

# 敏感轴安装偏角的误差分析与双位置标定方法

郭强,李岁劳,何颖

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710129)

**摘要:**对于光电辅助惯导系统的高精度定位定向而言,系统间敏感轴安装偏角的标定是惯导系统初始对准的关键。该文通过分析影响敏感轴安装偏角的主要因素,在不依赖外界辅助定位信息的情况下,使用双位置信息对敏感轴安装偏角进行标定。通过对误差模型进行分析,采用递推最小二乘参数辨识算法精确估计出惯导系统误差和敏感轴安装偏角。仿真结果表明,姿态估计误差优于 $0.1'$ ,敏感轴安装偏角的标定精度优于 $1'$ ,并且算法简单,实验操作方便,耗时较少,不依赖于外在环境,因此,本系统满足高精度定位定向系统的对准要求。

**关键词:**惯性导航系统;敏感轴安装偏角;双位置对准;递推最小二乘;参数辨识

**中图分类号:**TH714

**文献标识码:**A

**DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.016

## Error Analysis and Two-Position Calibration Method of Sensitive Axis Installation Angle

GUO Qiang, LI Suilao, HE Ying

(College of Automation Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** For the high-precision positioning and alignment of electro-optical aided inertial navigation system, the calibration of the sensitive axis installation angle between systems is the key to the initial alignment of the inertial navigation system(INS). Through analyzing the main influencing factors of the sensitive axis installation angle, the two-position information is used to calibrate the sensitive axis installation angle without the aid of external positioning information. The algorithm of recursive least-squares (RLS) parameter identification is used to accurately estimate the errors of inertial navigation system and the sensitive axis installation angle by analyzing the error of the model. The simulation results show that the estimation error of attitude angle is less than  $0.1'$ , the calibration accuracy of the sensitive axis installation angle is better than  $1'$ , and the algorithm is simple, easy to operate, less time consuming and independent of the external environment. Thus, the high-precision dynamic alignment requirement for the system can be satisfied.

**Key words:** INS; sensitive axis installation angle; two-position alignment; RLS; parameter identification

### 0 引言

陆用战车的作战精度、作战机动性及自主能力与其导航系统密不可分。导航系统可以为陆用战车提供快速和精确的定位定向,从而提高机动反应能力、快速隐蔽能力及精确打击能力<sup>[1-3]</sup>。本文借助光电探测系统进行光学定位定向,进而得到较高精度的方位和定位信息,然后把测得的航向信息传递给惯导系统。但是两者之间的敏感轴安装偏角量级最大可达 $0.5^\circ$ ,如果不进行标定,将严重影响航向的传递精度<sup>[4-7]</sup>。这些安装偏角均固定存在,可以通过标定的方法进行消除,因此,不同坐标系间的安装偏

角是基于光学瞄准的惯导系统初始对准技术的关键。

文献[4]中采用运动学约束与零速修正组合估计捷联惯导系统误差,进而估计出光电探测系统与捷联惯导系统之间的敏感轴安装偏角,标定精度优于 $30''$ ,但算法复杂,对车载机动要求严格,同时对惯导系统误差标定精度较低,且不够稳定。文献[5]中是将安装偏角的标定转化为对横向位置误差的标定,采用递推最小二乘算法标定出安装偏角所引起的横向位置偏差,敏感轴安装偏角的实验标定精度优于 $20''$ ,但是需使用 DGPS 来进行高精度定位作

收稿日期:2017-06-26

基金项目:航空基金资助项目(20150153002)

作者简介:郭强(1986-),男,陕西户县人,博士生,主要从事惯性导航系统和组合导航系统研究。通信作者:李岁劳(1964-),男,陕西扶风人,副教授、硕士生导师,硕士,主要从事惯性导航、组合导航的研究。

