

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513962

城市峡谷环境下基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合导航方法*

刘均杰^{1,2}, 孟 骞^{1,2}, 姜颖颖^{1,2}, 翟亚慰³, 周睿阳⁴

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096; 2. 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室 南京 210096;
3. 真点科技(北京)有限公司 北京 100094; 4. 北京航天控制仪器研究所 北京 100830)

摘 要:针对 GNSS/INS 高精度组合导航模型在复杂城市峡谷环境下卫星信号容易受到遮挡、多路径效应和故障干扰的问题,提出了一种基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合方法,通过“异常检测-故障排除-多源增强”的分级处理机制提升系统精度和鲁棒性。首先,该方法在卫星 RTK 定位阶段,通过引入基于卡方检验的故障检测方法,实现对每个历元观测数据中故障的快速判别。若检测到故障,便执行解分离,精准定位故障卫星并进行故障隔离,从而提升卫星导航系统的可靠性。然而,由于门限检测方法原理的局限性,尽管宽松的门限设置有助于确保“大故障”被及时检测,但也可能引发虚警,导致部分“小故障”未能完全排除。为进一步提高组合导航系统的弹性和可靠性,采用 IGG-III 抗差估计方法,动态调整组合导航系统的观测权重,进一步增强系统对门限下“小故障”的抑制能力,提高复杂场景下导航系统的整体性能。实验结果表明,所提出的算法在东向定位误差降低了 34.29%,在北向误差上降低了 13.22%,尤其在东向定位误差上取得了 55.87% 的显著降低。整体性能评估结果表明,所提算法的三维定位性能相比传统方法提高了 46%,充分验证了该方法在复杂城市峡谷环境下的有效性与鲁棒性。

关键词: 弹性导航; GNSS/INS 紧组合; 解分离; 抗差估计

中图分类号: TH76 TN96 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Hierarchical resilient tightly coupled RTK/INS integrated navigation method for urban canyon environments

Liu Junjie^{1,2}, Meng Qian^{1,2}, Jiang Yingying^{1,2}, Zhai Yawei³, Zhou Ruiyang⁴

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Key Laboratory of Micro-inertial Instrument and Advanced Navigation Technology, Ministry of Education,
Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. TruePoint Technology Inc, Beijing 100094, China;
4. Beijing Aviation Control Equipment Research Institute, Beijing 100830, China)

Abstract: Because of the challenges faced by GNSS/INS high-precision integrated navigation models in complex urban canyon environments, which are prone to occlusion, multipath effects, and fault interference, this article proposes a hierarchical resilient tightly coupled RTK/INS integrated navigation method that ensures system accuracy and robustness by implementing a multi-stage framework of detection, fault exclusion and multi-source enhancement. Initially, during the satellite RTK positioning stage, the method achieves rapid fault identification in the observation data of each epoch by introducing a Chi-square test-based fault detection method. If a fault is detected, a solution separation method is applied to accurately identify and isolate the faulty satellite, thereby enhancing the reliability of the satellite navigation system. However, due to the inherent limitations of threshold detection methods, while a loose threshold setting helps ensure the timely detection of large faults, it may also trigger false alarms, leading to the incomplete exclusion of some small faults. To further improve the resilience and reliability of the integrated navigation system, this article employs the IGG-III robust estimation method. By dynamically adjusting the observation weights within the integrated navigation system, this approach effectively

收稿日期: 2025-04-23 Received Date: 2025-04-23

* 基金项目: 国家自然科学基金(62203111, 62388101)、航空科学基金(20220008069003)、江苏省自然科学基金(BK20231434)、江苏省科技厅创新能力建设计划(BM2023013-4)项目资助

enhances the system's capability to suppress small faults that fall below the threshold, thereby boosting its overall performance in complex environments. The experimental results indicate that the proposed algorithm reduces the eastward positioning error by 34.29% and the northward error by 13.22%. Notably, it achieves a significant 55.87% reduction in the upward positioning error. The overall performance evaluation results show that the proposed algorithm improves 3D positioning performance by 46% compared to conventional methods, which strongly validates its effectiveness and robustness in urban canyon environments.

Keywords: resilient navigation; tightly coupled GNSS/INS integration; solution separation; robust estimation

0 引 言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)具备全天时、全天候提供三维定位与精确授时服务的能力,尤其是基于载波的实时动态差分(real-time kinematic, RTK)技术通过接收卫星信号并利用差分技术消除电离层和对流层延迟,能够实现厘米级的定位精度。但是在城市峡谷、高架隧道等复杂环境下,GNSS 容易受到信号遮挡、多路径效应和干扰的影响,定位的精度和完好性大大降低。为了解决这一问题,基于惯性导航系统(inertial navigation system, INS)与 GNSS 的组合导航系统成为了当前复杂环境下自主导航的主流解决方案^[1-2]。INS 凭借其自主导航能力,能够提供短时高精度的定位信息,不依赖外部信号,因此在 GNSS 信号干扰或丢失的情况下,能够提供连续稳定的定位支持。

