

DOI:10.16136/j.joel.2023.01.0274

调制电压幅值及噪声对谐振式光纤陀螺零偏稳定性的影响研究

高天香¹, 李俊², 蓝士祺², 吴凡², 岳亚洲², 齐新元^{1*}

(1. 西北大学 物理学院, 陕西 西安 710127; 2. 西安飞行自动控制研究所 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710076)

摘要: 谐振环路背向散射噪声是谐振式光纤陀螺(resonator fiber optic gyroscope, RFOG)系统中的主要光学噪声之一。本文基于谐振环中背向散射噪声对陀螺输出误差影响的理论分析, 对比不同调制波形和载波抑制路数的影响, 得到最佳方案为三角波双路调制。基于该方案, 建立陀螺零偏及零偏稳定性(bias stability, BS)误差与调制电压幅值及噪声关系的理论模型, 结合直径0.1 m, 光纤总长10 m, 精细度24的陀螺参数, 得到背向散射噪声导致的陀螺BS对调制电压变化范围与噪声幅值量化指标的需求, 为特定精度的陀螺设计奠定误差分配和控制参数设计基础。

关键词: 谐振式光纤陀螺; 背向散射; 载波抑制; 调制电压幅值; 调制电压噪声; 零偏稳定性

中图分类号: V241.5+9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)01-0074-07

Research on the influence of modulation voltage amplitude and noise on the resonator fiber optic gyroscope's bias stability

GAO Tianxiang¹, LI Jun², LAN Shiqi², WU Fan², YUE Yazhou², QI Xinyuan^{1*}

(1. School of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710076, China)

Abstract: The backscattering noise of the resonant loop is one of the main optical noises in the resonator fiber optic gyroscope (RFOG) system. Based on the theoretical analysis of the influence of the backscattering noise in the resonant ring on gyro output error, comparing the influence of different modulation waveforms and carrier suppression channels, the best solution is the triangular modulation with dual-channel. Based on this scheme, a theoretical model of the relationship between the gyro bias and bias stability (BS) error with the modulation voltage amplitude and noise is established. Combining the gyro parameters with a diameter of 0.1 m, total fiber length of 10 m and the fineness of 24, the requirements of the gyro zero-BS caused by backscattering noise on modulation voltage variation range and quantitative index of noise amplitude is obtained. It lays the foundation of error distribution and control parameter design for specific precision gyro.

Key words: resonator fiber optic gyroscope (RFOG); backscattering; carrier suppression; modulation voltage amplitude; modulation voltage noise; zero-bias stability (BS)

0 引言

谐振式光纤陀螺(resonator fiber optic gyroscope, RFOG)是一种利用Sagnac效应工作的惯性角速度传感器^[1,2]。相比激光陀螺(ring laser gy-

roscope, RLG), RFOG体积小, 且没有闭锁问题, 相比干涉式光纤陀螺(interferometric fiber optic gyroscope, IFOG), 达到相同精度RFOG所需的光纤更短, 受温度影响小且动态测量范围更大, 这些优点使得RFOG成为众多科研院所及高校关注的

* E-mail: qixycn@nwu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-15 修订日期: 2022-05-06

基金项目: 装备预研基金(61409230217)资助项目

重点领域之一^[3-7]。

Sagnac 效应是一种弱效应,系统中的各项噪声会对陀螺信号检测造成严重影响,其中,光学噪声之一的瑞利背向散射影响尤为突出^[8,9]。该噪声对陀螺的影响可分为两类,一类是背向散射光波本身的影响,另一类是由于背向散射光波和主光波的传输方向相同,两束光相干引入了寄生干涉^[10]。对于第一类背向散射噪声,采用不同的频率对顺、逆两个方向的光波进行相位调制^[9,10],理论上可消除其对陀螺输出信号的影响。第二类背向散射噪声,即背散噪声的干涉项仅依靠施加不同的调制频率无法完全消除^[11,12],可以采用抑制载波分量的方法^[13]。

