

面向GNSS拒止与伪有效解场景的车载GNSS/INS/OSM融合连续定位方法

毛逸飞¹, 赵杰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8月14日; 录用日期: 2026年9月13日; 发布日期: 2026年9月22日

摘要

智能网联汽车在长大隧道与城市遮挡区段运行时, 全球导航卫星系统(GNSS)观测可能中断。消费级接收机在定位有效标志(FixValid)仍为真时可输出坐标冻结型伪有效定位解, 使松组合滤波持续错误更新。针对前期交互式多模型自适应融合(IMM-AF)常用实现未纳入完整惯性机械编排、未利用接收机速度, 且未分离参考中心线与开放地图路径等不足, 文章建立基于误差状态卡尔曼滤波(ESKF)的车载GNSS/惯性导航系统(INS)/地图融合方法。惯性测量单元(IMU)按平面运动作机械编排; 伪有效定位解检测联立平面步进、滤波-GNSS偏差与u-blox导出速度, 经连续确认后剔除异常解并转入地图约束航位推算(map-DR)。检测阈值与采样间隔、分段掩码共用同一套量; 实现中冻结步进宽于运动学定义, 是误报来源。理想化参考实验沿惯性探测器(IE)真值降采样中心线推进(ESKF + Oracle map-DR), 实际地图实验沿开放街道地图(OSM)推进, 二者不合并解读。SensNav城区-隧道序列上, ESKF + Oracle map-DR全轨迹平面均方根误差(RMSE)为689.12 m, 可用段15.64 m, 异常段2031.79 m; GNSS单点定位为813.30 m, IMM-AF + Map为615.31 m、24.28 m、1813.35 m。2031.79 m度量检出后沿程积分的残余误差, 属长时间GNSS异常下的方法局限, 不是检测成功后的可用精度。同一框架下OSM路径全轨迹为1158.51 m, 校园开阔为1057.34 m, 由误报触发错误匹配放大。城区检测器召回率94.7%、误报率67.1%、F1值0.266。

关键词

GNSS拒止, 伪有效定位解, 误差状态卡尔曼滤波, 地图约束航位推算, 开放街道地图

Continuous Vehicle Localization under GNSS Denial and Pseudo-Valid Fixes: A GNSS/INS/OSM ESKF Fusion Approach

Yifei Mao¹, Jie Zhao¹, Youhong Xu²

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

文章引用: 毛逸飞, 赵杰, 徐友洪. 面向 GNSS 拒止与伪有效解场景的车载 GNSS/INS/OSM 融合连续定位方法[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(5): 894-907. DOI: 10.12677/jsta.2026.145085

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

Received: August 14, 2026; accepted: September 13, 2026; published: September 22, 2026

Abstract

When intelligent connected vehicles travel through long tunnels and urban canyons, Global Navigation Satellite System (GNSS) observations may be interrupted. Consumer-grade receivers can keep FixValid true while outputting frozen, pseudo-valid fixes that contaminate loosely coupled filters. Building on a prior Interacting Multiple Model-Adaptive Fusion (IMM-AF) baseline that lacked full inertial mechanization, receiver velocity, and separated reporting of reference-centerline versus open-map paths, this paper formulates a GNSS/Inertial Navigation System (INS)/map fusion scheme based on a seven-state Error-State Kalman Filter (ESKF). An Inertial Measurement Unit (IMU) drives planar mechanization; a detector jointly tests planar step, filter-GNSS discrepancy, and u-blox speed, then withholds GNSS updates and switches to map-constrained dead reckoning (map-DR). Thresholds share the sampling interval and the segment mask; the implemented freeze-step is looser than the kinematic definition and is the source of false positives. An idealized experiment advances along an Inertial Explorer (IE)-derived centerline (ESKF + Oracle map-DR); a real-map experiment uses OpenStreetMap (OSM). On the SensNav urban-tunnel sequence, ESKF + Oracle map-DR attains a planar Root Mean Square Error (RMSE) of 689.12 m (available 15.64 m; anomalous 2031.79 m), versus 813.30 m for GNSS single-point and 615.31/24.28/1813.35 m for IMM-AF + Map. The 2031.79 m value is residual along-track map-DR error after detection, a limitation under prolonged GNSS anomaly rather than usable accuracy. The OSM branch yields 1158.51 m on the urban sequence and 1057.34 m on campus, driven by a false-positive mismatch. Detector recall is 94.7% with a 67.1% false-positive rate (F1 = 0.266).

Keywords

GNSS Denial, Pseudo-Valid Fix, Error-State Kalman Filter, Map-Constrained Dead Reckoning, OpenStreetMap

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

智能网联汽车的连续定位直接支撑路径跟踪、协同感知与运行监控。隧道、城市峡谷与高架遮挡使卫星可见性下降，全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)伪距与载波相位观测的完好性随之恶化，松组合 GNSS/惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)在失锁或观测异常时位置误差迅速累积[1]-[3]。因此，有必要将几类现象区分开来加以讨论。GNSS 拒止指卫星信号被结构物遮挡，观测中断或载噪比骤降，传统处理对应接收机失锁，即定位有效标志(FixValid)为假或该历元无可用位置输出。定位跳变指相邻历元平面坐标出现远超运动学约束的阶跃。持续偏差指解仍随时间变化，但因非视距(Non-Line-of-Sight, NLOS)或多径而相对真值保持系统性偏移。本文针对的是拒止发生后消费级接收机仍以固定频率输出位置，且 FixValid 保持为真的情形。当该标志为真而水平坐标在多个历元上近似不变时，称其为坐标冻结型伪有效定位解：它属于伪有效定位解(FixValid 为真但解不可信)的一种可观测子

类,既不是无解失锁,也不是跳变或持续运动偏差。滤波若按常规量测更新处理,名义位置将被约束在冻结点附近,误差随车辆继续行驶而累积至百米乃至千米量级。Gao 等发布的 SensNav 多传感器车载导航数据集给出了含约 5.2 km 隧道的 18.62 km 城区轨迹,并同步记录 u-blox ZED-F9P、工业级惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、Septentrio 实时动态差分(Real-Time Kinematic, RTK)与惯性探测器(Inertial Explorer, IE)后处理真值,使上述坐标冻结型异常解能够在统一时间基准下被定量刻画[4]。该数据集公开于 GitHub 仓库 SensNav-Dataset [4]。