鉴于 INS 系统误差随时间累计和缺乏绝对定位功能的局限性,提高和保证 GNSS 定位性能仍然是进一步提升导航系统整体精度和可靠性的研究重点,近年来主要的研究方向包括:以经典卡方检验为代表的故障检测方法能够有效识别卫星观测数据存在故障的历元,并对故障历元的 GNSS 数据进行剔除^[3]。与此同时,文献[4]在 GNSS 接收机自主完好性监测技术中提出了解分离(solution separation, SS)方法,该方法被认为是解决多故障场景中卫星数据异常的有效方法,通过比较卫星子集和全集的解算结果,能够有效识别并剔除故障卫星。然而,解分离方法的计算量较大,尤其是在 GNSS 多星座和无故故障场景下,故障子集的解算和故障解算的操作会增加不必要的计算负担;文献[5]提出了一种基于双频 GNSS 观测值的一体化卫星选择与模糊度固定策略,通过联合仰角、载噪比与双频差分相位一致性检测,有效剔除了受干扰卫星,提升了模糊度固定成功率,提高了定位精度;为了提高导航系统在城市峡谷等复杂环境中的定位精度和鲁棒性,文献[6]通过引入了载波信噪比辅助的自适应抗差滤波算法,有效抑制了多路径效应和非视距信号对系统性能的影响;文献[7]提出了一种基于广义小波矩的新算法,对惯性传感器的复杂随机误差进行建模,并集成到扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)中提高了动态环境下的导航定位精度;文献[8]提

出了一种基于新息检测的抗差估计方法,通过高斯检验对 GNSS 观测数据进行故障检测与排除(fault detection and exclusion, FDE),有效提升了 GNSS/INS 紧组合导航系统在复杂环境中的鲁棒性;文献[9]进一步提出了基于鲁棒马氏距离统计量的抗差估计方法,有效解决了异常观测值对导航系统的影响,提升了多源融合系统的鲁棒性;文献[10]提出了一种基于多条件决策模型的抗差自适应方案,用于 RTK/INS 紧组合系统,通过选择抗差估计和自适应滤波,优化了过滤性能,提升了复杂城市环境中的定位精度;文献[11]提出了一种基于随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)的故障检测和排除算法,用于单差 RTK/INS 紧组合过程,利用接收器间单差模型,通过检测和排除 GNSS 故障,并通过引入全局故障比例统计,提高复杂城市环境中的定位精度和可靠性;文献[12]提出了一种基于自适应滞后平滑器的 RTK/INS 紧组合定位算法,通过动态调整估计窗口的滞后长度,在卫星可见性变化较大的环境中有效提升了组合导航系统定位精度;文献[13]提出了一种结合因子图优化与机器学习的多传感器融合定位方法,通过引入伪距残差预测与动态因子建模策略,实现了在 GNSS 受限条件下的高精度鲁棒定位;文献[14]提出了一种引入动态观测权调整策略的抗差因子图优化算法,通过构建残差函数与观测权因子的自适应关系,有效提升了 GNSS/INS 组合系统在异常观测条件下的鲁棒性与定位精度。

综上所述,上述研究主要侧重 GNSS 质量控制或多源融合信息增强的某一方面开展研究,相关研究没有考虑在不同复杂应用场景下技术的局限性,例如卡方检验在应对城市峡谷等 GNSS 多故障场景时存在局限,难以准确定位故障源并同时处理多个故障的影响;解分离方法难以检测门限下故障异常值,并对无故障和故障卫星数量有严格要求;基于 M 估计的抗差方法在修复小偏差时表现优异,但在遇到大故障时,修复效果较为有限^[15]。

为进一步提高自主导航系统在复杂场景下的定位精度和可靠性,从 GNSS 信号处理流程出发,提出了一种基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合导航方法。首先在纯卫星 RTK 阶段,利用卡方检验方法对卫星观测数据进行全局故障检测,保证绝对定位的可靠性;系统一旦检测到故障,将切换到故障排除模式,通过解分离操作隔离异常卫星数据,获得可靠的卫星子集;然后,在定位域利用

多源信息进一步增强定位的可靠性,将卫星子集和 INS 的输出数据进行组合,确保在卫星丢失或中断时进行连续定位;最后,以 INS 数据为基准,采用 IGG-III (institute of geodesy & geophysics III) 形式的抗差估计方法对解分离残余故障进行检验和降权,从而输出高精度且可靠的定位结果。本文的主要研究内容为:

1) 以“异常检测-故障排除-多源增强”为 GNSS 信号最优处理策略,提出了一种基于三级策略的弹性 RTK/INS 紧组合导航方法,可以有效实现复杂场景下定位输出的高精度与高可信;

2) 三级弹性策略首先通过卡方检验进行全局故障检测,在此基础上采用解分离方法定位观测中的故障并进行隔离。最后,通过抗差估计动态调整组合导航观测数据的权重,进一步抑制门限下故障对系统的影响;

3) 利用城市峡谷环境的开源数据集对本文算法进行验证,实验结果充分证明了所提算法在复杂环境下的可靠性和有效性。

1 算法理论模型

1.1 RTK 模型

实时动态差分定位是一种高精度卫星导航定位技术,广泛应用于测量测绘、自动驾驶、智慧农业作业等领域。RTK 模型的核心原理是通过接收机实时接收卫星信号,结合地面参考站的差分修正信息,通过双差的方式消除信号传播过程中的电离层延迟和对流层延迟,从而实现厘米级定位精度。接收机 m 对卫星 i 的原始观测方程如式(1)^[16]所示。

$$\begin{cases} P_m^i = \rho_m^i + c(\delta t_{rm} - \delta t_{si}) + Vion_m^i - Vtrop_m^i - \\ \quad \lambda N_m^i + \varepsilon_m^i \\ \lambda \varphi_m^i = \rho_m^i + c(\delta t_{rm} - \delta t_{si}) + Vion_m^i - Vtrop_m^i - \\ \quad \lambda N_m^i + \gamma_m^i \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_m^i 表示接收机 m 的伪距观测值, φ_m^i 表示接收机 m 的载波相位观测值, ρ_m^i 表示接收机 m 与卫星 i 的几何距离, δt_r 和 δt_s 分别表示接收机钟差和卫星钟差, $Vion$ 和 $Vtrop$ 分别表示电离层延迟和对流层延迟, N 表示整周模糊度, ε 和 γ 表示观测噪声。

