引文格式:梅登奎,董明承远,张小红,等.南极BDS/GNSS精密单点定位性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1313-1323.DOI:10.13203/j.whugis20260073

Citation:MEI Dengkui,DONG Mingchengyuan,ZHANG Xiaohong,et al.Performance Evaluation of Antarctic BDS/GNSS Precise Point Positioning[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(7):1313-1323.DOI:10.13203/j.whugis20260073

南极BDS/GNSS精密单点定位性能评估

梅登奎[1] 董明承远[1] 张小红[1,2] 赵变利[3]

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 国家基础地理信息中心,北京,100830

摘 要:当前我国极地科学考察对高精度全球导航卫星定位(global navigation satellite system,GNSS)服务需求日益迫切。基于南极国际GNSS服务组织测站,以及中国第41次南极科学考察期间昆仑站(KUNL)和泰山站(TAIS)的GNSS观测数据,从卫星可见数、定位精度、初始化时间及模糊度固定率等方面,系统评估了2024年3月1日—10日北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)/GNSS在南极高纬度地区的精密单点定位(precise point positioning,PPP)性能,并对比了2024年3月24日磁暴事件对极区PPP定位性能的影响。结果表明,南极CAS1、DAV1、TAIS和KUNL测站上空可见卫星数达50~60颗,单频标准单点定位(standard point positioning,SPP)平均定位精度约为2.7~3.3 m,双频SPP平均定位精度提升至2.0 m左右。与SPP相比,各个测站在单BDS或单Galileo系统条件下,其静态和动态PPP固定解定位精度可达厘米级,而TAIS和KUNL站单GPS系统静态PPP固定解定位误差为分米级。多系统融合(GPS/BDS/Galileo)可明显改善PPP定位精度,缩短初始化时间,并提升模糊度固定率;其中CAS1和DAV1站GPS/BDS/Galileo多系统融合PPP固定解平均初始化时间可缩短至12 min左右。相比之下,动态PPP定位性能总体上不及静态PPP。此外,磁暴期间南极不同测站各系统的PPP固定解平均三维定位误差明显增大,初始化时间也显著变长,这与磁暴期间电离层扰动增强有关。

关键词:精密单点定位;南极;GNSS;北斗卫星导航系统;磁暴;定位性能评估

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-03-04

DOI:10.13203/j.whugis20260073 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1313-11

Performance Evaluation of Antarctic BDS/GNSS Precise Point Positioning

MEI Dengkui[1] *DONG Mingchengyuan*[1] *ZHANG Xiaohong*[1,2] *ZHAO Bianli*[3]

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

Abstract: **Objectives**: With the continuous expansion of China's polar scientific expeditions, the demand for reliable and high-precision global navigation satellite system (GNSS) positioning services in Antarctica has become increasingly prominent. However, the Antarctic inland region is characterized by extremely harsh environmental conditions, sparse infrastructure, and limited communication capability, making it difficult to establish dense continuous GNSS observation networks or ground-based augmentation systems. Under these conditions, precise point positioning (PPP), which enables high-precision positioning using a single receiver with precise satellite orbit and clock products, provides an important technical solution for

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(C类)(42504024);国家自然科学基金联合基金(U25A20397);国家资助博士后研究人员计划(C档)(GZC20250170);国家自然科学基金(42230104)。

第一作者:梅登奎,博士,主要研究方向为北斗/GNSS电离层监测建模与应用。dengkuimei@whu.edu.cn

通信作者:张小红,博士,教授。xhzhang@whu.edu.cn

赵变利,硕士,工程师。zbl@ngcc.cn

Antarctic inland applications. **Methods:** Based on GNSS observations from Antarctic international GNSS service (IGS) stations, including CAS1 and DAV1, as well as rare GNSS data collected at China's Kunlun station (KUNL) and Taishan station (TAIS) during the 41st Chinese national antarctic research expedition, this study systematically evaluates the positioning performance of BeiDou navigation satellite system(BDS)/GNSS in the Antarctic high-latitude region, with particular focus on China's inland Antarctic stations. Geomagnetically quiet days from March 1 to March 10, 2024, and the strong geomagnetic storm event on March 24, 2024, were selected for comparative analysis. Standard point positioning (SPP), undifferenced and uncombined PPP float solutions, and PPP ambiguity resolution (PPP-AR) solutions were assessed under both static and simulated kinematic modes for single-system GPS, BDS, Galileo, and multi-system combinations of GPS/BDS and GPS/BDS/Galileo. Positioning accuracy, initialization time, ambiguity fix rate, visible satellite number, geometric dilution of precision (GDOP), and the rate of total electron content index (ROTI) were comprehensively analyzed. **Results:** The results indicate that multi-GNSS observations significantly enhance satellite availability in Antarctica, with approximately 50-60 visible satellites observed at Antarctic stations. The positioning accuracy of single-frequency SPP is approximately 2.7-3.3 m, while dual-frequency SPP improves the accuracy to about 2.0 m, highlighting the advantage of dual-frequency observations in polar environments. Compared with SPP, static PPP ambiguity resolution (PPP-AR) solutions achieve decimeter- to centimeter-level accuracy, demonstrating the feasibility of PPP for high-precision Antarctic positioning. BDS and Galileo outperform GPS in both positioning accuracy and ambiguity fixing capability. Multi-GNSS integration, especially the GPS/BDS/Galileo combination, further improves positioning stability and shortens initialization time, with the initialization time of the CAS1 and DAV1 reduced to about 12 min under favorable conditions. The average PPP-AR initialization times of high-latitude stations such as TAIS and KUNL are generally longer than those of the relatively lower-latitude CAS1 and DAV1 stations. This may be mainly attributed to the combined effects of satellite geometry, and observation noise in ice-snow environments in the high-latitude inland Antarctic region. Compared with static PPP, the overall performance in terms of average initialization time and average three-dimensional positioning error of simulated kinematic PPP-AR is degraded. For the four Antarctic stations, both kinematic and static PPP float resolution achieve centimeter-level average 3D positioning accuracy. The average convergence times of static and kinematic PPP float solutions at CAS1 and DAV1 are less than 15 minutes, whereas TAIS and KUNL exhibit longer average convergence time. During the geomagnetic storm, PPP positioning errors increased and ROTI values fluctuated markedly at Antarctic stations, suggesting that enhanced polar ionospheric disturbances adversely affect PPP performance. **Conclusions:** Overall, this study demonstrates that BDS/GNSS PPP, particularly multi-GNSS PPP, is an effective and reliable approach for high-precision positioning in Antarctic inland scientific expeditions. Meanwhile, the influence of space weather should be carefully considered in practical GNSS applications in polar regions.

