

# 高精度激光多普勒测速仪在陆用自主导航系统中的应用

应智慧, 高春峰, 王琦, 魏国, 周健, 谢元平

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 为了提高陆用自主导航系统的精度和机动能力,对高精度激光多普勒测速仪(LDV)在陆用导航领域的应用进行了研究。首先对分光再利用型 LDV 的结构和基本原理进行了介绍。在分析了自研的惯性导航系统(INS)和激光测速仪优缺点的基础上,对高精度测速仪辅助惯导系统的行进间姿态矫正、动态 LDV 参数误差估计和实时误差补偿一体化技术进行了研究。理论上阐述了在惯性导航系统误差方程中引入速度可以实现行进车辆的对准和高精度的自主导航的可行性。动态跑车实验结果表明,通过加入速度修正信息,在没有停车的状态下,跑车 1.2 h,惯导系统的导航误差从 2000 m 降至 6 m 以内。理论和实验证明,通过在传统的惯导系统中加入高精度 LDV 的辅助信息,可以大大提高陆用自主导航系统的性能。

**关键词** 测量; 激光多普勒测速仪; 自主导航; 惯导系统

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1204003

## Application of High-Accuracy Laser Doppler Velocimeter in Self-Contained Land Navigation System

Ying Zhihui, Gao Chunfeng, Wang Qi, Wei Guo, Zhou Jian, Xie Yuanping

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*

**Abstract** In order to improve the accuracy and maneuverability of self-contained land navigation system, the application of high-accuracy laser Doppler velocimeter (LDV) in the field of land navigation is studied in this paper. The structure and basic principle of the split reuse-type LDV are expounded. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of the inertial navigation system (INS) and LDV which are developed by our own department, the integrated technology of marching initial alignment, dynamic calibration and real-time errors compensation are discussed in detail. Expounded in theory that the attitude correction for marching vehicles, dynamic LDV parameter error estimation and high-precision autonomous navigation can be achieved by introducing velocity into the error equation of inertial navigation system. The results of dynamic vehicle tests show that the navigation error of inertial navigation system decreases from 2000 m to 6 m in 1.2 h without parking. It is even proved by theory and experiment that the performance of land navigation system is greatly improved after the application of high-accuracy LDV in land inertial navigation system.

**Key words** measurement; laser Doppler velocimeter; self-contained navigation; inertial navigation system

**OCIS codes** 120.7250; 040.1880

## 1 引 言

由于具有自主性强、抗干扰能力强、可以全面反映载体的动态信息、有较高的短时间精度、可在全球全时

**收稿日期:** 2017-07-18; **收到修改稿日期:** 2017-08-09

**作者简介:** 应智慧(1989—),女,硕士研究生,主要从事惯性导航和组合导航方面的研究。E-mail: ZHYingnuds@163.com

**导师简介:** 谢元平(1971—),男,博士,教授,主要从事光电检测技术和惯性导航技术方面的研究。

E-mail: xyp99999@139.com

段工作等特点<sup>[1]</sup>,惯性导航系统已成为许多导航领域中的核心导航系统,被广泛应用于导弹发射车、自行火炮、远程火箭炮等多种陆用武器装备,对于增强地面部队的机动能力、生存能力、快速反应能力、目标捕获能力、协同作战能力以及远程精确打击能力等都具有不可估量的作用和意义<sup>[2]</sup>。但惯导系统的初始对准误差和传感器误差会导致系统的导航误差随时间积累,严重影响系统的长时间定位精度。为了进一步提高惯导系统的导航定位精度,各国相继研究了多种误差抑制方法,常用的有零速修正、经验平滑、区域调整以及组合导航等,其中零速修正(ZUPT)技术是抑制惯性导航系统误差发散的一种廉价的、有效的、必不可少的手段<sup>[3-4]</sup>。但采用零速修正时,要求载体每隔3~5 min停止运动一段时间,极大地降低了载体的机动性,在大部分实际应用中是很不合适的。为弥补惯导系统的动态性能缺陷,多类组合导航系统已被研发和应用。最具有代表性的就是惯性导航系统(INS)/卫星导航系统(GINS)组合导航系统<sup>[5]</sup>。但是卫星导航[全球定位系统(GPS)/北斗/全球卫星导航系统(GLONASS)/伽利略定位系统(GALILEO)]需要接收机接收卫星信号,因此惯性/卫星的组合导航系统是不属于自主导航范畴的,在有遮挡和干扰的情况下,其可靠性无法得到保障。此外,惯性/里程计组合导航的方式也广泛应用于车辆导航。里程计是通过测量车辆的车轮转动数目来计算载体的速度和距离。由于车轮打滑和温度变化无法避免,导致里程计刻度因子具有不确定性,系统每次使用前均需要对相关参数进行重新标定,造成惯性/里程计组合系统使用复杂且精度难以提高<sup>[6-8]</sup>。

