

基于二维激光多普勒测速仪的车载组合导航系统

陈红江¹, 聂晓明², 王梦成²

(1. 湖南省计量检测研究院, 湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了减小由车式载体上下颠簸而引入的测量误差, 设计了二维结构的激光多普勒测速仪 2-D LDV(laser Doppler velocimeter), 并将其与捷联惯导组合导航。阐述了二维激光多普勒测速技术的基本原理, 详细讨论了其与捷联惯导组合的具体结构并进行了车载实验。理论和实验结果表明: 2-D LDV 减小了由于车辆上下颠簸而引入的测量误差, 进一步提高了导航精度。车辆行驶总里程为 29.67 km, 纯捷联惯导的位置误差为 936 m, 1-D LDV/SINS 组合系统的位置误差 17.2 m, 而 2-D LDV/SINS 组合系统的位置误差仅有 7.1 m, 相对于 1-D LDV/SINS, 2-D LDV/SINS 更适合于车载组合导航系统。

关键词: 二维激光多普勒测速仪; 捷联惯导; 组合导航; 上下颠簸

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1217008

Vehicle integrated navigation system based on two dimensional laser Doppler velocimeter

Chen Hongjiang¹, Nie Xiaoming², Wang Mengcheng²

(1. Institute of Metrology of Hunan Province, Changsha 410073, China;
2. College of Leading Edge Interdiscipline, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to reduce the measurement error because of the jolting of the vehicle, a novel two dimensional laser Doppler velocimeter (2-D LDV) was presented. And an idea of building an integrated navigation using 2-D LDV together with strapdown inertial navigation system (SINS) was proposed. The basic principle of 2-D LDV was expounded and the specific structure of the system using 2-D LDV together with SINS was discussed in detail. The result of theory and experiment show that the 2-D LDV reduces the measurement error because of the jolting of the vehicle, which has greatly improved the positional accuracy of the navigation system. The position error has been decreased from 936 m with pure SINS to 17.2 m with the 1-D LDV/SINS integrated system to 7.1 m with the 2-D LDV/SINS integrated system for the total distance of 29.67 km. 2-D LDV is more suitable for the vehicle integrated navigation system relative to the 1-D LDV.

Key words: two dimensional laser Doppler velocimeter; strapdown inertial navigation; integrated navigation; jolt up and down

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 湖南省质量技术监督局科技计划项目(2017KYJH02); 国家质检总局科技计划项目(2015QK148)

作者简介: 陈红江(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事速度计量、惯性导航相关技术研究。Email: chenhongjiang4041@163.com

0 引言

惯性导航系统最初为军用需求而设计, 主要为航空、航天、地面及海上军事用户提供导航及控制服务, 是现代国防系统的核心和关键技术产品, 被广泛应用于军用飞机、导弹、舰艇、核潜艇及坦克等国防领域。随着技术的发展, 惯性导航系统正朝着小型化、捷联化、组合导航的方向发展。多系统融合, 多种导航方式组合的系统将在未来军事战场上扮演十分重要角色^[1-3]。对于车式载体而言, 里程计受地面环境影响较大, 车轮跳动、打滑及变形都会给测量带来误差。

为了解决里程计过多依赖车轮的问题, 国防科技大学的周健团队采用一维激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Velocimeter, LDV) 与惯性导航系统进行组合, 提高了惯性导航系统的定位精度^[9-12]。但是一维激光多普勒测速仪在车式载体上下颠簸时会引入测量误差。为了减小由车式载体上下颠簸而引入的测量误差, 文章设计了二维结构的激光多普勒测速仪, 并将其与捷联惯导组合导航, 进一步提高惯性导航系统的定位精度。

1 2-D LDV 基本原理及其与捷联惯导组合进行航迹推算

1.1 2-D LDV 的基本原理

一维激光测速仪的光路结构如图 1 所示, 它在传统参考光模式的基础上进行了改进: 将传统参考光模式中本振光路中的衰减片换成一个 45° 放置的高反射率镜片 BS2, 这样一方面既保持了原结构中

