



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

顾及轨道误差的实时精密单点定位模糊度固定算法研究

作者姓名: 于超

指导教师: 陈俊平 研究员 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

2023年6月

**Research on Ambiguity Resolution for Real-rime Precise Point
Positioning Considering Orbit Errors**

**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
YU Chao
Supervisor: Professor Junping Chen**

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2023

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

随着全球定位系统的不断发展和完善,为 PPP 技术研究提供了更多的频点、更全的信号、更强的卫星几何构型,使 PPP 定位精度及收敛速度都有所提升。随着实时高精度定位的应用需求逐步提升, IGS 实时工作组于 2013 年开始向用户免费提供 RTS(Real-Time Service)服务。实时精密定位由于其高准确性、效率和经济性,在广泛范围内有着越来越多的应用,包括并不限于大地测量、气象预报、精准农业和无人驾驶等新兴领域。同时实时 PPP 也面临着巨大的挑战,例如需要高质量低延迟的轨道钟差信息、受产品精度影响收敛速度慢等问题。

PPP 模糊度固定技术是实现 GNSS 高精度定位和快速收敛的关键技术之一,但由于接收机和卫星端的硬件延迟和初始相位小数偏差的存在,如何估计将模糊度恢复成整数的产品成为解决模糊度固定的关键问题。目前基于后处理产品的相位偏差产品已逐渐发展成熟,但是实时精客单点定位模糊度固定技术仍有改进的必要。本文以提升实时精客单点定位的模糊度固定为目标,分析了当前 GNSS 星历产品的精度,深入研究了用于模糊度固定的相位小数偏差估计算法,本文的主要研究内容及结论包括以下几个方面:

(1) 介绍了 GNSS 常用的时间系统和坐标系统的概念;系统地给出了 GNSS 数据处理的观测模型和误差改正方法,包括无电离层组合模型和非差非组合模型;并给出了实时周跳探测方法,介绍了最小二乘和 Kalman 滤波两种参数估计理论。

(2) 详细地列出了 GNSS 星历产品评估的方法,分析了 2022 年全年 GNSS 各系统广播星历的精度。结果表明随着 Galileo 系统 FOC 卫星的增加,其广播星历精度最高,空间信号精度优于 0.18 m; GPS 卫星 Block IIIA 卫星的增加将其空间信号精度提高到 0.43 m,BDS 卫星基于星间星地联合的定轨与时间同步体制,即使在区域参考网的条件下实现了更稳定的广播轨道和钟差,其空间信号精度约为 0.56 m。而 GLONASS 的 GLONASS-K1 的广播星历表现要差于 GLONASS-M,其空间信号精度约为 2.43 m。

(3) 基于 IGS-RTS 服务的实时轨道和钟差产品,对当前的 12 个实时流产品展开了全面的评估分析,包括数据延迟、数据可用性、轨道和钟差精度以及定位收敛时间和精度。统计分析了不同实时产品 GNSS 卫星的轨道和钟差精度,并进行了 30 天的精客单点定位试验。试验表明:播发时延会降低 PPP 的收敛速度和收敛精度,对动态 PPP 的影响最为明显;多系统组合的动态 PPP 能够显著提高收敛速度和定位精度,基于 GREC 四个系统组合的实时静态 PPP 和动态 PPP 最优的三维定位精度分别达到了 3.5 cm 和 5.2 cm。

(4) 推导了基于非差无电离层组合模型的相位小数偏差估计算法和流程,

给出了用户端模糊度固定的流程;基于后处理的精密产品估计 GNSS 卫星相位小数偏差并对其进行了验证评估,结果表明:基于非差无电离层组合模型估计的相位小数偏差在天内、天与天之间的时间序列都表现较好的稳定性,且 FCB 产品的验后残差和观测值有较好的一致性。基于非差无电离层组合算法估计的 FCB 产品展开定位验证,结果表明 FCB 产品有效的提高了精密定位的收敛速度和收敛精度。

(5) 深入地研究了轨道误差对精密度单点定位的影响,针对实时卫星轨道误差的实际情况,提出了一种顾及轨道误差的相位小数偏差估计算法,并基于 WHU 实时轨道和钟差产品,对提出的算法进行验证。结果表明:与非差无电离层组合模型相比,新算法的相位小数偏差的时间稳定度相当,窄巷模糊度残差减少了 13.6%。通过模糊度固定的定位验证得出结论:新算法的首次模糊度固定时间更早,且在初始收敛时段表现优于非差无电离层组合模型。

(6) 针对在海域、无人区或其他无互联网络的环境,存在高精度的实时定位需求却缺乏相应的通讯手段。本文提出了利用 RDSS 和 GNSS 终端的结合,基于北斗短报文播发精密差分改正数,满足在特殊的环境下实现高精度定位的需求。对北斗区域播发短报文的通信质量展开分析,根据北斗报文通信的特征,设计了针对丢码误码的奇偶校验位保证数据的正确性,提出了四种压缩编码的方式并分别验证了基于不同信息编码方式的定位效果。此外依托课题组的实时 PPP-RTK 服务系统,搭建了基于北斗短报文的时空服务平台。

关键词: 精密度单点定位, 实时产品, 模糊度, 轨道误差

Abstract

With the development and improvement of GNSS, more frequencies, signals, and stronger satellite geometry configurations are provided for PPP technology, resulting in the improvement of PPP positioning accuracy and convergence speed. As the increasing demand for real-time high-precision positioning application, the IGS Real-Time Working Group started to provide RTS (Real-Time Service) services to users since 2013. Due to high accuracy, efficiency and economy, real-time precision positioning has a number of applications in a wide range, including many emerging fields such as geodesy, weather forecasting, precision agriculture, unmanned vehicles and so on. At the same time, real-time PPP also faces more challenges, such as the need for high-quality and low-latency orbit and clock, and slow convergence speed affected by product accuracy.

PPP ambiguity resolution technology is one of the key technologies to achieve high accuracy positioning and fast convergence of GNSS, but due to the existence of hardware delay and initial phase fractional deviation at the receiver and satellite, the product that restores the ambiguity to an integer is a key problem to solve the ambiguity resolution. At present, the phase bias products based on post-processing products have been gradually developed. However, it is necessary to improve the ambiguity resolution for real-time precise point positioning. In this paper, we analyze the accuracy of current GNSS ephemeris products with the objective of ambiguity resolution for real-time precise point positioning, and further study the algorithm of phase fractional cycle bias for ambiguity resolution:

(1) The concepts of time system and coordinate system commonly used in GNSS are introduced. The observation model and error correction methods for GNSS data processing are introduced systematically, including ionosphere-free combined model and uncombined model. The real-time cycle slip detection method is given, and the two parameter estimation theories of least squares and Kalman filter are introduced.

(2) The methods of GNSS ephemeris evaluation are listed in detail, and the accuracy of GNSS broadcast ephemeris in 2022 is analyzed. The results show that with the increase of Galileo system FOC satellites, the broadcast ephemeris accuracy of Galileo is the highest, and the signal -in-space range errors is better than 0.18 m. The Block IIIA satellites of GPS improves the signal -in-space range errors to 0.43 m. Even though under the condition of regional reference network, the orbit and clock of BDS satellites was more stable due to the inter-satellite-link data is used for orbit and time synchronization system. For GLONASS, the broadcast ephemeris of GLONASS-K1 is worse than that of GLONASS-M, and the signal-in-space range errors is about 2.43 m.

(3) The recovery algorithm of real-time orbit and clock products based on the IGS-

RTS service is introduced, and a comprehensive evaluation and analysis of the current 12 real-time streams is done, including data latency, data availability, orbit and clock accuracy, and convergence time and accuracy of positioning. The orbit and clock accuracies of GNSS satellites with different real-time products were statistically analyzed, and a 30-day precise point positioning experiment was conducted. The experiment showed that the time latency reduces the convergence speed and convergence accuracy of PPP, and has the more obvious affect on kinematic PPP. The kinematic PPP with multi-GNSS can significantly improve the convergence speed and positioning accuracy, and the 3D positioning accuracy of real-time static PPP and kinematic PPP based on the combination of GREC were less than 3.5 cm and 5.2 cm, respectively.

(4) The estimation algorithm of phase fractional cycle bias based on the ionosphere-free combined model was introduced, and the process of ambiguity resolution for user is given, and the fractional cycle bias is estimated based on the post-processing precision products and validated, and the results show that the phase fractional cycle bias showed good stability in both intra-day and day-to-day time series, and the FCB products have good agreement between the residuals and the observation values. The results show that the FCB product effectively improves the convergence speed and accuracy of precision positioning.

(5) The effect of orbit error on precision point positioning is investigated, and a phase fractional deviation estimation algorithm that takes orbit error into account is proposed and validated based on WHU real-time orbit and clock products. Compared with the FCB algorithm of ionosphere-free combined model, the new algorithm has a similar time stability, and the residual of narrow ambiguity is reduced by 13.6%. Through positioning with ambiguity fixed experiment, it is concluded that the new algorithm has earlier initial fixing time and performs better than the uncombination model in the initial convergence time.

(6) For the demand of high-precision real-time positioning in the sea, uninhabited areas or other environments without internet networks, we propose to use the combination of RDSS and GNSS terminals to achieve high-precision positioning in special environments. The communication quality of BDS short messages in the region is analyzed. According to the characteristics of BeiDou message communication, parity check bits are designed to ensure the correctness of the data for lost code error, and four compression coding methods are given and the positioning effects based on different information coding methods are verified respectively. In addition, based on the real-time PPP-RTK service system, a positioning, navigation, and timing services platform based on BeiDou short messages is built.

Key Words: Precise Point Positioning, Real-time products, Ambiguity, Orbit errors

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 卫星导航系统发展概况.....	2
1.2.1 GPS 系统发展概况	2
1.2.2 GLONASS 系统发展概况	2
1.2.3 GALILEO 系统发展概况	3
1.2.4 BDS 系统发展概况	3
1.3 国内外研究现状.....	5
1.3.1 精密单点定位技术发展现状.....	5
1.3.2 GNSS 实时精密定位服务发展现状	6
1.3.3 模糊度固定关键技术发展现状.....	7
1.4 研究内容与安排.....	8
第 2 章 GNSS 定位基础理论	11
2.1 时间与坐标系统.....	11
2.1.1 时间系统.....	11
2.1.2 常用坐标系统.....	13
2.2 GNSS 观测模型	14
2.2.1 GNSS 基本观测模型	14
2.2.2 无电离层组合模型.....	15
2.2.3 非组合模型.....	16
2.3 GNSS 定位误差处理	16
2.3.1 卫星轨道和钟差误差.....	16
2.3.2 相对论改正.....	17
2.3.3 天线相位中心改正.....	17
2.3.4 天线相位缠绕改正.....	18
2.3.5 潮汐效应.....	18
2.3.6 电离层延迟.....	19
2.3.7 对流层延迟.....	20
2.4 数据预处理与参数估计.....	20
2.4.1 周跳探测.....	20
2.4.2 函数模型与随机模型.....	22
2.4.3 最小二乘算法.....	23
2.4.4 卡尔曼滤波算法.....	24

2.5 小结.....	25
第 3 章 GNSS 星历产品精度评估	27
3.1 GNSS 广播星历产品评估方法	27
3.2 GNSS 广播星历精度分析	31
3.2.1 GPS 广播星历分析	31
3.2.2 GLONASS 广播星历分析	33
3.2.3 Galileo 广播星历分析	35
3.2.4 BDS 广播星历分析	37
3.3 GNSS 广播星历 PPP 算法.....	39
3.3.1 广播星历 PPP 算法.....	39
3.3.1 广播星历 PPP 性能评估	40
3.4 GNSS 实时产品精度分析	42
3.4.1 GNSS 实时产品恢复算法	43
3.4.2 GNSS 实时产品可用性分析	45
3.4.3 GNSS 实时产品轨道和误差分析	46
3.4.4 GNSS 实时产品定位验证	51
3.5 小结.....	57
第 4 章 GNSS 相位小数偏差估计算法	59
4.1 GNSS 相位偏差估计算法	59
4.1.1 基于无电离层组合模型估计原理.....	59
4.1.2 宽巷 FCB 估计	59
4.1.3 FCB 初值确定与实时质量控制	60
4.1.4 窄巷 FCB 估计	61
4.2 用户端模糊度固定算法.....	62
4.3 GNSS 相位小数偏差产品评估	63
4.3.1 试验设计	63
4.3.2 时间稳定度	63
4.3.1 残差分布特征	64
4.3.2 模糊度固定验证	66
4.4 小结.....	69
第 5 章 顾及轨道误差的实时相位小数偏差估计算法	71
5.1 引言	71
5.2 轨道误差对 PPP 的影响分析	71
5.2.1 轨道误差对视向的影响	71
5.2.2 轨道误差对模糊度估值的影响分析	72
5.3 顾及轨道误差的 FCB 产品评估	74
5.3.1 顾及轨道误差的 FCB 估计算法	74

5.4 顾及轨道误差的 FCB 产品质量评估	75
5.4.1 时间稳定度.....	75
5.4.2 残差分布特征.....	76
5.4.3 模糊度固定验证.....	77
5.5 小结.....	79
第 6 章 基于北斗短报文通信的时空服务平台	81
6.1 北斗全球短报文概述.....	81
6.1.1 北斗短报文业务介绍.....	81
6.1.2 北斗短报文通信质量评估	82
6.2 基于北斗短报文通信的编码设计	85
6.2.1 用户端的信息编码.....	85
6.2.2 基于原始 SSR 的信息编码	86
6.2.3 基于视向误差的信息编码	89
6.2.4 北斗短报文信息编码定位应用	92
6.3 基于北斗短报文通信的时空服务平台框架.....	96
6.4 小结.....	97
第 7 章 总结与展望	99
7.1 论文主要结论.....	99
7.2 工作展望	100
参考文献	103
致谢	113
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	115

图目录

图 1-1 各章节关系图	9
图 2-1 地心地固坐标系统指向示意图	14
图 3-1 广播星历和精密星历的轨道钟差基准点（红色：广播星历；蓝色：精密星历）	28
图 3-2 GNSS 广播星历预处理流程	31
图 3-3 GPS 广播星历轨道误差	32
图 3-4 GPS 卫星轨道误差的均值和标准差	32
图 3-5 GPS 广播星历钟差误差和空间信号精度	33
图 3-6 GLONASS 广播星历轨道误差	34
图 3-7 GLONASS 轨道误差的均值和标准差	34
图 3-8 GLONASS 广播星历钟差误差和空间信号精度	35
图 3-9 Galileo 广播星历轨道误差	36
图 3-10 Galileo 轨道误差的均值和标准差	36
图 3-11 Galileo 广播星历钟差误差和空间信号精度	37
图 3-12 BDS 广播星历轨道误差	38
图 3-13 BDS 卫星轨道误差的均值和标准差	38
图 3-14 BDS 广播星历钟差误差和空间信号精度	39
图 3-15 北斗三号广播星历衔接点等效距离误差	41
图 3-16 ABPO 站广播星历 PPP 定位误差序列	41
图 3-17 不同系统多站动态 PPP 定位误差	42
图 3-18 不同实时产品数据完整率	46
图 3-19 不同实时产品的 GNSS 卫星可用数量	46
图 3-20 GPS 实时产品轨道和钟差误差	47
图 3-21 GLONASS 实时产品轨道和钟差误差	48
图 3-22 Galileo 实时产品轨道和钟差误差	49
图 3-23 BDS 实时产品轨道和钟差误差	50

图 3-24 实时产品 PPP 的 IGS 测站分布	52
图 3-25 不同实时产品静态 PPP 收敛时间统计	53
图 3-26 不同实时产品静态 PPP 定位精度统计	55
图 3-27 不同实时产品动态 PPP 收敛时间统计	56
图 3-28 不同实时产品动态 PPP 定位精度统计	57
图 4-1 GNSS 相位小数偏差解算用站	63
图 4-2 GPS、Galileo 和 BDS 三系统的宽巷 FCB 时间序列	64
图 4-3 GPS、Galileo 和 BDS 三系统的窄巷 FCB 时间序列	65
图 4-4 GPS、Galileo 和 BDS 三个系统的宽巷 FCB 残差	65
图 4-5 GPS、Galileo 和 BDS 三个系统的窄巷 FCB 残差	66
图 4-6 GPS/Galileo/BDS 静态 PPP 定位误差时序	67
图 4-7 GPS/Galileo/BDS 动态 PPP 定位误差时序	68
图 4-8 不同策略和测站的模糊度固定比例	69
图 5-1 不同轨道精度产品的模糊度估值差异	73
图 5-2 无电离层模糊度估值和高度角的关系	74
图 5-3 DOY24 WHU 实时产品轨道切向和法向误差	76
图 5-4 原始 FCB 和顾及轨道误差估计的窄巷 FCB 稳定性	76
图 5-5 两种方案 FCB 估计算法的验后残差分布	77
图 5-6 GAMG 测站静态 PPP 定位误差时间序列	78
图 5-7 不同测站静态 PPP 定位 1 小时的收敛精度	78
图 5-8 不同测站动态 PPP 定位 1 小时的收敛精度	79
图 6-1 基于北斗全球短报文的时空服务平台服务模式	82
图 6-2 北斗短报文的信息传输时延	82
图 6-3 北斗短报文用户端接收的报文数量	83
图 6-4 接收时间间隔百分比统计	84
图 6-5 基于北斗全球短报文的时空服务平台约束	84
图 6-6 用户端信息编排	86
图 6-7 基于原始 SSR 的信息头部编排	86
图 6-8 方案 1 编码方案的参数精度衰减分析	88

图 6-9 基于视向误差的信息头部编排	89
图 6-10 ABPO 测站在不同时延下 OSR 的参数衰减情况	90
图 6-11 模拟短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差序列	93
图 6-12 模拟短报文通信数据的 ABPO 测站可用卫星数量	93
图 6-13 模拟短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差统计	94
图 6-14 实测短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差序列	95
图 6-15 实测数据北斗短报文的 ABPO 测站可用卫星数量	95
图 6-16 基于北斗短报文通信的时空服务平台框架	96

表目录

表 1-1 各卫星导航系统的基本卫星信号信息	4
表 3-1 不同卫星的 SISRE 计算投影系数 (Montenbruck, 2018)	30
表 3-2 GPS 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)	33
表 3-3 GLONASS 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)	35
表 3-4 Galileo 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)	37
表 3-5 BDS 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)	39
表 3-6 基于广播星历 PPP 的定位误差统计	42
表 3-7 12 个实时流挂载点基本信息	43
表 3-8 各分析中心 GPS 实时轨道和钟差精度统计	48
表 3-9 各分析中心 GLONASS 实时轨道和钟差精度统计	49
表 3-10 各分析中心 Galileo 实时轨道和钟差精度统计	49
表 3-11 各分析中心 BDS MEO 实时轨道和钟差精度统计	51
表 3-12 各分析中心 BDS IGSO 实时轨道和钟差精度统计	51
表 3-13 实时 PPP 处理策略	52
表 3-14 实时静态 PPP 收敛时间中位数 (分钟)	54
表 3-15 实时动态 PPP 收敛时间中位数 (分钟)	56
表 4-1 三系统宽巷和窄巷 FCB 时间稳定性统计	64

表 4-2 静态 PPP 1 小时定位精度统计	67
表 4-3 动态 PPP 2 小时定位精度统计	68
表 6-1 用户端北斗短报文信息编码参数说明	86
表 6-2 基于原始 SSR 的信息头部编码说明	86
表 6-3 基于原始 SSR 的信息编码方案一	87
表 6-4 基于原始 SSR 的信息编码方案二	87
表 6-5 不同延迟下改正数精度衰减统计	88
表 6-6 基于视向误差的信息编码头部参数说明	89
表 6-7 方案 3 的参数编码说明	89
表 6-8 方案 4 的参数编码说明	89
表 6-9 GPS 卫星 OSR 参数衰减	90
表 6-10 Galileo 卫星 OSR 参数衰减	91
表 6-11 BDS 卫星 OSR 参数衰减	91

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着全球卫星导航系统的不断发展，高精度定位技术在服务人类社会，包括自然灾害、交通运输、航空航天、军事等领域中，起到了不可或缺的作用。尤其是在信息智能化今天，高精度导航定位呈现出多星座兼容与融合、网络化与智能化、室内外无缝衔接、应用场景多样化与深入化的发展趋势，人们对于导航定位技术的需求变得越来越高。

实时动态定位 RTK (Real-Time Kinematic, RTK) 以及精密单点定位 PPP (Precise Point Positioning, PPP) 分别基于差分方法和非差方法，消除或减弱影响定位精度的各种误差，实现高精度的定位服务。RTK 由差分定位技术发展而来，通过基站和流动站之间的观测值差分，实现相位模糊度的快速固定与瞬时厘米级定位。PPP 由非差定位技术发展而来，通过使用高精度卫星星历产品修正用户轨道、钟差等误差，实现静态毫米至厘米级，动态厘米至分米级的定位服务 (刘经南等,2002;李浩军等, 2010)。

PPP 概念于 1997 由 Zumberge 首次提出 (Zumberge, et al.,1997)，其实验结果表明 PPP 方法能够在高精度和高可靠性方面与差分 GPS 方法相媲美，而且可以避免传统差分方法中存在的一些问题，如模糊度解算和基准站位置误差传播等。PPP 技术具有更高的定位精度和更广的适用范围，能够实现高精度的单点定位 (Kouba, et al.,2001; Bisnath, et al.,2008)，从而为大范围地理数据采集和应用提供了有力支持，成为差分相对定位技术之后的一项重大技术革命。传统 PPP 需要在完成数据采集后，通过地面上的参考站计算得到较高的精度产品，但是这个过程需要大量的时间通常需要等待数十分钟到数小时，才能获得高精度的定位结果。这种事后处理的方式无法满足对实时性要求较高的应用领域，例如交通运输、灾害应对等需要实时获得卫星定位信息的场景，因此有必要对实时精密单点定位 (Real-Time PPP, RT-PPP) 技术展开研究，以此拓展 PPP 技术的在每个领域的实际应用价值 (张小红,2006; 耿涛等,2007)。同时实时轨道和钟差的产品精度、大气误差模型的改正条件以及模糊度固定是限制实时精密定位的收敛速度和精度的重要条件。研究表明模糊度固定可以缩短 PPP 的收敛时间同时提高其定位精度 (Ge et al.2008; Collins et al.2008; Laurichesse et al.2009; 李星星 2013)。PPP 模糊度固定的关键技术是恢复模糊度的整周特性，目前主要包括 FCB 方法 (Ge et al.2008; Li P et al.2016; Li X et al.2018)、整数钟 (Integer recovery clock, IRC) 方法 (Laurichesse et al.2009) 和解耦钟方法(Collins et al.2008)。

未来，随着科技进步和社会需求的变化，高精度导航定位将会迎来更大的发

展空间和机遇。实时精密定位由于其高准确性、效率和经济性，在广泛范围内有着越来越多的应用，包括并不限于大地测量、气象预报、精准农业和无人驾驶等新兴领域。同时，实时 PPP 也面临着巨大的挑战，例如需要高质量低延迟的轨道钟差信息以及大气条件会对位置准确性造成影响等问题。因此，本文在回顾前人的研究之后，研究了当前实时卫星轨道与钟差数据流的获取及应用，同时对基于实时产品的实时模糊度固定技术进行攻关。

1.2 卫星导航系统发展概况

1.2.1 GPS 系统发展概况

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是由美国军方在上世纪 70 年代研制的全球卫星导航系统，1995 年达到完全作战能力，即 24 颗全球覆盖的现役卫星。当下有多达 31 颗卫星处于在轨服务状态。GPS 卫星在 L1 (1575.42 MHz) 和 L2(1227.60 MHz)频率上发射一个编码的右旋极化信号。识别 GPS 卫星所需的信息包含在公开的粗捕获码(C/A)信号中。由于加入人工噪声(Selective Availability, SA)的影响，直到 2000 年中期，伪距码本身的精度才有所下降。更高精度的 P 码是加密的，不公开使用，但加密的 Y 码可以被追踪。除了码测量外，还可以提供更高精度的载波相位观测。

美国于 2000 年启动了 GPS 现代化计划，在既有 GPS 系统基础上进行升级改造，旨在提高系统的性能、可靠性和安全性(Luba O, et al., 2005; NASA, 2014)，分为三个阶段：IIF、III 和 IIIF。其中，IIF 阶段已经完成，III 阶段正在进行中，其升级包括引入新的 L2C 和 L5 信号，提高信号精度和可靠性，现代化的 GPS 卫星(IIR-M、II-F、II-A、III)提供了公开可用的 L2 频率信号，记为 L2C。IIF 和 IIIA 也以 L5 (1176.45 MHz)的频率发射信号；此外 GPS 升级了地面运控系统，增加了参与卫星轨道与钟差测定的监测站，将广播星历用户距离误差(User Ranging Error, URE)减小至约 0.25m(Creel T et al.,2007)；替换到期服役的卫星，GPS 最初的空间星座由 Block II 和 Block IIA 卫星构成，后续陆续发射 Block IIR、Block IIR-M、Block IIF 和 Block IIIA 卫星，完成了对 Block IIA 卫星的全部替换，最后一颗 Block IIA 卫星在 2016 年停止使用。

1.2.2 GLONASS 系统发展概况

1974 年，GLONASS 系统由前苏联开始研制。空间段由 24 颗 MEO 卫星组成，卫星几乎均匀分布在 3 个轨道面，轨道高度约为 19100km，倾角约为 65° ，在高纬度地区覆盖较好(Hofmann, et al., 1993 and 2008; 刘基余, 2015)。GLONASS 系统于 1993 年首次达到完全运行能力，2012 年再次达到完全运行能力(Revnivaykh, 2012)。

俄罗斯从 2000 年开始实施“恢复 GLONASS 卫星星座”的计划，并实施 GLONASS 现代化进程(Liang, et al., 2011; Revnivykh, 2012)，计划分两个步骤(Dow, et al., 2009)。第一是延长 GLONASS-M 卫星设计使用寿命，改造地面跟踪站，增加一个民用频率，提高定位测速精度；第二是在第三代 GLONASS-K 卫星上增加第三频率 L3 码分多址信号，在第四代 GLONASS-K2 卫星和 GLONASS-KM 卫星 L1 和 L2 波段上增加码分多址信号，并配备更高稳定度的星载原子钟。

1.2.3 GALILEO 系统发展概况

为摆脱对美国 GPS 系统和俄罗斯 GLONASS 系统的依赖，出于对自身安全的考虑，1999 年欧盟通过了建设 GALILEO 系统的决定。GALILEO 的建设目的是满足全球卫星导航用户的民用需求的导航系统，将向全球用户提供公开服务、生命安全服务、商业服务、公共管制服务和搜救服务等五类服务。GALLIEO 系统可以通过 E1、E5A 和 E5B 等三个频率提供公开的导航、定位和授时服务。其中，E1 频点中心频率与 GPS 系统 L1 频点中心频率重合，E5A 频点中心频率与 GPS 系统 L5 频点中心频率重合，E5B 频点中心频率与北斗区域系统 B2I 频点中心频率重合。

GALILEO 系统的空间段计划包含 24 颗在轨运行卫星和 6 颗在轨备份星，轨道半长轴 29600 公里，轨道平面倾角为 56°。2005 年 ~ 2011 年，GALILEO 通过发射 GIOVEA/B 卫星，建立 GALILEO 测试平台和地面监控设备的验证(朱威强, 2016)。2011 年至 2013 年，GALILEO 发射了四颗 IOV 卫星，对导航定位服务能力进行初步验证。随后 GALILEO 开始发射组网卫星。截止到 2022 年，GALILEO 在轨服务卫星共包括 3 颗 IOV 卫星和 21 颗 FOC 卫星。此外 GALILEO 是第一个在卫星上搭载被动型氢原子钟的导航卫星系统。

1.2.4 BDS 系统发展概况

北斗卫星导航系统 (BDS) 是我国自主建设的卫星导航系统，按照“三步走”的战略规划。第一步建设了北斗卫星导航试验系统，又称北斗一号。与 GPS 系统不同，北斗一号系统采用“双向定位”体制，向用户提供卫星无线电测定业务 (Radio Determination Satellite Service, RDSS)，包括约束地面高程的二维定位和短报文服务(谭述森, 2007)。北斗二号系统 2004 年启动建设，在兼容北斗一号系统技术体制基础上，增加无源定位体制。2012 年底，北斗二号完成了 5 颗 GEO 卫星、5 颗 IGSO 卫星和 4 颗 MEO 卫星的组网，正式开始向亚太地区提供导航位置服务，完成了“三步走”中的第二步发展步骤。

随后 2015 年开始北斗系统开展了北斗三号的试验星验证，基于 2 颗 IGSO 和 3 颗 MEO 卫星，对星间链路技术、新型原子钟和新体制的导航信号展开试验论证，验证了北斗新一代导航系统的新技术体制设计和性能指标(潘军洋等，