交互式多模型自适应融合(Interacting Multiple Model-Adaptive Fusion, IMM-AF)已用于 GNSS/INS 组合,以多模型交互应对量测噪声变化与短时失锁[5]。本文在 SensNav 上实现四维常速度(Constant Velocity, CV)状态的 IMM-AF,并叠加地图约束作为对照基线,记为 IMM-AF + Map。全轨迹均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)可被占比有限的 GNSS 异常段主导,因而按 u-blox 与 IE 真值平面误差是否超过 30 m 划分 GNSS 可用段与 GNSS 异常段后再行评定。IMM-AF + Map 采用固定步进与新息阈值检测异常解,并在参考中心线上执行地图约束航位推算(Map-Constrained Dead Reckoning, map-DR)。其结构上的缺口在于:IMU 未进入完整机械编排,状态传播仍以 CV 离散模型为主;非完整约束(Non-Holonomic Constraint, NHC)取开放街道地图(OpenStreetMap, OSM)道路切向而非车体航向;检测未使用接收机导出速度;参考中心线与 OSM 可部署几何未在同一误差状态滤波中分离报告,容易将理想化参考实验与实际地图实验混读。

本文将滤波升级为地面车辆简化七维误差状态卡尔曼滤波(Error-State Kalman Filter, ESKF)。误差状态卡尔曼滤波的名义-误差分离与误差反馈形式以 Solà 的推导与 Groves 的组合导航表述为理论依据[6][7]。近年来,关于车载低成本 INS/GNSS 系统的误差状态估计已有诸多研究,如 Zhao 等人的工作[8]。ESKF、NHC、零速更新(Zero Velocity Update, ZUPT)与地图匹配本身均属已有方法,本文不将其单列为核心理论创新。相对 IMM-AF + Map 对照基线,本文的改动集中在同一闭环内的三处接口:用 IMU 机械编排替换 CV 离散传播(且仅在 GNSS 被剔除且未启用 map-DR 的区间积分,以免与折线推进冲突);用估计航向下的横向速度约束替换以 OSM 道路切向代替车体航向的横向约束;将 u-blox 导出速度、平面步进与滤波-GNSS 偏差联立为坐标冻结检测,并以连续三历元确认后转入 map-DR。map-DR 设置两条几何路径并分开报告:理想化参考路径沿 IE 真值降采样参考中心线推进,实际地图路径沿 OSM 折线推进[9][10]。两条路径共用同一检测与 ESKF 更新,仅替换道路几何。离散转移矩阵、NHC 量测矩阵与检测阈值均以第 3 节给出的实现式为准,七维截断不能等同于十五维捷联惯导误差模型,检测逻辑也不属于既有完好性监测算法的复现。ZUPT 用于区分停车与坐标冻结,其伪量测形式与车载文献中的停车约束一致[3]。

在 SensNav 城区-隧道序列与校园开阔序列上,本文将 ESKF + Oracle map-DR 与 GNSS 单点定位、IMM-AF + Map 对照基线、ESKF + OSM map-DR 以及 Septentrio RTK 参考精度对照,并给出检测器独立指标、误差分阶段统计与参数敏感性。可用段 15.64 m 低于 IMM-AF + Map 的 24.28 m,全轨迹与异常段仍高于 IMM-AF + Map。异常段 2031.79 m 应读作长时间拒止下沿程积分的局限。检测器召回率高而误报率高,误报会将可用历元送入 map-DR;在参考中心线上该放大被几何掩盖,在 OSM 上则达到千米级。两条轨迹不足以支持工程应用结论。

2. 方法

2.1. 问题表述与系统框架

本文方法的适用对象是坐标冻结型伪有效定位解,而不是全部 GNSS 异常。GNSS 拒止描述的是卫星信号被遮挡这一物理条件;在 SensNav 城区序列中,该条件主要出现在长大隧道。传统失锁对应 FixValid 为假或该历元无位置输出,松组合此时自然停止 GNSS 更新并转入惯性传播。定位跳变对应平面步进突然增大,可用新息或步进阈值直接隔离。持续偏差对应解仍在运动但相对真值存在系统性偏移,例如城

市非视距, 其时间序列形态与冻结相反。坐标冻结型伪有效定位解则同时满足 FixValid 为真、水平坐标多历元近似不变、车辆仍可能处于运动状态。本文检测与 map-DR 只针对后一类: 对失锁、跳变和持续偏差, 现有规则既不声称可检, 也不在实验中单独评定。

记 GNSS 历元时刻为 t_k , 采样间隔 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$, 名义上 $\Delta t_k = 0.1\text{ s}$, 与 SensNav u-blox 10 Hz 记录一致[4]。u-blox 输出 ENU 位置 $\mathbf{z}_k \in \mathbb{R}^3$ 及 FixValid 标志。IE 真值提供评定用参考轨迹。Xsens MTi 680 经重采样后给出载体坐标系比力 $\mathbf{a}^b$ 与角速度 $\boldsymbol{\omega}^b$ 。u-blox 导出速度给出平面速度模长 s_k 。道路地图表示为折线集合。理想化参考实验的折线由 IE 真值按弧长降采样得到, 实际地图实验的折线由开放道路数据缓存得到[9] [10]。每个 GNSS 历元按同一闭环调度。

每个 GNSS 历元执行如下闭环。首先由名义速度或 s_k 构成平面预测速度 $\mathbf{v}_k^{\text{pred}}$, 得到预测位置 $\hat{\mathbf{p}}_{k,xy}^- = \mathbf{p}_{k-1,xy} + \mathbf{v}_k^{\text{pred}} \Delta t_k$, 并计算平面新息:

$$\mathbf{v}_k = \|\mathbf{z}_{k,xy} - \hat{\mathbf{p}}_{k,xy}^-\|_2 \quad (1)$$

随后调用伪有效定位解检测。若 GNSS 可用且未被剔除, 则进行 GNSS 平面更新、NHC 更新, 并在连续确认计数为零时将平面位置输出强制复位到 $\mathbf{z}_{k,xy}$ 。若 GNSS 被剔除且启用 map-DR, 则沿当前折线按弧长推进。若 GNSS 被剔除且关闭 map-DR, 则仅沿 $\mathbf{v}_k^{\text{pred}}$ 作短时积分; 此时, IMU 机械编排在相邻 GNSS 历元之间传播名义状态。停车条件下附加 ZUPT。

2.2. 名义状态与误差状态

地面车辆在短时局部东北天(East-North-Up, ENU)中可近似为平面运动。名义状态取:

$$\mathbf{x}^n = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{v} \\ \psi \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^7 \quad (2)$$

其中, $\mathbf{p} = [p_E, p_N, p_U]^\top$ 为 ENU 位置, $\mathbf{v} = [v_E, v_N, v_U]^\top$ 为 ENU 速度, ψ 为绕天向的航向角, 载体坐标系 x 轴指向车头。误差状态定义为名义量与真值之差在切空间上的增量。Solà 给出 IMU 驱动系统中“名义状态积分、误差状态滤波、误差反馈后置零”的间接卡尔曼结构[7], Groves 给出捷联机械编排与误差状态的工程表述[6]。本文采用同一结构, 但将姿态截断为单一航向、不估计 IMU 零偏, 状态维数由完整惯性误差模型降至七维:

$$\delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{p} \\ \delta \mathbf{v} \\ \delta \psi \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^7, \quad \mathbf{p} = \mathbf{p}^n + \delta \mathbf{p}, \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}^n + \delta \mathbf{v}, \quad \psi = \psi^n + \delta \psi \quad (3)$$

