引文格式:陈俊平,张益泽,王阿昊,等.北斗PNT增强信息处理技术及其应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(10):2048-2055.DOI:10.13203/j.whugis20260353

Citation: CHEN Junping, ZHANG Yize, WANG Ahao, et al. BDS PNT Augmentation Information Processing: Technologies and Its Application[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(10): 2048-2055. DOI: 10.13203/j.whugis20260353

北斗PNT增强信息处理技术及其应用

陈俊平[1,2,3] 张益泽[1,2,3] 王阿昊[4] 王 彬[1,2,3] 周建华[5]

1 中国科学院上海天文台,上海,200030
2 中国科学院大学天文与空间科学学院,北京,100049
3 上海市空间导航与定位技术重点实验室,上海,200030
4 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京,100083
5 61081部队,北京,100094

摘 要:北斗卫星导航系统通过广域增强和精密单点定位服务,构建了从广域差分到精密定位的多层次高精度定位导航授时(positioning, navigation and timing,PNT)增强体系。围绕北斗PNT增强服务信息处理技术,阐述了北斗PNT增强服务实时改正参数体系,介绍了北斗信息处理系统中卫星轨道改正、卫星钟差改正、格网电离层改正、差分码偏差以及分区综合改正等参数的计算方法,总结了北斗PNT增强服务完好性监测方面的进展,给出了基于北斗系统增强参数的用户PNT基本模型,归纳了北斗PNT增强从米级到分米级的服务能力。针对中国综合时空体系建设的发展要求,对异构多体制星座全球PNT增强技术的发展进行了展望。

关键词:北斗卫星导航系统;星基增强;精密单点定位;定位模型和性能

中图分类号:TP208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20260353 **文章编号**:1671-8860(2026)10-2048-08

BDS PNT Augmentation Information Processing: Technologies and Its Application

CHEN Junping[1,2,3] *ZHANG Yize*[1,2,3] *WANG Ahao*[4] *WANG Bin*[1,2,3] *ZHOU Jianhua*[5]

1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China
2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China
4 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
5 61081 Troops, Beijing 100094, China

Abstract: BeiDou satellite navigation system (BDS) has established a multi-level high-precision positioning, navigation and timing (PNT) augmentation architecture, ranging from wide-area differential positioning to the precise point positioning (PPP), through BeiDou satellite-based augmentation system (BDSBAS) and the PPP service on B2b signal (PPP-B2b). This paper focuses on the information processing technologies for BDS PNT augmentation services. It elaborates on the real-time correction parameter system for BDS PNT augmentation, and introduces the computation methods for key parameters in BDS information processing system, including satellite orbit corrections, satellite clock corrections, grid ionosphere corrections, and partition comprehensive corrections. And then it summarizes the progress in integrity monitoring for BDS PNT augmentation services. The fundamental user PNT model based on BDS augmentation parameters is presented, and the service capability of BDS PNT augmentation from meter-level to decimeter-level is summarized. Furthermore, in view of the development requirements of China's compre-

基金项目:国家自然科学基金(42474034,12403075,42304023)。

第一作者:陈俊平,博士,研究员,主要从事卫星导航技术研究。junping@shao.ac.cn

通信作者:周建华,中国工程院院士。sunnpa@163.com

hensive PNT system, this paper provides a perspective on the technological evolution of global PNT augmentation based on the future heterogeneous multi-system satellite constellation.

Key words: BeiDou satellite navigation system (BDS); satellite-based augmentation; precise point positioning; positioning model and performance

近年来,随着精密单点定位(precise point positioning,PPP)技术的深入发展,北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)PPP-B2b提供全球实时PPP服务,它与北斗星基增强系统(BeiDou satellite-based augmentation system,BDSBAS)共同构成了北斗高精度定位导航授时(positioning, navigation and timing,PNT)增强服务能力。BDSBAS通过地球静止轨道(geosynchronous earth orbit,GEO)卫星向用户播发卫星轨道改正数、钟差改正数、电离层格网改正数及分区综合改正数等参数,能够在广域范围内显著提升北斗基本导航信号的精度与可靠性[1-4];而PPP-B2b则利用相同的GEO卫星通信链路,广播北斗三号与GPS卫星的精密轨道和钟差改正数,使用户无需依赖外部通信网络即可实现实时PPP[5]。两种高精度PNT增强服务基于相同的地面监测网络与卫星播发基础设施,分别面向不同定位精度等级与收敛时效的用户需求,形成从米级到分米级、从区域到广域增强的多层次北斗系统内嵌高精度服务体系。

