

北斗与惯性导航融合的多源定位算法研究

武之凤

中华通信系统有限公司河北分公司，河北 石家庄 050081

DOI: 10.61369/TACS.2025070002

摘要：伴随智能交通、无人驾驶及智能装备的发展，单一导航已难满足复杂环境中高精度定位需求，北斗卫星导航系统（BDS）具备覆盖广、精度高等优势，但在城市峡谷、隧道等场景易受遮挡干扰，惯性导航系统（INS）具有自主运行、连续定位的特点，却存在误差累积问题，本文针对北斗与惯性导航的融合展开研究，提出多源信息协同处理方法，结合多传感器融合与改进滤波策略，实现高精度与强抗干扰的定位效果，为复杂环境下的智能应用提供技术支撑。

关键词：北斗导航；惯性导航；多源融合；定位算法；滤波

Research on Multi-Source Positioning Algorithm Integrating Beidou and Inertial Navigation

Wu Zhifeng

Hebei Branch of China Communications Systems Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050081

Abstract : With the development of intelligent transportation, autonomous driving, and intelligent equipment, single navigation systems can no longer meet the demand for high-precision positioning in complex environments. The Beidou Navigation Satellite System (BDS) offers advantages such as wide coverage and high accuracy, but it is susceptible to occlusion and interference in scenarios like urban canyons and tunnels. The Inertial Navigation System (INS), on the other hand, features autonomous operation and continuous positioning, yet it suffers from error accumulation. This paper focuses on the integration of Beidou and inertial navigation, proposing a collaborative processing method for multi-source information. By combining multi-sensor fusion with improved filtering strategies, it achieves high-precision and robust anti-interference positioning effects, providing technical support for intelligent applications in complex environments.

Keywords : Beidou navigation; inertial navigation; multi-source fusion; positioning algorithm; filtering

引言

定位与导航技术是智能系统稳定运行的关键，但单一方式难以兼顾精度与可靠性，北斗具备高精度和广覆盖，却易受遮挡干扰，惯性导航可自主运行，不依赖外部信号，但误差易积累，将二者优势结合已成研究重点，近年来，多源融合定位算法在无人驾驶、无人机与特种装备等领域应用渐多，本文聚焦北斗与惯性导航融合，提出改进的多源定位算法，并探讨其在复杂环境中的应用价值与实现路径。

一、北斗与惯性导航的基本特性

（一）北斗系统的定位原理与应用场景

北斗卫星导航系统（BDS）的核心工作原理是，先测量卫星与接收机之间信号的传播时间，再依据该时间推算出两者间的距离，随后结合多颗卫星提供的伪距数据，运用几何定位的方法计算出接收机所在的位置与运行速度。从常规情况来看，要实现单点定位并同时解算出三维坐标与钟差，至少需要 4 颗卫星的支持，北斗系统采用中圆轨道、倾斜地球同步轨道以及地球静止轨道相结合的混合星座布局，这一布局确保在东亚地区能够观测到

的卫星数量一般超过 10 颗。

北斗三号提供频点：B3I, B1C, B2a, B2b，用户接收机通过多频观测可消除电离层延迟，提高定位精度，在无遮挡环境下，民用单频接收机精度约 10 m，多频高精度接收机结合差分或 PPP 技术，水平精度可达亚米级，部分情况甚至分米级，在智能交通与无人船舶应用中，北斗可实现数米范围的实时定位，保障调度与航行^[1]。

（二）惯性导航系统的结构与误差来源

惯性导航系统（INS）依靠加速度计和陀螺仪这两种核心器件来感知载体的运动状态，它先对加速度进行积分运算以获取载

体的速度信息，再通过进一步积分得到载体的位移情况，与此同时，利用陀螺仪提供的角速度数据完成对载体姿态的解算，惯性导航系统中常见的架构包括捷联式（strapdown）与平台式（platform-based）两种，其中捷联式架构由于具有结构紧凑、可靠性较强的特点，在车载系统和无人机系统中得到了更为广泛的应用。

