

陆用组合导航中二维激光多普勒测速仪的标定方法

王琦**, 高春峰, 聂晓明, 周健, 魏国, 龙兴武*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 为了抑制车辆颠簸及载重变化对一维激光多普勒测速仪的影响,设计了一种二维激光多普勒测速仪。针对其使用过程中的误差参数,提出了一种差分全球定位系统辅助的 Kalman 滤波标定方法,并设计了车载组合导航实验验证了该方法的有效性。由补偿后的二维激光多普勒测速仪与陀螺数据航迹推算的最大水平位置和最大高度的误差分别为 5.5 m 和 0.36 m。结果表明,该标定方法是有效的,补偿后的二维激光多普勒测速仪能大大提高导航的水平定位精度,且能给出高精度的高度信息。

关键词 测量; 二维激光多普勒测速仪; 标定方法; Kalman 滤波; 组合导航系统; 航迹推算

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0804004

Calibration Method of Two-Dimensional Laser Doppler Velocimeter in Land Integrated Navigation System

Wang Qi**, Gao Chunfeng, Nie Xiaoming, Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu*

*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract To suppress the influences of vehicle jolts and the load variations on one-dimensional (1D) laser Doppler velocimeter (LDV), a two-dimensional (2D) LDV is designed. As for the error parameters produced in the usage process of 2D LDV, the Kalman filtering calibration method with the auxiliary of the differential global positioning system (DGPS) is proposed. The effectiveness of this method is verified by an experiment of vehicle load navigation. The maximum horizontal position error and the maximum altitude error of the dead reckoning of the 2D LDV after compensation and the gyroscopes are 5.5 m and 0.36 m, respectively. The experimental results show that this calibration method proposed is effective, and the 2D LDV after compensation can not only greatly improve the horizontal positioning accuracy of navigation, but also give high precision altitude informations.

Key words measurement; two-dimensional laser Doppler velocimeter; calibration method; Kalman filtering; integrated navigation system; dead reckoning

OCIS codes 120.7250; 280.3340; 280.3420

1 引 言

激光捷联惯导系统因其全自主性、高隐蔽性、可多参数长时间连续测量等优势,在导航领域得到了广泛应用^[1]。然而,由于初始对准误差、惯性器件误差的存在,惯性导航系统的水平定位误差随时间的变化呈发散趋势,定位精度逐步降低^[2]。同时,由于惯导系统的高度通道无阻尼,因此其高度完全发散。对于无需高度信息的应用场合,惯导系统的高度往往置零,但对于需要高度信息的应用场合,常需引入其他系统以提供高度信息,如无线电高度表^[3]、气压

高度计^[4]。无线电高度表利用无线电波反射测距的原理来测量高度,主要用于测量飞机等高空载体的飞行高度,不适用于陆用惯导系统。气压高度计利用气压与高度间的关系,通过测量气压来测量载体的高度,但气压不仅与高度有关,还与温度、天气等因素有关,其测量精度不高。

Yeh 等^[5]证实了利用激光多普勒频移技术可确定流体速度。激光多普勒测速技术具有精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大及非接触测量等特点,在航天、机械、通信、医学等领域得到了快速的发展^[6-8]。近年来,激光多普勒测速仪(LDV)被用于

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-08

* E-mail: xwlong110@sina.com; ** E-mail: tianmawangqi@hotmail.com

陆用导航领域,其与捷联惯导系统组成组合导航系统,可提供车辆载体的对地速度^[9]。本课题组也进行了相关研究,提出了多种用于车辆速度测量的LDV结构,如多点分层结构^[10]、参考光结构^[11-12]、分光再利用结构^[13-14],其中分光再利用结构的LDV更适用于陆用导航领域。