对接收机 m 与接收机 n 和卫星 i 与卫星 j 中进行式(1)的观测方程构建,并分别进行站间差分与星间差分,得到双差载波观测方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{m,n}^{i,j} = \Delta \rho_{m,n}^{i,j} + Vion_{m,n}^{i,j} - Vtrop_{m,n}^{i,j} + \varepsilon_{m,n}^{i,j} \\ \lambda \Delta \varphi_{m,n}^{i,j} = \Delta \rho_{m,n}^{i,j} + Vion_{m,n}^{i,j} - Vtrop_{m,n}^{i,j} - \\ \quad \lambda \Delta N_{m,n}^{i,j} + \gamma_{m,n}^{i,j} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Delta P_{m,n}^{i,j}$ 表示双差伪距观测值, $\Delta \varphi_{m,n}^{i,j}$ 表示双差

载波观测值, $\Delta \rho_{m,n}^{i,j}$ 表示双差几何距离, $Vion_{m,n}^{i,j}$ 和 $Vtrop_{m,n}^{i,j}$ 表示双差电离层延迟和对流层延迟, $\Delta N_{m,n}^{i,j}$ 表示双差模糊度, $\varepsilon_{m,n}^{i,j}$ 和 $\gamma_{m,n}^{i,j}$ 表示双差噪声。

对于短基线 RTK 时,接收机 m 与接收机 n 所接收卫星信号经过的对流层和电离层状态相似,因而在经过双差后的电离层和对流层延迟被减弱或消除,因而式(2)可以简化为式(3),即:

$$\begin{cases} \Delta P_{m,n}^{i,j} = \Delta \rho_{m,n}^{i,j} + \varepsilon_{m,n}^{i,j} \\ \lambda \Delta \varphi_{m,n}^{i,j} = \Delta \rho_{m,n}^{i,j} - \lambda \Delta N_{m,n}^{i,j} + \gamma_{m,n}^{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 RTK/INS 紧组合模型

在 RTK/INS 紧组合系统中,GNSS 提供基于卫星信号的原始信息,提供双差载波相位和双差伪距观测值;而 INS 通过加速度计和陀螺仪的数据,推算出位置、速度和姿态,进而提供双差几何距离信息。通过紧组合技术,卡尔曼滤波器将这两类信息在状态空间中进行结合,以实现更鲁棒的导航解算。RTK/INS 的紧组合状态参数如式(4)所示^[17]。

$$X = [\delta \varphi \quad \delta v \quad \delta p \quad b_g \quad b_a \quad \Delta N]^T \quad (4)$$

其中, $\delta \varphi$ 、 δv 和 δp 分别表示姿态误差向量、速度误差向量和位置误差向量, b_g 和 b_a 分别表示陀螺仪和加速度计三轴零偏误差, ΔN 表示双差模糊度向量。

$$\begin{cases} \dot{\delta \varphi} = -R_b^e \delta \omega_{ib}^b - (\omega_{ie}^e \times \delta \varphi) \\ \dot{\delta v} = R_b^e f^b \\ \dot{\delta p}_{eb}^e = \delta v_{eb}^e \\ \delta \dot{b}_g = -\frac{1}{\tau_{bg}} \delta b_g + w_g \\ \delta \dot{b}_a = -\frac{1}{\tau_{ba}} \delta b_a + w_a \\ \delta \dot{N} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, R_b^e 表示地心地固坐标系下的惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 姿态矩阵, $\delta \omega_{ib}^b$ 表示陀螺仪角速率测量值的误差向量, ω_{ie}^e 表示地球自转角速度矢量在 e 系下的投影, f^b 表示加速度计输出的比例测量值, τ_{bg} 和 τ_{ba} 分别表示一阶高斯-马尔科夫过程的时间量, w_g 和 w_a 分别表示陀螺仪和加速度计的白噪声。

2 多级弹性 RTK/INS 组合方法

2.1 GNSS 组合数据处理与异常检测

在纯 GNSS 阶段,通过卡方检验对卫星观测数据进行分析。如果卡方检验判定存在故障,则执行 GNSS 解分离;若无故障判定,则将该卫星子集接入 INS 融合组合算法中。

1) 卡方检验

为了验证观测数据中是否存在粗差,采用后验方差的卡方检验方法。假设模型为线性化的观测方程^[18],即:

$$L = \mathbf{A}\mathbf{X} + \xi \quad (6)$$

其中, L 表示观测值与线性化预测值的差, \mathbf{A} 表示观测矩阵, \mathbf{X} 表示包含定位参数和接收机钟差参数的未知量向量, ξ 表示观测误差。线性化观测方程的残差向量 \mathbf{v} 可以表示为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} - L \quad (7)$$

