

## 陆用组合导航中 Janus 配置的激光多普勒测速仪的 标定方法

王 琦,高春峰,周 健,熊振宇,聂晓明,龙兴武

(国防科技大学 前沿交叉学科学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 在陆用组合导航领域,激光多普勒测速仪作为速度传感器能够与捷联惯导系统组成组合导航系统。为了抑制车辆颠簸引起的倾角变化对传统激光多普勒测速仪的影响,文中给出了基于 Janus 配置的分光再利用型激光多普勒测速仪。针对其与惯导系统组合导航过程中该配置结构测速仪的误差参数,文中首先推导了该测速仪的速度误差模型,在此基础上提出了差分 GPS 辅助的 Kalman 滤波标定法。实施了仿真及车载组合导航实验验证该方法的有效性。实验结果表明:文中提出的标定方法是有效的,误差参数补偿后的 Janus 配置激光多普勒测速仪能够大大提高组合导航定位精度。

**关键词:** 激光多普勒测速仪; Janus 配置; 标定方法; Kalman 滤波; 组合导航系统

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0417003

## Calibration method of laser Doppler velocimeter based on Janus configuration in land integrated navigation

Wang Qi, Gao Chunfeng, Zhou Jian, Xiong Zhenyu, Nie Xiaoming, Long Xingwu

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In the field of land integrated navigation, a laser Doppler velocimeter (LDV) can be used as a speed sensor to compose an integrated navigation system with a strapdown inertial navigation system (SINS). To suppress the influence of the inclination variations caused by vehicle jolts on conventional LDVs, a split-reuse LDV based on Janus configuration was presented. Aiming at the error parameters of this configuration type LDV in the integrated navigation with SINS, the velocity error model of LDV was deduced first, and then a Kalman filtering method assisted by a differential global positioning system (DGPS) to calibrate the error parameters was proposed. A simulation and a vehicle integrated navigation experiment were implemented to verify the effectiveness of the method. The experimental results show that the calibration method proposed in this paper is effective. The LDV based on Janus configuration after being compensated can greatly improve the positioning accuracy of the integrated navigation system.

**Key words:** laser Doppler velocimeter; Janus configuration; calibration method; Kalman filtering; integrated navigation system

收稿日期:2018-11-13; 修订日期:2018-12-16

基金项目:国家自然科学基金(61308060)

作者简介:王琦(1989-),男,博士生,主要从事激光多普勒测速及与激光惯性导航系统组合应用方面的研究。

Email: tianmawangqi@hotmail.com

导师简介:龙兴武(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事激光陀螺及惯性技术方面的研究。Email:xwlong110@sina.com

## 0 引言

1964 年, Yeh 等证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流体速度<sup>[1]</sup>, 由此激光多普勒测速仪作为一种新型的速度传感器, 就以其精度高、动态性能好、测量范围宽及非接触测量等优点在航天、机械、通信、医学等领域得到快速的发展<sup>[2-5]</sup>。近年来, 激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter, LDV)被用于陆用导航领域, 与 SINS 组成组合导航系统, 测量载体的对地速度<sup>[6-7]</sup>。然而, 当地面比较复杂、车式载体发生颠簸时, 传统参考光束型 LDV 的入射倾角就会发生变化, 从而产生较大的测量误差。为了减小载体颠簸引起的误差, 笔者课题组提出了基于 Janus 配置的参考光束型 LDV<sup>[8-9]</sup>, 但只是进行了仿真验证和简单的实验验证。由于分光再利用结构 LDV 的信噪比高、性能可靠, 更适用于陆用导航领域<sup>[10-11]</sup>, 所以文中在此基础上给出了基于 Janus 配置的分光再利用型 LDV 的结构。

