

车载 SINS/1D-LDV 杆臂误差在线标定算法

张涛^{1,2}, 聂晓明^{1,2}, 周健^{1,2*}, 王琦^{1,2}, 向志毅^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对在一维激光多普勒测速仪(one-dimensional laser Doppler velocimeter, 1D-LDV)和捷联惯导系统(strapdown inertial navigation system, SINS)构成的车载组合导航系统中,由于两者安装位置不同存在的杆臂速度误差问题,提出一种卡尔曼滤波在线标定算法对安装杆臂进行标定并补偿。通过引入在载体行进过程中速度方向始终保持载体行进方向的点,对传统杆臂速度误差模型进行了改进,使其能够准确反映1D-LDV与SINS输出的量测速度间的真实关系。车载实验结果表明,该标定算法能够有效标定1D-LDV与SINS间的杆臂误差。将经过杆臂误差补偿的1D-LDV量测速度与SINS的陀螺数据进行航迹推算,两组实验所得的水平定位误差由8.80 m和6.60 m分别降至7.07 m和5.48 m,在一定程度上提高了导航定位精度。

关键词:组合导航;一维激光多普勒测速仪;杆臂误差;标定算法

中图分类号:TN249 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2025)05-086-08



论
文
拓
展

Online calibration algorithm of vehicle-mounted SINS/1D-LDV lever-arm error

ZHANG Tao^{1,2}, NIE Xiaoming^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2*}, WANG Qi^{1,2}, XIANG Zhiyi^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the problem that the lever-arm velocity error between the measured speeds of 1D-LDV (one-dimensional laser Doppler velocimeter) and SINS (strapdown inertial navigation system) caused by their different installation positions in the vehicle-mounted integrated navigation systems composed of 1D-LDV and SINS, an online calibration algorithm based on Kalman filter was proposed to calibrate and compensate the mounting lever-arm. By introducing a reference point that maintains alignment between the velocity direction and the carrier's direction of motion during movement, the traditional lever-arm velocity error model was improved, so that it can accurately characterize the actual relationship between the measured velocities from the 1D-LDV and SINS. The vehicle experiment results show that the calibration algorithm can effectively calibrate the arm error between 1D-LDV and SINS. By using the 1D-LDV measured velocity (after lever-arm error compensation) and the gyroscopic data from the SINS to perform dead reckoning, the horizontal positioning errors in two experimental trials are reduced from 8.80 m and 6.60 m to 7.07 m and 5.48 m respectively, demonstrating a moderate improvement in navigation and positioning accuracy.

Keywords: integrated navigation; one-dimensional laser Doppler velocimeter; lever-arm error; calibration algorithm

捷联惯性导航系统以其自主性强、高隐蔽性和抗干扰能力强等优秀性质,在车载导航领域得到了广泛应用。然而,由于捷联惯导系统(strapdown inertial navigation system, SINS)中惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)存在测量误差,纯惯性导航系统的定位误差随时间推移会不断累积,并呈现振荡发散趋势,无法满足长时间、高精度的导航定位需求,将多种导航

系统融合进行组合导航已成为当前惯性导航技术发展的主流趋势^[1]。目前常用于与SINS构成组合导航系统的传感器包括全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、里程计(odometer, OD)等^[2-3]。其中:GNSS的定位依赖外部卫星信号,当导航场景为山林、隧道等卫星信号拒止场景时,GNSS将无法正常工作,可靠性和自主性差^[4];OD在车轮发生磨损、打滑、

收稿日期:2025-01-19

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30782)

第一作者:张涛(2000—),男,四川巴中人,硕士研究生,E-mail:1786384585@qq.com

*通信作者:周健(1983—),男,江苏盐城人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:wttzhoujian@163.com

引用格式:张涛,聂晓明,周健,等. 车载 SINS/1D-LDV 杆臂误差在线标定算法[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(5): 86-93.

Citation: ZHANG T, NIE X M, ZHOU J, et al. Online calibration algorithm of vehicle-mounted SINS/1D-LDV lever-arm error[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(5): 86-93.

空转等情况时会引入测量误差,且其误差参数在每次使用时往往需要重新标定,测量精度较低^[5]。

激光多普勒测速仪作为一种高精度的速度传感器,具有完全自主、测速范围宽以及非接触测量、误差参数稳定等诸多优点,且其测速误差不随时间累积,与 SINS 具有很强的互补性^[6]。在合理补偿两种传感器之间的安装误差参数后,通过构造 SINS/激光多普勒测速仪(laser Doppler velocimeter, LDV)车载组合导航系统能够有效提高组合导航的定位精度^[7-9]。

目前,研究人员关于组合导航过程中 LDV 量测速度的主要误差参数(比例因子误差、安装角误差和杆臂误差)的标定方案已经进行了大量深入的研究工作。传统的标定方案大多在静置条件下通过高精度转台装置对 LDV 的比例因子和安装角进行标定^[10],这种方法具有较高的标定精度,但不能进行实时标定,且无法对 LDV 与 SINS 间的杆臂误差进行有效标定,因此存在较大的局限性。针对传统标定方案的不足,部分研究人员通过利用 SINS、卫星导航系统等不同类型传感器提供速度信息,并采用卡尔曼滤波等方法对 LDV 的误差参数进行在线标定,从而降低了标定过程对特定标定环境的依赖性^[11-16]。在文献[13]中,崔耀星等采用 LDV 与 SINS 两者测量中心处的速度构造 LDV 的杆臂速度误差模型,将 LDV 的比例因子误差、安装角误差和杆臂误差作为误差状态量提出了 21 维的卡尔曼滤波标定算法,并通过车载实验对 LDV 的 3 种误差参数进行了有效估计,估计结果与标定值相近。

