

文章编号: 0258-7025(2010)05-1327-05

速率偏频激光陀螺标度因数高精度测量方法

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, 湖南 长沙 410073)

摘要 通过标定速率偏频激光陀螺(RBRLG)的安装误差角,实现了标度因数的高精度测量。根据速率偏频激光陀螺的结构特点,通过分析常规的标度因数测量方法,发现安装误差角直接决定了标度因数的测量精度,进而提出了一种安装误差角的标定方法。该方法将速率偏频激光陀螺倾斜约 45° 安装于位置转台上,分别测量其处于 4 种状态时激光陀螺的脉冲输出,通过运算即可得到激光陀螺的安装误差角,进而对标度因数的测量公式进行修正。实验结果表明,标定安装误差角后速率偏频激光陀螺标度因数的测量精度可优于 10^{-7} 。

关键词 激光技术;激光陀螺;速率偏频;标度因数;测量

中图分类号 V 241.5⁺58 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1327

Precise Measurement of Rate Biased Laser Gyro Scale Factor

Zhan Dejun Qin Shiqiao Wang Xingshu Wei Wenjian

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Scale factor of rate biased laser gyro is precisely measured by calibrating fix-error angle. Common scale factor measurement methods are analyzed according to the characteristics of rate biased laser gyro structure, and it is found that the precision of measuring scale factor is determined by fix-error angle. A method of calibrating fix-error angle is put forward. With this method rate biased laser gyro is installed on position turntable by approximate 45° , the output pulses of four different states are measured, then the laser gyro fix-error angle can be calculated, and the formula of measuring scale factor is corrected by the fix-error angle. The experimental result shows that precision of measuring rate biased laser gyro scale factor can be higher than 10^{-7} .

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

1 引 言

激光陀螺以其动态范围宽、启动时间短、承受过载能力强和数字输出等优点^[1~3],成为高精度测角领域的重要器件。速率偏频激光陀螺(RBRLG)^[4~9]通过将激光陀螺安装在速率偏频转台上,匀速地正转几周然后突然换向反转几周,有效地减少了单位时间内的过锁区次数,可以很大程度上提高激光陀螺的使用精度。但是由于偏频的过程中激光陀螺需要转过很大的角度,所以标度因数的准确测量对于 RBRLG 的高精度应用具有非常重要的意义。常规的标度因数

测量方法^[10,11]忽略了安装误差角(激光陀螺敏感轴与转台旋转轴之间的夹角)的影响,使其测量精度受到制约。本文通过高精度地标定出安装误差角提高了标度因数的测量精度。

2 标度因数测量方法

RBRLG 结构如图 1 所示,激光陀螺(RLG)安装于速率偏频转台上,通过控制速率偏频转台周期性地往复旋转为激光陀螺提供偏频。速率偏频转台转过的角度可以通过光栅角编码器(OAE)和读数

收稿日期: 2009-05-12; 收到修改稿日期: 2009-08-17

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: zdj4444@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方面的研究。

E-mail: sqqin8@nudt.edu.cn

头测量,光栅环上的参考基准作为速率偏频转台的零位基准。由于安装误差的存在,激光陀螺敏感轴 og 与速率偏频转台旋转轴 oZ 成一夹角 θ , 为安装误差角。

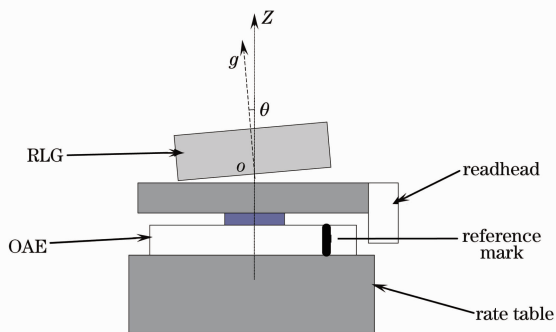


图1 速率偏频激光陀螺结构示意图

Fig.1 Structure diagram of RBRLG

在进行 RBRLG 标度因数测量时,常规的测量方法是使速率偏频转台按照一定的速度按正方向旋转 m 圈,旋转时使用零位基准作为整圈采样的同步参考,这时激光陀螺的输出脉冲数 N_m^+ 为

$$KN_m^+ = (1296000m + \omega'_e \tau_R m + \omega_B \tau_R m) \cos \theta + P^+, \quad (1)$$

