

GNSS/INS 组合定位在移动测绘系统中的应用与精度分析

王艳平¹ 李心雨²

1. 江苏浩坤地理信息科技有限公司 江苏 徐州 221000

2. 徐州海纳地理信息有限公司 江苏 徐州 221000

摘要: 随着高精度地理空间信息需求的日益增长, 移动测绘系统 (Mobile Mapping System, MMS) 作为高效获取三维地理空间数据的重要手段, 在智慧城市、自动驾驶、基础设施管理等领域发挥着不可替代的作用。全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 与惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 的组合定位技术是 MMS 实现高精度、高可靠性时空基准的核心。本文系统阐述了 GNSS/INS 组合定位的基本原理、典型架构及其在 MMS 中的集成方式; 深入分析了影响组合定位精度的关键因素, 包括传感器误差特性、组合滤波算法、时间同步与杆臂误差补偿等; 通过构建实验平台, 采集真实道路场景下的 GNSS/INS 数据, 并采用松组合与紧组合两种模式进行后处理解算, 对比分析其在开阔、城市峡谷及隧道等典型环境下的定位性能。实验结果表明, GNSS/INS 组合系统能有效克服单一传感器的局限性, 在 GNSS 信号中断期间, INS 可提供连续的高动态定位信息, 维持厘米至分米级的轨迹精度; 紧组合模式在弱 GNSS 信号环境下展现出显著优于松组合的鲁棒性和精度。本研究为 MMS 的设计优化与工程应用提供了理论依据和实践参考。

关键词: GNSS/INS 组合导航; 移动测绘系统; 卡尔曼滤波; 定位精度; 误差分析; 紧组合; 松组合

引言

进入21世纪, 数字孪生、智慧城市等新兴技术对高精度三维地理空间信息需求激增, 传统静态测绘方法效率低、成本高, 难以满足大规模、快速更新需求, 移动测绘系统 (MMS) 应运而生。MMS 多搭载于车辆、船舶或无人机等载体, 集成 GNSS 接收机、IMU、LiDAR、全景相机等传感器, 可同步、连续采集高密度三维点云和影像数据。MMS 核心挑战在于海量观测数据赋予精确时空坐标, 这依赖稳定可靠的定位定姿子系统 (POS)。单一 GNSS 虽能提供全球绝对位置信息, 但信号易受遮挡、多路径效应影响, 在复杂环境中性能下降甚至失效。INS 作为自主式导航系统, 不依赖外部信号, 能提供高频连续信息, 但导航误差会随时间累积发散, 无法长期独立工作。GNSS 与 INS 优势互补, 构成现代高精度移动测绘系统基石。GNSS/INS 组合技术可提供全天候、全地形连续导航能力, 实时校正 INS 误差、抑制漂移, 平滑 GNSS 噪声, 并在 GNSS 信号失锁时提供可靠推算航迹。因此, 深入研究 GNSS/INS 组合定位在 MMS 中的应用模式、关键技术和精度特性, 对提升 MMS 性能、拓展应用边界具有重要理论价值和现实意义。

1 GNSS/INS 组合定位基本原理与架构

1.1 GNSS 与 INS 工作原理简述

GNSS: 通过接收来自多个卫星的信号, 测量信号传播时间来计算用户到各卫星的距离 (伪距), 进而通过空

间后方交会原理解算出用户在地球坐标系 (如 WGS-84) 下的三维位置和接收机钟差^[1]。载波相位观测值可提供毫米级的相对距离变化信息, 结合精密单点定位 (PPP) 或实时动态 (RTK) 技术, 可实现厘米级绝对定位。

INS: 核心是惯性测量单元 (IMU), 包含三个正交的加速度计和三个正交的陀螺仪。加速度计测量载体坐标系下的比力 (f^b), 陀螺仪测量载体坐标系相对于惯性坐标系的角速度 (ω^b)。通过初始对准获得初始姿态、位置和速度后, INS 利用姿态矩阵 C^nb 将比力转换到导航坐标系 (n 系, 通常为当地水平坐标系), 扣除重力加速度 g^n 后积分得到速度, 再积分得到位置。姿态则通过对陀螺仪输出的角速度进行姿态更新 (如四元数法) 得到。整个过程是一个纯积分过程, 因此任何微小的传感器误差都会随时间累积, 导致导航解迅速发散。