为位置基准,无法在战时使用。由于光电探测系统可以提供较高的方位对准精度,为实现惯性导航系统的高精度对准,需精确估计系统间的安装偏角。本文提出了一种安装偏角的外场双位置标定方案,利用光电探测系统提供的高精度定向信息作为双位置的姿态和航向基准,只需将载车行驶到指定标志点,进行两次原地转向,便可采用最小二乘参数辨识算法精确估计出惯导系统误差和敏感轴安装偏角,因此本系统适应于陆用战车的高精度定位定向系统的对准要求。

### 1 安装偏角模型

惯性导航测量坐标系  $O_b-x_b y_b z_b$  ( $b$  为惯导系)、光电平台测量坐标系  $O_p-x_p y_p z_p$  ( $p$  为平台系) 的位置关系为<sup>[8]</sup>

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \mathbf{C}_p^b \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{C}_p^b$  为坐标系  $O_p-x_p y_p z_p$  到  $O_b-x_b y_b z_b$  的转移矩阵,其表达式<sup>[9-11]</sup>为

$$\mathbf{C}_p^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\psi, \theta, \gamma$  分别为坐标系  $O_p-x_p y_p z_p$  到  $O_b-x_b y_b z_b$  的欧拉转角。由于光电测量平台测量坐标系与惯导测量坐标系间的安装偏角都为小角度,可以对  $\mathbf{C}_p^b$  进行小角度线性化近似。简化后只考虑航向偏角的情况下,认为坐标系  $O_p-x_p y_p z_p$  到  $O_b-x_b y_b z_b$  只经历一次航向轴的转动,其偏角的平面模型如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

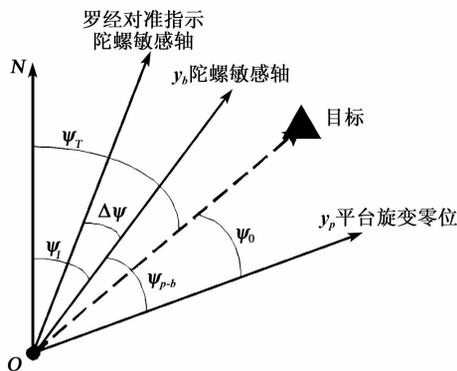


图 1 光电测量与惯导间安装偏角平面图

图 1 中,  $\psi_T$  为惯导陀螺敏感轴坐标系真实航向角;  $\Delta\psi$  为惯导罗经对准误差;  $\psi_T - \Delta\psi$  为惯导罗经对

准给出的惯导航向角;  $\psi_T$  为光电测量系统瞄准目标时的航向角,即目标航向角;  $\psi_0$  为光电测量系统瞄准目标时,平台输出的方位测量输出角,即目标方位角;  $\psi_{p-b}$  为惯导测量坐标系与光电测量系统旋变零位航向轴的安装偏角。

图 1 中各角度的关系可表示为

$$\psi_{p-b} = \psi_T + \psi_0 - \psi_I \quad (3)$$

式(3)中利用单靶标可以测得此时的  $\psi_0$ , 惯导系统进行罗经对准可测得  $\psi_I - \Delta\psi$ , 光电测量系统定靶标位置与光电测量系统位置可计算得到  $\psi_T$ , 则

$$(\psi_{p-b} + \Delta\psi_I) = \psi_T + \psi_0 - (\psi_I - \Delta\psi_I) \quad (4)$$

由式(4)可知,静止时可得到敏感轴安装偏角与惯导罗经对准误差角的和  $\psi_{p-b} + \Delta\psi_I$ , 无法分离  $\Delta\psi_I$  和  $\psi_{p-b}$ , 因此,需要运动激励来将其分离<sup>[5]</sup>。

### 2 安装偏角标定原理

本文所设计的双位置标定原理如图 2 所示。

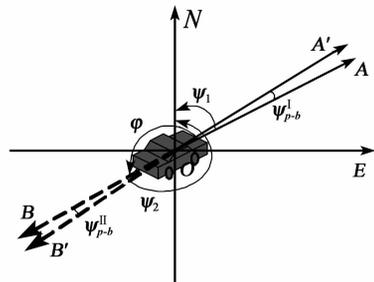


图 2 安装偏角标定原理图

标定基本流程如下:

