光学陀螺小型化和集成化的发展趋势, 目前正在受到世界上多个研究机构的关注^[1-5]。

RFOG 的测量极限受探测器散粒噪声的制约, 实际检测精度尚受限于三大光学噪声, 包括背向散射^[6]、偏振波动^[7]、光学 Kerr 效应^[8], Sagnac 效应引起的信号变化往往会淹没在这些非互易光学噪声中。为了抑制噪声和提高角速度检测精度, 激光相位调制解调技术被广泛应用于 RFOG, 通过调制和解调将谐振频率差转化为解调输出电压, 其中常见的调制波形有正弦波、三角波和锯齿波等^[4]。为了抑制非互易背向散射噪声, 调制系数常设置为 2.405^[6]; 为了在相同频率差下获得较大的解调输出信号幅度, 常需要结合光纤环形谐振腔参数优化调制频率, 以使得解调曲线斜率最大化, 此时对应角速度最灵敏的工作点。研究发现, 当光纤环形谐振腔的谐振曲线符合洛伦兹函数分布时, 最大灵敏度对

应的调制频率位于谐振腔半峰全宽(FWHM)的 $1/(2\sqrt{3})$ 处^[9], 而实际谐振腔的谐振曲线并非理想的洛伦兹线型, 此时需通过数学推导得到解调曲线斜率关于调制频率的解析表达式, 进而利用数值求解的方法获得最大解调斜率对应的最佳调制频率^[10]。上述优化都是从解调曲线斜率最大化出发, 而光纤陀螺的最佳性能取决于最佳的信噪比, 并不是最大灵敏度^[11]。角度随机游走(ARW)作为衡量光纤陀螺性能最重要的指标之一, 反映了陀螺输出中随机白噪声的功率密度大小, 代表着陀螺的信噪比特性。本文以最佳 ARW 为主要技术指标, 首先介绍了基于正弦相位调制同步解调的 RFOG 系统的基本原理, 接着详细推导了系统受散粒噪声制约的理论 ARW, 分析了调制参数包括调制频率和调制系数对理论 ARW 的影响。分析表明, 在给定条件下, 最佳 ARW 和最大解调曲线斜率对应的调制频率存在一定的差异, 在一定激光器功率及光纤环形谐振腔结构参数下, 存在一组最佳的调制参数和解调相位, 以实现 ARW 的最小化。最后, 搭建了实际 RFOG 系统, 验证了上述理论分析结果。

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-08; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61675181, 61377101)

*E-mail: mahl@zju.edu.cn

2 基本原理

2.1 基于正弦相位调制同步解调的 RFOG

RFOG 对转动信号的检测本质上是对谐振腔顺时针(CW)方向与逆时针(CCW)方向传输光波谐振频率差的测量。正弦相位调制同步解调技术被广泛应用于 RFOG,如图 1 所示。半导体激光器(LD)发出的激光通过 Y 分支相位调制器(Y-branch PM)进行分光与相位调制,然后分别从 CW 方向与 CCW 方向进入光纤环形谐振腔,出腔的两束激光分别被光电探测器 PD1 和 PD2 探测并进行光电转换。CW 方向的信号经过同步解调、低通滤波器 LPF2 的滤波后,通过比例积分(PI)控制模块对激光器频率调谐端进行控制,以将激光器中心频率锁定至谐振腔 CW 方向光波的谐振频率处,此时 CCW 方向的信号则直接被同步解调,经低通滤波器 LPF1 滤波后即可作为陀螺输出。

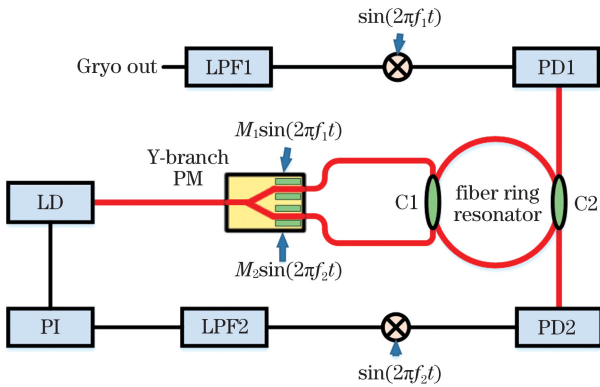


图 1 基于正弦相位调制同步解调的 RFOG 系统
Fig. 1 RFOG system based on sinusoidal phase modulation and synchronous demodulation

下面以谐振腔 CCW 方向的光波为例,对信号调制同步解调过程进行介绍与推导。假设 LD 发出的激光光场为

$$E = E_0 \exp(j2\pi f_0 t), \quad (1)$$

式中: t 为时间; E_0 为输入光场的幅度; f_0 为激光的中心频率。经过 Y 分支相位调制器的分光 and 相位调制后,进入谐振腔前的光场为

$$E_{in} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1 - \alpha_{PM})} E_0 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(M_1) \times \exp[j(2\pi f_0 t + 2\pi q f_1 t)], \quad (2)$$

