

面向智能网联汽车鲁棒连续定位的多源异构数据融合IMM-AF方法

赵杰¹, 毛逸飞¹, 徐友洪²

¹衢州职业技术学院智能制造学院, 浙江 衢州

²衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州

收稿日期: 2026年9月23日; 录用日期: 2026年10月14日; 发布日期: 2026年10月27日

摘要

智能网联汽车的安全运行依赖高精度、高可靠性的连续定位能力。然而, 含北斗的多星座全球导航卫星系统(GNSS)接收机在隧道及城市遮挡环境中仍可能输出“有效”但严重偏离的真值解, 导致全轨迹误差统计被GNSS异常段主导。本文提出一种基于多源异构数据融合的IMM-AF + Map定位方法, 融合GNSS、惯性测量单元(IMU)非完整约束、开放街道地图(OpenStreetMap, OSM)道路约束及隧道参考中心线地图航位推算, 并采用异常解检测与剔除及分段精度评定方案。SensNav城区-隧道序列实验表明: GNSS可用段内GNSS单点定位均方根误差(RMSE)为7.60 m, 全轨迹813.30 m; IMM-AF + Map全轨迹615.31 m (较813.30 m降低24.3%), GNSS异常段1813.35 m (较2398.40 m降低24.4%); 异常解检测与地图航位推算为GNSS异常段恢复的关键(消融: 关闭地图航位推算后全轨迹RMSE升至5073.72 m)。需指出: 在GNSS可用段, OSM横向约束可能因道路几何偏差使IMM-AF + Map的RMSE升至24.28 m (高于无地图IMM-AF的7.45 m), 体现地图约束须与GNSS质量联动, RTK参考精度为0.35~0.73 m。

关键词

智能网联汽车, 北斗, 多源异构数据融合, 交互多模型自适应滤波, SensNav

An IMM-AF Method for Robust Continuous Localization of Intelligent Connected Vehicles Using Multi-Source Heterogeneous Data Fusion

Jie Zhao¹, Yifei Mao¹, Youhong Xu²

¹School of Intelligent Manufacturing, Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

²School of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

文章引用: 赵杰, 毛逸飞, 徐友洪. 面向智能网联汽车鲁棒连续定位的多源异构数据融合 IMM-AF 方法[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(4): 361-374. DOI: 10.12677/dsc.2026.154036

Abstract

The safe operation of intelligent connected vehicles depends on high-precision, high-reliability continuous positioning capabilities. However, GNSS receivers incorporating the BeiDou system may still output “valid” yet significantly deviated true-value solutions in tunnel or urban occlusion environments, leading to the overall trajectory error statistics being dominated by GNSS anomalous segments. This paper proposes an IMM-AF + Map positioning method based on multi-source heterogeneous data fusion, which integrates GNSS data, non-incomplete constraints from the Inertial Measurement Unit (IMU), road constraints from OpenStreetMap (OSM), and position estimation using the tunnel reference centerline map, along with an approach for detecting and eliminating anomalous solutions as well as performing segmented accuracy assessment. The SensNav urban-tunnel sequence experiment demonstrates that the Root Mean Square Error (RMSE) for GNSS single-point positioning within the available GNSS segment is 7.60 m, and the overall trajectory RMSE is 813.30 m; for the IMM-AF + Map method, the overall trajectory RMSE is 615.31 m (a reduction of 24.3% compared to 813.30 m), and the RMSE for the GNSS anomalous segment is 1813.35 m (a reduction of 24.4% compared to 2398.40 m). The detection of anomalous solutions and the application of map-based position estimation are critical for restoring the GNSS anomalous segment (ablation: when map-based position estimation is disabled, the overall trajectory RMSE increases to 5073.72 m). It should be noted that within the GNSS available range, the OSM lateral constraint may cause the RMSE of IMM-AF + Map to increase to 24.28 m (higher than the 7.45 m observed with the IMM-AF system without map data), demonstrating that map-based constraints must be integrated in conjunction with GNSS quality; the RTK reference accuracy ranges from 0.35 to 0.73 m.

Keywords

Intelligent Connected Vehicle, BeiDou, Multi-Source Fusion, IMM-AF, SensNav

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着汽车产业电动化、网联化与智能化持续推进,智能网联汽车(Intelligent Connected Vehicle, ICV)及高级驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistance System, ADAS)对连续、可信位置估计的依赖日益增强:定位误差不仅影响导航体验,也直接关系到车道保持、路径规划及功能安全相关模块的触发边界[1] [2]。在我国“车路云一体化”试点与北斗三号全球组网背景下,车载终端普遍具备多星座全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能力(含北斗),路侧与云平台可为协同感知与协同决策提供基础设施支撑[1]。然而,面向量产部署的定位算法仍须在车端有限算力下,应对开阔城区、城市峡谷、高架遮挡及长隧道等复杂场景中的信号中断、多路径与非视距传播,并在GNSS质量时变条件下维持可解释、可复现的鲁棒性能[3] [4]。

GNSS/惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)组合定位是当前车载系统的主流技术路线。按耦合程度可分为松组合、紧组合与深组合;扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)及其误差状态形式(Error State Kalman Filter, ESKF)因实现成本适中而广泛应用[4] [5]。在开阔环境下,消费级GNSS通常可

达米级定位；IMU 可提供高更新率运动信息，但单独使用时误差随时间累积。多源融合通过互补增强缓解上述局限，并辅以零速更新(Zero Velocity Update, ZUPT)、非完整约束(Non-Holonomic Constraint, NHC)及地图约束等伪观测抑制漂移[6]。然而，固定结构单模型滤波器假设过程与观测噪声在整段轨迹上统计平稳，当 GNSS 由正常突变为失锁、降级或“仍标记有效但已不可信”的异常解时，容易出现模型失配与更新污染[7]。交互多模型(Interacting Multiple Model, IMM)滤波通过并行多模型与概率加权，为 GNSS 正常、降级与失锁等模式切换提供了经典框架[8]；近年亦有研究将 IMM 与 GNSS 运动学模型、多约束融合及新息域异常检测结合，以改善复杂城市场景下的自适应能力[9][10]。需要指出的是，IMM 本身并不自动解决伪有效定位解检测问题，异常定位解检测、地图航位推算(map-aided Dead Reckoning, map-DR)与滤波更新仍须协同设计[7][11]。

隧道及类似 GNSS 拒止环境是上述矛盾的高风险场景。综述研究表明，隧道内卫星信号受阻时，单纯 GNSS 难以维持连续定位，须依赖 INS/里程计航位推算并与地图或基础设施特征匹配以抑制长期漂移[12]。现有工作多基于激光雷达/相机与高精度地图(High-Definition Map, HD Map)或车道线匹配实现隧道内车道级定位[11][13][14]，对量产 ICV 而言，基于开放道路数据与消费级 GNSS/IMU 的轻量级方案仍缺乏公开基准上的系统评估。Gao 等发布的 SensNav 数据集提供了含约 5.2 km 隧道的 18.62 km 城区轨迹，以及 u-blox ZED-F9P (10 Hz)、WHEELTEC IMU、Septentrio RTK 与 Inertial Explorer (IE)后处理真值等多源记录，为 GNSS 增强、多传感器融合与复杂工况评价提供了重要基准[3]。