该七维截断只适用于短时、近似水平的地面车辆, 不能替代十五维惯性导航误差模型[6] [7]。误差协方差 $\mathbf{P} = \mathbb{E}[\delta \mathbf{x} \delta \mathbf{x}^\top]$ 初值取:

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag}(3^2, 3^2, 5^2, 1^2, 1^2, 1^2, (10^\circ)^2) \quad (4)$$

单位为 m、m·s⁻¹ 与弧度, 数值为本文给定初值, 不是某一文献给出的标定结果。更新后将 $\delta \mathbf{x}$ 误差反馈(注入)到名义状态并置零[7], 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &\leftarrow \mathbf{p} + \delta \mathbf{p} \\ \mathbf{v} &\leftarrow \mathbf{v} + \delta \mathbf{v} \\ \psi &\leftarrow \text{wrap}(\psi + \delta \psi) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\text{wrap}(\cdot)$ 将角度折合到 $(-\pi, \pi]$ 。

2.3. IMU 机械编排与协方差传播

在 GNSS 被剔除且未启用 map-DR 的区间, IMU 以采样间隔 Δt_i 积分。平面航向由天向角速度推进, 比力按航向旋转到 ENU 并扣除重力, 属于 Groves 所述捷联机械编排在水平地面车辆上的二维截断[6]:

$$\psi \leftarrow \psi + \omega_z^b \Delta t_i \quad (6)$$

载体坐标系比力在水平面内按航向旋转到 ENU, 天向扣除重力加速度 $g = 9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

$$\mathbf{a}^n = \begin{bmatrix} \cos \psi a_x^b - \sin \psi a_y^b \\ \sin \psi a_x^b + \cos \psi a_y^b \\ a_z^b - g \end{bmatrix}. \quad (7)$$

速度与位置取:

$$\mathbf{v} \leftarrow \mathbf{v} + \mathbf{a}^n \Delta t_i, \quad \mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \mathbf{v} \Delta t_i + \frac{1}{2} \mathbf{a}^n \Delta t_i^2 \quad (8)$$

更新, 并对平面速度施加 $|\mathbf{v}_{xy}| \leq v_{\max}$ 、 $|v_U| \leq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的截断, $v_{\max} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。式中位置更新使用了积分后的速度, 属于该文件中的短时离散化, 而非 Groves 教材中的严格二阶中点积分, 故不将式(8)写成标准 INS 机械编排的等价式。

记 $c = \cos \psi$ 、 $s = \sin \psi$ 。实验采用的离散状态转移矩阵写为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \Delta t_i \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{f}_a \Delta t_i \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_a = \begin{bmatrix} -c a_x^b + s a_y^b \\ -s a_x^b - c a_y^b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

一阶误差传播取 $\delta \mathbf{p}_{k+1} = \delta \mathbf{p}_k + \delta \mathbf{v}_k \Delta t_i$, 加速度误差仅通过航向进入平面速度。若对式(7)的东北向加速度关于航向求解析偏导, 则 $\partial a_E / \partial \psi = -s a_x^b - c a_y^b$ 、 $\partial a_N / \partial \psi = c a_x^b - s a_y^b$ 。式(9)中的 $\mathbf{f}_a$ 与该解析结果不逐项相同, 属于七维截断代码中的一阶工程近似; 全文数值均由该实现矩阵产生, 不以解析偏导替换, 也不能引用为 Solà 十五维误差运动学的原文公式[7]。过程噪声按 IMU 离散白噪声近似[6]:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(0, 0, 0, \sigma_a^2, \sigma_a^2, \sigma_a^2, \sigma_\psi^2) \Delta t_i \quad (10)$$

其中, $\sigma_a = 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, σ_ψ 在代码中取 0.5° 并换算为弧度, 为给定值而非标定结果。协方差预测为:

$$\mathbf{P} \leftarrow \mathbf{F} \mathbf{P} \mathbf{F}^\top + \mathbf{Q} \quad (11)$$

随后作对称化 $\mathbf{P} \leftarrow (\mathbf{P} + \mathbf{P}^\top) / 2$ 。理想化参考实验与实际地图实验在折线推进区间均不调用上述 IMU 积分, 以免折线几何与惯性积分双重驱动名义位置。

2.4. GNSS 平面量测更新

当 FixValid 为真且检测未剔除该历元时, 取平面位置量测 $\mathbf{z}_{k,xy}$ 。松组合 GNSS 位置更新的量测方程与卡尔曼增益形式见 Groves [6], 本文按下式更新:

$$\mathbf{z}_{k,xy} = \mathbf{p}_{xy} + \boldsymbol{\eta}_k, \quad \boldsymbol{\eta}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_G), \quad \mathbf{R}_G = \sigma_G^2 \mathbf{I}_2 \quad (12)$$

$\sigma_G = 2 \text{ m}$ 为代码给定值, 不是接收机标定方差。量测矩阵 $\mathbf{H}_G = [\mathbf{I}_2, \mathbf{0}_{2 \times 5}]$ 。新息、新息协方差与卡尔曼增益为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{z}_{k,xy} - \mathbf{p}_{xy}, \quad \mathbf{S} = \mathbf{H}_G \mathbf{P} \mathbf{H}_G^\top + \mathbf{R}_G, \quad \mathbf{K} = \mathbf{P} \mathbf{H}_G^\top \mathbf{S}^{-1} \quad (13)$$

误差状态估计 $\delta \mathbf{x} = \mathbf{K} \mathbf{y}$ 按式(5)误差反馈(注入), 协方差采用简化 Joseph 协方差更新(Joseph form) [6]:

$$\mathbf{P} \leftarrow (\mathbf{I}_7 - \mathbf{K} \mathbf{H}_G) \mathbf{P} \quad (14)$$

在检测连续计数为零, 或平面步进 $d_k \geq 2 \text{ m}$, 或序列起始若干历元, 将 $\mathbf{p}_{xy}$ 输出强制复位为 $\mathbf{z}_{k,xy}$, 该复位是为抑制开阔段误差累积而设的工程步骤, 不是标准 ESKF 量测更新的必要部分。若 $s_k > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则用 s_k 与当前航向重建平面速度; 若 GNSS 差分速度模长大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则用其方位角刷新 ψ 。复位后把名义位置投影到当前道路折线, 以同步 map-DR 的弧长状态。