由于基于 Janus 配置的 LDV 测量的是自身坐标系中的速度, 实际应用中测速仪坐标系难以与捷联惯导惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)系重合, 因此存在测速仪系与 IMU 系的安装误差角。Janus 配置 LDV 的激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 Janus 配置的 LDV 与捷联惯导系统组合导航精度的关键参数, 因此在高精度组合导航之前, 需要标定出这些参数。对于速度传感器与惯导系统组成的组合导航系统, 一般采用定点标定法<sup>[12]</sup>或滤波标定法<sup>[13]</sup>标定其误差参数。定点标定由于受定点位置精度及惯导系统初始对准精度的影响, 其精度有限。滤波标定法采用惯导速度与辅助传感器测量速度之差作观测量, 受状态量可观测度的影响, 其标定精度也不高。

为了得到更高精度的误差参数, 文中给出了差分 GPS(Differential Global Positioning System, DGPS)辅助下的滤波标定方法, 并通过实验验证了该方法的有效性。

## 1 Janus 配置的分光再利用型 LDV

### 1.1 传统参考光束型 LDV

参考光束型 LDV 的多普勒频率  $f_D$  与车式载体

运动速度  $v$  之间的关系为:

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

式中:  $\lambda$  为激光波长;  $\theta$  为激光束入射到地面的倾角。

如图 1(a)所示, 当车辆在理想、平整路面以速度  $v_y$  行驶时, 多普勒频率  $f_D$  为:

$$f_D = 2v_y \cos \theta / \lambda \quad (2)$$

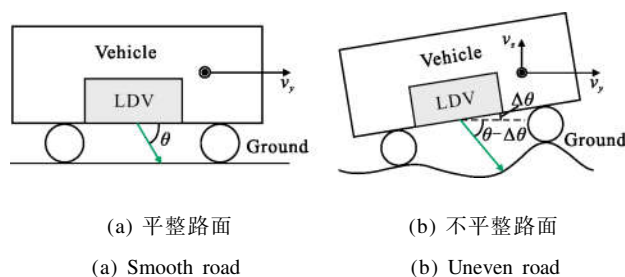


图 1 装载传统参考光束型 LDV 的载车在不同路面上行驶  
Fig.1 Vehicle loaded with a conventional reference-beam LDV runs on different kinds of roads

载体运行速度为:

$$v_y = f_D \lambda / (2 \cos \theta) \quad (3)$$

在实际行驶中, 路面总有一定起伏, 从而引起车辆在竖直方向上有起伏速度  $v_z$  及测速仪入射倾角变化  $\Delta \theta$ , 如图 1(b)所示, 此时测速仪多普勒频率  $f_D'$  为:

$$f_D' = 2[v_y \cos(\theta - \Delta \theta) - v_z \sin(\theta - \Delta \theta)] / \lambda \quad (4)$$

计算所得载体运行速度  $v_y'$  为:

$$v_y' = f_D' \lambda / (2 \cos \theta) \quad (5)$$

速度测量相对误差为:

$$\left| \frac{\Delta v_y}{v_y} \right| = \left| \frac{v_y' - v_y}{v_y} \right| = \left| \tan \theta \sin \Delta \theta + \cos \Delta \theta \frac{v_z}{v_y} - [\tan \theta \cos \Delta \theta - \sin \Delta \theta] - 1 \right| \quad (6)$$

从公式(6)可以看出, 传统参考光束型 LDV 的测速误差与入射倾角  $\theta$ 、倾角变化  $\Delta \theta$  及车辆竖直方向速度与水平方向速度比值  $v_z/v_y$  有关。

### 1.2 Janus 配置的分光再利用型 LDV 结构

分光再利用型 LDV 是传统参考光束型 LDV 的变形, 仍属于参考光束型 LDV。Janus 配置的分光再利用型 LDV 系统由两套分光再利用型 LDV 子系统组成, 每套子系统结构相同, 镜像安装在车辆底部, 激光束以相同的倾角  $\theta$  分别入射车头和车尾方向的地面, 同时测量各自的多普勒频率, 如图 2 所示。激光光源为功率 50 mW、波长 532 nm 的单模固体绿光激光器。经准直补偿透镜组准直后的激光束入射到反射率 50% 的分束镜 BS1 上。透射光束经全反镜