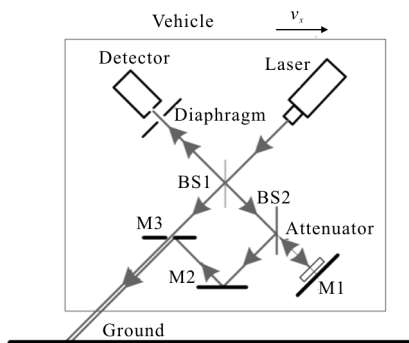


图 1 一维激光多普勒测速仪的光路结构
Fig.1 Optical structure of 1-D LDV

参考波与回波强度匹配的优点; 另一方面, 通过增加高反镜 M2 和中心带孔的高反镜 M3 使得原结构中被衰减片衰减掉的那部分光又重新被利用起来, 大大增强了探测光的光强, 从而提高了回波信号的强度, 也进一步提高了测量可靠性。载体运动速度为:

$$v = \frac{\lambda f_D}{2\cos\alpha} \quad (1)$$

式中: f_D 为多普勒频率; v 为车式载体的运动速度; α 为测速系统的发射倾角; λ 为激光束的波长。

为了减小由车式载体上下颠簸而引入的测量误差, 设计了二维结构的激光多普勒测速仪, 光路布置如图 2 所示。系统由两套一维测速子系统组成, 安装在车辆底部, 分别以相同的发射倾角向车头和车尾方向的地面发射激光束, 且发射频率相同, 同时测量各自的多普勒频率。

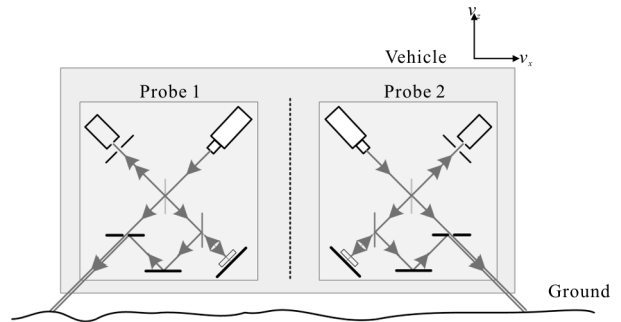


图 2 二维激光多普勒测速仪的光路布置
Fig.2 Optical path arrangement of 2-D LDV

当车辆在行驶过程中, 路面凹凸不平, 存在颠簸起伏时, 车式载体在前进方向上的运动速度为 v_x , 在竖直方向上的运动速度为 v_z 。由多普勒效应可知, 两套一维测速子系统的多普勒频率分别为:

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

$$f_{D2} = \frac{2(v_x \cos\alpha - v_z \sin\alpha)}{\lambda} \quad (3)$$

这里和分别对应探头 1 和探头 2 的多普勒频率。联立公式(2)、(3), 可得到车辆在前进和竖直方向的速度分别为:

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

$$v_z = \frac{\lambda(f_{D1} - f_{D2})}{4\sin\alpha} \quad (5)$$

如果由一维子系统推算车辆的运动速度, 由公

式(1)可知:

$$v_x' = \lambda f_{D1} / 2 \cos \alpha \quad (6)$$

则根据公式(4)、(6)可知,一维激光测速仪测量的相对误差为:

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{v_x' - v_x}{v_x} = \frac{f_{D1} - f_{D2}}{f_{D1} + f_{D2}} = \frac{v_z \sin \alpha}{v_x \cos \alpha} \quad (7)$$

假设 $v_x = 10 \text{ m/s}$, $\alpha = 30^\circ$, $v_z = 0.5 \text{ m/s}$, 由公式(7)可知,一维激光测速仪的速度测量误差将达到 2.9%。因此,设计和应用二维激光多普勒测速仪是非常必要的。

