



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于北斗三号全球卫星导航系统的实时精密定位算法研究

作者姓名：_____ 宋子远 _____

指导教师：_____ 陈俊平 研究员 张益泽 副研究员 _____

_____ 中国科学院上海天文台 _____

学位类别：_____ 理学博士 _____

学科专业：_____ 天体测量与天体力学 _____

培养单位：_____ 中国科学院上海天文台 _____

2024 年 6 月

**The Research on Real-Time Precise Positioning Method Based on
BDS-3 Global Satellite System Service**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
In Astrometry and Celestial Mechanics**

By

SONG Ziyuan

Supervisor: Professor CHEN Junping &

Associate Processor ZHANG Yize

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2024

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学

学位论文使用授权声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

随着北斗三号全球卫星导航系统正式上线,我国自主研发的北斗卫星导航系统服务性能迈上了新的台阶。目前北斗卫星导航系统已广泛应用于全球范围内的大地测量、灾害预警、农业建设等各个领域。人们对于位置服务实时性、精确性、广域性愈来愈高的需求,对我国北斗卫星导航系统实现更高精度、更广范围以及更稳定精密定位服务提出了新的要求与挑战。本文围绕北斗三号全球卫星导航系统实时精密定位算法展开研究,主要研究内容与创新点包括:

1. 针对北斗二号(BDS-2)与北斗三号(BDS-3)联合实时定位服务性能,基于北斗广播星历与 IGS 多家分析中心播发的实时精密星历,分析了 BDS-2/BDS-3 系统偏差来源及其时间序列特性。证明了该系统偏差由用户接收机端硬件延迟差异以及卫星端系统差异两部分构成,其中接收机硬件延迟差异与接收机类型高度相关。在此基础上,分析 BDS-2/BDS-3 系统偏差对联合定位的影响并统计其最优估计方法。BDS-2/BDS-3 联合系统偏差对 BDS-2/BDS-3 定位收敛具有显著影响:在估计 ISB 参数后,SPP 定位精度从 2.42 m 提高至 2.22 m,提升达到 8.0%;基于 WHU 实时产品,动态 RT-PPP 定位精度从 0.59 m 提升至 0.21 m,收敛时间从 200.0 min 缩短至 29.5 min;静态 RT-PPP 收敛时间从 110.0 min 缩短至 15.9 min。统计分析表明,在使用任意一家实时产品时,增加 BDS-2/BDS-3 间系统偏差估计能有效提高定位性能,且偏差估计方式应优先选用随机游走方式估计。

2. 基于 BDS-2/BDS-3 系统偏差估计,将 BDS-2/BDS-3 与 BDS-2 在全球范围内的实时定位性能进行对比。实验结果表明,BDS-3 显著优化了 BDS 导航系统在全球范围内的几何构型。BDS-2/BDS-3 联合星座相对于 BDS-2 星座,在亚洲地区平均可见卫星数从 9 颗提升至 18 颗,PDOP 从 2.92 提升至 1.43;对于欧非大陆地区可见卫星数从 5 颗扩展至 13 颗,PDOP 从 6.25 显著提升至 1.67;对美洲地区所有测站单天任意时段平均可见卫星数从小于 4 颗扩展至 9 颗,平均 PDOP 达到 2.32。

3. 通过实验验证了 BDS-2/BDS-3 联合系统在全球范围内相对 BDS-2、BDS-3 单独定位的性能提升。基本导航服务中,亚洲地区定位精度从 11.1 m 提升至 2.5 m;欧非大陆从 14.6 m 提升至 2.66 m;美洲地区从无法连续定位提升至可实现全天连续精度为 3.24 m 导航定位服务,在联合 BDS-2/BDS-3 后,BDS-2/BDS-3 联合伪距定位在全球平均定位精度进一步提升至 2.6 m。对于实时 PPP,BDS-3 相对于 BDS-2 在亚洲地区动、静态收敛时间分别提升 118.7 min、60.6 min;定位精度分别提升 0.48 m、0.10 m;在欧非地区,动、静态定位收敛时间分别提升 178.1min 和 157.2 min,定位精度分别提升 0.6 m、0.27 m;在美洲

地区 BDS-2/BDS-3 联合定位动静态可以分别在 68.9 min、25.0 min 完成收敛，可以实现动态 0.44 m、静态 0.07m 定位精度。BDS-3 在全球范围内动/静态定位精度分别达到 0.3 m/0.05 m，收敛时间达到 43 min/18.9 min。BDS-2/BDS-3 联合定位精度在其基础上可进一步提升动态定位服务性能，在全球平均定位精度动态达到 0.23 m；平均收敛时间分别达到 35.0 min，相比 BDS-3 提升 23.3%、18.6%。对于广域差分星基增强定位，BDS-2/BDS-3 双频定位相比 BDS-2 定位动态、静态收敛时间分别缩短 5.8 min、5.2 min；动/静态定位精度提升达到 30%、16%；单频 BDS2/BDS-3 联合定位动态收敛时间相比 BDS-2 缩短超过 80 min，定位精度提升 29%；BDS2/BDS-3 联合定位静态收敛时间相比 BDS-2 缩短超过 50 min，定位精度提升达到 44%。

4. 首次提出了基于 BDS-3 全球短报文链路的多系统实时精密单点定位模糊度固定算法(SMC-PPP-AR)。设计了一套服务端多系统精密改正数生成、编码与播发方案，结合 SMC-PPP-AR 用户端定位算法，可保证用户在全球地区无网络覆盖区域依旧可以获取免费高精度定位服务。实验表明，使用本文中提出的 SMC-PPP-AR 方法相比于传统 SMC-PPP 在定位前期优势更为明显：SMC-PPP-AR 在平面和高程的精度在前两小时相较于 SMC-PPP 分别提升了 1 cm 和 12 cm。与 SMC-PPP 相比前 40 min 完成收敛测站比例增加了 26%。SMC-PPP-AR 定位动态与静态定位精度分别提升了 10.0%和 7.8%；收敛时间与 SMC-PPP 相比，分别缩短 14.5%和 11.8%。除此之外，与播发传统改正数相比，使用本文提出的线性拟合改正数使得用户端改正数可用时长增加。在短报文通讯存在短时频繁丢包、数据延迟的情况下，依然可以保证用户定位服务连续性与服务精度。

5. 针对 BDS-3 B2b 精密单点定位服务，首次分析了 B2b 产品中 GPS 钟差跳变对 BDS-3+GPS 定位性能带来的影响。结合跳变统计特性，提出了一种钟差跳变探测与修复方法；基于该方法，通过实验明确论证了三种有效的 B2b-PPP GPS+BDS-3 定位模型。实验表明，当钟差跳变被妥善处理，双频 PPP 的动态定位精度可从 0.83 m 提升至 0.08m，收敛时间缩短 22 min。除此之外，在跳变修复的前提下对 B2b-PPP 中 GPS 适当降权能进一步提升 B2b-PPP 的定位性能。

6. 针对 BDS-3 B2b-PPP 产品中的完好性信息，首次提出将用户距离精度用于 B2b-PPP 随机模型的构建。通过实验分析，证明了 B2b-PPP 中播发的用户距离精度信息可靠性较差。基于上述研究，进一步提出一种 B2b-PPP URA 优化估计方法，将优化后的 URA 信息用于 B2b-PPP 中随机模型的构建；通过实验证明，进行 B2b-PPP 定位解算时使用优化后的 URA 能显著提升服务性能，与不使用 URA 定权相比，动态定位收敛时间从 17.3 min 缩短至 12.6 min，提升达 27.2%；静态定位收敛时间提升 22.2%，动态和静态收敛精度分别提升了 8.5%和 10.3%。本文进一步提出了结合北斗短报文链路的优化 URA 播发方法，参考短报文实际

通讯效率，验证了该播发方式的有效性。

关键词：北斗卫星导航系统，实时精密定位，模糊度固定，北斗短报文，北斗 B2b 精密单点定位

Abstract

With the official launch of the BDS-3 global satellite navigation system, China's independently developed BeiDou satellite navigation system has reached a new level of service performance. Currently, the BDS satellite navigation system has been widely used in various fields such as geodetic surveying, disaster early warning, and agricultural construction worldwide. The increasing demand for real-time, precise, and wide-area positioning services poses new requirements and challenges for achieving higher accuracy, wider coverage, and more stable precise positioning services with BDS satellite navigation system. This paper focuses on the research of real-time precise positioning algorithms for the BDS-3 global satellite navigation system. The main research contents and innovations include:

1. Regarding the performance of the joint real-time positioning services of BeiDou Navigation Satellite System (BDS-2) and BeiDou-3 (BDS-3), this study analyzes the sources and time series characteristics of system biases in BDS-2/BDS-3 based on broadcast ephemeris from BDS and real-time precise ephemeris from multiple International GNSS Service (IGS) analysis centers. It is demonstrated that the system biases consist of differences in hardware delays at the user receiver end and system differences at the satellite end, with the hardware delay differences at the receiver end highly correlated with receiver types. Building upon this analysis, the impact of BDS-2/BDS-3 system biases on joint positioning is examined, and the optimal estimation method is statistically determined. The joint system biases of BDS-2/BDS-3 have a significant impact on the convergence of BDS-2/BDS-3 positioning: after estimating the Inter-System Bias (ISB) parameters, the Single Point Positioning (SPP) accuracy improves from 2.42 m to 2.22 m, a 8.0% enhancement; based on real-time products from Wuhan University (WHU), the dynamic Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) accuracy increases from 0.59 m to 0.21 m, with convergence time shortened from 200.0 min to 29.5 min; static RT-PPP convergence time reduces from 110.0 min to 15.9 min. Statistical analysis indicates that when using any real-time product, incorporating estimates of BDS-2/BDS-3 inter-system biases can effectively enhance positioning performance, with the random walk estimation method preferred for bias estimation.

2. Based on the estimation of system biases in BDS-2/BDS-3, the real-time positioning performance of BDS-2/BDS-3 and BDS-2 is compared globally. Experimental results demonstrate that BDS-3 significantly optimizes the geometric configuration of the BDS navigation system worldwide. In comparison with the BDS-2 constellation, the joint constellation of BDS-2/BDS-3 increases the average number of visible satellites in the Asian region from 9 to 18, and reduces PDOP from 2.92 to 1.43; for the Europe-Africa continent, the number of visible satellites extends

from 5 to 13, and PDOP decreases significantly from 6.25 to 1.67; for all stations in the Americas, the average number of visible satellites per day at any given time increases from less than 4 to 9, with an average PDOP reaching 2.32.

3. The performance improvement of the BDS-2/BDS-3 combined system relative to BDS-2 and BDS-3 standalone positioning was verified through experiments on a global scale. In basic navigation services, the positioning accuracy in the Asian region improved from 11.1 meters to 2.5 meters; in the Europe-Africa continent, it improved from 14.6 meters to 2.66 meters; in the Americas, where continuous positioning was previously unavailable, it improved to achieve continuous accuracy of 3.24 meters throughout the day. Following the integration of BDS-2/BDS-3, the average positioning accuracy of BDS-2/BDS-3 combined pseudorange positioning further improved to 2.6 meters globally. For real-time Precise Point Positioning (PPP), compared to BDS-2, BDS-3 showed respective improvements in dynamic and static convergence times of 118.7 minutes and 60.6 minutes in the Asian region, and improvements in positioning accuracy of 0.48 meters and 0.10 meters. In the Europe-Africa region, dynamic and static positioning convergence times improved by 178.1 minutes and 157.2 minutes respectively, with corresponding improvements in positioning accuracy of 0.6 meters and 0.27 meters. In the Americas, BDS-2/BDS-3 combined positioning achieved dynamic and static convergence in 68.9 minutes and 25.0 minutes respectively, with positioning accuracy of 0.44 meters dynamically and 0.07 meters statically. BDS-3 achieved dynamic/static positioning accuracies of 0.3 meters/0.05 meters globally, with convergence times of 43 minutes/18.9 minutes. The BDS-2/BDS-3 combined positioning further enhanced dynamic positioning service performance, achieving an average dynamic positioning accuracy of 0.23 meters and average convergence times of 35.0 minutes globally, representing improvements of 23.3% and 18.6% compared to BDS-3. For Wide Area Differential Satellite-based Augmentation Systems, BDS-2/BDS-3 dual-frequency positioning reduced dynamic and static convergence times by 5.8 minutes and 5.2 minutes respectively compared to BDS-2 positioning, with dynamic positioning accuracy improving by 30% and static positioning accuracy improving by 16%. Single-frequency BDS2/BDS-3 combined positioning reduced dynamic convergence time by over 80 minutes compared to BDS-2, with positioning accuracy improving by 29%, while static convergence time was reduced by over 50 minutes compared to BDS-2, with positioning accuracy improving by 44%.

4. We propose, for the first time, a multi-system real-time precise single-point positioning ambiguity resolution algorithm (SMC-PPP-AR) based on the global short message link of BDS-3. We design a set of server-side multi-system precise correction generation, encoding, and broadcasting schemes. Combined with the SMC-PPP-AR user-side positioning algorithm, this setup ensures that users can still obtain free high-precision positioning services in areas without network coverage worldwide.

Experiments demonstrate that using the SMC-PPP-AR method proposed in this paper yields more significant advantages in the initial stage of positioning compared to traditional SMC-PPP: in the first two hours, the accuracy in both horizontal and vertical planes is improved by 1 cm and 12 cm, respectively, compared to SMC-PPP. Compared to SMC-PPP, the proportion of stations completing convergence within the first 40 minutes increased by 26%. SMC-PPP-AR improves dynamic and static positioning accuracy by 10.0% and 7.8%, respectively, compared to SMC-PPP; convergence time is shortened by 14.5% and 11.8%, respectively, compared to SMC-PPP. Additionally, compared to broadcasting traditional correction data, using the linear fitting correction data proposed in this paper extends the availability of user-side correction data from 2.5 minutes to 7.5 minutes. Even in cases of short-term frequent packet loss and data delay in short message communication, continuous user positioning service and service accuracy can still be ensured.

5. In the context of BDS-3 B2b precise single-point positioning service, we conducted the first analysis of the impact of GPS clock jumps in the B2b product on the positioning performance of BDS-3+GPS. Combining the statistical characteristics of clock jumps, we propose a method for detecting and repairing clock jumps. Based on this method, three effective B2b-PPP GPS+BDS-3 positioning models are clearly demonstrated through experiments. The experiments show that when clock jumps are properly handled, the dynamic positioning accuracy of dual-frequency PPP can be improved from 0.83 m to 0.08 m, with a reduction in convergence time of 22 minutes. Additionally, under the premise of jump repair, appropriately downweighting GPS in B2b-PPP can further improve the positioning performance of B2b-PPP.

6. This study addresses the integrity information in the BDS-3 B2b-PPP product and proposes, for the first time, the use of user range accuracy (URA) for constructing the stochastic model of B2b-PPP. Through experimental analysis, it is demonstrated that the reliability of the user range accuracy information broadcasted in B2b-PPP is poor. Based on this research, a method for re-estimating URA in B2b-PPP is further proposed, and the optimized URA information is utilized for constructing the stochastic model in B2b-PPP. Experimental results show that using the optimized URA significantly improves service performance in B2b-PPP positioning solutions. Compared to not using URA weighting, dynamic positioning convergence time is reduced from 17.3 minutes to 12.6 minutes, achieving a 27.2% improvement. Static positioning convergence time is improved by 22.2%, and dynamic and static convergence accuracies are increased by 8.5% and 10.3%, respectively. This paper further proposes an optimized URA broadcasting method combined with the BeiDou short message link, considering the actual communication efficiency of short messages, and validates the effectiveness of this broadcasting method.

Key Words: BDS, Real-time-PPP, Ambiguity-resolution, BDS-SMC, BDS-B2b-PPP

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外发展现状.....	3
1.2.1 GNSS 各系统发展现状	3
1.2.2 GNSS 实时精密单点定位发展现状	11
1.2.3 BDS-2/BDS-3 联合定位发展现状	12
1.2.4 基于北斗短报文链路的实时精密定位发展现状.....	12
1.2.5 北斗星基增强与北斗 B2b 精密定位发展现状	14
1.3 本文研究内容与章节安排.....	16
1.4 本章小结.....	17
第 2 章 GNSS 精密单点定位基础理论	18
2.1 时空基准系统.....	18
2.1.1 时间系统.....	18
2.1.2 空间坐标系统.....	19
2.2 GNSS 观测模型	22
2.2.1 GNSS 原始观测值	22
2.2.2 GNSS 组合观测值	23
2.3 GNSS 误差源与处理方法	25
2.3.1 卫星相关误差.....	25
2.3.2 传播路径相关误差.....	27
2.3.3 接收机相关误差.....	29
2.3.4 其他误差.....	30
2.4 数据预处理方法.....	31
2.4.1 先验粗差探测与剔除.....	32
2.4.2 相位周跳实时探测方法.....	32
2.5 参数估计方法.....	33
2.5.1 最小二乘理论.....	34
2.5.2 卡尔曼滤波.....	34
2.6 本章小结.....	36
第 3 章 BDS-2/BDS-3 系统偏差与联合实时精密定位算法.....	37
3.1 BDS-2/BDS-3 联合定位模型与系统偏差估计	37
3.1.1 多系统联合定位函数模型.....	37

3.1.2 BDS-2/BDS-3 联合定位参数估计	39
3.1.3 BDS-2/BDS-3 系统偏差	39
3.2 BDS-2/BDS-3 联合定位	51
3.2.1 BDS-2/BDS-3 联合卫星星座服务性能	52
3.2.2 BDS-2/BDS-3 联合基本导航服务性能	57
3.2.3 BDS-2/BDS-3 联合实时精密定位性能分析	58
3.3 BDS-2/BDS-3 联合广域差分星基增强	59
3.3.1 北斗广域差分增强改正数	59
3.3.2 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位模型	62
3.3.3 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位性能	62
3.4 本章小结	65
第 4 章 基于 BDS-3 全球短报文链路实时多系统 PPP 模糊度固定算法研究	67
4.1 实时多系统相位小数偏差估计方法	67
4.2 基于全球短报文链路的精密单点定位模糊度固定算法	68
4.2.1 改正数生成方法	68
4.2.2 改正数编码策略	74
4.2.3 改正数播发与用户使用策略	77
4.2.4 用户端定位算法	78
4.2.5 系统总体架构	80
4.3 用户定位与实时传输有效性验证	81
4.3.1 定位验证	82
4.3.2 短报文设备实时传输有效性验证	86
4.4 本章小结	88
第 5 章 北斗 B2b-PPP 钟差跳变分析与完好性指标优化算法研究	90
5.1 B2b-PPP 改正数与定位模型	90
5.1.1 改正数类型	90
5.1.2 改正数用户方法	91
5.1.3 B2b-PPP 双系统定位性能	92
5.2 B2b-PPP 钟差跳变探测与修复方法	92
5.2.1 B2b-PPP GPS 钟差跳变统计	92
5.2.2 B2b-PPP GPS 钟差跳变处理策略	94
5.2.3 不同策略定位性能分析	97
5.3 B2b-PPP 完好性指标精度评估与优化算法	100
5.3.1 基于 URA 的 B2b-PPP 随机模型构建方法	100
5.3.2 B2b 播发 URA 定位性能评估	101
5.3.3 B2b-PPP URA 优化估计	103

5.3.4 基于优化 URA 的 B2b-PPP 性能评估	106
5.3.5 优化 URA 参数播发	110
5.4 本章小结.....	112
第 6 章 总结与展望	114
6.1 本文主要创新点与结论.....	114
6.2 下一步研究方向.....	116
参考文献.....	117
致 谢.....	127
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果	130

图目录

图 1-1 GPS 卫星星座示意图(GPS.GOV., 2024)	4
图 1-2 GPS 卫星型号示意图(GPS.GOV., 2024)	4
图 1-3 GPS 地面控制部分站点类型及其分布示意图(GPS.GOV., 2024)	5
图 1-4 GLONASS 卫星星座示意图(GLONASS.GOV., 2024)	7
图 1-5 Galileo 地面段测站类型及其分布示意图(EUSPA., 2024)	8
图 1-6 Galileo HAS 服务两阶段服务性能对比图(EUSPA., 2024)	9
图 1-7 QZSS 卫星发射规划图(Cabinet Office., 2024)	10
图 1-8 QZSS CLAS 测站分布图	10
图 1-9 北斗短报文发展历程示意图	13
图 1-10 本文主要研究内容结构示意图	16
图 2-1 各时间系统转换关系示意图	19
图 3-1 BDS-2/BDS-3 联合系统偏差估计测站分布图	40
图 3-2 2020-2023 基于广播星历的 ISB 时间序列	42
图 3-3 基于广播星历不同接收机类型 ISB 天间时间序列误差棒图	43
图 3-4 基于广播星历的不同接收机类型站间差 ISB 时间序列	45
图 3-5 基于广播星历的不同接收机类型站间差 ISB 误差棒图	45
图 3-6 基于不同实时精密产品的 ISB 时间序列图	47
图 3-7 基于不同实时精密产品的站间差 ISB 序列图	48
图 3-8 BDS-2/BDS-3 动态 RT-PPP 不同 ISB 估计方式定位性能对比图	50
图 3-9 BDS-2/BDS-3 静态 RT-PPP 不同 ISB 估计方式定位性能对比图	51
图 3-10 BDS-2/BDS-3 定位性能验证全球测站分布图	52
图 3-11 不同地区测站卫星天空图	53
图 3-12 不同地区测站单天内可见卫星数对比图	54
图 3-13 轨道各分量误差对测站测距影响示意图	59

图 3-14 等效钟差改正数时间序列图	60
图 3-15 轨道改正数时间序列图	60
图 3-16 分区监测站与服务范围示意图	61
图 3-17 分区综合改正数时间序列图	61
图 3-18 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 单天单频动态分区定位误差序列图	64
图 3-19 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 单天双频动态分区定位误差序列图	65
图 4-1 服务端 SSR 改正数改为 OSR 改正数处理流程	70
图 4-2 基于 CNES 实时产品的 OSR 时间序列图	71
图 4-3 BDS 卫星 OSR 序列图	72
图 4-4 BDS 卫星实时钟差产品与最终钟差产品作差序列图	72
图 4-5 不同拟合样本数与外推精度关系图	74
图 4-6 各系统改正数数值分布范围图	75
图 4-7 基于 GSMC 单历元编码示意图	77
图 4-8 基于 GSMC 的 PPP-AR 改正数播发示意图	78
图 4-9 GSMC PPP-AR 系统端与用户端处理流程图	81
图 4-10 GSMC PPP-AR 定位验证全球测站分布图	82
图 4-11 单站前两小时定位误差序列对比图	83
图 4-12 前两小时定位性能统计结果对比图	83
图 4-13 各测站不同模式定位性能统计对比图	84
图 4-14 各测站两种模式成功固定率与首历元固定时间对比图	85
图 4-15 分别使用/不使用可外推 OSR 改正数对用户端定位时延影响	86
图 4-16 短报文通讯设备示意图	87
图 4-17 短报文通讯效率示意图	87
图 4-18 使用短报文实际传输改正数实测定位对比图	88
图 5-1 B2b 双系统与 BDS-3 单系统定位性能对比图	92
图 5-2 B2b-PPP 实时钟差产品时间序列图	93
图 5-3 B2b-PPP GPS 钟差跳变统计图	94

图 5-4	B2b-PPP GPS 钟差跳变探测与拼接流程图	95
图 5-5	跳变前后钟差序列对比图	96
图 5-6	B2b-PPP 定位验证测站分布图	97
图 5-7	不同 ISB 估计策略对定位服务性能影响对比图	99
图 5-8	不同加权系数对定位性能的影响	100
图 5-9	B2b-PPP URA 参数时间序列图	101
图 5-10	是否使用 URA 定权对单站单天定位误差序列对比图	102
图 5-11	不同比例因子 URA-B2b-PPP 定位性能统计图	103
图 5-12	URA 优化估计所用测站与定位验证测站(红色)分布图	104
图 5-13	URA 优化估计策略流程图	105
图 5-14	优化估计 URA 时间序列图	106
图 5-15	URA 值域分布图	106
图 5-16	优化 URA 定权精密定位单天误差序列对比图	107
图 5-17	优化 URA 定权前期定位性能对比图	108
图 5-18	优化 URA 作为完好性信息对定位影响图	110
图 5-19	单历元优化 URA 电文编码结构示意图	111
图 5-20	精化 URA 随时间定位性能变化示意图	112

表目录

表 1-1 BDS-3 服务类型设计	2
表 1-2 RTCM GPS 改正数播发参数信息.....	14
表 2-1 各 GNSS 坐标框架参数表.....	20
表 2-2 实时精密产品挂载点信息表	25
表 3-1 测站接收机信息表	41
表 3-2 基于广播星历的不同接收机类型 ISB 各年平均值与 STD 统计 表.....	44
表 3-3 基于广播星历的站间差 ISB 统计信息表.....	46
表 3-4 基于实时精密产品的站间差 ISB 统计信息表.....	49
表 3-5 不同 ISB 估计方式 SPP 定位性能对比表.....	51
表 3-6 亚洲大陆各测站卫星星座与服务连续性统计表.....	55
表 3-7 欧非大陆各测站卫星星座与服务连续性统计表.....	56
表 3-8 美洲大陆各测站卫星星座与服务连续性统计表.....	57
表 3-9 伪距单点定位性能对比表	58
表 3-10 精密单点定位性能对比表	58
表 3-11 联合广域差分增强定位时是否估计 ISB 性能对比表.....	63
表 3-12 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 单频分区定位精度统计表	64
表 3-13 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 双频分区定位精度统计表	65
表 4-1 GSMC 用户端请求编码格式说明.....	69
表 4-2 GSMC PPP-AR 编码信息头	76
表 4-3 GSMC PPP-AR 单颗卫星编码信息	76
表 4-4 三种定位模式定位性能统计表.....	84
表 4-5 两种模式模糊度固定成功率与首历元固定时间统计表.....	85
表 4-6 短报文通讯中断时长统计表.....	87
表 5-1 B2b 改正数播发信息	90
表 5-2 是否使用 URA 定权定位性能统计表	102

表 5-3 B2b-PPP 定位数据处理策略	107
表 5-4 优化 URA 定权精密定位性能统计表.....	109
表 5-5 使用短报文播发 B2b 优化 URA 信息头.....	111
表 5-6 使用短报文播发 B2b 优化 URA 单颗卫星信息.....	111

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)可利用导航卫星播发的卫星星历和无线电信号,为用户提供全球定位、导航和授时(Positioning, Navigation And Timing, PNT)服务(宁津生., 2013; 杨元喜 et al., 2021)。21 世纪以来,全球迈入信息时代。GNSS 的出现,打破了以往位置和时间信息壁垒,彻底改变了人们获取时空信息的方式、精度、可靠性和效率,已经成为当代社会不可或缺的基础设施。经过三十余年的发展,GNSS 技术因其高精度、低成本、全天候以及高可靠性,已被广泛应用于大地测量、地震监测、大气反演、精密授时、地球参考框架建设等科学领域(Bevis M et al., 1992; Pérez et al., 2001; Blewitt G et al., 2009; Jin et al., 2022; Zhu et al., 2022; Altamimi Z et al., 2023)。

精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)作为 GNSS 的主要定位手段之一,可以仅通过一台接收机获取厘米级精度的用户位置信息(Malys et al., 1990; Zumberge et al., 1997; Kouba et al., 2001)。除此之外,精密单点定位还可以获取接收机钟差、对流层、电离层等信息,因此在授时、大气反演与建模领域具有重要研究价值(Li et al., 2015; 张宝成 et al., 2011a; 张宝成 et al., 2011b)。传统精密单点定位依赖的高精度轨道和钟差产品往往具有较大的时间延迟,无法满足实时定位需要。为此全球 GNSS 服务组织(International GNSS Service. IGS)成立实时 PPP(Real-Time PPP, RT-PPP)工作小组,自 2013 年 IGS 正式提出实时服务(Real-Time Service, RTS)以来,RT-PPP 技术开始更多受到更多学者关注(Chen et al., 2013; 张小红 et al., 2013)。为了进一步解决 RT-PPP 收敛时间较慢以及收敛精度不足的问题,基于精密单点定位的模糊度固定(PPP Ambiguity Resolution, PPP-AR)技术应运而生(Ge et al., 2008; Geng et al., 2010; Geng et al., 2012)。PPP-AR 通过系统端多站网解 PPP 估计精密产品的卫星相位硬件延迟(Uncalibrated Phase Delay, UPD)的小数部分,并将其播发给用户。用户端即可使用星间单差消除接收机端硬件延迟、使用 UPD 产品恢复模糊度整数特性,从而实现模糊度固定。PPP-AR 使得精密单点定位收敛时间进一步缩短,在 E 方向尤为显著(Geng et al., 2013)。

北斗卫星导航系统(Beidou Satellite Navigation System, BDS)作为我国的“国之重器”自 2000 年发射第一颗北斗卫星以来,其发展经历了“三步走”(杨元喜., 2010)。2003 年,北斗卫星验证系统建成。实验系统由 4 颗地球同步轨道卫星(Geostationary Orbit, GEO)、地面控制部分以及用户站三部分构成,可向中国区域用户提供有源定位服务。2012 年,北斗二号区域导航定位系统(Beidou-2

Regional Satellite Navigation System, BDS-2)组网完成。BDS-2 共由 14 颗导航卫星组成, 包括 5 颗 GEO, 5 颗倾斜地球同步轨道卫星(Inclined Geo-Synchronous Orbit, IGSO)以及 4 颗中距离轨道卫星(Medium Earth Orbit, MEO)构成。北斗二号建成正式为亚太地区提供无源导航定位服务, 同时将北斗一号的双向位置报告、短报文通讯功能保留, 作为区域短报文通讯功能成为了北斗系统的一大特色(宁津生., 2013)。2020 年 7 月 31 日, 中国正式宣布北斗三号全球导航定位系统(Beidou-3 Global Navigation Satellite System, BDS-3)建设完成, 并向用户公开七种公开服务, 表 1-1 列出了 BDS-3 系统服务详细规划。北斗三号发挥其星间链路优势, 解决了我国测站分布限制导致的全球全天候信号捕获能力, 增强了卫星星座的自主运行能力, 从而能够提供更高精度的 PNT 服务(Tang C et al., 2018; Pan J et al., 2018; 杨建华., 2023)。

表 1-1 BDS-3 服务类型设计
Table 1-1 BDS-3 service type design

服务类型		频段信息	播发方式
中国及周边区域	精密单点定位	PPP-B2b	3GEO
	星基增强	BDSBAS-B1C/	3GEO
		BDSBASB2a	
	地基增强	2G~5G	移动蜂窝网络/互联网
	区域短报文通信	上行: L波段 下行: S波段	3GEO
全球范围	全球短报文通信	上行: L波段	上行: 14MEO
		下行: GSMC-B2b	下行: 3IGSO+24MEO
	定位导航授时	B1I B3I	3GEO+3IGSO+24MEO
		B1C B2a B2b	3IGSO+24MEO
	国际搜救	上行: UHF 下行: SAR-B2b	上行: 6MEO 下行: 3IGSO+24MEO

随着 BDS-3 号正式建成, BDS-2 作为平稳过渡系统, 其导航定位性能依旧保留。BDS-2/BDS-3 联合定位也成为了新的研究热点。已有研究表明 BDS-2/BDS-3 之间存在系统偏差(Inter-System Bias, ISB)(Song et al., 2020; Shi et al., 2022)。但基于实时精密产品与北斗广播星历的 BDS-2/BDS-3 系统偏差特性有待进一步深入研究。系统偏差对 BDS-2/BDS-3 联合基本定位服务、实时精密

定位服务以及北斗星基增强定位服务性能影响仍有待进一步分析。除此之外,如何充分利用全球短报文带宽资源,摆脱对于付费商业卫星以及网络的依赖,在沙漠、远洋等特殊地区,用户依然可以获取实时多系统 PPP-AR 精密定位的方法有待进一步研究; BDS-3 B2b 精密单点定位(B2b Precise Point Positioning, B2b-PPP)中尚存在一些问题有待解决,如 GPS 钟差中的系统性跳变及其对定位的影响、用户距离精度信息的精度问题等。以上这些问题的研究对于进一步完善北斗在全球范围内的独立定位能力,提升北斗系统定位性能,丰富北斗系统精密定位手段具有重要意义。

1.2 国内外发展现状

1.2.1 GNSS 各系统发展现状

1.2.1.1 GPS

全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS)是全球最早的卫星导航定位系统,其研发计划开始于 1973 年 12 月,旨在为美军提供全球范围、全天候的实时 PNT 服务。GPS 的第一颗实验卫星 BLOCK I 于 1979 年发射,并开始了对 GPS 信号中各项误差修正理论的研究。1993 年, GPS 正式完成全球组网,美国空军部宣布 GPS 具备完全工作能力。

GPS 系统基于 WGS-84 地固系以及 GPST 时间系统,本文将在第二章对各个系统的时空基准进行详细介绍。整个 GPS 系统由空间卫星星座、地面控制站以及用户接收机三部分组成。

GPS 空间段

GPS 卫星星座完全由 MEO 卫星组成,轨道高度约为 20000 km, 卫星轨道周期为半个太阳日(约 11 小时 58 分钟)。GPS 在进行卫星星座设计时需保证 95% 的时间内有不少于 24 颗导航卫星,所有卫星分布于 6 个轨道面上,如图 1-1 所示。该星座设计可保证地球上任意地点都有至少 4 颗可见卫星。

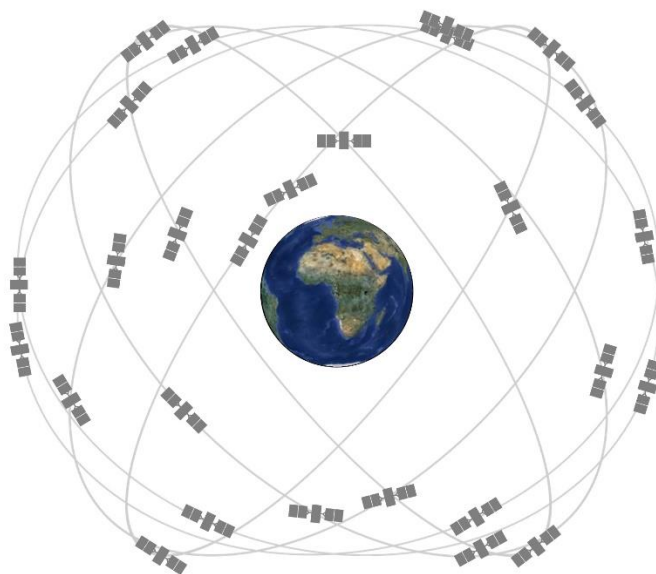


图 1-1 GPS 卫星星座示意图(GPS.GOV., 2024)

Figure 1-1 GPS satellite constellation

1999 年起，美国开始实施“GPS 现代化”计划，对 GPS 空间段进行卫星数量扩充，并对星座中的重要轨位进行调整。截止 2024 年 4 月 11 日，GPS 在轨服务卫星达到 31 颗（GPS Navigation Center, 2024），其中 BLOCK IIR 卫星 7 颗、IIR-M 卫星 7 颗、BLOCK IIF 卫星 11 颗、GPS III 卫星 6 颗。图 1-2 展示了 GPS 不同型号的卫星。

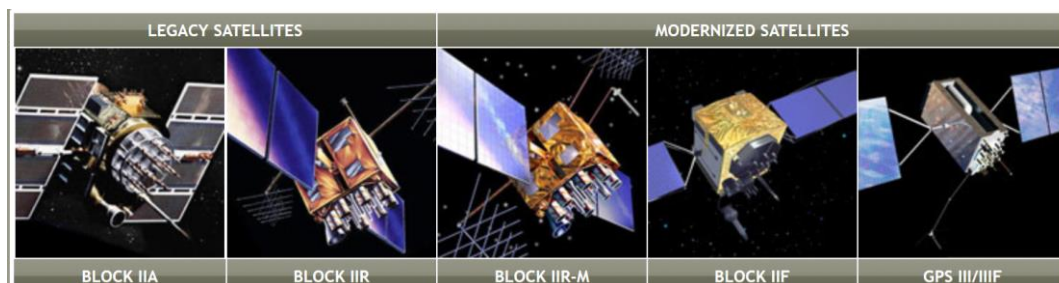


图 1-2 GPS 卫星型号示意图(GPS.GOV., 2024)

Figure 1-2 Different GPS satellite type

BLOCK IIA 卫星提供民用 L1 频点的 C/A 码以及军用 L1 和 L2 频点上的 P(Y) 码导航信息，卫星发射区间为 1990 年至 1997 年，最后一颗卫星于 2019 年退役，标志着 GPS 星座中所有 BLOCK IIA 卫星被替换淘汰。BLOCK IIR 卫星于 1997 年至 2004 年逐步发射补充、替代 BLOCK IIA 卫星，该卫星同样提供民用 L1 频点的 C/A 码以及军用 L1 和 L2 频点上的 P(Y) 码导航信息。BLOCK IIR-M 相比于 BLOCK IIR 进一步扩充了民用 L2C 频点；增加了军用 M 码，进一步增加了信号抗干扰能力；同时针对军事用途增加了卫星的信号播发功率调节，于 2005 年至 2009 年逐步发射并入 GPS 星座。BLOCK IIF 卫星在 BLOCK IIR-M 卫

星频点的基础上，扩充了第三代民用信号 L5 频点，提升了星上原子钟的性能，并使得服役时长扩展到 12 年，该类型卫星自 2010 年至 2016 年被逐步发射入轨。然而随着 GPS 信号的扩展，研究表明，用户使用三频定位时卫星钟存在频率间偏差（Inter Frequency Clock Bias, IFB），该偏差首次发现于 BLOCK IIF 卫星，其变化与卫星、太阳和地球之间的相对位置相关且在地影期变化显著（Li P et al., 2017; Zhang F et al., 2021）；定位时考虑该偏差后能显著提升定位精度（Li P et al., 2018; Li P et al., 2019）。GPS III 为最新一代 GPS 卫星，支持 BLOCK IIF 卫星所有频点，并进一步扩充了第四代民用频点 L1（L1C），进一步提升了导航系统精度、可靠性和完好性。GPS IIIF 上还将配备激光反射器以及搜索和救援有效载荷。

GPS 地面控制段

地面段负责对 GPS 卫星实时观测，确定轨道位置、钟差等并生成广播星历并注入卫星。GPS 地面段目前包括 1 个主控站、1 个备用主控站、11 个指挥控制天线以及 16 个监测站构成。图 1-3 展示了各个站点的分布。

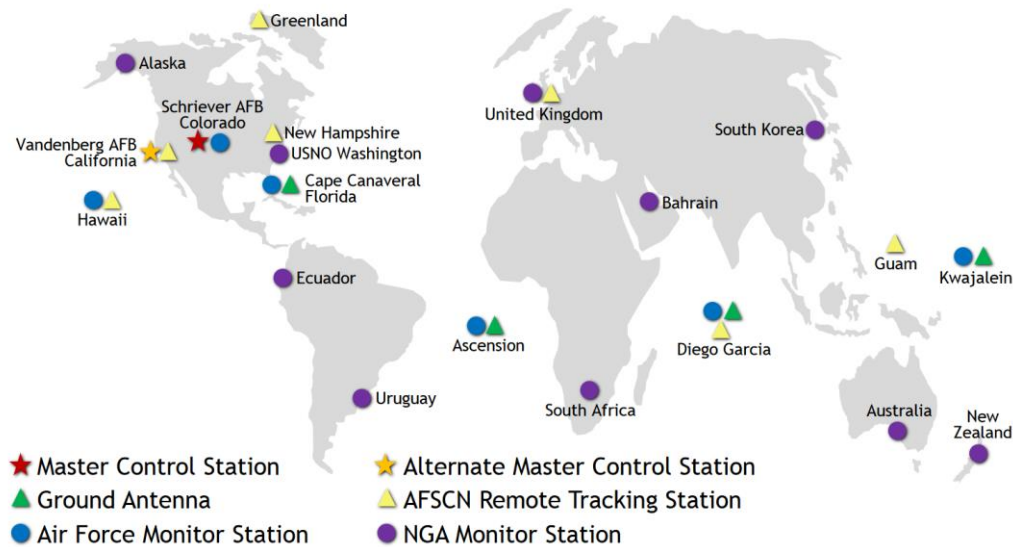


图 1-3 GPS 地面控制部分站点类型及其分布示意图(GPS.GOV., 2024)

Figure 1-3 GPS control segmentation station type and their distributions

其中，主控站主要负责对卫星进行控制和发送指令、利用全球监测站计算卫星的精确位置、生成广播星历、监测卫星播发性能和系统完好性、对卫星进行机动维护并解决异常情况；监测站负责跟踪过境卫星、记录其各类观测值、将观测值发送至主控站等；指挥控制天线负责将指令、处理器程序以及导航电文上注到卫星、收集遥测数据、通过 s 波段通信实现 s 波段测距，可进行异常报警和初轨计算。

为适应 GPS 现代化需求，地面控制系统计划进行改进，具体内容包括：采用基于卡尔曼滤波的新型轨道钟差实时估计技术；具备更多民用、军用频点信号的信息处理能力；允许更多的 GPS 卫星参与运行；支持 GPS 第三代卫星处理；

支持高速星间链路，点波束增强等信息处理；具备卫星发射、异常处置与退役卫星管理能力等。然而受限于对系统改进复杂程度和工作量认识不足，虽其改进在 2018 年就已提出（赵欣., 2017），但至今尚未宣告完全建成。

1.2.1.2 GLONASS

全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GLONASS）最早由苏联于 1976 年启动开发，后由俄罗斯继续建设与维护工作。其时空坐标基准分别为 GLONASS 和 PZ-90.11。与 GPS 系统码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）技术不同，格洛纳斯系统使用频分多址（Frequency Division Multiple Access, FDMA），其区别在于码分多址对于所有卫星信号具有相同频率，而频分多址技术下每颗卫星对应独立观测值频率。频分多址技术相比码分多址技术在带来更强抗干扰性能的同时，也增加了 GNSS 接收机的硬件制作成本，同时由于接收机端硬件延迟受频率影响不同卫星间存在差异，因此也给 GLONASS 的 RTK、PPP-AR 模糊度固定增加了难度。下式给出了计算不同 GLONASS 卫星频率的方法：

$$\begin{aligned} f_1 &= 1602\text{MHz} + n \cdot 0.5625\text{MHz} \\ f_2 &= 1246\text{MHz} + n \cdot 0.4375\text{MHz}, n = -7, \dots, 5, 6 \end{aligned} \quad (1-1)$$

另外，与其他系统不同的是，GLONASS 广播星历并不给出卫星的开普勒轨道参数，而是直接给出卫星在参考时刻的坐标、速度和加速度，因此用户在定位时需根据龙格库塔积分计算卫星位置。

GLONASS 空间段

截止 2024 年 4 月 11 日，GLONASS 再轨服务卫星共 26 颗，其中正常运行 24 颗，在轨试运行卫星 2 颗，所有卫星分布于三个轨道面，如图 1-4 所示。其卫星星座由 24 个处于中等高度近圆形轨道的卫星组成，高度为 19100 km，倾角为 64.8°，周期为 11 小时 15 分 44 秒。

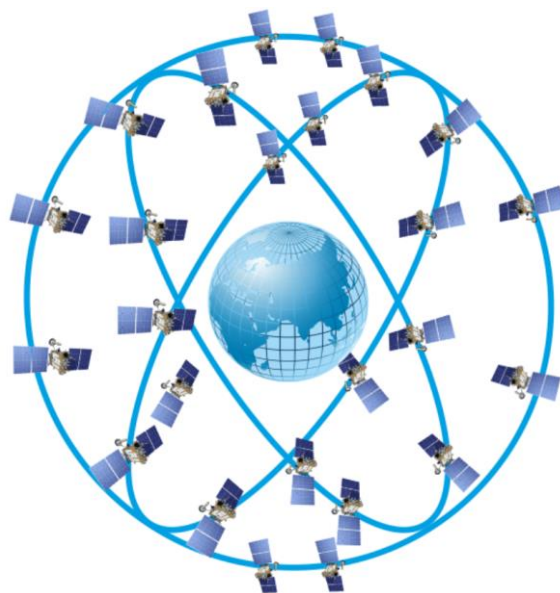


图 1-4 GLONASS 卫星星座示意图(GLONASS.GOV., 2024)

Figure 1-4 GLONASS satellite constellation

苏联最早发射的初代 GLONASS 卫星由于寿命较短且疏于管理, 使得 GLONASS 在建成后逐步失去全球导航定位功能(刘春保., 2019)。2003 年以来, 俄罗斯重新开始 GLONASS 星座的建设工作, 发射了第一颗 GLONASS-M 卫星, 至 2011 年, 重新完成了 24 颗卫星的组网, 并退役了所有初代卫星(李子富., 2021)。于此同时, 俄罗斯对其卫星进行进一步升级, 使用 GLONASS-K 和 GLONASS-K2 卫星逐步替代 GLONASS-M 卫星。新卫星支持 CDMA 体制、支持更多频点且支持全球搜寻和营救功能。

GLONASS 地面控制段

GLONASS 地面控制系统最早由 1 个主控站、5 个遥测控制站以及 9 个监测站组成。随着苏联解体后, 其控制站数量有所减少。截止 2021 年, GLONASS 地面端包含了 2 个主控站、9 个参考站、6 个上行链路以及 3 个激光测距站。

1.2.1.3 Galileo

欧洲全球卫星导航系统 (European Global Navigation Satellite System, Galileo) 最早在 20 世纪 90 年代由欧空局和欧盟委员会联合推动创建。然而受资金问题影响, Galileo 系统直到 2003 年才恢复建设 (Hansen et al., 2012)。Galileo 时间系统与 GPS 保持一致, 坐标框架采用 GTRF。Galileo 于 2005 年至 2006 年先后发射了最初两颗导航卫星, 并于 2016 年 12 月 15 日正式宣布提供初步服务 (Steigenberger et al., 2016)。2019 年, Galileo 具备完整服务能力。

Galileo 空间段

与 GPS 相似, Galileo 所有导航卫星皆为 MEO, 分布于 3 个轨道面, 平均轨

道高度 23222 km。截止 2024 年 4 月 11 日，在轨卫星共计 28 颗，其中 23 颗标记可用，5 颗标记不可用。Galileo 星座主要由 FOC 卫星构成。FOC 卫星采用模块化设计，在 E1、E5、E6 3 个频点播发导航信号。并搭载了星载高性能被动性氢钟和铷钟。

Galileo 地面控制段

Galileo 的控制中心分别位于德国的奥伯普法芬霍芬和意大利的富齐诺。除此之外，其在全球范围内分布有监测站和卫星注入站，其站点分布如图 1-5 所示。

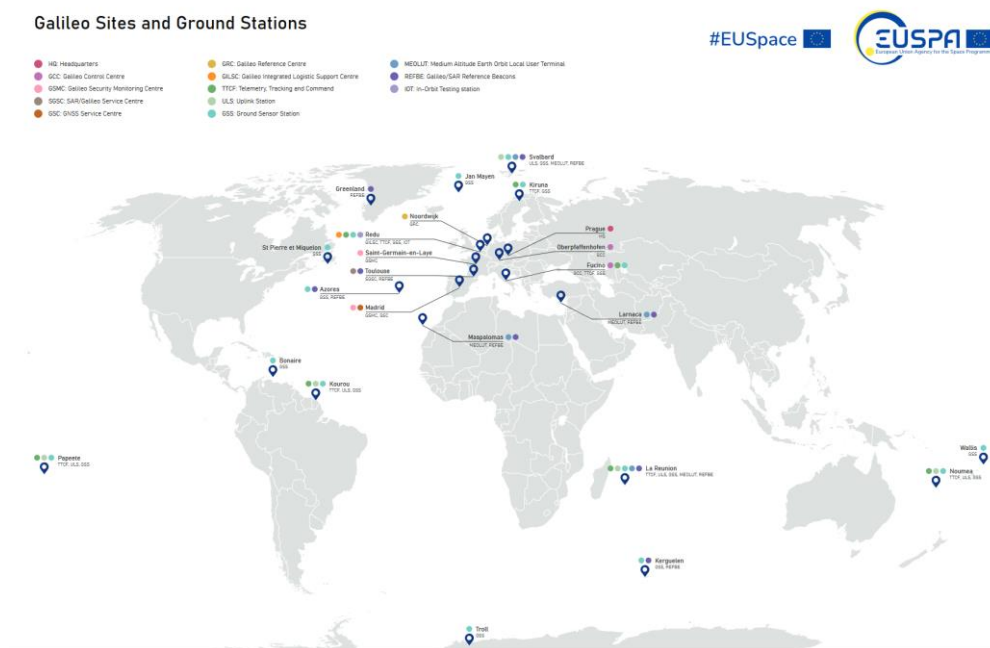


图 1-5 Galileo 地面段测站类型及其分布示意图(EUSPA., 2024)

Figure 1-5 Galileo control segmentation station type and their distributions

值得一提的是，Galileo 自 2023 年 1 月 24 日以来开始免费提供基于 E6-B 频点的高精度定位服务（High Accuracy Service，HAS），支持 Galileo E1/E5a/E5b/E6/E5 频点以及 GPS L1 和 L2C 频点。如图 1-6 所示，HAS 目前第一阶段可实现全球范围内分米级 PPP 定位精度。其第二阶段完整服务预计将进一步播发大气改正信息以实现欧洲区域 PPP-RTK(EUSPA., 2024)。








	Service Level 1 (SL1)	Service Level 2 (SL2)
 Coverage	Global	European Coverage Area (ECA)
 Corrections	Orbit, clock, biases (code and phase)	Orbit, clock, biases (code and phase) + atmospheric corrections
 Horizontal Accuracy (95%)	<20cm	<20cm
 Vertical Accuracy (95%)	<40cm	<40cm
 Converge Time	<300s	<100s
 Availability	99%	99%
 User HelpDesk	24/7	24/7

图 1-6 Galileo HAS 服务两阶段服务性能对比图(EUSPA., 2024)

Figure 1-6 Galileo HAS service performance comparison of two states(EUSPA., 2024)

1.2.1.4 BDS

本章第一节以对 BDS 发展现状进行了简要介绍,本节主要对 BDS-2 和 BDS-3 系统进行进一步补充说明。考虑到 BDS 系统监测站布站限制等因素,我国 BDS-2 和 BDS-3 皆采用混合星座模式。最初设计计划 BDS-2 卫星由 5GEO+5IGSO+4MEO 共 14 颗卫星构成; BDS-3 采用 3 GEO+3 IGSO+24 MEO 共 30 颗卫星构成。截止 2024 年 4 月 11 日, BDS-2 共有 15 颗卫星提供在轨服务,包括 5 GEO+7 IGSO+3 MEO; BDS-3 共有 29 颗卫星提供在轨服务,包括 2GEO+3IGSO+24 MEO, 另外有 2 颗 GEO、2 颗 IGSO 以及 4 颗 MEO 卫星正在进行在轨测试, 预计后续将补充进行在轨服务。BDS-2 与 BDS-3 目前联合共有 44 颗卫星提供在轨服务, 卫星数目在所有卫星导航系统中位列第一。

