

# 基于二维激光多普勒测速仪建立新组合 导航系统的方法

厉文涛<sup>1</sup>, 聂晓明<sup>2</sup>, 周健<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

<sup>2</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 为了提高车辆在行驶过程中的测量精度,提出一种利用二维激光多普勒测速仪(2D LDV)和捷联惯性导航系统(SINS)建立新的组合导航系统的方法。阐述了 2D LDV 的基本原理,并且详细讨论了由 2D LDV 和 SINS 组成的新的组合导航系统进行位置解算的过程。理论及实验结果表明:新的组合导航系统很好地抑制了纯惯性导航误差发散的特性;相比于由一维激光多普勒测速仪构成的组合导航系统,2D LDV 提高了载体速度测量的精度,从而进一步提高了组合系统的导航精度。新的组合导航系统两次实验在 2.2 h 内的定位误差分别只有 5.9 m 和 5.2 m。

**关键词** 遥感; 二维激光多普勒测速仪; 捷联惯性导航系统; 组合导航系统; 位置解算

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0310001

## Method for Establishing New Integrated Navigation System Based on Two-Dimensional Laser Doppler Velocimeter

Li Wentao<sup>1</sup>, Nie Xiaoming<sup>2</sup>, Zhou Jian<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>2</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** In this study, a newly built integrated navigation system using a two-dimensional laser Doppler velocimeter (2D LDV) combined with strapdown inertial navigation system (SINS) to enhance the measurement accuracy of a vehicle being driven is proposed. The basic principle of the 2D LDV is described, and the dead reckoning process is discussed in detail with respect to the newly built system comprising 2D LDV and SINS. The theoretical and experimental results show that the proposed navigation system effectively alleviates the error accumulation effect of the pure SINS. Moreover, compared with the integrated navigation system composed of one-dimensional laser Doppler velocimeter, the 2D LDV improves the accuracy of the carrier velocity measurement, thereby demonstrating the improved navigation accuracy of the proposed navigation system. The dead reckoning position errors of the proposed navigation system in the two experiments are observed to be only 5.9 m and 5.2 m over 2.2 h.

**Key words** remote sensing; two-dimensional laser Doppler velocimeter; strapdown inertial navigation system; integrated navigation system; dead reckoning

**OCIS codes** 280.3340; 250.0040; 250.4390; 250.4745

## 1 引 言

捷联惯性导航系统(SINS)已被广泛应用于许

多不同的领域,包括科学研究及车辆位姿、速度和位置测量的工业应用<sup>[1-5]</sup>。SINS 主要由陀螺仪和加速度计组成,它们分别被用来测量载体的角速度和加

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-09-20; 录用日期: 2019-10-15

基金项目: 湖南省自然科学基金(2016JJ3022)

\* E-mail: 841788292@qq.com

速度。SINS 在短时间内测得的信息很准确,但随着时间的推移,所测信息将会变得不可靠,这是因为它是通过角速度和加速度的积分来获取信息的。因此,一般从 SINS 中获取运动信息的导航系统的位置误差会随着时间的推移而发散。

为了克服 SINS 的这一缺点,需借助其他传感器进行外部阻尼,如里程表、多普勒计程仪以及光电测速仪等等。但它们都有缺点<sup>[6-10]</sup>:比如里程表,车轮的滑动、弹跳以及缩进都会导致测量误差;由于声波的发散角大,多普勒计程仪测量精度较低;光电测速仪虽然是基于空间滤波技术进行速度测量,但它的景深很小以至于信号频繁丢失。

近年来,本课题组进行了一种新的尝试,即利用一种分束再利用的激光多普勒测速仪(LDV)为车载惯性导航系统提供速度参数<sup>[11]</sup>。由一个新 LDV 和 SINS 组成的组合导航系统很好地抑制了纯 SINS 带来的累计误差,并且大大提高了导航精度,然而该 LDV 只是一个用于组合导航系统的一维激光多普勒测速仪(1D LDV)。当车辆行驶在不平整路面上时,由 1D LDV 提供的车辆速度不够准确。最终的结果是组合导航系统的位置误差随着时间的推移而变大。

本文提出了一种用于建立二维激光多普勒测速仪(2D LDV)的方法,不论路况如何,该 LDV 都可以持续地为车载组合导航系统提供准确的速度参数;并基于 SINS,给出了利用 2D LDV 建立新组合导航系统的方法流程。