相较于国际PNT增强系统,如美国的广域增强系统、欧洲的地球静止导航重叠服务和印度的GPS辅助GEO增强导航等,北斗高精度PNT增强服务在系统架构和服务模式上展现出鲜明的特色。北斗系统在L1和L5频段同时支持单频与双频用户,北斗+GPS双系统增强模式在区域覆盖和可用性方面较单系统具有显著提升。在改正数体系方面,北斗系统创新性地融合了基于状态空间表示(state space representation,SSR)的卫星轨道/钟差改正数、电离层格网改正数以及基于观测空间表示(observation space representation,OSR)的分区综合改正数(partition comprehensive corrections,PCC),构成了独特的四重差分改正数架构,能够同时满足单频和双频用户的实时高精度定位需求[6]。北斗PPP-B2b作为北斗系统独有的增强服务,突破了传统导航星基增强系统(atellite-based augmentation system,BDSBAS)依赖区域电离层格网和完好性通道的限制,与BDSBAS共用地面监测网络和GEO卫星播发通道,通过L波段直接播发PPP改正数,用户仅需单台接收机即可实现实时高精度定位与授时。此外,BDSBAS与PPP-B2b还具备与北斗短报文通信、国际搜救等服务深度融合的能力[7],形成了导航通信一体化的服务格局,该设计不仅显著提升了北斗系统在国际导航领域的差异化竞争力,也对保障中国在共建"一带一路"国家的高精度位置服务主导权、维护国家时空信息安全具有不可替代的战略价值[6]。

本文对北斗PNT增强信息处理技术进行了系统综述,围绕参数体系、核心算法、服务性能进行分析,并对下一步的发展进行了展望。

1　北斗PNT增强服务参数体系

北斗系统通过卫星播发导航信号及导航电文实现开放的PNT基本服务。导航电文中的广播星历为北斗系统提供时空基准,包含卫星轨道参数、卫星钟差参数以及电离层修正模型参数等,支撑北斗系统米级精度的PNT基本服务性能。广播星历包含的轨道参数是利用中国境内监测站的观测数据和星间链路数据进行全星座定轨,并进行星历拟合得到;卫星钟差参数则是将站间、星地和星间链路双向时间同步观测数据进行融合计算,并进行钟差参数拟合。

面向更高精度和完好性需求的应用,在开放的PNT基本服务基础上,文献[1]设计了一体化的北斗PNT增强服务体系。与基本服务相比,PNT增强服务的输入数据集与播发链路与PNT基本服务一致,信息处理方面进行了处理模式的升级和播发参数的拓展。在电文参数设计上,广域增强服务在广播星历的基础上叠加实时的轨道改正数、钟差改正数、格网电离层改正数,同时提供各类参数的完好性信息[8],实现空间信号精度优于0.3 m,支持基于载波相位的PPP服务;精密定位服务则在广域增强服务参数的基础上叠加分区综合改正数,空间信号精度可达0.1 m,用于加快PPP收敛的速度。北斗PNT增强信息处理的架构根据以上参数叠加体制进行设计,从而使得北斗系统形成了北斗基本导航、广域增强、精密定位三位一体的服务体系[6],如图1所示。

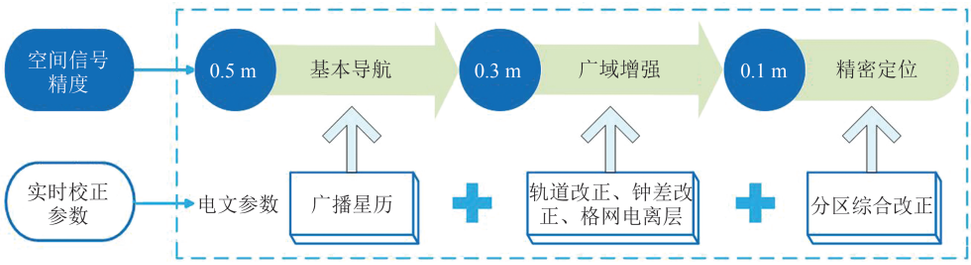


图1 北斗PNT参数体系及基本导航、广域增强、精密定位三位一体服务

Fig. 1 BDS PNT Parameter Architecture and Service of Basic Navigation, Wide-Area Augmentation and Precise Positioning

2 北斗PNT增强服务参数处理技术

北斗PNT增强服务参数体系包括北斗实时卫星轨道改正数、实时卫星钟差改正数、格网电离层改正数、分区综合改正数以及完好性参数,其核心处理技术包括非差伪距与历元间差分载波融合、地基观测与星间链路融合、模糊度与对流层等参数约束、格网电离层与分区综合改正加权、改正数时序匹配与基准统一、改正数叠加编码方法。