2017)。新一代北斗导航试验卫星搭载的星间链路载荷包括时分多址测量体制的相控阵天线和连续测量体制的反射面天线。此外, 在其中一颗 IGSO 试验卫星上搭载了被动式氢钟(Wu, et al., 2018)。

2017 年 11 月 5 日, 首批两颗北斗三号组网卫星发射入轨, 标志着北斗三号全球卫星导航系统 (BDS-3) 进入发射组网阶段(杨宇飞, 2019)。2018 年 12 月 27 日, BDS-3 完成了 18 颗 MEO 组网卫星的部署, 形成了全球覆盖的基本星座, 开始向全球提供基本服务。2020 年 7 月, 北斗三号已成功发射入轨全部 30 颗 BDS-3 卫星, 完成 BDS-3 完整系统的卫星组网。BDS-3 卫星上配备了国产新一代高精度铷钟和被动式氢钟, 能够提供高精度时间频率标准。

BDS-3 在基本 PNT 服务之外还具备星基增强、精密定位信息播发、区域短报文、全球短报文及国际搜救等多种服务能力。其中基本 PNT、全球短报文和国际搜救为全球覆盖服务; 星基增强、精密定位信息播发和区域短报文 3 类服务覆盖中国及周边地区(郭树人等, 2019)。其 PPP 服务通过北斗三号标称空间星座中的 3 颗 GEO 卫星的 PPP-B2b 信号提供, 参考 2021 年发布的北斗系统公开服务性能规范 (3.0 版), 单 BDS PPP 水平定位精度 (95%) 在 30 cm 内, 垂直定位精度 (95%) 在 60 cm 内, 收敛时间小于 30 分钟。

目前, GNSS 各系统提供服务的卫星已达 130 余颗, 由于导航系统的设计差异, 各系统的信号频率、信号组成、卫星轨道类型以及卫星数量均有所不同(李星星, 2022)。其中, GPS、GLONASS 和 Galileo 星座均由中轨道卫星(MEO)组成, BDS 系统与其他 GNSS 系统相比具有更多的信号频率和更复杂的轨道结构(GEO、IGSO), 能够提供更高精度和更多功能的服务, 当前北斗系统共有 45 颗在轨卫星, 各卫星导航系统的具体信息包括轨道类型、卫星数量、信号频率等相关信息汇总如下表所示 (查询时间截止 2023 年 3 月 22 日)。

表 1-1 各卫星导航系统的基本卫星信号信息

卫星系统	轨道类型	卫星数	信号	URL
GPS	MEO	31	L1C/A, L2C, L5	http://www.gps.gov/systems/gps/
GLONASS	MEO	22	L1C/A, L2C/A, L3	http://www.glonass-center.ru/en/GPS/
Galileo	MEO	24	E1, E5a, E5b, E5ab, E6	http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_Galileo/What_is_Galileo
BDS	BDS-2 GEO	5	B1I, B2I, B3I	http://en.beidou.gov.cn/
	BDS-2 IGSO	7	B1I, B2I, B3I	
	BDS-2 MEO	3	B1I, B2I, B3I	
	BDS-3 GEO	3	B1I, B3I	

卫星系统	轨道类型	卫星数	信号	URL
	BDS-3 IGSO	3	B1I, B3I, B1C, B2a, B2b	
	BDS-3 MEO	24	B1I, B3I, B1C, B2a, B2b	
QZSS	GEO	1	L1C/A, L1C, L2C, L5	http://en.beidou.gov.cn/
	IGSO	3	L1C/A, L1C, L2C, L5	
IRNSS	GEO	3	L5, S	http://www.isro.org/satellites/irnss.aspx
	IGSO	5	L5, S	

1.3 国内外研究现状

1.3.1 精密单点定位技术发展现状

精密单点定位技术的发展主要围绕着解决收敛时间长、定位精度与可靠性偏低等问题，其核心就是误差处理，对误差处理越精细其收敛时间越快、定位精度越高、定位结果越可靠，大致可以将其发展历程分为三个阶段：浮点解 PPP、固定解 PPP、大气增强固定解 PPP，对应的技术分别为传统 PPP、PPP-AR 和 PPP-RTK。本节将沿着 PPP 不同阶段开展论述，重点讲述实现 PPP/PPP-RTK 的模糊度固定关键技术的研究现状。

PPP 由非差定位技术发展而来，自 1997 年提出以来已发展了二十余年，利用全球分布的基准站观测数据计算精密的卫星轨道和钟差产品，实现在全球范围内的任意单站接收机在任何时间段内的高精度定位，能够满足静态毫米至厘米级，动态厘米至分米级的定位需求(Zumberge, 1997; Kouba and Héroux, 2001; Griffiths, 2019; Geng, 2021)。PPP 技术最初主要用于地球物理学和大地测量学等领域，后来逐渐在导航领域得到应用。PPP 技术选择了与 RTK 不同的方向，在服务端分别计算出各种误差量大小，并以空间状态域改正形式发送至流动站进行位置解算。近年来从最初的 PPP 技术到 PPP-AR（模糊度固定），再到底的 PPP-RTK（大气延迟增强），不管是定位精度还是收敛时间都取得了很大的突破，让商业化应用成为可能。

韩保民等利用精密星历和钟差产品分析了精密单点定位的误差模型和数据质量控制方法等问题，算例结果表明精密单点定位可以达到厘米级(韩保民等, 2003)。张小红基于独立研发的软件和航空动态数据验证了动态精密单点定位可以取得亚分米级的定位精度(张小红, 2006)。Gao 等人利用伪距和相位观测值中电离层延迟的大小相等、符号相反的特点，提出了 UofC 模型，并实现了动态 PPP 厘米级的定位精度(Gao and Shen, 2002)。李博峰通过推导证明了非组合模型与 UofC 模型具有等价关系，且都优于无电离层组合模型(李博峰, 2015)。蔡昌盛利用组合 GPS 和 GLONASS 精密单点定位证明了多系统组合能显著提高收敛速度

和收敛后的定位精度(蔡昌盛, 2008)。自从非差非组合 PPP 方法被提出后, 因其保留了所有观测信息的特征被国内外学者广泛研究。Leandro 基于非差非组合 PPP 模型, 推导了电离层延迟、码偏差、卫星钟差和伪距噪声的计算算法(Leandro, 2009)。张宝成对非差非组合 PPP 方法做了系统性的研究, 包括函数模型、随机模型、待估参数、滤波算法, 并将其应用于电离层延迟信息和 DCB 提取的研究中(Zhang et al. 2012; 张宝成等, 2010; 张宝成等, 2011)。周锋围绕多系统非差非组合的模型和算法展开研究, 详细分析了系统间偏差估计和单双频电离层约束模型方法(周锋, 2018)。

1.3.2 GNSS 实时精密度单点定位服务发展现状

在 IGS 组织的推动下, 来自世界各地的科研机构、大学和机构公开向用户提供高质量的 GNSS 数据和产品。GNSS 观测数据来自全球地面站网, 其中一些地面站自 20 世纪 90 年代初以来一直持续运行。IGS 提供的产品通常包括卫星轨道和钟差、接收机位置和钟差以及地球自转参数, 也可以包括对流层参数、电离层、信号偏差以及卫星姿态等。此外, IGS 提供了多家分析中心的组合产品, 组合产品包括卫星轨道和钟差、接收机位置和钟差、地球自转参数等。

为了满足实时 GNSS 高精度定位应用日益增长的需求, IGS 组织在 2013 年 4 月正式提供实时服务产品 (Agrotis et al., 2014; Hadas et al., 2015), 轨道和钟差产品通过 Ntrip 协议以 RTCM 标准协议的状态空间改正数形式 (State Space Representation, SSR) 向全球用户播发(Weber, 2007; RTCM 10403.3)。2020 年 IGS 发布了支持 GNSS 多系统实时产品的 IGS SSR 格式 (IGS RTWG, 2020), 弥补了 RTCM 10403.3 中仅有 GPS 和 GLONASS 双系统实时产品格式的不足(RTCM 10403.3)。

近年来, 国内外学者从产品数据完整率、产品精度、延迟时间等方面评估分析了 IGS RTS 不同产品的质量。在实时产品精度方面, Hadas 分别利用 IGC01 和 IGC03 评估了 GPS 和 GLONASS 的实时产品, 结果表明 IGS 综合的实时 GPS 卫星轨道、钟差精度优于 5 cm 和 8 cm, GLONASS 卫星轨道和钟差精度优于 13 cm 和 24 cm(Hadas and Bosy, 2015); Wang 分析了来自 8 个分析中心的 SSR 产品, 评估表明 GPS 卫星的轨道和钟差精度 优于 8 cm 和 0.3 ns, GLONASS 卫星的实时轨道和钟差分别优于 10cm 和 0.6ns, Galileo 卫星的轨道和钟差精度分别优于 4.4cm 和 0.18ns, 而 BDS-2 的轨道和钟差精度分别优于 14.5cm 和 0.32ns(Wang et al., 2018)。Wang 研究了利用 IGS 实时服务用于单北斗定位的表现, CNES 的实时产品中, BDS 的 IGSO 和 MEO 的数据可用性分别高于 95% 和 90%, 而 GEO 卫星平均仅为 65%(Wang et al., 2019)。Kazmierski 评估了 2017 年~2019 年的 CNES 四系统产品数据完整率, 结果表明 GPS、GLO、GAL、BDS 数据的可用性分别高于 97%、95%、95% 和 90%, 实时产品的精度分别优于 2.3 cm、5.2 cm、1.6 cm

和 3.9 cm(Kazmierski et al., 2020)。除了单一分析中心提供的实时产品, IGS 还提供了实时组合产品 IGC01、IGS01、IGS02 与 IGS03, 其中 IGC01 与 IGS01 产品仅有 GPS 系统, 其余 IGS 组合产品有多。GNSS 系统除了产品数据完整率和精度之外, 实时产品的延迟时间也是反映产品质量的重要方面, 各家分析中心单一实时产品延迟时间一般在 4 到 10 秒, IGS 实时组合产品的延迟时间约为 30 秒 (Hadas et al., 2015; Wang et al., 2018; Kazmierski et al., 2020)。还有部分研究关于实时产品的精度与应用(Chen, 2013; Li et al., 2013; Chen et al., 2017; Zhang et al., 2018; Yan et al., 2020; Xiao et al., 2021)。但随着越来越多的 GNSS 观测网络支持多频多系统观测值, Galileo 和 BDS 的实时产品数据可用性和精度也会有所变化。

1.3.3 模糊度固定关键技术发展现状

尽管国内外学者对 PPP 收敛速度和精度做了诸多研究, 但由于无法有效分离接收机和卫星的硬件延迟和初始相位偏差, 估计的模糊度参数为浮点解导致 PPP 收敛的速度仍然需要很长时间。Gabor 和 Nerem 于 1999 年首次提出了模糊度固定的基本原理和方法, 但由于当时的轨道和钟差产品精度的限制, 并没有得到理想的结果(Gabor and Nerem, 1999)。

从 2006 年开始, 国内外学者开始考虑通过估计初始相位偏差来解决 PPP 模糊度固定的问题。Ge 等人提出了通过消除相位未校准硬件延迟的小数部分 (Fractional Cycle Biases, FCBs) 可以恢复 PPP 模糊度的整数特性, 并通过星间单差法实现了宽巷模糊度和窄巷模糊度的分别固定, 最后固定单差消电离层组合模糊度, 模糊度固定率超过 80%, 东方向定位精度相对浮点解提高 30%(Ge et al., 2008)。随后 PPP 模糊度固定算法引起了广泛的关注和发展, 去耦钟模型最早由 Collins 提出, 与 FCB 方法不同的是, Collins 证明了接收机和卫星伪距硬件延迟和初始相位偏差都会导致 PPP 模糊度不具备整数特性。这就意味着伪距和相位作为独立的观测, 伪距和相位观测应该有两套钟差参数, 去耦钟模型分别估计伪距和相位钟差达到将伪距和相位延迟和模糊度参数分离的目的(Collins et al., 2008 and 2010)。Collins 等人还对解耦时钟模型每小时的结果进行了评估, 结果表明, 对于 90% 的小时解, 都可以实现 PPP 模糊度的固定(Collins, 2008)。Collins 等人将解耦时钟模型应用于加拿大西部海岸线的海啸预警系统。动态定位测试结果表明, 平面方向可以得到显著改善, 但高程方向不尽人意(Collins et al. 2009)。Lauchesse 等人提出了整数相位钟模型, 该模型利用无电离层模糊度和宽巷模糊度的关系, 在固定宽巷模糊度后, 将卫星钟差和窄巷相位小数偏差合并成一个参数, 由卫星钟差吸收窄巷小数偏差, 在 PPP 定位时应用整数相位钟产品可以直接实现窄巷模糊度的固定(Lauchesse, 2009; Lauchesse et al., 2010 and 2011)。

耿江辉、史俊波等从理论上证明了三种相位偏差估计方法在数学模型上的等

价性, 三种理论的区别是所使用的产品和算法实现上有所不同(Geng et al, 2010; Shi and Gao, 2014)。Li 等人利用参考站网的非差观测值估计相位小数偏差, 通过确定某个测站或者卫星约束为零, 实现了接收机与卫星的相位小数偏差的联合估计, 结果表明 30 分钟的 PPP 模糊度固定解比浮点解的定位精度有显著的提高(Li and Zhang, 2012)。Xiao 等人考虑到相位偏差估计考虑到实时应用和最小二乘估计的矩阵运算量问题, 提出一种基于卡尔曼滤波的 FCB 估计算法, 利用卡尔曼滤波算法估计的 FCB 产品和 CNES、WHU 的后处理产品有较好的一致性(Xiao et al., 2018)。郑艳丽对基于 FCB 方法上进行了 FCB 估计和模糊度固定上的算法改进, 提高了 FCB 估计的稳健性, 降低了粗差带来的影响, 基于实测数据进行了验证, 在国内监测网尺度上的结果显示 PPP 固定解在北、东和天三个方向上分别提升了约 23.9%、38.6% 和 16.0%(郑艳丽, 2013)。王进研究了多频多系统 PPP 的模糊度固定问题, 并利用模糊度固定用于电离层建模和 DCB 估计(王进, 2020)。此外潘宗鹏、李盼、刘帅等人从用户端出发, 对模糊度固定算法进行了改进, 通过质量控制手段实现部分模糊度固定, 加快精客单点定位的首次固定速度和固定率(刘帅, 2014; 潘宗鹏, 2015; 李盼, 2016)。目前关于 PPP 模糊度固定的研究大多数是基于事后处理的模式, 随着实时模糊度固定的需求提升, CNES 和国际海运事业无线电技术委员会 RTCM 工作组对实时产品格式的标准化推进, 已经将整数钟法标准化成每个频率上播发的相位偏差(Laurichesse, 2012)。Geng 基于整数钟模型和宽窄巷的方法, 提出了一种改进相位钟差和偏差模型用于实现非差模糊度的固定, 并将相关产品发布在了武汉大学的 FTP 服务器上(Geng, 2019)。

同时, 随着 Galileo 和 BDS 卫星的快速组网, 部分学者研究了基于多系统组合对模糊度固定的影响, 潘宗鹏提出了利用多系统组合的方式缩短模糊度首次固定的时间, 分析表明不管是动态还是静态条件下, 多系统组合 PPP 都能够加快模糊度浮点解的收敛速度, 减少模糊度的首次固定时间(潘宗鹏, 2015); 李盼的研究表明 GPS 和 BDS 双系统 PPP 固定解取得较快的首次固定时间和固定率, 而在 GLONASS 的观测信息辅助条件下, 冗余的观测值改善了模糊度参数的收敛精度, 三系统的 PPP 固定解首次固定时间减少了 10%-20%(李盼, 2016)。由此可见, GNSS 多系统观测信息的增加, 有效的改善了 PPP 定位性能的同时, 同样可以提升 PPP 模糊度固定的表现。

1.4 研究内容与安排

本文以提升实时精客单点定位的模糊度固定为目标, 分析了当前 GNSS 星历产品的精度, 深入研究了用于模糊度固定的相位小数偏差估计算法, 各章节之间的结构关系如图 1-1 所示, 本文的主要研究内容如下:

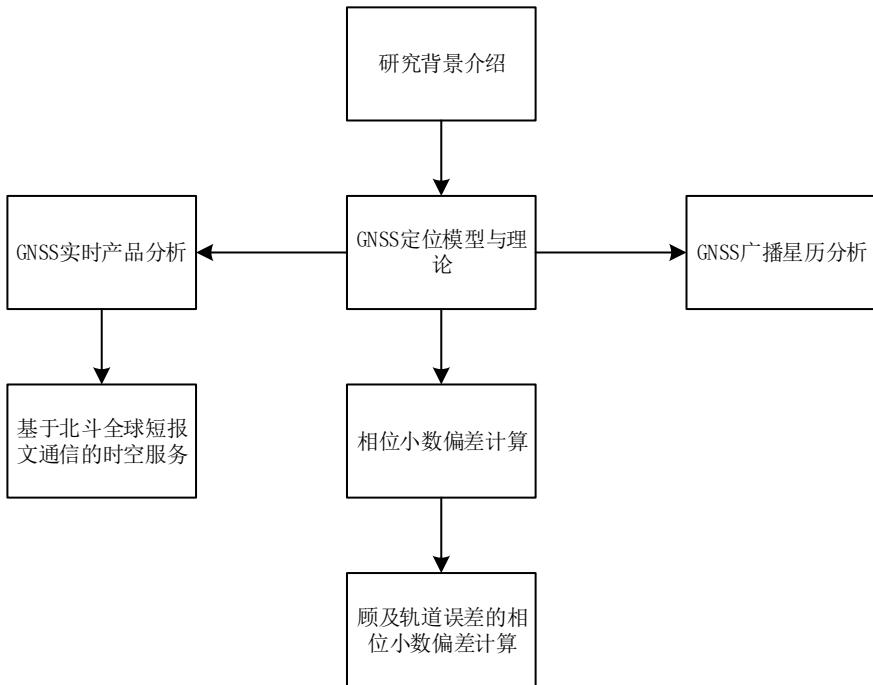


图 1-1 各章节关系图
Figure 1-1 Relationship diagram of chapters

第一章介绍了 GNSS 系统的发展概括和国内外精客单点定位技术的研究现状，并给出了本文的主要研究内容和章节安排。

第二章介绍了 GNSS 数据处理的基本理论和模型，包括常用的时间系统和坐标系统、GNSS 观测模型、各种误差处理算法、数据预处理和参数估计算法。位后面的章节提供理论基础。

第三章首先介绍了 GNSS 星历产品评估的数据处理方法，评估了当前 GNSS 各系统的广播星历产品的现状；此外，介绍了实时星历产品的恢复算法，针对现有的所有实时流轨道和钟差产品，对其数据延迟、数据可用性、轨道和钟差精度以及定位验证几方面展开全面的分析和评估。

第四章介绍了基于非差无电离层组合模型的相位小数偏差估计方法和流程，给出了用户端模糊度固定的算法原理。基于后处理轨道和钟差产品，从时间稳定性、残差分布和模糊度固定定位验证三方面分析了相位小数偏差产品的有效性。

第五章深入分析了轨道误差对精客单点定位的影响，针对现有实时产品的轨道误差对相位小数偏差估计的影响问题，提出了一种顾及轨道误差的相位小数偏差估计算法。通过对新算法估计的相位小数偏差产品的本身以及静态和动态精客单点定位的模糊度固定验证了算法的有效性。

第六章简要介绍了北斗短报文的情况，基于北斗短报文的区域服务验证了北斗短报文的通信质量，设计了基于北斗短报文的精密差分改正数信息编码，并搭建了基于北斗短报文的时空服务平台，展开了相关的技术验证。

第七章对全文的内容做了详细总结，并提出了下一步的研究计划。

第 2 章 GNSS 定位基础理论

2.1 时间与坐标系统

2.1.1 时间系统

时间是描述物理运动规律的基本物理量之一,对于不同的观测角度和物质运动规律下,可以构成不同的时间度量尺度。卫星导航常用的时间系统如下:

恒星时 ST (Sidereal Time)

恒星时是以春分点为参考点,由春分点的周日视运动所定义的时间系统。起算点是春分点通过本子午圈的时刻,春分点连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一个恒星日,即 24 个恒星时。

最常用的格林尼治恒星时 (GST: Greenwich Sidereal Time) 是春分点相对于格林尼治子午面的时角。恒星时是以地球自转为基础的,所以会受到岁差和章动的影响,考虑岁差影响后的 GST 称为格林尼治平恒星时 (GMST: Greenwich Mean Sidereal Time)。同时考虑岁差和章动影响的 GST 称为格林尼治真恒星时 (GAST: Greenwich Apparent Sidereal Time)。

世界时(太阳时) UT (Universal Time)

世界时是以平太阳为参考点,由平太阳的周日视运动确定的时间系统。起算时刻是格林尼治平子午夜零时,时间尺度为太阳连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一平太阳日。

根据对世界时的不同改正,可以分为三种: UT0、UT1 和 UT2。

UT0: 以瞬间子午面连续两次通过太阳的上中天为 24h。显然该时间系统受日月等对地球自转的影响,因而时间尺度的均匀性与一致性较差。

UT1: 将 UT0 “加上” 极移而得。本质上讲,该时间系统是平太阳时。可以表达为:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda \quad (2-1)$$

这里 $\Delta\lambda$ 是顾及极移后经度的变化量。

UT2: 由于地球诸多动力学效应的影响,仍然观测到极移还存在着微小的长期影响。因此可表示为:

$$UT2 = UT1 + \Delta T \quad (2-2)$$

目前所用的是以 UT1 为基准的太阳时。

动力学时 DT (Dynamical Time)

在爱因斯坦广义相对论中引进了两种时间尺度,一种为坐标时,它是存在于整个参考框架中的均匀时间系统,是抽象的,不可观测的时间尺度。不同的坐标系有不同的坐标时,坐标变换时它将与空间坐标一起变换。它是时空框架

的一个重要分量，同时是描述物理事件特别是力学运动的主要参量，因而它又称为力学时。动力学时包括两种时间系统，分别为地球动力学时（TDT 或 TT：Terrestrial Dynamical Time，）和质心动力学时 TDB（Barycentric Dynamical Time），其中质心动力学时是以太阳质心为参考的时间系统，地球动力学时是以地球质心为参考的时间系统。从 1991 年 IAU 第 21 届大会上将 TDT 更名为地球时 TT（Terrestrial Time）。由于地球围绕太阳运动，TDT 相对于 TDB 具有周期性变化。月球、太阳和行星历表都是以 TDB 为独立变量的，此外岁差、章动的计算公式也是依据该时间尺度的。而人造卫星则通常以 TDT 为独立变量。

国际原子时（TAI）

国际原子时（international atomic time，TAI）由国际时间局确定，将 1958 年 1 月 1 日的“UT2”零时作为 TAI 的起点时刻“0”。原子时的秒长定义为铯原子基态的两能级间跃迁辐射震荡的 9192631770 次所经历的时间。国际原子时是目前认为是均匀的、连续的时间尺度。

协调世界时(UTC)

原子时是地心地固坐标系唯一时间尺度。TDT 由 TAI 实现，且与 TAI 相差 32.184 秒。TAI 满足了时间间隔对尺度的均匀要求，但无法代替与地球自转相连的不均匀时间系统。因此引入协调世界时（universal time coordinated，UTC）来建立两种时间系统的协调机制。因此 UTC 定义以原子钟的秒长作为基础，但同时要求 UTC 与 UT1 的时差不能超过“1 秒”。由于原子时的秒长比世界时的秒长要略长，所以当时差超过 1 秒后，需要将原子钟拨慢 1 秒(闰秒)。

GNSS 时间系统

导航卫星系统为了数据处理方便，定义了导航系统专用的原子时时间系统。各卫星导航系统的时间系统均以使用 TAI 的秒长为基准，常用的时间系统有：

GPS 时（GPST：Global Positioning System Time）是 GPS 测量系统中特有的时间系统，是基于美国海军观测实验室 USNO 所维持的原子时系统，以 1980 年 1 月 6 日 UTC 0 时为原点，国际原子时的秒长为计量单位。另外，在任何时刻，GPST 与 TAI 都有 19s 的系统偏差(ICD-GPS-240C, 2019)。

GLNT(GLONASS Time)是 GLONASS 系统采用的时间系统(ICD-L1,L2-GLONASS , 2008)，其时间系统和 UTC 对齐，同样存在跳秒，且与 UTC 时间偏差 3 小时，同步误差小于 1 ms，实际一般优于 1 μ s。

GST 时(Galileo)是 Galileo 系统采用的时间系统，与 GPST 类似，GST 以 1999 年 8 月 22 日 UTC 0 时为原点，且为了保持和 GPST 的兼容性，将 GST 和 UTC 设置了 13 秒的系统偏差(European GNSS (Galileo) OS-SIS-ICD, 2015)。

BDT(BeiDou Time)是 BDS 系统所采用的时间系统，由 BDS 地面运控维持，其定义与 GPST、GST 类似，但是从 2006 年 1 月 1 日 UTC 0 时为原点(BDS-SIS-

ICD, 2019)。BDT 与 TAI 的差异是 33 秒, 故 GPST-BDT=14s。BDT 通过 UTC(NTSC) 与国际 UTC 建立联系, 它与 UTC 的时差保持在 100ns 以内。

QZSST(QZSS Time System)是 QZSS 系统所采用的时间系统, 由 JAXA 维持, 其起点定义与 GPST 相同。QZSST 与日本情报通信研究机构 (National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 维持的世界时 UTC(NICT) 差异在 50ns 以内 (IS-QZSS-PNT-004, 2022)。

IRNSST(IRNSS System Time)是 IRNSS 系统所采用的时间系统, 由 ISRO 维持, 其时间起点定义与 GST 类似 (Mruthyunjaya, 2017)。

2.1.2 常用坐标系统

卫星导航常用的坐标系统包括地心惯性坐标系、地心地固坐标系、卫星轨道坐标系和卫星固坐标系等。

(1) 地心惯性坐标系

地心惯性坐标系 (Earth-Centered Inertial ECI), 又称地心天球坐标系, 以地球质心为坐标原点, 基本面为 J2000.0 地球平赤道面, X 轴在基本面内由地球指向 J2000.0 的春分点, Z 轴为基本面法向, 指向北极方向。X/Y/Z 轴形成右手系。根据基本面的不同, 还存在瞬时真赤道坐标系 (True of Date equatorial System TDS) 和瞬时平赤道坐标系 (Mean of Date equatorial System MDS)。在卫星导航中, 地心惯性系多用于卫星轨道的相关计算

(2) 地心地固坐标系

地心地固坐标系 (Earth-Centered Earth-Fixed ECEF) 通常用于描述地面测站坐标。其坐标原点定义在地球质心, OZ 轴为地球平均自转轴, XOZ 面是 Greenwich 子午面。目前采用的平均自转轴是 2000 平均自转轴。X/Y/Z 轴形成右手系。一般来说地心坐标系有地心坐标系和大地坐标系两种表示途径。

(3) 卫星轨道坐标系

卫星轨道坐标常用于评估卫星轨道的位置误差。卫星坐标系又称“RTN 坐标系”, 其坐标系原点在卫星质心, Z 轴指向地球中心, X 轴指向卫星速度方向, X 轴和 Z 轴组成卫星轨道平面, Y 轴与 X 轴和 Z 轴组成右手坐标系。在卫星轨道坐标系中一般把 Z、X、Y 轴的指向称为径向 (Radial)、切向 (Along-track)、和法向 (Cross-track)。其坐标轴的三个方向向量可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_R &= \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \\ \mathbf{e}_T &= \mathbf{e}_N \times \mathbf{e}_R \\ \mathbf{e}_N &= \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{r} \times \mathbf{v}|} \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中 \mathbf{r} 表示卫星相对于地球中心的位置, \mathbf{v} 表示卫星在惯性系下的速度。

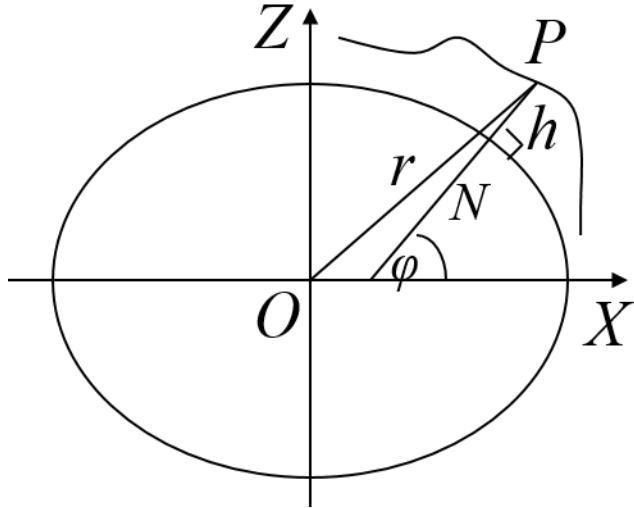


图 2-1 地心地固坐标系统指向示意图

Figure 2-1 The direction of Earth-Centered Earth-Fixed

(4) 卫星星固坐标系

星固坐标系的原点为卫星质心, Z 轴指向地球质心, 处于动偏(yaw steering)状态的卫星的 Y 轴一般指向 Z 轴与太阳至地球的方向向量组成的平面的法向, X 轴与 Y 轴和 Z 轴组成右手坐标系。卫星的天线相位中心改正一般表示在星固坐标系中, 其坐标轴的三个方向向量可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_Z &= -\frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \\ \mathbf{e}_Y &= \frac{\mathbf{e}_Z \times (\mathbf{r}_{sun} - \mathbf{r}_{sat})}{|\mathbf{e}_Z \times (\mathbf{r}_{sun} - \mathbf{r}_{sat})|} \\ \mathbf{e}_X &= \mathbf{e}_Z \times \mathbf{e}_Y \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中 \mathbf{r}_{sun} 和 \mathbf{r}_{sat} 分别为惯性系下卫星和太阳的位置。

