光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024022401

基于暂态过程优化的谐振式光纤陀螺背向散射噪声抑制方法研究

王沐禹，王梓丞*，魏玉强，赵佳琪，刘晓馥

（哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要： 针对谐振式光纤陀螺受背向散射噪声影响严重的问题，在优化三角波调制解调参数的基础上，提出了一种基于暂态过程优化的噪声抑制方法。该方法通过部分采样和均值滤波，在不改变陀螺光、电硬件配置的前提下，优化了三角波调制时存在的暂态过程现象，提高背向散射噪声的抑制比，改善解调曲线工作区的线性度。搭建样机并进行实验后，结果表明，基于暂态过程优化的噪声抑制方法能将暂态过程的占空比由64.3%降低至12.1%，解调后背向散射噪声的抑制比达到46.8%，且解调曲线工作区线性度达99.6%。可见，基于暂态过程优化的方法能有效提高谐振式光纤陀螺背向散射噪声的抑制能力，并改善解调曲线工作区的线性度。

关键词： 谐振式光纤陀螺；背向散射噪声；暂态过程；调制解调

中图分类号： TN253；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0537－06

Research on A Method for Suppressing Backscatter Noise in A Resonant Fiber Optic Gyro Based on Transient Process Optimization

WANG Muyu, WANG Zicheng, WEI Yuqiang, ZHAO Jiaqi, LIU Xiaofu

(School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, CHN)

Abstract: A method for suppressing backscatter noise based on transient process optimization is proposed. This method optimizes the parameters of triangular wave modulation and demodulation to address the serious effect of backscatter noise on a resonant fiber optic gyro (RFOG). The method optimizes the phenomenon of the transient process present in triangular wave modulation by partial sampling and mean filtering to improve the rejection ratio of backscatter noise and the linearity of the workspace of the demodulation curve without changing the optical and electrical hardware of the gyro. The results of experiments conducted with a prototype showed that the noise suppression method based on transient process optimization could reduce the duty cycle of the transient process from 64.3% to 12.1%, and the suppression ratio of backscatter noise reached 46.8%. At the same time, the workspace of the demodulation curve had a linearity of 99.6%. The method based on transient process optimization efficiently improved the suppression of backscatter noise in an RFOG, along with the linearity of the workspace of the demodulation curve.

Key words: resonator fiber optic gyro; backscatter noise; transient process; modulation and demodulation

收稿日期：2024－02－24.

*通信作者：王梓丞

0　引言

光学陀螺是一种利用光学 Sagnac 效应敏感载体转动角速度的传感器，主要包括激光陀螺和光纤陀螺两类。光纤陀螺作为第二代光学陀螺[1]，具有可靠性高、使用寿命长、成本低等多方面的突出优势，其精度覆盖范围广，目前已应用于军、民用的各个领域。

根据工作原理，光纤陀螺可以分为干涉式光纤陀螺、谐振式光纤陀螺（Resonator Fiber Optic Gyro，RFOG）等。其中，RFOG 利用多光束干涉原理，在使用较短光纤的前提下，大幅增强 Sagnac 效应，提高检测灵敏度。此外，随着相关技术的发展，RFOG 逐步展现出在高精度、集成化方面的巨大潜力，现已成为光学陀螺方面的重要研究分支之一。

然而，经过若干年的发展，已报道的 RFOG 仍然没有达到理想水平，难以在实际工程中实现应用。其主要原因在于，RFOG 采用窄线宽光源，这会引入以背向散射噪声为代表的光学噪声，这些噪声严重阻碍 RFOG 检测灵敏度的进一步提升。

为解决背向散射噪声问题，2016 年，美国 Honeywell 公司提出了一种三激光器方案[2]，相较于传统方案，该方案能够实现谐振频率差的更大分离，从而有效抑制背向散射噪声。紧接着，国内的航空工业西安飞行自动控制研究所在 2020 年设计出多频差动型 RFOG[3]。这类方案能有效抑制背向散射噪声，但使用的三激光器为应用增添了高额成本。2022 年，浙江大学舒晓武团队在常规频率分离的基础上，通过调整耦合器之间的光纤长度至最佳匹配值，增强了抑制背向散射噪声的能力[4]。2023 年，浙江大学马慧莲团队首次对相位调制后 RFOG 中的锁相特性展开研究[5]，在构建理论模型的同时，优化调制参数和反馈回路带宽，大幅消除了锁相现象，进一步抑制背向散射噪声。

