

文章编号: 0258-7025(2009)08-1995-04

速率偏频激光陀螺标度因数正反转不对称性的研究

战德军 秦石乔 王省书 魏文俭

(国防科学技术大学光电科学与工程学院光信息科学与技术系, 湖南 长沙 410073)

摘要 以激光陀螺输出拍频的理论公式为出发点, 分别从理论、仿真和实验三个方面分析了激光陀螺标度因数的正反转不对称性。标度因数的正反转不对称性对速率偏频激光陀螺的精度具有非常重要的影响, 分别从理论分析、数值模拟的角度比较详细地讨论了标度因数与转动方向的关系, 提出了一种在无须知道陀螺零偏和地球自转分量的情况下, 用于测量标度因数不对称性的实验方案, 通过实验得出某型激光陀螺转速绝对值为 $72^\circ/\text{s}$ 时, 标度因数正反转不对称性约为 0.02×10^{-6} 。

关键词 激光技术; 激光陀螺; 速率偏频; 标度因数; 不对称性

中图分类号 V241.5⁺58 文献标志码 A doi: 10.3788/CJL20093608.1995

Investigations on Forward-Reversal Rotation Asymmetry of Rate Biased Laser Gyro Scale Factor

Zhan Dejun Qin Shiqiao Wang Shengshu Wei Wenjian

(Department of Optics Information Science and Technology, Institute of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Based on theoretical equation of laser gyro beat output, scale factor forward-reversal rotation asymmetry of rate biased laser gyro is analyzed by theory, simulation, and experiment. Since the scale factor forward-reversal rotation asymmetry highly affects the precision of rate biased laser gyro, the relation between scale factor and rotation direction is analyzed by theory and numerical simulation, respectively, and a new kind way to measure the scale factor forward-reversal asymmetry is provided without knowing the laser gyro zero drift and earth rotation component. The experiments show that the scale factor forward-reversal rotation asymmetry of a laser gyro is approximately 0.02×10^{-6} with rotation rate of $72^\circ/\text{s}$.

Key words laser technique; laser gyro; rate biased; scale factor; asymmetry

1 引言

激光陀螺以其启动速度快、动态范围宽和使用寿命长等优点成为近年来惯性导航领域研究的重点^[1~3]。目前激光陀螺在高精度领域广泛应用的主要为四频差动激光陀螺^[4]、机械抖动偏频激光陀螺和速率偏频激光陀螺^[5~7], 更高精度的激光陀螺一般都是采用速率偏频技术^[6,8,9]。

速率偏频激光陀螺通过往复的正向、反向旋转为陀螺提供偏频, 由于每个方向转动的角度很大, 所

以研究转动方向不同时, 标度因数的不对称性具有非常重要的意义。本文从经典的激光陀螺输出拍频的理论公式出发, 研究了标度因数不对称性与转动方向的关系, 并提出了一套可行的实验方案。

2 理论分析

陀螺的输出可以表示为^[10]

$$\nu = [1 + S] \cdot \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda} \cdot \Omega + d, \quad (1)$$

收稿日期: 2008-06-13; 收到修改稿日期: 2008-09-11

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z208)资助课题。

作者简介: 战德军(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事虚拟仪器和激光陀螺等方面的研究。E-mail: zdj444@sohu.com

导师简介: 秦石乔(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电仪器与测控技术和光电精确制导技术等研究。

E-mail: sqqin8@nudt.edu.cn

其中 S 为标度因数修正项, 主要由模牵引效应和模排斥效应等因素引起, λ 为光波长, A 为陀螺腔内光束所围的面积, $\langle L \rangle$ 为陀螺腔长。 d 代表陀螺的零漂, Ω 为陀螺转动角速度, 所以陀螺的标度因数 K 为

$$K = [1 + S] \cdot \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda}, \quad (2)$$