影响一维(1D)LDV组合导航精度的原因有二。1)车辆颠簸的影响。当车辆在不平坦的路面行驶时,车辆颠簸会引起车辆竖直方向的跳动及测速仪光束倾角的变化,从而影响测速仪的测速结果。2)车辆载重变化的影响。由于载车与测速仪固联,其载重的变化也会导致测速仪的光束倾角发生变化。由于分光再利用结构LDV的信噪比高,性能可靠,故本课题组设计了一种分光再利用结构的二维(2D)LDV,其能测量车辆的前向和垂向速度,得到更高的定位精度,且其标定参数为定值。

由于2D LDV测量的是自身坐标系中的速度,而实际应用中测速仪的坐标系难以与捷联惯导的惯性测量单元(IMU)系重合,因此测速仪系与IMU系间存在安装误差角。2D LDV光束到地面的实际倾角与设计值之间也存在误差。安装误差角和倾角误差是制约2D LDV与捷联惯导系统组合导航精度的关键参数,因此在进行高精度组合导航之前,需要标定出这些参数。本文给出了差分全球定位系统

(DGPS)辅助下的参数标定方法,并通过实验验证了该方法的有效性。

2 2D LDV 结构

分光再利用结构2D LDV示意图如图1所示,其由两个1D LDV探头镜像安装而成,分别用1、2标记,每个子探头结构相同, v_1 、 v_2 分别为探头1、2的输出速度, v_x 、 v_y 、 v_z 分别为车辆侧向、前向、垂向速度,由于车辆不存在侧向速度,故 $v_x=0$ 。激光光源为单模固体绿光激光器,功率为50 mW,波长为532 nm。激光光束经准直补偿透镜组准直后入射到反射率为50%的分束镜BS1上。透射光束经全反镜M1反射后由M2中心小孔入射到地面。反射光束经反射率为98%的分束镜BS2分束后,其反射光束由M2反射后以相同角度入射到地面。沿反方向传播的散射光经分束镜BS1部分反射后经偏振片、滤光片及小孔光阑后入射到雪崩光电二极管探测器上,此为信号光。分束镜BS2的透射光束经全反镜M3反射后沿反方向同样入射到探测器上,此为参考光。信号光与参考光在探测器光敏面上干涉形成多普勒拍频信号。载体运动速度 v 与多普勒频率 f_D 之间的关系为

$$v = f_D \lambda / (2 \cos \theta), \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, θ 为激光束入射到地面的倾角。

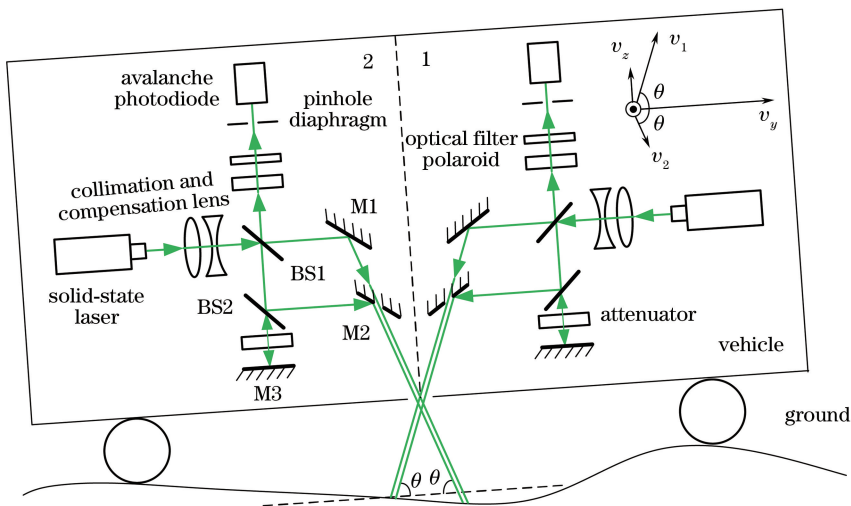


图1 2D LDV的光学结构

Fig. 1 Optical structure of 2D LDV

原本在传统参考光结构LDV中被衰减片衰减的光功率被分光镜BS2反射后入射到地面,故分光再利用结构LDV的激光功率利用率是传统参考光结构LDV的近两倍,其散射光功率也是传统参考光结构的近两倍,信噪比(SNR)表示为

$$f_{SNR} = \frac{\eta W_s}{h\nu \Delta f}, \quad (2)$$

式中 η 为量子效率系数, h 为普朗克常数, ν 为激光中心频率, Δf 为探测器带宽, W_s 为散射光功率。因此,相比于传统参考光结构LDV,分光再利用结构LDV