式中: α_{PM} 为 Y 分支相位调制器的损耗系数; M_1 和 f_1 分别为 CCW 方向光波的调制系数与调制频率; $J_q(M_1)$ 为 q 阶贝塞尔函数。受到调制的激光通过耦合器 C1 进入光纤环形谐振腔,形成绕腔多次传输的光波,在耦合器 C2 处输出的光场 E_{out} 可表示为

$$E_{out} = \frac{-A \exp\left[j\pi \frac{nL}{c} (f_0 + qf_1)\right]}{1 - B \exp\left[j2\pi \frac{nL}{c} (f_0 + qf_1)\right]} E_{in}, \quad (3)$$

式中: c 为真空中光速; L 为光纤环形谐振腔的长度; n 为光纤有效折射率; A 为光波在谐振腔内传输一周的传递系数; B 为光波经耦合器 C1 的交叉端进入谐振腔后传输一周再回到直通端的传输系数,它们可分别表示为

$$A = -\sqrt{k_1 k_2} \cdot \sqrt{(1 - \alpha_{C1})(1 - \alpha_{C2})(1 - \alpha_L)^{0.5}}, \quad (4)$$

$$B = \sqrt{(1 - k_1)(1 - k_2)} \cdot \sqrt{(1 - \alpha_{C1})(1 - \alpha_{C2})(1 - \alpha_L)}, \quad (5)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为光纤耦合器 C1 和 C2 的耦合系数; α_{C1} 和 α_{C2} 分别为光纤耦合器 C1 和 C2 的损耗系数; α_L 为光波在谐振腔内传输一周的损耗系数。根据(1)式和(2)式,可以得到透射型光纤环形谐振腔的传递函数为

$$H = \left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right| = \frac{A}{\sqrt{1 + B^2 - 2B \cos\left(2\pi \frac{f_0 + qf_1}{\Delta f_{FSR}}\right)}} = \frac{A}{\sqrt{(1 - B)^2 + 4B \sin^2\left(\pi \frac{\Delta f + qf_1}{\Delta f_{FSR}}\right)}}, \quad (6)$$

式中: Δf_{FSR} 为谐振腔的自由谱宽(FSR); Δf 为 CW 方向和 CCW 方向的谐振频率差,与转动角速度 Ω 成正比。 Δf_{FSR} 和 Δf 可分别表示为

$$\Delta f_{FSR} = \frac{c}{nL}, \quad (7)$$

$$\Delta f = \frac{D}{n\lambda} \cdot \Omega, \quad (8)$$

式中: D 为环路直径; λ 为激光波长。

当输出光场 E_{out} 到达光电探测器 PD1 后,进行光电转换,输出电压可以表示为

$$V_{PD1} = \frac{1}{2} (1 - \alpha_{PM}) K_{PD} E_0^2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_q(M_1) J_p(M_1) h_q h_p \exp\{j[2\pi(q - p)f_1 t + \varphi_q - \varphi_p]\}, \quad (9)$$

式中:下标 p, q 表示经过相位调制后展开的谐波阶次; $h_{p(q)}$ 和 $\varphi_{p(q)}$ 分别为谐振腔在调制频率为 f_1 的 $p(q)$ 谐波处对应的幅频响应与相频响应; K_{PD} 为光电转换时的增益系数。从(8)式可以看出,光电转换

后的电信号包含了调制频率为 f_1 的各次谐波。根据同步解调原理,解调时通常是利用锁相放大器将其一次谐波提取出来,即 $p = q \pm 1$, 此时,待解调信号可简化为

$$V_{BPF} = \frac{1}{2} G (1 - \alpha_{PM}) K_{PD} E_0^2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(M_1) J_{q+1}(M_1) h_q h_{q+1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_q - \varphi_{q+1}), \quad (10)$$

式中: G 为调制频率为 f_1 时的增益。对(10)式进行同步解调,滤除和频分量后得到的解调输出信号为

$$V_{demo} = -\frac{1}{4} G (1 - \alpha_{PM}) K_{PD} E_0^2 \sum_{q=0}^{\infty} J_q(M_1) J_{q+1}(M_1) \times [h_q h_{q+1} \sin(\varphi_q - \varphi_{q+1} - \varphi) - h_{-q-1} h_{-q} \sin(\varphi_{-q-1} - \varphi_{-q} - \varphi)], \quad (11)$$

式中: φ 为同步正弦波信号的相位分量。结合(6)式和(10)式,对光纤谐振腔的谐振曲线和对应的解调曲线进行仿真计算,仿真结果如图 2 所示。由图 2 可以得到如下结论:当激光中心频率与谐振腔的谐振频率一致时,谐振腔的输出光强达到最大值,即对应谐振曲线的峰值位置,此时的解调输出为零;在谐振频率附近的一段区域,解调输出与激光频率和谐振频率之间的偏差呈近似线性关系,开环 RFOG 系统利用这段近似线性工作区特性,首先将解调输出电压信号直接除以该近似线性区的解调曲线斜率,将其转换为旋转角速度 Ω 引起的谐振频率差,再利用(8)式就能够得到 Ω 的大小,解调输出电压信号的正负则反映了转动方向。

