

文章编号:1002-2082(2018)02-0290-06

谐振式光纤陀螺背向散射噪声抑制研究

蓝士祺,雷 兴,王 河,胡 强,韩宗虎

(中国航空工业集团公司 西安飞行自动控制研究所,陕西 西安 710065)

摘要:背向散射噪声是谐振式光纤陀螺的主要噪声之一。基于载波抑制法降低背向散射噪声的原理,建立了温度和电压对陀螺零偏影响的数学模型,理论证明此方法受温度影响较大且对电路要求较高。提出了三频差动谐振式光纤陀螺新方案,该方案通过谐振腔内运行三束频率间隔较大的光波来抑制背向散射噪声。与传统二频闭环陀螺进行了对比试验,结果表明:新方案能有效地降低陀螺噪声,最大陀螺零偏和零偏稳定性改善约4倍。

关键词:光纤陀螺;背向散射;载波抑制;三频差动

中图分类号:TN253;TP212.1

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0208002

Research on backscatter noise suppression for resonator fiber optic gyro

Lan Shiqi, Lei Xing, Wang Ke, Hu Qiang, Han Zonghu

(Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: Backscatter noise is one of the main noises in resonator fiber optic gyro(RFOG). Based on the principle for reducing the backscatter noise by carrier suppression method, the mathematical model was established for the influence of temperature and voltage on the gyro bias. It is theoretically proved that this method is largely affected by temperature and has higher circuit requirements. A new scheme of RFOG based on three-mode differential technology was put forward. In this scheme, the backscatter noise is decreased by operating three beams with large frequency intervals in the resonant cavity. A comparative experiment was conducted with traditional two-mode closed-loop gyro. The results show that the new scheme can effectively minimize the gyro noise, and both the maximum gyro bias and bias stability are improved by around 4 times.

Key words: fiber optical gyro (FOG); backscatter noise; carrier suppression; three-mode differential

引言

谐振式光纤陀螺集成了激光陀螺与干涉式光纤陀螺的优点,利用较短的光纤环形谐振腔即可实现高精度惯性角速率测量,是光学陀螺未来发展的重要方向之一^[1-3]。谐振式光纤陀螺的谐振腔内背向散射光与主传播光束之间的耦合会造成背向散射噪声,这是限制陀螺精度提升的重要因素^[4-6]。传统谐振式光纤陀螺通常使用载波抑制方法降低背向散射

噪声^[7-8],该方法在实验室环境中能有效抑制陀螺背散噪声,而陀螺工作环境例如外界温度,相位调制器控制电压等因素变化会明显影响陀螺零偏,限制陀螺精度提升。基于载波抑制法降低背向散射噪声的基本原理,建立了温度漂移和相位调制器的控制电压波动对陀螺零偏噪声影响的数学模型。理论分析显示,温度和控制电压波动对噪声抑制效果影响很大,追求较高精度时对陀螺的温控和电路要求很高。

收稿日期:2017-10-30; 修回日期:2017-12-08

作者简介:蓝士祺(1992—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事新型惯性器件方面的研究工作。

E-mail:375813102@qq.com

本文针对以上问题提出了一种三频差动谐振式光纤陀螺新方案。该方案可以有效地抑制背向散射噪声,降低了温度和电压波动的影响,为背散噪声抑制提供了新方案。

1 载波抑制降低背散噪声

1.1 载波抑制原理

背向散射噪声是谐振式光纤陀螺的主要噪声之一,在光纤谐振腔中,设顺时针和逆时针主光束的光场为 E_{cw} 和 E_{ccw} ,背向散射系数为 R_b ,则顺时针方向总光场应为主光束和背向散射光的叠加:

$$E_{\text{cw总}} = E_{\text{cw}} + \sqrt{R_b} E_{\text{ccw}} \quad (1)$$

由(1)式可以得到谐振腔内顺时针方向的光强 I_{cw} :

$$I_{\text{cw}} = E_{\text{cw总}} E_{\text{cw总}}^* = |E_{\text{cw}}|^2 + R_b |E_{\text{ccw}}|^2 + \sqrt{R_b} |E_{\text{cw}} E_{\text{ccw}}| = I_{\text{cw0}} + N_1 + N_2 \quad (2)$$