的信噪比有较大提高,更适合陆用导航领域。

2D LDV 的一个测速探头朝前,另一个探头朝后,两光束入射倾角 θ 的设计值 θ_d 均为 70° 。对于 2D LDV,两个探头的输出速度分别为

$$v_1 = f_{D1}\lambda/2, \quad (3)$$

$$v_2 = f_{D2}\lambda/2, \quad (4)$$

式中 f_{D1} 为探头 1 的多普勒频率, f_{D2} 为探头 2 的多普勒频率及。从(3)~(4)式可以看出,2D LDV 每个探头不再单独输出载车运动速度。

3 2D LDV 速度误差模型

如图 2 所示, b 系为 IMU 系, 建立与 2D LDV 相关的 m 系, 以 b 系 X_b - O - Y_b 平面与两探头入射

光线所在平面的交线为 Y_m 轴, 前向为正方向; 两入射光线所在平面内的 Y_m 轴垂线为 Z_m 轴, 向上为正方向; X_m 轴由右手定则决定。理想情况下, m 系中测速仪的速度为

$$\mathbf{V}_L^m = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(2\cos\theta_d) & 1/(2\cos\theta_d) \\ 0 & 1/(2\sin\theta_d) & -1/(2\cos\theta_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

测速仪速度在导航坐标系 (n 系) 表示为

$$\mathbf{V}_L^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{C}_m^b \mathbf{V}_L^m, \quad (6)$$

式中 \mathbf{C}_m^b 、 \mathbf{C}_b^n 分别为 m 系到 b 系和 b 系到 n 系的转换矩阵。理想情况下, \mathbf{C}_m^b 取单位矩阵。

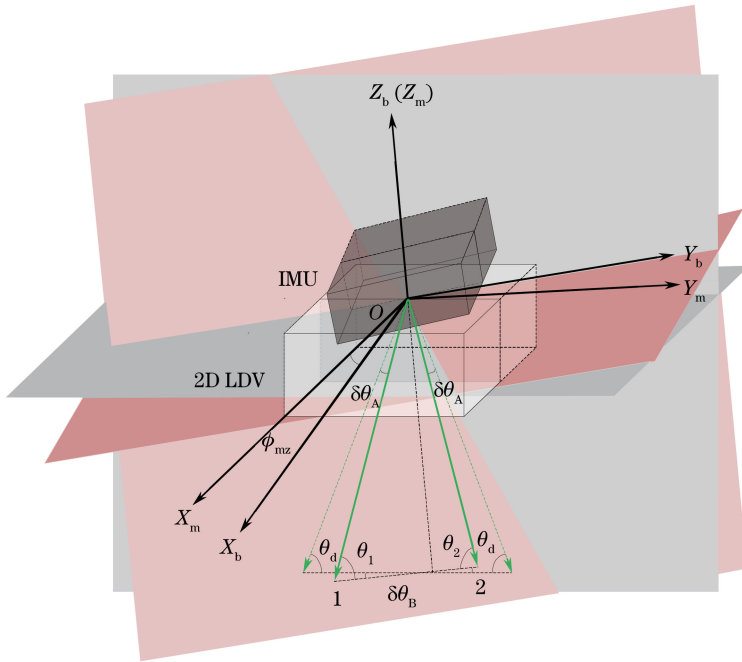


图 2 2D LDV 与 IMU 的安装关系

Fig. 2 Installation relationship between 2D LDV and IMU

在实际情况下, 2D LDV 与 IMU 之间存在安装误差角。由于 m 系中测速仪速度 v_x 为零, 同时 $v_z \ll v_y$, 故可认为 Z_m 轴与 Z_b 轴重合, 只需考虑 m 系与 b 系之间的俯仰误差角 ϕ_{mx} 和航向误差角 ϕ_{mz} 。由于 Y_m 轴在 X_b - O - Y_b 平面内, 故 $\phi_{mx} = 0$ 。2D