然而,一维激光多普勒测速仪(one-dimensional laser Doppler velocimeter, 1D-LDV)本质上作为一种单轴传感器,只能获取测量中心处的前向速度信息,因此当 1D-LDV 量测中心处的速度存在侧向或天向速度分量时,文献[13]中的杆臂速度误差模型将无法反映 1D-LDV 与 SINS 输出的量测速度间的真实关系。为准确标定 1D-LDV 与 SINS 间的杆臂误差,需要对现有误差模型进行改进。

本文首先分析了在车载导航环境下,1D-LDV 与 SINS 的量测速度之间存在的杆臂速度误差;随后构建了包括杆臂误差参数在内的 23 维卡尔曼滤波模型;最后利用滤波标定所得参数对 LDV 的量测速度进行补偿并进行航迹推算,实验结果证明了本文所提标定算法的有效性。

1 1D-LDV 杆臂速度误差模型

1.1 坐标系定义

所涉及的坐标系定义如下:LDV 测量坐标系(m 系)和惯组坐标系(b 系)均为“右-前-上”坐标系,前者与车身框架重合,后者由 IMU 确定;车载导航坐标系(n 系)为“东-北-天”坐标系;地球坐标系为 e 系,惯性坐标系为 i 系。

为便于分析讨论,下文假定 LDV 的比例因子误差和安装角误差已经过事先精确标定,即 LDV 与 SINS 输出的量测速度间仅存在杆臂速度误差。

1.2 量测中心杆臂速度误差分析

LDV 和 IMU 测量中心杆臂关系如图 1 所示。图中,LDV 的测量中心 O_m 相对于地心 O_e 的位置矢量记为 R_{me} ,IMU 的测量中心 O_b 相对于地心 O_e 的位置矢量记为 R_{be} ,LDV 与 IMU 测量中心的相对距离矢量记作 δl_{mb} ,即杆臂矢量。在 m 系下,三者满足矢量关系:

$$R_{me}^m = R_{be}^m + \delta l_{mb}^m \quad (1)$$

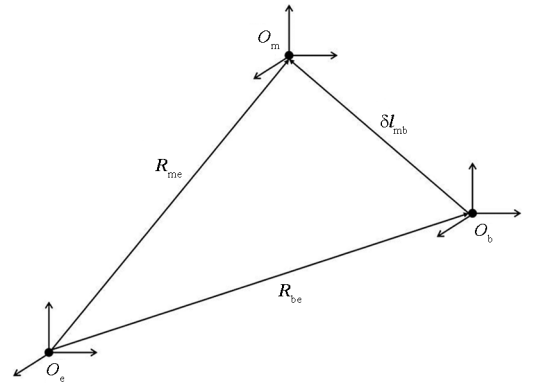


图 1 LDV 与 IMU 测量中心杆臂关系

Fig. 1 Relationship between LDV and IMU measurement center lever-arm

车载导航过程中,由于 LDV 与 IMU 均固连于载体上,忽略车体弹性形变影响,两者间的相对位置关系基本保持不变,因而杆臂 δl_{mb}^m 可视为常矢量。对式(1)两端相对 e 系进行求导,有:

$$\left. \frac{dR_{me}^m}{dt} \right|_e = \left. \frac{dR_{be}^m}{dt} \right|_e + \left. \frac{d(\delta l_{mb}^m)}{dt} \right|_e = \left. \frac{dR_{be}^m}{dt} \right|_e + \omega_{eb}^m \times \delta l_{mb}^m \quad (2)$$

式(2)可进一步转化为:

$$\begin{aligned} v_{O_m}^m &= v_{O_b}^m + \omega_{eb}^m \times \delta l_{mb}^m \\ &= v_{O_b}^m + \begin{bmatrix} -\omega_{eb,z}^m \delta l_{mb,y}^m + \omega_{eb,y}^m \delta l_{mb,z}^m \\ \omega_{eb,z}^m \delta l_{mb,x}^m - \omega_{eb,x}^m \delta l_{mb,z}^m \\ -\omega_{eb,y}^m \delta l_{mb,x}^m + \omega_{eb,x}^m \delta l_{mb,y}^m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $v_{O_m}^m$ 和 $v_{O_b}^m$ 分别为 LDV 和 IMU 测量中心处的地速在 m 系下的投影； ω_{eb}^m 为 b 系相对于 e 系的角速度在 m 系下的投影。由式(3)可以看出，由于存在杆臂矢量，当载体存在关于某一坐标轴的角运动时， O_m 与 O_b 处的速度会在与该坐标轴垂直的平面内产生差值，即杆臂速度误差，且差值的大小与载体的角运动和杆臂值大小有关。

1.3 修正后的 1D-LDV 杆臂速度误差模型

由于 1D-LDV 为单轴传感器，只能提供载体在轨迹行进方向上的速度信息，因此在实际应用时需要基于非完整性约束 (nonholonomic constraints, NHC) 假设原则对 LDV 输出的量测速度进行维度扩展。假定车式载体满足 NHC 原则，且实际行进速度大小为 v_{real} ，则 LDV 输出的量测速度在 m 系下可表示为：

$$v_{LDV}^m = v_{O_m}^m = [0 \quad v_{real} \quad 0]^T \quad (4)$$

从式(3)中可以看出，当载体进行角运动时，由于存在杆臂速度误差，即使载体运动满足 NHC 假设原则，LDV 测量中心处的速度 $v_{O_m}^m$ 通常也存在天向和侧向速度分量，则此时 LDV 输出的量测速度 v_{LDV}^m 与 $v_{O_m}^m$ 间将存在差值。由于载体做角运动时无法得知 $v_{O_m}^m$ 的天向和侧向速度分量信息，不能进行补偿，因此直接采用 LDV 和 IMU 测量中心处的杆臂速度误差模型描述两者输出速度间的关系是不恰当的。为分析讨论 LDV 和 SINS 输出速度之间的杆臂速度误差，考虑引入载体上速度方向始终沿载体行进方向的一点作为辅助，关于该点的选取分析如下：