2.2 GNSS 观测模型

2.2.1 GNSS 基本观测模型

GNSS 的数据处理主要有测码伪距和载波相位两种观测值, 其原始观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_{r,j}^S = \rho_r^S + d_{orb} + c \cdot (\bar{dt}_r - \bar{dt}^S) + T_r^S + \mu_j^S \cdot I_{r,1}^S + (d_{r,j} - d_j^S) + \varepsilon_{P_j} \\ L_{r,j}^S = \rho_r^S + d_{orb} + c \cdot (\bar{dt}_r - \bar{dt}^S) + T_r^S - \mu_j^S \cdot I_{r,1}^S + \lambda_j^S \cdot N_j^S + (B_{r,j} - B_j^S) + \varepsilon_{L_j} \end{cases} \quad (2-5)$$

式中上标 S 表示 GNSS 系统或卫星; 下标 r 和 j 表示接收机编号和信号频率; ρ_r^S 为卫星与接收机间的几何距离, 单位 m; d_{orb} 表示卫星轨道的误差, 单位 m; c 为真空中的光速, 单位 m/s; \bar{dt}_r 和 \bar{dt}^S 分别表示接收机钟差和卫星钟差, 单位

m ; T_r^s 为斜路径对流层延迟误差, 单位 m ; μ_j^s 是与频率 f_j^s 相关的电离层延迟放大系数 ($\mu_j = (f_1^s / f_j^s)^2$); $I_{r,1}^s$ 为第一频点上斜路径电离层延迟误差, 单位 m ; N_j^s 为整周模糊度, 单位 cycle (周); λ_j^s 为频率对应的载波波长 ($\lambda_j^s = c / f_j^s$), 单位 $m/cycle$; $d_{r,j}$ 和 d_j^s 分别为接收机端和卫星端的伪距硬件延迟, 单位 m ; $B_{r,j}$ 和 B_j^s 分别为接收机端和卫星端的相位硬件延迟, 单位 m ; ε_{P_j} 和 ε_{L_j} 分别为伪距和相位的观测噪声, 主要包含多路径效应和其它未模型化误差, 单位 m 。

除此之外, GNSS 观测方程中涉及到的卫星端和接收机端天线相位中心改正、相对论效应改正、潮汐负荷改正 (固体潮、海潮和极潮)、卫星天线相位缠绕改正等都需事先通过相应模型进行改正。

2.2.2 无电离层组合模型

以双频观测值形成无电离层组合 (Dual-Frequency Ionosphere-Free, IF) 观测值能消除电离层误差一阶项 (99% 以上), 作为传统 PPP 手段被广泛使用 (Hoffmann-Wellenhof et al, 1992; Kouba et al, 2001)。以 f_1 和 f_2 频点为例, 其观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_{IF} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_r^s + d_{orb} + c \cdot (dt_{r,IF} - dt_{IF}^s) + T_r^s + \varepsilon_{P_{IF}} \\ L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_r^s + d_{orb} + c \cdot (dt_{r,IF} - dt_{IF}^s) + T_r^s + \lambda_{IF}^s \cdot \bar{N}_{IF}^s + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases} \quad (2-6)$$

上式中 P_{IF} 和 L_{IF} 分别为伪距和相位双频无电离层组合观测值; $dt_{r,IF}$ 和 dt_{IF}^s 分别为包含双频无电离层组合硬件延迟的接收机钟差和卫星钟差; λ_{IF}^s 为双频无电离层组合波长, \bar{N}_{IF}^s 为双频无电离层组合载波相位模糊度; $\varepsilon_{P_{IF}}$ 和 $\varepsilon_{L_{IF}}$ 为双频无电离层组合后的观测噪声, 同样包含多路径效应和其它未模型化误差, 根据误差传播定律可知, 双频无电离层组合后的观测噪声将比原始观测值大 3 倍。

需要注意的是, 精密钟差一般是基于无电离层组合观测值解算, 由于参数的相关性其卫星端的无电离层伪距硬件延迟会被卫星钟差参数吸收, 而在 PPP 处理时接收机端伪距硬件延迟偏差会被接收机钟差吸收, 因此实际上式中的 $dt_{r,IF}$ 和 dt_{IF}^s 表示为:

$$\begin{cases} dt_{r,IF} = d\bar{t}_r + d_{r,IF} = d\bar{t}_r + \frac{f_1^2 d_{r,1} - f_2^2 d_{r,2}}{f_1^2 - f_2^2} \\ dt_{IF}^S = d\bar{t}^S + d_{IF}^S = d\bar{t}^S + \frac{f_1^2 d_1^S - f_2^2 d_2^S}{f_1^2 - f_2^2} \end{cases} \quad (2-7)$$

由于伪距和相位观测值在 PPP 定位过程中使用相同的时间基准, 伪距硬件延时改正会被模糊度的估计参数所吸收, 因此上式中的 \bar{N}_{IF}^S 可表示为:

$$\bar{N}_{IF}^S = N_{IF}^S + \left(\frac{f_1^2 (B_{r,1} - B_1^S + d_1^S - d_{r,1})}{f_1^2 - f_2^2} + \frac{f_2^2 (B_{r,2} - B_2^S + d_2^S - d_{r,2})}{f_1^2 - f_2^2} \right) / \lambda_{IF}^S \quad (2-8)$$

2.2.3 非组合模型

相比于无电离层组合模式, 非组合模型避免了观测值线性组合导致观测噪声的放大, 同时保留了电离层参数的观测信息, 非组合模型可表示为:

$$\begin{cases} P_1 = \rho_r^S + d_{orb} + c \cdot (dt_r - dt^S) + T_r^S + I_{r,1}^S + \varepsilon_{P_1} \\ P_2 = \rho_r^S + d_{orb} + c \cdot (dt_r - dt^S) + T_r^S + \mu_2^S \cdot I_{r,1}^S + \varepsilon_{P_2} \\ L_1 = \rho_r^S + d_{orb} + c \cdot (dt_r - dt^S) + T_r^S - I_{r,1}^S + \lambda_1^S \cdot N_1^S + \varepsilon_{L_1} \\ L_2 = \rho_r^S + d_{orb} + c \cdot (dt_r - dt^S) + T_r^S - \mu_2^S \cdot I_{r,1}^S + \lambda_2^S \cdot N_2^S + \varepsilon_{L_2} \end{cases} \quad (2-9)$$

2.3 GNSS 定位误差处理

GNSS 高精度定位必须对各种误差精细化处理, 在 GNSS 数据处理的各项误差大致可以分为卫星端误差、接收机端误差以及信号传播路径误差三类误差。

2.3.1 卫星轨道和钟差误差

GNSS 定位的前提之一是要已知卫星位置和卫星钟差信息, 通过迭代计算接收机的位置。目前常用的星历主要包括精密星历和广播星历, 不管是哪种星历给出的卫星位置与真实值间都会存在偏差, 这种偏差成为星历误差。一般来说, 精密星历的精密星历包含精密钟差和精密轨道, 精密钟差的更新频率为 30 s 或 5 min, 其精度在 0.02~0.06 ns, 任意时刻的卫星钟差可通过线性或二次项内插获得。精密轨道的更新频率为 5min 或 15 min, 任意时刻的卫星坐标可通过 10 阶拉格朗日多项式内插法获得(李征航, 2010), GPS 卫星的事后精密轨道精度在 1~2cm。而广播星历的误差在米级, 后续的章节我们将对广播星历和实时星历产品精度展开评估。

2.3.2 相对论改正

GNSS 观测中相对论效应改正可分为距离相对论改正和钟差相对论改正。

(1) 距离相对论改正。由于 GNSS 信号在传播过程中受 Shapiro 延迟的影响, 当经过一个大引力场时因时空弯曲度减小使信号速度变慢, 故需要进行距离相对论改正, 其改正公式如下(Ashby, 2003):

$$d_{Shapiro} = \frac{2\mu}{c^2} \cdot \ln\left(\frac{R_r + R^s + \rho_r^s}{R_r + R^s - \rho_r^s}\right) \quad (2-10)$$

上式中, μ 为万有引力常数; R_r 和 R^s 分别为接收机和卫星至地心的距离, ρ_r^s 为接收机和卫星间的距离。

(2) 钟差相对论改正。由于卫星相对于测站处于高速的运动状态, 依据相对论原理, 卫星上的原子钟和地面的原子钟因相对运动速度和重力位的差异导致产生了相对钟误差, 该误差分为常数和周期项两部分, 其中常数部分与卫星轨道长半轴相关, 可以在卫星出厂前人为校准, 周期项部分与卫星轨道偏心率相关, 用户必须在定位时实时改正。当卫星钟差采用精密星历时, 其改正公式为(Ashby, 2003):

$$d_{rela} = -\frac{2}{c^2} \cdot \mathbf{r}^s \cdot \mathbf{v}^s \quad (2-11)$$

上式中, r^s 和 v^s 分别为卫星坐标向量和卫星速度向量。

当卫星钟差采用广播星历时, 其改正公式为(ICD-GPS-240C, 2019):

$$d_{rela} = -4.442807633 \times 10^{-10} \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k) \quad (2-12)$$

上式中, e 为卫星轨道偏心率; A 为卫星轨道长半轴; E_k 为卫星轨道偏近地点角。值得注意的是, GLONASS 广播星历提供的卫星钟差已包含了钟差相对论效应改正, 故在使用时无需改正(Montenbruck et al, 2015)。

2.3.3 天线相位中心改正

GNSS 接收机获取的观测值是接收机天线相位中心(Antenna Phase Center, APC)至卫星天线相位中心的距离, 而精密星历的轨道位置一般是基于卫星质量中心 (Center of Mass, CoM) 给出的, 卫星质量中心和卫星信号发出的相位中心在星固坐标系下的偏差称为卫星天线相位中心偏差 (Phase Center Offset, PCO)。同时卫星的天线相位中心并不是一个固定的点, 它会随信号发射角度和方向产生微小的变化, 这种相对于天线相位中心点的偏差变化称为天线相位中心变化

(Phase Center Variation)。同理, 接收机 APC 与其天线参考点 (Antenna Reference Point, ARP) 也不一致, 故在 PPP 解算接收机坐标并归算至 ARP 的过程中需要对卫星端和接收端的 PCO/PCV 进行改正。

2.3.4 天线相位缠绕改正

GNSS 信号是一种右旋极化电磁波, 卫星在运行过程中为保证供能需做一定旋转使其太阳能帆板总是指向太阳, 故卫星天线相对于地面接收机发生了旋转, 该旋转会导致载波相位观测值产生变化, 这一现象即为相位缠绕 (Wu et al, 1992)。在非差精密度单点定位中, 其改正公式如下:

$$\Delta\varphi = \text{sign}(\zeta) \cdot \arccos\left(\frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{D}'}{|\mathbf{D}| \cdot |\mathbf{D}'|}\right) \quad (2-13)$$

$$\begin{cases} \zeta = \vec{\mathbf{k}} \cdot (\vec{\mathbf{D}'} \times \vec{\mathbf{D}}) \\ \vec{\mathbf{D}'} = \vec{\mathbf{a}} - \vec{\mathbf{k}}(\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{a}}) - \vec{\mathbf{k}} \times \vec{\mathbf{b}} \\ \vec{\mathbf{D}} = \vec{\mathbf{a}} - \vec{\mathbf{k}}(\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{a}}) - \vec{\mathbf{k}} \times \vec{\mathbf{b}} \end{cases} \quad (2-14)$$

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{i}} = \vec{\mathbf{j}} \times \vec{\mathbf{k}} \\ \vec{\mathbf{j}} = \vec{\mathbf{k}} \times \vec{\mathbf{u}_e} \end{cases} \quad (2-15)$$

上式中, \vec{k} 为卫星到接收机的单位向量; \vec{a} 和 \vec{b} 分别为星固坐标系中 \vec{i} 和 \vec{j} 方向的单位向量, \vec{u}_e 为卫星指向太阳的单位向量; \vec{a} 和 \vec{b} 分别为站心地平坐标中东方向 (E) 和北方向 (N) 的单位向量。

2.3.5 潮汐效应

地球上接收机的位置受地球自转轴漂移、太阳月球引力、各种潮汐运动的影响会发生偏移, 对于毫米至厘米级的精密度单点定位, 固体潮、海潮、极潮的影响必须考虑, 其改正公式如下:

$$d_M = d_{M0} + d_{solid} + d_{ocean} + d_{pole} \quad (2-16)$$

上式中, d_M 为接收机随时间变化的坐标; d_{M0} 为接收机的参考坐标; d_{solid} 、 d_{ocean} 和 d_{pole} 分别为固体潮、海潮和极潮改正。

(1) 固体潮改正。固体潮是受太阳和月球的引力而造成的地球形变, 主要由与纬度相关的固定形变和与时间相关的半日及一日周期振幅形变组成, 可用多次多阶的 Love 数和 Shida 数的球谐函数表示(Gerard, 2010), 其计算方法可参考 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) 在其服务器上提供的 DEHANTTIDEINEL.F 程序包。在中纬度地区, 固体潮的形变最大能超过 10 cm, 其对精密单点定位的影响主要表现在高程方向, 是必须考虑的一项误差改正(张益泽, 2017)。

(2) 海潮改正。海潮主要是由地球潮汐变化引起的地球形变, 与固体潮类似, 主要由半日及一日周期变化组成, 但不含固定形变且比固体潮的变化小一个数量级, 其表达式由 11 个潮波系数构成(Gerard, 2010)。从 IERS Conventions 2010 起, 海潮系数的计算模型更新为 FES2004, 该模型也被目前各大 IGS 分析中心在定轨和定位中所使用, 其计算方法可参考 IERS 提供的 ARG2.F 和 HARDISP.F 程序包 (<ftp://tai.bipm.org/iers/conv2010/chapter7/>)。对于定位精度要求不足 5 cm 或测站位置远离海洋区域的静态精密单点定位, 海潮改正可忽略不计(张益泽, 2017)。

(3) 极潮改正。极潮是由地球自转轴的偏移造成, 其改正公式为:

$$\begin{cases} dN = -9 \cdot \cos 2\varphi((X_p - \bar{X}_p) \cdot \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \cdot \sin \lambda) \\ dE = 9 \cdot \sin \varphi((X_p - \bar{X}_p) \cdot \sin \lambda + (Y_p - \bar{Y}_p) \cdot \cos \lambda) \\ dU = -33 \cdot \sin 2\varphi((X_p - \bar{X}_p) \cdot \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \cdot \sin \lambda) \end{cases} \quad (2-17)$$

上式中, dN 、 dE 和 dU 为接收机在站心地平坐标系中的偏移量; X_p 和 Y_p 为地球极移, \bar{X}_p 和 \bar{Y}_p 为地球平均极移; φ 和 λ 为接收机的纬度和经度。

由式(2-17)可知, 极潮改正主要与接收机位置和极移有关, 其周期呈现出季节性和钱德勒周期性, 最大变化可达 0.8 s, 换算为距离约 2.4 cm。对于 24 h 以内或更短时间的静态精密单点定位, 由于极潮变化非常小且大部分可被接收机钟差吸收, 故此改正可忽略不计(张益泽, 2017)。

2.3.6 电离层延迟

电离层通常被认为是距离地表高度 50-1000 km 的大气层区域, 当单频小于 10 GHz 的卫星或雷达信号通过该区域时将与电离层等离子体产生相互作用, 致使其传播速度和方向发生变化, 从而导致信号延迟。电离层延迟可表示为:

$$I = 40.28 \cdot 10^{16} \cdot STEC / f^2 \quad (2-18)$$

上式中 f 为信号频率, $STEC$ 为信号传播路径上总电子含量。可以看出, 电离层延迟的大小主要与信号频率和电离层中电子密度有关, 此外, 电离层延迟对

伪距和相位观测值的影响正好相反。一些研究表明在白天时电离层延迟误差较大,晚上的影响较小,当在太阳活跃期,GNSS信号穿过电离层而引起的延迟最大可到100 m (Liu et al, 2016)。

GNSS双频用户一般可以利用电离层延迟和频率的关系采用双频观测值的线性组合来消除电离层延迟误差(Morton, 2009)。对于单频或非差非组合用户,电离层延迟误差将成为单点定位中最大的误差源之一,需要采用外部电离层模型或者电离层产品进行改正(Klobuchar, 1987; Feess et al, 1987; Schaer et al, 1998; Jee et al, 2010; Wu et al, 2013; Wu et al, 2014; Cai et al, 2017)。

2.3.7 对流层延迟

对流层是地球大气层中最接近地面的一层,其质量占整个大气层的75%,包含了几乎所有水蒸气和气溶胶。由于大气密度的改变,导致信号在传播过程中发生路径和速度的变化产生的时间延迟称为对流层延迟。对流层延迟可表示为:

$$T = M_w^{dry} \cdot ZHD + M_w^{wet} \cdot ZWD \quad (2-19)$$

上式中ZHD (Zenith Hydrostatic Delay)和ZWD (Zenith Wet Delay)分别为天顶方向的对流层干延迟和湿延迟, M_w^{dry} 和 M_w^{wet} 分别为对流层干延迟和湿延迟对应的映射函数。

由式(2-19)可知,对流层延迟主要由两部分组成,即干延迟和湿延迟。干延迟主要由大气中的干燥气体引起,占对流层总延迟的90%左右,一般可通过先验模型进行精确改正(Leandro, 2006; Boehm, 2007; Lagler, 2013; Boehm J, 2015);湿延迟主要由水汽引起,因与水汽的密度分布高度相关,故很难用模型精确表达,其大小约占对流层总延迟的10%,在PPP中常作为未知参数进行估计,估计方法有随机游走过程和分段线性函数(王解先, 2011; Yuan et al, 2014)。

2.4 数据预处理与参数估计

2.4.1 周跳探测

目前应用最广泛的实时双频周跳探测方法为TurboEdit探测法,该方法主要利用双频观测值构建GF(Geometry-Free)和MW(Melbourne-Wubbena)组合进行周跳探测(Blewitt, 1990)。

(1) GF组合周跳探测法。根据式(2-5)可建立GF组合为:

$$\begin{cases} P_{GF} = P_2 - P_1 = (\mu_2^S - \mu_1^S) \cdot I_{r,1}^S - d_{r,12} + d_{12}^S + \varepsilon_{P_{GF}} \\ L_{GF} = L_1 - L_2 = (\mu_2^S - \mu_1^S) \cdot I_{r,1}^S + (\lambda_1^S \cdot N_1^S - \lambda_2^S \cdot N_2^S) + B_{r,12} - B_{12}^S + \varepsilon_{L_{GF}} \end{cases} \quad (2-20)$$

上式中, P_{GF} 和 L_{GF} 为电离层残差观测值, $d_{r,12}$ 和 $B_{r,12}$ 为L1和L2频点间接

收机端硬件延迟差异, d_{12}^s 和 B_{12}^s 为 L1 和 L2 频点间卫星端硬件延迟差异, $\varepsilon_{P_{GF}}$ 和 $\varepsilon_{L_{GF}}$ 为 GF 组合后的伪距和相位观测噪声。

由式 (2-20) 可知, 伪距 GF 组合了包含两个频点的电离层延迟差异、卫星端及接收机端硬件延迟差异和 GF 组合后的观测噪声, 在此基础上, 相位 GF 组合还包含了两个频点的模糊度差异。由于硬件延迟差异和观测噪声在历元间的变化量非常小可忽略不计, 故在未发生周跳时, GF 组合的历元间变化量即为两个频点间电离层延迟差异的变化量。伪距 GF 组合中没有模糊度信息, 其电离层延迟差异的变化量可被相位 GF 组合所利用。由于伪距 GF 组合后的观测噪声被放大到 42 cm, 远大于载波相位观测值波长, 为了减小其对周跳探测的影响, 一般需对伪距 GF 组合值进行 N 阶多项式拟合, 因此, GF 组合周跳探测量可表示为:

$$\Delta L_{GF} = L_{GF} - P_{fit} = \lambda_1^s \cdot N_1^s - \lambda_2^s \cdot N_2^s \quad (2-21)$$

上式中, P_{fit} 为伪距 GF 组合 N 阶多项式拟合值。

GF 组合周跳的判别条件为:

$$\begin{cases} |\Delta L_{GF}(k) - \Delta L_{GF}(k-1)| > 6 \cdot (\lambda_2^s - \lambda_1^s) \\ |\Delta L_{GF}(k+1) - \Delta L_{GF}(k)| < 1 \cdot (\lambda_2^s - \lambda_1^s) \end{cases} \quad (2-22)$$

当相位 GF 组合同时满足式 (2-22) 中两式, 即认为发生周跳; 当仅满足式 (2-22) 中第一式, 则认为是粗差。

(2) MW 组合周跳探测法。MW 组合包含伪距窄巷组合和相位宽巷组合, 其中伪距窄巷组合可表示为:

$$P_N = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (2-23)$$

相位宽巷组合可表示为:

$$L_w = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} \quad (2-24)$$

将式 (2-23) 和 (2-24) 进行组合, 即可得到 MW 组合的公式为:

$$\begin{aligned} L_w - P_N = & \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (\overline{N_1^s} - \overline{N_2^s}) + \frac{f_1 \cdot (D_{r,1} - d_1^s) - f_2 \cdot (D_{r,2} - d_2^s)}{f_1 - f_2} \\ & - \frac{f_1 \cdot (B_{r,1} - b_1^s) + f_2 \cdot (B_{r,2} - b_2^s)}{f_1 + f_2} + \varepsilon_{MW} \end{aligned} \quad (2-25)$$

由式 (2-25) 可知, MW 组合消除了大部分定位误差, 组合后的相位观测值波长 $c/(f_1 - f_2)$ 较原始单频波长也大大增加, 同时卫星端和接收机端的硬件延迟

差异基本稳定不变, 故 MW 组合周跳探测量可表示为:

$$N_{MW} = N_1^S - N_2^S = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 - f_2}{c \cdot (f_1 + f_2)} \cdot (f_1 P_1 + f_2 P_2) \quad (2-26)$$

上式中 N_{MW} 为宽巷模糊度, Φ 为以周为单位的载波相位观测值。

MW 组合周跳探测量的精度易受伪距观测噪声的影响, 一般需通过多历元取平均的方法进行减弱, 因此, MW 组合周跳的判别条件为:

$$\begin{cases} |N_{MW}^{mean}(k-1) - N_{MW}(k)| > 4\sigma \cdot (k-1) \\ |N_{MW}(k+1) - N_{MW}(k)| < 1 \end{cases} \quad (2-27)$$

上式中 N_{MW}^{mean} 为前 $k-1$ 个历元 MW 组合观测量的平均值, σ 为前 $k-1$ 个历元 MW 组合观测量的标准差。当 MW 组合同时满足式 (2-27) 中两式, 即认为发生周跳; 当仅满足式 (2-27) 中第一式, 则认为是粗差。

TurboEdit 法综合使用 GF 和 MW 组合对周跳进行探测, 当其中任意一个组合发现周跳即认为该历元产生周跳。虽然这种方法探测成功率很高, 但为了利用多项式拟合法对伪距观测噪声进行削弱, 需要积累几十甚至上百个历元的数据, 故该方法对定位初期的周跳无法进行准确探测。

2.4.2 函数模型与随机模型

(1) 函数模型

精密度单点定位使用伪距和相位观测值, 其估计参数包括了接收机位置和钟差、对流层延迟和模糊度参数。以双频无电离层为例, 对其观测方程线性化可以列为:

$$\begin{bmatrix} P_{IF,1} - \rho_1 - D_{P,1} \\ L_{IF,1} - \rho_1 - D_{L,1} \\ \vdots \\ P_{IF,n} - \rho_n - D_{P,n} \\ L_{IF,n} - \rho_n - D_{L,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_0 - X^{S,1}}{\rho_0} & \frac{Y_0 - Y^{S,1}}{\rho_0} & \frac{Z_0 - Z^{S,1}}{\rho_0} & 1 & M_{w,1} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{X_0 - X^{S,1}}{\rho_0} & \frac{Y_0 - Y^{S,1}}{\rho_0} & \frac{Z_0 - Z^{S,1}}{\rho_0} & 1 & M_{w,1} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{X_0 - X^{S,n}}{\rho_0} & \frac{Y_0 - Y^{S,n}}{\rho_0} & \frac{Z_0 - Z^{S,n}}{\rho_0} & 1 & M_{w,n} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{X_0 - X^{S,n}}{\rho_0} & \frac{Y_0 - Y^{S,n}}{\rho_0} & \frac{Z_0 - Z^{S,n}}{\rho_0} & 1 & M_{w,n} & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ c \cdot dt_r \\ ZWD \\ N_1 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

上式中, M_w 为对流层湿延迟的映射函数, ZWD 为对流层天顶方向湿延迟改正参数, N 为以 m 为单位的载波相位模糊度参数。

其定位模型可进一步简化为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{x} \quad (2-29)$$

上式中, y 为观测值残差, 即 OMC (Observation Minus Correction), G 为与

接收机概略坐标、卫星位置、对流层湿延迟映射函数相关的设计矩阵, x 为待估参数, 主要包括接收机坐标改正量、接收机钟差改正量、对流层延迟湿分量和相位模糊度参数等。

(2) 随机模型

由于不同的观测方程的精度不一致, 因此需要对观测方程进行定权, 即建立与之对应的随机模型。通过对各种定位误差项的分析, 观测方程噪声可表示为:

$$\sigma^2 = \sigma_{orb}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{ion}^2 + \sigma_{trop}^2 + \sigma_{noise}^2 \quad (2-30)$$

上式中, σ_{orb} 和 σ_{clk} 分别表示卫星轨道和钟差改正精度, 对于不同 GNSS 系统的广播星历和精密星历, 其精度差异较大; σ_{ion} 表示电离层延迟改正精度, 当采用双频或单频无电离层组合模型时, 这一项可不用考虑; σ_{trop} 表示对流层延迟改正精度, 在伪距单点定位中通常设置为经验值, 而在 PPP 中由于湿延迟分量被当做参数进行估算, 故不考虑此项改正精度; σ_{noise} 表示观测值噪声的精度, 其中主要包含多路径效应误差, 在 PPP 解算中, 对于 GPS 观测值, 其伪距和相位精度分别设置为 0.3 m 和 0.003 m。

同时公式(2-30)可将观测方程噪声划分为与高度角相关和与高度角无关的两部分(Zhang et al, 2019):

$$\sigma^2 = \sigma_{SISRE}^2 + \sigma^2(Ele) = \sigma_{orb}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma^2(Ele) \quad (2-31)$$

$$\sigma(Ele) = (0.5 + \frac{0.5}{\sin(Ele)}) \cdot \sigma_0 \quad (2-32)$$

上式中, σ_{SISRE} 为 GNSS 卫星的空间信号精度, 主要由卫星轨道和钟差精度组成, 该项与高度角无关; $\sigma(Ele)$ 为高度角定权函数, σ_0 为观测值精度。

综上所述, 与式 (2-29) 对应的随机模型可表示为:

$$\mathbf{W} = \frac{1}{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

上式中, W 为观测值权阵, R 为观测值的协方差阵。

2.4.3 最小二乘算法

最小二乘的数学模型为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \mathbf{R} \quad (2-34)$$

上式中, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的期望 $E[\boldsymbol{\varepsilon}] = 0$, 且 $\mathbf{R} = E[\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^T]$ 。

根据最小二乘原理, 可建立待估参数的法方程为:

$$(\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}) \cdot \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (2-35)$$

式 (2-29) 的最小二乘最优无偏解为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \\ \mathbf{P} = (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \end{cases} \quad (2-36)$$

上式中, \mathbf{P} 为参数的协因数阵, 因为是对称正定矩阵, 故可用 Cholesky 分解法进行求逆。

由于在单点定位参数估计的整个过程中存在很多相同的未知参数, 例如接收机钟差、发生周跳前各历元的相位模糊度参数等, 为了减小法方程矩阵的大小, 提高计算效率, 可以采用序贯平差法 (杨元喜, 2006)。以两组观测方程的数学模型为例:

$$\begin{cases} \mathbf{y}_1 = \mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_1, \quad \mathbf{R} \\ \mathbf{y}_2 = \mathbf{G}_2 \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_2, \quad \mathbf{R} \end{cases} \quad (2-37)$$