式中“+”代表正向旋转,“-”代表反向旋转, K 为激光陀螺的标度因数; ω'_e 为地球自转角速度在转台旋转轴 oZ 上的分量,在采用高精度速度控制的条件下,垂直于 oZ 的分量由于在整圈旋转的过程中可以抵消^[12],所以并未考虑;通过采用高精度速率控制,各圈间旋转周期的差异可以忽略。 τ_R 为速率偏频转台每圈旋转的时间; ω_B 为激光陀螺常值漂移(即零偏); P^+ 代表速率偏频转台正向旋转时零位参考的同步误差和由于激光陀螺零点漂移带来的误差。同理可得,当激光陀螺绕旋转轴反方向旋转 m 圈后的输出为

$$KN_m^- = (-1296000m + \omega'_e \tau_R m + \omega_B \tau_R m) \cos \theta + P^-, \quad (2)$$

根据文献[4,5],采用常规测量方法时,不考虑安装误差角 θ 的影响,即认为 $\cos \theta = 1$,使用 \tilde{K} 表示此时的标度因数测量值,则 \tilde{K} 的测量公式为

$$\tilde{K} = \frac{2592000m}{N_m^+ - N_m^-}, \quad (3)$$

当考虑安装误差角 θ 的影响后,激光陀螺标度因数 K 的测量公式可表示为

$$K = \frac{2592000m \cos \theta}{N_m^+ - N_m^-} = \tilde{K} \cos \theta. \quad (4)$$

使用相对误差来评价标度因数的测量精度,设 ΔK 为标度因数 K 的测量误差,则标度因数测量的相对

误差可以表示为

$$\frac{\Delta K}{K} \leq \frac{P^+ - P^-}{2592000m} + |\sin(\theta)\Delta\theta|, \quad (5)$$

由(5)式可知标度因数的测量精度主要由常规测量标度因数方法所带来的误差和安装误差角测量误差构成。其中常规测量标度因数方法所带来的误差可以通过减小旋转周期 τ_R (可以降低激光陀螺零漂的影响) 和增加旋转圈数 m (可以降低零位同步误差的影响) 降低其影响。准确地测量出安装误差角是进一步提高标度因数测量精度的关键,例如当安装误差角为 $300''$ 时,根据(4)式忽略安装误差角对标度因数测量的影响将达到 1.06×10^{-6} 。

3 安装误差角标定方法

安装误差角 θ 的标定装置如图2所示,使用支架将 RBRLG 以倾斜角 $\alpha \approx \frac{\pi}{4}$ 安装于高精度且具有整圈同步功能的位置转台(为了与速率偏频转台区分,命名为位置转台)上。速率偏频转台坐标系 $oXYZ$ 的定义如图3所示,平移位置转台的旋转轴 ON ,使 O 点与 $oXYZ$ 坐标原点 o 重合, oX 轴定义在 oNZ 所确定的平面内, oY 轴通过右手定则确定。

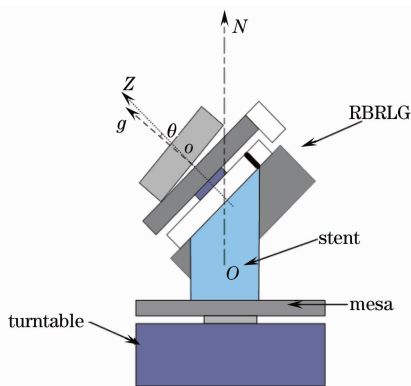


图2 安装误差角标定装置

Fig.2 Calibration setup of fix-error angle

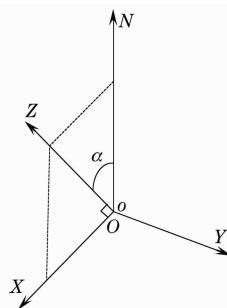


图3 速率偏频转台坐标系的定义

Fig.3 Coordinate definition of rate biased turntable

根据图 3 中的坐标系定义, 设位置转台共正向旋转 n 圈, 旋转的角度为 $\phi_{ON} = 1296000n$, 设旋转一圈所用的时间为 τ_M , ω''_e 为地球自转在位置转台旋转轴 ON 上的分量, 那么 $oXYZ$ 坐标系上敏感到的角度分别为

$$\phi_{oZ}^+ = (\phi_{ON} + \omega''_e \tau_M n) \cos \alpha, \quad (6)$$

$$\phi_{oX}^+ = -(\phi_{ON} + \omega''_e \tau_M n) \sin \alpha, \quad (7)$$

$$\phi_{oY}^+ = 0.$$

由于地球自转角速率在垂直于位置转台旋转轴方向的分量, 在位置转台整圈匀速旋转的情况下对 $oXYZ$ 的累计贡献为零^[9], 所以式中并没有考虑。

激光陀螺敏感轴 og 与速率偏频转台坐标系 $oXYZ$ 的关系如图 4 所示。其中 ox' 为 ogZ 平面与 oXY 平面的交线, β 为 oX 与 ox' 的夹角, 用来表示速率偏频转台的转动位置。