2.1 实时卫星轨道改正数计算方法

北斗系统播发的广播星历更新周期为1 h,卫星轨道误差随着外推时间增加而增大。实时卫星轨道改正数是用于实时修正广播星历中的卫星轨道预报误差[3]。在北斗PNT增强数据处理中,实时轨道改正数的处理策略包括两类:北斗二号利用地面监测站网的实时多频观测组成无电离层组合观测值,采用非差伪距与历元间差分载波融合策略,并引入基本导航定轨业务计算的模糊度以及对流层等参数,对每颗卫星的实时轨道改正数进行短弧滤波实时解算[4,9]。在北斗三号运控系统中,首先利用地面监测站网和星间链路观测值进行卫星动力学轨道计算,获得厘米级精度的精密轨道;在此基础上进行动力学轨道预报,并将卫星的动力学预报轨道与广播星历计算得到的轨道作差获得每颗卫星的实时轨道改正数[5]。北斗三号PNT增强服务中还包含了GPS卫星的实时轨道改正数,其采用了与北斗卫星类似的处理方法,区别在于输入的实时观测数据来源为分布区域更广的地面观测台站。北斗PNT增强服务中的北斗和GPS卫星实时轨道改正数的精度统计如表1所示,其中对比卫星类型包括北斗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit,IGSO)和中圆地球轨道(medium earth orbit,MEO)卫星,以及GPS系列卫星,R、T、N分别代表卫星轨道坐标系的径向、切向、法向,3D指三维空间中的轨道位置误差,用户测距误差(user ranging error,URE)通过R、T、N 3个方向的轨道误差加权计算得出。

表1 北斗和GPS卫星实时轨道和钟差改正数的精度统计[5]

Table 1 Accuracy Statistics of Real-Time Satellite Orbit and Clock Corrections for BDS-3 and GPS[5]

卫星类型	轨道/m					钟差/ns
	R	T	N	3D	URE	
北斗三号IGSO	0.155	0.188	0.220	0.328	0.157	0.241
北斗三号MEO	0.042	0.133	0.155	0.210	0.051	0.172
GPS Block IIR	0.050	0.153	0.120	0.202	0.057	0.156
GPS Block IIR-M	0.046	0.148	0.115	0.193	0.053	0.162
GPS Block IIF	0.047	0.164	0.119	0.209	0.055	0.177
GPS Block IIIA	0.043	0.120	0.125	0.181	0.049	0.153

2.2 实时卫星钟差改正数计算方法

与实时卫星轨道改正数类似,实时卫星钟差改正数用于实时修正广播星历中的钟差预报误差[3]。在北斗PNT增强数据处理中,北斗二号和北斗三号的实时钟差改正数计算策略存在差异。北斗二号早期播发了卫星等效钟差参数,将每颗卫星的实时轨道和钟差误差用一维的等效卫星钟差参数进行修正,从而等效钟差也包含了卫星轨道的误差[10]。等效钟差的计算采用了载波相位平滑伪距观测值,从而抑制了伪距观测的噪声。2017年起,北斗二号升级系统中采用了非差伪距与历元间差分载波融合的方法进行实时卫星轨道和钟差改正数的分离,大幅提升了实时误差修正的精度[4,9]。在以上实时解算策略中,对每颗卫星轨道径向改正数增加了强制为零的约束,使得实时钟差改正数吸收了卫星轨道径向改正数;由此计算的实时卫星钟差改正数保持了与原有等

效钟差的最大一致性,避免了系统升级引起用户授时服务基准的跳变。在北斗三号实时钟差改正参数处理模型中,对高精度卫星动力学预报轨道进行固定,同时引入动力学定轨中得到的载波相位模糊度和对流层参数并进行强约束,从而获得实时卫星钟差改正数[5]。北斗三号 PNT 增强服务中的 GPS 卫星实时钟差改正数计算采用了与北斗系统相同的处理策略。北斗 PNT 增强服务卫星实时钟差改正数的精度统计如表 1 所示。