其中, $\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} L$ 为加权最小二乘解, \mathbf{W} 表示权重矩阵。后验方差^[19] 定义为:

$$\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{W} \mathbf{v}}{n - m} \quad (8)$$

其中, n 表示观测值数目, m 表示未知数数目, $(n - m)$ 表示自由度。通过卡方分布检验,设定显著性水平 α , 阈值为:

$$\sigma^2 = \frac{\chi_{1-\alpha, n-m}^2}{n - m} \quad (9)$$

提出假设:

$$\begin{cases} H_0: \sigma_0^2 \leq \sigma^2 \\ H_1: \sigma_0^2 > \sigma^2 \end{cases}$$

当假设 H_0 通过检验,表明观测子集无异常观测,则该子集可用于导航解算;若假设 H_1 成立时,判定观测子集存在显著异常,此时进行解分离对故障卫星进行隔离处理。

2) 解分离

解分离方法是一种基于子集观测数据的故障检测与剔除技术,旨在通过子集解算结果与全集解算结果之间的差异对观测数据的可靠性进行评估。

在全集卫星观测数据的基础上,构建最小二乘解算模型,得到初始解算结果 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 。随后,通过移除某一子集观测数据重新进行解算,得到子集解算结果 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 。通过全集解和子集解可以构建如式(10)所示^[20-21] SS 检验统计量,即:

$$\Delta_k = |\hat{\mathbf{X}}_k - \hat{\mathbf{X}}_0| \quad (10)$$

为了判断某一卫星子集存在异常观测数据,需要计算 SS 检验统计量所对应的检验门限值,即:

$$T_d = \sigma^k Q^{-1} \left(\frac{P_{FA}}{N} \right) \quad (11)$$

$$\sigma^{(k)2} = \sigma_k^2 - \sigma_0^2 \quad (12)$$

其中, Q^{-1} 表示逆标准正态分布函数, P_{FA} 表示误警该率, N 表示卫星子集数, σ_k^2 表示基于子集 k 的结果所对应的方差, σ_0^2 表示基于全集的结果所对应的方差。

若 $\Delta_k < T_d$, 则认为当前观测子集中无观测数据故障;若 $\Delta_k > T_d$ 时,则认为该观测子集中存在观测数据故障,

应将该子集对应的卫星观测数据剔除。逐步迭代该过程,直至所有子集 SS 统计量均满足对应的检验门限值时,保留此次迭代的卫星观测子集。

在完成上述步骤后,系统进入组合导航阶段。为提高组合导航系统的鲁棒性,采用抗差估计方法对系统进行优化。

2.2 抗差估计

在复杂卫星定位场景中,观测值中可能存在粗差,从而降低导航解算的精度和可靠性。为了解决这一问题,采用于 IGG-III 等价权函数进行抗差估计。

组合导航中,新息定义为观测值与预测值间的偏离程度^[22-24],即:

$$\Delta r_k = z_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} \quad (13)$$

其中, Δr_k 表示第 k 个历元的新息, z_k 表示观测值, \mathbf{H}_k 表示观测矩阵, $\hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}$ 表示预测的观测向量。

将新息进行标准化,即:

$$s_k = \frac{\Delta r_k}{\sigma_k} \quad (14)$$

其中, σ_k 表示观测噪声的标准差。

IGG-III 等价权函数为:

$$\alpha_k = \begin{cases} 1, & |s_k| \leq T_0 \\ \frac{T_0}{|s_k|} \left(\frac{T_1 - |s_k|}{T_1 - T_0} \right)^2, & T_0 < |s_k| < T_1 \\ 0, & |s_k| > T_1 \end{cases} \quad (15)$$

其中, T_0 和 T_1 为 IGG-III 等价权函数的抗差参数,通常情况下取 $T_0 = 1 \sim 3$, $T_1 = 4 \sim 6$ 。

定义增益矩阵为 \mathbf{K}_k , 等价权矩阵为 \mathbf{W}_k , 那么可以通过 \mathbf{W}_k 对 \mathbf{K}_k 进行相应调整^[25-26], 即:

$$\mathbf{W}_k^i = \frac{R_k^i}{\alpha_k} \quad (16)$$

其中, R_k^i 表示观测噪声中的第 i 个元素, \mathbf{W}_k^i 表示等价权矩阵中的第 i 个元素, 且 α_k 为非零元素, 则经过调整后的增益矩阵 $\hat{\mathbf{K}}_k$ 可以表示为:

$$\hat{\mathbf{K}}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{W}_k)^{-1} \quad (17)$$

其中, \mathbf{P}_k^- 为观测状态向量协方差矩阵。

2.3 信号弹性处理策略总结

基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合方法流程图如图 1 所示。首先通过卡方检验对卫星观测数据进行分析,以判断 GNSS 卫星观测数据是否存在粗差。如果未通过卡方检验,则进入解分离阶段。在解分离阶段,建立故障模型,并进行 SS 检验统计量和检验门限的计算,当对应子集的 SS 检验统计量小于检验门限时,则通过 SS 检验,得到合格的卫星子集;反之,移除此时最大 SS 检验统计量对应的卫星观测值,重复进行以上流程。然后,为