式中 I_{cw0} 表示陀螺有效信号用于角速度探测,其余部分为背散噪声应当被消除。背散噪声主要分为两部分, N_1 表示背向散射光本身对陀螺信号的影响,可以对顺逆光束施加不同频率的调制并通过带通滤波加以抑制; N_2 表示背向散射光与主传播光束的干涉。当前通常采取对光路施加载波抑制来降低噪声影响^[9]。

为抑制背散噪声,一般在顺逆时针光路的输入端熔接相位调制器,通过相位调制器施加频率不同的调制对顺逆时针光束进行标记。在陀螺输出端采用相应频率的带通滤波器进行背散噪声分离。设顺逆时针方向光束的频率为 f_{cw} 和 f_{ccw} ,施加的相位调制频率分别为 F_{cw} 和 F_{ccw} ,相位调制系数为 M ,此时光纤谐振腔内顺时针光场和由逆时针光产生的背向散射光场可以用 Bessel 函数分别展开为

$$E_{\text{cw}_M} = E_0 \exp \{ j[2\pi f_{\text{cw}} t + M \sin(2\pi \cdot F_{\text{cw}} t)] \} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(M) \exp \cdot [j(n2\pi F_{\text{cw}} t + 2\pi f_{\text{cw}} t)] \quad (3)$$

$$\sqrt{R_b} E_{\text{ccw}_M} = \sqrt{R_b} E_0 \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} J_{n'}(M') \exp [j \cdot (n'2\pi F_{\text{ccw}} t + 2\pi f_{\text{ccw}} t)] \quad (4)$$

式中 J_n 为 n 阶 Bessel 系数。将(3)、(4)式代入(2)式得到受正弦调制的顺时针方向光强 I_{cw_M} :

$$I_{\text{cw}_M} = I_{\text{cw0}_M} + N_{1M} + N_{2M} \quad (5)$$

式中各个分量的表达式为

$$I_{\text{cw0}_M} = E_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |J_n|^2 + 2E_0^2 \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |J_{n-k} J_n|^2 \cdot \cos(k \times 2\pi F_{\text{cw}} t) \quad (6)$$

$$N_{1M} = R_b E_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |J_n|^2 + 2R_b E_0^2 \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |J_{n-k} J_n|^2 \cdot \cos(k \times 2\pi F_{\text{ccw}} t) \quad (7)$$

$$N_{2M} = 2 \sqrt{R_b} E_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} J_n(M) J_{n'}(M') \cdot \cos[2\pi(f_{\text{cw}} - n'F_{\text{ccw}})t + 2\pi(f_{\text{cw}} - f_{\text{ccw}})t] \quad (8)$$

将受调制的顺时针光信号 I_{cw_M} 通过中心频率等于调制频率 F_{cw} 的带通滤波,则(5)式只留下 $\cos(2\pi F_{\text{cw}} t)$ 项。由于 Sagnac 频差为一小量通常小于滤波带宽,可以将陀螺有效信号(6)式和背向散射噪声(7)、(8)式修正为

$$I_{\text{cw0}_M} = 2E_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |J_{n-k} J_n|^2 \cos(2\pi F_{\text{cw}} t) \quad (9)$$

$$N_{1M} = 0 \quad (10)$$

$$N_{2M} = 2 \sqrt{R_b} E_0^2 |J_0(M)| |J_1(M')| \cdot \cos[2\pi(f_{\text{cw}} - f_{\text{ccw}})t + 2\pi F_{\text{cw}} t] \quad (11)$$

从带通滤波后的陀螺信号(9)式和背散噪声(10)、(11)式可以看出,这种调制加滤波的方法虽然可以抑制背散光本身对陀螺信号的影响 N_{1M} ,而背散光与信号的干涉噪声 N_{2M} 还无法被完全消除。(11)式中背散干涉噪声 N_{2M} 的幅值大小与 Bessel 函数的乘积有关,载波抑制法通过选取合适的 M 将 Bessel 函数达到零值从而抑制 N_{2M} 。

