

基于高精度 GNSS 的城市设施巡检定位系统设计与实现

孙 勇¹ 胡 洋¹ 冀宗童¹
SUN Yong HU Yang JI Zongtong

摘 要

针对复杂城市环境下设施巡检定位精度不足的问题, 文章设计并实现了一套基于高精度 GNSS 的城市设施巡检定位系统。该系统融合多频卫星信号与惯性导航数据, 采用硬件感知层、软件处理层、数据服务层的分层架构; 同时引入自适应卡尔曼滤波算法与多源数据融合机制, 进一步提升定位稳定性与精度。实测结果表明: 系统水平定位精度可达 0.12 m, 相较传统 RTK 定位精度提升 52%, 最大定位误差降低 67%; 经 30 天连续压力测试, 服务可用性达 99.2%, 单点巡检检测效率较人工方式提升 3 倍。该系统可有效应用于桥梁、管网等城市基础设施巡检场景, 能够精准识别毫米级结构形变, 具备良好的工程实用价值与推广前景。

关键词

高精度 GNSS; 城市设施巡检; 定位系统; 多源数据融合; 性能评估

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.008

0 引言

城市基础设施的安全运维面临严峻挑战, 传统巡检方法在定位精度与效率方面存在显著局限。常规定位技术受建筑遮蔽、多路径效应等因素制约, 水平定位误差常超 1 m, 难以满足井盖错位、桥梁裂缝等毫米级缺陷的检测需求^[1]。现有研究虽尝试通过 RTK 技术改善精度, 但在动态环境适应性、多源数据协同等方面仍有不足。本研究旨在构建兼具厘米级定位能力与强环境适应性的巡检系统, 通过创新硬件集成方案与智能算法设计, 解决复杂场景下的精准定位问题。系统实施将极大程度提高设施病害识别效率, 降低人工巡检安全风险, 为智慧城市基础设施数字化管理提供技术支撑。

1 GNSS 城市设施巡检定位理论基础

全球导航卫星系统 (GNSS) 是城市设施空间信息获取的关键技术, 其高精度定位能力对裂缝监测、井盖错位等病害识别至关重要。传统单点定位在城市密集区受遮挡与多路径效应干扰, 误差常超 1 m, 难以满足厘米级精度需求。为提升性能, RTK 通过基准站差分观测实现实时厘米级定位, 精密单点定位 (Public-Private-Partnership, PPP) 依赖精密轨道与钟差产品, 在无需基站条件下提供全球高精度解算, 二者有效削弱大气误差与系统偏差, 显著提升城市复杂环境下的定位能力^[2]。城市巡检对系统实时性、稳定性与连续性要求极高。在信号衰减区域, 需结合惯性导航进行短时补偿, 并支持图像协同采集, 实现位置信息与设施影像的同步回传。

基于高精度 GNSS 的融合定位系统, 具备强环境适应性和多源融合优势, 是构建智能巡检平台的核心支撑。

2 高精度 GNSS 定位系统设计方案

2.1 系统总体架构设计

为契合城市复杂环境下设施巡检的高精度定位需求, 系统总体设计运用“架构引领、软硬协同、算法支撑、数据驱动”的技术路线, 整体划分为系统架构、硬件配置、定位算法以及数据管理四个关键层面, 开展功能闭环的技术体系构建工作。硬件感知层由双频 GNSS 接收机、惯性测量单元以及环境传感器构成, 承担原始空间数据的采集工作^[3]。接收机借助多星座跟踪技术捕获 GPS、北斗等卫星信号, 惯性单元在信号遮蔽区提供航位推算补偿, 环境传感器同步采集温度、湿度等辅助参数。设备依靠工业级防护外壳集成于移动巡检终端, 确保在震动、高低温等恶劣条件下持续稳定运行。软件处理层部署四阶功能模块: 数据预处理模块开展原始观测值质量检查以及粗差剔除的相关工作; 实时定位解算模块融合载波相位观测值以及惯性数据, 选用自适应滤波算法输出厘米级坐标; 空间分析引擎依据设施拓扑关系匹配定位结果以及设施数据库; 可视化交互界面支持巡检人员实时查看定位轨迹以及设施属性信息。各模块凭借消息队列来实现解耦通信, 保障高并发场景下的系统运行稳定性^[4]。数据服务层运用混合存储架构, 时序数据库存储高频定位流数据, 关系型数据库开展设施属性以及巡检记录的管理工作。数据总线模块提供标准 API 接口, 支撑与城市信息模型平台的坐标转换以及数据同步相关工作。系统借助冗余备份机制以及访问