M1 中心小孔入射到地面。反射光束经反射率 98% 的分束镜 BS2 分束后, 其反射光由全反镜 M2、M1 反射后以相同角度入射到地面。沿反方向传播的地面散射光经分束镜 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, 此为信号光。分束镜 BS2 的透射光束经衰减片后由全反镜 M3 反射, 沿反方向同样入射到探测器, 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

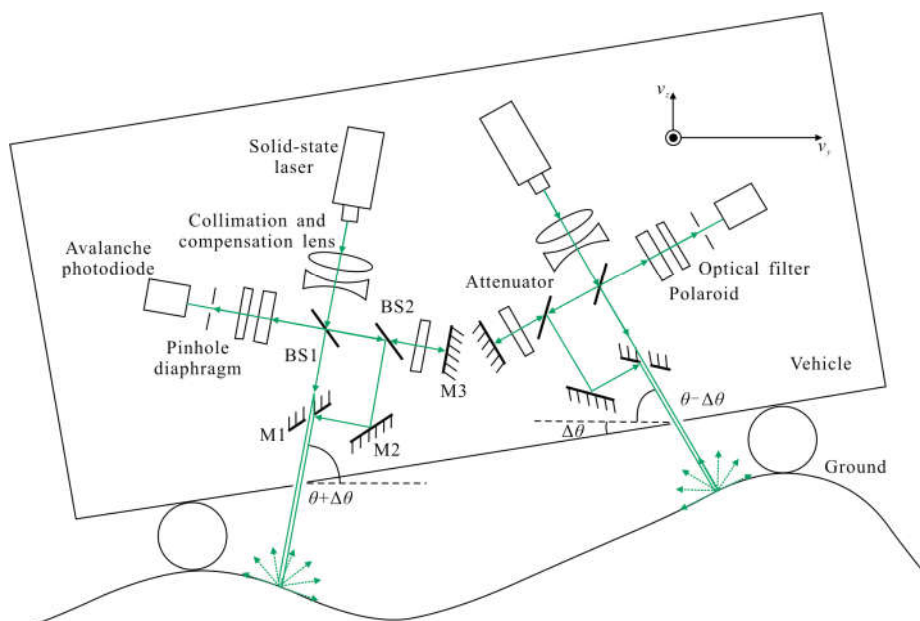


图 2 Janus 配置的分光再利用型 LDV 结构

Fig.2 Split-reuse LDV with Janus configuration

普勒拍频信号。

传统参考光型 LDV 只有一半的激光照射到地面, 而分光再利用型 LDV 中原本在传统参考光束结构中被衰减片衰减的光功率被分光镜 BS2 反射后同样入射到地面, 其照射到地面的总激光功率为原光束的 99%, 也就是说分光再利用型 LDV 的激光功率利用率是传统参考光型 LDV 的近两倍, 其散射光功率也是传统参考光型的近两倍, 其信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)为:

$$SNR = \frac{\eta W_s}{h\nu\Delta f} \quad (7)$$

式中:  $\eta$  为量子效率系数;  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为激光中心频率;  $\Delta f$  为探测器带宽;  $W_s$  为散射光功率。因此, 相比传统参考光束型 LDV, 分光再利用型 LDV 的信噪比有较大提高, 更适合陆用导航领域。

当路面起伏、车辆颠簸时, 两子系统的多普勒频率分别为:

$$f_{D1} = 2[v_x \cos(\theta - \Delta\theta) - v_z \sin(\theta - \Delta\theta)] / \lambda \quad (8)$$

$$f_{D2} = 2[v_x \cos(\theta + \Delta\theta) + v_z \sin(\theta + \Delta\theta)] / \lambda \quad (9)$$

车辆实际行驶中,  $v_z \ll v_y$ , 倾角变化  $\Delta\theta$  可近似为:

$$\Delta\theta' = \arctan \left[ \frac{f_{D1} - f_{D2}}{(f_{D1} + f_{D2}) \tan \theta} \right] \quad (10)$$