因此,能够在载体正常运动的条件下完成对惯导系统各项误差的修正,且不需要向外界接受和发送信号,对提高武器装备的精度和机动性来说具有极其重要的意义,也是自主导航学科领域努力的方向。

自从1964年Yeh和Cummins证实了通过激光多普勒频移技术可以获得流体的速度以来,激光多普勒测速技术在航空航天、机械制造和医疗保健等方面都有了广泛的应用。将高精度激光多普勒测速仪(LDV)用于车载自主导航系统,从而为车式载体提供速度参数具有明显优势:1)属于非接触测量,测量过程对测量目标无干扰,利用激光良好的传输特性,还可以进行远距离测量;2)测速精度高,已研制出的高精度LDV的测量精度可达到测量值的0.08%;3)空间分辨率好,由于激光束可以聚焦在很小的区域内,所以可以测量很小体积内的速度场;4)测速范围广;5)动态响应快,速度信息以光速传播,可以进行实时测量;6)具有良好的方向灵敏度,并且可以进行多维测量<sup>[9-12]</sup>。因此,利用LDV测量载车速度以辅助惯导系统的方法,完全可以实现提高陆用自主导航系统相关性能的目的。

目前,国内外对惯性/卫星组合导航和惯性/里程计组合导航的相关研究较多,但对系统的惯性/测速仪组合导航方法的研究较少。尤其是目前国内高精度激光测速仪刚步入实用阶段,其相关性能和与惯导系统的最优组合方法均需要进行深入的研究和探讨。

本文针对LDV的基本原理以及工作特性进行了分析,从测速仪的安装方式和参数标定最优化入手,针对测速仪的比例因子和安装误差特性给出了捷联惯导系统(SINS)/LDV组合样机的设计方案,避免了系统内杆臂的影响,且有效避免了一段时间内相关参数的重复标定。

本研究利用LDV提供外测速度,参考多种组合导航的工作方式,设计了一个14阶滤波器并选取了最优滤波参数,从理论上证明了高精度激光测速仪辅助导航的可行性。在跑车实验部分,以惯导系统的解算速度与LDV的外测速度差值为观测量,实现了在载体行进过程中进行实时的动态姿态校正、测速仪相关误差的标定以及定速修正(VUPT),系统地验证了组合系统的可行性和性能。

## 2 基本原理

### 2.1 LDV基本原理

激光多普勒测速是基于光学的多普勒效应实现运动物体速度测量的技术,在车载测速领域的实现方式是利用移动粒子散射光的频移来实现速度测量。目前国际上成熟的激光多普勒的测速产品主要是针对流体速度测量,适用于车载速度测量的很少。课题组针对目前传统参考光模式光路结构光能利用率低的问题,提出了分光再利用光路结构,大幅提高了多普勒信号信噪比,更适合于实际路面上的车载自主速度测量。采用的车载LDV(自行研制)的光路结构如图1所示。其中 $\mathbf{V}$ 为探测光路方向速度矢量, $\mathbf{e}_0$ 为反射光反向的单位矢量。

激光器输出光经准直后由分光镜分为两束,一束作为探测光束,另一束作为参考光束。参考光束经中性滤波片和全反镜沿原路返回,再经分光镜、小孔光阑到达探测器表面;探测光束以与参考表面运动方向呈 $\theta$

