

全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿技术

黄月锐涵 马家君 张子鹏 刘健宁 蒋军彪

Scale factor compensation technology of laser gyro with total reflection prism

HUANG Yueruihan, MA Jiajun, ZHANG Zipeng, LIU Jianning, JIANG Junbiao

引用本文:

黄月锐涵, 马家君, 张子鹏, 等. 全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿技术[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 444–449. DOI: 10.5768/JAO202344.0207003

HUANG Yueruihan, MA Jiajun, ZHANG Zipeng, et al. Scale factor compensation technology of laser gyro with total reflection prism[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 444–449. DOI: 10.5768/JAO202344.0207003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0207003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光陀螺光强扫描曲线模高的影响因素与改善途径分析

Analysis of influencing factors and improvement approaches of mode height of RLG light intensity mode-scanning curve

应用光学. 2021, 42(1): 143–148 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107001>

静/动态刻蚀对熔石英表面质量和激光损伤的影响

Effect of static/dynamic etching on surface quality and laser-induced damage of fused silica

应用光学. 2017, 38(5): 837–843 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507003>

镜面瑕疵对激光光束质量的影响

Effect of mirror defect on laser beam quality

应用光学. 2017, 38(4): 665–669 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407002>

大尺寸平面激光扫描补偿系统误差分析

Error analysis for large-scale planar laser scanning and compensation system

应用光学. 2018, 39(1): 124–129 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107002>

基于原向反射式激光光幕厚度一致性研究

Study on thickness consistency of primary reflection laser screen

应用光学. 2019, 40(2): 233–240 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201009>

热透镜控制激光光束质量技术研究

Controlling technique of beam quality by thermal lensing

应用光学. 2017, 38(1): 120–125 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0444-06

全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿技术

黄月锐¹, 马家君¹, 张子鹏¹, 刘健宁², 蒋军彪³

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;
3. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对全反射棱镜式激光陀螺标度因数随温度周期性变化的现象, 根据矩阵光学方法研究了稳频状态下温度变化对环形激光面积的影响, 获得了全反射棱镜式激光陀螺标度因数与稳频电压的关系, 并得出光束偏移是引起标度因数随温度周期性变化的原因。根据标度因数与稳频电压的关系, 建立了全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿模型, 通过实验对比了补偿前后标度因数的非线性度。结果表明, 根据该补偿模型对全反射棱镜式激光陀螺标度因数进行补偿, 标度因数非线性度提高了一个数量级以上, 对提高全反射棱镜式激光陀螺的性能具有一定的参考价值。

关键词: 激光光学; 激光陀螺; 标度因数; 光束偏移; 稳频; 跳模

中图分类号: TN248.2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0207003

Scale factor compensation technology of laser gyro with total reflection prism

HUANG Yueruihan¹, MA Jiajun¹, ZHANG Zipeng¹, LIU Jianning², JIANG Junbiao³

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
3. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the phenomenon that the scale factors of the laser gyro with total reflection prism changes periodically with temperature, the influence of temperature changes on the ring laser area under the condition of frequency stabilization was studied by matrix optical method. The relationship between the scale factors of the laser gyro with total reflection prism and the frequency stabilization voltage was obtained, and it was pointed out that the beam offset was the cause of the periodic change of scale factors with temperature. According to the relationship between the scale factors and the frequency stabilization voltage, the scale factor compensation model of the laser gyro with total reflection prism was established, and the nonlinearity of the scale factors before and after compensation was compared through experiments. The results show that the nonlinearity of the scale factors is increased by more than one order of magnitude by using the proposed model to compensate the scale factors of the laser gyro with total reflection prism. The research has certain reference value for improving the performance of laser gyro with total reflection prism.