1) 光学定位定向与惯导姿态。当载车行驶到目标点  $O$  时,在  $t_0$  时间段内光电探测系统进行 3 min 光学定位定向,得到较高精度的航向信息  $\psi_I$  和位置信息  $P_0$ , 惯性导航系统利用精确的位置信息和重力加速度信息,进行姿态对准,同时接受由光电探测系统传来的精确航向信息作为初始航向信息,因此,初始航向误差为  $\psi_{p-b}$ , 即标定目标,如图 3 所示。

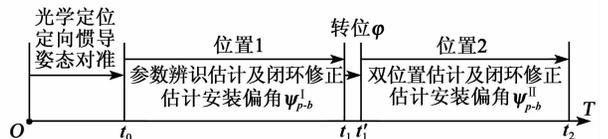


图 3 安装偏角标定流程图

2) 位置 1 参数辨识估计与修正。在光学定位定向后,由  $t_0 \sim t_1$  时间段(5 min)内采用参数辨识算法估计出惯导系统的姿态误差角和初始航向误差  $\psi_{p-b}^I$ , 对姿态误差和  $\psi_{p-b}$  进行校正,同时估计出北向陀螺漂移并记录,对惯性器件误差不进行补偿。

3) 载车转位。根据载车转位的需求,由  $t_1 \sim t_1'$

时间段(20 s)内将载车转动角度  $\varphi$ , 过程中惯导系统只进行姿态跟踪, 由于此时惯性器件误差并未得到补偿, 因此应控制时间尽可能短, 同时已知最优双位置转位角度为  $180^\circ$ , 因此需要转角  $\varphi$  尽量控制在  $180^\circ \pm 30^\circ$  范围内。

4) 位置 2 参数辨识估计与修正。在载车转位结束待稳定后, 由于转位时间较短, 则此时的初始误差角可以近似认为是位置 1 进行姿态和  $\psi_{pb}$  校正后的剩余误差, 因此, 由  $t'_1 \sim t_2$  时间段(5 min)内采用双位置参数辨识估计出惯导系统的剩余姿态误差角和敏感轴安装偏角  $\phi_{pb}^{\parallel}$ , 同时估计出水平器件误差, 并进行校正补偿。

### 3 双位置标定算法

#### 3.1 最小二乘参数辨识

进行参数辨识前需要提前已知载体的初始姿态、航向和位置信息, 此信息都可以通过光学定位定向和惯导系统姿态对准得到, 并且要求失准角均为小角度, 对准过程中载车无运动。单位置参数辨识具体算法参见文献[8], 载体的水平速度可改写为

$$\begin{cases} \Delta v_E(k) = a_{1E}(kT_s) + a_{2E}(kT_s)^2 + \\ \quad a_{2E}(kT_s)^3 + V_{DE} \\ \Delta v_N(k) = a_{1N}(kT_s) + a_{2N}(kT_s)^2 + \\ \quad a_{2N}(kT_s)^3 + V_{DN} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $T_s$  为采样周期;  $a_{ij}$  ( $i=1, 2, 3; j=E, N$ ) 为待辨识参数, 只要估计出  $a_{ij}$ , 便可以计算出其他参数, 即

$$\begin{cases} u_E = 2a_{2N}/g \\ u_N = -2a_{2E}/g \\ u_U = -6a_{3N}/(g\omega_{ie}\cos L) - 2a_{2E}\tan L/g \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $L$  为纬度值;  $g$  为重力加速度;  $\omega_{ie}$  为地球自转角速度值。

$$\begin{cases} \phi_{E0} = (a_{1N} - \nabla_N)/g \\ \phi_{N0} = (-a_{1E} + \nabla_E)/g \\ \psi_{pb} = \phi_{N0}\tan L(u_E + \epsilon_E)/(\omega_{ie}\cos L) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\nabla_N$  为北向的加速度计零偏;  $\phi_{E0}$  为东向的初始姿态对准误差;  $\phi_{N0}$  为北向的初始姿态对准误差;  $\epsilon_E$  为东向陀螺的漂移。