由于通过高精度稳频, 陀螺腔长的变化可以得到有效控制, 几何标度因数 $4A/\langle L \rangle \lambda$ 项的变化很小并且与转动方向无关, 所以 S 项是标度因数误差的主要来源。

文献[10]中描述激光陀螺的拍频输出从理论和实践都能证明良好的满足

$$v_p = \begin{cases} \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda} \cdot \Omega \cdot \sqrt{1 - \Omega_L^2/\Omega^2}, & |\Omega| > \Omega_L \\ 0, & |\Omega| < \Omega_L \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\Omega_L = (\Omega_L)_{in}^+ \text{ or } \Omega_L = (\Omega_L)_{in}^-. \quad (4)$$

文献[10]中对锁区现象的描述为: 进出锁区时闭锁阈值 Ω_L 不相等, 即 $(\Omega_L)_{in} < (\Omega_L)_{out}$; 转动为顺、逆时针方向时的 Ω_L 也不相等, 以“+”号表示顺时针方向旋转亦即正转, “-”号表示逆时针方向旋转亦即反转, 则 $(\Omega_L)^+ \neq (\Omega_L)^-$ 。(4)式中, $(\Omega_L)_{in}^+$ 代表激光陀螺顺时针方向旋转时进锁区的闭锁阈值, $(\Omega_L)_{in}^-$ 代表激光陀螺逆时针方向旋转时进锁区的闭锁阈值。转动为顺、逆时针方向时 Ω_L 不相等效应引起的误差量最大, 是影响标度因数的正、反转不对称性的主要因素。考虑到锁区的上述现象, (3)式可以写为^[10]

$$v_p = \begin{cases} \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda} \cdot \Omega \cdot \sqrt{1 - (\Omega_L)_{in}^2/\Omega^2}, & |\Omega| > \Omega_{out} \\ 0, & |\Omega| < (\Omega_L)_{out} \end{cases}, \quad (5)$$

所以根据(5)式陀螺出锁区后的标度因数又可表示为

$$K = \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda} \cdot \sqrt{1 - (\Omega_L)_{in}^2/\Omega^2}. \quad (6)$$

由于陀螺按照顺、逆时针旋转时 $(\Omega_L)^+ \neq (\Omega_L)^-$ 亦即 $(\Omega_L)_{in}^+ \neq (\Omega_L)_{in}^-$, 由(5)式可得陀螺标度因数与陀螺的旋转方向有关。由(2)式, 标度因数修正项 S 为

$$S = \sqrt{1 - (\Omega_L)_{in}^2/\Omega^2} - 1. \quad (7)$$

由于激光陀螺的闭锁阈值远小于陀螺转动角速度, 所以 $\left[\frac{(\Omega_L)_{in}}{\Omega}\right]^2 \ll 1$, 对(7)式进行泰勒展开, 舍去高阶小量, 取一次展开得

$$S \approx -\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(\Omega_L)_{in}}{\Omega}\right]^2, \quad (8)$$

可以发现 S 项与陀螺转动角速度平方 Ω^2 成反比, 与进锁区大小的平方 $(\Omega_L)_{in}^2$ 成正比。所以正、反转标度因数的不对称性的原因是正反转时角速度的不对称性和正、反转时锁区的不对称性, 即 $(\Omega_L)_{in}^+ \neq (\Omega_L)_{in}^-$ 。由于控制旋转速度比较容易, 所以研究的重点是由锁区不对称性引起的标度因数不对称性。

3 数值模拟

叙述中以“+”号上缀表示顺时针方向旋转亦即正转, “-”号上缀表示逆时针方向旋转亦即反转。所以 K^+ 表示陀螺顺时针旋转时的标度因数, K^- 表示陀螺逆时针旋转时的标度因数, 使用标度因数的相对变化量来衡量标度因数的正、反转不对称性, 则标度因数的不对称性 Δ 定义为

$$\Delta = \frac{|K^+ - K^-|}{(K^+ + K^-)/2} \approx |S^+ - S^-| \approx \frac{|(\Omega_L)_{in}^{2+} - (\Omega_L)_{in}^{2-}|}{2\Omega^2}. \quad (9)$$