角入射到待测表面,与探测光相反方向的表面散射光经分光镜、小孔光阑到达探测器表面,并与参考光发生混频。探测器输出的电压信号中包含多普勒频率项的多普勒信号。输出信号由数据采集卡采集并送至 PC 机处理,提取多普勒频率,进而求得载体的运动速度:

$$v = \frac{\lambda}{2 \cos \theta} f_D = \frac{1}{2 \cos \theta} \frac{c}{n f_0} f_D = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{f_0} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \cdot f_D, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光器在空气中的波长,  $f_D$  为所测得的多普勒频率,  $n$  为空气折射率,  $\theta$  为发射倾角,  $c$  为光在真空中的速度,  $f_0$  为激光输出光波的频率。所采用的车载 LDV 实物图如图 2 所示。

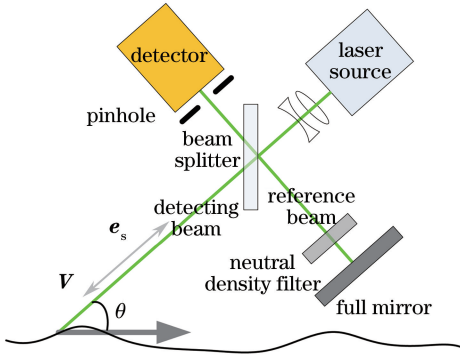


图 1 参考光束型 LDV 光路结构



图 2 LDV 样机外形

Fig. 1 Optical figure of reference beam type LDV

Fig. 2 Shape of the prototype of LDV

目前,自行研制的车载激光多普勒测速工程化样机的测速精度已达 0.082%,更新频率可达 50 Hz,为高精度 LDV 的实际应用提供了条件<sup>[13]</sup>。

### 2.2 高精度激光测速仪辅助导航的基本原理

激光测速仪在 SINS/LDV 组合系统中起着提供一个高精度外测速度的作用。惯导系统直接测量速度为系统在惯性空间中的速度,而 LDV 测量的是载体的对地速度,需要将 LDV 测量的载体对地速度转换为 SINS 的对地速度,才可以实现外测速度的基准作用<sup>[9]</sup>。因此除了测速仪和惯导系统本身的精度外,影响 SINS/LDV 组合系统精度的因素还有很多,主要包括测速仪的安装方式、SINS/LDV 系统标定等,下面分别进行分析。

1) LDV 安装方式。SINS 与测速仪均为直接固联在载体上,但目前惯导系统存在减震结构,必然存在惯导与测速仪敏感速度不同步问题,最明显的就是测速仪输出速度包含载体的高频抖动。因此,如果要提高对准精度,必须对测速仪输出速度进行预滤波或深化 SINS/LDV 组合系统的一体化设计。

2) SINS/LDV 系统标定。实际应用中,当测速仪和惯导系统在载车上安装完毕后,必须对测速仪的标度因数  $k_{LDV}$ 、测速仪与惯导系统间的安装差角  $\theta_{S,L}$  以及测速仪与惯导系统的安装杆臂  $r_{SINS-LDV}$  进行标定,如图 3 所示。其中  $x_{bLDV}, y_{bLDV}, z_{bLDV}$  分别表示测速仪所在载体坐标系,  $x_{bSINS}, y_{bSINS}, z_{bSINS}$  分别表示惯导系统所