在进行载波抑制时,除了调制波形^[14,15]或调制频率^[16,17]对载波抑制的效果有影响,调制电压幅值偏离最优值的大小以及调制电压噪声也会产生较大影响。本文理论分析从光纤环形谐振腔后输出光场变化出发,通过分析不同调制波形及抑制路数对载波抑制比的抑制效果,综合对比分析后,选取三角波调制、两路载波抑制的较优方案进行理论仿真,得到不同零偏稳定性(bias stability, BS)对应的调制电压变化范围与噪声的关系,并给出具体量化数值。

1 背向散射噪声与陀螺零偏误差输出

背向散射噪声对陀螺零偏误差输出的影响可表示为^[18]:

$$BIAS = \frac{c\lambda\sigma_R}{4\pi^2 DL} \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^N, \quad (1)$$

式中, c 是光在真空中的传播速度, λ 是传输光的波长, σ_R 是光纤环形谐振腔的背向散射系数, D 是光纤环的直径, L 是光纤环的长度, N 是载波抑制的路数,可取0、1、2, U 是调制电压幅值, $\Delta U/U$ 是调制电压变化最优电压的比值,即载波抑制比误差,当两路载波抑制时, $\Delta U/U = 1\%$ 对应80 dB的载波抑制比。

取谐振腔参数 $D=0.1$ m, $L=10$ m, 精细度为24,由于外界因素影响,取背散系数 σ_R 为0—0.003。基于式(1)可得载波抑制比与陀螺输出误差的关系。

如图1所示,当没有载波抑制时,由于背散噪声导致的陀螺零偏误差输出高达7289°/h。随着载波抑制比从0 dB增大到100 dB,陀螺零偏误差迅速减小。当采取单路载波抑制($N=1$)时,载波抑制比97.76 dB对应陀螺零偏误差输出为0.1°/h,而对于两路载波抑制($N=2$),同样的陀螺零偏误差精度仅需要每路载波抑制比为48.63 dB。因此,载波抑制对陀螺性能非常重要,且两路载波抑制效果更好。

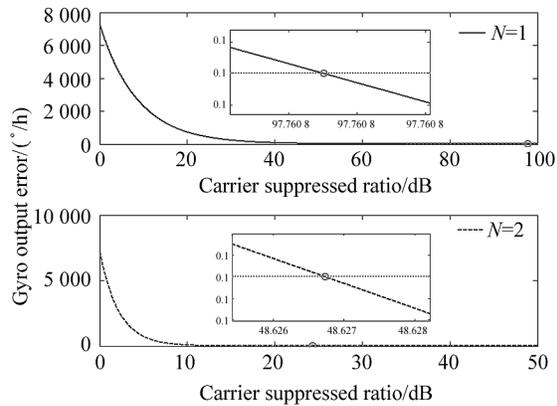


图1 载波抑制比与陀螺零偏误差的关系

Fig. 1 The relationship between carrier suppressed ratio and gyro bias error

2 不同调制波形与载波抑制的关系

采用不同调制波形时得到的载波抑制效果也不同,下面对常用的正弦波和三角波进行分析比较。

以陀螺系统逆时针光信号为例,激光器的输出光场可以表示为:

$$E = E_0 \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_0)], \quad (2)$$

式中, E_0 是光纤激光器输出光场幅度, f_0 是激光器的中心频率。

2.1 正弦波调制

对相位调制器(phase modulator, PM)施加正弦波调制时^[19],光纤环形谐振腔腔内光场表示为:

$$E_{\sin} = \frac{\sqrt{1-K}}{2} E_0 \cdot \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi U_{\sin}/V_{\pi} \sin(2\pi f_{\sin} t + \varphi_0)]\}, \quad (3)$$

式中, U_{\sin} 为驱动PM的正弦波电压信号, V_{π} 为PM的半波电压, f_{\sin} 为正弦波的调制频率, K 是系统的能量损耗系数。将式(3)用贝塞尔函数展开后得到:

$$E_{\sin} = \frac{\sqrt{1-K}}{2} E_0 \cdot$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{\sin} \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi U_{\sin}/V_{\pi} \sin(2\pi f_{\sin} t) + \varphi_0]\}. \quad (4)$$