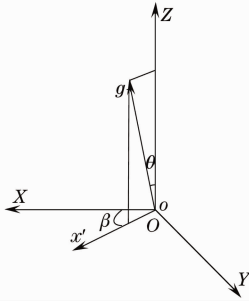


图 4 激光陀螺敏感轴与速率偏频转台坐标系的关系

Fig. 4 Relation of laser gyro sense axis and rate biased turntable coordinate

根据图 4 所定义的坐标关系, 位置转台正向旋转 n 圈后, 激光陀螺的脉冲输出 N_{og}^+ 为

$$KN_{og}^+ = \phi_{oZ}^+ \cos \theta + \phi_{oX}^+ \cos \beta \sin \theta + \omega_B \tau_M n. \quad (8)$$

同理, 使位置转台反向旋转 n 圈, 激光陀螺的脉冲输出 N_{og}^- 为

$$KN_{og}^- = \phi_{oZ}^- \cos \theta + \phi_{oX}^- \cos \beta \sin \theta + \omega_B \tau_M n. \quad (9)$$

设 $N_{og} = \frac{N_{og}^+ - N_{og}^-}{2}$, 则(8),(9)式消除地球自转和陀螺零偏的影响后可得

$$KN_{og} = \phi_{oZ} \cos \alpha \cos \theta - \phi_{oX} \sin \alpha \cos \beta \sin \theta. \quad (10)$$

设 ox' 与 oX 的初始夹角为 β_0 , 按照(10)式分别计算当 $\beta_1 = \beta_0$, $\beta_2 = \beta_0 + \frac{\pi}{2}$, $\beta_3 = \beta_0 + \pi$ 和 $\beta_4 = \beta_0 +$

$\frac{3\pi}{2}$ 时 N_{og} 的结果 N_{og}^i ($i = 1, 2, 3, 4$) 分别为

$$KN_{og}^1 = \phi_{oZ} \cos \alpha \cos \theta - \phi_{oX} \sin \alpha \cos \beta_0 \sin \theta, \quad (11)$$

$$KN_{og}^2 = \phi_{oZ} \cos \alpha \cos \theta + \phi_{oX} \sin \alpha \sin \beta_0 \sin \theta, \quad (12)$$

$$KN_{og}^3 = \phi_{oZ} \cos \alpha \cos \theta + \phi_{oX} \sin \alpha \cos \beta_0 \sin \theta, \quad (13)$$

$$KN_{og}^4 = \phi_{oZ} \cos \alpha \cos \theta - \phi_{oX} \sin \alpha \sin \beta_0 \sin \theta. \quad (14)$$

根据(11)~(14)式, 可计算得到 $\sin \theta$, $\sin \beta_0$ 和 $\cos \alpha$ 分别为

$$\sin \theta = \frac{K \sqrt{(N_{og}^1 - N_{og}^3)^2 + (N_{og}^2 - N_{og}^4)^2}}{2\phi_{oZ} \sin \alpha}, \quad (15)$$

$$\sin \beta_0 = \frac{K(N_{og}^2 - N_{og}^4)}{2\phi_{oZ} \sin \alpha \sin \theta}, \quad (16)$$

$$\cos \alpha = \frac{K(N_{og}^1 + N_{og}^3)}{2\phi_{oZ} \cos \theta}. \quad (17)$$

由于安装误差角约为几百秒(由机械加工精度保证), 使用 rad 作为单位时 $\sin \theta \approx \theta$, 将 $\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$ 代入(15)式, 忽略 $\cos \theta$ 的影响可得 RBRLG 的安装误差角 θ 的实际测量公式为

$$\theta = \frac{\tilde{K} \sqrt{(N_{og}^1 - N_{og}^3)^2 + (N_{og}^2 - N_{og}^4)^2}}{\sqrt{(2592000n)^2 - \tilde{K}^2 (N_{og}^1 + N_{og}^3)^2}}, \quad (18)$$

