

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.007

# 军用运输车辆高精度定位导航研究

郭 凌, 杜伟伟, 万 平, 李 睿  
(陆军勤务学院军事物流系, 重庆 401311)

**摘要:** 针对军用车辆导航应用的高可靠、抗干扰、低成本需求, 设计以北斗(Beidou navigation satellite system, BDS)与惯导(inertial navigation system, INS)松组合为核心, 融合地图匹配、车辆运动信息辅助等方法的高精度定位导航方案。分析车载 BDS/INS 松组合信息融合过程和方法及车载里程计/捷联惯导系统(strapdown inertial navigation system, SINS)补偿组合算法, 并基于此定位导航方案进行仿真分析, 研制导航定位模组并进行道路测试。仿真和道路测试结果验证了该定位导航系统的有效性。

**关键词:** 军用车辆; 北斗; 惯性导航; 高精度定位

**中图分类号:** TJ81 **文献标志码:** A

## Research on High Precision Positioning and Navigation of Military Transportation Vehicles

Guo Ling, Du Weiwei, Wan Ping, Li Rui

(Department of Military Logistics, Army Logistics University, Chongqing 401311, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of high reliability, anti-interference and low cost of military vehicle navigation application, a high-precision positioning and navigation scheme is designed, which takes the loose combination of Beidou navigation satellite system (BDS) and inertial navigation system (INS) as the core and integrates map matching, vehicle motion information assistance and other methods. The process and method of on-board BDS/INS loose integrated information fusion and the compensation combination algorithm of on-board odometer/strapdown inertial navigation system (SINS) are analyzed. Based on this positioning and navigation scheme, the navigation and positioning module is developed and tested on the road. Simulation and road test results verify the effectiveness of the positioning and navigation system.

**Keywords:** military vehicle; Beidou; inertial navigation; high precision positioning

## 0 引言

军用运输车辆是我军部队现行装备的基础性陆基通用机动装备, 时空数据是训练保障最基础的数据, 军用运输车辆指挥控制、协调调度、辅助驾驶、路径规划等各方面应用都离不开定位导航, 随着部队信息化建设发展和人工智能、大数据、云计算、物联网等高新技术的发展与应用, 对车辆定位精度及性能提出更高要求。

我国自主研发的北斗三号卫星导航系统(BDS-3)已于2020年7月全面建成并投入运营, 定位导航性能处于领先水平, 全球导航定位关键技术不再受制于人, 其军事应用前景广阔。因全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)自身定位原理易受遮蔽, 存在卫星数不足或产生多路径效应, 抗干扰性差的问题<sup>[1]</sup>。

目前, 军用运输车辆定位导航应用主要集中在

车辆指挥控制、综合调度以及辅助驾驶, 定位导航精度能达到道路级即可满足军用导航定位需求, 但因军事应用需要, 对定位导航系统的可靠性、抗干扰性等方面提出了更高要求。由于军用运输车辆具有种类多、数量大、异构性强等特点, 从工程实用角度来看, 需要高可靠、抗干扰、低成本的定位导航。以 BDS-3 为核心, 车载多传感器融合增强是实现需求的有效解决方案。

## 1 高精度导航研究现状

### 1.1 北斗导航系统

北斗导航定位系统全面建成后, 产业链建设全面铺开, 各种各样的位置服务、授时与时间同步得到广泛应用, 其自身定位导航授时服务性能优越, 具有抗遮挡能力强、导航定位与短报文融合等特点, 并提供星基增强(satellite-based augmentation system, SBAS)、地基增强(ground-based

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-07-23

基金项目: 军队后勤科研项目(BS215R012)

作者简介: 郭 凌(1968—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 从事装备信息化研究。E-mail: guoling118@163.com。

augmentation system, GAS)、精密单点定位( precise point positioning, PPP)等服务<sup>[2]</sup>。北斗系统 RNSS 服务主要性能指标如表 1 所示。服务精度为 95%，其中，在亚太地区，定位精度水平为 5 m、高程为 5 m(95%)。

表 1 北斗系统 RNSS 服务主要性能指标

定位精度/ m	授时精度/ ns	测速精度/ (m/s)	服务可用性/ %
水平≤10, 高程≤10	≤20	≤0.2	≥99

北斗系统利用星基增强、地基增强、精密单点定位等手段，可向用户提供米级、分米级、厘米级、毫米级高精度定位服务，目前国内超过 650 万辆营运车辆、4 万辆邮政和快递车辆已应用北斗系统，建成全球最大的营运车辆动态监管系统<sup>[3]</sup>。从军用运输车辆应用角度来看，北斗卫星导航系统性能指

表 2 常用车辆导航定位技术对比

导航技术	传感器	优点	缺点
卫星导航	卫星导航接收机：导航型芯片、测量型板卡	定位测速精度高、无误差积累、提供时间信息	易受遮挡和干扰、高动态时环路易失锁、不能输出姿态信息、数据更新率低
惯性导航	惯性测量单元(IMU)	动态特性好自主工作、短时精度和稳定性好导航信息完备、数据更新率高	导航误差随时间累积、初始对准时间长
地图匹配	地图数据库	定位误差低	需事先建库和维护
视觉导航	相机	信息丰富	受环境影响
雷达导航	激光雷达、毫米波雷达等	远距离测距强	成本高
基础设施	标识线、RFID 等	引导驾驶	成本高、维护难