采用正弦波相位调制时的归一化载波分量幅度可表示为:

$$A_{\sin,0} = |J_0(\zeta)|, \quad (5)$$

式中, ζ 称为调制系数,表示为:

$$\zeta = \pi \frac{U}{V_{\pi}}. \quad (6)$$

由式(5)和(6)可知,在一阶贝塞尔函数的零点时,载波分量幅度为0,此时调制系数为最佳值。载

波分量只与调制系数有关,而调制系数与调制电压成正比,即载波分量大小只与调制电压有关。

2.2 三角波调制

当对 PM 施加三角波调制时^[20],光纤环形谐振腔内光场表示为:

$$E_{tri} = \frac{\sqrt{1-K}}{2} E_0 \cdot \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi U_{tri}/V_\pi + \varphi_0]\}, \quad (7)$$

式中, U_{tri} 为驱动 PM 的三角波电压幅值,将式(7)进行傅里叶级数展开后得到:

$$E_{tri} = \frac{\sqrt{1-K}}{2} E_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} A_{tri} \exp\{j[2\pi(f_0 + n f_{tri})t + \varphi_0]\}, \quad (8)$$

式中, f_{tri} 为三角波的调制频率,采用三角波相位调制时的归一化载波分量幅度表达式为:

$$A_{tri,0} = \left| \frac{\sin(\zeta)}{\zeta} \right|. \quad (9)$$

对比式(5)和式(9)可以发现,对 PM 施加不同调制波形时,要使载波分量为 0,所对应的最优调制系数不同,对应的最优调制电压也不同。

2.3 调制波形仿真对比分析

根据式(5)、式(6)和式(9),仿真得到分别施加正弦波与三角波调制之后的调制电压偏离最优值大小(ΔU)与载波分量幅度及增量的变化的关系曲线,仿真计算得到的载波抑制的绝对值为载波抑制比,仿真电压精度万分之一伏特。

如图 2(a)所示, $\Delta U=0$ 时,即为不同调制波形下的最优电压值,越靠近最优值,载波抑制比越大。此时正弦波调制对应的载波抑制比为 99.68 dB,三角波调制对应的载波抑制比为 328.18 dB。图 2(b)给出了两种调制波形下的载波增量和调制电压的关系,可知三角波调制与正弦波调制相比,载波分量增量随调制电压幅值偏离最优值的变化曲线斜率较低,在相同的载波抑制比情况下,允许调制电压偏离

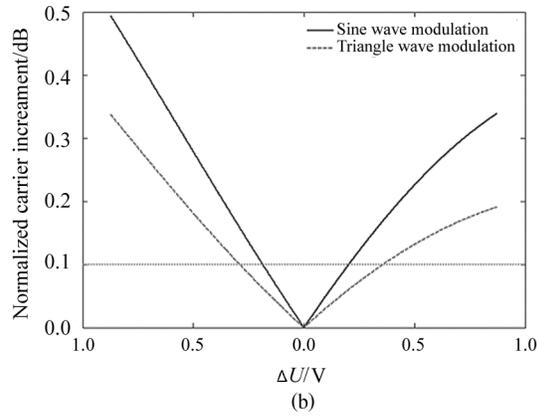
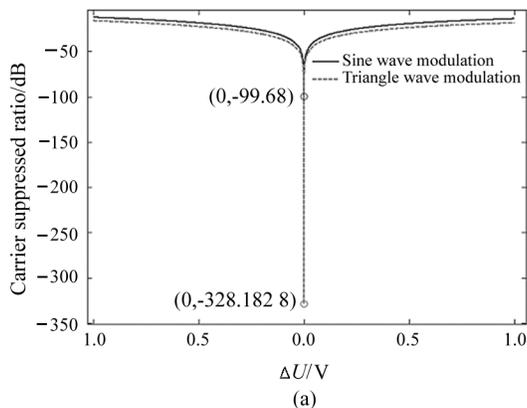