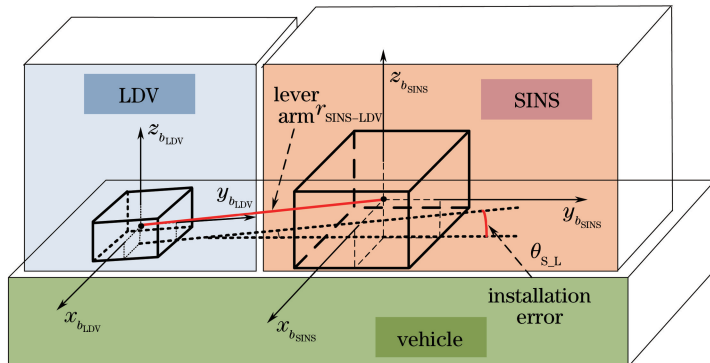


图 3 SINS/LDV 组合系统安装误差示意图

Fig. 3 Installation error of SINS/LDV integrated system

在的坐标系。

如果 LDV 标度因数  $k_{LDV}$  和安装误差角  $\delta\theta_{S-L}$  标定不准确,会直接导致输出外测速度存在误差,造成行进间对准误差增大;杆臂补偿不完全会导致杆臂效应,在载体转弯或大机动时测速仪和惯导经历不同速度。因此,准确标定测速仪和惯导系统的相关安装误差是高精度导航的基础。在 SINS/LDV 组合系统的设计过程中也充分考虑了对相关误差的简化,实际设计的 SINS 和激光测速仪样机系统是将惯导系统和测速仪的中心安装在同一垂线上,基本避免了杆臂的影响;其次是将两者通过同一安装框体进行固联,保证了系统的安装关系在短时间内变化很小,避免了每次使用需要重复标定的问题,如图 4 所示。

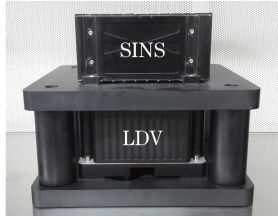


图 4 SINS/LDV 组合系统样机

Fig. 4 Prototype of the SINS/LDV integrated system

行进间对准和定速修正是利用惯导系统和 LDV 的输出速度差值作为观测量,实现对惯导系统的姿态和定位误差的校正。研究采用扩展卡尔曼滤波的方式,通过滤波器跟踪内部状态变化过程,对惯导系统的姿态信息、位置信息以及惯导和测速仪的相关安装关系进行滤波估计,以实现提高陆用自主导航系统精度的目的,原理如图 5 所示。其中  $f_b, w_b$  分别表示惯导输出的比力加速度和角速度; $V_{INS}$  表示惯导系统的测量速度, $V_{LDV}$  表示测速仪的测量速度。