1.2 2-D LDV 与捷联惯导组合

由于 2-D 激光测速仪速度测量精度高,可以用其与捷联惯导进行组合,组合导航系统的结构框图如图 3 所示。首先捷联惯导系统根据 2-D LDV 提供精确的速度信息完成行进间的初始对准。此时借助 2-D LDV 为惯导系统提供准确的载体对地速度信息,则能将载体对地加速度和对地速度的干扰进行补偿,进而实现载体在行进过程中的快速对准^[13]。然后再利用捷联惯导输出的航向信息和 2-D LDV 输出的速度信息进行航迹推算,得到系统的位置、速度和姿态等信息。

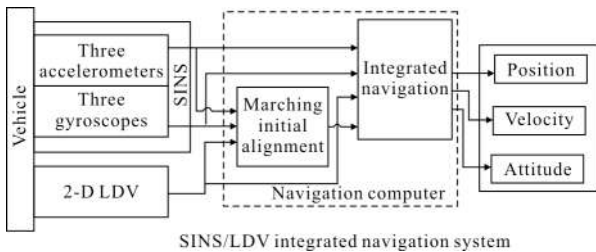


图 3 INS/LDV 组合导航系统的结构框图

Fig.3 Structure diagram of SINS/LDV integrated navigation system

1.2.1 LDV 辅助陆用捷联惯导系统行进间快速对准

当车式载体行驶时,由于载体存在对地的加速度,此时难以获得准确的载体对惯性系的重力信息,因此单纯依靠捷联惯组自身陀螺和加表的测量是无法完成准确的自主初始对准过程的。如果此时借助 LDV 为惯导系统提供准确的载体对地速度信息,则能将载体对地加速度和对地速度的干扰进行补偿,进而实现载体在行进过程中的快速对准。

设载体在初始时刻 t_0 所在经纬度为 (λ_0, L_0) , 在 t 时刻位置为 (λ, L_t) , 将姿态阵分为:

$$C_b^n(t) = C_e^n(t) C_i^e(t) C_{ib_0}^i C_b^{ib_0}(t) \quad (8)$$

其中

$$C_e^n(t) = \begin{bmatrix} -\sin \Delta \lambda & \cos \Delta \lambda & 0 \\ -\sin L_t \cos \Delta \lambda & -\sin L_t \sin \Delta \lambda & \cos L_t \\ \cos L_t \cos \Delta \lambda & \cos L_t \sin \Delta \lambda & \sin L_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_i^e(t) = \begin{bmatrix} \cos \omega_{ie} \Delta t & \sin \omega_{ie} \Delta t & 0 \\ -\sin \omega_{ie} \Delta t & \cos \omega_{ie} \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: C_e^n 为地球坐标系相对于导航坐标系的变换矩阵; $C_i^e(t)$ 为地心惯性系和地球坐标系之间的变换矩阵; ω_{ie} 为地球自转角速度; $\Delta t = t - t_0$; $\Delta \lambda = \lambda_t - \lambda_0$ 。由于实时经纬度 (λ_t, L_t) 未知,载体行驶速度相对地球自转角速度和地球半径的乘积 $\omega_{ie} \times R$ 来说为小量,故短时间内 (λ_0, L_0) 和 (λ_t, L_t) 近似相同,因此公式(9)可近似为:

$$C_e^n(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\sin L_0 & 0 & \cos L_0 \\ \cos L_0 & 0 & \sin L_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

利用陀螺输出的角运动信息通过捷联惯导姿态更新算法可进行实时解算 $C_b^{ib_0}(t)$, 其更新过程为:

$$C_b^{ib_0}(t) = C_b^{ib_0}(t) [\omega_{ib}^b \times] \quad (12)$$

式中: $[\omega_{ib}^b \times]$ 为陀螺测量输出 ω_{ib}^b 构成的反对称矩阵 $C_b^{ib_0}(t_0) = I$, 初始时刻为单位阵。因此,利用 LDV 给出的载体对地速度 v^b , 可以得到在载体惯性系中的速度 $v^{ib_0} = C_b^{ib_0} v^b$ 。因此求解姿态矩阵的关键就是求解载体惯性系到惯性系的变换矩阵,可由比力方程变换后求得:

$$\dot{v}^n(t) = f_{sf}^n(t) - [2\omega_{ie}^n(t) + \omega_{en}^n(t)] \times v^n(t) + g^n = f_{sf}^n(t) - [\omega_{in}^n(t) + \omega_{ie}^n(t)] \times v^n(t) + g^n \quad (13)$$

$$\omega_{ie}^n(t) = [0 \quad \omega_{ie} \cos L_t \quad \omega_{ie} \sin L_t] \quad (14)$$

$$\omega_{en}^n(t) = \begin{bmatrix} -v_N^n(t)/R & v_E^n(t)/R & v_D^n(t) \tan L_t / R \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\dot{L}_t & \dot{\lambda}_t \cos L_t & \dot{\lambda}_t \sin L_t \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

式中: $\dot{v}^n(t)$ 为载体的对地加速度; $f_{sf}^n(t)$ 为加速计的测

量值; $2\omega_{ie}^n(t) \times v^n$ 为哥氏加速度; $\omega_{en}^n(t) \times v^n$ 为载体在地表运动引起的向心加速度; g 为当地重力加速度。

由于 $C_b^{ib_0}(t)$ 已知, 因此利用 LDV 给出的载体对地速度 v^b , 可以得到载体在载体惯性系中的速度 $v^{ib_0} = C_b^{ib_0} v^b$, 对 $v^n(t) = C_{ib_0}^n(t) v^{ib_0}(t)$ 进行微分可得:

$$\dot{v}^n(t) = \dot{C}_{ib_0}^n(t) v^{ib_0}(t) + C_{ib_0}^n(t) \dot{v}^{ib_0}(t) = C_{ib_0}^n(t) [\dot{v}^{ib_0}(t) + \omega_{nib_0}^{ib_0}(t) \times v^{ib_0}(t)] \quad (16)$$

因此, 公式(14)可简化为:

$$C_{ib_0}^n(t) \left[\dot{v}^{ib_0}(t) + \omega_{ie}^{ib_0}(t) \times v^{ib_0}(t) - f_{sf}^{ib_0}(t) \right] = g^n \quad (17)$$

将 $C_{ib_0}^n(t) = C_i^n(t) C_{ib_0}^i$ 代入公式(17), 同时考虑到对准过程中实时 $C_n^{ib_0}$ 未知, $\omega_{ie}^{ib_0}(t)$ 只能忽略, 从而得到:

$$C_{ib_0}^n(t) \left[\dot{v}^{ib_0}(t) - f_{sf}^{ib_0}(t) \right] = C_i^n(t) g^n \quad (18)$$

式中: $v^{ib_0}(t)$ 为激光陀螺捷联惯组对地速度在 ib_0 系中的投影, 可以由补偿后 LDV 的输出 $v^b(t)$ 经过矩阵 $C_b^{ib_0}(t)$ 变换后得到, 而 $\dot{v}^{ib_0}(t) = C_b^{ib_0}(t) [\omega_{ib}^b(t) \times v^b + \dot{v}^b(t)]$ 。由公式(10)、(11)可得:

$$C_n^i(t) g^n = C_e^i(t) C_n^e(t) g^n = \begin{bmatrix} -g \cos L_0 \cos \omega_{ie} \Delta t \\ -g \cos L_0 \sin \omega_{ie} \Delta t \\ -g \sin L_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

考虑到降低加速度计测量噪声干扰的影响, 将公式(18)两边进行积分:

$$v^{ib_0}(t) = \int_{t_0}^t \left[\dot{v}^{ib_0}(t) - f_{sf}^{ib_0}(t) \right] dt \quad (20)$$

$$U^i(t) = \int_{t_0}^t C_n^i(t) g^n dt \quad (21)$$

可得:

$$C_{ib_0}^n(t) v^{ib_0}(t) = U^i(t) \quad (22)$$

分别取 $t=t_{k_1}$ 和 $t=t_{k_2}$ 两个时刻, 有 $C_{ib_0}^i v^{ib_0}(t_{k_1}) = U^i(t_{k_1})$ 和 $C_{ib_0}^i v^{ib_0}(t_{k_2}) = U^i(t_{k_2})$, 由于 $C_i^{ib_0}$ 中九个元素需要九个方程, 因此还需构造方程:

$$C_{ib_0}^i v^{ib_0}(t_{k_1}) \times v^{ib_0}(t_{k_2}) = U^i(t_{k_1}) \times U^i(t_{k_2}) \quad (23)$$

