

激光陀螺捷联惯性导航系统 IMU 误差标定

王建中

(重庆青年职业技术学院 信息工程系,重庆 400712)

摘要:针对激光陀螺捷联惯性导航系统惯性测量单元(IMU)误差标定对转台精度、基座对北和调平要求较高,以及系统工作时激光陀螺抖动、长时间工作温度升高、算法复杂等因素,提出了以速度为观测量,采用以最小二乘拟合法的系统级标定法。通过三轴转台多位置测量:静止-转动-静止,快速辨识三轴激光陀螺和三轴加速度计正交安装误差、传感器零偏、刻度因子等 24 个误差参数,整个标定过程时间约 2 h,多位置对准航向、横滚、俯仰测试精度优于 0.012° 。实验表明,采用该方法算法简单,操作过程便捷,可以有效提高激光陀螺捷联惯性导航系统 IMU 精度。

关键词:惯性测量单元;最小二乘法;安装误差;零偏;刻度因子

中图分类号:TN384

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.032

Error Calibration of IMU in Laser Gyro Strapdown Inertial Navigation System

WANG Jianzhong

(Dept. of Information Engineering, Chongqing Youth Vocational & Technical College, Chongqing 400712, China)

Abstract:As the inertial measurement unit (IMU) error calibration of the laser gyro strapdown inertial navigation system has high requirements on the precision of the turntable, the base north alignment and leveling, and considering the factors such as the jitter of the laser gyro, the temperature rises under long time working, and the complexity of the algorithm during the system operation, a system-level calibration method using the speed as the measurement value and the least square fitting method was proposed in this paper. Through three axis turntable to process multi-position measurement: stationary-rotation-stationary, 24 error parameters, such as installation error, sensor zero bias and the scale factor between three-axis laser gyro and three-axis accelerometer have been rapidly identified. The whole calibration process takes about 2 hours, with the multi-position alignment heading, roll, pitch accuracy of higher than 0.012° . The experiment shows that the proposed algorithm is simple and the operation process is convenient, and the IMU precision of the laser gyro strapdown inertial navigation system can be improved effectively.

Key words:inertial measurement unit (IMU); least square method; installation error; zero bias; scale factor

0 引言

激光陀螺捷联惯导系统惯性测量单元(IMU)由 3 个激光陀螺仪和 3 个加速计组成,其非正交安装、传感器零偏、刻度因子等误差直接影响系统的精度,因此,IMU 误差标定是捷联惯性导航系统研制和使用过程中非常重要的环节。国内、外常采用分立标定法和系统级标定法。分立标定法需通过精密的测试设备提供姿态基准^[1],以地球自转角速度、重

力加速度和转台角速度作为参考量,与陀螺仪和加速度计的实际输出量进行比较,从而求解出各项误差系数,但激光陀螺工作时,本身要产生抖动,从而影响标定精度。系统级标定法主要是利用惯性仪表的输出进行导航解算,以导航误差作为观测量来确定误差参数,避免了使用精密仪表,但其计算量大,滤波算法复杂,且标定时间长^[2]。

针对以上两种方法的缺点,以及标定过程中转

收稿日期:2018-02-08

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目 MEMS 捷联惯性导航系统研究(No. KJ1603902);重庆市基础科学与前沿技术研究专项北斗组合导航系统的数据融合方法研究(No. cstc2016jcyjA0138);新媒体环境下的教学资源管理云平台建设与教育教学深度融合研究

作者简介:王建中(1979-),男,四川蓬安人,副教授,高级工程师,硕士,主要从事计算机信息技术、惯性导航方向的研究。E-mail:570691790@qq.com。

台需要对北和调平等困难^[3],本文提出了系统级多位置 24 参数标定方法,通过手动或自动三轴转台旋转位置完成全部参数辨识,整个标定过程时间约 2 h。该方法以速度为观测量,采用最小二乘法,标定三轴激光陀螺和加速度计正交安装、传感器零偏、刻度因子等 24 个参数,其算法简单、高效,提高了系统 IMU 精度。