Key words: laser optics; laser gyro; scale factors; beam offset; frequency stabilization; mode skip

引言

全反射棱镜式激光陀螺 (total reflection prism laser gyro, TRPLG) 是一种高精度角速度传感器, 其利用全反射棱镜 (total reflection prism, TRP) 构成闭合光路, 具有锁区小、可靠性高、寿命长等优点, 被

广泛应用于航天航空等领域^[1-6]。然而, 在全反射棱镜式谐振腔中, 20% 以上的光束在 TRP 中传播, 光以布鲁斯特角传输进棱镜中, 在密度往低密度进行折射时会发生全反射现象, 形成稳定的光路进行传播, 但由温度引起的 TRP 折射率变化导致

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金 (62163006)

作者简介: 黄月锐 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光陀螺技术研究。E-mail: 985730550@qq.com

通信作者: 马家君 (1985—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事惯导系统研究。E-mail: jjma3@gzu.edu.cn

光程长的变化远大于谐振腔热膨胀导致的光程长的变化^[7-9]。TRP 折射率的变化将直接引起谐振腔中光束的偏移,导致标度因数偏离理想直线,并进一步导致谐振腔散射损耗,散射的非互易性和偏振效应的改变,从而引起 TRPLG 的零位漂移^[10-13]。

光束偏移作为 TRPLG 的主要误差源, Y.V.Bakin 等对在非稳频的情况下,不同温度对全反射棱镜式谐振腔中的光束偏移进行了分析,并给出了不同温度下谐振腔中的光束偏移量与相应标度因数的变化量^[14]。翟二江等对大型激光陀螺标度因数环形腔的几何形变进行了计算分析,得到了环形腔几何形变后的标度因数变化情况^[15]。刘健宁等分析了棱镜角度误差造成的光束偏离设计位置的程度,并设计了基于棱镜配套筛选、谐振腔损耗控制的调控方法^[16]。以上研究在 TRP 的加工及装配方面取得了很大进展,但对 TRPLG 光束偏移的研究均未考虑稳频、跳模等实际工作状态。

本文基于光束传输矩阵理论,结合 TRPLG 实际工作状态,采用迭代算法研究了 TRPLG 稳频状态的光束偏移特性,并与非稳频状态下的光束偏移特性进行了对比。在此基础上,研究了稳频状态下的光束偏移量与谐振腔参数的关系,并获得了稳频状态下各棱镜界面上光束偏移与温度的关系,进一步获得了 TRPLG 的光束偏移特性与标度因数的关系式。建立全反射棱镜式激光陀螺标度因数与稳频电压的关系,针对 TRPLG 的标度因数建立其补偿模型,同时通过优化标度因数来提高其对 TRPLG 测量精度的影响。

1 理论模型

在全反射棱镜式谐振腔中,由于光束在弧矢面上不随外界环境发生偏移,因此,只考虑光束在子午面内的偏移特性。根据 TRPLG 的结构特点,棱镜式谐振腔中光束传波路径如图 1 所示。

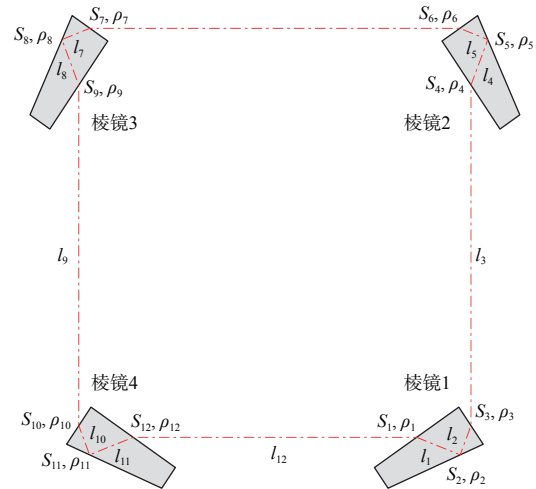


图 1 棱镜式谐振腔光束传波路径

Fig. 1 Beam propagation path of prism resonator

在图 1 中,以沿逆时针方向入射到棱镜 1 的入射面为界面 1,沿逆时针方向依次称其为界面 2,以此类推,直到界面 12。在各界面上,棱镜曲率半径分别为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{12}$,经棱镜折射或反射后光束直线传播距离分别为 $l_1, l_2, \dots, l_{12}$ 。假设光束均以布鲁斯特角进出棱镜,根据几何光学,环绕矩阵计算公式如表 1 所示。