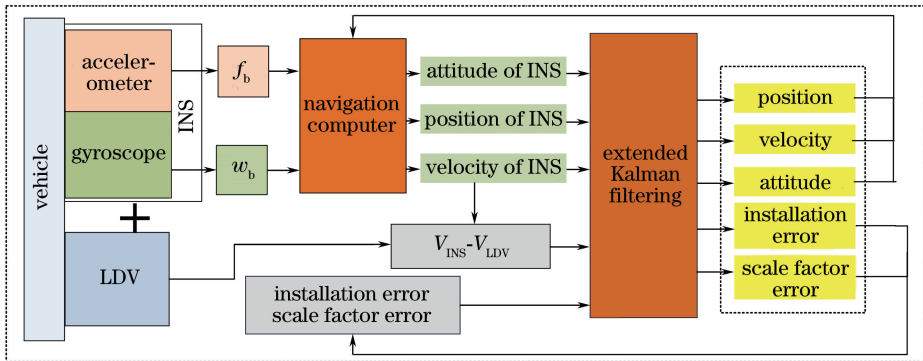


图 5 组合系统卡尔曼滤波原理图

Fig. 5 Principle diagram of Kalman filter of integrated system

对于 SINS,选择东北天坐标系作为导航坐标系,在导航坐标系下系统的误差模型<sup>[14]</sup>为

$$\begin{cases} \delta\dot{\phi} = -\delta\dot{\omega}_{ib}^n + \delta\omega_{in}^n + (\phi \times)\omega_{in}^n \\ \delta\dot{V}^n = -(\phi \times)C_b^n f^b + V^n \times (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) + \delta V^n \times (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + C_b^n \nabla^b \\ \delta\dot{L} = \frac{\delta V_N}{R_M + h} \\ \delta\dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{R_N + h} \sec L + \delta L \frac{V_E}{R_N + h} \tan L \sec L \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\delta\phi, \delta V^n, \delta L, \delta\lambda$  分别为惯导系统的姿态误差、速度误差、纬度误差和经度误差,  $C_{bn}$  为惯导系统测量得到的在载体系 ( $b$  系) 至导航坐标系 ( $n$  系) 的姿态变换矩阵,  $\omega_{ab}^c$  表示在  $c$  系中观测的  $b$  系统  $a$  系转动的角速度,  $V_N$  和  $V_E$  表示惯导的北向速度和东向速度,  $R_N$  和  $R_M$  分别是地球的卯西圈半径和子午圈半径。根据误差模型,选取失准角 ( $\delta\phi_E, \delta\phi_N, \delta\phi_U$ )、水平速度误差 ( $\delta V_E^n, \delta V_N^n$ ) 和位置误差 ( $\delta L, \delta\lambda$ )、陀螺漂移 ( $\epsilon_E, \epsilon_N, \epsilon_U$ ) 和水平加速度计的零偏 ( $\nabla_E, \nabla_N$ ) 以及 LDV 的比例因子误差 ( $\Delta K$ ) 和安装误差 ( $\Delta\theta$ ) 构成 14 维卡尔曼滤波器,



状态量如下:

$$\mathbf{X} = [\delta\phi_E \quad \delta\phi_N \quad \delta\phi_U \quad \delta V_E^n \quad \delta V_N^n \quad \delta L \quad \delta\lambda \quad \nabla_E \quad \nabla_N]^\top. \quad (3)$$

滤波器观测方程为惯导解算速度  $\hat{v}^n$  与测速仪测量速度  $v_{LDV}^n$  之差,得到定速修正状态方程和观测方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \\ \mathbf{Z} = [(\hat{v}^n)^\top - (\mathbf{C}_b^n \cdot v_{LDV}^n)^\top]^\top = \mathbf{H}_v\mathbf{X} + \mathbf{V} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\mathbf{W}$  为系统噪声向量,  $\mathbf{G}$  为输入矩阵,  $\mathbf{H}_v$  为观测矩阵,  $\mathbf{V}$  为观测噪声向量。系统矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} & \mathbf{F}_{13} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & -\mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} & \mathbf{F}_{23} & \mathbf{F}_{24} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{F}_{32} & \mathbf{F}_{33} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{5 \times 3} & \mathbf{0}_{5 \times 2} & \mathbf{0}_{5 \times 2} & \mathbf{0}_{5 \times 2} & \mathbf{0}_{5 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{式中 } \mathbf{F}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & A & -B \\ -A & 0 & -V_N/R_M \\ B & V_N/R_M & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -1/R_M \\ 1/R_N & 0 \\ \tan L/R_N & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{21} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -f_U & f_N \\ f_U & 0 & -f_E \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{22} = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L}{R_N} & A + \omega_{ie} \sin L \\ -2A & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{23} = \begin{bmatrix} \omega_{ie} V_N \cos L + C \cdot V_N & 0 \\ -V_E \omega_{ie} \cos L + C \cdot V_E & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{24} =$$

$$\begin{bmatrix} C_{b_{11}}^n & C_{b_{12}}^n \\ C_{b_{21}}^n & C_{b_{22}}^n \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 1/R_M \\ \sec L/R_N & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{V_E \sin L}{R_N \cos^2 L} & 0 \end{bmatrix}。 \text{其中 } A = \omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N}, B =$$

$$\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N}, C = \omega_{ie} \cos L + V_E \sec^2 L/R_N。$$

选取适当的滤波参数,就可以得到各状态的最优估计值并进行补偿。

姿态补偿:

$$\mathbf{C}_b^n = (\mathbf{I}_3 + [\phi \times]) \tilde{\mathbf{C}}_b^n. \quad (6)$$

定位误差补偿:

$$L = \tilde{L} - \delta L, \lambda = \tilde{\lambda} - \delta\lambda, h = \tilde{h} - \delta h. \quad (7)$$

