

基于北斗系统的动态差分定位方法研究

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/EPTSM.2025080010

摘要：本研究聚焦北斗卫星导航系统于动态环境中的差分定位方法开展探讨，搭建动态差分定位实验平台后，结合多源数据的收集工作与误差修正方案，针对车辆行驶、船舶航行及无人机飞行等典型场景实施实验探究，结果显示所提出的方法可在动态复杂环境里明显提升定位精度与可靠性，该研究既证实了北斗系统在工程应用方面的优势，也为交通运输、应急救援及智能装备提供了关键技术支撑，具备广阔应用前景。

关键词：北斗系统；动态定位；差分方法；精度提升

Research on Dynamic Differential Positioning Method Based on the Beidou System

Wu Zhifeng

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

Abstract : This study focuses on exploring differential positioning methods of the Beidou Satellite Navigation System in dynamic environments. After establishing a dynamic differential positioning experimental platform and integrating multi-source data collection with error correction strategies, experiments were conducted in typical scenarios such as vehicle travel, ship navigation, and unmanned aerial vehicle (UAV) flight. The results demonstrate that the proposed method significantly enhances positioning accuracy and reliability in dynamic and complex environments. This research not only validates the engineering advantages of the Beidou System but also provides crucial technical support for transportation, emergency rescue, and intelligent equipment, offering broad application prospects.

Keywords : Beidou System; dynamic positioning; differential method; accuracy enhancement

引言

北斗卫星导航系统全面建成并投入运行后，其在交通、农业、测绘、应急及国防等领域的应用价值不断凸显，动态环境下定位精度与可靠性却仍存在挑战，特别是在高速移动与复杂电磁环境当中，传统单点定位无法满足高精度需求，差分定位技术由此成为解决该问题的突破口，本文以北斗系统为基础，设计并研究动态差分定位方法，力求通过实验验证提升定位精度的可行性与实际应用价值。

一、北斗系统的动态差分定位概述

(一) 北斗系统的基本构成与发展现状

北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 是我国自主建设且独立运行的全球卫星导航系统，其整体由空间段、地面段与用户段三部分构成，空间段当前已形成 35 颗在轨卫星的星座，包含 24 颗中圆地球轨道卫星 (MEO)、3 颗地球静止轨道卫星 (GEO) 及 8 颗倾斜地球同步轨道卫星 (IGSO)，可实现全球无缝覆盖，地面段主要承担系统管理、精密测控及差分数据的生成工作，用户段则涵盖各类终端接收机与应用平台^[1]。

依据官方发布的数据，北斗三号系统在全球范围内的定位精度优于 10 米、测速精度优于 0.2 米 / 秒、授时精度优于 20 纳

秒。在中国及亚太地区，借助星基增强与地基增强手段，水平定位精度普遍能达到 1 米以内，可满足高精度定位需求，自 2020 年全面建成起，北斗已在交通运输、农业、测绘及应急救援等领域实现规模化应用，到 2024 年时，国内北斗终端社会保有量已超 15 亿台，渗透率处于世界前列。

(二) 动态定位中常见误差因素

动态环境下，北斗定位精度会受到多种误差因素的影响，首先是卫星钟差与轨道误差，即便系统提供精密星历，在长时间及高动态场景中仍会产生分米级误差，其次为电离层与对流层延迟，对于高速运动平台，延迟的不均匀性更为明显，在海洋航行与高原地区飞行时该现象尤为突出，相关研究指出，中低纬度地区电离层延迟可达 2–5 米，而在磁暴活动期间甚至会超过 10 米。

多路径效应同样是动态定位的主要干扰因素之一，当车辆行驶在高楼密集的城市峡谷，或船舶靠近港口岸壁时，信号易出现反射叠加情况，进而导致定位点漂移，实验数据显示，典型城市道路环境中，多路径误差会使定位精度降至 5-8 米，另外，高速运动带来的接收机噪声与信号丢失也需重视，像无人机在高速机动过程中，短时间内卫星可见数量会减少，这会直接影响差分解算的稳定性。