BDS-2 卫星提供 B1I、B2I 以及 B3I 三个频点的公开服务, 而北斗三号兼容其中的 B1I、B3I 信号, 同时还公开 B1c、B2a 以及 B2b 三个新频点。与 BDS-2 相比, BDS-3 卫星支持星间链路通讯。通过星间链路, BDS-3 卫星可实现全弧段的星间钟差和距离测量。另外 BDS-3 卫星为了提升原子钟的能力, 还搭载了我国自主研究生产的高性能被动氢原子钟和甚高精度星载铷原子钟。通过高性能星载原子钟, BDS-3 卫星的原子钟信息预报能力得到大幅度增强 (Wu Z et al., 2018; Ma Y et al., 2022)。

1.2.1.5 QZSS

准天顶卫星系统（Quazi-Zenith Satellite System）为日本政府建设的区域卫星导航系统，由日本宇航局（Japan Aerospace Exploration Agency,JAXA）负责建设实施。自 2018 年 11 月，JAXA 完成 4 颗 GEO 卫星的布设，用于增强 GPS 在亚太地区的定位性能。如图 1-7 所示，截止 2024 年 4 月 11 日，QZSS 卫星共有 4 颗卫星提供在轨服务，而 J01(PRN)已于 2023 年停止服务。另外 QZSS 还计划于今年发射一颗卫星，并在 2027 年实现 7 颗在轨卫星同步服务(Cabinet Office., 2024)。

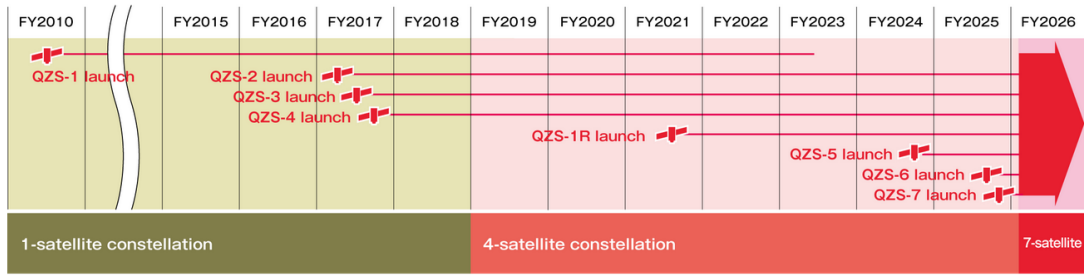


图 1-7 QZSS 卫星发射规划图(Cabinet Office., 2024)

Figure 1-7 QZSS satellites' launch schedule

QZSS 还支持区域增强定位服务，包括 SLAS(Sub-Meter Level Augmentation Service)和 CLAS(Centi-Meter Level Augmentation Service)。其中 SLAS 服务通过播发轨道钟差改正数为区域用户提供分米级定位服务，CLAS 利用日本区域内站间距约为 60km~70km 的密集监测站（如图 1-8 所示）解算并播发大气信息，从而可实现日本区域 1 分钟内的厘米级定位服务(Daiki M et al., 2019; Zhang et al., 2022)。



图 1-8 QZSS CLAS 测站分布图

Figure 1-8 QZSS CLAS station distribution

1.2.1.6 IRNSS

印度区域导航卫星系统 (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS) 由印度政府建设的独立区域卫星导航系统, 计划由 4 颗 GEO 卫星以及 3 颗 IGSO 卫星构成, 可为纬度 30° N 至 50° N, 经度 30° E 至 130° E 范围内的用户提供精度优于 20m 的基本导航定位服务(India GOV, 2024)。截止 2024 年 4 月 11 日, IRNSS 共有 5 颗卫星提供在轨服务。

1.2.2 GNSS 实时精密单点定位发展现状

RT-PPP 实现的关键在于实时轨道钟差产品的生成与播发。由于卫星轨道自身具有严密的动力学约束, 因此短期预报内具有较高精度。因此实时轨道产品一般根据超快速精密星历(IGS Ultra-Rapid Products, IGU)的预报部分生成。而对于如何实现实时精密钟差估计, 学者们开展了深入研究(Hauschild et al., 2009; 张小红 et al., 2010;)。IGS 工作组于 2013 年正式推出 RT-PPP 服务。该服务依赖于广播星历以及实时轨道、钟差改正等状态域参数(State Space Representation, SSR)(IGS, 2020), 按照国际海运事业无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM)制定的格式标准(RTCM, 2016), 以 NTRIP(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)协议进行网络播发(Weber G et al., 2007)。截止目前, 播发实时轨道钟差产品的分析中心有: IGS、CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)、BKG(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)、GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum)、WHU(Wuhan University)、CAS(The Institute of Geodesy and Geophysics (IGG) of the Chinese Academy of sciences)、DLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)、ESA(European Space Agency)、GMV(GMV Aerospace and Defense)以及 NRC(Natural Resources Canada)。Hadas 等对 2013 年的实时 IGS GPS+GLONASS 轨道钟差进行了产品评估, 实验证明 GPS 和 GLONASS 轨道精度分别为 4.8 cm 和 13.2 cm, 钟差精度分别达到 0.28 ns 和 0.82 ns(Hadas T et al., 2015); 基于不同分析中心的 RT-PPP 服务性能也被广泛评估, 服务性能可达到分米至厘米级精度(Shi et al., 2017; Elsobeiey et al., 2016; Wang et al., 2022)。为了进一步提升用户端 RT-PPP 可用性、稳定性, 相关学者进一步对实时精密定位中的周跳和钟跳探测与修复、产品中断处理、自主完好性监测等问题进行了研究(Guo et al., 2014; Laurichesse D et al., 2015; Odijk D et al., 2016)。针对 RT-PPP 收敛时间长的问题, 相关学者对实时 PPP-AR 方法展开了相关研究(Liu et al., 2020)。Li 等使用 LAMBDA 方法搜索 PPP-AR 中无电离层组合浮点模糊度(Li et al., 2013)。Chen 等使用多家分析中心的轨道钟差产品对 GPS/Galileo/BDS-2/三系统 UPD 进行了估计并评估了 PPP-AR 定位性能(Chen C et al., 2021)。Li 等对 CNES 的实时 PPP-AR 服务进行了评估(Li et al., 2022)。

截止目前, IGS 分析中心只有 CNES 一家播发实时 UPD 产品, 另外 WHU

通过整数钟方式提供 PPP-AR 服务,我国北斗系统官方服务中也尚未提供 PPP-AR 服务。因此,如何利用北斗系统内现有资源,实现 UPD 的解算与播发,能够利用北斗实现多系统实时 PPP-AR 服务,有待进一步的研究。

1.2.3 BDS-2/BDS-3 联合定位发展现状

自北斗三号于 2018 年 12 月 27 日开始提供全球 PNT 服务以来,BDS-2 与 BDS-3 的联合服务性能成为学者们关注焦点。Yang 等对 BDS-2 和 5 颗 BDS-3 实验星构成的联合星座进行分析,证明星座联合显著改善全球范围内北斗系统的可见卫星数和几何构型,在美洲地区最为明显(Yang et al., 2018)。对于 BDS-2/BDS-3 联合定轨,Li 联合 BDS-2 与 4 颗 BDS-3 卫星观测数据进行 BDS-3 卫星精密定轨研究(Li et al., 2019)。Zhao 等利用星间链路观测数据对 BDS-3 卫星定轨,进一步提升了 BDS-3 卫星轨道精度(Zhao et al., 2021)。Xie 等的研究表明:联合 BDS-3 星间链路观测值以及 16 个 IGMAS 观测站的 BDS-2/BDS-3 观测数据,可以将卫星轨道重叠弧段三维 RMS 缩小至 9.2 cm(Xie et al., 2019)。对于 BDS-2/BDS-3 联合定位,Zhang 等联合 BDS-2 与 BDS-3 精密轨道误差进行浮点 PPP 解算,证明 BDS-2/BDS-3 联合能够有效缩短 PPP 收敛时间(Zhang et al., 2019)。Qu 等的研究表明,BDS-2/BDS-3 联合进行 PPP-AR 解算,首历元固定时间(Time to First Fix, TTFF)显著改善,静态与动态的 TTFF 相比于 BDS-2 分别从 111 min, 114 min 缩短至了 57 min, 60 min。

针对 BDS-2 与 BDS-3 中的系统偏差问题,也有学者进行了相关研究。Zhang 等发现 BDS-2 与 BDS-3 的时间群延迟(Timing Group Delay, TGD)改正存在明显的系统偏差(Zhang et al., 2020)。在 BDS-2/BDS-3 联合定位中增加 ISB 参数估计能够提升 PPP 定位精度(Song et al. 2020; Zhao et al. 2020)。赵文基于武大和 GFZ 实时轨道钟差产品,对 ISB 的构成以及时间特性进行了分析(赵文., 2020)。然而,使用北斗广播星历以及实时精密星历时 BDS-2/BDS-3 联合定位中的 ISB 参数特性尚未有学者进行分析,系统偏差对 BDS-2/BDS-3 精密单点定位以及联合星基增强定位服务的影响有待被进一步验证;其最佳估计方式有待进一步讨论。

1.2.4 基于北斗短报文链路的实时精密定位发展现状

北斗短报文通讯(Short Message Communication, SMC)作为 BDS 卫星导航系统的特有功能,具有包括位置报告、应急搜救和报文通讯功能,相比于其他导航系统,北斗短报文系统在抗震救灾、船舶监控、气象探测等应用方面具有不可比拟的优势(Li et al. 2021; Chen et al., 2022a)。北斗短报文共经历过两次迭代更新。图 1-9 展示了北斗短报文系统的发展历程。在 2000 年,北斗一号开始提供区域短报文通讯服务(Regional Short Message Communication, RSMC),通讯范围覆盖中国大部分地区,单次最大通讯量达到 120 汉字。2014 年,随着北斗二号正式

提供服务,北斗区域短报文业务服务地区扩展至中国及周边地区,最大单次通讯量增加至 14000 bits,但对于一般用户,单次通讯量不超过 628 bits (CSNO, 2015)。2020 年,北斗三号全球定位系统宣布建成,基于 BDS-3 星间链路系统的北斗全球短报文通讯服务(Global Short Message Communication, GSMC)也正式上线。GSMC 服务地区覆盖全球,单次最大通信量达到 560 bits(CSNO, 2019)。

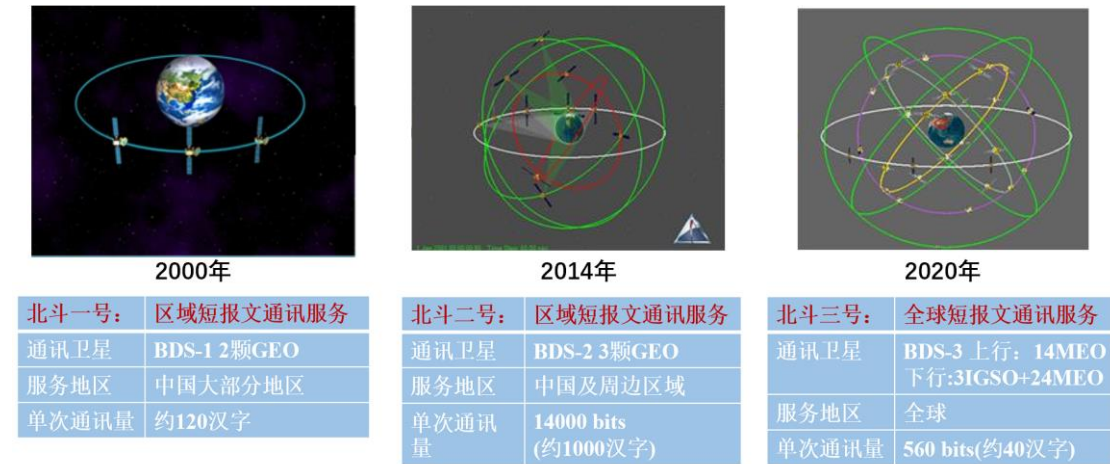


图 1-9 北斗短报文发展历程示意图

Figure 1-9 Evolutionary of BDS short message communication

北斗短报文通讯的丢包率和传输时延是 SMC 信息传输的一项重要指标。北斗短报文通讯最高频率为 1min (Yang et al., 2019), 即短报文用户端发起的通讯请求时间间隔最小为 60 s。成方林等对最早对北斗一号短报文通讯效率进行了评估, 在 208 个数据包中丢包率为 6.73%(成方林 et al., 2008)。谷军霞等对北斗短报文进行了长时间报文收发数据测试, 测试时长为 525 小时, 共发送了 9.45 万包数据, 丢包率达到了 75.1%以上, 且分包数越大丢包率越高(谷军霞 et al., 2015)。可见短报文通讯成功率在不同时间存在差异, 可能与用户通讯等级、卫星通讯负荷量等相关。在区域集中用户并发的情况下, 容易出现短报文信息入站拥挤、丢包率过高、时延过大等问题。

目前实现 RT-PPP 的方式除了使用 IGS 免费实时播发的改正数之外, 还可以使用商业公司使用通讯卫星播发的星基改正数进行定位。其中, 第一种方式需要通过网络获取改正, 在海洋、沙漠等特殊区域一般难以获得服务; 而第二种方式虽然对区域限制小, 但对于个人用户来说享受精密定位服务的成本较高。北斗短报文通讯系统为用户在特殊地区获得免费精密定位服务提供了新的可能。然而, 受到 SMC 通讯带宽限制的影响, SSR 播发的精密改正数无法直接通过短报文系统直接播发给用户。表 1-2 列出了 RTCM 协议下 GPS 卫星改正数播发信息, 单颗卫星带宽即需占用 205 bits。根据 RTCM SC104 播发标准, 精密定位改正数的单历元最小播发量为 6628 bits (Nie et al., 2020), 远超 BDS-3 中 GSMC 的单历元最大通信量 560 bits。除此之外, IGS 分析中心的改正数播发频率最小为 5 秒,

远超北斗 SMC 最小播发间隔。

表 1-2 RTCM GPS 改正数播发参数信息
Table 1-2 RTCM correction broadcast parameters information

信息名称	大小(bits)
卫星PRN	6
IODE	8
轨道径向改正数	22
轨道切向改正数	20
轨道法向改正数	20
轨道径向改正数变化率	21
轨道切向改正数变化率	19
轨道法向改正数变化率	19
钟差改正数	22
钟差改正数	21
钟差改正数	27
总计	205

为了克服短报文在播发带宽和播发频度的限制、利用北斗短报文系统实现精密定位服务，许多学者在该方向进行了研究。Li 等使用两台接收机，利用 BDS-2 RSMC 实现了海岸附近的 RTK 定位(Li et al., 2019)。Nie 等提出了一种单接收机利用 BDS-2 RSMC 设备实现离岸 RT-PPP，以进一步减少设备数量(Nie et al., 2020)。BDS-3 GSMC 正式提供服务后，也通过不同的编码方式，实现了基于 GSMC 的 RT-PPP(Geng et al., 2022; Gu et al., 2022)。

然而以上基于北斗短报文的定位研究皆基于 PPP 浮点解。使用 BDS-3 GSMC 实现多系统的实时 PPP-AR 的方法尚有待被研究。除此之外，以上利用 SMC 短报文的研究并未考虑短报文时延、丢包对用户精密定位性能的影响。如何在北斗短报文通讯出现中断时依旧保证用户定位稳定性和高精度，是亟需被研究和解决的问题。

1.2.5 北斗星基增强与北斗 B2b 精密定位发展现状

随着星基增强定位服务的不断发展，许多导航卫星系统已将 RT-PPP 服务整合到其信号中，提供星基精密单点定位服务。例如，日本准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)于 2020 年上线 MODOCA-PPP(Multi-GNSS

Advanced Orbit and Clock Augmentation Precise Point Positioning)星基增强精密定位测试服务,旨在2024年提供完整服务(Cabinet Office., 2022);欧洲的伽利略高精度服务(High Accuracy Service, HAS)于2023年1月24日-01-24开始试运行,其全球水平和垂直定位的95%精度目标分别为0.2米和0.4米(EGSC., 2023; Fernandez et al., 2022)。BDS-2自2017年以来,也开始为中国及周边地区用户提供分米级的星基增强位置服务(Zhang et al., 2019; Wang et al., 2020; Chen et al., 2022)。然而,BDS-2广域差分星基增强服务仅对授权用户开放(Chen et al., 2020)。随着BDS-3正式提供服务,基于BDS的公开RT-PPP服务于2021年7月正式宣布上线。SSR改正数调制于BDS-3 B2b信号中,由BDS-3地球同步轨道卫星播发,为中国及周边地区用户提供分米至厘米级定位服务(CSNO, 2020)。

自BDS-3 B2b提供精密定位服务(B2b-PPP)以来,已经有许多学者对其性能进行了研究。Xu等评估了B2b的轨道和钟差精度,证明B2b-PPP中BDS-3 MEO卫星的轨道精度在径向、切向和法向分别达到了6.8 cm、33.4 cm和36.6 cm,而其钟差精度达到0.12 ns(Xu et al., 2021)。Tao等将BDS-3 PPP-B2b实时定位服务与CNES提供的实时定位服务进行了对比,表明B2b-PPP服务性能与CNES RTS基本一致(Tao et al., 2021)。Sun等对B2b-PPP服务的长期稳定性进行了验证(Sun et al., 2023)。Geng等评估了B2b-PPP对中国海洋区域动态实时定位性能进行了分析(Geng et al., 2022)。Wu等进一步对B2b-PPP在动态船舶、无人机等更多载体的动态定位性能进一步进行了分析(Wu et al., 2023)。Xu等通过在B2b-PPP中增加了SISRE估计参数吸收轨道误差,从而提升B2b-PPP定位精度(Xu et al., 2023)。宋伟伟等通过对B2b施加外部高精度电离层约束来进一步提升其定位性能(宋伟伟 et al., 2023)。众多学者的研究表明目前B2b-PPP基本能在20分钟内实现三维误差小于0.3 m的实时动态定位。

He等第一次在研究中指出B2b-PPP的GPS钟差中存在系统性跳变,因此在使用BDS-3+GPS定位时ISB参数不能作为常数估计(He et al., 2023)。然而该跳变发生原因,跳变特性、其对定位的影响以及定位端处理方式有待进一步研究。另外,B2b-PPP播发的改正数除了轨道、钟差以及伪距码偏差(Differential Code Bias, DCB)参数之外,用户距离精度指数(User Range Accuracy Index, URAI)也一同被播发给用户。URAI由用户精度等级和用户精度指数两部分构成,用户可根据这两个参数恢复卫星的用户距离精度(User Range Accuracy, URA)(CSNO, 2020)。URA作为定位服务系统的完好性标识,在提供卫星可用性信息的同时,其数值本身也反映了卫星的轨道钟差精度(Wang et al., 2019)。然而对于B2b中URA信息的精度及其用于定位随机模型的效果,有待进一步的研究。

1.3 本文研究内容与章节安排

综上所述，目前国内外针对 BDS-2/BDS-3 联合精密定位、基于 BDS-3 全球短报文链路的精密定位以及 BDS-3 B2b-PPP 相关研究还存在诸多需要探讨之处。因此，本论文开展基于 BDS-3 全球卫星导航系统的精密定位算法研究，研究内容具体包括：

(1) BDS-2/BDS-3 联合定位系统偏差来源、特性分析以及其对伪距定位、实时精密定位以及广域差分星基增强定位服务的影响研究；

(2) 在考虑 BDS-2/BDS-3 联合系统偏差的基础上，对 BDS-2/BDS-3 基本导航服务、实时精密定位服务以及广域差分星基增强定位服务在全球不同区域的服务性能进行评估分析；

(3) 基于 BDS-3 全球短报文系统的多系统实时精密定位模糊度固定算法研究；

(4) BDS-3 B2b-PPP 中 GPS 钟差改正跳变分析、探测和修复方法研究；基于钟差跳变探测与修复方法的 B2b-PPP 定位模型研究与定位性能验证；

(5) 对 BDS-3 B2b-PPP 中 URA 进行精度评估；研究相位 URA 优化估计策略；对基于相位 URA 的定位随机模型性能进行研究，并提出使用北斗短报文播发优化 URA 的编码策略；

下图 1-10 展示了本文主要研究内容整体架构

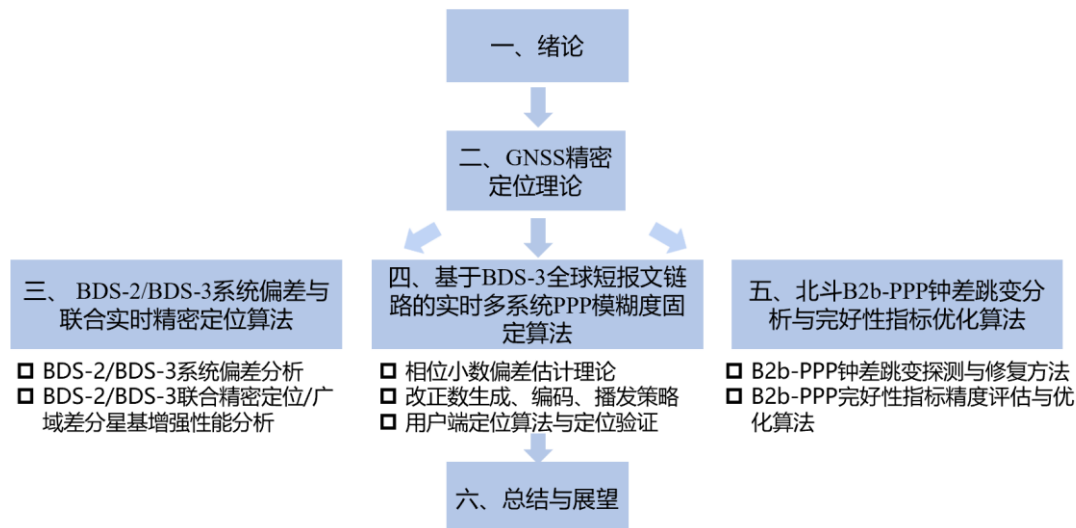


图 1-10 本文主要研究内容结构示意图

Figure 1-10 Schematic diagram of the main research content and thesis structure

基于以上研究内容，对各章节安排如下：

第一章：阐述本文研究背景及意义，结合当前国内外研究现状以及发展趋势，指出当前基于 BDS-3 全球精密定位系统的限制，进一步提出本文研究内容并梳理总结了文章结构。

第二章：介绍 GNSS 精密单点定位基础理论与数据处理方法，包括：GNSS

系统中的时空基准、GNSS 观测模型及其常用线性组合、GNSS 数据处理中误差源与处理方法以及平差处理中的最小二乘、卡尔曼滤波理论及其参数配置方法。

第三章：针对 BDS-2 与 BDS-3 联合实时定位服务中存在的系统偏差，基于北斗实时广播星历与 IGS 多家分析中心播发的实时精密星历，分析了实时定位中该偏差来源及偏差特性。通过实验分析了系统偏差对 BDS-2/BDS-3 联合定位精度的影响并讨论了其最优估计方法。在此基础上，进一步通过实验分析验证了 BDS-2/BDS-3 伪距定位、实时精密定位以及北斗广域差分增强定位在全球范围内的定位性能。

第四章：基于相位小数偏差估计以及 PPP-AR 定位基本理论，结合 BDS-3 全球短报文通讯方式、通讯带宽以及播发频率，提出了基于 BDS-3 全球短报文链路的多系统实时精密单点定位模糊度固定算法。对系统端多系统精密改正数生成、编码与播发方法进行设计，并结合用户端定位算法，对该算法服务性能进行验证；结合短报文通讯设备、分析北斗短报文系统实际通讯效率，在此基础上进一步验证了算法在实测动态定位中的可靠性。

第五章：针对 BDS-3 中 B2b 区域精密定位服务，对其产品中 GPS 钟差产品跳变对于 B2b-PPP BDS-3+GPS 定位性能带来的影响进行分析。结合该跳变特性，提出了一种钟差跳变探测与修复方法；基于该方法，通过实验明确论证了三种有效的 B2b-PPP 双系统定位模型。在此基础上，介绍了使用用户距离精度信息构建随机模型的方法，并评估了 B2b-PPP 中播发的 URA 用于随机模型的性能，证明了其自身播发的 URA 精度较差。本章进一步提出了一种 B2b-PPP URA 优化估计方法，将优化后的 URA 信息用于 B2b-PPP 中随机模型；通过实验证明了其可靠性，为我国 B2b 下一步优化提出了新的思路。除此之外，本章提出了结合北斗短报文系统的优化 URA 播发方法，参考短报文实际通讯效率，验证了该播发方式的有效性。

第六章：对全文创新点以及研究内容的结论进行总结，并对下一步的研究工作进行了展望。

1.4 本章小结

本章简要介绍了本文研究背景及意义，结合国内外发展现状，指出了基于北斗卫星导航系统在实时精密位置服务上若干亟待解决的问题。基于以上问题确定了本文主要研究内容。最后对本文文章结构进行了梳理，对本文各章主要内容进行简要概括。

第 2 章 GNSS 精密单点定位基础理论

2.1 时空基准系统

时空基准是建立导航系统并提供位置服务的前提。时空基准由时间系统和空间坐标系统联合维持。本节对常用时间系统和空间坐标系统定义及其转换关系进行描述。

2.1.1 时间系统

时间在三维空间难以用某一客观物质表述,常被我们用于描述事物变化的过程量。自古以来,人们便将自然界稳定循环发生的现象进行规律性总结,并据此确定了最早的时间和历法。如中国古代根据太阳的东升西落、月亮的阴晴圆缺定义了当时的十二时辰、农历历法等。随着社会的发展,人们对于时间的精准度要求越来越高,这就需要一个均匀、可稳定复现的周期性现象作为时间的衡量基准。

在二十世纪 60 年代之前,基于地球自转的世界时 UT0,亦被称为格林威治时间,被认为是一种均匀的时间而忽略了地球极移的影响。通过各个天文台对恒星位置的观测,证实了地球自转的不均匀性 (Urban et al., 2013)。因此自 1956 年起,在 UT0 的基础上增加极移改正,得到的时间 UT1 是目前世界上最常用的世界时。UT0 到 UT1 的转换关系可以表示为(赵铭., 1992):

$$UT1 = UT0 - \Delta\lambda = UT0 - (x\sin\lambda_0 + y\cos\lambda_0)\tan\varphi_0 \quad (2-1)$$

其中, x 、 y 分别为瞬时地极坐标, $\Delta\lambda$ 为极移改正; λ_0 、 φ_0 分别为观测点的地理纬度与地理经度。

如今,随着当代社会的迅速发展,物体的运动速度越来越快,与之相匹配的,人们对时间的精度要求也更加严格,基于地球自转的时间基准已经不能满足要求。人们发现,铯 133 原子基态的两个超精细能级间在零磁场下跃迁辐射周期非常稳定,并基于此定义了最早的原子时(TA):以 1958 年 1 月 1 日世界时 0 点为起点,将铯 133 跃迁辐射 9192631770 周所持续的时间定义为了 1 秒。

世界原子时(TAI)由分布于全世界的数百台原子钟进行维持,在 GPS 建成后,各台原子钟之间通过 GPS 和双向时间比对进行比较。而随着地球自转的放缓,世界原子时与世界时的差距逐渐增大。为了协调二者的关系,避免世界时与师世界原子时的差距进一步扩大,相关机构进一步定义了协调时间时(UTC)。当 UTC 与 UT1 差异超过 ± 0.9 秒时,便增加一秒,称为跳秒(Leap Seconds)。跳秒由国际地球自转服务组织(IERS)维持。

GPS 时(GPST)是 GPS 卫星导航系统所用的时间系统,其定义为:以 1980 年 1 月 6 日 0 时 0 分 0 秒 UTC 时间为起点,秒长严格等于原子时规定秒长 (GPS ICD,

2012)。GPST 被定义为连续时间系统，中间不进行跳秒。而其起点决定 GPST 与世界原子时之间有 19 秒的差距。GPST 由 GPS 控制中心维持。而除了 GPS 系统之外，后续建设的各个定位导航系统同样建立了自己的时间系统。GLONASS 采用 GLNT 时间系统，其特点为与 UTC 一同进行跳秒，且与 UTC 存在 3 小时时差(GLONASS ICD, 2012)。Galileo 系统定义的 GST 与 GPST 时间相似，将时间起点选在 1999 年 8 月 22 日 0 时 0 分 0 秒(UTC)，且为了消除与 GPST 的差异，将当时的跳秒设置为了 13 秒 (Galileo ICD, 2015)。BDS 采用 BDT 时间系统，起点设置为 2006 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒(UTC)，因此 BDST 与 TAI 之间相差 33 秒，与 GPST 之间相差 14 秒 (CSNO, 2015)。下图描述了原子时基础上的各主要时间系统间转换关系。其中 TDT 为地球动力学时，由国际天文联合会定义并维持。该时间常用于计算天体坐标系下的恒星、行星位置。

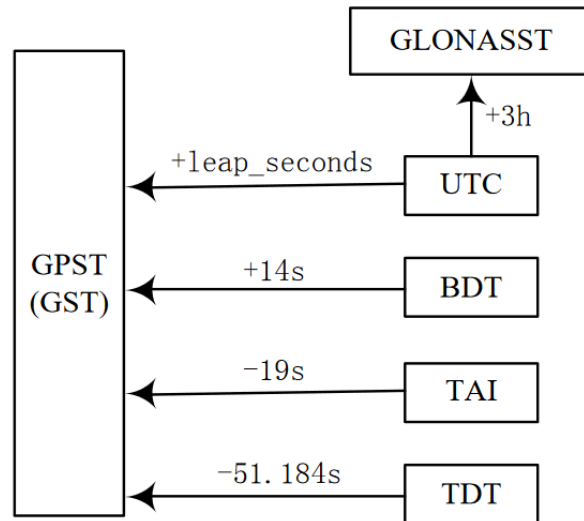


图 2-1 各时间系统转换关系示意图

Figure 2-1 Schematic diagram of various time system conversion relationships

2.1.2 空间坐标系统

与 GNSS 相关的空间坐标系主要有以下几种：

2.1.2.1 协议天球坐标系(Conventional Celestial Reference System, CRS)

地心惯性坐标系是一种常用的坐标系，以地球质心为原点。它通常用于方便描述卫星的位置 (Subirana, 2013)。在卫星导航中，常用的惯性参考系通常是 J2000.0，其坐标原点位于地球质心。参考平面为 J2000.0 的赤道平面，其中 Z 轴指向 J2000.0 赤道平面的北极，X 轴指向 J2000.0 春分点，而 Y 轴与 X 轴和 Z 轴形成右手坐标系。

2.1.2.2 协议地球坐标系(Conventional Terrestrial Reference System , TRS)

惯性坐标系与地球自转无关,因此地球上任何固定点在惯性坐标系中的坐标都会随着地球的旋转而变化。这使得确认地面物体位置在导航和定位方面变得不便。为描述地面观测站的位置,需要建立一个固定在地球表面的坐标系统,称为地球固定坐标系(有时也称为大地坐标系)。地球固定坐标系的原点通常位于地球的质心,正 Z 轴指向平均地极(协议地球极 CTP),正 X 轴指向零经度子午线(格林威治天文台),而 Y 轴与 Z 轴和 X 轴构成右手坐标系。所有 GNSS 卫星系统的参考框架都是地球固定坐标系。下表列出了四个主要全球卫星导航系统的坐标框架定义。

表 2-1 各 GNSS 坐标框架参数表
Table 2-1 Parameters for Various GNSS Coordinate Reference Frames

系统	GPS	GLONASS	Galileo	BDS
坐标 框架	WGS-84	PZ-90.11	GTRF	CGCS2000
长半 轴	6378137	6378136	6378136	6378137
扁率	1/298.257223563	1/298.25784	/	1/298.257222
自转 角速度	7.2921151467d-5	7.292115d-5	7.2921151467d-5	7.292115d-5
引力 常数	3.986005d14	3.986004418d14	3.986004418d14	3.986004418d14

除此之外, IERS 利用 VLBI、GNSS、SLR 和 DORIS 等手段建立并维持了协议地球参考框架 ITRF。由于地心运动非线性, ITRF 会每隔几年更新一次。目前最新框架为 ITRF2020。随着各个卫星导航系统坐标框架的更新,他们之间的差异在逐步缩小,也愈发接近 ITRF。

2.1.2.3 本地坐标系

测站本地坐标系以测站点为原点,以站心所在地球切面为基本平面,由站心指向正北方向。对于测站直角坐标系, X 轴在基本平面内指向正东, Y 轴指向主方向,即正北方, Z 轴与基本平面垂直向上。

2.1.2.4 星固坐标系

星固坐标系便于描述卫星天线的方位位置。星固坐标系原点为卫星质心, Z 轴由卫星质心指向地心, Y 轴指向轨道面的负法向, X 轴在轨道面内与 Z 轴垂直指向卫星运动方向, Y 轴实质为太阳至卫星方向与卫星至地心方向的叉乘方向。X、Y、Z 轴成右手系。卫星的天线相位中心改正一般基于该坐标系。其三个坐标轴的方向向量可以分别表示为:

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_z &= -\frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \\
\mathbf{e}_y &= \frac{\mathbf{e}_z \times (\mathbf{r}_{\text{Sun}} - \mathbf{r}_{\text{Sat}})}{|\mathbf{e}_z \times (\mathbf{r}_{\text{Sun}} - \mathbf{r}_{\text{Sat}})|} \\
\mathbf{e}_x &= \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_y
\end{aligned} \tag{2-2}$$

其中, \mathbf{r}_{Sun} 为太阳位置, \mathbf{r}_{Sat} 为卫星位置。

需要注意的是, 对于北斗系统部分卫星和 QZSS 系统, 卫星姿态存在零偏 (yaw fixed or orbit normal) 状态 (Zhou S et al., 2013; Wang W et al., 2013; 郭靖 et al., 2014; Guo J et al., 2017; 毛悦 et al., 2014; 毛悦 et al., 2015; Dai X et al., 2015; Montenbruck et al., 2015)。当卫星处于零偏姿态时, 星固坐标系与卫星轨道坐标系定义一致。

需要注意的是, 对于北斗 GEO 卫星, 由于它们相对于地球的位置相对恒定, 它们始终采用零偏模式。对于北斗 IGSO 和 MEO 卫星, 当太阳与卫星轨道面夹角小于一定角度 (约为 4°) 时, 卫星不再跟踪太阳的位置。相反, 偏航角固定为 0° , 将卫星的姿态从动态偏移转换为零偏。IGSO/MEO 卫星每年会经历两次动态偏移和零偏之间的转换, 零偏模式持续时间为 8 到 15 天。对于 QZSS 的 QZO 卫星, 当太阳与卫星轨道面夹角小于 20° 时, 将发生从动态到零偏的转换。卫星姿态模式会影响太阳辐射压力模型、卫星天线相位中心修正模型以及相位天线缠绕 (毛悦 et al., 2015)。

2.1.2.5 卫星轨道坐标系

卫星轨道坐标系又称 RTN 坐标系, 与星固系的定义类似, 只是坐标轴指向不同, 其坐标原点为卫星质心, R 轴为径向, 与地心到卫星质心的向径方向一致。T 轴为横向, 在轨道面内与 R 轴垂直, 指向卫星运动方向。N 轴为轨道面正法向, 与 R、T 轴成右手系。该坐标系一般用于评价卫星轨道误差以及各分析中心用于播发 SSR 轨道改正。

2.1.2.6 空间坐标系转换

任意两个空间三维坐标系的转换关系都可以表示为(IERS Conventions., 2010):

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{T} + \lambda \cdot \mathbf{R}_{1,2} \cdot \mathbf{X}_1 \quad (2-3)$$

其中, \mathbf{X}_1 、 \mathbf{X}_2 分别是同一点在转换前、转换后的坐标, \mathbf{T} 为坐标平移参数, λ 为尺度因子, $\mathbf{R}_{1,2}$ 为坐标旋转矩阵, 依据三个坐标轴的旋转角 θ_X 、 θ_Y 、 θ_Z , $\mathbf{R}_{1,2}$ 可表达为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{1,2} &= \mathbf{R}_Z(\theta_Z)\mathbf{R}_Y(\theta_Y)\mathbf{R}_X(\theta_X) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_Z) & \sin(\theta_Z) & 0 \\ -\sin(\theta_Z) & \cos(\theta_Z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_Y) & 0 & -\sin(\theta_Y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_Y) & 0 & \cos(\theta_Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_X) & \sin(\theta_X) \\ 0 & -\sin(\theta_X) & \cos(\theta_X) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-4)$$

特殊的, 当两坐标轴指向接近时, 上式可近似表达为:

$$\mathbf{R}_{1,2} \approx \begin{bmatrix} 1 & \theta_Z & -\theta_Y \\ -\theta_Z & 1 & \theta_X \\ \theta_Y & -\theta_X & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

CRS 与 TRS 之间的转换关系可表达为:

$$[\text{CRS}] = \mathbf{Q}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{W}(\mathbf{t}) \cdot [\text{TRS}] \quad (2-6)$$

其中, $\mathbf{Q}(\mathbf{t})$ 为岁差章动旋转矩阵, $\mathbf{R}(\mathbf{t})$ 为地球自转角矩阵, $\mathbf{W}(\mathbf{t})$ 为极移改正矩阵。

2.2 GNSS 观测模型

本节对 GNSS 定位中常用的观测模型进行介绍。

2.2.1 GNSS 原始观测值

在 GNSS 精密定位中, 主要原始观测值包括伪距观测值和载波相位观测值, 基于它们的原始观测方程可以写为:

$$\begin{cases} P_{i,r}^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + M_r^s d_{trop,r} + I_{r,i}^s + (B_{i,r} - B_i^s) + \varepsilon(P_{i,r}^s) \\ \Phi_{i,r}^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + M_r^s d_{trop,r} - I_{r,i}^s + \lambda_i^s (b_{i,r} - b_i^s) + \lambda_i^s N_{i,r}^s + \varepsilon(\Phi_{i,r}^s) \end{cases} \quad (2-7)$$

上式中各符号及变量的含义为:

上标 s 对应表示卫星 s 的 PRN, i 表示卫星 s 的频点, r 表示接收机 ID。

$P_{i,r}^s$ 和 $\Phi_{i,r}^s$ 分别表示伪距和载波相位观测值, 单位为 m。

ρ_r^s 表示卫星到接收机的几何距离, 单位为 m。在实际定位处理时, 可以用接收机初始坐标 (X_r, Y_r, Z_r) 以及卫星坐标 (X^s, Y^s, Z^s) 表示, 对其在接收机先验坐标 (X_r^0, Y_r^0, Z_r^0) 处进行 Taylor 展开并保留一阶项, 可以得到 ρ_r^s 的坐标表达形式如下:

$$\rho_r^S = \rho_0^S + \frac{x_r^0 - x^S}{\rho_0^S} \Delta x + \frac{y_r^0 - y^S}{\rho_0^S} \Delta y + \frac{z_r^0 - z^S}{\rho_0^S} \Delta z \quad (2-8)$$

c 代表光速，单位为 m/s。

dt_r 和 dt^S 分别代表接收机钟差和卫星钟差，单位为 s。

M_r^S 和 $d_{trop,r}$ 分别代表测站 r 的对流层投影函数和天顶对流层延迟， $d_{trop,r}$ 单位为 m。

$I_{r,i}^S$ 为频点 i 的电离层延迟，单位为 m。一般将其表示为 $I_{r,i}^S = \mu_j^S \cdot I_{r,1}^S$ ，其中 μ_j^S 为电离层放大系数，可表示为： $\mu_j^S = (f_1^S / f_j^S)^2$ 。

$B_{i,r}$ 、 B_i^S 分别为接收机伪距硬件延迟，和卫星伪距硬件延迟，单位为 m。

$b_{i,r}$ 、 b_i^S 分别为接收机相位硬件延迟和卫星相位硬件延迟，单位为 cycle。

λ_i^S 为第 i 个频点的波长，单位为 m/cycle。

$N_{i,r}^S$ 为相位整周模糊度，单位为 cycle。

$\varepsilon(P_{i,r}^S)$ 和 $\varepsilon(\Phi_{i,r}^S)$ 分别为伪距观测值和载波相位观测值的噪声，单位为 m，主要包含多路径误差、未改正完全的的天线相位中心偏差、固体潮、海潮、极潮以及其他未模型化误差残差。

2.2.2 GNSS 组合观测值

在 GNSS 数据处理中，为了实现对某些特定误差的消除、对某些物理量进行提取或者放大某些参数的物理特性，会基于上节的原始观测值进行线性组合。下面对 GNSS 中常用的线性组合观测值进行介绍。

2.2.2.1 双频消电离层组合观测值

双频消电离层组合基于电离层对不同频率 GNSS 信号的弥散作用，通过不同频率观测值的线性组合来消除观测值中的一阶电离层延迟(消除超过 99%)，双频伪距和载波相位观测值均可构成消电离层组合，公式可表示为：

$$\begin{cases} P_{IF,r}^S = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{1,r}^S - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{2,r}^S \\ L_{IF,r}^S = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{1,r}^S - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{2,r}^S \end{cases} \quad (2-9)$$

2.2.2.2 单频消电离层组合观测值

单频消电离层组合利用伪距观测值和相位观测值中电离层延迟大小相同、方向相反的特性，对单频伪距和单频载波观测值求和后取平均，因此也被称为“半和观测值”，具体形式可表达如下：

$$P_{i,graphic}^S = (P_{i,r}^S + L_{i,r}^S) / 2 \quad (2-10)$$

该方法优点在于消除电离层方式简单，可用于单频精密定轨定位。而缺点为将伪距噪声带入载波相位观测值，破坏了相位观测值原始精度。

2.2.2.3 无几何影响组合观测值

本文 2.2.2.1 小节中原始观测模型中误差可按照是否与频率相关分为两大类, 其中电离层延迟、伪距硬件延迟、相位硬件延迟、模糊度参数为频率相关项, 其他误差为频率无关项。无几何影响组合观测值通过不同频率观测值做差, 仅保留频率相关项, 该观测值可表示为:

$$\begin{cases} P_{GF,r}^S = P_{1,r}^S - P_{2,r}^S \\ L_{GF,r}^S = L_{1,r}^S - L_{2,r}^S \end{cases} \quad (2-11)$$

由于 GF 组合后的硬件延迟、天线相位中心偏差和多路径偏差在历元间的变化量很小, 因此 GF 组合一般可以用来进行电离层信息提取和周跳探测。

2.2.2.4 宽巷组合观测值

宽巷组合主要针对于观测值, 通过组合得到波长更大的模糊度, 从而使得模糊度更容易固定, 其组合可以表达为:

$$L_{WL,r}^S = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{1,r}^S - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{2,r}^S \quad (2-12)$$

宽巷组合之后的波长 $\lambda_{WL} = \frac{c}{f_1 - f_2}$ 。对于 GPS 系统, 其波长大约为 86.2 cm。

2.2.2.5 MW 组合观测值

MW 组合由载波宽巷和伪距窄巷组合构成, 最早由公式可以表达为:

$$\begin{aligned} L_{MW,r}^S &= \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{1,r}^S - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{2,r}^S - \frac{f_1}{f_1 + f_2} P_{1,r}^S - \frac{f_2}{f_1 + f_2} P_{2,r}^S \\ &= \frac{c}{f_1 - f_2} (\widetilde{N}_{1,r}^S - \widetilde{N}_{2,r}^S) \end{aligned} \quad (2-13)$$

其中, $\widetilde{N}_{1,r}^S$ 、 $\widetilde{N}_{2,r}^S$ 为包含硬件延迟的浮点模糊度。

MW 组合观测值消除了大多数误差, 只保留了宽巷模糊度, 仅受观测噪声的影响, 可以用来进行周跳探测、修复和模糊度固定。

2.2.2.6 线性组合对观测值噪声的影响

本小节利用误差传播理论, 讨论线性组合后观测值的噪声。

此处不失一般性的, 假设观测值的线性组合为:

$$C = a \cdot L_1 + b \cdot L_2 + c \cdot P_1 + d \cdot P_2 \quad (2-14)$$

此时组合后的电离层延迟相对于 L1 频点的电离层延迟变化可表达为:

$$k = f_1^2 \left(\frac{a}{f_1^2} + \frac{b}{f_2^2} - \frac{c}{f_1^2} - \frac{d}{f_2^2} \right) \quad (2-15)$$

假设此时伪距观测值的噪声为 ε_P , 相位观测值的噪声为 ε_L , 则组合后的噪声可表达为:

$$\sigma_C = \sqrt{(a^2 + b^2)\varepsilon_L^2 + (c^2 + d^2)\varepsilon_P^2} \quad (2-16)$$

2.3 GNSS 误差源与处理方法

GNSS 定位误差按照误差源可分为四类，分别是卫星相关误差、传播路径相关误差、接收机相关误差以及由物理原因造成的其他误差。本节对各种误差依照误差源的不同依次进行介绍。

2.3.1 卫星相关误差

2.3.1.1 卫星轨道与卫星钟误差

在实时定位中，GNSS 用户一般基于导航系统播发的广播星历获取 GNSS 卫星位置。卫星轨道误差是指通过卫星星历计算的卫星位置与卫星真实位置的差异。由于在定位时，用户端将 GNSS 卫星轨道坐标当作真值进行位置解算，因此卫星轨道误差会影响用户定位精度。卫星钟差是卫星上原子钟时间与 GNSS 系统时间之间的差异。该误差会对卫星与用户间几何距离计算带来偏差。

IGS 现在已有多家 MGEX 分析中心通过网络播发形式提供基于广播星历的实时精密轨道钟差改正数，用于提升用户实时定位精度。实施精密改正数生成基于超快速精密轨道的外推预测，与广播星历计算值相减得到。实时轨道改正数精度一般在 5 cm 以内，钟差精度一般不超过 1.5 ns。截止目前，可以使用的精密改正数据流挂载点信息如下图所示：

表 2-2 实时精密产品挂载点信息表

Table 2-2 Mounting point information for real-time precise products

序号	挂载点	支持系统	使用软件	更新周期(轨道/钟差)
1	SSRA00BKG	GRE	RETICLE	60s/5s
2	SSRA00CAS	GREC	GPSNet	5s/5s
3	SSRA00CNE	GRECJ	PPP-Wizard	5s/5s
4	SSRA00DLR	GRECJ	RETICLE	30s/5s
5	SSRA00ESA	G	RETINA	5s/5s
6	SSRA00GFZ	GREC	EPOS-RT	5s/5s
7	SSRA00GMV	GRE	magicGNSS	10s/10s
8	SSRA00NRC	G	HPGPSC	5s/5s
9	SSRA00WHU	GREC	PANDA	5s/5s
10	SSRA01IGS	G	RETINA	5s/5s
11	SSRA01IGS	GRE	BNC	60s/10s
12	SSRA01IGS	GREC	BNC	60s/10s

对于事后精密定位，IGS 依据不同时延需求，分别发布超快速精密星历(IGU)、快速精密星历(IGR)以及最终精密星历(IGS)三类精密轨道钟差产品。其中超快速精密星历延迟在 3-9 小时，轨道误差约为 3 cm，钟差 STD 约为 0.15 ns；快速星历时延约 17~41 小时，轨道精度达到 2.5 cm，钟差 STD 为 25 ps；最终产品一般需要 12~18 天，轨道精度优于 2.5 cm，钟差 STD 优于 20 ps。

2.3.1.2 卫星天线相位中心偏差与变化

GNSS 观测值描述的为接收机天线相位中心和卫星天线相位中心的距离。对于各个卫星导航系统来说,通过广播星历计算得到的卫星位置基于信号发射时的天线相位中心(APC),而精密星历中给出的卫星坐标基于卫星质心(MC)。因此当我们使用基于卫星质心的精密轨道产品时,需要考虑卫星天线相位中心改正(PCO)。

除此之外,天线相位中心在物理上并不是一个固定点,它随信号高度角及方位角度的变化而变化,而 PCO 改正后是平均相位中心,还需要在此基础上进行天线相位中心变化(PCV)改正(Schmid et al., 2003; Schmid et al., 2016)。

原则上,卫星端的天线相位中心偏差会在出厂前进行标定,但在太空中卫星端 PCO/PCV 会产生变化,因此 IGS 会定期发布 ANTEX 文件对大部分 GNSS 卫星进行 PCO/PCV 的重新标定。

对于 GNSS 导航卫星,动偏与零偏的卫星姿态控制策略不同,对应着相适应的改正模型。对于动偏卫星的 PCO,首先计算:

$$\bar{e}_z = -\frac{\bar{r}}{|\bar{r}|}, \bar{e}_y = \bar{e}_z \times \frac{\bar{r}_{\text{sun}} - \bar{r}}{|\bar{r}_{\text{sun}} - \bar{r}|}, \bar{e}_x = \bar{e}_y \times \bar{e}_z \quad (2-17)$$

其中, \bar{r} 、 \bar{r}_{sun} 分别为惯性系下卫星与太阳的位置向量。

基于上式,相位中心改正可表达为:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_{\text{ciscts}} \cdot (\bar{e}_x \quad \bar{e}_y \quad \bar{e}_z) \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{phs}} \\ y_{\text{phs}} \\ z_{\text{phs}} \end{pmatrix}, d\rho_{\text{phs}} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^T \cdot \frac{\bar{r}_{\text{sta}} - \bar{r}}{|\bar{r}_{\text{sta}} - \bar{r}|} \quad (2-18)$$

其中, R_{ciscts} 为惯性系与地固系转换旋转矩阵, \bar{r}_{sta} 为测站在地固系下坐标, $d\rho_{\text{phs}}$ 为卫星天线相位中心偏差在观测方向上的改正数。

对于零偏卫星,首先计算:

$$\bar{e}_z = -\frac{\bar{r}}{|\bar{r}|}, \bar{e}_y = \bar{e}_z \times \frac{\bar{v}}{|\bar{v}|}, \bar{e}_x = \bar{e}_y \times \bar{e}_z \quad (2-19)$$

其中 \bar{r} 、 \bar{v} 分别为卫星在惯性系下的位置和速度向量。

相位中心改正模型为:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_{\text{ciscts}} \cdot (\bar{e}_x \quad \bar{e}_y \quad \bar{e}_z) \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{phs}} \\ y_{\text{phs}} \\ z_{\text{phs}} \end{pmatrix}, d\rho_{\text{phs}} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^T \cdot \frac{\bar{r}_{\text{sta}} - \bar{r}}{|\bar{r}_{\text{sta}} - \bar{r}|} \quad (2-20)$$

2.3.1.3 卫星码偏差

GNSS 卫星和接收机通过不同通道发射和接收不同频点的信号,由于不同类型伪距观测量在穿过不同通道时产生的时延并不一致,因此将其差异称为差分码偏差或内部频间偏差 (Schaer et al., 2006; Dach et al., 2007; Leick et al., 2014)。码偏差主要由硬件偏差和固件偏差两部分引起,通常将其统称为硬件延迟偏差。其中硬件偏差由卫星/接收机天线通道时延引起,固件偏差由卫星/接收机数字/模拟

滤波器等时延引起。

目前 IGS 分析中心估计卫星钟差时,采用双频消电离层组合观测量,以 GPS 为例,IGS 估计钟差时使用 P1P2 频点的无电离层组合,卫星钟差中含有相应的硬件延迟偏差。因此在使用 IGS 播发卫星钟差进行精密单点定位时,若采用的伪距观测量与生成钟差产品时不一致则会导致伪距观测量中会存在 DCB。由于接收机端的硬件延迟可以包含到接收机钟差当中,不用改正接收机 DCB(Guo et al., 2015)。此时改正到第*i*个频点上的公式可以表示为:

$$\begin{aligned} d_{IF}^{s,j} - d_i^{s,j} &= (d_{IF}^{s,j} - d_1^{s,j}) + (d_1^{s,j} - d_i^{s,j}) \\ &= \frac{1}{1-\gamma_2} DCB_{P1P2}^{s,j} - DCB_{P1Pi}^{s,j} \end{aligned} \quad (2-21)$$

