

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.009

基于空间三轴激光陀螺的恒速偏频寻北技术

胡奇林¹, 李立新², 吴亮华¹, 张忆新¹, 武晓峰³

(1. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074; 2. 中国航天科工三院, 北京 100074;
3. 上海航天控制技术研究所, 上海, 200233)

摘要: 激光陀螺特有的闭锁效应使得其在应用中必须采取偏频去锁的方法, 速率偏频技术可以有效降低激光陀螺随机游走误差, 提高测量精度。基于空间三轴激光陀螺自身特有的三轴正交斜置特性, 采用恒速偏频方法, 通过建立新的系统误差方程, 引入刻度系数误差状态量, 采用卡尔曼滤波方法实现了系统的高精度寻北。这种初始对准方法对准速度快, 对准精度也有较大提高, 5min 寻北精度能达到 $90''(3\sigma)$ 。

关键词: 高精度寻北; 速率偏频; 刻度系数误差; 空间三轴激光陀螺

中图分类号: U666.12

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)04-0061-05

Constant-Rate Biased North Finding Technique Based on Monolithic Triaxial Ring Laser Gyro

HU Qi-lin¹, LI Li-xin², WU Liang-hua¹, ZHANG Yi-xin¹, WU Xiao-feng³

(1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;
2. The Third Academy of China Aerospace Science & Industry Corporation, Beijing 100074, China;
3. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: To reduce or eliminate the lock-in effect of Laser Gyro, biasing is commonly used in engineering applications. With rate-bias technique, all the random walk errors can be virtually decreased and the measuring accuracy can be improved. Based on the orthogonal-diagonal lattice of the monolithic triaxial ring laser gyro, with constant-rate biased technique, new equations for Strapdown Inertial Navigation System are built and scale factor error is imported as the state variable, and finally high precision north finding is realized by using Kalman filter method. Experiment result shows that this initial alignment method can not only speed up convergence, but also improve estimation accuracy. And the north finding precision can achieve 90 seconds of arc(3σ) in five minutes.

Key words: High precision north-finding technique; Rate bias; Scale factor error; Monolithic triaxial ring laser gyro

0 引言

激光陀螺因其性能稳定、动态范围宽、使用寿命长、启动速度快等优点成为近年来惯导设备应用的重点。激光陀螺存在一定的工作死区范围, 称之

为锁区。锁区的大小直接影响着激光陀螺的性能, 所以缩小消除锁区、克服锁区的影响成为了研制和发展激光陀螺的关键技术。实际应用中常采用抖动偏频技术与速率偏频技术来克服锁区影响。工程上通常采用机械抖动偏频技术消除闭锁, 但机械

收稿日期: 2016-11-15; 修订日期: 2017-02-01

作者简介: 胡奇林(1991-), 男, 硕士, 主要从事导航制导与控制方面的研究。E-mail: kylin_casic@qq.com

抖动偏频不能完全消除闭锁效应带来的影响,同时还增加了随机游走误差。理论研究表明,随机游走噪声水平决定了惯导系统的理论极限精度。激光陀螺随机游走不仅会引起导航误差,还会造成对准测漂误差及方位对准误差。因此,激光陀螺随机游走噪声的抑制技术是提高惯导寻北精度和快速性的关键。速率偏频技术能够使激光陀螺在大部分或全部时间内工作在锁区外,相比机械抖动偏频,可大幅减小随机游走误差,同时可实现旋转轴垂直方向惯性仪表误差的调制,从而提高大幅寻北精度。

1 高精度初始对准偏频方案

1.1 速率偏频的基本原理

抖动偏频是给激光陀螺加一个机械抖动,使激光陀螺腔体绕陀螺敏感轴做小角度的周期振动,从陀螺输出中扣除已知的抖动量即得陀螺的输入角速率。抖动偏频对安装平台有机机械振动干扰,而频繁通过锁区,存在随机游走误差。速率偏频是在激光陀螺上加一个远大于锁区阈值的转速,使激光陀螺一直处于线性工作区。速率偏频包括正反向速率偏频和单向恒速偏频。正反向速率偏频对偏频台正反换向性能和伺服控制系统要求严格。正反向速率偏频和抖动偏频都属于交变偏频,无法彻底消除过锁区误差。单向恒速偏频以恒定速率关机抖动,使激光陀螺始终工作在远离锁区的线性段上,可以有效避免过锁区问题。但恒速偏频由于采用单方向恒定速率转动,存在陀螺标度因数误差,寻北时受陀螺标度因数误差的影响较大。此时旋转轴向陀螺刻度系数误差成为了影响寻北精度的主要因素。