卫星定位导航与 INS 组合是应用最广泛、效果最佳的定位组合。INS 是一种不依赖于外部信息又不发射能量的自主式导航系统，隐蔽性好、受环境影响小、抗干扰性强。GNSS 有源导航提供绝对定位信息与微惯导无源导航进行位置推算，可以达到优势互补的效果。运用 BDS 数据对惯导及校准，可使惯导在运动中进行对准，提高快速反应能力。当机动、干扰或遮挡使 BDS 信号丢失时，惯导可以辅助 BDS 重新捕获信号，同时还可使 BDS 接收机跟踪环路带宽取得更窄，解决了动态与干扰的矛盾。使用卫星导航与 INS 组合技术可使系统抗干扰能力提高 10~15 dB<sup>[9]</sup>。

## 2 军用运输车辆导航定位需求及常用组合导航模式

### 2.1 军用运输车辆导航定位需求

军用运输车辆对定位导航服务主要集中于车辆指挥控制、定位共享、可视化调度以及自身车联网应用，不同应用场景对定位导航精度要求不同。相对来说，车联网业务应用对定位导航精度要求更高，典型的车与车通信(V2V)、车与基础设施通信(V2I)

标在开阔地域完全满足军用运输车辆位置服务及时间同步需求，但在复杂环境或受遮蔽时，卫星定位导航失效、抗干扰性差的自身局限性问题仍然存在。

### 1.2 多源融合增强

为克服 GNSS 脆弱性问题，采用多种车载传感设备进行多源数据融合，实现多传感器冗余，从而提高导航系统的精度、可靠性、鲁棒性。GNSS 与惯性导航、地图匹配、视觉导航、雷达导航等<sup>[4-5]</sup>进行技术融合是当前实现多源融合高精度定位的研究热点。高精度地图匹配、视觉导航、雷达导航、基础设施辅助等<sup>[6-8]</sup>方式成本较高且受环境影响较大，目前多应用于自动驾驶研究领域，不适用于军用运输车辆抗干扰、低成本、高可靠特性需求。常用车辆导航定位技术对比如表 2 所示。

等车联网业务对定位的业务需求如表 3 所示。

表 3 车联网精力主要应用场景及定位指标

应用场景	典型场景	通信方式	定位精度/m
交通安全	紧急制动预警	V2V	≤[1.5]
	交叉路口碰撞预警	V2V	≤[5]
	路面异常预警	V2I	≤[5]
交通效率	车速引导	V2I	≤[5]
	前哨拥堵预警	V2V, V2I	≤[5]
	紧急车辆让行	V2V	≤[5]

从上表可知，主要车联网应用定位精度小于 5 m 即可满足定位要求，BDS-3 定位导航性能已能够满足军用车辆定位导航需求。

### 2.2 BDS 与 INS 组合导航模式

导航系统的核心是 BDS 与 INS 组合导航，常用的组合导航定位优化方法，仍然基于传统的卡尔曼滤波器(Kalman filter)，其优化的指标是使状态方差达到最小。根据所估计状态变量的不同，组合导航的设计模式分为直接滤波法和间接滤波法<sup>[10]</sup>。一般建立卡尔曼滤波器模型，首先要选择状态变量，目前多是基于导航参数误差和车载传感器误差，进行状态估计，随后，通过一步预测和量测更新，状态方程可以实现在时间域的递推。军用运输车辆高

精度定位惯导子系统模块一般采用捷联惯导系统(SINS), 惯性测量器件(陀螺和加速度计)直接与运载载体固联, 通过导航计算机采集惯性器件的输出信息并进行数值积分求解运载体的姿态、速度和位置等导航参数。

从提高系统稳定性, 减少计算量和复杂度角度来看, 采用间接滤波反馈校正方法较为适宜, 即以各导航子系统的误差作为状态, 将估值反馈到各导航子系统中, 再将估计出的导航参数误差作为校正量, 对各子系统中相应的误差量进行校正<sup>[11]</sup>。

根据所使用的观测值及 BDS 和 SINS 间的相互辅助关系不同, BDS/SINS 的组合模式主要分为: 基于 BDS 导出位置速度的松组合、基于 BDS 原始观测值的紧组合和辅助 BDS 的深组合 3 种。其中, BDS/SINS 松组合是将导航子系统定位结果在卡尔曼滤波器中进行组合, 然后基于误差模型来估计 SINS 的误差, 对 SINS 进行校正, 原理简单、计算量小、有冗余度, 较易实现且可靠性较高, 较为适宜军用运输车辆定位导航系统使用<sup>[12]</sup>。

### 3 车载多传感器定位导航方案

军用运输车辆对定位导航服务主要集中于车辆指挥控制、定位共享、可视化调度以及自身车联网应用, 不同应用场景对定位导航精度要求不同。相对来说, 车联网业务应用对定位导航精度要求更高, 典型的车联网业务对定位的业务需求如表 3 所示。

军用运输车辆导航定位系统因军事需求, 对系统可靠性、鲁棒性要求较高, 需要相对简易、可靠性高的组合定位方案。组合导航系统硬件方面, 加装北斗抗干扰机与 INS 为组合导航系统核心, 充分利用车辆传感器和总线信息, 采集车辆 CAN 总线的传感器数据, 提供导航系统硬件支撑; 软件方面, 采用组合导航系统定位解算结果与地图数据进行匹配, 车辆行驶轨迹由经纬度坐标匹配到地图道路网上; 在定位解算算法上, 将零速修正、车辆运动修正、里程计信息等车辆运动辅助信息形成约束条件, 提高导航定位精度。以上系统组合增加硬件设施少, 多传感器辅助提高 IMU 输出精度, 各辅助信息即有即用、互不影响。军用运输车辆多传感器定位导航系统结构如图 1 所示。

采用间接滤波反馈校正方法, 将 MEMS IMU 和 BDS 接收机各自输出的位置/速度解算值做差, 差值作为组合导航融合滤波器的输入, 从而通过滤波器来估计出 IMU 的误差, 再利用估计误差来对惯

