引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20230472

Citation: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.DOI:10.13203/j.whugis20230472

北斗/GNSS广域精密定位技术与服务:现状与展望

陈秀德[1,2] 刘 惠[2] 蔚保国[1] 盛传贞[1] 黄观文[3]
惠沈盈[1,2] 应俊俊[1]

1 中国电子科技集团公司第五十四研究所卫星导航系统与装备技术国家重点实验室,河北 石家庄,050011
2 西安电子科技大学计算机科学与技术学院,陕西 西安,710071
3 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

摘 要:全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)精密定位服务已广泛应用于国防建设、智慧城市、交通运输、智能机器人、无人机等,近年来精密定位技术与服务应用不断发展,受到各行各业广泛关注。首先分类归纳了精密单点定位、模糊度固定的精密单点定位及精密单点实时动态定位技术在多系统多频、大气改正及模糊度固定等方面的研究进展,其次回顾了主要卫星导航系统精密定位服务在服务能力、范围等方面的特点及长期发展规划,然后总结了当前主流商业公司精密定位服务技术特点、服务能力及应用进展情况,最后探讨分析了当今GNSS精密定位服务面临的挑战及其发展趋势与未来展望。

关键词:精密单点定位;精密单点实时动态定位;厘米级增强服务;高精度服务;实时扩展;精密定位服务

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-05-22

DOI:10.13203/j.whugis20230472 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0413-17

BeiDou/GNSS Wide-Area Precise Positioning Technology and Service: Current Situation and Prospects

CHEN Xiude[1,2] *LIU Hui*[2] *YU Baoguo*[1] *SHENG Chuanzhen*[1] *HUANG Guanwen*[3]
HUI Shenying[1,2] *YING Junjun*[1]

1 State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050011, China
2 School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China
3 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Global navigation satellite system (GNSS) precise positioning service have been widely applied in various industries such as national defense construction, smart city, transportation, smart robot, unmanned aerial vehicle. The technology and service application of precise positioning continue to develop in recent years. First, this paper summarizes the research progress of precise positioning technologies represented by precise point positioning, precise point positioning with ambiguity resolution, and precise point positioning and real time kinematic in the aspect of multi-system and multi-frequency, atmospheric correction and ambiguity resolution. Second, it reviews the service capacity, scope and other aspects and long-term development plan of precise positioning service for the major satellite navigation systems. Then, the characteristics, service capabilities, and application progress of precise positioning service and technology provided by the mainstream commercial companies are discussed. Finally, it analyzes the challenges faced

基金项目:国家重点研发计划(308课题)。

第一作者:陈秀德,博士,工程师,主要从事GNSS导航定位与授时相关研究。zhuiqiuzirancxd@sina.com

by GNSS precise positioning service, the development trends, and the future prospects.

Key words: precise point positioning; precise point positioning and real time kinematic; centimeter level augmentation service; high accuracy service; real time extended; precise positioning service

随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)在多系统、多信号、快收敛、高灵敏等技术的快速发展[1-3],GNSS已成为提供实时精密定位服务的重要技术手段,全方位支撑了新兴应用,如无人驾驶、无人机配送、智慧农业等,在国防建设、日常生产生活中扮演着重要角色。以自动驾驶(automated driving, AD)为例,对于高等级水平AD,即高度自动驾驶水平L4和完全自动驾驶水平L5,高效安全是其基本特征,其对定位的基本要求是在全球广域范围,具备水平定位精度在95%以上情况下优于0.2 m的可用性、99.9%以上的完好性以及快速服务能力[2,4-6]。AD可以通过GNSS、机载激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)等多源传感器定位满足上述定位精度要求,但只有GNSS可为其他传感器提供全球统一的绝对位置和时间信息[7]。

GNSS定位主要分为基于码伪距和载波相位两类,前者提供分米至米级定位,后者提供毫米至分米级定位。GNSS基本定位服务一般只能在开阔环境下提供2~3 m级定位精度,无法满足精密定位应用,而通过GNSS增强可以提高定位精度。按照播发链路方式,GNSS增强可以分为星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)和地基增强系统(ground-based augmentation system, GBAS),前者通过卫星通信链路可以在全球或广域范围提供增强服务,后者通过地基通信链路可在局域范围(如机场、试验场)提供增强服务。按增强信息推送方式,可分为观测空间表示(observation space representation, OSR)和状态空间表示(state space representation, SSR)两种方式,与OSR相比,SSR可在占用较少通信宽带条件下,为用户提供增强定位、完好性、安全认证等信息。目前,主流的GNSS精密定位技术包括精密单点定位(precise point positioning, PPP)、实时动态定位(real time kinematic, RTK)以及新兴的精密单点实时动态定位(PPP-RTK)技术[7-10],其中RTK技术采用OSR推送,其他两种技术采用SSR推送方式。单站RTK采用载波相位双差模糊度固定(ambiguity resolution, AR)技术,瞬时即可获取厘米级定位,但需要与参考站进行双向通信,随着基线变长,会引入电离层、对流层等系统误差,因此,其作用范围有限,一般不超过20 km[9];为弥补其不足,后来出现了网络RTK(network-RTK, N-RTK)技术,扩大了单站RTK作用范围,基站间距一般在50~70 km,但并发用户数量仍然受限[11]。并且,随着政府对个人隐私权的重视,大规模应用中位置隐私保护变得至关重要[12],因此,这种需要上报概略位置的差分精密定位技术无法满足自动驾驶等高安全行业的需求。与之相比,PPP技术只需单向广播通信,用户数量无上限,但需要较长收敛时间,一般在20~30 min左右[13],这并不能满足无人驾驶、无人机等实时高动态行业需求;为进一步改善这种现状,很多学者开展了精密单点定位模糊度固定(PPP-AR)技术或者引入外部大气改正约束的方法来加速收敛,但仍需5~20 min才能完成定位收敛[12-18]。为解决定位收敛慢、用户数量受限等一系列问题,实现快速精密定位,PPP-RTK技术逐渐进入人们的视野,成为备受关注的新一代GNSS精密定位技术,该技术不仅具备了PPP单站定位、广域作用范围、用户无上限的优点,还具备了RTK快速厘米级定位的能力,通过区域监测网提供的大气改正信息,其收敛时间一般优于1 min[19-22]。从行业需求出发,基于地基互联网通信的精密定位服务(precise positioning service, PPS)已然无法满足恶劣场景(如沙漠、山区、海洋等)应用需求,而星基广域PPS不受地面通信基站限制,可满足全球或广域多场景下的应用需求。因此,本文主要围绕适用于全球或广域的精密定位技术与服务展开讨论。

本文旨在通过对GNSS精密定位技术与应用服务的发展现状、实际存在的问题及未来展望进行系统综述,让人们对GNSS精密定位技术进展及服务应用有更加系统性了解,为技术的发展与应用推广提供一定思路。本文介绍了GNSS精密定位技术的研究进展,论述了主要卫星导航系统广域PPS的特点及应用,对主流商业公司提供的广域PPS进行了论述,分析了当前PPS面临的挑战及其发展趋势与未来展望。

1　精密定位技术

与差分定位技术相比,非差定位技术具有通信更安全、可估参数更全面、基站网络成本更低廉等显著优越性。该技术从首次提出至今已20多年,先后经历了从单系统单/双频到多系统多频、组合到非组合、浮点解到固定解等方面的快速发展,逐渐形成了以PPP、PPP-AR和PPP-RTK为代表的不同服务等级的GNSS精密定位技术,为用户在全球或广域范围提供时空统一的无缝精密定位,主要通过SSR形式传输各类改正信息[23]。本文归纳了3种技术的主要特点:PPP定位精度为分米级,可在全球范围推广,主要改正信息包括卫星精密轨道、钟差及码偏差改正,但定位收敛较慢;与之相比,PPP-AR定位改正需增加卫星相位偏差信息,常见形式包括非校正相位延迟(uncalibrated phase delay, UPD)和相位小数周偏差(fractional cycle biases, FCB),其定位精度和收敛时间均有一定提升;而PPP-RTK定位在PPP-AR基础上增加了大气改正信息(含电离层和对流层),定位精度和收敛时间与RTK更为接近。3种技术的主要特点见表1,其中RSSR表示国际海运事业无线电技术委员会(radio technical commission for maritime services, RTCM)SSR协议,CSSR(compactSSR)表示压缩SSR协议。

表 1　PPP、PPP-AR、PPP-RTK主要技术特点

Table 1　Main Technical Features of PPP, PPP-AR and PPP-RTK

技术类型	定位精度	收敛时间/min	可覆盖范围	协议类型	宽带要求/bps	参数个数
PPP	分米级	15～30	全球	RSSR	500	3
PPP-AR	厘米至分米级	5～20	全球	CSSR	500	4
PPP-RTK	厘米级	＜1	区域	CSSR	2 000	6