计算所得载体运行速度  $v_y'$  为:

$$v_y' = \lambda(f_{D1} + f_{D2}) / (4 \cos \theta \cos \Delta\theta') \quad (11)$$

显然, 公式(11)同样适用于路面理想、倾角变化  $\Delta\theta=0$  时的情况, 因此公式(11)为 Janus 配置的参考光束型 LDV 系统速度测量的通用公式。速度测量相对误差为:

$$\left| \frac{\Delta v_y}{v_y} \right| = \left| \frac{v_y' - v_y}{v_y} \right| = \sqrt{1 + (v_z/v_y)^2} - 1 \quad (12)$$

从公式(12)可以看出, Janus 配置的参考光束型 LDV 系统测速误差仅与车辆竖直方向速度与水平方向速度比值  $v_z/v_y$  有关。

## 2 标定方法

### 2.1 Janus 配置 LDV 的速度误差模型

如图 3 所示,  $b$  系为 IMU 系, 建立 Janus 配置 LDV 相关的  $m$  系: 以车辆前行的水平方向为  $Y_m$  轴,

向前为正方向;竖直方向上  $Y_m$  轴垂线为  $Z_m$  轴,向上为正方向; $X_m$  轴由右手定则决定。 $m$  系中测速仪速度为:

$$V_L^m = [v_x \ v_y \ v_z]^T = \left[ 0 \ \frac{\lambda(f_{D1}+f_{D2})}{4\cos\theta\cos\Delta\theta'} \ 0 \right]^T \quad (13)$$

测速仪速度在导航坐标系表示为:

$$V_L^n = C_b^n C_m^b V_L^m \quad (14)$$

式中: $n$  为导航坐标系; $C_m^b$ 、 $C_b^n$  分别为  $m \sim b$  系和  $b \sim n$  系的转换矩阵。理想情况下  $C_m^b$  取单位矩阵。

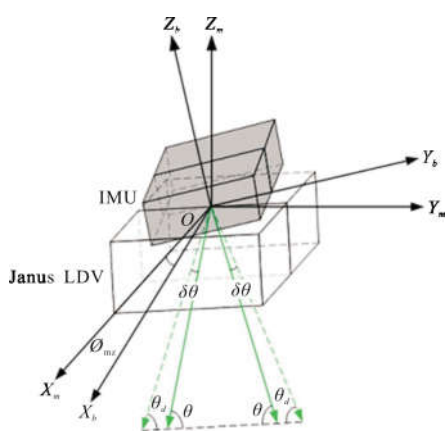


图 3 Janus 配置的 LDV 与 IMU 的安装关系

Fig.3 Installation relationship of the Janus configuration LDV and IMU

实际情况中 Janus 配置 LDV 与 IMU 之间存在安装误差角。由于陆用导航中往往只关注水平位置信息,且  $m$  系中测速仪速度  $v_x$  为零,  $v_z \ll v_y$ , 所以只需考虑  $m$  系与  $b$  系之间的航向误差角  $\phi_{m\sigma}$ 。Janus 配置的 LDV 两光束入射倾角  $\theta$  的设计值  $\theta_d$  均为  $70^\circ$ , 入射光线的倾角与设计值之间的误差为  $\delta\theta$ , 入射角真实值为  $\theta = \theta_d + \delta\theta$ , 所以  $m$  系中测速仪速度为:

$$\vec{V}_L^m = V_L^m + \delta V_L^m = V_L^m + C_\theta \delta\theta \quad (15)$$

式中:  $\delta V_L^m = C_\theta \delta\theta$ ,  $C_\theta = -[0 \ v_y \tan\theta_d \ 0]^T$ 。

导航坐标  $n$  系中测速仪速度为:

$$\vec{V}_L^n = (I - \phi \times) C_b^n (I - \phi_m \times) (V_L^m + \delta V_L^m) \quad (16)$$

式中:  $\phi$  为惯导系统姿态误差角;  $\phi_m$  为  $m$  系与  $b$  系的安装差角。

由公式 (16) 可得, Janus 配置的 LDV 速度误差  $\delta V_L^n$  模型为:

$$\delta V_L^n = (V_L^n \times) \phi + C_b^n (V_L^m \times) \phi_m + C_b^n C_\theta \delta\theta \quad (17)$$