3.1 锁区不对称性对标度因数的影响

为了分析方便, 对锁区的不对称性 σ 定义为

$$(\Omega_L)_{in}^+ = (1 + \sigma) \cdot (\Omega_L)_{in}^-. \quad (10)$$

设锁区不对称性 σ 的变化范围为 $-50\% \sim +50\%$, 当激光陀螺转动角速度 $|\Omega|$ 分别等于 $50^\circ/\text{s}$, $100^\circ/\text{s}$ 和 $200^\circ/\text{s}$, 锁区 $(\Omega_L)_{in}^- = 0.02^\circ/\text{s}$ 时, 使用(8)式得到的计算曲线如图 1 所示。可以看出标度因数正、反转不对称性受陀螺锁区不对称性的影响比较明显, 且随着锁区不对称性的减小而明显减小。

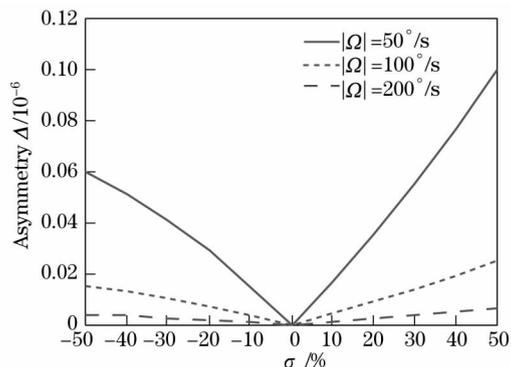


图 1 锁区不对称性的影响

Fig. 1 Relation of Δ and lock-in asymmetry σ

3.2 陀螺转动速度对标度因数的影响

设陀螺转动角速度 $|\Omega|$ 变化范围为 $50 \sim 200^\circ/\text{s}$, 当锁区 $(\Omega_L)_{in}^- = 0.01^\circ/\text{s}$, 锁区的不对称性 σ 分别为 50% , 20% 和 -50% 时, 仿真结果

如图 2 所示,可以发现标度因数正、反转不对称性随着陀螺转动角速度的增大下降明显。

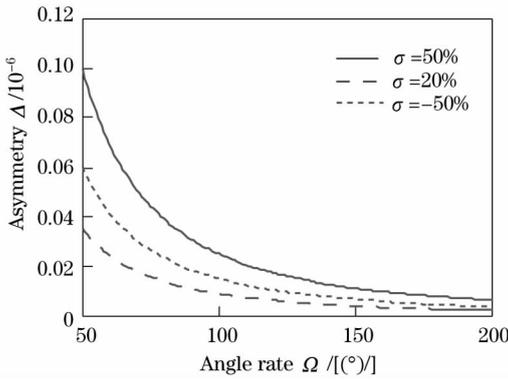


图 2 角速度 $|\Omega|$ 的影响

Fig. 2 Relation of Δ and angular rate $|\Omega|$

4 实验方案

设由于地球自转在陀螺敏感轴上投影所导致的零偏为 ϵ_e , 单位为 $[(^\circ)/s]$; 陀螺本身的零偏为 ϵ_D , 单位为 $[(^\circ)/s]$; 陀螺正向旋转时标度因数为 K^+ , 反向旋转时为 K^- , 单位为脉冲/度。当陀螺旋转 1 圈的时间为 $T_1 = T$ 时, 以下采用下缀“1”表示此时陀螺的各个参数, 陀螺正向旋转 n 圈后的输出为

$$N_1^+ = K_1^+ (360n + \epsilon_e n T_1 + \epsilon_D n T_1). \quad (11)$$

陀螺反向旋转 n 圈后的输出为

$$N_1^- = K_1^- (-360n + \epsilon_e n T_1 + \epsilon_D n T_1). \quad (12)$$

由(11)式和(12)式合并得

$$\frac{N_1^+ + N_1^-}{n T_1} = K_1^+ \left(\frac{360}{T_1} + \epsilon_e + \epsilon_D \right) + K_1^- \left(-\frac{360}{T_1} + \epsilon_e + \epsilon_D \right). \quad (13)$$