由于 LDV 与 IMU 均固连于载体，可将车辆整体视为刚体。车式载体的转向运动通常符合阿克曼转向几何原理，即后轮为驱动轮，前轮为转向轮^[17]。在转向过程中，全部车轮均绕一个瞬时中心点做圆周运动，如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，当车辆进行转向运动时，载体上任意一点均关于瞬时中心做圆周运动，且速度方向沿所在点运动轨迹的切线方向。其中，位于过车辆两后轮轴线且垂直于地面的面上的所有点的速度方向始终与车体前进方向相同，而其他位置处的速度均存在沿车体侧向的速度分量。

车式载体在进行横滚和俯仰角运动时各点的速度关系较为复杂，但考虑车式载体在行驶过程中的水平姿态角变化通常很小，且持续时间较短，不同点处存在的杆臂速度误差较小，因此做如下近似：当载体发生横滚角运动时，过载体重心且垂直于载体侧向轴的面上的所有点只有前向速度；

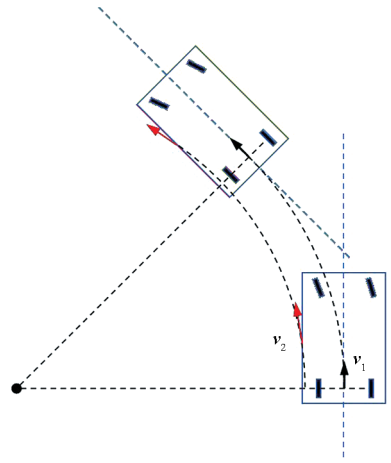


图 2 车式载体天向角运动

当载体发生俯仰角运动时，过载体重心且垂直于载体天向轴的面上的所有点只有前向速度。

由上述分析可知，当载体做角运动和直线运动时，所述三个面的交点处始终只有前向速度。将该点记为载体中心 O_g ，其相对于地心 O_e 、IMU 测量中心 O_b 和 LDV 测量中心 O_m 的位置矢量分别记作 R_{ge} 、 δl_{bg} 和 δl_{mg} ，如图 3 所示。

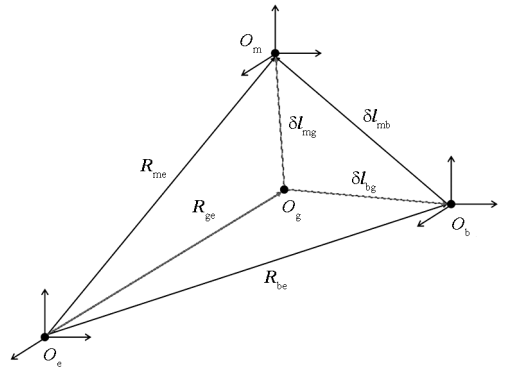


图 3 LDV、IMU 测量中心与载体中心杆臂关系

Fig. 3 Relationship between LDV, IMU measurement center and carrier center lever-arm

显而易见，点 O_g 处的地速 $v_{O_g}^m$ 与 $v_{O_b}^m$ 、 $v_{O_m}^m$ 间满足关系：

$$v_{O_b}^m = v_{O_g}^m + \omega_{eb}^m \times \delta l_{bg}^m$$

$$= v_{O_g}^m + \begin{bmatrix} -\omega_{eb,z}^m \delta l_{bg,y}^m + \omega_{eb,y}^m \delta l_{bg,z}^m \\ \omega_{eb,z}^m \delta l_{bg,x}^m - \omega_{eb,x}^m \delta l_{bg,z}^m \\ -\omega_{eb,y}^m \delta l_{bg,x}^m + \omega_{eb,x}^m \delta l_{bg,y}^m \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$v_{O_m}^m = v_{O_g}^m + \omega_{eb}^m \times \delta l_{mg}^m$$

$$= v_{O_g}^m + \begin{bmatrix} -\omega_{eb,z}^m \delta l_{mg,y}^m + \omega_{eb,y}^m \delta l_{mg,z}^m \\ \omega_{eb,z}^m \delta l_{mg,x}^m - \omega_{eb,x}^m \delta l_{mg,z}^m \\ -\omega_{eb,y}^m \delta l_{mg,x}^m + \omega_{eb,x}^m \delta l_{mg,y}^m \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)与式(6)相减实际便得到了 \mathbf{v}_{ob}^m 与 \mathbf{v}_{om}^m 之间的杆臂速度误差模型。不考虑其他测速误差,则由 1D-LDV 输出的速度 \mathbf{v}_{LDV}^m 实际为 \mathbf{v}_{om}^m 的前向速度分量,而由 SINS 解算输出的速度 \mathbf{v}_{SINS}^m 等于 \mathbf{v}_{ob}^m 。 \mathbf{v}_{LDV}^m 、 \mathbf{v}_{SINS}^m 和 \mathbf{v}_{og}^m 满足关系:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{LDV}^m &= \mathbf{v}_{om}^m - \begin{bmatrix} v_{om,x}^m \\ 0 \\ v_{om,z}^m \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{v}_{og}^m + \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega}_{eb,z}^m \delta l_{mg,x}^m - \boldsymbol{\omega}_{eb,x}^m \delta l_{mg,z}^m \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{v}_{SINS}^m &= \mathbf{v}_{ob}^m = \mathbf{v}_{og}^m + \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\omega}_{eb,z}^m \delta l_{bg,y}^m + \boldsymbol{\omega}_{eb,y}^m \delta l_{bg,z}^m \\ \boldsymbol{\omega}_{eb,z}^m \delta l_{bg,x}^m - \boldsymbol{\omega}_{eb,x}^m \delta l_{bg,z}^m \\ -\boldsymbol{\omega}_{eb,y}^m \delta l_{bg,x}^m + \boldsymbol{\omega}_{eb,x}^m \delta l_{bg,y}^m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