其中, $d_{IF}^{s,j}$ 为卫星端消电离层组合伪距硬件延迟, $d_i^{s,j}$ 第*i*个频点的伪距硬件延迟偏差。

2.3.1.4 天线相位缠绕

卫星在发射信号时由于天线的右旋极化,会对相位观测值产生相位缠绕误差。对于精密定位必须对其进行修正,其改正公式可表达为 (Wu J et al., 1992):

$$\Delta\Phi = N + \delta\phi \quad (2-22)$$

$$\text{其中 } \delta\phi = \text{sign}(\varsigma) \cdot \arccos\left(\frac{\vec{D} \cdot \vec{D}'}{\|\vec{D}\| \cdot \|\vec{D}'\|}\right) \quad (2-23)$$

上式中, N 的初值为 0, 其他变量定义如下:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \mathbf{a} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}) + \mathbf{k} \times \mathbf{b} \\ \vec{D}' &= \mathbf{a}' - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}') + \mathbf{k} \times \mathbf{b}' \\ \varsigma &= \mathbf{k} \cdot (\vec{D} \times \vec{D}') \end{aligned} \quad (2-24)$$

上式中, \mathbf{k} 为卫星至接收机的向量, \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 和 \mathbf{a}' 、 \mathbf{b}' 分别为站心地平坐标系和卫星星固坐标系的 X、Y 方向单位向量在 CRS 或 TRS 下的方向向量。

从相位缠绕改正公式可以看出,相位缠绕与卫星天线和接收机的相对位置有关,因此对于 BDS 或者 QZSS 零偏状态下的卫星,其相位缠绕误差对于静止的接收机始终不变,可以不改正而被相位模糊度完全吸收。

2.3.2 传播路径相关误差

2.3.2.1 对流层延迟

对流层是指高度低于 50 km 的中性大气层。当 GNSS 信号穿过对流层时,会产生时延和信号弯曲效应。与电离层不同的是,对流层没有被电离,因此对于频率赫兹小于 15GHz 的无线电信号没有弥散效应。因此对对流层延迟进行改正时不需要考虑不同频点的差异。对流层延迟包括干延迟和湿延迟两部分,其中干延迟占总量的 90%左右,主要与测站高程,大气温度和压力相关。湿延迟与对流层中水汽含量高度相关。在 GNSS 数据处理中,卫星对测站的斜对流层延迟通常通

过天顶对流层延迟与投影函数模型化的形式表达，具体公式如下：

$$D_{\text{trop}} = m_{\text{dry}} ZTD_{\text{dry}} + m_{\text{wet}} ZTD_{\text{wet}} \quad (2-25)$$

其中， D_{trop} 、 m_{dry} 、 ZTD_{dry} 、 m_{wet} 、 ZTD_{wet} 分别为斜对流层延迟，天顶对流层延迟干、湿分量以及对应的投影函数。

一般来说，天顶对流层延迟总量在 2-3 m 左右。其中干延迟部分变化较为稳定，可以通过经验模型计算得到，如使用常见的 Hopfield、Saastamoinen 等。不同模型计算得到的干延迟分量差异在毫米量级。而湿延迟部分受水汽影响，变化相对复杂，难以用模型精确计算，因此在高精度定位数据处理过程中，经常将其作为参数估计。另外也有研究表明，对于对流层延迟存在东西和南北方向的梯度差异，即在东西和南北方向需增加梯度参数估计。该方法在大气中水汽变化剧烈时(如大暴雨天气)具有更好的估计效果(Boehm et al., 2006; Li et al., 2015)。

2.3.2.2 电离层延迟

电离层是指地面 60 km 以上至 2000 km 磁顶的整个大气空间。在太阳 X 射线、紫外线的高能辐射下，高层大气发生电离效应而产生了大量的自由电子并形成了一个充满带电粒子但总体仍保持为电中性的电离层区域。GNSS 信号在通过电离层时，信号的传输方向、速度、相位以及振幅等状态会因电子产生变化，对信号总影响可达数米至数百米，是 GNSS 信号处理时必须考虑的修正项。也因为电离层结构复杂，变化剧烈，至今仍是 GNSS 相对较为棘手的误差源之一。通过广大学者的研究发现(Klobuchar., 1987; Schaer et al., 1999; 袁运斌., 2002)，电离层一阶项对于伪距和载波相位观测值的影响可表示为：

$$\begin{cases} I_{P_j} = \frac{40.28 \text{TEC}}{f_j^2} \\ I_{L_j} = -\frac{40.28 \text{TEC}}{f_j^2} \end{cases} \quad (2-26)$$

上式中， f_j 为信号对应频率，TEC 为信号传播过程中穿过的电子总量。从上式中可以看出，电离层对伪距和载波观测值的影响大小相同，方向相反。

除了一阶项，高阶项对定位信号的影响较小，一般可以选择忽略。对于双频用户，一般可以使用消电离层组合除去一阶电离层的影响，而非差非组合观测模型的提出允许用户端将电离层延迟作为参数估计。而对于单频用户，则需要电离层改正模型进行修正，如 Klobuchar 模型，BDS-Klobuchar 模型等。除此之外，对于一些全球/区域增强定位，还可以通过播发电离层格网的方式对用户端电离层进行插值计算并改正。

2.3.2.3 多路径效应

在使用 GNSS 接收机进行观测时，GNSS 信号除了直接被接收机捕获之外，还有可能经过测站附近的物体进行反射后，通过反射波的形式被接收机捕获。该

信号会与原始直射波信号产生干涉,从而使 GNSS 原始观测值产生偏差,该偏差被称为多路径偏差。

相对于对流层和电离层误差,多路径效应是一种相对更加局部的误差效应,其大小与接收机附近环境高度相关。由于反射信号的路径取决于反射表面和卫星位置,反射表面相对接收机通常为不变的,但卫星是运动的,所以多路径效应是时变的,由于卫星轨道运动的周期性,导致多路径效应也存在周期特性。

对于 GPS 信号而言,多路径效应对 L1 频点的相位多路径偏差最大可达 4.8 cm,对 L2 频点可达 6.1cm,而对伪距观测值的影响可达数米以上。目前针对多路径效应的方法和措施包括:

(1)选择合适的站址,尽量避开信号反射物;

(2)改进接收机,在天线下设置抑径板或抑径圈防止反射信号进入天线时产生多路径误差;

(3)延长观测时间,在数据处理中使用特殊的方法(如恒星日滤波)消除多路径效应导致的周期性误差(殷海涛 et al., 2011),但由于 BDS 的 GEO 卫星相对地面静止,该方法对其多路径处理效果较差。

2.3.3 接收机相关误差

2.3.3.1 接收机钟差

接收机内部振荡器频率的漂移产生的接收机钟时间与 GNSS 系统时间的差异被称为接收机钟差。为了控制成本,接收机一般使用石英钟,在定位中一般将其作为参数进行估计。

2.3.3.2 接收机天线相位中心偏差与变化

接收机天线相位中心偏差是指接收机天线相位中心与其几何中心的差异。且天线相位中心也会随着卫星高度角、方位角和信号频率的不同而变化。改正模型可参照卫星端 PCO/PCV 改正。

2.3.3.3 地球固体潮

由于地球并非一个刚体,而会受外部作用力(如太阳、月球引力)而产生弹性形变。因此测站点坐标在地固系中时刻存在着微小的形变。关于各种潮汐改正,国际上有统一的标准和约定,目前主要是参考国际地球自转服务(International Earth Rotation Service, IERS)的 IERS Conventions 系列技术文档。

地球固体潮是受日月引力影响而使地球形状产生周期性变化的现象。固体潮对测站水平和高程的影响可分别达到 5 cm 和 30 cm。目前 IERS 改正模型精度在 mm 级别,改正模型为(李征航 et al., 2009):

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=1}^2 \frac{GM_j r^4}{GMR_j^3} \left\{ [3l_2(\vec{R}_j \cdot \vec{r})]\vec{R}_j + \left[3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right)(\vec{R}_j \cdot \vec{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \vec{r} \right\} + [-0.025 \sin \phi \cos \phi \sin(\theta_g + \lambda)] \vec{r} \quad (2-27)$$

其中, $\Delta \vec{r}$ 为测站点的位移量, $j=1$ 表示太阳影响, $j=2$ 表示月球影响; GM 为地球引力常数, GM_j 可分别表示太阳引力常数和月球引力常数; \vec{R}_j 可分别表示太阳位置向量和月球位置向量; \vec{r} 为测站位置向量; l_2 、 h_2 皆为模型常数, 分别取值为 0.609 和 0.085; λ 、 ϕ 分别为测站经纬度, θ_g 为格林尼治恒星时。

2.3.3.4 海洋负荷潮

海洋负荷潮汐是由于月球和太阳的引潮力作用, 使海洋水面发生的周期性涨落现象, 对测站在水平方向和高程方向的影响可以达到 2 cm~5 cm。海潮也主要由一日及半日周期变化组成, 但海潮变化比固体潮小一个量级。海潮不含固定形变部分, 与测站经纬度高度相关。

该项误差对于靠近海岸或海上测站具有更显著的影响, 目前使用的海潮改正模型一般都考虑了 11 个分潮的影响, 在模型中给出了每个分潮在 NEU 三个方向的振幅和相位值, 用户利用这些参数和如下的改正公式可以计算得到测站的海潮改正:

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=1}^{11} f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (2-28)$$

上式中, 下标 j 对应 11 个不同的分潮, 包括 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_f 、 M_m 、 S_{sa} 。 f_j 、 A_{cj} 、 ω_j 、 χ_j 、 u_j 、 Φ_{cj} 为各分潮的模型系数。

2.3.3.5 极潮

极潮是指由于地球自转轴偏移造成的测站点位置误差, 极潮的变化与极移有关, 它的变化十分缓慢, 其周期呈现出季节性和钱德勒周期性(约 14 个月), 影响可达厘米级。由于极潮的变化非常缓慢, 因此对于短时间数据处理可以不予考虑, 而对于连续数月的观测需要对其进行改正。极潮的改正公式可表达为:

$$\Delta r = \begin{pmatrix} -0.009 \cos 2\theta (m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \\ 0.009 \sin \theta (m_1 \sin \lambda - m_2 \cos \lambda) \\ -0.033 \sin 2\theta (m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \end{pmatrix} \quad (2-29)$$

$$m_1 = x_p - 0.054 - 0.00083(t - t_0)$$

$$m_2 = -y_p + 0.357 + 0.00359(t - t_0)$$

上式中, Δr 为测站点在 NEU 三个方向的位移, t 为改正时刻, x_p 、 y_p 为对应时刻的极移, t_0 为 J2000 参考历元。

2.3.4 其他误差

2.3.4.1 地球自转效应

地球自转效应是指在 GNSS 信号传播过程中, 由于地球自转引起的地固系旋

转从而造成的误差，其改正量级数十米至上百米。改正公式可表示为：

$$\begin{pmatrix} \bar{X}^s \\ \bar{Y}^s \\ \bar{Z}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t & 0 \\ -\sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^s \\ Y^s \\ Z^s \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

其中， \bar{X}^s 、 \bar{Y}^s 、 \bar{Z}^s 可表示为经过地球自转改正后的卫星坐标， X^s 、 Y^s 、 Z^s 为信号发射时刻的卫星坐标， ω 为地球自转角速度， t 为信号传播时间。

2.3.4.2 相对论效应

相对论效应是由于卫星和接收机所在位置的地球引力位不同及卫星和接收机在惯性空间的运动速度不同而导致的卫星钟频率和接收机频率的视漂移现象 (Xu., 2007; 闫伟., 2012)。其影响可达几十至上百纳秒。其改正可分为两部分，分别是距离相对论改正和钟差相对论改正。

(1) 距离相对论改正

改正公式可表达为：

$$d_{\text{shapiro}} = \frac{2GM}{c^2} \ln \left(\frac{r_{cv} + r^{\text{sat}} + r_{cv}^{\text{sat}}}{r_{cv} + r^{\text{sat}} - r_{cv}^{\text{sat}}} \right) \quad (2-31)$$

上式中， r_{cv} 、 r^{sat} 分别表示接收机和卫星到地球质心的距离， r_{cv}^{sat} 为卫星到接收机的距离。该项改正量级在厘米左右，但对所有卫星影响相近，最大差异在 5 mm 左右。

(2) 钟差相对论改正

由于相同原子钟在卫星和在地面上收到引力影响并不相同，造成其钟速存在差异。对这部分差异的改正可以分为两部分。常数部分与卫星轨道长半轴相关，因此可以在卫星钟差出厂前通过调频实现改正。而周期项部分与卫星轨道偏心率相关，需要在用户定位时予以改正，改正模型为：

$$\Delta_{\text{rela}} = -\frac{2 \cdot r^{\text{sat}} \cdot v^{\text{sat}}}{c^2} \quad (2-32)$$

其中， r^{sat} 、 v^{sat} 分别为卫星位置和卫星速度， c 为光速。

需要说明的是，在使用广播星历时，可用下式进行计算：

$$\Delta_{\text{rela}} = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k) \quad (2-33)$$

其中， e 为轨道偏心率， A 为轨道半长轴， E_k 为卫星轨道偏近点角。

对于 GLONASS 卫星，由于其广播星历钟差已考虑相对路效应改正，因此用户定位时无需考虑该项改正。

2.4 数据预处理方法

观测数据在进行平差处理解算前，可以通过一定的监测手段对伪距观测值中存在的明显粗差或载波相位中的周跳进行提前探测与剔除，以防止其对坐标解算产生消极影响。

2.4.1 先验粗差探测与剔除

对于伪距观测值,可以在计算接收机钟差初值时对存在的明显粗差进行剔除,其中,接收机钟差初值的计算公式可以表达为:

$$dt_{r0} = \text{Mean}(P_{i,r}^s - s - M_{k,r}^s d_{trop,r} + \text{rela}) + dt^s \quad (2-34)$$

上式中, dt_{r0} 为接收机钟差初值, $P_{i,r}^s$ 为 i 频点伪距观测值, 双频可以使用无电离层组合观测值, 单频需提前进行电离层误差改正, s 为该颗卫星的卫地距, 可以通过计算卫星钟差 dt^s 时迭代计算。 $M_{k,r}^s d_{trop,r}$ 为对应的对流层延迟, rela 为相对论效应。 Mean 为对该历元所有卫星取平均。

在计算完平均 dt_{r0} 后, 对每一颗卫星计算得到的接收机钟差值进行检验, 对于不同定位模式, 检验阈值 dt_{r_lim} 分别设置为:

$$\begin{cases} 5.0 * 10^{-8} \text{ s} & \text{固定站坐标} \\ 3.0 * 10^{-7} \text{ s} & \text{动态或静态定位} \end{cases} \quad (2-35)$$

对于超过阈值的卫星进行剔除, 可以筛掉有明显观测值粗差的卫星。

2.4.2 相位周跳实时探测方法

在观测环境复杂、存在信号遮挡或由接收机自身原因导致信号失锁或中断时, 会造成相位数据的周跳。如果不对其进行处理, 在精密定位时会对相位观测值带来较大偏差, 因此需要考虑进行探测。

2.4.2.1 双频周跳探测方法

对于双频观测数据, 目前最广泛运用的周跳探测方法为 Blewitt 提出的 Turbo Edit 周跳探测方法 (Blewitt., 1990)。该方法利用双频数据分别构建 GF 和 MW 组合观测值进行周跳探测。

首先基于 GF 组合观测值, 双频伪距 GF 组合后, 剩余部分为两个频点的电离层延迟差异和硬件延迟差异; 双频相位 GF 组合后, 剩余部分为两个频点的电离层延迟差异、双频模糊度差异及硬件延迟差(可被模糊度吸收)。如果历元间未发生周跳, 则历元间的 GF 组合差异即为双频电离层延迟的差异。由于伪距不含模糊度, 因此其电离层延迟变化信息可以为相位信息利用。但根据表 2.4, 伪距 GF 组合噪声约为 42cm, 远大于相位观测值波长, 为了减小伪距噪声的影响, 可对伪距 GF 组合观测值进行 N 阶多项式拟合生成 Q 。故 GF 组合探测周跳模型为:

$$\Delta L_{GF} = L_{GF} - Q = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2-36)$$

GF 组合周跳判断条件为:

$$|\Delta L_{GF}(i) - \Delta L_{GF}(i-1)| > 6 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2-37)$$

$$|\Delta L_{GF}(i+1) - \Delta L_{GF}(i)| < 1 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2-38)$$

若同时满足 2-37 和 2-38, 则认为发生周跳; 若只满足 2-37, 则认为是粗差。

对于 MW 组合观测值方法, MW 组合的公式见式 2-13, 由于式 2-13 中硬件延迟差异几乎不变, 历元间相位缠绕变化对周跳也可以忽略, 因此 MW 组合周跳探测模型为:

$$N_{MW} = N_1 - N_2 = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 - f_2}{c \cdot (f_1 - f_2)} \cdot (f_1 P_1 + f_2 P_2) \quad (2-39)$$

式中, N_{MW} 为宽巷模糊度, 由于上式中含有伪距观测值, 为了减小伪距的噪声影响, 可以求多个历元的平均值 $\overline{N_{MW}}$, 则 MW 组合周跳判断条件为:

$$\left| N_{MW}(i-1) - N_{MW}(i) \right| > 4\sigma(i-1) \quad (2-40)$$

$$|N_{MW}(i+1) - N_{MW}(i)| < 1 \quad (2-41)$$

上式中, σ 为前 $i-1$ 个历元的 MW 组合的标准差。若同满足(2-40)和(2-41), 则认为发生周跳; 若只满足(2-40), 则认为是粗差。

需要注意的是, GF 组合对 $[\lambda_1 \Delta N_1 = \lambda_2 \Delta N_2]$ 组合的周跳不敏感, MW 组合对 $[\Delta N_1 = \Delta N_2]$ 组合的周跳不敏感。

2.4.2.2 单频周跳探测方法

单频数据无法组成 GF、MW 等组合, 因此无法使用 TurboEdit 方法探测周跳。目前常用的方法主要为多项式拟合, 即利用相位数据进行多项式拟合探测周跳(罗峰 et al., 2007; 蔡诗响 et al., 2009)。然而这种方法中相位的变化无法确定是由于接收机的运动还是周跳造成的, 因此只适用于规律运动或静态的接收机。也有提出利用星间单差观测值残差进行周跳探测(陈华 et al., 2012), 这种方法同样依赖于测站坐标, 只适用于静态数据。

为了消除几何运动状态的影响, 通常采用单频伪距相位组合进行周跳探测(Subirana et al., 2013):

$$\Phi - P = 2 \frac{1}{f^2} + \lambda N - K + \varepsilon \quad (2-42)$$

上式中, K 为与伪距相位硬件延迟差异。

从上式可以看出, 伪距相位组合除了包含模糊度, 还包含电离层差异。由于电离层在一定时间内变化比较稳定, 因此可以通过滑动多项式拟合来预报电离层误差。但这种方法受伪距噪声的影响很大, 尤其是对于实时数据。因此对于规律运动或静态数据, 一般结合相位观测值多项式拟合综合进行周跳探测。

2.5 参数估计方法

为了对观测方程中的未知参数进行求解, 需要对观测方程方程组进行解算, 当方程个数大于待估参数个数且满秩时, 方程无解。为了求取一定条件下的最优解, 本节对常用的参数最优估计方法进行叙述。

2.5.1 最小二乘理论

一般的，观测方程可表达为：

$$A_{n \times p} X_{p \times 1} = L_{n \times 1} \quad (2-43)$$

上式中， A 为设计矩阵； X 为参数向量， L 为观测向量。各观测值对应的随机模型可表达为：

$$D_L = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} Q_1 & & & \\ & Q_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & Q_{n-1} \\ & & & & Q_n \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

上式中 D 为观测向量 L 的方差阵， σ_0^2 为先验单位权中误差， Q_n 为观测值对应的协因数。

最小二乘参数估计方法基于观测值残差平方和最小推导得到，即：

$$\begin{cases} V = A\hat{X} - L \\ V^T Q^{-1} V = \min \end{cases} \quad (2-45)$$

上式中， V 为观测值残差阵， \hat{X} 为最小二乘参数估值，通过对极值条件求导可得：

$$\frac{\partial V^T Q^{-1} V}{\partial X} = 2V^T Q^{-1} A = 0 \quad (2-46)$$

将其带入上式可得最终法方程：

$$A^T Q^{-1} A \hat{X} = A^T Q^{-1} L \quad (2-47)$$

则对应的参数估计值及其协方差阵可表示为：

$$\begin{cases} \hat{X} = (A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T Q^{-1} L \\ D_{\hat{X}} = \sigma_0^2 (A^T Q^{-1} A)^{-1} \end{cases} \quad (2-48)$$

在经典最小二乘中，一般联合处理所有可用的观测数据，对求得的参数具有全局最优特性，一般适用于后处理，而不适合进行实时数据的单历元滤波处理。除此之外，最小二乘中也没有考虑参数的随机特性。

2.5.2 卡尔曼滤波

Kalman 滤波广泛应用于物体的实时状态估计。其主要由状态预测和参数更新两部分构成。

对于连续估计的第 $n-1$ 和 n 历元，其参数和协方差预测模型可表示为：

$$\begin{aligned} \hat{x}^-(n) &= \Phi(n-1) \hat{x}^-(n-1) \\ P_{\hat{x}(n)}^- &= \Phi(n-1) P_{\hat{x}(n-1)}^- \Phi^T(n-1) + Q(n-1) \end{aligned} \quad (2-49)$$

上式中， Φ 为参数的状态转移矩阵， Q 为过程噪声矩阵，通过 Q 可以在观测方程中增加先验信息和未被模型化的误差。

预测模型和历元 n 的观测模型可以组成观测模型如下：

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^-(n) \\ \mathbf{y}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{G}(n) \end{bmatrix} \mathbf{x}(n), \mathbf{P}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}(n) \end{bmatrix} \quad (2-50)$$

上式的最小二乘解可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)} &= \left[(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1} + \mathbf{G}^T(n) \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{G}(n) \right]^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}(n) &= \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)} \left[(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1} \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{G}^T(n) \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{y}(n) \right] \end{aligned} \quad (2-51)$$

对于 GNSS 定位静态模式参数解算, 其坐标参数不变, 钟差参数为随机噪声模型, 对流层参数一般为随机游走模型, 未发生周跳时, 其模糊度参数不变, 故其包含的坐标、接收机钟差、对流层湿延迟和模糊度参数的状态转移矩阵 Φ 和过程噪声矩阵 \mathbf{Q} 可表示为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & 0 & & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & \sigma_{\delta t}^2 & & \\ & & & & \sigma_{\text{trop}}^2 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2-52)$$

此时, 上式中 $\sigma_{\delta t}$ 可取 1 ms, σ_{trop}^2/t 可取 $1\text{cm}^2/\text{h}$ 。当发生周跳时, 状态转移矩阵 Φ 变为 0。

对于动态定位, Φ 和 \mathbf{Q} 可表示为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & 0 & & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_{dx}^2 & & & & & \\ & \sigma_{dy}^2 & & & & \\ & & \sigma_{dz}^2 & & & \\ & & & \sigma_{\delta t}^2 & & \\ & & & & \sigma_{\text{trop}}^2 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2-53)$$

式中 $[\sigma_{dx}^2, \sigma_{dy}^2, \sigma_{dz}^2]$ 为坐标噪声, 对于高速运动物体, 可设置为 10km。

而当运动速度固定时, 坐标参数可作为随机游走参数估计, 此时 Φ 和 \mathbf{Q} 可表示为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q'_{dx} \sigma_{dx}^2 & & & & & \\ & Q'_{dy} \sigma_{dy}^2 & & & & \\ & & Q'_{dz} \sigma_{dz}^2 & & & \\ & & & \sigma_{\delta t}^2 & & \\ & & & & \sigma_{\text{trop}}^2 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

其中, $[Q'_{dx}, Q'_{dy}, Q'_{dz}]$ 为运动速度的噪声。

对于静态或动态定位, 先验信息可设置为:

$$\mathbf{Q}_0 = \begin{bmatrix} 1^2 \text{km}^2 & & & & \\ & 1^2 \text{km}^2 & & & \\ & & 1^2 \text{km}^2 & & \\ & & 300^2 \text{km}^2 & & \\ & & & 0.1^2 \text{m}^2 & \\ & & & & 20^2 \text{m}^2 \end{bmatrix} \quad (2-55)$$

2.6 本章小结

本章主要对 GNSS 数据处理中的基础理论进行介绍。本章首先对 GNSS 定位中的时空基准定义与转换方法进行阐述；接着对 GNSS 中的基础观测方程以及各种线性组合进行描述。在此基础上，对 GNSS 数据处理中各种误差源及其改正方法进行叙述，最后对数据的预处理方法和参数估计理论进行了详细说明，为后文具体展开奠定理论基础。

第3章 BDS-2/BDS-3 系统偏差与联合实时精密定位算法

BDS-3 全球卫星导航系统于 2020 年全面组网完成并开始提供全球 PNT 服务, BDS-2 区域定位系统为保证我国定位系统平稳过渡至今仍然提供稳定 PNT 服务。BDS-2/BDS-3 联合定位能够丰富北斗卫星导航系统在全球范围内,尤其是亚太地区的导航定位卫星资源,从而进一步优化卫星空间几何结构,提高实时精密定位收敛性能与精度。然而研究表明,BDS-2 与 BDS-3 联合定位时存在系统偏差(Song et al., 2020)。本章首先基于北斗广播星历和不同实时产品,估计 BDS-2/BDS-3 联合定位系统偏差;对该偏差特性进行统计分析,分析该偏差产生原因,并讨论了其最佳估计方式。在此基础上,考虑该系统偏差,对 BDS-2/BDS-3 联合实时 SPP/PPP 进行性能评估。除此之外,分析了该偏差对 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位服务的影响,并对 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强服务性能进行了评估。

3.1 BDS-2/BDS-3 联合定位模型与系统偏差估计

3.1.1 多系统联合定位函数模型

为了对 BDS-2/BDS-3 联合定位进行研究,本节首先对多系统联合定位函数模型进行描述。不失一般性地,对于多系统精密定位,其观测方程可表达为:

$$\begin{cases} P_{i,r}^{k,s} = \rho_r^{k,s} + c \cdot (dt_r - dt^{k,s}) + M_r^{k,s} d_{trop,r} + (B_{i,r}^k - B_i^{k,s}) + \varepsilon(P_{i,r}^{k,s}) \\ \Phi_{i,r}^{k,s} = \rho_r^{k,s} + c \cdot (dt_r - dt^{k,s}) + M_r^{k,s} d_{trop,r} + (b_{i,r}^k - b_i^{k,s}) + \lambda_i N_i^{k,s} + \varepsilon(\Phi_{i,r}^{k,s}) \end{cases} \quad (3-1)$$

上式中, k 用来区分不同卫星导航系统。 $P_{i,r}^{k,s}$ 和 $\Phi_{i,r}^{k,s}$ 分别表示系统 k 中卫星 s 对于接收机 r 在 i 频点的伪距和相位观测值; $\rho_r^{k,s}$ 表示卫星和用户测站之间的几何距离, dt_r 和 $dt^{k,s}$ 分别表示接收机钟差和卫星钟差; $d_{trop,r}$ 和 $M_r^{k,s}$ 分别表示天顶对流层延迟及其投影函数; $B_{i,r}^k$ 和 $B_i^{k,s}$ 为接收机和卫星在 i 频点的伪距硬件延迟; $b_{i,r}^k$ 和 $b_i^{k,s}$ 分别为接收机和卫星在 i 频点的相位硬件延迟。 $N_i^{k,s}$ 和 λ_i 分别表示相位整周模糊度及其波长。 $\varepsilon(P_{i,r}^{k,s})$ 和 $\varepsilon(\Phi_{i,r}^{k,s})$ 分别表示原始伪距观测值和相位观测值的噪声。

原始观测方程构建无电离层组合时,对参数进行重组,上式可进一步表达为:

$$\begin{cases} P_{IF,r}^{k,s} = \rho_r^{k,s} + c \cdot (d\tilde{t}_r - dt^{k,s}) + M_r^{k,s} d_{trop,r} - B_{IF}^k + \varepsilon(P_{IF,r}^{k,s}) \\ \Phi_{IF,r}^{k,s} = \rho_r^{k,s} + c \cdot (d\tilde{t}_r - dt^{k,s}) + M_r^{k,s} d_{trop,r} + \bar{N}_{IF}^{k,s} + \varepsilon(\Phi_{IF,r}^{k,s}) \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\text{其中 } d\tilde{t}_r = dt_r + B_{IF,r}^k \quad (3-3)$$

$$\bar{N}_{IF}^{k,s} = \lambda_{IF} N_{IF}^{k,s} - B_{IF,r}^k + b_{IF,r} - b_{IF}^{k,s} \quad (3-4)$$

从 3-4 式中可以看出,对于双频无电离层组合,接收机钟差吸收了接收机的伪距硬件延迟,而模糊度参数中除了双频无电离层组合模糊度之外,还吸收了接收机的伪距、相位硬件延迟以及卫星的相位硬件延迟,此时模糊度参数为实数,失去整周特性。

以 IGS 播发的精密星历为例,由于在钟差估计时采用了双频无电离层组合,此时其播发卫星钟差产品 $dt^{k,s}$ 可表达为:

$$d\hat{t}^{k,s} = dt^{k,s} - B_{IF}^{k,s} \quad (3-5)$$

其中, $B_{IF}^{k,s}$ 为卫星 s 伪距硬件延迟的无电离层组合。相应的,此时模糊度参数可表达为:

$$\bar{N}_{IF}^{k,s} = \lambda_{IF} N_{IF}^{k,s} - B_{IF,r}^k + b_{IF,r} - b_{IF}^{k,s} + B_{IF}^{k,s} \quad (3-6)$$

对于卫星的伪距硬件延迟,已有文献证明了不同接收机类型对于相同卫星存在差异(Zhang et al., 2021),该差异与接收机内部通道延迟相关。在钟差估计时若未改正该偏差,上式可进一步表示为:

$$d\tilde{t}^{k,s} = dt^{k,s} - B_{IF}^{k,s} - \delta B_{IGS,IF}^{k,s} \quad (3-7)$$

其中, $\delta B_{IGS,IF}^{k,s}$ 为 IGS 分析中心在使用无电离层组合估计卫星钟差时,测站接收机对卫星 s 的平均伪距硬件延迟差异,该差异与估计钟差时使用的测站接收机类型相关。类似的,当使用北斗广播星历时, $d\tilde{t}^{k,s}$ 可表示为:

$$d\tilde{t}^{k,s} = dt^{k,s} - B_{B3I}^{k,s} - \delta B_{BDS,IF}^{k,s} \quad (3-8)$$

上式中, $B_{B3I}^{k,s}$ 为 B3I 频点的伪距硬件延迟, $\delta B_{BDS,IF}^{k,s}$ 为北斗系统监测站对卫星 s 的平均伪距硬件延迟偏差。

对于用户端定位,以无电离层组合定位模型为例,考虑不同接收机类型对于卫星存在的伪距硬件延迟偏差,在使用 IGS 精密产品时,(3-2)式可进一步描述为:

$$\begin{cases} p_{IF,r}^{k,s} = \rho_r^{k,s} + c \cdot (d\tilde{t}_r - d\hat{t}^{k,s}) + M_r^{k,s} d_{trop,r} + \delta B_{r,IGS,IF}^{k,s} + \varepsilon(p_{IF,r}^{k,s}) \\ \Phi_{IF,r}^{k,s} = \rho_r^{k,s} + c \cdot (d\tilde{t}_r - d\hat{t}^{k,s}) + M_r^{k,s} d_{trop,r} + \hat{N}_{IF}^{k,s} + \varepsilon(\Phi_{IF,r}^{k,s}) \end{cases} \quad (3-9)$$

$$\text{上式中: } \delta B_{r,IGS,IF}^{k,s} = -\delta B_{r,IF}^{k,s} + \delta B_{IGS,IF}^{k,s} \quad (3-10)$$

$$\hat{N}_{IF}^{k,s} = \lambda_{IF} N_{IF}^{k,s} - B_{IF,r}^k + b_{IF,r} - b_{IF}^{k,s} + B_{IF}^{k,s} + \delta B_{r,IGS,IF}^{k,s} \quad (3-11)$$

其中, $\delta B_{r,IF}^{k,s}$ 为用户接收机 r 对于卫星 s 的伪距硬件延迟偏差, $\delta B_{r,IGS,IF}^{k,s}$ 为卫星 s 对用户接收机伪距硬件延迟偏差与 IGS 钟差产品中包含的该卫星伪距硬件偏差的差异,该差异目前被学者们称为卫星内部伪距偏差(Inter-Satellite Code Bias)(Mi et al., 2019; Chen L et al., 2021)。对于同一颗卫星,该偏差会因用户接收机类型不同以及卫星轨道钟差产品不同而变化。从式 3-10 中可以看出当系统端估计轨道钟差产品时所用接收机与用户端接收机完全一致时,理论上 $\delta B_{r,IGS,IF}^{k,s}$ 将为 0; 当其不为 0 时,该偏差会对伪距观测值带来偏差;对于相位观测值,该偏差会被模糊度参数吸收。

3.1.2 BDS-2/BDS-3 联合定位参数估计

以双频无电离层组合为例，当使用多系统进行定位参数解算时，待估参数向量 \mathbf{dx} 可表示为：

$$\mathbf{dx} = [\delta\mathbf{r}, \delta d\tilde{t}_{r,IF}, \tilde{d}_{trop,r}, \hat{\mathbf{N}}_{IF}^{k,s}, \boldsymbol{\theta}_{ISB}] \quad (3-12)$$

其中， $\delta\mathbf{r}$ 为接收机位置改正向量， $\delta d\tilde{t}_{r,IF}$ 为接收机钟差改正量， $\tilde{d}_{trop,r}$ 为天顶对流层湿延迟改正量， $\hat{\mathbf{N}}_{IF}^{k,s}$ 为无电离层浮点模糊度向量， $\boldsymbol{\theta}_{ISB}$ 为各个系统间的系统偏差参数。

本节重点分析 BDS-2/BDS-3 联合定位时 ISB 参数 $\boldsymbol{\theta}_{BDS-2/BDS-3}$ 的构成。该偏差既可能来自于用户端，也可能来自于系统端。本节首先对此做出假设：对于接收机端，假定用户接收机对于 BDS-2 与 BDS-3 存在硬件延迟系统偏差，即

$$B_{IF,r}^{BDS2} \neq B_{IF,r}^{BDS3} \quad (3-13)$$

此时二者间的硬件延迟偏差 $\delta B_{IF,r}^{BDS2/BDS3}$ 不为 0，可表达为：

$$\delta B_{IF,r}^{BDS2/BDS3} = B_{IF,r}^{BDS3} - B_{IF,r}^{BDS2} \quad (3-14)$$

在用户定位时， $\delta B_{IF,r}^{BDS2/BDS3}$ 将被 ISB 参数吸收。

从 Zhang 等的文献中可以看出，无论是使用北斗广播星历还是精密产品，BDS-2 和 BDS-3 对同一类型的接收机 ISCB 估值之间存在系统偏差(Zhang et al., 2021)。该偏差来源分两种：第一种是 BDS-2 与 BDS-3 在钟差解算时分别使用了不同的钟差基准(Han et al., 2001; Bock et al., 2009)，另一种可能是 BDS-2 和 BDS-3 虽然采用了相同的钟差基准，但是估计卫星钟差的测站选取存在差异，此时，接收机端的系统性硬件延迟差异会被卫星钟差吸收。以上两种情况都会导致 ISCB 估计时存在系统偏差，同时也会在 BDS-2/BDS-3 联合定位时将该偏差吸收到 ISB 参数中。作为用户端，无法将两种情况产生的差异区分开，因此在本文中，将以上两种可能造成的差异统称为卫星端系统差异，记为 $D_{BDS-2/BDS-3}^A$ 。其中 A 用来区别不同的轨道钟差产品。

据此，基于以上假设与分析， $\boldsymbol{\theta}_{BDS-2/BDS-3}$ 可表达为：

$$\boldsymbol{\theta}_{BDS-2/BDS-3} = \delta B_{IF,r}^{BDS2/BDS3} + D_{BDS-2/BDS-3}^A \quad (3-15)$$

本章 3.1.3 节将会对 $\boldsymbol{\theta}_{BDS-2/BDS-3}$ 的构成、特性进行进一步分析。3.1.4 节将会讨论该偏差对定位的影响，并进一步讨论其最佳估计方式。

3.1.3 BDS-2/BDS-3 系统偏差

为了验证 $\boldsymbol{\theta}_{BDS-2/BDS-3}$ 的构成并进一步探究其特性，本节使用分布于中国及周边区域的 IGS 测站，分别基于北斗广播星历以及来自 WUH、GFZ、SHA、CNE 四家分析中心播发的实时轨道钟差产品，对 BDS-2 和 BDS-3 系统偏差参数进行估计。IGS 各测站分布如图 3-1 所示；各测站 2020 年至 2023 年接收机、天线、固件版本号信息列于表 3-1 中。本节所选 9 个测站共有三种接收机类型，分别是

Trimble Alloy、Javad TRE 3 以及 Septentio POLARX5。需要说明的是，MIZU 站在 2020 年 12 月测站接收机为 SEPT ASTERX4，自 2021 年之后更换为 Septentio POLARX5 类型。表 3-1 中“-”表示该年与上一年相比未发生变化，未列出年份表示该接收机在当年尚未支持接收双频 BDS-2 与 BDS-3 观测数据。

为了估计 $\theta_{BDS-2/BDS-3}$ ，本章使用 IGS SINEX 格式文件中的坐标提前将测站坐标标定，参数估计时固定站坐标。此时待估参数向量可表示为：

$$dx = [\delta d\tilde{t}_{r,IF}, \tilde{d}_{trop,r}, \tilde{N}_{IF}^{k,s}, \theta_{BDS-2/BDS-3}] \quad (3-16)$$

需要说明的是，本文中 ISB 时间序列进行单天估计，为了保证 ISB 估计结果的可靠性，本节只取收敛 4 小时后的部分进行统计分析，以排除对流层和模糊度参数尚未收敛对统计结果带来的影响。

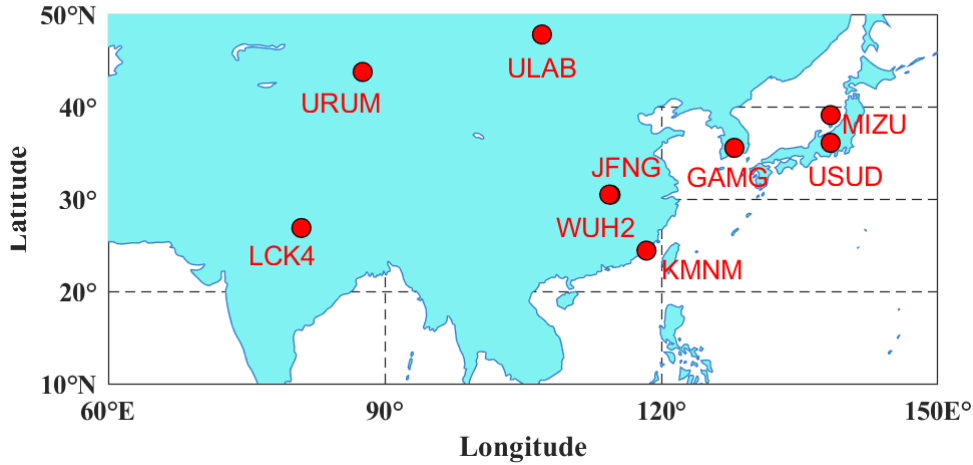


图 3-1 BDS-2/BDS-3 联合系统偏差估计测站分布图

Figure 3-1 BDS-2/BDS-3 combined system bias estimation station distribution

表 3-1 测站接收机信息表
Table 3-1 Receiver information table

测站	年份	接收机类型	天线类型	固件版本号
JFNG	2020	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00	5.45
	2021	-	-	-
	2022	-	-	6.14
	2023	-	-	6.20
WUH2	2020	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT	3.7.9
	2021	-	-	4.1.01
	2022	-	-	4.2.01
	2023	-	-	-
ULAB	2020	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT	3.7.9
	2021	-	-	4.1.01
	2022	-	-	-
	2023	-	-	4.2.01
URUM	2020	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT	3.7.6
	2021	-	-	4.1.01
	2022	-	-	-
	2023	-	-	4.2.01
LCK4	2020	TRIMBLE ALLOY	LEIAR25.R3	5.43
	2021	-	-	-
	2022	-	-	-
	2023	-	-	-
GAMG	2020	SEPT POLARX5TR	LEIAR25.R4	5.3.2
	2021	-	-	5.4.0
	2022	-	-	-
	2023	-	-	5.5.0
KMNM	2023	TRIMBLE ALLOY	TPSCR3_GGD	6.12
	2020	SEPT ASTERX4	SEPCHOKE_B3E 6	4.8.0
	2021	SEPT POLARX5	-	5.4.0
	2022	-	-	-
USUD	2023	-	-	5.5.0
	2020	SEPT POLARX5	AOAD/M_T	5.3.2
	2021	-	-	5.4.0
	2022	-	-	-
	2023	-	-	5.5.0

3.1.3.1 基于广播星历的系统偏差分析

基于 2020 年到 2023 年,年积日为 310 到 317 共 8 天的广播星历和观测数据,

本小节对各测站 BDS-2 与 BDS-3 间系统偏差进行估计，估计方式为随机游走，过程噪声设置为 $2 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ ，ISB 时间序列如图 3-2 所示。从图中可以看出，基于广播星历的 ISB 时间序列稳定，天内及各天之间没有明显的跳变。各测站 ISB 估值分布不同，结合表 3-1 中接收机类型信息可以看出，ISB 估计值与接收机类型高度相关，且同一类型接收机天内变化趋势同样高度相关。

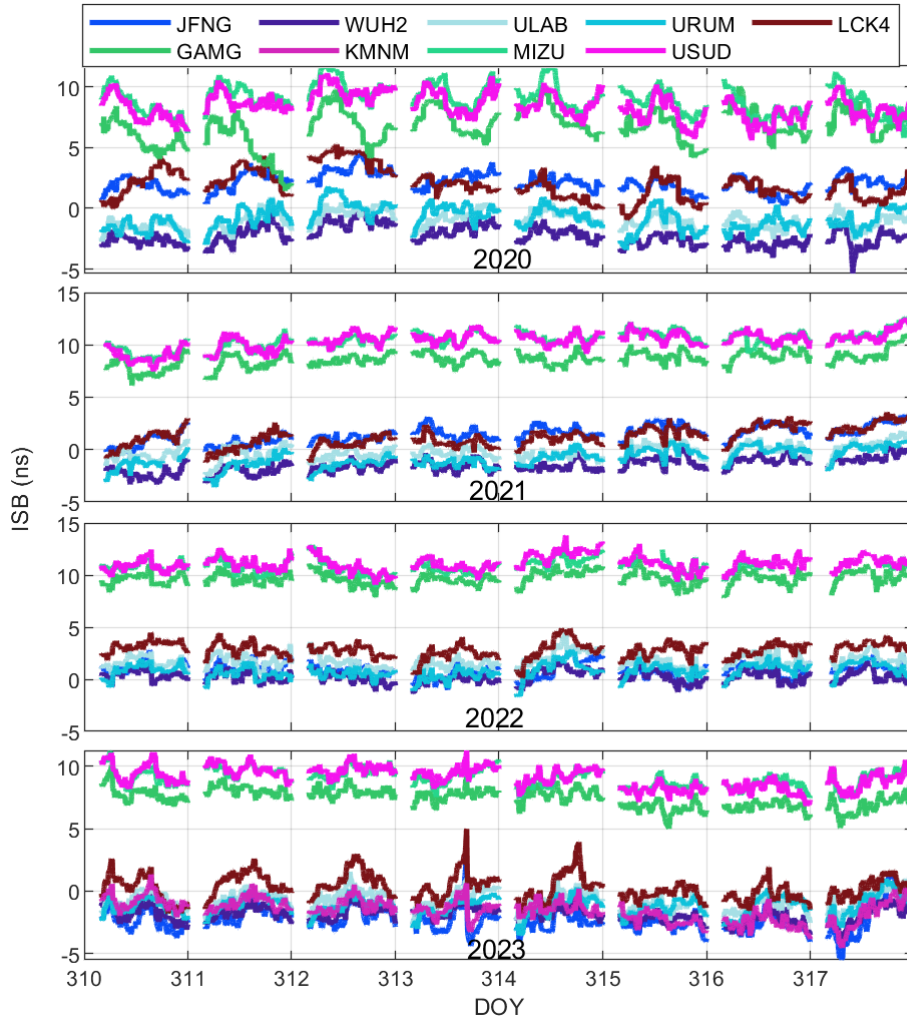


图 3-2 2020-2023 基于广播星历的 ISB 时间序列

Figure 3-2 ISB time series based on broadcast ephemeris from 2020 to 2023

对相同类型接收机 ISB 单天平均值以及天内稳定度(Standard deviation, STD)进行统计，各类型接收机平均各天 ISB 时间序列及其误差棒如图 3-3 所示。从图中可以看出，不同类型接收机估计 ISB 估值存在明显分层，同一类型接收机 ISB 平均较为稳定。该统计结果证明 BDS-2/BDS-3 联合估计 ISB 参数中包含用户接收机硬件延迟偏差 $\delta B_{IF,r}^{BDS2/BDS3}$ ；除此之外，从图 3-3 中可以看出，Septentrio 接收机 ISB 与另外两种接收机差异明显，而 Trimble 和 Javad 两类接收机 ISB 天内统计值自 2020 到 2023 年逐步缩小，2023 年其数值基本一致，因为两类厂商对

接收机固件进行了升级，减小了 BDS-2/BDS-3 硬件延迟的差异。表 3-2 展示了不同接收机每年 ISB 平均值以及每年中的天间变化，从表中可以看出，Trimble 和 Javad 两家厂商的接收机自 2022 年之后天间 STD 减小约 1ns，表明接收机硬件延迟偏差 $\delta B_{IF,r}^{BDS2/BDS3}$ 更为稳定，同样与接收机固件升级相关。

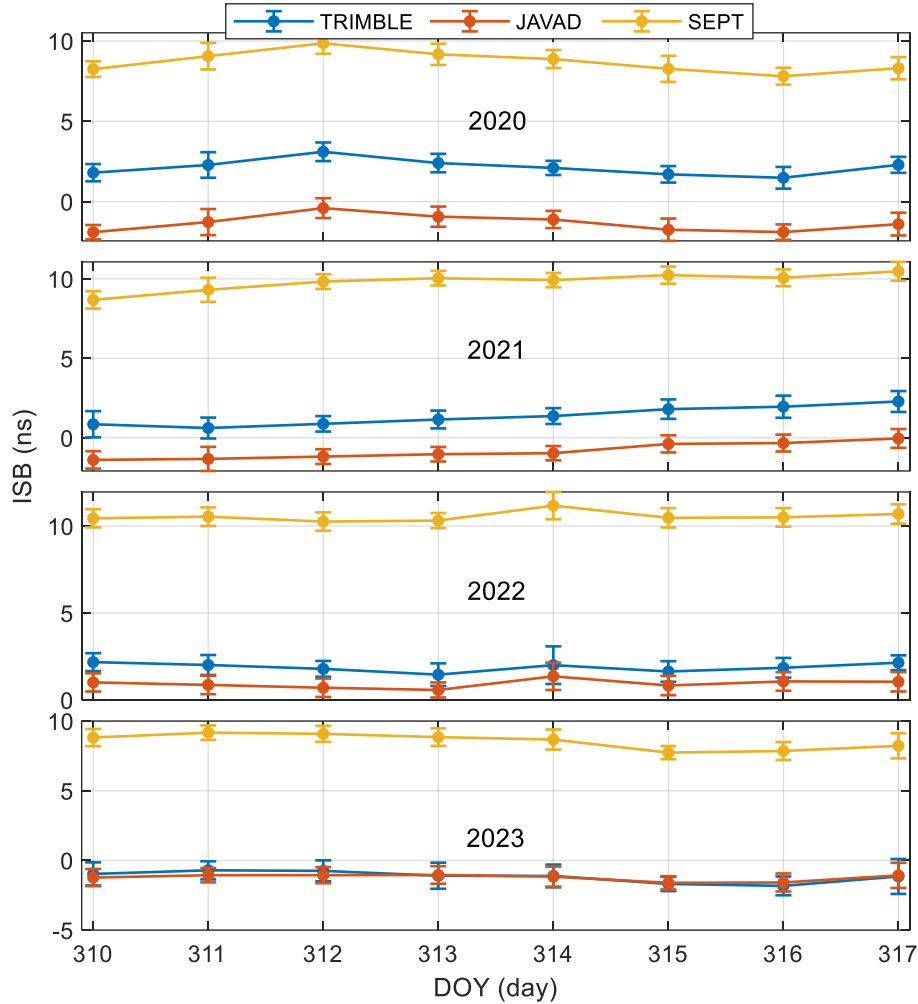


图 3-3 基于广播星历不同接收机类型 ISB 天间时间序列误差棒图

Figure 3-3 Error bar plot of ISB time series for different receiver types based on broadcast ephemeris

表 3-2 基于广播星历的不同接收机类型 ISB 各年平均值与 STD 统计表
Table 3-2 ISB annual time series for different receiver types based on broadcast ephemeris

接收机厂商	年份	平均值 (ns)	平均天内稳定度(ns)
TRIMBLE	2020	2.1	0.6
	2021	1.4	0.6
	2022	1.9	0.6
	2023	-1.2	0.8
JAVAD	2020	-1.3	0.6
	2021	-0.8	0.5
	2022	0.9	0.5
	2023	-1.2	0.6
SEPTENTIO	2020	8.7	0.6
	2021	9.8	0.5
	2022	10.5	0.6
	2023	8.6	0.6

为了进一步探究接收机中 BDS-2 与 BDS-3 硬件延迟差异的特性, 选择了六个测站建立了四条基线, 使用站间差分消除卫星端系统差异后, 对 BDS-2 与 BDS-3 进行站间差 ISB 参数估计。四条基线信息列于表 3-3 中。其中, 基线 1, 2, 3 中的接收机类型以及固件版本号保持一致, 基线 4 接收机类型不同。四条基线于 2023 年站间差 ISB 估值时间序列图与各天误差棒统计分别如图 3-4, 图 3-5 所示。结合表 3-3 可以看出, 对于相同接收机类型的基线 1, 基线 2, 基线 3, 其天内变化较稳定, STD 最大不超过 0.4 ns; 而对于接收机类型不同的基线 4, 其天内 STD 达到 0.66 ns, 证明不同类型接收机硬件延迟天内变化存在差异。基线 1, 2, 4 的 ISB 估值皆在 0 值附近, 基线 3 估值存在偏差。其中, 基线 1 长度最短, 其 ISB 天内与天间稳定度最佳, 分别为 0.23 ns 和 0.09 ns; 基线 2 中两测站虽距离较远, 但两测站纬度接近, 共视可见卫星较基线 3 更多, 因此其 ISB 估值较小; 基线 3 基线距离超过 2700 公里, 受同一时刻公视卫星差异影响, 虽然接收机类型相同, 但 ISB 估值不为 0。