导结果进行修正, 最终得到松组合导航的输出结果。

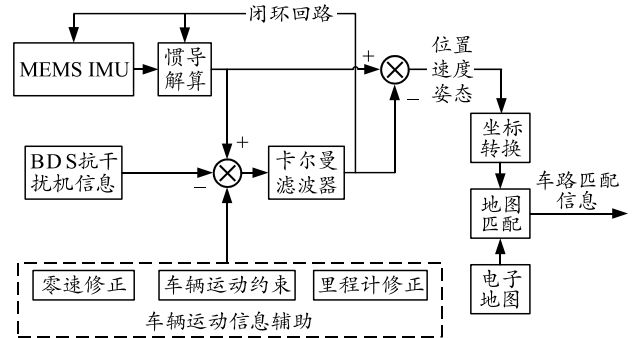


图 1 军用运输车辆多传感器定位导航系统结构

BDS/INS 组合能够显著提高导航系统的性能, 将从 3 方面产生增效作用:

1) 用惯性传感器来辅助接收机的载波和码跟踪环, 可降低跟踪环的有效带宽, 从而提高接收机在噪声环境下跟踪信号的能力。惯性信息越精确, 环路带宽就能设计得越窄。这就使得在 BDS/INS 组合导航受干扰而丢失 BDS 信号之前, 载体可以更接近受干扰及保护的目标。甚至在干扰环境以外, 当 BDS 接收机导航解受到几何结构、信号强度变化和天线屏蔽所产生的短期中断影响时, 惯导数据同样可提供“平滑”和精确的导航解。

2) 在 BDS 信号不可用时, INS 能够提供唯一的导航信息。这些惯性位置和速度信息可以降低 BDS 信号中断后所要求的再捕获搜索时间, 同时可在干扰环境下直接再捕获军用加密码。

3) 在执行任务期间, 低噪声惯性传感器可以通过使用组合导航滤波器中的 BDS 测量来校准它们的偏移误差, 从而进一步提高了 1) 和 2) 中列出的情况。

### 4 车载 BDS/SINS 松组合信息融合

军用运输车辆定位导航系统由 BDS 与 SINS 松组合而成, 2 个导航子系统间在信息融合前需进行误差处理, 而后采用误差状态卡尔曼滤波进行数据融合, 以解决系统的非线性问题, 从而完成系统数据信息融合。

#### 4.1 处理杆臂误差

SINS 以 IMU 几何中心作为导航定位和测速的基准; BDS 以接收天线的相位中心作为参考点, 为将两者导航信息进行融合, 需进行导航信息转换, 统一参考基准<sup>[13]</sup>。SINS 与 BDS 空间误差关系如图 2 所示。

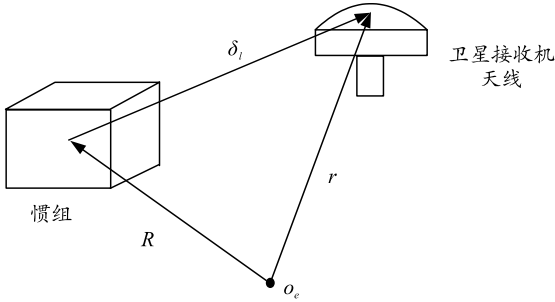


图 2 SINS 与 BDS 空间误差关系

如图 2 可有三者矢量关系：

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{R} + \boldsymbol{\delta}_l. \quad (1)$$

式中：\$\boldsymbol{R}\$ 为 IMU 相对地心 \$o\_e\$ 矢量；\$\boldsymbol{r}\$ 为 BDS 接收机中心相对地心矢量；\$\boldsymbol{\delta}\_l\$ 为 BDS 接收机相伴中心相对 IMU 的矢量。

天线和惯组之间的安装位置一般相对固定不动，即 \$\boldsymbol{\delta}\_l\$ 在地球坐标系下为常矢量，对地球坐标系求导可得：

$$\boldsymbol{v}_{en(\text{BDS})} = \boldsymbol{v}_{en(\text{INS})} + \boldsymbol{\omega}_{eb} \times \boldsymbol{\delta}_l. \quad (2)$$

式中：记 \$\left. \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right|\_e\$ 为卫星天线的地速；

\$\left. \frac{d\boldsymbol{R}}{dt} \right|\_e\$ 为惯导的地速。

由于 2 个子系统地速定义导航坐标系之间的误差很小，可以忽略不计，可以得到：

$$\boldsymbol{v}_{\text{BDS}}^n = \boldsymbol{v}_{\text{INS}}^n + \boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{eb}^b \times \boldsymbol{\delta}_l^b). \quad (3)$$

在实际应用中可作近似 \$\boldsymbol{\omega}\_{eb}^b \approx \boldsymbol{\omega}\_{ib}^b\$ 或者 \$\boldsymbol{\omega}\_{eb}^b \approx \boldsymbol{\omega}\_{nb}^b\$。得到杆臂速度误差：

$$\delta \boldsymbol{v}_L^n = \boldsymbol{v}_{\text{INS}}^n - \boldsymbol{v}_{\text{BDS}}^n = -\boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{eb}^b \times \boldsymbol{\delta}_l^b) = -\boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{nb}^b \times \boldsymbol{\delta}_l^b). \quad (4)$$

惯导与卫星天线之间的位置误差可近似看为：

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{INS}} - L_{\text{BDS}} &= -\delta_{IN} / R_{Mh} \\ \lambda_{\text{INS}} - \lambda_{\text{BDS}} &= -\delta_{IE} \sec L_{\text{INS}} / R_{Nh} \\ h_{\text{INS}} - h_{\text{BDS}} &= -\delta_{IU} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