本文基于 SensNav 城区-隧道序列开展实验，观察到一个在既有文献中讨论不足、但对融合算法极具误导性的现象：非 RTK 的 u-blox ZED-F9P 在隧道内持续输出有效定位标志(FixValid)仍为真的解，但水平位置在长达数百米的区间内几乎冻结，相对 Inertial Explorer (IE)后处理真值的二维偏差可达千米量级；若仍将其作为有效 GNSS 观测参与滤波，GNSS 单点定位的全轨迹 RMSE 高达 813.30 m。另一方面，当按 u-blox 与 IE 真值二维误差不超过 30 m 划分 GNSS 可用段时，GNSS 单点定位的 RMSE 仅为 7.60 m，与扩展卡尔曼滤波基线(7.47 m)、IMM-AF 方法(7.45 m)同量级。上述“全轨迹指标被约 11.5%的 GNSS 异常段样本主导”的反差表明：在含长隧道的车载 GNSS 研究中，仅报告全轨迹 RMSE 会掩盖开阔段真实性能，也无法公正评价融合方法在 GNSS 异常段的恢复能力；必须采用与输入 GNSS 质量一致、而非依赖融合输出误差的分段精度评定方案(本文称“GNSS 可用段/GNSS 异常段”)。

针对上述问题，本文在团队高铁场景北斗/惯导/电子地图融合研究[15]基础上，提出面向公路智能网联汽车的 IMM-AF + Map 多源融合定位框架，并在 SensNav 双序列上开展对比与消融实验。需要诚实说明的实现边界如下：本文交互多模型滤波为 GNSS 时间栅格上的四维常速度(CV)松组合实现，IMU 以非完整约束形式注入，而非完整 15 维惯导机械编排；SensNav 实验使用 u-blox 多星座输出(含北斗)，代表消费级量产车载终端，而非单北斗专用实车数据；隧道地图航位推算采用 IE 真值降采样得到的参考中心线，用于量化“有先验道路几何时可恢复潜力的上界”，而非商用高精度地图在线部署方案；动态分米级(10~20 cm)精度为工程可研目标，并非本次实验已达指标。

本文围绕三项研究问题展开：其一，在 GNSS 可用段，IMM-AF 能否保持与 GNSS 单点定位同量级精度；其二，在 u-blox 与 IE 真值二维误差超过 30 m 的隧道或 GNSS 异常段，异常定位解检测与参考中心线地图航位推算能否降低 RMSE 以及各组件贡献如何；其三，分段精度评定指标与 SeptentrioRTK 参考精度对可达成精度有何指示。为回答上述问题，本文构建 IMM-AF + Map 融合链路，在三模型 IMM 中嵌入新息阈值与隧道伪有效定位解检测，并将 OSM 道路横向约束与 IE 真值降采样中心线上的地图航位推算纳入同一滤波更新链路；建立基于 u-blox 输入质量的分段精度评定方案；在 SensNav 双序列上完成对比与消融实验并开源 MATLAB 复现代码。

2. 相关工作

车载 GNSS/INS 组合定位按耦合深度可划分为松组合、紧组合与深组合，其中扩展卡尔曼滤波及其误差状态形式因实现复杂度与精度之间的折中而在工程界广泛采用[4]-[6]；在开阔场景下，消费级多星座接收机通常可提供米级平面位置，而 IMU 虽能以百赫兹量级输出运动信息，却在缺乏外部观测时不可避免地积累漂移，因而 ZUPT、NHC 以及地图伪观测常被引入滤波框架以抑制长期发散[5] [6]。单模型 EKF 隐含“过程与观测噪声统计在整段轨迹上平稳”的假设，当 GNSS 由正常可用突变为失锁、精度降级，或更隐蔽地变为“仍被标记有效但已严重偏离真值”的异常解时，固定结构滤波器难以及时剔除污染观测，定位性能随之退化[4] [7]；交互多模型滤波通过并行维护多组运动/噪声模型并以贝叶斯方式完成模型概率加权，为上述模式切换提供了经典且可扩展的架构[8]，近年来亦有工作将 IMM 与 GNSS 运动学表征、城市场景多约束融合及新息域异常检测相结合，以改善非高斯观测与模型失配条件下的鲁棒性[9] [10]，但 IMM 本身并不等价于异常解检测，如何在滤波更新链路中协同设计阈值判定逻辑、航位推算与地图约束，仍是消费级终端在复杂路况下面临的开放问题[7] [11]。

GNSS 完好性监测与保护水平评估面向高等级安全应用，关注故障检测与风险可控[4]；消费级 u-blox 等终端在遮挡环境中却可能呈现另一种更“静默”的失效形态，即有效定位标志(FixValid)仍为真而水平位置长期冻结或缓慢漂移，其危害在于异常解被当作可信观测持续注入滤波器，进而主导全轨迹误差统计[7]。在隧道及类似 GNSS 拒止环境中，卫星信号长期中断使得单纯依赖 GNSS 无法维持连续定位，须借助惯导/里程计航位推算，并与高精度地图、车道线或隧道基础设施特征匹配以抑制漂移[12]；We 等将 GNSS/IMU/相机与 HD 地图在城区连续隧道场景中融合，展示了车道级定位潜力[11]，Li 等则基于激光雷达横向测距与车道约束实现千米级隧道的分米级横向精度[13]，上述方案多依赖测绘级或准测绘级传感器与 HD 地图，与本文所关注的“开放道路数据 + 消费级 GNSS/IMU + 可复现公开基准”在成本假设与部署边界上存在显著差异。Gao 等发布的 SensNav 数据集以 18.62 km 城区轨迹(含约 5.2 km 隧道)、u-blox 与 Septentrio 双 GNSS、IMU 及 IE 后处理真值为特征，为 GNSS 增强与多传感器融合提供了难得的公开评测平台[3]；本文并非发布新数据，而是在该基准上系统评估 IMM-AF + Map (见图 1)、分段精度指标与组件消融。先前在高铁场景验证了北斗/惯导/电子地图融合定位的可行性[15]，本文将其迁移至公路智能网联汽车场景，并针对 SensNav 观察到的消费级终端坐标冻结型异常解，补充异常解检测、OSM 约束与参考中心线地图航位推算等机制及可复现实验。

3. 方法

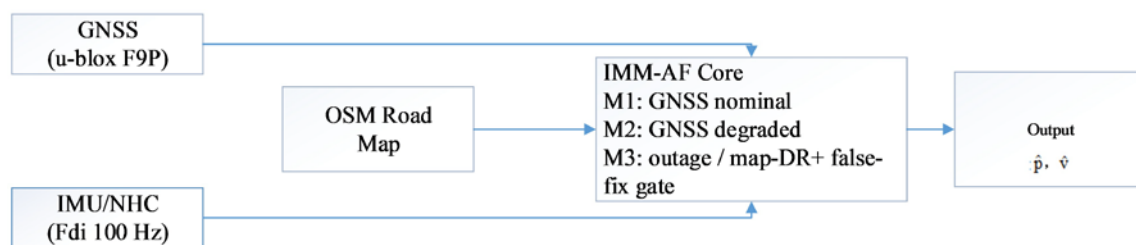


Figure 1. IMM-AF + Map multi-source fusion localization framework

图 1. IMM-AF + Map 多源融合定位框架

本文在 u-blox 10 Hz GNSS 历元上估计四维名义状态

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} p_x & p_y & v_x & v_y \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中 p_x, p_y 为东向与北向位置(m), v_x, v_y 为对应速度(m/s)。该实现为完整 15 维 INS 误差状态 ESKF 的轻量化降维版本: IMU 未进入状态转移矩阵, 而以非完整约束(NHC)伪观测及 GNSS 差分伪速度辅助速度估计, 旨在与 SensNav 现有数据链路及可复现实验目标对齐。