图 2 (a) 调制电压幅值偏离最优值与载波抑制比的关系; (b) 调制电压幅值偏离最优值与载波增量的关系

Fig. 2 (a) The relationship between the deviation of the modulation voltage amplitude from the optimal value and the carrier suppressed ratio; (b) The relationship between the deviation of the modulation voltage amplitude from the optimal value and the carrier increment

最优值的范围更大。

从以下结果可以看出,在同样的调制电压分辨率情况下,采用三角波调制可得到更大的理论载波抑制比,且载波增量变化缓慢。载波抑制能力主要取决于不同调制波形对外界的抗干扰能力,即最优调制电压的变化误差。

仿真中半波电压选取 PM 的标称值 $V_\pi=3.6$ V,背散系数在 0—0.003 之间随机变化。

3 调制电压及噪声与 BS 的关系

根据背向散射噪声对陀螺零偏误差影响,结合第一、二部分不同调制波形和抑制路数对比,选择三角波双路调制的背散噪声载波抑制方案。基于此方案,给定激光功率为 10 mW,探测器增益倍数 30 倍,量子效率 0.67,陀螺带宽 100 Hz,积分时间 1 s,输出测试 3 600 s,分析调制电压幅值偏离或调制电压噪声分别对陀螺零偏及 BS 的影响。

3.1 调制电压幅值偏离与 BS 的关系

根据式(6)和(9)可知,载波分量幅值为 0 时有多个零点,即有多个最佳调制系数,对应不同的最优调制电压幅值。当选取半波电压为 3.6 V 的 PM 时,考虑到信号发生器的调制电压范围,一般选用第一个最优调制电压幅值,为 7.2 V,其他光纤谐振腔参数与第二部分相同。

假设调制电压没有噪声时,如图 3 所示,选择调

制电压幅值在最优调制电压 7.2 V 和调制电压幅值为 8.2 V 时,分别对应的载波抑制比、陀螺零偏误差和 BS 随时间的变化曲线,零偏稳定性通过对零偏误差输出求百秒均方差获得。

如图 3(a)所示,只有背向散射噪声单项因素影响陀螺精度变化的情况下,调制电压幅值为理论最优值 7.2 V 时,载波抑制比为 328.18 dB。由于载波分量只能无限接近最低值,因此即使调制电压噪声为 0 时,载波抑制后的一阶贝塞尔函数幅值也不为 0,背散噪声干涉项对陀螺零偏误差和 BS 都有一定

贡献。

如图 3(b)所示,调制电压幅值为 8.2 V 时,距离最优调制电压偏差 1 V,载波抑制比骤降至 18.55 dB。此时陀螺零偏误差从 $1 \times 10^{-29} / \text{h}$ 陡增到 $100 / \text{h}$,BS 从 $3.16 \times 10^{-32} / \text{h}$ 增大到 $0.29 / \text{h}$,均变化 31 个数量级。

从以上结果可以看出,电压幅值偏离导致调制系数和载波抑制比大小变化,从而影响陀螺系统对背散噪声抑制能力,造成陀螺系统零偏误差输出和 BS 波动。因此,调制电压幅值越接近最优值,越有利