LDV 入射光线到地面的入射倾角与设计值之间的误差为 $\delta\theta_A$, 地平线与 Y_m 轴的夹角为 $\delta\theta_B$, 两入射角的真实值分别为 $\theta_1 = \theta_d + \delta\theta_A - \delta\theta_B$ 、 $\theta_2 = \theta_d + \delta\theta_A + \delta\theta_B$ 。令 $\delta\theta_1 = \delta\theta_A - \delta\theta_B$ 、 $\delta\theta_2 = \delta\theta_A + \delta\theta_B$, 故 m 系中测速仪的速度为

$$\tilde{\mathbf{V}}_L^m = \mathbf{V}_L^m + \delta\mathbf{V}_L^m = \mathbf{V}_L^m + \mathbf{C}_\theta \delta\theta, \quad (7)$$

$$\text{式中 } \delta\mathbf{V}_L^m = \mathbf{C}_\theta \delta\theta, \mathbf{C}_\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\cot 2\theta_d \cdot v_y + \frac{v_2}{2\sin\theta_d} & -\cot 2\theta_d \cdot v_y + \frac{v_1}{2\sin\theta_d} \\ -\cot 2\theta_d \cdot v_z + \frac{v_2}{2\cos\theta_d} & -\cot 2\theta_d \cdot v_z - \frac{v_1}{2\cos\theta_d} \end{bmatrix}, \delta\theta = \begin{bmatrix} \delta\theta_1 \\ \delta\theta_2 \end{bmatrix}.$$

导航坐标 n 系中测速仪的速度为

$$\tilde{\mathbf{V}}_L^n = (\mathbf{I} - \boldsymbol{\phi} \times) \mathbf{C}_b^n (\mathbf{I} - \boldsymbol{\phi}_m \times) (\mathbf{V}_L^m + \delta \mathbf{V}_L^m), \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{\phi}$ 为惯导系统姿态误差角, $\boldsymbol{\phi}_m$ 为 m 系与 b 系的安装差角, 符号 \times 表示将向量转换成矩阵。

忽略二阶小项, 由(8)式可得:

$$\tilde{\mathbf{V}}_L^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{V}_L^m - (\boldsymbol{\phi} \times) \mathbf{C}_b^n \mathbf{V}_L^m - \mathbf{C}_b^n (\boldsymbol{\phi}_m \times) \mathbf{V}_L^m + \mathbf{C}_b^n \delta \mathbf{V}_L^m = \mathbf{V}_L^n + (\mathbf{V}_L^n \times) \boldsymbol{\phi} + \mathbf{C}_b^n (\mathbf{V}_L^m \times) \boldsymbol{\phi}_m + \mathbf{C}_b^n \mathbf{C}_\theta \delta \theta. \quad (9)$$

2D LDV 的速度误差 $\delta \mathbf{V}_L^n$ 模型为

$$\delta \mathbf{V}_L^n = \tilde{\mathbf{V}}_L^n - \mathbf{V}_L^n = (\mathbf{V}_L^n \times) \boldsymbol{\phi} + \mathbf{C}_b^n (\mathbf{V}_L^m \times) \boldsymbol{\phi}_m + \mathbf{C}_b^n \mathbf{C}_\theta \delta \theta. \quad (10)$$

4 标定方法

采用 Kalman 滤波标定法标定与 2D LDV 有关的参数, 滤波系统的误差模型为

$$\mathbf{Z}(t) = [\delta \mathbf{V}_L^n \quad \delta \mathbf{p} \quad \delta \mathbf{V}_L^n]^T = \mathbf{H}(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (12)$$