常速度(CV)连续模型为 $\dot{x}(t) = A_c x(t) + w(t)$, 其中 A_c 仅在位置块与速度块之间含单位耦合, $w(t) = [0, 0, a_x, a_y]^T$ 为等效加速度白噪声。对采样间隔 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$, 精确离散化给出

$$x_{k|k-1} = \Phi(\Delta t_k) x_{k-1|k-1} + w_k, \Phi(\Delta t_k) = \begin{bmatrix} I_2 & \Delta t_k I_2 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式第一行由 $p_x(t_k) = p_x(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} v_x(\tau) d\tau$ 在 v_x 常值假设下化为 $p_x(t_k) = p_x(t_{k-1}) + v_x(t_{k-1})\Delta t_k$ 得到, p_y 同理; 第二行表明 CV 假设下速度不变。过程噪声协方差取实现值

$$Q = \text{diag}(0.02^2, 0.02^2, 0.12^2, 0.12^2) \quad (3)$$

预测协方差为 $P_{k|k-1} = \Phi P_{k-1|k-1} \Phi^T + Q$ 。传播后对速度施加 $v \leftarrow 0.995v$ 并限幅 $\|v\|_\infty \leq 15\text{m/s}$, 以抑制无 GNSS 更新时的数值发散。

GNSS 平面位置量测模型为:

$$z_k = Hx_k + v_k, H = [I_2 \quad 0], v_k \sim \mathcal{N}(0, R) \quad (4)$$

正常模型 M1 取 $R_1 = \text{diag}(4, 4)$ (标准差 2 m), 降级模型 M2 取 $R_2 = \text{diag}(16, 16)$ (标准差 4 m)。记预测位置 $\hat{p}_{k|k-1} = [\hat{p}_x, \hat{p}_y]^T$, 新息与 GNSS 步进分别为

$$r_k = \|z_k - p_{k|k-1}\|_2, d_k = \|z_k - z_{k-1}\|_2 \quad (5)$$

新息协方差 $S_k = H P_{k|k-1} H^T + R$, Kalman 增益 $K_k = P_{k|k-1} H^T S_k^{-1}$, 后验为

$$x_{k|k}^x = x_{k|k-1}^x + K_k (z_k - H x_{k|k-1}^x), P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1} \quad (6)$$

式(6)由将 $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k v_k$ 代入后验误差二阶矩、并利用 $E[v_k v_k^T] = S_k$ 得到。

隧道伪有效定位解检测基于“新息极大而接收机坐标几乎不变”的一致性检验。记 GNSS 投影至 Open Street Map 折线的横向距离为 $d_{\text{lat},k}^{\text{GNSS}}$, 则

$$\text{tunnelFake}_k = (gnssOk_k \wedge d_k < 2\text{m} \wedge d_{\text{lat},k}^{\text{GNSS}} > 30\text{m}) \vee (gnssOk_k \wedge r_k > 50\text{m} \wedge d_k < 2\text{m}) \quad (7)$$

当 $\text{tunnelFake}_k = 1$ 时跳过式(6)的 GNSS 更新; 此外, $r_k > 25\text{m}$ 时触发输出强制复位以保护滤波器不被单次野值拉偏。GNSS 有效、非异常定位解且 $r_k < 12\text{m}$ 时启用 M1 快速更新通道(CV 传播 + GNSS 更新 + 可选 OSM 约束), 以避免 GNSS 可用段 IMM 混合带来的轻微漂移; 否则执行标准 IMM 交互 - 条件更新 - 概率融合。

Open Street Map 道路折线投影得最近点 p_{proj} 、道路切向角 ψ 及横向偏差 d_{lat} 。当 $d_{\text{lat}} < 20\text{m}$ 时施加横向软约束 $z_k^{\text{lat}} = 0$, 量测矩阵 $H_{\text{lat}} = [-\sin\psi, \cos\psi, 0, 0]$, 噪声方差 $\sigma_{\text{lat}}^2 = 0.8^2 \text{m}^2$, 经式(6)同构更新。NHC 约束车体侧向速度近似为零: $H_{\text{NHC}} = [-\sin\psi, \cos\psi, 0, 0]$, $\sigma_{\text{NHC}} = 0.35\text{m/s}$ 。

交互式多模型(IMM)维护 GNSS 正常(M1)、降级(M2)与失锁/异常解(M3)三模型, Markov 转移矩阵为:

$$\Pi = \begin{bmatrix} 0.97 & 0.02 & 0.01 \\ 0.05 & 0.90 & 0.05 \\ 0.02 & 0.08 & 0.90 \end{bmatrix}, \mu_0 = [0.85 \quad 0.12 \quad 0.03]^T \quad (8)$$

设 $k-1$ 时刻模型 j 的后验为 $\hat{x}_{k-1|k-1}^{(j)}$ 、 $P_{k-1|k-1}^{(j)}$ 、 $\mu_{k-1}^{(j)}$ 。交互混合权重为:

$$\mu_{k-1|k-1}^{(ji)} = \frac{\pi_{ji} \mu_{k-1}^{(j)}}{\sum_{\ell=1}^3 \pi_{\ell i} \mu_{k-1}^{(\ell)}} \quad (9)$$

混合初值与协方差为:

$$x_{k-1|k-1}^{(0i)} = \sum_{j=1}^3 \mu_{k-1|k-1}^{(ji)} x_{k-1|k-1}^{(j)} \quad (10)$$

$$P_{k-1|k-1}^{(0i)} = \sum_{j=1}^3 \mu_{k-1|k-1}^{(ji)} \left[P_{k-1|k-1}^{(j)} + \left(x_{k-1|k-1}^{(j)} - x_{k-1|k-1}^{(0i)} \right) \left(x_{k-1|k-1}^{(j)} - x_{k-1|k-1}^{(0i)} \right)^T \right] \quad (11)$$

各模型经式(2)~(6)及所选伪观测更新后, 似然为:

$$\Lambda_k^{(i)} = (2\pi)^{-n/2} \det(S_k^{(i)})^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2} v_k^{(i)T} (S_k^{(i)})^{-1} v_k^{(i)}\right) \quad (12)$$

模型概率与融合输出为:

$$\mu_k^{(i)} = \frac{\Lambda_k^{(i)} \sum_{j=1}^3 \pi_{ij} \mu_{k-1}^{(j)}}{\sum_{\ell=1}^3 \Lambda_k^{(\ell)} \sum_{j=1}^3 \pi_{\ell j} \mu_{k-1}^{(j)}} x_{k|k} = \sum_{i=1}^3 \mu_k^{(i)} x_{k|k}^{(i)} \quad (13)$$