但惯性导航系统存在一个主要问题，即误差会不断积累，以陀螺仪为例，即便其零偏稳定性达到 $0.01^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 的水平，经过 1 小时的积分运算后，仍有可能导致数百米的定位漂移；若加速度计的零偏误差处于 $100 \mu\text{g}$ 的量级，经过 30 分钟的累积，就会产生超过 100 米的位置误差。高精度的环形激光陀螺（RLG）和光纤陀螺（FOG）能够将零偏控制在 $0.001^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 以下，不过这类器件的成本较高，难以实现大规模推广应用，微机电系统（MEMS）惯性器件具有低功耗、低成本的优势，但其零偏通常在 $1^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 以上，更适合在短时间内辅助卫星导航系统工作，而无法独立实现长时间的精准定位。

（三）北斗与惯导的互补性分析

北斗系统的显著优势体现在定位精度高、时间基准稳定，但它的性能会受到环境条件的制约，当处于隧道、城市峡谷等特殊环境，或是受到电磁干扰时，信号很容易丢失，进而导致定位结果出现瞬时中断的情况；惯性导航系统则完全依靠内部传感器运行，具备自主工作能力与抗干扰能力，不需要依赖外部信号，因此在上述信号不佳的场景中仍能持续输出定位数据。

这两种系统的缺点恰好能够相互弥补：惯性导航系统的累积误差可通过北斗系统提供的实时高精度位置信息进行校正，从而避免误差漂移进一步扩大；而当北斗系统信号受阻无法正常工作时，惯性导航系统能够提供短时间的定位补偿，保障定位链路不会中断，在车辆行驶的实际场景中，北斗接收机在无遮挡环境下可实现 2~3 米的定位精度，当信号丢失 3 分钟后，若仅依靠 MEMS 惯性导航系统，定位误差可能会达到数十米，而采用北斗与惯性导航融合的方式，定位误差通常能够控制在 5 米以内。

在融合架构的作用下，北斗系统可提供频率较低但精度较高的位置观测数据，惯性导航系统能提供频率较高但易出现漂移的运动状态数据，两者结合后可实现厘米至分米级的连续定位，在实际工程应用过程中，典型的采样率配置为北斗观测频率 1 Hz 至 10 Hz、惯性导航观测频率 100 Hz 至 200 Hz，搭配扩展卡尔曼滤波等算法，能够实现动态环境下的实时精确导航^[2]。

二、融合定位算法设计思路

（一）多源数据处理框架

北斗与惯性导航融合的前提是建立合理数据处理框架，包括信号采集、时间同步、坐标转换与数据预处理，北斗接收机输出伪距、载波相位及速度信息，更新频率 1~10 Hz；惯性导航提供加速度、角速度与姿态信息，频率达 100~200 Hz，因采样频率差异显著，需进行时间同步，常通过外部时钟（如 PPS 脉冲）或软件插值实现时间对齐。

在坐标转换中，北斗多采用 2000 国家大地坐标系（CGCS2000），而惯性导航以 NED 或 ENU 为基础，需通过姿态矩阵将载体坐标映射至统一坐标系，再与北斗数据融合，为减小噪声，惯性导航数据常先经低通滤波处理，北斗伪距观测则需剔除粗差并抑制多路径效应，以保证融合精度与可靠性^[3]。

（二）状态估计与滤波模型

融合算法的核心是状态估计，常用方法是扩展卡尔曼滤波（EKF），其状态向量可定义为：

$$\mathbf{x} = [\delta r, \delta v, \delta \theta, b_a, b_g]^T$$

其中 δr 为位置误差， δv 为速度误差， $\delta \theta$ 为姿态误差， b_a 为加速度计零偏， b_g 为陀螺仪零偏，状态转移方程基于惯性运动学模型：

$$\mathbf{x}_{k+1} = F_{kk} \mathbf{x}_k + G_{kwk} w_k$$

观测方程由北斗伪距与速度观测构成：

$$z_k = H_{kk} \mathbf{x}_k + v_k$$

其中 w_k 与 v_k 分别代表系统噪声和观测噪声，通过迭代执行预测与更新步骤，可实现北斗与 INS 之间的互补校正，在参数设置上，惯导噪声协方差矩阵 Q 的取值范围可设定为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ，该数值能够反映 MEMS 器件的零偏漂移情况；北斗观测噪声协方差矩阵 R 则需依据接收机精度来确定，单频接收机的 R 值通常设为 10 m^2 ，而高精度多频接收机的 R 值可降至 0.1 m^2 ，若采用无迹卡尔曼滤波（UKF），可通过采样点对非线性状态进行传播，从而提升系统在剧烈机动条件下的估计精度。