式中 $\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 5} & \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 2} \\ \mathbf{0}_L^n \times & \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 5} & \mathbf{C}_b^n (\mathbf{V}_L^m \times) & \mathbf{V}_b^n \mathbf{V}_\theta \end{bmatrix}$, $\mathbf{v}(t)$ 为量测噪声, $\mathbf{0}_{m \times n}$ 为 m 行 n 列的零元素矩阵, $\mathbf{I}_{4 \times 4}$ 为 4 阶单位矩阵。

5 实验验证

为了验证所提出的 2D LDV 标定方法, 设计了车载实验。实验系统如图 3 所示, 该系统由 IMU、2D LDV、DGPS 接收机、导航计算机和蓄电池组组成。其中, IMU 由三个零漂为 0.003 ($^\circ$)/h 的激光陀螺和三个零偏为 $50 \mu\text{g}$ 的石英加速度计组成, 数据更新频率为 100 Hz ; DGPS 的水平定位精度为 0.1 m , 高度精度为 0.02 m , 数据更新频率为 10 Hz ; 导航计算机用于采集数据; 蓄电池组给整个系统供电。载车的行驶轨迹如图 4 所示, 起止点由蓝色五角星标示, 车辆掉头处由黑色矩形框标注并放大, 全程共 55.6 km 。

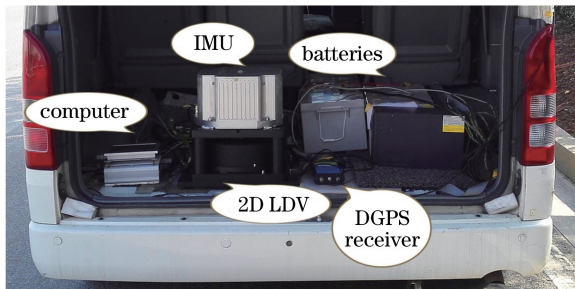


图 3 车载实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of vehicle load experimental system

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t) \mathbf{w}(t), \quad (11)$$

式中 $\mathbf{X}(t) = [\phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U \quad \delta V_E \quad \delta V_N \quad \delta L \quad \delta \lambda \quad \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \phi_{mz} \quad \delta \theta_1 \quad \delta \theta_2]^T$, 为 15 维的状态向量; $\mathbf{F}(t)$ 为 15×15 的系统状态转移矩阵; $\mathbf{G}(t)$ 为噪声转移矩阵; $\mathbf{w}(t)$ 为系统噪声; t 为时间; ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为惯导系统的姿态误差角; $\delta V_E, \delta V_N$ 为惯导系统的水平速度误差; $\delta L, \delta \lambda$ 为惯导系统的水平位置误差; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为 x, y, z 轴陀螺的零漂; ∇_x, ∇_y 为 x, y 轴加速度计的零偏。

根据 DGPS 输出的位置 \mathbf{p}_G , 每秒钟作一次速度求解, 得到量测方程的基准速度 \mathbf{V}_G^n 。以 \mathbf{p}_G 及 \mathbf{V}_G^n 为基准, 以惯导系统的速度误差 $\delta \mathbf{V}_L^n$ 、位置误差 $\delta \mathbf{p}$ 及 2D LDV 的速度误差 $\delta \mathbf{V}_L^n$ 为观测量, 滤波求得 $\phi_{mz}, \delta \theta_1$ 和 $\delta \theta_2$, 量测方程为

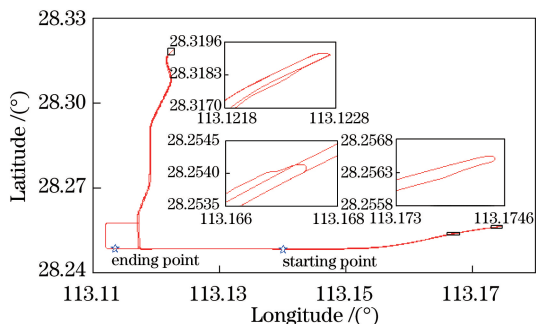


图 4 载车的行驶轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of running track of loaded vehicle