## 2 LDV 模型

### 2.1 1D LDV

图 1 给出了 1D LDV 的光路布置图,即物理模型,它由一个单频激光源、两个分束器(BS)、一个衰减器、一个光阑、一个探测器及几个反射镜(M)组成。由激光源发出的激光束被反射率为 50%的分束器 BS1 分成两束,其中透射光束通过反射镜 M3 的中心孔照射在地面上,反射光束又被反射率为 98%的分束器 BS2 分束,BS2 上的反射光束通过反射镜 M2 和 M3 后以相同的方向照射在地面上。BS2 上的透射光束又被反射镜 M1 反射回来。经地面散射的一部分光束按原路径返回入射到光电探测器上。基于光电探测器的平方率特性,输出信号包含了差频项和多普勒信号,信号的频率与车辆的速度成正比,即

$$f_D = 2v_x \cos \alpha / \lambda, \quad (1)$$

式中: $f_D$  为信号的多普勒频率, $v_x$  为车辆的速度, $\alpha$  为系统激光的发射倾角, $\lambda$  为激光波长。所以车辆的速度可以表示为

$$v_x = \lambda f_D / (2 \cos \alpha). \quad (2)$$

从图 1 中可以看出,由于传统参考光模式配置中衰减器衰减的光束能量随着激光的分束而被分开并被重新利用,新光路结构配置下光束能量的利用率大约是传统参考光模式配置下光能量利用率的两倍,因此,对于相同的路面,新光路结构配置下地面散射对应的散射光束能量是传统参考光模式配置下光束能量的两倍。称这种光路结构的系统为分束再利用型 LDV,(2)式也就是 1D LDV 的数学模型。

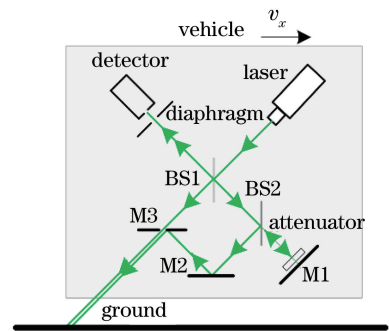


图 1 1D LDV 光路布置

Fig. 1 Optical arrangement of 1D LDV

### 2.2 2D LDV

当车辆行驶在不平整的路面上时,为了解决车辆颠簸摇摆时 1D LDV 测量误差较大的问题,本文设计了一种 2D LDV 并详细论述了其工作原理。这种安装在车辆底部的仪器由两个一维子系统组成,其中一个子系统的激光束朝前入射,另一个朝后入射,它们的发射倾角相同,其物理模型如图 2 所示。当车辆行驶在不平整的路面上时,它会在 X 轴方向上有一个速度  $v_x$ ,同时在 Z 轴方向上有一个速度  $v_z$ 。根据多普勒效应,两个子系统的多普勒频率可以表示为

$$f_{D1} = \frac{2(v_x \cos \alpha + v_z \sin \alpha)}{\lambda}, \quad (3)$$

$$f_{D2} = \frac{2(v_x \cos \alpha - v_z \sin \alpha)}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: $f_{D1}$  为子系统 1 的多普勒频率, $f_{D2}$  为子系统 2 的多普勒频率。

根据(3)式和(4)式,可以分别得到车辆在 X 轴和 Z 轴方向的速度表达式,也即 2D LDV 的数学模型:

$$v_x = \frac{\lambda(f_{D1} + f_{D2})}{4 \cos \alpha}, \quad (5)$$

$$v_z = \frac{\lambda(f_{D1} - f_{D2})}{4 \sin \alpha} \quad (6)$$

对于 1D LDV(假设只包含子系统 1), 车辆的速度可以根据(2)式计算出, 即

$$v'_x = \lambda f_{D1} / (2 \cos \alpha) \quad (7)$$

根据(5)式和(7)式, 1D LDV 测量的速度的相对误差可以表示为

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{v'_x - v_x}{v_x} = \frac{f_{D1} - f_{D2}}{f_{D1} + f_{D2}} = \frac{v_z \sin \alpha}{v_x \cos \alpha} \quad (8)$$

根据(8)式, 假设  $v_x = 10 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $v_z = 0.5 \text{ m/s}$ , 则 1D LDV 的速度测量的相对误差为 2.9%。所以在组合导航系统中利用一个 2D LDV 来测量车辆的速度很有必要。

