引文格式：王明亮,关沧海,马少华. 精密单点定位在基准站稳定性分析中的可行性研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):88-91. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.02.018

精密单点定位在基准站稳定性分析中的可行性研究

王明亮，关沧海，马少华
（自然资源部第二大地测量队，黑龙江 哈尔滨 150025）

摘　要：精密单点定位（precise point positioning，PPP）技术在诸多地学研究及工程应用中得到了广泛应用，包括低轨卫星定轨、大地测量、地面沉降监测及低等级控制网建立等。随着北斗三号系统的全球组网，利用BDS-3及多系统组合开展精密单点定位成为研究热点。利用黑龙江省不同纬度的基准站24 h静态观测数据，开展基于BDS-3单系统、GPS单系统及二者组合的精密单点定位性能分析，旨在为黑龙江全省范围内的基准站稳定性分析提供数据支撑。结果表明，BDS-3单系统PPP在N、E、U方向的平均精度为1.1、1.3、0.4 cm；GPS单系统PPP在N、E、U方向的平均精度为1.3、1.1、1.2 cm；BDS-3与GPS组合系统PPP在N、E、U方向的平均精度为1.2、1.4、0.7 cm。可见精密单点定位坐标结果能够用于基准站稳定性快速研判分析，可满足基准站位移和沉降的监测需求。

关键词：精密单点定位；卫星导航定位基准站；稳定性；北斗三号系统
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0088-04

Feasibility Study of Precise Point Positioning in Stability Analysis of Reference Station

WANG Mingliang, GUAN Canghai, MA Shaohua
(The Second Geodetic Surveying Institute of Ministry of Natural Resources, Harbin 150025, China)

Abstract: Precise point positioning (PPP) technology has been widely used in many geoscience research and engineering applications, including low-orbit satellite orbit determination, geodesy, surface subsidence monitoring and low-level control network establishment. With the global networking of BDS-3 system, the use of BDS-3 and multi-system combination to carry out PPP has become a research hotspot. In this paper, we used 24 h static observation data of reference stations at different latitudes in Heilongjiang Province to carry out the performance analysis of PPP based on BDS-3, GPS and their combination, aiming to provide data support for the stability analysis of reference stations in Heilongjiang Province. The results show that the average accuracy of PPP in N, E and U directions of BDS-3 is 1.1 cm, 1.3 cm and 0.4 cm. The average accuracy of PPP in N, E and U directions of GPS is 1.3 cm, 1.1 cm and 1.2 cm. The average accuracy of PPP in N, E and U directions of combination system is 1.2 cm, 1.4 cm and 0.7 cm. It can be seen that the coordinate results of PPP can be used for rapid stability research and analysis of reference station, and meet the monitoring requirements of displacement and settlement of reference station.

Key words: PPP, GNSS reference station, stability, BDS-3

精密单点定位（precise point positioning，PPP）技术是区别于网络RTK定位的一种不需要网络信号的高精度定位方法，该技术利用一台卫星信号接收机，采用高精度的卫星轨道和卫星钟差，通过模型改正/参数估计等方法对影响定位精度的误差（主要包括卫星端误差、接收机端误差以及卫星信号传播路径上的误差）进行消除，从而获得厘米级甚至毫米级坐标[1]。在PPP技术的早期实现中，浮点解PPP一直广泛应用，它不固定载波相位的整周模糊度，因此精度受限于模糊度的浮点估计。近些年来，国内外学者对于PPP的研究重心，已经从浮点解PPP向固定解PPP转变，随着研究的深入，固定解PPP技术已经越来越成熟[2]。

目前已有很多学者研究组合PPP，包括GPS/Galileo组合、GPS/BDS组合、GPS/Galileo/QZSS组合以及BDS/GPS/Galileo/GLONASS组合等，但各有侧重[3-11]。

本文在黑龙江省范围内按纬度2°间隔选取11个基准站，分别采用单北斗三号系统（BDS-3）、单GPS卫星系统及二者组合定位并固定整周模糊度的方式，分析精密单点定位技术对于不同纬度上基准站的水平位移与垂直沉降监测精度，为黑龙江省基准站稳定性分析提供数据支撑，从而进一步提升全省网络RTK服务的稳定性和可靠性。