其中变换矩阵 $C_i^{ib_0}$ 为:

$$C_{ib_0}^i = \begin{bmatrix} [U^i(t_{k_1})]^T \\ [U^i(t_{k_2})]^T \\ [U^i(t_{k_1}) \times U^i(t_{k_2})]^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [v^{ib_0}(t_{k_1})]^T \\ [v^{ib_0}(t_{k_2})]^T \\ [v^{ib_0}(t_{k_1}) \times v^{ib_0}(t_{k_2})]^T \end{bmatrix} \quad (24)$$

将得到的 $C_{ib_0}^i$ 代入公式(8)中即可以得到初始姿态阵, 由于是基于惯性系作为参考基准, 因此能够有效解决动基座角运动和线运动扰动的影响。

1.2.2 组合导航系统滤波算法

组合系统采用间接法滤波, 卡尔曼滤波器接收捷联惯性导航系统和 LDV 两者输出速度的差值, 经过滤波计算, 估计各误差量, 用惯性导航系统误差的估计值去校正系统输出的导航参数, 使导航参数得到相应的补偿以趋于最优^[14], 其滤波方案如图 4 所示。

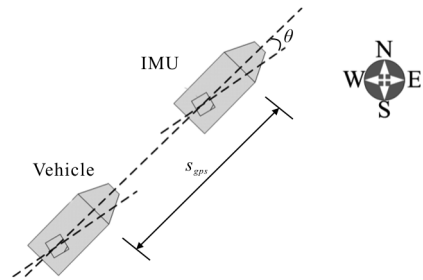


图 4 LDV 标定示意图

Fig.4 Calibration schematic diagram of LDV

SINS/LDV 组合导航系统的状态变量为:

$$X = [\phi_E, \phi_N, \phi_D, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_D, \delta \varphi, \delta \lambda, \delta h, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z] \quad (25)$$

式中: ϕ_E, ϕ_N, ϕ_D 为姿态误差角; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_D$ 为速度误差; $\delta \varphi, \delta \lambda, \delta h$ 为位置误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别表示陀螺仪的随机误差; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 分别表示加速度计的随机误差。

系统的状态方程表示为:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (26)$$

式中: 系统状态转移矩阵为 $F(t) = \begin{bmatrix} F_N & F_S \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{15 \times 15}$,

其中 F_N 为 9×9 维基本导航参数阵, F_S 为导航参数与惯性仪表误差之间的变换矩阵; $G(t)$ 为系统噪声输入矩阵; 系统噪声为 $W(t) = [\omega_{\varepsilon_x}, \omega_{\varepsilon_y}, \omega_{\varepsilon_z}, \omega_{\nabla_x}, \omega_{\nabla_y}, \omega_{\nabla_z}]^T$, 其

中 $\omega_{\varepsilon_x}, \omega_{\varepsilon_y}, \omega_{\varepsilon_z}$ 为陀螺仪的白噪声, $\omega_{\nabla_x}, \omega_{\nabla_y}, \omega_{\nabla_z}$ 为加速度计的白噪声。

由于 LDV 测得的是地速在车体坐标系内的分量, 要使其输出的速度与惯性导航系统输出的速度形成量测量, 必须将 LDV 的输出速度变换到导航坐标系中。这里取当地地理坐标系为导航坐标系, 根据 LDV 和惯性导航系统在导航坐标系中的速度差值建立量测方程为:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} v_{INS_E} - v_{LDV_E} \\ v_{INS_N} - v_{LDV_N} \\ v_{INS_U} - v_{LDV_U} \end{bmatrix} = H(t)X(t) + v(t) \quad (27)$$