LDV 参数补偿:

$$K = \tilde{K} - \Delta K, \theta = \tilde{\theta} - \Delta\theta. \quad (8)$$

### 3 实验方案及结果分析

在设计了合理的组合滤波器的基础上,进行了激光测速仪辅助的激光惯导定速修正技术的跑车验证试验。样机在湖南省长沙市进行了跑车实验,主要实验设备有 GPS 接收机(定位精度为  $\pm 5$  m),自研的 SINS/LDV 组合系统样机(采用的惯导系统型号为 POS,陀螺仪的零偏稳定性为  $0.008^\circ/\text{h}$ ,随机游走为  $0.001^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ,石英加速度计的零偏稳定性在  $0.5$  mg 以内,LDV 的测速精度为  $0.1\%$ )。将测速仪与惯导系统安装在载车上,利用 LDV 的输出速度作为外测速度,GPS 仅提供位置基准作用。实验设备如图 6 所示。

实验过程前 300 s 为惯导系统的静态粗对准过程,粗对准完成后载车发动行驶,组合系统进入工作状态。载车行驶过程中全程不停车,速度输出图 7 所示。

由图 7 可见,跑车全程的平均速度在  $15$  m/s 左右,最高车速达到  $27$  m/s。在跑车全程有多处快速加减速过程,对测速仪的动态测速精度和 SINS/LDV 组合系统的动态性能均有很好的验证作用。实验过程中,对测速仪的比例因子误差  $\Delta K$  和安装误差  $\Delta\theta$  进行估计,并采用(6)式和(7)式的误差补偿方法对其估计误差进行补偿,结果如图 8 和图 9 所示。