第一作者简介：王明亮（1981—），硕士研究生，正高级工程师，主要从事基础测绘和自然资源调查监测等项目的生产、质量和技术管理等工作，E-mail：36859483@qq.com。

1　PPP数学模型

精密单点定位通常使用双频观测值，用以消除电离层对卫星信号的干扰，采用精密钟差产品消除卫星钟差项。双频无电离层组合观测值的观测方程[12-14]为：

$$P^i_{IF,k}=\rho^i_k+c(t_k-t^i)+o^i_k+T^i_k+c(d_{IF,k}-d^i_{IF})+\varepsilon_{P^i_{IF,k}}$$

$$L^i_{IF,k}=\rho^i_k+c(t_k-t^i)+o^i_k+T^i_k+c(u_{IF,k}-u^i_{IF})+\lambda_{IF}N^i_{IF,k}+\varepsilon_{L^i_{IF,k}}$$

式中，$P^i_{IF,k}=\dfrac{f_m^2P^i_{m,k}-f_n^2P^i_{n,k}}{f_m^2-f_n^2}$ 为伪距无电离层组合观测值；$L^i_{IF,k}=\dfrac{f_m^2L^i_{m,k}-f_n^2L^i_{n,k}}{f_m^2-f_n^2}$ 为相位无电离层组合观测值；$d_{IF,k}=\dfrac{f_m^2L_{m,k}-f_n^2d_{n,k}}{f_m^2-f_n^2}$ 为接收机伪距无电离层硬件时延；$d^i_{IF}=\dfrac{f_m^2d^i_m-f_n^2d^i_n}{f_m^2-f_n^2}$ 为卫星伪距无电离层硬件时延；$u_{IF,k}=\dfrac{f_m^2u_{m,k}-f_n^2u_{n,k}}{f_m^2-f_n^2}$ 为接收机相位无电离层硬件时延；$u^i_{IF}=\dfrac{f_m^2u^i_m-f_n^2u^i_n}{f_m^2-f_n^2}$ 为卫星相位无电离层硬件时延；$\lambda_{IF}=\dfrac{c}{f_m^2-f_n^2}$ 为无电离层载波波长；$N^i_{IF,k}=f_mN^i_m-f_nN^i_n$ 为无电离层模糊度；$\varepsilon_{P^i_{IF,k}}$ 为伪距无电离层组合观测值的多路径效应和测量噪声；$\varepsilon_{L^i_{IF,k}}$ 为相位无电离层组合观测值的多路径效应和测量噪声，m、n 代表不同的载波频率。

2　PPP数据处理策略

2.1　数据来源

本文实验数据采用HLJCORS不同纬度基准站采集到的观测时间为2023年10月27日（年积日300）的静态观测数据，共计11座站点，观测时长均为24 h，Rinex文件版本采用3.04。所有站均配备了华测CHC P5接收机，天线类型为TRM59900.00 SCIS，该型号接收机可以采集BDS/GPS/GLONASS/Galileo四个卫星系统的GNSS观测数据。所选基准站分布如图1所示。

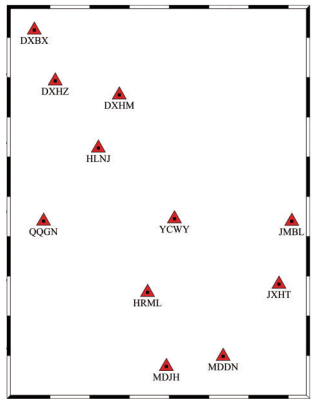


图1　基准站分布示意图

2.2　处理策略

本文以GAMIT/GLOBK计算的各站点坐标作为真值，与采用PRIDE PPP-AR V2.2软件[15-16]解算得到的结果进行比较。参考框架采用ITRF2020，天线相位中心改正文件使用igs20.atx。11座基准站的GAMIT/GLOBK平差计算坐标精度如表1所示，从表中可见，平差计算坐标精度的一致性较好。

