

文章编号 1004-924X(2011)01-0146-07

速率偏频激光陀螺寻北仪标度因数的在线估计

张 岩, 吴文启, 吴美平

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为满足高精度寻北的工程需求,针对激光陀螺内部腔体温度变化和锁区不稳定性等因素会使速率偏频激光陀螺标度因数发生缓慢变化的问题,提出了在线估计标定因数的方法,并研究了速率偏频激光陀螺寻北仪及其标度因数测量误差。首先,通过标度因数实验研究其变化规律;然后,仿真分析了激光陀螺标度因数测量误差对寻北精度的影响;最后,根据陀螺测量值周期重复变化规律,提出了一种在线一阶递推估计标度因数变化的算法,通过引入单轴转台的角度测量值,得到了标度因数的变化参数。仿真分析表明,该算法对速率偏频激光陀螺标度因数变化的估计误差优于 1×10^{-6} ,由标度因数变化引起的寻北标准差减小至 $2''$ 左右。寻北实验结果表明,该算法能够有效抑制标度因数变化引起的寻北误差,5 min 寻北标准差达到 $24''$,基本满足高精度寻北的需求。

关键词:速率偏频激光陀螺;寻北仪;标度因数;递推算法;在线估计

中图分类号: V241.5; U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0146

Online estimation for scale factor of north-finder based on rate biased ring laser gyroscope

ZHANG Yan, WU Wen-qi, Wu Mei-ping

(College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To satisfy the engineering requirement of high precision north-finding, the north-finder based on a Rate Biased Ring Laser Gyroscope (RBRLG) and its measurement error come from the scale factor of RBRLG were studied to solve the problem on the scale factor slow change resulted from the inner temperature change and the instability of lock-in region of the RBRLG. Firstly, the change rule of scale factor was researched by a scale factor test. Then, the influence of the scale factor change on the north-finding precision was analyzed by a simulation. Finally, an online first order recursive algorithm was established to estimate the scale factor change according to the periodicity of RBRLG measurement. By introducing the platform angle measurement, the scale factor changes could be obtained. Simulated results indicate that the estimation error for the scale factor of RBRLG is less than 1×10^{-6} by the proposed algorithm, and the standard deviations of north-finding results caused by the scale factor change decrease to about $2''$. The experiment on the north-finder results shows that this algorithm can effectively restrain the north-finding error caused by scale factor change, and the standard

收稿日期:2010-08-16;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60604011);航空科学基金资助项目(No. 20070888002)

deviation is about $24''$ for 5 min, which can basically satisfy the requirement of high precision north-finding.

Key words: Rate Biased Ring Laser Gyroscope (RBRLG); north-finder; scale factor; recursive algorithm; online estimation

1 引 言

寻北仪是一种测量其基准边与地理真北方向之间夹角的仪器,可为其他设备提供方位和姿态等信息,被广泛应用于武器瞄准、导弹发射、隧道和矿井建设等国防和民用领域。寻北仪通常使用陀螺仪作为敏感地球自转角速度的测量部件,其寻北精度主要取决于陀螺零偏稳定性和陀螺随机游走等陀螺精度指标。二位置法和多位置法等寻北算法,虽然可以有效消除陀螺常值零偏的影响,但对陀螺随机游走和零偏漂移等误差的抑制效果并不明显。连续旋转式寻北仪可以将陀螺误差均匀调制在各个方向,近年来,已有学者对采用该方法的激光陀螺寻北仪和光纤陀螺寻北仪进行了研究^[1-6]。文献[4]采用二位置寻北方案,零偏稳定性为 $0.02 (^{\circ})/h$ 的光纤陀螺在 5 min 之内的寻北精度 $< 3'$;文献[5]采用多位置寻北方案,动调陀螺在 90 个位置寻北,寻北时间为 4.5 min,寻北精度达到 $8''$,精度很高,但文献中未给出动调陀螺的精度指标,有待进一步的研究;文献[6]采用旋转调制式寻北方案,使用零偏稳定性为 $0.1 (^{\circ})/h$ 的光纤陀螺进行寻北实验,分析得到的等效陀螺精度能够提高 50 倍,理论寻北精度优于 $1'$,由于其他误差因素的存在,实验得到的等效陀螺精度提高了约 10 倍,在 3 min 之内寻北精度达到 $4.2'$ 。