其参数解为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{G}_2]^{-1} \cdot [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{y}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{y}_2] \\ \mathbf{P} = [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{G}_2]^{-1} \end{cases} \quad (2-38)$$

其递归算法为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{P}_1 \cdot [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{y}_1] \\ \mathbf{P}_1 = [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{G}_1]^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{P}_2 \cdot [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{y}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{y}_2] \\ \mathbf{P}_2 = [\mathbf{P}_1^{-1} + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{G}_2]^{-1} \end{cases} \quad (2-39)$$

值得注意的是, 序贯平差法中相同参数的解在每个历元并不相同, 只有最后一个历元的解才是最终解。对于 PPP 中需要估计的对流层湿延迟参数, 一般每隔 2 小时进行一次参数消除, 在实时动态定位中, 原来的坐标改正量参数需要在每个历元处理前进行消除。

2.4.4 卡尔曼滤波算法

Kalman 滤波算法作为一种基于最小方差的递归估计算法, 只需知道上一历元时刻状态估值以及当前状态的观测值即可计算出当前状态的估计值, 无需额外知道过去的历史观测信息, 其主要由状态预测和参数更新两部分组成 (杨元喜,

2006)。

对于第 $n-1$ 和 n 历元, 参数和协方差阵的预测模型为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}^-(n) = \boldsymbol{\theta}(n-1) \cdot \hat{\mathbf{x}}^-(n-1) \\ \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- = \boldsymbol{\theta}(n-1) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- \cdot \boldsymbol{\theta}^T(n-1) + \mathbf{Q}(n-1) \end{cases} \quad (2-40)$$

上式中, 带有上标“-”的参数为预测值, 带有“ $\hat{\cdot}$ ”的参数为滤波值; $\boldsymbol{\theta}$ 为参数的状态转移矩阵, \mathbf{Q} 为过程噪声矩阵。

第 n 历元的观测模型和式 (2-40) 可以列为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^-(n) \\ \mathbf{y}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{G}(n) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(n) \\ \mathbf{P}(n) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}(n) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2-41)$$

式 (2-41) 的最小二乘解为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(n) = \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- \cdot [(\hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^-)^{-1} \cdot \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{G}^T(n) \cdot \mathbf{R}^{-1}(n) \cdot \mathbf{y}(n)] \\ \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^{\hat{x}(n)} = [(\hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^-)^{-1} + \mathbf{G}^T(n) \cdot \mathbf{R}^{-1}(n) \cdot \mathbf{G}(n)]^{-1} \end{cases} \quad (2-42)$$

可以看到, Kalman 滤波的解和序贯平差法的解类似, 而传统的 Kalman 滤波的公式为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(n) = \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{K}(n) \cdot [\mathbf{y}(n) - \mathbf{G}(n) \cdot \hat{\mathbf{x}}^-(n)] \\ \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^{\hat{x}(n)} = \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- \cdot [\mathbf{I} - \mathbf{K}(n) \cdot \mathbf{G}(n)] \end{cases} \quad (2-43)$$

$$\mathbf{K}(n) = \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- \cdot \mathbf{G}^T(n) \cdot [\mathbf{G}(n) \cdot \hat{\mathbf{P}}_{\hat{x}(n)}^- \cdot \mathbf{G}^T(n) + \mathbf{R}(n)]^{-1} \quad (2-44)$$

上式中, \mathbf{K} 为 Kalman 滤波的增益矩阵。

2.5 小结

本章简要介绍了 GNSS 基础理论, 介绍了 GNSS 定位常用的时间系统和坐标系统, 并给出了相关的转换关系; 推导了 GNSS 定位的基本观测模型并系统的介绍了 GNSS 数据处理的各种误差的定义及其处理改正算法, 为后面的章节提供理论基础和算法依据。

第3章 GNSS 星历产品精度评估

GNSS 的广播星历由地面运控系统计算生成, 提供导航、定位和授时等服务。但由于地面运控系统的高实时性需求和预报误差影响, 其产品性能仅能维持几米量级的定位精度。随着实时高精度应用需求的增长, 实时产品应运而生。本章节将对 GNSS 广播星历产品进行评估, 对各卫星导航系统的基本服务能力进行分析。此外还对当前所有分析中心提供的实时产品的质量进行评估, 包括数据延迟、数据可用性、产品精度、定位应用几个方面的分析, 指出了当前星历产品的约束限制, 为后续章节和 GNSS 实时产品的精化改进提供参考。

3.1 GNSS 广播星历产品评估方法

GNSS 不同的轨道和钟差产品因其生成的算法和数据差异性导致其基准不同, 因此两者在比较时需要注意一下几个问题:

(1) 时间系统

精密星历和广播星历所使用的时间系统存在差异。IGS 分析中心的精密星历基于 GPST; GPS 广播星历采用 GPST 标准, Galileo 广播星历采用与 GPST 同尺度的 GST 时间系统, 因此 GPS 和 Galileo 无需考虑时间基准的转换; 而 GLONASS 的广播星历参考时刻是基于 UTC 时间, 和 GPST 存在跳秒的差异; BDS 系统采用的 BDT 和 GPST 存在固定的 14 秒差异。因此在两种星历比较时 GLONASS 和 BDS 系统需要将广播星历时间系统转换到 GPST 实现时间基准的统一。

(2) 坐标系统

各 GNSS 分析中心的事后精密产品均基于 ITRF 参考框架生成(Neilan et al., 2015), 而不同的卫星导航系统使用不同的参考框架。其中 GPS 系统使用 WGS-84 坐标框架, GLONASS 系统使用 PZ90.11 坐标框架, Galileo 使用 GTRF 坐标框架和北斗系统使用的 CGCS2000 坐标框架, 这些坐标参考框架与 ITRF 参考框架的差异均在厘米量级, 相比于各系统广播星历的米级误差, 坐标框架基准的差异可以忽略不计(Malys and Neill, 2017)。

(3) 天线相位中心改正

一般来说, 各 GNSS 分析中心的精密产品的卫星轨道都是基于卫星质量中心。而广播星历的轨道基于卫星天线相位中心, 如图 3-1 所示, 精密产品和广播星历产品因使用的天线相位中心和参考点的不同, 在比较时需要扣除卫星天线相位中心的影响。各卫星导航系统地面运控系统在生成广播星历时使用的是卫星出厂标定的 PCO 值, Montenbruck 等人在评估 GNSS 广播星历时给出了各 GNSS 系统广播星历中使用的 PCO 值(Montenbruck, 2015; Montenbruck, 2017)。对于北

斗三号卫星, 北斗卫星导航系统官方提供了地面运控系统所使用的相位中心文件 (<http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020200323534413069510.atx>)。值得注意的是, 2017 年 1 月 17 日之前北斗的广播星历轨道名义上是基于卫星相位中心的, 但实际上 SLR 检核的结果显示是基于卫星质量中心(Montenbruck, 2015), 因此在 2017 年 1 月 17 日之前的北斗精密轨道和广播轨道比较时无需考虑天线相位中心的差异。此外 BDS 的天线相位中心的参考点是与北斗的钟差参考点一致, 都是基于 B3 天线的相位中心, 因此在 BDS 的卫星广播星历位置从天线相位中心转换到卫星质量中心时, 只需要使用 B3 天线参数。

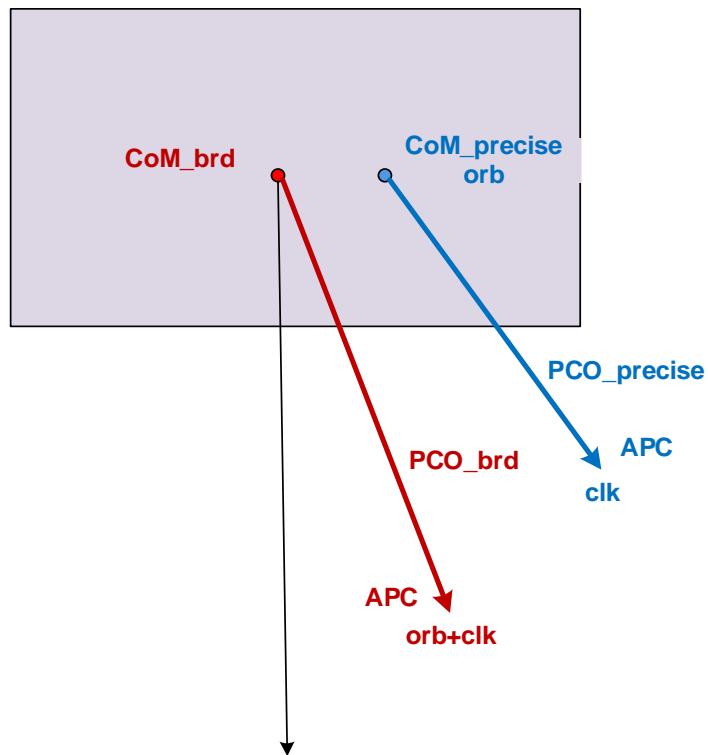


图 3-1 广播星历和精密星历的轨道钟差基准点 (红色: 广播星历; 蓝色: 精密星历)

Figure 3-1 The orbit and clock reference of broadcast ephemeris and precision ephemeris (red: broadcast ephemeris; blue: precision ephemeris)

(4) 码偏差改正

GNSS 分析中心的精密钟差产品都是基于双频无电离层组合生成, 其中 GPS 和 GLONASS 的广播星历的钟差基准与精密产品一致, 无需改正。而 Galileo 卫星播发 FNAV 和 INAV 两种广播星历, 其中 FNAV 星历调制在 E5a-I 信号上, 其广播钟差基于 E1E5a 无电离层组合; INAV 星历调制在 E1 和 E5b 信号上, 其广播钟差是基于 E1E5b 无电离层组合的。本文的评估结果均使用 Galileo 的 FNAV 对其广播星历评估, 因此无需额外的码偏差改正。对于北斗系统, GNSS 分析中心在提供北斗三号卫星的产品之前, 北斗的精密钟差产品是基于 B1B2 无电离层组合基准的, 而在提供北斗三号卫星以后钟差都是基于 B1B3 无电离层组合基准。

其中武汉大学 IGS 分析中心从 2019 年 1 月 1 日开始提供以 B1B3 无电离层组合为基准且包含北斗三号卫星的精密产品。此外需要注意的是，北斗广播星历的钟差是基于 B3 频点的，用户可以通过广播星历的 TGD 参数转换到不同的频点及组合上使用。其 B1、B2 频点与 B3 频点间的伪距硬件延迟可表示为：

$$\begin{cases} TGD_1 = d_1^S - d_3^S = -DCB_{13}^S \\ TGD_2 = d_2^S - d_3^S = -DCB_{23}^S = (DCB_{12}^S - DCB_{13}^S) \end{cases} \quad (3-1)$$

上式中， TGD_1 和 TGD_2 表示 BDS 广播星历的 TGD 参数； DCB_{13}^S 表示 B1B3 频点的 DCB。通过换算，BDS 不同频点及组合的卫星钟差可表示为：

$$\begin{cases} dt_1^S = dt_3^S - TGD_1 \\ dt_2^S = dt_3^S - TGD_2 \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\begin{cases} dt_{12}^S = dt_3^S - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} TGD_1 + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} TGD_2 \\ dt_{13}^S = dt_3^S - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} TGD_1 \\ dt_{23}^S = dt_3^S - \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_3^2} TGD_2 \end{cases} \quad (3-3)$$

(5) 相对论效应

GLONASS 的广播星历已经包含了钟差的相对论改正，而精密星历的钟差参数不包括相对论改正，因此在 GLONASS 的广播星历钟差评估时需要先扣除钟差相对论的影响。

(6) 广播星历预处理

从 IGS 数据中心可以直接获取 IGS、DLR 和 GOP 等分析中心的广播星历归档产品。但部分测站接收机受环境或接收机软硬件的影响，接收的广播星历数据解码后与实际卫星播发的不同。虽然接收机解码过程中数据通过了各种检验，但其错误的数据导致基于星历参数计算的卫星位置和钟差与实际存在偏差。IGS 分析中心在合并星历的时候可能无法准确探测出数据错误，出现相同的参考历元有两组甚至多组不同星历参数的星历记录。虽然这种情况发生的概率较小，但对 GNSS 广播星历的评估是不可忽略的。因此评估前需要先对广播星历数据进行预处理，处理的流程如图 3-2 所示，处理策略如下：

- 1) 读取多站的广播星历文件
- 2) 对广播星历中每一条星历数据的参数进行一致性检查，去掉重复的广播星历，卫星健康标识为不正常的不做处理。
- 3) 按照卫星循环，计算每一条广播星历在卫星状态可用的连续弧段内和其

他广播星历的衔接点误差。在计算卫星轨道位置的同时对卫星轨道高度进行粗差检查，统计通过衔接点限差的广播星历情况，根据阈值标记广播星历可用状态。

4) 以符合衔接点误差限差并且不涉及多组参考时刻相同的广播星历为参考，对具有相同参考时刻的广播星历进行错误检查。若仍具有多组相同时刻的星历，检查 BDS 的信号传输时间 TTM 参数(Transmission time of message) 是否在理论更新周期前 2 分钟，有则剔除；检查 GLONASS 星历参数的频率通道参数，异常则剔除。

(7) 评估方法

轨道误差分析，基于广播星历和精密星历分别计算同一时刻的卫星位置，将作差并从地心地固坐标系转换到卫星轨道坐标系内进行比较。

而在钟差误差评估时，由于在生成广播星历或精密星历时使用的基准站或参考的基准钟不同，导致其存在基准的差异。因此钟差误差分析时需要扣除钟差基准带来的影响。卫星钟差误差可用公式 (3-4) 表示。目前主要有平均值、中位数以及加权平均值三种方法确定钟差基准(Montenbruck, 2015; Wu, 2017; 张益泽, 2017)，本文的评估广播星历选用中位数的方法计算钟差基准，避免个别卫星钟的粗差对评估结果产生影响。

$$\Delta T_b^i(k) = \mu(k) + \delta T^i(k) + \Delta^i(k) \quad i = (1, 2 \dots n) \quad (3-4)$$

式中 $\Delta T_b^i(k)$ 表示包含钟差基准的钟差误差， $\mu(k)$ 表示钟差基准值， $\delta T^i(k)$ 为实际钟差误差， $\Delta^i(k)$ 表示随机误差。

基于以上轨道误差和钟差的计算，采用以下公式计算空间信号测距精度：

$$SISRE = \sqrt{(\alpha \cdot R - clk)^2 + \beta(A + C)^2} \quad (3-5)$$

其中 R 、 A 、 C 和 clk 分别表示卫星径向、切向、法向和钟差误差， α 和 β 为投影系数，对于不同导航系统与卫星高度而言，投影系数不同，具体数值见表 3-1 (Montenbruck, 2018)。此外，为避免粗差影响数据统计的准确性，本文对 SISRE 设置了 10m 的阈值，其中 GEO 卫星轨道切向误差阈值为 50m，对超过阈值的数据进行剔除(Montenbruck, 2015)。

表 3-1 不同卫星的 SISRE 计算投影系数 (Montenbruck, 2018)

Table 3-1 Projection coefficient of SISRE

系数	GPS	GLONASS	Galileo	BDS(GEO/IGSO)	BDS(MEO)
α	0.979	0.977	0.984	0.992	0.981
β	0.143	0.149	0.128	0.089	0.136

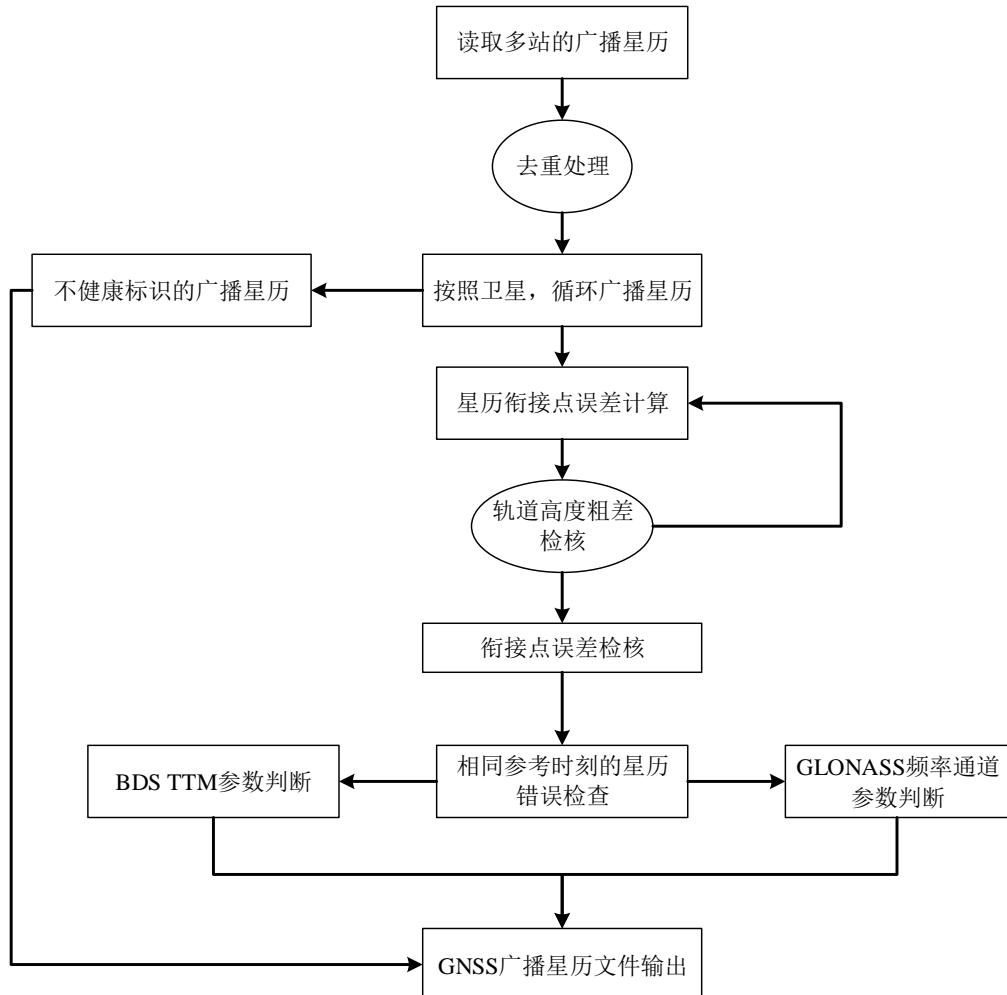


图 3-2 GNSS 广播星历预处理流程

Figure 3-2 The reprocessing procedure for GNSS broadcast ephemeris

3.2 GNSS 广播星历精度分析

为充分分析 GNSS 广播星历的误差变化情况, 从 MGEX 数据中心选择了 2022 年全年的 GNSS 广播星历数据进行预处理与精度评估, 以武汉大学 IGS 分析中心的事后精密产品作为参考基准, 按照 60 秒的时间采样率统计 GNSS 的广播星历误差。

3.2.1 GPS 广播星历分析

“GPS III”是 GPS 推进系统现代化建设的一部分, 相比于之前的 GPS 系列卫星其导航信号的设计精度进一步提高。截止 2022 年底 10 颗计划的 GPS Block IIIA 卫星已有 5 颗发射成功并进入了在轨运行状态。GPS 在轨卫星包括 Block IIR、Block IIR-M、Block IIF 和 Block IIIA 四种类型的卫星, 个别的 Block IIR 卫星已服役超过 20 年。图 3-3 给出了 2022 年 GPS 不同类型卫星的轨道径向、切向和法向的均方根误差统计结果, 我们能够注意不同类型的 GPS 卫星轨道三个

方向的精度相当, Block IIIA 卫星的轨道径向精度稍好于其他类型的卫星。图 3-4 统计了不同卫星轨道误差的均值和标准差, GPS 卫星的轨道误差均没有系统性偏差, 且 Block IIIA 卫星的轨道径向误差离散度相对更小。GPS 广播星历的轨道径向误差约 0.15 m, 切向误差约为 1.06m, 轨道法向误差约为 0.42 m。

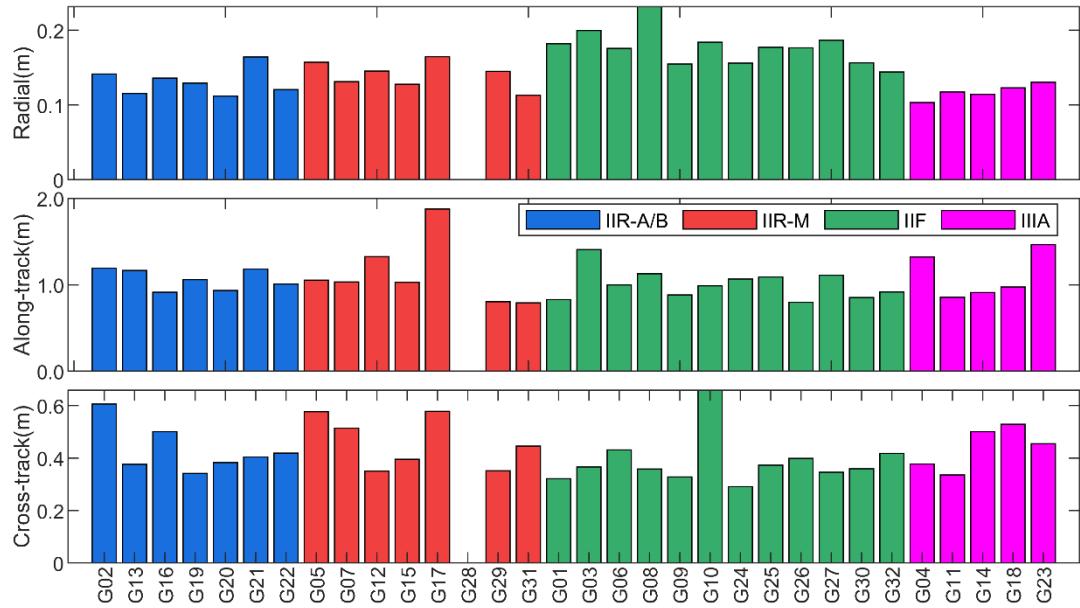


图 3-3 GPS 广播星历轨道误差

Figure 3-3 The orbit errors of GPS broadcast ephemeris

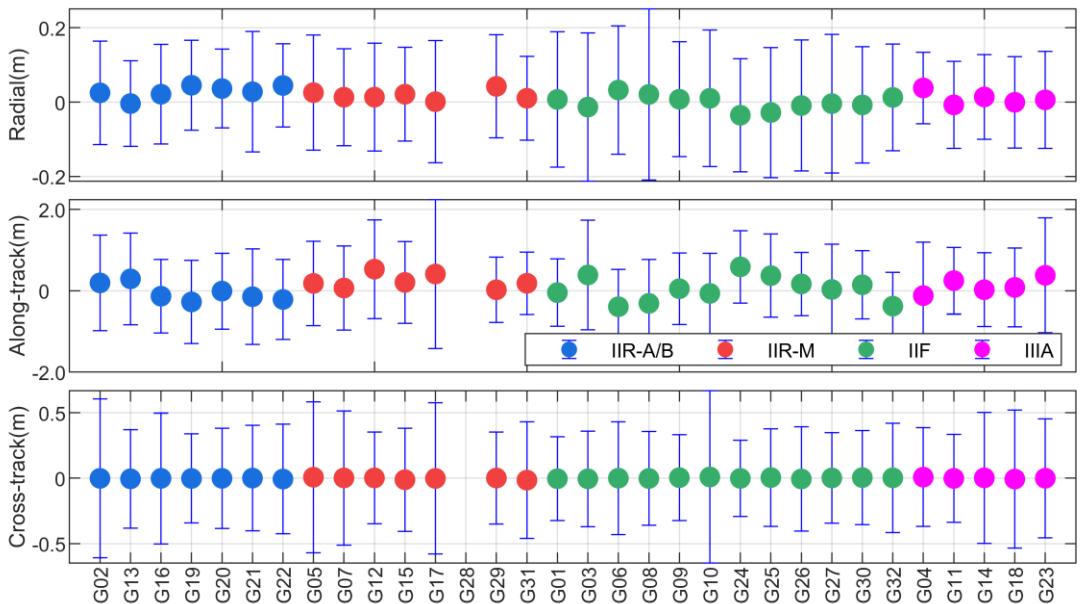


图 3-4 GPS 卫星轨道误差的均值和标准差

Figure 3-4 The mean and STD of GPS orbit errors

图 3-5 展示了 GPS 卫星钟差误差和空间信号精度的统计结果。不同于轨道误差的统计方式, 钟差误差统计均方根误差表现的是 GPS 广播星历钟差和伪距观测值的一致性, 而钟差误差的标准差表现的是卫星钟差的稳定程度, 在实际精

密单点定位的过程中，钟差误差均值会被相位模糊度参数所吸收，因此钟差的 STD 对相位观测值的影响较大。不同类型 GPS 卫星的钟差误差差异较为明显，随卫星类型的更新逐渐变好。需要注意的是，G08 卫星虽然是较新的 Block IIF 系列卫星，但 G08 卫星上搭载了 Cs 原子钟导致钟差精度的稳定性较差。Block IIIA 卫星的星原子钟比其他类型卫星性能更优，钟差误差的 RMS 约为 0.63 ns， STD 约为 0.37 ns。表 3-2 给出了 GPS 广播星历误差和空间信号精度的统计结果，总体上来说随着 GPS 系统现代化 Block IIIA 卫星的更新和加入，GPS 卫星的空间信号精度有逐步提升趋势，当前 GPS 星座的空间信号精度能达到 0.43 m。

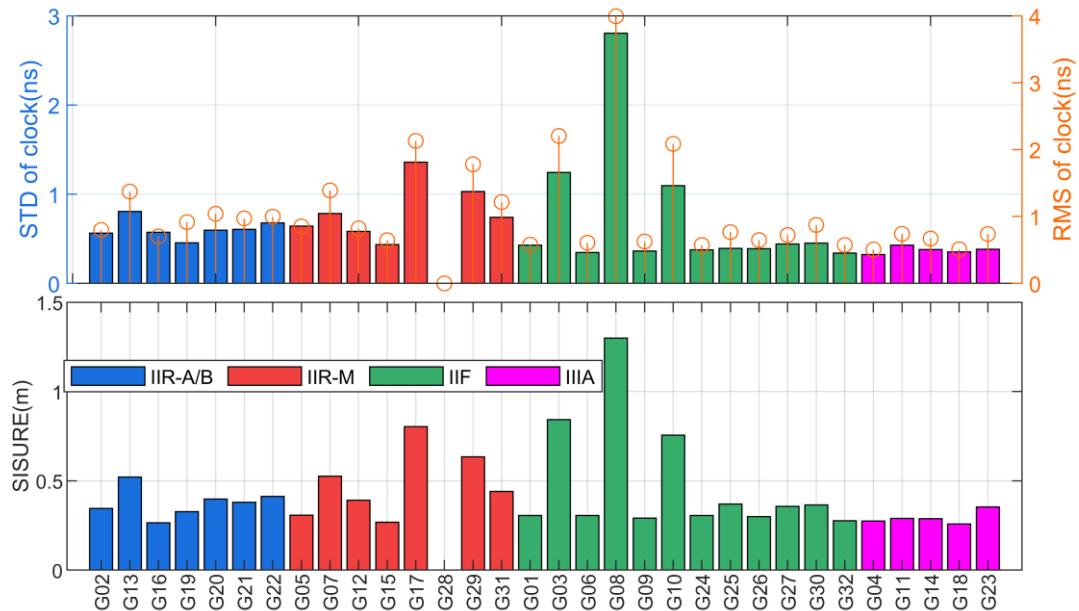


图 3-5 GPS 广播星历钟差误差和空间信号精度

Figure 3-5 The errors of clock and SISRE for GPS

表 3-2 GPS 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)

Table 3-2 The errors of GPS broadcast ephemeris and SISRE(RMS)

Type	R/m	T/m	N/m	Clock/ns		SISRE/m
				RMS	STD	
IIR	0.13	1.06	0.43	0.97	0.61	0.38
IIR-M	0.14	1.13	0.46	1.26	0.79	0.48
IIF	0.18	1.01	0.39	1.18	0.72	0.48
IIIA	0.12	1.10	0.44	0.63	0.37	0.29
Mean	0.15	1.06	0.42	1.07	0.66	0.43

3.2.2 GLONASS 广播星历分析

广播星历评估期间，GLONASS 星座包括 GLONASS-M 和 GLONASS-K1 两种类型卫星，其中 GLONASS-K1 卫星分别是 R09、R11 和 R22。图 3-6 给出了 GLONASS 广播星历的轨道误差的 RMS 统计结果，GLONASS-K1 类型的卫星虽然是 GLONASS 新一代的卫星，但其轨道误差明显高于 GLONASS-M 卫星，特别是 GLONASS-K1 的轨道切向误差接近大部分 GLONASS-M 卫星两倍。总体上