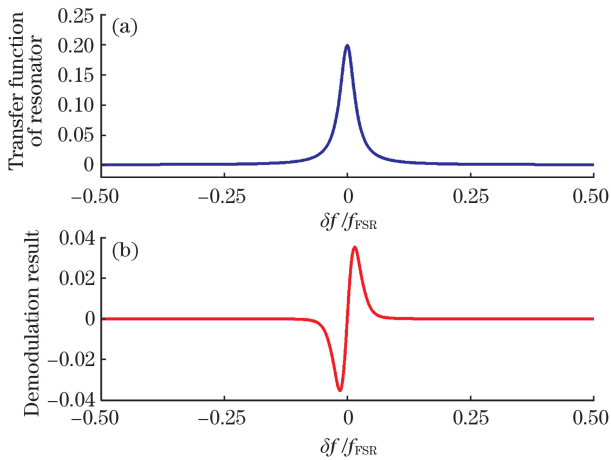


图 2 谐振曲线与解调曲线仿真结果。(a)谐振曲线;
(b)解调曲线

Fig. 2 Simulation results of resonance curve and demodulation curve. (a) Resonant curve; (b) demodulation curve

2.2 角度随机游走及其分析方法

光纤陀螺中的白噪声用 ARW 来表征,单位为 $(^\circ) \cdot h^{-1/2}$ 或 $[(^\circ) \cdot h^{-1}] \cdot Hz^{-1/2}$, ARW 反映了陀

螺输出中随机白噪声的功率密度大小。当陀螺输出仅由理想白噪声构成时, ARW 可由积分时间和零偏稳定性计算得到,即

$$A_{ARW} = \frac{\sigma_\Omega}{\sqrt{B_{BW}}} = \sigma_\Omega \cdot \sqrt{\tau}, \quad (12)$$

式中: A_{ARW} 为 ARW 值; B_{BW} 为检测带宽, $B_{BW} = 1/\tau$; τ 为积分时间; σ_Ω 为在积分时间 τ 下测得的零偏稳定性。该方法计算简单,但缺点也十分明显。陀螺的零偏稳定性是由随机噪声与低频漂移共同决定,当陀螺输出中漂移过大时,由(12)式计算得到的 ARW 将严重失真。因此,该计算方法只能用作 ARW 的粗略计算,且测试时间不宜过长,以减小漂移的影响。

为了更加精确地计算 ARW,需要将白噪声从其他噪声中分离出来,进行单独计算,目前常用的计算方法有 Allan 方差分析法^[12]和功率谱密度(PSD)^[13]分析法两种。Allan 方差分析法的主要特点是通过分析方差与积分时间的关系,实现不同类型噪声的分离和计算。图 3 给出了在双对数坐标系下典型的 $\sigma(\tau)$ 关于积分时间 τ 的曲线,其中 $-1/2$ 斜率对应的便是 ARW 的大小。

由 ARW 的定义可知, ARW 反映的是陀螺输

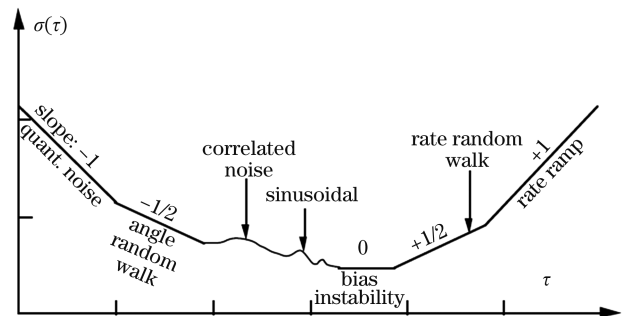


图 3 Allan 方差曲线示意图^[12]

Fig. 3 Schematic diagram of Allan variance curve^[12]

出中白噪声的功率谱密度大小,因此可通过计算陀螺输出白噪声 PSD 曲线,求得白噪声的功率谱密度,再通过单位转换计算出 ARW。单边带功率谱密度与 ARW 之间的关系^[13]为

$$A_{ARW} = \frac{\sqrt{S_{\Omega}}}{60\sqrt{2}}, \quad (13)$$

式中: S_{Ω} 为陀螺输出白噪声的单边带功率谱密度。

Allan 方差分析法能够对陀螺中的各种噪声源及噪声特性进行表征和分析,PSD 分析法则主要用于计算和白噪声有关的 ARW 指标。虽然理论上 PSD 曲线中也包含了零偏稳定性、速率斜坡等其他噪声指标,但由于其所处频段过低,很难进行拟合分析。Allan 方差分析法一般用于全面评估陀螺的各项噪声,而 PSD 分析法则多用于获得更为精确的 ARW。

2.3 散粒噪声制约的陀螺基本测量极限

ARW 是衡量随机噪声大小的重要指标,在 RFOG 中,随机噪声主要来源于光子散粒噪声、检测电路的热噪声、激光器的频率噪声等。其中散粒噪声作为光纤陀螺中最基本的一类噪声,其噪声值大小仅与探测光功率相关,对于参数确定的谐振腔,散粒噪声基本决定了系统能够测量的最小转速,除了增大探测光功率的方法外没有有效的抑制方法,因此,一般将散粒噪声制约的理论灵敏度称为极限灵敏度。对于一束功率为 P 的激光,由散粒噪声制约的 RFOG 的理论灵敏度^[14]为

$$\delta\Omega_{RFOG} = \frac{\sqrt{2} \frac{c}{LD} \cdot \frac{\lambda}{F}}{\sqrt{\eta P \cdot (\lambda/hc) \cdot \tau}}, \quad (14)$$