式中: $v_{INS_E}, v_{INS_N}, v_{INS_U}$ 分别为惯性导航系统输出速度在导航坐标系中沿东、北、天顶方向的分量; $v_{LDV_E}, v_{LDV_N}, v_{LDV_U}$ 分别为激光多普勒测速仪测得速度在导航坐标系中沿东、北、天顶方向的分量; $H(t) = [0_{3 \times 3}, \text{diag}\{1 \ 1 \ 1\}, 0_{3 \times 9}]$; $v(t)$ LDV 沿东、北、天顶方向的速度误差。

1.2.3 系统安装及标校

LDV 由于安装误差的存在, 其比例因子无法事先确定。另外, 由于安装误差的存在, SINS 中惯性测量单元(Inertial Navigation Unit, IMU)的航向角并不等于车式载体的航向角, 二者之间存在一个固定的安装差角。因此, 在进行组合导航前需要对 LDV 比例因子和 IMU 安装差角进行标定。具体标定过程如图 4 所示。

令安装好 LDV 和 IMU 的车辆沿直线行驶一段距离, 起点记为 P , 终点记为 Q 。那么 PQ 间的实际距离可以通过 P 的经纬度(B_P, L_P)和 Q 点的经纬度(B_Q, L_Q)计算得到, 记为 s_{gps} 。同时根据 LDV 的输出速度及数据更新频率可以积分得到一个距离 s_{LDV} , 于是激光测速仪的比例因子可以通过公式(28)确定。

$$k_{LDV} = \frac{s_{gps}}{s_{LDV}} \quad (28)$$

设通过 GPS 得到的载体轨迹为轨迹 A, 通过 IMU 的航向角以及 LDV 的速度实时推算可以得到轨迹 B, 如图 5 所示。其中, 轨迹 A 的方向代表了车辆的航向, 轨迹 B 的方向代表了 IMU 的航向, 二者之间的夹角即为待标定的安装差角 θ 。设轨迹 A 在高斯平面的斜率为 k_A , 轨迹 B 在高斯平面的斜率为

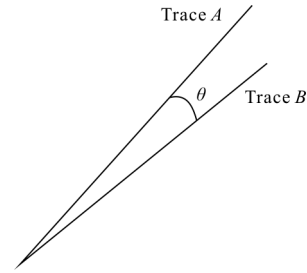


图 5 IMU 安装差角标定示意图

Fig.5 Angle of installation calibration schematic diagram of IMU

k_B , 那么安装差角 θ 可以通过公式(29)计算得到:

$$\theta = \arctan\left(\frac{k_A - k_B}{1 + k_A \cdot k_B}\right) \quad (29)$$

2 实验结果与分析

2-D LDV 是高精度组合导航系统的核心部件, 表 1 给出了其主要的性能指标。

表 1 2-D LDV 的主要性能指标

Tab.1 Main performance of 2-D LDV

Content	Performance
Forward subsystem	0.043% (1σ)
Backward subsystem	0.046% (1σ)
Range of measurement/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	0.1-120
Output frequency/Hz	100
Distance of installation/m	<1.5
Wavelength of laser/nm	532
Inclination angle/ $^\circ$	60

将 2-D LDV、SINS 及 GPS 接收机安装在车式载体上进行了车载实验, 实验照片如图 6 所示。实验中使用的 GPS 的定位误差小于 5 m。跑车过程中以 GPS 得到的位置为基准计算 2-D LDV 与 SINS 组合系统航迹推算的位置误差。实验结果如图 7~10 所