图 5 所示为 IMU 纯惯性导航的水平位置误差, 2.1 h 内最大水平位置误差为 1020 m , 同时由于纯惯性系统的高度通道完全发散, 无法给出高度信息。

图 6 所示为 2D LDV 两个探头的测速结果。可以看出, 在载车行驶过程中, 两个探头输出速度的变化趋势并不完全一致, 一个探头输出速度增大时, 另一个探头输出速度减小。这是因为车辆上下颠簸对两个探头的影响正好相反, 因此利用两探头的输出速度可以求解出车辆的前向速度与垂向速度, 从而大大抑制车辆颠簸对测量的影响, 这正是 2D LDV 的优势所在。尽管如此, 若不标定测速仪的有关误差参数, 而是直接利用 2D LDV 输出速度和 IMU 的三个陀螺进行航迹推算, 其定位结果如图 7(a)、

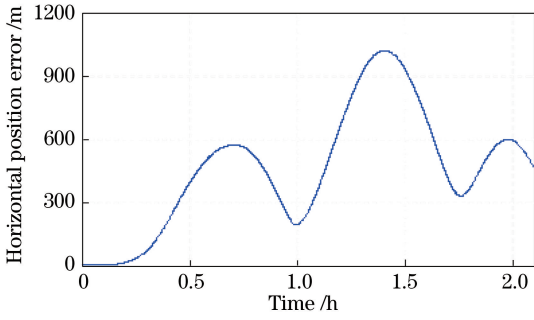


图 5 IMU 纯惯性导航的水平位置误差

Fig. 5 Horizontal position error of IMU under pure inertial navigation

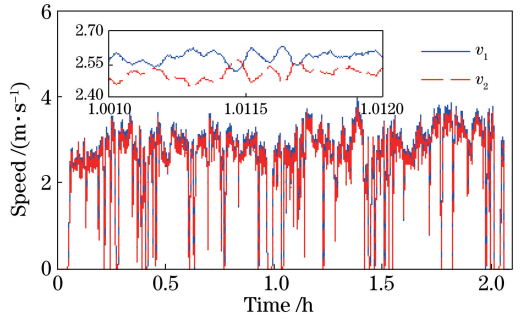


图 6 2D LDV 的输出速度

Fig. 6 Output speeds of 2D LDV

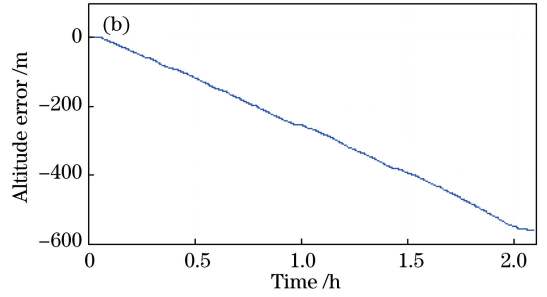
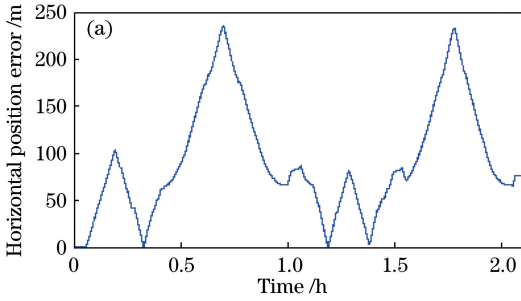


图 7 2D LDV 有关参数标定前航迹推算的定位误差。(a)水平位置;(b)高度

Fig. 7 Positioning errors of dead reckoning before calibration of related parameters of 2D LDV.