GLONASS 的卫星轨道径向误差约 0.39 m, 轨道切向误差约 2.72 m, 轨道法向误差约 0.87 m。图 3-7 给出了 GLONASS 卫星的轨道误差的均值和标准差, 其中 GLONASS-K1 类型的 R09 卫星存在大约 14.0 cm 的径向偏差, 而 R16 卫星的轨道精度稳定性很差, 且轨道切向方向有接近 4.0 m 的系统性偏差。

图 3-8 展示了 GLONASS 广播星历钟差误差和空间信号精度, 两种类型的卫星的钟差精度相当, GLONASS 的广播星历钟差误差 RMS 大约为 7.0 ns, 钟差误差的稳定度 STD 大约为 2.42 ns, 空间信号误差大约 2.34 m, 该评估结果与之前的评估结果相当(Montenbruck, 2015, 2018, 张益泽), 但由于 GLONASS-K1 卫星的广播产品不稳定有精度下降的趋势。

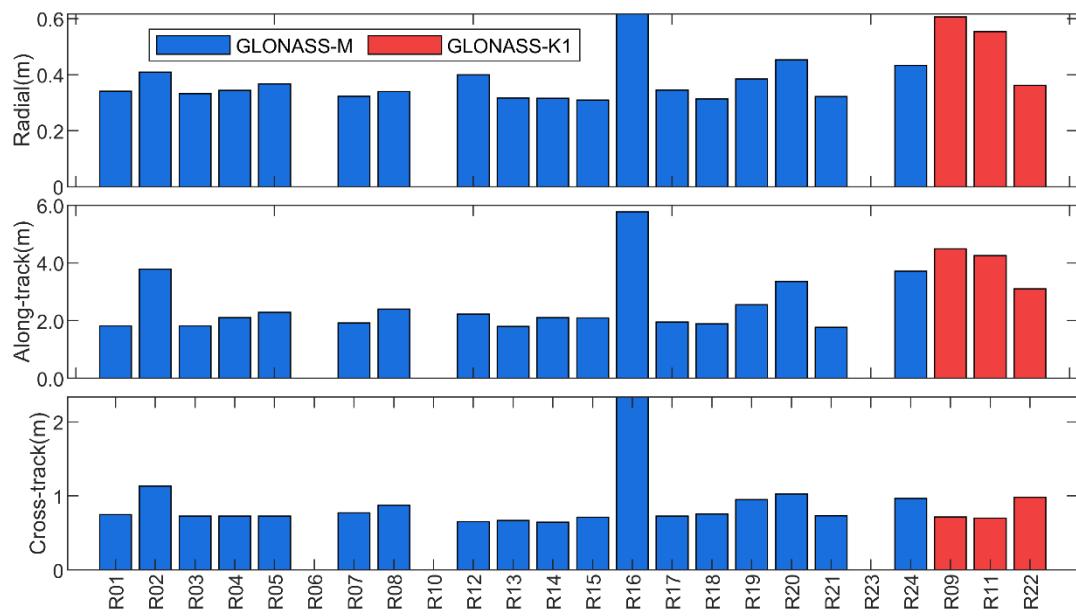


图 3-6 GLONASS 广播星历轨道误差
Figure 3-6 The orbit errors of GLONASS broadcast ephemeris

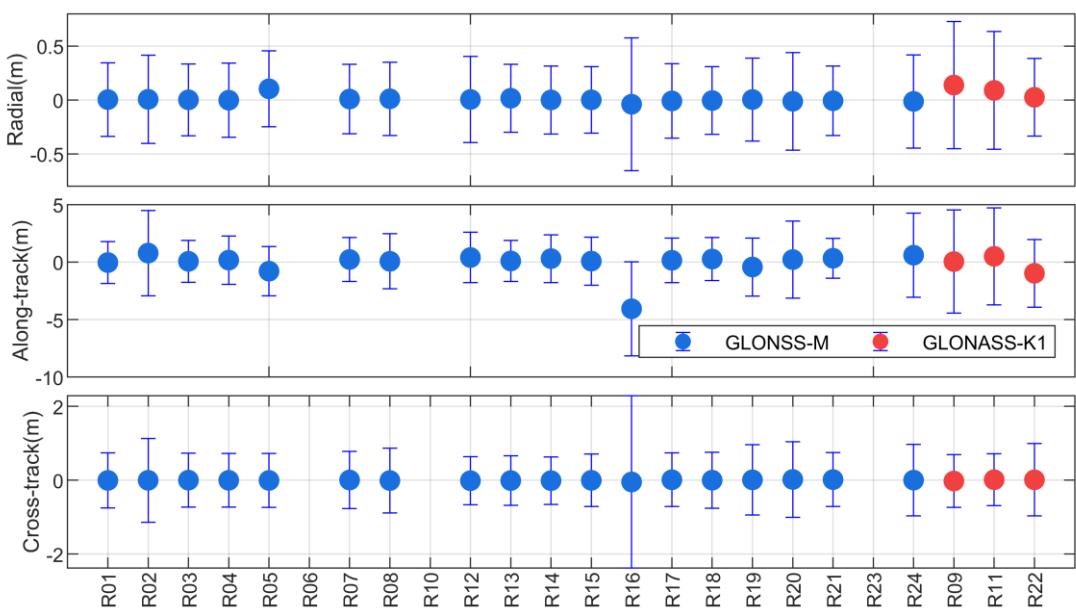
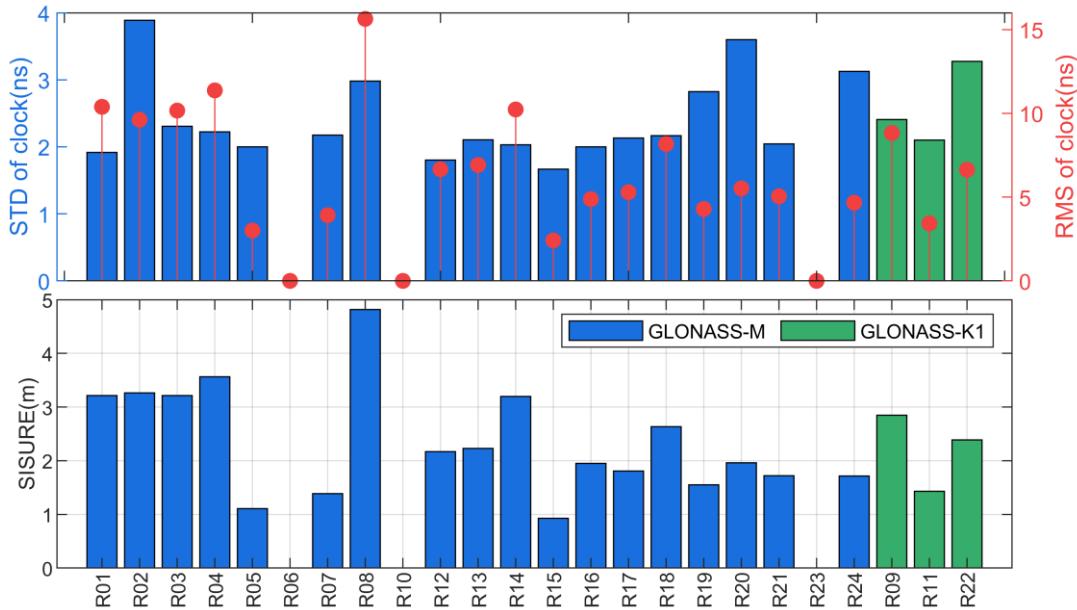


图 3-7 GLONASS 轨道误差的均值和标准差

Figure 3-7 The mean and STD of GLONASS orbit errors**表 3-3 GLONASS 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)****Table 3-3 The errors of GLONASS broadcast ephemeris and SISRE(RMS)**

Type	R/m	T/m	N/m	Clock/ns		SISRE/m
				RMS	STD	
GLONASS-M	0.37	2.50	0.88	7.12	2.39	2.36
GLONASS-K1	0.50	3.94	0.80	6.30	2.59	2.22
Mean	0.39	2.72	0.87	7.00	2.42	2.34

**图 3-8 GLONASS 广播星历钟差误差和空间信号精度****Figure 3-8 The errors of clock and SISRE for GLONASS**

3.2.3 Galileo 广播星历分析

评估期间 Galileo 系统 24 颗在轨可用卫星，包括 IOV 和 FOC 两种类型，其中 IOV 卫星有 E11、E12 和 E19 共三颗。图 3-9 给出了 Galileo 广播星历轨道误差的统计情况，从图中可以看出，Galileo 的广播星历轨道精度显著优于其他卫星导航系统，这一部分得益于 Galileo 地面运控系统更新广播星历的间隔从 10 分钟到 180 分钟不等，较高频度的更新保证了 Galileo 卫星的广播轨道一直保持较好的精度水平。

图 3-10 列出了 Galileo 轨道误差的均值和标准差。我们能发现 Galileo 大部分的卫星的径向均存在不同程度的系统偏差，这有可能是评估时使用了与 Galileo 的地面控制的天线相位参数不符造成的，但具体原因还有待进一步分析。同时 Galileo 的 IOV 卫星的轨道稳定性要弱于 FOC 卫星。总体来说 Galileo 的 IOV 卫星的轨道径向误差优于 0.22 m，轨道法向误差优于 0.39 m，轨道切向误差优于 0.19 m；FOC 卫星轨道精度优于 IOV 卫星，FOC 卫星轨道径向、切向和法向误差分别优于 0.16m、0.27 m 和 0.16 m。

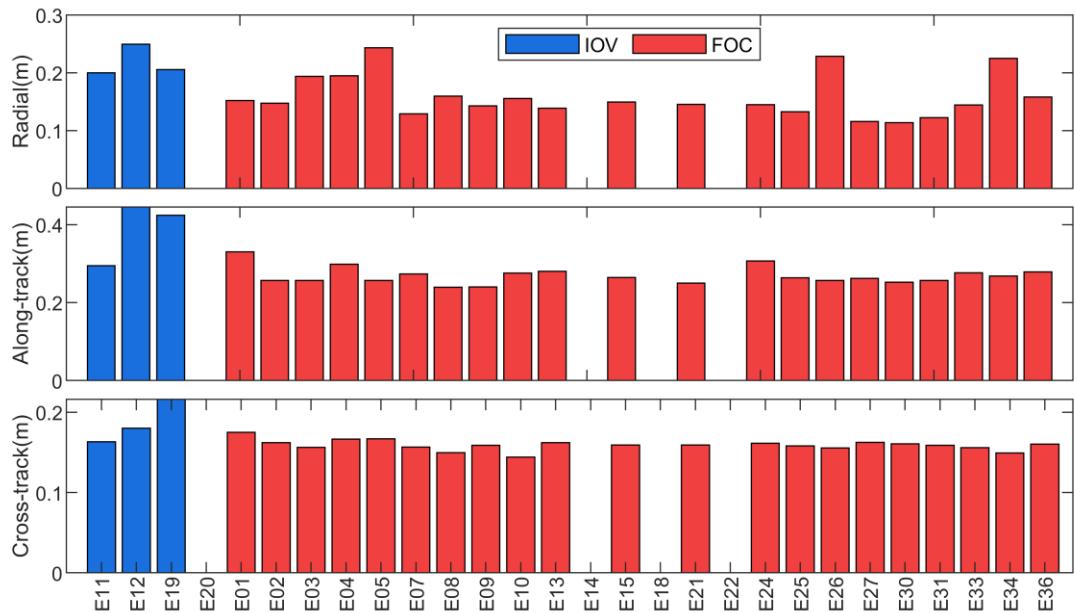


图 3-9 Galileo 广播星历轨道误差

Figure 3-9 The orbit errors of Galileo broadcast ephemeris

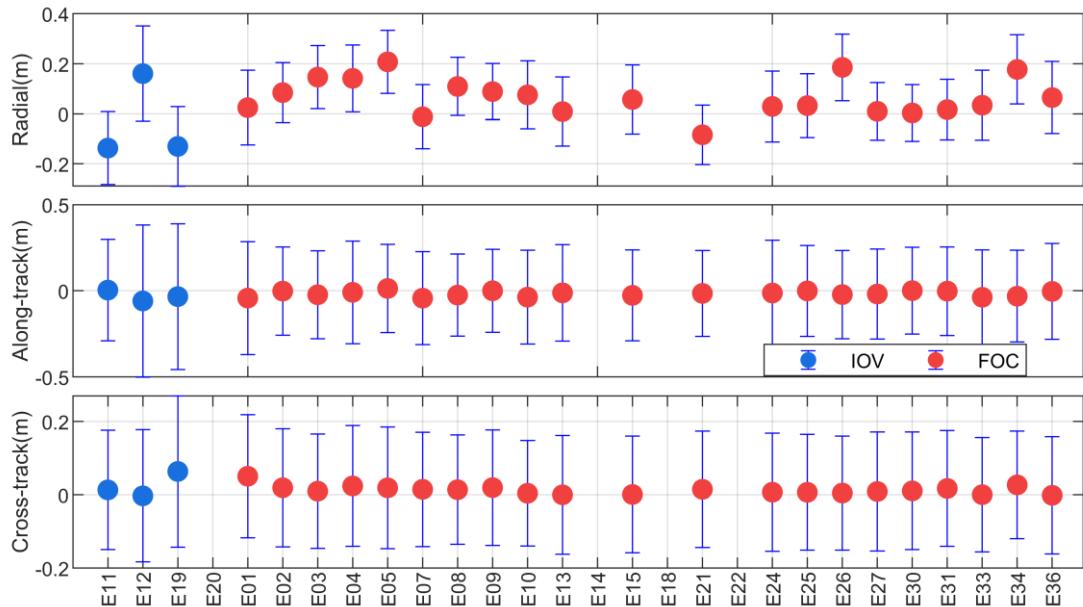


图 3-10 Galileo 轨道误差的均值和标准差

Figure 3-10 The mean and STD of Galileo orbit errors

图 3-11 展示了 Galileo 广播星历钟差误差和空间信号精度情况。从图中可以看出, IOV 卫星的钟差 STD 明显大于 FOC 卫星, 这主要由于这三颗 IOV 卫星搭载的铷原子钟性能不如 FOC 卫星搭载的氢原子钟。Galileo 的 IOV 卫星广播星历钟差误差 RMS 优于 0.69 ns, FOC 卫星的钟差误差 RMS 优于 0.50 ns。表 3-4 列出了 Galileo 广播星历误差和空间信号误差的统计结果, 随着 FOC 卫星的增加和 IOV 卫星的退役, 相比于先前的评估结果, 目前 Galileo 卫星的空间信号精度有略微的提升, SISURE 优于 0.18 m。

表 3-4 Galileo 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)
Table 3-4 The errors of Galileo broadcast ephemeris and SISRE(RMS)

Type	R/m	T/m	N/m	Clock/ns		SISRE/m
				RMS	STD	
IOV	0.22	0.39	0.19	0.69	0.66	0.35
FOC	0.16	0.27	0.16	0.50	0.44	0.16
Mean	0.17	0.28	0.16	0.53	0.46	0.18

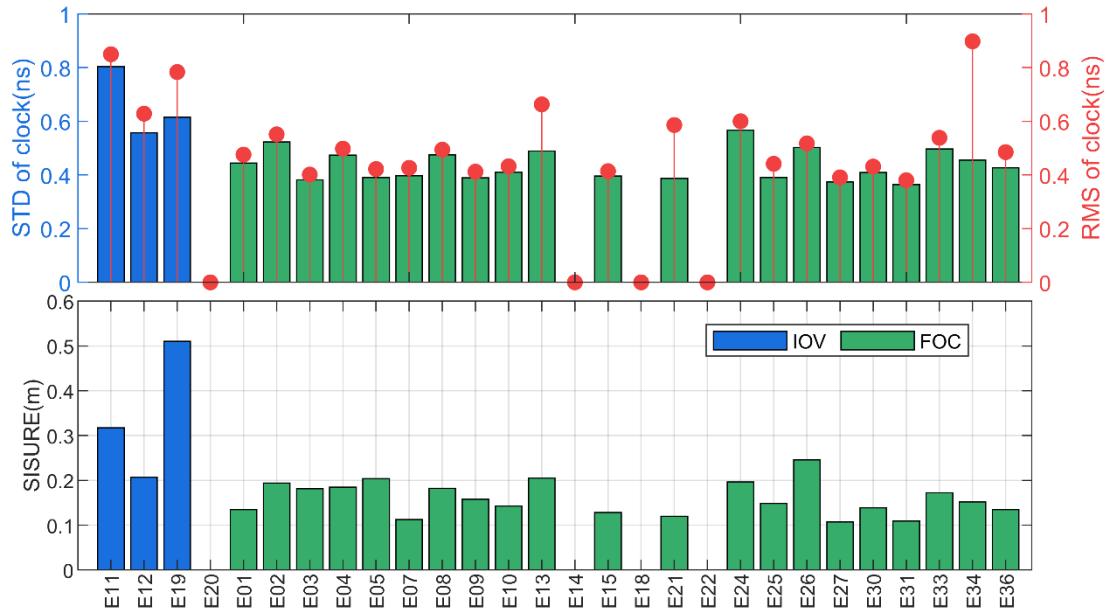


图 3-11 Galileo 广播星历钟差误差和空间信号精度

Figure 3-11 The errors of clock and SISRE for Galileo

3.2.4 BDS 广播星历分析

BDS 广播星历由地面运控信息处理系统生成，其轨道参数是基于区域测站精密定轨生成精密轨道后参数拟合生成，而广播钟差参数是基于双向时间比对技术生成实时钟差点后再通过参数拟合生成。北斗二号系统在 2017 年经过两次重大的更新，分别于 2017 年 1 月 17 日对广播星历基准做了调整，使广播轨道的参考中心吻合于相位中心，同时利用多星定轨与双向时间同步技术的两种钟差的差异，修正多星定轨的轨道径向分量，虽然修正导致轨道径向的均值出现系统性偏差，但提高了轨道和钟差参数的自洽性，进而提高北斗系统的空间信号精度(Chen, 2022)；其次于 2017 年 7 月 22 日更新了广播星历的 TGD 参数算法，更新后的 TGD 参数与 IGS 发布的 DCB 产品更为接近，不同卫星间的 TGD 参数一致性得到显著提高，间接提高了单双频用户的钟差精度。随着北斗三号正式提供服务，北斗二号系统在未来几年即将退出历史舞台，且已有部分关于北斗二号空间信号精度评估的成果(Wu, 2017; 张益泽, 2016; 刘万科, 2016)，因此下面只对北斗三号广播星历展开评估。

图 3-12 给出了 BDS 广播星历轨道误差统计结果，相比于其他系统，在星间

链路的支持下的北斗 MEO 轨道径向精度最高, 约为 0.08 m; IGSO 卫星的轨道稍差, 径向误差约为 0.19 m。北斗 MEO 的切向和法向误差相当, 分别优于 0.40 m 和 0.37 m。图 3-13 展示了北斗轨道误差的均值和表现差情况, 北斗 MEO 中的 C45 和 C46 存在一个近 10 cm 的系统性偏差, 且 MEO 的径向误差的 STD 表现很稳定, STD 变化优于 7.0 cm。对于 IGSO 卫星中 C39 径向存在大约 6.5 cm 的系统性偏差。而对于切向和法向均没有明显的系统性偏差, 且每颗卫星的轨道稳定性保持一致。

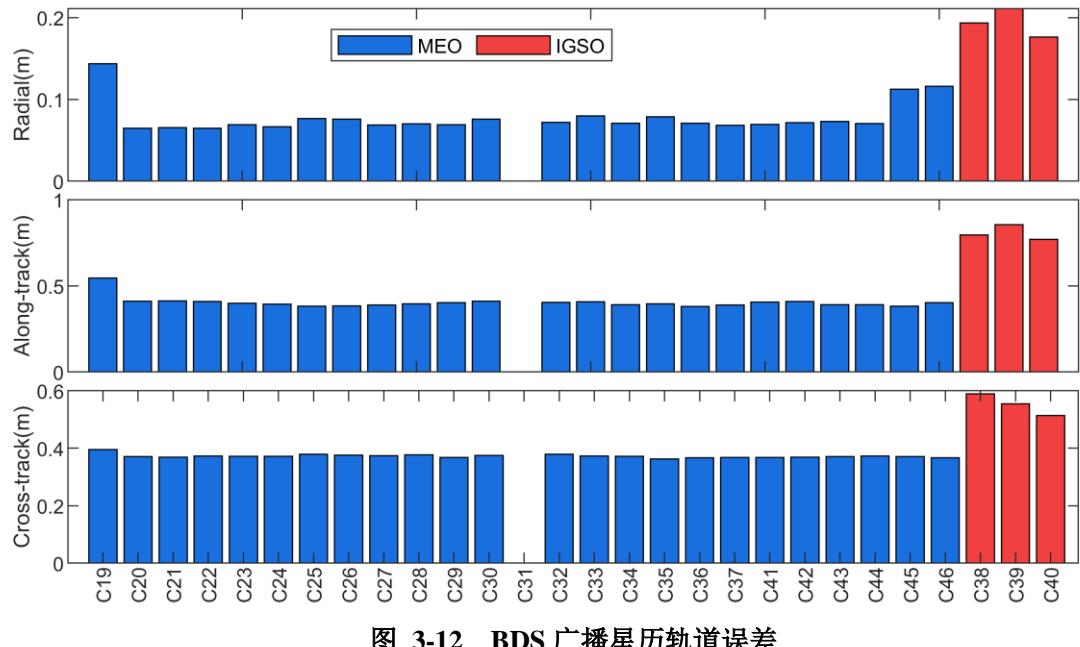


图 3-12 BDS 广播星历轨道误差

Figure 3-12 The orbit errors of BDS broadcast ephemeris

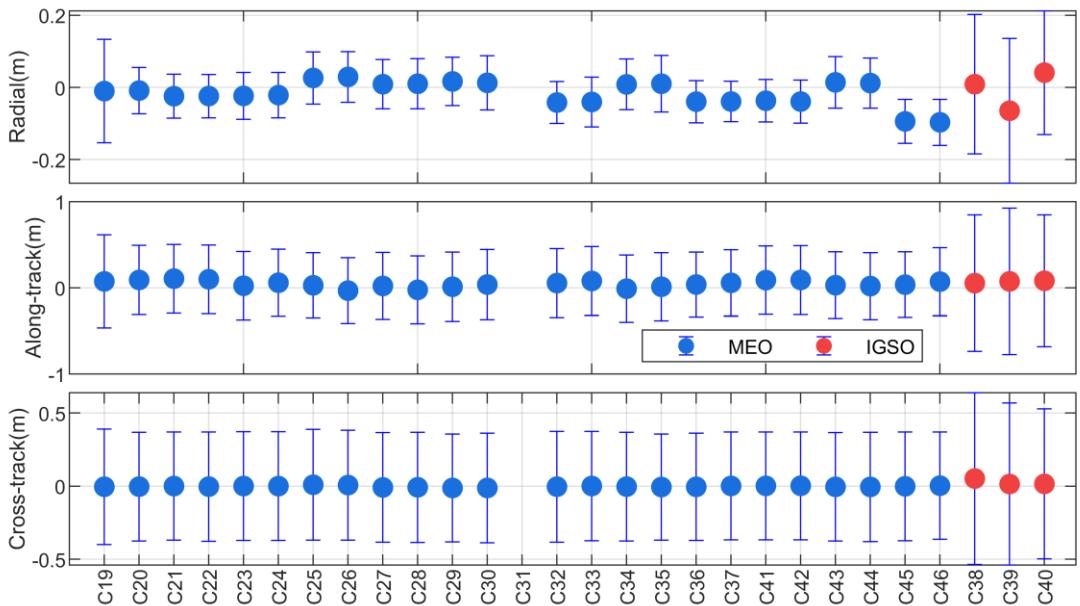


图 3-13 BDS 卫星轨道误差的均值和标准差

Figure 3-13 The mean and STD of BDS orbit errors

图 3-14 为 BDS 的广播星历钟差误差和空间信号精度的统计结果, 北斗 MEO

卫星的稳定度相当, 大约 0.75ns 左右, 这可能由于在星间链路支持下北斗三号星地星间联合时间同步解算保证了星座网络的时间基准和稳定, 使得解算的钟差参数更为准确。北斗 IGSO 的卫星钟差略差于 MEO 卫星, 钟差 STD 约为 1.12 ns。表 3-5 列出了 BDS 广播星历误差和空间信号的精度统计结果, 目前北斗 IGSO 的空间信号精度优于 0.81 m, MEO 卫星的空间信号精度优于 0.53 m。

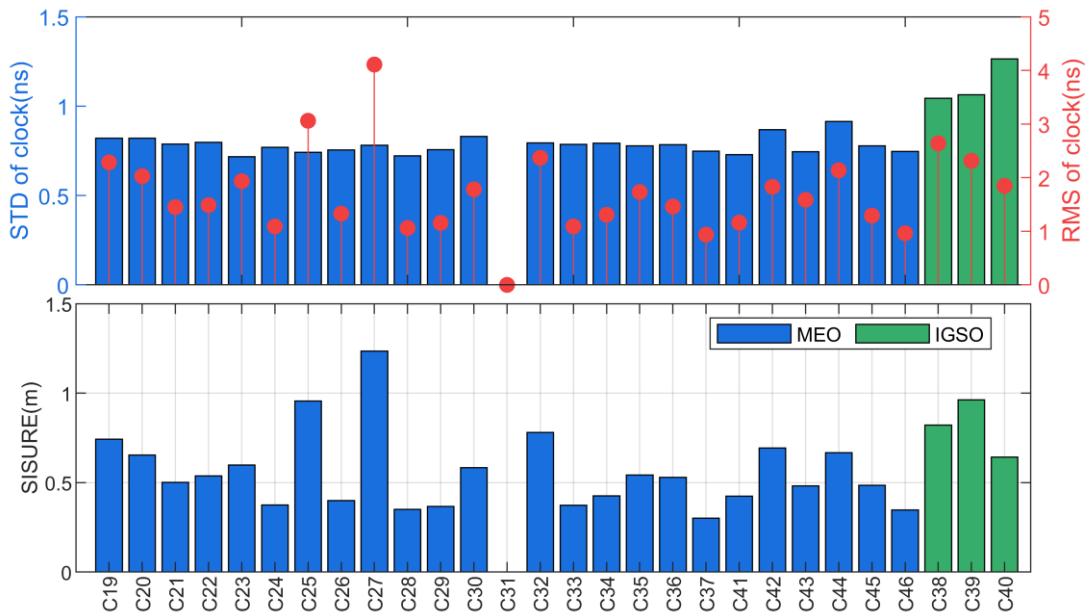


图 3-14 BDS 广播星历钟差误差和空间信号精度

Figure 3-14 The errors of clock and SISRE for BDS

表 3-5 BDS 广播星历误差和空间信号精度统计(RMS)

Table 3-5 The errors of BDS broadcast ephemeris and SISRE(RMS)

Type	R/m	T/m	N/m	Clock/ns		SISRE/m
				RMS	STD	
BDS(IGSO)	0.19	0.68	0.55	2.27	1.12	0.81
BDS(MEO)	0.08	0.40	0.37	1.63	0.75	0.53
Mean	0.09	0.45	0.39	1.69	0.79	0.56

3.3 GNSS 广播星历 PPP 算法

3.3.1 广播星历 PPP 算法

由上一节对 GNSS 广播星历的现状的评估结果可知, 当前 GNSS 系统, 特别对于 GPS、Galileo 和 BDS 随着不断的升级和改造, 其空间信号精度逐渐提升, 且已经达到一个较高的水平。最早在 2008 年由 Montenbruck 等人利用 GPS 广播星历实现了对低轨卫星实时定轨算法, 能够满足实时分米级的定轨精度; 此后 Carlin 等人利用 GPS 和 Galileo 卫星广播星历进行了地面站的精密单点定位试验, GPS 动态精密单点定位能够实现大约 63cm 的三维位置精度, 而 Galileo 由于其较快的更新频度和高精度的星载原子钟, 能够实现 29cm 的三维定位精度, 双系

统组合对定位精度有进一步的提升，大约为 25cm 的三维误差。同样的，随着北斗三号全球卫星导航系统的建成与发展，Chen 等人实现了 GPS、Galileo 和 BDS 三系统的广播星历精密定位验证。虽然 Chen 等人利用对北斗轨道和钟差进行一系列的精细处理，包括广播轨道与精密产品的旋转平移误差、考虑单接收机的视向误差等实现了 GPS、Galileo 和 BDS 三系统静态定位 8.6cm，动态定位 23.4cm 的位置误差。但考虑到这些细节特性状态与星座系统控制直接相关，当导航系统基础坐标更新或星座内的原子钟发生切钟或者调频调相操作，其星座整体的偏差特性可能发生改变，无法保证其工程应用的稳定性。