Key words: precise point positioning (PPP); Antarctica; GNSS; BeiDou navigation satellite system (BDS); geomagnetic storm; positioning performance evaluation

极地是对全球气候变化响应最为显著的关键区域,也是地球科学研究的重要前沿领域[1]。冰川物质平衡监测、板块运动研究以及科学考察活动安全导航等,对高精度、高可靠位置信息的需求日益迫切。当前,以北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)、全球定位系统(global positioning system,GPS)为代表的全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)虽可为全球用户提供导航定位服务[2],但其在低纬度地区覆盖良好、观测几何构型优良,而在高纬度地区,尤其是南北极区域,卫星覆盖不足、几何结构较差的问题尤为突出[3]。实时动态相对定位技术虽能提供较高的定位精度[4],但其依赖本地基准站的布设,在南极等环境恶劣、基础设施薄弱的地区实施难度较大。精密单点定位(precise point positioning,PPP)技术[5]凭借其全球覆盖、高精度及无需地面参考站等优势,在满足极地科学考察与地球物理研究对高精度、高可用性定位需求方面,展现出重要的应用潜力与现

实意义。

已有研究表明，BDS 系统在极区已具备独立导航能力，其在可见卫星数、位置精度因子及标准单点定位（standard point positioning，SPP）精度方面优于或与 GPS 相当[6-9]。在极区 PPP 性能方面，学者已评估了 GPS、Galileo 等系统静态 PPP 精度可达厘米级[10]，并探讨了星基增强服务在南极地区的适用性[11]。文献[12]系统评估了 BDS-3 正式提供全球服务后在极区的 PPP 定位性能，结果表明 BDS-3 单系统 PPP 精度达到厘米级，与 GPS、GLONASS、Galileo 相当。尽管单一星座（如 GPS、BDS 等）可以覆盖南北极地区，但是用户观测的卫星数相对较少，而且卫星仰角相对较低。当某颗卫星处于不健康状态时，会导致精度较差，甚至服务不连续[13]，多系统融合技术可增加极区卫星可见数，进而提升极区定位性能[12,14-16]。然而，极区卫星几何构型不佳以及磁暴等极端空间天气事件仍是制约 GNSS 定位精度的主要挑战[15]。为此，可通过电离层延迟改正、对流层建模与多路径抑制以及数据处理策略优化，改善极区 GNSS 定位性能[17]。

泰山站与昆仑站作为中国南极内陆科学考察的重要支撑平台，不仅为科考活动提供关键的物资中转与人员休整支持，还承载着天文观测、气象监测、高空物理探测及深冰芯钻探等前沿科研任务，具有显著的科学研究价值与战略意义[4]。考虑到南极内陆地区环境严酷、基础设施稀缺，建设密集 GNSS 连续观测网和地面增强系统存在较大困难，因此 PPP 技术在该区域具有重要应用潜力。特别是昆仑站（KUNL）和泰山站（TAIS）位于南极内陆区域，相关实测 GNSS 数据获取困难，具有较强的稀缺性和应用价值。因此，基于中国第 41 次南极科学考察采集的 KUNL、TAIS 及南极 IGS（international GNSS service）站（如澳大利亚凯西站（CAS1）、戴维斯站（DAV1）等）的实测数据，同步选取磁静日与磁暴日两种空间天气条件进行对比，系统开展从 SPP 到 PPP（包括浮点解与固定解）、从静态到动态的 BDS/GNSS 定位性能综合评估，重点分析单系统 GPS（G）、BDS（C）、Galileo（E）与多系统融合（GC、GCE）在不同纬度与观测条件下的定位精度、初始化时间、模糊度固定率等关键指标，并结合可见卫星数、几何精度因子（geometric dilution of precision，GDOP）等，分析纬度差异及磁暴事件对定位结果的影响，明确多系统融合在我国南极内陆科考场景下提升定位可靠性方面的核心作用。

1　PPP 原理

GNSS 伪距和相位的原始观测方程为：

$$\begin{cases} P_{r,n}^{s} = \rho_r^s + c\left(t_r - t^s\right) + \gamma_n \cdot I_{r,1}^{s} + m_r^s \cdot Z_r + b_r - b^s + e_{r,n}^{s} \\ L_{r,n}^{s} = \rho_r^s + c\left(t_r - t^s\right) + \gamma_n \cdot I_{r,1}^{s} + m_r^s \cdot Z_r + \lambda_n\left(N_{r,n}^{s} + B_r - B^s\right) + \varepsilon_{r,n}^{s} \end{cases} \tag{1}$$

式中，上标 s 和下标 r 分别对应卫星 s 和接收机 r；下标 n 为频率编号；$P_{r,n}^{s}$ 与 $L_{r,n}^{s}$ 分别代表伪距和相位观测值；ρ_r^s 为站星几何距离；t_r 与 t^s 分别为接收机和卫星钟差；$I_{r,1}^{s}$ 为卫星第一频率的电离层斜延迟；m_r^s 为对流层投影函数；Z_r 为天顶对流层延迟；b_r 和 b^s 分别表示接收机与卫星的伪距硬件延迟；λ_n 为载波波长；$N_{r,n}^{s}$ 为整周模糊度；B_r 和 B^s 分别为接收机和卫星的相位小数偏差；$e_{r,n}^{s}$ 和 $\varepsilon_{r,n}^{s}$ 分别表示伪距和相位观测中所包含的观测噪声、多路径及其他未模型化误差的总体影响；γ_n 为电离层延迟在频率间的转换系数，其与频率 f_n 的关系表达式为：

$$\gamma_n = f_1^2 / f_n^2 \tag{2}$$

基于非差非组合 PPP 模型[18-19]分别进行静态与仿动态定位解算，各参数处理策略具体如下：采用武汉大学分析中心（WUM）发布的多系统精密星历与钟差产品[20]，对卫星轨道误差与钟差进行改正。在坐标估计方面，静态解算采用常数模型，动态解算采用白噪声模型，且接收机钟差在各历元独立估计。电离层延迟通过随机游走过程进行估计，对流层延迟的干分量采用 Saastamoinen 模型改正，湿分量则结合全球投影函数（global mapping function，GMF）进行随机游走估计。针对相位模糊度，通过引入武汉大学提供的 OSB（observation-specific bias）产品，改正卫星端码观测值和相位观测值的硬件延迟偏差[21]，并采用最小二乘模糊度降相关平差法进行 PPP 模糊度固定（PPP ambiguity resolution，PPP-AR）。相对论效应、固体潮汐形变、天线相位中心偏差及相位缠绕效应等误差采用模型予以改正[22]。详细处理策略归纳如表 1 所示。