对(13)式变换后得到以脉冲数为单位的陀螺零偏为

$$D_1 = \frac{N_1^+ + N_1^-}{2n T_1} = (K_1^+ - K_1^-) \frac{180}{T_1} + (K_1^+ + K_1^-) \frac{(\epsilon_e + \epsilon_D)}{2}. \quad (14)$$

当提高转速到以前的 2 倍, 即每圈旋转时间为 $T_2 = T/2$ 时, 采用下缀“2”表示此时的陀螺各个参数, 使用前面的计算方法, 同理得到此时以脉冲数为单位的陀螺零偏 D_2

$$D_2 = \frac{N_2^+ + N_2^-}{2n T_2} = (K_2^+ - K_2^-) \frac{180}{T_2} + (K_2^+ + K_2^-) \frac{(\epsilon_e + \epsilon_D)}{2}. \quad (15)$$

设 $\rho_1 = \frac{K_1^+ - K_1^-}{K_1^+}$ 和 $\rho_2 = \frac{K_2^+ - K_2^-}{K_2^+}$, 那么

$$D_1 = \rho_1 K_1^+ \frac{180}{T_1} + (2 - \rho_1) K_1^+ \frac{(\epsilon_e + \epsilon_D)}{2}, \quad (16)$$

$$D_2 = \rho_2 K_2^+ \frac{180}{T_2} + (2 - \rho_2) K_2^+ \frac{(\epsilon_e + \epsilon_D)}{2}. \quad (17)$$

根据(5)式可以得到 $K_1^+ \approx K_2^+$, 再由 $T_2 = T_1/2$, 根据(7)式中标度因数修正项与陀螺转动角速度的关系得到 $\rho_2 \approx \rho_1/4$, 所以

$$D_2 - D_1 \approx -\rho_1 K_1^+ \frac{90}{T_1} + \left[\left(2 - \frac{\rho_1}{4} \right) K_2^+ - (2 - \rho_1) K_1^+ \right] \frac{(\epsilon_e + \epsilon_D)}{2}, \quad (18)$$

由于地球自转和陀螺零偏都远小于陀螺转动角速度, 所以 $(\epsilon_e + \epsilon_D)/2 \ll 90/T_1$, 经过推导可得

$$\left| \left[\left(2 - \frac{\rho_1}{4} \right) K_2^+ - (2 - \rho_1) K_1^+ \right] \frac{(\epsilon_e + \epsilon_D)}{2} \right| \ll \left| -\rho_1 K_1^+ \frac{90}{T_1} \right|,$$

因此可以得到不包含地球自转和陀螺零偏分量的表达式

$$D_2 - D_1 \approx -\rho_1 K_1^+ \frac{90}{T_1}. \quad (19)$$

所以, 当陀螺转动角速度 $|\Omega| = \frac{360^\circ}{T_1}$ 时, 标度因数的不对称性 Δ_1 表达式为

$$\Delta_1 \approx \frac{|K_1^+ - K_1^-|}{K_1} \approx |\rho_1| = \frac{|D_2 - D_1|}{K_1^+ (90/T_1)} = \frac{|D_1 - D_2| / (90/T_1)}{M^+ / 360} = \frac{4T_1 |D_1 - D_2|}{M^+}, \quad (20)$$

其中 M^+ 为正转 1 圈时陀螺输出脉冲数的绝对值。

5 实验

通过(20)式对某型号激光陀螺标度因数正反转不对称性进行了实验, 图 3 为该型陀螺实验结果的数据曲线, 实验中采用的每圈旋转周期分别为 $T_1 = 5$ s 和 $T_2 = 2.5$ s, 图 3 中每个数据点为脉冲数零偏的 1000 s 平均值。