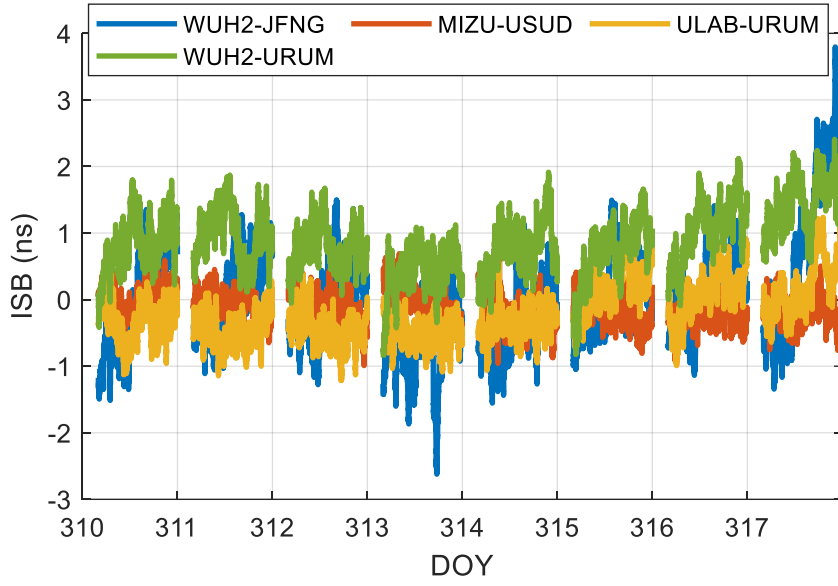


图 3-4 基于广播星历的不同接收机类型站间差 ISB 时间序列

Figure 3-4 ISB Time Series of Inter-station Differences for Different Receiver Types Based on Broadcast Ephemeris

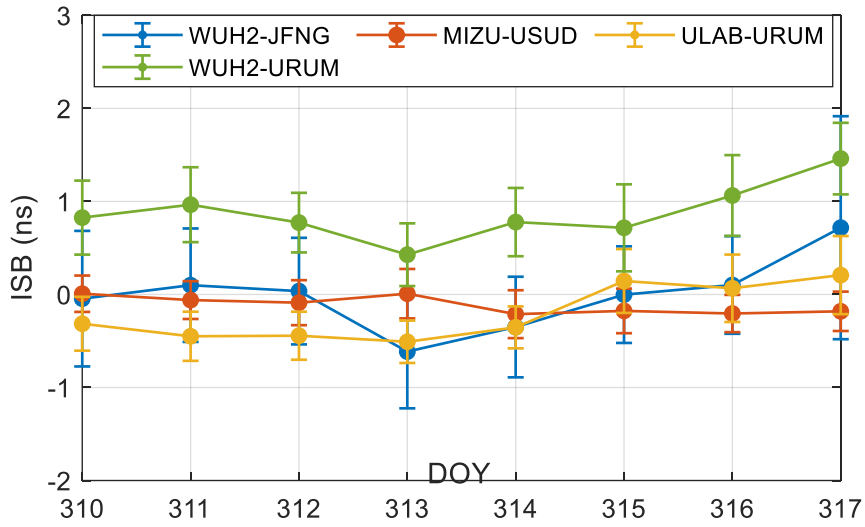


图 3-5 基于广播星历的不同接收机类型站间差 ISB 误差棒图

Figure 3-5 Error bar of ISB inter-station differences for different receiver types based on broadcast ephemeris

表 3-3 基于广播星历的站间差 ISB 统计信息表

Table 3-3 Statistics table of ISB inter-station differences based on broadcast ephemeris

基线名称	编号	基线长度 (km)	天平均值 (ns)	天内稳定度(ns)	日间稳定度 (ns)
MIZU-USUD	1	41.3	-0.11	0.23	0.09
ULAB-URUM	2	1568.5	-0.21	0.30	0.30
WUH2-URUM	3	2755.2	0.88	0.39	0.30
WUH2-JFNG	4	13.0	-0.01	0.66	0.39
平均值		-	-	0.40	0.27

3.1.3.2 基于实时精密星历的系统偏差分析

使用 4 个分析中心的实时精密轨道钟差，对 2023 年年积日为 310 到 317 共 8 的 ISB 时间序列进行进一步分析，统计方法与 3.1.3.1 节相同。ISB 时间序列如图 3-6 所示。从图中可以看出，与广播星历类似，ISB 参数估值对于相同接收机类型存在一致性；从而进一步证明 ISB 中吸收了接收机的硬件延迟偏差。相比于广播星历，精密星历估计得到的 ISB 时间序列存在明显系统性跳变；证明该跳变由卫星端造成；该跳变产生的原因可能是钟差估计过程中钟差基准的切换。不同分析中心 ISB 估计值之间同样存在系统性差异，证明不同实时精密产品之间卫星端系统差异不同，可能由不同分析中心钟差基准不同以及钟差估计时测站选取差异造成。

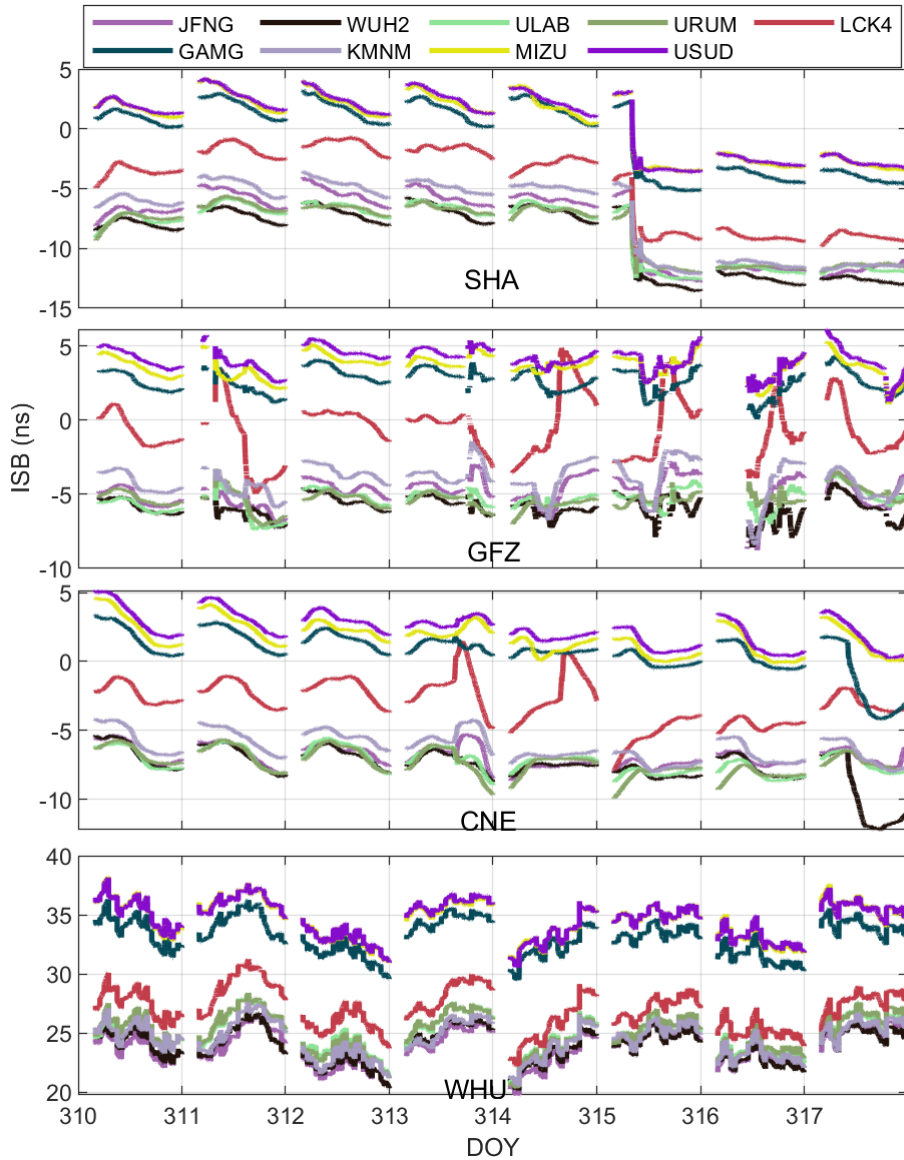


图 3-6 基于不同实时精密产品的 ISB 时间序列图

Figure 3-6 Time series of ISB based on different real-time precise products

与 3.1.3.1 小节类似，为了进一步探究接收机硬件延迟的特性，本节同样使用站间差分消除卫星端钟差基准差异与钟差基准变化对 ISB 估值的影响，对站间差观测值进行 BDS-2 与 BDS-3 ISB 参数估计。需要说明的是，四个分析中心的精密产品中，GFZ 缺少 C01-C06 卫星，CNE 缺少 C01-C05、C07、C09、C11、C14 卫星，而 SHA 和 WHU 产品包含了所有北斗可用卫星，为了保证站间 ISB 估计一致性，本小节只使用 SHA 和 WHU 的产品进行实验分析。图 3-7 展示了四条基线站间差 ISB 时间序列。从图中可以看出消除站间差异后两个分析中心 ISB 时间序列一致性较高。

表 3-4 对各基线天平均值、天内稳定性和天间稳定性进行了统计。从统计结果中可以看出，相较于广播星历，由于精密产品轨道精度更高，站间差 ISB 估值

稳定性更好。1 号基线天平均值趋近于 0，且天内变化量小于 0.1 ns，进一步证明相同接收机与固件版本号的接收机硬件延迟差异与天变化量高度一致。基线 1，2，3 随着基线长度增大，ISB 估值受轨道误差影响较大，天内稳定性变弱。基线 4 虽距离最短，但其天内变化明显大于基线 1、2，同样说明不同接收机类型硬件延迟差异天内变化不同。

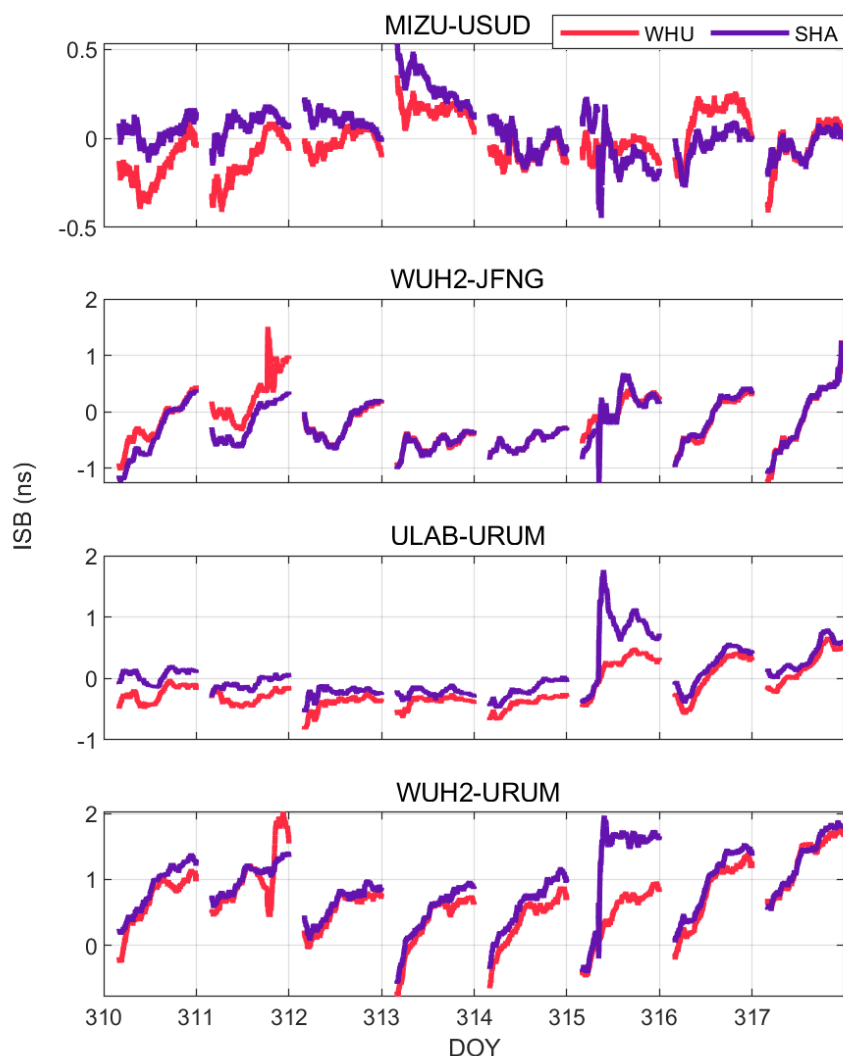


图 3-7 基于不同实时精密产品的站间差 ISB 序列图
Figure 3-7 ISB sequence based on different real-time precise products

表 3-4 基于实时精密产品的站间差 ISB 统计信息表
Table 3-4 Statistics of inter-station bias (ISB) based on real-time precise products

基线名称	编号	基线长度 (km)	分析中 心	天平均 值 (ns)	天内 稳定度(ns)	天间 稳定度(ns)
MIZU-USUD	1	41	WHU	0.01	0.08	0.11
			SHA		0.09	0.12
ULAB-URUM	2	1568	WHU	-0.05	0.18	0.26
			SHA		0.19	0.33
WUH2-URUM	3	2755	WHU	0.79	0.38	0.33
			SHA		0.40	0.30
WUH2-JFNG	4	13	WHU	-0.21	0.32	0.27
			SHA		0.34	0.22

本节通过对 BDS-2 与 BDS-3 联合估计的 ISB 时间序列进行分析,证明 BDS-2 与 BDS-3 之间存在系统性偏差。该偏差与接收机端 BDS-2 与 BDS-3 的硬件延迟差异以及卫星端系统差异相关。对于卫星端系统差异,使用北斗卫星广播星历时 ISB 估值稳定,说明广播星历卫星端系统差异稳定;而基于实时精密产品估计 ISB 存在天内跳变,不同分析中心产品跳变频率和跳变幅度不同,与分析中心钟差估计时基准选取与基准切换有关。在接收机端, BDS-2 与 BDS-3 的硬件延迟差异与接收机类型高度相关,其中 Trimble 和 Javad 类型接收机硬件延迟差异较小,而 Septentrio 接收机硬件延迟差异与另外两类接收机相差较大。接收机硬件延迟存在天内变化且不同接收机类型天内变化存在差异,该天内变化同样会被 ISB 参数吸收。

3.1.3.3 BDS-2/BDS-3 系统偏差对联合定位性能影响

本小节进一步探究 BDS-2/BDS-3 间系统偏差对联合实时定位性能的影响。对于 RT-PPP, 分别使用 SHA 和 WHU 两家的实时轨道钟差产品进行定位评估;对于 PPP 收敛时间的判定为: 连续十个历元水平精度小于 0.3 m、高程精度小于 0.5 m。SPP 使用广播星历进行定位。

对于 RT-PPP 和 SPP, 使用四种策略进行定位解算, 每种策略皆利用 BDS-2/BDS-3 所有卫星进行定位解算。四种策略的区别在于, 策略 1 到策略 3 皆增加 BDS-2/BDS-3 系统间偏差参数估计, 其中 1~3 分别对应参数作为常数估计 (Constant Variable, CV)、随机游走估计(Random Walk, RW)以及白噪声估计 (White Noise, WN), 策略 4 不估计系统间偏差参数(No ISB Estimation, NO)。

图 3-8、图 3-9 分别展示了动态以及静态模式下分别使用 SHA 和 WHU 进行四种策略解算的 RT-PPP 的收敛时间与收敛精度统计。从图中可以看出,增加 ISB 参数估计对基于 SHA 产品的定位性能影响不大,而对 WHU 产品计算的 RT-PPP

性能提升显著,该现象结合图 3-6 可知,是由于 WHU 本身 ISB 量级较大,而 SHA 量级较小。在不估计 ISB 的情况下,WHU 的动态、静态收敛时间分别超过 200min、110min,增加 ISB 参数估计后可分别缩短至 29.5min、15.9min;同时动态收敛精度可由 0.59m 缩短至 0.21m。除此之外,可以看出对于 SHA 产品,使用常数估计可获得较高定位精度,而对于 WHU 产品,使用 CV 进行 ISB 估计会导致收敛精度明显降低。同样结合图 3-6 分析可知,原因是 SHA 钟差产品本身连续性较好且天内变化小,较少发生系统性跳变;而 WHU 产品存在短时频繁钟差基准切换,因此使用常数估计定位效果较差。基于以上分析,在使用任意一家实时产品时,增加 BDS-2/BDS-3 间系统偏差估计能有效提高定位性能,且偏差估计方式应优先选用随机游走方式估计。

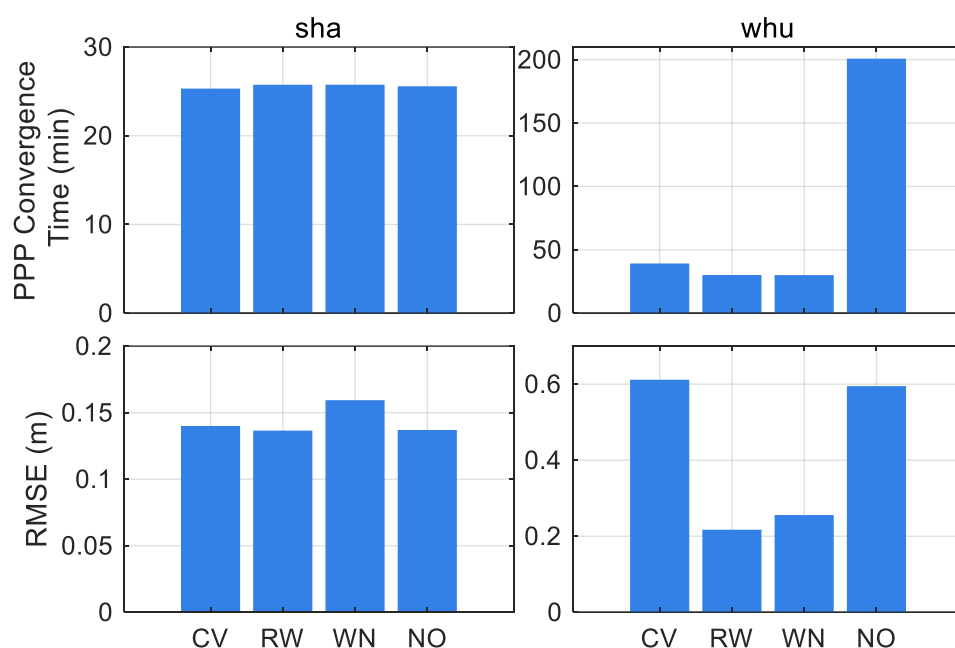


图 3-8 BDS-2/BDS-3 动态 RT-PPP 不同 ISB 估计方式定位性能对比图

Figure 3-8 Comparison of kinematic positioning performance estimated with different BDS-2/BDS-3 ISB estimation strategy

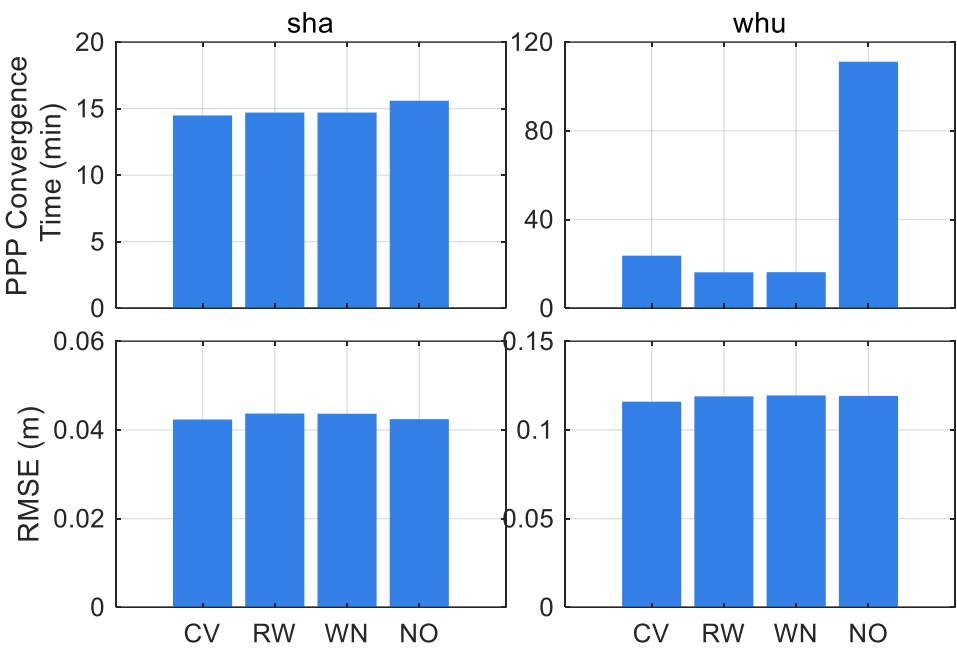


图 3-9 BDS-2/BDS-3 静态 RT-PPP 不同 ISB 估计方式定位性能对比图
Figure 3-9 Comparison of static positioning performance estimated with different BDS-2/BDS-3 ISB estimation strategy

表 3-5 列出了使用不同策略下的伪距定位精度统计结果，从表中可以看出增加 ISB 估计同样能有效提升 SPP 定位性能。使用随机游走噪声估计 BDS-2/BDS-3 系统偏差相对于不估计该参数，定位精度提升达到 0.2 m,提升比例达到 8%。

表 3-5 不同 ISB 估计方式 SPP 定位性能对比表
Table 3-5 Table comparing SPP positioning performance with different ISB estimation methods

Mode	SPP
RMSE (m)	
CV	2.32
RW	2.22
WN	2.25
NO	2.42

3.2BDS-2/BDS-3 联合定位

本节基于以上对 BDS-2/BDS-3 联合定位系统偏差的结论，进一步讨论 BDS-3 系统正式上线后，BDS-2/BDS-3 联合在全球范围内的服务性能。由于 BDS-2 为区域定位系统，因此本文选取全球不同区域监测站，将其分为三大区域分别进行

定位验证与精度统计。区域划分与各区域测站分布由图 3-9 所示。其中，A 区域为包括中国以及周边国家在内的亚洲区域；B 区域为欧非大陆地区；而 C 区域为西半球美洲大陆。图中列出所有测站皆支持 BDS-2 与 BDS-3 卫星观测。需要说明的是，本节中计算 PPP 时精密产品选用 SHA 播发的实时轨道钟差。

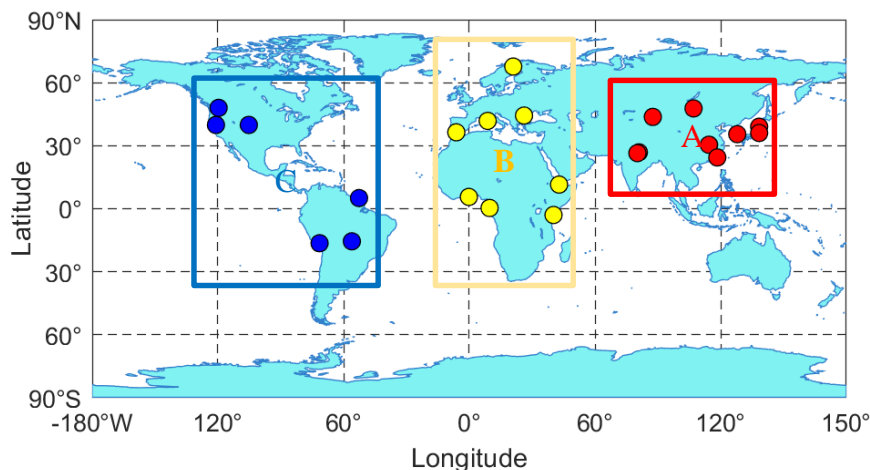


图 3-10 BDS-2/BDS-3 定位性能验证全球测站分布图

Figure 3-10 Global distribution map of BDS-2/BDS-3 positioning performance verification stations

3.2.1 BDS-2/BDS-3 联合卫星星座服务性能

首先对 BDS-2 以及 BDS-2/BDS-3 联合的星座服务性能进行对比分析。图 3-11、图 3-12 分别展示了位于 A、B、C 三个区域的其中一个测站，测站分别为 JFNG、KIRU 以及 BREW。对于单 BDS-2 和 BDS-2/BDS-3 联合在 2023 年 DOY 为 310 天 0 点时刻的卫星天空图以及当天可见卫星时间序列图。图中可以看出，受区域星座设计中 MEO 卫星数较少影响，BDS-2 对于亚洲地区测站可见卫星数达到 8-9 颗，而对于欧非地区可见卫星数平均不超过 5 颗，对于美洲地区 BREW 站全天最高可见卫星数未超过两颗，无法提供 PNT 服务。在 BDS-3 上线后，亚洲地区北斗卫星数量可达 18 颗以上；对于欧非地区可见卫星扩展到 10 颗左右；而对于美洲地区，绝大部分可见卫星为 BDS-3 MEO 卫星，可见卫星数达到 8 颗，BDS-2/BDS-3 联合系统能够提供持续且稳定的 PNT 服务。

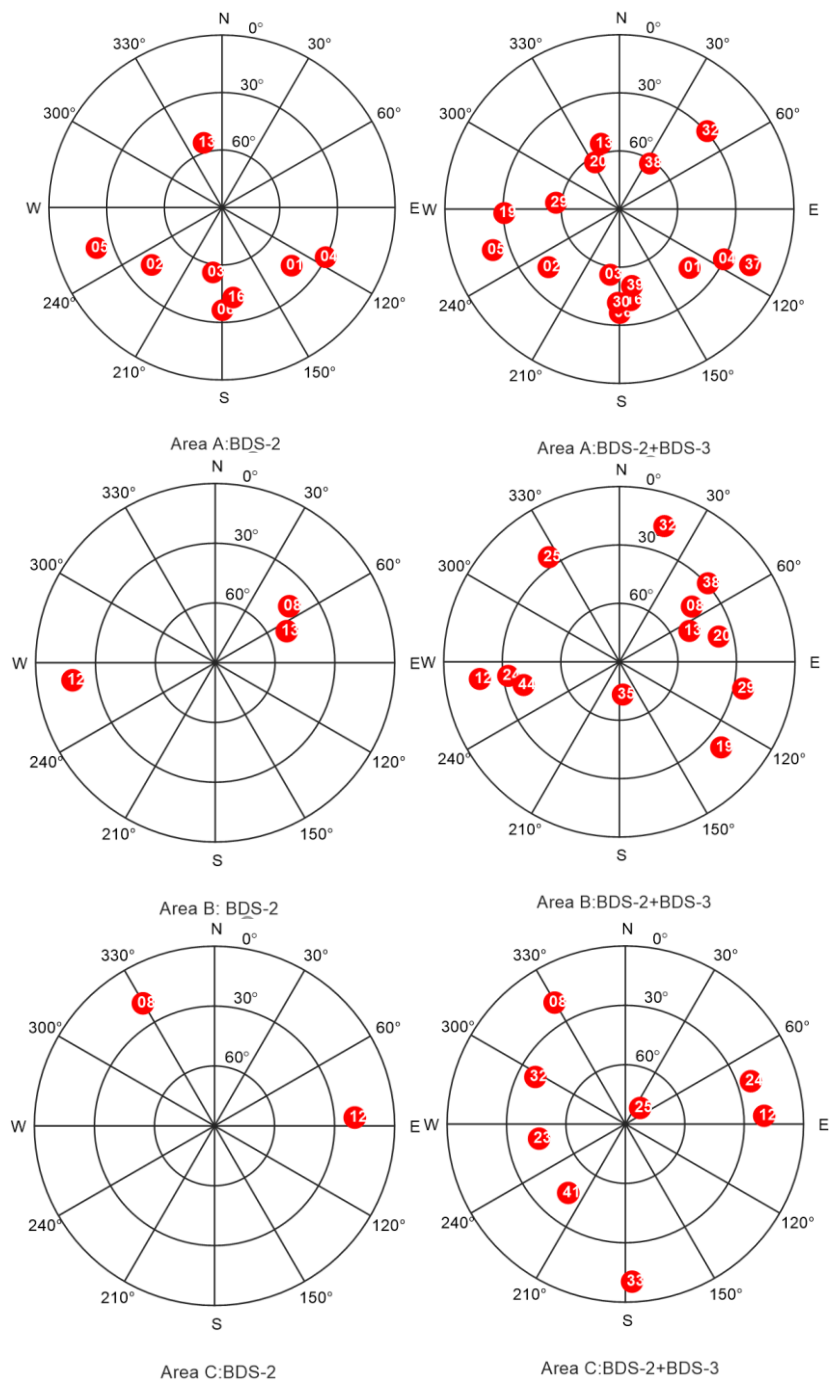


图 3-11 不同地区测站卫星天空图

Figure 3-11 Comparison of satellite sky plots for stations in different regions

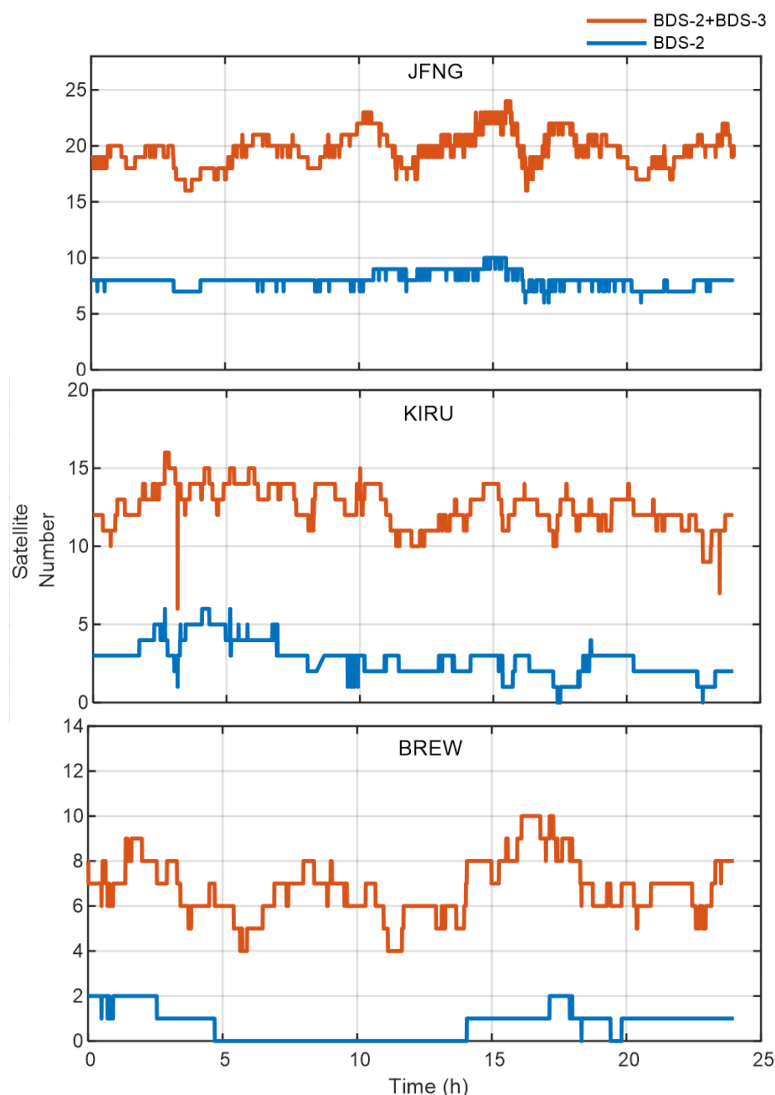


图 3-12 不同地区测站单天内可见卫星数对比图

Figure 3-12 Comparison of the number of visible satellites per day for stations in different regions

表 3-6 列出了位于亚洲地区测站的卫星空间精度(PDOP)、单天平均可见卫星数以及服务连续性。其中服务连续性的计算方法为:以 30s 作为采样间隔,计算卫星数大于等于 5 颗的历元占总历元数的比例。从中可以看出, BDS-2 对亚洲地区平均可见卫星数为 9 颗,而 BDS-2/BDS-3 联合后可见卫星数扩展至 18 颗,对各测站 PDOP 从 2.92 提升至 1.43。对于亚洲地区测站,仅 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 联合皆可提供 100%连续定位服务。

表 3-6 亚洲大陆各测站卫星星座与服务连续性统计表
Table 3-6 Statistics table of satellite constellation and service continuity for stations across the Asian continent

Area A		BDS-2		BDS-2/BDS-3		
Station	PDOP	Satellite Number	availability (%)	PDOP	Satellite Number	availability (%)
JFNG	2.65	8	100	1.42	17	100
WUH2	2.66	10	100	1.39	20	100
ULAB	2.70	10	100	1.28	19	100
URUM	2.66	10	100	1.32	19	100
GAMG	3.26	10	100	1.44	19	100
LCK4	3.14	7	100	1.40	16	100
MIZU	3.59	9	100	1.43	18	100
USUD	2.30	11	100	1.78	16	100
KMNM	3.35	8	100	1.41	17	100
Average	2.92	9	100	1.43	18	100

表 3-7 列出了位于欧非洲地区测站的 PDOP、单天平均可见卫星数以及服务连续性。从表中可以看出，BDS-2 对欧非地区平均可见卫星数仅为 5 颗；其中，只有更靠东边的 DJIG、BUCU 站平均可见卫星数大于 5 颗。受卫星数限制，只有三个测站能够保证全天连续定位服务，而其他测站全天可定位时长比例不超过 35%。在 BDS-2/BDS-3 联合后可见卫星数扩展至 13 颗，对各测站 PDOP 从 6.25 显著提升至 1.67。测站可定位比例也达到了 99.9%。

表 3-7 欧非大陆各测站卫星星座与服务连续性统计表

Table 3-7 Statistics table of satellite constellation and service continuity for stations across the European and African continents

Area B		BDS-2		BDS-2/BDS-3		
Station	PDOP	Satellite Number	availability (%)	PDOP	Satellite Number	availability (%)
ACRG	4.43	4	19.8	1.92	10	99.8
AJAC	6.25	5	32.6	1.75	11	100
BUCU	8.80	6	97.6	1.61	13	100
DJIG	4.00	8	100	1.35	17	100
KIRU	6.95	5	6.3	1.80	13	100
MAL2	5.16	4	100	1.32	17	100
NKLG	8.17	4	18.2	1.94	10	100
Average	6.25	5	53.5	1.67	13	99.9

表 3-8 为美洲地区测站的 PDOP、单天平均可见卫星数以及服务连续性。从中可以看出, BDS-2 对美洲地区所有测站单天任意时段平均可见卫星数都小于 4 颗, 完全不具备位置服务能力; 在 BDS-2/BDS-3 联合后可见卫星数扩展至 9 颗, 对各测站 PDOP 可达 2.32。测站可定位比例也达到了 99.6%。

表 3-8 美洲大陆各测站卫星星座与服务连续性统计表

Table 3-8 Statistics table of satellite constellation and service continuity for stations across the American continent

Area C		BDS-2		BDS-2/BDS-3		
Station	PDOP	Satellite Number	availability (%)	PDOP	Satellite Number	availability (%)
AREG	-	<4	0	2.20	11	100
BREW	-	<4	0	2.48	7	97.8
CUIB	-	<4	0	2.83	8	100
KOUG	-	<4	0	2.02	10	100
NIST	-	<4	0	2.24	8	100
QUIN	-	<4	0	2.16	8	100
Average	-	<4	0	2.32	9	99.6

3.2.2 BDS-2/BDS-3 联合基本导航服务性能

在 BDS-2/BDS-3 联合 SPP 定位时考虑系统偏差,与单 BDS-2、单 BDS-3 在全球范围内的 SPP 服务性能进行了对比。表 3-9 对分布于各区域内的测站分别统计了 SPP 定位精度。从中可以看出,基于 BDS-2 卫星的 SPP 仅能满足亚洲地区 11.1 m 精度的服务性能,对于欧非地区连续定位服务约为 15 m。对于美洲地区, BDS-2 可见卫星数无法满足定位最小卫星数要求。与 BDS-2 系统相比, BDS-3 在全球范围内伪距定位精度显著提升,对亚洲地区 SPP 定位精度从 11.1 m 提升至 2.5 m; 欧非大陆从 14.6 m 提升至 2.66 m; 在美洲地区也可实现全天连续精度为 3.24 m 的基本导航定位服务。在扩充 BDS-3 星座后, BDS-2/BDS-3 联合服务性能获得进一步提升,对亚洲地区 SPP 定位精度提升至 2.22 m; 欧非大陆提升至 2.42 m; 在美洲地区也可实现全天连续精度为 3.15 m 的基本导航定位服务。整体来说, BDS-3 在全球范围内平均定位精度达到 2.80 m, BDS-2/BDS-3 联合基本导航定位在全球平均定位精度达到 2.60 m。

表 3-9 伪距单点定位性能对比表
Table 3-9 Table comparing of SPP performance

Area	A	B	C
	RMSE (m)	RMSE (m)	RMSE (m)
BDS-2	11.1	14.6	-
BDS-3	2.50	2.66	3.24
BDS-2/BDS-3	2.22	2.42	3.15

3.2.3 BDS-2/BDS-3 联合实时精密定位性能分析

在 BDS-2/BDS-3 联合进行 RT-PPP 解算时考虑系统偏差, 与 BDS-2、BDS-3 服务性能进行对比。表 3-10 列出了两种卫星星座不同地区的动态、静态服务统计精度。从表中可以看出, BDS-3 相对 BDS-2 定位精度提升显著, 亚洲地区动、静态收敛时间分别提升 118.7 min、60.6 min; 定位精度分别提升 0.48 m、0.10 m。欧非地区, 动、静态定位收敛时间分别提升 178.1min 和 157.2 min, 定位精度分别提升 0.6 m、0.27 m。美洲地区 BDS-2/BDS-3 联合定位动静态可以分别在 68.9 min、25.0 min 完成收敛, 可以实现动态 0.44 m、静态 0.07m 定位精度。BDS-3 在全球范围内动/静态定位精度分别达到 0.3 m/0.05 m, 收敛时间达到 43 min/18.9 min。BDS-2/BDS-3 联合定位精度在其基础上可进一步提升动态定位服务性能, 在全球平均定位精度动态达到 0.23 m; 平均收敛时间分别达到 35.0 min, 相比 BDS-3 提升 23.3%、18.6%。

表 3-10 精密单点定位性能对比表
Table 3-10 Table comparing PPP (Precise Point Positioning) performance

Area		A		B		C	
Mode		Converge	RM	Converge	RM	Converge	RMS
		nce time (min)	SE (m)	nce time (min)	SE (m)	nce time (min)	E (m)
K	BDS-2	146.7	0.68	210.3	0.87	-	-
	BDS-3	28.0	0.20	32.2	0.27	68.9	0.44
	BDS-2/BD S-3	25.7	0.14	26.0	0.17	53.7	0.38
S	BDS-2	73.0	0.14	176.5	0.31	-	-
	BDS-3	12.4	0.04	19.3	0.04	25.0	0.07
	BDS-2/BD S-3	14.7	0.04	19.2	0.04	24.1	0.06

3.3 BDS-2/BDS-3 联合广域差分星基增强

由 3.2 节可知, BDS-2 基本导航服务在亚太区域仅能提供 10 m 左右定位精度, 这限制了其在高精度定位领域的应用, 为此, BDS-2 广域差分增强导航服务可通过北斗 GEO 卫星向授权用户播发广域差分星基增强参数和完好性信息以提高其服务性能 (陈俊平 et al., 2018; 陈俊平 et al., 2019; 张益泽 et al., 2019; 房成贺 et al., 2019)。在 BDS-3 系统建成后, 广域差分增强服务同样扩展至 BDS-3。本节首先对北斗广域增强定位中的等效钟差、轨道改正数、相位分区综合改正数产品进行介绍。在考虑系统偏差的前提下, 进一步分析 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位性能。

3.3.1 北斗广域差分增强改正数

3.3.1.1 等效钟差与轨道改正数

下图 3-12 表示了轨道各方向误差对用户测距误差的影响。其中, 轨道径向方向误差对用户测距影响 $\Delta dR(z')$ 可表示为:

$$\Delta dR(z') = (1 - \cos z') dR \quad (3-17)$$

而轨道法向和切向综合误差对用户测距影响可表示为:

$$dR^\perp(z') = \sin(z') dR^\perp \quad (3-18)$$

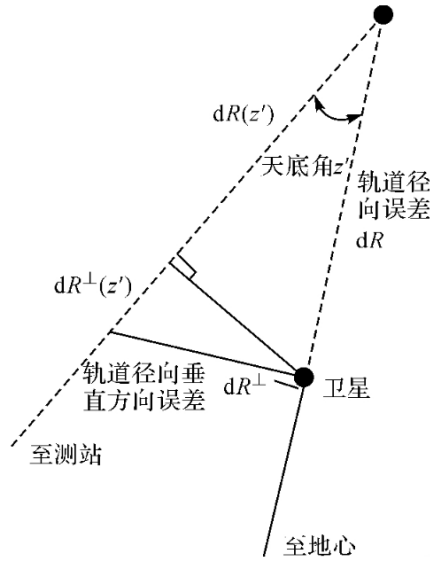


图 3-13 轨道各分量误差对测站测距影响示意图

Figure 3-13 Each component of the orbit errors impact on the ranging of a station

依据北斗卫星星座参数, 卫星轨道径向在垂直方向上的误差对于不同天底角引起的测距误差站轨道误差, MEO 最大达到 23%, GEO/IGSO 卫星最大可达 15%。(陈俊平 et al., 2017)。因此对于更高精度的广域差分定位需求, 需要在广域差分中考虑轨道在径向误差以及除径向外其他方向上的误差。

在系统端，固定站坐标后，使用相位历元间差分观测方程，可以计算历元间轨道钟差改正数的变化量；使用伪距双频无电离层组合观测值可以获得轨道钟差改正数的绝对值。两者合并建立滑动窗口即可获得各历元卫星等效钟差与轨道改正数(陈俊平 et al., 2017)。图 3-13 与图 3-14 分别为 BDS 卫星等效钟差与轨道改正数序列。

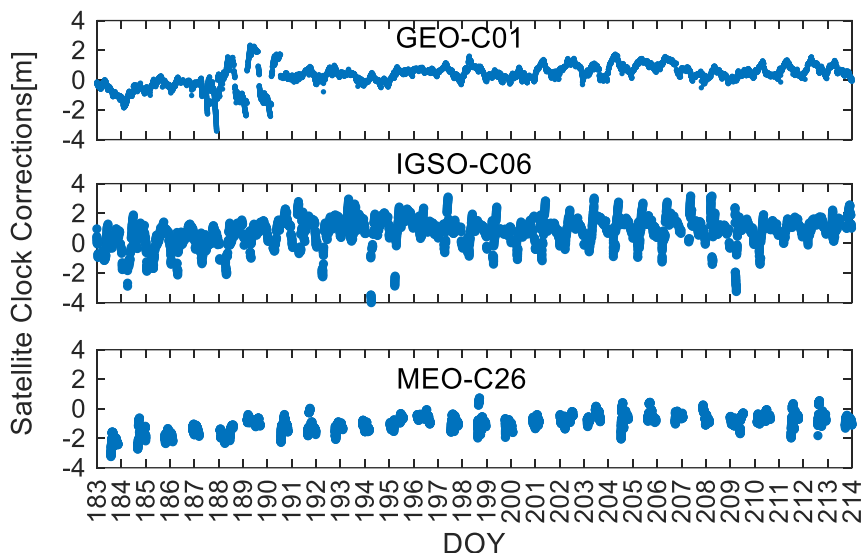


图 3-14 等效钟差改正数时间序列图

Figure 3-14 Time series of Equivalent Clock Bias Correction

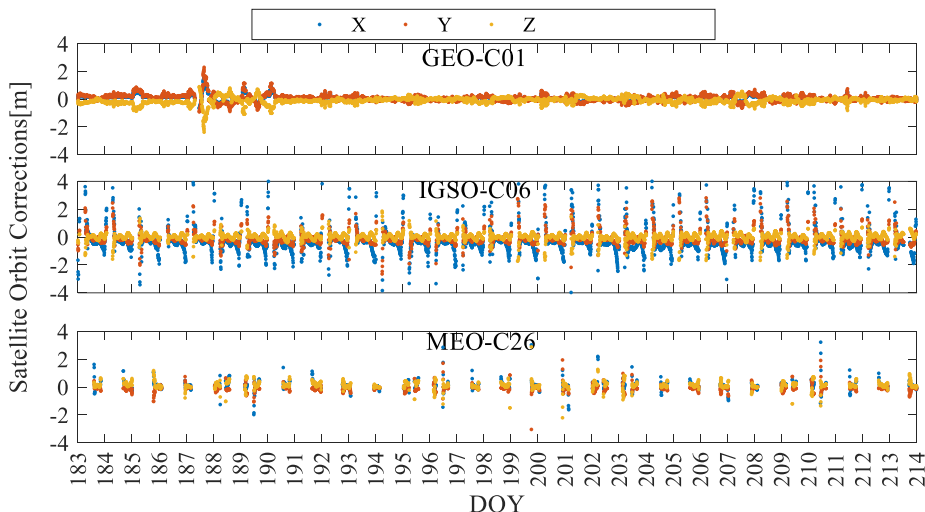


图 3-15 轨道改正数时间序列图

Figure 3-15 Time series of orbit corrections

3.3.1.2 分区综合改正数

在以上两种改正数改正的基础上，两个相近测站相位残差包含相似的剩余轨道误差、钟差误差、对流层误差以及电离层误差，因此其变化趋势高度线性相关(张益泽, 2017)。北斗系统端使用系统监测站，计算北斗卫星各个频点伪距、相

位残差，并将其播发给用户，用户依据等效钟差改正数、轨道改正数其附近测站分区综合改正数，使用广播星历即可进行精密定位 (陈俊平 et al., 2019)。图 3-15 为 18 个北斗监测站分布。将服务范围设置为 500km 时，可基本覆盖整个中国区域。图 3-16 展示了分区综合改正数的时间序列。

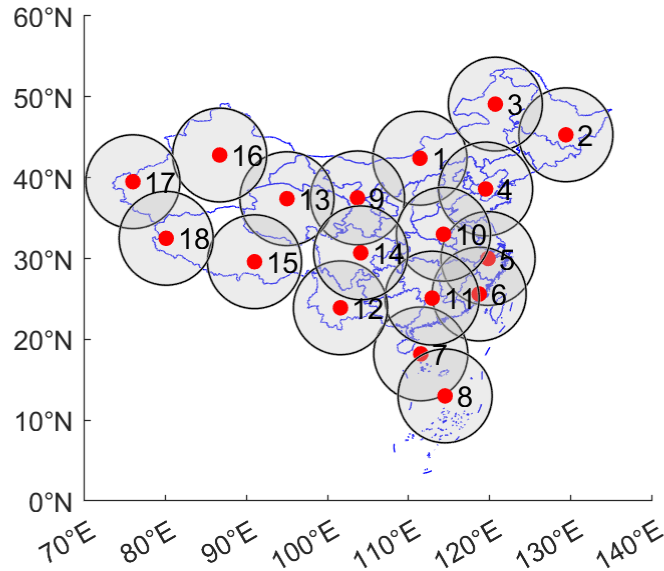


图 3-16 分区监测站与服务范围示意图

Figure 3-16 Schematic map of regional monitoring stations and service coverage

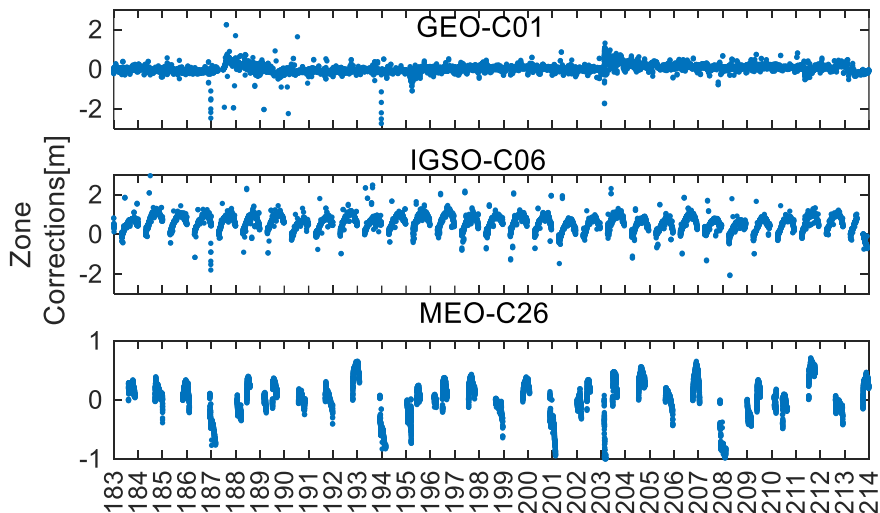


图 3-17 分区综合改正数时间序列图

Figure 3-17 Time series of zone corrections

3.3.2 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位模型

3.3.2.1 单频半法定位函数模型

使用等效钟差、轨道改正数、分区综合改正数，式(2-10)可进一步表达为：

$$\begin{cases} P_i^S = \rho + c \cdot (dt_i - dt_i^S) + T + I_i^S + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{zone_corr} + \varepsilon_{P_1} \\ \frac{P_i^S + L_i^S}{2} = \rho + c \cdot (dt_i - dt_i^S) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \frac{\lambda_i^S \cdot N_i^S}{2} + \delta L_{zone_corr} + \varepsilon_{\frac{P_i^S + L_i^S}{2}} \end{cases} \quad (3-19)$$

上式中， I_i^S 为电离层延迟，本文中，北斗广域差分增强系统中播发的 GIVE 电离层格网计算(房成贺 et al. 2019, 马岳鑫 et al., 2021); δ_{orb} 为轨道改正数; δ_{ESC} 为等效钟差改正数; δP_{zone_corr} 为伪距分区综合改正, δL_{zone_corr} 为分区综合改正数。其他变量与式(3-2)中变量定义一致。

3.3.2.2 双频消电离层组合函数模型

使用等效钟差、轨道改正数、分区综合改正数，式(2-9)可进一步表达为：

$$\begin{cases} P_{IF}^S = \rho + c \cdot (dt_{IF} - dt_{IF}^S) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_{IF}} \\ L_{IF}^S = \rho + c \cdot (dt_{IF} - dt_{IF}^S) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{IF}^S \cdot N_{IF}^S + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases} \quad (3-20)$$

上式中各变量定义与式(3-2)、(3-16)中变量定义一致。

3.3.3 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位性能

3.3.3.1 BDS-2/BDS-3 系统偏差对联合分区改正增强性能影响

由 3.1.3 节中分析可知，站间差分的 ISB 估值存在天内变化，尤其是当两接收机类型不同时，ISB 天内变化更为显著。因此为了分析接收机端硬件延迟变化对分区综合改正定位影响，本节同样考虑在 BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位中加入 ISB 参数估计，此时以双频无电离层组合为例，待估参数可表达为：

$$dx = [\delta r, \delta dt_{r,IF}, \hat{N}_{IF}^{k,S}, \theta_{BDS-2/BDS-3}] \quad (3-21)$$