表 1 环绕矩阵计算公式

Table 1 Calculation formula of linking matrix

物理意义	公式
光束从空气折射到棱镜的变换矩阵 $M_{P \rightarrow A}$	$M_{P \rightarrow A}(\rho) = \begin{pmatrix} 1/n & 0 & 0 \\ -\frac{(n^2-1)\sqrt{n^2+1}}{n\rho} & n^2 & -\Delta n_Q + n\Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
光束从棱镜到空气的变换矩阵 $M_{A \rightarrow P}$	$M_{A \rightarrow P}(\rho) = \begin{pmatrix} n & 0 & 0 \\ -\frac{(n^2-1)\sqrt{n^2+1}}{n^2\rho} & \frac{1}{n^2} & \frac{\Delta n_Q}{n^2} - \frac{\Delta n_A}{n} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
光束通过距离为 l 的介质的变换矩阵 M_D	$M_D(\langle l \rangle) = \begin{pmatrix} 1 & \langle l \rangle & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
光束在全反射面上的变换矩阵	$M_{RP}(\rho) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{\rho} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
将棱镜式环形谐振腔展开为周期性薄透镜序列,由此得环绕矩阵 M	$M = \prod_{i=1}^4 M_{A \rightarrow P}(\rho_{3i-2}) M_D(\langle l_{3i-2} \rangle) M_{RP}(\rho_{3i-1}) M_D(\langle l_{3i-1} \rangle) M_{P \rightarrow A}(\rho_{3i}) M_D(\langle l_{3i} \rangle)$

式中: $n=nQ/nA$ 为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时棱镜的折射率; nA 为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时空气的折射率; ΔnQ 为棱镜折射率的变化量; ΔnA 为空气折射率的变化量; ρ 为界面的曲率半径; l 表示光束传输的光学程长。在环绕矩阵 M 中, 特征值为 1 的特征向量反映了谐振腔中稳定传播的光束, 通过计算可得该特征向量为

$$\begin{pmatrix} r \\ \theta \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} r \\ \theta \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} r = \frac{(1-M_{22})M_{13} + M_{12}M_{23}}{2-M_{11}-M_{22}} \\ \theta = \frac{(1-M_{11})M_{23} + M_{21}M_{13}}{2-M_{11}-M_{22}} \end{cases} \quad (2)$$

式中 M_{ij} 为谐振腔环绕矩阵 M 的矩阵元:

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据传输矩阵理论, 界面 1 处的光束偏离光轴的距离和方向角分别为 r 和 θ 。将 r 和 θ 经过各个变换矩阵, 可以获得谐振腔中各棱镜界面上光束偏移的距离和方向角。假设光轴和棱镜界面与水平方向的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 以光轴和棱镜界面的交点为坐标原点建立直角坐标系, 如图 2 所示。

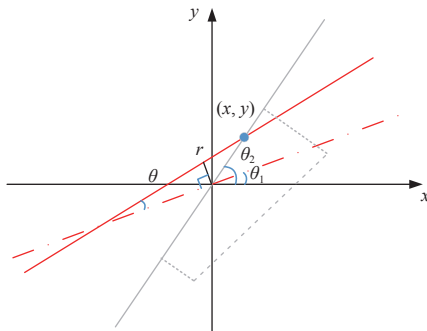


图2 光束偏移棱镜界面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam offset prism interface

根据几何关系, 可以获得光束偏移棱镜界面的坐标值为

$$\begin{cases} x = \frac{r \cos \theta_2 \cos \theta}{\sin(\theta_2 - \theta_1 - \theta)} \\ y = \frac{r \sin \theta_2 \cos \theta}{\sin(\theta_2 - \theta_1 - \theta)} \end{cases} \quad (4)$$

以上分析为 TRPLG 光束偏移建立了理论模型, 在此基础上, 根据 TRPLG 实际工程过程中的具体参数, 通过数值模拟可以获得 TRPLG 的光束偏移特性。根据 x 指定的坐标间距对 y 进行梯形