1.2 组合导航的必要性与优势

GNSS 与 INS 的误差特性具有高度的互补性: GNSS 提供长期稳定的绝对精度, 但更新率低 (通常 1-10Hz), 易受环境干扰。INS 提供高频 (100-1000Hz)、连续、短期高精度的相对导航信息, 但存在长期漂移。两者的组合可以实现: (1) 提高精度: GNSS 校正 INS 的累积误差, INS 平滑 GNSS 的随机噪声。(2) 增强鲁棒性: 在 GNSS 信号短暂中断 (< 60秒) 时, INS 可维持高精度导航。(3) 改善动态性能: INS 的高频输出可满足 MMS 对高采样率 POS 的需求。(4) 辅助 GNSS: INS 提供的高精度动态信

息可辅助GNSS接收机进行信号捕获与跟踪,缩短首次定位时间(TTFF)。

1.3 组合架构:松组合与紧组合

1.3.1 松组合(LooselyCoupled)

松组合是最经典的组合方式。GNSS接收机独立完成定位解算,输出位置 P_{GNSS} 和速度 V_{GNSS} 。INS根据自身传感器数据进行纯惯导推算,输出 P_{INS} 和 V_{INS} 。卡尔曼滤波器的状态向量通常包含INS的位置误差 δP 、速度误差 δV 、姿态误差 ϕ ,以及IMU的陀螺零偏 ε_g 和加表零偏 ∇_a 等。量测向量 Z 为GNSS与INS输出之差: $Z = [P_{GNSS} - P_{INS}, V_{GNSS} - V_{INS}]^T$ 。滤波器利用此量测对状态向量进行估计,并将估计出的误差反馈给INS进行校正。优点是结构简单,模块化程度高,GNSS和INS可以独立工作^[2]。缺点是当GNSS无法输出有效解(如卫星数 <4)时,组合系统退化为纯INS,失去组合优势。

1.3.2 紧组合(TightlyCoupled)

紧组合打破了GNSS接收机内部的黑箱,直接利用其输出的原始观测值。INS的导航解用于预测从载体到各可见卫星的几何距离,从而生成伪距和载波相位的预测值 ρ_{pred} 和 Φ_{pred} 。卡尔曼滤波器的量测向量 Z 为实际观测值与预测值之差: $Z = [\rho_{obs} - \rho_{pred}, \Phi_{obs} - \Phi_{pred}]^T$ 。状态向量除了包含INS的误差状态外,还需增加每个卫星的模糊度参数(对于载波相位)以及接收机钟差等。优点是充分利用了所有可用的卫星信息,即使只有1-2颗卫星可见,也能提供有效的量测,极大地提升了在城市峡谷等弱信号环境下的性能。缺点是系统耦合度高,设计和实现复杂,需要GNSS接收机开放原始观测数据接口。

2 移动测绘系统中的集成与误差分析

2.1 MMS系统集成

在典型的车载MMS中,GNSS天线、IMU、激光扫描仪和相机被刚性安装在一个稳固的平台上。系统集成的关键在于建立各传感器之间的精确时空关系。一是时间同步:所有传感器的数据必须打上统一、高精度的时间戳。通常以GNSS的PPS(每秒脉冲)信号作为时间基准,通过硬件触发或软件插值实现纳秒级同步。二是空间标定(杆臂与安置角):需要精确测定IMU中心到GNSS天线相位中心的杆臂向量(leverarm),以及各传感器坐标系之间的旋转矩阵(安置角)。这些参数通常通过专门的标定场或在线标定算法(如基于平面约束或共线条件)进行求解。^[2]

2.2 关键误差源分析

组合系统的最终精度受多种误差源的综合影响:

2.2.1 IMU误差

(1) 零偏:陀螺和加表的零偏是导致INS位置发散的最主要原因。零偏的稳定性(Allan方差)直接决定了INS的自主导航时间。(2) 比例因子:传感器输出与真实物理量之间的比例系数误差。(3) 安装误差:传感器敏感轴与理想正交轴之间的偏差^[3]。(4) 噪声:包括角度随机游走(ARW)和速度随机游走(VRW)。

2.2.2 GNSS误差

(1) 轨道与钟差误差:可通过使用精密星历和钟差产品消除。(2) 电离层/对流层延迟:可通过双频观测值或模型进行修正。(3) 多路径效应:在城市环境中尤为严重,是GNSS定位的主要误差源之一。(4) 接收机噪声:伪距和载波相位的测量噪声。

2.2.3 组合系统特有误差

一是时间同步误差:即使微秒级的时间不同步也会在高速运动下引入显著的位置误差。二是杆臂误差:未精确补偿的杆臂会导致GNSS量测与INS预测不在同一空间点上,引入杠杆效应误差^[4]。三是初始对准误差:INS的初始姿态、位置、速度不准会直接影响后续的导航精度。

3 实验设计与结果分析

3.1 实验平台与数据采集

为验证理论分析,本文搭建了一个实验级MMS平台,主要设备包括:

GNSS接收机:NovAtel OEM7720,支持GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou全系统全频点,可输出原始观测值。

IMU:SBG Systems Ellipse-N,战术级MEMSIMU,陀螺零偏稳定性 $0.2^\circ/\text{hr}$,加表零偏稳定性 $50\mu\text{g}$ 。

其他:Velodyne VLP-16激光雷达,Ladybug5+全景相机。

实验在北京某区域进行,路线精心规划,覆盖了三种典型环境:

开阔环境:无遮挡的郊区道路。

城市峡谷:两侧高楼林立的城市主干道。

GNSS拒止环境:一段长约300米的地下隧道。

数据采集率为:GNSS20Hz,IMU200Hz。采用后处理模式,使用NovAtel Inertial Explorer软件分别进行松组合和紧组合解算,并以高精度RTK/PPK解作为参考真值(精度优于2cm)。

3.2 定位精度分析

3.2.1 开阔环境

在开阔环境下,两种组合模式均能获得优异的性能。水平定位精度(RMS)均优于5cm,姿态精度(横滚/俯仰)优于 0.05° ,航向优于 0.1° 。此时,GNSS信号质量高,松组合和紧组合的性能差异不大,系统精度主要受限于IMU的零偏稳定性和GNSS的观测噪声。

3.2.2 城市峡谷环境

进入城市峡谷后，GNSS信号频繁失锁，多路径效应严重。此时，两种组合模式的性能差异开始显现。(1) 松组合：当可见卫星数低于4颗时，GNSS解算失败，组合系统完全依赖INS推算。由于IMU存在零偏，位置误差随时间线性增长。在一次长达25秒的信号中断后，水平位置误差累积至约1.2米。(2) 紧组合：得益于对单颗卫星观测值的有效利用，紧组合在整个过程中始终能提供量测信息。即使在信号最差的路段，其水平定位精度(RMS)也能维持在0.3米以内，显著优于松组合。这充分证明了紧组合在弱信号环境下的强大鲁棒性。

3.2.3 GNSS拒止环境(隧道)

在长达300米(约20秒车程)的隧道内，GNSS信号完全丢失。(1) 松组合与紧组合表现一致：两者均退化为纯INS工作模式。位置误差随时间平方增长。20秒后，水平位置误差达到约2.5米。这验证了INS误差累积的理论特性(位置误差 $\propto t^2$)。(2) 姿态保持良好：由于陀螺仪的短期稳定性较好，姿态角(尤其是横滚和俯仰)在短时间内仍能保持较高精度，这对于保证激光点云的几何形状至关重要。

3.3 结果总结

实验结果清晰地表明：在GNSS信号良好的开阔环境下，松组合和紧组合均能满足高精度MMS的需求。在GNSS信号恶劣的城市峡谷环境中，紧组合凭借其对原始观测值的直接利用，展现出远超松组合的定位精度和连续性，是复杂城市场景下的首选方案。在完全GNSS拒止的环境下，组合系统性能取决于IMU的质量，定位误差不可避免地会累积。对于长时间的GNSS中断，需要引入

其他传感器(如里程计、视觉SLAM)进行融合。

4 结语

本文系统研究了GNSS/INS组合定位技术在移动测绘系统(MMS)中的应用与精度问题，得出重要结论：GNSS/INS组合是MMS实现高精度、高可靠性时空基准的核心技术，能互补解决单一传感器缺陷；松组合适合常规测绘，紧组合是应对挑战性环境的关键；组合系统精度受多种因素影响，IMU零偏稳定性和GNSS多路径效应是主要瓶颈；GNSS完全拒止时，战术级IMU可在数十秒内维持亚米级精度。展望未来，GNSS/INS组合技术在MMS中将呈现多源融合趋势，融入多种传感器解决长时GNSS拒止问题；算法智能化，利用人工智能补偿复杂误差；低成本高精度，推动高精度MMS向大众市场普及；云-边协同处理，实现MMS数据实时处理与服务。该技术作为MMS的“大脑”，持续创新优化将为构建精准、智能数字世界奠定空间信息基础。

参考文献

- [1] 李宁. 基于GNSS/INS组合精密定位模糊度校正方法在城市车载测绘系统中的应用研究[J]. 经纬天地, 2024, (02): 73-77.
- [2] 周达, 郭旗, 尹帆, 等. 基于PF的GNSS/INS组合导航定位算法[J]. 长春工业大学学报, 2025, 46(05): 458-465.
- [3] 董韵. 面向量测异常的GNSS/INS组合导航抗差滤波研究[D]. 中国民用航空飞行学院, 2025.
- [4] 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[2025-11-26].