(8)

联立式(7)和式(8),可得 LDV 的输出量测速度与 SINS 解算速度之间的杆臂速度误差模型为:

$$\mathbf{v}_{LDV}^m = \mathbf{v}_{SINS}^m - \boldsymbol{\omega}_{eb}^m \times \delta \mathbf{l}_{bg}^m + \mathbf{C}_\omega \begin{bmatrix} \delta l_{mg,x}^m \\ \delta l_{mg,z}^m \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \boldsymbol{\omega}_{eb,z}^m & -\boldsymbol{\omega}_{eb,x}^m \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

从式(9)可以看出,1D-LDV 与载体中心之间的前向杆臂 $\delta l_{mg,y}^m$ 对杆臂速度误差没有贡献,因此在标定和补偿时可以予以忽略。

2 标定算法设计

考虑 LDV 量测速度的比例因子误差和安装角误差,可得 n 系下 LDV 的量测速度误差模型:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{v}}_{LDV}^n &= (1 + \delta k) \mathbf{v}^n + \mathbf{v}^n \times \boldsymbol{\phi} + \mathbf{C}_v \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_z \end{bmatrix} - \\ &\mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_m^b \left(\boldsymbol{\omega}_{eb}^m \times \delta \mathbf{l}_{bg}^m - \mathbf{C}_\omega \begin{bmatrix} \delta l_{mg,x}^m \\ \delta l_{mg,z}^m \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_v = v_{real} \begin{bmatrix} -C_{13} & C_{11} \\ -C_{23} & C_{21} \\ -C_{33} & C_{31} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: \mathbf{v}^n 为载体真实速度在 n 系下的投影; δk 为 LDV 量测速度的比例因子误差; φ_x, φ_z 分别为 m 系相对于 b 系的俯仰角误差和方位角误差; $\mathbf{C}_b^m, \mathbf{C}_m^b$ 分别为 b 系到 m 系和 m 系到 b 系的坐标变换矩阵; $\boldsymbol{\phi}$ 为计算姿态误差角; $C_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 为 \mathbf{C}_b^m

中对应位置的子元素。

在线标定算法采用卡尔曼滤波方法,滤波器的状态向量 \mathbf{X} 包括 15 维 SINS 系统误差 \mathbf{X}_{SINS} 、8 维 LDV 误差 \mathbf{X}_{LDV} , 定义如下:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_{SINS}^T \quad \mathbf{X}_{LDV}^T]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_{SINS} = [(\boldsymbol{\phi}^n)^T \quad (\delta \mathbf{v}^n)^T \quad (\delta \mathbf{p})^T \quad (\boldsymbol{\varepsilon}_{ib}^b)^T \quad (\nabla_{ib}^b)^T]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_{LDV} = [\varphi_x \quad \varphi_z \quad \delta k \quad \delta l_{bg}^m \quad \delta l_{mg,x}^m \quad \delta l_{mg,z}^m]^T \quad (15)$$

式(14)中: $\boldsymbol{\phi}^n, \delta \mathbf{v}^n, \delta \mathbf{p}$ 分别为 SINS 解算的姿态误差、速度误差和位置误差; $\boldsymbol{\varepsilon}_{ib}^b, \nabla_{ib}^b$ 分别为陀螺和加速度计的零偏。在导航过程中,测速仪的各项误差可以视为随机常数,有: $\dot{\varphi}_x = 0, \dot{\varphi}_z = 0, \delta \dot{k} = 0, \delta \dot{l}_{bg}^m = 0, \delta \dot{l}_{mg,x}^m = 0, \delta \dot{l}_{mg,z}^m = 0$ 。

基于式(13)~(15)可以建立 LDV 杆臂误差标定滤波模型:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \quad (16)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{SINS} & \mathbf{0}_{15 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 1} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{21 \times 21} \quad (17)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^m & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_b^m \\ \mathbf{0}_{15 \times 3} & \mathbf{0}_{15 \times 3} \end{bmatrix}_{21 \times 6} \quad (18)$$

$$\mathbf{W} = [\boldsymbol{\omega}_{ex}^b \quad \boldsymbol{\omega}_{ey}^b \quad \boldsymbol{\omega}_{ez}^b \quad \boldsymbol{\omega}_{vx}^b \quad \boldsymbol{\omega}_{vy}^b \quad \boldsymbol{\omega}_{vz}^b]^T \quad (19)$$

其中: \mathbf{F} 为系统状态转移矩阵; \mathbf{F}_{SINS} 为捷联惯导系统误差转移矩阵; \mathbf{G} 为系统噪声转移矩阵; \mathbf{W} 为系统噪声向量; $\boldsymbol{\omega}_{ej}^b, \boldsymbol{\omega}_{vj}^b (j = x, y, z)$ 分别为陀螺和加速度计的随机漂移噪声。

n 系下捷联惯导解算速度的误差模型为:

$$\tilde{\mathbf{v}}_{SINS}^n = \mathbf{v}^n + \delta \mathbf{v}^n \quad (20)$$

采用 LDV 输出的量测速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{LDV}^n$ 和 SINS 解算速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{SINS}^n$ 的差作为量测量,构建量测方程:

$$\mathbf{Z} = \tilde{\mathbf{v}}_{SINS}^n - \tilde{\mathbf{v}}_{LDV}^n = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (21)$$