1 IMU 误差模型建立

激光陀螺捷联惯导系统主要组件的 3 个激光陀螺仪和 3 个加速度计在机械安装时存在误差,激光陀螺坐标系与加速度计传感器本身在工程安装中不能完全正交,存在一定偏角^[4]。激光陀螺仪和加速度计两个坐标系不能完全重叠,也是非正交的误差源。另外,激光陀螺固定于转台位置转动 360° 的角速度输出量与理论值、加速度计正、反两个方向输出量与理论值对应的值不一致,需要标定刻度因子;同时传感器在零位置输出量存在误差。采用以最小二乘拟合法的系统级标定,通过三轴转台多位置:静止-转动-静止^[5],激光陀螺捷联惯导系统在固定位置保持静止,给定初始航向完成标定准备工作后,按照预先设计的方向转动或旋转至指定位置,保持系统静止后再测量系统数据,测试时间为 T ,通过观测系统速度变化和转动过程传感器的变化量,标定 24 个误差参数,一共进行 14 个步骤。

在标定过程中,定义东北天坐标系为基准坐标系^[4],激光陀螺误差方程为

$$\begin{cases} \omega_{tx} = b_{11}\omega_x + b_{12}\omega_y + b_{13}\omega_z - B_{01} \\ \omega_{ty} = b_{21}\omega_x + b_{22}\omega_y + b_{23}\omega_z - B_{02} \\ \omega_{tz} = b_{31}\omega_x + b_{32}\omega_y + b_{33}\omega_z - B_{03} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega_{tx}, \omega_{ty}, \omega_{tz}$ 为代入标定参数后激光陀螺的输出角速度; B_{01}, B_{02}, B_{03} 为激光陀螺零偏; b_{11}, b_{22}, b_{33} 为激光陀螺刻度因子,也称为比例系数; $b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{23}, b_{31}, b_{32}$ 为激光陀螺安装误差。

加速度计误差方程为

$$\begin{cases} a_{tx} = a_{11}a_x + a_{12}a_y + a_{13}a_z - A_{01} \\ a_{ty} = a_{21}a_x + a_{22}a_y + a_{23}a_z - A_{02} \\ a_{tz} = a_{31}a_x + a_{32}a_y + a_{33}a_z - A_{03} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_{tx}, a_{ty}, a_{tz} 为代入标定参数后加速度计输出的速度增量; A_{01}, A_{02}, A_{03} 为速度计零偏; a_{11}, a_{22}, a_{33} 为加速度计刻度因子,也称为加速度计比例系数; $a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{23}, a_{31}, a_{32}$ 为加速度计安装误差。

2 IMU 标定方案设计

激光陀螺捷联惯导系统其惯性组件安装在固定箱体结构后,由于存在各种误差,3 个激光陀螺和 3 个加速度计与理论坐标系东北天存在一定误差角。系统固定在标定三轴转台上,激光陀螺和加速度安装误差、转台误差控制在 3' 内,IMU 的实际位置与导航坐标系理论值误差如图 1 所示。IMU 与导航坐标系定义: $E_1 N_1 U_1$ 为激光陀螺捷联导航系统惯性组合的实际位置; ENU 为东北天导航坐标系,两者之间存在一定偏角。系统固定在手动三轴转台如图 2 所示。

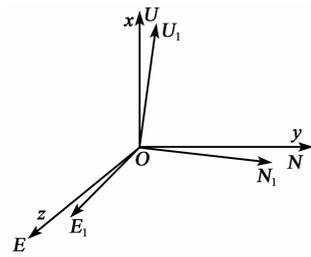


图 1 系统 IMU 组件安装与理论坐标系对比



图 2 系统固定在手动三轴转台

IMU 速度误差在东北天导航坐标系下为

$$\delta \dot{V}^n = -\varphi^n \times f^n - (-2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n - (2\delta\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + C_b^c \delta f^b \quad (3)$$

在标定过程中,系统不发生位移,因此, $V^n = 0, \omega_{en}^n = 0$;地球自转角速度相对于转台旋转角速度很小, $-2\omega_{ie}^n \times \delta V^n$ 忽略不计,故速度误差方程为

$$\delta \dot{V}^n = -\varphi^n \times f^n \quad (4)$$

IMU 标定前,安装固定系统,转台初始位置对准北向,即转台固定在 0° 位置,系统航向、横滚、俯仰对准 0° 。预装 24 个标定参数, x, y, z 轴激光陀螺刻度因子为 0.932 920, x, y, z 轴加速计刻度因子为 1.0,其余参数初始值设为 0。3 个激光陀螺和 3 个加速度计数据采集周期 $\tau = 5$ ms,每个位置静止时数据采集 100 s,即采集次数 $n = 20\ 000$, $\Delta V_{e1}, \Delta V_{e2}$ 为在 t_1, t_2 时刻东向速度,常数 $K = 180/\pi$ 。IMU 标