（三）动态环境下的鲁棒性优化

在复杂环境中，单纯使用扩展卡尔曼滤波（EKF）往往难以保障系统的鲁棒性，当北斗信号中断时间超过 30 秒时，惯导漂移可能会导致数十米的定位误差，因此需要引入自适应机制与冗余机制，常用的实施方式包含以下几种：

自适应滤波：当观测残差超出设定阈值（如 3σ 原则）时，系统会自动调整观测噪声矩阵 R ，以此避免异常观测数据对融合结果产生不良影响。

模糊加权策略：当卫星可见数量减少时，适当降低北斗观测数据在融合过程中的权重，同时提高惯导数据的权重，确保定位结果实现平滑过渡。

多模型切换：采用交互多模型（IMM）方法，在车辆直线行驶、转弯、加速等不同运动状态下，切换对应的动态模型，使滤波过程更贴合实际运动特性。

以车辆应用场景为例，当北斗信号丢失 1 分钟时，若仅依靠低成本 MEMS 惯导，定位误差可能会超过 80 米；而启用自适应滤波与多模型切换后，定位误差可控制在 15 米以内；若搭配高精度 FOG 惯导，定位误差甚至能控制在 5 米以内。

为进一步增强系统抗干扰能力，可引入多源观测信息，比如将里程计、视觉里程计（VO）或车轮速度传感器作为辅助观测量，相关试验数据表明^[4]，在城市峡谷环境中，当卫星数量降至 4 颗以下时，单北斗定位精度会下降至 20 米以上，而融合 INS 与

里程计后，定位误差可维持在 2~3 米范围内，系统鲁棒性得到显著提升。

三、算法实现与试验验证

(一) 试验平台与数据采集方案

试验平台搭建在一辆中型试验车辆上，车上配备了北斗接收机、MEMS 惯性测量单元（IMU）、车轮里程计以及数据采集主机，其中，北斗接收机为双频（B3I/B1C），单点定位精度约为 2.5 米，数据输出频率为 10 Hz；IMU 采用六轴 MEMS 器件，角速度随机漂移为 0.05°/s，零偏稳定性约为 10°/h，加速度计零偏为 100 μg；车轮里程计用于辅助测量，其分辨率为 0.01 米，试验数据通过 CAN 总线与串口进行同步采集，同时采用 PPS 信号对所有传感器的时间戳进行对齐^[5]。

图1试验平台框图

试验路线选取在典型城市环境中，涵盖宽阔大道、树木遮挡路段以及一条长约 1.2 千米的隧道，试验全程行驶距离约 15 千米，车辆平均车速为 40 千米/小时，为方便开展对比验证，试验过程中同步记录高精度 RTK 结果作为“真值”基准，该基准的水平精度优于 5 厘米。

(二) 算法实现流程

融合算法基于扩展卡尔曼滤波（EKF）框架完成实现，主要实施步骤如下：如图1所示。

图2算法实现流程图

数据预处理：对北斗数据进行多路径抑制与粗差剔除操作，对 IMU 数据采用一阶低通滤波处理以去除高频噪声^[6]。

坐标统一：将北斗输出的 CGCS2000 坐标转换为 ENU 坐标系，实现与惯导计算结果的坐标对齐。

状态初始化：将北斗定位结果作为系统初始位置，速度参数

取自北斗多普勒观测数据，姿态信息通过静置对准方式获取。

预测步骤：利用 IMU 测量值驱动状态转移方程，对位置、速度和姿态进行预测，同时完成协方差的更新。

更新步骤：当北斗观测数据可用时，计算伪距与速度观测残差，更新状态向量和协方差矩阵；若北斗信号缺失，则依靠惯导输出数据进行短时推算。

异常检测：当观测残差超过设定阈值时，自适应增大观测噪声矩阵 R，避免异常数据对整体定位精度造成影响。

该算法采用 C++ 语言实现，运行于工控机平台，工控机 CPU 主频为 2.4 GHz，内存为 8 GB，算法实时计算延迟小于 20 毫秒，能够满足车辆动态场景下的实时性需求。