式中: \mathbf{Z} 为量测量; \mathbf{H} 为量测转移矩阵; \mathbf{V} 为量测噪声向量。联立式(11)和式(21),展开并忽略高阶小量,可得:

$$\tilde{\mathbf{v}}_{SINS}^n - \tilde{\mathbf{v}}_{LDV}^n = \delta \mathbf{v}^n - (\mathbf{v}^n \times) \boldsymbol{\phi} - \mathbf{C}_v \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_z \end{bmatrix} - \delta k \mathbf{v}^n +$$

$$\mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_m^b \left(\boldsymbol{\omega}_{eb}^m \times \delta \mathbf{l}_{bg}^m - \mathbf{C}_\omega \begin{bmatrix} \delta l_{mg,x}^m \\ \delta l_{mg,z}^m \end{bmatrix} \right) \quad (22)$$

$$\mathbf{H}(t) = [-(\mathbf{v}^n \times) \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 9} \quad -\mathbf{C}_v \quad -\mathbf{v}^n \\ \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_m^b (\boldsymbol{\omega}_{eb}^m \times) \quad -\mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_m^b \mathbf{C}_\omega] \quad (23)$$

3 车载实验验证分析

为验证所提标定算法的有效性,以课题组自主研发的高精度激光多普勒测速仪为依托,结合高精度激光惯组系统在湖南省长沙市进行了车载组合导航实验。实验中所使用的设备主要有:高精度 IMU、全球定位系统(global positioning system, GPS)以及分光再利用型 1D-LDV。IMU 的输出频率为 200 Hz,其中陀螺零偏稳定性为 $0.03 (^{\circ})/h$,加速度计零偏稳定性为 $5 \times 10^{-5} g$;差分 GPS 的输出频率为 10 Hz,水平定位误差小于 0.1 m;1D-LDV 的输出频率为 100 Hz,量测误差小于 $0.1\% (1\sigma)$ 。其中,高精度 GPS 用于充当位置基准。实验设备在车式载体上的安装情况如图 4 所示。



图 4 实验设备安装

Fig. 4 Experimental equipment installation

第一组车载实验持续 0.66 h,航迹全程约为 28.08 km,实验前进行 15 min 的静基座初始对准。车辆的行驶轨迹如图 5 所示,其中车辆掉头处由矩形框放大标注。图 6 所示为 LDV 的输出速度。图 7(a) ~ (b) 为导航实验过程中的姿态估计曲线。

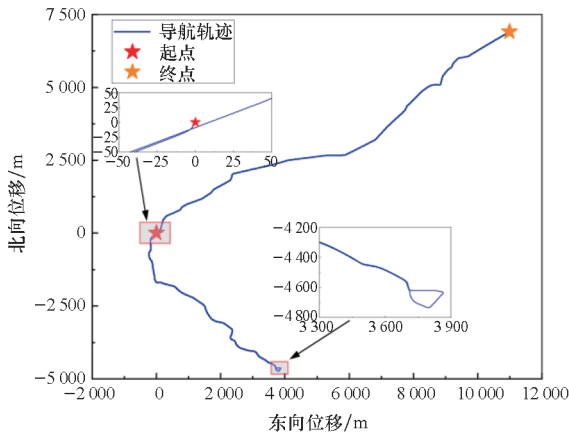


图 5 车载实验轨迹(第一组)

Fig. 5 Vehicle experimental trajectory (group 1)

通过本文所提算法对 1D-LDV 的误差参数进行滤波标定,所得滤波曲线分别如图 8(a) ~ (d) 所示,标定结果在表 1 中列出。

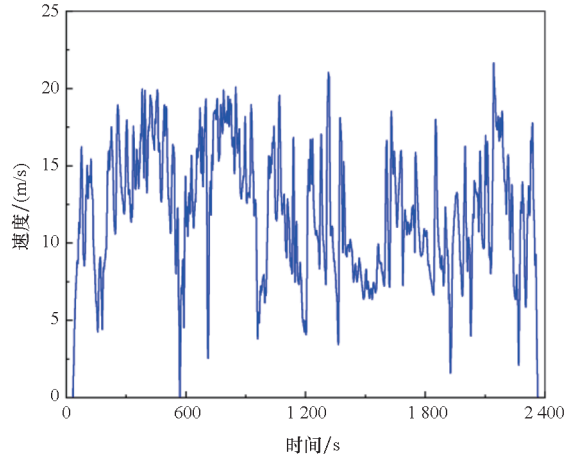
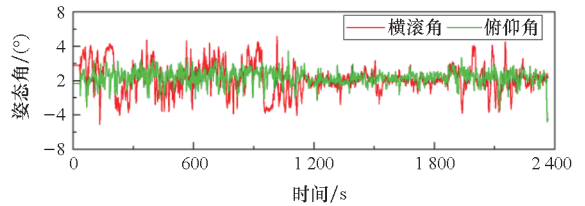


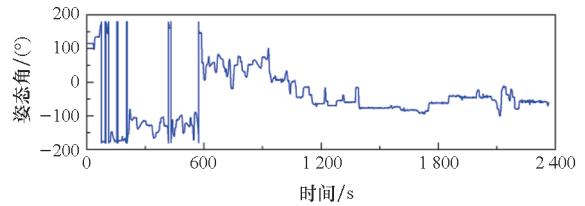
图 6 测速仪输出速度(第一组)