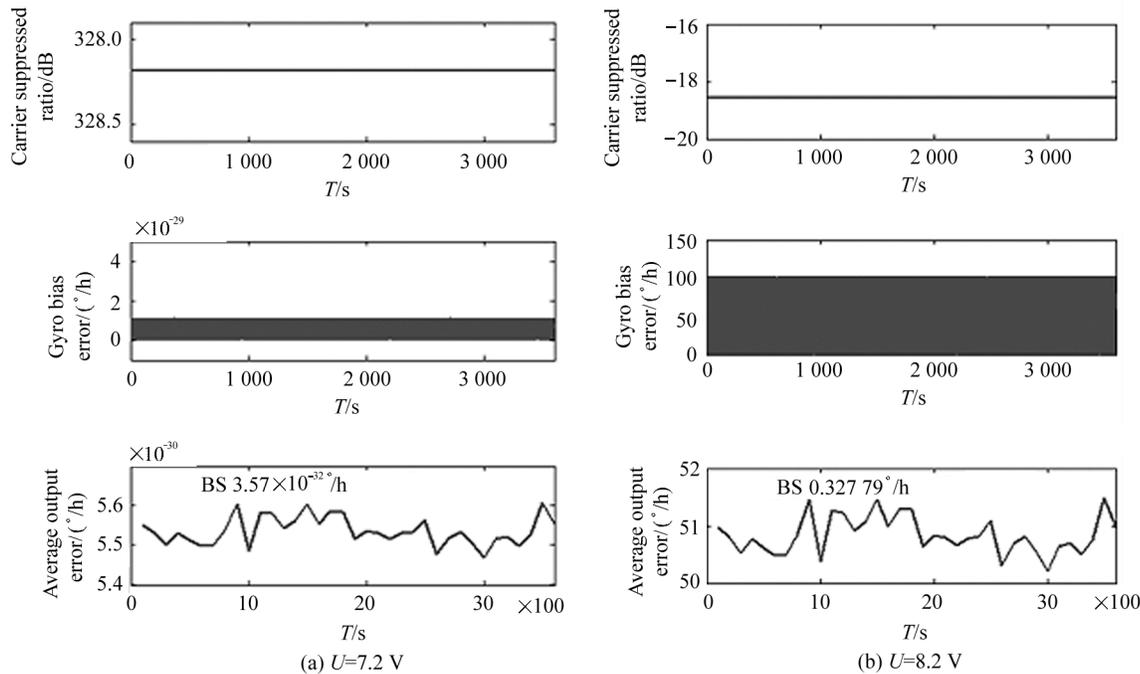


图 3 不同调制电压幅值对应的载波抑制比、陀螺零偏误差、零偏稳定性

Fig. 3 Carrier suppressed ratio, gyro bias error, and BS under different modulation voltage amplitudes

于抑制第二类背散噪声,提高陀螺 BS。

3.2 调制电压噪声与 BS 的关系

在实际工程应用中,输出调制电压不可避免地存在噪声,需要考虑调制电压噪声对陀螺输出的影响。其随机变化的特性,与调制电压幅值偏离的作用效果不同。选取最优调制电压幅值为 7.2 V,调制电压噪声为 50 mV 时,仿真可得噪声对陀螺输出的影响,如图 4 所示。

图 4 分别给出了在仅考虑背向散射噪声导致的 BS 误差情况下,最优调制电压幅值 7.2 V 处存在 50 mV 调制电压噪声时的电压输出、载波抑制比、背散噪声导致陀螺零偏误差变化和背散噪声导致的 BS

变化。相比图 3(a)无调制电压噪声条件下,其载波抑制能力大幅降低,使得陀螺系统零偏误差和 BS 恶化约 20 个数量级。因此,调制电压噪声对陀螺输出影响较大。

以上是针对最优调制电压幅值情况下调制电压噪声的分析,如果分别取调制电压幅值为 7.2 V 和 8.2 V,调制电压输出噪声幅值从 10—300 mV 连续变化,仿真结果如图 5 所示。从图中可以看出,调制电压为 7.2 V 时,电压噪声幅值越大,BS 越差;调制电压为 8.2 V 时,平均 BS 恶化至 $0.32 / \text{h}$ 左右,但噪声幅值变化对 BS 的影响较小,整体趋势较为平稳。