由式(7)可知, 在单一位置上水平加速度计零偏  $\nabla_E$  和  $\nabla_N$ ,  $\epsilon_E$  均无法估计, 因此只能忽略不计, 则单一位置上的参数估计极限精度为

$$\begin{cases} \delta\phi_{E0} = -\nabla_N/g \\ \delta\phi_{N0} = \nabla_E/g \\ \delta\psi_{pb} = \nabla_E\tan L/g - \epsilon_E/(\omega_{ie}\cos L) \end{cases} \quad (8)$$

采用最小二乘算法对  $a_{ij}$  进行参数估计, 分别取:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_E = [a_{1E} \ a_{2E} \ a_{3E}]^T \\ Z_E = \Delta V_E \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_N = [a_{1N} \ a_{2N} \ a_{3N}]^T \\ Z_N = \Delta V_N \end{cases} \quad (10)$$

递推最小二乘估计算法<sup>[8]</sup>为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + P_k \mathbf{H}_k^T (Z_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k-1}) \\ P_k = P_{k-1} - P_{k-1} \mathbf{H}_k^T (I + \\ \quad \mathbf{H}_k P_{k-1} \mathbf{H}_k^T)^{-1} \mathbf{H}_k P_{k-1} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\mathbf{H}_k = [kT_s \ (kT_s)^2 \ (kT_s)^3]^T$ , 递推算法中,  $\hat{\mathbf{X}}_k$  初值为零向量, 通常取  $P_0 = \alpha I$ , 其中  $\alpha$  为一个很大的正数。

#### 3.2 双位置标定算法

由标定原理可知, 完成位置 1 的参数辨识对准并进行误差修正补偿, 如要达到最优双位置, 应将载车转动趋近于  $180^\circ$  作为位置 2, 使用转动过程中的姿态跟踪结果作为初始姿态, 再次进行最小二乘参数辨识估计。因为转动时间较短, 惯导系统也经过精确标定, 所以可以认为载车转位前后的姿态误差角相等, 则位置 2 的初始姿态误差等于位置 1 校正后的剩余误差, 即

$$\begin{bmatrix} \phi_{E0}^{\parallel} \\ \phi_{N0}^{\parallel} \\ \psi_{pb}^{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta\hat{\phi}_{E0}^{\parallel} \\ \delta\hat{\phi}_{N0}^{\parallel} \\ \delta\hat{\psi}_{pb}^{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_N^{\parallel}/g \\ \nabla_E^{\parallel}/g \\ \nabla_E^{\parallel}\tan L/g - \epsilon_E^{\parallel}/(\omega_{ie}\cos L) \end{bmatrix} \quad (12)$$

已知载车转过的角度为  $\varphi$ , 由于姿态角  $\theta, \gamma$  均为小角度, 则在位置 1、2 之间转移矩阵中忽略其影响, 则两位置陀螺漂移间关系如下:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_E^{\parallel} \\ \epsilon_N^{\parallel} \\ \epsilon_U^{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_E^{\parallel}\cos\varphi - \epsilon_N^{\parallel}\sin\varphi \\ \epsilon_E^{\parallel}\sin\varphi + \epsilon_N^{\parallel}\cos\varphi \\ \epsilon_U^{\parallel} \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理加速度计零偏的关系也如式(13)所示。在位置 2 再次进行参数辨识估计, 也可得出一组  $a_{ij}^{\parallel}$  ( $i=1, 2, 3; j=E, N$ ), 由式(12)可得

$$\begin{bmatrix} \phi_{E0}^{\parallel} \\ \phi_{N0}^{\parallel} \\ \psi_{pb}^{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\nabla_N^{\parallel} - a_{1N}^{\parallel})/g \\ (\nabla_E^{\parallel} - a_{1E}^{\parallel})/g \\ \phi_{N0}^{\parallel}\tan L - (\epsilon_E^{\parallel} + u_E^{\parallel})/(\omega_{ie}\cos L) \end{bmatrix} \quad (14)$$