(a) Horizontal position; (b) altitude

(b)所示。最大水平位置及最大高度误差分别为 236 m 和 559 m,定位精度较低。

按照 Kalman 滤波法对 2D LDV 的相关误差参数进行滤波标定后,结果如图 8(a)~(c)所示,分别

为 m 系与 b 系的航向误差角 ϕ_{mz} 、倾角误差 $\delta\theta_1$ 及 $\delta\theta_2$ 的滤波收敛曲线。可以看出,这三个参数均能很快收敛,取值分别为: $\phi_{mz} = -0.28691^\circ$ 、 $\delta\theta_1 = -1.21587^\circ$ 、 $\delta\theta_2 = 0.01007^\circ$ 。

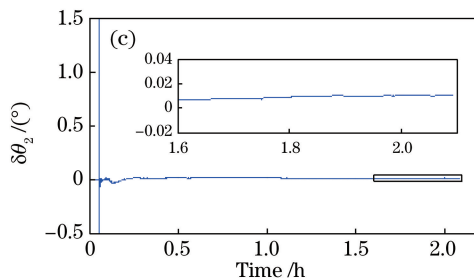
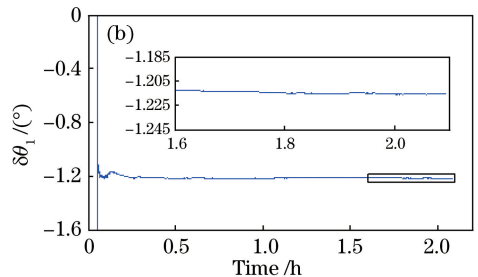
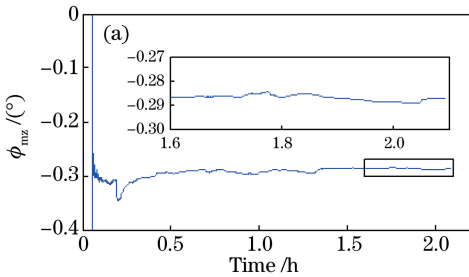


图 8 滤波收敛曲线。(a) ϕ_{mz} ;(b) $\delta\theta_1$;(c) $\delta\theta_2$

Fig. 8 Filtering convergence curves. (a) ϕ_{mz} ; (b) $\delta\theta_1$; (c) $\delta\theta_2$

为了验证标定参数的有效性,由 2D LDV 与 IMU 组成组合导航系统,其数据处理流程如图 9 所示。首先,由 IMU 完成 13 min 快速初始对准;然后,根据修正后的 2D LDV 速度及 IMU 中的三陀螺输出进行航迹推算;最后,以 DGPS 数据为基准,计算航迹推算的位置误差。结果如图 10(a)、(b)所示,可以看出,其导航定位精度远远高于 IMU 纯惯

性及参数修正前航迹推算的结果,其最大水平位置及最大高度误差分别为 5.5 m 和 0.36 m。

从标定参数的定义中可以看出,b 系与 m 系固联,即这些标定参数为固定值,将标定完毕后的参数保存,下次实验时直接调用即可。高精度的导航结果证明了基于 DGPS 标定 2D LDV 误差参数的方法是有效的。