1.1　PPP和PPP-AR研究进展

PPP技术是在1997年首次被提出,采用事后处理方式,可获取2.3～3.5 dm级定位,与差分定位相比,PPP具有全球应用和无基线长度限制等特点[12]。静态PPP定位测试表明,在95%置信水平下,达到水平20 cm或者更高定位精度,收敛时间至少需要20 min[24]。与浮点PPP相比,PPP-AR收敛速度更快、稳定性和定位精度更高,尤其是东方向定位精度[25-27],此外,AR技术可以在信号中断恢复后场景中加速再收敛。与RTK差分定位相比,PPP收敛比较慢,主要原因是待估参数间存在较强相关性,RTK可通过双差来消除卫星和接收机码和相位偏差,将其与模糊度分离,可实现瞬时收敛,并实现厘米水平实时定位精度;而PPP收敛需要一段时间才能将卫星和接收机相位偏差与模糊度进行分离[28]。PPP技术这种缓慢收敛的缺点成为制约其在实时应用中的最大壁垒。近几年,随着各GNSS在多系统、多频点及兼容与互操作等方面的快速发展,PPP技术也迎来新的发展机遇,很多学者在PPP/PPP-AR多系统、多频点、模糊度固定策略及大气改正方面开展了研究工作。

在多系统、多频点方面,很多学者围绕系统内、系统间偏差估计策略等方面开展了研究,可提升定位精度和加速收敛。文献[29]从系统辅助角度考虑加入GLONASS观测量,可加速GPS PPP固定,5 min内固定率提高了61%,10 min内固定率可达到95.83%。文献[27]提出GPS三频数据进行PPP快速AR的方法,窄巷模糊度固定率在65 s即可达到99%,并且在强多径环境下,三频PPP固定率仍可达到78%,而双频PPP基本无法固定。随着GPS的现代化以及Galileo、北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)的全球化发展,从传统的GPS、GLONASS双系统单/双频向多系统多频发展。文献[30-31]基于GPS/Galileo/BDS三系统三频数据,提出采用估计频间偏差(inter-frequency clock bias, IFCB)方法来提高UPD估计质量,PPP-AR三维精度可达2.2 cm,收敛时间为10.8 min,与双频相比,收敛时间缩短15.6%;文献[32]提出了GLONASS辅助GPS/BDS的PPP-AR模型,可将收敛时间缩短10%～20%,并且提出了部分模糊度固定模型,可有效改善定位性能。文献[33-34]进行了四系统联合PPP分析,与单GPS相比,收敛速度提升70%,定位精度提高25%。此外,还提出了一种四系统UPD估计模型用于PPP-AR解算,首次收敛时间可缩短至9.21 min,天顶方向定位精度可提升84.3%。文献[35]提出采用非组合数据进行四系统PPP,收敛速度可提升60%以上,对单频收敛后精度提升约25%,对双

频收敛后精度无明显提升效果。

在模糊度固定策略方面,学者们主要围绕卫星相位偏差估计模型,先后提出了恢复整数钟(integer recovery clock, IRC)、去耦合钟差(decoupled clock, DC)、UPD和相位钟/偏差模型。文献[26]首次提出了IRC方法实现AR,该方法的前提是假设在单天弧段内卫星宽巷相位偏差为固定值,首先基于Melbourne-Wübbena组合固定宽巷模糊度并提取小数部分的宽巷相位偏差,然后基于无电离层组合(ionosphere-free, IF)实现窄巷模糊度固定。文献[36]提出了一种顾及质量控制的逐级模糊度固定的整数相位钟方法,可进一步提升定位性能。文献[37]提出了DC方法,该方法在窄巷模糊度处理策略上与IRC相同,而宽巷相位偏差是按逐历元估计得到,但该方法需要估计两套卫星钟差产品,并且IRC、DC方法与情报采集卫星(information gathering satellite,IGS)钟差、码偏差产品均不兼容[38-39]。文献[25]首先提出了UPD方法,该方法在宽巷相位偏差处理策略上与IRC相同,而将窄巷相位偏差作为窄巷模糊度的小数部分提取出来,然后重复计算宽巷相位偏差,该方法固定率超过80%,并且与IGS卫星钟差产品兼容[40]。文献[41]指出,在解算窄巷相位偏差时,如果使用模糊度固定解,可提升窄巷相位偏差产品精度,与传统UPD方法相比,这种改进的UPD方法可提升定位精度,在东方向定位精度可提升15.4%。此外,文献[42]基于IRC和UPD方法提出一种改进的相位钟/偏差方法,该方法与IRC方法相比,可以与IGS钟差和码偏差产品兼容,可以提升UPD方法定位精度,在东方向单天定位精度可提升20%,并且相位偏差产品采用单天估计策略,而不是UPD方法中常用的15 min估计策略,使PPP-AR更容易满足实际应用需求。

在大气改正方面,围绕电离层和对流层增强改正约束PPP来加速收敛和提升定位精度。文献[39]为实现快速PPP,同时考虑到DC方法与IGS全球电离层格网(global ionosphere map, GIM)模型无法兼容问题,提出了基于区域监测网修正GIM方法,通过与DC策略进行联合解算,实现水平10 cm精度所需收敛时间由30 min缩短至4.5 min(在68%置信水平),区域监测站密度仅为150 km左右。文献[43]提出通用对流层随机模型,可以通过该模型改正或者约束对流层进行PPP,两种方法均可缩短收敛时间,尤其是天顶方向。文献[9,44]指出大气约束(尤其是电离层约束)可缩短双/三频PPP收敛时间,并验证了GIM模型约束PPP的性能,收敛时间缩短60%以上(在68%置信水平)。文献[45]考虑了接收机的差分码偏差(differential code biases, DCB)对定位结果的影响,提出了一种电离层约束模型,将电离层电子总含量(total electron content,TEC)融合到倾斜TEC(slant TEC,STEC)和垂直TEC(vertical TEC,VTEC)中,经GIM和区域电离层验证表明,实现水平0.1 m精度的收敛时间可缩短至7.5 min。文献[46]提出了一种实现PPP瞬时收敛方法,首历元通过位置和对流层约束来估计卫星相位偏差、方差等参数,然后将这些参数应用于PPP滤波处理,可实现PPP瞬时收敛。

1.2 PPP-RTK研究进展

PPP-RTK思想是由Wübbena在2005年首次提出,其融合了PPP和N-RTK的优点,既克服了PPP收敛慢的缺点,又摆脱了RTK对双向通信及短基线约束的苛刻要求[47],其特征为实时快速模糊度固定的高精度PPP定位技术,基本思想是基于一定密度的基准网,通过PPP整数解实现大气改正的精密提取与时空相关建模,将大气建模后的改正信息播发给用户,实现单站用户快速或瞬时高精度定位[19,48-49]。近年来,国内外许多学者主要围绕如何实现PPP快速或瞬时模糊度固定与高精度定位,从UPD估计、全球/区域高精度大气模型构建、非差非组合策略、快速模糊度处理等方面开展了大量研究工作。

在UPD估计方面,围绕卫星相位偏差估计策略开展了研究。文献[25]首次提出采用星间单差方法估计宽巷、窄巷UPD小数的方法,使单站用户通过修正星间单差UPD,可实现类似RTK双差模糊度固定的效果,平均固定率超过80%,在东方向定位精度可提升30%。常用的IRC、DC、UPD、相位钟/偏差4种卫星钟相位偏差估计方法详见文献[25-26,37,42]。此外,文献[50-51]针对当前多系统多频点UPD改正表达形式比较复杂的思维缺点,提出了采用与观测信号偏差相关(observable-specific signal bias, OSB)参数来表达UPD改正。

在全球/区域高精度大气模型构建方面,研究人员主要围绕区域电离层建模与预报、广域大气建模以及模型插值等难点进行了研究。文献[48]提出采用电离层预报来加速PPP模糊度固

定的方法,首先通过无电离层组合解算卫星宽巷模糊度,然后通过修正电离层误差的宽巷模糊度求解窄巷模糊度,可大幅度提升再收敛性能,电离层模型预报 180 s时,仍可实现固定率优于93%,并且在动态测试中,固定率从7.7%提高至93.6%。文献[52-53]提出了适合大范围应用的分层级大气改正模型,并基于欧洲监测网数据进行了试验验证,电离层和对流层传输误差分别降低 61% 和 96%,初始化时间优于 1 min,其中83.6%的解可实现瞬时收敛,该方法降低了通信宽带压力,提升了实时PPP-RTK应用效能;此外,提出顾及时空变化的电离层插值模型,用于PPP-RTK定位改正,可加速收敛和提升定位精度。文献[54]提出了一种以B样条函数为基础的四维电离层层析改正模型,在PPP-RTK应用时,可将收敛时间缩短至20个历元内。