恒速偏频技术需建立在陀螺刻度系数误差小、刻度系数稳定性和重复性好的基础上。而激光陀螺具有刻度系数稳定、重复性好的特点,目前国内的空间三轴激光陀螺精度达到 $0.005(^{\circ})/h$,刻度系数稳定性在 1×10^{-6} 以内($0.7 \times 10^{-6} \sim 0.9 \times 10^{-6}$),已具备工程应用条件。

建立了基于恒速偏频的18阶卡尔曼滤波模型,其系统状态变量为

$$\mathbf{X} = [\delta\varphi, \delta h, \delta\lambda, \delta V_n, \delta V_u, \delta V_e, \phi_n, \phi_u, \phi_e, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \delta k_{gxx}, \delta k_{gyy}, \delta k_{gzz}]^T$$

$\delta V_n, \delta V_u, \delta V_e$ 分别表示捷联惯导系统北向、天向、东向的速度误差;

$\delta L, \delta h, \delta\lambda$ 分别表示捷联惯导系统的纬度误差、高度误差、经度误差;

ϕ_n, ϕ_u, ϕ_e 分别表示捷联惯导系统导航坐标系内北、天、东三个方向的失准角;

$\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 分别表示捷联惯导系统载体坐标系内X、Y、Z三个方向的加速度计零偏;

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 分别表示捷联惯导系统载体坐标系内X、Y、Z三个方向的陀螺漂移;

$\delta k_{gxx}, \delta k_{gyy}, \delta k_{gzz}$ 分别表示X、Y、Z陀螺的刻度系数误差。

下文给出卡尔曼滤波的系统矩阵

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} & \mathbf{F}_{13} & \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{F}_{31} & \mathbf{F}_{32} & \mathbf{F}_{33} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_b^n & -\mathbf{C}_b^n \omega_{ib}^b \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{F}_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{V_u}{R_M+h} & -\frac{V_n}{R_M+h} & -2(\omega_{ie} \sin L + \frac{V_e \tan L}{R_N+h}) \\ \frac{2V_n}{R_M+h} & 0 & 2(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_e}{R_N+h}) \\ 2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_e \tan L}{R_N+h} & -(2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_e}{R_N+h}) & \frac{V_n \tan L - V_u}{R_N+h} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{12} = \begin{bmatrix} -(2V_e \omega_{ie} \cos L + \frac{V_e^2 \sec^2 L}{R_N+h}) & \frac{V_n V_u}{(R_M+h)^2} + \frac{V_e^2 \tan L}{(R_N+h)^2} & 0 \\ -2V_e \omega_{ie} \sin L & -[\frac{V_n^2}{(R_M+h)^2} + \frac{V_e^2}{(R_N+h)^2}] & 0 \\ 2\omega_{ie} (V_u \sin L + V_n \cos L) + \frac{V_e V_n \sec^2 L}{R_N+h} & \frac{V_e V_u - V_e V_n \tan L}{(R_N+h)^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F_{13} = \begin{bmatrix} 0 & -f_e & f_u \\ f_e & 0 & -f_n \\ -f_u & f_n & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_M+h} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sec L}{R_N+h} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{V_n}{(R_M+h)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{V_e}{R_N+h} \tan L \sec L & -\frac{V_e \sec L}{(R_N+h)^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_{33} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{V_n}{R_M+h} \\ \frac{V_n}{R_M+h} & 0 \\ \omega_{ie} \sin L + \frac{V_e \tan L}{R_N+h} & -(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_e \tan L}{R_N+h}) \end{bmatrix}$$

$$F_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{R_N+h} \\ 0 & 0 & \frac{\tan L}{R_N+h} \\ -\frac{1}{R_M+h} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_{32} = \begin{bmatrix} -\omega_{ie} \sin L & -\frac{V_e}{(R_N+h)^2} & 0 \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_e \sec^2 L}{R_N+h} & -\frac{V_e \tan L}{(R_N+h)^2} & 0 \\ 0 & \frac{V_n}{(R_M+h)^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} -(\omega_{ie} \sin L + \frac{V_e \tan L}{R_N+h}) \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_e}{R_N+h} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