其中,  $(V_L^m \times) \phi_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & v_y \\ 0 & 0 & 0 \\ -v_y & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi_{m\sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \phi_{m\sigma}$ 。令  $C_\phi = [v_y \ 0 \ 0]^T$ , 公式(17)可以变换为:

$$\delta V_L^n = (V_L^n \times) \phi + C_b^n C_\phi \phi_{m\sigma} + C_b^n C_\theta \delta\theta \quad (18)$$

## 2.2 Kalman 滤波标定

采用 Kalman 滤波标定法标定与 Janus 配置 LDV 有关的误差参数, 滤波系统的误差模型为:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)w(t) \quad (19)$$

式中:  $X(t) = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta V_E \ \delta V_N \ \delta L \ \delta \lambda \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \nabla_x \ \nabla_y \ \phi_{m\sigma} \ \delta\theta]^T$ , 为 14 维的状态向量;  $F(t)$  为  $14 \times 14$  的系统状态转移矩阵;  $\phi_E$ 、 $\phi_N$ 、 $\phi_U$  为惯导系统的姿态误差角;  $\delta V_E$ 、 $\delta V_N$  为惯导系统的速度误差;  $\delta L$ 、 $\delta \lambda$  为惯导系统的位置误差;  $\varepsilon_i (i=x, y, z)$  为  $i$  轴陀螺的零漂;  $\nabla_j (j=x, y)$  为  $j$  轴加速度计的零偏。

以 DGPS 输出的位置  $p_G$  以及求得的速度  $V_G^n$  为基准, 以惯导系统的速度误差  $\delta V^n$ 、位置误差  $\delta p$  及 Janus 配置的 LDV 速度误差  $\delta V_L^n$  为观测量滤波求得  $\phi_{m\sigma}$  和  $\delta\theta$ , 量测方程为:

$$Z(t) = [\delta V^n \ \delta p \ \delta V_L^n]^T = H(t)X(t) + v(t) \quad (20)$$

式中:  $H(t) = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 3} & I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 5} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} \\ V_L^n \times & 0_{3 \times 4} & I_{3 \times 5} & C_b^n C_\phi & C_b^n C_\theta \end{bmatrix}$ ,  $v(t)$  为量测噪声;  $0_{m \times n}$  为  $m$  行  $n$  列的零元素矩阵;  $I_{4 \times 4}$  为 4 阶单位矩阵。

## 3 实验验证

### 3.1 仿真实验

为了验证上述标定方法, 设计如下仿真。根据陆用车辆典型机动特性, 设置车辆的初始姿态及仿真行驶轨迹如下: 车体初始姿态  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ , 静止 780 s 后, 以  $1 \text{ m/s}^2$  的加速度行驶 20 s, 匀速行驶 1 000 s 后右转  $90^\circ$ , 然后匀速行驶 1 000 s, 左转  $90^\circ$  后再匀速行驶 2 000 s。

相关设备参数设置如下: 陀螺零偏  $0.01 (^\circ)/\text{h}$ , 噪声为  $0.0005 (^\circ)/\sqrt{\text{h}}$ ; 加速度计零偏  $50 \mu\text{g}$ , 噪声  $20 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ; 测速仪倾角误差  $1^\circ$ , 噪声  $0.02 \text{ m/s}$ ;

DGPS 的位置精度:0.5 m;IMU 系与测速仪系安装姿态差角:(0.5°,0.3°,1°)。

仿真结果如图 4(a)~(b)所示,分别为航向误差角  $\phi_{mc}$  及倾角误差  $\delta\theta$  的滤波收敛曲线,可以看出转弯有利于参数精度的提高,其最终取值如表 1 所示,记为 A。作为对比,表 1 同时给出了定点标定及速度差观测量的滤波标定结果,分别记为 B 和 C。可以看出文中所提方法具有最高精度的标定结果。