本文 PPP 收敛时间定义为水平方向定位误差连续至少 5 min 小于 0.1 m，且高程方向误差小于 0.2 m。PPP 固定状态判定标准为：Ratio 检验值大于 2，且水平方向定位精度优于 0.1 m。各南极 IGS 测站参考坐标采用 IGS 发布的产品，TAIS 和 KUNL 站参考坐标采用当天 PPP 静态模糊度固定解最后 10 个历元的坐标平均值。

表1 非差非组合PPP处理策略

Table 1 PPP Solution Strategy of Undifference and Uncombined

项目	策略
系统	GPS+BDS+Galileo
采样间隔/s	30
截止高度角/(°)	7
参数估计方法	卡尔曼滤波
观测值定权方法	高度角定权
轨道钟差	武汉大学精密轨道和钟差产品
伪距和相位偏差	武汉大学OSB产品修正
坐标估计	静态常数估计,动态白噪声估计
电离层延迟	随机游走估计
对流层延迟	干延迟采用Saastamoinen模型改正,湿延迟采用随机游走估计
相位模糊度	常数估计,部分模糊度固定
天线误差	使用igs20.atx改正

2 研究区域与数据来源

为系统评估南极高纬度测站BDS/GNSS的定位性能,选取2024年3月1日—10日(磁静日)南极IGS站CAS1与DAV1的观测数据,并结合中国第41次南极科考同期于KUNL与TAIS所采集的GNSS数据,开展了静态与动态PPP定位的解算与对比分析。据空间环境预报中心(http://blog.sepc.ac.cn/p=9892)报道,2024-03-24发生强磁暴,在协调世界时12时至15时Kp指数快速上升,峰值达到8。为探究地磁扰动对定位结果的影响,对此次磁暴发生期间南极IGS站的PPP定位性能进行分析。需要指出的是,南极KUNL和TAIS站观测数据分别于3月16日和3月11日开始中断,因此仅选取ARHT(麦克默多站)、CAS1、DAV1 3个IGS站进行磁暴期间PPP定位性能分析,并使用电离层总电子含量(total electron content,TEC)变化率指数(rate of TEC index,ROTI)表征电离层扰动程度[23]。测站分布如图1所示,各测站位置信息见表2,其中,KUNL位于80.42°S,TAIS位于73.85°S,另选取ARHT站(纬度与KUNL站接近)、DAV1与CAS1作为对比站点,以综合分析纬度差异对定位性能的影响。

3 实验结果分析

3.1 标准SPP性能评估

具有足够的可见卫星数是进行卫星BDS/GNSS PPP的重要前提,图2分析了2024-03-01南极CAS1、DAV1、KUNL和TAIS 4个测站上空不同导航系统可见卫星数。可以看出,CAS1和DAV1站可见卫星总数接近60颗,纬度更高的KUNL和TAIS站可见卫星总数在50颗左右。就单系统可见卫星数而言,BDS-3可见卫星数与GPS相当甚至更高,Galileo和GLONASS次之,BDS-2可见卫星数最少。

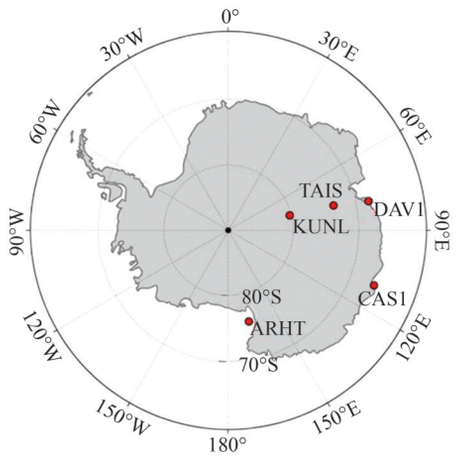


图1 南极GNSS测站分布图

Fig. 1 Distribution of GNSS Stations in Antarctica

表2 南极GNSS测站位置信息

Table 2 Information of GNSS Stations in Antarctica

测站名称	经度/(°E)	纬度/(°S)	高程/m
KUNL	77.01	80.42	4 092.76
ARHT	166.68	77.83	84.00
TAIS	76.97	73.85	2 637.87
DAV1	77.97	68.57	44.50
CAS1	110.52	66.28	22.55

图3对比了3月1日—10日南极CAS1、DAV1、TAIS和KUNL 4个测站的SPP平均三维(three-dimensional,3D)定位误差。从图3可以看出,CAS1和DAV1站的单频SPP平均定位误差约为2.7 m,纬度更高的TAIS和KUNL站的单频SPP平均定位误差约为3.3 m;双频SPP通过无电离层组合有效抑制电离层延迟,将SPP平均定位误差缩小至2.0 m左右,这表明了双频接收机在南极科考与监测任务中的优势。

3.2 PPP性能评估

3.2.1 静态/动态PPP-AR定位性能

图4对比了3月1日—10日南极CAS1、DAV1、TAIS和KUNL测站的静态PPP-AR平均3D定位误差。结果表明,4个南极测站采用GPS单系统进行PPP解算时,平均3D定位误差总体上更大。其中,纬度更高的TAIS和KUNL站PPP定位误差达到分米级,而纬度略低的

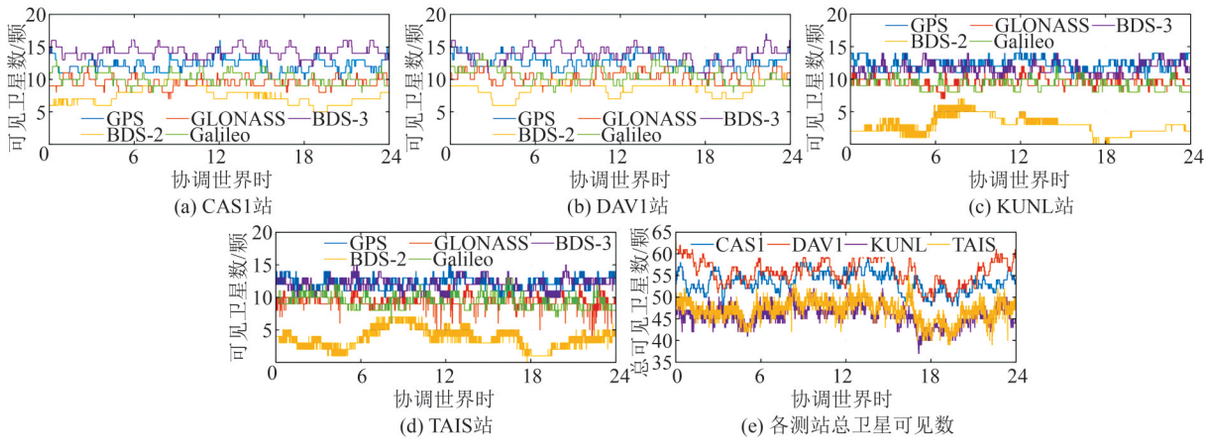


图 2　2024-03-01 南极 CAS1、DAV1、KUNL、TAIS 站 GNSS 卫星可见数

Fig. 2　Number of Visible Satellites at CAS1, DAV1, KUNL and TAIS Stations on March 1, 2024