表1　GAMIT/GLOBK平差计算坐标精度

统计项	NRMS/mm	ERMS/mm	URMS/mm
最小值	0.1	0.1	0.1
最大值	0.4	0.2	1.0
平均值	0.2	0.1	0.6

为对比分析BDS-3和GPS系统的定位精度，本文采用相同的数据处理策略分别处理BDS-3卫星观测数据、GPS卫星观测数据以及二者组合的观测数据，使用的频点为BDS-3 B1I/B3、GPS L1/L2。具体的数据处理策略如表2所示。

表2　PPP数据处理策略

参数项	处理策略
观测值	无电离层组合观测值
卫星系统组合	单BDS-3/单GPS/BDS-3+GPS
解算模式	事后静态
采样间隔	30 s
截止高度角	10°
卫星轨道	武汉大学精密轨道产品
卫星钟差	武汉大学精密钟差产品
相对论效应	模型改正
天线相位缠绕	模型改正
电离层延迟	二阶电离层改正
对流层投影函数	VMF3
天顶对流层估计	STO（逐历元估计）
对流层水平梯度估计	PWC（分段常值估计）
模糊度固定方法	取整法
接收机钟差	白噪声估计

3　PPP数据处理与分析

3.1　可见卫星数分析

对覆盖黑龙江省境内的11座基准站数据进行分析，得到BDS-3和GPS系统的可见卫星数量如表3所示。分析表明，BDS-3系统在卫星可见性方面展现出显著优势，卫星数量平均比GPS多出3颗。无论是最南端的MDJH站，还是最北端的DXBX站，BDS-3系统都能保持平均13颗可见卫星的稳定表现，而GPS系

统则平均为10颗可见卫星。这一显著差异意味着，在更大范围的地理区域内使用BDS-3系统进行PPP定位时，能够获取更多的卫星观测数据。更多的卫星观测数据可以改善定位解算的几何精度因子（GDOP），降低位置解算中的误差，特别是在平面位置精度和垂直位置精度方面。

此外还表明，黑龙江省区域内使用BDS-3和GPS系统进行测量作业时，完全能够满足《全球定位系统（GPS）测量规范》（GB/T18314-2009）中对于同步观测有效卫星数（≥4颗）和有效观测卫星总数（≥6颗）的要求。

3.2 外符合精度分析

分别采用BDS-3、GPS和BDS-3/GPS组合进行精密单点定位解算。

结果表明对于BDS-3单系统、GPS单系统以及二者组合系统，各站点在N方向、E方向、U（上方向）3个维度上的定位误差均实现了厘米级精度的控制。BDS-3在N、E、U方向的平均精度为1.1、1.3、0.4 cm；GPS在N、E、U方向的平均精度为1.3、1.1、1.2 cm；组合系统在N、E、U方向的平均精度为1.2、1.4、0.7 cm。从统计结果来看，无论是单独使用BDS-3系统，还是单独使用GPS系统，亦或是将两者进行组合定位，其PPP数据处理结果均能够达到规范要求，尤其是各方向上的定位误差均优于2 cm，这表明PPP定位具备开展站点稳定性分析的能力。

值得注意的是，在N、E、U 3个方向中，U方向的平均精度表现最佳，这可能是由于BDS和GPS两种系统解算出的坐标结果在误差方向上表现出较强的一致性，导致误差相互抵消，从而使得垂直方向的精度显著优于水平方向。同时可发现，组合系统在U方向的精度要略差于BDS-3，其可能主要由硬件延迟差异和轨道/钟差产品一致性影响。硬件延迟方面，BDS-3与GPS的接收机端伪距/相位硬件延迟存在系统间偏差，在组合PPP模糊度固定过程中，未完全校准的硬件延迟残差会通过无电离层组合放大，尤其影响垂直方向；轨道/钟差产品一致性方面，武汉大学精密产品的BDS-3与GPS轨道对齐精度存在亚厘米级差异，多系统组合时可能因参考框架不一致导致垂直方向误差累积。