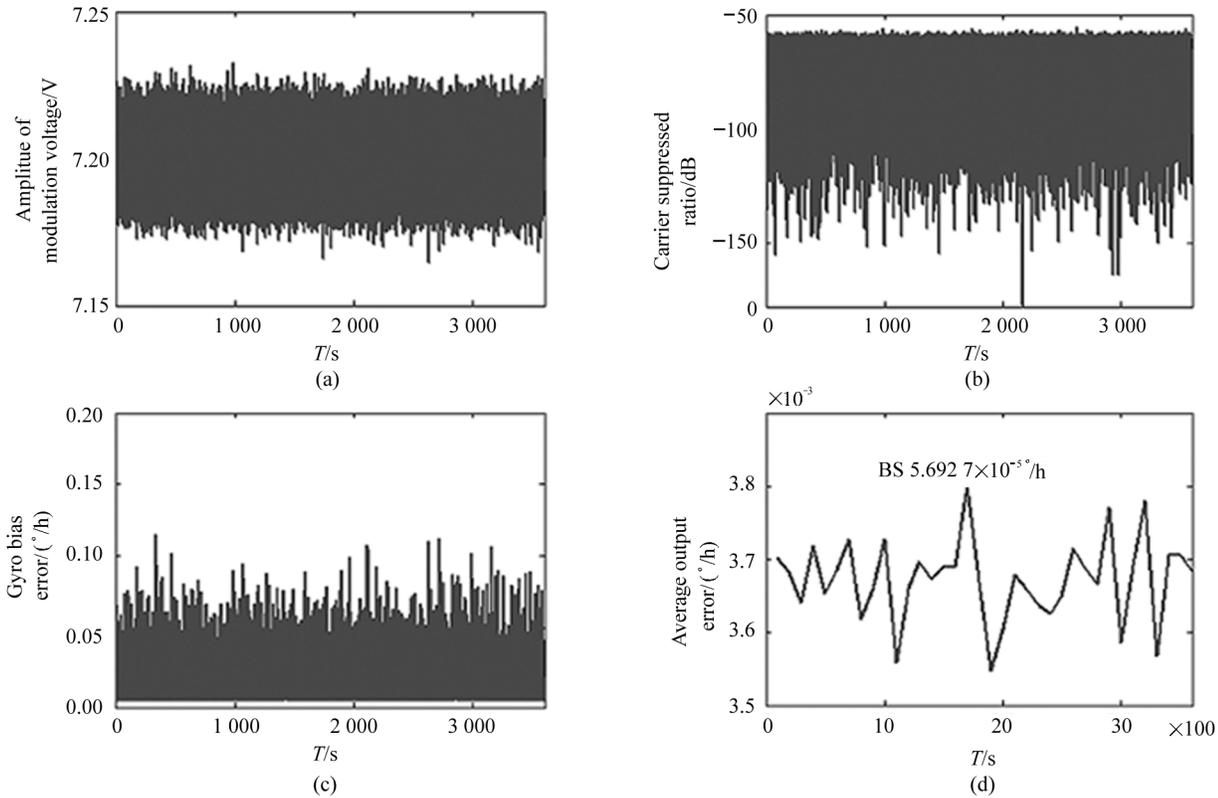


图 4 调制电压噪声与陀螺输出的关系

Fig. 4 The relationship between modulation voltage noise and gyro output

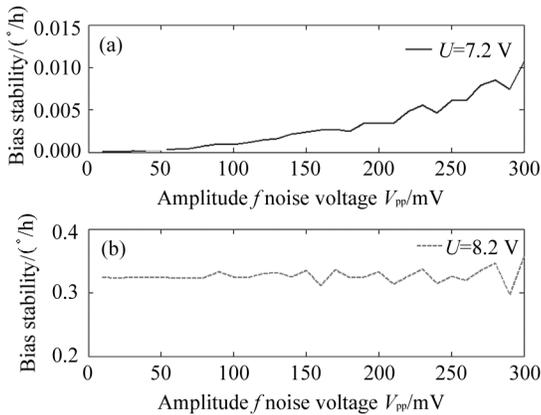


图 5 调制电压噪声幅值变化与零偏稳定性的关系

Fig. 5 The relationship between the amplitude change of modulation voltage noise and the BS

从上述分析可以看出:调制电压幅值及噪声大小,均会影响系统对背散噪声干涉项抑制能力,并最终影响陀螺 BS。因此,针对不同性能陀螺对背散噪声的抑制要求,使得在陀螺 BS 误差分配设计时,需要考虑调制电压幅值与其噪声的影响,并且对它们的精确控制进行具体数值量化。

4.3 调制电压幅值及其噪声与 BS 的关系

综合考虑调制电压及其噪声变化与 BS 的关系,选取噪声幅值分别为 0 mV、50 mV、100 mV、200 mV,得到调制电压变化最优值 ± 0.8 V 与 BS 的关系,如图 6 所示。