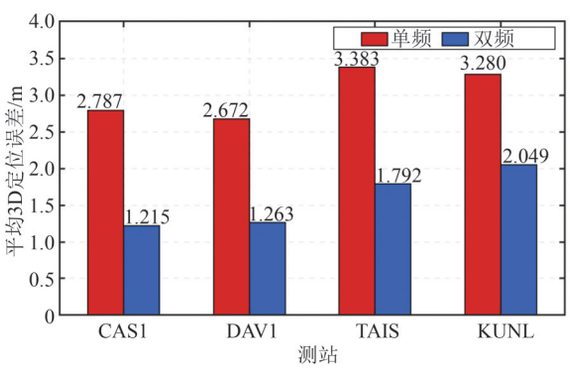


图 3　南极不同纬度测站单频和双频 SPP 平均 3D 定位误差

Fig. 3　Average 3D Positioning Errors of Single-Frequency and Dual-Frequency SPP at Antarctic Stations of Different Latitudes

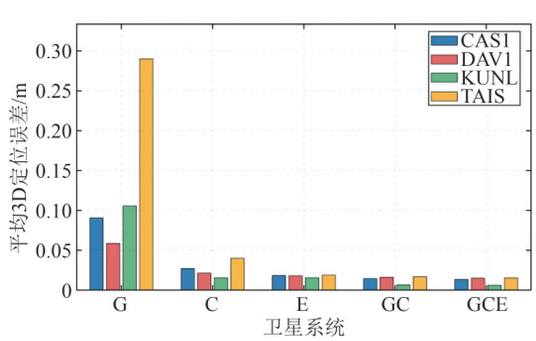


图 4　不同测站静态 PPP-AR 平均 3D 定位误差对比

Fig. 4　Comparison of Average 3D Positioning Errors of Static PPP-AR at Different Stations

CAS1 和 DAV1 站则为厘米级。相比之下,采用单 BDS 或 Galileo 系统进行 PPP 解算时,4 个测站的平均 3D 定位误差均为厘米级,整体精度明显优于 GPS 单系统。采用多系统(GCE、GC 等)融合定位时,4 个测站的平均 3D 定位误差明显减小,均可实现厘米级定位精度,验证了 PPP 技术在南极高精度定位中的可行性;尤其是 TAIS 站单 GPS 平均定位误差较大,多系统组合 PPP 后其定位误差显著减小。这说明在南极地区,利用多系统融合可增加有效观测数据,增强卫星观测几何结构,改善定位性能。

图 5 对比了 3 月 1 日—10 日各测站静态 PPP 平均模糊度固定率。从图 5 可看出,4 个测站单 GPS 系统的平均固定率最低,单 BDS 和单 Galileo 系统的平均固定率均优于单 GPS 系统;纬度相对较低的 CAS1 和 DAV1 测站中,BDS 单系统表现较好;纬度较高的 TAIS 和 KUNL 测站中,Galileo 单系统表现较好。总体上,GCE 多系统组合可以明显改善平均固定率,特别是在改善单 GPS 系统固定率方面更加明显,并且 4 个测站的 GCE 多系统组合 PPP 平均固定率超过 98%。这表明在南极高纬度地区,多系统联合解算有助于提升 PPP-AR 的可用性。

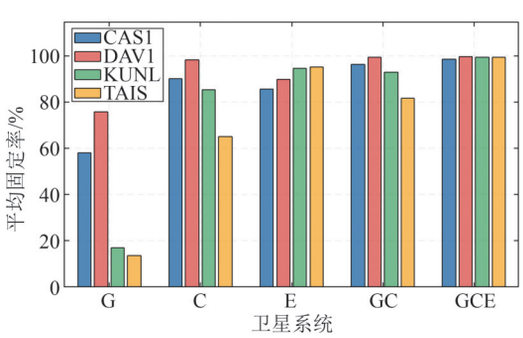


图 5　不同测站静态 PPP-AR 平均固定率对比

Fig. 5　Comparison of Static PPP-AR Average Fix Rates at Different Stations

图 6 给出了 3 月 1 日—10 日不同测站静态 PPP-AR 的平均初始化时间。从图 6 可以看出,不同系统的平均初始化时间存在差异。其中,GPS 单系统平均初始化时间明显大于 BDS 或 Galileo 系统,TAIS 站 GPS 单系统平均初始化时间接近 80 min;相比之下,单 BDS 与单 Galileo 系

统PPP平均初始化时间相当,在20 min左右。多系统融合(比如GCE)能有效缩短初始化时间,最快可在12 min左右完成初始化,表明多系统融合有助于加快南极地区PPP初始化速度。

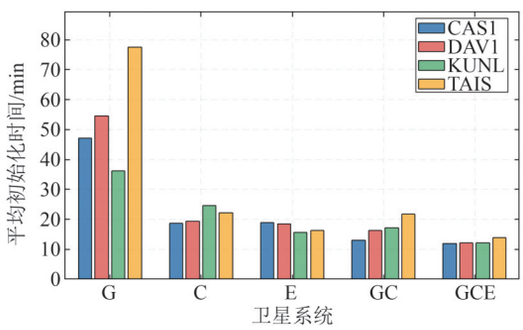


图6 不同测站静态PPP-AR平均初始化时间对比

Fig. 6 Comparison of Average Initialization Time for Static PPP-AR at Different Stations

图7对比了3月1日—10日不同测站GDOP。结果表明,单GPS系统的平均GDOP值整体最大,而单BDS和单Galileo系统的GDOP值相对较小。融合GPS与BDS后,各站GDOP值均降低;融合GPS、BDS与Galileo 3个系统,GDOP值得以进一步减小,说明多系统融合可通过增加可见卫星数与改善空间几何构型,有效提升定位条件。此外,KUNL站单BDS、单Galileo以及多系统融合的GDOP值均略有增大,反映出高纬度测站的卫星观测几何条件有所弱化。

