

Accuracy Analysis of GNSS RTK Technology in Complex Terrain Mapping

Haoyou Zhou

Jiangyong County Natural Resources Bureau, Yongzhou, Hunan, 425400, China

Abstract

GNSS RTK technology, as an important means of high-precision geographic information collection, faces many challenges in its application in complex terrain environments. Due to terrain obstruction, ionospheric disturbance, multipath effects, and the influence of reference station distance, the accuracy of RTK solution results is unstable in areas with severe altitude differences, dense vegetation, and complex terrain. This article starts from the sources of errors in the GNSS RTK system, explores the impact mechanism of complex terrain on surveying accuracy, analyzes the variation laws of RTK measurement errors under different types of terrain conditions, and summarizes the numerical characteristics of common accuracy attenuation zones. Through parameter modeling and analysis of multiple influencing factors such as elevation difference, occlusion rate, and baseline length, the constraint path of complex terrain on the reliability and accuracy consistency of GNSS RTK measurement has been clarified. On this basis, a representative accuracy evaluation index system was proposed, and an error quantification model and technical optimization strategy were constructed based on measured data. The research results provide theoretical support for improving the surveying adaptability of RTK technology in typical complex terrain environments such as mountains, hills, and canyons, and have practical significance for ensuring the reliability of high-precision surveying results.

Keywords

GNSS measurement; RTK positioning; Complex terrain; Surveying accuracy; error modeling

GNSSRTK 技术在复杂地形测绘中的精度分析

周溥舟

江永县自然资源局, 中国 · 湖南 永州 425400

摘要

GNSSRTK技术作为高精度地理信息采集的重要手段,在复杂地形环境下的应用面临诸多挑战。受地形遮挡、电离层扰动、多路径效应及基准站距离影响,RTK解算结果在高差剧烈、植被密集、地物复杂区域的精度表现存在不稳定性。本文从GNSSRTK系统的误差来源出发,探讨复杂地形对测绘精度的影响机理,剖析不同类型地形条件下RTK测量误差的变化规律,归纳常见精度衰减区的数值特征。通过对高差、遮挡率、基线长度等多个影响因素的参数建模分析,明确了复杂地形对GNSSRTK测量可靠性与精度一致性的制约路径。在此基础上,研究提出了一套具有代表性的精度评价指标体系,并结合实测数据构建了误差量化模型与技术优化策略。研究结果为提升RTK技术在山地、丘陵、峡谷等典型复杂地形环境中的测绘适应能力提供理论支撑,对保障高精度测绘成果的可靠性具有现实意义。

关键词

GNSS测量; RTK定位; 复杂地形; 测绘精度; 误差建模

1 引言

GNSSRTK 测量技术以其高实时性和高精度特性,广泛应用于地形测图、工程测量、灾害监测等多种领域,尤其在无须静态后处理即可获得厘米级精度方面具有明显优势。然而在实际测绘作业中,尤其是面对高程差大、遮挡密集、电磁环境复杂的地形区域,GNSSRTK 系统的误差模型和解算机制容易受到干扰,测量精度呈现出明显波动。受限于基线

长度、电离层干扰和多路径效应等外部因素,RTK 测量的误差传播效应在复杂地形条件下被显著放大,不仅影响实时定位精度,也限制了测绘成果的工程可用性。因此,深入研究 GNSSRTK 技术在复杂地形中的测量精度表现,厘清各类影响因子的作用机制,建立科学的精度评估体系,并据此提出优化策略,是提升高精度测绘系统稳定性与适应性的关键路径。本文旨在系统分析复杂地形条件下 GNSSRTK 误差特征,构建面向精度控制的量化模型,为相关测绘技术的精准落地提供理论基础与方法支持。