定步骤如下:

1) 标定加速度计刻度因子 a_{11} 、 a_{22} 、 a_{33} ，零偏 A_{01} 、 A_{02} 、 A_{03} 。先将系统固定，转动三轴转台至航向 0° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置，保持系统静止，给定航向 0° ，寻北完成后采集数据 100 s；然后沿俯仰方面缓慢、匀速转动 $+90^\circ$ ，即俯仰从 0° 转动至 $+90^\circ$ ，保持静止采集数据 100 s；再俯仰方向转动 -180° ，转动至 -90° ，采集数据 100 s；而后俯仰方向转动 $+90^\circ$ ，转动至 0° ，沿横滚方向转动 $+90^\circ$ ，转动至 $+90^\circ$ ，采集数据 100 s；横滚方向转动 -180° ，即横滚从 $+90^\circ$ 转动至 -90° ，采集数据 100 s；最后回到初始位置。系统在三轴转台位置依次如图 3~7 所示，最后回到图 3 位置，航向、横滚、俯仰分别用 H 、 R 、 P 表示。

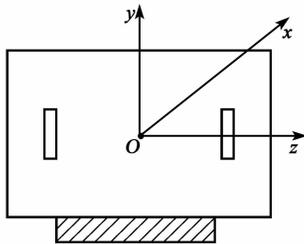


图 3 $H=0^\circ, R=0^\circ, P=0^\circ$

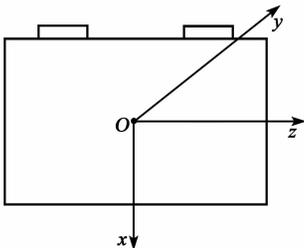


图 4 $H=0^\circ, R=0^\circ, P=+90^\circ$

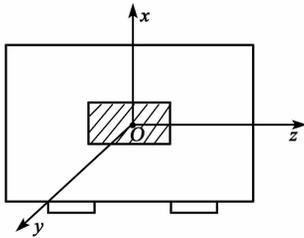


图 5 $H=0^\circ, R=0^\circ, P=-90^\circ$

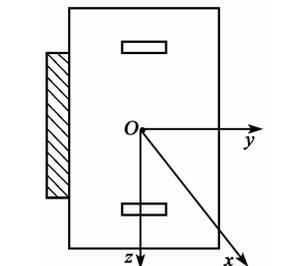


图 6 $H=0^\circ, R=+90^\circ, P=0^\circ$

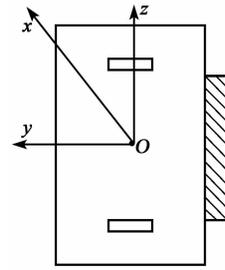


图 7 $H=0^\circ, R=0^\circ, P=-90^\circ$

零偏参数和加速度计刻度因子如下:

$$\begin{cases} A_{01} = A_{01_0} + (\sum_{i=1}^{20000} a_{x_p(i)} + \sum_{i=1}^{20000} a_{x_m(i)}) / 2T_{100} \\ A_{02} = A_{02_0} + (\sum_{i=1}^{20000} a_{y_p(i)} + \sum_{i=1}^{20000} a_{y_m(i)}) / 2T_{100} \\ A_{03} = A_{03_0} + (\sum_{i=1}^{20000} a_{z_p(i)} + \sum_{i=1}^{20000} a_{z_m(i)}) / 2T_{100} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_{11} = a_{11_0} / [(\sum_{i=1}^{20000} a_{x_p(i)} - \sum_{i=1}^{20000} a_{x_m(i)}) / 2T_{100}] \\ a_{22} = a_{22_0} / [(\sum_{i=1}^{20000} a_{y_p(i)} - \sum_{i=1}^{20000} a_{y_m(i)}) / 2T_{100}] \\ a_{33} = a_{33_0} / [(\sum_{i=1}^{20000} a_{z_p(i)} - \sum_{i=1}^{20000} a_{z_m(i)}) / 2T_{100}] \end{cases} \quad (6)$$