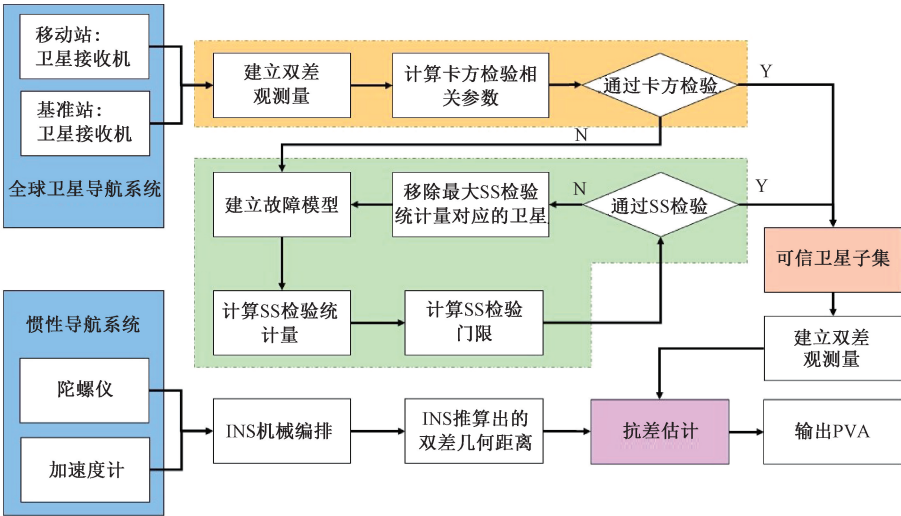


图 1 基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合方法流程

Fig. 1 Flowchart of hierarchical resilient tightly coupled RTK/INS integrated navigation

了进行对组合导航系统的优化,使用抗差估计对筛选后的卫星子集所提供的伪距和载波双差观测值与 INS 推导出的双差几何距离进行数据融合,提高系统的鲁棒性和稳定性。

3 实验验证

为验证本文算法在导航定位精度提升方面的效果,本章基于城市峡谷环境下车载数据进行测试。

3.1 开源数据集分析

实验数据采用武汉大学公开的 SmartPNT-POS 数据集集中的 Data 02 组数据^[27],该数据集具有丰富的场景覆盖,并采用 IE 8.90 软件以紧组合模式解算得到高精度的地面真值。所使用的采集设备 SmartPNT-mate 能够接收多星座 GNSS 卫星信号;Data02 组数据所采用的 IMU 为 ISA-100C,能够提供高精度的惯导信息,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 ISA-100C 技术参数

Table 1 ISA-100C technical parameters

误差项	陀螺仪	加速度计
	($x-, y-, z-$ 轴)	($x-, y-, z-$ 轴)
零偏	0.05 deg/hr	0.01 mg
随机噪声	0.005 deg/ $\sqrt{\text{hr}}$	0.02 m/s/ $\sqrt{\text{hr}}$

Data 02 数据集所涵盖的城市道路及复杂场景,包括明显的多路径效应区域,如街道树木覆盖区和卫星信号遮挡区,为算法在动态环境中的性能评估提供了典型的实际测试平台。

本文选取了数据中具有较好代表性的 800 个历元作为解算示例。截取的 800 个历元轨迹与环境如图 2 所示。图 2 中左下部分小图中展示出 4 种场景,分别为: 1)小图上部框线:空旷场景,代表开阔的、信号受遮挡较少的环境;2)小图左右框线:建筑半遮挡场景,代表存在建筑物的半遮挡环境,容易产生多路径效应和信号中断; 3)小图下部框线:树木半遮挡场景,茂密的树木对 GNSS 信号的衰减和散射,同样会影响信号质量和可用卫星数量。此外,图 2 右上角的小图补充展示了后续直行路段所处的场景;4)树木全遮挡场景。综上所述,本研究选取的数据段全面涵盖了城市道路中常见的多种典型场景,其中包括部分复杂环境,为本文算法的评估提供了基础。

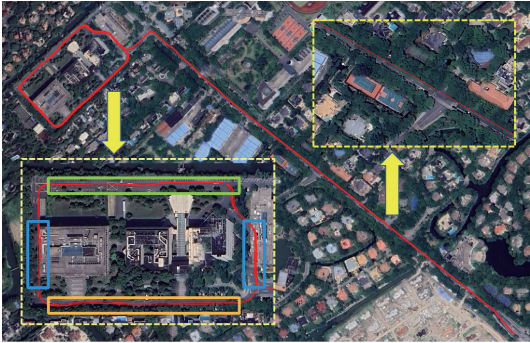


图 2 Data 02 中截取的 800 个历元轨迹

Fig. 2 Selected 800 epochs from Data 02

3.2 实验分析

本文算法采用 RTK/INS 紧组合模式进行解算,实验中所采用的卫星星座为北斗和 GPS。模糊度固定模式选择为 continuous 模式,固定门限值设定为 3.0,卫星高度截止角选取为 15°。

针对 RTK/INS 组合导航算法设计了 3 个实验场景。1) M1: 基于 EKF 的 RTK/INS 紧组合导航算法; 2) M2: 基于 GNSS 组合粗差探测的 EKF 的 RTK/INS 紧组合导航算法; 3) M3: 城市峡谷环境下基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合方法。

在 800 历元选取段内的卫星数量分布情况如图 3 所示。对卫星可见数分布图与实际轨迹运行图的联合分析表明, 在历元 70~250 和 410~520 的范围, 由于车辆正处于建筑半遮挡和树木半遮挡环境中, 卫星可见数呈现频繁波动。特别是在历元 610~800 的范围, 轨迹位于树木全遮挡场景, 卫星信号受到严重阻挡, 引发可见卫星数的显著波动。所选取的 800 个历元的卫星可见数的波动变化, 充分展现了实验环境的复杂性, 尤其体现在城市道路环境中常见的城市峡谷效应以及树木对卫星信号造成的遮挡。