法计算, 可得到环形光路的面积大小:

$$S = \left| \sum_{i=1}^{12} x(i) \cdot y(i+1) - x(i+1) \cdot y(i) \right| \quad (5)$$

标度因数的表达式为

$$K = \frac{4S}{\lambda \cdot L} \quad (6)$$

式中: K 为标度因数; L 为陀螺总程长; λ 为所选光波长, 一般取 632.8 nm 的波长。在稳频的情况下, 陀螺总程长与所选光波长为恒定值, 将环形光路的面积 S 带入标度因数计算公式(6), 得:

$$K = \frac{4 \cdot \left| \sum_{i=1}^{12} x(i) \cdot y(i+1) - x(i+1) \cdot y(i) \right|}{\lambda \cdot L} \quad (7)$$

由式(7)可得到 TRPLG 的光束偏移特性与标度因数的关系式。

2 稳频对标度因数的影响

TRPLG 以加热器作为稳频系统的伺服部件, 通过加热器调节密封在第 2 类棱镜间的空气折射率, 实现激光振荡频率的稳定。加热器电压的调节具有一定的范围, 当稳频系统调节达到一定限度时, 必须通过跳模来维持 TRPLG 的精度。稳频系统的调节将改变原有光束传播路径, 进而导致谐振腔总光程长发生变化, 因此, 为了分析稳频对 TRPLG 光束偏移的影响, 需要通过迭代算法计算稳频状态下光束偏移量, 具体流程如图 3 所示。

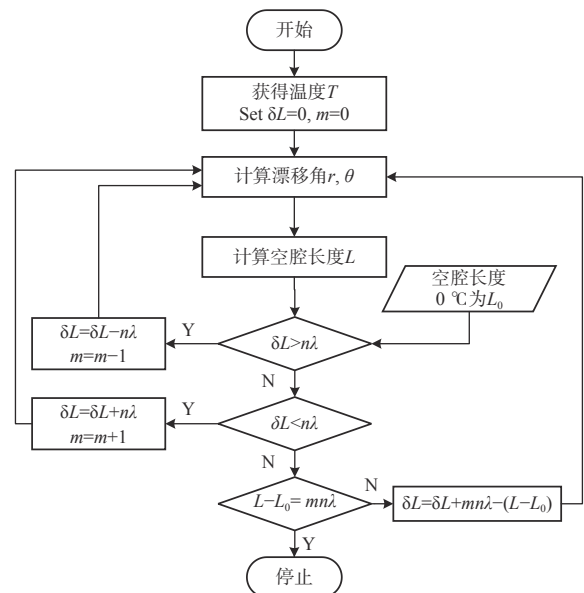


图3 稳频状态下光束偏移计算流程图

Fig. 3 Flow chart of beam offset calculation under frequency stabilization state

在图3中,首先计算由温度 T 引起的光束偏移量 r 和 θ ,并根据式(10)计算出光束偏移后的坐标值,从而获得谐振腔总光程长的变化量 $L-L_0$ 。若该光程长变化量为正,减小稳频系统调节量 δL ,反之,则增大稳频系统调节量 δL ;当稳频系统调节量大于 $n\lambda$ 时,则在原有稳频系统调节量的基础上减去 $n\lambda$,跳模次数 m 减1,反之,则在原有稳频系统调节量的基础上加上 $n\lambda$,跳模次数 m 加1,通过反复迭代直到棱镜式谐振腔光程总变化量为 $mn\lambda$ 的恒定值。在谐振腔总程长不变以及固定波长的情况下,温度 T 会改变光的传播路径,导致光束偏移角 θ 的改变,会引起标度因数的变化,光束偏移角与标度因数误差量 ΔK 之间的关系式为

$$\Delta K = K' - K$$

$$= K' - \frac{4 \cdot \left| \sum_{\theta=1}^{12} x(\theta) \cdot y(\theta+1) - x(\theta+1) \cdot y(\theta) \right|}{\lambda \cdot L} \quad (8)$$