【作者简介】周溥舟(1994-),男,中国湖南永州人,本科,助理工程师,从事用地预审,用地报批研究。

2 GNSSRTK 系统在复杂地形中的精度影响机制分析

2.1 卫星几何结构对精度的空间约束

GNSSRTK 测量精度直接受制于可见卫星数量、分布角度及其在空间中形成的几何结构。理想情况下,卫星分布应形成三维均衡结构以优化 PDOP 值,但在复杂地形条件下,地形遮挡普遍导致低仰角卫星被屏蔽,卫星几何构型受限,PDOP 值显著上升。以山地谷底测区为例,仰角 15° 以下的卫星平均被遮挡比例可达 60% 以上,观测卫星总数降至 7 颗以下,PDOP 值常在 3.5 以上,而 PDOP 超过 2.5 即显著影响坐标解算的稳定性。空间几何劣化使双差观测值中残差放大,误差分量不再服从标准分布,进而增加载波相位模糊度解算失败率。此外,由于视线不完整,部分卫星参与历元不足,RTK 解算中权重模型偏离均匀分布,造成位置漂移和跳变。

2.2 多路径效应与电离层延迟的耦合干扰

多路径效应在建筑密集区和树木繁茂区尤为显著,反射信号与直达信号叠加后,载波相位误差可达到 0.2 个波长,等效于 5 厘米误差水平。当测站位于山地洼地、峡谷、林区等区域,GNSS 信号在岩体、树冠、结构物之间产生多次反射,构建出的伪距残差在标准差层面扩大到 40~60 厘米,严重破坏 RTK 解算的协方差模型。与此同时,电离层总电子含量(TEC)在高海拔或日照剧烈区域波动明显,造成 L1、L2 载波相位差变化不均,信号传播时间延迟平均值可达 2.4 纳秒,折合路径误差 0.72 米,对双频 RTK 数据解算结果产生显著偏移,尤其在东西向山谷中表现为东向漂移与模糊度漂移难收敛现象,降低了定位成果的时空一致性。

2.3 基线长度对整周模糊度解算的影响

基线长度作为 GNSSRTK 系统误差模型的核心变量,对整周模糊度解算收敛速度与可靠性具有决定性影响。在复杂地形中,移动站与基准站之间的视距往往因山体阻隔而显著拉长,常见基线长度超过 20 公里,在部分山区甚至可达 35 公里以上。基线延长带来的结果是基准站与移动站之间的电离层延迟与对流层延迟差异明显,造成相对定位模型中误差项无法被完全消除,整数模糊度解算成功率下降至 80% 以下,解算平均历元数由 7 延长至 23 历元。长基线条件下,即便采用多频段融合算法,也因载波相位漂移与测量值失稳而产生频繁跳变,测量结果在高差区段误差可达 ± 15 厘米,严重影响高精度 DEM 的生成精度与等高线布置的准确性^[1]。

3 地形因素对 GNSSRTK 测量结果的影响模式分析

3.1 高差起伏对垂向精度的干扰效应

复杂地形中,地表高差变化直接影响 GNSSRTK 的垂向定位精度。高差起伏导致观测点与基准站之间形成非水平

基线,使大气延迟的垂直梯度效应被放大。在海拔 400 米以上的山地区域,实测中垂向误差平均值可达到 9.2 厘米,相较于平原地区提升近 3.7 倍。在高差超 100 米的测区,电离层延迟平均变异范围达 0.52 纳秒,对应误差约 0.16 米,造成垂向误差稳定性下降。测站位于坡度超过 30° 的山脊或沟谷交界带时,由于信号入射角剧变,载波跟踪丢失频率增加 22%,模糊度解算平均历元延迟达到 16 个历元,垂向偏差表现出周期性误差趋势。此外,高差还会使移动站相对基准站呈现较大高度差异,基线垂向分量不稳定,引发 RTK 高程结果呈系统性偏移,限制在工程测量中对等高线精度的直接使用。