本文在现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）平台上实现了 RFOG 信号处理，利用三角波调制分离主光波和背向散射光波的频率，并通过载波抑制削弱背向散射光波对 RFOG 的影响。本文还提出了一种部分采样的控制算法，通过识别三角波调制后产生的暂态过程，优化解调效果，进一步提高对背向散射噪声的抑制比。

1　噪声分析

RFOG 在实际工作环境下，易受到温度、压力等外在因素的影响，产生一定的噪声。其中，频率锁定技术对互易性噪声有较好的抑制效果。因此，非互易性噪声是影响 RFOG 性能的主要噪声，背向散射噪声是最具代表性的非互易性噪声之一。

1.1　背向散射噪声产生机理

光纤在制作时，必然存在密度不均匀点，同时熔接处易发生反射，由此引起的 Rayleigh 散射会向各个方向传播，其中部分光波的传播方向与入射光的反方向重合，产生 Rayleigh 散射噪声。Rayleigh 散射噪声与光纤熔接处的反射光共同构成了背向散射噪声。在 RFOG 中，为了得到高质量的谐振曲线，往往采用窄线宽激光器作为光源。窄线宽光源发出的光波相干长度越长，越容易与背向散射光波发生干涉，这会严重影响陀螺性能。

为便于研究，背向散射可以等效为谐振腔内某一点 P 点发生的单点反射[6]，如图 1 所示。由图可见，矩形为耦合器，E_{in} 为入射光场，E_{out} 为主光波，用蓝色实线表示，E_{back} 为背向散射光波，用绿色虚线表示。

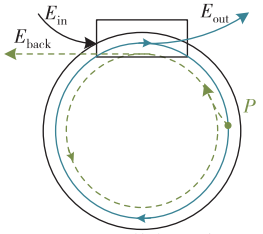


图 1　背向散射示意图

若忽略输入光光场的随机相位，可推导得出腔内主光波和背向散射光波关于频率差 Δf 的传递函数 H 和 H_{b}，其分别可表示为：

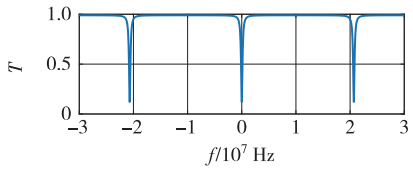
$$H=\sqrt{(1-\alpha_{\mathrm{c}})\left[1-\rho\frac{(1-Q)^2}{(1-Q)^2+4Q\sin^2\left(\frac{\pi\Delta f}{FSR}\right)}\right]} \tag{1}$$

$$H_{\mathrm{b}}=\frac{\sqrt{R_{\mathrm{b}}}k_{\mathrm{c}}(1-\alpha_{\mathrm{c}})10^{-\alpha_L L_{\mathrm{b}}/10}}{(1-Q)^2+4Q\sin^2\left(\frac{\pi}{FSR}\Delta f\right)} \tag{2}$$

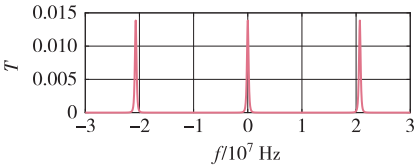
式中，α_{c} 为耦合损耗，Q 为腔内损耗系数，ρ 为谐振深度，Δf 为谐振频率与光源中心频率的差值，FSR（Free Spectral Range）为自由光谱范围，R_{b} 为 P 点处的反射系数，k_{c} 为耦合器分光系数，α_{L} 为光纤的

单位长度传输损耗，L_b 为 P 点和耦合器间的光纤长度。

分别取 α_c 为 0.01 dB，Q 为 0.96，ρ 为 0.88，FSR 为 2.1×10^7 Hz，R_b 为 1.46×10^4，k_c 为 0.06，α_L 为 0.02 dB/cm，L_b 为 1 cm，由式(1)和式(2)可以仿真得到主光波的谐振曲线和背向散射光波的曲线，如图 2 所示。