式中:标度因数在常温下有常值 K' , $K' = 1.01 \times 10^{-5} (\text{℃})$ 。在稳频情况下,通过式(8)就可知道标度因数的变化规律,其中影响标度因数中最主要的因素是稳频通道电压。可通过增加加热器的电压值来补偿标度因数变化的大小,若标度因数误差量为正值时,实际稳频电压值减少误差量 ΔK ;若标度因数误差量为负值时,实际稳频电压值增加误差量 ΔK ,由此对标度因数进行补偿,能提高标度因数的非线性度。

3 标度因数补偿实验

为了获得单纵模运转,TRPLG通常在棱镜式谐振腔中加入限模光阑,由于光阑的作用,光束偏离光轴越远谐振腔损耗越大。当陀螺输出光强恒定时,可以通过高频振荡器工作电压的大小来评估谐振腔损耗,进而获得TRPLG在实际工作过程中的光束偏移特性。根据以上分析,设计了TRPLG光束偏移实验平台,如图4所示。

图4中谐振腔将输出的拍频信号经加热器输出,经过ADC模块将模拟信号转换为电信号输入到FPGA中,在FPGA中完成相敏解调、PID控制以及OSC(小抖动调制模块)控制,随后将控制信号经过DAC模块转换成模拟信号,将模拟信号输入给高频振荡器,形成闭环控制。图4中, u_{to} 为光强控制基准电压; u_{eo} 为光强控制误差信号; u_o 为光控制信号; u_{th} 为稳频控制基准电压; u_{eh} 为稳频控制误差信号; u_h 为稳频控制信号;TRPLG谐振腔腔长为

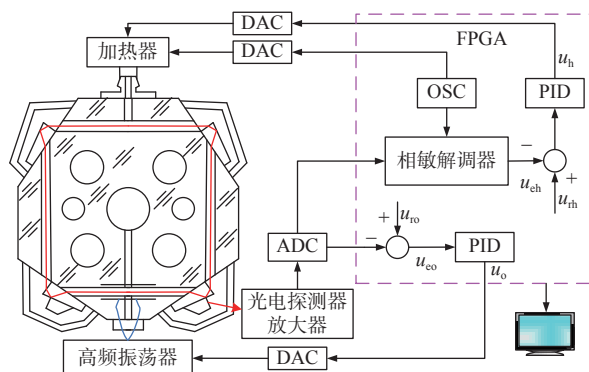
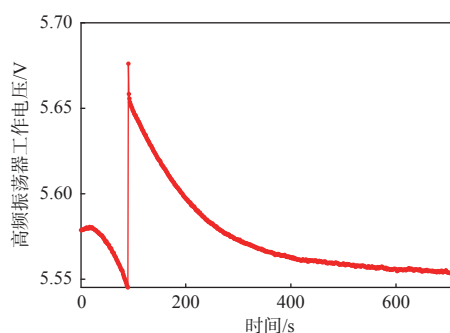


图4 光束偏移实验平台

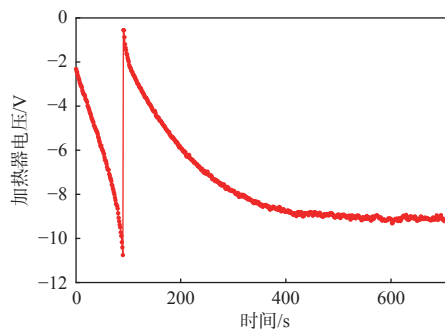
Fig. 4 Experimental platform of beam offset

0.28 m,主光阑安装在第二类棱镜小直角面上,次光阑安装在第一类棱镜小直角面上,温度传感器安装在棱镜式谐振腔上。光电探测器输出信号经ADC采集并在FPGA中通过PID实现稳频和稳光强控制。在实验过程中,先将TRPLG放入高低温箱中,并在 -40℃ 下保温2 h,再将温箱从 -40℃ 缓慢升高至 70℃ ,对TRPLG进行2 h的测试,并将陀螺温度、高频振荡器工作电压和加热器电压等信号通过RS422串口传输到计算机,实验结果如图5所示。

实验结果表明,随着谐振腔温度升高,由于棱镜折射率变大,谐振腔光学程长变长,加热器通过不断减小稳频通道空气折射率实现稳频。谐振腔温度由 -40℃ 升高至 70℃ 过程中,稳频系统共跳