2.5. 非完整约束与零速更新

地面车辆在无侧滑假设下, 载体坐标系横向速度近似为零, 该伪量测由 Dissanayake 等引入低成本捷联 IMU 辅助, 并在近五年 GNSS/INS 车载融合中继续使用。由航向构造横向单位向量 $\mathbf{n} = [-\sin \psi, \cos \psi]^\top$, 横向速度标量为:

$$v_\perp = \mathbf{n}^\top \mathbf{v}_{xy} = -s v_E + c v_N \quad (15)$$

量测取 $z_{\text{NHC}} = 0$, 残差为 $-v_\perp$ 。实验采用的量测矩阵取:

$$\mathbf{H}_{\text{NHC}} = [0, 0, 0, -s, c, 0, -s v_E - c v_N] \quad (16)$$

若对式(15)求解析偏导, 则 $\partial v_\perp / \partial v_E = -s$ 、 $\partial v_\perp / \partial v_N = c$ 、 $\partial v_\perp / \partial \psi = -c v_E - s v_N$ 。式(16)的速度列与解析结果一致, 航向列取 $-s v_E - c v_N$ 而非 $-c v_E - s v_N$, 属于平面简化下的一阶工程近似; 全文 NHC 更新均使用式(16), 不以 Dissanayake 原文雅可比替代。量测噪声 $\sigma_{\text{NHC}} = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。仅当 $\|\mathbf{v}_{xy}\| > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时施加 NHC, 以免停车时航向不可观导致协方差异常收缩。该约束使用滤波估计航向, 而非 OSM 折线切向, 从而与第一篇以 OSM 道路切向代替车体航向的横向约束相区别[5]。

当 $\|\mathbf{v}_{xy}\| < 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且启用 ZUPT 时, 将三维速度作为零量测。Yoder 与 Humphreys 将 ZUPT 表述为停车时的强零速伪量测[3], 本文按下式更新:

$$\mathbf{z}_{\text{ZUPT}} = \mathbf{0}_3 = \mathbf{v} + \boldsymbol{\eta}_Z, \quad \mathbf{H}_Z = [\mathbf{0}_3, \mathbf{I}_3, \mathbf{0}_{3 \times 1}], \quad \mathbf{R}_Z = \sigma_Z^2 \mathbf{I}_3 \quad (17)$$

$\sigma_Z = 0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为代码给定值。残差 $\mathbf{y} = -\mathbf{v}$, 增益与误差反馈形式与 GNSS 更新相同。ZUPT 在检测模块中同时作为例外: 一旦判定静止, 该历元不进入伪有效定位解候选, 以免把停车误判为坐标冻结。

2.6. 伪有效定位解检测与剔除

记 GNSS 平面步进、滤波-GNSS 平面偏差与 OSM 横向偏差分别为:

$$d_k = \|\mathbf{z}_{k,xy} - \mathbf{z}_{k-1,xy}\|_2, \quad \delta_k = \|\mathbf{p}_{xy} - \mathbf{z}_{k,xy}\|_2, \quad d_k^{\text{lat}} = \text{dist}_\perp(\mathbf{z}_{k,xy}, \mathcal{M}) \quad (18)$$

其中, $\mathcal{M}$ 为当前道路折线, $\text{dist}_\perp$ 为点到折线的横向距离。检测、评定与机械编排共用同一组时间与长度单位, 阈值不再各自另设。采样间隔取接收机标称频率的倒数 $\Delta t = 1/10 = 0.1 \text{ s}$ 。偏差阈值 $d_{\text{lat}} = 30 \text{ m}$ 与 GNSS 可用段/异常段掩码为同一物理量, 不是第二条完好性保护级[5]。停车与运动的分界取 ZUPT 的 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与速度候选的 $s_{\text{min}} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 后者严格高于前者, 避免把停车同时送进 ZUPT 与冻结候选。确认窗取 $T_c = N_c \Delta t$, $N_c = 3$, 即 0.3 s 。冻结步进的运动学定义是观测位移远小于速度所暗示的位移:

$$d_{\text{step}}^{(\text{kin})} = \kappa v_{\text{ref}} \Delta t \quad (19)$$

取参考车速 $v_{\text{ref}} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、比例 $\kappa = 0.5$, 得 $d_{\text{step}}^{(\text{kin})} = 0.5 \text{ m}$ 。实现取 $d_{\text{step}} = 2 \text{ m}$, 等价于步进速度 $d_{\text{step}} / \Delta t = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 宽于式(19)的冻结定义: 城市行驶时 d_k 经常小于 2 m , 冻结条件几乎常真, 真正起开作用的只剩下 $\delta_k > d_{\text{lat}}$ 。该实现与运动学定义的差距是误报的来源, 正文主数字对应实现值, 不以式(19)

冒充已跑实验。偏差发散条件为 $\delta_k > d_{\text{lat}}$ 。速度候选、新息候选与地图候选分别定义为：

$$\begin{cases} C_k^{\text{vel}} = \mathbf{1}[d_k < d_{\text{step}}] \mathbf{1}[s_k > s_{\text{min}}] \mathbf{1}[\delta_k > d_{\text{lat}}] \\ C_k^{\text{inn}} = \mathbf{1}[d_k < d_{\text{step}}] \mathbf{1}[v_k > \gamma_{\text{tun}}] \mathbf{1}[\delta_k > d_{\text{lat}}] \\ C_k^{\text{map}} = \mathbf{1}[d_k < d_{\text{step}}] \mathbf{1}[d_k^{\text{lat}} > d_{\text{lat}}] \mathbf{1}[v_k > \gamma_{\text{inn}}] \mathbf{1}[\delta_k > d_{\text{lat}}] \end{cases} \quad (20)$$

其中, $s_{\text{min}} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\gamma_{\text{tun}} = 50 \text{ m}$, $\gamma_{\text{inn}} = 12 \text{ m}$, $\mathbf{1}[\cdot]$ 为示性函数, 均为本文给定值。综合候选 $C_k = C_k^{\text{vel}} \vee C_k^{\text{inn}} \vee C_k^{\text{map}}$ 。连续确认计数取：

$$n_k = \begin{cases} n_{k-1} + 1, & C_k = 1 \\ 0, & C_k = 0 \end{cases} \quad (21)$$

当 $n_k \geq N_c$ 时判定为伪有效定位解并剔除 GNSS 更新。 C_k^{vel} 刻画“接收机报告车辆在运动、但水平解几乎不变”的运动学矛盾； C_k^{inn} 在速度缺失时仍能捕捉预测 - 量测分离, 其新息阈值思想与组合导航中的残差检验同类, 但阈值并非该文献的卡方阈值； C_k^{map} 把 OSM 横向偏差作为附加证据而非单独充分条件。在 $d_{\text{step}} = 2 \text{ m}$ 的实现下, 三条候选共享过宽的冻结开关, 召回率可以被抬高, 误报率也会同时升高。检测关闭时, 滤波对所有 FixValid 为真的历元执行 GNSS 更新, 性能退化为对 GNSS 单点定位的跟踪。该模块只用于本文闭环调度, 不把它表述为可用的接收机自主完好性监测。