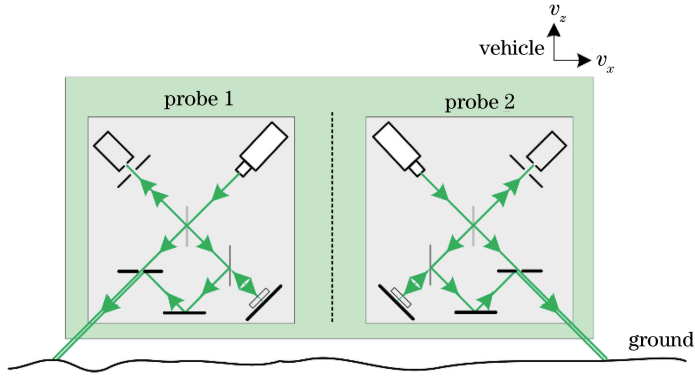


图 2 2D LDV 的光路布置

Fig. 2 Optical arrangement of 2D LDV

### 3 基于 2D LDV 和 SINS 的组合导航系统

2D LDV 由于具有测量高精度、环境适用性强的优点, 可以用来和 SINS 构成一种新型的组合导航系统。2D LDV/SINS 组合导航系统的结构如图 3 所示。

首先, 激光测速仪安装时存在安装角度误差, 这会导致其比例因子偏离设计值。考虑到在惯性导航系统启动初期误差还没有发散, 系统测量精度较高, 因此利用惯性导航系统启动初期的位置信息对激光

测速仪进行在线标定。通常标定距离不小于 1 km, 即车辆行驶距离不小于 1 km。标定完成后, 再利用 2D LDV 提供的准确速度信息快速完成系统的初始对准<sup>[12]</sup>。具体来说就是, 将速度和加速度项添加到方向余弦矩阵中, 以将体传感器加工轴线所在方向和本地导航参考坐标系关联起来。然后, 利用实时补偿来抑制纯 SINS 的误差(初始对准误差、设备误差和计算误差等等)。系统初始对准完成后, 基于误差模块反馈, 利用组合导航系统对测速仪的输出进行实时误差监测, 具体来说就是, 将

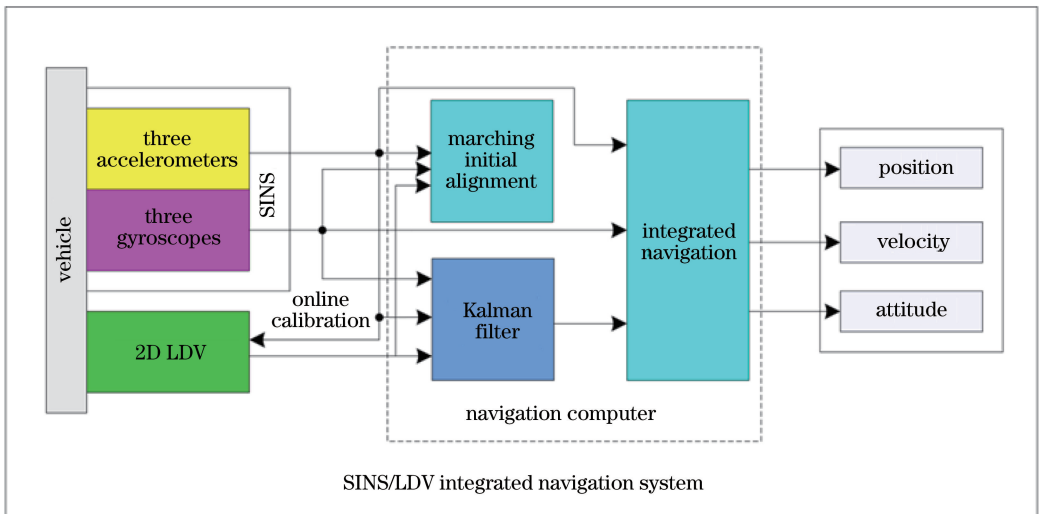


图 3 LDV/SINS 组合导航系统的结构图

Fig. 3 Structure of LDV/SINS integrated navigation system

SINS 和 2D LDV 之间的速度差值视为 Kalman 滤波器的观测值,用来计算基于组合导航系统动态误差模块的 SINS 的误差。通过直接改变输出,将系统误差的估计值用于基本 SINS 数据的校正,从而使测量残差保持在稳定的最小值。最后,将惯性导航系统的输出与经 Kalman 滤波器校正后的速度输出进行组合,完成导航解算,从而得到载体的位置、速度和姿态信息。