在非差非组合策略方面,主要围绕基于非差非组合的卫星相位偏差、卫星钟差估计以及大气改正提取策略等内容开展了研究。文献[19]首次提出基于非差非组合数据,进行S变换的PPP-RTK模型参数估计理论。文献[20]从去相关的S变换理论角度,采用3种非差非组合模型估计卫星相位偏差,对比了3种模型的用户静态、动态定位性能。文献[21]采用非差非组合PPP-RTK模型估计了卫星钟差和相位偏差,评估了用户侧多GNSS PPP-RTK定位性能,多GNSS AR可有效加速收敛,收敛后精度与浮点解基本相当。文献[49]提出了区域大气增强PPP方法,通过参考站非差非组合PPP固定解提取大气改正,然后用户侧进行插值,即可实现瞬时AR,固定后定位精度优于5 cm。

在快速模糊度处理方面,围绕多系统多频、低轨增强等开展了研究。文献[22]提出基于多GNSS多频所有可用数据进行PPP-RTK模型参数估计的方法,提取了大气校正信息,在用户侧进行模糊度固定,并且采用超宽巷、宽巷及L1模糊度级联固定策略提高城市场景下的用户定位性能,在郊区可实现93.7%固定,信号中断后只需5 s即可实现模糊度快速固定。文献[55]提出了适用于实时场景的PPP-RTK方法,在静态测试中,可实现AR,并且2 s即可实现90%样本的收敛;在高速动态场景测试中,穿过桥梁后2 s即可实现90.6%样本的收敛,5 s内即可实现90%样本在水平定位精度优于0.1 m。文献[10]考虑到区域监测网密度需求对PPP-RTK广域应用的限制,通过引入低轨卫星即可实现PPP-RTK在广域范围的快速高精度应用,仿真验证表明,拥有360颗低轨卫星的星座即可在800 km广域范围内,将首次固定时间(time to first fix, TTFF)从161 s缩短至12 s。文献[56]分析了两种常用电离层模型在不同纬度建模精度,并开展PPP-RTK精度测试,将低纬度电离层建模后应用到PPP-RTK定位的方法可获取最高定位精度,三维精度优于3.5 cm。

2　卫星导航系统精密定位服务

随着各国在GNSS技术的大力投入,目前主要的卫星导航系统已开始提供精密定位服务。其中,北斗三号卫星导航系统(BDS-3)自2020-07-31正式开通以来,可为用户提供7种类型服务,B2b信号精密单点定位(B2b-PPP)服务作为重要的特色服务之一,通过地球静止轨道(geostationary earth orbit,GEO)卫星可为亚太区域用户提供PPP服务[57-59]。Galileo从2023-01-24正式向全球用户通过中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星提供高精度服务(high accuracy service,HAS)初始服务,其原型设计为提供PPP-AR服务,但目前仅支持PPP服务[60-62]。日本准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)从2018年11月向日本国内用户提供厘米级水平增强服务(centimeter level augmentation service,CLAS),该服务采用了PPP-RTK技术。此外,QZSS从2022-09-30开始向亚太区域提供多GNSS先进轨道和钟差增强PPP(multi-GNSS advanced orbit and clock augmentation PPP, MADOCA-PPP)试运行服务,2024年在QZSS 5~7号卫星播发正式服务[63-65]。上述卫星导航系统精密定位服务主要特点见表2,其中C、G、E、R、Q依次为北斗、GPS、Galileo、GLONASS及QZSS系统简写。

2.1　BDS B2b-PPP服务

BDS-3通过3颗GEO卫星广播PPP改正,在亚太区域可为用户提供95%置信水平下,单BDS水平定位精度优于0.3 m、高程精度优于0.6 m、收敛时间优于30 min的PPP服务[57,66-68]。很多学者对B2b-PPP精度、性能进行了验证分析。文献[58]从定位精度、可用性等方面分析了B2b-PPP性能,结果表明,B2b-PPP可有效改善星历更新带来的误差,卫星钟差精度提升85.1%,卫星钟差精度可达0.2 ns;在中国区域服

务可用性优于80%,并且兼容频点B1C/B2a定位精度优于传统频点B1I/B3I;此外,当PPP服务信息数据龄期(issue of data, IOD)发生变化时,会短期出现轨道、钟差不匹配问题。文献[59]从空间信号测距误差(signal in space range error, SISRE)和定位性能对比分析了B2b-PPP与CNES实时服务(real-time service, RTS)的特性,结果表明,BDS-3的B2b-PPP服务信息可用性等要优于CNES;GPS钟差改正存在系统偏差,会影响SISRE统计结果;B2b-PPP BDS-3动态定位精度与GPS CNES RTS结果相当;文献[69]对比分析了B2b-PPP和德国地学研究中心(GeoForschungsZentrum, GFZ)、中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)产品精度,广播星历SISRE要优于B2b-PPP精度,这主要是因为B2b-PPP改正与GFZ产品存在卫星钟差系统偏差;同时基于中国周边实测数据验证,通过B2b-PPP修正可实现静态厘米级、动态分米级定位;在中国境内,B2b-PPP定位精度要优于武汉大学实时服务(WHU)产品,而在服务边界,受卫星数影响,B2b-PPP定位精度和可用性均有所下降。文献[70]提出了一种改进B2b-PPP方法,可在广域范围内实现1 min内的厘米级精密定位。

表2 卫星导航系统精密定位服务主要特点

Table 2 Main Features of Precise Positioning Service of Satellite Navigation Systems

卫星系统	服务名称	技术类型	精度/cm(95%置信水平)	收敛时间	服务范围	可用性/%	播发系统
C	B2b-PPP	PPP	C:水平≤30;高程≤60 C/G:水平≤20;高程≤40	C:≤30 min C/G:≤20 min	亚太地区	—	C/G/E*/R*
E	HAS	PPP/PPP-AR* PPP-RTK*	水平<20;高程<40	全球:<5 min 欧洲:<100 s	全球 欧洲	99	E/G
Q	CLAS	PPP-RTK	静态:水平≤6;高程≤12 动态:水平≤12;高程≤24	≤60 s	日本境内	99	G/Q/E/R*
	MADOCA-PPP	PPP PPP-AR	水平≤30;高程≤50	≤30 min	亚太地区	—	

注:*表示目前还不支持,但原型设计支持后续升级。

2.2 Galileo HAS服务

欧盟委员会在2017年2月首次提出制定Galileo高精度定位服务的技术与规范[71]。欧盟空间计划署宣布Galileo在2023-01-24正式提供HAS初始服务[72]。HAS目前采用PPP技术,通过MEO卫星E6b信号和地面互联网同步播发服务信息,为全球Galileo和GPS用户免费提供实时PPS。HAS发展过程分为3个阶段,第一阶段是初始测试阶段,于2019年开始,主要测试E6b信号传播能力和初始精度测试;第二阶段是初始服务阶段,目标是提供PPP-AR服务,主要基于Galileo现有地面监测网,通过卫星信号和互联网同步播发Galileo和GPS卫星精密轨道、钟差、码偏差、相位偏差改正(目前还不具备[73]),可为用户提供在95%置信水平下5 min收敛后可实现水平0.2 m、高程0.4 m的PPS;第三阶段是全面服务阶段,2024年具备状态,主要在第二阶段服务产品基础上,增加了区域大气改正(对流层和电离层),预计会大大缩短收敛时间,大约可从300 s缩短至100 s以内,但大气改正服务仅覆盖欧洲区域,采用PPP-RTK技术[60,62,71-72,74-78]。目前有很多学者对HAS服务性能进行了大量测试与分析。文献[79]提出一系列创新方法,采用快速PPP算法,可为HAS提供优于1 TECU精度的电离层服务产品;文献[61]基于研制的用户终端及算法,验证了HAS服务的性能;文献[62]首次从服务范围、产品精度和定位性能角度,对HAS初始服务进行了评估,结果表明,在95%置信水平下,Galileo、GPS的SISRE分别为9.5 cm、16 cm,定位精度满足设计要求。文献[78]和文献[80]分别分析了HAS对低轨(low earth orbit, LEO)卫星定轨及SPP的影响,对三维定轨精度及垂直方向位置精度均有很大提升;文献[81]将HAS应用于PPP卫星异常检验,服务鲁棒性得以提升。文献[72]从服务产品精度、定位性能角度,对正式发布的HAS初始服务进行了评估,Galileo和GPS的SISRE分别为10.6 cm、11.8 cm,各卫星码偏差均在0.3 ns内;在95%置信水平下,静态联合定位水平和高程均方根(root mean square, RMS)分别为13.1 cm、18.6 cm;收敛时间未达到设计的300 s内,主要因为目前还不支持卫星相位偏差改正。此外,产品延迟即使达到60 s,定位精度仍满