式中: F 为谐振腔的清晰度; η 为探测器的量子效率; h 为普朗克常数。(14)式没有考虑调制对激光功率以及解调曲线斜率的影响。实际 RFOG 系统中,激光经过调制后其功率会分布到调制频率的各次谐波处,如图 4 所示,具体分布特性与调制波形及调制参数(包括调制频率 f_1 和调制系数 M_1)有关。由图 4 可以看到,调制后的激光按调制频率 f_1 展开,分布在谐振曲线的不同位置,各次谐波分量受到不同斜率 K_1 的影响,即使在相同的谐振腔峰值输出功率下,不同的调制参数也会影响到最终的探测功率,进而影响散粒噪声的大小,因此对于不同的调制参数,系统对应的理论灵敏度也是不同的。下面将以正弦相位调制解调技术为例,分析激光调制参数对理论 ARW 的影响。

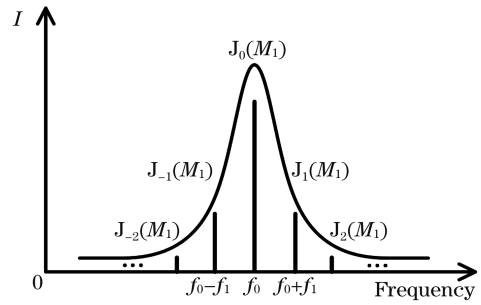


图 4 相位调制后激光能量的频谱分布

Fig. 4 Frequency spectrum distribution of laser energy after phase modulation

3 仿真结果

根据(11)式,可以计算出解调曲线斜率与调制频率、调制系数和解调相位之间的关系。图 5 给出了不同调制频率和解调相位下, $1 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 的转动角速度对应的解调输出量相对于谐振峰值幅度的变化率,其中图 5(a)、(b)分别对应 $M_1 = 1.080$ 和 $M_1 = 2.405$ 。这是因为在基于正弦相位调制的 RFOG 中,调制系数 $M_1 = 1.080$ 和 $M_1 = 2.405$ 是两个重要且被经常使用的系数,以满足不同的应用需求。其中 $M_1 = 1.080$ 对应着 0 阶贝塞尔函数与 1 阶贝塞尔函数乘积的最大值,此时待解调信号主要由 0 阶与 ± 1 阶信号混频形成,调制频率对解调斜率的影响较小,尤其是在反射式光纤环形谐振腔中,可以采用远大于谐振腔半峰全宽的调制频率,以实现较大的解调曲线斜率,同时又能减小激光频率噪声的影响,该调制系数被广泛应用于激光器 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频技术中^[15]。由于 0 阶贝塞尔函数的第一个零点接近于 2.405, $M_1 = 2.405$ 则常用于实现载波抑制,此时可以最大程度地减小背向散射对 RFOG 检测精度的影响^[16]。

仿真所用的谐振腔为透射式光纤环形谐振腔,具体参数如下:直径为 12 cm,长度为 29 m,对应的 FSR 为 7.1 MHz,测试清晰度为 14.7,于是 FWHM 为 484 kHz。根据图 5 的仿真结果,当 $M_1 = 1.080$ 时,随着调制频率的增大,解调信号先迅速增大然后逐渐降低,最佳解调相位也随之发生变化,变化幅度约为 $\pi/2$;当 $M_1 = 2.405$ 时,调制后的光信号不包含载波,当调制频率过大时,信号能量主要分布在谐振曲线两侧较为平缓的区域,谐振频率处的解调斜率会迅速降低,因此,当 $M_1 = 2.405$ 时,调制频率不能过大。

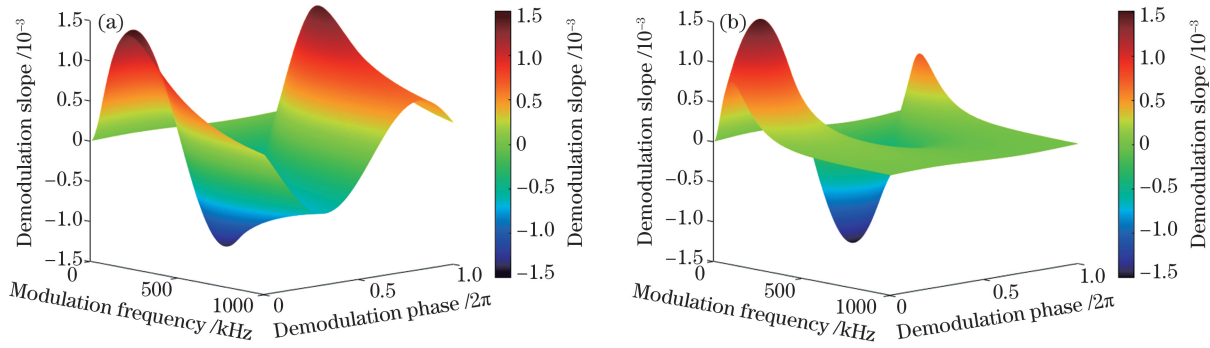


图 5 调制系数和解调相位对解调斜率的影响。(a) $M_1=1.080$; (b) $M_1=2.405$

Fig. 5 Influences of modulation coefficient and demodulation phase on demodulation slope. (a) $M_1=1.080$;
(b) $M_1=2.405$