变量注释:

ω_{ie} 表示地球自转角速率;

R_M 表示地球子午圈曲率半径,单位为 m;

R_N 表示地球卯酉圈曲率半径,单位为 m;

L 表示地理纬度,单位为 rad。

C_n^b 表示捷联惯导系统从导航坐标系到载体坐标系的姿态矩阵,其满足 $C_n^b = (C_n^b)^T$ 。

此模型在原有 15 维滤波模型基础上增加了 3 个状态变量,即陀螺的刻度系数误差。

1.2 激光陀螺的安装方式

空间三轴激光陀螺是一种成熟的高经济性惯性器件(敏感轴分布示意图如图 1 所示),是单轴机抖激光陀螺技术的集成创新,即用整体结构方式将 3 只单轴机抖激光陀螺集成于同一基体上,构成三轴正交的空间激光陀螺。一方面消除了原有 3 个陀螺不同抖动频率相互之间的干扰,另一方面提高了系统工作的可靠性,也降低了陀螺部件的整体功耗。与陀螺组合(含 3 只单轴机抖激光陀螺)相比,优越性主要表现为:部件少、体积小、质量小、结构紧凑、振动环境适应性提高等。

其中 X_b, Y_b, Z_b 为惯导坐标系, X_s, Y_s, Z_s 为空间三轴激光陀螺坐标系。 Y_b 轴为惯导速率偏频旋转轴。

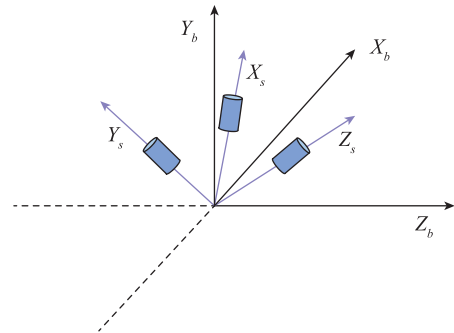


图 1 三轴激光陀螺敏感轴分布示意图

Fig. 1 Diagram of three orthogonal axes of monolithic triaxial ring laser gyro

1.3 速率偏频的主要流程

利用空间三轴激光陀螺进行速率偏频寻北时需要遵循一定的流程,要把握好机抖状态跟偏频状态的切换。对准流程如下(图 2):

1) 首先系统上电,预热 3min,然后发送对准指令,系统开始对准。

2) 系统开机抖进行粗对准;

3) 粗对准结束后,系统以恒定转速进行速率偏频,然后关机抖;

4) 对准时间 5min,然后开机抖,最后停止恒速转动,完成寻北。

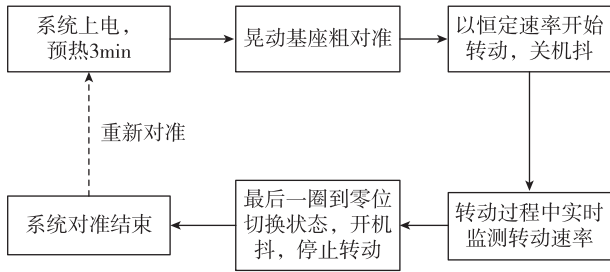


图2 速率偏频流程图

Fig. 2 Flow chart of rate bias

1.4 偏频角速度的选择

激光陀螺在不同转速下的刻度系数稳定性不一样,对系统在转速 $40(^{\circ})/s$ 到转速 $100(^{\circ})/s$ 进行寻北试验对比,实验结果可以发现,转速越快陀螺刻度系数越稳定,滤波模型中刻度系数误差的估计也会越快。但是转台会损耗得越严重,转台的寿命会缩短,且转速过快对转台转速的精度存在影响,因此在实际工作中转台转速宜选择合适的值。