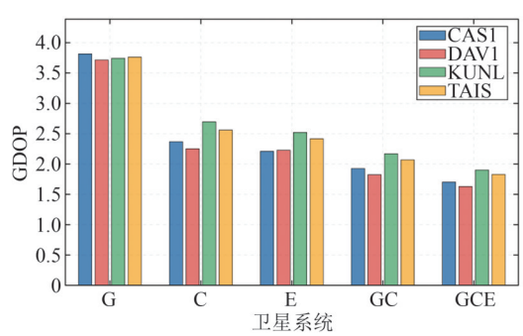


图7 不同测站平均GDOP对比

Fig. 7 Comparison of Average GDOP at Different Stations

表3对比了3月1日—10日多系统静态和仿动态PPP-AR定位性能统计结果。与静态PPP相比,虽然仿动态PPP平均模糊度固定率略有提升,但是在平均初始化时间和平均3D定位误差方面整体表现有所下降。4个南极测站的动态和静态PPP平均3D定位误差完成初始化之后均为厘米级;4个测站静态PPP-AR平均初始化时间在14 min内,而KUNL站和TAIS站的动态PPP-AR平均初始化时间略长,其中TAIS站动态PPP平均初始化时间为20.8 min。

表3 3月1日—10日多系统PPP-AR定位性能统计结果

Table 3 Statistical Results of Multi-system PPP-AR Positioning Performance from March 1 to March 10

测站	动态			静态		
	平均初始化时间/min	平均固定率/%	平均3D定位误差/m	平均初始化时间/min	平均固定率/%	平均3D定位误差/m
CAS1	11.20	98.68	0.042	11.85	98.67	0.013
DAV1	15.25	99.93	0.032	12.10	99.93	0.015
KUNL	17.63	99.60	0.024	12.15	99.61	0.006
TAIS	20.80	99.51	0.031	13.90	99.53	0.015

综合上述分析结果可知,4个测站单GPS系统PPP的平均3D定位误差最大(图4)、平均固定率最低(图5)、平均初始化时间最长(图6),推测其原因可能是单GPS系统的平均GDOP值最大(图7),卫星空间几何构型相对较弱所致。然而,纬度更高的TAIS站和KUNL站单GPS系统平均GDOP值与CAS1站和DAV1站较为接近,但TAIS站和KUNL站单GPS系统平均定位误差仍然最大、平均固定率仍然最低,表明TAIS站和KUNL站定位性能的下降并非主要由卫星几何构型引起。进一步分析3月1日—10日各测站观测数据质量得出,在多路径误差方面,各测站Galileo系统的平均多路径误差最小,GPS与BDS系统相当;在信噪比方面,各测站GPS卫星信号的信噪比低于BDS和Galileo系统。值得注意的是,TAIS站和KUNL站GPS系统中用于周跳探测的连续观测弧段数量显著少于同站BDS和Galileo系统,表明GPS相位观测值出现了更多的中断与重新捕获现象。这可能是导致TAIS站和KUNL站GPS单系统PPP定位性能相对较差的主要原因之一。

3.2.2 静态/动态PPP浮点解定位性能

图8展示了3月1日—10日不同测站静态PPP浮点解的平均3D定位误差。结果表明,4个南极测站PPP浮点解的3D定位误差很小,无论是单系统还是双系统或三系统,定位误差均保持在厘米级。这表明即使未实现模糊度固定,静态PPP浮点解在南极地区仍可实现较高精度的定位,为极地卫星精密定位提供了可靠的技术方案。

图9对比了3月1日—10日南极不同测站静态PPP浮点解的平均收敛时间。由图9可见,不同测站的平均收敛时间存在一定差异。除了单Galileo系统,TAIS和KUNL等高纬度测站可能主要受卫星几何构型和观测数据质量差异等影响,其PPP平均收敛时间整体长于纬度相对较低

的 CAS1 和 DAV1 测站。此外,不同 GNSS 系统的平均收敛时间相差不大;相比单系统,多系统融合方案,如 GC 和 GCE 组合,可在一定程度上缩短 PPP 浮点解的平均收敛时间,特别是 CAS1 站 GCE 组合 PPP 浮点解平均收敛时间在 10 min 内。上述结果表明,在南极地区采用多系统融合策略有助于提高 PPP 浮点解的收敛效率。

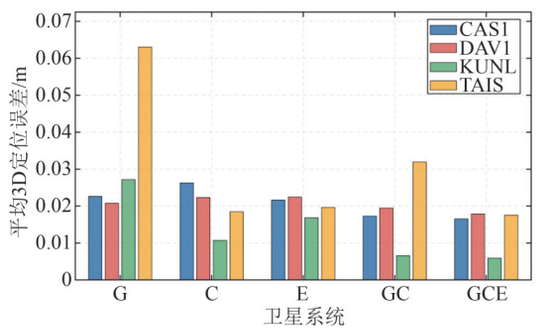


图 8　不同测站静态 PPP 浮点解平均 3D 定位误差对比

Fig. 8　Comparison of Static PPP-Float Average 3D Positioning Errors at Different Stations

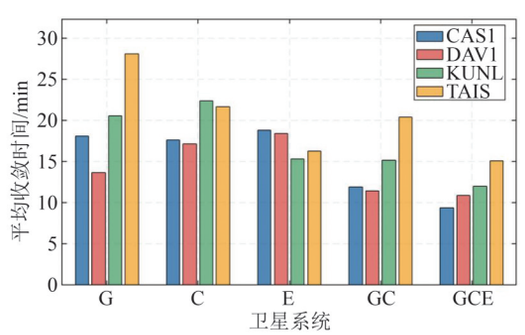


图 9　不同测站静态 PPP 浮点解平均收敛时间对比

Fig. 9　Comparison of Average Convergence Time for Static PPP-Float at Different Stations

表 4 给出了 3 月 1 日—10 日多系统 PPP 浮点解定位性能统计结果。结果显示,在平均收敛时间方面,各个测站的 PPP 动态浮点解平均收敛时间长于 PPP 静态浮点解,其中 KUNL 和 TAIS 站的平均收敛时间略长,CAS1 和 DAV1 站平均收敛时间较短。此外,各个测站的 PPP 动态浮点解平均 3D 定位误差也大于 PPP 静态浮点解。表中仅展示了仿动态定位结果,在真实动态环境下,载体运动引起的观测几何持续变化、信号遮挡与多径效应增强,可能进一步降低精密定位性能。