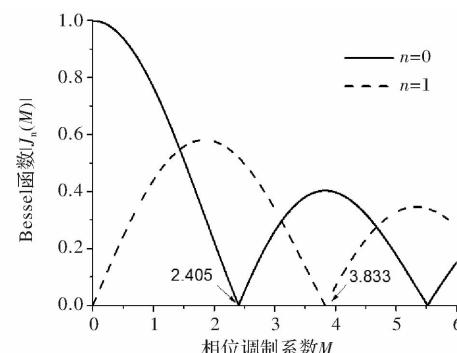


图 1 Bessel 函数与相位调制系数关系

Fig. 1 Bessel function versus phase modulation coefficient

图 1 为 $|J_0(M)|$ 和 $|J_1(M)|$ 函数曲线,其零

点分别为 2.405 和 3.833。根据相位调制器电光调制原理,相位调制系数 M 由半波电压和调制电压的共同决定:

$$M = \frac{\pi}{V_\pi} V_s \quad (12)$$

式中: V_s 为相位调制器的控制电压; V_π 为去除半波电压。考虑到相位调制器输出功率,载波抑制法通过改变相位调制器的控制电压将 $J_0(M)$ 置于第一零点 $M=2.405$ 处来消除背向散射干涉噪声 N_{2M} 。由(3)式可以得到 $M=2.045$ 时顺时针光各谐波分量的归一化振幅 $|J_n(M)|$ 如图 2 所示。

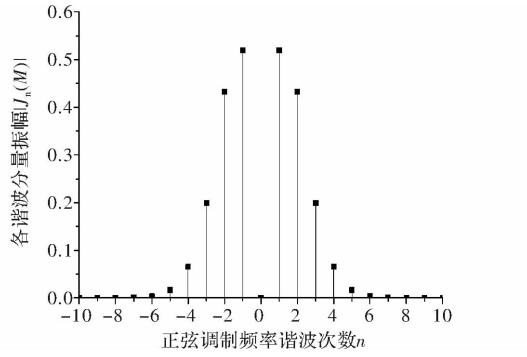


图 2 $M=2.045$ 各阶次谐波分量幅值

Fig. 2 Amplitude of each harmonic component with $M=2.405$

当相位调制系数 $M=2.405$ 时,光场能量转移到高阶次谐波上使得零阶载波几乎完全消除从而实现载波抑制。

1.2 载波抑制影响因素分析

由载波抑制工作原理可以看出,通过载波抑制可以降低背向散射噪声。文献[9]给出了载波抑制下由背向散射光引起陀螺零偏的经验公式,结合 $J_0(M)$ 函数特性和 M 定义式(12)可以将其修正为

$$B_s = \frac{c\lambda\sigma_R}{4\pi^2 DL} \left(\frac{\Delta V}{V_{opt}} \right)^N = \frac{c\lambda\sigma_R}{4\pi^2 DL} |J_0(M)|^N \quad (13)$$

式中: c 为真空光速; λ 为光波波长; D 为谐振环直径; L 为光纤长度; σ_R 为谐振时背向散射系数; ΔV 为相位调制器控制电压误差; V_{opt} 为载波抑制理想电压; N 为载波抑制施加路数 ($N=0, 1, 2$ 分别为不施加载波抑制、单方向载波抑制和顺逆两方向载波抑制)。考虑到相位调制器的半波电压会随温度改变且调制电压存在波动,将相位调制系数 M 的定义式(12)修正为

$$M = \frac{\pi}{V_\pi(1+K\Delta T)}(V_s + \Delta V) \quad (14)$$

式中: K 为半波电压与温度的相关系数; ΔT 为温度变化量; ΔV 为控制电压误差。将(14)式带入(13)式得到陀螺零偏与相位调制器的温度和控制电压误差关系:

$$B_s = \frac{c\lambda\sigma_R}{4\pi^2 DL} \left(J_0 \left(\frac{\pi}{V_\pi(1+K\Delta T)} \cdot (V_s + \Delta V) \right) \right)^N \quad (15)$$