近几年,国内激光陀螺的精度大幅度提高,为实现高精度寻北,本文采用零偏稳定性为 $0.005 (^{\circ})/h$ 的激光陀螺,对旋转调制式速率偏频激光陀螺寻北仪进行了研究。通过单轴转台的连续转动使激光陀螺工作在速率偏频方式,可以在提高陀螺测量精度的同时消除陀螺机械抖动对转台的干扰。

由于速率偏频激光陀螺需要测量大角度的旋转,其标度因数误差是陀螺测量精度的一项重要指标^[7-9]。为了提高速率偏频激光陀螺标度因数的稳定性和精度,通常要求以高于 $100 (^{\circ})/s$ 的角

速率正反旋转,且要求很高的换向角加速度实现瞬间反转,这对转动机构的性能与可靠性要求都很高,并且在寻北仪应用中往往需要额外的转动机构以测量地球自转角速度的水平分量^[10],在工程实现上带来了极大的不便。本文研究的速率偏频激光陀螺寻北仪工作在 $10 (^{\circ})/s$ 单方向连续旋转状态,只需要一个转动机构,降低了对转动机构正反旋转的要求,有利于工程推广应用。

相比正反高速旋转的速率偏频激光陀螺和机械抖动激光陀螺,单方向连续旋转状态下激光陀螺标度因数的稳定性有比较明显的下降。本文通过实验对速率偏频激光陀螺标度因数误差特性进行了研究,并根据其缓变特点,提出了一种标度因数变化的在线一阶递推估计算法。该算法可以避免建立速率偏频激光陀螺标度因数温度模型时所需的大量重复性工作,具有较高的工程应用价值。

2 寻北仪基本原理

速率偏频激光陀螺寻北仪基本结构如图 1 所示:

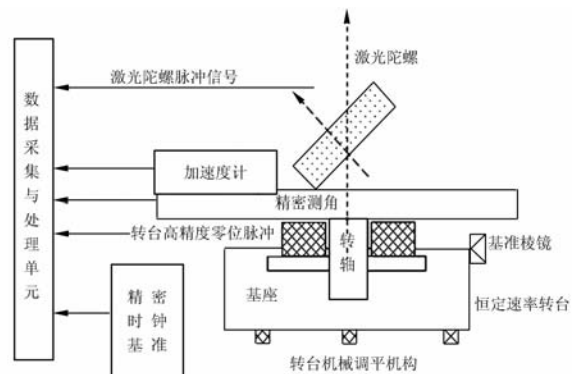


图 1 速率偏频激光陀螺寻北仪

Fig. 1 North-finder based on rate biased RLG

图 1 中,转台采用有零位脉冲输出的单轴速率转台,通过高精度测角光栅测量转台转动角度,通过机械调平机构实现转台大致水平,采用一个安装在转台面上的高精度石英加速度计通过旋转实现水平姿态角的高精度解析调平。

高精度二频激光陀螺安装在单轴速率转台上,转台为激光陀螺提供偏频速率。为能同时敏感地球自转角速率和转台提供的偏频速率,激光陀螺采用斜向安装方式,此时激光陀螺敏感轴随着转台相对地球的自转角速度矢量做周期性变化,被转台旋转频率调制后的激光陀螺敏感轴角速度的输入量包含了转台转动角速度分量和地球自转角速度分量。

设当地纬度为 L ,地球自转角速度为 ω_{ie} ,转台精确调平时,转轴与当地垂线重合,转台匀速转动,角速率为 Ω ,转台零位基准边与真北方向夹角为 φ ,陀螺敏感轴与其在水平方向投影的夹角为 θ 。从陀螺敏感轴在水平方向的投影与转台零位基准边夹角为 0 时开始计时,激光陀螺敏感轴的输入角速度 Ω_G 为:

$$\Omega_G(t) = \Omega \sin \theta + \omega_{ie} \sin L \sin \theta + \omega_{ie} \cos L \cos \theta \cos(\Omega t + \varphi), \quad (1)$$

由式(1)可知,激光陀螺敏感轴输入角速度主要由以下 3 项组成:

(1)转台转动角速率 Ω 在激光陀螺敏感轴上的投影 $\Omega \sin \theta$;

(2)地球自转角速度垂直分量在激光陀螺敏感轴上的投影 $\omega_{ie} \sin L \sin \theta$;

(3)地球自转角速度水平分量在激光陀螺敏感轴上的投影 $\omega_{ie} \cos L \cos \theta \cos(\Omega t + \varphi)$ 。

其中,只有第 3 项与北向角 φ 有关。根据激光陀螺输出的角增量特性,通过对激光陀螺和转台转动角度的测量与处理,可得到地球自转角速度水平分量在激光陀螺敏感轴上的投影值,进而得到转台零位基准边与真北方向的夹角 φ 。

3 速率偏频激光陀螺标度因数的误差特性及其对寻北精度的影响

3.1 速率偏频激光陀螺标度因数误差特性

速率偏频方式下激光陀螺需要测量大角度的旋转,标度因数的测量误差会导致较大的等效量化误差,因此,标度因数测量误差是速率偏频激光陀螺非常重要的误差源。

根据激光陀螺测试规范,将激光陀螺水平安装在转台台面,其敏感轴与转台转轴平行。转台分别以 $10 (^{\circ})/s$, $20 (^{\circ})/s$, $30 (^{\circ})/s$, $60 (^{\circ})/s$ 和

$100 (^{\circ})/s$ 的转动速率进行 8 组标度因数测试,发送指令关闭激光陀螺的机械抖动,使其工作在速率偏频方式。标度因数测试结果如表 1 所示,标度因数均值为 $0.46634601 (^{\circ})/pulse$,重复性为 7.00×10^{-6} 。而采用同样的测试环境,在机械抖动偏频方式下对该陀螺进行标度因数测试,标度因数均值为 $0.46634784 (^{\circ})/pulse$,重复性为 1.27×10^{-6} 。

表 1 速率偏频方式激光陀螺标度因数测试结果

Tab. 1 Results of RBRLG's scale factor test

转台状态			标度因数/ 正转圈数
反转圈数	速率/ $(^{\circ}) \cdot s^{-1}$		$(^{\circ}) \cdot pulse^{-1}$
20	20	10	0.46634190
20	20	10	0.46635057
20	20	20	0.46634894
20	20	20	0.46634916
20	20	30	0.46634373
20	20	30	0.46634242
20	20	60	0.46634518
20	20	100	0.46634614

由激光陀螺标度因数测试结果可以看出,对于同一激光陀螺,相比机械抖动方式,速率偏频方式标度因数重复性明显降低。

在室温条件下,转台以 $10 (^{\circ})/s$ 的速率单方向连续旋转,对速率偏频激光陀螺进行 1.2 h 的标度因数测试,试验结果如图 2,图 3 和图 4 所示。