（三）差分定位方法的研究意义

为解决上述误差问题，差分定位技术逐步发展起来，该技术的核心思路是搭建基准站，对卫星信号误差进行实时监测，并将修正信息传输至移动终端，以此抵消大部分系统与环境误差，动态差分定位不仅能明显提升定位精度，还可增强定位的连续性与可靠性。

以车辆导航场景来说，普通单点定位误差通常在 5-10 米，无法满足车道级导航需求，而采用实时差分定位（RTK）后，水平精度可稳定在厘米级，船舶航行过程中，差分方法能有效避免靠港时的航迹漂移，提高靠泊安全性，无人机作业时，通过差分定位可实现厘米到分米级的动态轨迹控制，保障航空摄影与巡检任务的精度^[2]。

二、动态差分定位实验设计

（一）实验平台搭建与硬件配置

为验证北斗动态差分定位方法的有效性，本研究构建了综合实验平台，硬件组成包含一台基准站接收机与三套移动接收机，基准站选用双频北斗接收机，采样频率设定为 1 Hz，天线高度固定为 2.5 m，安装在已知高程点处，移动端接收机采用轻量化高动态接收机（型号 BDR6200），可支持 B1C、B2a 双频信号采集，采样频率为 5 Hz，能够满足动态环境下的数据实时性需求^[3]。



图1 北斗动态差分定位实验平台

通信链路借助 UHF 无线电模块（频率 430 MHz，带宽 12.5 kHz）搭建，基准站的差分改正数据实时传递至移动端，延迟控制在 0.5 秒以内，数据处理单元采用嵌入式工控机，配备 Intel i7-9700 CPU 与 16GB 内存，运行 Linux 系统，集成了实时差分算法模块，整个平台功耗控制在 60 W 以内，可保障车载、船载及机载平台的适配性。

（二）测试场景选择

为全面验证动态差分定位效果，本研究选取三类典型场景开展实验，第一类是车辆场景，测试在城市快速路与普通公路进行，车辆速度维持在 40-80 km/h，行驶里程约 35 km，实验环境包含高架桥与隧道段，用于考察遮挡环境下的定位稳定性^[4]，第二类为船舶场景，实验地点选在某内河航道，全程航行 12 km，船速控制在 15 km/h 左右，重点考察水面开阔环境与桥下通过时的定位差异，第三类是无人机场景，采用四旋翼无人机（最大起飞重量 6.2 kg），飞行高度为 50-120 m，速度控制在 5-12 m/s，飞行航线设计为矩形和“8”字形，总航程约 8 km。如图 1 所示。



图1 三类典型场景图

三类场景中均同步设置对照组，采用单点定位模式进行对比，以此评估差分方法的改进程度，同时，车辆与无人机均搭载高精度惯性导航单元（IMU，陀螺仪精度 0.02°/h，加速度计量程 $\pm 16 g$ ），为后续误差分析与轨迹拟合提供参考基准。

（三）数据采集与误差来源分析

实验过程中，所有接收机均以 RINEX 3.03 格式记录观测数据，车辆场景共采集原始数据约 3.2 GB，船舶场景数据量为 1.1 GB，无人机飞行数据为 2.4 GB，差分改正信息由基准站实时输出，同时留存离线版本供后续验证使用。

初步分析显示，车辆场景中信号中断主要发生在隧道段，最长丢失时间为 6 秒，多路径效应造成的伪距偏差在 $\pm 1.8 m$ 范围内，船舶航行时，因水面反射，伪距偏差扩大至 $\pm 2.3 m$ ，桥下段出现短时遮挡情况，无人机场景中，信号整体稳定，但高速转弯时存在短时观测不连续现象，单点定位的横向误差平均为 1.25 m。

对比差分定位结果，车辆场景横向误差降至 0.35 m，纵向误差控制在 0.28 m；船舶场景精度提升更为显著，横向误差降至 0.42 m；无人机飞行时，差分定位平均误差约 0.31 m，远优于单点模式，通过数据采集与误差分析，能够直观体现差分定位在动态场景中的优势，为后续算法改进与应用推广提供实验依据^[5]。