式中 \tilde{K} 为使用常规测量方法得到的标度因数。

4 安装误差角的标定误差分析

从(18)式可以看出影响安装误差角 θ 测量精度的因素主要有两项: 第一项为常规测量方法得到的标度因数 \tilde{K} 与实际标度因数 K 的偏差; 第二项为激光陀螺输出脉冲数 N_{og} 的误差。其中标度因数 \tilde{K} 与实际标度因数 K 的偏差由安装误差决定, 一般 $(\tilde{K} - K)/K$ 的数量级约为 10^{-6} , 根据(18)式可得对安装误差角测量的影响远小于 $0.1''$, 所以 \tilde{K} 的影响完全可以忽略。对安装误差角测量精度影响最大的就是第二项, 设 ΔN_{og} 为 N_{og} 的最大测量误差, 通过误差分析可得 ΔN_{og} 引起的安装误差角 θ 的测量误差 $d\theta$ 为

$$d\theta \approx \frac{(\cos \beta_0 + \sin \beta_0) \theta K}{\phi_{oZ} \sin \theta \sin \alpha} \Delta N_{og} \leq \frac{\sqrt{2} K}{\phi_{oZ} \sin \alpha} \Delta N_{og}, \quad (19)$$

再根据 N_{og} 的测量公式(10), 忽略掉相对影响很小的量后, N_{og} 的测量误差 ΔN_{og} 可以表示为

$$\Delta N_{og} \leq \sin \alpha (|\Delta \phi_{oZ} \cot \alpha| + |\phi_{oZ} \Delta \alpha| + |\phi_{oX} \sin \theta \Delta \beta| + |\phi_{oX} \Delta \theta|) / K, \quad (20)$$

将(20)式代入(19)式, 并设 $\cot \alpha = 1$, 最后得

$$d\theta \leq \sqrt{2} \left(\left| \frac{\Delta \phi_{oZ}}{1296000n} \right| + |\Delta \alpha| + |\sin \theta \Delta \beta| + |\Delta \theta| \right), \quad (21)$$

式中 $\Delta \phi_{oZ}$ 为位置转台的最大定位误差, $\Delta \alpha$ 为位置转台的旋转轴的最大随机晃动误差, $\Delta \theta$ 为速率偏频转台转动时 θ 的最大随机变化, $\Delta \beta$ 为速率偏频转台最大定位误差。这 4 项误差是影响 RBRLG 安装误差角 θ 的主要误差源。

设 RBRLG 的安装误差角 θ 为 $300''$; 位置转台的定位误差 $\Delta\phi_{ON}$ 为 $2''$; 速率偏频转台转动时 θ 的随机变化 $\Delta\theta$ 为 $1''$, 速率偏频转台的定位误差 $\Delta\beta$ 为 $100''$; 位置转台的旋转轴的随机晃动误差 $\Delta\alpha$ 为 $0.5''$; 每个计数位置位置转台正反转各一圈, 即 $n = 1$ 。将以上参数代入(21)式, 可得 θ 的标定误差 $d\theta$ 小于 $4''$ 。

5 实 验

为了验证提出的测量方法的有效性, 首先对某型激光陀螺使用常规方法测量标度因数, 实验中所使用速率偏频转台的零位基准的同步误差约为 $0.1''$, 转台旋转周期 $\tau_R = 2.4$ s, 每次测量时转台正反转各 5 圈, 即 $m = 5$, 图 5 为使用(3)式计算得到的 300 次测量结果的相对误差。300 次测量结果的平均值为每脉冲 $0.84279480''$ 。

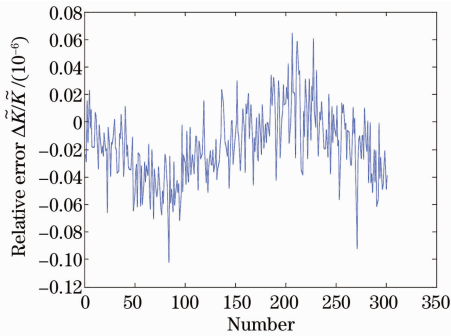


图 5 常规测量法测量标度因数的结果

Fig. 5 Result of measuring scale factor with common method

从图 5 中可以看到标度因数有一个缓慢的漂移, 但是幅度不大, 均方差约为 4×10^{-8} , 整体上的相对误差基本小于 10^{-7} 。

按照图 2 所示的结构搭建实验装置, 实验中位置转台选用的是六三五四研究所的单轴一体化转台 TS-360, 其同步精度优于 $2''$, 以某个位置为起点, 按照本文介绍的安装误差角标定方法对安装误差角进行测量, 在 $\beta_1 \sim \beta_n$ 的每个测量位置位置转台只正反转一圈, 计算得到相应的 $N_{og}^1 \sim N_{og}^4$, 代入(18)式即可得到安装误差角 θ 。初始夹角 β_0 每增加 10° 测量一次安装误差角, 图 6 所示为 80 个位置点的测量结果。