(a) 谐振谱



(b) 散射谱

图 2 主光波谐振谱和背向散射谱

由图 2 可见，在谐振频率处，背向散射光波最强，对主光波的谐振深度产生较大影响，严重制约陀螺的性能[7]。

1.2 背向散射噪声抑制方法

在 RFOG 中，一般采用相位调制的方法，通过相位调制器(Phase Modulator，PM)将背向散射光波和主光波的频率分离出来，再进行后续的解调放大，实现背向散射噪声的抑制。三角波和正弦波是目前常用的两种调制信号[8]，相比正弦波，三角波在 FPGA 中的实现更为简单，因此，本文选取三角波调制为研究对象。

1.2.1 三角波调制与解调

当未对 PM 载入三角波信号时，设激光器输出的光场为 E_{in}，其表达式为：

$$E_{in}(t)=E_0 e^{j(2\pi f_0 t+\varphi_0)} \tag{3}$$

式中，E_0 为激光器输出光场的幅度，f_0 为激光器的中心频率，φ_0 为初相位。

若在 PM 上施加三角波信号，则光场的相位可表示为：

$$\varphi_{tri}(t)=j\left[(2\pi f_0 t+\frac{\pi}{V_\pi}V_{tri}(t)+\varphi_0\right] \tag{4}$$

式中，V_π 为 PM 的半波电压，$V_{tri}(t)$ 为三角波调制信号，频率为 f_r。

实际上，对入射光波进行三角波调制可等效为对激光器中心频率的频移，当所取其他参数理想时，调制后的等效频移量 f_{FM} 可表示为：

$$f_{FM}=\begin{cases}2f_r & p\dfrac{1}{f_r}<t\leqslant\left(p+\dfrac{1}{2}\right)\dfrac{1}{f_r}\\ -2f_r & \left(p+\dfrac{1}{2}\right)\dfrac{1}{f_r}<t\leqslant(p+1)\dfrac{1}{f_r}\end{cases} \tag{5}$$

式中，p 为整数。

调制后的谐振曲线仿真结果如图 3 所示，曲线变得粗壮，在谐振谷处发生分裂，将曲线放大后可以看到曲线由一个个方波构成，高低电平对应式(5)中的等效移频量，且在一定范围内，方波幅值会随着频率差值的增大而增大，呈一定的线性关系，此范围即陀螺的线性工作区。

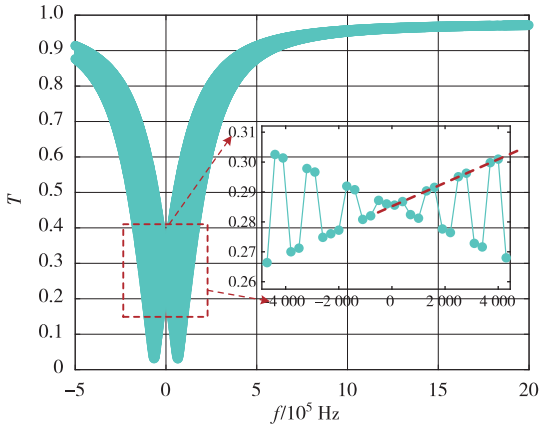


图 3 三角波调制后的谐振谱

根据式(1)和式(5)，分别计算 $f_{FM}=\pm2f_r$ 时谐振腔的光强输出，并作差，即可得到解调曲线，如图 4 所示。

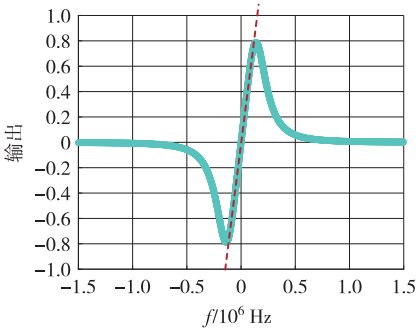


图 4 解调曲线

与理论分析结果一致，谐振频率差为 0 附近的解调曲线呈现出较好的线性度，可以用于解算角速度信息。

1.2.2 三角波调制参数优化

为提高三角波调制的载波抑制比，尽可能抑制

背向散射噪声，需要对调制参数进行优化。经推导，归一化载波分量幅值可以表示为：

$$|A_0|=\left|\frac{\sin(M)}{M}\right| \tag{6}$$

根据式(6)进行仿真，得到图 5，可以看到，当 M 是 π 的整数倍时，归一化载波分量幅值为 0，此时载波抑制比最大。本文采用的 PM 半波电压为 3.9 V，为了使 $M=\pi$，取调制三角波幅值为 3.9 V。