需要说明的是，由于分区综合改正数中已经包含了分区服务半径内对流层延迟误差的残余误差，故与传统精密单点定位模型相比，无需再对对流层延迟误差的湿分量进行参数估算(张益泽，2017)。

本节使用 11 个北斗监测站附近的测站 T01-T11 进行定位性能测试。这些测站分别使用了 01、06、12 以及 14 分区播发的分区综合改正数。对于北斗广域差分增强定位，双频动静态定位收敛条件皆设置为连续 10 个历元水平误差小于 0.5 m，垂直误差小于 0.7 m。对于单频定位，动静态定位收敛条件皆设置为连续 10 个历元水平误差小于 0.7 m，垂直误差小于 1.0 m。

在 BDS-2/BDS-3 联合分区定位进行 ISB 估计并于无 ISB 估计定位结果进行对比,结果列于表 3-11。增加 ISB 参数估计对于双频动态定位服务性能提升幅度不大,定位精度提升 4.5%,收敛时间提升 3.7%,对其他定位模式同样由提升,但提升幅度较小。

表 3-11 联合广域差分增强定位时是否估计 ISB 性能对比表

Table 3-11 Performance comparison table for ISB estimation in satellite-based augmentation positioning

Mode		Kinematic		Static	
Frequency		RMSE (m)	Converge nce time (min)	RMSE (m)	Convergen e time (min)
Dual	NO ISB	0.44	35.5	0.22	21.6
	With ISB	0.42	34.2	0.21	20.5
Single	NO ISB	0.83	39.8	0.29	34.5
	With ISB	0.83	39.2	0.29	34.2

3.3.3.2单频定位性能评估

在增加 ISB 参数估计后,本小节进一步对 BDS2/BDS-3 联合单频广域差分增强定位性能相对于 BDS-2 的提升进行统计分析。下图为两种模式 T01 站单天动态定位误差序列图。从图中可以看出增加 BDS-3 卫星后广域差分增强定位性能提升显著。表 3-12 列出了两种模式下动静态定位统计,从中可以看出,BDS2/BDS-3 联合定位动态收敛时间相比 BDS-2 缩短超过 80 min,定位精度提升 29%; BDS2/BDS-3 联合定位静态收敛时间相比 BDS-2 缩短超过 50 min,定位精度提升达到 44%。

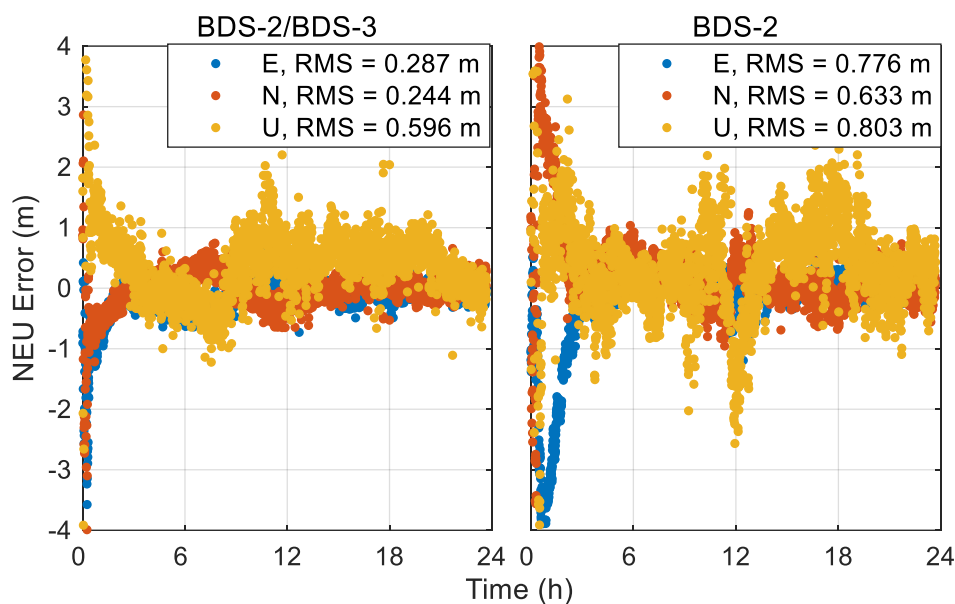


图 3-18 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 单天单频动态分区定位误差序列图

Figure 3-18 Single-frequency kinematic error sequence plot for BDS-2 and BDS-2/BDS-3 zone correction positioning

表 3-12 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 单频分区定位精度统计表

Table 3-12 Statistical table of single-frequency zone positioning accuracy for BDS-2 and BDS-2/BDS-3

Mode	Kinematic		Static	
	RMSE (m)	Convergence time (min)	RMSE (m)	Convergence time (min)
BDS2	1.17	120.1	0.52	97.4
BDS2/BDS-3	0.83	39.2	0.29	34.2

3.3.3.3 双频定位性能评估

类似地，对 BDS2/BDS-3 联合双频广域差分增强定位性能相对于 BDS-2 的提升进行统计分析。下图为两种模式 T01 站动态单天误差序列图。从图中可以看出扩展 BDS-3 卫星后对 E 方向定位精度提升最为明显。表 3-13 列出了两种模式下动静态定位统计。从表中可以看出，BDS2/BDS-3 联合定位动态、静态收敛时间相比 BDS-2 分别缩短 5.8 min、5.2 min；动态定位精度提升达到 30%，静态定位精度提升达到 16%。

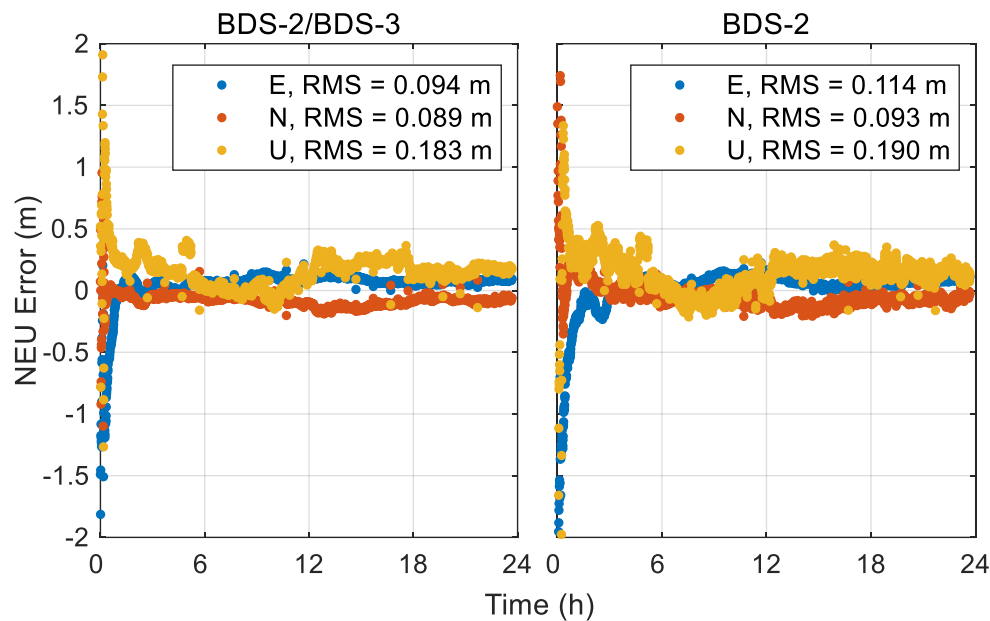


图 3-19 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 单天双频动态分区定位误差序列图

Figure 3-19 Dual-frequency kinematic error sequence plot for BDS-2 and BDS-2/BDS-3 zone correction positioning

表 3-13 BDS-2 与 BDS-2/BDS-3 双频分区定位精度统计表

Table 3-12 Statistical table of dual-frequency zone positioning accuracy for BDS-2 and BDS-2/BDS-3

Mode	Kinematic		Static	
	RMSE (m)	Convergence time (min)	RMSE (m)	Convergence time (min)
BDS2	0.60	40.0	0.25	25.8
BDS2/BDS-3	0.42	34.2	0.21	20.5

3.4 本章小结

(1) 本章针对 BDS-2 与 BDS-3 联合定位数据处理中二者的系统偏差，基于不同实时轨道钟差产品对该偏差进行估计，通过实验分析得出该系统偏差由用户接收机端硬件延迟差异以及卫星端系统差异两部分构成。其中接收机硬件延迟差异与接收机类型高度相关。本文统计分析了 Trimble Alloy 、Javad TRE3 和 Septentio POLARX5 的 ISB 时间序列，从中可以看出 Trimble 和 Javad 接收机的 BDS-2/BDS-3 硬件延迟差异趋于一致，而 Septentio 与另外两家差异较大。对站间差后的 ISB 时间序列进行分析，可以看出接收机硬件延迟存在天内变化，相同类型接收机天内变化一致，而不同类型接收机之间该变化存在显著差异。使用北斗卫星广播星历估计的 ISB 时间序列稳定；而使用不同分析中心的实时产品 ISB

时间序列有不同程度跳变。可以看出各分析中心钟差基准选取以及估计测站选取存在差异,且钟差基准存在天内切换。

(2) BDS-2/BDS-3 联合系统偏差对 BDS-2/BDS-3 定位收敛具有显著影响。在估计 ISB 参数后, SPP 定位精度从 2.42 m 提高至 2.22 m, 提升达到 8.0%。基于 WHU 实时产品, 动态 RT-PPP 定位精度从 0.59 m 提升至 0.21 m, 收敛时间从 200.0 min 缩短至 29.5 min; 静态 RT-PPP 收敛时间从 110.0 min 缩短至 15.9 min。统计分析表明, 在使用任意一家实时产品时, 增加 BDS-2/BDS-3 间系统偏差估计能有效提高定位性能, 且偏差估计方式应优先选用随机游走方式估计。

(3) BDS-3 显著优化了 BDS 导航系统在全球范围内的几何构型。BDS-2/BDS-3 联合星座相对于 BDS-2 星座, 在亚洲地区平均可见卫星数从 9 颗提升至 18 颗, PDOP 从 2.92 提升至 1.43; 对于欧非大陆地区可见卫星数从 5 颗扩展至 13 颗, PDOP 从 6.25 显著提升至 1.67; 对美洲地区所有测站单天任意时段平均可见卫星数从小于 4 颗扩展至 9 颗, 平均 PDOP 达到 2.32。

(4) 在考虑系统偏差后, 将 BDS-2/BDS-3 联合定位性能与 BDS-2 定位性能进行对比分析。结果表明, 对于亚洲地区 BDS-2 与 BDS-3 联合定位显著缩短 RT-PPP 收敛时间, 其中动、静态收敛时间分别提升 121.5 min、58.6 min; 定位精度分别提升 0.54 m、0.10 m。欧非地区, 动、静态定位收敛时间分别提升 184.3 min 和 157.3 min, 定位精度分别提升 0.7 m、0.27 m; 美洲地区 BDS-2/BDS-3 联合定位动静态可以分别在 53.7 min、24.1 min 完成收敛, 可以实现动态 0.38 m、静态 0.06 m 定位精度。在扩展 BDS-3 之后, BDS-2/BDS-3 联合 RT-PPP 定位精度在全球平均定位精度动静态分别达到 0.23 m、0.05 m; 平均收敛时间分别达到 35.0 min, 19.2 min; BDS-2/BDS-3 联合伪距定位在全球平均定位精度达到 2.6 m。

(5) 对于北斗广域差分增强定位服务, 在考虑系统偏差后, BDS-2 与 BDS-3 联合广域差分增强定位服务性能有小幅提升。BDS-2/BDS-3 联合广域差分增强定位相对于 BDS-2, 单频定位动态收敛时间缩短超过 80 min, 定位精度提升 29%; 静态收敛时间缩短超过 50 min, 定位精度提升达到 44%。双频动态、静态收敛时间相比 BDS-2 分别缩短 5.8 min、5.2 min; 动态定位精度提升达到 30%, 静态定位精度提升达到 16%。

第4章 基于 BDS-3 全球短报文链路实时多系统 PPP 模糊度固定算法研究

上一章介绍了北斗系统中 BDS-2/BDS-3 卫星联合精密定位服务。而多系统融合定位服务与北斗单系统相比,在卫星几何构型上具有明显优势,有助于模糊度的快速收敛(Lou et al., 2016; An et al., 2020)。如果服务端除轨道钟差之外能够播发相位小数偏差产品,可进一步缩短收敛时间,提升定位精度(Shu B et al., 2021)。

目前获取全球多系统 RT-PPP 的方式总体上有两种,一种是通过网络接收 IGS 分析中心播发的实时改正数;另一种则是购买商业公司提供的星基精密定位服务。第一种方式成本低廉但依赖于网络服务,在沙漠、海洋等无网络覆盖区域改正数获取会受到严重限制;第二种方式可通过卫星直接获取改正,但其精密服务成本较高。北斗三号全球短报文系统作为一种公开卫星播发手段,摆脱了对互联网的依赖,为实时高精度定位产品播发与接收提供了一条新的渠道。然而短报文通讯自身的带宽限制、播发频率为多系统 RT-PPP 带来了诸多挑战,如何基于 SMC 实现多系统 PPP-AR 更是研究的难点。除此之外,数据丢包、延迟等也给基于短报文的精密定位带来了更高要求和挑战。

据此,本章提出一种适用于北斗三号全球短报文系统的实时多系统 PPP-AR 方法。该方法一方面克服北斗短报文中通讯带宽和播发频度的限制,另一方面在短报文存在通讯中断、数据丢包的情况下依旧能够保证定位服务连续性以及定位精度。本章首先对实时多系统相位小数偏差估计方法进行简单介绍;在此基础上,提出一整套适用于短报文系统的改正数生成、编码、播发和客户端使用方法。应用本文提出的方法,结合短报文通讯设备,对其服务性能进行了详细论证。

4.1 实时多系统相位小数偏差估计方法

本章基于双频无电离层组合宽窄巷相位小数偏差方式进行用户端 PPP-AR 定位。因此本节首先介绍系统端宽窄巷 UPD 估计方法。

对于宽巷模糊度,可以通过式(2-13)构建。窄巷模糊度则可以通过无电离层组合和宽巷模糊度组合构建,公式可表示为:

$$\begin{cases} \hat{N}_{r,WL}^S = \frac{L_{r,i}^S}{\lambda_i} - \frac{L_{r,j}^S}{\lambda_j} - \frac{(f_i P_{r,i}^S + f_j P_{r,j}^S)(f_i - f_j)}{c(f_i + f_j)} \\ \hat{N}_{r,NL}^S = \frac{\lambda_{IF} \hat{N}_{r,IF}^S}{\lambda_{NL}} - \frac{\lambda_i \hat{N}_{r,WL}^S}{\lambda_j - \lambda_i} \end{cases} \quad (4-1)$$

式中, $\hat{N}_{r,WL}^S$ 、 $\hat{N}_{r,NL}^S$ 分别表示浮点宽巷、窄巷模糊度; $\hat{N}_{r,IF}^S$ 为无电离层组合浮点模糊度; λ_i 、 λ_j 与 f_i 、 f_j 分别表示 i 、 j 频点的波长与频率。为了进一步消除伪

距硬件延迟和 PCO 改正对宽巷模糊度的影响，可将其进行如下改正：

$$\bar{N}_{r,WL}^s = \hat{N}_{r,WL}^s + \frac{f_i b_i + f_j b_j}{c \cdot (f_i^2 - f_j^2)} + \frac{2 \cdot f_i f_j (PCO_i - PCO_j)}{c \cdot (f_i + f_j)} \quad (4-2)$$

其中， $\bar{N}_{r,WL}^s$ 为修正后的宽巷浮点模糊度， b 为伪距硬件延迟， pco 为各频点 pco 在径向的投影。

由式(4-2)可知，宽巷浮点模糊度由宽巷整周模糊度、接收机硬件 UPD、卫星硬件 UPD 三部分构成。以宽巷模糊度为例，GPS, Galileo, BDS 三系统的 UPD 估计方程可表示为：

$$\begin{cases} \hat{N}_{r,WL}^{s,g} = N_{r,WL}^{s,g} + UPD_{r,g} - UPD^{s,g} \\ \hat{N}_{r,WL}^{s,e} = N_{r,WL}^{s,e} + UPD_{r,e} - UPD^{s,e} \\ \hat{N}_{r,WL}^{s,c} = N_{r,WL}^{s,c} + UPD_{r,c} - UPD^{s,c} \end{cases} \quad (4-3)$$

上式中， $\hat{N}_{r,WL}^{s,k}$ 、 $N_{r,WL}^{s,k}$ 分别表示 k 系统中卫星的浮点、整数宽巷模糊度；。此处需要特别说明的是，实际上，相位硬件延迟的整周部分同样被 $N_{r,WL}^{s,g}$ 吸收，因此，UPD 参数实际为相位硬件延迟的小数部分。以 GPS 系统为例，上式可进一步表达为

$$\Delta N_r^g = \hat{N}_{r,WL}^{s,g} - N_{r,WL}^{s,g} = UPD_{r,g} - UPD^{s,g} \quad (4-4)$$

假设同一时刻有 n 个测站，每个测站可观测 m 颗卫星，则观测方程可表达为：

$$\begin{bmatrix} \Delta N_1^g \\ \Delta N_2^g \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta N_n^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 1 & -1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} UPD_{1,g} \\ UPD_{2,g} \\ \vdots \\ UPD^{s,1} \\ UPD^{s,2} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

利用公式(4.16)中数学模型对宽巷 UPD 进行估计时，首先需要确定一组比较准确的 UPD 初值(潘宗鹏., 2018)。窄巷模糊度固定方式与宽巷类似。将轨道钟差及其配套的相位小数偏差产品播发给用户即可实现模糊度固定的精密单点定位解算。对于用户端算法，安排在 4.2.4 节进行详细介绍。

4.2 基于全球短报文链路的精密单点定位模糊度固定算法

4.2.1 改正数生成方法

4.2.1.1 轨道钟差改正数参数压缩方法

在 1.2.3 节中，对 GSMC 通讯带宽以及 RTCM 通讯协议中改正数带宽做了详细介绍，阐明了使用 GSMC 播发精密定位改正数的难点与局限性。据此，为了减少改正数的播发个数并节约 GSMC 播发带宽，本节首先提出将 RTCM 中 SSR 改正数转换为 OSR 改正数的方法。

SSR 轨道钟差改正数包括轨道径向、切向以及法向误差以及卫星钟差。而对用户定位影响最大的为改正数在径向的投影(Yang et al., 2021)。据此, 首先利用短报文通讯的双向通讯机制, 用户端在发送精密位置服务申请时, 先通过 Bancroft 算法获取其自身概略位置(Bancroft et al., 1985; 侯鹏宇 et al., 2018), 并将该坐标通过北斗短报文系统发送至服务端。表 4-1 规定了用户端向服务端播发请求时的编码格式, 内容包含了请求时间信息、ECEF 下的概略坐标以及不同系统的频点信息。服务端利用用户端的概略坐标位置, 将实时 SSR 改正投影到用户视线方向上, 转为 OSR 改正数, 从而将轨道钟差参数个数从 4 个压缩为 1 个。以上整体处理流程如图 4-1 所示。

表 4-1 GSMC 用户端请求编码格式说明
Table 4-1 GSMC Encoded information for user positioning request

Parameter	Value accuracy	Effective-range (decimal)	Size
GPSWeek	1 (week)	0-4095	12
GPSSec	1 (s)	0-604800	20
X(ECEF)	1 (m)	± 9999999	25
X(ECEF)	1 (m)	± 9999999	25
X(ECEF)	1 (m)	± 9999999	25
GPS Frequency	1	0-2 (0:L1/L2; 1:L1/L5; 2:L2/L5)	2
BDS Frequency	1	0-2 (0:B1I/B2a; 1:B1I/B3I; 2:B2a/B3I)	2
Galileo Frequency	1	0-2 (0:E1/E5a; 1:E1/E6; 2:E5a/E6)	2
Total			113

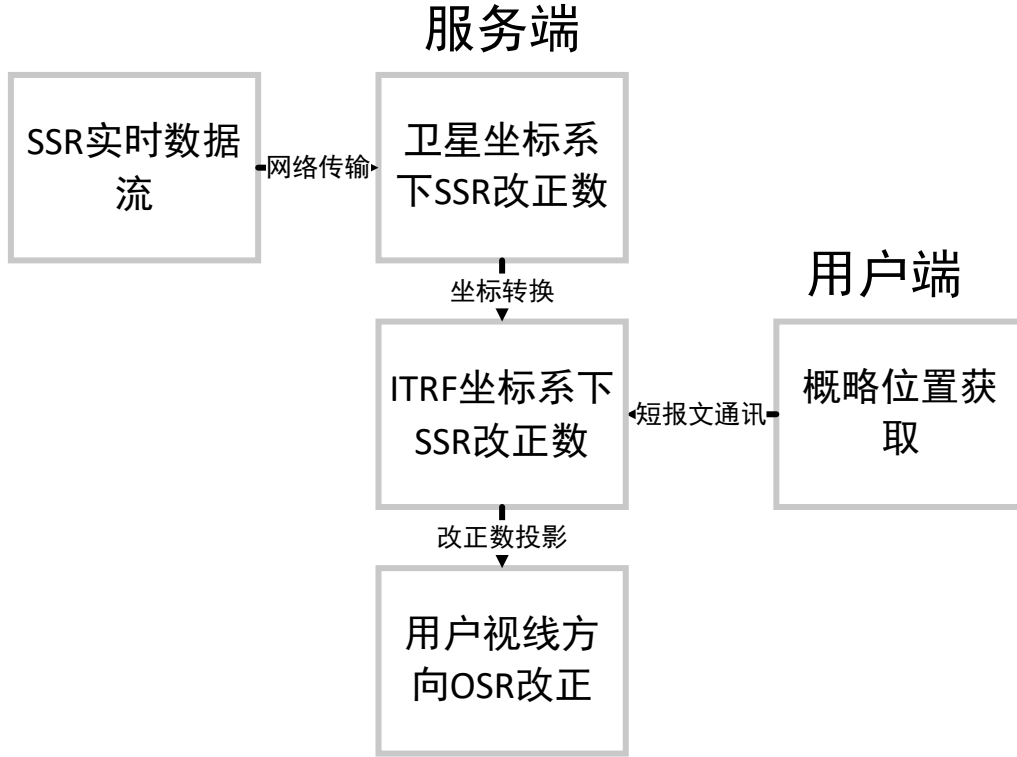


图 4-1 服务端 SSR 改正数改为 OSR 改正数处理流程

Figure 4-1 Processing flow for changing server-side SSR corrections to OSR corrections

接下来对 SSR 转 OSR 具体方法进行推导。实时 SSR 轨道改正数基于卫星本体坐标系，由径向、切向和法向改正三个参数 $(\delta_r^s, \delta_a^s, \delta_c^s)$ 及其一阶线性变化项 $(\dot{\delta}_r^s, \dot{\delta}_a^s, \dot{\delta}_c^s)$ 组成(Chen et al., 2022b)。在卫星坐标系下的改正向量 δ^s 可以表达为：

$$\delta^s = \begin{bmatrix} \delta_r^s \\ \delta_a^s \\ \delta_c^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\delta}_r^s \\ \dot{\delta}_a^s \\ \dot{\delta}_c^s \end{bmatrix} \times (t - t_0) \quad (4-6)$$

其中 t 和 t_0 分别表示当前时刻和 SSR 的历元时刻。

实时 SSR 中的钟差改正由二阶多项式系数 C_0 , C_1 , 和 C_2 构成。钟差改正 δC^s 可以通过下式计算：

$$\delta C^s = C_0 + C_1 \times (t - t_0) + C_2 \times (t - t_0)^2 \quad (4-7)$$

将轨道改正从卫星本体坐标系转换至地心地固(ECEF)坐标系，转换公式为：

$$\delta X^s = [\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_a, \mathbf{e}_c] \cdot \delta^s \quad (4-8)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{e}_r = \mathbf{e}_a \times \mathbf{e}_c \\ \mathbf{e}_c = \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|} \\ \mathbf{e}_a = \frac{\dot{\mathbf{r}}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \end{cases} \quad (4-9)$$

δX^s 为 ECEF 下的轨道改正数； $\mathbf{d} \mathbf{r}$ 和 $\dot{\mathbf{r}}$ 分别代表 ECEF 框架下的卫星位置和速度向量，可以通过广播星历计算得到。

ECEF 框架下的 OSR 改正数可以进一步被表达为：

$$\delta OSR^s = c \cdot \delta C^s - \mathbf{e} \cdot \delta \mathbf{X}^s \quad (4-10)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{e} = \frac{\mathbf{P}^s - \mathbf{P}_r}{|\mathbf{P}^s - \mathbf{P}_r|} \quad (4-11)$$

另外， \mathbf{e} 为用户占至卫星的方向向量； c 代表光速。 \mathbf{P}^s 和 \mathbf{P}_r 分别表示卫星和接收机在 ECEF 下的位置向量。

4.2.1.2 OSR 改正数拟合预处理方法

按照 Geng、Gu 等在文献中提出的方法(Geng et al., 2023; Gu et al., 2023)，上小节中计算生成的用户视向 OSR 改正数将被直接编码并播发给用户。而当北斗全球短报文发生丢包、延迟等情况时，OSR 改正数的精度会随着通讯中断的时长增加而迅速降低。因此，为了能够进一步扩展 OSR 改正数的可用时长，本节提出使用最新获取的若干历元 OSR 改正来进行多项式拟合的方法。本章使用 CNES 分析中心实时播发的 SSR 改正数进行算法设计与数据处理，包括轨道、钟差以及相位 UPD 改正。

为了确定适合的拟合阶数，首先需要确定 OSR 改正数的短期变化趋势。首先将轨道钟差转化为 OSR 改正数后对其时间序列进行分析。图 4-2 展示了各个系统单颗卫星的 OSR 改正数时间序列。从图中可以看出其变化在短期内具有明显线性特征，此外各系统卫星在广播星历更新时会发生相应的跳变。

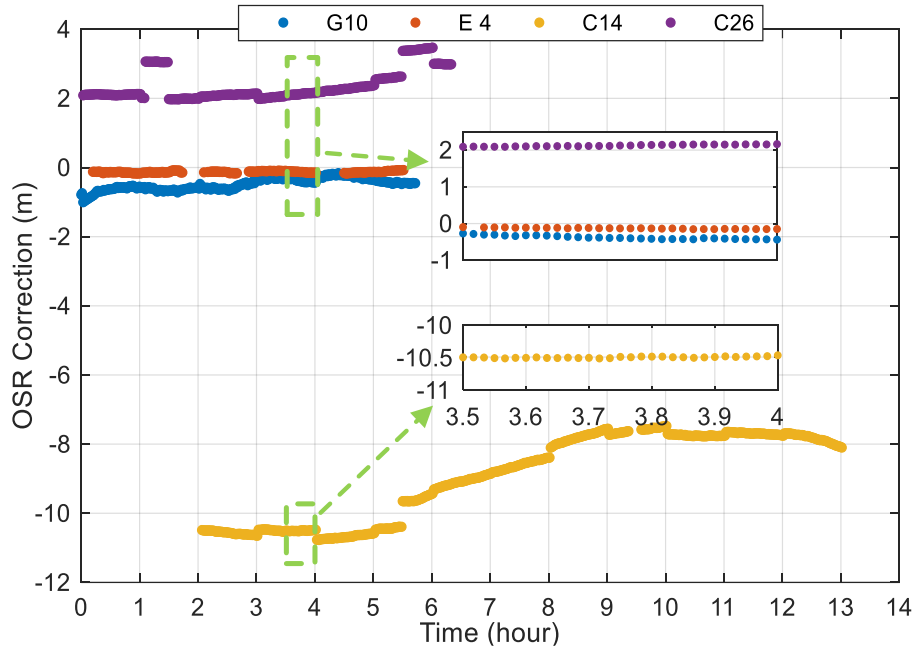


图 4-2 基于 CNES 实时产品的 OSR 时间序列图

Figure 4-2 Time series based on CNES real-time products of OSR

进一步分析发现对于北斗卫星，除广播星历切换产生的跳变外，还存在一个随机的系统性跳变。北斗卫星的 OSR 改正时间序列如图 4-3 所示，红色方框标识标记了 BDS 卫星跳变，该跳变对所有 BDS 卫星表现出一致性，为北斗卫星系统性跳变。为了进一步验证跳变发生的原因，本文使用 GFZ 生成的最终钟差产品作为基准，在消除掉基准差异后与 CNES 播发的实时钟差做差，结果如图 4-4 所示。从图 4-4 中红框标出的部分可以看出北斗卫星钟差发生系统性跳变，且与图三中 OSR 改正数发生跳变时间一致，因此 BDS 卫星的该系统性跳变与 CNES 的实时钟差产品有关。对于 GPS 和 Galileo 两个系统的钟差，未发现存在系统性跳变。

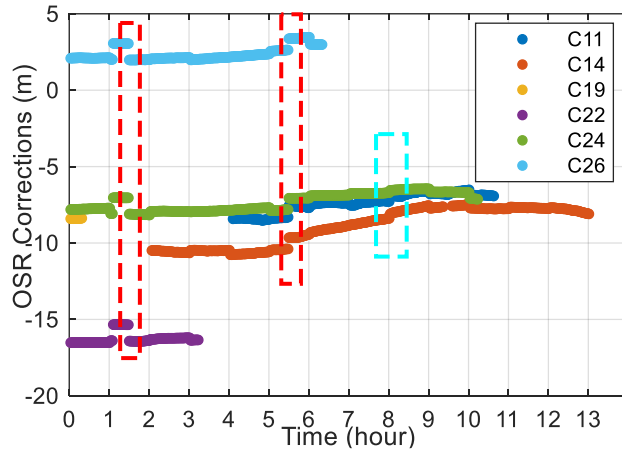


图 4-3 BDS 卫星 OSR 序列图

Figure 4-3 OSR sequence of BDS satellites

图 4-4 BDS 卫星实时钟差产品与最终钟差产品作差序列图

Figure 4-4 Sequence of the difference between real-time clock bias products and final clock bias products for BDS satellites

考虑到 OSR 时间序列的线性趋势，本文使用一阶线性项对 OSR 改正数进行拟合，公式可表达为：

$$\begin{bmatrix} \delta OSR_{t_1}^s \\ \vdots \\ \delta OSR_{t_i}^s \\ \vdots \\ \delta OSR_{t_n}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot a_0^{OSR} + \begin{bmatrix} t_1 - t_1 \\ \vdots \\ t_i - t_1 \\ \vdots \\ t_n - t_1 \end{bmatrix} \cdot a_1^{OSR} \quad (4-12)$$

其中， $\delta OSR_{t_i}^s$ 为卫星 s 在 t_i 时刻的 OSR 改正数； a_0^{OSR} 和 a_1^{OSR} 分别代表 δOSR^s 在 t_n 时刻的常数项和一阶线性变化； t_n 表示最新一组 OSR 改正数的历元时刻。

为了消除广播星历切换对拟合造成的影响，当 IODE 切换时，OSR 改正数可

以按照以下公式进行计算：

$$\delta OSR^s = Coor_f - (Coor_c - \delta OSR^{s'}) \quad (4-13)$$

其中, $Coor_f$ 表示广播星历切换之前的卫星坐标; $Coor_c$ 代表切换后用最新广播星历计算得到的坐标; $\delta OSR^{s'}$ 和 δOSR^s 分别代表广播星历切换后和切换前的 OSR 改正数. 当拟合样本中 OSR 改正数的 IODE 不一致时采用这个公式计算 OSR 改正, 直到当前历元拟合用到的所有改正数都对应切换后的 IODE。

为了保证北斗卫星在发生系统性跳变时 OSR 改正数拟合的连续性, 需要对 OSR 改正数进行拼接, 公式可表达为:

$$\delta OSR_{BDS}^s = \delta OSR_{BDS}^{s'} + dOSR_{BDS}^s \quad (4-14)$$

其中, $dOSR_{BDS}^s$ 为北斗系统发生系统跳变的变化量, 可由所有卫星跳变量求平均获得; $\delta OSR_{BDS}^{s'}$ 和 δOSR_{BDS}^s 分别代表变化前与拼接后的 OSR 改正数。

4.2.1.3 OSR 拟合策略与拟合精度评估

为了保证 OSR 改正数播发的最佳精度, 本文选择使用最新获得的 OSR 改正数作为 a_0^{OSR} 进行播发。而为了进一步确认一阶线性项的最优拟合策略, 需要使用不同的拟合样本数来对 OSR 系数进行拟合并验证其拟合精度。本节使用了 2022 年年积日从 156 到 162, 共计 7 天的 10 个 IGS 测站来做验证。

为了验证一阶线性项 a_1^{OSR} 的最优拟合策略, 本小节使用不同样本数对其进行拟合, 样本时间间隔为 5 s。在拟合完成后将其进行外推, 并对 1-5 分钟的外推值进行统计。为了对拟合精度进行评估, 本文把每个历元计算得到的 OSR 改正当作真值, 与其前面通过拟合系数外推至当前历元的值做比较, 结果如图 4-5 所示。从图中可以看出随着拟合样本数的增加, 使用 a_1^{OSR} 项进行外推的误差明显减小。随着拟合样本数的增加, 对拟合精度的提升逐渐变小。当拟合历元样本达到 36 个时拟合精度最佳, 此时 Galileo 系统的五分钟外推误差小于 0.05 m, 对于 GPS 和 BDS, 外推误差分别为 0.1 m 和 0.18 m。因此, 结合实际数据处理效率与拟合精度, 本文将一阶线性项 a_1^{OSR} 的拟合样本数设置为 36 个。

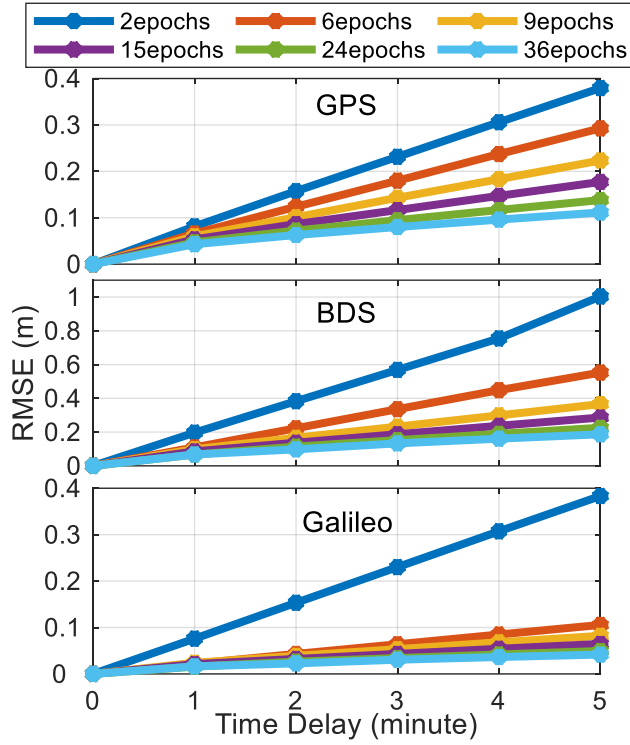


图 4-5 不同拟合样本数与外推精度关系图

Figure 4-5 Graph showing the relationship between different fitting sample sizes and extrapolation accuracy

4.2.2 改正数编码策略

本章使用 GPS、Galileo 和 BDS 三系统来实现基于短报文的多系统实时 PPP-AR，而实现多系统的最大限制在于短报文系统的带宽有限。为了节约 GSMC 的带宽，本文使用 GPS 的 L1/L2 频点，BDS 的 B1I/B3I 频点以及伽利略的 E1/E5a 频点。此时，用户端定位不需要考虑接收额外的 DCB 参数来进行修正。除此之外，包括 a_0^{OSR} 、 a_1^{OSR} 和两个频点 UPD 在内的这些实现 PPP-AR 不可或缺的参数在编码时也需要进行进一步的简化。

4.2.2.1 改正数值域分析

在编码时，为了给每个改正数留出足够的空间，同时又要保证带宽不被浪费，首先需要对各个改正数的值域分布范围进行统计。此处本文使用一周的改正数进行统计分析。图 4-6 展示了各个系统改正数的值域分布。从图中可以看出，对于 GPS 系统和 Galileo 系统，其改正数分布相对集中；其中 a_0^{OSR} 在 ± 2 m 的范围内， a_1^{OSR} 和 UPD 参数分别在 ± 1 mm/s 和 ± 2 m 的范围内。与之相反，北斗卫星的改正数相比之下则更为分散。尤其是北斗卫星的 a_0^{OSR} 项。这是由于北斗的钟差基准为 B3I 频点(Chen et al., 2020; Chen et al., 2022c)，而 CNES 播发的 SSR 实时钟差基于 B1I/B3I 无电离层组合频点，因此二者之间存在基准偏差，该偏差放大了 a_0^{OSR} 项。除此之外，BDS-2 卫星较差的轨道误差精度也是导致改正数偏大的原因。

因(Zhao et al., 2022)。为了减小其分布范围,本文利用广播星历中播发的 TGD 参数将 BDS 卫星 a_0^{OSR} 改正数的基准从 B1I/B3I 改至 B3I,此时改正数分布如图 4-6 中红色部分所示, a_0^{OSR} 改正数分布范围明显减小。在做完基准转换后,北斗卫星绝大多数的 a_0^{OSR} 落至 ± 3 m 的范围内。由于 GSMC 系统的带宽限制,更大值域的改正数无法进行编码,此时服务端需要舍弃改正数超过阈值的卫星。

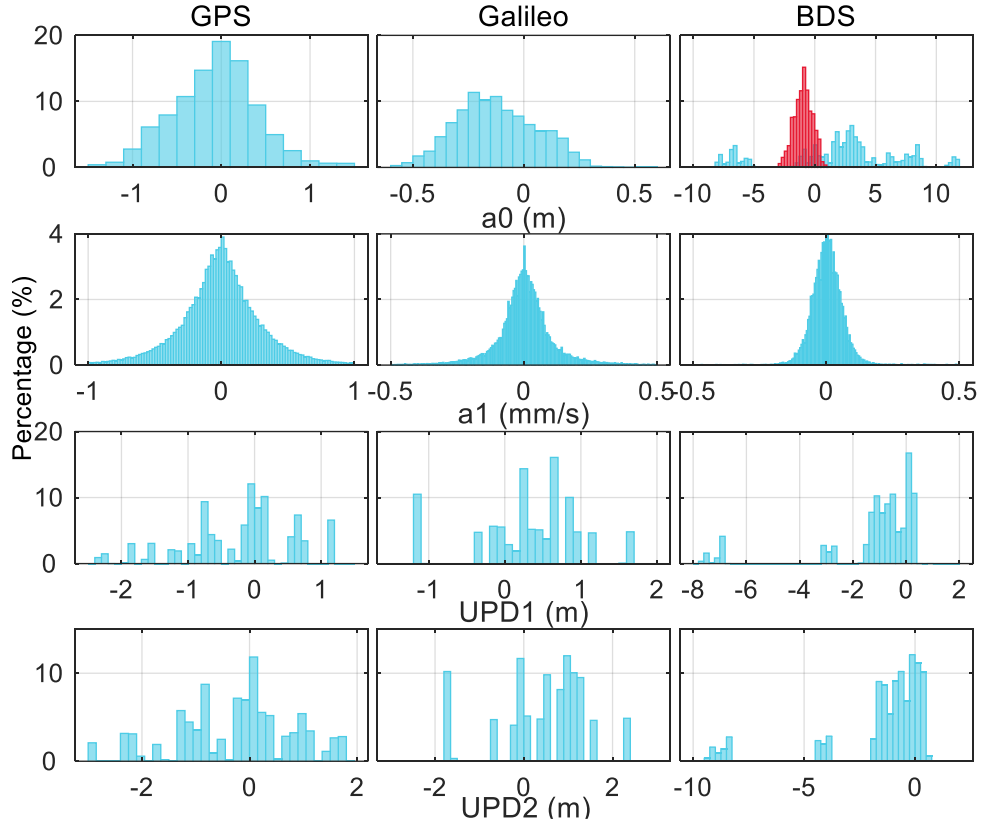


图 4-6 各系统改正数数值分布范围图

Figure 4-6 Graph showing the distribution range of correction values for each system

4.2.2.2 改正数编码设计

除改正数本身之外,系统还需要将改正数的参考时刻、卫星数等信息播发给用户。据此,使用单独的信息头对相关信息进行播发。以 GPS 时作为时间基准,同时为了压缩头文件信息的带宽, GPS 周信息可做如下简化:

$$Week_s = Week_c - 2000 \quad (4-15)$$

其中 $Week_s$ 和 $Week_o$ 分别代表简化后和简化前的 GPS 周信息。信息头的具体编码格式如表 4-2 所示。

表 4-2 GSMC PPP-AR 编码信息头
Table 4-2 Header for encoded information

Header Part	Range	Value accuracy	Effective-range (decimal)	Size
Simplified GPS week	0~1023	1	1~1023	10 bits
GPS second	0~ 1048576	1	0~604800	20 bits
Number of satellites	0~ 15	1	0~10	4 bits
Total		-		34 bits

改正数的分布范围以及实时 SSR 轨道钟差改正精度在视向平面优于 2 cm, 同时钟差精度优于 0.1 ns (Li et al., 2022), 除此之外 0.1 周的相位大约为 2 cm。据此, 本文对改正数编码策略设计如表 4-3 所示。除了上面提到的改正数之外, 卫星系统编号, 卫星 PRN 号以及卫星 IODE 信息也需连同改正数信息进行编码发送。

表 4-3 GSMC PPP-AR 单颗卫星编码信息
Table 4-3 Encoded information for a single satellite

Body Part	Range	Value accuracy	Effective range (decimal)	Size
System	0~2	1	0~2	2 bits
PRN	1~63	1	1~63	6 bits
IODE	0~255	1	0~255	8 bits
a_0	± 3 m	6 mm	0~1000	10 bits
a_1	± 1 mm/s	0.125 mm/s	0~15	4 bits
UPD_1	± 2 m	8 mm	1~500	9 bits
UPD_2	± 2 m	8 mm	1~500	9 bits
Total		-		48 bits

按照上述编码策略, 每颗卫星需要占用 48 bit。除了信息头以及和信息尾部的 CRC 校正码, 最多一次可以在 GSMC 调制 10 颗卫星的改正数信息。此时单历元完整的信息结构设计如图 4-7 所示, 其中 546 bit 被利用, 剩余 14bit。

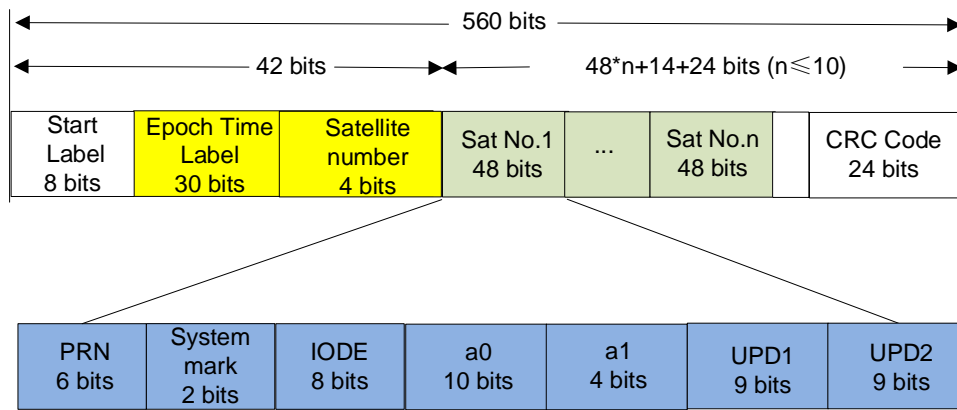


图 4-7 基于 GSMC 单历元编码示意图

Figure 4-7 Schematic diagram illustrating the encoding based on GSMC for a single epoch

4.2.3 改正数播发与用户使用策略

按照 4.2.2 节的编码设计,使用 GSMC 一次可以至多播发十颗卫星的改正数。然而对于 GPS、Galileo、BDS 三系统而言,用户的可见卫星数可能会超过 20 颗 (Li et al., 2015)。据此,在播发的一阶多项式系数可以对改正数进行拟合的前提下,本文进一步提出对多系统所有可见卫星改正数进行轮流播发的策略。

首先为了确认进行改正数播发的卫星列表,需要根据用户的概略位置进行卫星高度角计算,将卫星高度角阈值设置为 15° 。为了进一步阐述播发策略,以共播发 30 颗卫星为例,播发频度设定为 1 min。此时,30 颗卫星首先会被分为三组,每组十颗卫星。如图 4-8 所示,每组的卫星在系统端通过三个历元依次播发给用户。当可见卫星数不是 10 的整数倍,此时最后一个历元播发的卫星数将少于 10,服务端会自动将第一组中的部分卫星会补充进该历元凑足 10 颗卫星进行播发,并且后续播发顺序会依次进行调整。对于实时定位服务,上述播发策略会按照播发频度进行循环播发来保证用户端改正数被依次更新。

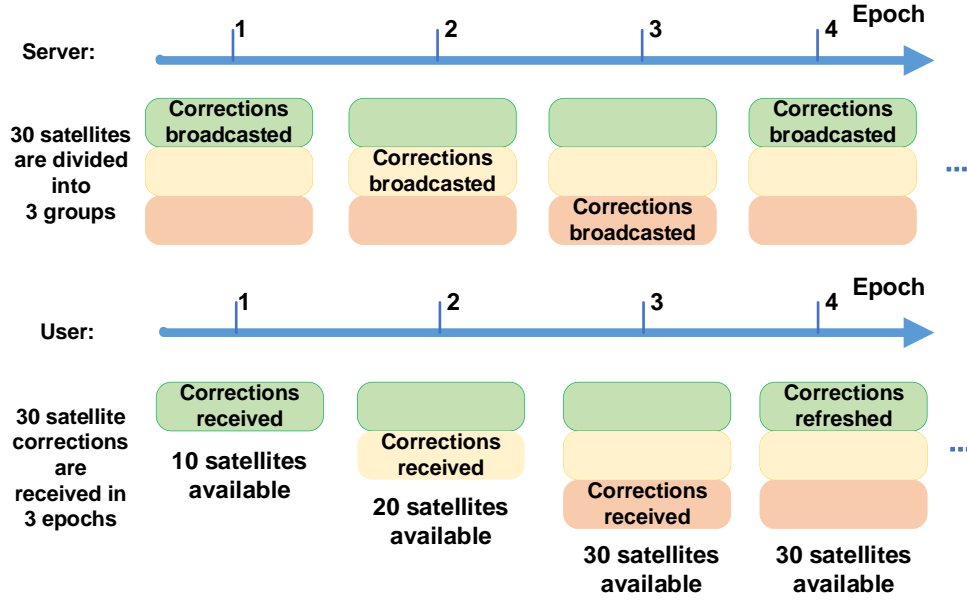


图 4-8 基于 GSMC 的 PPP-AR 改正数播发示意图

Figure 4-8 Schematic diagram illustrating the broadcasting of PPP-AR corrections based on GSMC

对于用户而言，当其收到第一包十颗卫星改正数即可进行十颗卫星的 PPP-AR 定位；当收到第二包改正数时，由于径向改正数可以外推至当前时刻，此时可以联合二十颗卫星进行定位。当收到第三包数据后，用户可以使用所有满足条件的可见卫星进行 PPP-AR 定位解算。之后用户可根据后续收到的最新改正数对已有卫星改正数进行替换更新。

4.2.4 用户端定位算法

在公式(2-9)的基础上，适用于短报文的无电离层组合精密单点定位模糊度固定算法公式可进一步表示为：

$$\begin{cases} P_{IF,r}^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + M_r^s d_{trop,r} + (B_{IF,r} - B_{IF}^s) - \delta OSR^s + \varepsilon(P_{IF,r}^s) \\ \Phi_{IF,r}^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + M_r^s d_{trop,r} + (b_{IF,r} - b_{IF}^s) + \lambda_{IF} N_{IF}^s - \delta OSR^s + \varepsilon(\Phi_{IF,r}^s) \end{cases} \quad (4-16)$$

其中 $P_{IF,r}^s$ 和 $\Phi_{IF,r}^s$ 分别表示无电离层组合的伪距和相位观测值； ρ_r^s 表示卫星和用户测站之间的几何距离， dt_r 和 dt^s 分别表示接收机钟差和卫星钟差； $d_{trop,r}$ 和 M_r^s 分别表示天顶对流层延迟和投影函数； $B_{IF,r}$ 和 B_{IF}^s 为接收机和卫星的伪距硬件延迟； $b_{IF,r}$ 和 b_{IF}^s 分别为接收机和卫星的相位硬件延迟。 N_{IF}^s 和 λ_{IF} 分别表示无电离层组合模糊度及其波长。 $\varepsilon(P_{IF,r}^s)$ 和 $\varepsilon(\Phi_{IF,r}^s)$ 分别表示 IF 伪距观测值和相位观测值的噪声。需要特别说明的是，由于之前对 BDS 卫星改正数基准做过转换，因此这里同样需要使用 TGD 将卫星钟差基准从 B3I 改至 B1I/B3I。

在上式中, δOSR^s 为用户到卫星方向的轨道与钟差改正的投影, 可以通过北斗 GSMC 播发的 a_0^{OSR} 和 a_1^{OSR} 进行计算:

$$\delta OSR^s = a_0^{OSR} + a_1^{OSR} \times (t - t_0) \quad (4-17)$$

由 4.2.2 节可知, B_{IF}^s 在此处为 0. b_{IF}^s 可以通过 GSMC 播发的 UPD 参数进行改正并且认为其短期内为常数保持不变. $B_{IF,r}$ 和 $b_{IF,r}$ 可以通过星间差进行消除, 公式可表示为:

$$\begin{cases} \nabla P_{IF,r}^s = \nabla \rho_r^s - c \cdot \nabla dt^s + \nabla M_r^s d_{trop,r} - \nabla \delta OSR^s + \varepsilon(P_{IF,r}^s) \\ \nabla \Phi_{IF,r}^s = \nabla \rho_r^s - c \cdot \nabla dt^s + \nabla M_r^s d_{trop,r} - b_{IF}^s + \lambda_{IF} \nabla N_{IF}^s - \nabla \delta OSR^s + \varepsilon(\Phi_{IF,r}^s) \end{cases} \quad (4-18)$$

其中 ∇ 表示星间差变量. 此时, ∇N_{IF}^s 中伪距和相位硬件延迟被消除, 可以通过 Kalman 滤波进行常数估计.