式中：\$\boldsymbol{\delta}\_l^n = [\delta\_{IE} \quad \delta\_{IN} \quad \delta\_{IU}]^T = \boldsymbol{C}\_b^n \boldsymbol{\delta}\_l^b\$，\$\delta\_{IE}\$、\$\delta\_{IN}\$ 和 \$\delta\_{IU}\$ 分别为杆臂的东向、北向和天向投影分量；\$R\_{Mh}\$ 为子午圈主曲率半径；\$R\_{Nh}\$ 为卯酉圈主曲率半径。

从而 BDS 与 SINS 空间杆臂误差向量为：

$$\delta \boldsymbol{p}_{\text{BL}} = \boldsymbol{p}_{\text{INS}} - \boldsymbol{p}_{\text{BDS}} = -\boldsymbol{M}_{pv} \boldsymbol{C}_b^n \boldsymbol{\delta}_l^b. \quad (6)$$

式中：\$\boldsymbol{p}\_{\text{INS}} = [L\_{\text{INS}} \quad \lambda\_{\text{INS}} \quad h\_{\text{INS}}]^T\$；\$\boldsymbol{p}\_{\text{BDS}} = [L\_{\text{BDS}} \quad \lambda\_{\text{BDS}}\$

\$h\_{\text{BDS}}]^T\$；\$\boldsymbol{M}\_{pv}\$ 为位置误差矩阵 \$\begin{bmatrix} 0 & 1/R\_{Mh} & 0 \\ \sec L/R\_{Nh} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\$。

## 4.2 进行时间同步

卫星导航与惯导坐标系实际使用的数据，往往因为解算和传输而存在一定时间的滞后性。将两者之间的时间误差记为 \$\delta t\$，在组合导航系统信息对比时，须进行系统时间同步<sup>[14]</sup>。惯导速度和卫星速度之间的关系为：

$$\boldsymbol{v}_{\text{BDS}}^n + \boldsymbol{a}^n \delta t = \boldsymbol{v}_{\text{INS}}^n. \quad (7)$$

式中 \$\boldsymbol{a}^n\$ 是载体在不同步附近的平均线加速度，可通过惯导在两相邻时间 (\$T=t\_m-t\_{m-1}\$) 内的速度平均变化来近似，即

$$\boldsymbol{a}^n \approx (\boldsymbol{v}_{\text{INS}(m)}^n - \boldsymbol{v}_{\text{INS}(m-1)}^n) / T. \quad (8)$$

一般情况下，可假设时间不同步 \$\delta t\$ 是相对固定的，视为常值参数。

得到不同步速度误差 \$\delta \boldsymbol{v}\_{\delta t}^n\$ 和位置误差 \$\delta \boldsymbol{p}\_{\delta t}\$，为：

$$\delta \boldsymbol{v}_{\delta t}^n = \boldsymbol{v}_{\text{INS}}^n - \boldsymbol{v}_{\text{BDS}}^n = \boldsymbol{a}^n \delta t; \quad (9)$$

$$\delta \boldsymbol{p}_{\delta t} = \boldsymbol{p}_{\text{INS}} - \boldsymbol{p}_{\text{BDS}} = \boldsymbol{M}_{pv} \boldsymbol{v}_{\text{INS}}^n \delta t. \quad (10)$$

## 4.3 状态空间方程

### 4.3.1 状态方程

结合军用运输车辆实际模型，定义捷联惯导误差模型状态变量 \$\boldsymbol{X}\_{\text{INS}}\$ 为：

$$\boldsymbol{X} = [\Delta v_n, \Delta v_u, \Delta v_e, \phi_n, \phi_u, \phi_e, \Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]_{15 \times 1}^T. \quad (11)$$

式中：\$\Delta v\_n\$、\$\Delta v\_u\$、\$\Delta v\_e\$ 为北、天、东向速度误差；\$\phi\_n\$、\$\phi\_u\$、\$\phi\_e\$ 为姿态误差角；\$\Delta \varphi\$、\$\Delta \lambda\$、\$\Delta h\$ 为纬度、经度、高度误差；\$\nabla\_x\$、\$\nabla\_y\$、\$\nabla\_z\$ 为三轴加速度计零偏；\$\varepsilon\_x\$、\$\varepsilon\_y\$、\$\varepsilon\_z\$ 对应三轴陀螺仪漂移误差。建立惯性导航系统误差模型为：

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{F} \boldsymbol{X} + \boldsymbol{G} \boldsymbol{W}. \quad (12)$$

式中：\$\boldsymbol{G} = [\boldsymbol{I}\_6 / \boldsymbol{O}\_{9 \times 6}]\$，\$\boldsymbol{I}\_6\$ 为 \$6 \times 6\$ 的单位矩阵，\$\boldsymbol{O}\_{9 \times 6}\$ 为 \$9 \times 6\$ 的零矩阵；\$\boldsymbol{W} = [w\_{v\_n}, w\_{v\_u}, w\_{v\_e}, w\_{\phi\_n}, w\_{\phi\_u}, w\_{\phi\_e}]^T\$ 为建模噪声；\$\boldsymbol{F}\$ 为系统状态转移矩阵，具体表达式如下：

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} & \boldsymbol{C} & \boldsymbol{C}_b^e & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{G} & \boldsymbol{I} & \boldsymbol{J} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{C}_b^e \\ \boldsymbol{K} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{L} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