足设计要求。文献[82]在郑州测试了HAS服务可用性优于85%,并统计了全球380个监测站应用HAS后的PPP性能,无论是静态还是仿动态,均可实现分米级定位。文献[83]介绍了HAS服务在实时导航定位授时、对流层监测等地球科学活动中的应用,HAS服务成为不依赖地基网络改正的一条重要GNSS精密服务途径。

2.3 QZSS 精密定位服务

QZSS为用户提供7种服务,其中,米级以内的PPS有两种,即CLAS和MADOCA-PPP。CLAS采用了PPP-RTK技术,主要在日本境内提供PPS,动态用户可在1 min内获取水平12 cm、高程24 cm的定位精度(在95%置信水平下),服务信息包括卫星精密轨道、钟差、码偏差、相位偏差改正、倾斜电离层及垂直对流层改正[64]。MADOCA-PPP采用PPP技术,将为亚太区域用户提供PPP服务。目前,一些学者对CLAS服务开展了部分研究。文献[84-86]详细介绍了CLAS的服务范围、类型、设计性能及发展现状情况等;文献[87]提出一种适用于CLAS服务的完好性算法;文献[81-82]从静态、动态定位性能、模糊度固定方面,对CLAS初始服务进行了评估,结果表明,与传统RTK精度基本相当;文献[88]提出了一种提高部分模糊度估计的策略,在开阔环境下,测量型接收机水平和高程定位精度均优于10 cm,模糊度固定率超过99%;在城市环境下,固定率也达到92.89%;而低功耗接收机受观测质量、相位偏差等因素影响,固定率比较低。

3 商用精密定位服务

除传统测绘行业外,人工智能机器人、无人机、自动驾驶等新兴行业对精密定位服务的需求也日益高涨。目前,一些商业服务公司也在致力于为用户提供广域GNSS高精度定位服务,包括国外的Trimble、NovAtel、u-blox,中国的合众思壮、中海达、千寻位置、六分科技、大有时空、时空道宇,可为用户提供不同等级的精密定位服务。

3.1 Trimble CenterPoint RTX

Trimble公司自2011年开始推出SBAS全球PPS实时扩展(real-time extended, RTX)服务,最初仅支持GPS和GLONASS双系统;2015年服务升级后,支持区域电离层和对流层改正,同年推出CenterPoint RTX快速服务;2017年增加系统完好性监测服务,并且全面支持BDS和Galileo双系统;2019年3月,开始提供关键安全和自动驾驶所需的完好性信息[10,89-90]。针对CenterPoint RTX快速服务,推出了服务完好性监控方案,即Trimble RTX Integrity监控系统,该系统是按照自动驾驶功能安全标准研发设计而来,包括自动驾驶软件性能提升与能力确定(automotive software performance improvement and capability determination, ASPICE)和ISO 26262标准,因此,保证了RTX快速服务在自动驾驶应用中的高可靠性[90]。Trimble收集全球分布的100多个自建监测站采集的原始观测数据,解算生成卫星精密轨道、钟差、相位偏差等产品,并基于区域加密监测站生成大气改正产品,通过6颗GEO卫星的L波段信道和地基互联网链路将服务产品按照授权类型传输给用户[91-92],为用户提供厘米级实时PPS。随着BDS-3的全面开通,Trimble全面升级了监测网Alloy接收机,从而进一步支持BDS-3 B1C、B2a频点。多模多频RTX服务可将定位收敛时间至少缩短50%,部分观测质量良好的测站采用RTX基本服务即可在1 min内完成收敛,此外,Trimble提出一种产品与数据服务器切换机制,可进一步提升CenterPoint RTX服务性能和可靠性[90]。CenterPoint RTX服务主要特点见表3,其中精度采用95%置信区间数据的RMS结果来表征,详细介绍参见文献[90-91,93]。

表 3　Trimble CenterPoint RTX服务主要特点

Table 3　Main Features of Trimble CenterPoint RTX Service

类别	技术类型	精度/cm	收敛时间/min	服务范围	播发系统	完好性
基本服务	PPP-AR	水平≤2	<15	全球	G/R/E/C/Q	×
快速服务	PPP-RTK	高程≤5	<1	欧洲、北美洲		√

一些学者对CenterPoint RTX服务性能进行了测试与分析。文献[92]收集了一个月静态采集数据,分析了多系统联合RTX定位性能,测试结果表明多系统联合可提升定位性能,GPS/GLONASS/Galileo/BDS四系统联合模式收敛最快,定位精度最高,东、北、天方向的RMS分别为1.2 cm、1.5 cm和2.3 cm。文献[94-95]基于船载动态采集数据,对RTX动态定位性能进行了分

析,测试从已知点静态启动,收敛后再进行动态测试,收敛后水平、高程标准差(standard deviation, STD)分别为1 cm和3 cm。此外,对比了RTX PPP、单站RTK、网络RTK动态定位性能,水平、高程定位精度都在厘米级,其中RTX PPP水平和高程向定位精度分别在3 cm、7 cm内;3种模式的定位可用性依次为100%、83.4%和28.5%,由此看出,与地基无线电链路和蜂窝网络相比,GEO卫星L波段通信链路环境适应性更强。文献[96]首次基于振动台动态场景下的20 Hz高采样数据开展动态测试,验证了RTX服务在预警风险评估动态位移监测(如变形监测、地震位置监测)的可行性,不同振动频率和振动幅度场景下,平均RMS定位精度为3.6 mm。

3.2 Hexagon/NovAtel TerraStar

Hexagon集团下属NovAtel公司推出了TerraStar实时PPS,该服务按精度可分为4种,分别为TerraStar-L、TerraStar-C、TerraStar-C PRO和TerraStar-X。前3种服务可应用于全球范围,最后一种只在北美洲和欧洲区域适用。其中,TerraStar-L服务采用了PPP技术,为全球GPS和GLONASS提供分米级定位服务;TerraStar-C和TerraStar-C PRO采用了PPP-AR技术,与TerraStar-L服务相比,进一步提高了定位精度、鲁棒性和可用性,缩短了收敛时间,其中,TerraStar-C PRO服务通过联合Galileo和BDS,定位精度和收敛时间性能得到进一步提升[97-99]。而TerraStar-X服务通过使用区域增强电离层改正,可为区域用户提供收敛更快、精度更高的定位服务[100]。NovAtel公司通过3个地面网络控制中心,实时收集全球均匀分布的100多个监测站的采集数据,解算高精度改正,通过6颗GEO卫星至少两个L波段向用户发送服务信息,保证传输的可靠性。根据产品特性,即使服务中断300 s,历史服务产品依然可用[99-101]。TerraStar各种服务主要参数对比情况见表4。

表4 NovAtel TerraStar服务主要特点

Table 4 Main Features of NovAtel TerraStar Service

类别	技术类型	精度/cm		收敛时间/min	服务范围	播发系统
		水平	高程			
TerraStar-L	PPP	≤40	≤60	<5	全球	G/R
TerraStar-C	PP-AR	≤4	6.5	30~45	全球	G/R
TerraStar-C PRO	PPP-AR	2.5	5	<18	全球	G/R/E/C
TerraStar-X	PPP-RTK	2	5	<1	北美洲、欧洲	G/R

文献[97]基于TerraStar-C服务,先后在非洲、澳大利亚及美国进行了测试,动态测试结果表明,水平精度优于2 cm,高程精度优于5 cm,达到5 cm精度阈值所需的收敛时间为25 min。文献[99]在GPS和GLONASS双系统基础上增加了Galileo、BDS和QZSS三系统服务改正,在95%置信水平下,达到5 cm精度所需收敛时间缩短了50%。此外,增加区域电离层改正后,将在几秒内即可达到上述收敛精度;在TerraStar-C PRO服务下,欧洲和美国达到厘米级定位平均所需时间分别为15.8 min、12.8 min。文献[100]在乌克兰对TerraStar服务在静态和车载动态定位性能进行了测试,结果表明,在静态模式下,经过40~50 min后,水平和高程精度分别可达到7.82 cm、12.5 cm;在车载动态模式下,精度为10~20 cm,并且采用四系统TerraStar服务可加速动态PPP初始化,实现瞬时初始化,且运动中信号中断2~5 min后,无需重新初始化,服务精度仍可有保障。

3.3 u-blox PointPerfect

2021年4月,u-blox公司收购了Sapcorda公司,成为独立拥有先进GNSS PPS的供应商。自2021-08-31开始对外提供实时精密定位服务PointPerfect(https://www.u-blox.com/en/product/pointperfect),向美国和欧洲u-blox用户提供实时厘米级定位服务。PointPerfect服务采用PPP-RTK技术,通过L波段通信卫星或者地面IP网络链路将改正信息传输给用户,采用轻量级和安全的物联网消息队列遥测传输协议,形成结合行业驱动的实时导航安全位置增强2.0版协议。从2022-09-01起,PointPerfect服务覆盖韩国;2022年12月,PointPerfect服务覆盖加拿大[101-102]。u-blox PointPerfect服务主要特点如表5所示。