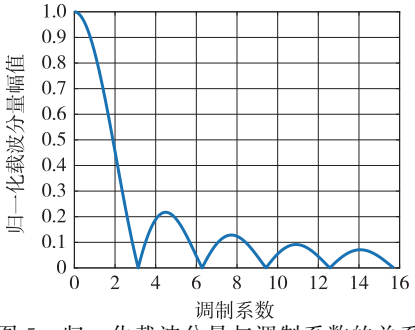


图 5　归一化载波分量与调制系数的关系

解调曲线的线性区对应 RFOG 的工作区，线性区的斜率越大，RFOG 对角速度的检测灵敏度就越高。斜率 k_0 与调制三角波频率之间的关系为[9]：

$$k_0=\frac{16\pi\rho Q(1-\alpha_c)(1-Q)^2\sin\left(2\pi\dfrac{f_r}{FSR}\right)}{FSR(1-Q)^2+4Q\sin^2\left(\pi\dfrac{f_r}{FSR}\right)} \tag{7}$$

按照图 2 的参数取值，根据式(7)进行仿真，得到图 6。可以看到，斜率与调制频率之间的关系并不是简单的线性关系，而是存在一个最大值。在本文所采用的 RFOG 系统中，当调制频率为 110 kHz 时，解调曲线斜率最大。

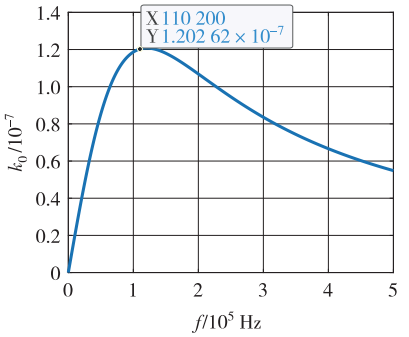


图 6　解调曲线斜率和调制频率关系

2　暂态过程优化方法

背向散射噪声根据成因不同，可以分为第一类和第二类背向散射噪声。由背向散射光波自身引起的称为第一类，由背向散射光波和主光波干涉引起的称为第二类[9]。调制解调可以有效分离主光波和背向散射光波的频率，彻底抑制第一类背向散射噪声。在此基础上，通过选取合适的调制参数，能够使载波抑制比最大，进一步抑制第二类背向散射噪声。

在理想情况下，三角波调制后的待解调信号是由图 3 所示的同频不同幅值的方波信号构成，但方波的高低电平转换并不会瞬时完成，存在如图 7 红色圆圈所示的过渡状态，称为暂态过程。

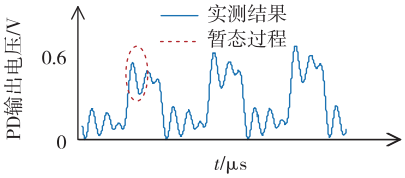


图 7　暂态过程实测图

暂态过程本身是数模信号转换导致的正常结果，但当暂态过程占空比较大时，稳态值将无法获取，这会直接导致解调时产生误差，解调曲线工作区线性度不佳，无法准确解算载体角速度。在光路、电路等硬件保持不变的前提下，调制信号的频率变小能够有效减小暂态过程的占空比。然而，改变调制信号的频率会影响载波抑制效果和解调曲线工作区的斜率，削弱对背向散射噪声的抑制效果，同时影响陀螺检测灵敏度。因此，本文在调制信号参数最优的基础上，采取部分采样结合均值滤波的方式，优化暂态过程。具体实现时编写的 Verilog 程序流程如图 8 所示。

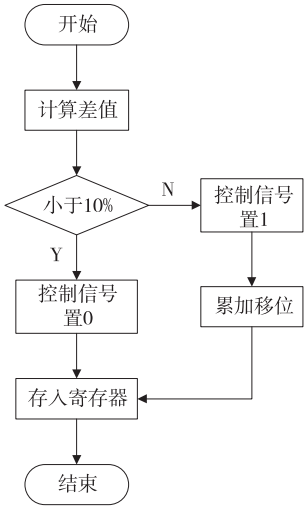


图 8　暂态过程优化流程图

根据图 8，在 FPGA 内首先对模数转换器(Analog to Digital Converter，ADC)所采集的信号进行判断，以瞬时值与稳态值差值小于 10% 为判断