式中：\$\boldsymbol{O}\$ 为 \$3 \times 3\$ 的零矩阵；\$\boldsymbol{A}\$、\$\boldsymbol{B}\$、\$\boldsymbol{C}\$、\$\boldsymbol{G}\$、\$\boldsymbol{I}\$、\$\boldsymbol{J}\$、\$\boldsymbol{K}\$、\$\boldsymbol{L}\$ 的具体表现形式为：

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -v_u/R_n & -v_n/R_n & -(2\omega_{ie} + v_e/(R_e \cos \varphi)) \sin \varphi \\ 2v_u/R_n & 0 & (2\omega_{ie} + v_e/(R_e \cos \varphi)) \cos \varphi \\ (2\omega_{ie} + v_e/(R_e \cos \varphi)) \sin \varphi & -(2\omega_{ie} + v_e/(R_e \cos \varphi)) \cos \varphi & v_n/R_n \tan \varphi - v_u/R_e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -f_e & f_u \\ f_e & 0 & -f_n \\ -f_u & f_n & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} -(2\omega_{ie} \cos \varphi + v_e/R_e \sec^2 \varphi)v_e & 0 & 0 \\ -2v_e \omega_{ie} \sin \varphi & 0 & 0 \\ (2\omega_{ie} \cos \varphi + v_e/R_e \sec^2 \varphi)v_n + 2v_u \omega_{ie} \sin \varphi & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/R_e \\ 0 & 0 & \tan \varphi/R_e \\ -1/R_n & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{I} &= \begin{bmatrix} 0 & -v_n/R_n & -(\omega_{ie} + v_n/R_n) \sin \varphi \\ v_n/R_n & 0 & (\omega_{ie} + v_n/R_n) \cos \varphi \\ (\omega_{ie} + v_n/R_n) \sin \varphi & -(\omega_{ie} + v_n/R_n) \cos \varphi & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} -\omega_{ie} \sin \varphi & 0 & 0 \\ \omega_{ie} \cos \varphi + v_e/R_e \sec^2 \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} 1/R_n & 0 & 1/R_n \\ 0 & 0 & 1/R_e \cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ v_e \tan \varphi/R_e \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

### 4.3.2 量测方程

量测方程忽略车辆垂直通道影响, 将 SINS 输出的方向角及加速度, 分别分解至导航坐标系北向、东向。之后与 BDS 速度分量对比, 构成量测方程, 再利用卡尔曼滤波进行校正。量测方程可表示为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{INS}^n - \tilde{V}_{BDS}^n \\ \tilde{P}_{INS} - \tilde{P}_{BDS} \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V}. \quad (14)$$

其中: 
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & -\mathbf{C}_b^n(\omega_{eb} \times) & \mathbf{a}^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & -\mathbf{M}_{pv} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{M}_{pv} \mathbf{v}_{INS}^n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_v \\ V_p \end{bmatrix}.$$

式中  $V_v$  和  $V_p$  分别为卫星接收机速度测量白噪声和位置测量白噪声。

### 4.3.3 反馈更新

最后根据以上状态空间方程, 利用卡尔曼滤波进行参数的时间更新和量测更新:

先验状态估计:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}. \quad (15)$$

后验状态估计:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}). \quad (16)$$

求取增益矩阵:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1}. \quad (17)$$

先验估计协方差:

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T. \quad (18)$$

后验估计协方差:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}. \quad (19)$$

## 5 车辆运动信息约束补偿

当 BDS 受到干扰或屏蔽失效时, 利用里程计信息进行定位解算, 可有效抑制惯导系统误差快速发散。

军用运输车辆里程计一般采集非转向轮里程信号, 即行驶转弯时不发生偏转, 与车体正前方保持同向, 里程计输出瞬时速度大小, 前进取正而倒车取负。建立与车体固连的“右-前-上”右手直角的里程计坐标系, 其速度输出在里程计坐标系可表示为:

$$\mathbf{v}_D^m = [0 \quad v_D \quad 0]^T. \quad (20)$$

式中:  $v_D$  为里程计前向速度大小; 右向和天向速度均为 0, 建立车辆载体坐标系的 3 维速度约束<sup>[15]</sup>。

里程计在一小段时间段  $[t_{j-1}, t_j]$  ( $T_j = t_j - t_{j-1}$ ) 内的路程增量为  $\Delta S_j$ , 如果该时间段很短, 则可以认为载车在这小段时间内是沿直线行驶, 路程增量在车体坐标系的投影为:

$$\Delta \mathbf{S}_j^m = [0 \quad \Delta S_j \quad 0]^T. \quad (21)$$

利用车辆运动约束和里程计补偿可进一步提高组合导航定位精度和稳定性。

## 6 地图匹配

地图匹配是一种将组合导航位置映射到路网上路段的过程, 以创建对车辆所走路线的估算。对于多源信息融合, 常用的地图匹配状态空间模型是离散状态隐马尔可夫模型 (hidden Markov model, HMM)<sup>[16]</sup>。采用 HMM 作为匹配算法的核心, 并辅以场景策略算法, 实现地图匹配。

HMM 应用到地图匹配结合车辆运动主要涉及

到观测变量、隐藏变量、观测概率及状态转移概率。

在 HMM 地图匹配算法中，匹配道路是未知的，作为隐藏变量  $Y_n$ 。每个时刻观测到组合导航解算定位信息是观测变量  $X_n$ 。地图匹配的目标是在已知定位信息的情况下对匹配道路进行估计：

$$\max_{Y_1, \dots, Y_n} P(Y_n, \dots, Y_1 | X_1, \dots, X_n)。(22)$$

观测概率，即观测的定位点离路段位置越近，真实点在此路段的概率越大。状态转移概率，即 2 个定位点的距离越近，状态转移概率越大。

对上述问题，可以采用维特比 (Viterbi) 算法用递推的方法进行计算。Viterbi 算法是一个动态规划 (dynamic programming, DP) 算法，用于计算 HMM 预测问题，即用动态规划求概率最大路径 (最优路径)。