2 数学仿真

数学仿真仅用来判断能否在 5min 中内估计出设定的等效 Y_b 向的刻度系数误差,无法进行重复性对比,寻北精度可在实际系统验证得到。

2.1 仿真条件:

试验时加入的误差信息如下所示:

陀螺漂移为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [0.005(^{\circ})/h \quad 0.005(^{\circ})/h \quad 0.005(^{\circ})/h]$$

加表零偏为

$$\mathbf{V} = [50\mu g \quad 50\mu g \quad 50\mu g]$$

陀螺刻度系数误差为

$$\delta\mathbf{K}_G = \text{diag}[5 \times 10^{-6} \quad 10 \times 10^{-6} \quad 15 \times 10^{-6}]$$

姿态、速度及位置无初始误差。

利用轨迹发生器产生所需要的单轴恒速偏频条件下的陀螺与加速度的输出值,并相应地产生各时刻的载体速度、位置、姿态信息。转速为 $40(^{\circ})/s$ 到 $100(^{\circ})/s$ 。

2.2 仿真结果

如图 3 所示,从左至右分别为 $100(^{\circ})/s$ 转速到 $40(^{\circ})/s$ 。

取转速 $60(^{\circ})/s$ 下的数据进行分析:

从图 3 可以看出,估计得到的 y 陀螺刻度系数误差为 9.96×10^{-6} ,实际理论设定 1×10^{-5} ,在对准的 5min 时间内能够较为快速准确地估计出 y 向陀螺刻度系数误差,估计残差为 4×10^{-8} ,在 5min 中

内对航向造成的角度误差为 0.00096° ($3.456''$),精度损失可以忽略,满足对准要求,因此在实际使用时偏频速率为 $60(^{\circ})/s$ 。

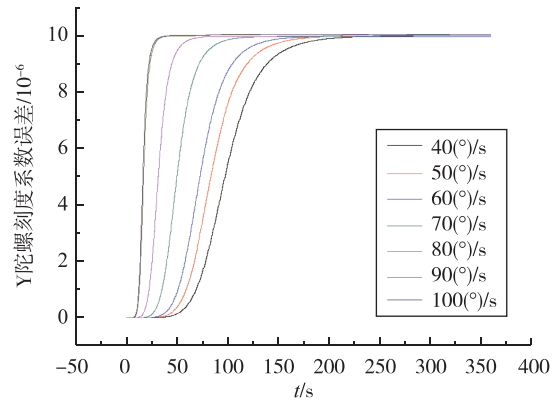


图3 不同转速下刻度系数误差估计速度

Fig. 3 Scale factor error estimated at different rate

3 实验验证

使用基于空间三轴激光陀螺的单轴旋转系统进行试验(实物图如图 4)。



图4 基于空间三轴激光陀螺的单轴旋转系统

Fig. 4 Single axis rotation system based on monolithic triaxial ring laser gyro

实验过程,将惯组固定在大理石台上,均是同一状态启动,分别利用速率偏频与机抖正反转动进行四位置寻北,对准时间 5min,完成 8 次对准,视为 1 组对准试验,8 次对准试验之间惯组断电 1min,转