Fig. 6 Output velocity of LDV (group 1)



(a) 横滚角、俯仰角

(a) Roll angle, pitch angle

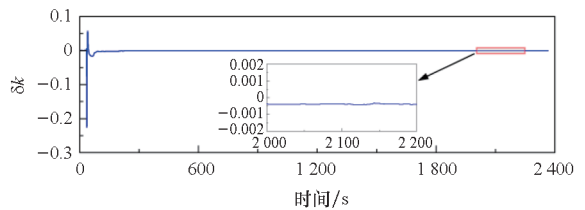


(b) 航向角

(b) Yaw angle

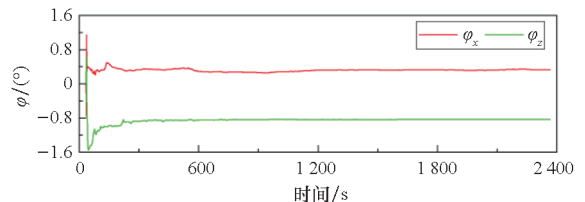
图 7 导航姿态估计曲线(第一组)

Fig. 7 Navigation attitude estimation curve (group 1)



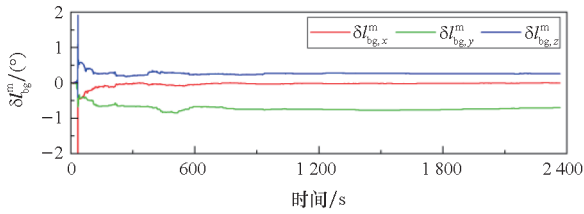
(a) LDV 比例因子误差

(a) Scale factor error of LDV

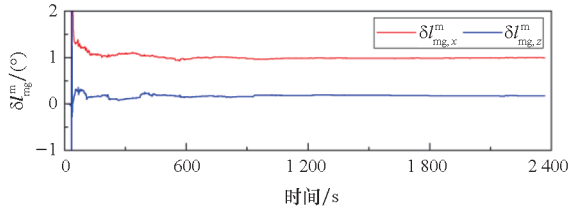


(b) LDV 安装角误差

(b) Installation angle error of LDV



(c) IMU 测量中心与载体中心杆臂误差
(c) Error between IMU measurement center and carrier center lever-arm



(d) LDV 测量中心与载体中心杆臂误差
(d) Error between LDV measurement center and carrier center lever-arm

图8 LDV 误差参数滤波收敛曲线(第一组)

Fig. 8 Convergence curve of LDV error parameter filtering (group 1)

表1 LDV 误差参数滤波标定结果(第一组)

Tab. 1 Error parameter filtering calibration result of LDV (group 1)

误差参数	标定值
δk	-0.000 3
$\varphi_x, \varphi_z / (^\circ)$	0.324, -0.832
$\delta l_{bg,x}^m, \delta l_{bg,y}^m, \delta l_{bg,z}^m / m$	0, -0.70, 0.26
$\delta l_{mg,x}^m, \delta l_{mg,z}^m / m$	0.99, 0.18

从滤波收敛曲线可以看出,1D-LDV 的各项误差参数均能得到快速的收敛。为验证滤波标定结果的有效性,利用标定结果对 1D-LDV 输出的量测速度进行补偿;然后根据补偿前后的 1D-LDV 量测速度分别与 IMU 的三轴陀螺输出数据进行航迹推算,并以 GPS 的位置数据为基准计算定位误差,定位误差结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,未补偿杆臂误差所得到的定位误差高于补偿杆臂误差后的定位误差。1D-LDV 杆臂误差补偿前后的航迹推算定位误差结果的均方根值分别为 8.80 m 和 7.07 m。

为进一步证明所提算法的有效性,进行了第二组车载实验,实验设备的安装情况与第一组车载实验一致。第二组车载实验持续 0.62 h,航迹

全程约为 43.03 km。实验前进行 15 min 的静基座初始对准。车辆的行驶轨迹如图 10 所示,其中车辆掉头处由矩形框放大标注。图 11 所示为 LDV 的输出速度。图 12(a) ~ (b) 为导航实验过程中的姿态估计曲线。

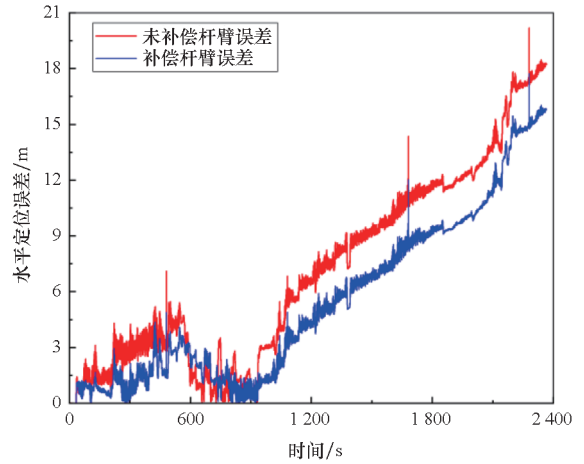


图9 航迹推算定位误差结果(第一组)

Fig. 9 Positioning error result of track calculation (group 1)

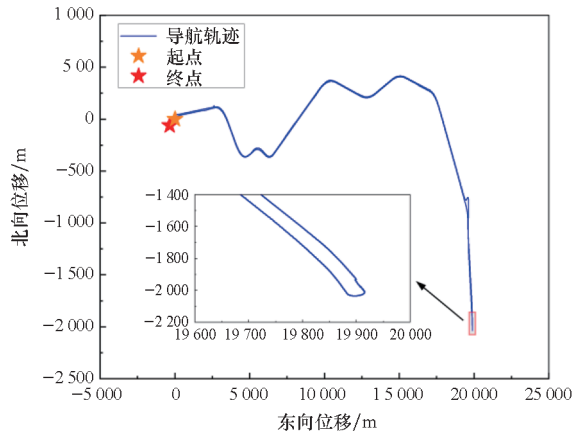


图10 车载实验轨迹(第二组)