为了估计窄巷模糊度 ∇N_{NI}^s , 首先需要固定宽巷模糊度 N_{WL}^s . N_{WL}^s 可以表示为:

$$\tilde{N}_{WL}^s = N_{WL}^s + UPD_{WL,r} - UPD_{WL}^s \quad (4-19)$$

其中 \tilde{N}_{WL}^s 为浮点宽巷模糊度, UPD_{WL}^s 和 $UPD_{WL,r}$ 分别表示宽巷卫星端和接收机端的 UPD. 需要特别注意的是, 对于 CNES 播发的 UPD_{WL}^s 改正数, 其产品中卫星和接收机短的 PCO 都已经被扣除, 因此宽巷模糊度中也需要扣除 PCO 的影响(Geng et al., 2021), 公式如下:

$$N_{WL}^s = \lambda_{WL} \left(\frac{\Phi_{1,r}^s + z_{1,r}^s}{\lambda_1} - \frac{\Phi_{2,r}^s + z_{2,r}^s}{\lambda_2} \right) - \frac{f_1(P_{1,r}^s + z_{1,r}^s) + f_2(P_{2,r}^s + z_{2,r}^s)}{f_1 + f_2} \quad (4-20)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} z_{1,r}^s = z_{1,r} \sin \theta_r^s + z_1^s \\ z_{2,r}^s = z_{2,r} \sin \theta_r^s + z_2^s \end{cases} \quad (4-21)$$

λ 为对应频点波长; Φ 为相位观测值; P 为伪距观测值; f 为频率; $z_{i,r}$ 为接收机天线对于频点 i 的天顶 PCO; z_i^s 对应卫星天线; θ_r^s 接收机 r 对于卫星 s 的高度角.

与无电离层模糊度类似, UPD_{WL}^s 可以通过 GSMC 播发的改正数进行改正. $UPD_{WL,r}$ 能够通过星间单差消除. 然后星间单差的宽巷模糊度 ∇N_{WL}^s 通过取整进行固定.

星间单差窄巷模糊度可以表示为:

$$\nabla \tilde{N}_{NI}^s = \nabla \tilde{N}_{IF}^s - \nabla N_{WL}^s \quad (4-22)$$

其中 $\nabla \tilde{N}_{NI}^s$ 和 $\nabla \tilde{N}_{IF}^s$ 分别表示星间单差浮点窄巷模糊度和无电离层组合浮点模糊度; ∇N_{WL}^s 为固定的整数星间单差宽巷模糊度.

由于 \tilde{N}_{IF}^s 可在公式(4-18)中滤波估计得到, \tilde{N}_{WL}^s 通过公式 (4-19)得到, \tilde{N}_{NI}^s 可以通过上式计算得到。然后使用 LAMBDA (Teunissen 1995; Li et al., 2013) 将星间单差窄巷模糊度进行固定并得到固定后的无电离层组合模糊度。

4.2.5 系统总体架构

如图 4-9 所示, 基于短报文的精密单点定位系统共有三部分, 分别是实时 SSR 输入, 短报文算法处理服务端和用户端。实时 SSR 产品可以通过 IGS RTS 网络播发获取或服务端自身生成。利用 GSMC 双向通讯功能, 系统端在获取实时 SSR 改正与用户概略坐标后, 可计算得到其 OSR 改正, 利用高采样率的 SSR 改正累计数历元并对 OSR 改正数进行线性拟合, 将拟合系数连同 UPD 参数, 分包后通过数个历元对用户进行依次播发, 用户在收到改正数后将其外推至当前时刻可进行 PPP 定位, 额外利用 UPD 信息可以实现模糊度固定, 从而进一步进行 PPP-AR 定位。

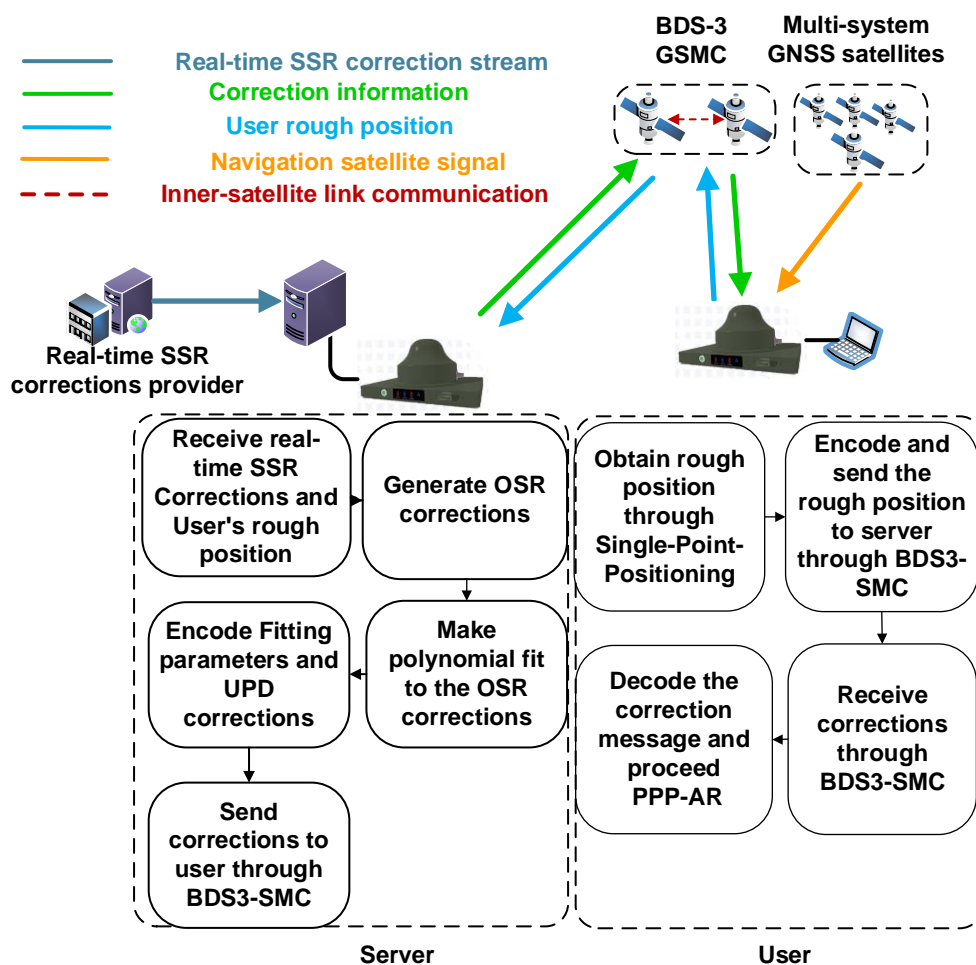


图 4-9 GSMC PPP-AR 系统端与用户端处理流程图

Figure 4-9 Flowchart of the processing procedure for GSMC PPP-AR system at both the system side and the user side

4.3 用户定位与实时传输有效性验证

使用全球平均分布的 11 个 IGS 监测站,时间跨度为 2022 年 DOY 为 192-198 共 7 天的数据来对上述算法进行性能实验。测站分布如图 4-10 所示。测站的先验坐标可以通过 SINEX 文件获取,并在统计中作为真值来计算 RMSE。本节先对 GSMC 的 PPP-AR 定位性能进行验证,然后结合实时短报文设备,对该算法定位性能与短报文通讯效率对定位的影响进行深入分析。

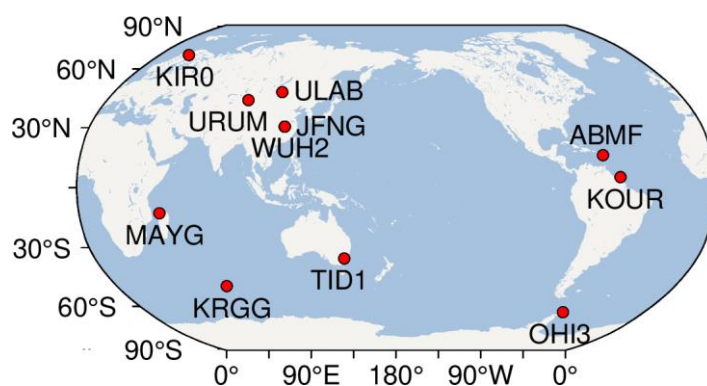


图 4-10 GSMC PPP-AR 定位验证全球测站分布图

Figure 4-10 Global distribution map of verification stations for GSMC PPP-AR positioning

4.3.1 定位验证

本小节中，基于 GSMC 的 PPP-AR 方法(GSMC-PPP-AR)分别与基于 GSMC 的 PPP(SMC-PPP)和基于网络传输的 SSR 计算的 PPP-AR 方法(SSR-PPP-AR)进行对比分析。GSMC-PPP 只使用 GSMC 播发的 OSR 拟合系数进行浮点 PPP 解算而不使用 UPD 进行模糊度固定。三种定位模式分别通过定位收敛时间和定位精度进行评估。除此之外，对于两种模糊度固定模式，通过 TTFF 来衡量模糊度固定质量。此处 TTFF 定义为连续三个历元固定模糊度的首历元时间。

在本节中，对静态和动态定位两种定位模式进行定位性能验证。用户定位采样率为 30 秒。收敛判断条件设置为连续五分钟动态 NEU 三个方向皆小于 0.2 m，静态小于 0.15m。对于模糊度参数，由于 BDS 卫星轨道钟差精度较差，因此仅对 GPS 和 Galileo 卫星进行固定。考虑到参数外推会降低 GSMC 播发参数的精度，用户端将接收的改正数有效时长设置为了 5 分钟。

4.3.1.1 定位初期性能验证

为了比较 GSMC-PPP-AR 和 GSMC-PPP 两种在定位前期的性能差异，本文对所有测站前两小时的定位结果进行分析，图 4-11 展示了其中 KOUR 测站在 2022 年 DOY192 天前两小时的定位误差序列对比图。相比于 GSMC-PPP，GSMC-PPP-AR 对于用户前期定位具有更好的收敛性能和定位精度，提升在 E 方向和 U 方向更为明显。所有测站前两个小时的定位性能统计如图 4-12 所示。GSMC-PPP-AR 在平面和高程的精度在前两小时相较于 GSMC-PPP 分别提升了 1 cm 和 12 cm。相较于 GSMC-PPP，GSMC-PPP-AR 在前 40 min 完成收敛的测站比例增加了 26%。

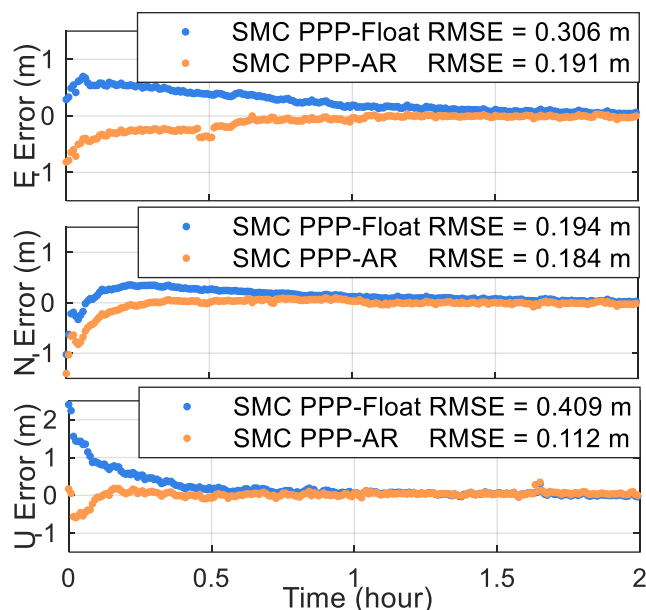


图 4-11 单站前两小时定位误差序列对比图

Figure 4-11 Comparison plot of positioning errors for the first two hours at a single station

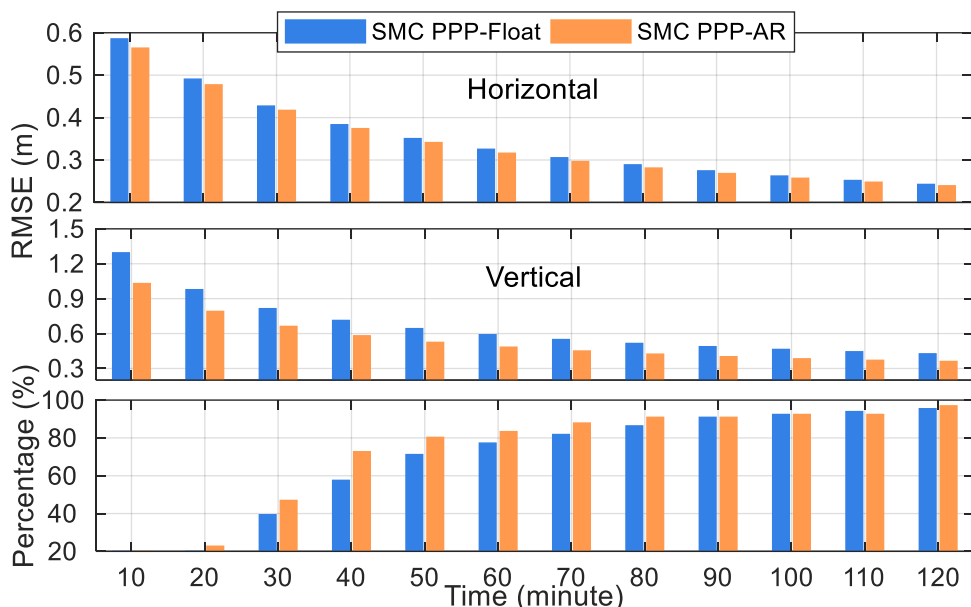


图 4-12 前两小时定位性能统计结果对比图

Figure 4-12 Comparison plot of positioning performance statistics for the first two hours

4.3.1.2 整体定位性能统计

图 4-13 展示了三种策略每个测站的三维 RMS 精度以及收敛时间统计。对于大多数站, GSMC-PPP-AR 的定位精度和收敛时间都要优于 GSMC-PPP, 且动态相对于静态更加明显。所有测站的平均 RMS 与收敛时间统计与表 4-4 中。需要说明的是, 此处为了进一步体现定位前期差异, 统计范围并非收敛后精度, 而是

包含单天中所有历元。相较 GSMC-PPP，GSMC-PPP-AR 的动态与静态定位精度分别提升了 10.0%和 7.8%；收敛时间分别缩小了 14.5%和 11.8%。另外从统计结果中可以看出，受 GSMC-PPP-AR 中短报文参数外推误差和拟合精度损失对动态定位影响，相较于 SSR-PPP-AR，其动态定位精度损失 0.03 m，定位收敛时间延长了 39%，而对于静态定位收敛时间延长了 29%。

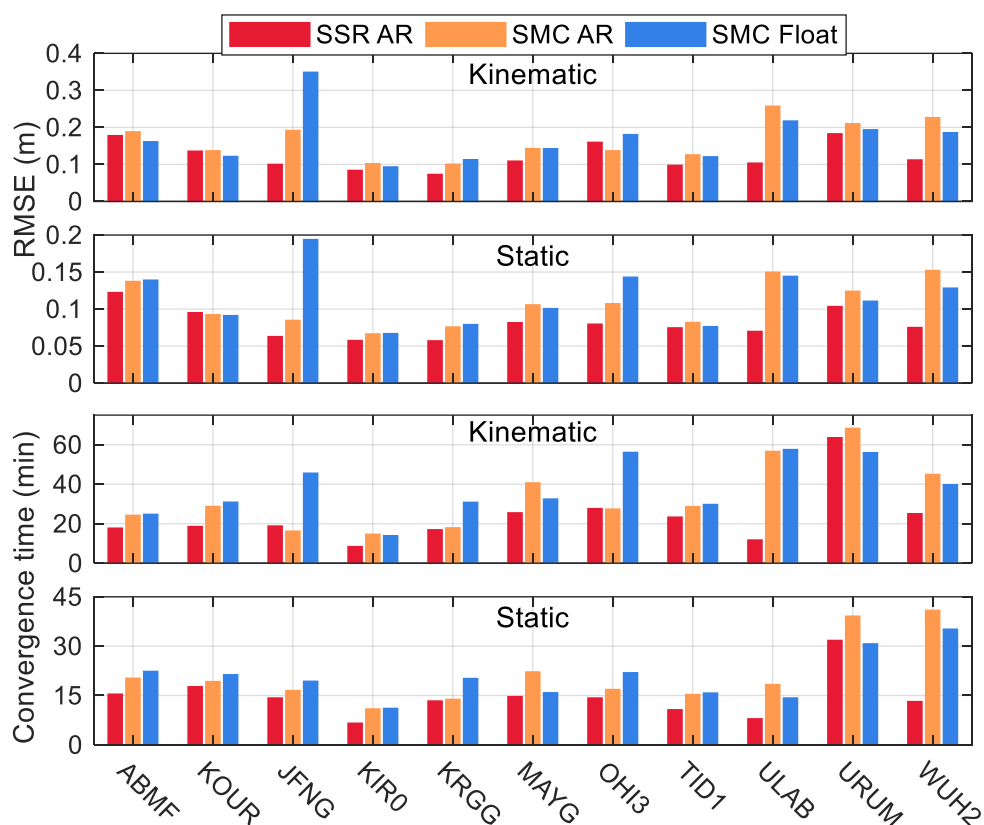


图 4-13 各测站不同模式定位性能统计对比图

Figure 4-13 Comparison plot of positioning performance statistics for different modes at various stations

表 4-4 三种定位模式定位性能统计表

Table 4-4 Table of positioning performance statistics for three positioning modes

Mode	Kinematic		Static	
	RMSE (m)	Convergence time (min)	RMSE (m)	Convergence time (min)
SSR PPP-AR	0.12	23.4	0.08	14.5
GSMC PPP-AR	0.15	32.5	0.11	18.7
GSMC PPP	0.17	38.0	0.12	21.2

图 4-14 展示了 GSMC-PPP-AR 和 SSR-PPP-AR 两种模糊度固定模式下各测站首历元固定时长和模糊度成功固定率。从图中可以看出对于大多数测站，GSMC-PPP-AR 模糊度固定性能小幅降低。所有测站的统计结果如表 4-5 所示。从中可以看出动态模式下 GSMC-PPP-AR 的模糊度固定成功率下降了 4%，首历元固定时间延长了 9.7 分钟，静态模式下性能下降较少。性能下降原因是短报文播发改正数的拟合精度损失和外推误差，以及 UPD 参数的未及时更新。

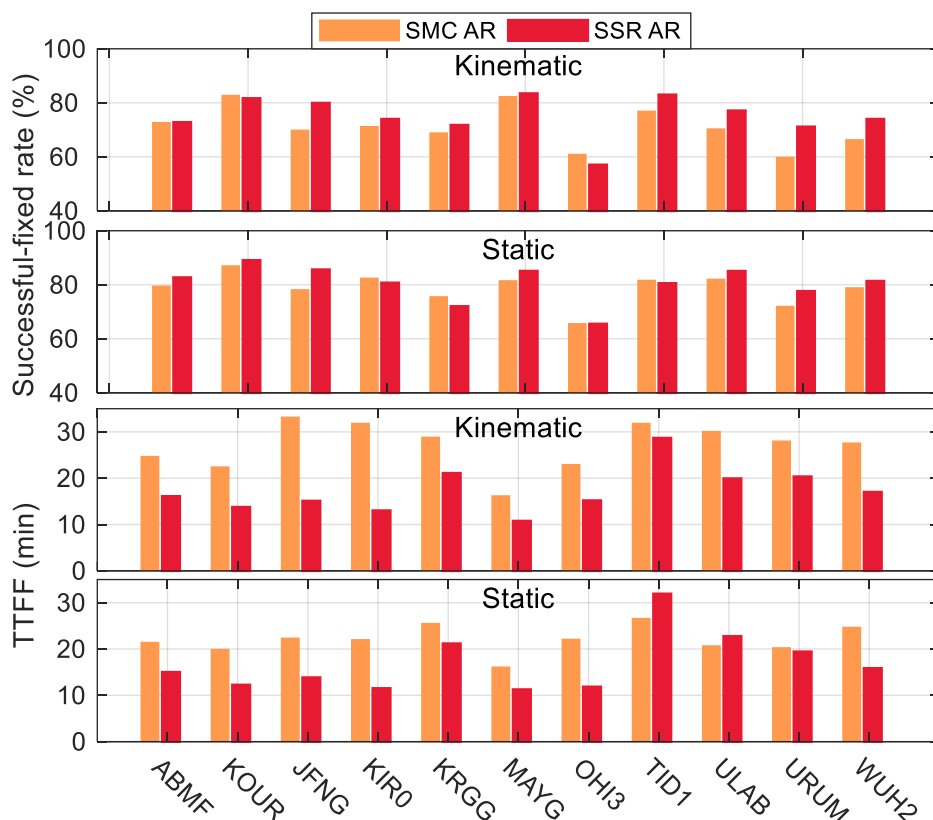


图 4-14 各测站两种模式成功固定率与首历元固定时间对比图

Figure 4-14 Comparison plot of the success rate of fixed solutions and the time to first fixed epoch for two modes at various stations

表 4-5 两种模式模糊度固定成功率与首历元固定时间统计表

Table 4-5 Statistics table of ambiguity fixing success rate and time to first fixed epoch for two modes

Mode	Kinematic		Static	
	Successfully fixed rate (%)	TTFF (min)	Successfully fixed rate (%)	TTFF (min)
SSR PPP-AR	75.1	17.3	80.5	16.7
GSMC PPP-AR	71.1	27.0	78.5	22.0

4.3.2 短报文设备实时传输有效性验证

在 4.3.1 节的基础上, 本节使用 SMC 短报文通讯设备进行实测定位验证, 并对定位精度及其受 SMC 通讯效率的影响进行进一步分析。

4.3.2.1 改正数外推时长与精度损失统计

为了进一步验证本文提出算法对短报文通讯中断、通讯延迟情况下的定位性能, 在用户端使用 SMC-PPP-AR 定位已完成收敛后停止 OSR 改正数的获取和更新, 用户端则继续进行持续 10 分钟的定位解算。此时本文对用户端采用了两种不同改正数使用策略。策略一: 使用最新收到的 a_0^{OSR} 和 a_1^{OSR} 将改正数外推到当前时刻; 策略二: 仅使用最新收到的 a_0^{OSR} 项作为改正进行定位。此外两种策略皆使用最新收到的 UPD 参数进行模糊度固定。10 分钟内的定位精度统计结果如图 4-15 所示。从中可以看出, 随着外推时间的增长, 使用可外推的参数进行定位能有效减少定位精度损失, 在十分钟内定位精度始终优于 0.08 m, 而仅使用 a_0^{OSR} 项在外推时间大于八分钟时平均 RMS 大于 0.08 m。

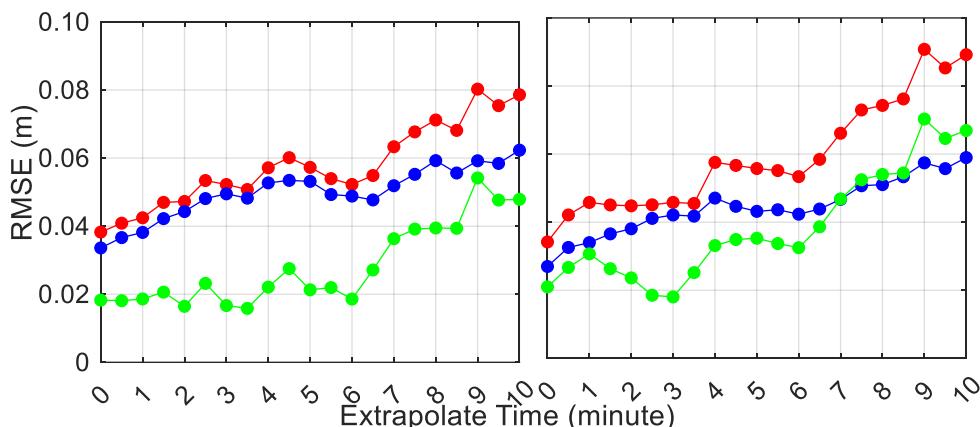


图 4-15 分别使用/不使用可外推 OSR 改正数对用户端定位时延影响

Figure 4-15 impact of using/excluding extrapolatable OSR corrections on user-side positioning delay

4.3.2.2 短报文通讯效率与定位统计

在进行实际定位处理时, 数据丢包、数据传输错误的发生也会对 SMC-PPP-AR 定位性能造成影响。因此本文使用 SMC 传输设备对改正数进行收发和用户定位测试, 测试设备如图 4-16 所示。设备收发频率设置为 1 分钟, 并且通过短报文设备获取的改正数与服务端生成的原始改正数进行对比分析。SMC 设备的传输性能通过数据丢包率和数据传输错误率两个指标进行评估。

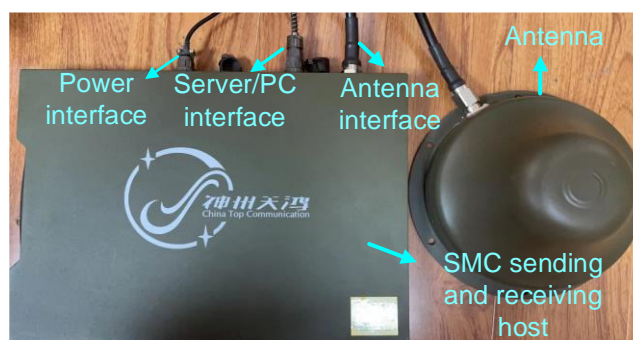


图 4-16 短报文通讯设备示意图

Figure 4-16 Schematic diagram of short message communication device

图 4-17 展示了使用 SMC 设备进行 4 小时的数据接收状态。与服务端生成的原始改正数相比，数据丢失率达到了 49%，除此之外还 2% 的数据包在用户端解码出错，其原因可能是由 SMC 设备请求过载和用户端信号捕捉失败所导致。表 4-6 统计了不同连续丢包时长比例。从表中可以看出，大约 80% 的连续丢包时长不超过 2 个历元，并且只有不到 3% 的数据连续丢失超过了 5 分钟；此时可外推的 OSR 系数可有效弥补通讯问题带来的定位精度损失。

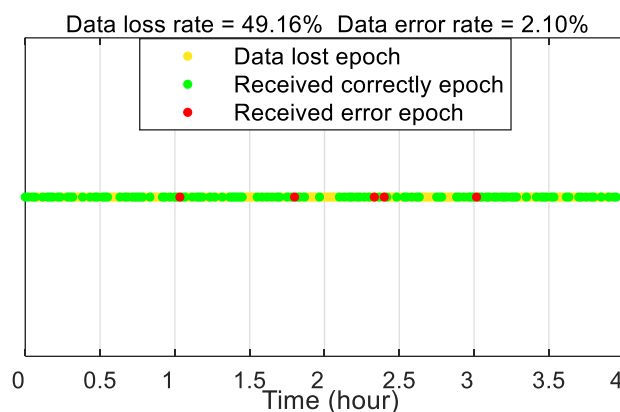


图 4-17 短报文通讯效率示意图

Figure 4-17 Schematic diagram illustrating the efficiency of short message communication

表 4-6 短报文通讯中断时长统计表

Table 4-6 Table of statistics on the duration of interruptions in short message communication

Consecutive	1	2	3	4	5	> 5
missing data time(minutes)						
Percentage(%)	58.5	20.0	9.2	4.6	4.6	3.0

为了进一步对用户定位进行评估，根据 4.3.2.1 的结论，本文将用户端改正数的可用时长延长至 7.5 分钟，并将结果与无数据丢失情况下结果进行对比。定

位结果如图 4-18 所示, 由于传输过程中数据的丢包传输错误, 使用 SMC 通讯设备进行 PPP-AR 定位精度在水平方向和垂直方向分别降低了 0.9 cm 和 3.0 cm。此外, 模糊度固定成功率从 83.8% 降到了 73.2%。然而, 由于本章中 OSR 拟合系数的使用, 在用户端仅正确收到 48.7% 的改正数前提下, 用户定位服务基本没有发生中断。在定位精度要求更低的情况下, 改正数的可用时长可以被进一步放宽来保证定位的连续性。

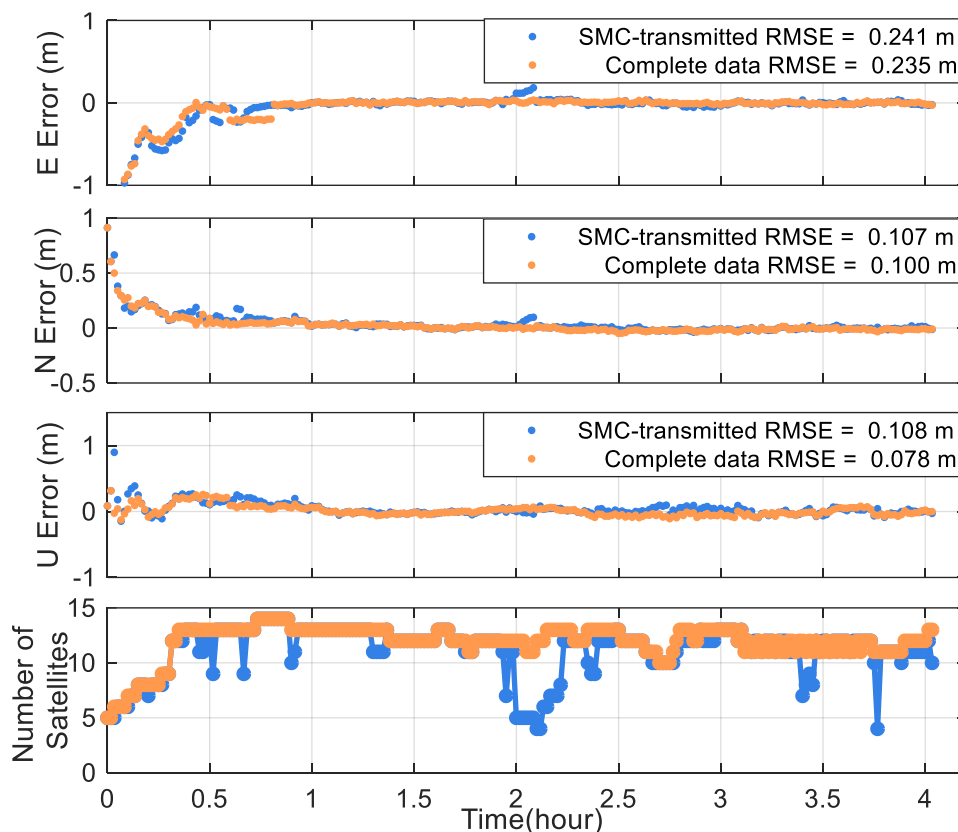


图 4-18 使用短报文实际传输改正数实测定位对比图

Figure 4-18 Comparison plot of measured positioning using actual transmission of corrections via short messages

4.4 本章小结

本章围绕提升北斗 GSMC 在用户定位性能, 提出了一整套使用 GSMC 实现多系统实时 PPP-AR 的方法, 包括改正数的生成, 编码, 播发以及用户端的定位算法。对于其中的研究要点做如下总结:

(1) 使用 SSR 生成的 OSR 改正数在短期内具有线性变化趋势, 与卫星轨道和钟差在视线方向的投影为线性变化一致。因此可以使用线性拟合的方式对高采样率 OSR 改正数进行拟合, 服务端通过播发拟合系数的方式提高改正数的可用时长。在拟合时需要对广播星历切换前后的 OSR 改正进行基准切换以保证拟合正确

性。除此之外，在CNES播发的实时钟差改正中本文发现了一个BDS系统特有的整体跳变，该偏差在拟合时亦需予以修正。

(2) 受轨道钟差精度影响，GPS和Galileo的改正数分布相对集，而BDS改正数分布较为分散。除此之外BDS的OSR常数项受钟差基准不同影响导致分布较为分散。使用TGD进行对其基准改正后其分布更加集中，能有效节省带宽。使用循环播发的方案可以实现GSMC有限带宽前提下用户端的多系统PPP-AR定位。

(3) GSMC-PPP-AR方法相对于GSMC-PPP浮点解在定位前期优势更为明显：GSMC-PPP-AR在平面和高程的精度在前两小时相较于GSMC-PPP分别提升了1 cm和12 cm。与GSMC-PPP相比前40 min完成收敛的测站比例增加了26%。对整体定位性能而言，GSMC-PPP-AR的动态与静态定位精度分别提升了10.0%和7.8%；收敛时间分别缩小了14.5%和11.8%。受系统端改正数的投影误差、拟合误差以及用户端改正数外推误差的影响，GSMC-PPP-AR相比GSSR-PPP-AR在定位性能有所下降，其动态定位精度损失0.03 m，定位收敛时间延长了39%；静态定位收敛时间延长了29%。动态模式下GSMC-PPP-AR的模糊度固定成功率下降了4%，首历元固定时间延长了9.7分钟。

(4) 结合北斗短报文通讯设备，验证了本章中提出的SMC PPP-AR算法在SMC存在通讯延迟、数据丢包等情况下的服务性能。与只播发OSR改正数相比，播发OSR改正数的线性拟合系数将改正数可用时长延长了3倍。除此之外，在短报文播发频繁出现短时时延的情况下，通过实测改正数证明了该方法依然可以保证用户定位精度。

第 5 章 北斗 B2b-PPP 钟差跳变分析与完好性指标优化算法研究

北斗三号实时精密单点定位服务于 2021 年 7 月正式上线。其精密定位改正信息由北斗三号 GEO 卫星通过 B2b 信号播发, 可以为中国及周边区域提供分米至厘米级 RT-PPP 服务。本章首先提出 B2b-PPP 中 GPS 钟差中存在系统性跳变, 该跳变会显著影响双系统定位性能。据此, 对该系统跳变进行统计分析并提出了三种有效的钟差跳变解决方案。除此之外, 用户距离精度因子作为实时服务完好性信息, 其数值本身反映了产品轨道误差精度, 因此本章将 B2b 播发的 URA 信息利用在观测值随机模型中, 并对其精度评估。通过定位实验证明其精度较差。因此, 本章利用中国区域测站对 URA 进行优化估计, 将优化后的 URA 用于构建随机模型, 通过定位性能统计证明了优化后 URA 对用户定位性能提升明显。结合北斗短报文系统, 进一步设计了 URA 播发方式, 并结合北斗短报文通讯时延进一步分析了优化后 URA 系数的可用时长。

5.1 B2b-PPP 改正数与定位模型

5.1.1 改正数类型

北斗 B2b 精密定位服务改正数由卫星掩码、卫星轨道改正、用户距离误差指数(URAI)、卫星钟差改正以及卫星码偏差(DCB)构成, 五种改正数目前共通过四种 type 类型向用户播发(CSNO, 2020), 各类型信息由下表所示。

表 5-1 B2b 改正数播发信息

Table 5-1 Broadcast Information of B2b Corrections

Type No.	Message	System	Broadcast frequency (s)	Correction validity time (s)
1	Satellite mask	GPS+BDS-3	48	/
2	Satellite orbit correction and URAI	GPS+BDS-3	48	96
3	Satellite DCB	BDS-3	48	86400
4	Satellite clock correction	GPS+BDS-3	6	12

为保证用户端能够正确匹配和使用, B2b 通过以下数据版本号(IOD)参数保证各类型信息的关联性:

- 1) IOD SSR: 所有 type 类型都播发该字段, 只有不同 type 类型中的 IOD SSR 相同时才可互相匹配使用。
- 2) IODP: 表示卫星掩码的数据版本号, IODP 在 type 1 和 type 4 中播发。由于用户端在解码 type 4 时需要使用 type 1 确认卫星与播发钟差参数的对应关系, 因此在使用 type4 之前需要先确认二者 IODP 参数是否匹配。

- 3) IODN: 表示 GNSS 下行信号播发的卫星钟差与卫星轨道改正数版本号。该参数目前只在 type 2 中播发, 用于轨道改正数与广播星历 IODE 参数匹配。除此之外, type 2 中额外播发 IOD Corr 参数, 用于轨道改正数与钟差改正数关联性匹配。
- 4) IOD Corr: 表示轨道改正数和钟差改正数的版本号, 目前在 type 2 以及 type 4 中播发。对于同一颗卫星, 钟差改正数与轨道改正数 IOD Corr 相同同时二者才可匹配使用。

5.1.2 改正数用户方法

为了正确使用 B2b 轨道、钟差改正数, 首先需将 5.1.1 小节中的各类参数进行匹配。需要注意的是, B2b 改正数中对 BDS-3 系统的改正是基于 CNAV1 导航星历, 而对 GPS 卫星的改正则基于 LNAV 导航星历, 因此在用户端可以通过 IGS 目前最新定义的 RINEX 4.0 格式广播星历进行定位。

使用改正数恢复卫星精密坐标的公式可表示为:

$$X_{prec}^s = X_{brd}^s - \delta X_{B2b}^s \quad (5-1)$$

其中 X_{brd}^s 表示使用广播星历计算的卫星坐标, δX_{B2b}^s 为 ECEF 框架下的 B2b 轨道改正数。

而原始 B2b 轨道改正数 δX_{B2b}^s 是基于卫星坐标系的, 因此需要对其进行卫星系至 ECEF 系的转换, 转换关系可表示为:

$$\delta X^s = [e_r, e_a, e_c] \cdot \delta X_{B2b}^s \quad (5-2)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} e_r = e_a \times e_c \\ e_c = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \\ e_a = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|} \end{cases} \quad (5-3)$$

其中 r 和 \dot{r} 分别代表卫星在 ECEF 坐标系下的位置和速度向量。

B2b 改正数中 URAI 通过用户精度等级 URA_{class} 以及用户精度指数 URA_{value} 两个参数, 连同轨道改正数下播给用户, 用户端恢复 URA 的公式可表达为:

$$URA \leq 3^{URA_{class}}(1 + 0.25 * URA_{value}) - 1 \quad (5-4)$$

使用 B2b 钟差对钟差进行精密改正公式可表达为:

$$C_{prec}^s = C_{BRD} - \frac{\delta C_0}{c} \quad (5-5)$$

其中 C_{BRD} 使用广播星历计算得到的卫星钟差; δC_0 表示 B2b 的钟差改正数 c 为光速。需要注意的是, 北斗 B2b 中改正数基于 BDT, 用户端在进行 GPS+BDS-3 恢复精密轨道钟差时需要注意与广播星历统一时间基准。

为了验证 B2b 精密定位服务性能, 本文定位模型使用传统双频消电离层组合, 其函数模型与 3.1.1 节中定位模型一致, 因此不再重复介绍。需要注意的是, 由于 BDS-3 钟差基准为 B3I, 而 B2b 改正数匹配的 B-CNAV1 导航电文中 TGD 改正基于 B1C 和 B2a 频点, 此时在使用 B1I/B3I 进行双频定位时则需要使用 B2b type 3 类型播发的 DCB 进行码偏差改正。

5.1.3 B2b-PPP 双系统定位性能

为了验证双系统 B2b-PPP 服务性能, 对 B2b-PPP 进行 GPS+BDS3 双系统解算, 并与 BDS-3 单系统定位进行了精度对比。在使用双系统定位时, 首先将 ISB 当作随机游走参数进行估计, 并将过程噪声设置为 $0.1 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 。图 5-1 展示了 JFNG 站于 2023 年 DOY 为 192 单天定位误差序列。从中可以看出, 使用双系统定位精度反而明显差于北斗单系统定位结果。通过分析发现, 双系统的验后残差明显大于北斗单系统, 由此导致了程序中频繁的验后残差剔除以及频繁的模糊度参数初始化。

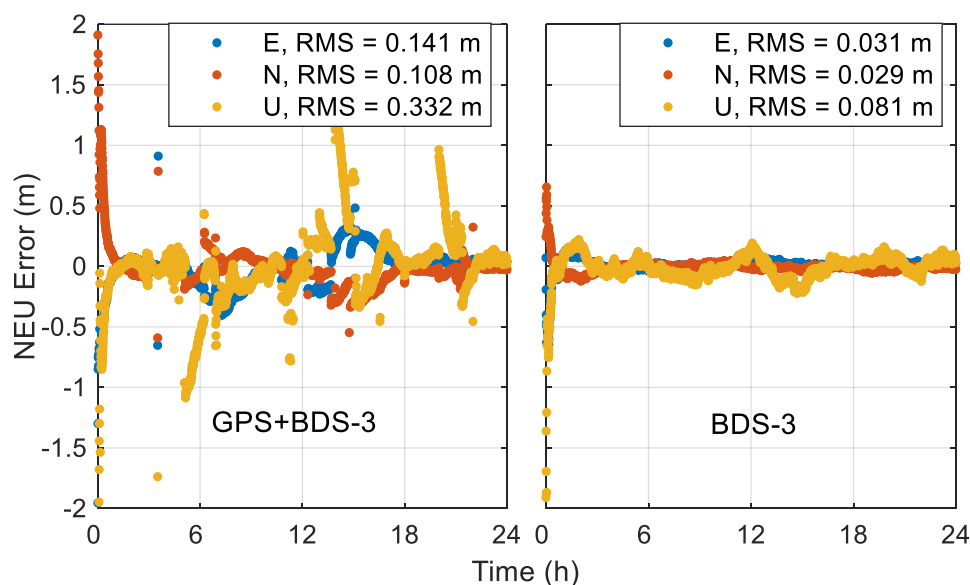


图 5-1 B2b 双系统与 BDS-3 单系统定位性能对比图

Figure 5-1 Comparison of positioning performance between B2b dual-system and BDS-3 single-system

5.2 B2b-PPP 钟差跳变探测与修复方法

5.2.1 B2b-PPP GPS 钟差跳变统计

为了找出 5.1.3 节中双系统 B2b 定位精度变差的原因, 本文对卫星钟差序列进行了画图分析。图 5-2 中画出了连续 90 分钟的 BDS-3 和 GPS 卫星的 B2b 钟差改正数时间序列。如图所示, B2b 中的 GPS 卫星钟差即使在没有 IOD Corr 切换

时,也存在频繁的系统性跳变。而 BDS-3 卫星钟差在该时间段内保持稳定,未发生同步跳变直到 IOD Corr 切换。因此证明了 B2b 中 GPS 钟存在系统性跳变且对双系统定位造成不利影响。

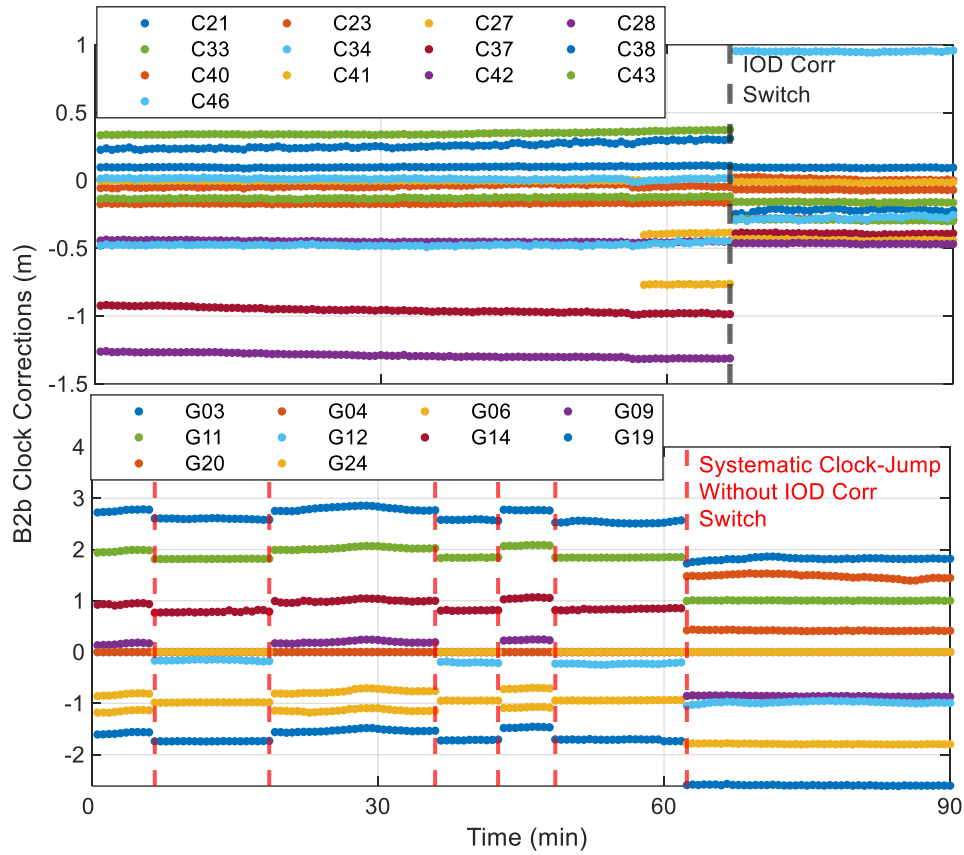


图 5-2 B2b-PPP 实时钟差产品时间序列图

Figure 5-2 Time series of real-time clock bias products for B2b-PPP

为了进一步对 B2b GPS 钟差的系统性跳变进行分析,本文统计了连续三天的 GPS 钟差改正序列。图 5-3 展示了 2023 年 DOY 从 192-194 连续三天 GPS 钟差跳变量级。从图中可以看出,系统性跳变值集中于 -2 m 至 1 m 范围内。该系统跳变发生时间随机且频繁,平均每小时跳变次数达到 8.2 次,单次平均跳变量达到 0.61 m。该跳变在进行 GPS 单系统定位时会被接收机钟差完全吸收,而在双系统联合定位时,ISB 参数在上述配置中无法完全吸收该偏差,因此会被先验残差吸收并在平差时被用户位置参数吸收,从而影响用户定位精度。

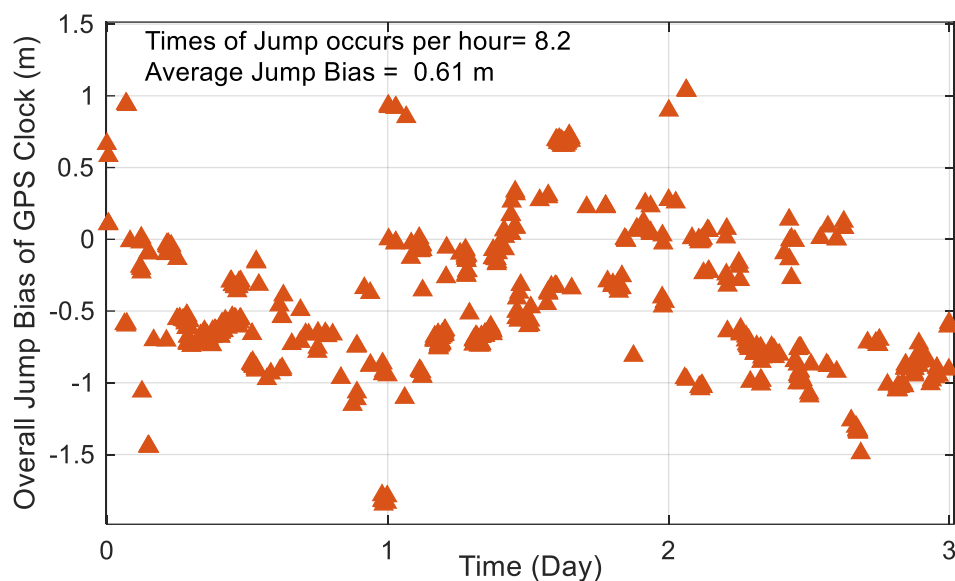


图 5-3 B2b-PPP GPS 钟差跳变统计图

Figure 5-3 Statistical plot of GPS clock jumps for B2b-PPP

5.2.2 B2b-PPP GPS 钟差跳变处理策略

5.2.2.1 跳变探测与钟差拼接

由于 B2b GPS 钟差中跳变是系统性的，因此当跳变发生时，该跳变可以被用户端探测并拼接以保证钟差连续性。通过对 GPS 钟差改正数统计发现，B2b GPS 钟差改正时总会存在某颗卫星改正数为 0 值，并且 0 值卫星切换与系统性钟差跳变同时发生。由此可以推测该卫星在系统端被置为参考星，且跳变发生是由参考星的切换导致。为了对该跳变进行实时探测，本文将 GPS 钟差改正为 0 的卫星 PRN 进行记录。当该 PRN 发生切换时，通过对所有卫星跳变值取平均的方式计算跳变值，同时更新标记最新参考星。具体的跳变探测和钟差拼接流程如图 5-4 所示。需要特别说明的是，在跳变发生计算跳变平均值时，需要剔除该历元中恰好发生 IODN 参数切换的卫星，这是由于对于 B2b 中的 GPS 卫星，其 IODN 切换大多不在同一历元切换，此时单颗卫星切换将对平均跳变值计算带来误差。

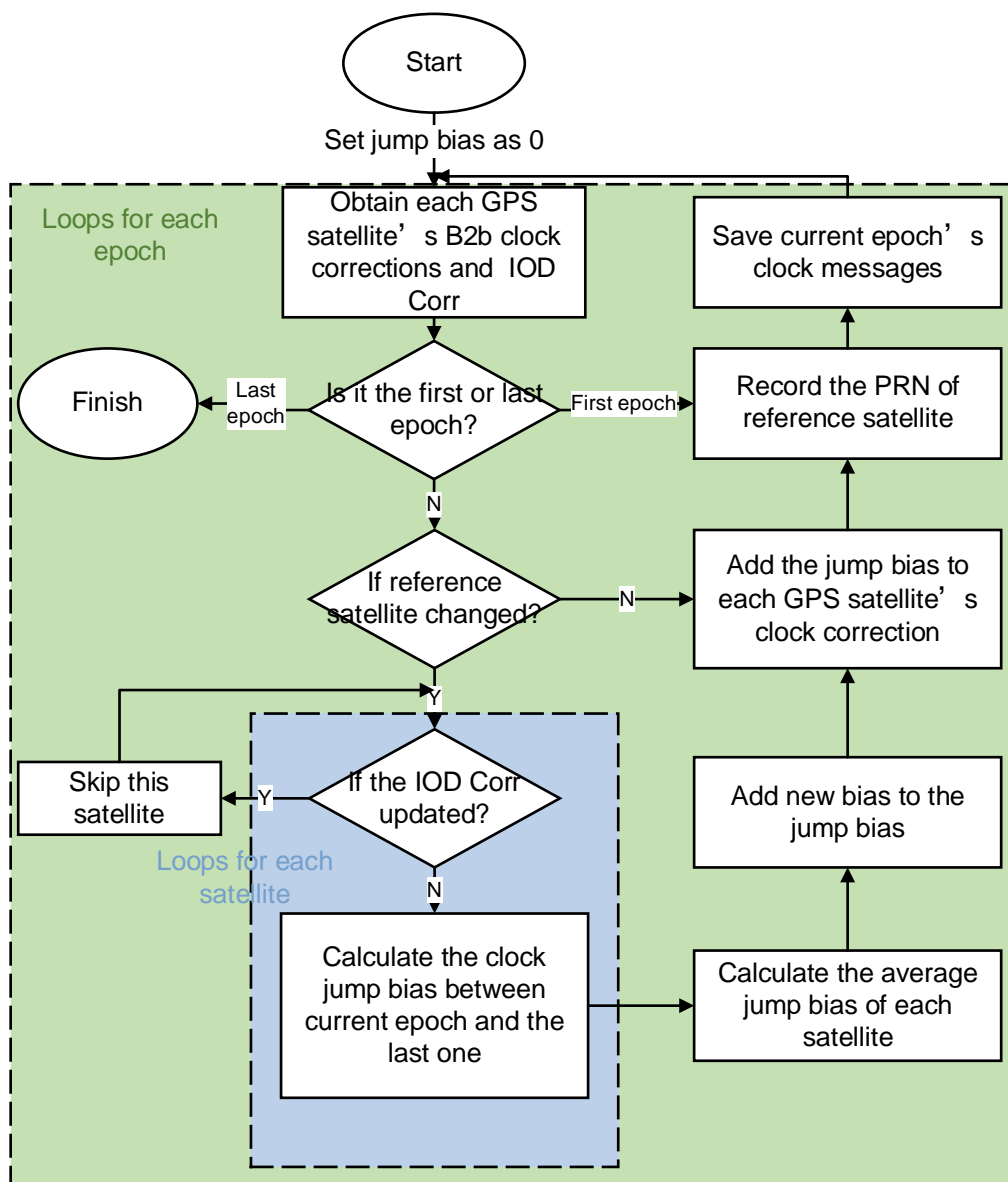


图 5-4 B2b-PPP GPS 钟差跳变探测与拼接流程图

Figure 5-4 Flowchart of GPS clock jump detection and stitching process for B2b-PPP