2.3　格网电离层改正数计算方法

导航系统的电离层修正模型主要服务单频用户,尤其是民航领域。北斗系统广播星历采用的电离层模型是经验模型,时空分辨率低。为提升北斗单频用户的 PNT 性能,北斗系统播发了格网电离层改正参数[3]。其原理是将电离层延迟在空间上划分为经纬度格网单元分布,其中北斗二号 320 个格网按照 2.5°(纬度)×5°(经度)进行划分,北斗三号按照国际民用航空组织标准设计了 2 192 个格网[11-12]。北斗实时电离层延迟的计算也是基于区域地面站网的实时观测数据,同样采用了非差伪距与历元间差分载波融合的方法。其处理流程为:首先基于单层薄层假设,计算得到每个电离层观测穿刺点(ionospheric pierce point,IPP)处的天顶延迟,然后以每个电离层格网点(ionospheric grid point,IGP)附近的 IPP 天顶电离层延迟数据为输入,利用不同的加权插值方法计算得到预先定义的 IGP 处的格网电离层垂直延迟(grid ionospheric vertical delay,GIVD),并计算格网电离层垂直误差(grid ionospheric vertical error,GIVE)指数,用于表征 GIVD 的精度情况。北斗系统按照各参数定义的播发频率通过 GEO 卫星向用户播发每个格网点的 GIVD 和 GIVE 指数。为提升格网电离层的覆盖性,北斗三号还融合了其他卫星导航系统的观测数据。格网电离层改正数是决定单频用户定位精度的关键因素,其在中国大陆大部分区域可实现优于 2 TECU 的改正精度,平均改正率可达 75%~87%,精度与稳定性均显著优于广播星历中播发的经验模型[13]。

2.4　分区综合改正数计算方法

采用轨道、钟差和电离层三重改正后,大部分空间段的观测误差已被修正,但观测值中仍存在无法模型化的空间段误差以及环境相关的误差[1]。为进一步消除用户伪距和载波相位观测值的残余误差,北斗系统设计了分区综合改正数,对每颗卫星观测误差进行进一步修正。北斗分区综合改正数体制将北斗 PNT 增强服务区划分为数十个区域,利用分区内观测值残余误差在空间上存在的相关性进行误差修正[3-4]。其处理流程为:首先利用各个分区内监测站的实时观测数据以及广播星历、实时轨道、钟差修正等参数,计算各测站对每颗卫星的伪距和载波相位观测值的残余误差。在此基础上,将同一分区内各监测站对相同卫星的残差根据各测站至分区中心的距离确定权重,采用反距离加权方法计算平均值,得到该分区内每颗卫星的综合改正数。在分区综合改正计算过程中,由于每个测站计算的原始残差中包含了测站钟差误差以及载波相位模糊度参数的影响,需要进行残差时间基准以及各测站模糊度的归算[14]。此外,为了保证北斗各类服务的向下兼容、参数播发量最小,实现改正效果的最优化,分区综合改正数的电文编排采用了参数叠加的二次编码策略[2]。

2.5　北斗 PNT 增强完好性参数计算方法

北斗 PNT 增强的完好性参数主要用于量化信号误差的置信度,确保在故障发生时能及时向用户告警[8]。北斗 PNT 增强服务的完好性参数主要包括用户距离精度(user range accuracy,URA)、用户差分距离误差(user differential range error,UDRE)和 GIVE 指数[11-12]。

UDRE 用于量化经过实时轨道改正数和钟差改正数修正后,仍然存在残余误差的统计方差,用户可利用 UDRE 判断当前增强参数是否满足完好性要求[8,15]。其处理流程为:利用地面监测站观测数据,采用最小方差估计方法,在解算每颗卫星的轨道和钟差改正数的同时,依据改正数的方差-协方差信息计算 UDRE 参数,再转换为 UDRE 索引。GIVE 是用于量化 IGP 处垂直延迟改正数经模型修正后的残余误差指标,进而计算保护级,以评估电离层延迟改正对定位完好性的影响。其处理流程为:利用地面监测站的双频观测数据在获取增强改正参数的同时,综合考虑电离层残差分布的偏度和峰度统计特性,生成包络实际估计误差的 GIVE 指数,再转换为 GIVE 索引。

3　北斗 PNT 增强服务用户算法及性能

3.1　PNT 增强服务参数用户修正方法

北斗系统利用星座中的 GEO 卫星播发了以上增强参数,用户接收解码后采用伪距以及载波

相位观测值进行PNT应用时可对广播星历进行修正。采用以上增强参数对卫星轨道、钟差以及电离层和综合误差进行修正,用户站对卫星s第i个频点的伪距和载波相位观测方程P_i^s、L_i^s分别为:

$$\begin{cases} P_i^s = \tilde{\rho} + c\left(t^s - \delta t^s\right) - ct_r - d_i^s + m\alpha_i I^s + \delta L + T_r + \varepsilon_p \\ L_i^s = \tilde{\rho} + c\left(t^s - \delta t^s\right) - ct_r + m\alpha_i I^s + \delta L + T_r + N + \varepsilon_l \end{cases} \tag{1}$$

$$\tilde{\rho} = \sqrt{(x^s - \delta x^s - x)^2 + (y^s - \delta y^s - y)^2 + (z^s - \delta z^s - z)^2} \tag{2}$$