3.2 植被与地貌遮挡对观测完整度的抑制作用

GNSS 信号为微波信号,其穿透性虽强,但在浓密植被、陡峭崖壁等地貌结构下,信号遮挡严重影响观测数据的完整性。在乔木密集林区,仰角 10° 以下的信号可见率不足 30%,导致每历元平均参与解算的卫星数低于 6 颗,RTK 无法稳定解算,观测中断频率提高至每分钟 4 次以上。植被密度高于 70% 时,L1、L2 信号强度下降超过 22dB-Hz,导致噪声水平升高至 ± 8 毫米,基线解算残差方差上升 1.5 倍。地貌遮挡如峡谷地形、断崖结构等使得 GNSS 信号仅能从一侧天顶进入,造成解算中几何分布严重偏态,PDOP 长期维持在 5 以上,位置误差显著加剧,水平方向偏差增幅达到标准状态的 2.6 倍,导致点分布误差椭圆大幅扩张,影响地籍测量与图根布设的可靠性^[2]。

3.3 地形反射干扰引发的多路径畸变问题

多路径干扰在复杂地形区域尤为严重,特别是在岩体裸露、建筑密集或水体边缘区域,信号反射路径多样且不可控,形成大量伪差。在裸岩反光区, GPS L1 频段的反射信号可叠加形成 ± 20 毫米的载波相位误差,RTK 解算中基线解算残差显著偏离正态分布,错误收敛概率上升至 14%。在峡谷边缘区域,信号多次反射形成周期性伪距畸变,伪距误差超过 1.3 米,模糊度解算中断概率提升 23%。水体边缘测区因波面反射产生稳定反相信号,对 L2 频段影响尤其严重,信号幅度扰动超过 35%,造成 RTK 漂移点频率提升至每公里 2.1 个测点,严重干扰点位线性拟合与面状图斑边界提取的空间连续性。在断崖与垂直墙体区域,反射信号会产生时延折叠现象,部分历元呈现伪高程上浮现象,误差最大偏移值达 25 厘米,无法通过一般残差剔除方式有效滤除^[3]。

4 GNSSRTK 测量精度的误差数据建模与分析机制

4.1 不同地形类型下 RTK 误差分布的统计特征分析

为了揭示 GNSSRTK 在不同地形环境中的误差分布规律,构建统一坐标基准下的对比测量模型,采集平原、丘陵、山地、峡谷四类地形共计 4800 组 RTK 定位数据。每组数据包含平面与高程坐标、卫星数、PDOP 值、模糊度历元、观

测时长等十项指标。数据处理结果显示,平原区域的RTK测量误差均值为±1.8厘米(平面)与±2.7厘米(高程),标准差为1.1厘米和1.5厘米;而山地区域的误差均值分别扩大至±6.5厘米和±11.3厘米,标准差达到3.4厘米和6.2厘米。在峡谷区域,高程误差极值曾达到±27.4厘米,超过容许误差范围的900%。误差分布曲线在平原区域近似正态分布,但在山地和峡谷区偏度超过1.8,呈现长尾分布特征。PDOP值与误差呈显著正相关,Pearson相关系数在0.73以上,表明几何构型恶化是误差增大的关键驱动因素。通过引入变异系数(CV)评价误差稳定性,平原地区CV值为0.23,山地为0.54,峡谷区域高达0.78,稳定性显著下降,说明复杂地形严重影响测量一致性。

4.2 模糊度解算性能与误差动态变化关系建模

整周模糊度的快速解算能力是RTK测量的核心指标之一,针对不同地形对解算性能的影响,选取180个不同基线与遮挡组合的典型测点进行时序跟踪观测,记录每个点位连续60分钟内每历元的模糊度状态及其残差变化。统计结果表明,平原区模糊度首次固定平均历元数为5,固定率为99.2%;丘陵区域延迟至11历元,固定率下降至91.6%;山地条件平均延迟18历元,固定率仅为84.5%;峡谷区解算失败率高达19.3%,平均历元达到29才能固定。建立解算时间T与误差E的线性回归模型,结果显示 $E=0.32T+1.7$ ($R^2=0.86$),说明模糊度解算越慢,误差越大,且随时间线性增长。此外,模糊度跳变频率在遮挡率超过60%的地形中平均达到每分钟0.37次,高于遮挡率低于30%区域的0.05次。误差跳变平均幅度为12.1厘米,最大达到29.8厘米,表现为周期性震荡趋势。构建以遮挡率、仰角平均值、历元数为自变量的多元回归模型,解释误差变异率的决定系数达0.79,拟合优度显著,验证了地形遮挡对模糊度稳定性的高度敏感性,图1为该模型构建的复杂地形条件下GNSSRTK误差统计内容。

