



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 北斗/GNSS 广域精密定位技术与服务: 现状与展望
作者: 陈秀德, 刘惠, 蔚保国, 盛传贞, 黄观文, 惠沈盈, 应俊俊
DOI: 10.13203/j.whugis20230472
收稿日期: 2023-12-11
网络首发日期: 2024-05-22
引用格式: 陈秀德, 刘惠, 蔚保国, 盛传贞, 黄观文, 惠沈盈, 应俊俊. 北斗/GNSS 广域精密定位技术与服务: 现状与展望[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230472>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230472

引用格式：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），2024,DOI:10.13203/J.whugis20230472

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, 2024, 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（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（PPP）、模糊度固定的精密单点定位（PPP-AR）及精密单点实时动态定位（PPP-RTK）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（PPP）；精密单点实时动态定位（PPP-RTK）；厘米级增强服务（CLAS）；高精度服务（HAS）；实时扩展（RTX）；精密定位服务（PPS）

中图分类号：P228

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

CHEN Xiude^{1,2} LIU Hui² YU Baoguo¹ SHENG Chuanzhen¹ HUANG Guanwen³
HUI Shenyong^{1,2} YING Junjun¹

1 The 54th Research Institute of CETC, State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, 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 cities, transportation, smart robots, unmanned aerial vehicle (UAV), etc., the technology and service application of precise positioning continue to develop in recent years. Firstly, it summarizes

基金资助：国家重点研发计划项目（308 课题）

第一作者和通信作者：陈秀德，博士，河北石家庄，主要从事 GNSS 导航定位与授时相关研究。
zhuiqizirancxd@sina.com

separately 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. Secondly, it reviews the service capacity, scope and other aspects and long-term development plan of precise positioning service for major satellite navigation systems; Then, the characteristics, service capabilities, and application progress of precise positioning service and technology provided by mainstream commercial companies were discussed; Finally, the challenges faced by GNSS precise positioning service at present, their development trends, and future prospects were analyzed.

Keywords: precise point positioning (PPP); precise point positioning and real time kinematic (PPP-RTK); centimeter level augmentation service (CLAS); high accuracy service (HAS); real time extended (RTX); precise positioning service (PPS)

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) 的发展, 在国防建设、日常生产生活中都扮演着重要角色。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、雷达 (LiDAR)、惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 等多源传感器定位满足上面的定位精度要求, 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 米级定位精度, 无法满足精密定位应用, 而通过 GNSS 增强可提高定位精度。按照播发链路方式, GNSS 增强可分为星基增强 (satellite-based augmentation system, SBAS) 和地基增强 (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, 可分为观测状态表示 (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)、RTK 以及新兴的精密单点实时动态定位 (Precise Point Positioning and Real Time Kinematic, PPP-RTK) 技术^[7-10], 均采用 SSR 推送方式。其中, 单站 RTK 采用载波相位双差模糊度固定技术, 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 Ambiguity Resolution, 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 PPP 单站定位、广域作用范围、用户无上限的优点，还具备 RTK 快速厘米级定位能力，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发展现状、实际存在的问题及未来展望进行系统综述，让读者对 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。本文主要结构：第 1 节介绍了 GNSS 精密定位技术的研究进展；第 2 节论述了主要卫星导航系统广域 PPS 特点及应用；第 3 节对主流商业公司提供的广域 PPS 进行了论述；第 4 节分析了当前 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的 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]。为方便读者更容易理解三种技术，本文归纳了三种技术的主要特点：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，但该种定位收敛较慢；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），这种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。三种技术详细特点见表 1。

表 1 PPP、PPP-AR、PPP-RTK 主要技术特点

Table 1 The main technical features of PPP、PPP-AR、PPP-RTK

技术类型	定位精度	收敛时间	可覆盖范围	协议类型	宽带要求	参数个数
PPP	分米级	15~30 min	全球	RSSR	500bps	3
PPP-AR	厘米~分米级	5~20 min	全球	CSSR	500bps	4
PPP-RTK	厘米级	<1 min	区域	CSSR	2000bps	6