本节将研究广播星历应用于精密度单点的算法，并给出不同卫星导航系统精密度单点定位的性能。首先对于接收机 r 观测的卫星 s 的基础观测方程：

$$\begin{aligned} PC_r^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + M_r^s \cdot T_r + S^s + \varepsilon_p \\ LC_r^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + M_r^s \cdot T_r + \lambda N_r^s + S^s + \varepsilon_\phi \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中公式中的 S^s 代表了卫星对接收机的空间信号测距误差，该误差吸收了卫星轨道、钟差和与对流层有关的投影误差。

已有一些文章讨论了该参数的随机游走量级，但实际上在应用广播星历实时精密度定位的过程中，星历切换的误差对定位测距变化是不可忽略的。因此研究星历切换误差的量级，图 3-15 给出了 BDS-3 在 2022 年相邻两组星历切换时，轨道和钟差衔接的等效距离误差和误差量级的分布情况。从图中可知，大部分北斗卫星的 dURE 的均方根误差在 0.2 m~0.3m 的水平，dURE 的 95% 分位数的数值大约为 0.47m。因此在给 S^s 参数随机游走的同时，在星历切换前后需要额外的放大参数的协方差来加速 S^s 参数的收敛。

3.3.1 广播星历 PPP 性能评估

本小节选取了 12 个 IGS 测站用于 PPP 验证，为更好的验证广播星历 PPP 的定位的性能，我们只对广播星历的动态定位展开分析，分别按照 GPS、Galileo、BDS-3 和 GPS/Galileo/BDS-3 三系统组合共四种策略做基于广播星历的动态 PPP。

图 3-16 给出了 ABPO 站 4 种在 2020 年 1 月 20 日的广播星历精密度定位的误差时间序列。从图中可以看出，就单系统的广播星历 PPP 而言，定位精度与广播星历的空间信号精度水平保持一致，其中 Galileo 定位精度最高，在 N、E、U 三个方向上的均方根误差分别为 0.08m、0.12m 和 0.25m。受广播星历切换的衔接误差影响，北斗广播星历的误差时间序列波动较大。但 GEC 三系统组合后定位精度和定位误差的稳定性显著提高，三系统组合的定位精度在 N、E 和 U 三个方向的均方根误差分别为 0.06m、0.08m 和 0.18m。

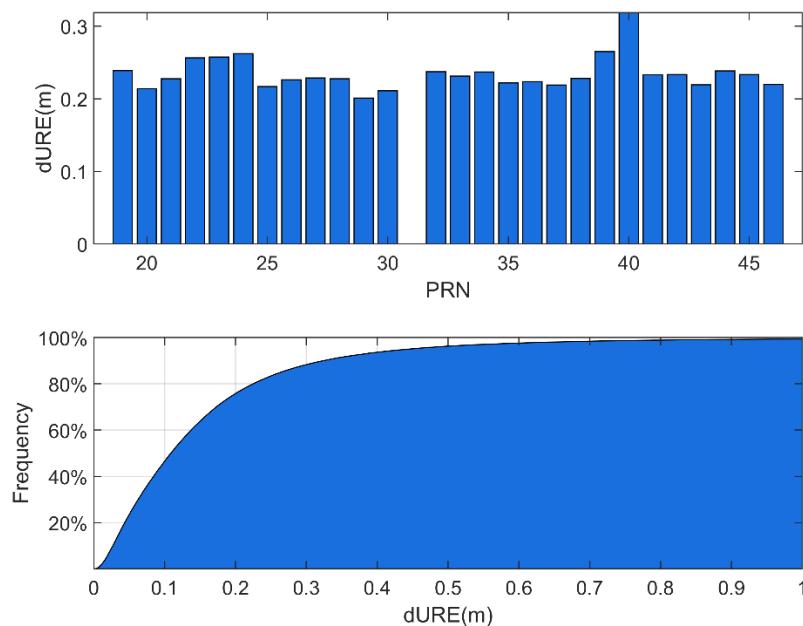


图 3-15 北斗三号广播星历衔接点等效距离误差

Figure 3-15 Equivalent range error of connection point for Beidou-3 broadcast ephemeris

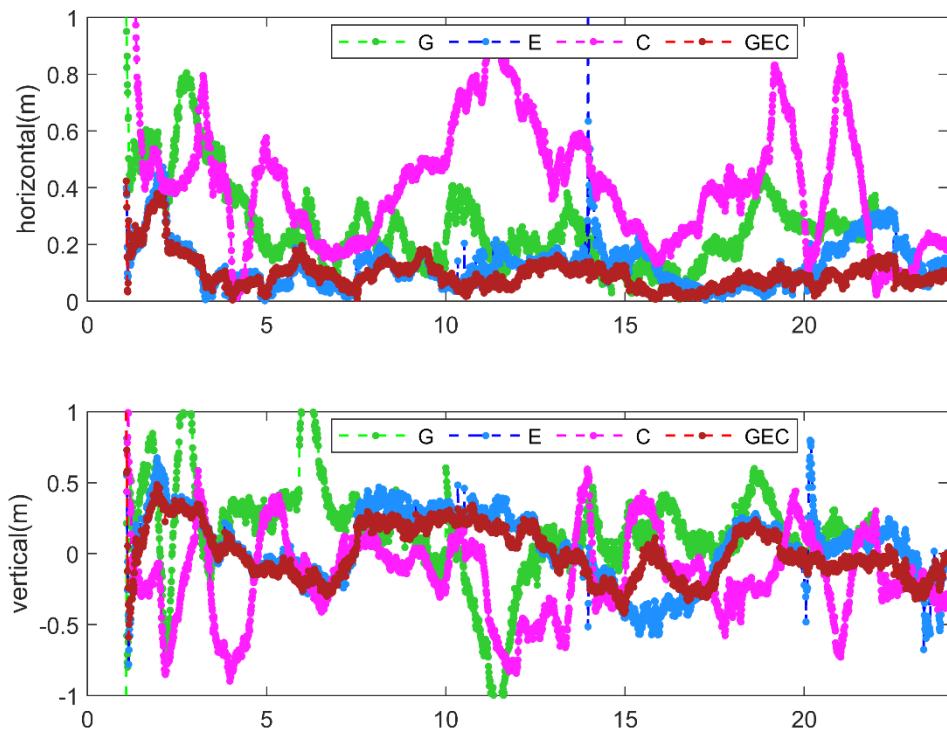


图 3-16 ABPO 站广播星历 PPP 定位误差序列

Figure 3-16 Positioning errors of ABPO broadcast ephemeris PPP

图 3-17 展示了 12 个 IGS 站动态定位三维位置误差, 总体上来说 GPS 和 BDS 单系统的定位精度相当, 三系统组合的精度最高。多站的统计结果如表 3-6 所示,

从统计结果来看, BDS-3 单系统的动态 PPP 精度略高于 GPS, Galileo 单系统的三维位置误差大约为 0.31m, 而三系统组合的定位精度大约为 0.23m, 提升了大约为 25.8%。

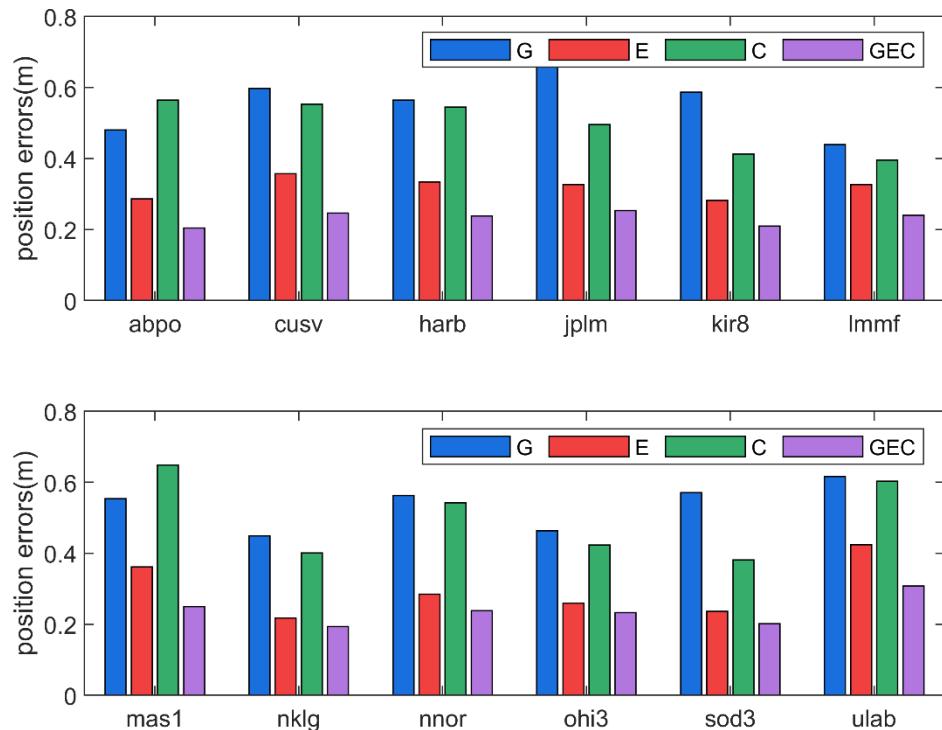


图 3-17 不同系统多站动态 PPP 定位误差
Figure 3-17 Position error of kinematic PPP for different systems and stations

表 3-6 基于广播星历 PPP 的定位误差统计

Table 3-6 Position errors based on broadcast ephemeris PPP

系统组合	N	E	U	三维
G	0.22	0.26	0.42	0.55
E	0.10	0.14	0.26	0.31
C	0.18	0.27	0.37	0.50
GEC	0.07	0.11	0.19	0.23

3.4 GNSS 实时产品精度分析

本节利用由 BKG 开发的 BNC 软件拓展开发的共享内存数据软件连续接收了从 2021 年 330 天到 359 共 30 天的多家分析中心实时 SSR 产品(Stürze, 2016), GNSS 数据的实时挂载点包括 BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), CAS (The Institute of Geodesy and Geophysics (IGG) of the Chinese Academy of Sciences), CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), ESA(European Space Agency) 、 GFZ(Deutsches

GeoForschungsZentrum), GMV(GMV Aerospace and Defense), NRC(Natural Resources Canada), WHU(Wuhan University), IGS01, IGS02 和 IGS03 共 12 个挂载节点, 详细信息见表 3-7。其中 IGS 的三个挂载点的区别在于使用的导航系统和组合算法的区别, IGS01 利用由欧空局研发的 RETICLE 软件通过单历元数据综合多家分析中心产品(Hadas, 2015; Elsobei, 2016), 仅提供 GPS 单系统的轨道和钟差; IGS02 和 IGS03 利用 BKG 研发的 BNC 软件基于卡尔曼滤波算法综合多家分析中心的实时钟差(Hauschild, 2009; Elsobei, 2016), IGS02 提供 GPS、GLONASS 和 Galileo 三系统的轨道和钟差产品, 而 IGS02 和 IGS03 的区别在于是否综合了北斗卫星的产品。

表 3-7 12 个实时流挂载点基本信息

Table 3-7 The information of 12 real-time mount points

序号	挂载点	系统	软件	更新周期(轨道/钟差)	平均播发时延/s	播发时延 STD/s
1	SSRA00BKG	GRE	RETICLE	60s/5s	16.06	1.65
2	SSRA00CAS	GREC	GPSNet	5s/5s	6.18	1.17
3	SSRA00CNE	GRECJ	PPP-Wizard	5s/5s	18.89	1.07
4	SSRA00DLR	GRECJ	RETICLE	30s/5s	14.03	0.95
5	SSRA00ESA	G	RETINA	5s/5s	12.31	0.81
6	SSRA00GFZ	GREC	EPOS-RT	5s/5s	13.40	1.57
7	SSRA00GMV	GRE	magicGNSS	10s/10s	13.90	3.14
8	SSRA00NRC	G	HPGPSC	5s/5s	9.19	1.40
9	SSRA00WHU	GREC	PANDA	5s/5s	16.25	1.05
10	SSRA01IGS	G	RETINA	5s/5s	30.70	3.38
11	SSRA02IGS	GRE	BNC	60s/10s	37.50	1.09
12	SSRA03IGS	GREC	BNC	60s/10s	37.81	1.00

3.4.1 GNSS 实时产品恢复算法

(1) 龄期匹配

实时 SSR 改正数通过使用 IOD 龄期参数和广播星历进行匹配使用。GPS 和 Galileo 卫星的广播星历龄期大约需要一周的时间循环一次, 可以和实时产品播发的 IOD 参数直接匹配。然而对于 GLONASS 和 BDS 的 IODE 定义有所不同, 需要使用广播星历的参考时刻计算。GLONASS 的 IODE 计算方法如下 (Kazmierski, 2020):

$$IOD_{GLONASS} = \frac{MOD(SoD_{brdc} + 3 \times 3600,86400)}{900} \quad (3-7)$$

其中 SoD_{brdc} 代表 GLONASS 广播星历的在 UTC 时间系统的参考时刻, 此时 $IOD_{GLONASS}$ 的变化范围在 1~95 之间, 大约每天循环一遍。

BDS 广播星历的数据龄期表示参考时刻与生成星历的原始观测数据最新时刻的时间差, 因此 BDS 卫星对应的 IOD 参数计算方法如下:

$$IOD_{BDS} = MOD\left(\frac{MOD(TOE_{brdc}, 604800)}{720}, 240\right) \quad (3-8)$$

其中 TOE_{brdc} 表示 BDS 广播星历的星历参考时刻, 此时 IOD_{BDS} 的变化范围在 0~235 之间。然而在实时数据流接收和解码的过程中, 在 BDS 的广播星历参考时刻跨越北斗周的时候, 可能出现北斗周参数不跳, 且周内秒参数超过 604800 的情形发生。大多数分析中心会根据实际情况将周内秒重新处理成新的周内秒, 但仍有部分分析中心按照实际接收情况处理, 因此在接收到 SSR 产品以后, 需要对 SSR 产品中 BDS 卫星的 IOD 参数重处理, 算法如下所示:

$$IOD_{SSR} = \begin{cases} IOD_{SSR} - 120 & 0 < TOE_{SSR} \leq 86400 \text{ and } IOD_{SSR} \geq 120 \\ IOD_{SSR} - 120 & 86400 < TOE_{SSR} < 87000 \text{ and } IOD_{SSR} \neq 120 \\ IOD_{SSR} & \text{其他情况} \end{cases} \quad (3-9)$$

(2) 实时轨道和钟差恢复

实时 SSR 产品基于广播星历的卫星位置和钟差进行改正, 其改正参数的形式可以列为:

$$SSR(t_0, IOD) = (\delta r, \delta a, \delta c, \delta \dot{r}, \delta \dot{a}, \delta \dot{c}, A_0, A_1, A_2) \quad (3-10)$$

其中 t_0 是 SSR 改正数的参考时刻, $(\delta r, \delta a, \delta c)$ 分别表示卫星轨道的径向、切向和法向的改正数; $(\delta \dot{r}, \delta \dot{a}, \delta \dot{c})$ 表示卫星径向、切向和法向改正数变化的速度项; (A_0, A_1, A_2) 分别代表卫星钟差改正数的二次多项式系数。广播星历的卫星位置是基于地球地固坐标系, 而 SSR 改正数是基于卫星轨道坐标系, 因此 SSR 的轨道改正数在使用时需要转换到地球地固坐标系下, 轨道改正数可按照公式 3-11 计算。

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta orb = \begin{bmatrix} e_{radial} \\ e_{along} \\ e_{cross} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta r \\ \delta a \\ \delta c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{radial} \\ e_{along} \\ e_{cross} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta \dot{r} \\ \delta \dot{a} \\ \delta \dot{c} \end{bmatrix} \times (t - t_0) \\ \begin{bmatrix} e_{radial} \\ e_{along} \\ e_{cross} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|} \times \frac{r \times \dot{r}}{|\dot{r} \times \dot{r}|} \\ \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|} \\ \frac{r \times \dot{r}}{|\dot{r} \times \dot{r}|} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3-11)$$

这里的 r, \dot{r} 分别表示在历元 t 时刻广播星历计算的卫星位置和速度; $(e_{radial}, e_{along}, e_{cross})$ 分别是卫星径向、切向和法向三个方向的单位向量; 由此改正后的广播星历卫星位置可以表示为:

$$X = X_{brdc} + \delta orb \quad (3-12)$$

其中 X 代表改正后的卫星位置, X_{brdc} 表示广播星历的卫星位置。类似的算法, 钟差改正数的使用算法见公式 3-13。

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta clk = A_0 + A_1(t - t_0) + A_2(t - t_0)^2 \\ Clk = Clk_{brdc} + \frac{\delta clk}{c} \end{array} \right. \quad (3-13)$$

其中 δclk 是历元 t 时刻的卫星钟差改正值; Clk 是改正后的卫星钟差, Clk_{brdc} 表示历元 t 时刻广播星历计算的卫星钟差, c 表示光速。需要注意的是, SSR 钟差改正数都是基于广播星历直接获得的钟差为基准点的, 因此对于 GLONASS 卫

星不需要额外扣除广播钟差包含的相对论改正，对于北斗卫星，其改正数数值较大是因为其包含了 B3I 和 B1I-B3I 无电离层组合频点的 DCB 差异。

3.4.2 GNSS 实时产品可用性分析

实时精�单点定位极其依赖于高精度轨道和钟差产品。除了实时产品本身的误差之外，实时产品的播发延迟可能会引入额外的预报误差，进而影响实时定位的连续性和稳定性。因此，本节首先对实时产品的延迟和数据完整率展开评估。

应当注意，表 3-6 中统计的延迟信息可能受到接收网络环境的影响，但统计结果的相对值仍然可以作为参考。IGS 综合的三个产品要等待多家分析中心的实时改正数输出后再做综合，因此延迟最大，IGS01、IGS02 和 IGS03 的平均产品延迟分别为 30.70 秒、37.50 秒和 37.85 秒。CAS 的实时产品延迟最短，平均值为 6.18s。除 IGS 综合产品外，最大的延迟产品来自 GMV，平均值为 18.89 s。此外，ESA 的 SSR 产品在数据收集期间的 STD 最小，为 0.81 s，最大的 STD 来自 IGS01，STD 为 3.38 s。其他 SSR 产品如 BKG、GFZ 和 GMV 也具有较大的 STD 值。尽管 STD 值之间的差异很小，但它间接显示了延迟时间异常或中断的数据量，这将限制实时精密定位的收敛效果。

考虑到部分分析中心的轨道和钟差更新间隔不同，图 3-18 给出了不同实时产品的轨道和钟差数据完整率。数据统计排除了广播星历健康状态参数为“异常”的卫星，如 G11、G28、R11、E14 和 E18。所有的实时产品数据完整率均表现为 GPS 卫星可用性最好，其次是 GLONASS，最差的是 BDS 卫星。这与 MGEX 观测网对 GNSS 卫星的支持数量成正比。在测试期间，所有实时产品的 GPS 数据完整率均超过 98.5%，其中 ESA 的实时产品完整率最高，约为 99.75%；GLONASS 实时产品的数据完整率高于 95.79%；但对于 Galileo 和 BDS 卫星，不同实时产品数据完整率呈现较大的差异，IGS02 和 IGS03 数据完整率普遍较低，其中 Galileo 实时数据完整率最低的为 IGS02，大约为 94.2%，BDS 的 IGS03 数据完整率最低约为 85.9%，主要由于轨道和钟差综合的过程中产品的不连续性和异常剔除导致部分历元没有综合解。一般来说，在轨道和钟差的数据完整性是一致的，但图 3-15 中 CAS 的实时产品 Galileo 和 BDS 卫星钟差数据完整率明显低于轨道产品完整率，这表明测试期间 CAS 的这两种卫星实时钟差产品可能存在更多的数据中断或者丢失。

此外，图 3-19 为实时产品每个历元的 GNSS 卫星可用数量。不同 SSR 产品之间的 GPS 和 GLONASS 卫星的可用数量差异不大，测试期间所有实时产品的 GPS 卫星可用数量为 29 颗；GLONASS 卫星的可用数量为 19 或 20；大多数实时产品的 Galileo 可用卫星数量为 22，而 GFZ 的实时产品仅提供了 18 颗 Galileo 改正数；CAS、GFZ 和 WHU 的实时产品 BDS 卫星可用数量包含 42 颗 BDS-2 和 BDS-3 卫星。需要注意的是，因 BDS 卫星实时产品的连续性和稳定性较低，

CNES 和 IGS03 产品 BDS 卫星可用数量分别为 25 和 17 颗, 而 DLR 的实时产品 BDS 卫星的数量为 27 颗是由于 DLR 仅提供 BDS 系统 MEO 卫星的改正数。

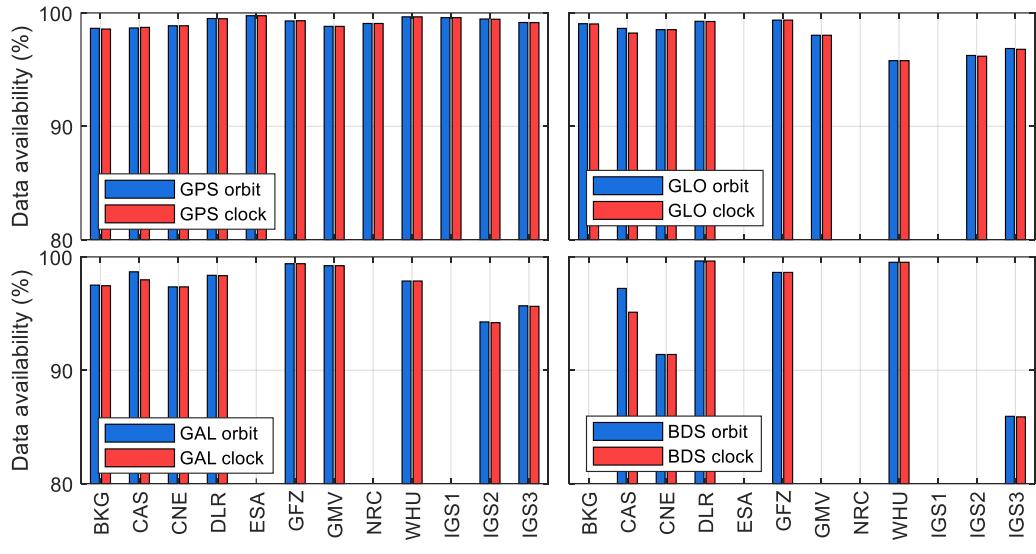


图 3-18 不同实时产品数据完整率

Figure 3-18 Data availability rate of different real-time products

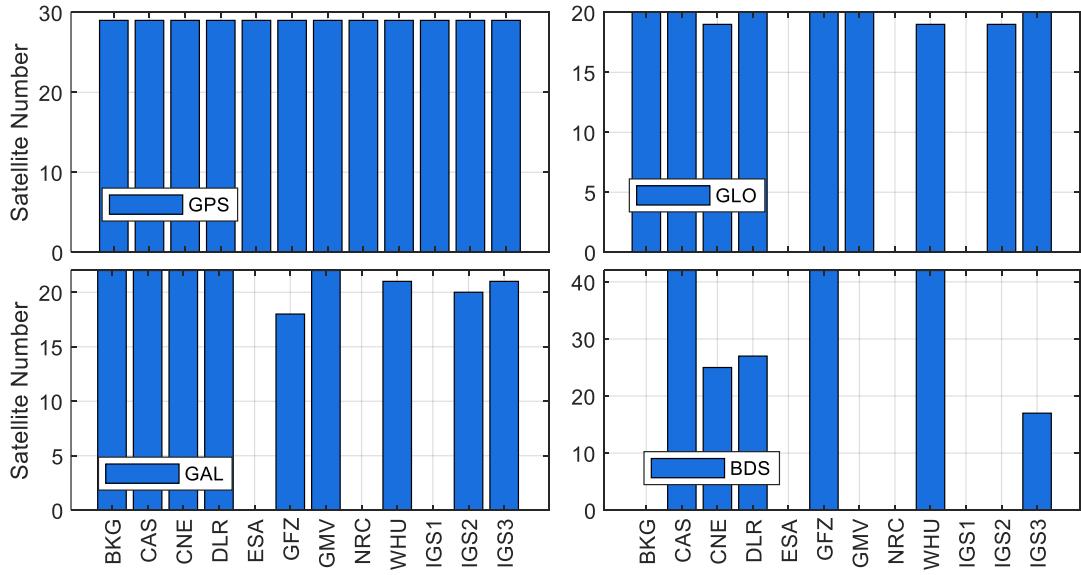


图 3-19 不同实时产品的 GNSS 卫星可用数量

Figure 3-19 Number of available GNSS satellites for different real-time products

3.4.3 GNSS 实时产品轨道和误差分析

与 GNSS 广播星历评估类似, 以武汉大学 IGS 分析中心的事后精密产品作为参考, 计算不同实时产品的轨道和钟差误差。值得注意的是, 根据 IGS-SSR 协议, IGS 分析中心理论上已将实时的相位中心轨道产品从无电离层组合基准转换到主频相位中心基准(IGS RTWG, 2020), 然而试验期间 NRC 的实时产品仍旧使用的是基于无电离层相位基准的产品, 该偏差会影响双频天线长度不同的卫星评估结果, 特别是 GPS Block IIIA、Galileo 以及 BDS-3 卫星; 此外 CAS 的实时产

品于 2021 年 DOY 346 发生了服务中断，并且于 DOY348 恢复服务后改为基于无电离层组合为基准的轨道产品，因此 NRC 和 CAS 的实时产品在轨道误差评估时需要额外考虑不同的天线相位中心转换。

3.4.3.1 GPS 实时产品

图 3-20 为不同 GPS 实时产品的轨道和钟差精度，所有实时产品的 GPS 卫星径向分量均优于 2.2 cm，轨道切向误差优于 7.7 cm，轨道法向误差优于 4.0cm。各分析中心的统计结果如表 3-8 所示。IGS01 实时产品的轨道精度最好，径向、切向和法向分量分别为 1.4 cm、2.8 cm 和 1.9 cm。实时钟差误差的 STD 和 RMS 也在图 3-20 中给出，GPS 卫星的实时钟差误差的 STD 优于 0.2ns。WHU 的 GPS 实时钟差表现最好，平均 STD 约为 0.06 ns，这个精度统计结果可能与参考产品的一致性有关。CNES、ESA、GMV 和 IGS01 的 GPS 实时钟差也达到了类似的精度，优于 0.1 ns。比较不同的 IGS 实时综合钟差，Kalman 滤波综合的钟差产品稳定性要差于单历元综合的算法。

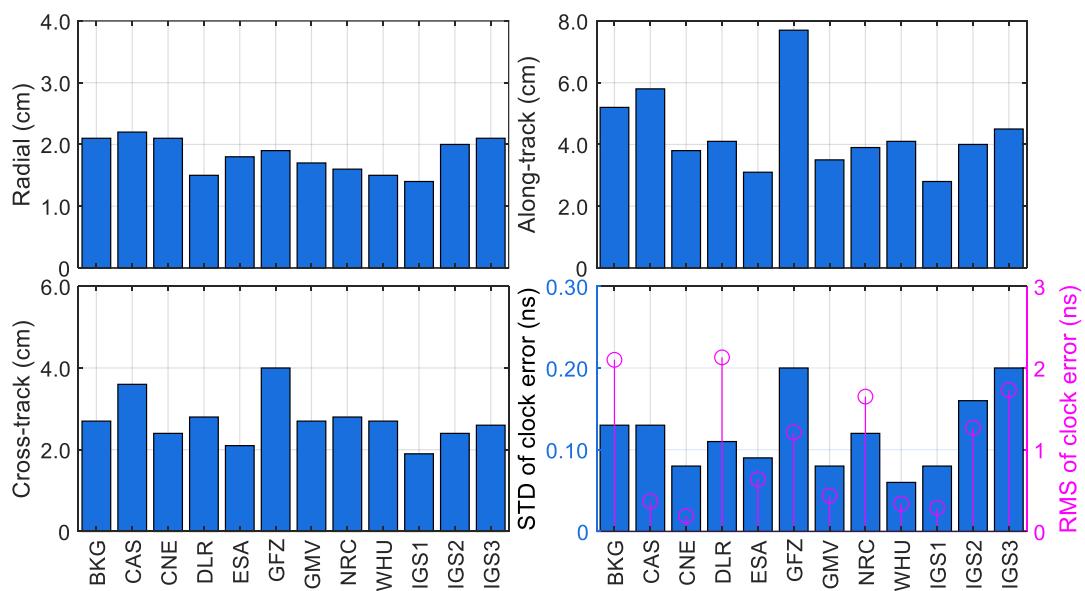


图 3-20 GPS 实时产品轨道和钟差误差

Figure 3-20 The errors of GPS real-time product orbit and clock

3.4.3.2 GLONASS 实时产品

测试期间，共有 9 个实时流挂载点提供了 GLONASS 实时产品。图 3-21 给出了不同 GLONASS 实时产品的轨道和钟差精度。不同产品的 GLONASS 轨道径向误差 RMS 为 3.1 cm 至 5.2 cm，其中 CNES 的 GLONASS 轨道精度最优。各分析中心的统计结果如表 3-9 所示。不同实时产品的 GLONASS 轨道切向和法向上的精度相当，GLONASS 轨道切向误差约 10.0 cm，法向误差约为 6.0 cm。对于 GLONASS 的实时钟差产品，除了 GMV 的实时钟差 STD 较差外，不同实时