式中： a_{x_p} 、 a_{y_p} 、 a_{z_p} 为对应加速度计 $+90^\circ$ 位置测量值； a_{x_m} 、 a_{y_m} 、 a_{z_m} 为对应加速度计 -90° 位置测量值。激光陀螺捷联惯性导航系统传感器数据采集周期为 5 ms，每个位置数据测量时间 $T_{100} = 20\,000 \times 0.005 = 100$ (s)。

2) 标定 x 轴激光陀螺刻度因子 n_{11} 。系统转动至航向 0° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止 (见图 3)；然后给定航向 0° ，待初始化完成后，沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+360^\circ$ ，采集数据 100 s；再沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -360° ，即回到起始位置，采集数据 100 s。

$$n_{11} = n_{11_0} \{1.0 - [(\Delta V_{e1} - \Delta V_{e2}) / 2] / (2\pi \times g \times T_{100} \times \tau)\} \quad (7)$$

3) 标定 z 轴激光陀螺刻度因子 n_{33} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止，如图 8 所示。给定航向 -90° ，初始化完成后，沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+360^\circ$ ，采集数据 100 s；再沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -360° ，采集数据 100 s，再回到初始位置。

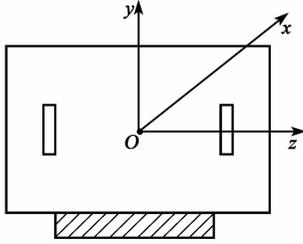


图 8 $H = -90^\circ, R = 0^\circ, P = 0^\circ$

$$n_{33} = n_{33_0} \{ 1.0 - [(\Delta V_{e1} - \Delta V_{e2})/2] / (2\pi \times g \times T_{100} \times \tau) \} \quad (8)$$

4) 标定 y 轴激光陀螺刻度因子 n_{22} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 -90° 、俯仰 0° 位置保持静止, 即从初始位置 (见图 8) 转至标定准备位置 (见图 9)。给定航向 -90° , 待初始化完成后, 沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+360^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -360° , 采集数据 100 s, 再回到初始位置。

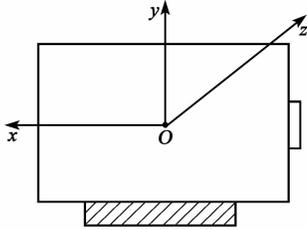


图 9 $H = -90^\circ, R = -90^\circ, P = 0^\circ$

$$n_{22} = n_{22_0} \{ 1.0 - [(\Delta V_{e1} - \Delta V_{e2})/2] / (2\pi \times g \times T_{100} \times \tau) \} \quad (9)$$

5) 标定 z 轴加速度计零偏 A_{03} 。系统转动至航向 0° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 0° , 待初始化完成后, 沿横滚方向缓慢匀速转动 $+180^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿横滚方向缓慢匀速转动 -180° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿横滚方向缓慢匀速转动 -180° , 采集数据 100 s; 然后沿横滚方向缓慢匀速转动 $+180^\circ$, 回到初始位置。

$$A_{03} = A_{03_0} - \{ [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2})/2] / (2 \times g \times T_{100}) \} \quad (10)$$

6) 标定 x 轴加速度计零偏 A_{01} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 给定航向 -90° , 待初始化完成后, 沿俯仰方向缓慢匀速转动 $+180^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿俯仰方向缓慢匀速转动 -180° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -180° , 采集数据 100 s; 然后沿横滚方向缓慢、匀速转动 $+180^\circ$, 回到初始位置。

$$A_{01} = A_{01_0} + \{ [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2})/2] / (2 \times g \times T_{100}) \} \quad (11)$$

7) 标定 y 轴加速度计零偏 A_{02} 、 y 轴加速度计

与 z 轴加速度计的安装误差 a_{23} 。系统转动至航向 0° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 0° , 待初始化完成后, 沿横滚方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿横滚方向缓慢、匀速转动 -90° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿横滚方向缓慢、匀速转动 -90° , 采集数据 100 s; 最后沿横滚方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 回到初始位置。

$$A_{02} = A_{02_0} + \{ [(\Delta V_{e1} - \Delta V_{e2})/2] / (2 \times g \times T_{100}) \} \quad (12)$$

$$a_{23} = a_{23_0} + [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (13)$$