注：RSSR 表示 RTCM SSR 协议；CSSR 表示压缩（Compact）SSR 协议。

1.1 PPP 和 PPP-AR 研究进展

PPP 技术是在 1997 年首次由 Zumberge 等人提出，采用事后处理方式，可获取 2.3~3.5 分米级定位，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]。Seepersad 等人静态 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，尤其是东方面定位精度^[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，实现 AR^[28]。PPP 技术这种缓慢收敛的缺点成为制约 PPP 技术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。Liu 等^[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%。耿江辉等^[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、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。李盼等^[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,收敛缩短 15.6%;李盼^[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 AR 模型,可有效改善定位性能。李星星等^[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,李星星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,U 方向定位精度可提升 84.3%。楼益栋等^[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,研究人员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 (phase clock/bias) 模型。Laurichesse 等^[26]首次提出了 IRC 方法实现 AR,该方法前提是假设在单天弧段内卫星宽巷相位偏差为固定值,先基于 M-W 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。刘帅等^[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。Collins 等^[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 IGS 卫星钟差、码偏差产品均不兼容^[38-39]。葛茂荣等^[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%,并且该方法与 IGS 卫星钟差产品兼容^[40]。耿江辉等^[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,耿江辉等^[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 卫星钟差和码偏差产品兼容,并且可以提升 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。Banville 等^[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。姚宜斌等^[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。John、Aggrey 等^[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)。高扬等^[45]考虑了接收机差分码偏差 (differential code biases, DCB) 对定位结果的影响,提出了一种电离层约束模型,将电离层总电离层含量 (ionospheric 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 精度收敛时间可缩短至 7.5 min。Tang 等^[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 Wubben 在 2005 年首次提出，该技术融合了 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]。近几年，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。葛茂荣等^[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/偏差四种卫星钟相位偏差估计方法详见文献^{[25][26][37][42]}。此外，Villiger、李星星等^[50,51]针对当前多系统多频点 UPD 改正表达形式比较复杂缺点，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。耿江辉等^[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%。崔博斌、李盼等^[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% 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。Pulido 等^[54]提出了一种以 B 样条函数为基础的 4 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。Odijk 等^[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。张宝成等^[20]从去相关的 S 变换理论角度，采用三种非差非组合模型估计卫星相位偏差，对比了三种模型的用户静态、动态定位性能。马宏阳等^[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。李星星等^[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。李星星等^[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。安向东等^[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。李星星等^[10]指出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。宋伟伟等^[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，北斗全球卫星导航系统（BeiDou-3, BDS-3）自 2020 年 7 月 31 日正式开通以来，可为用户提供七种类型服务，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 年 1 月 24 日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]。日本准天顶系统（Quasi-Zenith Satellite System, QZSS）从 2018 年 11 月，向日本国内用户提供厘米水平增强服务（Centimeter Level Augmentation Service, CLAS），服务采用了 PPP-RTK 技术；此外，QZSS 从 2022 年 9 月 30 日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, MADOCA-PPP）试运行服务，预计 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。

表 2 卫星导航系统精密定位服务主要特点

Table 2 The main features of precise positioning service of satellite navigation system

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

注：C/G/E/R/Q 依次为北斗、GPS、Galileo、GLONASS 及 QZSS 系统简写；*表示目前还不支持，但原型设计支持后续升级。

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。Xu 等^[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。Tao 等^[59]从空间信号精度（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 B2b PPP 服务信息可用性要优于 CNES；B2b PPP 服务信息中 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;Liu 等^[69]对比分析了 B2b PPP 和 GFZ、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 WHU 实时服务,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。赵齐乐等^[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。