文献[101]基于u-blox ZED-F9p低功耗定位模块和小型天线,在开阔环境下分析了PointPerfect服务支持下的静态定位性能,测试结果表明,模糊度固定后,60 s即可获取水平方向厘米级定位,在95%置信水平下,水平和高程方向定位精

表 5　u-blox PointPerfect服务主要特点

Table 5　Main Features of u-blox PointPerfect Service

服务名称	技术类型	精度(95%)/cm	收敛时间(95%)/s	服务范围	可用性/%	播发系统
u-blox PointPerfect	PPP-RTK	水平方向:3～6	＜30	欧洲、北美洲、澳大利亚、韩国	99%	G/R/E

度分别为8.9 cm、28.4 cm。文献[102]采用测量型、低功耗接收机和天线进行了对比实验,开展了PointPerfect服务支持下的静态仿动态定位性能分析,结果表明,在PointPerfect服务下,低功耗u-blox模块和ASANT天线表现出与测量型设备同等级定位性能,水平和高程均可实现厘米级定位精度。

3.4　中海达Hi-RTP

自2019年,中海达向亚太地区尤其是“一带一路”沿线区域用户提供星基精密定位服务——全球精度(Hi-RTP),定位收敛时间优于15 min,定位精度最高可达3 cm。Hi-RTP通过收集全球100多个参考站采集数据,分别在中国和德国分析中心解算改正信息,可通过L波段卫星或地面网络为亚太地区用户提供快速服务,获取瞬时厘米级精密定位,还可以通过地面网络为全球用户提供标准服务[21-22]。Hi-RTP服务主要技术特点见表6。

表 6　中海达Hi-RTP服务主要技术特点

Table 6　Main Features of Hi-RTP Service

类别	技术类型	精度/cm		收敛时间/min	服务范围	可用性/%	播发系统
		水平	高程				
标准服务	PPP-AR	＜5	＜10	＜20	全球	99	G/C/R/E
快速服务	PPP-RTK	＜3	＜5	＜0.5	中国		

3.5　千寻XStar

千寻位置公司于2015年8月成立,同年开始参与国家北斗地基增强系统“全国一张网”建设工作;2016年开始提供地基精密定位服务;2018年推出星基增强产品;2021年5月提供星基增强服务;2022年完成了抗电离层算法升级,在强电离层环境下,固定率最大可提升60%;2023年6月完成了“全国一张网”的安全升级,通过采用国产商用密码技术,实现对地基监测数据的全程加密传输与存储,大幅提升了数据源的稳定性与可靠性;2023-08-30,正式发布高精度定位星基增强服务——千寻星鉴(XStar)。XStar(https://www.qxwz.com/products/qxxstar)可以与千寻地基、星基服务进行深度融合,同时结合千寻的人工智能融合算法,实现多场景下的智能切换,进行全场景下的感知处理,为用户提供高可用、高可靠的精密定位服务,截至2023年,千寻地基监测站规模达到3 000个[10,22]。XStar服务主要特点见表7。

表 7　千寻XStar服务主要技术特点

Table 7　Main Features of XStar Service

类别	技术类型	精度/cm		收敛时间/min	服务范围	可用性/%	播发系统
		水平	高程				
标准服务	PPP-AR	＜2.5	＜5	＜15	亚太地区	99.99	C/G/R/E/Q
快速服务	PPP-RTK			＜2	中国		

3.6　其他商用服务

除了上述成熟的商用精密定位服务外,自2023年开始,六分科技、大有时空以及时空道宇3家公司也开始围绕自动驾驶行业应用需求,提出了更安全的车规级精密定位服务,主要技术特点对比情况见表8。

截至2023年底,六分科技在全国自建监测站已达3 000多个,推出了星地融合厘米定位服务——星璨(Orion)。Orion采用了PPP-RTK技术,可通过L波段卫星或者地面网络为中国用户提供PPS。同时该服务通过了汽车功能安全认证,服务体系符合D级汽车安全完整性等级(automotive safety integrity level D, ASIL-D)认证,满足L2.5～L5级别自动驾驶对定位精度的要求,可提供精度优于10 cm的车道级定位,定位固定率可达95%,为用户提供覆盖服务端和用户端的

完好性监测信息(https://www.sixents.com/solution/intelligentDriving#div0)。

2023-01-04,大有时空正式发布PPP-RTK精密服务。该服务可通过两种模式服务用户,一是通过大有时空定位平台账号直接播发给用户;二是大有时空定位服务转发至合作伙伴Hexagon播发服务平台,由Hexagon服务平台播发给用户,为全球用户提供精密定位服务。服务短时间中断后,仍可维持服务精度,最长维持时间可达120 s(https://www.dayoupi.cn/news/192.html)。

时空道宇公司成立于2018年,主要依托自主研发的低轨未来出行星座结合地基时空服务网络,为用户提供天地一体化高精度时空信息服务。2022-06-02,时空道宇自主研发的首轨九星成功入轨,成为中国首家基于自主研发低轨卫星开展星基增强服务的公司。2023年9月,时空道宇发布星基服务结合融合定位终端——涟漪智行,为杭州亚运会2 000多辆车提供了车规级定位服务。目前,服务已通过IEC61508 SIL-2等级的功能安全认证,在自动驾驶场景下,满足ISO26262 ASIL-B功能安全需求,服务体系符合ISO26262 ASIL-D认证要求,并提供高级别车规级安全服务(http://www.geespace.com/location-service)。

表8 其他公司服务的主要技术特点

Table 8 Main Features of Other Services

服务名称	技术类型	精度/cm			收敛时间/min	服务范围	可用性/%	播发系统
		模式	水平	高程				
六分科技	PPP-RTK	静态	<2.5	<5	<0.5	中国	99.9	C/G/R/E/Q
		动态	<10	<20				
大有时空	PPP-RTK		<3	<5	<0.5	中国、欧洲、北美洲	99.99	C/G/R/E
时空道宇	PPP-RTK		<10	−	−	中国	99.9	C/G/E

4 面临挑战与未来展望

随着GNSS精密定位服务应用的不断深入,各种服务的弊端也逐渐暴露出来,本文主要从通信链路、服务类型、信号脆弱性3个方面对GNSS精密定位面临的挑战进行了分析,同时对技术应用未来发展进行了全面展望。

4.1 面临挑战

1)通信链路。北斗B2b-PPP在服务边界地区不太稳定[103]。随着自动驾驶、无人机等新兴行业对高动态、高精度定位服务的需求,PPP收敛速度将无法满足其应用,需要更高精度的服务,如PPP-RTK服务。这就需要更高通信宽带来支撑服务通信,同时也需要多元化通信方式来提高服务的可靠性、连续性与稳定性。

2)服务类型。目前,BDS-3仅支持PPP服务,对高动态用户而言,PPP收敛时间过长,一般需要30 min左右[58-59],无法满足瞬时高精度定位需求。针对高安全要求的应用行业,还需要为用户提供服务完好性信息[104-105],且卫星服务很容易受到欺骗干扰的影响[106],因此,需要考虑增加安全授权认证信息。

Galileo HAS初始服务并不支持卫星相位偏差产品,后续提供该产品后,HAS将为用户提供PPP-AR服务,预计Galileo/GPS联合定位动态收敛时间可进一步缩短至7.5 min[72]。但对于高动态应用场景,如航空应用、航海远洋、自动驾驶等,收敛速度还是无法满足行业对瞬时高精度定位服务需求。

3)信号脆弱性。卫星星座一般为MEO卫星,轨道高度在2.5万km以上,BDS星座中还包含GEO和倾斜地球同步轨道卫星,其轨道高度在3.5万km以上。按照国际电联规定,无线电信号从上述轨道卫星传输至地面,其落地功率应不超过−121.5 dBW,这种低落地电平会直接造成GNSS容易受到干扰的窘境,干扰形式包括物理遮挡、信号压制和欺骗等[10]。在城市峡谷、隧道、过天桥等复杂城市环境中,脆弱信号无法满足精密定位服务需求。由于GNSS星座局限性,其服务性能在南北极地区相对较弱[107]。

4.2 未来展望

1)通信链路。未来BDS-3可通过以下3种途径进行精密定位服务优化升级。(1)充分发挥短报文通信优势。短报文通信服务(short message communication service, SMCS)是BDS-3特有的服务之一,分为全球短报文(global SMCS, GSMCS)和区域短报文(regional SMCS, RSMCS)[103,108]。其中GSMCS通信主要通过星