由图 5 的仿真结果可知,不同的调制参数下对应不同的最佳解调相位,以实现解调输出幅度的最大化。图 6 为进一步通过计算得到的最大解调斜率和不同调制频率、调制系数的关系。由图 6 可以得到:当调制系数大于 1 时,改变调制频率的大小,最大解调输出幅度几乎没有改变。例如当 $M_1=1.1$ 时,其最佳调制频率约为 180 kHz, $1^\circ \cdot s^{-1}$ 对应的解调输出相对变化量约为 1.44×10^{-3} , $M_1=2.2$ 的最佳调制频率为 80 kHz, 对应最大解调输出的相对变化量为 1.5×10^{-3} , 两个不同调制系数下的最大解调输出相对变化量差异仅为 4% 左右。这是因为当 M_1 大于 1 时,系统对应的最大解调斜率基本保持稳定,此时只要使调制频率、解调相位与调制系数相匹配,就能基于正弦调制的 RFOG 实现最佳的理论灵敏度。

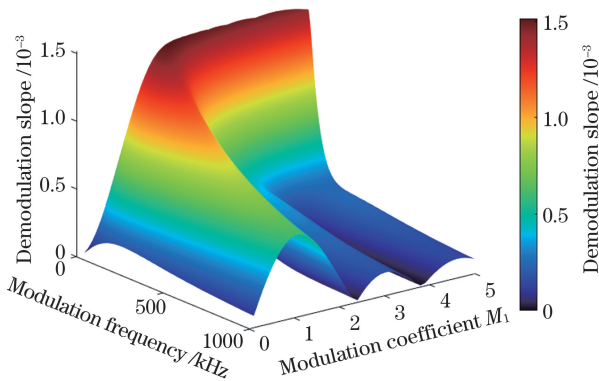


图 6 解调斜率与调制参数的关系

Fig. 6 Relationship between demodulation slope and modulation parameters

除了解调斜率受到调制参数的影响外,实际探测光功率也会随着调制参数的变化而发生改变。根据(2)式,当激光器中心频率位于谐振频率时,不进行相位调制即 $f_1=0, M_1=0$ 时,谐振腔峰值输出功

率达到其最大值,即

$$P_{\max} = (E_{\text{out}} \cdot E_{\text{out}}^*) \Big|_{f_1=0, M_1=0} = \frac{1}{2} (1 - \alpha_{\text{PM}}) h_0^2 E_0^2, \quad (15)$$

式中: E_{out}^* 为 E_{out} 的共轭; h_0 为(9)式中 $q=0$ 时谐振腔的幅频响应。

经过相位调制后,谐振腔的输出光功率可表示为

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} (1 - \alpha_{\text{PM}}) E_0^2 \sum_{q=-\infty}^{q=\infty} J_q^2(M_1) h_q^2. \quad (16)$$

将谐振腔输出功率按其峰值功率的最大值进行归一化,即

$$P'_{\text{out}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\max}} = \frac{1}{h_0^2} \sum_{q=-\infty}^{q=\infty} J_q^2(M_1) h_q^2. \quad (17)$$

根据(17)式,可以仿真计算归一化输出功率与调制参数的关系,如图 7 所示。可以看到,随着调制频率与调制系数的逐渐增大,相位调制后各次谐波处的光场分布逐渐远离谐振频率,使得谐振腔出射功率逐渐减小。

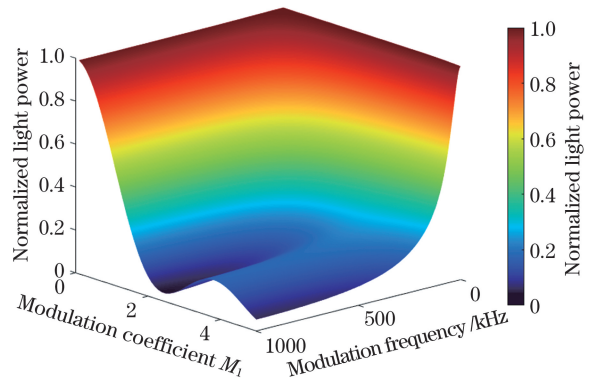


图 7 谐振腔归一化出射功率与调制参数的关系

Fig. 7 Relationship between normalized output power of resonance cavity and modulation parameters

假设谐振腔透射端的输出峰值光功率为 $30 \mu\text{W}$, 陀螺带宽为 1 Hz , 将图 6 和图 7 的仿真结果代入(14)式, 对不同调制参数下散粒噪声制约的理论 ARW 进行仿真计算, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 考虑解调曲线斜率以及谐振腔输出功率的影响后, 一定激光功率和光纤环形谐振腔结构参数下, 基于正弦相位调制的 RFOG 系统存在最佳的调制参数, 用于实现散粒噪声制约的 ARW 最小化。