2.7. 双路径地图约束航位推算

剔除 GNSS 且启用 map-DR 时, 取推进速度模长。将名义位置投影到道路折线并沿切向前进, 属于地图匹配中的几何约束操作, OSM 几何来自开放街道地图[9] [10], 参考中心线几何来自 IE 真值降采样而非 OSM。推进步长取：

$$v_k = \min\left(\max\left(\|v_k^{\text{pred}}\|, 2.5\right), v_{\text{max}}\right), \quad \Delta s_k = v_k \Delta t_k \quad (22)$$

下限 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与上限 $v_{\text{max}} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 同属 eskf 过程约束：上限与协方差传播中的速度截断一致, 下限用于隧道内速度估计崩溃时仍能沿折线前进。二者都不是真值速度。长时间 GNSS 异常下, Δs_k 相对真值弧长的系统偏差会随行驶距离累积, 这是异常段千米级 RMSE 的直接机制, 与检测是否已经给出剔除标志不是同一件事。

将名义位置投影到折线 $\mathcal{M}$ 得到弧长参数 (i_k, α_k) , 其中 i_k 为段索引, $\alpha_k \in [0, 1]$ 为段内比例, 然后沿切向前进 Δs_k 得到投影点 $\mathbf{p}_k^{\mathcal{M}}$ 与切角 $\psi_k^{\mathcal{M}}$ 。名义状态设置为：

$$\mathbf{p}_{xy} \leftarrow \mathbf{p}_k^{\mathcal{M}}, \quad \mathbf{v}_{xy} \leftarrow v_k \begin{bmatrix} \cos \psi_k^{\mathcal{M}} \\ \sin \psi_k^{\mathcal{M}} \end{bmatrix}, \quad \psi \leftarrow \psi_k^{\mathcal{M}} \quad (23)$$

并叠加过程噪声 $\text{diag}(0.12^2, 0.12^2, 0.06^2, 0.05^2, 0.05^2, 0.03^2, (1^\circ)^2)$ 。参考中心线路径的 $\mathcal{M}$ 为 IE 真值降采样折线, 投影采用真值折线最近段；OSM 路径的 $\mathcal{M}$ 为开放道路折线。两条路径的检测、ESKF 更新与速度源相同, 仅 $\mathcal{M}$ 不同。

OSM 路径另设强约束条件：仅当 $v_k > \gamma_{\text{tun}}$ 或 GNSS 点相对 OSM 的横向偏差大于 d_{lat} 时才执行式(23), 否则：

$$\mathbf{p}_{xy} \leftarrow \mathbf{p}_{xy} + \mathbf{v}_k^{\text{pred}} \Delta t_k \quad (24)$$

该条件用于抑制开阔段因 OSM 几何偏差引起的误切换。异常段专用变体进一步要求强异常在连续历元上维持后才允许 OSM 折线推进, 并在步进恢复正常达到设定历元后退出折线约束。参考中心线路径

不使用上述 OSM 强约束，以免把地图几何误差混入理想化参考评定。

2.8. 分段精度评定与对照方法

评定轨迹与 IE 真值在真值时刻对齐，平面误差 $e_k = \|\mathbf{p}_{k,xy} - \mathbf{p}_{k,xy}^{\text{gt}}\|_2$ 。均方根误差为标准统计量：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2} \quad (25)$$

全轨迹、可用段与异常段分别计算 RMSE。对照方法与待评方法使用同一序列、同一掩码与同一真值时刻对齐，不按方法各自重划异常区间。对照包括 GNSS 单点定位、IMM-AF + Map 对照基线(滤波结构取交互式多模型自适应融合[5]并叠加地图约束)、理想化参考实验 ESKF + Oracle map-DR、实际地图实验 ESKF + OSM map-DR，以及不进入融合的 Septentrio RTK 参考精度。消融关闭 map-DR、关闭速度检测，并比较 OSM 强约束开闭与异常段专用 map-DR。异常检测另作独立评定：以该 30 m 掩码为真值正例，以检测器输出的剔除标志为预测正例，统计准确率、精确率、召回率、F1 值(F1-Score)、误报率(False Positive Rate)与漏检率(False Negative Rate)；对每个连续异常段，将段起始至首次检出的时间记为检测延迟，未检出的段不计入平均延迟而计入漏检。参数敏感性在城区序列上对确认历元数、偏差阈值、冻结步进阈值与速度阈值作单因素扫描，其余参数保持第 3 节给定值。

3. 实验设置

实验使用 SensNav 已下载的两条序列[4]，见表 1。序列 2025-01-15-17-01-24 为城区加隧道，轨迹长度 18.62 km，其中隧道约 5.2 km，构成主实验。序列 2025-01-17-15-54-34 为校园开阔对照，轨迹长度 3.87 km。GNSS 采用 u-blox ZED-F9P，标称 10 Hz；IMU 采用 Xsens MTi 680，按 100 Hz 重采样进入机械编排；速度辅助检测读取 u-blox 导出的平面速度；真值为 IE 后处理 10 Hz 轨迹；RTK 参考为同平台 Septentrio，评定前按固定阈值清洗粗差。OSM 折线取自开放街道地图道路几何[9][10]。实现在 MATLAB R2024b 下完成，滤波与检测不调用 GINav [11]。检测与滤波参数与第 3 节给出的数值一致，两条序列共用同一组参数，不按场景单独调参。城市开阔与遮挡下的 GNSS 观测质量差异亦见 Zhang 等对城区跟踪环路的讨论[12]。

Table 1. SensNav experimental sequences and sensors

表 1. SensNav 实验序列与传感器

序列	场景	长度/km	用途
2025-01-15-17-01-24	城区加隧道(隧道约 5.2 km)	18.62	主实验
2025-01-17-15-54-34	校园开阔	3.87	对照

4. 实验结果与数据分析

4.1. 城区 - 隧道序列

城区 - 隧道序列的平面 RMSE 如表 2 所示。GNSS 单点定位全轨迹为 813.30 m，可用段为 7.60 m，异常段为 2398.40 m，说明全轨迹误差由隧道内坐标冻结型异常解主导。IMM-AF + Map 全轨迹为 615.31 m，可用段为 24.28 m，异常段为 1813.35 m。ESKF + Oracle map-DR 全轨迹为 689.12 m，相对 GNSS 单点定位降低 $(813.30 - 689.12)/813.30 = 15.3\%$ ；可用段为 15.64 m，低于 IMM-AF + Map 的 24.28 m；异常

段为 2031.79 m，高于 IMM-AF + Map 的 1813.35 m。RTK 参考在可用段为 0.34 m，异常段因隧道内差分失效不参与该段评定。

Table 2. Planar RMSE (m) for urban-tunnel sequence

表 2. 城区 - 隧道序列平面 RMSE (m)

方法	全轨迹	GNSS 可用段	GNSS 异常段
GNSS 单点定位	813.30	7.60	2398.40
IMM-AF + Map (对照)	615.31	24.28	1813.35
ESKF + Oracle map-DR (主要报告)	689.12	15.64	2031.79
ESKF + OSM map-DR (对比)	1158.51	843.79	2488.51
RTK 参考	0.34	0.34	—