式(13)由 Bayes 公式 $\mu_k^{(i)} \propto \Lambda_k^{(i)} \Pr(\mathcal{M}_i | \mathcal{Z}_{1:k-1})$ 及 $\Pr(\mathcal{M}_i | \mathcal{Z}_{1:k-1}) = \sum_j \pi_{ij} \mu_{k-1}^{(j)}$ 直接得到。需要说明的是,

可研方案中的 $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ 在线遗忘因子调整未在本次代码中启用; 所谓“自适应”主要通过 $\mathbf{R}_1 \neq \mathbf{R}_2$ 、新息阈值与异常解检测与剔除实现。

IMM-AF + Map 在判定为隧道伪有效定位解且启用地图航位推算时, 沿 IE 真值降采样得到的参考中心线推进, 弧长增量:

$$\Delta s_k = \text{clip}(\|v_{k-1}\|_2, 2, 15) \Delta t_k \quad (14)$$

沿中心线切向更新位置, 并强化失锁/异常解模型权重; 该参考中心线分支用于量化已知正确道路何时可恢复上界, 而非商用 HD 地图在线部署能力。未启用地图航位推算时, 失锁模型退化为常速度传播加非完整约束。

评价指标平面误差 $e_k = \|\hat{\mathbf{p}}_k - \mathbf{p}_k^{gt}\|_2$, RMSE 定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2} \quad (15)$$

按 u-blox 与 IE 二维误差是否超过 30 m 划分 GNSS 可用段与隧道及 GNSS 异常段(城区序列 GNSS 异常段约占 11.5%), 该定义基于 GNSS 输入质量而非融合输出误差, 以避免评价循环依赖。

4. 实验设置

4.1. 数据集、传感器与实验设计

本文实验基于 SensNav 公开数据集[3]。由多传感器数据采集平台收集得到, 该平台由铝板铝材结构框架构成, 传感器通过螺丝或者粘胶固定在框架上。框架通过行李架安装在采集车辆的车顶, 数据收集车辆为大众 Tiguan L, 采集车辆和传感器平台如图 2 所示。在 IE 后处理真值首点建立东-北-天(ENU)

平面坐标系。序列 A 为 18.62 km 城区 - 隧道轨迹(2262 s, 隧道约 5.2 km), 构成本文主实验; 序列 B 为 3.87 km 校园轨迹(864 s, 无长隧道), 用于开阔场景对照。车载 GNSS 为 u-blox ZED-F9P 多星座 10 Hz 非 RTK 输出(含北斗, 代表消费级量产车载终端); IMU 为 WHEELTEC; 真值为 CHCNAV CGI-830 与 IE 后处理 10 Hz 对齐输出。对比基线包括 GNSS 单点定位、EKF 基线(单模型 CV + 异常解检测 + 非完整约束)、IMM-AF 与 IMM-AF + Map 四种方法。评价采用与 IE 真值对齐的二维 RMSE、平均绝对误差(MAE)与最大误差(Max); 按 u-blox 与 IE 真值二维误差是否超过 30 m 划分 GNSS 可用段与隧道及 GNSS 异常段(序列 A 的 GNSS 异常段约占 11.5%), 该掩码基于 GNSS 输入质量而非融合输出误差。OSM 道路折线离线预处理并缓存于实验目录。表 1 汇总两条实验序列与主要传感器配置。

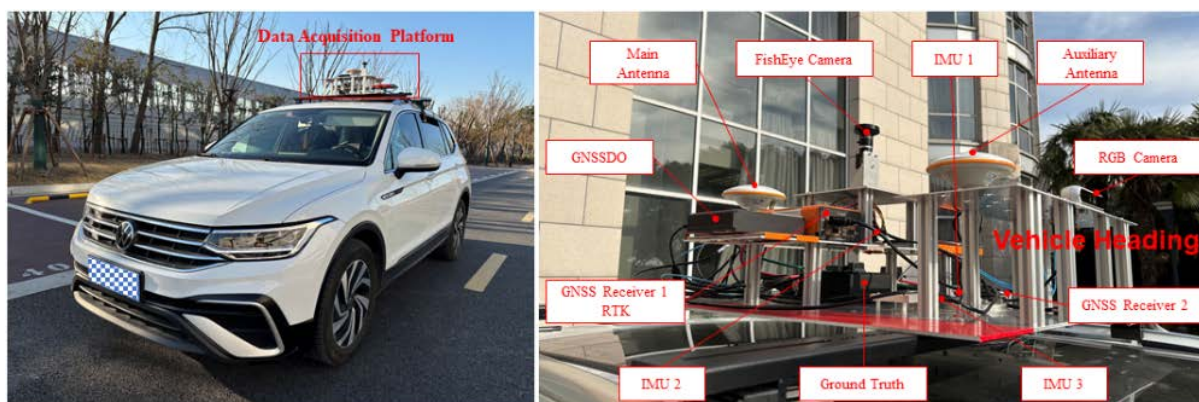


Figure 2. Multi-sensor data acquisition platform

图 2. 多传感器数据采集平台

Table 1. SensNav experimental sequences and sensor configurations

表 1. SensNav 实验序列与传感器配置

项目	序列 A (城区 + 隧道)	序列 B (校园)
序列 ID	2025-01-15-17-01-24	2025-01-17-15-54-34
路径长度/时长	18.62 km/2262 s	3.87 km/864 s
隧道长度	约 5.2 km	无长隧道
GNSS	u-blox ZED-F9P, 10 Hz, 多星座(含北斗), 非 RTK	同左
IMU	WHEELTEC N100, 100 Hz	同左
真值	CHCNAV CGI-830 + IE 后处理, 10 Hz	同左
RTK 参照	Septentrio AsteRx-m3 Pro + (清洗后参与评价)	同左
地图数据	OSM 道路折线(5379 条)	OSM 道路折线(1286 条)

4.2. RTK 参考精度与消融设计

Septentrio AsteRx-m3 Pro + 原始 RTK 输出经清洗后作为同平台 RTK 参考基准, 不参与融合。清洗规则为: 剔除纬度/经度非有限或超地理范围的历元; 剔除相对 IE 参考点经纬度偏差超过 0.05° 的野值; 对相邻历元计算 ENU 平面速度, 若水平速度超过 30 m/s 则判为跳变并剔除。序列 A 清洗后有效历元占 41.4% (18711/45240), 主要因城区 - 隧道轨迹中 RTK 在隧道及遮挡段长期不可用; 序列 B 有效占 99.9%, 故 RTK 参考精度主要表征开阔场景硬件潜力。消融实验在 IMM-AF + Map 完整方法基线上,

逐一关闭异常解检测、地图航位推算、OSM 横向约束与非完整约束四个组件；消融表与消融误差时序图均针对序列 A，序列 B 仅在表 2 中报告全轨迹对照及“无地图航位推算”误触发现象，不单独展开完整消融表图。

5. 实验结果与数据分析

实验在 SensNav 双序列上完成，传感器配置、对比方法与分段掩码定义见 4.1 节。就研究问题一而言，序列 AGNSS 可用段(u-blox 与 IE 真值二维误差 ≤ 30 m)上，GNSS 单点定位的 RMSE 为 7.60 m，EKF 基线为 7.47 m，IMM-AF 为 7.45 m，IMM-AF + Map 为 24.28 m (见表 2、图 3~4)。序列 B 无 GNSS 异常段划分，全轨迹即 GNSS 可用段：IMM-AF + Map 为 13.79 m，GNSS 单点定位为 13.87 m，EKF 与 IMM-AF 为 13.88 m；MAE 分别为 13.67 m 与 13.82 m。