式中,c为光速;(x^s, y^s, z^s)、t^s分别为利用广播星历计算的卫星轨道和钟差;d_i^s为对应频率的伪距偏差改正数;m为电离层投影系数;α_i为与频点相关的电离层比例系数;I^s为基于格网电离层参数计算的用户与卫星视线IPP的GIVD;δL为用户计算得到的分区综合改正数;$(\delta x^s, \delta y^s, \delta z^s)$、$\delta t^s$分别为基于增强参数计算的观测时刻的卫星轨道和钟差改正数;$\tilde{\rho}$为经过实时卫星轨道改正数之后的卫星和地面测站的几何距离;T_r和N分别为需要进行参数估计的对流层延迟和载波相位模糊度参数;(x, y, z)、t_r分别为待求的用户坐标和钟差参数;ε_p和ε_l分别为伪距和载波相位观测值的噪声。

各类参数的播发频度存在差异,使用时需要根据观测时刻、增强参数时标及其数据龄期进行匹配,并且要与对应龄期的广播星历适配,若各类参数时序匹配错误,将会因改正基准不一致而引入额外误差。北斗三号增强PNT参数存在GPS钟差改正数跳变情况和URA参数精度差的问题,影响动、静态定位的收敛时间,文献[16-17]提出了跳变探测与拼接的策略,设计了基于北斗短报文的精化URA播发方案,有效消除跳变影响,定位精度达到0.08 m,动态定位收敛时间10.7 min,缩短了18.9%。

增强PNT用户在以上电离层延迟I^s的计算过程中,首先根据自身的概略位置和所观测卫星的方位角、高度角,计算出导航信号传播路径与电离层单层模型相交的IPP地理坐标,再依据系统播发的格网掩码信息,确定该IPP周围有效的格网点。格网点的选取策略根据IPP所在的纬度区域而不同:当穿刺点位于南北纬60°之间时,优先选择4个格网点构成5°×5°的四边形区域,若不可用,则退而选择3个格网点构成三角形区域或更大范围的10°×10°区域;当IPP位于更高纬度时,格网的经度差相应增大。选定有效格网点后,用户从播发信息中读取这些格网点的GIVD,根据IPP的具体位置按权重进行内插:当采用4个格网点时,使用双线性内插,权重按IPP在四边形内的相对位置分配;当采用3个格网点时,使用三角形内插,权重按面积比例分配,以此获得IPP处的GIVD。最后,将该GIVD乘以与卫星高度角相关的投影因子,即可得到最终用于修正伪距观测值的斜路径电离层改正数。

增强PNT用户在应用分区综合改正数的过程中,可能存在用户运动过程中跨分区的情况,从而出现分区综合改正数跨分区切换的问题。针对跨分区服务中分区综合改正数中断或切换导致的定位精度恶化和重新收敛问题,文献[18]提出了一种分区综合改正数拟合模型,该方法利用多个邻近分区的分区综合改正数与待拟合分区改正信息之间的双差残差,对中断弧段的改正数进行拟合填补,有效避免定位重新收敛,保持定位结果的连续性和可靠性。文献[19]从用户端出发提出了分区切换算法,该算法利用相邻分区综合改正数历元间变化量高度相关的特性,在用户跨分区切换时以相邻分区改正数的历元间变化量递推计算连续的"伪"分区综合改正数,实现了分区改正数中断情况下的分米级精度定位性能。

3.2 PNT增强服务用户定位算法体系

在北斗增强改正数的四重叠加架构基础上,北斗构建了用户增强定位算法体系。用户依据观测数据类型以及增强参数接收的情况,进行算法的适配。对于双频和单频用户都支持标准单点定位(standard point positioning, SPP)以及PPP两种定位模式,用户算法见表2,详细模型参见文献[3]。表2中的函数$f(x, y, z, t_r)$、$g(x, y, z, t_r)$均为包含待估参数的观测方程;(x, y, z)、t_r、P_1^s、L_1^s、P_i^s、L_i^s等参数含义同式(1);I^s、$\tilde{I}^s$分别为电离层延迟的待估值和先验值;P_3^s、L_3^s分别为无电离层组合伪距和载波相位观测值。

在表2所列算法中,单频SPP和双频SPP采用常规的伪距定位模型。单频PPP可采用两种定位模型:一种是利用半合法组合观测值,其中伪距观测值需要采用实时电离层改正数进行修正,而载波相位观测值通过与伪距观测值形成消电离层组合;另一种单频PPP模型是非差非组合模型,对单频的伪距和载波相位分别构建观测方程。双频PPP也有两种模型:一种是常用的无电离层组合,通过两个频率观测值的组合消除电离