图 8 和图 9 分别为测速仪的动态标定结果的收敛过程。由图 8 可见,测速仪的比例因子误差的收敛速

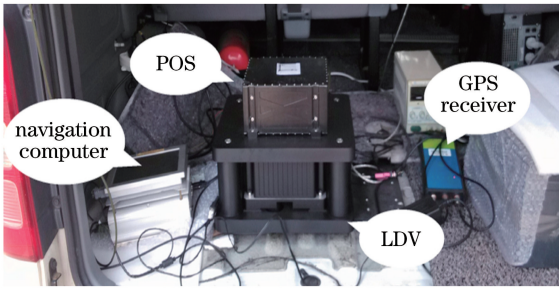


图 6 跑车实验设备

Fig. 6 Experimental equipments of dynamic vehicle

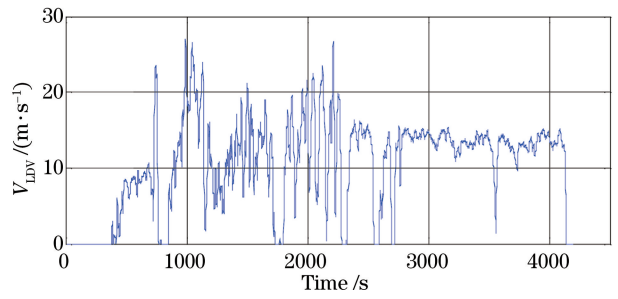


图 7 LDV 输出速度

Fig. 7 Output velocity of LDV

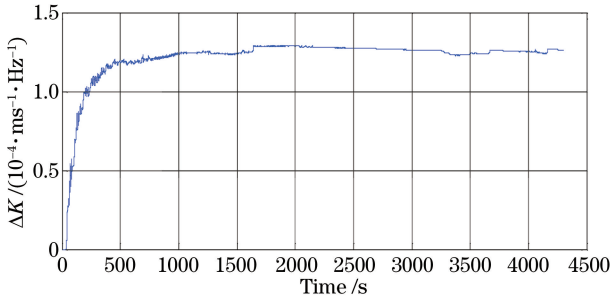


图 8  $\Delta K$  的动态标定结果

Fig. 8 Dynamic calibration result of  $\Delta K$

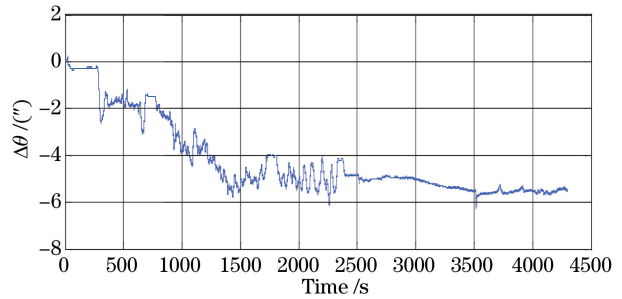


图 9  $\Delta\theta$  的动态标定结果

Fig. 9 Dynamic calibration result of  $\Delta\theta$

度较快,在 30 min 左右已经趋于收敛,估计值为  $1.25 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。由图 9 可见,测速仪安装误差的收敛速度较慢,在 1 h 左右才趋于收敛,且整个滤波过程中误差值有明显的波动,估计值为  $-5.27''$ ;这是由于安装误差和惯导系统的姿态误差有一定的耦合关系,因此收敛速度较慢。

载车在开始行驶后,定速修正以 10 min 为周期进行。实验路径设计时采用了基本单方向不调头的路径,这样可以有效避免往返行驶时误差抵消的影响。以 GPS 输出位置结果为基准,将纯惯性导航结果与定速修正定位结果进行对比,如图 10 所示。

由图 10 可明显看到,在全路段,纯惯性定位误差较大,而定速修正结果与基本 GPS 定位结果较吻合。为更加清晰地进行对比,此处分别列出纯惯性和定速修正与 GPS 定位结果对比的定位误差。4300 s 纯惯性导航定位误差如图 11 所示。



图 10 定位结果对比

Fig. 10 Comparison of location results

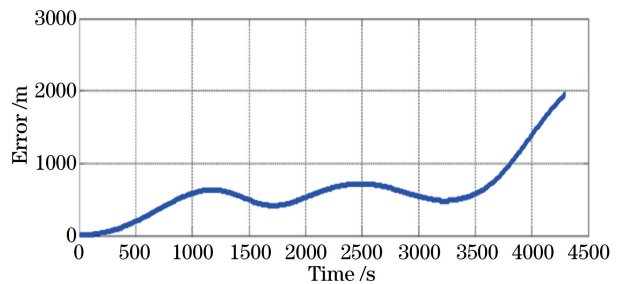


图 11 纯惯性导航误差

Fig. 11 Navigation error of INS

在纯惯性导航 4300 s 内,定位误差发散趋势明显,在 4300 s 处导航误差最大值为 2100 m。采用 2.2 节所述的定速修正导航误差结果如图 12 所示。

从图 12 可见,定速修正导航 4300 s,修正后定位误差在 6 m 以内,且全程位置误差不发散。由于实验过程中没有姿态基准,因此无法对组合算法的姿态矫正性能进行量化评估。但是在位置修正结果中,每次修正一段时间后纯惯性导航过程中系统的定位误差增大幅度均较小,故认为系统的姿态误差在修正后也保持在小量。实验结果表明,定速修正可以在保证载体机动性的前提下大幅提高导航精度,有一定的实用意义。

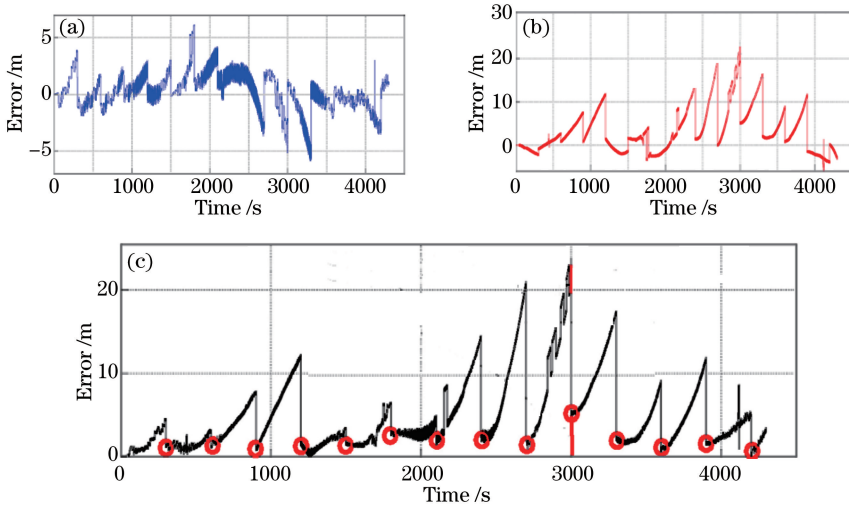


图 12 定速修正导航误差结果。(a)定速修正东向位置误差;(b)定速修正北向位置误差;(c)定速修正位置误差  
 Fig. 12 Navigation error of VUPT. (a) East position error of VUPT; (b) north position error of VUPT;  
 (c) position error of VUPT