间链路(inter-satellite link, ISL)来实现。文献[109-110]先后验证了RSMCS的通信情况,传输成功率均优于95%;文献[111]提出了一种PPP服务信息简化方法,可通过短报文传输为远海用户提供实时PPP服务。国内外学者已开展相关研究工作,围绕服务端简化改正参数、用户端进行短期预报等方法,挖掘GSMCS通信在BDS-3精密定位服务的潜力。(2)发挥低轨卫星通信优势。国内学者分别从定位精度、收敛特性、通信量、落地功率、抗干扰性等方面[112-114],讨论了低轨卫星为GNSS增强带来的机遇。因此,可以依托LEO信息增强来提高GNSS精密定位服务性能。(3)目前,B2b-PPP服务采用的协议与RTCM SSR协议类似[68,115],信息不够紧凑,后期可考虑升级为CSSR协议,该协议支持全球范围PPP/PPP-AR服务以及区域或国家级的PPP-RTK服务。以全球范围PPP服务为例,CSSR的宽带有效率比RTCM SSR要高出约65%;国家范围的PPP-RTK服务,CSSR有效率要高出50%[116]。增强信息与不同通信链路结合时,需要进行单独设计,保证服务的稳定与可靠性。

2)服务类型。面对PPP定位收敛慢、完好性无保障、易受干扰等一系列问题,可以考虑通过以下几种手段升级服务:(1)对于收敛慢的问题,可以考虑增加卫星相位偏差改正信息,提供PPP-AR服务;随着大气建模技术的发展[20-21,29],可进一步增加大气改正信息,为用户提供PPP-RTK服务,实现瞬时高精度定位。(2)为用户提供PPS完好性信息,在通信宽带满足下,可考虑播发不同服务类型的完好性信息,实现服务间无缝切换,同时针对不同服务类型建立完善的可信完好性体系,如文献[117]中建立了PPP-RTK高可信完好性监测体系。(3)可以考虑增加安全授权认证信息,降低干扰欺骗的影响,进一步提高服务的可靠性。

各卫星导航系统也有各自的服务升级规划,其中,Galileo HAS服务在2024年进入全面服务阶段(即第三阶段),在欧洲区域提供PPP-RTK服务,有望实现100 s收敛的效果,可满足新兴产业精密定位服务需求。QZSS CLAS服务目前仅覆盖日本本土,后续将形成7颗卫星的星座,可作为独立的区域导航系统,并且将QZSS PPP服务范围扩展至亚太区域[63,118-120]。

商用精密定位服务除满足用户位置和时间基准需求外,还需要提供高完好性等服务。目前,Trimble RTX快速服务已提供了安全完好性服务[5],后续其他商用服务公司也应围绕应用行业需求,逐渐形成覆盖服务完好性、授权认证等方面的高安全服务体系。

3)信号脆弱性。GNSS信号脆弱性严重制约着GNSS精密定位服务在各行各业的广泛应用,为有效改善现状,可考虑从以下4种途径进行优化:(1)通过多模多频联合,如五系统四频/五频,提升PPS性能。(2)通过低轨卫星增强来提供提升精密服务性能,考虑低轨落地功率更强,既可将低轨卫星作为导航星,增加可用卫星数,加速定位收敛,也可通过低轨卫星转发增强信息,实现GNSS广域精密服务,且低轨卫星可快速覆盖南北极,进一步扩大服务范围。(3)通过电离层抑制技术进一步提升服务性能,电离层误差是影响定位中的重要误差源,电离层活动与太阳周期(约11 a)、地理位置等因素有关,通过在服务中添加电离层完好性参数,用户端采用一定电离层抑制技术,以此来提升服务。(4)通过多源融合技术提升精密定位服务。单一技术无法保证高安全应用行业精密定位的连续、可靠的服务应用,在现有GNSS精密定位服务技术基础上,可以考虑惯性导航、超宽带、视觉等技术的融合应用,形成更加完备、时空基准统一的精密定位服务体系。

综上所述,基于高中低轨通导一体的多源传感器融合的精密定位技术必将成为未来精密定位技术与服务的主流发展方向。后续将围绕此方向继续开展研究工作,争取为精密定位技术发展及服务应用推广提供助力。

参 考 文 献

[1] European GNSS Agency (GSA). Report on Road User Needs and Requirements[R]. 2018-01-08. https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Road-Report-on-User-Needs-and-Requirements-v1.0.pdf.

[2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 汽车驾驶自动化分级: GB/T 40429—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Road Vehicles—Diagnostic Communication over Controller Area Network (DoCAN) —Dictionary: GB/T 40429—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[3] Galileo GNSS Agency. GNSS User Technology Report[R]. Publications Office of the EU, Galileo GNSS Agency, Paris, France, 2020.

[4] PENDÃO C G, FERREIRA A, MOREIRA A, et al. Challenges in Characterization of GNSS Precise Positioning Systems for Automotive [C]//International Conference on Localization and Global Navigation Satellite System, Tampere, Finland, 2020

[5] CHEN L, ZHENG F, GONG X P, et al. GNSS High-Precision Augmentation for Autonomous Vehicles: Requirements, Solution, and Technical Challenges[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1623.

[6] JOUBERT N, REID T G R, NOBLE F. Developments in Modern GNSS and Its Impact on Autonomous Vehicle Architectures[C]//2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Las Vegas, NV, USA, 2020.

[7] RAKHMANOV A, WISEMAN Y. Compression of GNSS Data with the Aim of Speeding up Communication to Autonomous Vehicles [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2165.

[8] LI X X, ZHANG X H, REN X D, et al. Precise Positioning with Current Multi-Constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8328.

[9] AGGREY J, BISNATH S. Improving GNSS PPP Convergence: The Case of Atmospheric-Constrained, Multi-GNSS PPP-AR [J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 587.

[10] LI X X, HUANG J X, LI X, et al. Review of PPP - RTK: Achievements, Challenges, and Opportunities[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 28.

[11] TEUNISSEN P, MONTENBRUCK O. Springer-Handbook of Global Navigation Satellite Systems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.

[12] BISNATH S, GAO Y. Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations[M]// Observing our Changing Earth. Berlin, Heidelberg: Springer , 2009: 615-623.

[13] COLLINS P, LAHAYE F, BISNATH S. External Ionospheric Constraints for Improved PPP-AR Initialisation and a Generalised Local Augmentation Concept [C]//The 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, USA, 2012.

[14] CHOY S, BISNATH S, RIZOS C. Uncovering Common Misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and Its Future Prospect [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 13-22.

[15] TEUNISSEN P J G, KHODABANDEH A. Review and Principles of PPP-RTK Methods[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 217-240.

[16] GENG J H, GUO J, MENG X L, et al. Speeding up PPP Ambiguity Resolution Using Triple-Frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(1): 6.

[17] WU Z Y, WANG Q X, HU C, et al. Modeling and Assessment of Five-Frequency BDS Precise Point Positioning[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 8.

[18] LI Z, CHEN W, RUAN R G, et al. Evaluation of PPP-RTK Based on BDS-3/BDS-2/GPS Observations: A Case Study in Europe[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 38.

[19] ODIJK D, ZHANG B C, KHODABANDEH A, et al. On the Estimability of Parameters in Undifferenced, Uncombined GNSS Network and PPP-RTK User Models by Means of Mathcal System Theory [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(1): 15-44.

[20] ZHANG B C, CHEN Y C, YUAN Y B. PPP-RTK Based on Undifferenced and Uncombined Observations: Theoretical and Practical Aspects [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 1011-1024.

[21] MA H Y, ZHAO Q L, VERHAGEN S, et al. Assessing the Performance of Multi-GNSS PPP-RTK in the Local Area [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3343.

[22] LI X X, WANG B, LI X, et al. Principle and Performance of Multi-Frequency and Multi-GNSS PPP-RTK [J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 7.

[23] LI X X, DICK G, GE M R, et al. Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor: Precise Point Positioning with Orbit, Clock, and Phase Delay Corrections[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(10): 3615-3621.

[24] SEEPERSAD G, BISNATH S. Challenges in Assessing PPP Performance [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2014, 8(3): 205-222.

[25] GE M, GENDT G, ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399.

[26] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination [J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149.

[27] GENG J H, BOCK Y. Triple-Frequency GPS Precise Point Positioning with Rapid Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 449-460.

[28] ELSHEIKH M, IQBAL U, NOURELDIN A, et al. The Implementation of Precise Point Positioning (PPP): A Comprehensive Review[J]. *Sensors*, 2023, 23(21): 8874.

[29] LIU Y Y, YE S R, SONG W W, et al. Rapid PPP Ambiguity Resolution Using GPS+GLONASS Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(4): 441-455.