在 HMM 框架下建立地图匹配模型，核心在于确定观测概率模型和转移概率模型。

### 6.1 观测概率模型

观测概率模型确定依据定位位置和方向<sup>[17-18]</sup>。

1) 对定位位置，与道路距离越接近概率越大，反之的概率越小。同时考虑匹配道路的选择对横向距离误差较敏感，对纵向距离误差不敏感。采用正态分布建立模型。

2) 对定位方向，与道路方向越接近概率越大，反之的概率越小。同时概率与速度有关，速度越大越可信。采用正态分布，以速度为参数建立模型。

则观测概率矩阵可表示为

$$b_j(k) = P(o_t = o_k | q_t = r_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\|o_t - r_j\|^2}{2\sigma^2}}。(23)$$

式中： $o_t$  为观测点位置； $r_j$  为  $t$  时刻所有路段。

由上式可看出，时刻  $t$  的观测点与候选点之间的距离越小，那么这个候选点是真正的实际点的概率就越大。

### 6.2 转移概率模型

转移概率模型的确定依据道路距离、车辆行驶速度的约束建立。根据车速和时间差计算移动距离，该距离和路径移动距离越接近，概率越大<sup>[19-20]</sup>。采用指数分布建立模型。

则状态转移矩阵可表示为：

$$a_{ij} = P(q_{t+1} = r_j | q_t = r_i) = V(r_i \rightarrow r_j) \cdot F_t(r_i \rightarrow r_j)。(24)$$

式中： $F_t(r_i \rightarrow r_j) = 1/\beta e^{-d_t/\beta}$ ； $d_t = \|\|o_t - o_{t+1}\|_{\text{great circle}} -$

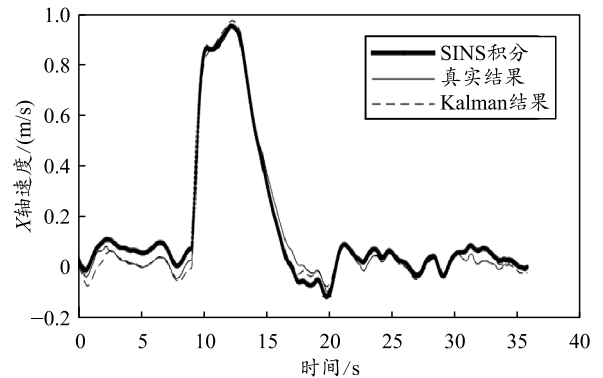
$$\|r_i - r_j\|_{\text{route}}|； V(r_i \rightarrow r_j) = \frac{\sum k_{u=1}(e'_u \cdot v \times \bar{v}_{ij})}{\sqrt{\sum k_{u=1}(e'_u \cdot v)^2} \cdot \sqrt{\sum k_{u=1} \bar{v}_{ij}^2}}。$$

式中： $r_j$  为时刻  $t+1$  时所在路段； $r_i$  为时刻  $t$  时所在路段； $F_t(r_i \rightarrow r_j)$  为根据前后 2 个时间点之间的观测点和隐藏候选实际点的信息，表示前后 2 个观测点距离与前后 2 个候选点距离之差的绝对值来表示这 2 段距离的接近程度，越接近，概率越大； $V(r_i \rightarrow r_j)$  为前后 2 个时间点之间的速率信息； $e'_u \cdot v$  为路段的最大速率； $\bar{v}_{ij}$  为平均速率，与最大速率的变化程度相似。

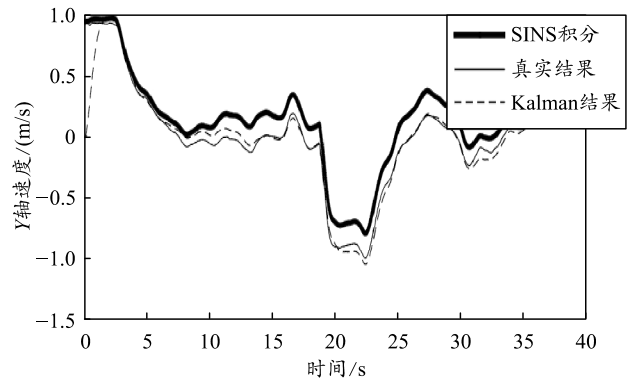
## 7 仿真分析及道路测试

### 7.1 仿真分析

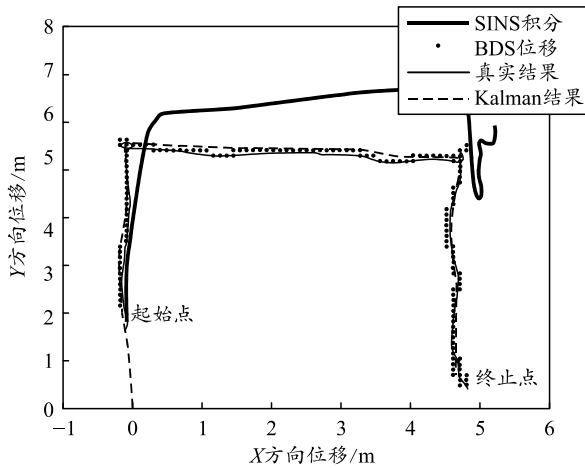
为验证组合导航定位系统效果，结合 BDS/SINS 组合模型，以 Matlab 软件为载体进行仿真实验。为简化仿真过程，直接引入 SINS 模拟数据、卡尔曼滤波器输入为时间戳 (s)、车载系统在地球坐标系下产生的加速度 ( $\text{m/s}^2$ )、地球坐标系下使用 GPS 计算的位移 (m)；输出为载体在地球坐标系下的速度 (m/s) 和位移 (m)。采用数据轨迹对比的方法，仿真对比单 SINS 系统、组合系统及真实系统的速度估计和单系统、组合系统及真实系统的位置估计。导航速度、位移估计对比如图 3 所示。