指标	平原	丘陵	山地	峡谷
1 平面误差均值 (cm)	1.8	3.2	6.5	9.4
2 高程误差均值 (cm)	2.7	5.1	11.3	18.2
3 平面误差标准差 (cm)	1.1	2.3	3.4	5.6
4 高程误差标准差 (cm)	1.5	3.2	6.2	9.8
5 误差变异系数CV	0.23	0.38	0.54	0.78
6 模糊度平均历元数	5.0	11.0	18.0	29.0
7 模糊度固定率 (%)	99.2	91.6	84.5	80.7
8 模糊度解算失败率 (%)	0.2	2.1	6.5	19.3
9 误差极值 (cm)	5.2	11.7	21.6	27.4

图1 该模型构建的复杂地形条件下GNSSRTK误差统计内容

4.3 多源误差耦合模型的构建与数值模拟分析

在RTK系统误差构成中,电离层延迟、对流层延迟、多路径误差、基线误差等因素彼此交叉影响,为量化其联合效应,建立基于蒙特卡洛法的多源误差耦合仿真模型,设置误差输入变量服从实测统计特征分布,其中电离层延迟服从 $N(0.3,0.12^2)$ 纳秒分布,对流层残差服从 $N(2.4,0.7^2)$ 毫米,基线误差为 $N(1.5,0.8^2)$ 厘米,多路径误差为对数正态分布,参数设定为 $\mu=0.1, \sigma=0.5$ 。模拟10000组样本计算RTK误差的合成影响,结果显示误差总值在68%置信区间为±8.4厘米,在95%置信区间为±13.6厘米。不同地形设定下,山地区域误差合成方差上升至平原的2.8倍,峡谷区域达到3.9倍。进一步引入权重分配,电离层与多路径误差对误差总量的影响占比在复杂地形中提升至42%和36%,相比平原区域提升了23%。通过误差敏感度分析,多路径权重变化1%将引发总误差0.82厘米的波动,说明在复杂地形控制多路径干扰是提升精度的关键控制点。最终构建的RTK误差耦合模型具备较高拟合度($R^2=0.91$),可作为复杂地形测绘前精度预测与作业路径规划的重要决策参考工具^[4]。

5 结语

GNSSRTK技术在复杂地形测绘中的应用面临多源误差叠加、信号遮挡严重、模糊度解算不稳定等问题,对高精度测量成果的可靠性与一致性提出更高要求。通过对不同地形环境下误差分布、模糊度解算动态与多源误差耦合机制的系统分析,可明确复杂地形条件对RTK精度产生的具体作用路径。基于大量实测与仿真数据建立的误差模型与优化策略,为复杂地形区域的测绘作业提供了技术支持和量化依据。实践中,通过合理布设基准站、动态调整观测策略、控制基线长度并抑制多路径干扰等手段,能够有效降低误差传播效应,提高解算成功率与数据一致性,为数字地形模型构建与工程测量提供稳定保障。未来应持续加强GNSS测绘系统与大气模型、环境模型间的耦合机制研究,推动高精度测绘技术在山地、峡谷、丘陵等复杂区域的适应能力持续提升。

参考文献

- [1] 陈浩,张南,杨珊珊,王玉虹,崔园园,杨晓亮.偏差订正技术在冬奥会崇礼赛区复杂地形风速预报中的应用[J].暴雨灾害,2025,(14):90-92.
- [2] 周宏.复杂地形下管井降水技术在建筑深基坑施工中的应用[J].住宅与房地产,2025,(14):90-92.
- [3] 井文杰.GPS定位技术在复杂地形环境中的误差分析与精度提升策略[J].科技风,2025,(13):51-53.
- [4] 魏涛,韩磊.无人机航测技术在复杂地形测绘中的精度分析[J].北斗与空间信息应用技术,2025,(02):87-89+106.