[30] LI P, JIANG X Y, ZHANG X H, et al. GPS + Galileo + BeiDou Precise Point Positioning with Triple-Frequency Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 78.

[31] 曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 92-100.
CAO Xinyun, SHEN Fei, LI Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 92-100.

[32] 李盼. GNSS精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
LI Pan. Research on Methodology of Rapid Ambiguity Resolution for GNSS Precise Point Positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.

[33] LI X X, GE M R, DAI X L, et al. Accuracy and Reliability of Multi-GNSS Real-Time Precise Positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.

[34] LI X X, LI X, YUAN Y Q, et al. Multi-GNSS Phase Delay Estimation and PPP Ambiguity Resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 579-608.

[35] LOU Y D, ZHENG F, GU S F, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning with Raw Single-Frequency and Dual-Frequency Measurement Models[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 849-862.

[36] 刘帅, 孙付平, 郝万亮, 等. 整数相位钟法精密单点定位模糊度固定模型及效果分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1230-1237.
LIU Shuai, SUN Fuping, HAO Wanliang, et al. Modeling and Effects Analysis of PPP Ambiguity Fixing Based on Integer Phase Clock Method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1230-1237.

[37] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing[J]. *Navigation*, 2010, 57(2): 123-135.

[38] LOYER S, PEROSANZ F, MERCIER F, et al. Zero-Difference GPS Ambiguity Resolution at CNES - CLS IGS Analysis Center[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 991-1003.

[39] BANVILLE S, COLLINS P, ZHANG W, et al. Global and Regional Ionospheric Corrections for Faster PPP Convergence[J]. *Navigation*, 2014, 61(2): 115-124.

[40] LI P, ZHANG X H, GUO F. Ambiguity Resolved Precise Point Positioning with GPS and BeiDou[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(1): 25-40.

[41] GENG J H, SHI C, GE M R, et al. Improving the Estimation of Fractional-Cycle Biases for Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(8): 579-589.

[42] GENG J H, CHEN X Y, PAN Y X, et al. A Modified Phase Clock/Bias Model to Improve PPP Ambiguity Resolution at Wuhan University[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10): 2053-2067.

[43] YAO Y B, PENG W J, XU C Q, et al. Enhancing Real-Time Precise Point Positioning with Zenith Troposphere Delay Products and the Determination of Corresponding Tropospheric Stochastic Models[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2): 1217-1230.

[44] AGGREY J, SEEPERSAD G, BISNATH S. Performance Analysis of Atmospheric Constrained Uncombined Multi-GNSS PPP[C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Colorado, USA, 2017.

[45] XIANG Y, GAO Y, LI Y H. Reducing Convergence Time of Precise Point Positioning with Ionospheric Constraints and Receiver Differential Code Bias Modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(1): 8.

[46] TANG X, JIN S G, ROBERTS G W. Prior Position- and ZWD-Constrained PPP for Instantaneous Convergence in Real-Time Kinematic Application[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2756.

[47] Wübbena G, Schmitz M, Bagge A. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks[C]//The 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, California, USA, 2005.

[48] GENG J H, MENG X L, DODSON A H, et al. Rapid re-Convergences to Ambiguity-Fixed Solutions in Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(12): 705-714.

[49] LI X X, ZHANG X H, GE M R. Regional Reference Network Augmented Precise Point Positioning for Instantaneous Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158.

[50] VILLIGER A, SCHAER S, DACH R, et al. Determination of GNSS Pseudo-Absolute Code Biases and Their Long-Term Combination[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1487-1500.

[51] LI X, LI X X, JIANG Z H, et al. A Unified Model of GNSS Phase/Code Bias Calibration for PPP Ambiguity Resolution with GPS, BDS, Galileo and GLONASS Multi-Frequency Observations [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 84.

[52] CUI B B, JIANG X Y, WANG J G, et al. A New Large-Area Hierarchical PPP-RTK Service Strategy [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 134.

[53] LI P, CUI B B, HU J H, et al. PPP-RTK Considering the Ionosphere Uncertainty with Cross-Validation[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 10.

[54] OLIVARES-PULIDO G, TERKILDSEN M, ARSOV K, et al. A 4D Tomographic Ionospheric Model to Support PPP-RTK [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1673-1683.

[55] AN X D, ZIEBOLD R, LASS C. PPP-RTK with Rapid Convergence Based on SSR Corrections and Its Application in Transportation[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4770.

[56] 宋伟伟, 何成鹏, 辜声峰. 不同纬度区域电离层增强PPP-RTK性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1832-1842.
SONG Weiwei, HE Chengpeng, GU Shengfeng. Performance Analysis of Ionospheric Enhanced PPP-RTK in Different Latitudes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1832-1842.

[57] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Specification (version 3.0) : BDS-OS-PS-3.0[S]. Beijing, China: CSNO, 2021.
中国卫星导航系统管理办公室,北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0版): BDS-OS-PS-3.0[S]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室, 2021.

[58] XU Y Y, YANG Y X, LI J L. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Precise Point Positioning Service[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 142.

[59] 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.

[60] European Union. Galileo High Accuracy Service Signal-in-Space Interface Control Document (HAS SIS ICD)[R]. Paris, France: European Union, 2022.

[61] PINTOR P, GONZÁLEZ E, SENADO A, et al. Galileo High Accuracy Service (HAS) Algorithm and Receiver Development and Testing[C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Colorado, USA, 2022.

[62] FERNANDEZ-HERNANDEZ I, CHAMORRO-MORENO A, CANCELA-DIAZ S, et al. Galileo High Accuracy Service: Initial Definition and Performance[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 65.

[63] SAKAI T. Japanese GNSS Future System Evolution in the 2020－2030 Perspective[C]//European Navigation Conference (ENC), Dresden, Germany, 2020.

[64] HIROKAWA R, FERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ I. Open Format Specifications for PPP/PPP-RTK Services: Overview and Interoperability Assessment [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Colorado, USA, 2020.

[65] Cabinet Office. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Muti-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation － Precise Point Positioning (IS-QZSS-MDC-002)[R]. Washington, USA: Cabinet Office, 2023.

[66] YANG Y X, DING Q, GAO W G, et al. Principle and Performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 5.

[67] LIU C, GAO W G, LIU T X, et al. Design and Implementation of a BDS Precise Point Positioning Service[J]. *Navigation*, 2020, 67(4): 875-891.

[68] 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-精密单点定位服务信号PPP-B2b(1.0版) BDS-SIS-ICD-PPP-B2b-1.0[S]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室, 2020.
China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document － Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b (Version 1.0) : BDS-SIS-ICD-PPP-B2b-1.0[S]. Beijing, China: CSNO, 2020.

[69] LIU Y, YANG C, ZHANG M N. Comprehensive Analyses of PPP-B2b Performance in China and Surrounding Areas [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 643.

[70] 赵齐乐, 陶钧, 郭靖, 等. 广域瞬时厘米级精密单点定位和服务系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1058-1069.
ZHAO Qile, TAO Jun, GUO Jing, et al. Wide-Area Instantaneous cm-Level Precise Point Positioning: Method and Service System[J]. *Geomatics and In-*

formation Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1058-1069.

[71] Fernandez-Hernandez I, Vecchione G, Díaz-Pulido F, et al. Galileo High Accuracy: A Program and Policy Perspective[C]//The 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, 2018.

[72] NACIRI N, YI D, BISNATH S, et al. Assessment of Galileo High Accuracy Service (HAS) Test Signals and Preliminary Positioning Performance [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(2): 73.

[73] MARTINI I, SUSI M, CUCCHI L, et al. Galileo High Accuracy Service Performance and Anomaly Mitigation Capabilities[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 25.

[74] European Commission, European GNSS Agency, & European Space Agency. Galileo High Accuracy Service E6-B Signal-in-Space Message Specification v1.2[R]. Paris, France: European Commission, 2020.

[75] European Union. Galileo Services - High Accuracy Service Performance Report[R]. Paris, France: European Union, 2023.

[76] GIOIA C, BORIO D, SUSI M, et al. The Galileo High Accuracy Service (HAS): Decoding and Processing Live Corrections for Code-Based Positioning [C]//The International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Long Beach, USA, 2022.

[77] HORST O, KIRKKO-JAAKKOLA M, MALKAMÄKI T, et al. HASlib: An Open-Source Decoder for the Galileo High Accuracy Service[C]// The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Denver, USA, 2022.

[78] ANGRISANO A, ASCIONE S, CAPPELLO G, et al. Application of "Galileo High Accuracy Service" on Single-Point Positioning [J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4223.

[79] ROVIRA-GARCIA A, TIMOTÉ C C, JUAN J M, et al. Ionospheric Corrections Tailored to the Galileo High Accuracy Service[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(12): 130.

[80] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, et al. Orbit Determination of Sentinel-6A Using the Galileo High Accuracy Service Test Signal[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 120.