(a) 导航系统 X 轴速度估计对比



(b) 导航系统 Y 轴速度估计对比



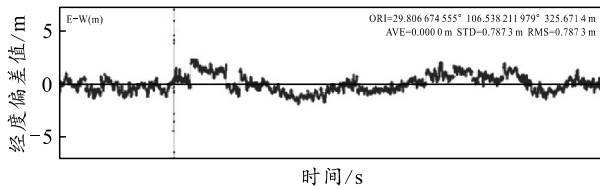
(c) 导航系统位移估计对比

图 3 导航系统速度、位移估计对比

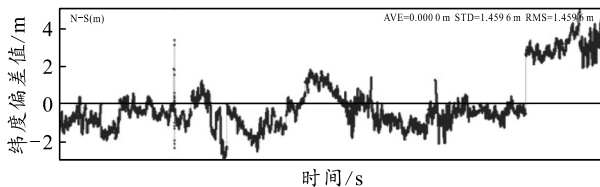
通过上图数据轨迹对比，导航定位系统在经过组合滤波后，系统速度和位移结算误差可以更好收敛，组合导航系统导航定位效果改善明显。

### 7.2 静态测试

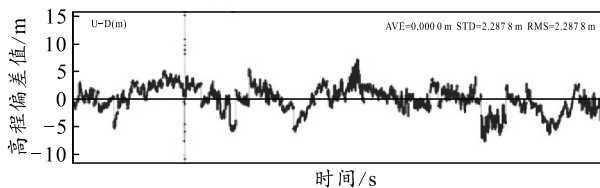
静态测试即将应用本组合导航定位方案的多功能终端<sup>[21]</sup>接入楼顶天线(天线坐标已标定，视为真值)，楼顶视野开阔，无信号遮挡，多功能终端采用 B3 频点定位，按照 1 s 采样频率输出定位结果坐标，连续观测 24 h。将定位结果与已知坐标值相减获得定位精度指标。静态测试定位结果如图 4 所示，分别给出了其在经度、纬度和高程方向的定位误差，分别为 0.787, 1.460 和 2.288 m，综合 3 维定位误差为 2.824 m，满足精度指标要求。



(a) 经度方向偏差



(b) 纬度方向偏差



(c) 高程方向偏差

图 4 静态定位测试结果

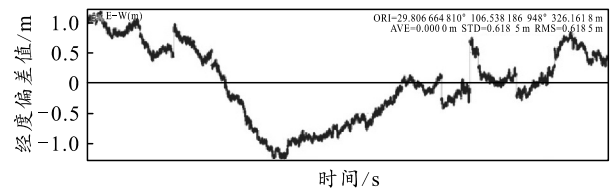
### 7.3 道路测试

#### 7.3.1 动态跑车测试

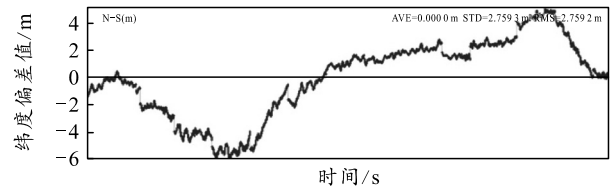
为测试组合导航定位方案在实际动态运行时在不同环境状态下的定位性能，采用动态跑车测试的方案，跑车时采用私家车，将定位天线通过吸盘安装于车顶，跑车测试范围位于重庆市渝北区、北碚区、沙坪坝区、璧山区以及江北区的部分区域，测试时长累计超过 100 h，定位终端安装实景如图 5 所示。测试时，将采用本组合定位方案的设备终端与商用接收机终端置于车内，通过功分器连接至车顶同一天线，测试设备采用北斗 B3 频点定位，商用接收机采用 GPS L1 频点与北斗 B1 频点联合定位，按照 1 Hz 采样频率同步输出定位结果坐标，通过比较差值计算动态定位精度指标，选取了其中一次测试时间较长的测试结果，动态定位结果如图 6 所示，图中分别给出了在经度、纬度和高程方向的定位误差曲线。



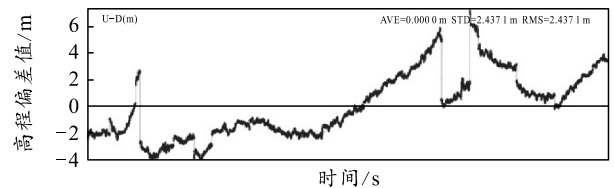
图 5 定位终端安装实景



(a) 经度方向偏差



(b) 纬度方向偏差



(c) 高程方向偏差

图 6 动态定位测试结果

依据数据统计结果，本次动态测试中经度、纬度和高程方向的测量中误差分别为 0.619，2.759 和 2.437 m，综合 3 维测量误差为 3.73 m，满足精度指标要求。

### 7.3.2 地图匹配测试

在重庆市大学城附近地域实车进行道路测试对比试验。为便于测试，直接接入高德地图 Web 端 JavaScript 接口。为验证定位导航前端加载地图匹配效果，将加载地图匹配前后定位轨迹进行对比，加载地图匹配前后定位轨迹对比如图 7 所示。