图 5-5 展示了跳变探测与钟差修复前后的钟差序列对比。从图中可以看出在进行钟差修复后，GPS 钟差序列恢复连续性，且相比较连续钟差，原始钟差序列跳变值最大达到了 1.5 m。

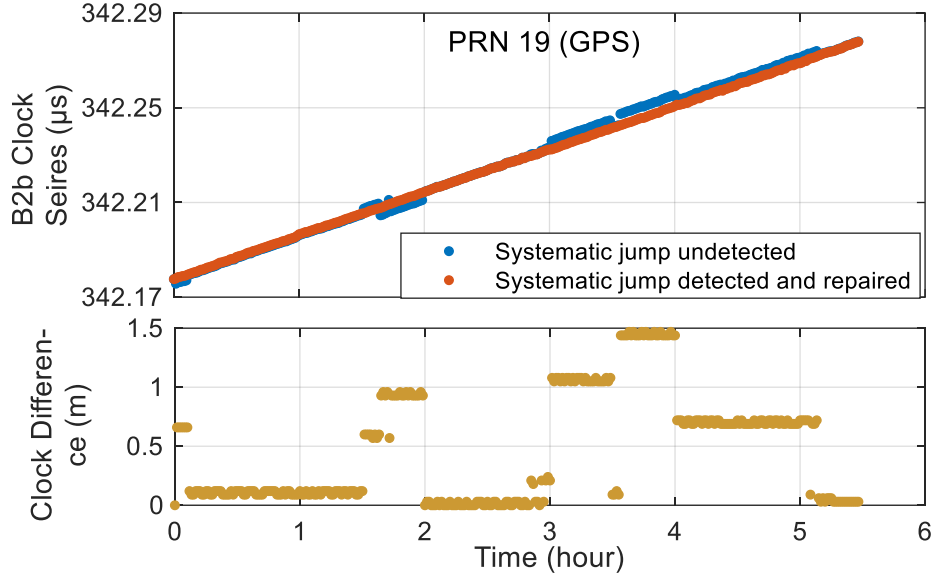


图 5-5 跳变前后钟差序列对比图

Figure 5-5 Comparison plot of clock bias sequences before and after the jump

5.2.2.2 ISB 参数处理策略

由于该跳变对所有卫星相同,所以在理论上该跳变可以完全被 ISB 参数吸收。由此本文在使用卡尔曼滤波对其进行估计时,通常使用三种策略,分别为常数估计、随机游走参数估计与白噪声估计法。此时常数估计对于 ISB 参数显然不可行,因此本文研究另外两种 ISB 估计方法对该跳变的处理效果。当 ISB 做白噪声估计时,卡尔曼滤波的参数配置可表示为:

$$\begin{cases} \phi_{ISB} = 0 \\ Q_{ISB} = 9 * 10^{10} m^2 \\ P_{0_ISB} = 9 * 10^{10} m^2 \end{cases} \quad (5-6)$$

其中 ϕ_{ISB} 为 ISB 状态转移矩阵系数, Q_{ISB} 为 ISB 过程噪声; P_{0_ISB} 为 ISB 参数的初始先验方差。而当对 ISB 参数做随机游走估计时,配置可表示为:

$$\begin{cases} \phi_{ISB} = 1 \\ Q_{ISB} = Q'_{ISB}{}^2 * \Delta t m^2 \\ P_{0_ISB} = 1 * 10^2 m^2 \end{cases} \quad (5-7)$$

其中 Q'_{ISB} 为与时间相关的过程噪声系数。为了研究不同过程噪声设置对该系统偏差的吸收效果,在本章中设置 Q'_{ISB} 最小为 $0.1 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 并最大设置为 $3.0 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 。

5.2.2.3 B2b-PPP 随机模型与 GPS 降权方法

进行 B2b-PPP 定位时,函数模型对应的随机模型可表达为:

$$\sigma^{s^2} = \sigma_{\text{noise}}^s{}^2 + \sigma_{\text{orb}}^2 + \sigma_{\text{clk}}^2 + \sigma_{\text{Trop}}^2 + \sigma_{\text{ION}}^2 \quad (5-8)$$

式中: σ^{s^2} 为卫星 s 的观测值方差; σ_{orb} , σ_{clk} , σ_{Trop} 和 σ_{ION} 分别为轨道、钟

差、对流层和电离层的改正误差，由于轨道和钟差先验精度未知，因此 σ_{orb} 、 σ_{clk} 数值皆设置为 0；除此之外对流层进行参数估计，且无电离层组合消除了电离层延迟的一阶项，因此 σ_{Trop} 和 σ_{ION} 在默认状态下同样为 0； σ_{noise}^s 为观测噪声与高度角中误差因子，其计算公式可以表示为：

$$\sigma_{\text{noise}}^s = \sigma_{\text{Obs}} * \varphi = \sigma_{\text{Obs}} * \left(0.5 + \frac{0.5}{\sin(A_{\text{Ele}})}\right) \quad (5-9)$$

式中： σ_{Obs} 为观测值噪声，对于原始伪距观测值 σ_{Obs} 一般可设置为 0.3 m，原始相位观测值则设置为 0.003 m，当使用双频无电离层组合时会放大观测噪声； A_{Ele} 代表卫星 s 的高度角； φ 为高度角相关的系数因子。

此时，用户定位随机模型可表达为：

$$\sigma^s = \sigma_{\text{Obs}} * \left(0.5 + \frac{0.5}{\sin(A_{\text{Ele}})}\right) \quad (5-10)$$

由于跳变仅存在于 GPS 卫星钟差，因此考虑对 GPS 卫星进行降权处理以降低系统跳变对双系统联合定位的影响。具体降权方式为对计算得到的 GPS 卫星权重额外附加一个降权系数 f_{GPS} ，公式可表示为：

$$P_{\text{GPS}}^{s'} = \frac{P_{\text{GPS}}^s}{f_{\text{GPS}}} \quad (5-11)$$

其中 f_{GPS} 为大于 1.0 的值， P 为观测值权重。

5.2.3 不同策略定位性能分析

本文使用七个平均分布与中国及周边区域的 IGS 监测站对上述各策略进行性能分析。各测站名与分布如图 5-6 所示。

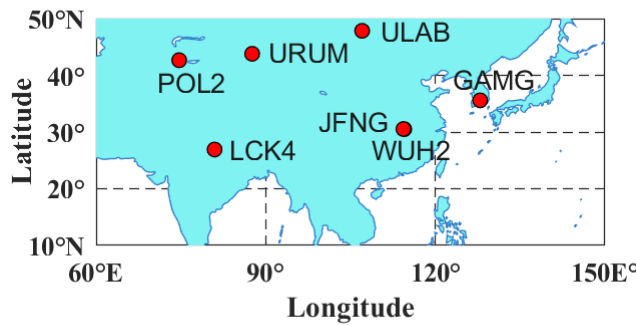


图 5-6 B2b-PPP 定位验证测站分布图

Figure 5-6 Distribution map of verification stations for B2b-PPP positioning

为了评估上述不同跳变处理策略的性能，使用 2023 年 DOY 为 318-324 共计 7 天的 IGS 测站数据进行实验。测站的真实坐标通过对应天数 SINEX 文件获取并用于计算 RMS。在本节中，数据采样率同样设置为 30 s，动态和静态模式下

的水平和高程收敛时间皆分别设置为 0.2 m 和 0.3 m。为了验证 5.2.2.1 节中钟差拼接方法的有效性,本节分别使用原始钟差和进行跳变探测与拼接之后的钟差进行 B2b-PPP 定位。在此基础上,在 ISB 参数估计时分别采用了白噪声和随机游走两种参数估计方式。

图 5-7 展示了不同策略下的 RMS 以及收敛时间统计。需要说明的是此处尚未对 GPS 卫星进行降权。从统计结果中可以看出,当 ISB 作为白噪声估计时,钟差是否拼接对定位统计无差异。这进一步证实了该系统性跳变可以完全被 ISB 参数吸收。

对 ISB 做随机游走参数估计时,过程噪声设置不合理将会对定位精度造成不利影响。对于动态定位,三维定位误差将从 0.08 m 放大至 0.832 m,对于静态定位影响相对较小,三维定位误差从 0.035 米放大至 0.037 m;在动态模式下,收敛时间从 20.2 min 最长放大至 42.2 min,静态模式下收敛时间从 18.0 min 放大至 19.5 分钟。

另外,从图 5-7 中可以看出,随着过程噪声的增大,随机游走估计 ISB 策略的定位性能得到逐步提升。使用拼接后钟差时,过程噪声设置为 $1.0 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 可以获得所有处理策略中的最佳定位性能;而随着过程噪声的进一步增大,随机游走参数定位性能与白噪声估计策略趋于相同。当进行跳变探测和钟差拼接时,只需将过程噪声设置为 $0.5 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 以上时即可获得理想定位精度;而使用原始钟差序列时,过程噪声需放大至 $2.5 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 才能完全覆盖 GPS 钟差跳变对定位带来的不利影响。该数值大于 ISB 过程噪声估计的一般值。以 Net_Diff (Zhang, 2023)为例,其默认值为 $1.0 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 。此时,动态定位精度将由 0.08 m 放大至 0.32 m,同时定位收敛时间增加了 5%。从统计结果可知,当该偏差被妥善处理时,B2b-PPP 动态水平定位精度和垂直定位精度分别可达 0.04 m 和 0.07 m,平均收敛时间为 23.0 min;对于静态定位水平定位精度和垂直定位精度皆为 0.02 m,平均收敛时间为 18.0 min。

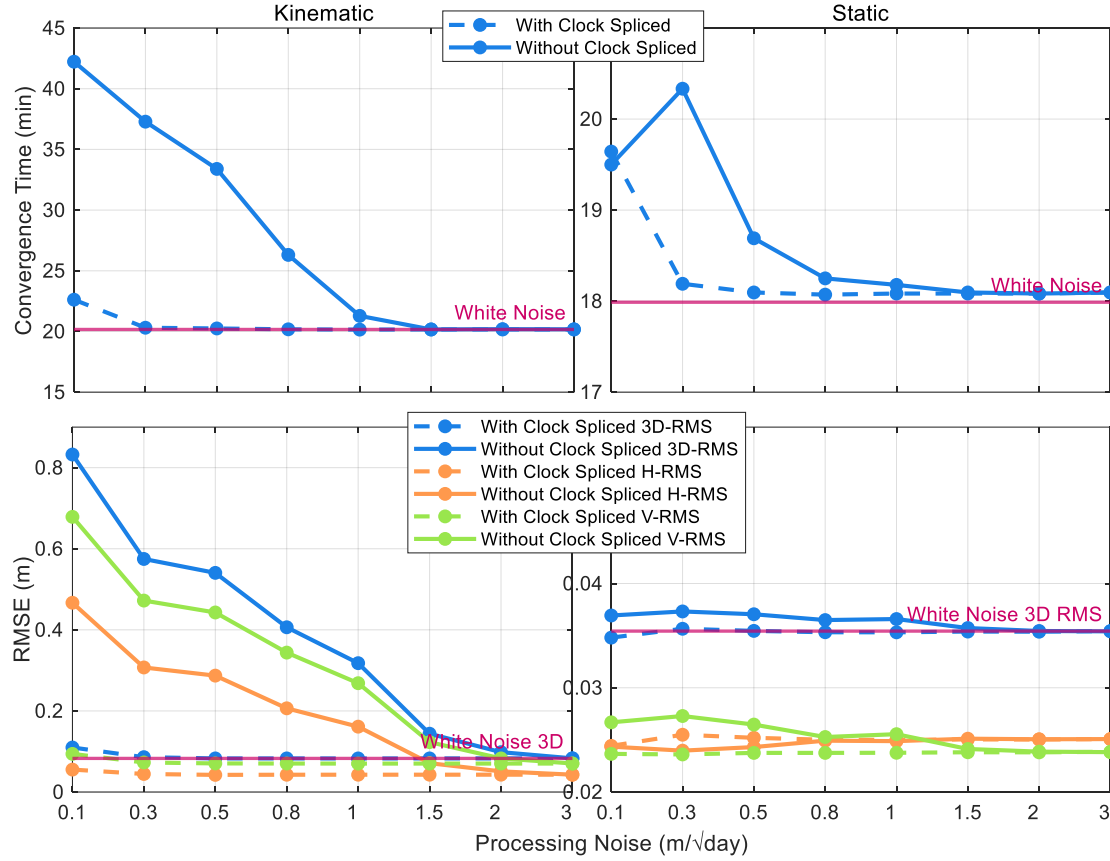


图 5-7 不同 ISB 估计策略对定位服务性能影响对比图

Figure 5-7 Comparison plot of positioning service performance with different ISB estimation strategies

为了验证对 GPS 降权的双系统 B2b-PPP 定位效果，首先使用原始钟差进行实验。GPS 的降权系数 f_{GPS} 分别被设置为 1.0, 2.0 和 4.0。ISB 估计策略设置为随机游走参数估计，过程噪声分别设置为 1.0 和 2.0 $\text{m}/\sqrt{\text{day}}$ 进行对比。使用钟差拼接方法，并将过程噪声设置为 0.5 $\text{m}/\sqrt{\text{day}}$ 进行定位统计以作为定位性能参考值。图 5-8 中展示了不同降权系数与不同随机游走噪声设置下的定位性能对比。从图中可以看出，随着 GPS 权重的降低，精度会相对增加。加权系数从 1.0 至 4.0，定位精度从 0.32 m 降低到 0.09 m，而与之相对的是，收敛时间明显增加，从 21.3 min 增加至了 30.6 min。随着过程噪声的增加，不同权重下的定位表现趋于相同。除此之外，在使用拼接钟差时，如图中红色虚线标记，当 f_{GPS} 设置为 2.0 时其定位性能最优，相较于 f_{GPS} 为 1.0 时精度提升 8%，而收敛时间基本一致。这是由于北斗轨道钟差精度优于 GPS 所致(Tao et al., 2021)。

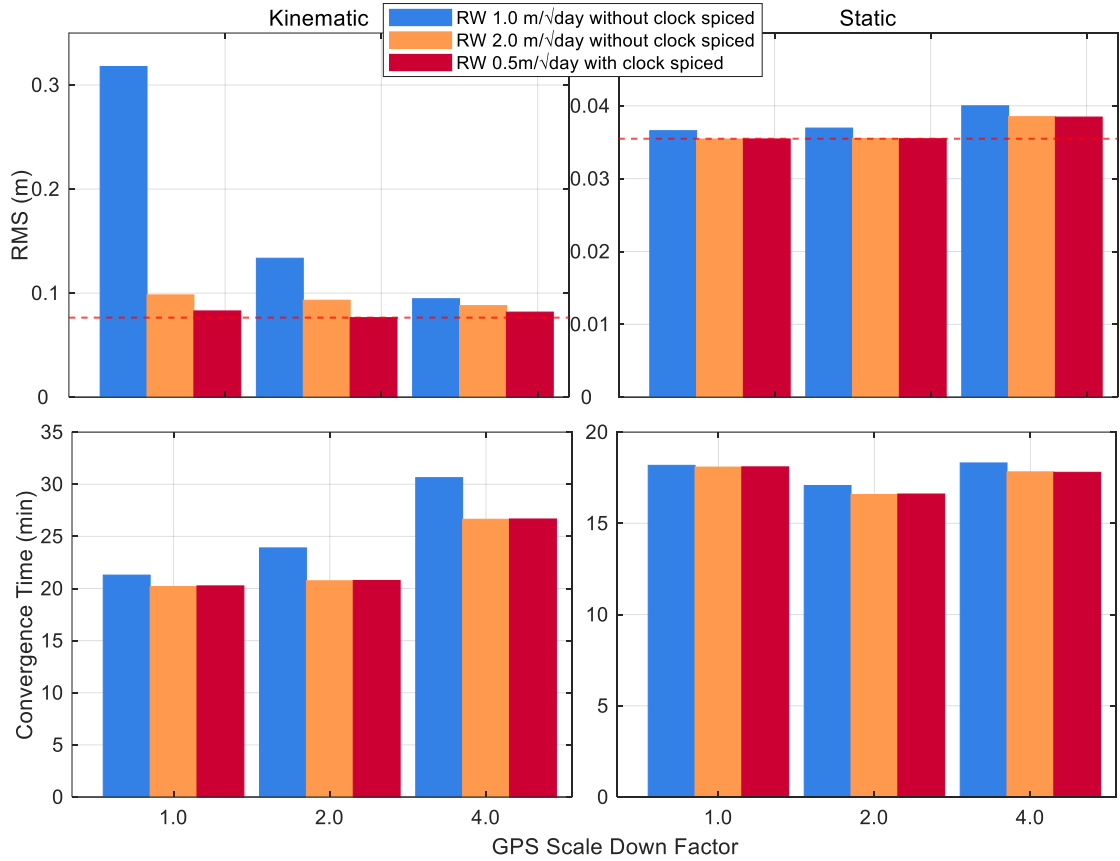


图 5-8 不同加权系数对定位性能的影响

Figure 5-8 Impact of different weighting coefficients on positioning performance

5.3 B2b-PPP 完好性指标精度评估与优化算法

在 B2b-PPP GPS 钟差跳变被妥善处理的前提下，本节首先提出将 B2b 中播发的 URA 用于随机模型构建的方法，并对其定位效果进行了讨论分析。经统计发现 B2b 中自身播发的 URA 信息无法准确描述用户实际距离误差。据此，进一步提出了 URA 优化估计方法。使用优化的 URA 对定位性能进行验证，并讨论其播发方法。

5.3.1 基于 URA 的 B2b-PPP 随机模型构建方法

一般对于 SPP, URA 一般通过伪距残差计算得到(杨赛男, 2017); 而对于 PPP, URA 参数 σ_{URA^s} 需要由相位残差统计得到。URA 数值本身反映了卫星 s 的轨道、钟差误差、相位噪声以及其他未模型化偏差对该测站在卫星径向的影响，因此将其用于定位随机模型构建时，第 s 颗卫星伪距观测值随机模型依旧通过式(5-10)计算，而相位观测值的随机模型可以表达为：

$$\sigma^s = \sigma_{\text{URA}^s} * \varphi = \sigma_{\text{URA}^s} * \left(0.5 + \frac{0.5}{\sin(A_{\text{Ele}})}\right) \quad (5-12)$$

5.3.2 B2b 播发 URA 定位性能评估

首先对时长七天的 B2b 系统播发 URA 时间序列进行分析, 其时间序列如图 5-9 所示。从图中可以看出, 在 B2b 中 BDS-3 卫星的 URA 值分布于 0.02 m 至 0.2 m, 其中以 0.07 m 到 0.20 m 最为广泛。而对于 GPS 卫星, 其 URA 明显普遍大于 BDS-3, 大部分数值分布在 0.22 m 到 0.67 m 之间。

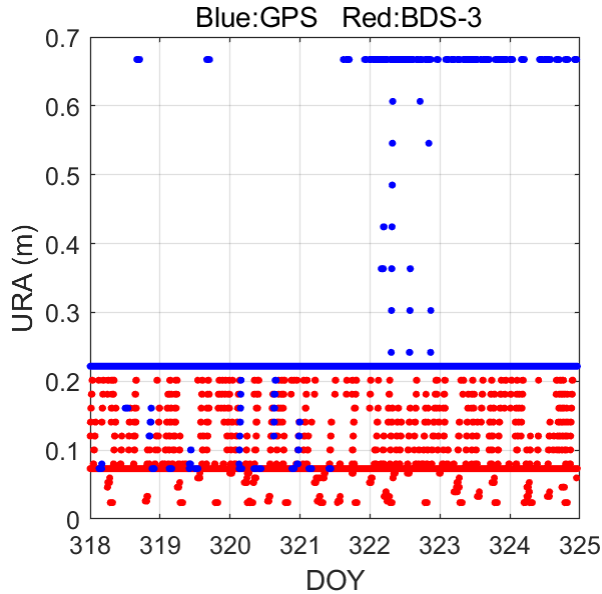


图 5-9 B2b-PPP URA 参数时间序列图

Figure 5-9 Time series plot of URA parameters for B2b-PPP

为了对 URA 定权方法进行验证, 使用七天的定位数据进行 B2b-PPP 定位, 并与不考虑 URA 的定权方法用作对比分析。对于 GPS 卫星钟差跳变, 使用钟差探测和拼接方法进行消除。图 5-10 展示了 JFNG 站 DOY192 天的单天定位误差时间序列。仅考虑观测噪声和高度角的定权方式相比于使用 URA 定权反而在定位精度和收敛时间上表现更佳。对所有测站定位结果进行统计, 结果列于表 5-2 中, 可以看出不论是静态还是动态模式下, 使用 URA 定权的收敛时间都显著增大。

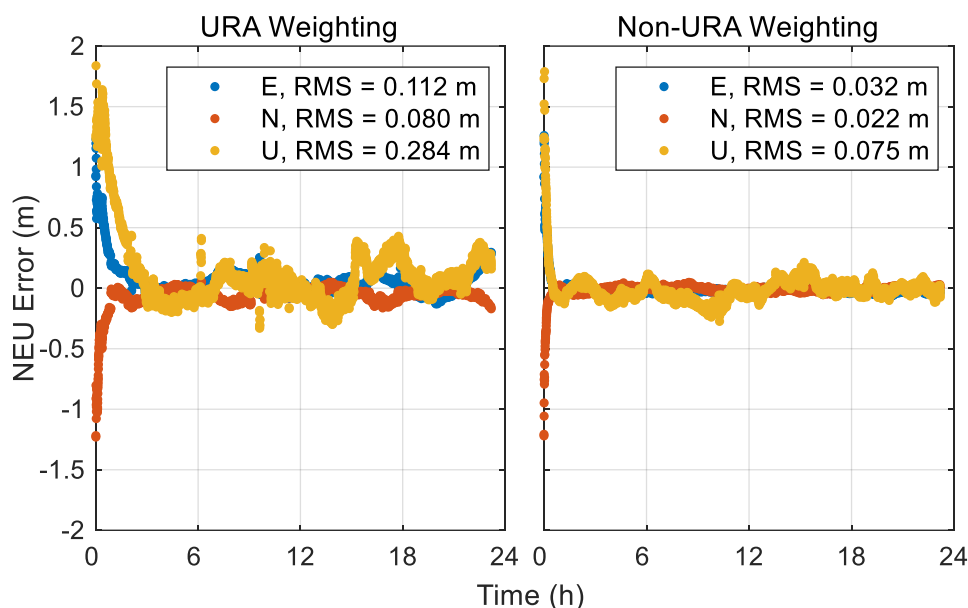


图 5-10 是否使用 URA 定权对单站单天定位误差序列对比图

Figure 5-10 Comparison plot of single-station single-day positioning error sequences with and without URA weighting

表 5-2 是否使用 URA 定权定位性能统计表

Table 5-2 Statistical table of positioning performance with and without URA weighting

Mode	Kinematic		Static	
	RMSE (m)	Convergence time (min)	RMSE (m)	Convergence time (min)
URA Weighted	0.20	117.0	0.05	90.0
Non-URA Weighted	0.08	20.3	0.04	18.1

为了找出使用 URA 定权后定位性能减弱的原因，本文进一步对 URA 时间序列进行分析。从上图中可以看出，URA 数值中很大一部分比例在 0.1 m 以上，而在随机模型中，原始伪距和相位观测值的观测噪声分别被设置为 0.3 m 和 0.003 m。因此 URA 较大的数值会导致相位观测值的相对权重大幅减小，从而造成了 B2b-PPP 收敛时间的显著增加。据此。进一步考虑使用 URA 等比缩小系数 f_{URA} 对 URA 进行等比缩小处理，处理后的 URA' 可表达为：

$$URA' = \frac{URA}{f_{URA}} \quad (5-13)$$

对等比缩小系数进行调整，并重新评估 URA 定权方式的定位性能，定位统计结果如图 5-11 所示。从中可以看出，等比缩小系数从 1 一直放大至 120，而定位精度随着系数增大逐渐趋近于不采用 URA 定权的结果，在本实验中没有找到 URA 定权精度更佳的缩小系数。据此可以推断 B2b 播发的 URA 精度较差，无法为 B2b-PPP 随机模型进一步精化做出贡献。

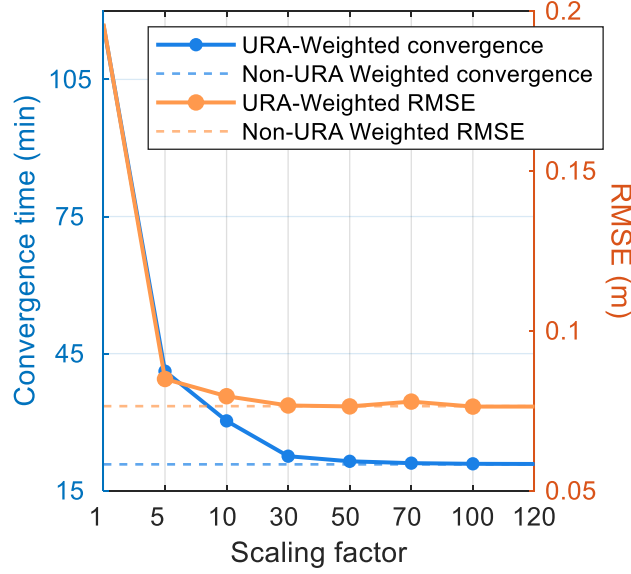


图 5-11 不同比例因子 URA-B2b-PPP 定位性能统计图

Figure 5-11 Statistical plot of positioning performance for URA-B2b-PPP with different scale factors

5.3.3 B2b-PPP URA 优化估计

5.3.3.1 估计方法

由于 URA 表征检测站相位残差的精度指标，其计算公式可表示为：

$$URA_j^s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \bar{v}_{j,r}^{s^2}}{n}} \quad (5-14)$$

其中， URA_j^s 为卫星 s 在 j 频点的 URA 统计值，本文中用户端采用双频消电离层组合模型，因此本节估计 IF 频点 URA。 $\bar{v}_{j,r}^s$ 为测站 r 对卫星 s 在 j 频点的相位验后残差， n 为卫星 s 在当前历元的验后残差样本数。

为了增加 URA 统计值的可靠性，本节共选取了 11 个平均分布在中国及周边地区的 IGS 检测站作为基准站进行 URA 优化估计，另外选取 4 个测站作为用户站进行定位性能验证，各站点分布如图 5-12 所示。

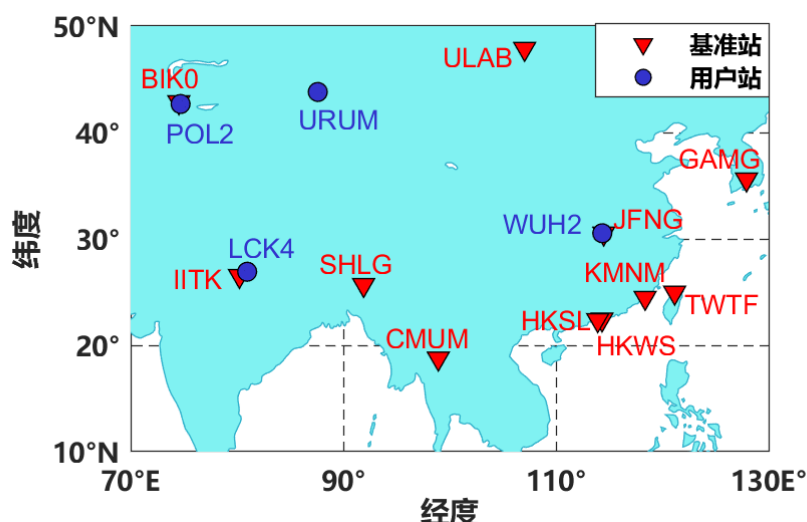


图 5-12 URA 优化估计所用测站与定位验证测站(红色)分布图

Figure 5-12 Distribution map of stations used for URA re-estimation and validation stations (highlighted in red)

图 5-13 展示了利用监测站数据实时优化估计北斗 B2b URA 的流程。首先从 SINEX 文件获取各监测站精确站坐标。然后利用实时接收的北斗 B2b 轨道钟差改正数以及各检测站的实时观测数据,对各站逐历元进行固定站坐标的实时双频消电离层组合 PPP 滤波解算。此时待估参数包括测站钟差、对流层延迟以及各卫星无电离层组合浮点模糊度。通过卡尔曼滤波进行参数估计,并计算此时的相位残差。在理论上,此时相位残差吸收了轨道和钟差误差在卫星观测方向的投影以及相位观测噪声。在系统端对验后残差进行累计,建立一个 30 个历元的验后残差样本,从而提高 URA 计算的可靠性。在样本数满足要求后开始通过滑动窗口的方式逐历元估计各卫星 URA。

该策略在过程中一共有两次粗差探测与样本过滤来对 URA 计算进行质量控制。第一次是在计算 URA 之前对统计样本量进行筛选:(1)删掉卫星高度角小于 15° 时的相位残差,避免较大的相位观测值噪声或多路径效应污染样本;(2)监测站实时滤波解算中进行验后粗差探测和剔除过程中,被踢掉的卫星验后残差不参与 URA 统计值计算。第二次是在计算完所有卫星 URA 时,对该卫星是否可用进行评价:(1)统计样本中,超过三个测站连续对某一颗卫星验后粗差检测未通过的,认为该卫星轨道钟差存在精度问题,标记该卫星不可用;(2)对于 URA 超过 3σ ($\leq 99.7\%$) 的值,认为是粗差,标记该卫星不可用。

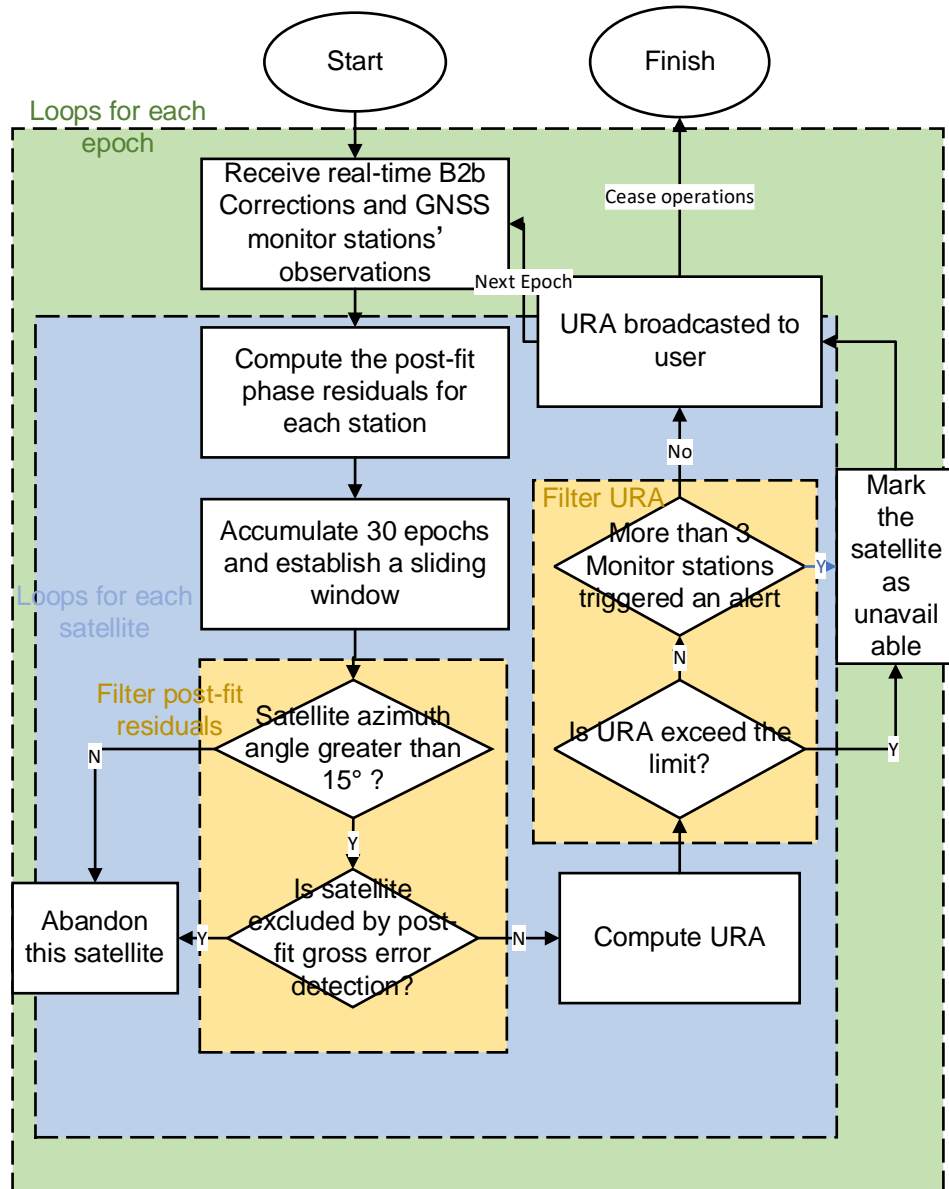


图 5-13 URA 优化估计策略流程图

Figure 5-13 Flowchart of URA optimization estimation strategy

5.3.3.2 优化 URA 序列分析

依照 5.3.3.1 中的测量，对连续一周的 B2b URA 进行了优化估计与统计。图 5-14 为系统端计算得到的 BDS-3 和 GPS 一天中的优化估计 URA 时间序列。可以看出两个系统的 URA 时间序列为厘米级，大部分在 2 cm 范围以内。进一步对其分布范围进行统计，其数值分布如图 5-15 所示。可以看到，BDS-3 卫星 URA 量级小于 GPS，BDS-3 卫星 95% 分布在 1.5 cm 内，GPS 95% 分布在 1.7 cm 内。统计知 99.7% 分布在 1.78 cm 内，因此将其作为 5.3.3.1 中 URA 粗差剔除的阈值。除此之外，BDS-3 的 URA 最广泛落于 0.5 cm 区间内，GPS 的 URA 最广泛落于 0.9 cm 区间内，其比例大至为 1: 2，反映了 B2b 中两者的轨道钟差精度差异。

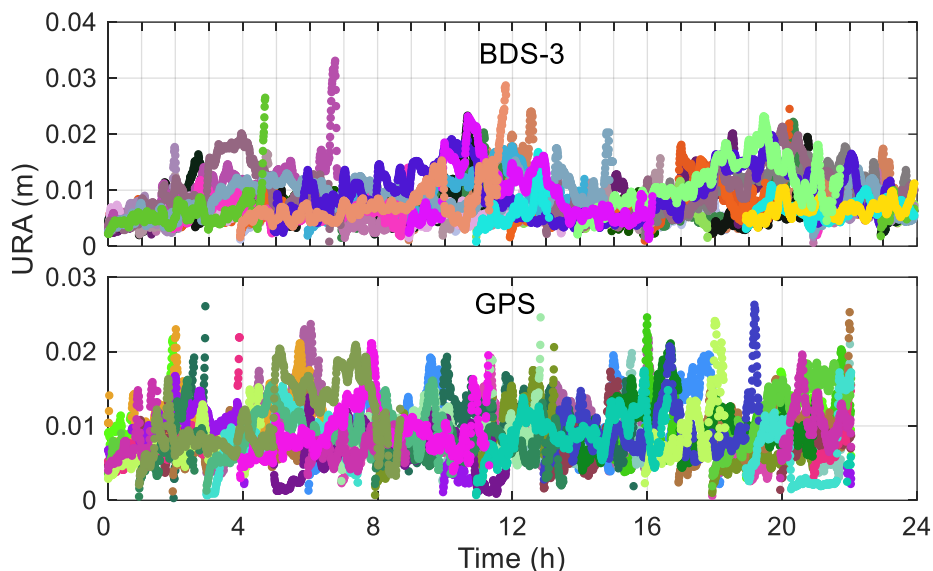


图 5-14 优化估计 URA 时间序列图

Figure 5-14 Time series of re-estimated URA

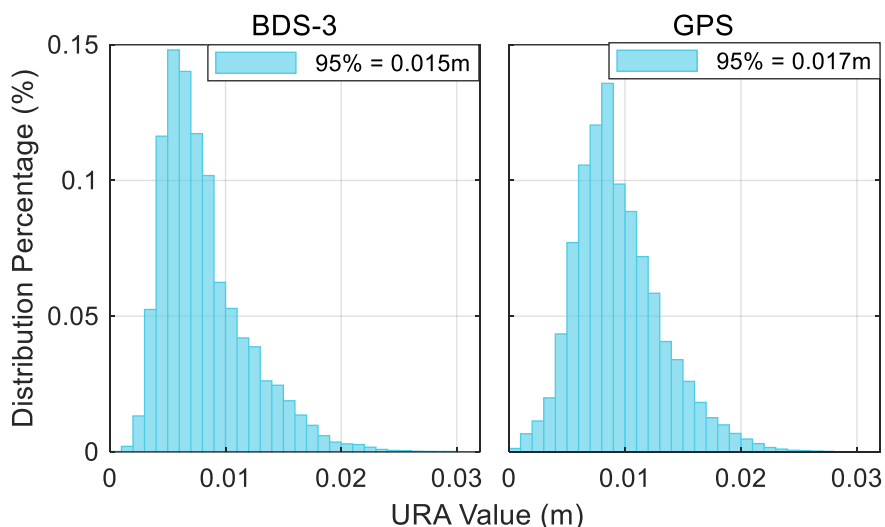


图 5-15 URA 值域分布图

Figure 5-15 Distribution of URA values

5.3.4 基于优化 URA 的 B2b-PPP 性能评估

为了评估优化估计 URA 的性能，本节使用优化后的 URA 对 B2b-PPP 进行随机模型构建，并再次与仅使用高度角和观测值精度定权方式的定位性能进行对比。本节中各精度指标统计方法与 5.2.3 节相同。需要说明的是，考虑到系统端估计 URA 前期需要收敛过程，本节在 URA 系统端连续运行 1 小时后再进行用户端 B2b-PPP 定位测试与性能统计。

表 5-3 B2b-PPP 定位数据处理策略
Table 5-3 B2b-PPP processing strategies

处理策略	优化 URA 定权 B2b-PPP	不使用 URA 定权 B2b-PPP
观测值	GPS: L1+L2 BDS-3: B1+B3	-
采样率/s	30	-
轨道钟差	GPS:LNAV+B2b 改正数 BDS-3:CNAV-1+B2b 改正数	-
截止高度角/°	10	-
滤波方式	卡尔曼滤波	-
对流层延迟	干延迟: 萨斯塔莫宁 湿延迟: 随机游走(1 cm/√h) 投影函数: VMF ^[25]	-
电离层延迟	双频消电离层组合	-
系统间偏差	白噪声估计	-
卫星伪距硬件延迟	GPS: 无需修正 BDS-3: 使用 B2b 硬件延迟偏差 信息修正	-
随机模型	URA 与高度角综合定权	观测噪声与高度角综合定权

图 5-16 展示了分别使用两种不同定权方法的单天解算误差序列，测站为 JFNG, 时间为 2023, DOY: 192。从单天统计值中能看出使用优化后 URA 的定权方式能明显增加动态定位在三个方向的统计精度，其中对 E 方向和 U 方向提升显著。

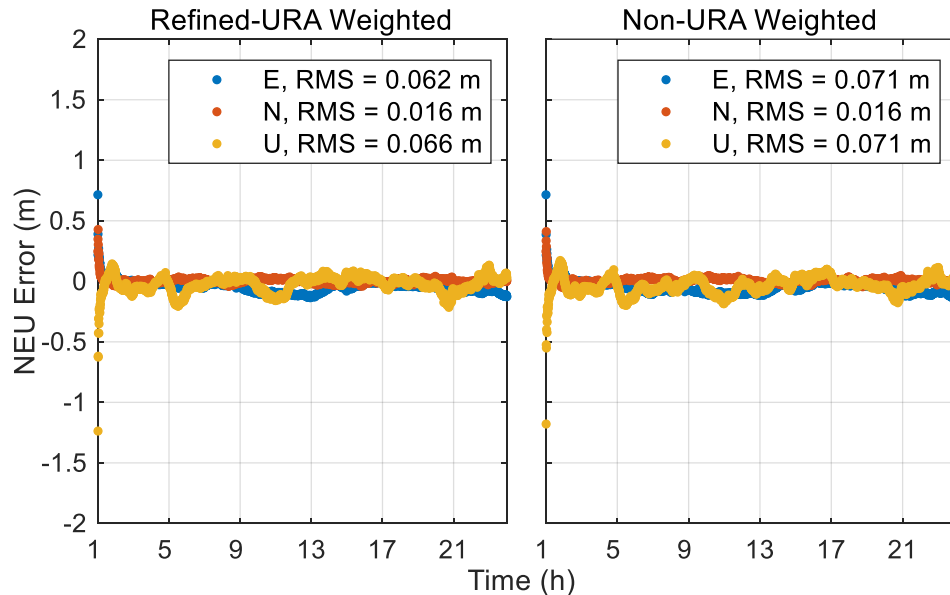


图 5-16 优化 URA 定权精密定位单天误差序列对比图

Figure 5-16 Comparison plot of single-day precise positioning errors with optimized URA weighting

图 5-17 展示了使用两种定权方法，对所有测站前半个小时收敛精度以及收敛测站百分比数的统计结果。从图中可以看出，使用精化 URA 定权能有效增加用户使用 B2b-PPP 前期的收敛速度和定位性能。相对于不使用 URA 进行定权，使用精化 URA 前半小时平均三维收敛精度提升超过 6 cm，平均测站收敛百分比前 10 分钟提升 50%，前 15 分钟提升 10%，25 min 钟内 100%测站收敛。表 3 展示了所有测站的统计结果。使用精化 URA 对 B2b-PPP 收敛时间提升明显，动态定位收敛时间提升从 13.2 min 缩短至 10.7 min，提升达 18.9%，静态定位收敛时间提升 14.5%。由于 URA 提供了更准确的观测值随机模型和卫星完好性信息，收敛精度也较之前有所提升，动态和静态收敛精度分别提升了 11.2%和 8.9%。

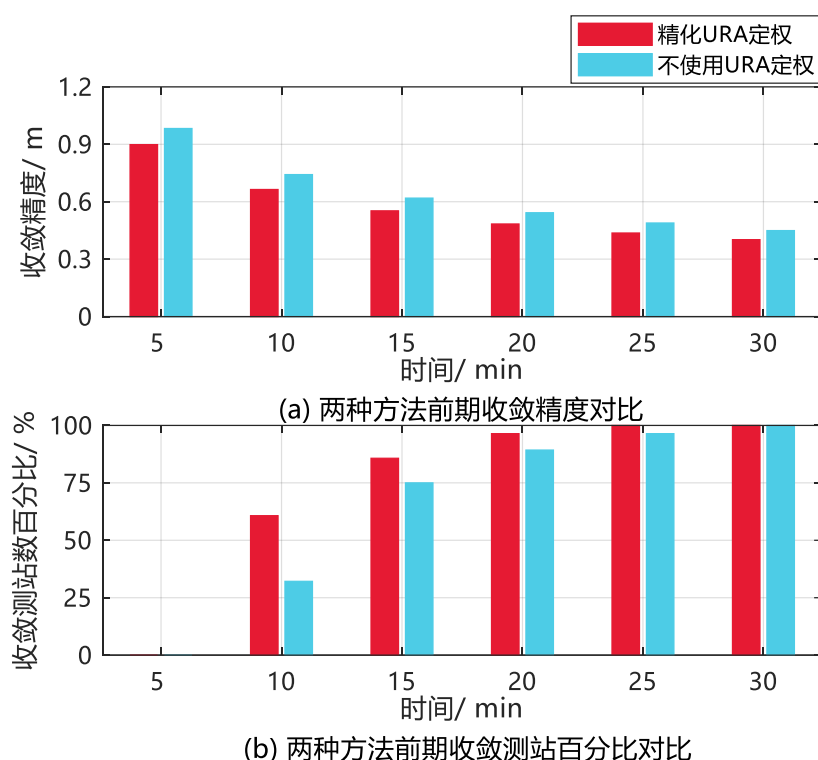


图 5-17 优化 URA 定权前期定位性能对比图

Figure 5-17 Comparison plot of positioning performance before and after optimizing URA weighting

表 5-4 优化 URA 定权精密定位性能统计表

Table 5-3 Statistical table of precise positioning performance with optimized URA weighting

Mode	Kinematic		Static	
	RMSE (m)	Convergence time (min)	RMSE (m)	Convergence time (min)
Non-URA B2b-PPP	0.098	13.2	0.045	11.7
Refined-URA B2b-PPP	0.087	10.7	0.041	10.0
Improvement Percentage (%)	11.2	18.9	8.9	14.5

优化后的 URA 除了可以提升用户定位随机模型的精度，其标记的不可用信息也为用户提供了系统完好性判断。图 5-18 展示了 IITK 测站在 2023, DOY: 319 天某一时段的 PPP 解算误差序列。从图中可以看出，在该时段内，URA 卫星不定时出现了一颗卫星的不可用警告。上下两图分别展示了使用 URA 进行卫星剔除和不进行卫星剔除的定位结果。从精度统计可以看出，使用优化 URA 进行完好性判断能有效保证在卫星异常时段内的定位精度和稳定性。

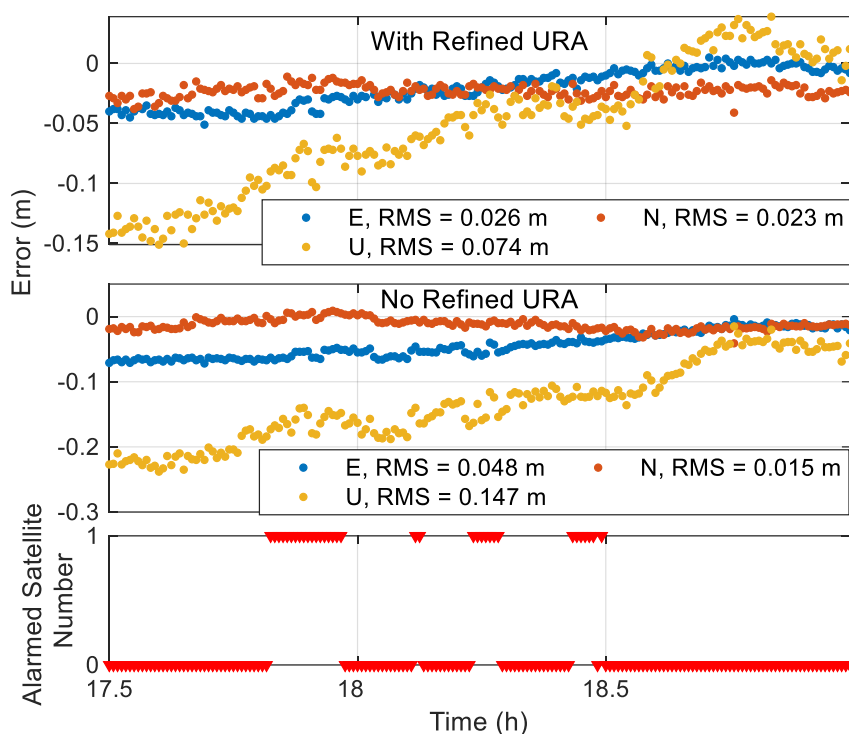


图 5-18 优化 URA 作为完好性信息对定位影响图

Figure 5-18 Graph showing the impact of optimized URA as integrity information on positioning

5.3.5 优化 URA 参数播发

作为服务端，经过优化估计的 URA，既可以通过网络进行播发，也可以通过北斗短报文通讯设备进行数据播发。前者具有更佳的通讯效率和传输频率；而后者可以摆脱对互联网的依赖，在海洋、沙漠等特殊地区保持 B2b URA 参数的获取能力。因此，本节以短报文通讯为例，设计了一种基于北斗全球短报文系统的优化 URA 编码方式。

由于北斗 B2b 目前服务范围仍在中国及周边区域，因此 URA 增强信息既可以选择通过北斗区域短报文进行播发，也可以通过北斗全球短报文进行播发。其中区域短报文通讯带宽超过 14000 bit，而全球短报文通讯带宽为不超过 560 bit。本节以全球短报文为例进行 URA 电文参数编码设计。

与 4.2.2.2 节相似，首先对历元时间信息以报头形式进行编码，具体信息包括历元的参考时刻(BDT 周+BDT 秒)，以及该历元包含的 URA 卫星总数。报头各参数编码信息如下表所示。

表 5-5 使用短报文播发 B2b 优化 URA 信息头

Table 5-4 Header for broadcasting optimized URA information using short messages (B2b)

Header Part	Range	Value accuracy	Effective-range (decimal)	Size
BDT week	0~4095	1	1~4095	12 bits
BDT second	0~1,048,576	1	0~604800	20 bits
Number of satellites	0~63	1	0~63	6 bits
Total		-		38 bits

在此基础上,对单颗卫星需播发信息进行规定。单颗卫星播发内容包括:系统标识,卫星号以及卫星 URA。其中,系统标识为 0 标识 BDS-3 卫星,1 表示 GPS 卫星;URA 精度设置为 0.1mm,范围为 0~17.8 mm。其中,当播发值为 17.8 mm 时,为系统端标记该卫星不可用。单颗卫星具体编码设计信息如表 5-5 所示。

表 5-6 使用短报文播发 B2b 优化 URA 单颗卫星信息

Table 5-5 Broadcasting single-satellite optimized URA information using short messages (B2b)

Body Part	Range	Value accuracy	Effective range (decimal)	Size
System	0~2	1	0~1	2 bits
PRN	1~63	1	1~63	6 bits
URA	0~17.8 mm	0.1 mm	1~178	8 bits
Total		-		16 bits

综上所述,使用全球短报文单次播发编码格式如图 5-19 所示,其中报头占 46bits,单颗卫星 URA 信息占 16 bits,按照此编码方式,单次通讯最多可播发 30 颗卫星 URA 信息,满足 B2b 当前 GPS+BDS-3 卫星的使用需求。

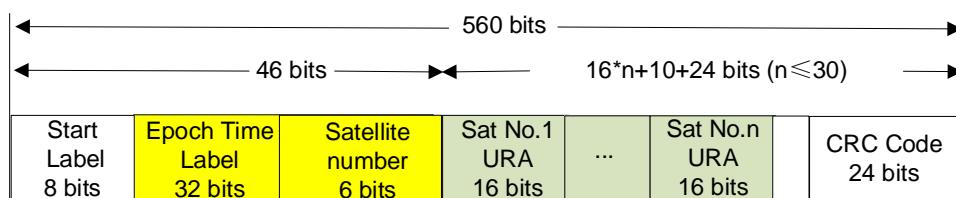


图 5-19 单历元优化 URA 电文编码结构示意图

Figure 5-19 Schematic diagram of the encoding structure for single-epoch optimized URA messages