[81] MARTINI I, SUSI M, PAONNI M, et al. Satellite Anomaly Detection with PPP Corrections: A Case Study with Galileo's High Accuracy Service [C]//The International Technical Meeting of the the Institute of Navigation, Long Beach, USA, 2022.

[82] ZHOU P Y, XIAO G R, DU L. Initial Performance Assessment of Galileo High Accuracy Service with Software-Defined Receiver [J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(1): 2.

[83] HADAS T, KAZMIERSKI K, KUDŁACIK I, et al. Galileo High Accuracy Service in Real-Time PNT, Geoscience and Monitoring Applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 8000905.

[84] MIYA M, FUJITA S, SATO Y, et al. Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System, Its User Interface, Detailed Design, and Plan[C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2016.

[85] MIYA M, FUJITA S, SATO Y, et al. Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System, Design for Satellite Based RTK-PPP Services[C]//The 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Tampa, USA, 2015.

[86] MIYA M, FUJITA S, SATO Y, et al. Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System, Its User Interface, Detailed Design, and Plan[C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2016.

[87] FUJITA S, SATO Y, MIYA M, et al. Design of Integrity Function on Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2016.

[88] ZHANG Y Z, KUBO N, PULLEN S. Evaluation of QZSS Centimeter Level Augmentation System (CLAS): Open-Sky to Urban Environments and Geodetic to Low-Cost Receivers[C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Denver, USA, 2022.

[89] RODRIGUEZ-SOLANO C, TALBOT N, ZYRYANOV G, et al. Protection Level of the Trimble RTX Positioning Engine for Autonomous Applications[C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, St. Louis, USA 2021.

[90] WEINBACH U, BRANDL M, CHEN X M, et al. Introducing the Next Generation of Trimble's RTX Positioning Service [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the In-

stitute of Navigation, St. Louis, USA, 2021.

[91] GLOCKER M, LANDAU H, LEANDRO R, et al. Global Precise Multi-GNSS Positioning with Trimble Centerpoint RTX [C]//The 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, 2012.

[92] ATIZ O F, SHAKOR A Q, OGUTCU S, et al. Performance Investigation of Trimble RTX Correction Service with Multi-GNSS Constellation [J]. *Survey Review*, 2023, 55(388): 44-54.

[93] İLÇI V, PEKER A U. The Kinematic Performance of Real-Time PPP Services in Challenging Environment[J]. *Measurement*, 2022, 189: 110434.

[94] ALKAN R M. Cm-Level High Accurate Point Positioning with Satellite-Based GNSS Correction Service in Dynamic Applications[J]. *Journal of Spatial Science*, 2021, 66(2): 351-359.

[95] ALKAN R M, EROL S, İLÇI V, et al. Comparative Analysis of Real-Time Kinematic and PPP Techniques in Dynamic Environment[J]. *Measurement*, 2020, 163: 107995.

[96] OZER YIGIT C, BEZCIOGLU M, ILCI V, et al. Assessment of Real-Time PPP with Trimble RTX Correction Service for Real-Time Dynamic Displacement Monitoring Based on High-Rate GNSS Observations[J]. *Measurement*, 2022, 201: 111704.

[97] SHERIDAN K, TOOR P, RUSSELL D, et al. Terrastar-C: A Global GNSS Service for cm-Level Precise Point Positioning With Ambiguity Resolution [C]//European Navigation Conference, Venue, Poland, 2015.

[98] JOKINEN A, ELLUM C, WEBSTER I, et al. NovAtel CORRECT with Precise Point Positioning (PPP): Recent Developments [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, USA, 2018.

[99] JOKINEN A, ELLUM C, WEBSTER I, et al. NovAtel CORRECT with Precise Point Positioning (PPP): Recent Developments [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, USA, 2018.

[100]KONDRATIUK V, KONIN V, KUTSENKO O, et al. Testing Static and Kinematic Modes of Precise Point Positioning Service in Ukraine[J]. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, 62(10): 530-540.

[101]ROBUSTELLI U, CUTUGNO M, PUGLIANO G. Low-Cost GNSS and PPP-RTK: Investigating the Capabilities of the U-Blox ZED-F9P Module [J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 6074.

[102]HOHENSINN R, STAUFFER R, GLANER M F, et al. Low-Cost GNSS and Real-Time PPP: Assessing the Precision of the U-Blox ZED-F9P for Kinematic Monitoring Applications [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5100.

[103]蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 427-435.
CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. BDS-3 Performance Assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4): 427-435.

[104]ZHANG W H, WANG J L, EL-MOWAFY A, et al. Integrity Monitoring Scheme for Undifferenced and Uncombined Multi-Frequency Multi-Constellation PPP-RTK[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(2): 68.

[105]ZHANG W H, WANG J L. Integrity Monitoring Scheme for Single-Epoch GNSS PPP-RTK Positioning[J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 10.

[106]HIROKAWA R, FUJITA S. A Message Authentication Proposal for SatelliteBased Nationwide PPP-RTK Correction Service [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, USA, 2019.

[107]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.

[108]杨子辉, 薛彬. 北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势[J]. 导航定位学报, 2022, 10(1): 1-14.
YANG Zihui, XUE Bin. The Developed Procedures and Developing Trends of BeiDou Satellite Navigation System[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2022, 10(1): 1-14.

[109]唐斌, 赵文军, 张天桥, 等. 北斗三号区域短报文服务解析与试验验证[C]//第十四届中国卫星导航年会论文集——S07卫星导航用户终端, 济南, 2024.
TANG Bin, ZHAO Wenjun, ZHANG Tianqiao, et al. Analysis and Test Verification of Regional Short Message Communication Service in BDS-3[C]// The 14th China Satellite Navigation Annual Conference — S07 Satellite Navigation User Terminal, Jinan, China, 2024.

[110]王纯,杜源,黄观文,等. 基于北斗三号区域短报文通信的滑坡灾害监测数据传输方案设计[J]. 导航定位与授时,2023,10(3):96-107.
WANG Chun, DU Yuan, HUANG Guanwen, et al. Design of Landslide Hazard Monitoring Data Transmission Scheme Based on BeiDou-3 Regional Short Message Communication[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(3): 96-107.

[111]姬生月,孙嘉文,宋云记,等. 基于北斗短报文的远海实时精密单点定位[J]. 国防科技大学学报,2021,43(6):74-84.
JI Shengyue, SUN Jiawen, SONG Yunji, et al. Ocean Real-Time Precise Point Positioning Based on BeiDou Short-Message Communication [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(6): 74-84.

[112]郭树人,刘成,高为广,等. 卫星导航增强系统建设与发展[J]. 全球定位系统,2019,44(2):1-12.
GUO Shuren, LIU Cheng, GAO Weiguang, et al. Construction and Development of Satellite Navigation Augmentation Systems[J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(2): 1-12.

[113]张恒才,蔚保国,秘金钟,等. 综合PNT场景增强系统研究进展及发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):491-505.
ZHANG Hengcai, YU Baoguo, BI Jinzhong, et al. A Survey of Scene-Based Augmentation Systems for Comprehensive PNT[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 48(4): 491-505.

[114]袁洪,陈潇,罗瑞丹,等. 对低轨导航系统发展趋势的思考[J]. 导航定位与授时,2022,9(1):1-11.
YUAN Hong, CHEN Xiao, LUO Ruidan, et al. Review of the Development Trend of LEO-Based Navigation System[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(1): 1-11.

[115]RTCM Special Committee No. 104. Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3 + Amendment 1 (RTCM Standard No. 10403.3)[R]. Washington, USA: RTCM, 2020.

[116]MITSUBISHI ELECTRIC. Specification of Compact SSR Message for Satellite-Based Augmentation Service, v08(Technical Report No. RTCM SC-104) [R]. Los Angles, USA: MITSUBISHI ELECTRIC, 2019.

[117]李子申,王宁波,李亮,等. 北斗高精度高可信PPP-RTK服务基本框架[J]. 导航定位与授时,2023,10(2):7-15.
LI Zishen, WANG Ningbo, LI Liang, et al. Basic Framework of BDS-Based High-Precision and High-Credibility PPP-RTK Service [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(2): 7-15.

[118]SAKAI T, KOGURE S. The Latest Status of Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) and Its Future Expansion [C]//The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, USA, 2019.

[119]HIROKAWA R, NAKAKUKI K, FUJITA S, et al. The Operational Phase Performance of Centimeter-Level Augmentation Service (CLAS) [C]// ION Pacific PNT, Honolulu, USA, 2019.

[120]NAMIE H, KUBO N. Performance Evaluation of Centimeter-Level Augmentation Positioning L6-CLAS/MADOCA at the Beginning of Official Operation of QZSS[J]. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2021, 10(1): 27-35.