3.2.3　磁静与磁暴期间 PPP 定位性能对比

此次磁暴主相主要发生在协调世界时 12 时至 18 时,Kp 指数峰值达到 8。图 10 给出了磁暴日 ARHT、CAS1 和 DAV1 3 个测站的静态 PPP-AR 定位误差序列、可见卫星数以及 ROTI 指数的时序变化。需要说明的是,磁暴日静态 PPP-AR 采

表 4　3 月 1 日—10 日多系统 PPP 浮点解定位性能统计结果

Table 4　Statistical Results of Multi-system PPP-Float Positioning Performance from March 1 to March 10

测站	动态		静态	
	平均收敛时间/min	平均 3D 定位误差/m	平均收敛时间/min	平均 3D 定位误差/m
CAS1	11.15	0.057	9.35	0.017
DAV1	15.15	0.037	10.90	0.018
KUNL	17.85	0.024	12.03	0.006
TAIS	24.80	0.032	15.08	0.018

用每 3 h 解算一次的策略,并对当天 8 组 PPP-AR 定位结果取平均值,以表征磁暴日的平均定位性能。表 5 进一步统计了磁暴日与磁静日三系统 PPP-AR 的平均 3D 定位误差、平均初始化时间及平均模糊度固定率等指标。图 10 结果表明,磁暴日 3 个测站的 ROTI 序列均在部分时段出现明显增强,尤其在协调世界时 10 时至 18 时波动较为剧烈,峰值超过 4 TECU/min,表明 3 个测站均受到不同程度的电离层不规则体扰动影响;在电离层扰动增强时段,3 个测站的 PPP-AR 定位误差在东、北、天 3 个方向均出现明显波动,定位稳定性显著降低,由表 5 可以看出,ARHT 测站的平均 3D 定位误差最大,误差波动也最为显著;其静态和动态 PPP-AR 的平均 3D 定位误差分别为 0.052 m 和 0.119 m,平均初始化时间分别为 32.3 min 和 77.6 min。相比之下,DAV1 测站在磁暴日的定位误差和初始化时间整体小于 ARHT 和 CAS1 测站。表 5 结果进一步表明,相较于磁静期,磁暴期间 ARHT 站和 CAS1 站多系统 PPP-AR 的定位精度和初始化时间均出现不同程度退化,平均模糊度固定率也略有下降。其中,高纬度 ARHT 测站受磁暴影响最为明显,其动态 PPP-AR 的 3D 定位误差由厘米级退化至分米级。上述结果表明,磁暴期间南极区域电离层不规则体活动增强,电离层扰动明显加剧,导致 GNSS 信号传播路径上的 TEC 快速变化,并可能引起载波相位观测周跳增多以及模糊度固定困难等问题,进而影响 PPP 定位精度和初始化稳定性。

图 11(a)给出了磁暴日不同 GNSS 系统静态 PPP-AR 的平均 3D 定位误差对比结果。总体来看,纬度最高的 ARHT 测站在单 GPS、单 BDS 和单 Galileo 系统下的平均 3D 定位误差均达到分米级,表明磁暴期间该站定位性能受电离层扰动影响较为显著。相比之下,多系统融合能够有效改善高纬地区 PPP-AR 定位性能,ARHT 测站的平

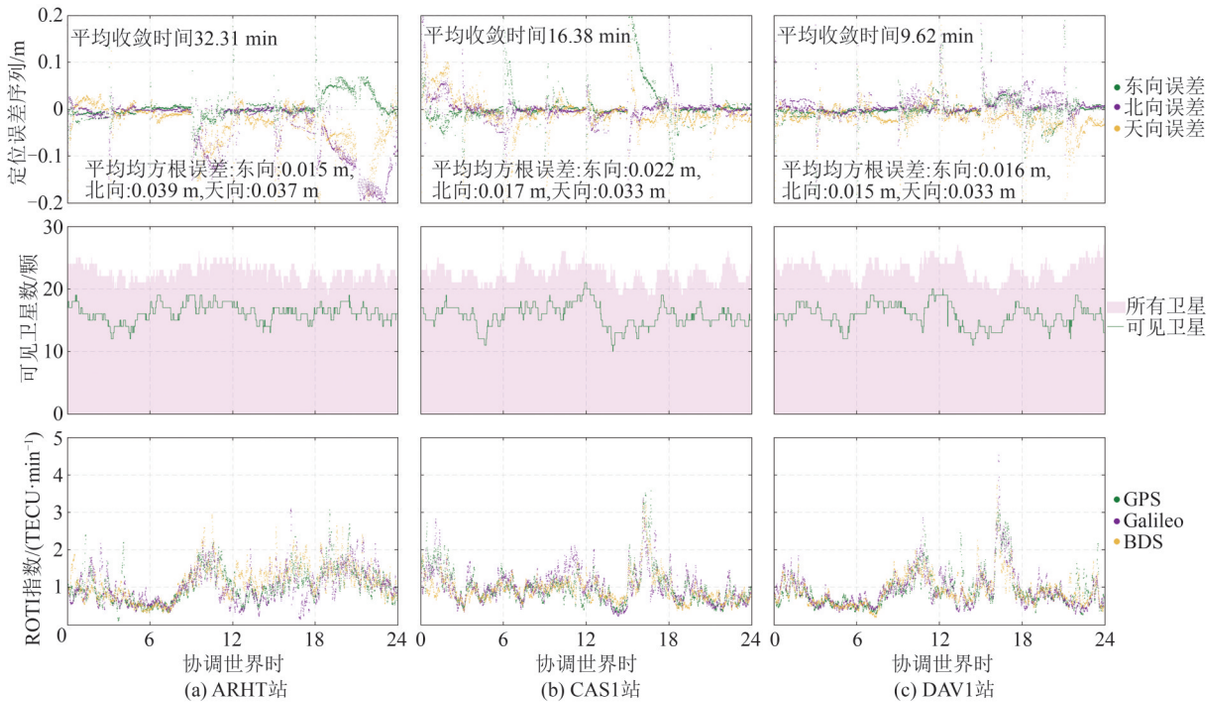


图10 磁暴日ARHT、CAS1和DAV1测站的定位误差序列、可见卫星数以及ROTI时序图

Fig. 10 Time Series of 3D Positioning Errors, Number of Visible Satellites, and ROTI at ARHT, CAS1, and DAV1 Stations on the Geomagnetic Storm Day

表5 磁静日与磁暴日多系统融合PPP-AR定位性能对比

Table 5 Positioning Performance Comparison of Multi-GNSS PPP Fixed Solutions on Geomagnetically Quiet and Storm Days