从图 6 中的数据可得安装误差角 θ 的平均值为 $646.75''$, 均方差约为 $0.21''$ 。根据(21)式, 对安装误差角测量精度产生影响的误差项在测量过程中都表现出随机的性质, 所以提出的方法对安装误差角的测量不存在系统偏差, 根据图 6 中测量结果的波动

范围可得安装误差角 θ 的测量误差基本上小于 $1''$ 。将实验得到的 \tilde{K} 和 θ 的平均值代入(4)式中得 K 值为每脉冲 $0.84279066''$ 。根据安装误差角的测量精度和图 5 中 \tilde{K} 的测量结果, 由(5)式可得标度因数 K 的测量精度优于 10^{-7} 。

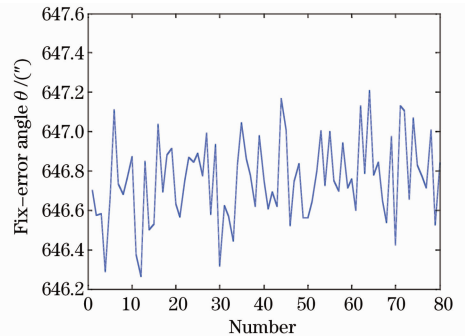


图 6 速率偏频转台安装误差测量结果

Fig. 6 Result of measuring rate table fix-error angle

6 结 论

通过分析常规的激光陀螺标度因数测量方法, 得出 RBRLG 安装误差角的存在影响标度因数的测量精度, 进而提出了一种安装误差角的标定方法。标定过程需要提供一个高精度且具有整圈同步功能的位置转台, 高稳定度的旋转角速度可以有效抵消旋转过程中地球自转在垂直于旋转轴方向的分量, 同步功能是为了可以整圈采样。通过对安装误差角的测量公式进行误差分析, 得出位置转台的同步误差、位置转台的旋转轴的随机晃动误差、速率偏频转台转动时旋转轴的随机晃动误差和速率偏频转台定位误差是影响安装误差角标定精度的主要因素, 最后通过实验对某型激光陀螺的标度因数进行了测量, 实验结果表明采用该方法进行标度因数的测量, 精度可优于 10^{-7} 。

参 考 文 献

- Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyro[M]. Changsha: Press of National Defense Technology University, 1984. 27~46
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984. 27~46
- 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
- Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei et al.. Choice of operating point for the four-mode differential laser gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 301~304
汪之国, 龙兴武, 王飞等. 四频差动激光陀螺工作点的选择[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 301~304
- Shiqiao Qin, Zongsheng Huang, Xingshu Wang. Feature analysis

- of the scale factor variation on a constant rate biased ring laser gyro[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 138~141
- 5 Zhan Dejun, Qin Shiqiao, Zhan Baodong *et al.*. Analysis of the error characteristic of rate-biased laser gyro passing through lock-in[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(6): 730~731
战德军,秦石乔 张宝东 等. 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
- 6 Han Zonghu, Feng Peide. Theoretical research on improving the accuracy of laser gyro using rate biased technique[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2001, **9**(2): 43~44
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): 43~44
- 7 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
- 8 Zhang Yanshen, Tang Quan'an, Su Li. Experimental research on ring laser gyro with rate biasing [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 1994, **2**(4): 34~39
章燕申,唐全安,苏力. 速率偏频激光陀螺的实验研究[J]. 中国惯性技术学报, 1994, **2**(4): 34~39
- 9 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
- 10 Zhang Weixu, Du Jianbang, Han Zonghu *et al.*. Methods for Laser Gyroscope Test[M]. Beijing: COSTIND, 1995. 7~8
张惟叙,杜建邦 韩宗虎 等. 激光陀螺仪测试方法[M]. 北京:国防科工委, 1995. 7~8
- 11 IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros[S]. IEEE Std. 2006. 27~29
- 12 Zhang Shuxia, Yan Wei. Calibration of installing errors of laser SINS[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2000, **8**(1): 47~49
张树侠,闫威. 激光陀螺捷联系统安装误差的标定[J]. 中国惯性技术学报, 2000, **8**(1): 47~49