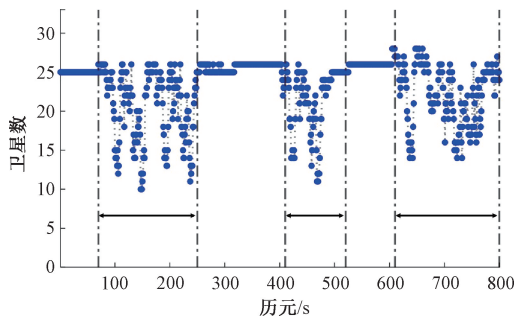


图 3 截取的 800 个卫星数量

Fig. 3 Satellite number of the selected 800 epochs

为全面分析和验证本文提出算法的定位性能, 本节对 M1、M2 和 M3 这 3 种方法在相同数据段中的误差表现进行了对比分析。东向、北向和天向定位误差的对比情况分别如图 4~6 所示。

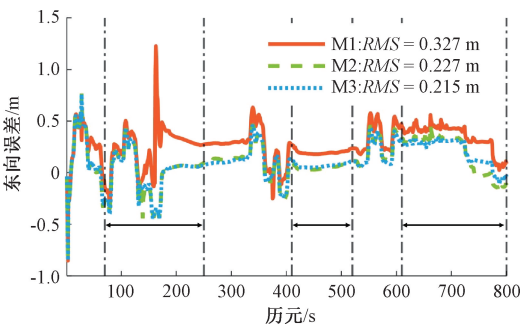


图 4 东向误差

Fig. 4 Position error in east direction

结合图 4~6 可以看出, 本文提出算法在东向、北向和天向 3 个方向的定位误差上均展现了显著的优势。将图中数据统计并汇总, 如表 2 和 3 所示。

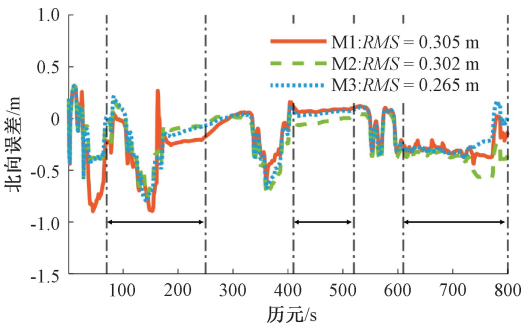


图 5 北向误差

Fig. 5 Position error in north direction

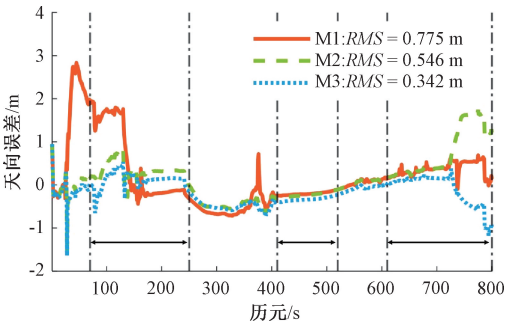


图 6 天向误差

Fig. 6 Position error in up direction

表 2 误差结果
Table 2 Error result (m)

方法	误差值		
	东	北	天
M1	0.327	0.305	0.775
M2	0.227	0.302	0.546
M3	0.215	0.265	0.342

表 3 精度提升
Table 3 Accuracy improvement (%)

方法	精度提升		
	东	北	东
M1	-	-	-
M2	30.65	1.02	29.47
M3	34.29	13.22	55.87

具体而言, 从图 4 可以看出, 东向误差中, 本文所提算法定位结果波动较小, 表现出更强的稳定性; 图 5 显示, 北向误差中, 本文算法有效降低了异常误差值, 体现了算法对动态环境中粗差的抑制能力; 图 6 展示了天向误差中, 本文算法同样具有更低的误差范围, 进一步验证

了算法在垂直方向的定位精度改进。

整体定位误差的对比情况如图 7 所示。通过对比 3 种方法的整体误差分布情况,可以进一步验证本文提出算法在综合定位性能上的优越性体现了更高的精度和鲁棒性。

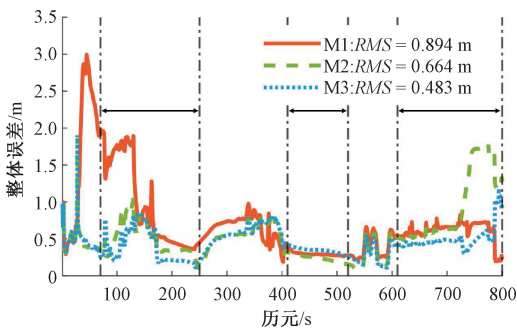


图 7 整体误差
Fig. 7 Overall error

上述实验结果表明,本文算法的均方根误差为 0.483 m,相较于 M1 (0.894 m) 和 M2 (0.664 m) 分别降低了 46% 和 27%,表明本文算法在整体精度上具有明显优势。此外,本文算法的平均误差仅为 0.443 m,而 M1 和 M2 分别为 0.713 和 0.552 m,进一步验证了本文算法在复杂场景中的误差抑制能力。标准差方面,本文算法