8) 标定 x 轴加速度计与 y 轴加速度计的安装误差 a_{12} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 -90° 待初始化完成后, 沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -90° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -90° , 采集数据 100 s; 然后沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 回到初始位置。

$$a_{12} = a_{12_0} - [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (14)$$

9) 标定 x 轴加速度计与 z 轴加速度计安装误差 a_{13} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 -90° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 -90° , 待初始化完成后, 沿俯仰方向 (绕 y 轴方向) 缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -90° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -90° , 采集数据 100 s; 最后沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 回到初始位置。

$$a_{13} = a_{13_0} - [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (15)$$

10) 标定 y 轴激光陀螺与 x 轴激光陀螺安装误差 n_{21} 和 z 轴激光陀螺与 x 轴激光陀螺安装误差 n_{31} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 -90° , 待初始化完成后, 沿横滚方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿横滚方向缓慢、匀速转动 -90° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿横滚方向缓慢、匀速转动 -90° , 采集数据 100 s; 最后沿横滚方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 回到初始位置。

$$n_{21} = n_{21_0} - [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (16)$$

$$n_{31} = n_{31_0} - [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (17)$$

11) 标定 x 轴激光陀螺与 y 轴激光陀螺安装误差 n_{12} 和 z 轴激光陀螺与 y 轴激光陀螺安装误差 n_{32} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 -90° , 待初始化完成后, 沿航向方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿航向方向缓慢、匀速转动 -90° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿航向方向缓慢、匀速转动 -90° , 采集数据 100 s; 最后沿航向方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 回到初始位置。

$$n_{32} = n_{32_0} + [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (18)$$

$$n_{12} = n_{12_0} + [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (19)$$

12) 标定 y 轴激光陀螺与 z 轴激光陀螺安装误差 n_{23} 和 x 轴激光陀螺与 z 轴激光陀螺安装误差 n_{13} 。系统转动至航向 0° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 0° , 待初始化完成后, 沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 采集数据 100 s; 再沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -90° , 回到初始位置, 采集数据 100 s; 再继续沿俯仰方向缓慢、匀速转动 -90° , 采集数据 100 s; 最后沿俯仰方向缓慢、匀速转动 $+90^\circ$, 回到初始位置。

$$n_{23} = n_{23_0} + [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (20)$$

$$n_{13} = n_{13_0} + [(\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}) / (2 \times g \times T_{100})] \quad (21)$$

13) 标定 x 、 y 、 z 轴激光陀螺零偏 N_{01} 、 N_{02} 、 N_{03} 。系统转动至航向 0° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 0° , 待初始化完成后, 保持静止采集数据 600 s, 系统自动计算出 x 、 y 、 z 轴激光陀螺零偏 N_{01} 、 N_{02} 、 N_{03} 如下:

$$N_{01} = N_{01_0} + 3\ 600 \times K \times V_e / (2R) \quad (22)$$

$$N_{02} = N_{02_0} - 3\ 600 \times K \times \psi / T_{10} \quad (23)$$

$$N_{03} = N_{03_0} - 3\ 600 \times K \times V_n / (2R) \quad (24)$$

式中: R 为地球长半轴; V_e 为东向速度; V_n 为北向速度; $T_{10} = 600$ s。

14) 标定 y 、 z 轴激光陀螺零偏 N_{02} 、 N_{03} 。系统转动至航向 -90° 、横滚 0° 、俯仰 0° 位置保持静止, 然后给定航向 -90° , 待初始化完成后, 保持静止采集数据 600 s, 系统在 (13) 基础上自动计算出 y 、 z 轴激光陀螺零偏 N_{02} 、 N_{03} 如下:

$$N_{02} = N_{02_0} - 3\ 600 \times K \times [(\psi - ik_0) / K] / T_{10} \quad (25)$$