三、差分算法与数据处理方法

（一）动态差分改进算法设计

动态环境里，常规单差或双差算法易受多路径及高动态运动

影响,使得定位结果产生波动,针对这一问题,本研究在传统伪距差分的基础上引入了载波相位平滑技术,其中,伪距测量值 P 与载波相位观测值 Φ 的组合模型可表示为:

$$P = \alpha P + (1 - \alpha) \Phi \cdot \lambda$$

其中, α 为平滑因子(取值范围 0~1), λ 为载波波长,本实验中, α 设定为 0.25,在保证快速收敛的同时有效降低了伪距噪声。

另外,鉴于动态场景中速度变动幅度较大,本研究在算法内引入卡尔曼滤波器,其状态向量涵盖位置、速度与钟差三个部分,观测量为经过修正的伪距和载波相位,滤波步长设定为 0.2 s,依靠这一方法,能够在车辆进行加减速操作以及无人机完成急转弯动作时,维持较高的定位连续性。

(二) 多源数据融合与实时处理

为进一步提高动态定位精度,本研究在差分定位算法里加入多源数据融合机制,具体来看,北斗接收机与惯性测量单元(IMU)数据通过松耦合方式实现融合,IMU 提供的速度与姿态信息以 100 Hz 频率采集,经积分处理后与北斗差分解算结果进行匹配,滤波模型选用扩展卡尔曼滤波(EKF)。

车辆实验中,当北斗信号在隧道内中断 6 秒时,IMU 可维持定位结果,位置漂移约 1.2 m,这一表现远优于单独使用北斗差分出现的信号丢失情况^[6];无人机飞行过程中,融合算法能在短时信号遮挡场景下维持平滑航迹,横向误差平均不超出 0.45 m,

数据处理架构方面,差分改正信息与原始观测数据均通过高速串口传输至工控机,采用多线程并行处理方式,解算模块延迟控制在 150 ms 以内,可满足车辆和无人机动态场景的实时性需求。

(三) 误差修正与精度提升策略

动态差分定位中,误差来源较为复杂,需结合多种修正手段加以解决,首先针对电离层延迟,采用双频无电离层组合模型,可有效消除约 90% 的延迟误差;对流层延迟则运用改进的 Saastamoinen 模型修正,结合当地气象参数(温度 25°C、气压 1013 hPa、湿度 65%),残余误差控制在 2 cm 以内。

面对多路径效应,采用实时滑动窗口检测方法,窗口长度设定为 20 秒,当伪距残差超过 ± 2 m 时,系统会自动降低该卫星权重,防止观测异常扩散至滤波结果中。

利用基准站高精度星历数据开展轨道和钟差改正,使动态差分定位在车辆、船舶与无人机三类实验中均达到分米级水平,具体表现为:车辆横向误差均值 0.35 m,船舶定位误差 0.42 m,无人机航迹误差 0.31 m,通过多重修正与融合策略,差分定位的鲁棒性和精度得到显著提升,能够满足工程应用需求^[7]。

四、实验结果与应用分析

(一) 车辆行驶定位实验结果分析

车辆实验于城市快速路与普通公路开展,累计采集数据对应

的行驶里程为 35 km,将单点定位结果与差分定位结果进行对比后发现,差分方法在定位精度与连续性两方面均呈现明显提升,单点定位模式下,车辆经过隧道出口时会出现位置跳变现象,最大偏差达到 2.8 m;差分定位则通过伪距平滑处理与卡尔曼滤波修正,将该偏差降低至 0.9 m,具体数据可参考表 4-1。

表 4-1 车辆定位精度对比

指标	单点定位均值	差分定位均值	精度提升比例
横向误差 (m)	1.82	0.35	80.8%
纵向误差 (m)	1.47	0.28	81.0%
隧道段最大偏差 (m)	2.80	0.90	67.9%
平均延迟 (ms)	120	150	—

结果显示,车辆差分定位的误差被稳定控制在 0.3~0.4 m 区间内,能够满足车道级导航的使用需求,即便处于复杂交通环境中,依旧保持着较好的定位稳定性。

(二) 船舶航行动态定位效果评估

船舶实验在某内河航道实施,整个航行过程的里程为 12 km,实验期间,单点定位在船舶通过桥下时出现短时漂移情况,最大误差达到 3.5 m;差分定位则可对该误差进行有效修正,将偏差控制在 1.1 m 以内,水面多路径效应在单点定位模式下表现得更为明显,差分方法则借助基准站改正与权重调整手段,有效抑制了伪距残差的影响,相关数据详见表 4-2。