ESKF + Oracle map-DR 与 IMM-AF + Map 使用同一城区序列、同一 30 m 异常掩码与同一 IE 真值时刻对齐，因此三段 RMSE 应一并读取。可用段 15.64 m 低于 IMM-AF + Map 的 24.28 m，与估计航向 NHC 以及 $n_k=0$ 时对名义位置的输出强制复位有关，该段更接近 GNSS 单点定位的 7.60 m。异常段 2031.79 m 高于 IMM-AF + Map 的 1813.35 m，全轨迹 689.12 m 高于 615.31 m。2031.79 m：它主要来自已剔除后的沿程积分，是长时间异常下的局限，不是异常段可交付精度。据此不能用单一全轨迹 RMSE 判断方法优劣：本文方法在 GNSS 可用时跟踪更接近单点观测，在千米级隧道沿程 map-DR 上尚未达到 IMM-AF + Map 对照实现。ESKF + OSM map-DR 全轨迹为 1158.51 m，可用段为 843.79 m，异常段为 2488.51 m，属于实际地图实验，不得与理想化参考结果合并解读。图 1 给出 GNSS 单点定位、IMM-AF + Map、ESKF + Oracle 与 ESKF + OSM 的误差时序。

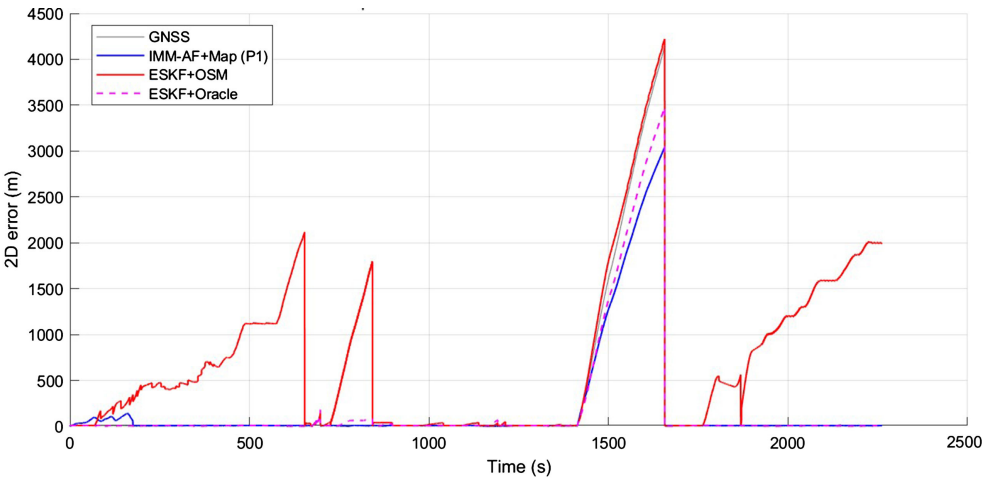


Figure 1. Time series of urban area-tunnel sequence positioning error

图 1. 城区 - 隧道序列定位误差时序

4.2. 校园开阔序列

校园开阔序列全轨迹平面 RMSE 如表 3 所示。该序列按 30 m 掩码不形成 GNSS 异常段。GNSS 单点定位为 13.87 m，IMM-AF + Map 为 13.79 m，ESKF + Oracle map-DR 为 14.32 m。ESKF + OSM map-DR 为 1057.34 m。校园 GNSS 相对 OSM 的平均横向偏差仅为 7.78 m，大于 30 m 的历元只占 1.50%。检测器

误报率为 97.2%，map-DR 在 95.3%的可用历元上开启，误剔除历元 RMSE 为 1072.03 m。该千米级误差是误报打开 map-DR 之后的沿程积分，不是 GNSS 单点不可用，也不能写成 OSM 融合已经改善定位。该路径只作为实际地图实验，用于暴露这一失效，不作为工程指标。

Table 3. RMSE (m) for the open-campus sequence layout
表 3. 校园开阔序列平面 RMSE (m)

方法	全轨迹
GNSS 单点定位	13.87
IMM-AF + Map (对照)	13.79
ESKF + Oracle map-DR (主要报告)	14.32
ESKF + OSM map-DR (对比)	1057.34

4.3. 消融实验

城区 - 隧道序列上拆开检测、map-DR 与 OSM 约束如表 4 所示。关闭速度检测后，ESKF + Oracle 全轨迹为 813.30 m，可用段为 7.60 m，异常段为 2398.40 m，与 GNSS 单点定位逐项相同，说明没有剔除逻辑时滤波对冻结解的跟踪等价于直接输出 u-blox。关闭 map-DR 而保留检测时，异常段为 765.56 m，低于参考中心线 map-DR 的 2031.79 m，但可用段升至 1936.64 m、全轨迹升至 1840.30 m。其原因是开阔段一旦误剔除 GNSS，名义状态只能沿预测速度与 IMU 积分漂移，误差在恢复 GNSS 之前持续增长；map-DR 虽然在隧道内引入折线几何误差，却避免了开阔段无约束漂移主导全轨迹 RMSE。OSM 不加强约束时全轨迹为 1260.52 m，可用段为 1122.22 m；加强约束后为 1158.51 m 与 843.79 m。异常段专用 map-DR 全轨迹为 1102.23 m，可用段为 914.65 m，异常段为 2031.48 m，全轨迹低于 OSM 强约束配置，可用段仍高于 800 m。校园序列上，无 map-DR 分支为 5596.52 m，OSM 各变体仍在 1029 m 至 1057 m，异常段专用策略未能消除开阔场景误检。

Table 4. RMSE (m) for urban-tunnel sequence ablation plane
表 4. 城区 - 隧道序列消融平面 RMSE (m)

配置	全轨迹	GNSS 可用段	GNSS 异常段
ESKF + Oracle map-DR (主要报告)	689.12	15.64	2031.79
ESKF 无 map-DR	1840.30	1936.64	765.56
ESKF + Oracle 无速度检测	813.30	7.60	2398.40
ESKF + OSM (强约束)	1158.51	843.79	2488.51
ESKF + OSM (无强约束)	1260.52	1122.22	2031.13
ESKF + OSM (异常段专用 map-DR)	1102.23	914.65	2031.48

4.4. 异常检测器独立评价

以 30 m 掩码为真值、以剔除标志为预测如表 5 所示，与定位 RMSE 分开统计。城区序列共 22,620 个 GNSS 历元，其中异常正例 2601 个，形成 2 个连续异常段。ESKF + Oracle 路径上召回率为 94.7%，漏检率为 5.3%，平均检测延迟为 0.10 s；精确率仅为 15.5%，误报率为 67.1%，F1 值为 0.266，准确率为 40.0%。接到 OSM 后召回率不变，误报率升至 85.2%。校园序列无异常正例，误报率为 94.3% (Oracle)与