(a) 高频振荡器工作电压



(b) 加热器电压

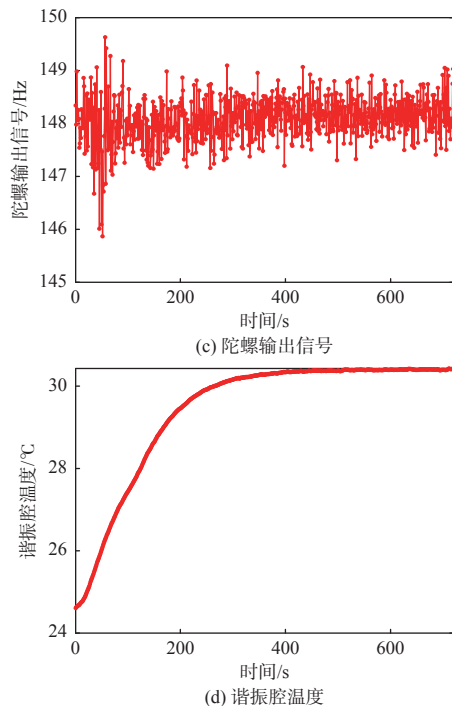


图 5 光束偏移实验结果

Fig. 5 Experimental results of beam offset

模 36 次, 温度平均每升高 3 °C 跳模一次; 当 TRPLG 输出光强恒定时, 谐振腔损耗越大, 高频振荡器工作电压越高, 高频振荡器工作电压反映了 TRPLG 平均光束偏移量, 由于稳频及跳模的影响, 谐振腔光束偏移量程锯齿波变化, 实验结果与理论分析

吻合较好。

TRPLG 光束偏移特性将导致光束环绕面积的改变, 从而对陀螺标度因数产生一定的影响。图 6 给出了温度从 0 °C 升高到 10 °C 时光束偏移导致的标度因数变化。

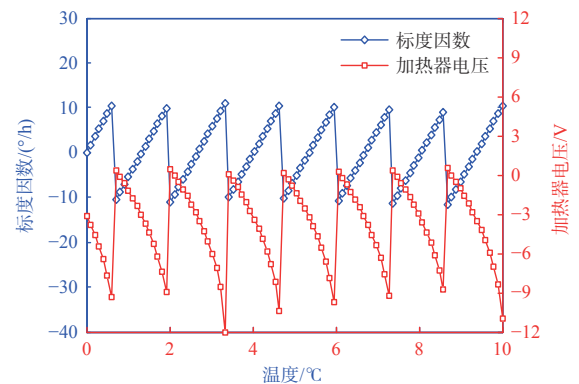


图 6 标度因数和加热器电压与温度的关系

Fig. 6 Relationship between scale factors and heater voltage versus temperature

光束偏移特性导致 TRPLG 标度因数存在 20 °/h 的变化, 其变化周期与稳频系统跳模过程相关。标度因数的改变将直接影响陀螺的使用, 为了提高标度因数的稳定度, 可以根据加热器电压对标度因数进行补偿。表 2 对比了标度因数补偿前后陀螺的精度和标度因数稳定度。

表 2 温度补偿前后陀螺性能比较

Table 2 Comparison of gyro performance before and after temperature compensation

温度/°C	温度补偿前			温度补偿后		
	陀螺仪精度/(°/h)	标度因数稳定性/(ppm)	随机游走/(°/√h)	陀螺仪精度/(°/h)	标度因数稳定性/(ppm)	随机游走/(°/√h)
+25	0.65	30	0.002 5	0.42	0.83	0.001 8
-40—+70	0.77	33	0.002 9	0.55	0.91	0.002 0
+70—40	0.78	32	0.002 8	0.53	0.95	0.002 1