联立式(12)、(13)和式(14), 并考虑式(6)的结论可得

$$\begin{cases} \nabla_E^{\parallel} = ((M+1)a_{IE}^{\parallel} + Na_{IN}^{\parallel}) / [(M+1)^2 + N^2] \\ \nabla_N^{\parallel} = (-Na_{IE}^{\parallel} + (M+1)a_{IN}^{\parallel}) / \\ \quad [(M+1)^2 + N^2] \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \epsilon_N^{\parallel} = \hat{\epsilon}_N^{\parallel} \\ \epsilon_E^{\parallel} = (M\epsilon_N^{\parallel} + u_E^{\parallel}) / (N+1) \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$M = \frac{\sin \varphi}{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi} \quad (17)$$

$$N = \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi} \quad (18)$$

将式(15)、(16)和位置 2 估计的  $[u_E^{\parallel} \ u_N^{\parallel} \ u_U^{\parallel}]$  代入式(14)中即可求出此刻的姿态误差角和敏感轴安装偏角,同时进行姿态矩阵修正。

综上所述可得,改进的双位置参数辨识无需实验室转台,在载车上就可以直接使用,同时充分利用两个位置的参数信息,并且对陀螺漂移和加速度计零偏做了有效估计,通过下式可估计水平陀螺漂移与水平加速度计零偏并进行校正补偿:

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}_x = \hat{C}_n^{\phi}(1,1)\epsilon_E^{\parallel} + \hat{C}_n^{\phi}(1,2)\epsilon_N^{\parallel} \\ \hat{\epsilon}_y = \hat{C}_n^{\phi}(2,1)\epsilon_E^{\parallel} + \hat{C}_n^{\phi}(2,2)\epsilon_N^{\parallel} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \hat{\nabla}_x = \hat{C}_n^{\phi}(1,1)\nabla_E^{\parallel} + \hat{C}_n^{\phi}(1,2)\nabla_N^{\parallel} \\ \hat{\nabla}_y = \hat{C}_n^{\phi}(2,1)\nabla_E^{\parallel} + \hat{C}_n^{\phi}(2,2)\nabla_N^{\parallel} \end{cases} \quad (20)$$

#### 4 仿真与结果分析

通过仿真生成载车数据,0~300 s 时间内保持静止,作为位置 1 的静态数据,300~320 s 时间内载车转位 170°,320~620 s 时间内继续保持静止,作为位置 2 静态数据,其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真条件

初始位置 信息	光电系统			敏感轴安 装偏角/(°)
	定位误 差/m	定向误 差/(°)	跟踪误 差/(°)	
[38°;108°; 380 m]	0.1	20	20	30
惯导水平 姿态误 差/(°)	陀螺随机 常值漂 移/[°/h]	陀螺随机 漂移/ [°/h]	加计随机 常值零偏/ $\mu g(g=$ $9.8 \text{ m/s}^2)$	加计随机 噪声/ $\mu g(g=$ $9.8 \text{ m/s}^2)$
[5; 3]	[0.01;0.01; 0.01]	[0.01;0.01; 0.01]	[50;50; 50]	[20;20; 20]

仿真结果如图 4~6 所示。由图 4 可知,由于方差阵初值较大,曲线震荡剧烈,在位置 1 时姿态估计

误差收敛较快,100 s 以后趋于稳定,而安装偏角误差,收敛较慢,到快 300 s 时趋于稳定;而当经过转位到位置 2 后,可以发现各项参数估计收敛速度都有所提高,同时估计精度也较位置 1 结果有所提高。俯仰角误差由位置 1 的 0.21' 提高到位置 2 的 0.06';横滚角误差由位置 1 的 0.2' 提高到位置 2 的 0.055';敏感轴安装偏角标定精度由位置 1 的 2.31' 提高到位置 2 的 0.92'。由此可知,本文设计的敏感轴安装偏角算法可信有效,并且最终精度满足陆军战车的高精度定位定向需要。