1. 智成时空 (西安) 创新科技有限公司 陕西西安 710086

控制策略开展数据安全管理工作，多部门间的安全数据共享得以实现。整体架构设计如图 1 所示，兼顾实时性与扩展性，为城市设施全生命周期管理提供基础支撑。

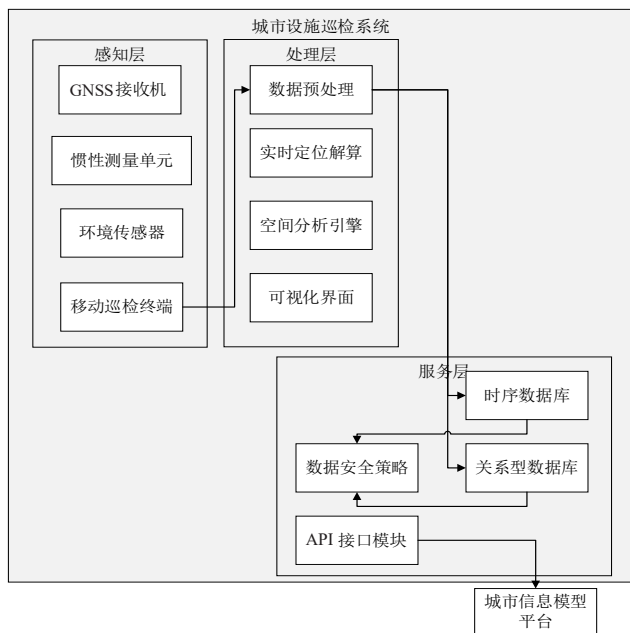


图 1 城市设施巡检系统架构图

2.2 硬件模块详细设计

系统架构设计明确之后，硬件模块是实现定位精度的物理基础，要优先满足城市复杂环境下的稳定运行以及高频采集的需求。硬件模块的设计围绕高精度定位的核心需求来开展选型以及集成的相关工作^[5]。GNSS 接收器选用支持 GPS L1/L2 以及北斗 B1/B2/B3 的多频点接收板卡，其载波相位观测值的分辨率达到 0.01 周，原始观测数据的最高输出频率为 20 Hz。板卡内置抗多路径抑制算法，借助环形天线阵列以及自适应滤波技术削弱建筑群带来的反射干扰，水平定位精度的设计指标为 $8\text{ mm}+1\times 10^{-6}$ 。为了延长野外作业的时间，接收器运用动态电压调节技术，在信号稳定的区域会自动切换至 0.8 W 的低功耗模式，相比常规模式能实现 40% 的节能效果。传感器组包含三轴 MEMS 惯性测量单元以及温湿度采集模块。惯性单元的量程覆盖 $\pm 400^\circ/\text{s}$ 的角速度以及 $\pm 8\text{ g}$ 的加速度，在 GNSS 信号中断的期间借助四元数解算开展航向补偿的相关工作。温湿度传感器的精度分别达到 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以及 $\pm 2\%\text{ RH}$ ，其采集到的数据用来修正对分层延迟误差。所有传感器借助 RS-485 总线集成在防护等级为 IP68 的铝合金外壳内，内部填充的导热硅胶能保障设备在 $-25\sim 65^\circ\text{C}$ 的工况下保持稳定运行。通信模块运用双通道的设计：4G Cat.1 模块负责传输亚米级定位数据以及设施状态信息，峰值速率为 10 Mbit/s；Lora 扩频通信模块当作备用链路来使用，在隧道等封闭场景下能维持 2 km 范围内的基础通信能力。设备内置的存储芯片能缓存 72 h 的原始数据，依靠软硬件协

同的优化策略，把整个系统的待机功耗控制在 1.2 W 以下。这种配置方案在保证厘米级定位精度的同时，实现单次充电连续工作 12 h 的技术目标。信号强度与定位精度存在定量关系：

$$\sigma_p = \frac{k \cdot \lambda}{2\pi \cdot \sqrt{\text{SNR}}} \quad (1)$$

式中： σ_p 表示载波相位测量误差， k 表示设备相关常数， λ 表示载波波长，SNR 表示信噪比。该公式表明，当信噪比提高 3 dB 时，相位测量误差可降低约 30%，这为天线设计与信号处理算法优化提供了理论依据。