层的影响,从而无需进行实时电离层延迟的修正;另一种双频 PPP 模型是非差非组合模型,对两个频点的伪距和载波相位分别构建观测方程,并将第一个频点的电离层延迟与测站坐标和钟差一起作为待求未知数。在单频 PPP 和双频 PPP 非差非组合模型中,可引入用户接收到北斗实时电离层延迟改正数作为先验约束,先验精度可基于北斗播发的 GIVE 索引参数进行计算。

表 2　北斗 PNT 增强服务用户定位算法

Table 2　User Positioning Algorithms for BDS PNT Augmentation Service

定位模式	观测数据	定位模型
单频 SPP	单频伪距观测值	$f(x,y,z,t_r)=P_i^s$
单频 PPP	单频伪距观测值、载波相位观测值	$\begin{cases} f(x,y,z,t_r)=P_1^s \\ g(x,y,z,t_r)=\dfrac{P_1^s+L_1^s}{2} \end{cases}$ 或者 $\begin{cases} f(x,y,z,t_r,I^s)=P_1^s \\ g(x,y,z,t_r,I^s)=L_1^s \\ I^s=\tilde{I}^s \end{cases}$
双频 SPP	双频伪距观测值	$f(x,y,z,t_r)=P_3^s$
双频 PPP	双频伪距观测值、载波相位观测值	$\begin{cases} f(x,y,z,t_r)=P_3^s \\ g(x,y,z,t_r)=L_3^s \end{cases}$ 或者 $\begin{cases} f(x,y,z,t_r,I^s)=P_i^s \\ g(x,y,z,t_r,I^s)=L_i^s \\ I^s=\tilde{I}^s \end{cases}$

3.3　PNT 增强服务应用情况及性能评估

北斗 PNT 增强服务的应用十分广泛。例如,基于北斗三号 SBAS 服务的 PPP 技术可实时捕获厘米级同震位移,并据此快速反演震级、矩张量和断层滑动分布,其结果与事后精密解高度吻合,可有效摆脱地面互联网的依赖,为山区或通信中断场景下的地震预警和灾害快速评估提供可靠技术支持[20-21]。在海洋定位方面,针对海洋环境互联网受限且 RTK 基线增长导致精度下降的问题,BDSBAS 通过 GEO 卫星广播实时轨道/钟差改正,无需地面通信链路,即可在远海实现分米级实时定位,为深远海资源勘探和水下导航提供高自主性定位支撑[22]。在时间频域领域,基于 BDSBAS 实时产品恢复的精密卫星钟差,可实现实时单站授时和站间时间传递,支持亚纳秒级实时时间比对,且北斗三号的时间基准稳定性优于 GPS,该能力可直接服务于地震台网、海底观测网等分布式地学观测系统,在光纤无法覆盖的区域仍能保证高精度时间统一[23-24]。以上诸多应用中,采用的观测数据涵盖了 B2a、B1C 等北斗系统全频点,表 3 统计了公开发表的部分应用中的定位精度和定位收敛时间,其中收敛时间通常定义为静态模式下,水平/高程误差小于 0.1/0.2 m;动态模式下,水平/高程误差小于 0.2/0.4 m。

表 3　北斗 PNT 增强定位模式及定位精度

Table 3　Positioning Modes and Positioning Accuracy of BDS PNT Augmentation

定位模式	定位精度/m	收敛时间/min
单频 SPP	动态:水平 1.0～2.3,高程 1.9～3.8[25]	
单频 PPP	静态:水平 0.02～0.18,高程 0.04～0.22 动态:水平 0.15～0.5,高程 0.4～0.8[3-4,26-28]	静态:8～100 动态:12～180
双频 SPP	动态:水平 0.4～0.7,高程优于 0.5[9]	
双频 PPP	静态:水平 0.01～0.13,高程 0.01～0.18 动态:水平 0.05～0.17,高程 0.1～0.28[3-5,15,20-32]	静态:2～40 动态:5～60

4　北斗 PNT 增强技术展望

北斗系统通过系统内的 GEO 卫星播发的实时卫星轨道、钟差、格网电离层、分区综合改正等改正数,实现了从广域差分到精密定位的 PNT 增强体系。针对北斗系统未来的发展,中华人民共和国国务院新闻办公室 2022 年 11 月发布《新时代的中国北斗》白皮书指出,面向未来,中国将建设技术更先进、功能更强大、服务更优质的北斗系统,建成更加泛在、更加融合、更加智能的综合时空体系。针对该目标,北斗系统内嵌 PNT 增强技术的后续发展主要体现在以下几个方面:

1)异构多体制时空基准测定新技术。目前北斗增强 PNT 采用的观测数据仅包含地面监测站和星间链路的观测数据。而未来综合时空体系中包含的异构星座导航系统的观测拓扑更复杂、观测体制也更丰富,其中拓扑节点包括地面测站、北斗卫星、低轨卫星、地基卫星等,需要发展异构多体制观测情况下的时空基准测定技术。

2)全球 PNT 增强误差校正新体制。北斗增强 PNT 服务目前仅通过 GEO 卫星播发四重差分改正数,服务区域仅覆盖亚太重点区域,且定位收敛时间较长。随着未来多体制异构星座的建设,增强 PNT 服务需要进一步发展增强参数体系、参数计算策略、参数播发体制和协议等。

3)全球PNT增强可信定位算法。未来PNT增强系统的观测数据更多源、增强参数体系更为丰富,需要深入研究误差精确修正、模糊度快速固定方法等新算法,发展可信定位框架体系,为自主、无人、编队等系统的探测、感知能力提供支撑。

参 考 文 献

[1] 周建华,陈俊平,胡小工.北斗卫星导航系统原理及其应用[M].北京:科学出版社,2020.
ZHOU Jianhua, CHEN Junping, HU Xiaogong. Principle and Application of Beidou Satellite Navigation System[M]. Beijing: Science Press, 2020.

[2] ZHOU J. BDS SIS Performance Improvement for Legacy PNT and Differential Service[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC), Shanghai, China, 2017.

[3] CHEN J P, ZHANG Y Z, YU C, et al. Models and Performance of SBAS and PPP of BDS[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 4.

[4] CHEN J P, WANG A H, ZHANG Y Z, et al. BDS Satellite-Based Augmentation Service Correction Parameters and Performance Assessment[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 766.

[5] TANG C P, HU X G, CHEN J P, et al. Orbit Determination, Clock Estimation and Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(9): 60.

[6] 周建华,陈俊平,张晶宇.北斗"一带一路"服务性能增强技术研究[J].中国工程科学,2019,21(4):69-75.
ZHOU Jianhua, CHEN Junping, ZHANG Jingyu. Service Performance Enhancement Technologies for BeiDou Navigation Satellite System Along the Belt and Road[J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(4): 69-75.

[7] 陈俊平,张益泽,于超,等.北斗卫星导航系统精密定位报告算法与性能评估[J].测绘学报,2022,51(4):511-521.
CHEN Junping, ZHANG Yize, YU Chao, et al. Processing Algorithms and Performance Evaluation of BDS RDSS Location Reporting Service[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(4): 511-521.

[8] CAO Y L, CHEN J P, HU X G, et al. Design of BDS-3 Integrity Monitoring and Preliminary Analysis of Its Performance[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(4): 1125-1138.

[9] 陈俊平,杨赛男,周建华,等.综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型[J].测绘学报,2017,46(5):537-546.
CHEN Junping, YANG Sainan, ZHOU Jianhua, et al. A Pseudo-Range and Phase Combined SBAS Differential Correction Model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 537-546.

[10] CAO Y L, HU X G, WU B, et al. The Wide-Area Difference System for the Regional Satellite Navigation System of COMPASS[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(7): 1307-1315.

[11] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.1版)[EB/OL].[2026-07-03]. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201710/P020171202693088949056.pdf.
China Satellite Navigation System Management Office. BeiDou Satellite Navigation System Space Signal Interface Control Document Public Service Signal (Version 2.1)[EB/OL]. [2026-07-03]. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201710/P020171202693088949056.pdf.

[12] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件星基增强服务信号BDSBAS-B1C(1.0版)[EB/OL].[2026-07-03]. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/202008/P020200803362063969518.pdf.
China Satellite Navigation System Management Office. BeiDou Satellite Navigation System Space Signal Interface Control Document Star-Based Augmentation Service Signal BDSBAS-B1C (Version 1.0)[EB/OL].[2026-07-03]. http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/202008/P020200803362063969518.pdf.

[13] 房成贺,陈俊平,兰孝奇,等.综合伪距相位观测的实时电离层延迟格网改正算法研究[J].大地测量与地球动力学,2018,38(10):1011-1015.
FANG Chenghe, CHEN Junping, LAN Xiaoqi, et al. Research of Real-Time Ionospheric Delay Grid Correction Algorithm Based on Pseudo-Range and Phase Observation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(10): 1011-1015.

[14] 陈俊平,张益泽,周建华,等.分区综合改正:服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正模型[J].测绘学报,2018,47(9):1161-1170.
CHEN Junping, ZHANG Yize, ZHOU Jianhua, et al. Zone Correction: A SBAS Differential Correction Model for BDS Decimeterlevel Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1161-1170.