根据 2.1 节中的 SINS/LDV 组合样机的设计方案,由于惯导系统和测速仪采用固联的方式,且测速仪的比例因子受温度影响相对较小,因此可以认为系统在经一次标定后,测速仪的相关参数在一段时间内变化不大,即可实现一段时间内的免标定。免标定的时间范围将在后续的工作中进行研究。此外,在后续工作过程中会考虑加入姿态基准,进行测速仪对惯导系统的姿态修正能力的量化评估。

## 4 结 论

以教研室自研的高精度激光测速仪为依托,在传统零速修正的基础上开展了 SINS/LDV 组合系统的定速修正的相关研究。理论及实验结果表明,在高精度激光测速仪提供的外测速度的基础上,通过扩展卡尔曼滤波的方法可以对导航系统的相关误差进行有效估计和补偿。在 SINS/LDV 组合系统不向外界发送和接收任何信息的情况下,实现了车载惯导系统的高精度自主导航,解决了惯导系统的误差发散问题,而且避免了传统零速修正需要停车等缺陷,大幅提高了惯导系统的导航定位精度和机动性,为长时间高精度陆用自主定位定向提供了技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] Scheduling S, Dissanayake G, Nebot E M, *et al.* An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(1): 85-95.
- [2] Gao C F, Wei G, Zhou J, *et al.* Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained navigation[C]. SPIE, 2015, 9525: 95252A.
- [3] Yang Yucui, Yu Along, Zhu Yanhua. Research on "zero velocity update" technology applied in missile launching vehicle based on Kalman filter [J]. Electrical Automation, 2010, 32(1): 1-3.  
 杨裕翠, 俞阿龙, 祝燕华. 基于卡尔曼滤波器的零速修正技术在导弹发射车中的应用研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(1): 1-3.
- [4] Bristeau P J, Petit N, Praly L. Design of a navigation filter by analysis of local observability[C]. Decision and Control of IEEE, 2010, 58(8): 1298-1305.
- [5] Zhang Zhongping, Cheng Zhien, Zhang Haifeng, *et al.* Global laser ranging observation of Beidou satellites and data application[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(4): 0404004.  
 张忠萍, 程志恩, 张海峰, 等. 北斗卫星全球激光测距观测及数据应用[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0404004.
- [6] Wang W, Wang D. Land vehicle navigation using odometry/INS/vision integrated system[C]. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2008: 754-759.
- [7] Kleinhempel W. Automobile Doppler speedometer[C]. Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1993:

509-512.

- [8] Yan Gongmin. Research of vehicle autonomous position and azimuth determining system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.  
严恭敏. 车载自主定位定向系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [9] Zhou Jian. Preliminary study on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.  
周健. 用于车载自主导航激光多普勒测速仪的初步研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [10] Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1316-1321.  
周健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪 [J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1316-1321.
- [11] Wei Guo, Wang Yu, Zhou Jian, *et al.* Vehicle integrated navigation based on laser Doppler velocimeter [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 49-53.  
魏国, 王宇, 周健, 等. 基于激光多普勒测速仪的车载组合导航 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 49-53.
- [12] Nie Xiaoming. Research on laser velocimeter for vehicle self-contained navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.  
聂晓明. 用于车载自主导航系统激光测速技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [13] Gao C, Wang Q, Wei G, *et al.* A highly accurate calibration method for terrestrial laser Doppler velocimeter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2017, 66(8): 1994-2003.
- [14] Gao Zhongyu. Kalman filter design of inertial positioning system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(4): 5-9.  
高钟毓. 惯性定位系统的卡尔曼滤波器设计 [J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(4): 5-9.