图 6 实验照片

Fig.6 Photo of experiment

示,其中图 7 为 GPS 记录的实验跑车路线,总里程为 29.67 km,图 8 为 2-D LDV 测得的车辆全程的速度曲线,即由其中两个一维测速子系统的测量值解算出的载体前进方向上的速度曲线,实验总时长约 2.2 h,包括 12 min 实验前准备时间,车辆行进中约 2 h。图 9 为 2-D LDV 中两个一维测速子系统在某一段时间内输出的速度曲线,图 10 为以 GPS 接收机输出的位置信息为基准,纯捷联惯导、前向测速子系统与 SINS 组合以及 2-D LDV/SINS 组合系统分别输出的位置误差曲线。

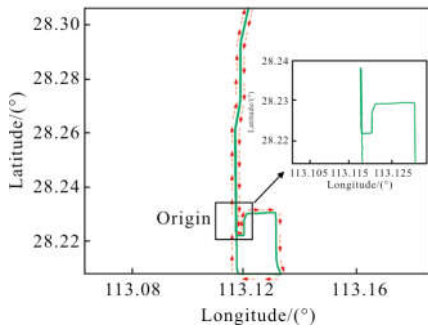


图 7 车式载体运行路线

Fig.7 Operating path of the vehicle

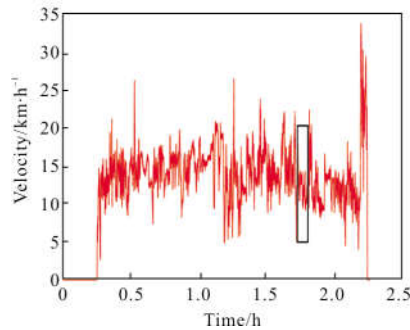


图 8 2-D LDV 输出的全程速度曲线

Fig.8 Output velocity curve of the 2-D LDV

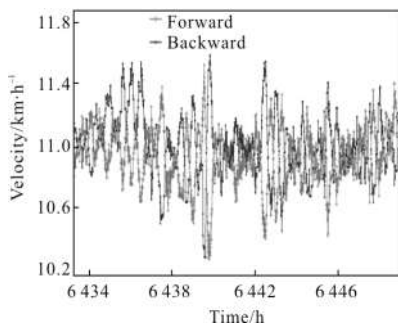
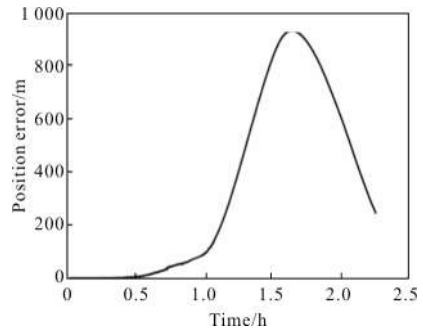


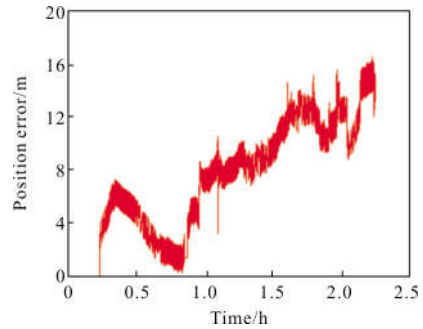
图 9 2-D LDV 中两个一维测速子系统一段时间内的测量值对比

Fig.9 Comparison of measurement values between two 1-D LDV subsystem during one period in 2-D LDV over a period of time



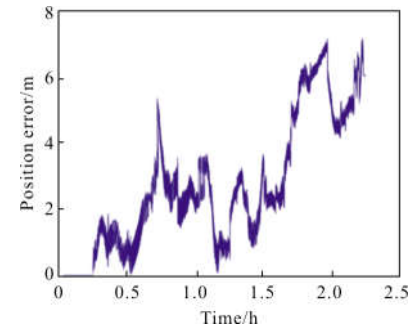
(a) 纯捷联惯导输出的位置误差曲线

(a) Positional error curve of the pure SINS



(b) 1-D LDV/SINS 组合系统输出的位置误差曲线

(b) Positional error curve of the 1-D LDV/SINS integrated system



(c) 2-D LDV/SINS 组合系统输出的位置误差曲线

(c) Positional error curve of the 2-D LDV/SINS integrated system

图 10 纯捷联惯导及组合系统的测量结果

Fig.10 Measurement results of pure strapdown inertial navigation system and its combination system