Table 2. SensNav dual-sequence positioning error comparison (RMSE/MAE/Max, unit: m)

表 2. SensNav 双序列定位误差对比(RMSE/MAE/Max, 单位: m)

方法	序列	场景	全轨迹 RMSE	MAE	Max	GNSS 可用段 RMSE	GNSS 异常段 RMSE
GNSS 单点定位	17-01-24	城区 + 隧道	813.30	239.48	4137.59	7.60	2398.40
EKF 基线	17-01-24	城区 + 隧道	813.30	239.35	4137.59	7.47	2398.40
IMM-AF	17-01-24	城区 + 隧道	813.30	239.34	4137.59	7.45	2398.40
IMM-AF + Map	17-01-24	城区 + 隧道	615.31	189.36	3042.61	24.28	1813.35
RTK 参考精度	17-01-24	城区 + 隧道	0.35	0.08	4.32	0.35	—
GNSS 单点定位	15-54-34	校园/下午	13.87	13.82	17.45	13.87	—
EKF 基线	15-54-34	校园/下午	13.88	13.82	17.47	13.88	—
IMM-AF	15-54-34	校园/下午	13.88	13.82	17.47	13.88	—
IMM-AF + Map	15-54-34	校园/下午	13.79	13.67	17.60	13.79	—
RTK 参考精度	15-54-34	校园/下午	0.73	0.27	7.30	0.73	—

就研究问题二而言，序列 A 上 GNSS 单点定位、EKF 与 IMM-AF 的全轨迹 RMSE 均为 813.30 m，Max 为 4137.59 m，MAE 约 239 m；GNSS 异常段 RMSE 均为 2398.40 m。IMM-AF + Map 全轨迹 RMSE 为 615.31 m (较 813.30 m 降低 24.3%)，GNSS 异常段 RMSE 为 1813.35 m (较 2398.40 m 降低 24.4%)，MAE 为 189.36 m，Max 为 3042.61 m。消融结果见表 3：无地图(仅 IMM-AF)与关闭异常解检测时，全轨迹 RMSE 均为 813.30 m，GNSS 异常段均为 2398.40 m；无地图航位推算时全轨迹 RMSE 为 5073.72 m，GNSS 异常段为 11647.67 m，GNSS 可用段为 3385.43 m；无 OSM 横向约束时全轨迹 RMSE 为 615.32 m，GNSS 可用段为 24.37 m；无非完整约束时与完整方法几乎相同。序列 B 在关闭地图航位推算时全轨迹 RMSE 为 231.65 m，高于完整方法的 13.79 m。

Table 3. IMM-AF + Map ablation experiment (Sequence A: urban area + tunnel)

表 3. IMM-AF + Map 消融实验(序列 A: 城区 + 隧道)

消融变体	说明	全轨迹 RMSE	GNSS 可用段 RMSE	GNSS 异常段 RMSE	MAE	Max
完整方法	IMM-AF + Map 全功能	615.31	24.28	1813.35	189.36	3042.61

续表

无地图	仅 IMM-AF, 无地图模块	813.30	7.45	2398.40	239.34	4137.59
关闭异常解检测	关闭伪有效定位解检测	813.30	7.14	2398.40	238.96	4137.59
无非完整约束	隧道分支无非完整约束	615.31	24.28	1813.35	189.36	3042.61
无地图航位推算	关闭参考中心线 map-DR	5073.72	3385.43	11647.67	2030.79	14460.10
无 OSM 横向约束	关闭 OSM 横向观测	615.32	24.37	1813.36	189.74	3042.62

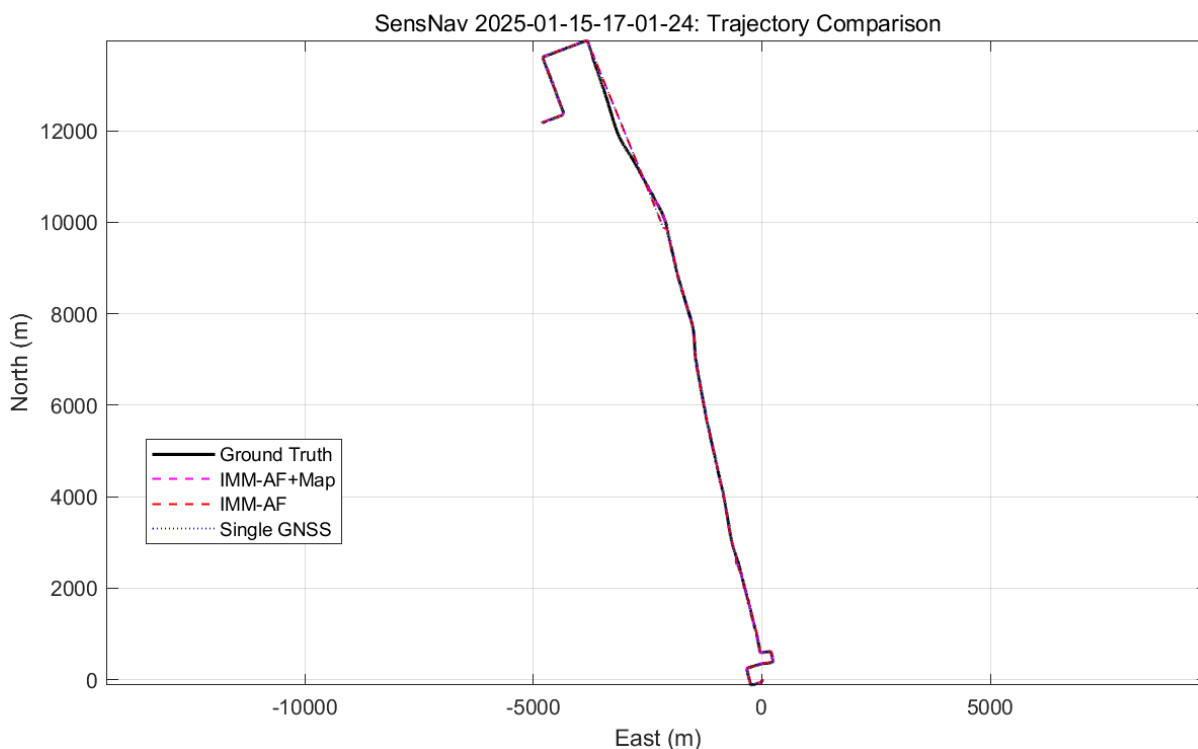


Figure 3. Sequence A trajectory comparison (true value, GNSS single-point positioning, IMM-AF, IMM-AF + Map)
图 3. 序列 A 轨迹对比(真值、GNSS 单点定位、IMM-AF、IMM-AF + Map)