条件，再输出部分采样的控制信号，控制信号的占空比与暂态过程一致。当满足判断条件时，认为所采集信号处于暂态过程中，控制信号置高电平，对暂态过程进行平滑滤波，从而提升采集到的信号质量，优化解调效果；当不满足判断条件时，认为所采集的信号达到稳态，控制信号置低电平，将当前数据存入寄存器以进行下一步的解调运算。为节约资源，此处的平滑滤波可以通过累加移位实现。

3 实验测试与分析

3.1 样机搭建

如图 9 所示，是实验样机的整体结构框图。为实时观察背向散射噪声的抑制效果，仅对一路光波进行调制解调，另一路用于采集背向散射光波信号。

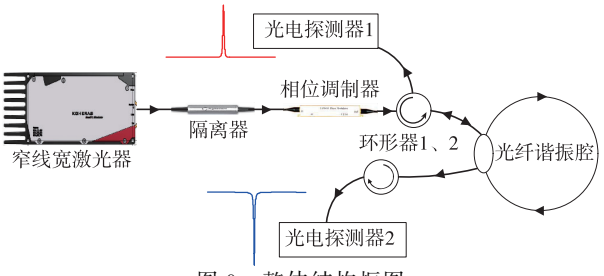


图 9 整体结构框图

窄线宽激光器发出的光经隔离器后，在 PM 处进行相位调制。调制后的光经环形器 1 入腔传输，出腔后经环形器 2 输出，在光电探测器 2 处即可采集到谐振腔的输出。背向散射光波出腔后经环形器 1，由光电探测器 1 采集。光电探测器 2 处得到的输出信号经 ADC 采样后，在 FPGA 中完成信号的解调放大。

3.2 实验测试

未施加调制信号时，打开激光器，光电探测器 1 处的输出如图 10 所示，可以较为明显地观察到背向散射噪声的存在。由于温度等环境因素的干扰，背向散射光波的强度并非保持不变，为验证噪声抑制效果，计算同一位置处的背向散射噪声抑制比作为依据。图 10 中，两处背向散射噪声相距 210 ms，对应谐振腔的一个 FSR，与图 2 的仿真保持一致。未加调制时，背向散射噪声为 36.9 mV。

接着验证本文提出方案，测试结果如图 11 所示。首先，利用 FPGA 输出幅值为 3.9 V、频率为 110 kHz 的三角波对谐振曲线进行调制，此时示波器中所观察到的调制后方波周期为 8.7 μs，与理论值 9 μs 接近。观察光电探测器 2 处的输出波形，按图 7 中的判断条件，暂态过程时间为 2.8 μs，占空比为 32.1%。此时将信号处理的程序进行烧录，暂态过程得到了明显的改善，占空比降低为 12.1%，如图 11(a)所示。最后，对三角波调制后的信号进行解调，得到如图 11(b)所示的解调曲线，线性工作区的满量程输出为 4.04 V，与拟合直线间最大偏差为 16 mV，线性度为 99.6%。抑制背向散射噪声前后光电探测器 1 处采集的背向散射噪声如图 11(c)所示，幅值分别为 36.9 和 19.6 mV，抑制比达 46.8%。

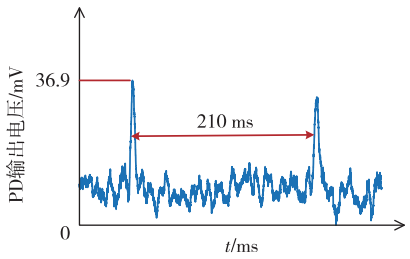
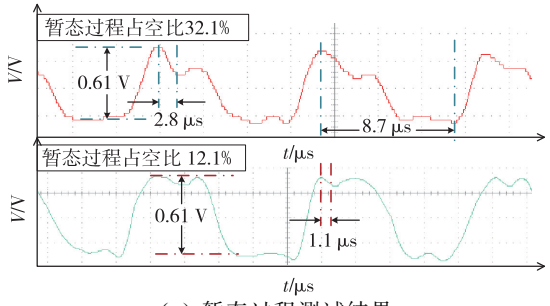
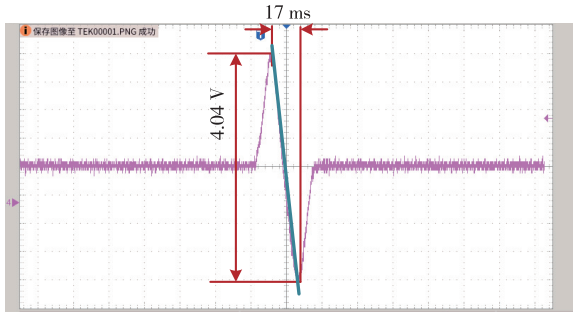