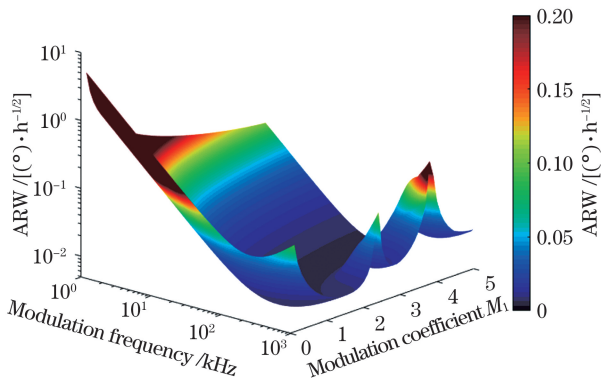


图 8 不同调制参数下散粒噪声引起的 ARW
Fig. 8 ARW caused by shot noise at different modulation parameters

为进一步分析调制频率对 RFOG 系统性能的影响, 图 9 进一步仿真计算了当调制系数 $M_1 = 1.080$ 时, 散粒噪声制约的 ARW 以及解调曲线斜率与调制频率的关系。由图 9 可知, 最佳 ARW 和最大解调曲线斜率对应的调制频率存在一定的差异, 其中 ARW 在 $f_1 = 218.7 \text{ kHz}$ 时达到最小值,

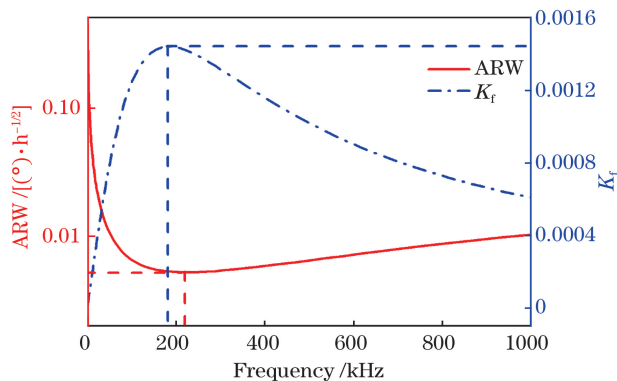


图 9 理论 ARW 和解调曲线斜率与调制频率的关系
($M_1 = 1.080$)

Fig. 9 Relationship among theoretical ARW, slope of demodulation curve, and modulation frequency
($M_1 = 1.080$)

而使解调曲线斜率最大化的 f_1 为 177.8 kHz , 上述差异是由谐振腔出腔功率和解调斜率随调制频率的变化速率不同所导致。由于解调曲线斜率大小直接影响检测系统的信噪比, 调制频率的选取需兼顾 RFOG 角速度分辨率及检测系统信噪比的需求。由图 9 发现, 当调制频率位于 $180 \sim 300 \text{ kHz}$ 之间时, ARW 的变化较为缓慢, 因此, 可以在这个区间内按解调曲线斜率需求优化设计调制频率。

4 实验测试

以直径 $D = 12 \text{ cm}$ 、长度 $L = 29 \text{ m}$ 、测试清晰度 $F = 14.7$ 的透射式光纤环形谐振腔为核心敏感元件, 搭建了正弦相位调制解调的 RFOG 系统^[17], 以 3 kHz 左右的半导体激光器为探测光源, 通过调整出纤激光功率大小, 使得光纤环形谐振腔的峰值透射功率约为 $30 \mu\text{W}$, 测试了三个不同调制频率下的陀螺输出特性, 频率噪声 PSD 曲线如图 10 所示。在图 10(a)中, 所用调制频率为 1 MHz , 测试得到的频率噪声 PSD 大小为 $1.100 [(\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}]^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$, 根据(13)式计算得到 ARW 为 $0.0124 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1/2}$; 在图 10(b)中, 所用调制频率为 600 kHz , 测试得到的频率噪声 PSD 大小为 $0.373 [(\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}]^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$, 对应的 ARW 为 $0.0072 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1/2}$; 在图 10(c)中, 所用调制频率为 240 kHz 时, 测试得到的频率噪声 PSD 大小为 $0.198 [(\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}]^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$, 对应的 ARW 为 $0.0052 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1/2}$ 。对比图 10 的仿真结果可得, 当调制频率分别为 1 MHz 、 600 kHz 、 240 kHz 时, 理论计算得到的 ARW 分别为 0.0124 , 0.0072 , $0.0052 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1/2}$ 。因此, 上述实验结果很好地验证了理论分析结果。

5 结 论

从 ARW 出发, 对基于正弦调制同步解调的 RFOG 的性能进行了优化分析和设计, 分析了调制参数(包括调制频率和调制系数)和解调相位对散粒噪声制约的理论 ARW 的影响, 获得了一定激光功率和光纤环形谐振腔结构参数下对应的最佳调制参数和解调相位, 用于实现 ARW 的最小化; 搭建了实际 RFOG 系统, 验证了理论分析结果, 最后在谐振腔峰值探测功率为 $30 \mu\text{W}$ 、总长为 29 m 的光纤环形谐振腔上, 获得了低至 $0.0052 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1/2}$ 的 ARW。