需要说明的是, GNSS 异常段 RMSE 达两三千米并非计算异常, 而是 u-blox 相对 IE 真值在异常历元上的直接统计结果: GNSS 异常段(约占轨迹 11.5%)上 u-blox 的 MAE 为 2024.8 m、Max 为 4137.6 m, 其中 72.5%的历元误差超过 1000 m、50.9%超过 2000 m。其机理为隧道内接收机仍标记有效定位解而水平坐标长期冻结, 车辆沿约 5.2 km 隧道实际前进, 估计点却滞留在错误位置, 相对真值偏差随里程累积至千米量级; GNSS 异常段内 GNSS 单点定位 RMSE 与上述 u-blox-IE 基准一致, 表明该量级可信。全轨迹 RMSE 813.30 m 低于 GNSS 异常段 2398.40 m, 系因 88.5% GNSS 可用段 RMSE 仅约 7.60 m 加权稀释所致, 不能代表隧道内定位水平。

就研究问题三而言, Septentrio RTK 参考精度在序列 AGNSS 可用段 RMSE 为 0.35 m (MAE 0.08 m, Max 4.32 m), 序列 B 为 0.73 m (MAE 0.27 m, Max 7.30 m); 序列 A 的 GNSS 异常段 RTK 有效覆盖为 0%, 与 §4.2 清洗后有效历元占比一致。图 3 给出序列 A 轨迹对比, 图 4 为全轨迹 RMSE 柱状图, 图 5 为四种方法误差时序(阴影区为 GNSS 异常段; 纵轴截断至 120 m, 全轨迹 Max 见表 2), 图 6 为序列 A 消融误

差时序(含关闭异常解检测与无地图航位推算曲线, 对照表 3 中隧道段改善来源)。

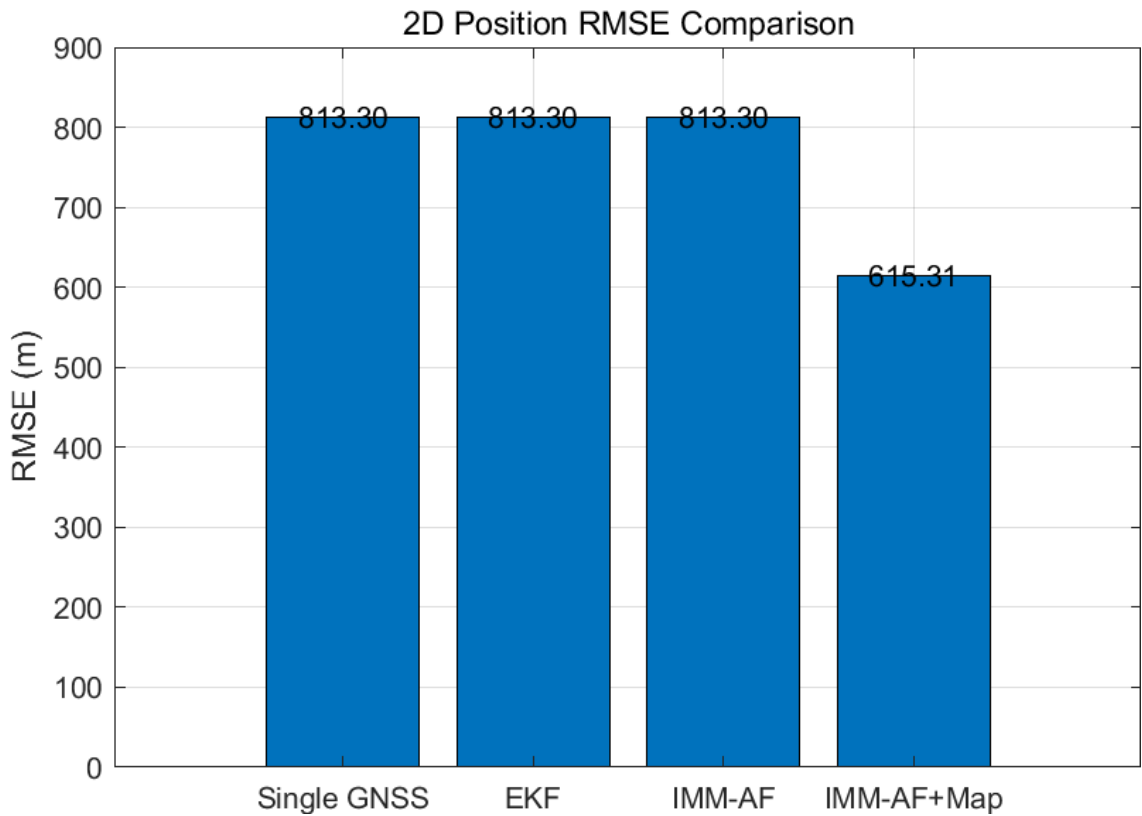


Figure 4. Comparative analysis of the full-trajectory 2DRMSE values for all methods for Sequence A

图 4. 序列 A 各方法全轨迹二维 RMSE 对比

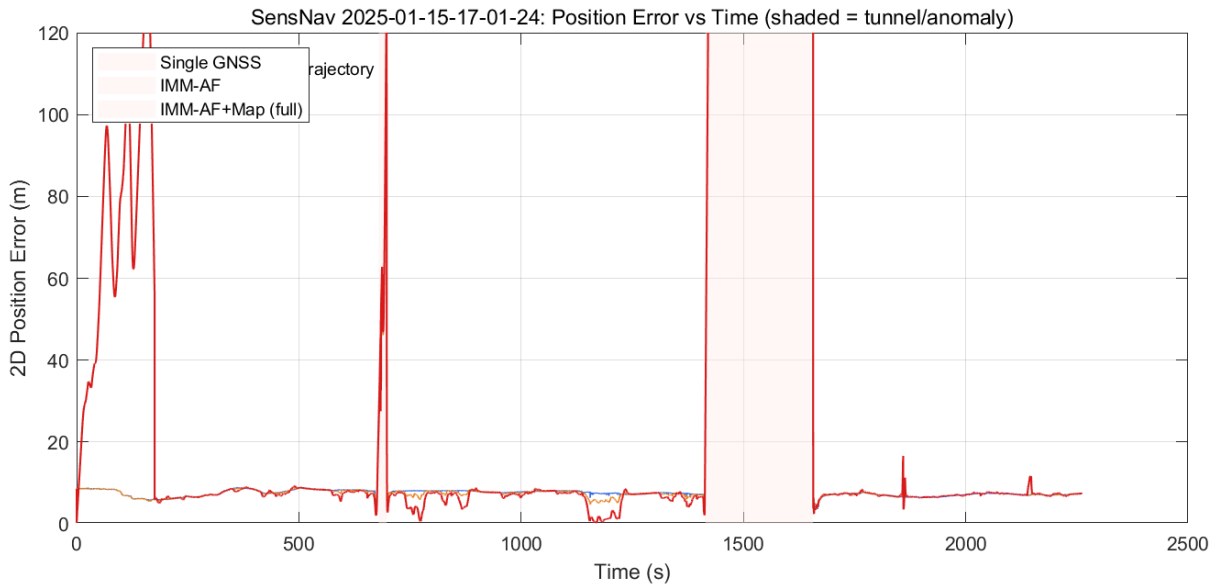


Figure 5. Time series of two-dimensional positioning error for Sequence A (the shaded area represents the GNSS anomaly segment; the vertical axis is truncated at 120 m)