选用半波电压 $V_\pi=4.84$ V 的相位调制器, $K=-500 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 谐振环直径 $D=0.08$ m, 光纤长度 $L=20$ m, 入射光波长 $\lambda=1550$ nm, 考虑谐振放大时宏观背散系数 $\sigma_R=1.33\%$, 顺逆方向均施加载波抑制 $N=2$ 。将上述参数代入(15)式得到陀螺零偏 B_s 随温度漂移 ΔT 和控制电压误差 ΔV 影响如图 3 所示。

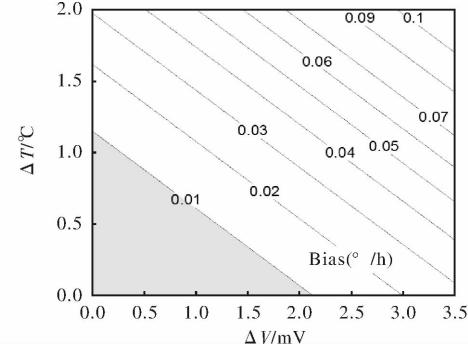


图 3 温度和电压波动对陀螺零偏影响

Fig. 3 Influence of temperature and voltage fluctuation on gyro bias

为了将背向散射零偏波动降低到谐振式光纤陀螺由散粒噪声限制的精度 $0.01^\circ/\text{h}$ 以下, 陀螺需工作在阴影区域, 此时至少需控制相位调制器的温度变化量 ΔT 在 1.15°C 以内且控制电压漂移低于 2.14 mV。从上述理论分析可以看出, 虽然载波抑制法能降低背向散射噪声, 但受温度影响明显且对控制电压精度要求高, 实际工程应用难度较大。

2 三频差动谐振式光纤陀螺

背向散射噪声 N_{2M} 的表达式(11)给出了噪声的幅值大小和频率特性。 N_{2M} 不仅与相位调制系数 M 有关, 其频率等于顺逆光束的频差。若是能在获取 Sagnac 频差的前提下增大顺逆光束之间的频率间隔, 则通过带通滤波即可将背向散射误差消除, 这为背向散射噪声抑制提供了新思路。本文提出了一种抑制背向散射噪声的三频差动陀螺

方案,其结构原理如图 4 所示。

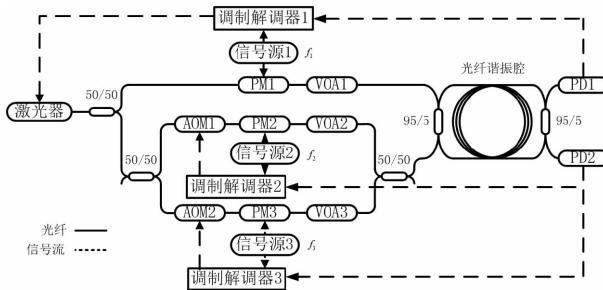


图 4 三频差动陀螺方案示意图

Fig. 4 Schematic of three-mode differential gyro

三频差动陀螺工作时,光纤谐振腔内运行 3 束光波。第 1 束为逆时针光波 f_{CCW} ,通过控制激光器输出频率以保证对于 f_{CCW} 锁定在谐振腔逆时针方向上的第 q 个纵模上。第 2、3 束分别为顺时针光波 f_{CW1} 和 f_{CW2} ,通过声光移频器 AOM 移频分别跟踪锁定在谐振腔顺时针方向上的第 $q-m$ 和 $q+m$ 个纵模上($m=1,2,3,\dots$)。静止时谐振腔内每个光束之间的频率间隔 Δv 为自由光谱范围 f_{FSR} 的 m 倍。逆时针转动时,三频差动陀螺谐振腔内频谱分布如图 5 所示。