在实际应用中，BDS-3系统的静态PPP定位性能已经处于与GPS相当的水平，在某些特定方向上甚至展现出一定的精度优势。这表明BDS-3系统在提高PPP定位精度方面具有良好的发展潜力和应用前景。通过进一步优化北斗三号系统的性能，结合精密轨道模型、卫星钟差改正数等精密数据产品，并加强对大气延迟、地球曲率改正等因素的精确建模和控制，可以有效提升PPP定位的准确性和可靠性。这些技术改进不仅有助于提高单点定位精度，同时也为BDS-3系统在精密工程测量、地壳形变监测等领域的广泛应用奠定了坚实基础。

为进一步综合对比不同方向、不同卫星系统的定位精度，统计结果如图2、3、4所示。

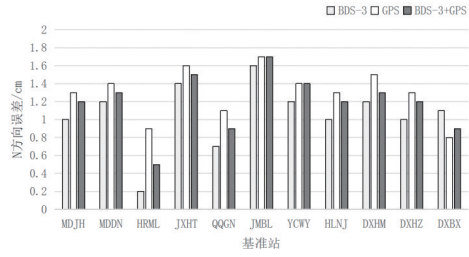


图2 各基准站N方向PPP定位结果与真值较差

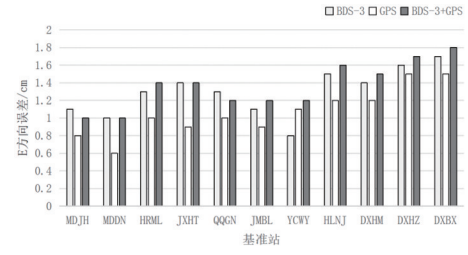


图3 各基准站E方向PPP定位结果与真值较差

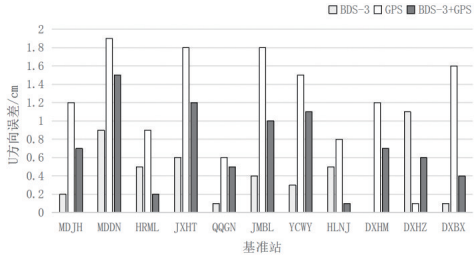


图4 各基准站U方向PPP定位结果与真值较差

从上图整体来看，BDS-3系统在北向（N）和上向（U）方向的定位误差最小，这主要得益于BDS-3系统的最新卫星布局和更高精度的星载原子钟技术。相比之下，GPS系统在东向（E）方向表现最佳，这与其成熟稳定的信号传播特性和强大的多路径效应抑制能力有关。虽然在实测精度上存在一定的差异，但三者的误差量级均保持在毫米级范围内，这种微小的差异在基准站稳定性判断中可以忽略不计。

值得注意的是，不同纬度的基准站显示出一定的定位精度差异，但这种差异并不显著，位于较高纬度的基准站（如DXBX、DXHZ、DXHM、HLNJ等）在E方向的平均误差稍高于低纬度基准站，经分析各站的数据有效率和多路径误差（仅统计GPS和BDS-3），其结果如表3所示。

表3　站点数据质量统计表

站点代码	数据有效率/%	MP1/m	MP2/m
MDJH	99.41	0.08	0.07
MDDN	98.94	0.07	0.10
HRML	99.03	0.08	0.09
JXHT	99.49	0.08	0.08
QQGN	98.98	0.07	0.06
JMBL	98.80	0.17	0.17
YCWY	97.26	0.08	0.13
HLNJ	99.32	0.05	0.04
DXHM	99.07	0.07	0.09
DXHZ	98.49	0.09	0.10
DXBX	98.82	0.10	0.22

从上表可看出，所有站点的数据有效率均大于98%，多路径效应均小于0.3 m，其中JMBL和DXBX的多路径误差略大，但是JMBL的E方向误差较小，可见多路径效应不是影响高纬度站点E方向误差的主要因素，主要可能与高纬度地区卫星几何分布和信号传播条件有关。

从数据处理角度看，基于本文采用的PPP软件版本和实验数据计算得到的组合系统的平均精度相较于BDS-3单系统略低，主要原因在于GPS单系统的PPP计算结果平均精度略差，这对组合系统的整体平均精度产生了拉低效应，但这种差距在实际应用中并不显著，因为组合系统能够通过多系统间的互补性有效提高定位鲁棒性。