Fig. 10 Vehicle experimental trajectory (group 2)

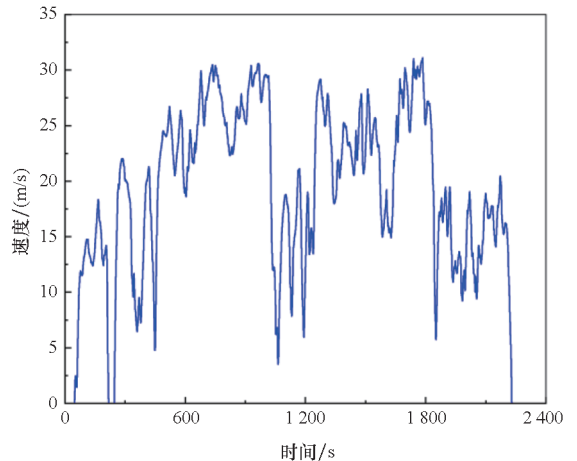
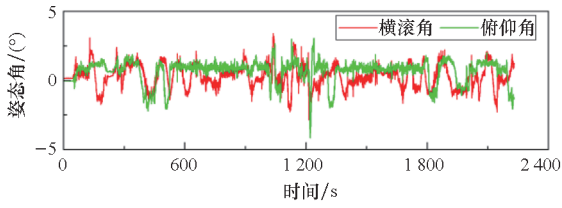
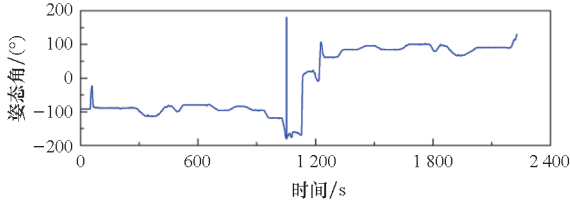


图11 测速仪输出速度(第二组)

Fig. 11 Output velocity of LDV (group 2)



(a) 横滚角、俯仰角
(a) Roll angle, Pitch angle

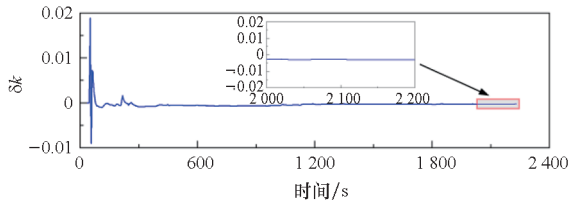


(b) 航向角
(b) Yaw angle

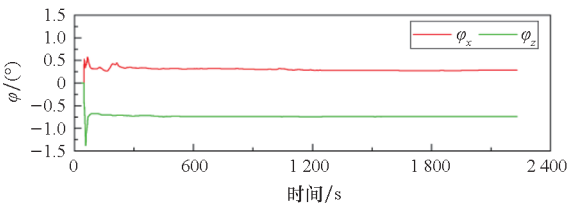
图 12 导航姿态估计曲线(第二组)

Fig. 12 Navigation attitude estimation curve (group 2)

第二组车载实验中 1D-LDV 的误差参数标定滤波曲线分别如图 13(a) ~ (d) 所示, 标定结果在表 2 中列出。根据补偿前后的 1D-LDV 量测速度与 IMU 的三轴陀螺输出数据进行航迹推算, 所得定位误差结果如图 14 所示。补偿前后的航迹推算定位误差结果的均方根值分别为 6.60 m 和 5.48 m。

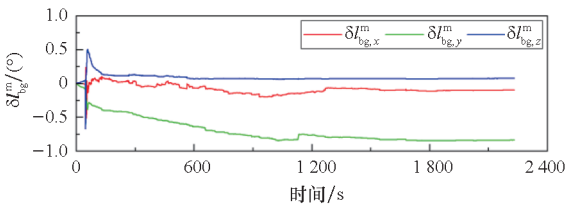


(a) LDV 比例因子误差
(a) Scale factor error of LDV

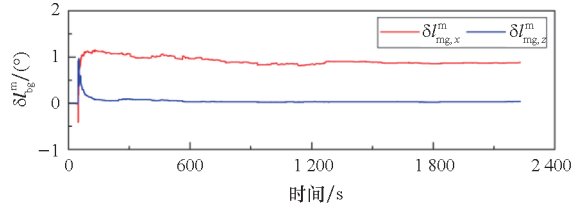


(b) LDV 安装角误差

(b) Installation angle error of LDV



(c) IMU 测量中心与载体中心杆臂误差
(c) Error between IMU measurement center and carrier center lever-arm



(d) LDV 测量中心与载体中心杆臂误差
(d) Error between LDV measurement center and carrier center lever-arm

图 13 LDV 误差参数滤波收敛曲线(第二组)
Fig. 13 Convergence curve of LDV error parameter filtering (group 2)

表 2 LDV 误差参数滤波标定结果(第二组)
Tab. 2 Error parameter filtering calibration result of LDV (group 2)

误差参数	标定值
δk	-0.000 2
$\varphi_x, \varphi_z / (^\circ)$	0.287, -0.742
$\delta l_{bg,x}^m, \delta l_{bg,y}^m, \delta l_{bg,z}^m / m$	-0.09, -0.84, 0.08
$\delta l_{mg,x}^m, \delta l_{mg,z}^m / m$	0.88, 0.03