由图 8 可知,整个实验过程中 2-D LDV 工作正常,它测得了车式载体相对于地面的运行速度,实验开始前捷联惯导需要一段时间的预热。根据图 9 所示两个一维测速子系统输出的速度结果可知,整个实验过程中,两个一维测速子系统(前向子系统和后向子系统)输出的速度值并不完全相同,一个子系统输出速度曲线“凸起”时,另一个子系统输出速度曲线恰好“凹陷”。这是因为车辆上下颠簸对两个测速

子系统输出速度的影响正好相反,只有车辆完全平稳向前行驶时,它们输出的结果才相同。根据以上分析不难发现,利用两个测速子系统测得的速度值可以准确解算出载体前进方向上的速度,从而大大抑制由载体上下颠簸引入的测量误差,这就是 2-D LDV 相对于一维 LDV 的优势所在。由图 10 可知,由于纯捷联惯导存在误差累积效应,纯 SINS 输出的位置误差较大,为 936 m;而 1-D LDV(这里指 2-D LDV 中前向测速子系统)与 SINS 组合系统的位置误差较小,为 17.2 m,主要是因为速度信息的引入大大抑制了捷联惯导的误差累积效应;2-D LDV/SINS 组合系统的位置误差进一步减小,为 7.1 m,这是因为 2-D LDV 减小了由于车辆上下颠簸而引入的测量误差,进一步提高了导航精度。

3 结 论

文中基于两个一维测速子系统设计了 2-D LDV,并将其与捷联惯导进行组合,解决了车式载体的上下颠簸时一维激光测速仪测速误差大的难题,进一步提高了车载导航系统的定位精度。这种 2-D LDV/SINS 组合方式为对车式载体在复杂的外界环境下实现精确定位及高机动性具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Antonio Tiano, Antonio Zirilli, Fausto Pizzocchero. Application of interval and fuzzy techniques to integrated navigation systems [C]//Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society -NAFIPS, 2001(1): 13-18.
- [2] Lenon Cork, Rodney Walker. Sensor fault for UAVs using a nonlinear dynamic model and the IMM-UKF algorithm [J]. *Information, Decision and Control*, 2007(2): 374-555.
- [3] Yeon Fuh Jiang, Yu Pinglin. Error estimation of INS ground alignment through observability analysis [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 92-97.
- [4] Liang Dongsheng, Liu Zhaohui, Liu Wen, et al. Aerial vehicle astronomy autonomous navigation technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3020-3025. (in Chinese)
- [5] Gong Junbin, Cheng Hua, Ma Jie, et al. 3D terrain matching algorithm based on terrain contour orthogonal decomposition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 924-928. (in Chinese)
- [6] Chu Yonghui, Li Maodeng, Huang Xiangyu, et al. Autonomous navigation method based on landmark and pulsar measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 143-146. (in Chinese)
- [7] Yang Jinxian, Yuan Gannan. Design and experiment for INS based on MIMU/GPS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 285-294. (in Chinese)
- [8] Zhang Libin, Cui Naigang, Lv Shiliang, et al. Design of INS/CNS integrated navigation system for launch vehicle upper stage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2473-2480. (in Chinese)
- [9] Ham F M, Brown R G. Observability, eigenvalues and Kalman filtering [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(2): 269-273.
- [10] Zhou Jian. Preliminary study on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] Zhou Jian, Long Xingwu. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained inertial navigation system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(3): 477-483.
- [12] Zhou Jian, Nie Xiaoming, Lin Jun. A novel laser Doppler velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation [J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 64(4): 319-323.
- [13] Gao Chunfeng, Wei Guo, Zhou Jian, et al. Research on SINS fast alignment for marching vehicles based on laser Doppler velocimeter [J]. *Navigation and Control*, 2013, 12(3): 1-5. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)