2.3 定位算法设计

在硬件采集保障高质量观测数据的基础上，核心算法模块则承担将多源数据转化为高精度坐标的关键任务。定位算法采用扩展卡尔曼滤波框架实现多源数据融合，通过状态空间建模解决城市复杂环境下的定位漂移问题^[6]。系统将接收机位置、速度、钟差以及惯性传感器零偏等参数构建为 15 维状态向量，以 GNSS 伪距、载波相位观测值和 IMU 原始数据作为量测输入。预测阶段基于惯性测量单元输出的角速度与加速度推算载体运动状态，更新阶段利用 GNSS 观测残差修正预测值，通过迭代计算降低非线性误差影响。这种设计有效抑制了高层建筑群造成的多路径效应，同时补偿卫星信号短暂中断时的定位漂移。为提升算法稳健性，实施三项优化策略：首先建立自适应噪声协方差调整机制，当 GNSS 定位精度因子 PDOP 大于 4 时自动增大观测噪声权重；其次设计异常观测值检测模块，通过卡方检验剔除偏差超过 3 倍方差的伪距数据；最后引入滑动窗口平滑处理，利用历史状态信息削弱单点突变误差。这些策略使系统在隧道出口、立交桥下层等信号突变区域保持定位连续性。卡尔曼滤波的核心预测方程描述状态向量传递过程：

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k \quad (2)$$

式中： $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 表示 k 时刻基于 $k-1$ 时刻的状态预测向量， $\mathbf{F}_k$ 表示状态转移矩阵， $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ 表示 $k-1$ 时刻的状态估计向量， $\mathbf{B}_k$ 表示控制输入矩阵， $\mathbf{u}_k$ 表示控制输入向量。该方程通过物理运动模型实现状态向量的时间递推，为后续观测更新奠定基础。

2.4 数据处理与管理模块设计

为实现高效的任务执行与数据闭环管理，系统还需配套完善的数据处理流程与管理机制。数据处理流程采用分层异步架构，实现多源异构数据的高效管理。采集层并行接收 GNSS 观测值、IMU 姿态角及环境参数，并通过 CRC 校验与时间戳对齐机制完成预处理^[7]。若报文丢失率超过 5% 或时间偏差大于 100 ms，系统将自动触发重传协议，保障数据

完整性与时效性。各通道数据校验合格后封装为统一消息体，写入内存队列等待处理。存储层采用双引擎架构：时序数据库以小时为单位切片压缩高频定位数据；关系型数据库构建设施三维拓扑结构，并通过空间索引加速查询。数据清洗模块实施三步流程：剔除低高度角观测值、滑动均值滤波惯性数据、校验设施坐标的空间一致性，最终数据进入融合计算引擎。多源数据融合采用自适应加权算法：

$$P = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \quad (3)$$

式中： P 为融合后坐标， w_i 为第 i 个数据源的权重（0~1）， P_i 为各源位置估计值。

权重根据信号强度、历史精度和环境条件动态调整，GNSS质量下降时自动提高IMU权重^[8]。融合结果通过数据总线分发至应用模块，并同步写入数据库集群。为强化数据可控性与系统管理能力，系统设计了数据管理模块，涵盖元数据管理、权限控制与异常调度三项功能。通过统一数据索引与哈希校验支持快速检索与完整性校验，基于RBAC策略实现角色权限划分，并记录操作日志。任务调度机制支持自动派发巡检任务，异常监测模块实时识别定位误差与报文丢失，触发告警并推送至管理平台，提升系统的数据治理效率与稳定性。