### 4 实 验

在整个新组合导航系统的建立过程中,2D LDV 是一个关键部分,它的主要性能参数如表 1 所示。

利用一个瑞士转台实施两个子系统精度测量的

表 1 2D LDV 的主要性能参数  
Table 1 Main performance parameters of the 2D LDV

Parameter	Value
Relative accuracy of velocity measurement ( $1\sigma$ ) / %	Probe 1 0.043
	Probe 2 0.046
Range of velocity measurement / ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	0.1-120
Data update rate / Hz	100
Installation distance / m	<1.5
Wavelength of laser / nm	532
Inclination angle of the probes / ( $^\circ$ )	75

评估实验,这种转台的转速稳定性很好,相对误差小于  $10^{-5}$ 。当转台以  $1000 (^\circ)/\text{s}$  转动时,两个子系统的测量结果分别如图 4(a)和图 4(b)所示。由图 4 可知,两个子系统的速度测量的相对误差( $1\sigma$ )分别为 0.043%和 0.046%。

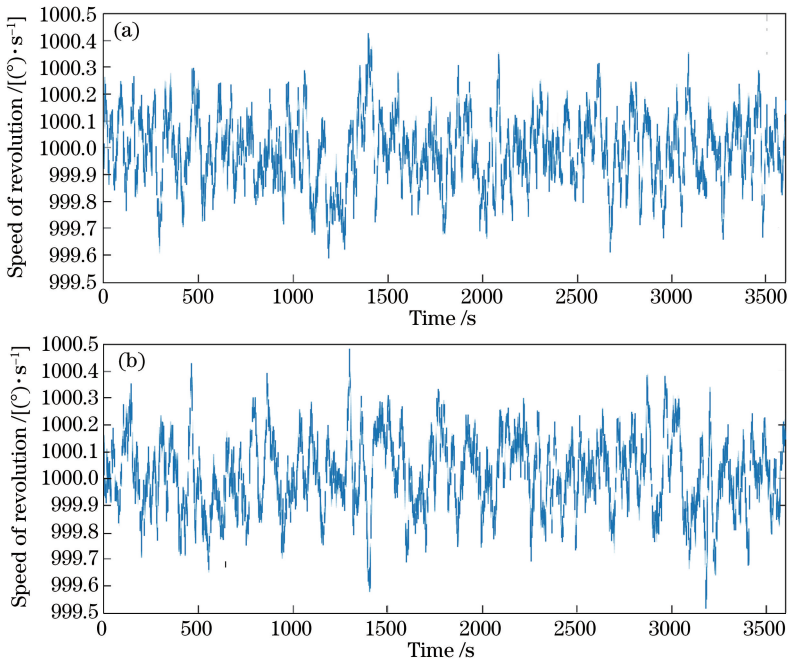


图 4 两个子系统的速度测量结果。(a)子系统 1;(b)子系统 2

Fig. 4 Speed measurement results of two subsystems. (a) Subsystem 1; (b) subsystem 2

将惯性测量单元(IMU)、2D LDV、显控单元以及差分定位系统(DGPS)接收器安装在车辆上,如图 5 所示,进行动态车辆的实验。实际上,实验中使用的是一种高精度 DGPS 接收器,它的定位误差在 0.2 m 以内,因此它输出的位置信息可以作为分析 2D LDV 和 SINS 测量结果的参考值。

根据 DGPS 接收器的数据,车辆的运动曲线如图 6 所示。图 7 所示为 2D LDV 的测量结果,其中小框图中给出了两个子系统一段时间内测量得到的速度曲线。由图 7 的小框图可以看出,在整个实验过程中两个子系统测量得到的速度是不同的。一个

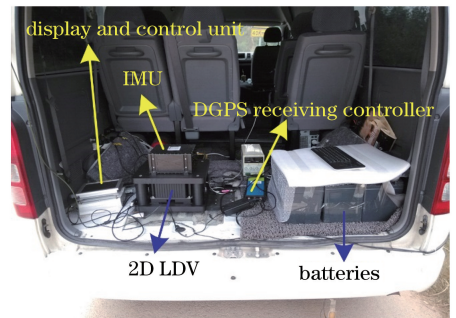


图 5 实验照片

Fig. 5 Photo of the experiment

子系统的曲线上升时另一个在下降,那是因为车辆

的颠簸对两个子系统的影响是相反的。导致的结果是一个子系统测量的速度值升高,而另一个子系统测量的速度值下降。当且仅当车辆平稳运行时,两个子系统的速度测量值相等。车辆向前的速度可以通过两个子系统的测量结果计算得到,这样可以抑制车辆的颠簸对 LDV 测量结果的影响,这也是 2D LDV 的优势所在。