产品的 GLONASS 钟差 STD 在 0.20 ns 到 0.58 ns 之间。CNES 产品的 GLONASS 钟差稳定性最好，平均 STD 为 0.2 ns。IGS02 和 IGS03 的综合实时钟差误差的 STD 约为 0.58 ns，而 GMV 的实时钟差稳定性最差，平均 STD 为 1.77 ns。

表 3-8 各分析中心 GPS 实时轨道和钟差精度统计

Table 3-8 Real time GPS orbit and clock accuracy from various analysis centers

序号	AC	Radial/cm	Along/cm	Cross/cm	CLK(RMS)/ns	CLK(STD)/ns
1	BKG	2.1	5.2	2.7	2.10	0.13
2	CAS	2.2	5.8	3.6	0.37	0.13
3	CNES	2.1	3.8	2.4	0.19	0.08
4	DLR	1.5	4.1	2.8	2.13	0.11
5	ESA	1.8	3.1	2.1	0.64	0.09
6	GFZ	1.9	7.7	4.0	1.21	0.20
7	GMV	1.7	3.5	2.7	0.44	0.08
8	NRC	1.6	3.9	2.8	1.65	0.12
9	WHU	1.5	4.1	2.7	0.34	0.06
10	IGS01	1.4	2.8	1.9	0.29	0.08
11	IGS02	2.0	4.0	2.4	1.27	0.16
12	IGS03	2.1	4.5	2.6	1.73	0.20

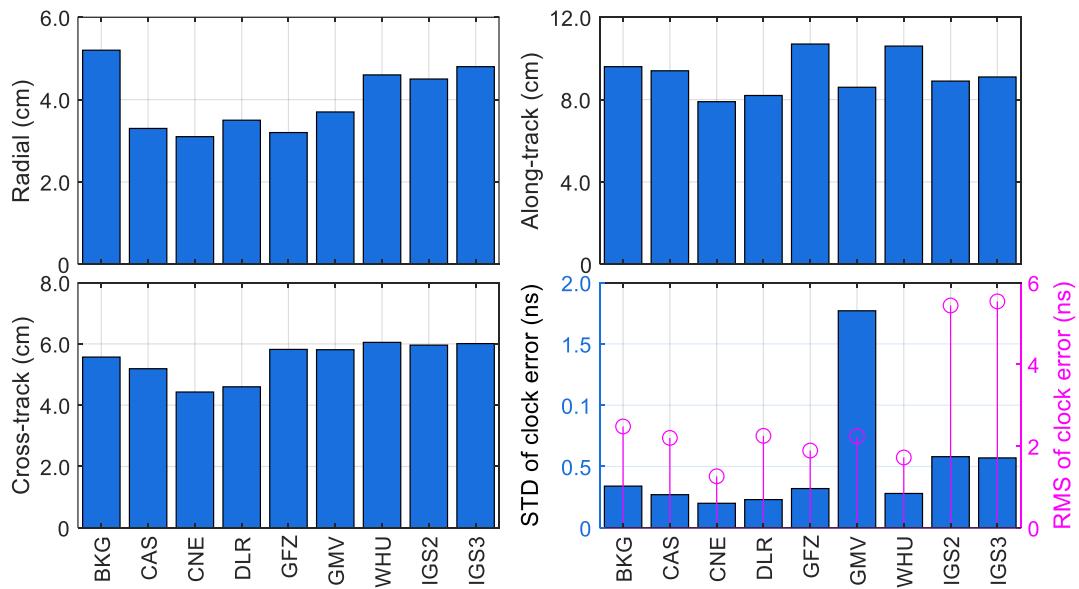


图 3-21 GLONASS 实时产品轨道和钟差误差

Figure 3-21 The errors of GLONASS real-time product orbit and clock

3.4.3.3 Galileo 实时产品

9 个产品提供了 Galileo 卫星实时轨道和钟差产品，图 3-22 给出了不同实时产品 Galileo 卫星轨道和钟差的误差。可以看出，Galileo 实时产品的轨道精度略低于 GPS 卫星，但优于 GLONASS。各分析中心的统计结果如表 3-10 所示。WHU 实时产品的 Galileo 轨道和钟差精度最高，轨道径向、切向和法向的误差分

别优于 2.1 cm、6.6 cm 和 3.7 cm。得益于 Galileo 卫星几乎所有卫星都搭载了氢原子钟的优势, 不同实时产品的 Galileo 卫星实时钟差精度显著优于 GPS 卫星。除 GFZ 的实时产品外, Galileo 实时钟差 STD 在 0.10 ns 至 0.15 ns 之间, RMS 优于 0.2 ns。

表 3-9 各分析中心 GLONASS 实时轨道和钟差精度统计

Table 3-9 Real time GLONASS orbit and clock accuracy from various analysis centers

序号	AC	Radial/cm	Along/cm	Cross/cm	CLK(RMS)/ns	CLK(STD)/ns
1	BKG	5.2	9.6	5.6	2.48	0.34
2	CAS	3.3	9.4	5.2	2.20	0.27
3	CNES	3.1	7.9	4.4	1.26	0.20
4	DLR	3.5	8.2	4.6	2.25	0.23
5	ESA	-	-	-	-	-
6	GFZ	3.2	10.7	5.8	1.89	0.32
7	GMV	3.7	8.6	5.8	2.24	1.77
8	NRC	-	-	-	-	-
9	WHU	4.6	10.6	6.1	1.72	0.28
10	IGS01	-	-	-	-	-
11	IGS02	4.5	8.9	6.0	5.44	0.58
12	IGS03	4.8	9.1	6.0	5.54	0.57

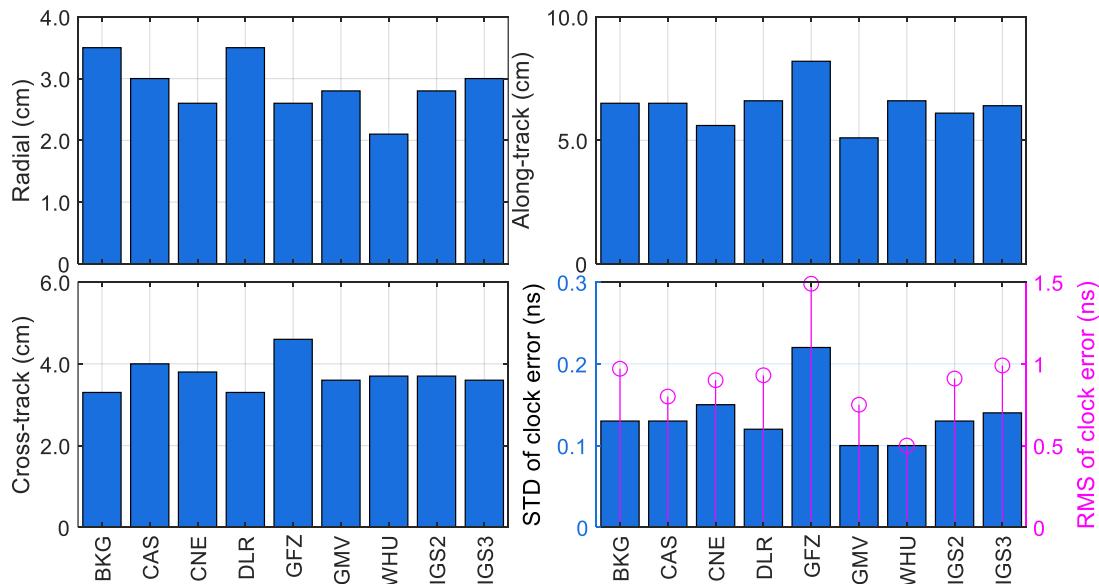


图 3-22 Galileo 实时产品轨道和钟差误差

Figure 3-22 The errors of Galileo real-time product orbit and clock

表 3-10 各分析中心 Galileo 实时轨道和钟差精度统计

Table 3-10 Real time Galileo orbit and clock accuracy from various analysis centers

序号	AC	Radial/cm	Along/cm	Cross/cm	CLK(RMS)/ns	CLK(STD)/ns
1	BKG	5.2	9.6	5.6	2.48	0.34
2	CAS	3.3	9.4	5.2	2.20	0.27
3	CNES	3.1	7.9	4.4	1.26	0.20

4	DLR	3.5	8.2	4.6	2.25	0.23
5	ESA	-	-	-	-	-
6	GFZ	3.2	10.7	5.8	1.89	0.32
7	GMV	3.7	8.6	5.8	2.24	1.77
8	NRC	-	-	-	-	-
9	WHU	4.6	10.6	6.1	1.72	0.28
10	IGS01	-	-	-	-	-
11	IGS02	4.5	8.9	6.0	5.44	0.58
12	IGS03	4.8	9.1	6.0	5.54	0.57

3.4.3.4 BDS 实时产品

截止 2021 年底，包括 CAS、CNES、DLR、GFZ、WHU 和 IGS03 在内的六个实时产品具备提供 BDS 卫星轨道和钟差改正数的能力。BDS 实时产品 IGS0 和 MEO 的轨道和钟差误差如图 3-23 所示，可以看出 BDS 实时产品精度略差于 GPS。各分析中心的统计结果如表 3-11 和表 3-12 所示。不同实时产品中 DLR 的 BDS MEO 卫星精度最好，轨道径向、切向和法向误差分别为 3.9 cm、9.5 cm 和 4.3 cm；实时钟差 STD 约为 0.17 ns， RMS 约为 0.39 ns。对于北斗三颗 IGS0 卫星，除 GFZ 的 IGS0 实时轨道和钟差数据异常外，表现最好的是 WHU 实时产品。WHU 实时轨道轨道的三个分量的 RMS 分别约为 10 cm、16.6 cm 和 11.7 cm，IGSO 的实时钟差 STD 约为 0.42 ns。

总体来说，除个别产品数据异常外，不同实时轨道和钟差的产品精度有较好的一致性，因此实时数据处理的粗差细节处理不可忽略。随着未来 MEGX 观测网络中更多的接收机具备接入多频多系统的能力，Galileo 和 BDS 卫星轨道和钟差精度仍有提高的空间，同时轨道和钟差产品的连续性和稳定性也有望进一步提升。

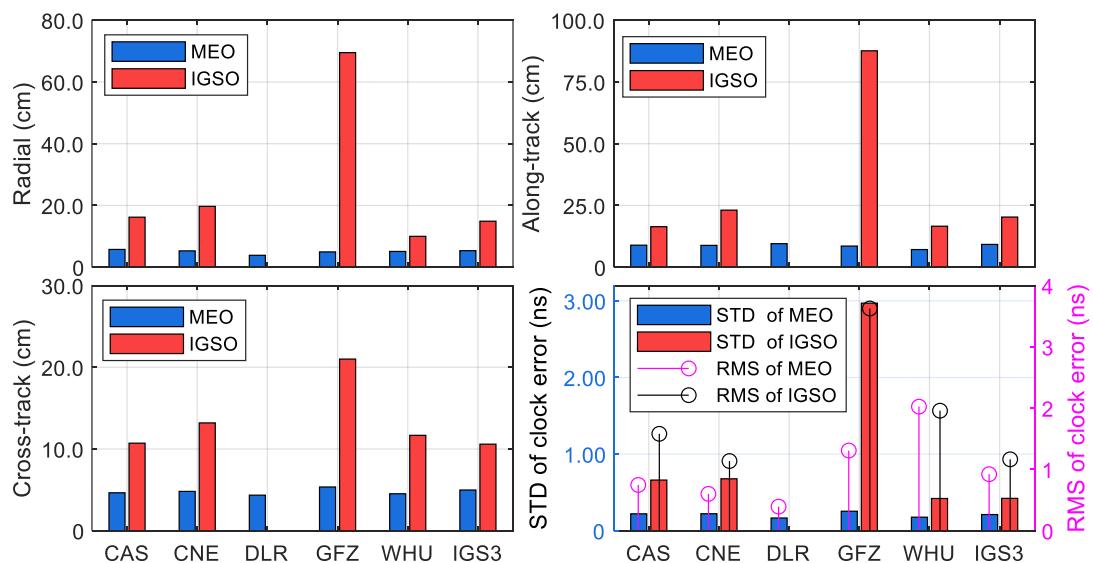


图 3-23 BDS 实时产品轨道和钟差误差

Figure 3-23 The errors of BDS real-time product orbit and clock

表 3-11 各分析中心 BDS MEO 实时轨道和钟差精度统计

Table 3-11 Real time BDS MEO orbit and clock accuracy from various analysis centers

序号	AC	Radial/cm	Along/cm	Cross/cm	CLK(RMS)/ns	CLK(STD)/ns
1	BKG	-	-	-	-	-
2	CAS	5.8	8.9	4.6	0.75	0.22
3	CNES	5.3	8.8	4.8	0.60	0.22
4	DLR	3.9	9.5	4.4	0.39	0.17
5	ESA	-	-	-	-	-
6	GFZ	5.0	8.6	5.4	1.31	0.25
7	GMV	-	-	-	-	-
8	NRC	-	-	-	-	-
9	WHU	5.1	7.2	4.5	2.02	0.18
10	IGS01	-	-	-	-	-
11	IGS02	-	-	-	-	-
12	IGS03	5.4	9.2	5.0	0.92	0.21

表 3-12 各分析中心 BDS IGSO 实时轨道和钟差精度统计

Table 3-12 Real time BDS IGSO orbit and clock accuracy from various analysis centers

序号	AC	Radial/cm	Along/cm	Cross/cm	CLK(RMS)/ns	CLK(STD)/ns
1	BKG	-	-	-	-	-
2	CAS	16.2	16.4	10.7	1.58	0.66
3	CNES	19.7	23.1	13.2	1.14	0.68
4	DLR	-	-	-	-	-
5	ESA	-	-	-	-	-
6	GFZ	69.5	87.6	21.0	3.63	2.98
7	GMV	-	-	-	-	-
8	NRC	-	-	-	-	-
9	WHU	10.0	16.6	11.7	1.96	0.42
10	IGS01	-	-	-	-	-
11	IGS02	-	-	-	-	-
12	IGS03	14.9	20.3	10.6	1.16	0.42

3.4.4 GNSS 实时产品定位验证

基于上一节接收的共 30 天 GNSS 实时产品, 选择了 16 个全球分布、具备接收 GPS、GLONAS、Galileo 和 BDS-3 四个系统能力的 IGS 测站, 用于对 GNSS 实时产品的 PPP 验证, 这些台站的分布和名称如图 3-24 所示。本小节设计了后处理模式和实时模式两种方案来分析数据完整率和延迟对实时 PPP 的影响, 后处理模式和实时模式的区别在于是否考虑数据播发延迟带来的影响。实时 PPP 的处理策略如表 3-13 所示。

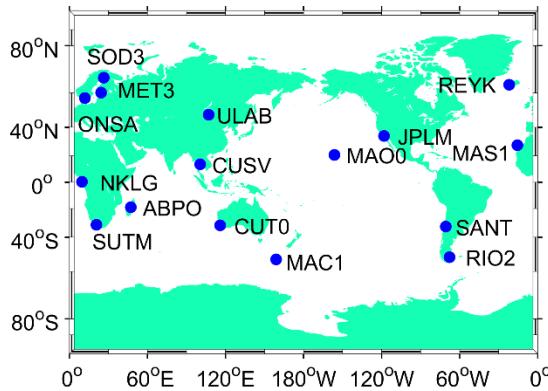


图 3-24 实时产品 PPP 的 IGS 测站分布

Figure 3-24 IGS station distribution for real-time PPP

在实时 PPP 试验中, 采用收敛时间和收敛精度两个指标评价实时产品的服务性能。本节中实时静态 PPP 的收敛时间定义为首次连续 10 个历元三维误差优于 20 cm, 收敛精度为 24 小时定位结果最后一个历元的坐标误差; 对于实时动态 PPP 定位采用小时解的方式, 收敛时间定义为首次连续 10 个历元平面和高程误差同时优于 15 cm 和 25 cm, 精度为收敛后坐标误差的均方根误差。

表 3-13 实时 PPP 处理策略

Table 3-13 Real-time PPP processing strategy

参数	解算策略
Solution	静态/动态
采样间隔	30 s
截止高度角	10°
频率选择	GPS: L1/L2; GLONASS: G1/G2; GALILEO: E1/E5a; BDS: B1I/B3I
估计方式	卡尔曼滤波
周跳探测	MW+GF算法
电离层延迟	无电离层组合模型
轨道钟差产品	实时广播星历+SSR改正
接收机钟差	白噪声估计
权重策略	高度角定权, 伪距噪声设置为 0.3m, 相位噪声设置为 3 mm
模糊度	浮点解
天线相位中心	igs14.atx
对流层延迟	干延迟改正模型: GPT2w + SAAS + VMF 湿延迟: 随机游走估计
接收机系统偏差	随机游走估计
测站参考坐标	IGS SINEX周解
系统组合	G/GRE/GREC

3.4.4.1 实时静态 PPP

收敛时间采用四分位数法统计, 利用箱线图分别给出 25%、50%、75% 分位数和四分位数间距的收敛时间统计结果, 不同实时产品的收敛性能以箱线图的中线(中位数)作为比较。不同实时产品的静态 PPP 试验收敛时间统计情况如图 3-25 所示。对于后处理策略, GPS 单系统的静态 PPP 中 WHU 实时产品的收敛速

度最快, 收敛时间中位数为 7.5 min, 而 BKG 的实时产品 GPS 静态 PPP 的收敛速度最慢, 收敛时间中位数为 15.0 min。结合 3.3.2 节和 3.3.3 节的评估结果, 定位收敛速度与数据的完整率和实时改正数精度直接相关。实时静态 PPP 收敛时间中位数见表 3-14 所示。在实时的模式下, 由于 CAS 的产品播发延迟最短, 其收敛速度要快于 WHU 产品, CAS 实时产品的 GPS 静态 PPP 收敛时间中位数为 11.0 min; 类似的作为数据延迟最高且产品精度较差的 IGS03 产品, 其收敛时间中位数为 21.5 min。显而易见的是不同的实时产品在实时策略下都要比后处理策略需要更多的收敛时间。和后处理策略相比, 实时策略的收敛时间要慢 10.0% ~ 76.2%, 且在实时产品处于同等精度的条件下, 播发延迟越大导致轨道和钟差改正数的外推精度越差, 进而收敛时间越长。

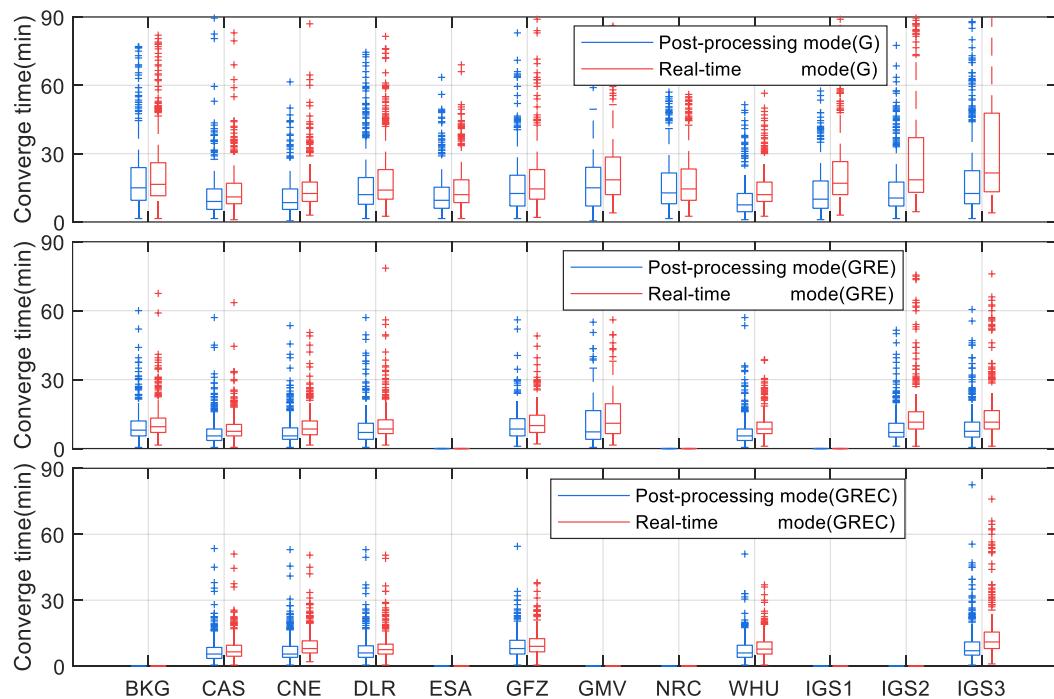


图 3-25 不同实时产品静态 PPP 收敛时间统计

Figure 3-25 The convergence time of static PPP for different real-time products

此外, GPS/GLONASS/Galileo (GRE) 三系统组合下, 两种策略的静态 PPP 收敛速度明显快于仅 GPS 定位, 这主要得益于卫星数量的增加, 特别是伽利略卫星的作用。对于不同的实时产品, 后处理模式 GRE 三系统静态 PPP 的收敛时间中位数为 5.5 min 至 8.5 min, 相比于 GPS 静态 PPP 的收敛速度提高了 26.7% ~ 51.7%; 而在实时模式下 GRE 三系统静态 PPP 收敛时间中位数在 7.5 min 至 11.5 min, 收敛速度提升 29.2% ~ 46.5%。对于 GPS/GLONASS/Gileo/BDS (GREC) 四系统组合静态 PPP, 收敛速度比 GRE 组合有微小的变化, 主要由于 BDS 实时改正数的完整率和精度限制了对定位性能的提升, 不同实时产品的 GREC 组合静态 PPP 相比于 GRE 组合的收敛速度提高不超过 14.3%。因此, RTS 可能需要

更加关注 BDS 实时产品生成模型和数据连续性, 以确保 multi-GNSS 实时应用性能。

表 3-14 实时静态 PPP 收敛时间中位数 (分钟)

Table 3-14 Median convergence time of real-time static PPP (min)

挂载点	G		GRE		GREC	
	后处理	实时	后处理	实时	后处理	实时
BKG	16.5	15.0	9.5	8.0	-	-
CAS	11.0	9.0	7.5	5.5	6.5	5.5
CNES	12.5	8.5	8.5	5.5	8.0	5.5
DLR	14.0	12.0	8.5	7.0	7.5	6.0
ESA	12.0	9.5	-	-	-	-
GFZ	14.5	12.5	10.0	8.5	9.0	8.0
GMV	18.5	15.0	11.0	7.3	-	-
NRC	14.5	12.8	-	-	-	-
WHU	12.0	7.5	8.5	5.5	7.8	6.0
IGS01	17.0	10.0	-	-	-	-
IGS02	18.5	10.5	11.5	7.0	-	-
IGS03	21.5	12.5	11.5	7.5	11.0	7.0

图 3-26 展示了不同实时产品静态 PPP 的定位精度, 从图中可以看出, 实时策略下 GPS 静态 PPP 的定位误差和后处理模式精度相当。总体而言, 实时模式下所有实时产品 GPS 静态 PPP 平面和高程精度分别优于 3.2 cm 和 2.5 cm, 其中 WHU 产品精度最高, 平面和高程方向均达到 1 cm。GRE 和 GREC 组合的静态 PPP 定位精度高于 GPS 单系统 PPP, 但定位精度提升不超过 17.1%。此外, GRE 或 GREC 组合的三维位置定位精度优于 3.5cm。WHU 实时产品的 GRE 或 GREC 组合静态 PPP 定位精度最好, 水平和垂直方向分别为 0.9 cm 和 1.1 cm。

3.4.4.2 实时动态 PPP

不同实时产品动态 PPP 的收敛时间统计结果如图 3-27 所示。后处理策略下, GPS 动态 PPP 的收敛时间中位数为 19.0 min 至 44.0 min, 而实时策略下的收敛时间中位数在 22.5 min 至 58 min。实时动态 PPP 收敛时间中位数见表 3-15 所示。实时策略下, 实时产品延迟越大导致其收敛时间越长。相比于后处理策略, IGS01、IGS02 和 IGS3 的综合实时产品在实时策略下的收敛速度分别下降了 64.0%、80.0% 和 58.9%, 而其他分析中心的实时产品的收敛速度下降最大不超过 32.9%。CNES 的 GPS 动态 PPP 的收敛速度最快, 收敛时间中位数约 22.5 min, 其次是 ESA 和 CAS 的实时产品。

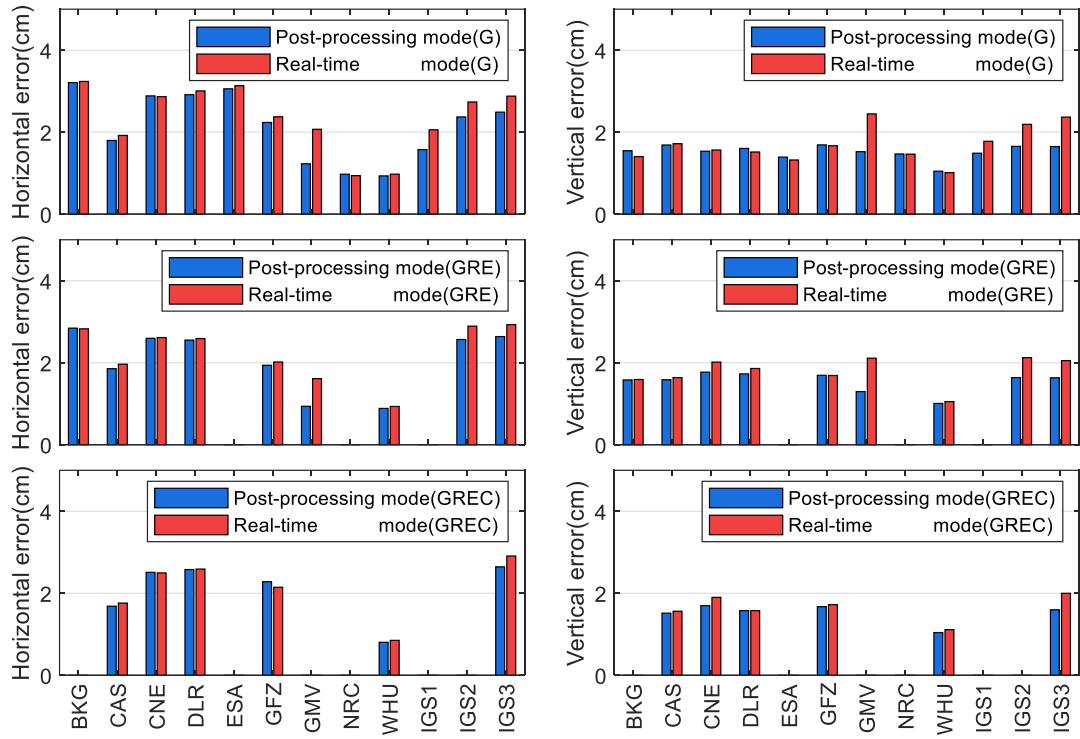


图 3-26 不同实时产品静态 PPP 定位精度统计

Figure 3-26 The accuracy of static PPP for different real-time products

多系统组合的实时动态 PPP 相比于 GPS 单系统的收敛速度提升效果更为显著，整体上 GRE 三系统组合相比于 GPS 单系统动态 PPP 收敛速度提高了 48.9% ~ 69.8%，收敛时间的中位数在 10.0 ~ 17.5 min。加入 BDS 卫星参与动态 PPP 后收敛速度进一步提高，其中 CAS 实时产品的 GREC 组合动态 PPP 的收敛时间最短，中位数为 8.5 min，而轨道和钟差精度较高的 DLR 和 WHU 实时产品其次，收敛时间中位数为 9.5 min。

图 3-28 了不同实时产品小时解动态 PPP 的定位精度。对于实时策略下 GPS 单系统动态 PPP，基于 ESA 和 WHU 实时产品的定位表现最佳，水平方向的 RMS 为 10.8 cm，高程方向的 RMS 为 9.5 cm，基于 CAS、CNES 实时产品的定位结果略差于 WHU。基于 IGS 综合产品 IGS03 的结果表现最差，水平方向的 RMS 为 19.0 cm，高程方向的 RMS 为 17.4 cm。