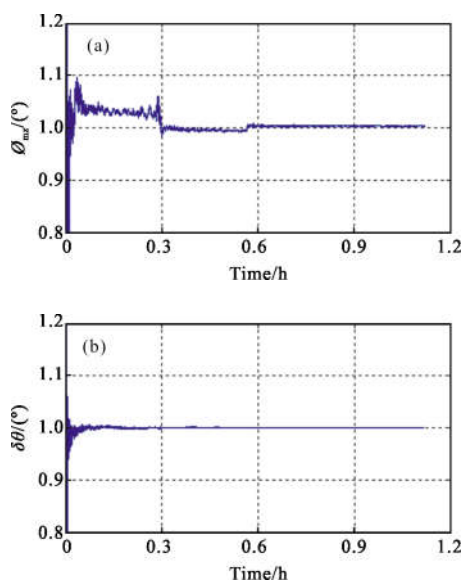


图 4 (a)  $\phi_{mc}$  和(b)  $\delta\theta$  的仿真滤波收敛曲线

Fig.4 Filtering convergence curves of (a)  $\phi_{mc}$  and (b)  $\delta\theta$  in simulation

表 1 仿真实验各参数取值

Tab.1 Value of each parameter in simulation experiment

Parameter	$\phi_{mc}/(^{\circ})$	$\delta\theta/(^{\circ})$
Set value	1	1
Final value of A	1.003 3	0.999 8
Final value of B	1.038 9	0.998 8
Final value of C	1.004 7	0.993 2

### 3.2 车载实验

为了进一步验证文中提出的 Janus 配置的 LDV 的标定方法,设计如下车载实验。实验系统如图 5 所示,由 IMU、Janus 配置的分光再利用结构 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 0.003 ( $^{\circ}$ )/h 的激光陀螺和三个零偏 50  $\mu\text{g}$  的石英加表组成,采样频率为 100Hz;DGPS 的

定位精度为 0.1 m,数据更新频率为 10Hz;导航计算机采集数据;蓄电池组给整个系统供电。载车行驶轨迹如图 6 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 2.1 h,共行驶 55.4 km。

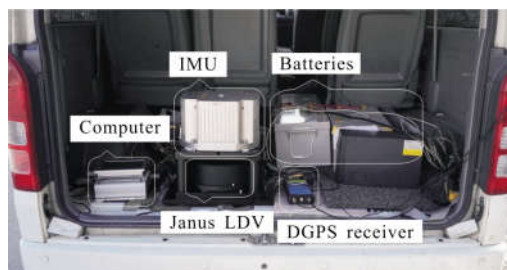


图 5 实验系统安装图

Fig.5 Installation diagram of the experiment system

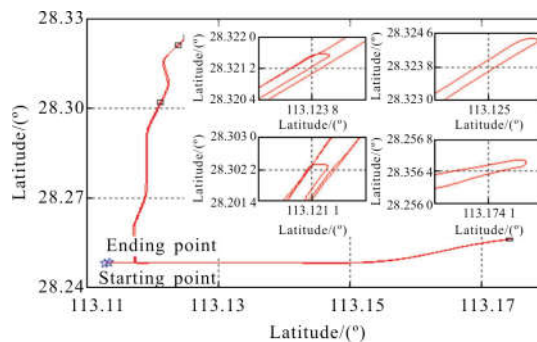


图 6 载车行驶轨迹

Fig.6 Route of the vehicle

计算机采集了 Janus 配置的 LDV 的测速数据,作为对比,计算机还同时采集了一个 LDV 子系统的测速数据。测速结果如图 7 所示,其中蓝色实线为

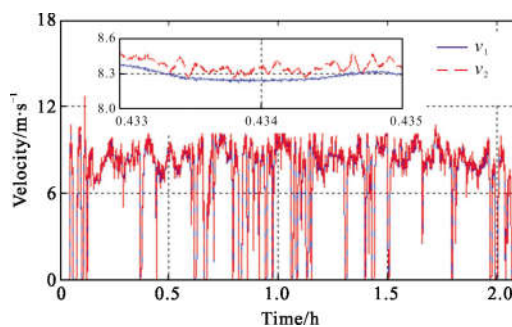


图 7 Janus 配置 LDV 及 LDV 子系统输出速度对比

Fig.7 Comparison of output velocities of the Janus configuration LDV and LDV subsystem