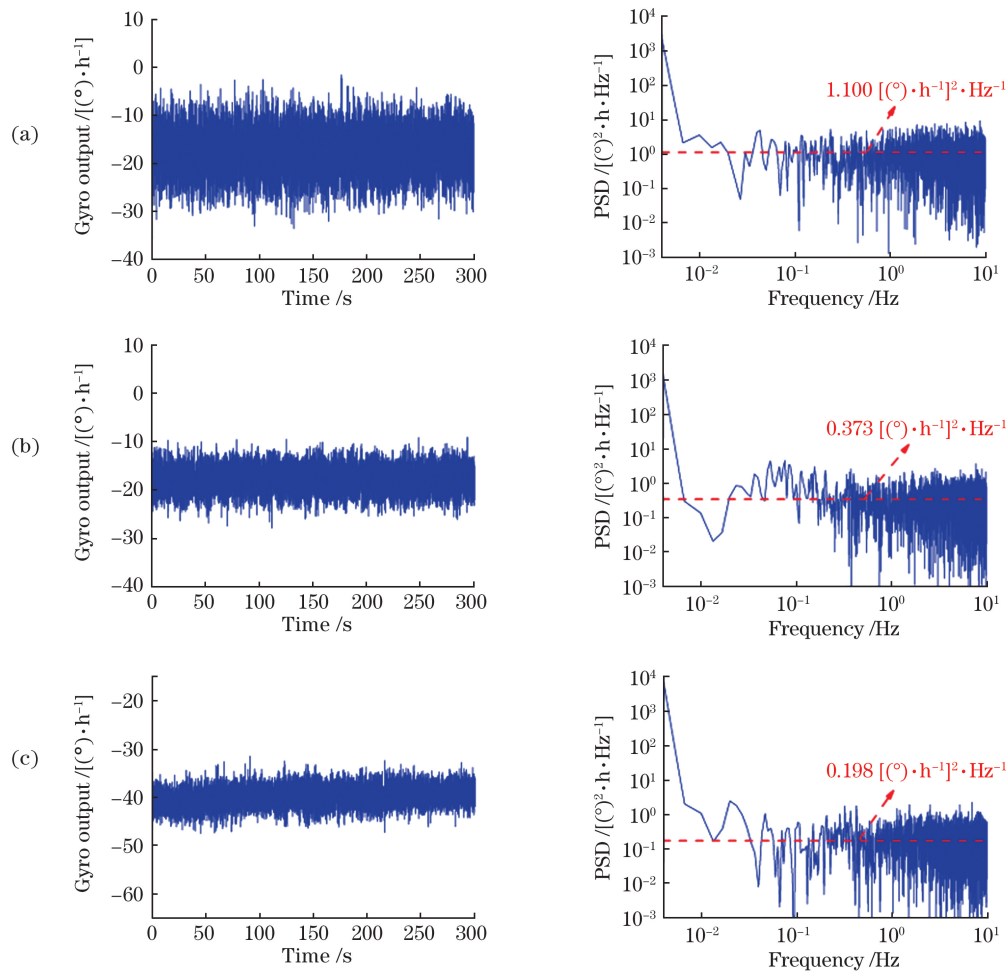


图 10 不同调制频率下的陀螺输出结果及频率噪声 PSD 分析。(a)调制频率为 1 MHz;(b)调制频率为 600 kHz;
(c)调制频率为 240 kHz

Fig. 10 Gyro output results and PSD of frequency noise at different modulation frequencies. (a) Modulation frequency of 1 MHz; (b) modulation frequency of 600 kHz; (c) modulation frequency of 240 kHz

参 考 文 献

- [1] Ezekiel S, Balsamo S R. Passive ring resonator laser gyroscope[J]. Applied Physics Letters, 1977, 30 (9): 478-480.
- [2] Ma H L, Zhang J J, Wang L L, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35 (16): 3546-3554.
- [3] Lei M, Yu H Y, Fang Y, et al. Out-of-lock frequency-tracking control of resonant fiber-optic gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0106002. 雷明, 于怀勇, 方圆, 等. 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研究 [J]. 中国激光, 2020, 47 (1): 0106002.
- [4] Qian W W, Wu C B, Lin Y, et al. Resonant micro-optical gyroscope based on optical switch to suppress backscattering noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1010003.
- [5] Strandjord L K, Qiu T, Salit M, et al. Improved bias performance in resonator fiber optic gyros using a novel modulation method for error suppression [C]// 26th International Optical Fiber Sensors, Conference Technical Digest, September 24-28, 2018. Washington, D.C.: OSA, 2018: ThD3.
- [6] Ma H L, He Z Y, 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.
- [7] Takiguchi K, Hotate K. Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization axis in the polarization-maintaining fiber resonator [J]. Journal of Lightwave Technology,

- 1992, 10(4): 514-522.
- [8] Takiguchi K, Hotate K. Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro [C] // Optical Fiber Sensors, January 29, 1992. Washington, D.C.: OSA, 1992: W23.
- [9] Feng X, Ma Y J, Yu H Y, 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.
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.
- [10] Wang L L, Li H Z, Zhang J J, et al. Optimization of the sinusoidal phase modulation technique in resonant fiber optic gyro [J]. Optics Communications, 2017, 387: 18-23.
- [11] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Boston: Artech House, 2014: 22-23.
- [12] IEEE Aerospace and Electronic Systems Society. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros: IEEE Std 647-2006 [S]. New York: IEEE Press, 2006.
- [13] Sanders G, Strandjord L K, Wu J, et al. Improvements of compact resonator fiber optic gyroscopes [C] // 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 19-20, 2017, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2017: 1-12.
- [14] Shupe D M. Fiber resonator gyroscope: sensitivity and thermal nonreciprocity [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 286-289.
- [15] Lu Y, Zhang J J, Ma H L, et al. High-frequency Pound-Drever-Hall sensing of a short and high-finesse fiber ring resonator [C] // 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016. Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [16] Mao H, Ma H L, Jin Z H. Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4632-4643.
- [17] Li H Z, Lin Y, Liu L, et al. Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique [J]. Optics Express, 2020, 28(12): 18103-18111.