97.2% (OSM)。召回率高只说明隧道内坐标冻结大多被抓住，不能据此把检测器写成已经可用：在误报率超过 60%时，剔除标志会把大量 GNSS 可用历元送进 map-DR，这是后续误差放大的开关。精确率、F1 与误报率应优先于召回率阅读；该检测输出不能当作完好性监测结果引用。

Table 5. Independent evaluation of the anomaly detector (True value: u-blox relative IE plane error greater than 30 m)
表 5. 异常检测器独立评价(真值: u-blox 相对 IE 平面误差大于 30 m)

序列	方法	准确率	精确率	召回率	F1	误报率	漏检率	延迟(s)
城区 - 隧道	ESKF + Oracle map-DR	0.400	0.155	0.947	0.266	0.671	0.053	0.10
城区 - 隧道	ESKF + OSM map-DR	0.240	0.126	0.947	0.223	0.852	0.053	0.10
校园开阔	ESKF + Oracle map-DR	0.057	—	—	—	0.943	—	—
校园开阔	ESKF + OSM map-DR	0.028	—	—	—	0.972	—	—

4.5. 异常段误差形成机制

按检测输出与 30 m 掩码把城区轨迹拆成互斥阶段如表 6 所示。ESKF + Oracle 在 GNSS 可用且未剔除的 6594 个历元上 RMSE 为 7.64 m，与单点定位可用段 7.60 m 接近；在可用但被误剔除的 13,425 个历元上为 18.34 m，因为参考中心线仍接近真值，误报并未把误差放到百米以上。漏检仅 139 个历元，RMSE 为 242.95 m。异常且执行 map-DR 的 2462 个历元 RMSE 为 2087.56 m，最大误差 3476.59 m，该阶段覆盖了异常段样本的 94.7%，直接决定了表 2 中 2031.79 m 的异常段 RMSE。该数字对应检测已经给出剔除标志之后的沿程积分，不是检测尚未工作，也不能当作异常段可交付精度。它应读作长时间 GNSS 异常下 map-DR 的局限，而不是异常段可以交付的定位精度。速度被截断在 $2.5\sim15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，折线分辨率在隧道进出口有限，七维模型不含零偏，沿程位置一旦与真值弧长错位，误差随行驶距离累积。对 2031.79 m 异常段误差进一步分析可知，其主要来源并非单一初始状态误差，而是长时间 map-DR 过程中多种误差的累积效应。初始位置误差主要影响进入折线约束时的局部投影位置，通常表现为异常段起始处的误差偏置；初始航向误差则会进一步影响速度方向，使沿程误差随行驶距离增长。由于本文七维误差状态未显式估计 IMU 零偏，零偏及其引起的速度、航向漂移无法在滤波过程中被单独校正，是长时间惯性传播误差的重要来源。此外，map-DR 采用截断后的速度进行折线推进，速度估计误差会直接转化为沿程距离误差。因此，2031.79 m 更适合解释为“初始状态误差 + 未建模惯性误差 + 速度积分误差”共同作用下的沿程累积结果，而现有实验尚未对三者进行独立量化分解，这也是后续需要进一步完善的部分。OSM 路径上，可用但误剔除历元的 RMSE 已达 913.95 m，异常 map-DR 历元为 2614.56 m，说明错误道路几何会把误报从十米量级放大到千米量级。

Table 6. Stage-wise planimetric error for urban area-tunnel sequences
表 6. 城区 - 隧道序列分阶段平面误差

阶段	ESKF + Oracle 样本数	ESKF + OracleRMSE (m)	ESKF + OSM 样本数	ESKF + OSMRMSE (m)
GNSS 可用且未剔除	6594	7.64	2960	7.91
GNSS 可用但误剔除	13425	18.34	17059	913.95
GNSS 异常且漏检	139	242.95	139	242.94
GNSS 异常且 map-DR	2462	2087.56	2355	2614.56
GNSS 异常且无折线约束	0	—	107	60.08

4.6. 地图约束误检与错误匹配

map-DR 的失效条件可以由校园序列与城区可用段同时给出。校园 GNSS 单点 RMSE 为 13.87 m, 相对 OSM 的平均横向偏差为 7.78 m, 大于 30 m 的比例为 1.50%, 但 map-DR 仍在 95.3% 的可用历元上开启, 估计误差均值在 map-DR 开启时为 937.20 m。城区可用段中 map-DR 开启比例为 59.3%, OSM 融合可用段 RMSE 为 843.79 m, 而 GNSS 单点可用段为 7.60 m。机制是同一条链: 过宽的冻结步进抬高误报, 误报打开折线推进, 错误或错层连通的路段使弧长错位后沿程积分不可逆。理想化参考实验用 IE 中心线掩盖误报, 实际地图实验把它放大到千米级。OSM 数字只用于暴露该链, 不能作为在线部署或工程应用指标。

对 913.95 m 的可用但误剔除误差进一步分析, 其主要原因并非 GNSS 本身失效, 而是误报触发后的地图匹配错误。具体而言, 当检测器将正常 GNSS 历元误判为坐标冻结后, 系统停止采用 GNSS 位置更新, 并将当前位置投影至 OSM 道路折线; 若当前位置附近存在道路几何偏差、平行道路或道路连接关系不一致, 最近折线投影可能发生错误切换, 使车辆被吸附到与真实行驶道路不一致的路段。此后 map-DR 按照错误路段的弧长方向持续推进, 局部匹配误差会进一步转化为沿程位置误差, 从而形成 913.95 m 的千米级误差。因此, 该误差主要体现为“误报触发 + 错误道路匹配 + 沿程积分放大”的级联失效, 而不是单纯的 OSM 几何误差。

4.7. 关键参数敏感性

在城区理想化参考路径上对 N_c 、 d_{lat} 、 d_{step} 与 s_{min} 作单因素扫描如表 7 所示, 用以核对 3.6 节的参数逻辑, 而不是挑选主表最优值。 N_c 、 d_{lat} 与 s_{min} 在扫描范围内对全轨迹 RMSE 的改变不超过 1 m, 异常段 RMSE 几乎不动。 d_{step} 对误报率最敏感: 实现值 2 m 对应 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 宽于式(19)的 0.5 m; 改为更接近运动学定义的 1 m 时, 误报率由 0.671 降到 0.289, 可用段 RMSE 由 15.64 m 降到 7.15 m, F1 由 0.266 升到 0.448, 异常段仍为 2031.79 m。改为 3 m 时误报率升至 0.716, 可用段升至 39.32 m。主表保持实现值 2 m, 不把扫描中的 1 m 回写为主结论, 以避免按本轨迹调参。2031.79 m 对上述四类阈值都不敏感, 说明它不随检测器“是否更准”而消失, 只随长时间折线积分存在。收紧 d_{step} 可以减轻误报, 但不能消除异常段千米级沿程误差, 后者仍是未解决的方法局限。