Janus 配置的 LDV 的测速数据,记为  $v_1$ ;红色虚线为 LDV 子系统的测速数据,记为  $v_2$ 。可以看出,虽然  $v_1$  和  $v_2$  的变化趋势一致,但由于 Janus 配置的 LDV 能

够减小车辆颠簸、倾角变化对测速结果的影响,所以相比于  $v_2, v_1$  减小了上下波动,变得更加平滑。这正是 Janus 配置的 LDV 的优势所在。同时可以看出,  $v_2$  总体上大于  $v_1$ , 这是测速仪光束倾角误差的影响。如果不标定测速仪有关误差参数,而是直接由 Janus 配置 LDV 的输出速度和 IMU 三个陀螺进行航迹推算,其定位结果如图 8 所示。最大位置误差为 253 m, 定位精度较低。

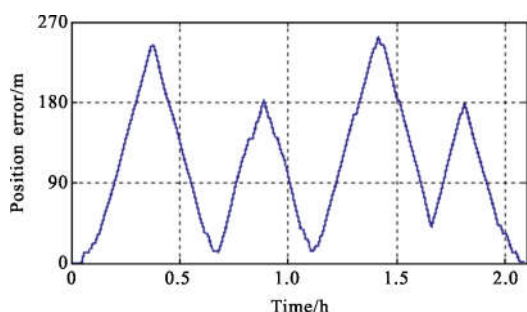


图 8 Janus 配置 LDV 有关参数标定前航迹推算定位误差

Fig.8 Position error of dead reckoning before the calibration of the relative parameters of the Janus configuration LDV

按照第 2 节滤波法对 Janus 配置 LDV 相关误差参数进行滤波标定,结果如图 9(a)、(b)所示,分别为  $m$  系与  $b$  系的航向误差角  $\phi_{mc}$ 、倾角误差  $\delta\theta$  的滤波收

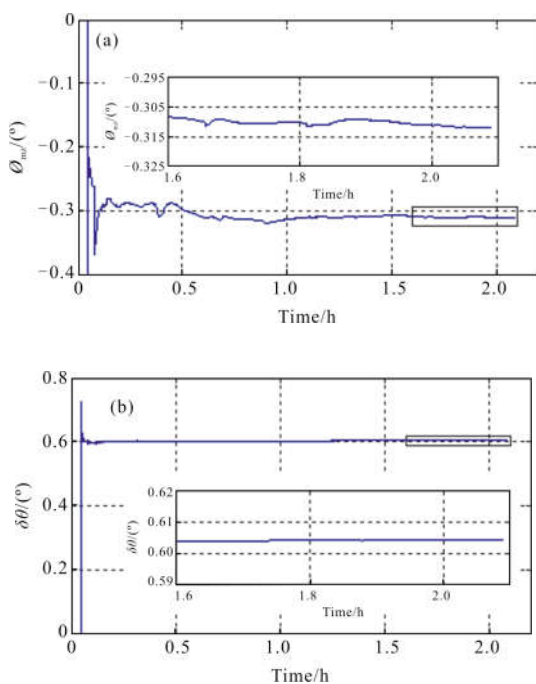


图 9 (a)  $\phi_{mc}$  和 (b)  $\delta\theta$  的实验滤波收敛曲线

Fig.9 Filtering convergence curves of (a)  $\phi_{mc}$  and (b)  $\delta\theta$  in experiment

敛曲线。可以看出这两个参数均能很快收敛,取值分别为:  $\phi_{mc} = -0.31209^\circ, \delta\theta = 0.60414^\circ$ 。