的 0.192 m 远小于 M1 和 M2,说明本文算法在误差波动上更具鲁棒性。

实验通过 M1、M2、M3 方法的对比,有效地证明了本文算法的优越性。在本算法中,当卡方检验检测到当前历元卫星数据存在显著故障时,便会切换到故障排除模式,通过解分离机制对故障星进行检测和隔离。这一环节主要用于识别和排除那些会对定位结果造成显著偏差的“大故障”,从而提高了导航解的可靠性。然而,受限于门限检测方法的原理,为了尽可能地检测到“大故障”,往往需要设置相对宽松的门限,但这会增加将正常观测值误判为故障的虚警风险,会导致门限下的“小故障”未能被完全排除。因而,采用 IGG-III 抗差估计方法,对未能通过前期门限检测而被完全排除的“小故障”进行进一步的检测和抑制,通过动态调整不同观测值的权重来降低异常值的影响,有效降低了“小故障”带来的漏警影响。

在最大误差方面,尽管本文算法的最大误差为 1.902 m,略高于 M2,但在 90% 和 95% 置信概率下,M3 的表现最佳,分别达到了 92.375% 和 96.75%,显著高于 M1 和 M2,表明本文算法在大部分情况下均能保持较高的定位精度和可靠性。

综上所述,表 4 的分析结果充分证明了本文提出算法在定位精度、误差波动控制方面的显著优势,为复杂动态环境下的高精度导航提供了有效解决方案。

表 4 整体误差分析表
Table 4 Overall error analysis

方法	均方根误差/m	平均误差/m	标准差/m	最大误差/m	90% 置信概率/%	95% 置信概率/%
M1	0.894	0.713	0.541	2.993	89.38	92.25
M2	0.664	0.552	0.370	1.865	91.63	93.50
M3	0.483	0.443	0.192	1.902	92.38	96.75

4 结 论

针对 RTK/INS 组合导航系统在复杂城市环境中容易遭受信号遮挡和多路径干扰,进而影响定位精度和导航系统可靠性的问题,提出了基于多级弹性策略的 RTK/INS 紧组合方法,并通过实验验证了该方法的有效性。实验结果表明,所提出的算法相比传统的 EKF 基础算法和仅进行卫星质量控制的算法,在多个方向的定位误差上表现出了更高的精度。在东向、北向和天向 3 个方向,本文方法不仅显著减少了定位误差的波动范围,还有效抑制了复杂环境中信号干扰引起的异常误差,展现出更强的鲁棒性。此外,通过对比不同方法的整体误差统计,本文算法在均方根误差、标准差和置信概率等指标上均

优于其他两种对比算法,尤其在 90% 和 95% 置信概率下,本文算法表现出更高的定位精度和可靠性。

未来研究工作将进一步研究 2 个方面:1) 深入探讨 RTK/INS 紧组合系统在复杂环境下的完好性风险,分析在 GNSS 信号丢失或干扰情况下的完好性;2) 研究更加高效的 GNSS 故障检测与修复机制,进一步提升系统在复杂环境中的鲁棒性和弹性。

参考文献

[1] BOGUSPAYEV N, AKHMEDOV D, RASKALIYEV A, et al. A comprehensive review of GNSS/INS integration techniques for land and air vehicle applications [J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): 4819.
[2] CHEN K, CHANG G B, CHEN CH. GINav: A MATLAB-based software for the data processing and

- analysis of a GNSS/INS integrated navigation system[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 108.
- [3] LI X, FANG K, LI X, et al. Fault identification method of GNSS/INS integrated navigation system based on the fusion of chi-square test and multiple solution separation algorithm[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2021: 558-569.
- [4] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, et al. Baseline advanced RAIM user algorithm and possible improvements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 713-732.
- [5] CHENG Q, CHEN W, SUN R, et al. Strategy for single-epoch RTK positioning using dual frequency in urban areas[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(3): 4523-4534.
- [6] NIU Z, LI G CH, GUO F G, et al. An algorithm to assist the robust filter for tightly coupled RTK/INS navigation system[J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2449.
- [7] ZHAO L D, ZHAO L. A novel algorithm for enhancing the navigation accuracy of INS/GNSS integrated systems in urban cities[C]. 2023 38th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2023: 254-259.
- [8] DONG Y, WANG D J, ZHANG L, et al. Tightly coupled GNSS/INS integration with robust sequential Kalman filter for accurate vehicular navigation[J]. Sensors, 2020, 20(2): 561.
- [9] 姜颖颖, 潘树国, 孟骞, 等. 基于鲁棒马氏距离统计量的多源融合抗差估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 252-262.
- JIANG Y Y, PAN SH G, MENG Q, et al. Robust Mahalanobis distance statistic-based multi-sensor integration robust estimation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 252-262.
- [10] WU J J, JIANG J G, ZHANG CH, et al. A novel optimal robust adaptive scheme for accurate GNSS RTK/INS tightly coupled integration in urban environments[J]. Remote Sensing, 2023, 15(15): 3725.
- [11] ZHANG Q, LIN H, DING L Y, et al. RANSAC-based fault detection and exclusion algorithm for single-difference tightly coupled GNSS/INS integration[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 9(2): 3986-3997.
- [12] YE CH, LI W, HU Y. A tightly-coupled GNSS RTK/INS positioning algorithm based on adaptive lag smoother[C]. 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2023: 1-8.
- [13] GAO W, ZHAN X Q, YANG R. INS-aiding information error modeling in GNSS/INS ultra-tight integration[J]. GPS Solutions, 2024, 28(1): 35.
- [14] 马杰, 王雯, 邓辰龙, 等. 动态观测权调整的GNSS/INS抗差因子图优化算法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 1-16[2025-04-23].
- MA J, WANG W, DENG CH L, et al. A robust factor graph optimization algorithm with dynamic observation weight adjusting[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-16[2025-04-23].
- [15] XIONG J, CHEONG J W, XIONG ZH, et al. Adaptive hybrid robust filter for multi-sensor relative navigation system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 11026-11040.
- [16] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- XIE G. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009.
- [17] 李团. 单频多模GNSS/INS/视觉紧组合高精度位姿估计方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- LI T. Research on the tightly coupled single-frequency multi-GNSS/INS/vision integration for precise position and orientation estimation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [18] 张建, 喻国荣, 潘树国, 等. 基于卡方检验的GNSS观测值部分粗差抗差滤波算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 102-109.
- ZHANG J, YU G R, PAN SH G, et al. Partial gross error robust filtering algorithm for GNSS observations based on chi-square test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 102-109.
- [19] 张亚彬, 王利, 范丽红, 等. 组合粗差探测的MHSS ARAIM算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(1): 9-17.
- ZHANG Y B, WANG L, FAN L H, et al. Study on MHSS ARAIM algorithm combined with gross error detection[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(1): 9-17.
- [20] GAO Y T, JIANG Y, GAO Y, et al. Solution separation-based integrity monitoring for RTK positioning with faulty ambiguity detection and protection level[J]. GPS Solutions, 2023, 27: 140.
- [21] WANG SH ZH, ZHAN X Q, ZHAI Y W, et al. Solution separation-based integrity monitoring for integer ambiguity resolution-enabled GNSS positioning[C]. 2023 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. 2023: 492-513.
- [22] 葛志敏. GNSS/INS组合导航故障检测与抗差自适应