至下一位置,重复上述操作,直至完成 4 组试验。

(1) 寻北实验数据如表 1 所示。

表 1 系统实测数据

Tab. 1 System measured data

位置	机抖正反转		速率偏频	
	航向角	转换到初始位置	解调航向角	转换到初始位置
位置一	358.638	358.638	358.648	358.648
	358.652	358.652	358.65	358.65
	358.638	358.638	358.655	358.655
	358.659	358.659	358.662	358.662
	358.632	358.632	358.651	358.651
	358.658	358.658	358.654	358.654
	358.65	358.65	358.652	358.652
	358.643	358.643	358.641	358.641
	89.216	358.642	89.226	358.652
	89.223	358.649	89.233	358.659
位置二 转动 90.574°	89.228	358.654	89.223	358.649
	89.217	358.643	89.227	358.653
	89.219	358.645	89.219	358.645
	89.235	358.661	89.226	358.652
	89.242	358.668	89.229	358.655
	89.226	358.652	89.224	358.65
	181.463	358.66	181.454	358.651
	181.448	358.645	181.46	358.657
	181.456	358.653	181.443	358.64
	181.465	358.662	181.456	358.653
位置三 转动 92.229°	181.431	358.628	181.456	358.653
	181.453	358.65	181.457	358.654
	181.438	358.635	181.454	358.651
	181.462	358.659	181.459	358.656
	269.175	358.638	269.195	358.658
	269.172	358.635	269.182	358.645
	269.181	358.644	269.191	358.654
	269.211	358.674	269.199	358.662
	269.185	358.648	269.182	358.645
	269.202	358.665	269.202	358.665
位置四 转动 87.734°	269.195	358.658	269.188	358.651
	269.191	358.654	269.194	358.657
	3σ			
	117.2248''		60.1924''	

(2) 刻度系数误差估计曲线图如图 5 所示。

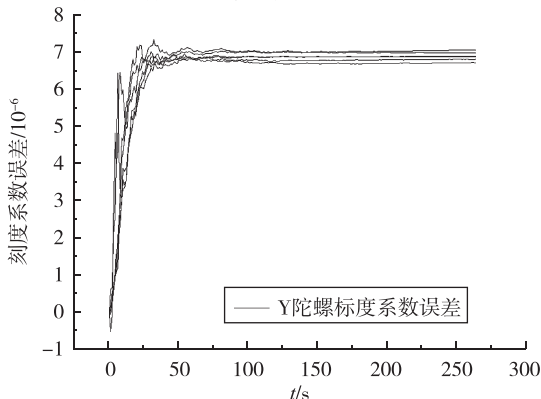


图 5 速率偏频状态刻度系数误差估计

Fig. 5 The estimate of scale factor error in rate bias state

从上述数据可以看出,机抖正反转 5min 的对准精度为 117.2248(3 σ),速率偏频 5min 的对准精度为 60.1924(3 σ)。速率偏频方案寻北精度优于机抖正反转,寻北精度相对于机抖正反转提升了将近 2 倍。从图 2 可以看出,速率偏频状态下刻度系数误差的估计速度很快,基本在 1min 中就已经趋于稳定了,刻度系数误差的估计量级在 10⁻⁸~10⁻⁷ 级别,基本对航向无影响。

4 结论

恒速偏频能在同量级惯性器件基础上最大限度地降低激光陀螺随机游走误差,此状态下,系统的寻北精度在很大程度上取决于陀螺刻度系数的稳定性。通过恒速转动能够提升旋转轴向陀螺刻度系数估计速度和估计精度,从而缩短对准时间,相对于机抖正反转能进一步提高其寻北精度。

参考文献

- [1] 张岩,吴文启,吴美平. 速率偏频激光陀螺寻北仪标度因数的在线估计[J]. 光学精密工程,2011,19(1):146-152.
- [2] 于化鹏. 恒速偏频激光陀螺寻北系统精度与快速性影响因素与机理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.
- [3] 张岩,吴文启,张晓强,等. 静基座速率偏频激光陀螺捷联惯导系统快速高精度初始对准算法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(12):2706-2710.
- [4] 宋敏,吴文启,于化鹏,等. 速率偏频激光陀螺系统速度数值积分算法误差分析与优化[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(2):152-156.
- [5] Buschlberger H J, Handrich E H, Malthanetal H, et al. Laser gyros in system applications with rate-bias technique [C]//Symposium Gyro Technology, 1987: 7.0-7.28.
- [6] 战德军,秦石乔,张宝东,等. 速率偏频激光陀螺锁区误差特性分析[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(6):730-733.
- [7] 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):41-46,59.
- [8] Levinson E, Giovanni C S. Laser gyro potential for long endurance marine navigation [C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1980: 115-129.
- [9] 战德军,秦石乔,王省书,等. 速率偏频激光陀螺标度因数正反转不对称性的研究[J]. 中国激光,2009,36(8):1995-1998.
- [10] 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):37-39,58.