为了验证标定参数的有效性,由 Janus 配置 LDV 与 IMU 组成组合导航系统。首先,由 IMU 完成 13 min 快速初始对准;然后,由修正后的 Janus 配置 LDV 速度及 IMU 中的三陀螺输出进行航迹推算;最后,由 DGPS 数据为基准,计算航迹推算位置误差。结果如图 10 所示,其最大位置误差为 5.2 m。作为对比,图 11 给出了 LDV 子系统航迹推算位置误差,其最大误差值为 22 m。可以看出误差参数修正后 Janus 配置 LDV 的组合导航定位精度远远高于误差参数修正前组合导航定位精度及 LDV 子系统航迹推算的结果。高精度的导航结果证明了文中提出基于 DGPS 标定 Janus 配置 LDV 误差参数的计算方法是有效的。

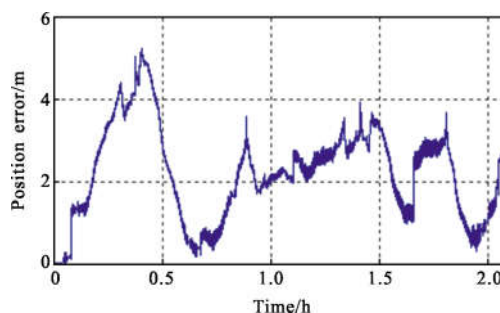


图 10 Janus 配置 LDV 有关误差参数补偿后航迹推算位置误差

Fig.10 Position error of dead reckoning after the compensation of the relative parameters of the Janus configuration LDV

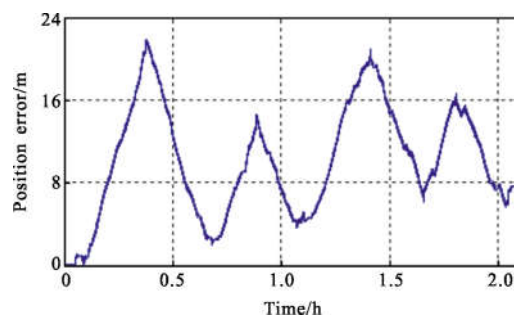


图 11 LDV 子系统航迹推算位置误差

Fig.11 Position error of dead reckoning of the LDV subsystem

## 4 结论

在陆用导航领域,为了抑制车辆颠簸、倾角变化对 LDV 测速的影响,文中设计了 Janus 配置的分光再利用型 LDV 并给出了 DGPS 辅助下的 Janus 配置

LDV 误差参数的标定方法,实施了仿真及车载实验验证了该标定方法的有效性。实验结果表明,该标定方法确实能够实现 Janus 配置 LDV 误差参数的高精度标定,大大提高导航定位精度。

#### 参考文献:

- [1] Yeh Y, Cummins H S. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10): 176-178.
- [2] Wang Tao, Zan Zhanhua, Zhang Cuiting, et al. Detection of internal thread for spacecraft with gas turbulence laser Doppler [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0406006. (in Chinese)
- [3] Gu Xiaobin, Feng Guoying, Liu Jian. Application of adaptive filtering algorithm in the weak vibration measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0417003. (in Chinese)
- [4] Nie Yanju, Meng Zhaokui, Hu Shuling, et al. Frequency domain adaptive threshold detection for laser Doppler velocimetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0406002. (in Chinese)
- [5] Lu Zhenzhong, Wang Peinan, Liu Jifang, et al. Method of differential laser Doppler ship wake detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3525-3529. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Ying Zhihui, Gao Chunfeng, Wang Qi, et al. Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained land navigation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204003. (in Chinese)
- [8] Zhou J, Huang H, Long X W. A novel laser Doppler velocimeter [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(21): 2170-2176.
- [9] Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter based on Janus configuration [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(2): 266-271. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Tang K H, Wang J L, Li W L, et al. A novel INS and Doppler sensors calibration method for long range underwater vehicle navigation [J]. *Sensors*, 2013, 13(11): 14583-14600.
- [13] Lv Z P, Tang K H, Wu M P. Online estimation of DVL misalignment angle in SINS/DVL integrated navigation system [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011: 336-339.