Analysis and Optimization of Angle Random Walk of Resonant Fiber Optic Gyroscope

Li Hanzhao, Qian Weiwen, Liu Lu, Ma Huilian*, Jin Zhonghe

School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract

Objective A resonant fiber optic gyroscope (RFOG) is a rotation rate sensor based on the Sagnac effect. The rotation rate is measured by determining the resonant frequency difference between the clockwise and counterclockwise waves propagating in a multiturn fiber ring resonator. Since the Sagnac effect is very weak, signal modulation and demodulation techniques are indispensable for improving the detection accuracy of the RFOG. The sinusoidal wave-phase modulation and demodulation techniques are widely used in the RFOG, in which the modulation index is set as 2.405 to reduce the backscattering noise. The modulation frequency is conventionally optimized to maximize the demodulation slope at the resonant point, which yields the highest sensitivity. However, the shot-noise-limited theoretical sensitivity of the RFOG depends on the signal-to-noise ratio (SNR) rather than the most sensitive working point. Angle random walk (ARW) is one of the basic parameters of the RFOG, which is used to evaluate the shot-noise limit. Aiming at the optimum theoretical ARW, the influences of the modulation parameters, including the modulation index, modulation frequency, and demodulation phase, on the theoretical ARW are analyzed. This study provides insights into the optimization of the modulation parameters to improve the theoretical sensitivity of RFOGs. Our experiments verify the simulation results.

Methods Here, we introduce the basic operating principle of the RFOG based on the sinusoidal phase modulation and demodulation techniques. Thereafter, the theoretical ARW is derived in detail. The relationship between the theoretical ARW and the modulation parameters is analyzed. We find that the modulation parameters for the optimum ARW are different from those for the most sensitive working point. Subsequently, we set up a practical RFOG system based on the sinusoidal phase modulation and demodulation techniques and determine the influences of the modulation parameters on the ARW. We employ the power spectral density (PSD) analysis method to calculate the

ARW of the gyro output data.

Results and Discussions In the practical RFOG system, the diameter of the fiber ring resonator is 12 cm and the total fiber length is 29 m. The measured fineness is 14.7. All the simulation results are obtained using the same fiber ring resonator as that in the practical RFOG system, and the peak output power of the resonator is $30 \mu\text{W}$. Figure 5 shows the relationship between the amplitude of the demodulation output at a given rotation rate and the modulation-demodulation parameters. Two modulation indexes are calculated, i. e. , 1.080 and 2.405. The relationship between the maximum demodulation output and the modulation parameters is further investigated, as shown in Fig. 6. When the modulation index is greater than 1, the maximum demodulation output remains almost unchanged with the variation of the modulation frequency. For example, when the modulation index is 1.1, the optimal modulation frequency is approximately 180 kHz and the maximum amplitude of the demodulation output corresponding to a rotation rate of $1 (^{\circ})/\text{s}$ is approximately 1.44×10^{-3} . When the modulation index is 2.2, the optimal modulation frequency is 80 kHz and the maximum amplitude is 1.5×10^{-3} . The difference is only approximately 4%. This is because when the modulation index is greater than 1, the maximum demodulation slope at the resonant point remains almost unchanged as the modulation index increases. The RFOG based on the sinusoidal modulation-demodulation technique can achieve the optimum theoretical sensitivity by resorting to match three parameters, including the modulation index, modulation frequency, and demodulation phase. The optimum sensitivity is related to the demodulation slope at the resonant point, as well as the output power of the fiber ring resonator. The relationship between the output power and the modulation parameters is shown in Fig. 7. It can be observed that the output power decreases as the modulation frequency or index increases. A set of optimal modulation-demodulation parameters (Figs. 8 and 9) related to the fiber ring resonator is observed, which enables the achievement of the best ARW. When the modulation frequencies are set as 1 MHz, 600 kHz, and 240 kHz, the calculated ARWs are $0.010 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, $0.007 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, and $0.005 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, respectively; for the practical RFOG system, the measured ARWs are $0.0124 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, $0.0072 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, and $0.0052 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$ (Fig. 10), respectively.

Conclusions An RFOG based on the sinusoidal modulation and synchronous demodulation technique is optimized to improve its shot-noise-limited theoretical sensitivity. The optimal modulation parameters, including the modulation frequency, modulation index, and demodulation phase, corresponding to a certain fiber ring resonator are obtained. Thereafter, an experimental system is set up to verify the simulation results. When the peak output power of the fiber ring resonator is $30 \mu\text{W}$, the measured ARW of the RFOG is $0.0052 (^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, which is close to the theoretical value.

Key words fiber optics; resonant fiber optic gyroscope; Sagnac effect; sinusoidal modulation and demodulation; angle random walk

OCIS codes 060.2370; 060.2800; 060.5060; 230.5750