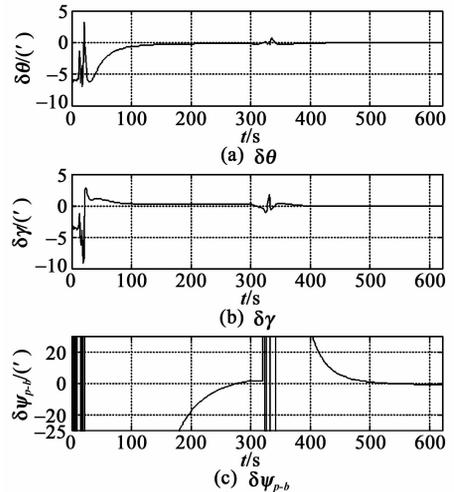


图 4 姿态估计误差和安装偏角标定误差图

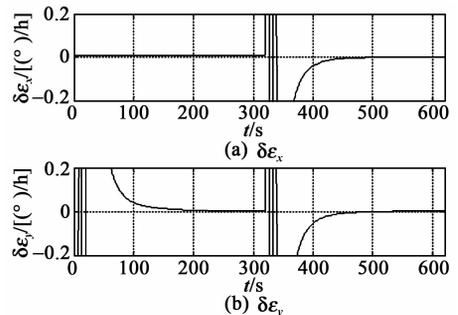


图 5 水平陀螺漂移估计误差图

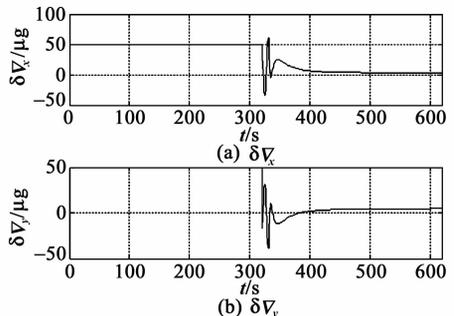


图 6 水平加速度计零偏估计误差图

由图 5 可知,x 轴陀螺在位置 1 时并未得到估计,y 轴陀螺的估计误差为 0.002 6 (°)/h;在位置 2 时 x 轴陀螺漂移得到有效估计,估计误差为

0.001 7 ( $^{\circ}$ )/h,  $y$  轴陀螺的估计误差为 0.001 5 ( $^{\circ}$ )/h。由图 6 可知,位置 1 时刻,  $x$  或  $y$  轴加速度计都未得到估计,到位置 2 后,两者都得到有效估计,  $x$  轴加速度计的估计误差为 3.22  $\mu g$ ,  $y$  轴加速度计的估计误差为 4.75  $\mu g$ 。

## 5 结束语

本文根据通过建立敏感轴的安装偏角模型,分析了影响敏感轴安装偏角的主要因素,在不依赖外界辅助定位信息的情况下,采用最小二乘参数估计的双位置算法精确估计出惯导系统的器件误差和敏感轴安装偏角。仿真结果表明,在 13 min 标定时间内,水平姿态角估计误差优于 0.1',敏感轴安装偏角标定误差优于 1',算法简单,实验操作方便,耗时较少,对外在环境依赖性小,因此本系统适应于陆用战车的高精度定位定向系统的要求。