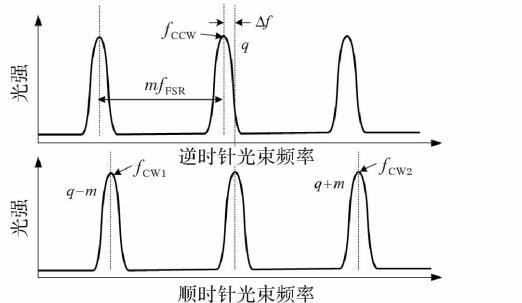


图 5 逆时针转动下三频光束频谱示意图

Fig. 5 Spectrum diagram of three-mode beams under CW rotation

由于 Sagnac 效应会使得顺逆光束发生频率偏移,从图 5 中得到光纤谐振腔内 3 束光波频率间隔的关系为

$$\Delta v_1 = f_{CCW} - f_{CW1} = m f_{FSR} - \Delta f_\alpha = \Delta f_{AOM1} \quad (16)$$

$$\Delta v_2 = f_{CW2} - f_{CCW} = m f_{FSR} - \Delta f_\alpha = \Delta f_{AOM2} \quad (17)$$

式中: Δf_α 为转动产生的顺逆时针光束 Sagnac 频差; Δf_{AOM1} 和 Δf_{AOM2} 为声光移频器 AOM1 和 AOM2 的移频量。通过 Δf_{AOM1} 和 Δf_{AOM2} 作差,结合谐振式光纤陀螺 Sagnac 频差 Δf_α 计算公式^[1]即可得到角速度表达式:

$$\Omega = \frac{(\Delta f_{AOM2} - \Delta f_{AOM1})n\lambda}{2D} \quad (18)$$

3 实验与结果分析

依照图 5 所示方案搭建三频差动谐振式光纤陀螺。选用纤芯折射率 1.465,长为 20 m 的藤仓熊猫光纤,根据 AOM 的移频范围 ± 40 MHz 设置 $m=4$ 。陀螺工作时谐振腔内光波两两之间频率间隔 Δv 约 40 MHz。对 3 路光束分别施加 $f_1 = 95$ kHz, $f_2 = 97$ kHz 和 $f_3 = 99$ kHz 的正弦调制^[10],并经过相应频率的带通滤波得到陀螺信号。三频差动陀螺中也施加了载波抑制,即使温度或者控制电压波动导致背向散射噪声增大,由于 3 路调制频率不同且 N_{2M} 频率近似等于 40 MHz 远高于调制频率,通过带通滤波即可抑制背向散射噪声 N_{1M} 和 N_{2M} 。实验设置一个二频闭环陀螺作为对照组,其结构方案如图 6 所示。

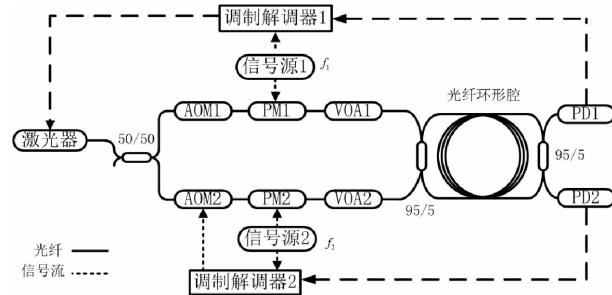


图 6 二频陀螺方案示意图

Fig. 6 Schematic of two-mode differential gyro

对照组中的二频陀螺使用 2 个移频量为 40 MHz 的 AOM 形成闭环控制,以避免陀螺元件和控制回路不同对陀螺噪声的影响。由于谐振式光纤陀螺的背向散射噪声无法直接测得,使用 1 h 陀螺零偏来表征二频闭环陀螺和三频差动陀螺对噪声抑制程度。