4　结　语

本研究以黑龙江省不同纬度的11个基准站为研究对象，对比分析了单BDS-3系统、单GPS系统以及组合系统在坐标精度、卫星可见性和定位稳定性等方面的表现。成果不仅验证了单北斗系统在测绘基准维持中的技术可行性，更为东北亚高纬度区域推广单北斗系统应用提供了数据实证和实践依据，特别是对于需要高精度定位服务的行业，展现了北斗系统的实用价值和潜力，有助于推动国土测绘、交通运输等领域逐步实现从“北斗优先”向“北斗唯一”的技术转型，为构建自主可控的时空基准体系提供了可靠的技术路径。

参考文献

[1] 中华人民共和国自然资源部. 卫星导航定位基准站网运行维护技术规范:GB/T 39618-2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020

[2] 魏二虎,刘学习,王凌轩,等. BDS/GPS组合精密单点定位精度分析与评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(11):1654-1660

[3] 吕伟才,高井祥,刘天骏. GPS/Galileo精密单点定位模糊度解算与实验分析[J]. 测绘科学,2019,44(11):195-204

[4] 宋大鹏,李玉海,崔素梅,等. GPS/Galileo/QZSS精密单点定位精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(5):63-67

[5] 高猛,孟子恒. GPS/BDS/Galileo/GLONASS实时精密单点定位性能评估[J]. 导航定位学报,2024,12(4):90-98

[6] 孙大伟,艾孝军,贾小林,等. BDS/GNSS精密单点定位性能分析[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(11):1111-1116

[7] 祝会忠,杨添宇,赵洪涛,等. GNSS多系统精密单点定位方法与性能分析[J]. 测绘科学,2020,45(12):1-7

[8] 师思超,武文锐. BDS-2/BDS-3/GPS精密单点定位精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(6):68-71

[9] 薛二锋,吕登申,赵廷宝. GNSS-PPP多系统多频点组合定位精度分析[J]. 导航定位学报,2023,11(4):145-150

[10] 王胜骞,韩琦,王星,等. 北半球高纬地区北斗三号定位性能分析[J]. 地理空间信息,2022,20(3):92-96

[11] 林晓静. 基于PPP技术的省级CORS站点速度场及稳定性研究[J]. 地理空间信息,2022,20(8):24-26

[12] 惠星国,张斌,高春伟. GPS/BDS精密单点定位解算精度对比分析[J]. 青海大学学报,2019,37(3):75-79

[13] 杨诗妮,何丽娜,戴伟成,等. 不同纬度GPS/BDS-3精密单点定位性能分析[J]. 甘肃科学学报,2024,36(1):72-78

[14] 邵先锋,刘流,贾雪. 多GNSS系统组合PPP定位精度评估[J]. 地理空间信息,2021,19(4):44-50

[15] 赵忠海,岳昊,关沧海. 基于PRIDE PPP-AR的精密单点定位精度分析[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(9):37-39

[16] 宋开放,乔书波,肖国锐,等. 基于不同模糊度固定产品的PPP-AR定位性能评估[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(10):997-1002

(上接第87页)

湖水质参数反演[J]. 人民长江,2020,51(3):205-212

[11] 龚绍琦,黄家柱,李云梅,等. 水体氮磷高光谱遥感实验研究初探[J]. 光谱学与光谱分析,2008,27(4):839-842

[12] 赵松,侯毅凯,张安兵,等. 基于无人机多光谱影像的滏阳河水质遥感反演[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(3):81-85

[13] 陈洁,张立福,张红明,等. 白洋淀水体总磷总氮高光谱估算模型比较[J]. 遥感学报,2023,27(7):1642-1652

[14] 周艺,周伟奇,王世新,等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. 水科学进展,2004,4(3):312-317

[15] 樊志强,王志国,黄平平,等. 基于高光谱影像湖泊叶绿素a浓度反演分析[J]. 生态科学,2023,42(1):121-128