Table 7. Single-factor sensitivity analysis for the urban area ESKF + Oracle map-DR system

表 7. 城区 ESKF + Oracle map-DR 单因素敏感性

参数	取值	全轨迹 RMSE (m)	可用段 RMSE (m)	异常段 RMSE (m)	F1	误报率
N_c	1	688.48	15.13	2029.95	0.267	0.676
N_c	3 (默认)	689.12	15.64	2031.79	0.266	0.671
N_c	5	689.73	16.21	2033.55	0.266	0.666
d_{lat} (m)	20	689.12	15.63	2031.79	0.263	0.683
d_{lat} (m)	30 (默认)	689.12	15.64	2031.79	0.266	0.671
d_{lat} (m)	50	689.12	15.67	2031.79	0.270	0.657
d_{step} (m)	1.0	688.99	7.15	2031.79	0.448	0.289
d_{step} (m)	2.0 (默认)	689.12	15.64	2031.79	0.266	0.671
d_{step} (m)	3.0	696.80	39.32	2052.01	0.260	0.716
s_{min} (m/s)	0.5	689.12	16.03	2031.79	0.261	0.690
s_{min} (m/s)	1.0 (默认)	689.12	15.64	2031.79	0.266	0.671
s_{min} (m/s)	2.0	689.11	15.57	2031.79	0.277	0.636

5. 讨论

当前最主要的科学问题不是滤波形式本身，而是检测器高召回、高误报，以及误报打开 map-DR 后的沿程积分。召回率 94.7% 只说明隧道冻结大多被抓住；误报率 67.1%、精确率 15.5%、F1 值 0.266 说明剔除标志在 GNSS 可用段不可单独使用。实现中 $d_{\text{step}} = 2 \text{ m}$ 宽于式(19)的运动学冻结，是误报的参数来源。误报在参考中心线上被压到 18.34 m，在 OSM 上放到 913.95 m 乃至校园开阔 1072.03 m，因此千米级误差可以在没有真正 GNSS 异常时出现。

2031.79 m 与上述误报链不是同一件事。该数字主要反映长时间 GNSS 异常条件下 map-DR 的沿程累积误差，其形成同时受到初始位置/航向误差、未建模 IMU 零偏以及速度估计误差影响。当前，实验能够确定其主要误差链条，但尚未通过独立消融实验对三类误差进行定量分解，因此后续应进一步开展误差源隔离实验。漏检仅 139 个历元，而 2462 个已剔除并执行 map-DR 的历元 RMSE 为 2087.56 m。该数字度量的是约 5.2 km 隧道内按 $2.5 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 截断速度沿折线积分的残余沿程误差，是长时间 GNSS 异常下 map-DR 的局限。表 7 中改动 d_{step} 能改变误报率，但不能把 2031.79 m 降下来，故不能把它读成“再把检测调准一些即可得到的异常段精度”，更不能读成工程可达指标。

相对 IMM-AF + Map，可用段 15.64 m 对 24.28 m、异常段 2031.79 m 对 1813.35 m、全轨迹 689.12 m 对 615.31 m，只说明接口改动在可用段更接近单点观测，在长时间沿程上尚未超过第一篇实现。两条轨迹、同一 30 m 掩码下的对照到此为止。OSM 路径与理想化参考路径均不能外推为车载在线定位。后续若继续工作，应先把 d_{step} 收到与 $\kappa v_{\text{ref}} \Delta t$ 一致，并单独处理长时间沿程速度，而不是叠加更多阈值去宣称可部署。

6. 结束语

本文在七维 ESKF 闭环中接入速度辅助检测与双路径 map-DR，用于观察坐标冻结型伪有效定位解被剔除之后名义状态如何传播。ESKF、NHC 与地图匹配本身不是新理论。检测阈值与采样间隔、30 m 分段掩码共用同一套量；实现中的冻结步进宽于运动学定义，造成高误报。在 SensNav 城区 - 隧道序列上，与 IMM-AF + Map 同一掩码时，ESKF + Oraclemap-DR 的可用段平面 RMSE 为 15.64 m，全轨迹为 689.12 m，异常段为 2031.79 m。2031.79 m 表示长时间拒止下折线沿程积分的局限，不是检测成功后的可用精度。检测器召回率为 94.7%，误报率为 67.1%，F1 值为 0.266，不能作为完好性结论。OSM 路径城区 1158.51 m、校园 1057.34 m 反映误报后的错误匹配。

基金项目

衢州市科技计划攻关项目(2024K171)。

参考文献

- [1] He, Y., Li, J. and Liu, J. (2023) Research on GNSS INS & GNSS/INS Integrated Navigation Method for Autonomous Vehicles: A Survey. *IEEE Access*, **11**, 79033-79055. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3299290>
- [2] Liu, J. and Guo, G. (2021) Vehicle Localization during GPS Outages with Extended Kalman Filter and Deep Learning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/tim.2021.3097401>
- [3] Yoder, J.E. and Humphreys, T.E. (2023) Low-Cost Inertial Aiding for Deep-Urban Tightly Coupled Multi-Antenna Precise GNSS. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, **70**, navi.561. <https://doi.org/10.33012/navi.561>
- [4] 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>
- [5] Wu, Z., Zhang, Y., Sun, J. and Yin, Z. (2016) A Filter Algorithm for GPS/INS Integrated Navigation System Based on

-
- IMM-AF. 2016 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, 10-15 July 2016, 838-841. <https://doi.org/10.1109/igarss.2016.7729212>
- [6] Groves, P.D. (2013) *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd Edition, Artech House.
- [7] Solà, J. (2017) Quaternion Kinematics for the Error-State Kalman Filter. arXiv:1711.02508.
- [8] Zhao, L., Chen, T., Yuan, P., Tang, Z. and Wang, J. (2023) A Novel Vehicle Localization Method Based on Adaptive Singular Spectrum Analysis Using Low-Cost INS/GNSS. *IEEE Access*, **11**, 88670-88685. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3305920>
- [9] Haklay, M. and Weber, P. (2008) OpenStreetMap: User-Generated Street Maps. *IEEE Pervasive Computing*, **7**, 12-18. <https://doi.org/10.1109/mprv.2008.80>
- [10] OpenStreetMap (2026) OpenStreetMap Contributors. <https://www.openstreetmap.org>
- [11] Chen, K., Chang, G. and Chen, C. (2021) Ginav: A MATLAB-Based Software for the Data Processing and Analysis of a GNSS/INS Integrated Navigation System. *GPS Solutions*, **25**, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01144-9>
- [12] Zhang, T., Shi, J., Lin, T., Feng, X. and Niu, X. (2023) GNSS Position-Aided Delay-Locked Loops for Accurate Urban Navigation. *GPS Solutions*, **27**, Article No. 127. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01452-2>