由图中可知：该车载导航定位模组原始导航定位轨迹较为平滑，导航定位效果稳定，能较好反映车辆真实行驶路径，但存在与电子地图道路漂移的问题，进行地图匹配加载后，可进一步提高导航定位与地图道路匹配度。

应用此组合定位导航指挥端也可较为准确地掌握车辆实时位置，车辆行驶路径能得到真实反映，车辆实时定位监测、车辆行驶轨迹监测如图 8、9 所示。



图 7 地图匹配前后定轨迹对比

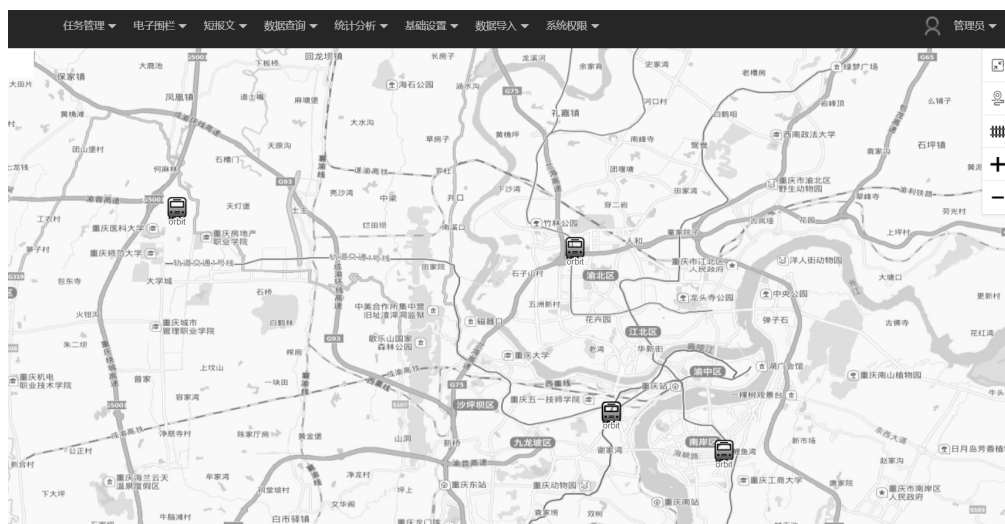


图 8 车辆实时定位显示



图 9 车辆行驶轨迹监测



## 8 结束语

随着信息技术发展,车联网是实现车辆智能管理、智能信息服务和智能化控制的发展趋势。定位技术、传感器技术是车联网的重要技术组成,根据场景以及定位性能的需求不同,车载定位选择较为灵活。随着军用运输车辆无人化、智能化发展,可采取多传感器紧组合、深组合等方式,提高导航定位精度和可靠性,满足军用运输智能化发展需求。

### 参考文献:

- [1] 郭凌,杜伟伟,刘凌,等. GNSS 发展对军事物流影响探析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(5): 113-118.
- [2] 中国卫星导航系统办公室.《北斗卫星导航系统应用服务体系》(1.0 版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227333024390305.pdf>.
- [3] 中国卫星导航系统办公室.北斗卫星导航系统发展报告(4.0 版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227337020425733.pdf>.
- [4] 纪新春,魏东岩,袁洪,等. 基于智能手机的车辆多源融合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(5): 638-644, 693.
- [5] 黄娟娟,徐圆,朱群雄. 基于改进 HMM 模型的 3D 景区地图匹配算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(6): 259-266.
- [6] 雷杨,赵玉荣,王亓剑,等. 基于视觉检测与定位的智能车导航系统[J]. 电子测试, 2021(4): 41-43.
- [7] PINTO D A A S, RIEM D O I M A, PEDROSA E F, et al. A Camera to LiDAR calibration approach through the optimization of atomic transformations[J]. Expert Systems With Applications, 2021, 176: 114894.
- [8] 仲跻炜,陈大吾,朱峰. 基于北斗高精度定位和车道级高精度地图的车辆监控平台设计与实现[J]. 全球定位系统, 2015, 40(4): 50-55.
- [9] 陈军,黄静华,安新源,等. 卫星导航定位与抗干扰技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 207-211.
- [10] 王伟,丛宁,邹佳. 一种鲁棒 GPS/INS 组合导航滤波算法设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(2): 240-245.
- [11] 张亮. 低成本车载 BDS/DR 组合导航滤波算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [12] 蒋治宇. 低成本车载组合导航系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [13] 严恭敏,翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019: 176-223.
- [14] 严恭敏,张强,何昆鹏,等. 捷联惯导系统中加速度计的时延补偿研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(12): 1578-1583.
- [15] 常乐,章红平,高周正,等. 零速修正在 GNSS/INS 紧组合导航中的应用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(10): 879-883.
- [16] 黄娟娟,徐圆,朱群雄. 基于改进 HMM 模型的 3D 景区地图匹配算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(6): 259-266.
- [17] REN M, KARIMI H A. A hidden Markov model-based map-matching algorithm for wheelchair navigation[J]. Journal of Navigation, 2009, 62(3): 383-395.
- [18] LOU Y, ZHANG C, ZHENG Y, et al. Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories[C]//Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM, 2009: 352-361.
- [19] NEWSON P, KRUMM J. Hidden Markov map matching through noise and sparseness[C]//Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM, 2009: 336-343.
- [20] RAYMOND R, MORIMURA T, OSOGAMI T, et al. Map matching with hidden Markov model on sampled road network[C]//Pattern Recognition(ICPR), 2012 21st International Conference on. IEEE, 2012: 2242-2245.
- [21] 郭凌,杜伟伟,李睿,等. 基于北斗卫星导航系统的应急物流车辆智能监管系统设计[J]. 军事交通学院学报, 2021, 23(1): 45-50.