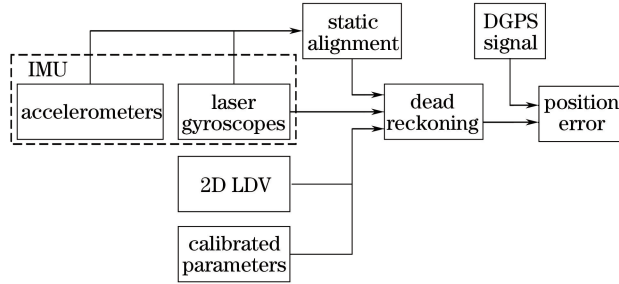


图 9 航迹推算的数据处理流程

Fig. 9 Data processing procedure of dead reckoning

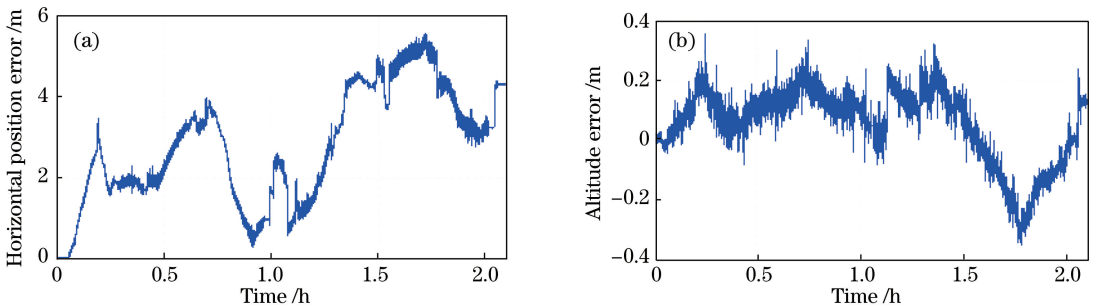


图 10 2D LDV 有关参数标定补偿后航迹推算的定位误差。(a)水平位置;(b)高度

Fig. 10 Positioning errors of dead reckoning after calibration and compensation of related parameters of 2D LDV.

(a) Horizontal position; (b) altitude

6 结 论

在陆用导航领域,为了抑制车辆颠簸及倾角变化对 1D LDV 的影响,设计了分光再利用结构的 2D LDV,并给出了 DGPS 辅助下的 2D LDV 误差参数的标定方法,车载实验验证了该标定方法的有效性。实验结果表明,该标定方法能实现 2D LDV 误差参数的高精度标定,大大提高了导航定位精度。

参 考 文 献

[1] Barshan B, Durrantwhyte H F. Evaluation of a solid-state gyroscope for robotics applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(1): 61-67.
 [2] Elsheimy N, Hou H Y, Niu X J. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and

Measurement, 2008, 57(1): 140-149.
 [3] Hajiyev C, Saltoglu R. RKF-based fault tolerant integrated INS/radar altimeter[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2004, 76(1): 38-46.
 [4] Sabatini A M, Genovese V. A sensor fusion method for tracking vertical velocity and height based on inertial and barometric altimeter measurements [J]. Sensors, 2014, 14(8): 13324-13347.
 [5] Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10): 176-178.
 [6] Liu Z J, Cui L S, Xie D L. Theory analysis and measurement for interference fringes of laser Doppler velocimeter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804001.
 刘子君, 崔骊水, 谢代梁. 激光多普勒流速仪的干涉条纹理论分析与测量 [J]. 中国激光, 2017, 44(8):

- 0804001.
- [7] Wang Y, Liu J F, Lu Z Z, *et al.* Laser Doppler method for the detection of wake bubbles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0813002.
王贇, 刘继芳, 鲁振中, 等. 尾流气泡群的激光多普勒检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0813002.
- [8] Ji H Y, Shang J H, Liu D, *et al.* Heterodyne laser Doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 189-192.
计贺岩, 尚建华, 刘丹, 等. 用于水下光通信的外差式激光多普勒振动计[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 189-192.
- [9] Zhang X Y, Yin J J, Lin Z L, *et al.* A positioning and orientation method based on the usage of INS and single-beam lidar[J]. Optik, 2015, 126(22): 3376-3381.
- [10] Zhou J, Yang W Q, Long X W. Research on multipoint layer-type laser Doppler self-velocimeter[J]. Optical Engineering, 2010, 49(4): 044301.
- [11] Zhou J, Long X W. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system[J]. Chinese Journal of 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.
- [12] Ying Z H, Gao C F, Wang Q, *et al.* Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained land navigation system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1204003.
应智慧, 高春峰, 王琦, 等. 高精度激光多普勒测速仪在陆用自主导航系统中的应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204003.
- [13] Zhou J, Nie X M, Lin J. A novel laser Doppler velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 64(6): 319-323.
- [14] Nie X M, Zhou J, Long X W. Laser Doppler velocimeter for vehicle application with improved signal-to-noise ratio[J]. Applied Physics B, 2014, 116(3): 637-641.