[15] 马岳鑫,唐成盼,胡小工,等.基于残差统计特性的中国区域格网电离层GIVE算法优化[J].测绘学报,2021,50(3):304-314.

MA Yuexin, TANG Chengpan, HU Xiaogong, et al. Optimization of GIVE Algorithm for Grid-Based Single Shell Ionospheric Model over Chinese Region Based on Residual Statistics[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(3): 304-314.

[16] CHEN J P, SONG Z Y, ZHANG Y Z, et al. Clock Systematic Jump Estimation and URA Refinement of BDS-3 B2b Real-Time Precise Point Positioning Service[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(2): 73.

[17] 宋子远, 陈俊平, 张益泽, 等. BDS-3 B2b-PPP URA评估精化与播发方法[J]. 导航定位学报, 2024, 12(4): 58-67.
SONG Ziyuan, CHEN Junping, ZHANG Yize, et al. Methods of URA Evaluation Refinement and Re-Broadcast Based on BDS-3 B2b-PPP Service[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2024, 12(4): 58-67.

[18] 王兵浩, 周建华, 陈俊平, 等. 北斗WADS分区综合改正数拟合模型及定位分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(4): 565-573.
WANG Binghao, ZHOU Jianhua, CHEN Junping, et al. A Fitting Algorithm and Positioning Analysis of BDS WADS Zone Correction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(4): 565-573.

[19] 陈俊平, 王阿昊, 张益泽, 等. 北斗广域差分分米级定位的分区切换算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 822-830.
CHEN Junping, WANG Ahao, ZHANG Yize, et al. PPP Algorithm Using BDS New SBAS Differential Corrections[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 822-830.

[20] ZANG J F, FAN S J, XU C J, et al. Performance Assessment of the BDS-3 PPP-B2b Service for Real-Time Earthquake Source Description: A Case Study for the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 26.

[21] 方荣新, 陈智潜, 李大炜, 等. 基于北斗PPP-B2b改正信号的地震同震形变实时监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(3): 567-575.
FANG Rongxin, CHEN Zhiqian, LI Dawei, et al. A Method for Real-Time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(3): 567-575.

[22] GENG T, LI Z Q, XIE X, et al. Real-Time Ocean Precise Point Positioning with BDS-3 Service Signal PPP-B2b[J]. *Measurement*, 2022, 203: 111911.

[23] ZHANG Z, SUN B Q, WANG K, et al. Sub-Nanosecond UTC Dissemination Based on BDS-3 PPP-B2b Service[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(1): 43.

[24] HE Q Q, CHEN L, LIU L, et al. Long-Term Performance Evaluation of BeiDou PPP-B2b Products and Its Application in Time Service[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1358.

[25] HU Z G, LIU X Z, WANG G X, et al. Initial Performance Assessment of the Single-Frequency (SF) Service with the BeiDou Satellite-Based Augmentation System (BDSBAS)[J]. *GPS Solutions*, 2022, 27(1): 35.

[26] 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(1): 63-71.
CHEN Junping, YU Chao, ZHOU Jianhua, et al. Decimeter-Level Algorithm for Satellite-Based Augmentation Systems and Performance Analysis of BDS-2/BDS-3[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2021, 51(1): 63-71.

[27] 张益泽, 陈俊平, 杨赛男, 等. 北斗广域差分分区综合改正数定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(2): 159-165.
ZHANG Yize, CHEN Junping, YANG Sainan, et al. Analysis of PPP Performance Based on BDS Comprehensive Zone Corrections[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 159-165.

[28] ZHOU H T, WANG L, FU W J, et al. Real-Time Single-Frequency Precise Point Positioning Using BDS-3 PPP-B2b Corrections[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112178.

[29] TAO J, LIU J N, HU Z G, et al. Initial Assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS Compared with the CNES RTS[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 131.

[30] YANG H C, REN X D, LIU M X, et al. Dual-Frequency to Five-Frequency Real-Time Precise Point Positioning Using New BDS-3 PPP-B2b Service[J]. *Earth, Planets and Space*, 2024, 76(1): 82.

[31] ZHANG Z T, WANG H. Integrated BeiDou Satellite-Based Augmentation System Framework Combining B2a and B1C Services[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(2): 74.

[32] 陈俊平, 胡一帆, 张益泽, 等. 北斗星基增强系统性能提升初步评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 1075-1082.
CHEN Junping, HU Yifan, ZHANG Yize, et al. Preliminary Evaluation of Performance of BeiDou Satellite-Based Augmentation System[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(7): 1075-1082.