(三) 试验结果与性能评估

试验结果从定位精度、连续性和鲁棒性三个维度展开评估，对比对象包括单北斗定位、单 INS 推算以及北斗 / INS 融合算法三种方式，具体结果如下表 1 所示。

表1试验结果分析

场景	指标	北斗单独定位	INS 单独推算	北斗 / INS 融合
开阔道路 (10 km)	水平 RMSE	2.3 m	45.2 m	1.1 m
	垂直 RMSE	3.1 m	60.5 m	1.8 m
树木遮挡 (3 km)	最大误差	8.6 m	52.3 m	2.7 m
隧道 (1.2 km)	最大误差	失锁 >100 m	95.4 m	6.3 m
全程 (15 km)	水平 RMSE	5.8 m	72.8 m	2.4 m
	可用率	86%	100%	99%

结果表明，在开阔场景中融合算法水平定位均方根误差仅 1.1 m，较单北斗提升超 50%；树木遮挡环境下最大误差 2.7 m，显著优于单北斗的 8.6 m；在隧道中，单北斗失锁且 INS 漂移近 100 m，而融合算法将误差控制在 6.3 m 内，保证定位连续性，总体可用率达 99%，明显优于单北斗的 86%^[7]。

四、工程实现与应用分析

(一) 系统软硬件架构设计

在工程实现过程中，北斗 / INS 融合系统一般由导航传感器模块、处理器单元以及通信接口构成，传感器部分包含多频北斗接收机和 IMU，其中多频北斗接收机可提供厘米到米级的高精度位置信息，IMU 则能输出高频运动数据，处理器选用嵌入式工控机或车规级 SOC，这类设备需具备浮点运算能力和低延迟特性，在数据通信环节，采用 CAN 总线或以太网实现多源数据的高速传输，并通过 PPS 信号维持严格的时钟同步。

(二) 算法在典型场景中的应用

在城市道路环境中，北斗信号常因高楼反射受到影响，融合算法通过调整权重有效抑制伪距异常，保障车辆实现 2~3 米的车道级定位，在隧道场景里，北斗信号失锁后，系统依靠 INS 进行短时推算，同时结合车轮里程计辅助，在 1 千米范围内可将误差

控制在 5~8 米, 满足高速通行的安全需求^[8], 在林区和山区环境中, 多径干扰问题较为突出, 融合算法借助残差检测和自适应滤波保持稳定运行, 其最大误差降至单北斗定位的三分之一。

(三) 工程化问题与解决措施

实际应用中仍面临工程挑战: 其一是功耗, 车载 IMU 与北斗接收机约 10W, 无人机需进一步优化; 其二是成本, 高精度 FOG 惯导价格高昂, 不利于推广, 需借助算法提升 MEMS 效果; 其三是实时性, 复杂滤波与多源处理易产生延迟, 需通过并行计算与硬件加速降至 20ms 内, 为此可采用软硬件协同优化, 如选用低功耗 IMU、引入轻量化滤波模型, 以兼顾精度与效率。

五、结语

本文围绕北斗与惯性导航的多源融合展开研究, 从系统特性、算法设计到试验与应用进行系统探讨, 结果表明, 北斗 / INS 融合可显著提升复杂环境下的定位精度与连续性, 在隧道、城市峡谷和遮挡场景中表现出较强鲁棒性, 试验中融合算法全程可用率达 99%, 精度优于单一系统, 工程实现方面, 依托软硬件协同与自适应算法, 保证了实时性与成本优势, 未来需进一步提升轻量化算法性能, 推动其在智能交通、无人机和特种装备中的应用。

参考文献

- [1] 余跃. 基于 BDS/SINS/DR 的列车多源定位信息融合方法研究 [D]. 大连交通大学, 2022.
- [2] 刘天弋. 面向城市道路环境的车载低线数 LiDAR/INS/GNSS 融合导航算法研究 [D]. 武汉大学, 2023.
- [3] 邵宇强. 水下惯性基多源融合与矢量化故障检测方法研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [4] 王鹏飞. 基于多源信息融合的列车定位方法研究 [D]. 大连交通大学, 2023.
- [5] 方辉. 基于多源信息融合的行人室内定位算法研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [6] 李子月. 多源融合定位辅助的复杂场景信号灯识别关键技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2023.
- [7] 楚飞黄. 基于多传感器融合的车载导航定位算法研究 [D]. 南京理工大学, 2024.
- [8] 李默闻. 陆海多源 PNT 传感器弹性融合导航定位技术 [D]. 山东大学, 2024.