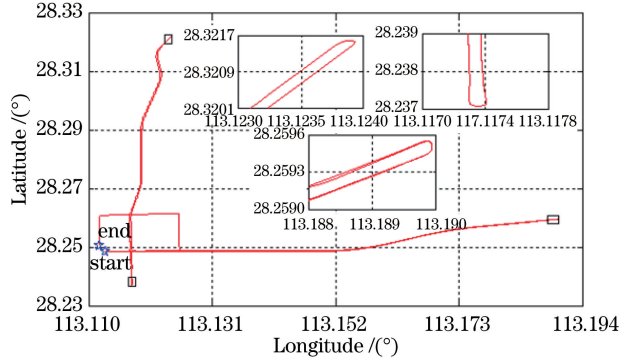


图 6 车辆的行驶路径

Fig. 6 Operating path of the vehicle

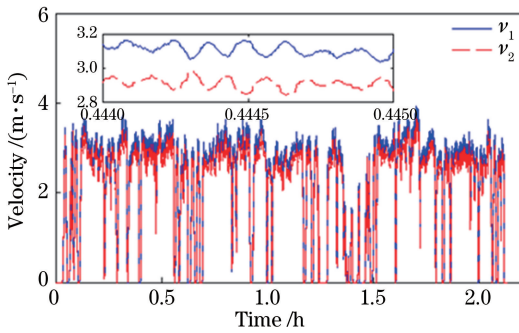


图 7 2D LDV 子系统的输出速度曲线

Fig. 7 Output velocity curves of the subsystems of 2D LDV

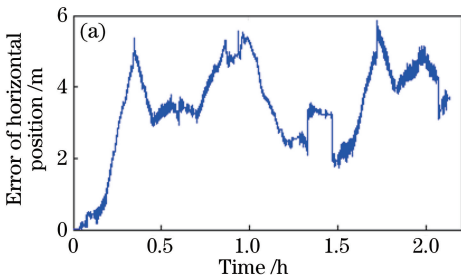


图 9 2D LDV/SINS 组合系统的第一次测量结果。(a)水平位置误差曲线;(b)高度位置误差曲线

Fig. 9 First results of 2D LDV/SINS integrated system. (a) Error curve of horizontal position;

(b) error curve of height position

图 8 所示为纯 SINS 水平位置的误差。图 9 所示为利用新组合导航系统(2D LDV 和 SINS)进行第一次定位解算实验的结果,为了验证图 9 中解算结果的重复性进行了第二次实验,结果如图 10 所示。图 9 和 10 中的(a)是组合系统水平位置的误差曲线,(b)是组合系统高度位置的误差曲线。根据图 9 和图 10,可以看出组合系统的位置误差很小。第一次定位解算实验的水平位置误差从 1591.0 m 降到了 5.9 m,组合系统高度位置的最大误差也仅有 0.4 m;第二次定位解算实验时组合系统的水平位置误差降到了 5.2 m,高度位置的最大误差也在 0.4 m 左右。纯 SINS 速度测量误差具有差异性,IMU 的定位误差也有所差异,这对于长时间工作的导航系统来说是有害的。由 1D LDV 和 SINS 构成的传统组合导航系统很好地降低了纯 SINS 的累计误差并且很好地提高了系统导航精度。对于由 2D LDV 和 SINS 构成的新组合导航系统:一方面很好地抑制了纯 SINS 的累计误差;另一方面,2D LDV 提高了车辆颠簸摇摆时载体的测速精度,从而进一步提高了导航精度。

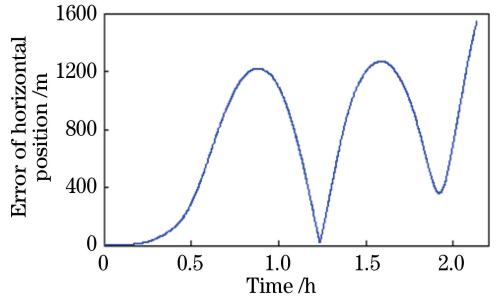
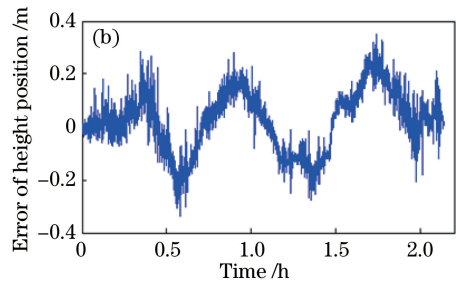