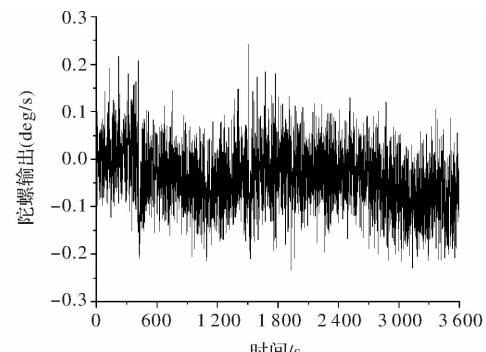


图 7 二频闭环陀螺零偏输出

Fig. 7 Bias output of two-mode closed-loop gyro

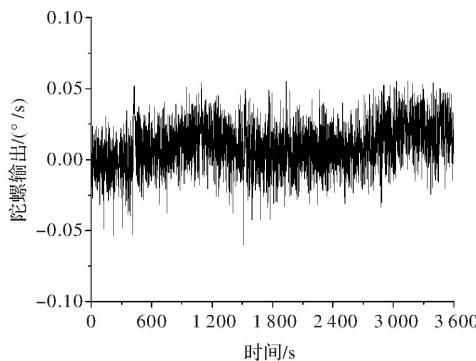


图 8 三频差动陀螺零偏输出

Fig. 8 Bias output of three-mode differential gyro

图 7 和图 8 分别为二频闭环陀螺和三频差动陀螺静态 1 h 的零偏输出。从测试数据得到二频闭环陀螺和三频差动陀螺的最大零偏输出分别为 $0.242^{\circ}/s$ 和 $0.056^{\circ}/s$, 其零偏稳定性分别为 $99.34^{\circ}/h$ 和 $24.7^{\circ}/h$ 。对比实验数据可以看出, 三频差动方案在零偏噪声抑制方面更优, 其中最大零偏噪声和零偏稳定性均改善约 4 倍。

4 结论

本文推导了背向散射噪声形成机理, 给出了背散噪声表达式。根据载波抑制原理和相位调制器特性建立了温度漂移和电压波动对陀螺零偏影响的数学模型。通过仿真计算得到, 在高精度测量时使用载波抑制法降低背散噪声需要对陀螺温度控制在 1.15°C 以内, 电压波动小于 2.14 mV , 工程应用中实现难度较大。基于背向散射噪声频率特性, 提出了三频差动谐振式光纤陀螺方案。理论证明了该方案能有效抑制背向散射噪声, 降低对陀螺温控和电路设计的要求。搭建三频差动陀螺样机并设置二频闭环陀螺作为对照组, 通过 1 h 静态试验对比得到: 三频差动陀螺的最大零偏噪声和零偏稳定性均改善约 4 倍, 为谐振式光纤陀螺背向散射噪声抑制提供了新方案。

参考文献:

- [1] ARDITTY H J, LEÈFOVRE H C. Sagnac effect in fiber gyroscopes[J]. Optics Letters, 1981, 6(8): 401.
- [2] YAO Qiong, SONG Zhangqi, XIE Yuanping, et al. Study on the characteristics of fiber optic resonator ring for resonator fiber optic gyroscope[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 676-680.
- 姚琼, 宋章启, 谢元平, 等. 谐振腔光纤陀螺光纤谐振环特性研究[J]. 光子学报, 2007, 36(4): 676-680.
- [3] JIANG Zhiguo, HU Zongfu. Analysis on sensitivity of resonant fiber optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 305-311.
- 蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 305-311.
- [4] MA Huilian, ZHANG Jianjie, WANG Linglan, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3546-3554.
- [5] NAKAZAWA M. Rayleigh backscattering theory for single mode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(9): 1175-1180.
- [6] MA Huilian, JIN Zhonghe, Ding Chun, et al. Optimal design of ring resonator in silica optical waveguide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1330-1332.
- 马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 二氧化硅光波导环形谐振腔[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1330-1332.
- [7] MA Huilian, JIN Zhonghe, HOTATE K. Reduction of backscattering induced noise by carrier suppression in waveguide-type optical ring resonator gyro[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 29(1): 85-90.
- [8] MAO Hui, MA Huilian, JIN Zhonghe. Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4632-4643.
- [9] KAISER T J, CARDARELLI D, WALSH J G. Experimental developments in the RFOG[J]. SPIE, 1991, 1367: 121-126.
- [10] FENG Xiang, MA Yingjian, YU Huaiyong, 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.