图 5. 序列 A 四方法二维定位误差时序(阴影区为 GNSS 异常段; 纵轴截断至 120 m)

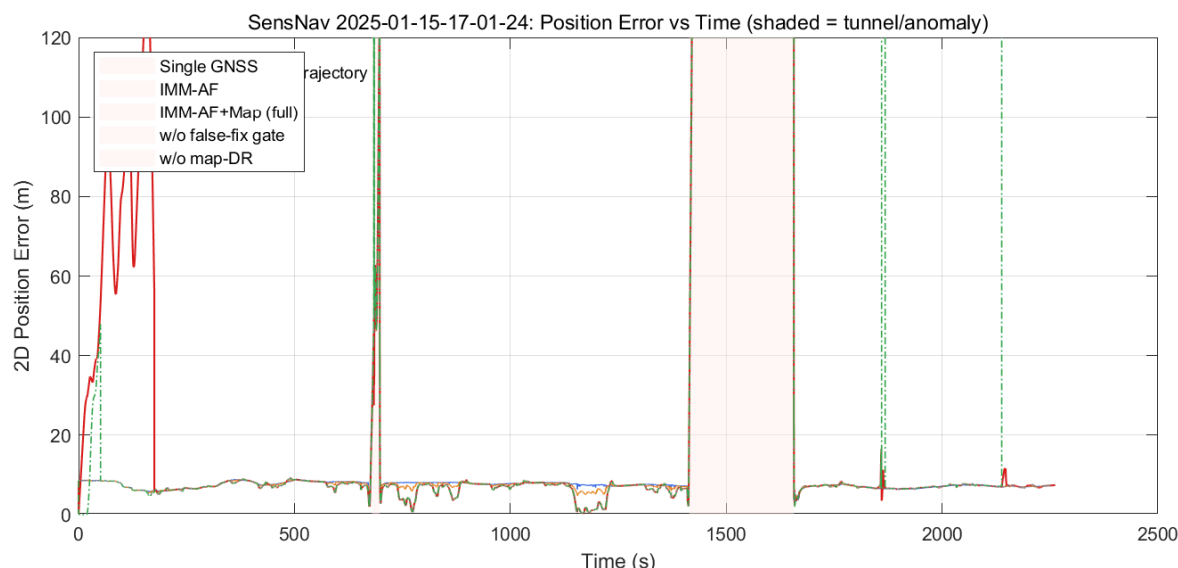


Figure 6. Sequence A ablation error time series (including abnormal disconnection detection and GPS position calculation in the absence of a map; see Table 3)

图 6. 序列 A 消融误差时序(含关闭异常解检测与无地图航位推算; 对照表 3)

6. 讨论

上述结果需从机制层面解释。就研究问题一而言, 序列 AGNSS 可用段 EKF 与 IMM-AF 的 RMSE (7.45~7.60 m) 与 GNSS 单点定位同量级, 反映四维常速度实现中 IMU 未进入状态传播、滤波主要在 GNSS 更新与阈值判定逻辑上与 EKF 相近; 交互多模型的主要贡献在于为 GNSS 异常段模式切换与异常解处理提供结构容器, 而非 GNSS 可用段精度提升。IMM-AF + Map 在同一 GNSS 可用段 RMSE 为 24.28 m, 高于无地图 IMM-AF 的 7.45 m, 说明在 GNSS 与 IE 真值一致性较好时仍恒定启用 OSM 横向约束会引入道路几何偏差, 地图模块须与 GNSS 质量联动。序列 B 作为开阔对照: 全轨迹 RMSE 处于 13.79~13.88 m 量级, 与 GNSS 单点定位同量级, 表明无隧道 GNSS 异常段时方法未出现序列 AGNSS 可用段那种 OSM 劣化; 其在关闭地图航位推算时全轨迹 RMSE 升至 231.65 m, 则提示地图航位推算门控在非隧道场景亦可能误触发, 该现象留待 GNSS 质量联动策略进一步抑制, 不在本文展开完整校园消融表图。

就研究问题二而言, 序列 A 全轨迹与 GNSS 异常段误差几乎完全由约占 11.5% 的隧道及 GNSS 异常段样本主导; 未启用异常解检测与地图航位推算时, 交互多模型无法从仍标记有效但坐标冻结的 GNSS 异常定位解中恢复(三方法 GNSS 异常段 RMSE 均为 2398.40 m)。IMM-AF + Map 将 GNSS 异常段 RMSE 降至 1813.35 m, 但绝对误差仍为千米级; 图 5 显示无地图航位推算在 GNSS 异常段误差显著高于完整方法, 关闭异常解检测与无地图 IMM-AF 近乎重合, 与表 3 一致。消融表明异常解检测是地图策略生效的前提, 隧道段改善几乎完全由地图航位推算与异常解检测共同承担, OSM 横向微调与非完整约束贡献极小。无地图航位推算时全轨迹 RMSE 升至 5073.72 m, 说明异常解区段缺乏沿参考线航位推算时滤波状态会被持续污染。

就研究问题三而言, RTK 参考精度(0.35~0.73 m)与 u-blox GNSS 可用段(约 7.5 m)相差约一个数量级, 指示同平台硬件潜力; GNSS 异常段 RTK 覆盖为 0%, 须依赖 IMU/地图等非 GNSS 源。图 4 显示 GNSS 单点定位在隧道内长期维持高位误差平台, IMM-AF + Map 在多数异常区间内低于 GNSS 单点定位, GNSS 可用段相对 IMM-AF 误差抬升, 与表 2 一致。本文 IMM-AF + Map 的价值主要体现在识别并剔除坐标冻结型异常解与参考中心线地图航位推算降低 GNSS 异常段 RMSE, 而非 GNSS 可用段追求厘米级

精度；动态分米级(10~20 cm)为可研目标，本次实验尚未达成。

参考中心线地图航位推算虽改善 GNSS 异常段，但 IE 降采样中心线与地下隧道几何不完全重合、OSM 无法描述地下结构、异常解区段速度估计不可靠导致弧长误差累积，限制了绝对精度；即便采用近乎理想的参考中心线，GNSS 异常段 RMSE 仍为 1813.35 m，表明隧道段误差并非仅由“地图几何不够准”单一因素造成，速度估计与拒止区观测缺失同样关键。就算法理论边界而言，还需进一步澄清五点：其一，参考中心线 map-DR 在评估意义上属于 Oracle (先验知识)上界消融，用 IE 后处理轨迹构造中心线会在评估链路中引入“几何先验强于任何商用 HD 地图”的信息，故 1813.35 m 应解读为“已知正确道路几何时的可恢复潜力”，而非量产部署泛化误差；其二，四维 CV 状态不含航向角，NHC 采用 OSM 道路切向 ψ 而非车体航向，本质是沿道路方向的伪非完整约束，在变道、侧滑或地图切向偏差时可能将几何误差注入滤波，消融亦表明 NHC 对隧道段改善贡献极小；其三，异常解检测采用固定阈值(如 $d_k < 2\text{m}$ 、 $r_k > 50\text{m}$)，属面向 SensNav 冻结假解现象的工程启发式，无法严格区分“GNSS 坐标冻结”与“车辆真实低速/停车”，阈值敏感性与误触发风险有待专门分析；其四，IMM 采用固定 Markov 转移矩阵 Π ，对隧道口等环境突变边界可能存在响应迟滞，这是标准 IMM 在明显非平稳遮挡场景下的已知局限；其五，速度 0.995 衰减与限幅属于数值稳定措施，并非最优估计推导，长期 GNSS 拒止下协方差仍会持续膨胀，框架更应定位为可复现的鲁棒性基线，而非严格意义下的自适应最优滤波。