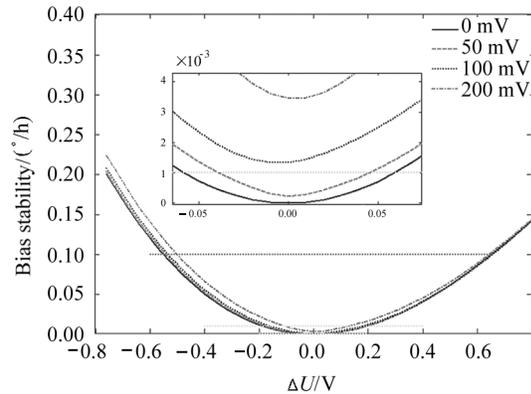


图 6 调制电压变化量与零偏稳定性的关系

Fig. 6 The relationship between modulation voltage change and BS

从图 6 可以看到,随调制电压变大,BS 先减小后

增大,在最优电压值处 BS 最好,此时噪声的影响体现明显,噪声越大,BS 越差。调制电压变化最优值越大,噪声的影响越不明显。因此,调制电压变化量对 BS 的影响大于噪声幅值的影响。

针对不同性能陀螺对背散噪声的抑制要求,使得在陀螺 BS 误差分配设计时,以 $0.1^\circ/\text{h}$ 、 $0.01^\circ/\text{h}$ 、 $0.001^\circ/\text{h}$ 为例,在不同调制电压噪声幅值下允许的调制电压可变化范围数值量化如表 1 所示。

表 1 不同零偏稳定性下的调制电压可变化范围

Tab. 1 Variable range of modulation voltage under different BS

BS/($^\circ/\text{h}$)	Amplitude of noise voltage/mV	Variable range of modulation voltage/mV
0.1	0	-548.4—650.2
	50	-541.9—652.9
	100	-533.2—652.1
	200	-499.4—641.6
0.01	0	-181.3—190.5
	50	-170.3—188.7
	100	-154.1—174.1
	200	-99.35—122.8
0.001	0	-55.21—56.03
	50	-38.89—44.16
	100	—
	200	—

由表 1 可得,当分配到背向散射噪声导致的陀螺 BS 误差时,对载波抑制方案的控制参数需求不同。陀螺 BS 为 $0.1^\circ/\text{h}$ 时,调制电压幅值偏离最优值范围较大,且控制精度要求较低,此时噪声作用体现不明显;陀螺 BS 为 $0.01^\circ/\text{h}$ 时,调制电压幅值偏离最优值范围和调制电压噪声幅值都对陀螺性能有比较明显的影响,控制调制电压幅值偏离值的同时还要考虑调制电压噪声幅值的影响;随着精度的提升,陀螺 BS 要求为 $0.001^\circ/\text{h}$ 时,调制电压幅值偏离最优幅值减小,控制精度要求较高,在调制电压幅值已经控制到接近最优值附近的前提下,调制电压噪声幅值也需控制在一定的范围内,从表 1 可以看出,调制电压噪声幅值超过 100 mV 时,即使调制电压幅值在最优值处,也无法满足陀螺性能精度要求。

4 结 论

本文首先基于背散噪声对陀螺的输出误差影响进行了理论分析,发现双路载波抑制更有利于抑制

陀螺零偏输出。并通过仿真计算正弦波和三角波两种常用调制波形的载波抑制比分别为 99.68 dB 和 328.18 dB,因此采用三角波调制的载波抑制比更大,且调制电压变化范围较大。然后基于三角波双路调制的方案,建立了陀螺零偏及 BS 误差与调制电压及噪声关系的理论模型,仿真得到调制电压偏离最优调制电压值越大,陀螺 BS 越差;调制噪声幅值越大,BS 越差。

当分配到背散噪声导致的陀螺 BS 误差时,所需要控制的电压变化范围也不同。陀螺性能精度 $0.1^\circ/\text{h}$ 时调制电压变化为主要影响因素,性能精度 $0.01^\circ/\text{h}$ 时调制电压变化和噪声共同作用,性能精度 $0.001^\circ/\text{h}$ 时调制电压控制精确的情况下还需控制噪声幅值大小。针对陀螺不同分配指标情况控制参数的需求,为陀螺系统设计奠定基础。