算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.

GE ZH M. Research on fault detection and robust adaptive algorithm for GNSS/INS integrated navigation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.

- [23] 罗诗琦, 陈瑞琼, 刘娅. 基于抗差估计的多 GNSS 共视基准站数据融合[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 169-175.

LUO SH Q, CHEN R Q, LIU Y. Data fusion of GNSS common-view multi-reference stations based on robust estimation[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 169-175.

- [24] 李圣英, 孟骞, 姜颖颖, 等. 故障修复增强的抗差滤波 PDR/GNSS 行人导航方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 233-242.

LI SH Y, MENG Q, JIANG Y Y, et al. Robust filter-based PDR/GNSS pedestrian integration navigation approach enhanced by fault recovery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 233-242.

- [25] ZHANG CH, ZHAO X B, PANG CH L, et al. Improved fault detection method based on robust estimation and sliding window test for INS/GNSS integration[J]. The Journal of Navigation, 2020, 73(4): 776-796.

- [26] YU H ZH, TENG X L, PAN SH G, et al. A coupled RTK/INS positioning method based on robust estimation[C]. China Satellite Navigation Conference. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 94-104.

- [27] ZHU F, CHEN X, CAI Q Q, et al. A large-scale diverse GNSS/SINS dataset: Construction, publication, and application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73:1-13.

作者简介



刘均杰, 2023 年于河北工业大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 高精度定位及多源信息弹性融合。

E-mail: Junjieliu@seu.edu.cn

Liu Junjie received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2023. He is currently a master student at Southeast University. His main research interests include GNSS high-precision positioning and multi-source information fusion.



孟骞(通信作者), 2018 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为东南大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向为自主导航完好性, 多源信息弹性融合与可信定位。

E-mail: qianmeng@seu.edu.cn

Meng Qian (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2018. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Southeast University. His main research interests include autonomous navigation integrity, multi-source information resilient fusion and assured positioning.



姜颖颖, 2019 年于安徽理工大学获得学士学位, 2023 年于东南大学获得硕士学位, 主要研究方向为 GNSS/INS 组合定位故障检测和排除, 多传感器融合及其完好性。

E-mail: yingyingjiang2023@163.com

Jiang Yingying received her B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2019 and her M. Sc. degree from Southeast University in 2023. Her main research interests include fault detection and exclusion of GNSS/INS integrated positioning, multi-sensor integration and its integrity.



翟亚慰, 2018 年于美国伊利诺伊理工大学获得博士学位, 现为真点科技(北京)有限公司高级算法工程师, 主要从事高精度 GNSS (PPP、RTK) 完好性监测算法研究与开发。

E-mail: zhaiyawei@true-point.com

Zhai Yawei received his Ph. D. degree from Illinois Institute of Technology in 2018. He is currently a senior algorithm engineer at TruePoint Technology Inc. His work focuses on developing integrity monitoring algorithms for GNSS based high precision positioning, e. g., PPP and RTK.



周睿阳, 2024 年于莫斯科国立鲍曼技术大学获得博士学位, 现为北京航天控制仪器研究所工程师, 主要研究方向为惯性导航系统及多源自主导航。

E-mail: zhouruiyang0418@163.com

Zhou Ruiyang received his Ph. D. degree from Bauman Moscow State Technical University in 2024. He is currently an engineer at the Beijing Institute of Aerospace Control Devices. His main research interests include inertial navigation systems and multi-source autonomous navigation.