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(EUSPA)宣布 Galileo 在 2023 年 1 月 24 日正式提供 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 发展过程分为三个阶段,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%置信条件下,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,预计 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。Garcia 等^[79]提出一系列创新方法,采用快速 PPP 算法,可为 HAS 提供优于 1TECU 精度的电离层服务产品。Pintor 等^[61]基于研制的用户终端及算法,验证了 HAS 服务的性能。Fernandez 等^[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 SISRE 分别为 9.5、16cm,定位精度满足设计要求。Hauschild、Angrisano 等^[78,80]分别分析了 HAS 对 LEO 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。Martini 等^[81]将 HAS 应用于 PPP 卫星异常检验,服务鲁棒性得以提升。Naciri 等^[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、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 RMS 精度分别为 13.1、18.6 cm;收敛时间未达到设计的 300 s 内,这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。周佩元等^[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。Hadas 等^[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 为用户提供七种服务,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。Miya 等^[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。Fujita 等^[87]提出一种适用于 CLAS 服务的完好性算法。Hirokawa 等^[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。张益泽等^[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，这些公司包括国外的 Trimble、NovAtel、Ublox 公司，国内的合众思壮、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 (FAST)；2017 年增加系统完好性监测服务，并且全面支持北斗和 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 Fast (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（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) 研发设计而来，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 服务主要特点如表 3。

表 3 Trimble CenterPoint RTX 服务主要特点^[90-93]

Table 3 The main features of Trimble CenterPoint RTX service

服务名称	类别	技术类型	精度 (95% RMS)/cm	收敛时间 (95%)	服务范围	播发系统	完好性
Trimble	基本服务	PPP-AR	水平 ≤ 2	<15min	全球	G/R/E/C/	×
CenterPoint	快速服务	PPP-RTK	高程 ≤ 5	<1min	欧洲/ 北美洲	Q	✓
RTX	(FAST)						

注：RMS 表示均方根误差 (root mean square)。

一些学者对 CenterPoint RTX 服务性能进行了测试与分析。Atiz 等^[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，东北天各方向 RMS 精度分别为 1.2、1.5 和 2.3 cm。Alkan 等^[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 STD 精度分别为 1 cm 和 3 cm；此外，对比了 RTX PPP、单站 RTK、网络 RTK 三种模式下动态定位性能，水平、高程定位精度都在厘米级，其中 RTX PPP 水平和高程方向定位精度分别在 3 cm、7 cm 内；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。Yigit 等^[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，TerraStar 服务按精度可分为 TerraStar-L、TerraStar-C、TerraStar-C PRO 和 TerraStar-X 四种。前三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，此外，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 公司通过三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，保证了传输的可靠性。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 The main features of NovAtel TerraStar service

服务名称	类别	技术类型	精度(95%/cm)		收敛时间(95%)	服务范围	播发系统
			水平	高程			
	TerraStar-L	PPP	≤40	≤60	<5min	全球	G/R
NovAtel	TerraStar-C	PP-AR	≤4	6.5	30-45min	全球	G/R
TerraStar	TerraStar-C PRO	PPP-AR	2.5	5	<18min	全球	G/R/E/C
	TerraStar-X	PPP-RTK	2	5	<1min	北美洲、欧洲	G/R

Sheridan 等^[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 精度阈值所需收敛时间为 25 min。Jokinen 等^[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前面提到的收敛精度；在 TerraStar-C PRO 服务下，欧洲区域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。Kondratiuk 等^[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，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、12.5 cm 精度；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，此外，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 Ublox PointPerfect

2021 年 4 月，Ublox 公司收购了 Sapcorda 公司，成为独立拥有先进 GNSS PPS 的供应商。自 2021 年 8 月 31 日，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 Ublox 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，协议采用轻量级和安全的物联网消息队列遥测传输协议 (Message Queue Telemetry Transport, MQTT)，形成结合行业驱动的实时导航安全位置增强 (SPARTN) 2.0 版协议。从 2022 年 9 月 1 日起，PointPerfect 服务覆盖韩国；从 2022 年 12 月，PointPerfect 服务覆盖加拿大^[101,102]。Ublox PointPerfect 服务主要特点如表 5 所示。