$$N_{03} = N_{03_0} + 3\ 600 \times K \times V_e / (2R) \quad (26)$$

式中: ψ 为数据采集完时刻的航向; $ik_0 = -90^\circ$ 为给定的初始航向。

标定完成后, 自动生成 24 个参数, 写入到配置文件中, 每次系统开启 24 个自动读取配置文件, 载入相应参数, 如表 1 所示。

表 1 IMU 标定初始值和标定完成参数对照表

序号	标定参数	变量	初始值	标定完成
1	x 轴激光陀螺零偏 / $[(^\circ) \cdot \text{h}^{-1}]$	N_{01}	+0.000 000	-0.089 093
2	y 轴激光陀螺零偏 / $[(^\circ) \cdot \text{h}^{-1}]$	N_{02}	+0.000 000	+0.024 217
3	z 轴激光陀螺零偏 / $[(^\circ) \cdot \text{h}^{-1}]$	N_{03}	+0.000 000	+0.083 595
4	x 轴加速计零偏 ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)	A_{01}	+0.000 000	+0.005 578
5	y 轴加速计零偏 ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)	A_{02}	+0.000 000	-0.001 545
6	z 轴加速计零偏 ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)	A_{03}	+0.000 000	-0.006 089
7	x 轴激光陀螺刻度因子	n_{11}	+0.932 920	+0.932 914
8	x 轴激光陀螺安装误差	n_{12}	+0.000 000	+0.001 704
9	x 轴激光陀螺安装误差	n_{13}	+0.000 000	-0.000 680
10	y 轴激光陀螺安装误差	n_{21}	+0.000 000	-0.001 561
11	y 轴激光陀螺刻度因子	n_{22}	+0.932 920	+0.932 777
12	y 轴激光陀螺安装误差	n_{23}	+0.000 000	+0.000 938
13	z 轴激光陀螺安装误差	n_{31}	+0.000 000	+0.000 483
14	z 轴激光陀螺安装误差	n_{32}	+0.000 000	-0.004 225
15	z 轴激光陀螺刻度因子	n_{33}	+0.932 920	+0.932 778
16	x 轴加速计刻度因子	a_{11}	+1.000 000	+0.980 063
17	x 轴加速计安装误差	a_{12}	+0.000 000	+0.000 778
18	x 轴加速计安装误差	a_{13}	+0.000 000	-0.000 321
19	y 轴加速计安装误差	a_{21}	+0.000 000	+0.000 000
20	y 轴加速计刻度因子	a_{22}	+1.000 000	+1.080 845
21	y 轴加速计安装误差	a_{23}	+0.000 000	+0.001 081
22	z 轴加速计安装误差	a_{31}	+0.000 000	+0.000 000
23	z 轴加速计安装误差	a_{32}	+0.000 000	+0.000 000
24	z 轴加速计刻度因子	a_{33}	+1.000 000	+0.953 045

3 IMU 实验验证

激光陀螺捷联惯导系统 IMU 精度验证采用高精度数显转台验证姿态重复性和正交性, 采用陆用车辆跑车验证姿态稳定性。

3.1 姿态重复性和正交性实验

选用高精度数显转台, 误差优于 $0.000 1^\circ$ 。调平高精度数显转台, 将 IMU 固定在转台上^[6], 做好相应测试准备, 开启电源寻北 2 次取平均值, 设置为高精度数显转台刻度的初值, 每个象限自动寻北 4 次, 如表 2~5 所示。

表 2 转台 0°位置测试数据

序号	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)
1	0.011 565 8	0.002 935	-0.000 660
2	-0.009 192 0	0.003 021	-0.000 860
3	-0.007 355 0	0.003 615	-0.001 320
4	0.003 195 1	0.002 923	-0.001 010
平均值	-0.000 447 0	0.003 124	-0.000 960
均方差	0.006 261 6	0.000 197	0.000 162

表 3 转台 90°位置测试数据

序号	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)
1	90.010 040	0.003 193	0.000 331
2	90.002 872	0.002 869	0.000 647
3	89.998 995	0.002 147	0.000 573
4	90.006 333	0.003 344	0.000 195
平均值	90.004 560	0.002 888	0.000 436
均方差	0.002 901 2	0.000 304	0.000 139

表 4 转台 180°位置测试数据

序号	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)
1	180.003 14	0.001 930	0.001 658
2	180.007 41	0.001 529	0.000 991
3	180.002 54	0.001 137	0.001 559
4	180.000 58	0.001 648	0.000 646
平均值	180.003 42	0.001 561	0.001 214