3 系统实现与性能验证

3.1 系统实施环境与配置

系统实施选取某省会城市核心区作为示范区，覆盖主干道路、立交桥群及地下管网密集区域。移动巡检终端采用车载与手持双模式部署：车载终端通过磁吸底座固定于工程车顶，内置双天线GNSS接收机与4G通信模块；手持终端配备肩背式供电背包，集成惯性导航单元与工业平板。基准站网络依托既有测绘控制点建设，在半径15 km范围内布设3个参考站，每个站点架设扼流圈天线与防雷设备，通过光纤专线连接控制中心。这种配置保证全域厘米级定位覆盖，同时降低多路径效应影响。软件环境部署于城市信息中心云平台，采用容器化微服务架构。定位解算服务运行于8核32 GB内存的Docker容器，分配100 GB固态缓存空间；时序数据库集群采用3节点Redis-TimeSeries架构，存储周期设定为90天；关系型数据库使用PostgreSQL-PostGIS扩展，建立道路、桥梁、管线的三维拓扑模型。所有服务通过Kubernetes进行容器编排，设置自动伸缩策略应对巡检高峰期的并发请求。系统与市政设施管理系统通过OAuth2.0协议进行对接，实现设施属性信息的双向同步。

网络架构采用三层隔离设计：设备接入层通过APN专网传输原始观测值，带宽保障10 Mbit/s；数据处理层在政务专网运行，启用IPSec加密隧道；应用展示层通过负载均衡器提供互联网访问。网络安全组策略设置白名单访问控制，仅允许授权终端MAC地址接入。为应对极端情况，配置4G/北斗短报文双链路冗余，在网络中断时维持基础通信能力12 h。测试平台搭建过程分三阶段实施：首先在开阔场地进行72 h连续静态测试，验证设备稳定性与时钟同步精度；其次在模拟城市环境开展动态标定，利用激光跟踪仪建立真值参照系统；最终选择早高峰期的城市环路进行实景测试，同步采集高架桥伸缩缝、路灯基座等典型设施的定位数据。测试期间共部署12台移动终端，累计采集超过2 000 km轨迹数据，为系统优化提供基础数据集。

3.2 定位精度实验结果分析

在城市主干道测试场景中，系统水平定位精度表现出显著环境相关性。在开阔路段（9:00—9:15时段），误差值稳定维持在0.08~0.12 m区间；当车辆进入高层建筑群（9:16—9:30时段），多路径效应导致误差波动加剧至0.15~0.28 m；高架桥过渡段（9:31—9:45时段）因卫星信号短暂中断，惯性导航补偿期间出现0.35 m瞬时峰值。这种波动特性契合城市复杂环境的信号传播规律。桥梁监测场景数据揭示垂直精度特性。在跨江大桥动态测试中，系统高程定位误差均值为0.15 m，但在钢索区因金属结构干扰，误差短暂增至0.41 m。对比静态基准点测量数据，水平方向重复性精度达到0.03 m（1 σ ），高程方向为0.05 m（1 σ ），满足设施变形监测需求。值得注意的是，信号遮挡恢复后的收敛时间平均为8.2 s，较传统单频接收机缩短62%。定位误差采用均方根误差指标进行量化评估：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((X_i - \hat{X}_i)^2 + (Y_i - \hat{Y}_i)^2)} \quad (4)$$

式中：RMSE为平面位置均方根误差， n 为采样点数量， X_i 、 Y_i 为第 i 个采样点的真实坐标， $\hat{X}_i$ 、 $\hat{Y}_i$ 为系统输出的定位坐标。该公式客观反映空间离散点的综合定位偏差。地下管网巡检数据呈现特殊规律。当手持终端靠近井盖检测点时，金属井盖导致天线相位中心偏移，产生系统性0.12 m误差。通过补偿算法校正后，管线连接点定位精度提高至0.07 m。在行道树浓密区域，卫星可视数降至4颗时仍维持0.25 m精度，表明多源融合算法有效提升弱信号环境鲁棒性。

3.3 综合性能评估与应用展示

为全面验证系统性能，本研究从定位精度、系统稳定性与应用效果三个维度进行综合评估。在典型城市核心区实测

中，系统水平定位误差均值控制在 0.12 m 以内，较传统 RTK 方案提升 52%；在桥梁与地下管网等高干扰场景中仍保持高可用性，信号遮挡恢复时间缩短至 8.2 s，展现出优异的环境适应性。相关服务连续开展运行工作 30 天，系统整体可用性达 99.2%，没有出现重大数据丢失以及通信中断事件，足以验证其在高强度巡检任务开展过程中的可靠性。如表 1 所示，本系统在定位精度以及遮挡恢复、检测效率等核心指标上，和传统 RTK 巡检方案相比都实现了显著优化，尤其在复杂环境下的响应稳定性以及任务完成率方面展现出十分突出的优势。