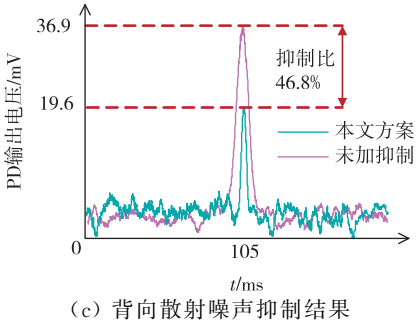
图 10 未加调制时采集到的背向散射光波



(a) 暂态过程测试结果



(b) 解调输出



(c) 背向散射噪声抑制结果

图 11 测试结果

4　结论

本文针对RFOG中背向散射噪声抑制不充分的问题，对三角波调制解调进行了理论推导和仿真。在此基础上，针对三角波调制时的载波抑制比和解调曲线线性区斜率，进行了参数优化。为了减小三角波调制时暂态过程对解调结果的影响，提出了一种部分采样结合均值滤波的解决方案。最后，搭建实验样机，对背向散射噪声的抑制效果进行测试。实验结果表明，本文所提出的方案在三角波调制解调的基础上，大幅减小了暂态过程的占空比，进一步优化解调结果，增强了背向散射噪声抑制效果，为三角波调制解调方案提供了一种高效的信号处理与优化方法。在后续工作中可以结合频率锁定，进一步提高闭环RFOG的各项指标。

参考文献：

[1] 刘　路，刘　霜，钱伟文，等. 基于同频调制解调的谐振式光纤陀螺仪[J]. 中国惯性技术学报，2021，29(4)：532-535.
Liu Lu，Liu Shuang，Qian Weiwen，et al. Resonant fiber optic gyroscope based on the reciprocal modulation-demodulation technique[J]. J. of Chinese Inertial Technology，2021，29(4)：532-535.

[2] Udd E，Pickrell G，Du H，et al. Fiber optic sensors and applications Ⅶ[J]. Proc. SPIE，2016，9852：985201.

[3] 王京献，李　俊，蓝士祺. 一种差动型谐振式空芯光子晶体光纤陀螺方案的设计与实现[J]. 中国惯性技术学报，2020，28(6)：802-808.
Wang Jingxian，Li Jun，Lan Shiqi. Design and realization of a scheme for differential resonant hollow core photonic crystal fiber gyro[J]. J. of Chinese Inertial Technology，2020，28(6)：802-808.

[4] Zou K，Wang L，Chen K，et al. Optimization of reciprocal modulation parameters in resonant fiber optic gyro[J]. J. Lightwave Technol.，2021，39(17)：5669-5675.

[5] Liu L，Liu S，Ma H，et al. Evaluation and measurement of the lock-in effect in resonant fiber optic gyroscopes[J]. J. Lightwave Technol.，2023，41(17)：5754-5762.

[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]. Appl. Opt.，2013，52(8)：1668-1675.

[7] Conteduca D，Arruda G S，Barth I，et al. Beyond Q：the importance of the resonance amplitude for photonic sensors[J]. ACS Photonics，2022，9(5)：1757-1763.

[8] He Y，Yang F，Yan W，et al. Phase modulation techniques for suppressing backscattering noise in resonator integrated optic gyroscopes[J]. Chinese Optics，2019，12(6)：1403-1417.

[9] 韩松延，胡宗福. 谐振式光纤陀螺的信噪比研究[J]. 半导体光电，2020，41(6)：788-793.
Han Songyan，Hu Zongfu. Research on signal to noise ratio of resonant fiberoptic gyro[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(6)：788-793.

[10] Wang Z，Wang G，Wang Z，et al. Incoherence suppression method of optical noises in a resonant fiber optic gyro based on the circularly polarized light propagation mechanism in a resonator[J]. Opt. Lett.，2021，46(13)：3191-3194.

作者简介：

王沐禹(2000—)，男，江苏省盐城市人，硕士研究生，主要从事谐振式光学陀螺和光学回音壁领域的研究；

王梓丞(1992—)，男，黑龙江省哈尔滨市人，博士，主要从事光纤惯性传感与系统技术领域的研究。