表 6 转台 270°位置测试数据

序号	惯性测量单元(IMU)			方位引出装置			数字水平仪			误差		
	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)
1	18.490 735	0.009 131	-0.017 374	18.490 735	0.009 131	-0.017 374	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
2	73.089 917	0.016 078	0.052 619	73.086 553	0.016 232	0.050 595	0.003 364	-0.000 154	0.002 023	0.003 364	-0.000 154	0.002 023
3	155.919 132	0.009 914	0.038 357	155.914 991	0.015 055	0.034 939	0.004 141	-0.005 141	0.003 418	0.004 141	-0.005 141	0.003 418
4	253.865 463	0.019 274	0.023 924	253.860 077	0.013 940	0.019 301	0.005 387	0.005 334	0.004 623	0.005 387	0.005 334	0.004 623
5	345.907 142	0.008 051	-0.023 233	345.907 313	0.003 913	-0.024 130	0.001 829	0.004 138	0.000 897	0.001 829	0.004 138	0.000 897
6	18.039 193	0.012 562	-0.012 099	18.036 076	0.011 384	-0.010 579	0.003 116	0.001 178	-0.001 520	0.003 116	0.001 178	-0.001 520

由表 6 可以看出,航向稳定性优于 0.009°,横滚、俯仰精度优于 0.06°。

4 结束语

本文提出了基于激光陀螺捷联惯性导航系统 IMU 误差标定方法,解决了因转台精度、基座对北和调平,以及系统工作时激光陀螺抖动、长时间工作温度升高、算法复杂等因素对系统标定的难点,提出了以 IMU 输出结果速度为观测量,采用最小二乘拟合法的系统级标定法,通过三轴转台多位置测量:静止-转动-静止,快速辨识三轴激光陀螺和三轴加速度计正交安装误差、传感器零偏、刻度因子等 24 个误差参数,标定过程缩短至 2 h,姿态精度优于 0.012°。实验表明,采用该方法算法简单,操作过程便捷,可以有效解决因转台误差对 IMU 标定精度的影响,从而提高了激光陀螺捷联惯性导航系统精度,为 IMU 误差标定提供了参考价值。

续表

序号	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)
均方差	0.001 596 4	0.000 182	0.000 316

表 5 转台 270°位置测试数据

序号	航向/(°)	横滚/(°)	俯仰/(°)
1	270.012 11	0.004 157	0.002 99
2	270.006 56	0.003 439	0.003 05
3	270.003 85	0.004 046	0.003 788
4	270.005 46	0.004 221	0.002 579
平均值	270.006 99	0.003 966	0.003 102
均方差	0.002 044 4	0.000 211	0.000 274

3.2 跑车验证姿态稳定性

将激光陀螺捷联惯导系统 IMU 固定在车体底盘上^[7],中轴线与车体中轴线大致保持一致。实验车配置有高精度方位引出装置和数字水平仪,无累计误差。方位引出装置精度高于 0.006°,验证航向稳定性;数字水平仪精度优于 0.000 6°。IMU 初始化完成后,方位引出装置装订初始航向值和数字水平仪装订横滚、俯仰值与 IMU 设备初值一致,在某地闭环跑车实验结果如表 6 所示。

参考文献:

- [1] 吴赛成,秦石乔,王省书,等. 激光陀螺惯性测量单元系统级标定方法[J]. 中国惯性技术学报,2011,19(2):185-189.
- [2] 袁保伦. 四频激光陀螺旋转式惯导系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007:100-102.
- [3] 谢波,秦永元,万彦辉. 激光陀螺捷联惯导系统多位置标定方法[J]. 中国惯性技术学报,2011,19(2):158-162.
- [4] 董春梅,任顺清,陈希军. 基于三轴转台误差分析的 IMU 标定方法[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(4):895-901.
- [5] 毛玉良. 激光陀螺捷联惯导系统误差辨识与修正技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.
- [6] 王建中,杨璐. 定向测姿系统的研究[J]. 电子技术应用,2016,42(9):14-18.
- [7] WANG Jianzhong. Vehicle attitude determination system based on vehicle GPS[J]. Revista De La Facultad De Ingeniería UCV, 2017, 32(7): 375-384.