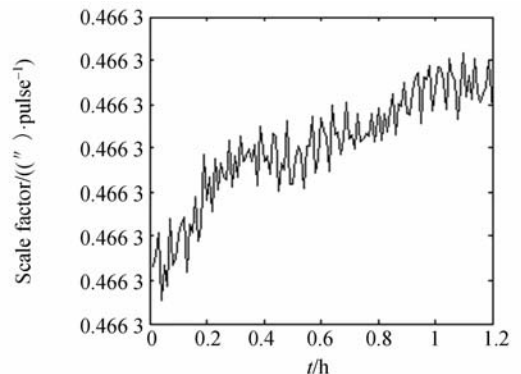


图 2 速率偏频激光陀螺标度因数变化曲线

Fig. 2 Change of RBRLG's scale factor

由图 2,图 3 和图 4 可以看出,由于速率偏频激光陀螺内部腔体温度变化等因素的存在,陀螺上电后标度因数缓慢变化并逐渐趋于稳定,在此

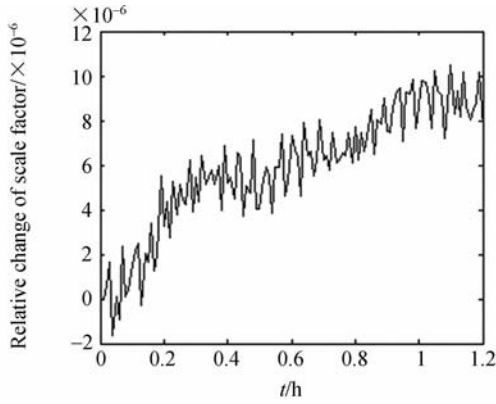


图 3 速率偏频激光陀螺标度因数相对变化曲线

Fig. 3 Relative change of RBRLG's scale factor

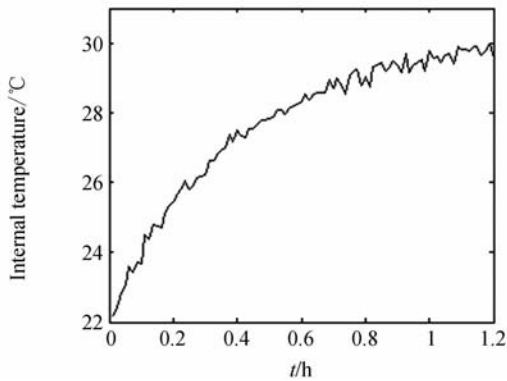


图 4 速率偏频激光陀螺腔体内部温度变化曲线

Fig. 4 Change of RBRLG's inner temperature

期间标度因数相对变化值达到 10×10^{-6} 以上。对多个陀螺进行多次标度因数试验,结果表明,速率偏频激光陀螺的标度因数在上电初期均存在明显变化,且变化相对值一般在 $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 之间。

实验发现,由于激光陀螺自身锁区的不稳定性及温度变化对锁区的影响,输入的偏频转速越小,标度因数变化相对越大。对于本文研究的速率偏频激光陀螺寻北仪,激光陀螺同时测量转台转动角速度和地球自转角速度,寻北精度取决于对地球自转角速度水平分量的测量精度。因此,为保证对地球自转角速度水平分量的测量精度,转台转速不能过大,而这样会导致激光陀螺标度因数变化相对较大,必须对其影响进行分析。

3.2 标度因数误差对寻北精度的影响

激光陀螺标度因数误差会引起激光陀螺测量值中各角度分量的计算误差,由于转台转动角速度远远大于地球自转角速度,转台角度分量的计

算误差会影响地球自转角速度水平分量投影值的计算精度,进而影响寻北仪的寻北精度。

为直观得出标度因数变化对寻北精度的影响,设转台转速为 $10 (^{\circ})/s$,陀螺倾角为 30° ,此时式(1)中第 3 项的幅值约为 $10 (")/s$,而第 1 项为 $5 (^{\circ})/s$, 1×10^{-6} 的标度因数变化将导致第 1 项出现 $0.018 (")/s$ 的测量误差,当标度因数变化较大时,其影响不能忽略。在不考虑其他测量误差的情况下,以激光陀螺标度因数指数变化为例对寻北算法进行仿真分析,仿真结果如表 2 所示。

表 2 标度因数变化对寻北精度的影响

Tab. 2 Influence of scale factor change on north-finding precision

初始北向角/ $^{\circ}$	标度因数 相对变化值 $\times 10^{-6}$	寻北 时间 /min	寻北 均值 / $^{\circ}$	寻北 标准差 / $^{\circ}$
1~360	0	5	-0.01	0.34
1~360	1	5	-0.06	2.44
1~360	2	5	-0.03	6.10
1~360	10	5	-0.01	31.99
1~360	100	5	0.35	303.88

由仿真结果可以看出,当激光陀螺标度因数相对变化为 10×10^{-6} 时,仅由标度因数变化引起的寻北方差即已达到约 $32''$,且随标度因数相对变化的增加,寻北方差显著增加。为实现寻北仪的高精度寻北,必须对激光陀螺标度因数的变化进行估计和补偿。

4 标度因数在线一阶递推估计算法

速率偏频激光陀螺标度因数变化和陀螺腔体内部温度有一定的一致性,通过建立标度因数的温度模型,可以得到标度因数的估计值。但由于陀螺腔体内部温度分布的不均衡以及温度梯度对激光陀螺测量的影响,通常需要进行大量试验才能得到高精度的激光陀螺标度因数温度模型;而且每个激光陀螺的温度模型各不相同,因此,通过温度模型得到激光陀螺标度因数估计值的方法虽然可行但需要较大的工作量^[10-12]。