参 考 文 献:

- [1] 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, 2017: 1-12.
- [2] MA H L, ZHANG J, WANG L, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3546-3554.
- [3] PAN Z W, ZHANG C F. Resonator intergrated optic gyro based on multilevel laser frequency lock-in technique[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(4): 040601.
- [4] SANDERS G, STRANDJORD L K, WILLIAMS W, et al. Improvements to signal processing and component miniaturization of compact resonator fiber optic gyroscopes[C]// 2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 11-12, 2019, Braunschweig, Germany. New York: IEEE, 2018: 1-22.
- [5] WANG Q W, FENG L S, LI H, et al. Enhanced differential detection technique for the resonator integrated optic gyro[J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2941-2944.
- [6] YANG Y, YANG F. High performance fiber optic gyroscope with a radiation-tolerant and temperature-stable scale factor[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(11): 110605.
- [7] SHANG K J, LEI M, FANG Y, et al. Resonator fiber-optic gyro with intensity error suppression using a bias-sampling compensation technique[J]. Applied Optics, 2020, 59(13): 3995-3999.
- [8] LAN S Q, LEI X, WANG K. Research on backscatter noise

- suppression for resonator fiber optic gyro [J]. *Applied Optics*, 2018, 39(2):290-294.
- [9] ZOU K, WANG L, CHEN K, et al. Optimization of reciprocal modulation parameters in resonant fiber optic gyro [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(17):5669-5675.
- [10] SHANG K J, LEI M, FANG Y, et al. Resonator photonic crystal fiber optic gyro with back-reflection error suppression using biased sawtooth wave modulation technology[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 57:102234.
- [11] HU Z F, JIANG Z G, WANG J F, et al. Resonator fiber optic gyros with light time-division input and multiplexing output in clockwise and counterclockwise directions[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3):030601.
- [12] JIANG Z G, CHEN R Q, HU Z F. Residual intensity modulation induced error in resonator fiber optic gyroscopes with reciprocal detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3):6600812.
- [13] LIU N, NIU Y X, FENG L S, et al. Suppression of back-scattering induced noise by the sideband locking technique in a resonant fiber optic gyroscope [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(1):010608.
- [14] YING D Q, XIE T, WANG Z Y, et al. A closed-loop RFOG based on digital serrodyne and sine modulations with two LiNbO₃ phase modulators [J]. *Optics Communications*, 2019, 452:151-157.
- [15] YAN S B, LI X F, ZHENG Y Q, et al. Backscattering noise suppressed by different phase modulation waveform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10):1019001.
- 闫树斌, 李小枫, 郑永秋, 等. 不同相位调制波形对背向散射噪声的抑制 [J]. *光子学报*, 2014, 43(10):1019001.
- [16] YING D Q, XIE T, WANG Z Y, et al. Modulation spectrum analysis and optimization for closed-loop RFOG under dynamic condition [J]. *Optics Communications*, 2020, 466:125659.
- [17] MA H L, ZHANG J J, LU Y, et al. Optical ring resonators and implications for resonant micro-optic gyroscopes [C]//*IEEE Photonics Conference*, October 2-6, 2016, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2017:341-342.
- [18] KAISER T J, CARDARELLI D, WALSH J. *Experimental developments in the RFOG* [C]//*Fiber Optic and Laser Sensors*, February 1, 1991, San Jose, United States. Bellingham, WA: SPIE, 1991, 1367:121-126.
- [19] WANG L L, LI H Z, ZHANG J H, et al. Optimization of the sinusoidal phase modulation technique in resonant fiber optic gyro [J]. *Optics Communications*, 2017, 387(15):18-23.
- [20] YING D Q, MA H L, JIN Z H. Resonator fiber optic gyro using the triangle wave phase modulation technique [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(4):580-586.

作者简介:

齐新元 (1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非厄米拓扑光子学、光场调控和光纤激光器方面的研究。