图 8 纯 SINS 水平位置误差曲线

Fig. 8 Error curve of horizontal position of single SINS



## 5 结 论

本文提出了一种用于提高车辆在不平整路面行驶时的测量精度的方法,结合 2D LDV 和 SINS 设

计了新的组合导航系统,2D LDV 由两个 1D 子系统组成(其中一个子系统的激光束朝前入射,另一个朝后入射)。新的组合导航系统很好地抑制了纯 SINS 误差发散的特性。另外,相比于由 1DLDV 构成的

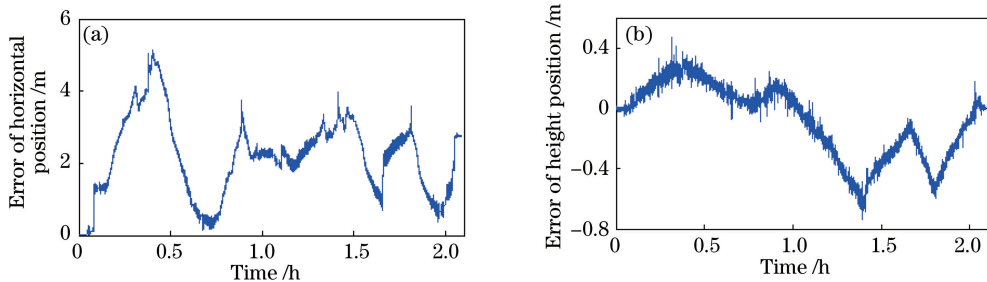


图 10 2D LDV/SINS 组合系统的第二次测量结果。(a)水平位置误差曲线;(b)高度位置误差曲线  
Fig. 10 Second results of 2D LDV/SINS integrated system. (a) Error curve of horizontal position;  
(b) error curve of height position

组合导航系统,2D LDV 显著提高了载体速度测量的精度,从而进一步改善了导航精度。在两次定位解算实验中,新的组合导航系统在 2.2 h 内的定位误差分别为 5.9 m 和 5.2 m。

### 参 考 文 献

- [1] Lin Y R, Zhang W, Xiong J Q. Specific force integration algorithm with high accuracy for strapdown inertial navigation system[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42: 25-30.
- [2] Gao K, Ren S Q, Chen X J, et al. Observability analysis of vehicle-based-laser strapdown inertial navigation system initial alignment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201007.  
高亢, 任顺清, 陈希军, 等. 车载激光捷联惯导系统初始对准可观性分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201007.
- [3] Hu J, Cheng X H. A modified attitude algorithm for fiber strapdown inertial navigation system[J]. Optik, 2015, 126(24): 5207-5212.
- [4] Ali J, Nzar M. Realization of initial alignment algorithm for strapdown inertial navigation system using central difference filter[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 4731-4736.
- [5] Gao S S, Wei W H, Zhong Y M, et al. Rapid alignment method based on local observability analysis for strapdown inertial navigation system[J]. Acta Astronautica, 2014, 94(2): 790-798.
- [6] Yu Z P, Hu Y J, Huang J M. GPS/INS/odometer/DR integrated navigation system aided with vehicular dynamic characteristics for autonomous vehicle application[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 936-942.
- [7] Li W L, Zhang L D, Sun F P, et al. Alignment calibration of IMU and Doppler sensors for precision INS/DVL integrated navigation [J]. Optik, 2015, 126(23): 3872-3876.
- [8] 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.
- [9] Wang Q Y, Li Y B, Diao M, et al. Moving base alignment of a fiber optic gyro inertial navigation system for autonomous underwater vehicle using Doppler velocity log [J]. Optik, 2015, 126(23): 3631-3637.
- [10] Terra O, Hussein H M. Simple and accurate calibration system for laser Doppler velocimeters[J]. Optik, 2019, 179: 733-739.
- [11] Zhou J, Nie X M, Lin J. A novel laser Doppler velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 319-323.
- [12] Gao C F, Wei G, Zhou J, et al. Research on SINS fast alignment for marching vehicles based on laser Doppler velocimeter [J]. Navigation and Control, 2013, 12(3): 1-5.  
高春峰, 魏国, 周健, 等. 基于激光多普勒测速仪的车载捷联惯导系统行进间快速对准方法研究[J]. 导航与控制, 2013, 12(3): 1-5.