考虑到短报文系统播发频率限制以及传输中存在丢包现象,可能会导致用户

收到的优化 URA 在使用时存在时延, 因此本节进一步对优化后 URA 对定位精度随使用时延的影响进行研究。图 5-20 展示了将系统端播发的 URA 分别延长 5-30 分钟用户端的定位收敛时间和收敛精度统计。从图中可以看出, 时延对用户定位时间影响较小, 30 分钟时延内收敛时间皆优于不使用 URA 的收敛时间。而 URA 时延对定位精度影响较为明显, 当时延超过 20 分钟时, 使用优化 URA 的精度将比不使用 URA 的定位精度更差, 因此为了保证用户精度, URA 的时延不宜超过 20 min。从 4.3.2 节对短报文通讯实测效率来看, 超过 97% 的短报文通讯丢包/中断连续时长不超过 5 分钟。因此使用短报文播发优化 URA 可以保证用户定位精度提升。

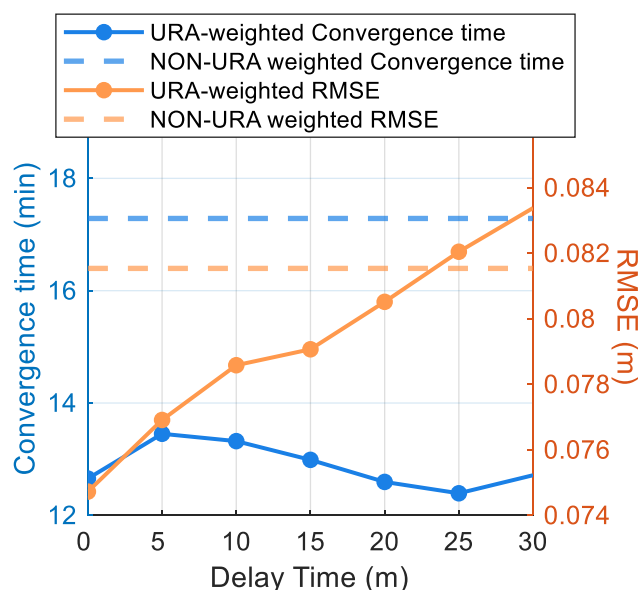


图 5-20 精化 URA 随时间定位性能变化示意图

Figure 5-20 Schematic diagram illustrating the variation of positioning performance over time with refined URA

5.4 本章小结

本章主要基于北斗 B2b PPP 服务, 对其现有服务性能进行分析并提出了一系列优化方案, 对本章主要研究内容总结如下:

(1) 针对双系统 B2b-PPP 定位中 GPS 钟差跳变可能会对定位造成精度损失的问题, 提出了一种 GPS 钟差跳变探测与拼接的方法; 在此基础上, 确定了三种策略有效解决该偏差对定位的影响, 包括: 1) 对 ISB 参数进行白噪声估计, 能够使 ISB 参数完全吸收 GPS 钟差的系统性跳变, 此时无论是否使用拼接后的钟差都能保证定位精度; 2) 将 ISB 参数作为随机游走噪声估计, 同时对 GPS 钟差进行跳变探测与拼接, 此时将过程噪声设置为 $0.5 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 可以满足定位需求。此时将过程噪声设置为 $1.0 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 能够获得最佳定位性能。3) 将 ISB 参数作为随机游走参数估计, 同时不使用钟差拼接方法, 此时需要将 ISB 参数的过程噪声设置

为 $2.5 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 以上来吸收 GPS 钟差跳变。此外, 经过统计分析证明, 使用 GPS 降权无法同时保证定位精度与收敛时间, 对于 GPS 系统性钟差跳变不是一种有效的解决方案。

(2) 钟差跳变被消除后, 双频 PPP 的动态定位精度可以从 0.83 m 减小至 0.08 m , 收敛时间缩短 22 min 。除此之外, 在跳变被修正的情况下, 将 BDS-3 与 GPS 的权重设置为 2: 1 能提升双系统 B2b-PPP 的定位性能, 与 1: 1 相比动态提升可达 8%。

(3) 提出了将 B2b URA 用于定权的随机模型构建方法。并通过实验证明 B2b 自身播发 URA 精度无法满足 B2b-PPP 随机模型构建要求。因此, 基于 B2b-PPP 的轨道钟差, 提出了一套 URA 优化估计策略。进行 B2b-PPP 定位解算时使用优化后的 URA 能显著提升定位性能: 动态定位收敛时间提升从 13.2 min 缩短至 10.7 min , 提升达 18.9%; 静态定位收敛时间提升 14.5%, 收敛精度较不使用 URA, 动态和静态收敛精度分别提升了 11.2% 和 8.9%。除此之外, 优化后的 URA 作为完好性信息可以在用户端可以对异常卫星进行标记并及时剔除, 从而进一步保证 B2b 服务的稳定性和可靠性。

(4) 本章针对优化后 URA 的播发问题, 提出了一种结合全球短报文系统播发方法。在此基础上, 针对短报文自身存在的丢包与数据时延, 分析了优化 URA 随时延对定位精度的影响。实验证明, 优化 URA 在现有短报文通讯频率和丢包率下能够完整发挥优化 URA 对 B2b 的性能增强。

第6章 总结与展望

6.1 本文主要创新点与结论

本文着眼于提升北斗卫星导航系统在全球范围内定位服务性能、丰富北斗系统精密定位手段,针对北斗二号与北斗三号联合、北斗三号全球短报文、B2b精密单点定位等服务,提出了一系列精密定位算法以及服务优化改进策略。总结本文主要创新点与结论如下:

(1) BDS-2 与 BDS-3 系统偏差由 BDS-2 系统和 BDS-3 系统接收机硬件延迟差异以及卫星系统偏差构成。其中接收机硬件延迟差异与接收机类型高度相关。对于北斗卫星广播星历,钟差基准差异稳定;而不同分析中心的实时精密轨道误差钟差基准差异不同,且钟差基准存在天内频繁切换,从而导致 ISB 估值存在跳变。BDS-2 与 BDS-3 系统偏差对 BDS-2/BDS-3 定位收敛具有显著影响。在估计 ISB 参数后, SPP 定位精度从 2.42 m 提高至 2.22 m,提升达到 8.0 %。基于 WHU 实时产品,动态 RT-PPP 定位精度从 0.59 m 提升至 0.21 m,收敛时间从 200.0 min 缩短至 29.5 min;静态 RT-PPP 收敛时间从 110.0 min 缩短至 15.9 min。统计分析表明,在使用任意一家实时产品时,增加 BDS-2/BDS-3 间系统偏差估计能有效提高定位性能,且偏差估计方式应优先选用随机游走方式估计。

(2) BDS-3 显著优化了 BDS 导航系统在全球范围内的几何构型。BDS-2/BDS-3 联合星座相对于 BDS-2 星座,在亚洲地区平均可见卫星数从 9 颗提升至 18 颗, PDOP 从 2.92 提升至 1.43;对于欧非大陆地区可见卫星数从 5 颗扩展至 13 颗, PDOP 从 6.25 显著提升至 1.67;对美洲地区所有测站单天任意时段平均可见卫星数从小于 4 颗扩展至 9 颗,平均 PDOP 达到 2.32。

(3) BDS-3 在全球范围内定位精度显著提升相比 BDS-2 提升显著。基本导航服务中,亚洲地区定位精度从 11.1 m 提升至 2.5 m;欧非大陆从 14.6 m 提升至 2.66 m;美洲地区从无法连续定位提升至可实现全天连续精度为 3.24 m 导航定位服务,在联合 BDS-2/BDS-3 后, BDS-2/BDS-3 联合伪距定位在全球平均定位精度达到 2.6 m。对于实时 PPP, BDS-3 相对于 BDS-2 在亚洲地区动、静态收敛时间分别提升 118.7 min、60.6 min;定位精度分别提升 0.48 m、0.10 m;在欧非地区,动、静态定位收敛时间分别提升 178.1min 和 157.2 min,定位精度分别提升 0.6 m、0.27 m;在美洲地区 BDS-2/BDS-3 联合定位动静态可以分别在 68.9 min、25.0 min 完成收敛,可以实现动态 0.44 m、静态 0.07m 定位精度。BDS-3 在全球范围内动/静态定位精度分别达到 0.3 m/0.05 m,收敛时间达到 43 min/18.9 min。BDS-2/BDS-3 联合定位精度在其基础上可进一步提升动态定位服务性能,在全球平均定位精度动态达到 0.23 m;平均收敛间分别达到 35.0 min,相比 BDS-3 提升

23.3%、18.6%。对于广域差分星基增强定位, BDS-2/BDS-3 双频定位相比 BDS-2 定位动态、静态收敛时间分别缩短 5.8 min、5.2 min; 动态定位精度提升达到 30%, 静态定位精度提升达到 16%; 单频 BDS2/BDS-3 联合定位动态收敛时间相比 BDS-2 缩短超过 80 min, 定位精度提升 29%; BDS2/BDS-3 联合定位静态收敛时间相比 BDS-2 缩短超过 50 min, 定位精度提升达到 44%。

(4) 基于 BDS-3 全球短报文链路, 提出了一种使用 GSMC 实现多系统实时 PPP-AR 的方法。证明 SSR 生成的 OSR 改正数在短期内具有线性变化趋势, 与卫星轨道和钟差在视线方向的投影为线性变化一致。用线性拟合的方式对高采样率 OSR 改正数进行拟合, 播发拟合系数可以提高改正数的可用时长。通过短报文通讯设备实测证明, 与只播发 OSR 改正数相比, 播发 OSR 改正数的线性拟合系数将改正数可用时长从 2.5 min 延长至 7.5 min。除此之外, 在短报文播发频繁出现丢包与延迟发送的情况下, 该方法依然可以保证用户定位精度。SMC-PPP-AR 方法相对于 SMC-PPP 浮点解在定位前期优势更为明显: SMC-PPP-AR 在平面和高程的前两小时定位精度相较于 SMC-PPP 分别提升了 1 cm 和 12 cm。与 SMC-PPP 相比前 40 min 完成收敛的测站比例增加了 26%。对整体定位性能而言, SMC-PPP-AR 的动态与静态定位精度分别提升了 10.0% 和 7.8%; 收敛时间分别缩小了 14.5% 和 11.8%。受系统端改正数的投影误差、拟合误差以及用户端改正数外推误差的影响, SMC-PPP-AR 相比 SSR-PPP-AR 在定位性能有所下降, 其动态定位精度损失 0.03 m, 定位收敛时间延长了 39%; 静态定位收敛时间延长了 29%。动态模式下 SMC-PPP-AR 的模糊度固定成功率下降了 4%, 首历元固定时间延长了 9.7 分钟。

(5) B2b-PPP 精密服务产品中 GPS 钟差产品存在系统性跳变, 会严重削弱 B2b-PPP 双系统定位性能。对其共有三种策略有效解决该偏差对定位的影响, 包括: 1) 对 ISB 参数进行白噪声估计, 能够使 ISB 参数完全吸收 GPS 钟差的系统性跳变, 此时无论是否使用拼接后的钟差都能保证定位精度; 2) 将 ISB 参数作为随机游走噪声估计, 同时对 GPS 钟差进行跳变探测与拼接, 此时将过程噪声设置为 $0.5 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 可以满足定位需求。此时将过程噪声设置为 $1.0 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 能够获得最佳定位性能。3) 将 ISB 参数作为随机游走参数估计, 同时不使用钟差拼接方法, 此时需要将 ISB 参数的过程噪声设置为 $2.5 \text{ m}/\sqrt{\text{day}}$ 以上来吸收 GPS 钟差跳变。实验证明, 钟差跳变被消除后, 双频 PPP 的动态定位精度可以从 0.83 m 减小至 0.08 m, 收敛时间缩短 22 min。除此之外, 在跳变被修正的情况下, 将 BDS-3 与 GPS 的权重设置为 2: 1 能提升双系统 B2b-PPP 的定位性能, 与 1: 1 相比动态提升可达 8%。

(6) 验证了 B2b-PPP 中 URA 参数用于定位随机模型构建的性能, 与传统随机模型相比其定位性能反而下降。在此基础上, 对 URA 进行了优化估计。优化后的 URA 用于随机模型构建能有效提升 B2b-PPP 的服务性能, 动态定位收敛时间

提升从 13.2 min 缩短至 10.7 min, 提升达 18.9%; 静态定位收敛时间提升 14.5%, 收敛精度较不使用 URA, 动态和静态收敛精度分别提升了 11.2% 和 8.9%。除此之外, 优化 URA 作为完好性信息可通过短报文通讯播发给用户, 用户端还可通过该 URA 对异常卫星进行标记并及时剔除, 从而进一步保证 B2b 服务的稳定性和可靠性。

6.2 下一步研究方向

鉴于本人科研水平有限, 尚有部分工作未能及时开展。结合已有工作目前国内研究热点, 总结下一步研究内容包括:

(1) 基于北斗全球短报文链路的多系统 PPP-AR 算法优化与 PPP-RTK 算法实现。目前虽已实现基于 GSMC 系统的多系统实时 PPP-AR 算法, 但是由于系统端采用宽窄巷无电离层组合方式估计相位小数偏差, 因此需要至少播发两个频点的相位小数偏差产品。而使用整数钟方法则只需要播发宽巷相位小数偏差产品从而进一步节约短报文带宽。此外, PPP-RTK 相对于 PPP-AR 能够实现定位瞬时收敛。实现 PPP-RTK 需要在 PPP-AR 基础上进一步播发区域电离层/对流层产品。区域大气产品对于目前 BDS-3 GSMC 传送带宽而言具有较大难度, 需要对其编码、播发方法进行进一步优化。

(2) 基于广播星历/PPP-B2b 产品的广域相位小数偏差产品解算。相位小数偏差产品估计精度受轨道精度影响。在区域范围内, 由于轨道径向误差对于所有测站相近, 因此可被卫星钟差吸收, 对相位小数偏差估计影响较小。而轨道切向和法相误差对窄巷相位小数偏差估计影响较大。PPP-B2b 轨道误差较大, 为了北斗 B2b 系统端下一步能够支持 PPP-AR, 需要对轨道误差较大情况下的相位小数偏差方法进行进一步研究。

(3) 基于 PPP-AR/PPP-RTK 系统与用户完好性监测与指标搭建。目前对于相位小数偏差产品、区域大气产品的系统完好性指标、完好性系统搭建等研究工作还较少。为了保证用户实时 PPP-AR/PPP-RTK 服务可靠性, 需要对系统端以及用户自主可靠性监测算法针对高精度定位进行进一步深入研究。

(4) 低轨卫星/GNSS 联合高精度定位算法研究。目前中国低轨卫星搭建工作已全面展开, 中国星网等已发射数颗低轨卫星。实测数据已经表明增加低轨卫星能够有效缩短实时 PPP 收敛时间。然而, 低轨卫星/GNSS 定位中依然有众多问题有待被研究, 如低轨卫星数据质量, 低轨卫星大气延迟处理方式以及如何用低轨卫星增强 GNSS 精密产品等。

参考文献

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X. *et al.* ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions[J]. *J Geod* 97, 47 (2023).
- An, X., Meng, X. & Jiang, W. (2020) Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination. *Satell Navig* 1, 7.
- Bancroft, Stephen. (1985) “An Algebraic Solution of the GPS Equations.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-21: 56-59.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. (1992) GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System[J]. *J Geophys Res Atmos* 97(D14): 15787-15801.
- Blewitt G. (1990) An Automatic Editing Algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 17(3):199-202.
- Blewitt, G., Hammond, W.C., Kreemer, C. *et al.* GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems[J]. *J Geod* 83, 335–343 (2009).
- Bock H, Dach R, Jaggi A, Beutler G. (2009) High-rate GPS clock corrections from CODE: support of 1 Hz applications[J]. *Journal of Geodesy*, 83(11):1083–1094.
- Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. (2006) Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. *Geophys Res Lett* 33(7).
- Cabinet Office. (2024) <https://qzss.go.jp/>.
- Cabinet Office, Government of Japan. (2022) Trial service of MADOCA-PPP has now started [EB/OL].
- Chen C, Xiao G, Chang G, Xu T, Yang L. (2021) Assessment of GPS/Galileo/BDS Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Using Products from Different Analysis Centers[J]. *Remote Sens* 13(16):3266-3285.
- Chen J, LI H, Wu B, Zhang Y, Wang J, Hu C (2013). Performance of real-time precise point positioning[J]. *Mar. Geodesy* 36(1): 98-108.
- Chen Junping, Chen Qian, Wang Bin, Yang Sainan, Zhang Yize, Wang Jungang,. (2017) Analysis of Inner-consistency of BDS Broadcast Ephemeris Parameters and their Performance[C], *Proceedings of the ION Pacific PNT 2017 Conference*, May.
- Chen J, Wang A, Zhang Y, Zhou J, Yu C. (2020) BDS Satellite-Based Augmentation Service Correction Parameters and Performance Assessment[J]. *Remote Sens* 12(5): 766-784.
- Chen J, Zhang Y, Yu C, Ding J. (2022a) Processing algorithms and performance

- evaluation of BDS RDSS location reporting service[J]. *Acta Geod. et Cartogr* 51(4):511-521.
- Chen J, Wang J, Yu C, Zhang Y, Wang B. (2022b). Improving BDS broadcast ephemeris accuracy using ground-satellite-link observations[J]. *Sat nav*, 3(11): 1-12.
- Chen J, Zhang Y, Wang A, Yu C, Song Z, Zhou J. (2022c) Models and performance of SBAS and PPP of BDS[J]. *Sat nav* 3(11):1-12.
- Chen, L., Li, M., Zhao, Y. et al. (2021) Multi-GNSS real-time precise clock estimation considering the correction of inter-satellite code biases[J]. *GPS Solut* 25, 32.
- CSNO (2015) Performance requirements and test methods for BDS RDSS unit. Chinese Satellite Navigation Office (CSNO), Beijing, China
- CSNO (2019) Development of the BeiDou Navigation Satellite System, version 4.0. China Satellite Navigation Office (CSNO), Beijing, China.
- CSNO (2020), Chinese Satellite Navigation Office, BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B2b (Version 1.0).
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P, et al. (2007) Bernese GPS software version 5.0[J]. *Astronomical Institute, [67] University of Bern*. 640: 114
- Dai X, Ge M, Lou Y, et al. (2015) Estimating the yaw -attitude of BDS IGSO and MEO satellites. *Journal of Geodesy*, 89(10): 1005-1018.
- EGSC (2023), European GNSS Service Centre. Galileo high accuracy service service definition document (HAS SDD) (Issue 1.0).
- EUSPA (2024). <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/>.
- Elsobeiey M, Al-Harbi S(2016) Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service[J]. *GPS Solut* 20(3):565-571.
- Fernandez-Hernandez, I., Chamorro-Moreno, A., Cancela-Diaz, S. et al. (2022) Galileo high accuracy service: initial definition and performance[J]. *GPS Solut* 26, 65.
- Galileo ICD (2015). <http://galileognss.eu/galileo-os-sis-icd/>.
- Ge M, Gendt G, Rothacher M. (2008) Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations[J]. *J Geod* 82(7): 389-399.
- Geng J, Meng X, Dodson A, Teferle F. (2010) Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison[J]. *J Geod* 84(9): 569-581.
- Geng J, Shi C, Ge M, Dodson A, Lou Y, Zhao Q. (2012) Improving the estimation of fractional-cycle biases for ambiguity resolution in precise point positioning[J]. *J Geod*, 86(8):579-589.
- Geng J H, Bock Y. (2013) Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 87(5): 449-60
- Geng J, Yang S, Guo J. (2021) Assessing IGS GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 phase bias

- products with PRIDE PPP-AR[J]. *Sat nav* 2(17):1-15.
- Geng T, Ma Z, Xie X, Tao J, Liu T, Zhao Q, Li J. (2022) Multi-GNSS real-time precise point positioning using BDS-3 global-short message communication to broadcast corrections[J]. *GPS Solut* 26(99):1-13.
- Geng, T., Li, Z., Xie, X., Liu, W., Li, Y., Zhao, Q. (2022a). Real-time ocean precise point positioning with BDS-3 service signal PPP-B2b[J]. *Measurement* 203, art. 111911.
- GLONASS ICD (2008). <https://www.glonass-iac.ru>.
- GLONASS COV(2024). https://glonass-iac.ru/chi/about_glonass/#og.
- GPS ICD (2012). <http://www.gps.gov/technical/icwg/>.
- GPS GOV. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>.
- GPS navigation center (2024). <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>.
- Gu S, Guo R, Gong X, Zhang S, Lou Y, Li Z. (2022) Real-time precise point positioning based on BDS-3 global short message communication[J]. *GPS Solut* 26(107):1-14.
- Guo F, Zhang X (2014) Real-time clock jump compensation for precise point positioning[J]. *GPS Solut* 18(1): 41-50.
- Guo F, Zhang X, Wang J. (2015) Timing group delay and differential code bias corrections for BeiDou positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 89(5):427-445.
- Guo J, Xu X, Zhao Q, et al. (2016) Precise orbit determination for quad -constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison. *Journal of Geodesy*, 90(2):1-17.
- Hadas T, Bosy J (2015) IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. *GPS Solut* 19(1): 93-105.
- Han S, Kwon J, Jekeli C. (2001) Accurate absolute GPS positioning through satellite clock offset error estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 75(1):33–43.
- Hansen R, Wouters J. (2012) Towards an EU industrial policy for the space sector—lessons from Galileo. *Space Policy* 28(2):94–101.
- Hauschild A, Montenbruck O (2009) Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning[J]. *GPS Solut* 13(3): 173-182.
- He, Q.; Chen, L.; Liu, L.; Zhao, D.; Gong, X.; Lou, Y.; Guan, Q. (2023) Long-Term Performance Evaluation of BeiDou PPP-B2b Products and Its Application in Time Service[J]. *Remote Sens.* 15, 1358.
- IGS (2020). IGS state space representation (SSR) format version 1.00. RTCM SC-104 SSR Working Group and IGS Real-Time Working Group, Arlington, TX, USA.
- India GOV (2024). <https://www.isro.gov.in>.
- Jin, X., Song, S., Zhou, W. et al. (2022) Multi-GNSS global ionosphere modeling enhanced by virtual observation stations based on IRI-2016 model[J]. *J Geod* 96, 81.
- Klobuchar J (1987) Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS

- users[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 23 (3): 325-331
- Kouba J, Héroux P. (2001) Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solut. 5(2):12–28.
- Laurichesse D, Privat A (2015) An Open-source PPP Client Implementation for the CNES PPP-WIZARD Demonstrator[C]. ION GNSS 2015, September 15-18, 2015, Tampa, Florida.
- Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. (2014) GPS Satellite Surveying, 4th Edition [M].
- Li B, Verhagen S, Teunissen P. (2013) GNSS integer ambiguity estimation and evaluation: LAMBDA and Ps-LAMBDA[C]. Lecture Notes in Electrical Engineering 244(1):291-301
- Li B, Ge H, Bu Y, Zheng Y, Yuan L. (2022) Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers[J]. Sat nav 3(12):1-17.
- Li B, Zhang Z, Zang N, Wang S. (2019) High-precision GNSS ocean positioning with BeiDou short-message communication[J]. J Geod 93:125–139.
- Li G, Guo, S, Lv J, Zhao K, He z. (2021) Introduction to global short message communication service of BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Adv. Space Res 67(5): 1701-1708.
- Li P, Zhang, X., Li, X. et al. (2017) Characteristics of inter-frequency clock bias for Block IIF satellites and its effect on triple-frequency GPS precise point positioning. *GPS Solut* **21**, 811–822.
- Li P, Zhang, X., Li, X. et al. (2018) GPS inter-frequency clock bias modeling and prediction for real-time precise point positioning. *GPS Solut* 22, 76.
- Li P, Zhang, X., Guo, F. et al. (2019) GPS inter-frequency clock bias estimation for both uncombined and ionospheric-free combined triple-frequency precise point positioning. *J Geod* 93, 473–487.
- Li W, Yuan Y, Ou J, et al. (2015) New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop. *J Geod* 89(1): 73-80.
- Li, X, Ge, M., Zhang, H. et al. (2013) A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning[J]. *J Geod* 87, 405–416.
- Li, X, Ge, M., Dai, X. et al. (2015) Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *J Geod* 89, 607–635.
- Li X, Zus F, Lu C, et al. (2015) Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations[J]. *Geophys Res Lett* 42(10): 4173-4181.
- Li X, Yuan Y, Zhu Y, Huang J, Wu J, Xiong Y, Zhang X, Li X. (2019) Precise orbit determination for BDS3 experimental satellites using iGMAS and MGEX tracking networks[J]. *Journal of Geodesy*, 93:103–117.

- Liu T, Jiang W, Laurichesse D, Chen H, Liu H, Wang J. (2020) Assessing GPS/Galileo real-time precise point positioning with ambiguity resolution based on phase biases from CNES[J]. *Adv. Space Res* 66(4):810-825.
- Lou, Y., Zheng, F., Gu, S. et al. (2016) Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models[J]. *GPS Solut* 20, 849–862.
- Matsumoto, Daiki, Kaneso, Takayuki, Urushido, Takashi, Owada, Satoru. (2019) Evaluation of QZSS SLAS (Sub-meter Level Augmentation Service) Performance. Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, April 2019, pp. 361-366.
- Ma Y et al., (2022) Long-Term Frequency Stability Analysis for RRFM and Power-Law Noise Determination of the BeiDou-3 Satellite On-Board Atomic Clocks," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-15, 2022.
- Malys S, Jensen PA (1990) Geodetic Point Positioning with GPS Carrier Beat Phase Data from the CASA UNO Experiment. *Geophys[J]. Res. Lett* 17(5):651-654.
- Mi, X., Zhang, B. & Yuan, Y. (2019) Multi-GNSS inter-system biases: estimability analysis and impact on RTK positioning[J]. *GPS Solut* 23, 81.
- Mi, X., Zhang, B., Odolinski, R. et al. (2020) On the temperature sensitivity of multi-GNSS intra- and inter-system biases and the impact on RTK positioning[J]. *GPS Solut* 24, 112.
- Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. (2015) GNSS satellite geometry and attitude models. *Advances in Space Research*. 56(6):1015-1029.
- Nie Z, Wang B, Wang Z, He K. (2020) An offshore real-time precise point positioning technique based on a single set of BeiDou short-message communication devices[J]. *J Geod* 94(9):1–11.
- Odijk D, Zhang B, Khodabandeh A, et al. (2016) On the estimability of parameters in undifferenced, uncombined GNSS network and PPP-RTK user models by means of S-system theory[J]. *J Geod* 90(1): 15-44.
- Pan J, Hu X, Zhou S, Tang C et al. (2018) Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link measurements. *Adv Space Res* 61:145-153.
- Pérez O J, Bilham R, Bendick R, et al. (2001) Velocity field across the southern Caribbean plate boundary and estimates of Caribbean/South-American plate motion using GPS geodesy 1994-2000[J]. *Geophys Res Lett* 28(15): 2987-2990.
- Petit G, Luzum B, Al E. IERS Conventions (2010). IERS Technical Note, 2010, 36:1 - 95.
- Qu L, Du M, Wang J, Gao Y, Zhao Q, Zhang Q, Guo X. (2019) Precise point positioning ambiguity resolution by integrating BDS-3e into BDS-2 and GPS[J]. *GPS Solutions*, 23(3).

- RTCM Special Committee. (2016) RTCM Standard 10403.3 differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) services-version 3. RTCM Special Committee No. 104, Arlington, TX, USA.
- Schaer S. (1999) Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. University of Berne, Switzerland
- Schaer S, Steigenberger P. (2006) Determination and use of GPS differential code bias values[C]. IGS [161] Workshop.: 8-11
- Schmid R, Rothacher M. (2003) Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *Journal of Geodesy*, 77(7):440-446.
- Schmid R, Dach R, Collilieux X, et al. (2016) Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *Journal of Geodesy*, 90(4):343-364.
- Shi C, Hu Y, Zheng F, et al. (2022) Accounting for BDS-2/BDS-3 inter-system biases in PPP and RTK models[J]. *Advances in Space Research*.
- Shi J, Yuan X, Cai Y, Wang J. (2017) GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation[J]. *GPS Solut* 21(2): 405-414.
- Shu B, H. Liu, L. Wang, G. Huang, Q. Zhang, Z. Yang. Performance improvement of real-time PPP ambiguity resolution using a regional integer clock[J]. *Adv. Space Res.*, 67 (2021), pp. 1623-1637.
- Song Ziyuan, Chen Junping, Wang Bin, Yu Chao. (2020) Analysis and Modeling of the Inter-system Bias Between BDS-2 and BDS-3[C]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 651.
- Steigenberger, P., Montenbruck, O. (2017) Galileo status: orbits, clocks, and positioning. *GPS Solut* **21**, 319–331.
- Subirana J. Sanz, Juan Zornoza J.M. and Hernández- Pajares M. (2013) GNSS Data Processing: Volumn I: Fundamentals and Algorithms[C]. ESA communications, Netherlands.
- Sun, S, Wang, M, Liu, C et al. (2023) Long-term performance analysis of BDS-3 precise point positioning (PPP-B2b) service[J]. *GPS Solut* 27, 69.
- Tang C, Hu X, Zhou S. et al. (2018) Initial results of centralized autonomous orbit determination of the new-generation BDS satellites with inter-satellite link measurements. *J Geod* 92:1155-1169.
- Tao, J., Liu, J., Hu, Z. et al. (2021) Initial Assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS[J]. *GPS Solut* 25, 131.
- Teunissen, P. (1995) The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation[J]. *J Geod* 70(1-2):65-82.
- Urban S E, Seidelmann P K, Sinnott R W. (2013) Explanatory supplement to the astronomical almanac(3rd ed.)[M]. Mill Valley, California: University Science Books.
- Wang Ahao, Chen Junping, Zhang Yize, Wang Jiexian, Wang Bin. (2020) BDS/GPS

- Combined Kinematic Precise Point Positioning Based on Zone Corrections[J]. Journal of Tongji University (natural science), 48(3):447-455.
- Wang A, Zhang Y, Chen J, Wang H. (2022) Improving the (re-)convergence of multi-GNSS real-time precise point positioning through regional between-satellite single-differenced ionospheric augmentation[J]. GPS Solut 26(2):26-39.
- Wang, Jian, Li, Qihang, Liu, Ruihua, (2019) "Improvement of Positioning Accuracy with GNSS Using User Range Accuracy and Posterior Variance Model[C] (2019)" Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, Florida, September, pp. 1488-1495.
- Wang W, Chen G, Guo S, et al. (2013) A Study on the Beidou IGSO/MEO Satellite Orbit Determination and Prediction of the Different Yaw Control Mode. China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2013:31-40.
- Weber G, Mervart L, Lukes Z, Rocken C, Dousa J. (2007) Real-time clock and orbit corrections for improved point positioning via NTRIP[C]. In: Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, Texas, USA, September 25–28 2007, pp 1992–1998.
- Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. (1992) effects of antenna orientation on GPS carrier phase. Astrodynamics[J]. Astrodynamics 1991:1647-1660.
- Wu, P., Lou, Y., Zhang, W. et al. (2023) Evaluation of real-time kinematic positioning performance of the BDS-3 PPP service on B2b signal[J]. GPS Solut 27, 192.
- Wu Z, Zhou S, Hu X, Liu L, Shuai T, Xie Y, Tang C, Pan J, Zhu L, Chang Z (2018) Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser. GPS Solut 22:44.
- Xie X, Geng T, Zhao Q, Cai H, Zhang F, Wang X, Meng Y. (2019) Precise orbit determination for BDS-3 satellites using satellite-ground and inter-satellite link observations[J]. GPS Solutions, 23(2).
- Xu G (2007) GPS: theory, algorithms and applications (second edition).Springer Science & Business Media.
- Xu, X., Nie, Z., Wang, Z. et al. (2023) An improved BDS-3 PPP-B2b positioning approach by estimating signal in space range errors[J]. GPS Solut 27, 110.
- Xu, Y., Yang, Y. & Li, J. (2021) Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service[J]. GPS Solut 25, 142.
- Yang JH, Tang CP, Song YZ, et al. (2021) Analysis of signal-in-space ranging error of GNSS navigation message[J]. SciSin-Phys MechAstron,51:019508.
- Yang Y, Xu Y, Li J, Yang C. (2018) Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. Science China Earth Sciences, 61(5):614– 624.

- Yang Y, Gao W, Guo S, Mao Y, Yang Y. (2019) Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. *Navigation* 66(1):7–18.
- Zhang, F., Chai, H., Li, L. et al. (2021) Estimation and analysis of GPS inter-frequency clock biases from long-term triple-frequency observations. *GPS Solut* **25**, 126.
- Zhang Yize, Nobuaki Kubo, Chen Junping, Wang Jiexian, Wang Hu. Initial Positioning Assessment of BDS New Satellites and New Signals[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1320.
- Zhang Y, Kubo N, Chen J, Chu F, Wang A, Wang J. (2020) Apparent clock and TGD biases between BDS-2 and BDS-3[J]. *GPS Solut* 24(1): 1521-1886.
- Zhang Yize, Kubo Nobuaki, Chen Junping, Wang Ahao. (2021) Calibration and analysis of BDS receiver-dependent code biases[J]. *Journal of Geodesy*, 95(43).
- Zhang, Yize, Kubo, Nobuaki, Pullen, Sam, (2022) Evaluation of QZSS Centimeter Level Augmentation System (CLAS): Open-Sky to Urban Environments and Geodetic to Low-Cost Receivers. *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*, Denver, Colorado, September 2022, pp. 2729-2750.
- Zhang Z, Li B, Nie L, Wei C, Jia S., Jiang S. Initial assessment of BeiDou-3 global navigation satellite system: signal quality, RTK and PPP[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4):1-12.
- Zhang Yize. (2023) open accessed software. https://github.com/YizeZhang/Net_Diff.
- Zhao L, Hu X, Tang C. et al., (2021) Inter-satellite link augmented BeiDou-3 orbit determination for precise point positioning[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*.35(4):332-343.
- Zhao, Q., Guo, J., Wang, C. et al. (2022) Precise orbit determination for BDS satellites. *Satell Navig* 3, 2.
- Zhao W, Chen H, Gao Y, et al. Evaluation of inter-system bias between BDS-2 and BDS-3 satellites and its impact on precise point positioning[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2185.
- Zhou S, Hu X, Zhou J, et al. (2013) Accuracy Analyses of Precise Orbit Determination and Timing for COMPASS/Beidou-2 4GEO/5IGSO/4MEO Constellation[C]. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2013:89-102.
- Zhu, L.; Zhang, H.; Li, X.; Zhu, F.; Liu, Y. GNSS Timing Performance Assessment and Results Analysis[J]. *Sensors* 2022, 22, 2486.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 102(B3): 5005–5017.
- 蔡诗响, 张小红, 李星星,等. (2009) 一种基于多项式拟合的单频周跳探测改进方法[J]. *测绘地理信息*, 34(5):1-3.
- 陈华, 彭利峰, 张彦芬. (2012)一种适合于星间单差精密单点定位的周跳探测方

- 法[C]. 中国卫星导航学术年会电子文集.
- 陈俊平, 杨赛男, 周建华, 曹月玲, 张益泽, 巩秀强, 王君刚. (2017) 综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型[J]. 测绘学报, 46(5):537-546.
- 陈俊平, 张益泽, 周建华, 杨赛男, 胡一帆, 陈倩. (2018) 分区综合改正:服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正模型[J]. 测绘学报, 47(9): 1161-1170.
- 陈俊平, 王阿昊, 张益泽, 周建华, 王兵浩, 王解先. (2019) 北斗广域差分分米级定位的分区切换算法[J]. 测绘学报, 48(7): 822-830.
- 成方林, 张翼飞, 刘佳佳. 基于"北斗"卫星导航系统的长报文通信协议[J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 26-28, 31.
- 房成贺, 陈俊平, 兰孝奇等. (2019) 联合 BDS/GPS 的北斗广域差分实时电离层延迟格网改正方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 39(2): 169-177.
- 谷军霞, 王春芳, 宋之光. 北斗短报文通信信道性能测试与统计分析[J]. 气象科技, 2015, 43(03): 458-463.
- 郭靖. (2014) 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉大学.
- 侯鹏宇, 宋子远, 石波等. (2018) Bancroft 算法应用于 GPS/BDS/GLONASS 三系统伪距单点定位[J]. 海洋测绘, (6): 33-36.
- 李征航, 张小红. (2009) 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉大学出版社, 武汉.
- 李子富. (2021) 俄罗斯 GLONASS 系统发展综述[J]. 航天电子对抗, 37(3): 5.
- 刘春保. (2019) 2018 年国外导航卫星发展综述[J]. 国际太空, (2): 42-47.
- 罗峰, 姚宜斌, 宋伟伟. (2007) 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳. 全球定位系统, 32(5): 9-13.
- 马岳鑫, 唐成盼, 胡小工等. (2021) 基于残差统计特性的中国区域格网电离层 GIVE 算法优化[J]. 测绘学报, 50(3): 304-314.
- 毛悦, 宋小勇, 王维, 等. (2015) 北斗 IGSO/MEO 卫星姿态控制及光压差异分析. 测绘科学, (08): 129-134.
- 毛悦, 宋小勇, 王维, 等. (2014) IGSO 姿态控制模式切换期间定轨策略研究. 武汉大学学报(信息科学版), (11): 1352-1356.
- 宁津生. (2013) 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报: 1(1): 3-8.
- 潘宗鹏. (2018) GNSS 精密单点定位及其质量控制的理论和方法[D], 战略支援部队信息工程大学.
- 宋伟伟, 宋啟晟, 何倩倩, 龚晓鹏, 辜声峰. (2023) 高精度电离层产品增强 PPP-B2b 定位性能分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
- 闫伟. (2012) GNSS 系统仿真及精密单点定位研究与应用[D]. 中国科学院测量与地

- 球物理研究所.
- 杨建华.(2023)基于星间链路的北斗三号卫星空间信号精度提升关键技术研究[D]. 中国科学院上海天文台.
- 杨赛男.(2017) 北斗分米级增强系统关键技术研究及精度评估[D]. 中国科学院上海天文台.
- 杨元喜.(2010)北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J].测绘学报, 39(1):1-6
- 杨元喜, 杨诚, 任夏. (2021) PNT 智能服务[J]. 测绘学报, 50(8): 1006-1012.
- 殷海涛, 甘卫军, 肖根如(2011)恒星日滤波的修正以及对高频 GPS 定位的影响研究.武汉大学学报(信息科学版), 36(5): 609-611
- 袁运斌.(2002)基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D].中国科学院测量与地球物理研究所.
- 张宝成, 欧吉坤, 李子申, 等(2011a)利用精密单点定位求解电离层延迟[J].地球物理学报, 54(4): 950-957。
- 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等(2011b)利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差[J].测绘学报, 40(4): 447-453.
- 张小红, 李星星, 郭斐, 等(2010)基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究[J].地球物理学报, 53(6): 1308-1314
- 张小红, 左翔, 李盼(2013)非组合与组合 PPP 模型比较及定位性能分析[J].武汉大学学报(信息科学版), 38(5):561-565.
- 张益泽. (2017) 北斗实时高精度定位服务系统研究[D], 同济大学.
- 张益泽, 陈俊平, 杨赛男, 陈倩. (2019) 北斗广域差分分区综合改正数定位性能分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 44(2): 159-165.
- 赵铭. (1992) 关于 UT0 和 UT1 关系的准确概念. 中国科学院上海天文台年刊 [J], (00):7-12.
- 赵文. (2020) 北斗 2/3 联合精密单点定位关键技术研究[D]. 武汉大学.
- 赵欣.(2017) 从 OCX 看 GPS 系统未来发展[J]. 卫星应用, 2017(7):6.

致 谢

冬去春来万物生，腊尽春回百花明。大地回暖，万象更新，转眼又到了上海春雨绵绵、万物复苏的季节。每每此时，天文大厦院子里的空气都变得格外清新，夹杂着专属于早春落雨季的清凉与芳香。从 2018 年入学至今，六年时光转瞬即逝。在 2024 年的这个春天，有很多感激，有些许感慨，希望能在此记录。

在上海天文台求学的这六年，首先要感谢我的导师陈俊平研究员。陈老师在 2018 年给我在这个课题组读研学习的机会，也给了我硕博期间难得又宝贵的资源、经历和见识。在我自己经历迷茫、不知所措的时候，陈老师给了我最大的耐心、关心和鼓励。在学术研究上，陈老师字斟句酌帮我修改文章的场景至今仍历历在目，一遍遍帮我梳理文章结构、完善文章表达，让我自身的逻辑思考和论文写作能力也得到了锻炼。在科研项目实践上，正因为有了陈老师提供的平台才能使我有更多机会接触、了解专业前沿的动态和知识，也使得我在项目参与过程中逐步锻炼了自己发现问题、解决问题的能力。除此之外，这六年中还受到太多陈老师事无巨细的帮助：在陈老师的介绍下我才有幸获得了去华测实习的机会；在待人接物方面陈老师也会教导我如何更得体的与人沟通与表达等。老师在学术上的渊博，为人处事的正直与谦逊，对事情的敏锐判断在这几年中潜移默化的影响着我。得此恩师，实属三生有幸。

在这里，还要对我的第二导师张益泽副研究员，表达发自内心的感激。在我 2018 年刚进入这个团队的时候，便对我们课题组里的“大神级”人物——张益泽师兄有所耳闻。彼时张老师还在东京海洋大学进修博后，刚入组的我有幸参考张老师编写的 Net_Diff 软件，完成了我对 Fortran 和 PPP 算法的最初学习。张老师对于定位算法理解深刻、基础极其扎实，Net_Diff 定位软件功能丰富，代码易读且算法设计简洁巧妙。同时作为导师，他负责又富有耐心，即使在深夜也会帮我修改论文，并且在科研和项目开发过程中总是愿意花费时间了解我遇到的问题并提供有效解决方案。如果没有张老师无私提供的软件平台以及在学术方面事无巨细的指导和帮助，我无法在专业知识和成果方面获得更大的进步。在日常的相处过程中，张老师对于大事小情的负责态度、与人交谈的和善与耐心、解决问题的逻辑思维能力、甚至是对这个世界敏锐洞察都在悄无声息地影响着我。虽然我个人能力与张老师相比相差甚远，但有幸看到其优秀且能向其学习，已然令我受益匪浅。

回想起来，在我至今 28 年的人生路上还有颇多恩师，他们无私的给了我偌大的指导和帮助。非常感谢从小学便开始教我英语的肖航老师，肖老师在英语单

词记忆方法、英语口语甚至是学习思维上对我的指导帮助令我受用终身；特别感谢大学本科时期，对我进行过巨大帮助的山东科技大学王胜利教授、石波教授。感谢两位老师在我大一学年的第一个暑假给了我进入 IPNT 小组学习导航定位算法的机会，让我敲下了第一行 C 的代码，用程序跑出了第一个 SPP 解算结果，为我的研究生道路提供了方向、奠定了基础。感谢课题组中王彬老师、谭伟杰老师对我研究生阶段学习和生活的指导、关心与帮助。感谢上海交通大学战兴群教授、同济大学王解先教授、上海天文台葛茂荣研究员、周旭华研究员以及曹月玲研究员对本论文的审阅与修改。感谢上海天文台动力学中心胡小工老师、周善石老师、宋叶志老师、董文丽老师、曲伟菁老师、齐朝祥老师、黄勇老师、王小亚老师、黄乘利老师、宋淑丽老师等对我学习阶段的指导和帮助。感谢团委左文文老师对我的信任以及在团支部工作过程中给予的耐心指导。感谢研究生部马金老师、储怡老师以及王慧老师给予的充分关心与帮助。感谢 GPS Solutions 前主编 Alfred Leick 先生，虽然我们未曾谋面，但是与您的邮件沟通中我可以深深感到您作为期刊主编的耐心、负责，感谢您对我投稿文章的指导与帮助。

六年的学习生涯少不了同门与同学们的陪伴。在课题组这个大家庭中，感谢陈倩师姐和于超师兄，在我最早去北京总站学习时给予的指导与帮助；感谢王阿昊师兄，在我进组后耐心的教我 Net_Diff 的使用方法和 PPP 理论知识；感谢杨赛男师姐、侯阳飞师兄在我学习、找工作过程中提供的诸多帮助；感谢朱红玉师妹作为我的答辩秘书尽职尽责的付出；同样感谢课题组中柳培钊师兄、董志华师姐、刘姣师姐、孟令东师兄、马壮师兄、周扬师兄、伍冠斌师兄对与我这个小师弟的关心帮助；感谢丁君生、王茹圆、唐文杰、杨乾峰、崔洁、刘东林、程泉润、刘文宣、宋伟、王珩、黄煜等同级和师弟师妹们的陪伴；同你们一起为项目奋斗、一道出差打拼、一同讨论学术、一块游历山水、品鉴美食的一幕幕仿佛就在昨天。感谢杨建华、杨鹏、刘杰、钟星宇、涂云、靳许磊、闫玺、李朴、刘宇宸、胥灿灿、张镭、潘鑫、吕钢、蒋建华等 2018 级一起入学的同学们对我的照顾。感谢隔壁办公室李凯师兄、陶恩哲师兄、徐可馨师姐以及李朵朵，两个办公室之间邻里和睦，其乐融融。感谢我的舍友肖威、苏珂、唐文杰和麦晓枫，我们一同经历屋顶漏水、疫情隔离，无论什么环境都能一起苦中作乐。感谢苏珂和焦国强两位一起从本科 IPNT 小组走到上海天文台的老同学，你们为我树立了优秀科研人的榜样。感谢 SHAO NBA 里的每一位成员，与你们在篮球场酣畅淋漓流汗的时光总是那么快乐。感谢同在上海的苗维凯博士、郑衍宁博士，犹记得在大一暑假开始你们对我编程的指导和帮助。感谢包括刘洋洋学姐、洪菊学姐、王星星学姐等 IPNT 小组里所有的成员，我们的革命友谊从 18 岁维持到了现在。

最后，要把感谢送给对我非常重要的朋友和家人。感谢侯鹏宇博士，非常幸运在本科时与你相识。大一入学一同参加军训时魔鬼训练时你的一句：“再坚持一下”是你第一次给我坚持克服困难的力量。在我痛苦、迷茫的时候同样是你伸

手把我拽出了深渊。有幸或远或近的见证了你一路的成长与进步，希望你能在毕业后找到理想的工作，顺利迈向你理想中的人生下一阶段。感谢叶群女士，谢谢你对我的包容、支持、理解和陪伴，你给了我人生路上前进的无穷动力。同样感谢叶群女士家人对我的支持和关爱。最后，感谢我的父母、奶奶、姥姥、阿姨、叔叔和耿千金等所有的家人，感谢你们给了我那么多的爱，足够让我勇敢的去爱这个世界。特别地，对于我在读研期间仙逝的姥爷和爷爷，希望您们能接收到我对您们的思念。

大成若缺，其用不弊；大盈若冲，其用不穷；大直若屈，大巧若拙，大辩若讷，大盈若绌。静胜躁，寒胜热，清静为天下正。语言文字终有限，本人表达能力更是限上加限，难以表达心里对一路走来所有人、所有经历的感谢。回顾这六年时光，唯觉自己万分幸运，愿把每一份感激留存心底，伴随自己在人生路上继续砥砺前行。

2024 年 4 月于杭州

5 月于上海

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历:

2014 年 9 月——2018 年 6 月, 在山东科技大学测绘科学与工程学院获得学士学位。

2018 年 9 月——2024 年 6 月, 在中国科学院上海天文台攻读博士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

- [1] **Song Ziyuan**, Chen Junping, Zhang Yize, Yu Chao, Ding Junsheng. (2023) Real-time Multi-GNSS Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Based on the BDS-3 Global Short-message Communication Function[J]. GPS Solutions, 27(3), 136.
- [2] **Song Ziyuan**, Chen Junping, Wang Bin, Yu Chao. (2020) Analysis and Modeling of the Inter-system Bias Between BDS-2 and BDS-3. In: Sun J., Yang C., Xie J. (eds) China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume II. CSNC 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 651. Springer, Singapore.
- [3] 宋子远, 陈俊平, 张益泽, 唐文杰. (2024) 北斗三号 B2b-PPP URA 评估、精化与播发方法研究[J]. 导航定位学报.(已录用)
- [4] 侯鹏宇, 宋子远, 石波等.(2018) Bancroft 算法应用于 GPS/BDS/GLONASS 三系统伪距单点定位[J]. 海洋测绘, (6):33-36.
- [5] Ding Junsheng, Chen Junping, Tang Wenjie, **Song Ziyuan**. (2022) Spatial-Temporal Variability of Global GNSS-Derived Precipitable Water Vapor (1994–2020) and Climate Implications[J]. Remote Sensing, 14, 3493.
- [6] Wang, S.L.; Deng, J.; Lu, X.S.; **Song, Z.Y.**; Xu, Y. (2017) A new GNSS single-epoch ambiguity resolution method based on triple-frequency signals. Isprs. Int. J. Geo-Inf. 2017, 6, 46.
- [7] Chen Junping, Zhang Yize, Wang Ahao, Yu Chao, **Song Ziyuan**, Zhou Jianhua. (2022) Models and performance of SBAS and PPP of BDS[J]. Satellite Navigation, 3:4.
- [8] Ershen Wang, Wei Song, Yize Zhang, Heng Wang, **Song Ziyuan**, Hongzheng Zeng. (2023) A New Model- and Data-Driven Partial Ambiguity Resolution 2 for GPS+BDS RTK Positioning[J]. SSRN Electronic Journal.
- [9] Tang Wenjie, Chen Junping, Zhang Yize, Ding Junsheng, **Song Ziyuan**. (2024) Refined Troposphere Delay Models by NWM Ray-tracing for Pseudolite Positioning System and Their Performance Assessment[J]. Advances in Space Research.

- [10] 陈俊平, 于超, 王阿昊, 张益泽, **宋子远**. (2021) 北斗二号/三号融合的分米级星基增强算法与性能分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 51(1):019507
- [11] 刘东林, 陈俊平, 王解先, 侯阳飞, **宋子远**. (2021) 多系统实时精密轨道钟差恢复及精度分析[A]. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第十二届中国卫星导航年会论文集.

申请或已获得的专利:

- [1] 陈俊平, **宋子远**, 张益泽, 于超; 基于短报文的固定模糊度精密单点定位方法、设备和介质. (实质审查)
- [2] 陈俊平, **宋子远**, 张益泽, 程泉润; 北斗 B2b-PPP 用户距离精度因子精化及用户定位随机模型优化方法. (已申请)
- [3] 陈俊平, 程泉润, 张益泽, 王彬, 谭伟杰, 于超, **宋子远**; 基于广播星历的精密单点定位方法、接收机、设备和介质. (已授权)

参加的研究项目:

- [1] 参与北斗二号地面运控系统基本导航服务稳定性维护
- [2] 参与实时多系统 PPP-RTK 系统搭建
- [3] 参与北斗三号全球短报文精密定位服务搭建
- [4] 参与北斗低轨地面运控电文仿真与在轨测试

获奖情况

获 2020 年中国科学院上海分院“优秀共青团员”称号

获 2022 年中国科学院大学“三好学生”称号

获 2022 年中国科学院大学“优秀学生干部”称号

获 2024 年中国科学院大学“三好学生”称号

获 2024 年“上海市普通高等学校优秀毕业生”称号