由图 3 可以得到两组脉冲数零偏之差的绝对值 $|D_1 - D_2| \approx 3/1000$, 又由于 M^+ 的平均值为 2.78×10^6 。将这些数据代入(20)式得到标度因数的正反转不对称性 $\Delta \approx 0.02 \times 10^{-6}$ 。

6 结论

通过理论分析、仿真和实验初步得出: 速率偏频激光陀螺旋转方向对标度因数的影响, 微观上是由于模牵引效应和模推斥效应等因素的作用, 宏观上是由于锁区的不对称性影响; 宏观上, 锁区大小、陀

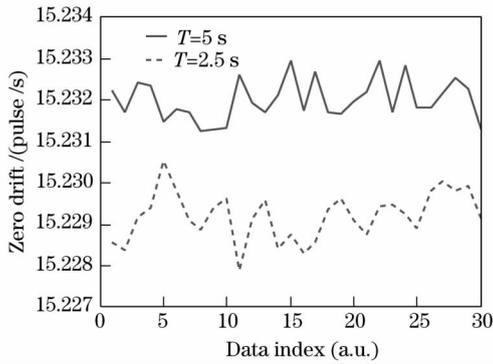


图 3 以脉冲数为单位的零偏

Fig. 3 Zero drift with pulse number as unit

螺转动角速度和锁区不对称性共同决定了标度因数与陀螺转动方向的关系;通过实验得到某陀螺正反转角速度为 $72(^{\circ})/s$ 时,标度因数的正反转不对称性约为 0.02×10^{-6} 。

参 考 文 献

- Gao Yukai, Lin Yurong, Deng Zhenglong. A method for improving the performance of ring laser gyro by injecting the multi-cycles step noise with white noise[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 481~484
高玉凯, 林玉荣, 邓正隆. 改善激光陀螺输出特性的随机噪声注入方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 481~484
- Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 354~358
高玉凯, 邓正隆. 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 354~358
- Ge Wentao, Chen Minggang, Zhang Wei *et al.*. Temperature error modeling and compensation for laser SINS[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(3): 290~293
葛文涛, 陈明刚, 张伟等. 激光捷联惯性导航系统温度误差建模及补偿[J]. *中国惯性技术学报*, 2007, **15**(3): 290~293
- Jin Shilong, Li Xiaohong, Yang Kaiyong *et al.*. Arts of Faraday effect element of the four mode RLG[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 22~25
金世龙, 李晓红, 杨开勇等. 四频差动激光陀螺螺法拉第旋光片的加工[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 22~25
- Zhan Dejun, Qin Shiqiao. Analysis of the error characteristic of rate-biased laser gyro passing through lock-in [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(6): 730~731
战德军, 秦石乔. 速率偏频激光陀螺过锁区误差特性分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2007, **15**(6): 730~731
- Wang Jinyu. Research on laser gyro using rate biased technique [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000
王锦瑜. 激光陀螺速率偏频技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2000
- Han Zonghu, Feng Peide. Theoretical research on improving the accuracy of laser gyro using rate biased technique[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2001, **9**(2): 41~59
韩宗虎, 冯培德. 速率偏频技术提高激光陀螺精度的理论研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, **9**(2): 41~59
- Zhang Jun, Zhao Zhong, Gao Maolin. Initial alignment of SINS based on rate biased RLG [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, **14**(1): 12~13
张 钧, 赵 忠, 高茂林. 激光陀螺速率偏频系统初始对准方法研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, **14**(1): 12~13
- Xu Yajun, Liu Changhua, Xu Zhiyong. Dead band of laser gyro and rate bias control system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(5): 37~39
徐亚军, 刘长华, 徐智勇. 激光陀螺锁区及速率偏频控制系统[J]. *光电工程*, 2003, **30**(5): 37~39
- Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyro[M]. Changsha: Press of National Defense Technology University, 1984
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984