测站	磁暴日(3月24日)						磁静日(3月1日—10日)					
	静态			动态			静态			动态		
	平均3D定位误差/m	平均初始化时间/min	平均固定率/%	平均3D定位误差/m	平均初始化时间/min	平均固定率/%	平均3D定位误差/m	平均初始化时间/min	平均固定率/%	平均3D定位误差/m	平均初始化时间/min	平均固定率/%
ARHT	0.052	32.3	99.13	0.119	77.6	99.13	0.016	13.65	99.60	0.036	16.90	99.58
CAS1	0.034	16.4	98.16	0.054	31.8	98.06	0.013	11.85	98.67	0.042	11.20	98.68
DAV1	0.032	9.6	99.55	0.049	12.3	99.48	0.015	12.10	99.93	0.032	15.25	99.93

均3D定位误差降至厘米级。对于纬度略低于ARHT的CAS1和DAV1测站,除CAS1站单BDS系统PPP-AR的平均3D定位误差仍为分米级外,DAV1站单BDS或单Galileo系统的平均3D定位误差均处于厘米级水平。从不同系统组合来看,GCE组合整体表现最佳,其定位误差普遍小于单系统和双系统结果,其中CAS1和DAV1测站平均3D定位误差降至0.05 m以内。该结果表明,多系统融合可通过增加观测冗余、优化卫星空间几何构型以及增强解算稳定性,有效提高磁暴条件下PPP-AR的定位精度。

图11(b)给出了磁暴日不同系统静态PPP-AR的平均初始化时间。结果表明,各测站单GPS系统的PPP平均初始化时间整体最长,单BDS系统平均初始化时间整体上最短。多系统组合(GC、GCE)可缩短初始化时间,CAS1和DAV1测站的GCE组合平均初始化时间在20 min以内。磁暴期间,受高纬度电离层扰动影响,南极测站PPP定位性能均出现明显下降,其中纬度最高的ARHT测站定位性能下降最明显。相比单GPS系统,GPS/BDS/Galileo多系统组合由于能够提供更多观测卫星和更优几何构型,可在一定程度上缓解单系统在磁暴期间定位性能下降,是极区复杂电离层环境下提升PPP可靠性的有效途径。

4 结 语

本文面向南极高纬地区,特别是我国南极内陆科学考察中的高精度导航定位需求,利用南极

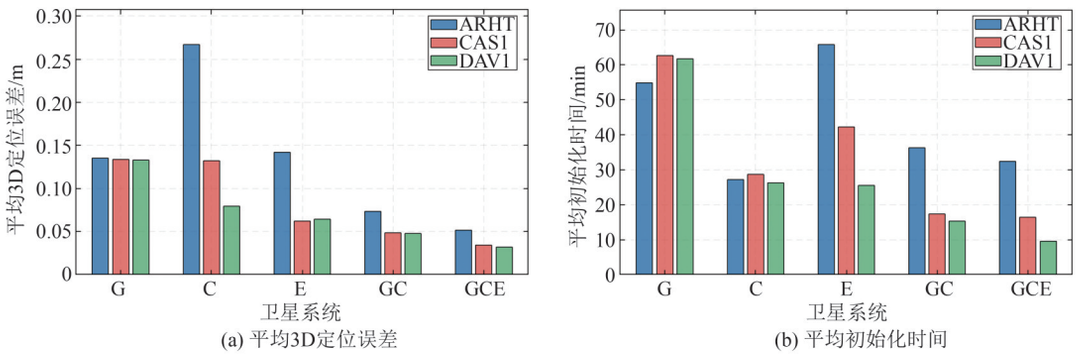


图 11　3 月 24 日磁暴日不同测站静态 PPP-AR 平均 3D 定位误差和平均初始化时间对比

Fig. 11　Comparison of Static PPP-AR 3D Positioning Errors and Average Initialization Time on March 24

IGS 测站以及中国第 41 次南极科学考察期间 KUNL 站和 TAIS 站实测 GNSS 数据，系统评估了 BDS/GNSS 多系统 PPP 在磁静日期间的定位性能，并结合 2024-03-24 强磁暴事件，分析了电离层扰动对南极典型测站 PPP 定位结果的影响。本文引入了中国南极内陆科考站实测数据，补充了 KUNL 和 TAIS 站多系统 PPP 性能评估结果，可为中国南极内陆科考高精度定位服务提供参考。主要结论如下：

1）在南极地区，单频 SPP 平均 3D 定位精度约为 2.7～3.3 m，双频 SPP 平均 3D 定位精度可降低至 2.0 m 左右，表明了双频接收机在南极应用中具有明显优势。

2）在定位精度方面，采用 GPS 单系统进行 PPP 解算时，TAIS 和 KUNL 测站的平均 3D 定位误差达到分米级，而纬度相对较低的 CAS1 和 DAV1 测站则保持在厘米级水平。相比之下，采用单 BDS 或单 Galileo 系统进行 PPP 解算时，南极测站的平均 3D 定位误差均可达到厘米级，整体定位精度优于 GPS 单系统。在 PPP-AR 初始化速度方面，TAIS 和 KUNL 测站长于 CAS1 和 DAV1 测站，表明高纬内陆南极环境下 PPP 参数初始化相对困难。CAS1 和 DAV1 纬度较低、卫星几何条件相对较好，因此在保持厘米级定位精度的同时实现了更快收敛速度。

进一步采用 GPS/BDS/Galileo 多系统组合 PPP-AR 后，各测站的平均 3D 定位误差进一步减小，均可实现厘米级定位精度。同时，多系统融合有效缩短了初始化时间，提高了模糊度固定率，表现出最优的定位性能。该结果表明，在南极地区，多系统融合能够增加可用观测数量，改善卫星空间几何构型，增强定位性能，是应对极区卫星几何构型较差、观测环境复杂等问题的有效手段。与静态 PPP 相比，仿动态 PPP 在定位精度和初始化时间方面略有下降，说明动态模式下参数估计受观测噪声、卫星几何变化及测站环境影响更为明显。因此，在极地实际动态定位应用中，仍需进一步优化动态 PPP 算法，以提升其定位精度、初始化效率和可靠性。

3）相比于磁静期，磁暴期南极测站各系统的 PPP-AR 平均定位精度和平均初始化时间等总体变差，平均固定率也略有降低。分析可知，磁暴期各测站 ROTI 指数发生明显波动，表明此次磁暴期间 PPP 定位性能下降与极区电离层扰动效应增强密切相关。未来仍需结合不同强度的磁暴事件进一步验证，并探讨电离层扰动效应削弱方法。

参　考　文　献

[1] 刘顺林. 中国极地考察 40 年进展与展望[J]. 极地研究, 2024, 36(3): 317-328.
LIU Shunlin. The Progress and Prospect on the 40th Anniversary of Chinese Arctic and Antarctic Scientific Expeditions[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2024, 36(3): 317-328.