表 1 系统与传统 RTK 巡检方案主要性能指标对比

指标项	水平定位 误差 /m	信号遮挡恢 复时间 /s	单点检 测效率	日均任务 完成率	服务 可用性
传统 RTK 巡检系统	0.25	21.5	1.0 倍	86.40%	95.10%
本系统 (高精度 GNSS)	0.12	8.2	3.0 倍	98.70%	99.20%
提升幅度	↓52%	↓62%	↑200%	↑14.2%	↑4.1%

在实际应用场景中，系统已经顺利完成部署工作，投入到城市桥梁支座以及管线节点、井盖等设施的巡检任务中。凭借厘米级的定位能力以及高频数据采集机制，系统能准确识别桥梁伸缩缝的微小位移、井盖错位等毫米级病害，来实现一站式自动标记以及任务派发的相关工作。移动终端会把采集到的各类数据实时上传到城市信息平台，支持相关管理人员开展远程查看巡检轨迹以及缺陷分布的工作，来实现巡检模式从“人工点巡”向“智能网巡”的转变。同时，系统还支持和 BIM 平台进行集成，完成设施数字化档案的搭建工作，为后续城市基础设施的运维决策提供对应的数据支撑。从整体评估结果来看，其具备稳定、高效、智能的巡检能力，已经拥有在智慧城市建设过程中进行规模化推广的应用潜力。

4 结语

本研究顺利开展了高精度 GNSS 城市设施巡检定位系统的搭建工作，借助多源数据融合以及自适应滤波算法来实现厘米级的定位精度。该系统在复杂的城市环境下呈现出极佳的稳定特性，把水平定位误差控制在 0.12 m 以内，检测效率提高了 3 倍。实际的应用场景验证了其在桥梁接缝监测以及地下管网检测等场景的有效性，极大程度上提升了设施隐患的识别能力。后续的研究工作会拓展 5G 边缘计算的集成内容，深化和数字孪生平台的联动，来推动城市基础设施智能运维体系的完善与发展。

参考文献：

[1] 张小成 .GNSS 测量技术在水下地形与高程测绘中的综合应用研究 [J]. 中国战略新兴产业 ,2025(8):128-130.

[2] 刘学习,朱守庆,陈国,等.基于全球统一坐标框架的 GNSS 精密轨道与钟差产品一致性分析 [J]. 测绘学报, 2025, 54(3):432-447.

[3] 张云秋,曹文继,赵冰,等.新型低功耗高精度 GNSS 定位系统的设计与研究 [J]. 现代传输, 2025(1):65-68.

[4] 冯钰玮,李芳芳,邹江,等.基于北斗技术的贵州电网高精度位置服务系统设计及建设方案 [J]. 电力勘测设计, 2025(1):21-25.

[5] 魏彦恒.矿区开采沉陷盆地动态三维建模研究 [J]. 能源与节能, 2025(2):75-79.

[6] 王明娟,杨峻巍,郭庆峰.高精度时频同步网络零值标定方法 [J]. 电讯技术, 2025, 65(1):68-73.

[7] 巴特尔,戚红建,曹懿程,等.GNSS 与 SINS 融合下的露天煤矿无人驾驶矿用卡车视觉惯性导航方法 [J]. 煤矿机械, 2025, 46(1):228-232.

[8] 石艳兵,陈富翔.基于 GNSS 算法北斗定位技术在大直径钢筋笼下放定位纠偏中应用研究 [J]. 中国水运, 2025(2):124-126.

【作者简介】

孙勇（1990—），男，安徽利辛人，硕士研究生，工程师，研究方向：三维地理信息与数字孪生、大地测量与卫星导航定位（GNSS）、地理信息系统（GIS）开发与应用等。

胡洋（1991—），男，陕西西安人，硕士研究生，研究方向：多源空间数据处理与服务化技术、空间数据轻量化与高效传输技术等。

冀宗童（1997—），男，江苏徐州人，硕士研究生，研究方向：三维地理信息与数字孪生、摄影测量与遥感（航空）等。

（收稿日期：2025-10-13 修回日期：2026-05-15）