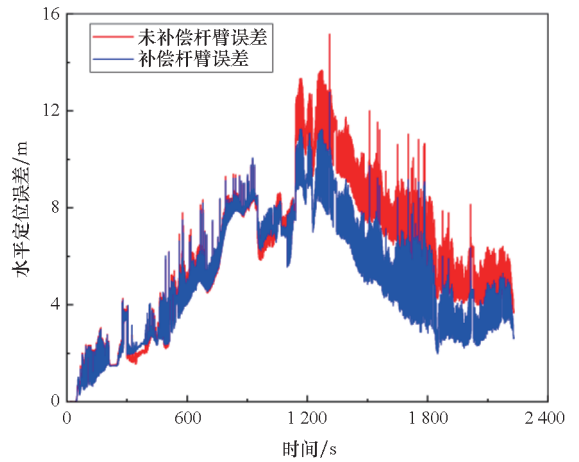


图 14 航迹推算定位误差结果(第二组)
Fig. 14 Positioning error result of track calculation (group 2)

4 结论

本文提出了一种 23 维的卡尔曼滤波在线标定算法, 通过分析 1D-LDV 的量测速度和 SINS 的解算速度之间存在的杆臂速度误差, 以及引入在载体行进过程中速度方向始终保持载体行进方向的点, 对现有杆臂速度误差模型加以改进, 从而构建新的可以准确反映 1D-LDV 与 SINS 输出速度真实关系的杆臂速度误差模型。通过两组车载实验验证了

标定算法的有效性,在经过杆臂误差补偿后,两组实验的定位误差由 8.80 m 和 6.60 m 分别降至 7.07 m 和 5.48 m,导航定位精度得到一定提升。

参考文献 (References)

- [1] XIANG Z Y, WANG Q, HUANG R, et al. A robust online calibration method for SINS/LDV integrated navigation system based on position observation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(1): 895–908.
- [2] 徐开俊, 徐照宇, 赵津晨, 等. GNSS/INS 组合导航系统发展综述[J]. *现代计算机*, 2022, 28(20): 1–8.
XU K J, XU Z Y, ZHAO J C, et al. Overview of the development of GNSS/INS integrated navigation system [J]. *Modern Computer*, 2022, 28(20): 1–8. (in Chinese)
- [3] CHEN W, YANG G L, TU Y Q. A digital track map-assisted SINS/OD fusion algorithm for onboard train localization [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(1): 247.
- [4] 倪少杰, 李诗扬, 谢郁辰, 等. GNSS/INS 超紧组合导航综述[J]. *国防科技大学学报*, 2023, 45(5): 48–59.
NI S J, LI S Y, XIE Y C, et al. Overview of GNSS/INS ultra-tight integrated navigation [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(5): 48–59. (in Chinese)
- [5] 李传立, 尚俊娜, 李芳. 里程计技术发展综述[J]. *软件导刊*, 2019, 18(12): 6–10.
LI C L, SHANG J N, LI F. Summary of the development of odometer technology [J]. *Software Guide*, 2019, 18(12): 6–10. (in Chinese)
- [6] XIANG Z Y, WANG Q, NIE X M, et al. LSTM-assisted SINS/2D-LDV tightly coupled integration approach using local outlier factor and adaptive filter [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 74: 8500915.
- [7] FU Q W, LIU Y, LIU Z B, et al. High-accuracy SINS/LDV integration for long-distance land navigation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2952–2962.
- [8] XIANG Z Y, ZHANG T, WANG Q, et al. A SINS/GNSS/2D-LDV integrated navigation scheme for unmanned ground vehicles [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(12): 125116.
- [9] 陈兰剑, 席崇宾, 周健, 等. 用于导航定位的激光多普勒测速技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(6): 174–186.
- CHEN L J, XI C B, ZHOU J, et al. Review of laser Doppler velocimeter technology for navigation and localization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 174–186. (in Chinese)
- [10] HUANG R, NIE X M, ZHOU J. Laser Doppler velocimeter and its calibration system [J]. *Measurement*, 2019, 134: 286–292.
- [11] GAO C F, WANG Q, WEI G, et al. A highly accurate calibration method for terrestrial laser Doppler velocimeter [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(8): 1994–2003.
- [12] 王琦, 高春峰, 周健, 等. 陆用组合导航中 Janus 配置的激光多普勒测速仪的标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 417003.
WANG Q, GAO C F, ZHOU J, et al. Calibration method of laser Doppler velocimeter based on Janus configuration in land integrated navigation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 417003. (in Chinese)
- [13] 崔耀星, 汤建勋, 聂晓明. 激光多普勒测速仪在线标定算法[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(1): 105–108.
CUI Y X, TANG J X, NIE X M. Laser Doppler velocimeter online calibration algorithm [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(1): 105–108. (in Chinese)
- [14] XIANG Z Y, WANG Q, HUANG R, et al. Position observation-based calibration method for an LDV/SINS integrated navigation system [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(26): 7869–7877.
- [15] XIANG Z Y, WANG Q, HUANG R, et al. Online calibration method for pitch-independent laser Doppler velocimeter based on improved integrated navigation model [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 9513213.
- [16] XIANG Z Y, WANG Q, JIN S L, et al. Online calibration method for SINS/LDV integrated navigation system based on left group error definition [J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(5): 055106.
- [17] 穆梦雪, 赵龙. 车载 GNSS/SINS/里程计分布式弹性融合导航方法[J]. *测绘学报*, 2024, 53(3): 425–434.
MU M X, ZHAO L. A distributed GNSS/SINS/odometer resilient fusion navigation method for land vehicle [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(3): 425–434. (in Chinese)