[2] 陈秀德, 刘惠, 蔚保国, 等. 北斗/GNSS 广域精密定位技术与服务：现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(3): 413-429.
CHEN Xiude, LIU Hui, YU Baoguo, et al. BeiDou/GNSS Wide-Area Precise Positioning Technology and Service: Current Situation and Prospects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(3): 413-429.

[3] YANG Y X, MAO Y, REN X, et al. Demand and Key Technology for a LEO Constellation as Augmentation of Satellite Navigation Systems[J]. *Satellite Navigation*, 2024, 5(1): 11.

[4] 胡主宽, 范斌斌, 周颖熙, 等. BDS-3/BDS-2/GPS 短基线 RTK 性能对比分析[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(3): 14-19.

HU Zhukuan, FAN Binbin, ZHOU Yingxi, et al. Performance Comparison of BDS-3/BDS-2/GPS RTK for ShortBaseline[J]. *Journal of Geomatics*, 2023, 48(3): 14-19.

[5] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407.
ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407.

[6] 杜玉军, 王泽民, 安家春, 等. 北斗系统在远洋及南极地区的定位性能分析[J]. 极地研究, 2015, 27(1): 91-97.
DU Yujun, WANG Zemin, AN Jiachun, et al. Positioning Analysis of BeiDou Navigation Satellite System over Ocean and Antarctic Regions[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2015, 27(1): 91-97.

[7] 陈闯, 潘雷, 宋芮德. GNSS在极区环境下的定位性能分析[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(4): 15-18.
CHEN Chuang, PAN Lei, SONG Ruide. Positioning Performance Assessment of GNSS in Polar Environment[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(4): 15-18.

[8] 徐炜, 贾雪, 乔方, 等. 北斗在南/北极地区的基本定位性能评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(12): 1268-1273.
XU Wei, JIA Xue, QIAO Fang, et al. Preliminary Assessment of Positioning Performance of BDS Navigation System in North and South Polar Regions[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(12): 1268-1273.

[9] 王泽民, 杜玉军, 熊云琪, 等. 北斗系统在南极中山站地区的基本定位性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(8): 1027-1034.
WANG Zemin, DU Yujun, XIONG Yunqi, et al. Preliminary Assessment of Positioning Performance of BeiDou Navigation Satellite System at Zhongshan Station, Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1027-1034.

[10] 苗沛乐. 伽利略精密单点定位在南极地区的性能分析[J]. 测绘技术装备,2022, 24(3): 45-52.
MIAO Peile. Performance Analysis of Galileo Precise Point Positioning in the Antarctic Region[J]. *Geomatics Technology and Equipment*,2022,24(3): 45-52.

[11] 刘洋, 柴洪洲, 王敏, 等. 南极地区星基精密单点定位服务精度分析及定位评估[J]. 测绘通报, 2025(8): 1-6.
LIU Yang, CHAI Hongzhou, WANG Min, et al. Precision Analysis and Positioning Evaluation of Satellite-Based Precise Point Positioning Service in the Antarctic Region[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2025(8): 1-6.

[12] ZHAO J, AN J C, WANG Z M, et al. Signal Quality and Positioning Performance of GPS/BDS-3/GLONASS/Galileo in Polar Regions[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(6): 2541-2554.

[13] 姚翔, 陈明剑, 李滢, 等. 极地BDS精密单点定位性能分析[J]. 导航定位学报, 2018, 6(4): 57-63.
YAO Xiang, CHEN Mingjian, LI Ying, et al. Performance Analysis on Polar BDS PPP[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2018, 6(4): 57-63.

[14] 杨元喜, 徐君毅. 北斗在极区导航定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 15-20.
YANG Yuanxi, XU Junyi. Navigation Performance of BeiDou in Polar Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 15-20.

[15] 程建华, 李哲欣, 刘佳鑫. 基于精密星历的极区卫星导航系统性能分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3020-3028.
CHENG Jianhua, LI Zhexin, LIU Jiaxin. Performance Analysis of Polar Global Navigation Satellite System Based on Precise Ephemeris[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(8): 3020-3028.

[16] 温波, 朱庆伟, 张俊. 极地地区多模GNSS精密单点定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(7): 682-689.
WEN Bo, ZHU Qingwei, ZHANG Jun. Accuracy Analysis of Polar Multi-GNSS Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(7): 682-689.

[17] 王朝阳, 卢勇夺, 邢喆, 等. 卫星截止高度角、对流层映射函数和海潮模型对南极GNSS精密定位的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(12): 1294-1298.
WANG Zhaoyang, LU Yongduo, XING Zhe, et al. Research on Influence of Satellite Cut-off Elevation Angle, Tropospheric Mapping Function and Ocean Tide Model on Antarctica GNSS PPP[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(12): 1294-1298.

[18] ZHANG X H, REN X D, CHEN J, et al. Investigating GNSS PPP-RTK with External Ionospheric Constraints[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 6.

[19] 徐宗秋, 张鸿洋, 徐彦田, 等. 一种BDS非差非组合PPP中电离层功率谱密度估计方法[J]. 武汉大

学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 628-636.
XU Zongqiu, ZHANG Hongyang, XU Yantian, et al. A Method for Estimating Ionospheric Power Spectral Density in BDS Undifferenced and Uncombined PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(4): 628-636.

[20] 李俊强, 徐胜意, 郭靖, 等. IGS不同分析中心多频多模产品质量分析和精密单点定位验证[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026. https://doi.org/10.13203/j.whugis20240430.
LI Junqiang, XU Shengyi, GUO Jing, et al. Quality Analysis of Multi-frequency and Multi-GNSS Products from Different IGS Analysis Centers and Precise Point Positioning Validation[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026. https://doi.org/10.13203/j.whugis20240430.

[21] 许国振, 任晓东, 张小红. CNES多系统OSB产品质量分析及实时精密单点定位性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2352-2364.
XU Guozhen, REN Xiaodong, ZHANG Xiaohong. Quality Analysis of Multi-GNSS OSB Products from CNES and Its Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2352-2364.

[22] HÉROUX P, KOUBA J. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(6/7/8): 573-578.

[23] 梅登奎, 闻德保. 磁暴期间中国中低纬电离层不规则体与扰动分析[J]. 空间科学学报, 2020, 40(6): 1007-1013.
MEI Dengkui, WEN Debao. Analysis of Ionospheric Irregularities and Disturbances at Middle and Low Latitudes in China During the Magnetic Storm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(6): 1007-1013.