本文研究的速率偏频激光陀螺寻北仪,激光陀螺测量值随转台转动做周期性变化,由标度因数的缓变特性,可将一周过程内的激光陀螺标度

因数变化近似为一阶线性变化过程,由此建立标度因数非线性变化的在线一阶递推算法模型:

$$k(t) = k_{0,i} + k_{1,i}(t - T_i), \quad T_i \leq t \leq T_{i+1}. \quad (2)$$

其中, T_i 为转台转动到第 i 周的起始时间,

$$\begin{aligned} N_{i,m} &= \int_{t_{i,m-1}}^{t_{i,m}} k(t) \Omega_G(t) dt = \sin \theta \int_{t_{i,m-1}}^{t_{i,m}} k(t) \Omega(t) dt + \omega_{ie} \sin L \sin \theta \int_{t_{i,m-1}}^{t_{i,m}} k(t) dt + \\ &\omega_{ie} \cos L \cos \theta \int_{t_{i,m-1}}^{t_{i,m}} \cos(\alpha(t) + \varphi) k(t) dt = k_{0,i} [\sin \theta \Delta \alpha_{i,m} + \omega_{ie} \sin L \sin \theta \Delta t + \\ &\omega_{ie} \cos L \cos \theta \cos(\alpha_{i,m} + \varphi) \Delta t] + k_{1,i} [\sin \theta \Delta \alpha_{i,m} \Delta t (m - 0.5) + \omega_{ie} \sin L \sin \theta \Delta t^2 (m - 0.5) + \\ &\omega_{ie} \cos L \cos \theta \cos(\alpha_{i,m} + \varphi) \Delta t^2 (m - 0.5)], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, Δt 为采样间隔, $N_{i,m}$ 为第 i 周第 m 个激光陀螺的输出数据, $t_{i,m}$ 为第 i 周第 m 个采样时刻, $\alpha_{i,m}$ 为第 i 周第 m 个采样时刻对应的转台角度, $\Delta \alpha_{i,m}$ 为第 i 周第 m 个采样间隔内转台转过的角

$$N_{i,\Sigma} = \sum_{m=1}^{M_i} N_{i,m} = k_{0,i} (2\pi \sin \theta + \omega_{ie} \sin L \sin \theta M_i \Delta t) + k_{1,i} \sum_{m=1}^{M_i} (m - 0.5) (\sin \theta \Delta \alpha_{i,m} \Delta t + \omega_{ie} \sin L \sin \theta \Delta t^2), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_{i+1,\Sigma} &= \sum_{m=1}^{M_{i+1}} N_{i+1,m} = (k_{0,i} + k_{1,i} M_i \Delta t) (2\pi \sin \theta + \omega_{ie} \sin L \sin \theta M_{i+1} \Delta t) + \\ &k_{1,i} \sum_{m=1}^{M_{i+1}} (m - 0.5) (\sin \theta \Delta \alpha_{i+1,m} \Delta t + \omega_{ie} \sin L \sin \theta \Delta t^2), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, M_i 和 M_{i+1} 分别为第 i 周和第 $i+1$ 周的采样点数,通过连续两周的累加值构成方程组并求解,即可得到一阶递推算法中的参数 $k_{0,i}$ 和 $k_{1,i}$ 。

5 仿真和寻北实验

对上述标度因数估计算法进行仿真验证,分别设定激光陀螺标度因数随时间 t 按照多项式形式、指数形式等已知规律缓慢变化,使用该估计算法均可有效地估计出激光陀螺标度因数,标度因数变化相对值达到 100×10^{-6} 时算法的估计误差仍优于 1×10^{-6} 。图 5 为标度因数按照指数形式在 1 h 内变化 10×10^{-6} 情况下标度因数变化曲线和估计误差。

在转速稳定性较高的情况下,陀螺每周测量角度值近似为常值。为验证实际应用时标度因数

$k_{0,i}$ 为第 i 周时激光陀螺标度因数的初始值, $k_{1,i}$ 为第 i 周时激光陀螺标度因数变化的斜率。

将此标度因数递推算法模型代入激光陀螺输出,并利用单轴转台的角度测量值,有:

度间隔。

在整周内对激光陀螺输出数据进行累加,若转速稳定性较高,可以认为地球自转角速度水平分量投影值整周累加后互相抵消,有:

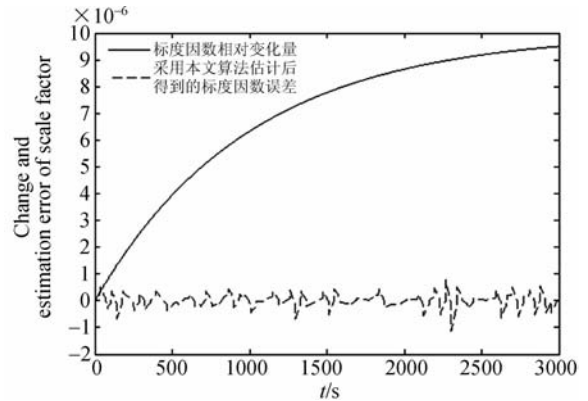


图 5 标度因数变化及估计算法误差曲线

Fig. 5 Change and estimation error of scale factor

估计算法的效果,对速率偏频激光陀螺进行 20 min 测试,对未补偿和补偿标度因数误差情况时的陀螺每周测量角度值进行比较,结果如图 6 所示。由于测试过程中陀螺标度因数发生缓慢变化,变化幅度达到约 20×10^{-6} ,若不对标度因数

误差进行补偿,得到的陀螺每周测量角度值将缓慢变化;采用本文提出的标度因数估计算法后,陀螺每周测量角度值稳定性大大提高,对应的标度因数误差已优于 0.2×10^{-6} ,表明该算法对标度因数的变化具有很好的补偿效果。

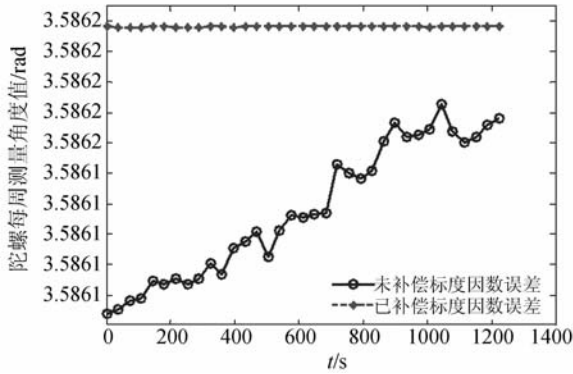


图 6 实测标度因数误差补偿效果

Fig. 6 Compensation results of scale factor by experiment

仍以激光陀螺标度因数指数形式变化为例进行仿真分析,在其他仿真条件不变的情况下,采用该算法对激光陀螺标度因数变化进行估计,得到的寻北精度如表 3 所示:

表 3 采用标度因数估计算法后的寻北精度

Tab. 3 North-finding precision using scale factor estimation

初始 北向角 /(°)	标度因数 相对变化值 $\times 10^{-6}$	寻北 时间 /min	寻北 均值 /(")	寻北 标准差 /(")
1~360	0	5	-0.03	0.38
1~360	1	5	-0.06	0.42
1~360	10	5	0.04	2.06
1~360	100	5	0.05	2.17

仿真结果表明,采用该算法估计激光陀螺标度因数,有效降低了不同幅度标度因数变化对激

光陀螺寻北精度的影响。

为验证以上分析,对某速率偏频激光陀螺寻北仪进行多组寻北实验,激光陀螺零偏稳定性为 $0.005 (^{\circ})/h$,寻北时间为 5 min,实验结果如表 4 所示。

表 4 寻北实验结果

Tab. 4 Results of north-finding experiments

	未估计标度因数	估计标度因数
1	226°32'59"	226°31'52"
2	226°32'27"	226°32'24"
3	226°31'2"	226°32'31"
4	226°31'50"	226°32'4"
5	226°32'23"	226°31'33"
6	226°30'46"	226°31'39"
σ	52"	24"

由表 4 可以看出,通过对速率偏频激光陀螺标度因数的变化进行估计,在寻北均值基本一致的情况下,寻北标准差由 52"缩小到 24"(1 σ),寻北精度得以明显提高。