表 5 Ublox PointPerfect 服务主要特点

Table 5 The main features of Ublox PointPerfect service

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

Robustelli 等^[101]基于 Ublox 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 即可获取水平厘米定位, 在 95% 置信水平下, 水平和高程方向定位精度分别为 8.9 cm、28.4 cm。Hohensinn 等^[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 Ublox 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, 中海达向亚太区域尤其是“一带一路”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区域用户提供快速服务, 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 The main features of Hi-RTP service

服务名称	类别	技术类型	精度(95%)/cm		收敛时间 (95%)/min	服务范围	可用性	播发 系统
			水平	高程				
中海达	标准服务	PPP-AR	<5	<10	<20	全球	99%	G/C/
Hi-RTP	快速服务	PPP-RTK	<3	<5	<0.5	中国		R/E

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”的建设工作; 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, 千寻完成了“全国一张网”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, 大幅度提升了数据源的稳定性与可靠性; 2023 年 8 月 30 日, 正式发布高精度定位星基增强服务-千寻星鉴 (XStar)。XStar 服务 (<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 AI 融合算法, 实现多场景下的智能切换, 可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, 截止 2023 年, 千寻地基监测站规模达到 3 000 个^[10,22]。千寻 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 The main features of Qianxun Xstar service

服务名称	类别	技术类型	精度(95%)/cm		收敛时间 (95%)/min	服务范围	可用性	播发 系统
			水平	高程				
千寻 XStar	标准服务	PPP-AR	<2.5	<5	<15	亚太区域	99.99%	C/G/R
	快速服务	PPP-RTK			<2	中国		/E/Q

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三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 3000 多个，推出了星地融合厘米定位服务-星璨 (Orion)，该服务采用了 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，此外，该服务通过了汽车功能安全认证，服务体系符合 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 年 1 月 4 日，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，主要依托自研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 年 6 月 2 日，时空道宇自研的首轨九星成功入轨，成为国内首家基于自研低轨卫星开展星基增强服务的公司。2023 年 9 月，时空道宇星基服务结合自研融合定位终端-涟漪智行，为杭州亚运会 2000 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 The main features of other company service

服务名称	技术类型	精度(95%)/cm			收敛时间 (95%)/min	服务范围	可用性	播发 系统
		模式	水平	高程				
六分科技 (Orion)		静态	<2.5	<5	<0.5	中国	99.9%	C/G/R
		动态	<10	<20				/E/Q
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		<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，我们主要从通信链路、服务类型、信号脆弱性三方面对 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

■ 通信链路

北斗 B2b PPP 在服务边界，服务不太稳定^[103]。此外，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。

■ 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]。此外，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]。即使如此，对于高动态应用场景，如航空应用、航海远洋、自动驾驶等，这样的收敛速度还是太慢，无法满足行业对瞬时高精度定位服务需求。

■ 信号脆弱性

卫星星座一般为 MEO 卫星，轨道高度在 2.5 万公里以上，BDS 星座中还包含 GEO 和 IGSO 卫星，其轨道高度在 3.5 万公里以上。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 -121.5dBW。如此低落地电平也直接导致了 GNSS 很容易受到干扰，干扰形式包括物理遮挡、信号压制和欺骗等^[10]。其次在城市峡谷、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。此外由于 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

■ 通信链路

未来 BDS-3 可通过以下三种途径进行精密定位服务优化升级。途径 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。唐斌、王纯等^[109,110]先后验证了 RSMCS 的通信情况，传输成功率均优于 95%；姬生月等^[111]提出了一种 PPP 服务信息简化方法，通过短报文传输，可为远海用户提供实时 PPP 服务。基于国内外学者已开展的研究工作，可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。途径 2：发挥低轨卫星通信优势。国内学者郭树人、张小红、袁洪等^[112-114]先后从定位精度、收敛特性、通信量、落地功率、抗干扰性等方面，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。途径 3：目前，B2b PPP 采用的协议与 RTCM SSR 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]。此外，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。