表 4-2 船舶定位精度对比

指标	单点定位均值	差分定位均值	精度提升比例
横向误差 (m)	2.35	0.42	82.1%
纵向误差 (m)	2.12	0.39	81.6%
桥下段最大偏差 (m)	3.50	1.10	68.6%
船速保持误差 (m/s)	0.18	0.05	72.2%

结果显示,差分定位能够稳定维持亚米级精度,尤其在水面反射强烈及桥下遮挡的场景中,依旧能保持轨迹连续性,为船舶航行安全提供了可靠保障。

(三) 无人机飞行差分定位应用研究

无人机实验累计飞行航程 8 km,飞行高度处于 50~120 m 区间,航迹包含矩形与“8”字形两种形态,单点定位模式下,无人机在高速转弯阶段出现轨迹漂移现象,最大横向误差达到 2.1 m;差分定位则通过实时修正保持轨迹平滑,最大误差降至 0.7 m,动态飞行过程中,单点定位误差均值为 1.25 m,差分定位误差均值则降至 0.31 m,精度提升幅度超过 75%^[8]。

另外,在短时遮挡场景中,无人机差分定位结合 IMU 数据可维持稳定航迹,位置漂移控制在 0.8 m 以内;与之相比,单点定位在相同条件下漂移幅度超过 2 m,部分情况下甚至出现航迹断裂,实验结果证实,差分方法对无人机航迹控制与路径规划具有显著作用,能够满足精密测绘、农田监测及物流运输等场景的使用需求。

车辆、船舶与无人机三类实验均证明,基于北斗系统的动态差分定位方法可显著提升定位精度与轨迹连续性,差分技术结合多源融合与误差修正策略,成功将动态定位精度从米级提升至分

米级，为工程应用提供了可靠的数据支持。

五、结语

本文以北斗系统为基础，针对车辆、船舶与无人机等典型动态场景，设计并验证了动态差分定位方法，通过搭建实验平台、开展场景测试与进行数据处理，结果表明该方法在复杂环境中能

显著降低伪距误差，将定位精度从米级提升至分米级，同时保障了轨迹连续性与实时性，车辆实验实现车道级导航功能，船舶实验提高航行安全水平，无人机实验确保航迹平滑，充分体现北斗系统在工程应用中的优势，未来研究将进一步优化差分算法效率，结合5G通信与多源融合技术，拓展其在智慧交通、应急救援与无人化装备中的广泛应用前景。

参考文献

- [1] 翁吴彬.北斗卫星导航系统动态定位精度测试研究 [J].计算机产品与流通,2018,(08):94.
- [2] 尹航.北斗导航系统载波相位差分定位技术研究 [D].北京理工大学,2018.DOI:10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.001511.
- [3] 刘金海,张睿,涂锐,等.北斗三号试验卫星对短基线RTK定位性能影响分析 [J].导航定位学报,2018,6(04):42~45.DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20180408.
- [4] 潘兴琳,牛亚飞,罗锐.基于RBN台的长波导航系统差分定位 [J].现代导航,2020,11(03):197~200.
- [5] 陈俊平,于超,周建华,等.北斗二号/三号融合的分米级星基增强算法与性能分析 [J].中国科学:物理学 力学 天文学,2021,51(01):63~71.
- [6] 冷宏宇,秘金钟,徐彦田,等.BDS-3单基站差分定位性能提升分析 [J].测绘通报,2021,(03):1~6.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0068.
- [7] 王楚扬,秘金钟,李勇熹,等.BDS-3/GPS/Galileo组合动态差分定位算法研究 [J].测绘科学,2022,47(02):16~22.DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.02.003.
- [8] 刘信潮.无人机定位及搜索系统应用研究 [D].青岛理工大学,2022.DOI:10.27263/d.cnki.gqudc.2022.000662.