以上测试结果表明, 补偿后的标度因数稳定度能达到 1 °/h, 比补偿前提高了一个数量级, 陀螺性能也得到了提高。

4 结论

在 TRPLG 中, 棱镜温度的改变会引起光束偏移, 通过数值模拟可以获得 TRPLG 的光束偏移特性以及标度因数与偏移角 θ 的关系式。其中影响标度因数最主要的因素是稳频通道的电压。在调节一个光波长跳模一次的稳频控制方式的基础

上, 有效减小稳频额外引起的光束偏移量, 并根据矩阵光学建立标度因数与稳频电压关系, 通过两者关系搭建全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿模型。实验结果表明, 利用稳频电压补偿的方法, 能够使得标度因数非线性提高一个数量级。

参考文献:

- [1] ANDERSON D Z. The four-mode linearly-polarized ring laser gyro[D]. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona, 1981.

- [2] Anonymous. Small, precise, affordable gyroscope navigates without GPS[J]. NASA Tech Briefs, 2020, 44(6): S18.
- [3] 郑辛, 刘飞, 雷明, 等. 微小型惯性仪表发展现状、趋势以及对行业的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(6): 701-708.
- ZHENG Xin, LIU Fei, LEI Ming, et al. Development and trend of micro inertial sensors and its impact on the industry[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(6): 701-708.
- [4] ANDERSON D Z, CHOW W W, SANDERS V E, et al. Novel multioscillator approach to the problem of locking in two-mode ring-laser gyros. Part II[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(7): 941-942.
- [5] 邓平, 朱飞翔, 赵荣鑫. 一种基于航向角准确修正的惯性导航室内定位算法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(6): 716-722.
- DENG Ping, ZHU Feixiang, ZHAO Rongxin. An indoor inertial navigation and positioning algorithm based on accurate heading angle correction[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(6): 716-722.
- [6] Di VIRGILIO ANGELA D V. Sagnac gyroscopes and the GINGER project[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2020, 7: 49.
- [7] 贺文红, 王达. 国外海军舰船导航系统与技术发展[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(11): 185-189.
- HE Wenhong, WANG Da. Foreign naval ships navigation system and technology development[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(11): 185-189.
- [8] WANG Shaodi, ZHANG Zhili. Research on principle, application and development trend of laser gyro[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(2): 022118.
- [9] 邹伟, 黄垚, 梁可, 等. 激光陀螺测角仪的校准与计量方法[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 40-47.
- ZOU Wei, HUANG Yao, LIANG Ke, et al. Calibration and measurement method of laser gyro goniometer[J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(4): 40-47.
- [10] XIONG Zhenyu, WEI Guo, GAO Chunfeng, et al. Precision temperature control for the laser gyro inertial navigation system in long-endurance marine navigation[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(12): 4119.
- [11] WANG Junjie, FENG Lishuang, ZHI Yinzhou. Analysis of optimal frequency bias of frequency-lock in passive ring resonator optic gyro[J]. SPIE, 2014, 9141: 266-271.
- [12] 刘健宁, 翁浚, 鲁政, 等. 棱镜式激光陀螺光胶表面残余应力影响[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 59-65.
- LIU Jianning, WENG Jun, LU Zheng, et al. Influence of residual stress on surface of optical cement in prism laser gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 59-65.
- [13] 赵洪常, 汪之国. 热传递对异面腔四频差动激光陀螺温度漂移补偿的影响[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 105-111.
- ZHAO Hongchang, WANG Zhiguo. Influence of thermal transfer on temperature drift compensation in nonplanar four-frequency differential laser gyros[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9): 105-111.
- [14] 翟二江, 郭文阁, 姚黎郇, 等. 大型激光陀螺几何形变对标度因数的影响[J]. *红外*, 2020, 41(8): 36-43.
- ZHAI Erjiang, GUO Wenge, YAO Lixun, et al. Influence of geometric deformation of large laser gyroscope on scale factor[J]. *Infrared*, 2020, 41(8): 36-43.
- [15] 刘健宁, 蒋军彪, 马家君, 等. 基于调控技术的棱镜式激光陀螺损耗控制[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 54-61.
- LIU Jianning, JIANG Junbiao, MA Jiajun, et al. Loss control in prismatic laser gyroscope based on cavity adjustment technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 54-61.