■ 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。我们可以考虑通过以下几种手段升级服务：第一，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；第二，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；第三，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 服务预计 2024 年进入全面服务阶段（即第三阶段），将在欧洲区域提供 PPP-RTK 服务，有望实现 100s 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，后面 QZSS 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]。

此外，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。

■ 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，可考虑从以下四种途径进行优化。第一，通过多模多频联合，如五系统四频/五频，提升 PPS 性能。第二，通过低轨卫星增强来提升精密服务性能，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，此外，低轨卫星可快速覆盖南北极，进一步扩大服务范围。第三，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（11 年左右一个大周期），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。第四，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，可以考虑惯导、UWB、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。后续作者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, 2018: 1–48. https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Road-Report-on-User-Needs-and-Requirements-v-1.0.pdf.
- [2] (State Administration for Market Regulation, 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.) 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.
- [3] Galileo GNSS Agency. GNSS User Technology Report, Issue 3; 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[J], 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, USA, 2020: 2029-2036.
- [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 J G, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems - Signals and Modulation[M]. 2017..
- [12] Bisnath S, Gao Y. Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations[C]//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 (ION GNSS 2012). 2012: 3055-3065.
- [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{S} -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] 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. (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.)
- [32] Li Pan. *Research on Methodology of Rapid Ambiguity Resolution for GNSS Precise Point*

Positioning[D].Wuhan: Wuhan University, 2016. (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.)

- [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] 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. (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.)
- [37] COLLINS PAUL BISNATH SUNIL LAHAYE FRANÇOIS HÉROUX PIERRE. 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 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). 2017: 2191-2203.
- [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, ION GNSS 2005, 2005: 2584-2594.
- [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] 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. (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.)
- [57] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Specification (version 3.0) : BDS-OS-PS-3.0[S].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].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 (2022). Galileo High Accuracy Service signal-in-space interface control document (HAS SIS ICD), Issue 1.0.
- [61] Pintor P, González E, Senado A, et al. Galileo High Accuracy Service (HAS) Algorithm and Receiver Development and Testing[C]//The 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022). 2022: 836-851.
- [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]//2020 European Navigation Conference (ENC). Dresden, Germany, 2020: 1-10.
- [64] Hirokawa R, Fernández-Hernández I. Open Format Specifications for PPP/PPP-RTK Services: Overview and Interoperability Assessment[C]//Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)", "ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 22-25, 2020.2020: 1268-1290.
- [65] Cabinet Office(2023). Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation – Precise Point Positioning (IS-QZSS-MDC-002).
- [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] Cheng L, Gao W G, Liu T X, et al. Design and Implementation of a BDS Precise Point Positioning Service[J]. *Annual of Navigation*, 2020, 67: 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]. 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]. 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] Zhao Qile, Tao Jun, Guo Jing, et al. Wide-area Instantaneous Cm-level Precise Point Positioning: Method and Service System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1058-1069. (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.)
- [71] Fernandez-Hernandez I, Vecchione G, D áz-Pulido F, et al. Galileo high accuracy: A program and policy perspective[C]//Proceedings of the 69th international astronomical congress, Bremen, Germany. 2018: 1-5.
- [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 (2020). Galileo high accuracy service E6-B signal-in-space message specification v1.2.
- [75] European Union (2023). Galileo Services - High Accuracy Service Performance Report July - September 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 The Institute of Navigation", "Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. January 25-27, 2022. Long Beach, California. 2022: 1065-1074.
- [77] Horst O, Kirkko-Jaakkola M, Malkam äki T, et al. HASlib: An Open-source Decoder for the Galileo High Accuracy Service[C]//The 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022). 2022: 2625-2633.
- [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, Timot é 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]//Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. 2022: 1246-1262.
- [82] Zhou P Y, Xiao G R, Du L. Initial Performance Assessment of Galileo High Accuracy Service with Software-defined Receiver[J]. *GPS Solutions*, 2023, 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: 1-5.
- [84] Miya M, Sato Y, Fujita S, et al. Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System, Its Preliminary Design and Plan[C]//The 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014). 2014: 645-652.
- [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 (ION GNSS+ 2015). 2015: 1958-1962.
- [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 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)", "ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 12-16, 2016. Portland, Oregon. 2016: 2864-2869.
- [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 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)", "ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 12-16, 2016. Portland, Oregon. 2016: 3258-3263.
- [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]//ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation", "The 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022). September 19-23, 2022. Denver, Colorado. 2022: 2729-2750.
- [89] Rodriguez-Solano C, Talbot N, Zyryanov G, et al. Protection Level of the Trimble RTX Positioning Engine for Autonomous Applications[C]//The 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)", "ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 20-24, 2021. St. Louis, Missouri. 2021: 1577-1595.
- [90] Weinbach U, Brandl M, Chen X, et al. Introducing the Next Generation of Trimble's RTX Positioning Service[C]//The 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021). 2021: 424-442.
- [91] Glocker M, Landau H, Leandro R, et al. Global Precise Multi-GNSS Positioning with Trimble Centerpoint RTX[C]//2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. December 5-7, 2012. Noordwijk, Netherlands. 2012: 1-8.
- [92] Faruk A O, Qader S A, Sermet O, 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*, 2019, 66: 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. 2015.
- [98] Jokinen A, Ellum C, Webster I, et al. NovAtel CORRECT with Precise Point Positioning (PPP) for High Accuracy Kinematic Applications[C]//The 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015). 2015: 1123-1152.
- [99] Jokinen A, Ellum C, Webster I, et al. NovAtel CORRECT with Precise Point Positioning (PPP): Recent Developments[C]//The 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)", "ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite

- Division of The Institute of Navigation. September 24-28, 2018. Miami, Florida. 2018: 1866-1882.
- [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] Roland H, Raphael S, Franz G M, 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] 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. (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.)
- [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 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019). 2019: 1798-1811.
- [107] Yang Yuanxi, Xu Junyi. Navigation Performance of BeiDou in Polar Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 15-20. (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.)
- [108] 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. (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.)
- [109] Tang B, Zhao W, Zhang T, et al. Analysis and experimental verification of Beidou-3 regional Short Message service [C]// Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office. Proceedings of the 14th China Satellite Navigation Annual Conference -- S07 Satellite Navigation User Terminal. 2024: 30-35.(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: 30-35.)
- [110] 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. (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.)
- [111] 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. (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.)
- [112] 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. (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.)
- [113] Zhang Xiaohong, Ma Fujian. Review of the Development of LEO Navigation-augmented GNSS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1073-1087. (张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述[J]. *测绘学报*, 2019, 48(9): 1073-1087.)
- [114] 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. (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.)
- [115] RTCM Special Committee No. 104 (2020). Differential GNSS (global navigation satellite systems) services – version 3 + amendment 1 (RTCM Standard No. 10403.3).
- [116] Mitsubishi Electric (2019). Specification of compact SSR message for satellite-based augmentation service, v08. Technical Report No. RTCM SC-104.
- [117] 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. (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.)
- [118] Sakai T, Kogure S. The Latest Status of Quasi-zenith Satellite System (QZSS) and Its Future Expansion[C]//Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)", "ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 16-20, 2019. Miami, Florida. 2019.
- [119] Hirokawa R, Nakakuki K, Fujita S, et al. The Operational Phase Performance of Centimeter-level Augmentation Service (CLAS) [C]//The ION 2019 Pacific PNT Meeting, 2019: 349-360.
- [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.

网络首发:

标题: 北斗/GNSS 广域精密定位技术与服务: 现状与展望

作者: 陈秀德, 刘惠, 蔚保国, 盛传贞, 黄观文, 惠沈盈, 应俊俊

收稿日期: 2023-12-11

DOI:10.13203/j.whugis20230472

引用格式:

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), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230472

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, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230472