## 参考文献:

- [1] 周晓尧,范大鹏,张智永.升降式光电探测平台定位原理与误差分析[J].宇航学报,2011,32(6):1416-1422.
- [2] PIERCE R S, ROSEN D. A Method for integrating form errors into geometric tolerance analysis[J]. Journal of Mechanical Design, 2008,130(1): 011002-1-10.
- [3] ZHOU Xiaoyao, LU Yafei, ZHANG Zhiyong, et al. Error analysis and correction of gyro-stabilized platform for electro-optical pointing system[C]//Hangzhou:2nd International Conference on Functional Manufacturing and Mechanical Dynamics, 2012,141: 264-269.
- [4] 郭强,李岁芳,王玮.光电探测系统辅助 SINS 的动态对准方法[J].仪器仪表学报,2015,36(11):2435-2442.
- [5] 郭强,李岁芳,何颖.敏感轴安装偏角的误差分析与标定方法[J].仪器仪表学报,2017,37(4):927-934.
- [6] ZHOU Weidong, JI Yuren. Application of noise estimator with limited memory index on flexure compensation of rapid transfer alignment[C]//S. I.: 2012 Proceedings of 2012 3rd International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, 2012: 1169-1173.
- [7] 王玮,王丹,冯培德.基于光电探测系统的地面车精确定位定向技术[J].北京航空航天大学学报,2007,33(8):902-905.
- [8] 付强文.车载定位定向系统关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2014.
- [9] GUO Qiang, LI Suilao. Dynamic alignment research of the dead reckoning system aided by electro-optical detection system[C]//S. I.: The 34th Chinese Control Conference, 2015,34:5292-5296.
- [10] GEORGY J, KARAMAT T, IQBAL U, et al. Enhanced MEMS-IMU/odometer/GPS integration using mixture particle filter[J]. GPS Solutions, 2011,15(3): 239-252.
- [11] 王跃刚,杨家胜,文超斌,等.车载导弹低机动条件下的传递对准[J].中国惯性技术学报,2013,21(3): 324-327.
- [12] ZENG Hongyan, SHEN Changyu, LU Yanfang. Refractiveindex sensor based on polarizationmaintaining fiber M-Z interferometer with an FBG [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015,28(11): 1727-1731.
- [13] YIN Xunli, CHENG Xuemei, FEI Kun, et al. Four-wave mixing in a polarization-maintaining fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(11): 1232-1235.
- [14] 冯新焕,孙磊,刘艳格,等.基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J].中国激光,2005,32(2):145-148.
- [15] FENG Xinhuan, SUN Lei, LIU Yange, et al. Switchable and spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(2): 145-148.
- [16] 苗飞,姜明顺,隋青美,等.保偏布喇格光纤光栅传感特性研究[J].光通信技术,2012,3(36):45-47.
- [17] MIAO Fei, JIANG Mingshun, SUI Qingmei, et al. Sensing characteristics analysis of polarization- maintaining fiber Bragg grating[J]. Optical Communication Technology, 2012,3(36):45-47.
- [18] 王伟,孟洲,杨华勇.熊猫型保偏光纤光栅温度和压力传感特性的实验研究[J].光学与光电技术,2007,5(2):35-38.
- [19] WANG Wei, MENG Zhou, YANG Huayong. Temperature and pressure sensing characteristics on panda polarization maintaining fiber Bragg grating[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007,5(2): 35-38.
- [20] 梅加纯,范典,李剑芝,等.保偏光纤双光栅传感性能的实验研究[J].光电子·激光,2005,16(4):402-404.
- [21] MEI Jiachun, FAN Dian, LI Jianzhi, et al. The study on the performance of polarization maintaining dual wavelength fiber grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005,16(4): 402-404.
- [22] 梅加纯,范典,姜德生.保偏光纤光栅温度传感性能的实验研究[J].应用光学,2006,27(2):137-139.
- [23] MEI Jiachun, FAN Dian, JIANG Desheng. Temperature sensing performance of polarization maintaining fiber Bragg grating[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 137-139.
- [24] 张艳宾.保偏光纤光栅传感特性的研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [25] 饶云江,王义平,朱涛.光纤光栅原理及应用[M].北京:科学出版社,2006:48-49.

(上接第 67 页)