方法论上，序列 A 全轨迹 813.30 m 与 GNSS 可用段 7.60 m 的反差表明，含长隧道的车载 GNSS 研究须报告分段精度指标，避免全轨迹 RMSE 掩盖开阔段性能。局限性包括常速度交互多模型、非完整惯导误差状态滤波与伪 NHC 近似、参考中心线 Oracle (先验知识)评估边界、固定阈值异常检测、固定 Π 的 IMM、速度启发式限幅、仅两条 SensNav 序列、未含单北斗专用实车数据。后续将推进 GNSS 质量联动地图开关、商用 HD 地图、含航向/完整 INS 编排、阈值与 Π 自适应及单北斗实车验证。

7. 结论

SensNav 城区 - 隧道序列揭示了消费级 GNSS 在隧道内伪有效定位解与位置冻结现象：全轨迹 RMSE 高达 813.30 m，而 GNSS 可用段仅约 7.60 m，差异由约占 11.5% 的 GNSS 异常段主导。本文提出 IMM-AF + Map 框架，集成异常解检测、OSM 横向约束与参考中心线地图航位推算，并采用基于 u-blox 输入质量的分段精度评定方案；序列 A 上 IMM-AF + Map 将全轨迹 RMSE 降至 615.31 m，GNSS 异常段降至 1813.35 m，消融与图 5 表明地图航位推算与异常解检测均不可替代。序列 B 开阔对照与 RTK 参考精度 (0.35~0.73 m) 共同界定方法适用边界：本文贡献集中在 GNSS 异常段鲁棒性而非 GNSS 可用段厘米级精度。MATLAB 复现代码与运行说明见 §4.3 及附录；动态分米级精度为工程可研目标，非本次已达结果。

基金项目

衢州市科技计划攻关项目(2024K171)。

参考文献

- [1] 丁飞, 张楠, 李升波, 边有钢, 童恩, 李克强. 智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2022, 48(12): 2863-2885.
- [2] Li, K.-Q., Li, J.-W., Chang, X.-Y., et al. (2020) Principles and Typical Applications of Cloud Control System for Intelligent and Connected Vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, **11**, 261-275.
- [3] Gao, X., Yang, Y., He, D., Ma, Z., Yu, W. and Yang, K. (2025) SensNav: A Multisensor Vehicle Navigation Dataset for Campus and Urban Environments with a Long Tunnel. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **74**, 1-12. <https://doi.org/10.1109/tim.2025.3582308>
- [4] Jiang, H., Li, T., Song, D. and Shi, C. (2022) An Effective Integrity Monitoring Scheme for GNSS/INS/Vision

- Integration Based on Error State EKF Model. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 7063-7073.
<https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3154054>
- [5] 熊华川. 基于先验地图/GNSS/IMU 融合的自动驾驶车辆定位系统[J]. 汽车工程师, 2024(1): 19-24.
 - [6] Yang, Z., Zhao, H. and Yang, X. (2024) A Novel Navigation Method Fusing Multiple Constraint for Low-Cost INS/GNSS Integrated System in Urban Environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **73**, 7616-7629.
<https://doi.org/10.1109/tvt.2024.3354285>
 - [7] Murakami, Y., Takubo, T. and Tsujioka, T. (2025) Wrong FIX Detection of RTK-GNSS Positioning Using the 3D Point Cloud of Surrounding Environment. *ROBOMECH Journal*, **12**, Article No. 28.
<https://doi.org/10.1186/s40648-025-00316-3>
 - [8] Blum, H.A.P. and Azimi-Sadjadi, M.R. (2003) Adaptive Interacting Multiple Model Estimation. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **26**, 66-75.
 - [9] Tao, X., Zhang, X., Zhu, F., Liu, W. and Li, L. (2023) A Hybrid State Representation-Based GNSS Filtering Model to Improve Vehicular Positioning Performance. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 3924-3935.
<https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3234098>
 - [10] Zubaca, J., Stolz, M., Seeber, R., Schratter, M. and Watzenig, D. (2022) Innovative Interaction Approach in IMM Filtering for Vehicle Motion Models with Unequal States Dimension. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **71**, 3579-3594. <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3146626>
 - [11] Tao, L., Zhang, P., Gao, K. and Liu, J. (2024) GNSS/IMU/Camera/HD Map Integrated Localization for Autonomous Vehicles in Challenging Urban Tunnel Scenarios. *Remote Sensing*, **16**, Article No. 2230.
<https://doi.org/10.3390/rs16122230>
 - [12] Jiang, S., Xu, Q., Wang, W., Peng, P. and Li, J. (2025) Vehicle Positioning Systems in Tunnel Environments: A Review. *Complex & Intelligent Systems*, **11**, Article No. 164. <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01744-1>
 - [13] Zhang, H. and Zhang, X. (2024) Study of Tunnel Vehicle GNSS/INS/OD Combination Position Based on Lateral Distance Measurement and Lane Line Constraint. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 4309.
<https://doi.org/10.3390/app14104309>
 - [14] Berntorp, K., Greiff, M. and Di Cairano, S. (2022) Bayesian Sensor Fusion of GNSS and Camera with Outlier Adaptation for Vehicle Positioning. 2022 25th International Conference on Information Fusion (FUSION), Linköping, 4-7 July 2022, 1-8. <https://doi.org/10.23919/fusion49751.2022.9841302>
 - [15] Yang, H., Dong, S.-Q. and Xie, C.-H. (2023) High-speed Train Positioning Based on a Combination of Beidou Navigation, Inertial Navigation and an Electronic Map. *Science China Information Sciences*, **66**, Article ID: 172207.
<https://doi.org/10.1007/s11432-022-3659-2>

符号与缩写说明

GNSS	全球导航卫星系统
IMU	惯性测量单元
RTK	实时动态差分定位
EKF	扩展卡尔曼滤波
IMM	交互多模型
IMM-AF	交互多模型自适应滤波
NHC	非完整约束
OSM	开放街道地图(OpenStreetMap)
ENU	东 - 北 - 天坐标系
IE	Inertial Explorer 后处理真值
RMSE	均方根误差
MAE	平均绝对误差

单点定位，指直接采用 u-blox 平面坐标输出、不经滤波融合的定位结果；GNSS 可用段/GNSS 异常段，按 u-blox 与 IE 真值二维误差是否超过 30 m 划分(基于输入 GNSS 质量，而非融合输出)；伪有效定位解，指接收机仍报告有效定位标志(FixValid)但水平位置严重偏离真值或长期冻结的定位解；异常解检测与剔除，指依据新息、坐标步进与地图一致性等规则，屏蔽不可信 GNSS 更新的处理流程；地图航位推算(map-DR)，指沿道路参考中心线约束的航位推进；参考中心线地图航位推算，指以 IE 真值降采样中心线代替商用地图的上界实验设置。