6 结 论

本文从工程应用的角度出发,基于静基座情况下速率偏频激光陀螺匀速转动时每周测量值的重复性,提出一种标度因数非线性变化的在线一阶递推模型,利用转台角度测量值对标度因数变化进行实时估计。仿真分析表明,在标度因数变化相对值小于 100×10^{-6} 时,该算法的估计误差优于 1×10^{-6} ,由此引起的寻北标准差约为 2"。

标度因数误差补偿实验中,标度因数变化最大达到 20×10^{-6} ,补偿后标度因数误差优于 0.2×10^{-6} 。实验结果表明,在线一阶递推估计算法可以有效估计速率偏频激光陀螺标度因数存在的缓慢变化现象。5 min 寻北实验表明,采用该算法后寻北标准差由 52"缩小到 24",寻北精度得以明显改善。

参考文献:

[1] KIM S J, LEE S S, KWON Y S, et al.. Dynamic

north-finding scheme based on a fiber optic gyroscope [J]. SPIE, 1997, 3087: 126-136.

[2] ZHANG ZH J, SUN J Y, WU K Y. Error analysis and test study of fiber optic gyroscope north-finder

- [J]. *SPIE*, 2005, 5634: 611-618.
- [3] ZHANG Y, WU W Q, CAO J L. The study of north-finder based on rate biased RLG[C]. *The 3rd International Symposium on System and Control in Aeronautics and Astronautics*, 2010.
- [4] 蒋庆仙, 陈晓壁, 马小辉, 等. 单轴光纤陀螺寻北仪[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(2): 165-169.
JIANG Q X, CHEN X B, MA X H. North seeker using single axis FOG[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(2): 165-169. (in Chinese)
- [5] 沈斌武, 王志乾, 刘畅, 等. BP 神经网络在多位置捷联寻北系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1890-1895.
SHEN CH W, WANG ZH Q, LIU CH, et al.. Application of BP neural network to multi-position strap-down north seeking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1890-1895. (in Chinese)
- [6] 徐海刚, 郭宗本. 一种实用旋转调制式陀螺寻北仪的设计[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 616-619.
XU H G, GUO Z B. Design of a practical rotation-modulation gyro north-finder[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(5): 616-619. (in Chinese)
- [7] 袁保伦, 饶谷音, 廖丹. 旋转式惯导系统的标度因数误差效应分析[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(2): 160-164.
YUAN B L, RAO G Y, LIAO D. Scale factor error analysis for rotating inertial navigation system[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(2): 160-164. (in Chinese)
- [8] 战德军, 秦石乔, 王省书, 等. 速率偏频激光陀螺标度因数高精度测量方法[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1327-1331
ZHAN D J, QIN SH Q, WANG X SH, et al.. Precise measurement of rate biased laser gyro scale factor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 37(5): 1327-1331. (in Chinese)
- [9] QIN SH Q, HUANG Z SH, WANG X SH. Feature analysis of the scale factor variation on a constant rate biased ring laser gyro [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(3): 138-141.
- [10] 黄宗升. 旋转式激光陀螺寻北仪的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
HUANG Z SH. *Research on rotary north finder based on ring laser gyro*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] XIA J H, QIN Y Y, RUI L. Modeling temperature data of RLG's scale factor using LS-SVM[C]. *IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, 2008: 510-513.
- [12] 张鹏飞, 王宇, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺多温度点实时温度补偿方法的研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 562-566.
ZHANG P F, WANG Y, TANG J X, et al.. Research on methods for compensating temperature of mechanically dithered RLG [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(5): 562-566. (in Chinese)

作者简介:



张 岩(1981—),男,山西永济人,博士研究生,主要从事激光陀螺惯性导航系统应用技术、最优估计理论等方面的研究。E-mail: zhangyan_nudt@126.com



吴美平(1970—),男,福建南平人,教授,博士生导师,主要从事导航技术、空间遥感遥测技术、飞行力学控制等方面的研究。E-mail: meipingwu@263.net

导师简介:



吴文启(1967—),男,广西南宁人,教授,博士生导师,主要从事导航技术、空间遥感遥测技术等方面的研究。E-mail: wenqiwu_lit@sina.com.cn