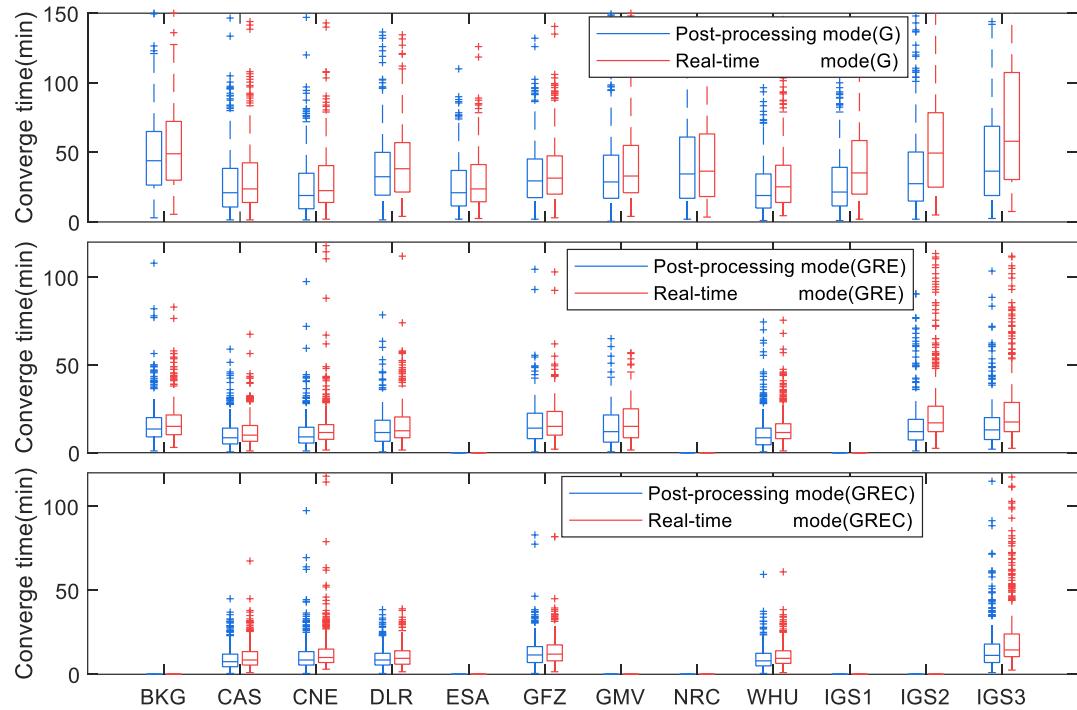


图 3-27 不同实时产品动态 PPP 收敛时间统计

Figure 3-27 The convergence time of kinematic PPP for different real-time products

表 3-15 实时动态 PPP 收敛时间中位数 (分钟)

Table 3-15 Median convergence time of real-time kinematic PPP (min)

挂载点	G		GRE		GREC	
	后处理	实时	后处理	实时	后处理	实时
BKG	49.0	44.0	15.0	13.5	-	-
CAS	23.8	21.0	10.0	8.5	8.5	7.5
CNES	22.5	19.0	11.5	9.0	10.0	8.5
DLR	38.3	32.5	12.5	11.5	9.5	8.5
ESA	23.8	21.0	-	-	-	-
GFZ	31.5	29.5	15.0	14.0	12.0	11.5
GMV	33.0	28.8	15.0	12.0	-	-
NRC	36.5	34.5	-	-	-	-
WHU	25.3	19.0	11.5	8.5	9.5	8.0
IGS01	35.3	21.5	-	-	-	-
IGS02	49.5	27.5	17.0	12.0	-	-
IGS03	58.0	36.5	17.5	13.0	14.5	11.3

与 GPS 单系统相比, 基于不同实时产品的 GRE 组合动态 PPP 定位精度提高了 23.0% ~ 60.0%, GREC 组合的动态 PPP 定位精度提高了 49.4% ~ 72.8%, 其中 GRE 组合动态 PPP 中 IGS02 定位表现最差, 水平和高程方向上的误差 RMS 分别为 9.1 cm 和 11.8 cm。基于 CAS、DLR、GFZ 和 WHU 实时产品的 GREC 组合动态 PPP 的小时解定位误差优于 5.2 cm。此外, 由于 BDS 卫星实时改正数的连续性较差, CNES 和 IGS03 的 GREC 组合实时动态 PPP 定位误差分别为 7.6 cm

和 8.5 cm。由此可见,与静态 PPP 的结果相比,多系统组合和卫星数量的增加能够显著提高实时动态 PPP 定位的定位精度,提升效果要远远高于因产品延迟带来精度衰退的影响。

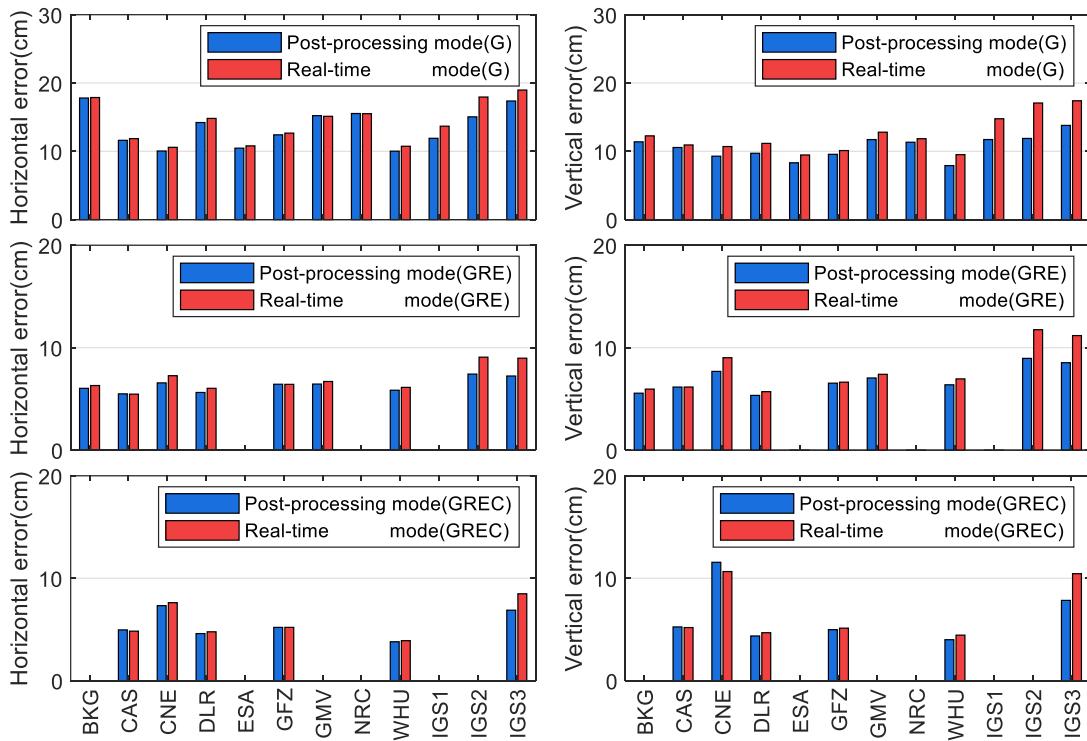


图 3-28 不同实时产品动态 PPP 定位精度统计

Figure 3-28 The accuracy of kinematic PPP for different real-time products

3.5 小结

本章对 GNSS 的广播星历和实时产品展开评估和分析,介绍了 GNSS 广播星历产品和实时产品精度评估时涉及的细节问题,并对广播星历和实时产品从多种角度展开分析,得到以下结论:

(1) 截止 2022 年底, GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS-3 的空间信号精度分别达到了 0.43 m、2.43 m、0.18 m 和 0.56 m。相比于先前的评估结果, GPS 和 Galileo 系统随着新系列卫星的更新,其空间信号精度均有所提升。而 BDS-3 在星地星间链路联合解算下,其广播轨道和钟差的稳定性更高,仅利用区域观测网达到了与 GPS 相当的空间信号精度。

(2) 通过对 12 个 GNSS 实时产品的可用评估,所有产品的数据可用性与 IGS 观测网络的成熟程度直接相关,对于不同的实时产品的数据完整率 GPS 最高, GLONASS 次之, Galileo 和 BDS 相对较差。各挂载点存在不同的播发延迟,延迟的范围普遍在 6.18 s ~ 37.85 s 之间。

(3) 统计分析了不同实时产品 GNSS 卫星的轨道和钟差精度，并进行了 30 天的精密度单点定位试验。试验表明：播发时延会降低 PPP 的收敛速度和收敛精度，对动态 PPP 的影响最为明显；多系统组合的动态 PPP 能够显著提高收敛速度和定位精度，基于 GPEC 四个系统组合的实时静态 PPP 和动态 PPP 最优的三维定位精度分别达到了 3.5 cm 和 5.2 cm。

第 4 章 GNSS 相位小数偏差估计算法

精密度单点定位模糊度固定一直以来都是导航定位领域的热点之一, 而如何估计将模糊度恢复成整数的产品是实现模糊度固定的前提条件。目前相位小数偏差估计方法包括 FCB 方法(Ge, 2008)、整数钟(Laurichesse, 2009)和解耦钟(Collins, 2008)三种方法, 以上方法已经被证明理论上和应用是等价的(Geng, 2010)。虽然相位偏差估计和 PPP-AR 理论发展已经较为成熟, 但大多数的研究主要集中于后处理模式, 即目前发布的 FCB 产品主要基于事后高精度轨道和钟差产品。而后处理模式在估计相位偏差时通常基于高精度的轨道和钟差, 忽略了卫星轨道和钟差误差的影响, 对于使用后处理精密产品或者快速产品尚可满足需求。对于实时模式下的 FCB 估计, 目前相关的研究仍然较少, 仅有 CNES 等少数几个 IGS 机构发布了实时 FCB 产品(Loyer, 2012)。

本章将推导 FCB 参数估计的模型与方法, 并基于武汉大学事后精密产品估计的 FCB 进行评估和验证。

4.1 GNSS 相位偏差估计算法

4.1.1 基于无电离层组合模型估计原理

由 2.2.2 节可知, 在引入无电离层组合系数后, 基于无电离层模糊度的整数特性被破坏, 无法直接通过使用相位偏差改正使其恢复整数特性, 但公式 2-5 中的无电离层模糊度可以写成宽巷模糊度和窄巷模糊度的组合形式:

$$\lambda_{IF}^S \bar{N}_{IF}^S = \lambda_{NL} N_{NL} + \frac{f_2}{f_1 + f_2} \lambda_{WL} N_{WL} \quad (4-1)$$

部分变量定义如下:

$$\begin{cases} \lambda_{NL} = c / (f_1 + f_2) \\ \lambda_{WL} = c / (f_1 - f_2) \\ N_{WL} = N_1 - N_2 \end{cases} \quad (4-2)$$

其中 λ_{NL} 表示窄巷模糊度的波长, 对于 GPS 卫星波长大约为 10.6 cm, λ_{WL} 表示宽巷模糊度的波长, 对于 GPS 卫星约为 86.2 cm。由此可知, 在 PPP 处理时, 我们能够计算无电离层模糊度的浮点解, 若同时可以确定宽巷和窄巷的整数模糊度, 便可以依据上述公式实现无电离层的整数模糊度的固定。

4.1.2 宽巷 FCB 估计

宽巷 FCB 估计采用 MW (Melbourne-Wubeena) 组合(Wubben, 1985), 只依赖于原始伪距和相位观测值, 因此宽巷 FCB 的估计与无电离层模糊度的提取可以独立进行。首先根据各个测站上的伪距和相位观测值形成 MW 组合观测值:

$$\begin{aligned}
MW &= \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (\bar{N}_1 - \bar{N}_2 + b_{r,1} - b_{r,2} - b_1^s + b_2^s) \\
&= \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (\bar{N}_{WL} + b_{r,WL} - b_{WL}^s)
\end{aligned} \tag{4-3}$$

上式中, \bar{N}_1 和 \bar{N}_2 为 L1 和 L2 频点上的整周模糊度, \bar{N}_{WL} 为整周宽巷模糊度, $b_{r,WL}$ 和 b_{WL}^s 分别为接收机和卫星的宽巷 FCB。

从上式可以看出, MW 组合观测值包含了宽巷模糊度的整周部分、接收机及卫星的小数部分。由于通过均值滤波后的宽巷观测值受伪距噪声的影响被削弱, 且宽巷的波长较大, 可以通过直接取整的方式获取宽巷的整数模糊度, 扣除 MW 组合中的整数部分, 即可得到宽巷 FCB 观测值 $L_{r,WL}^s$:

$$L_{r,WL}^s = b_{r,WL} - b_{WL}^s \tag{4-4}$$

假设在第 k 个历元有 n 个测站观测到了 m 颗卫星, 可通过网解的方式计算所有卫星的宽巷 FCB, 形成如下方程:

$$\begin{bmatrix} L_{1,WL}^1 \\ L_{1,WL}^2 \\ \vdots \\ L_{2,WL}^1 \\ L_{2,WL}^2 \\ \vdots \\ L_{n,WL}^1 \\ \vdots \\ L_{n,WL}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{1,WL} \\ b_{2,WL} \\ \vdots \\ b_{n,WL} \\ b_{WL}^1 \\ b_{WL}^2 \\ \vdots \\ b_{WL}^m \end{bmatrix} \tag{4-5}$$

以上公式的法方程是秩亏的, 因此需要确定一个基准, 一般可以令所有卫星的和为零作为约束条件(李盼, 2016)。

4.1.3 FCB 初值确定与实时质量控制

需要注意的是, 由于取整原因, 宽巷 FCB 的观测值可能存在正负一周的差异, 因此需要合理的确定接收机和卫星的宽巷 FCB 的初值, 再通过站间传递的方式对所有观测值做对齐处理, 本文确定测站和卫星初始相位偏差的算法如下:

(1) 循环 FCB 观测值, 找到观测网络中高度角最高的卫星 i 和接收机 s , 将高度角最高的卫星 i 的初始相位偏差设为 0, 计算接收机 s 的相位偏差初始值;

(2) 循环 FCB 观测值, 计算观测到卫星 i 的接收机初始相位偏差; 再次循环每个接收机的 FCB 观测值, 利用有相位偏差初值的接收机确定其他卫星的相位偏差初值, 当某颗卫星存在共同观测时, 对高度角高于 40 度的卫星相位偏差取平均处理。

(3) 循环所有接收机的 FCB 观测值, 认为上一步中计算的卫星初始相位偏差已知, 通过取平均的方式重新计算每一个接收机的初始相位偏差。

实时卡尔曼滤波中将宽巷和窄巷 FCB 作为随机游走参数进行估计, 利用 PPP 求解的协方差矩阵为 FCB 估计的观测方程的权重, 建立验后残差判断准则, 根据验后残差大于 0.4 周的数据进行剔除处理后重新计算(李盼, 2016)。

4.1.4 窄巷 FCB 估计

通过估计获取无电离层模糊度和宽巷 FCB 后, 利用公式 4-1 中的无电离层模糊度浮点解和宽巷整周模糊度计算出窄巷模糊度浮点解:

$$\lambda_{NL} \bar{N}_{NL}^s = \lambda_{IF}^s \bar{N}_{IF}^s - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \bar{N}_{WL}^s \quad (4-6)$$

与宽巷浮点模糊度类似, 上式中的窄巷浮点模糊度同样包括窄巷模糊度的整周部分、接收机及卫星的小数部分。扣除窄巷模糊度的整数部分, 即可得到窄巷 FCB 观测值 $L_{r,NL}^s$:

$$L_{r,NL}^s = b_{r,NL} - b_{NL}^s \quad (4-7)$$

同样地, 与宽巷 FCB 估计类似, 上式中的窄巷 FCB 观测值同样需要通过站间传递进行对齐, 以确定接收机和卫星窄巷 FCB 的初值, 最后可以形成如公式 (4-8) 的观测方程。

$$\begin{bmatrix} L_{1,NL}^1 \\ L_{1,NL}^2 \\ \vdots \\ L_{2,NL}^1 \\ L_{2,NL}^2 \\ \vdots \\ L_{n,NL}^1 \\ \vdots \\ L_{n,NL}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{1,NL} \\ b_{2,NL} \\ \vdots \\ b_{n,NL} \\ b_{NL}^1 \\ b_{NL}^2 \\ \vdots \\ b_{NL}^m \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

在窄巷 FCB 估计中, 同样需要进质量控制, 如低高度角下的周跳探测和窄巷观测值取舍准则、对高度角较低或观测值噪声较大的窄巷观测值降权、将窄巷 FCB 参数当作随机游走参数进行估计、验后残差检验和粗差剔除等。

最后, 利用解算的宽巷和窄巷 UPD, 即可恢复原始频点的 FCB。

$$\begin{cases} b_1 = b_{NL} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} b_{WL} \\ b_2 = b_1 - b_{WL} \end{cases} \quad (4-9)$$

上式中, b_1 和 b_2 分别为 L1 和 L2 频点上的 FCB 值。

4.2 用户端模糊度固定算法

在已知卫星端伪距硬件延迟和相位小数偏差的条件下, 受接收机端的影响, 传统的无电离层组合PPP仍然只能获得无电离层模糊度的浮点解。因此用户端的模糊度固定需要利用星间单差算法消除接收机端的硬件延迟和相位偏差。固定的方式则与服务端生成算法相同, 将无电离层模糊度分为宽巷和窄巷分别固定, 无电离层模糊度可以列为:

$$\lambda_{IF} B_{IF,r}^j = \frac{f_2}{f_1 + f_2} \lambda_w B_{w,r}^j + \lambda_N B_{1,r}^j \quad (4-10)$$

式中 $B_{w,r}^j$ 和 $B_{1,r}^j$ 可以表示为:

$$\begin{cases} B_{w,r}^j = N_{w,r}^j + b_{w,r} - b_w^j \\ B_{1,r}^j = N_{1,r}^j + b_{1,r} - b_n^j \end{cases} \quad (4-11)$$

式中, $B_{w,r}^j$ 、 $B_{1,r}^j$ 为含有接收机和卫星端硬件延迟影响的宽巷和窄巷实数模糊度; $N_{w,r}^j$ 、 $N_{1,r}^j$ 和 $N_{1,r}^j$ 为宽巷和窄巷整周模糊度; $b_{w,r}$ 、 $b_{1,r}$ 和 b_w^j 、 b_n^j 分别为接收机端和卫星端宽巷和窄巷硬件延迟; f_i 表示载波频率。

根据公式(4-3)可知, 宽巷模糊度包含了整周部分和卫星与接收机的小数部分, 而宽巷的波长约为0.86 m, 通过多个历元的平滑后消除伪距噪声带来的影响, 再通过星间单差的方式消除接收机端的小数偏差, 就近取整即可获得宽巷整周模糊度。

与服务端一致, 计算出宽巷整周模糊度后, 带入无电离层组合方程中可以求出窄巷模糊度的浮点解。

$$B_{1,r}^j = \frac{f_1 + f_2}{f_1} B_{IF,r}^j - \frac{f_2}{f_1 - f_2} N_{w,r}^j = N_{1,r}^j + b_{1,r} - b_n^j \quad (4-12)$$

改正卫星端窄巷FCB后, 所有窄巷模糊度具有一致的小数部分, 可以利用星间差消除接收机端FCB, 采用 LAMBDA方法尝试对星间单差的窄巷模糊度进行固定。当宽巷和窄巷模糊度同时固定时, 我们则可以反求出无电离层组合模糊度的固定解, 将其当成已知值, 重新带入无电离层观测方程中, 进而获得精密度单点定位无电离层模糊度固定解, 即:

$$B_{IF,r}^j = \frac{f_1}{f_1 + f_2} (N_{1,r}^j + b_{1,r} - b_n^j) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{w,r}^j$$

需要注意的是, 卫星从进入接收机视野到能够实现模糊度固定需要一段收敛时间, 因此将求取所有卫星的模糊度固定解是很难的, 因此需要对模糊度固定解

中选择部分质量较好的模糊度子集进行固定，实现模糊度的部分固定，可以提高模糊度的固定成功率，进而进一步提高模糊度的收敛时间。

4.3 GNSS 相位小数偏差产品评估

基于上一节的模型和算法估计 GPS/Galileo/BDS 三系统的相位小数偏差产品，并分别从时间稳定度、残差分布特征和 PPP-AR 验证几方面对估计的 FCB 产品展开质量评估。

4.3.1 试验设计

选择 2022 年 DOY 20-24 共 5 天全球分布的 90 个 IGS 测站数据，测站分布如图 4-1 所示。利用武汉大学事后产品逐历元估计 FCB 参数，计算 GPS、Galileo 和 BDS-3 三个系统的相位偏差产品。

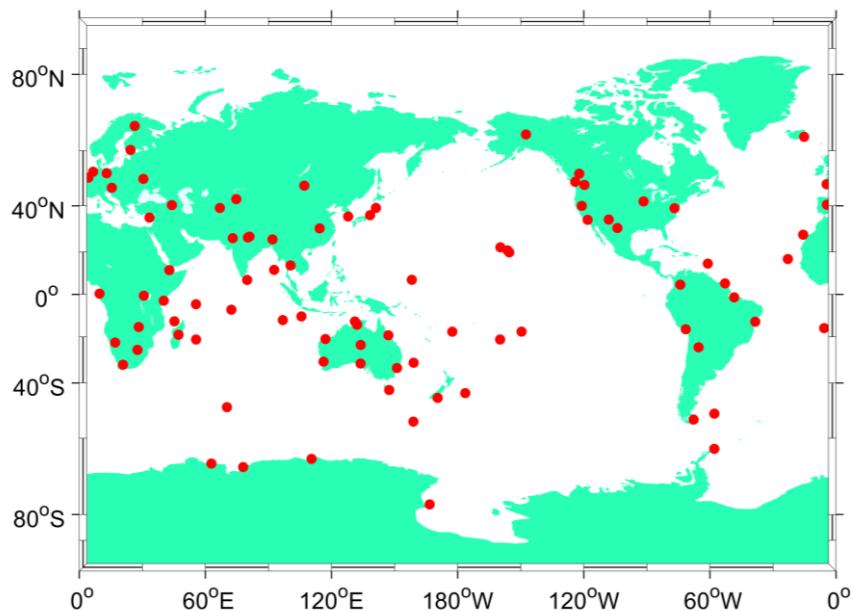


图 4-1 GNSS 相位小数偏差解算用站
Figure 4-1 The stations for solving GNSS phase cycle bias

4.3.2 时间稳定度

以 2022 年 DOY 20 三个系统联合计算的 FCB 为例，下图给出了 GPS、Galileo 和 BDS-3 部分卫星的宽巷 FCB 的时间序列。从图中可以看出，逐历元滤波解算的各系统宽巷 FCB 天内变化都很稳定，波动的标准差均优于 0.05 周。图 4-3 给出了试验期间三个系统宽巷 FCB 的天内稳定性变化情况，GPS 和 Galileo 窄巷 FCB 的时间序列天内变化较较为稳定，而 BDS 卫星的窄巷 FCB 稳定性稍差，主要是由于 BDS 的事后轨道和钟差产品精度还不如其他两个系统。

表 4-1 给出了试验期间三系统的宽巷和窄巷 FCB 的时间稳定性统计结果。总体来说，基于后处理的精密产品的 GPS、Galileo 和 BDS 卫星 FCB 天与天之间

都表现较好的稳定，其中三系统的宽巷 FCB STD 均优于 0.05 周；窄巷 FCB 时间稳定性因与各系统的产品精度差异而不同，GPS、Galileo 和 BDS 的窄巷 FCB 稳定性分别优于 0.057 周、0.044 周和 0.129 周。

表 4-1 三系统宽巷和窄巷 FCB 时间稳定性统计

Table 4-1 The STD of wide and narrow lanes for GPS/Galileo/BDS

DOY	宽巷 FCB 稳定度/周			窄巷 FCB 稳定度/周		
	GPS	Galileo	BDS	GPS	Galileo	BDS
20	0.048	0.019	0.034	0.050	0.047	0.109
21	0.050	0.027	0.031	0.049	0.047	0.117
22	0.047	0.027	0.038	0.090	0.039	0.134
23	0.046	0.019	0.034	0.047	0.038	0.161
24	0.048	0.029	0.032	0.050	0.052	0.125
Mean	0.048	0.024	0.034	0.057	0.044	0.129

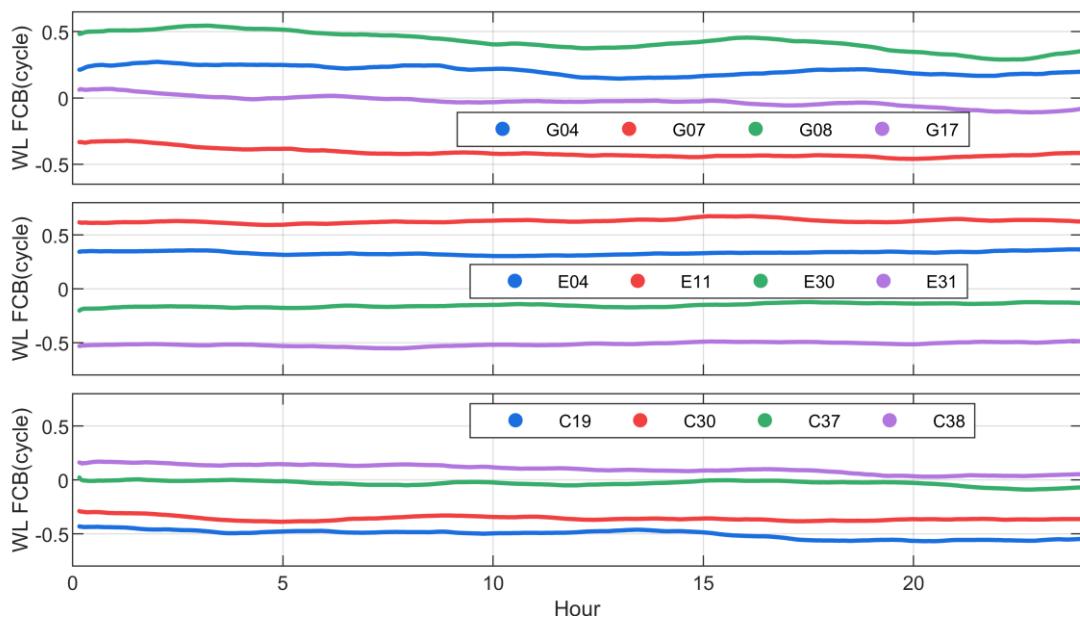


图 4-2 GPS、Galileo 和 BDS 三系统的宽巷 FCB 时间序列

Figure 4-2 The time series of wide lane for GPS/Galileo/BDS

4.3.1 残差分布特征

验后残差的分布是检验 FCB 产品质量的指标之一。图 4-4 和图 4-5 分别给出了三系统 FCB 估计的宽巷和窄巷模糊度残差分布情况。从图中可以看出，Galileo 的宽巷 FCB 的残差分布最为集中，GPS 和 BDS 的分布情况相当。统计表明，大约有 96.02% 的 GPS 宽巷 FCB 残差低于 0.15 周，宽巷残差的 RMS 为 0.067 周；Galileo 的宽巷 FCB 残差有 99.32% 不超过 0.15 周，残差的 RMS 为 0.048 周；对于 BDS，有 96.48% 的宽巷 FCB 残差不超过 0.15 周。

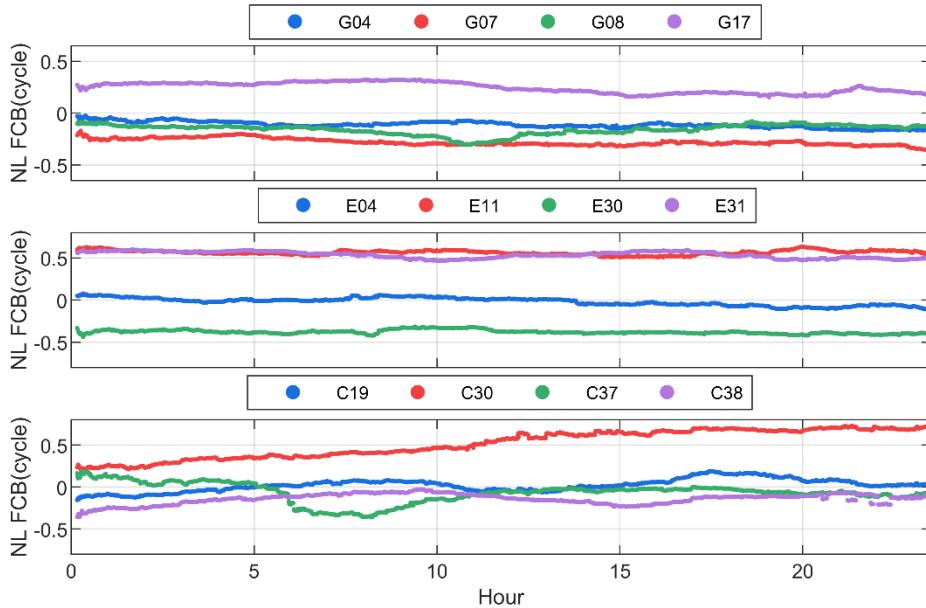


图 4-3 GPS、Galileo 和 BDS 三系统的窄巷 FCB 时间序列

Figure 4-3 The time series of narrow lane for GPS/Galileo/BDS

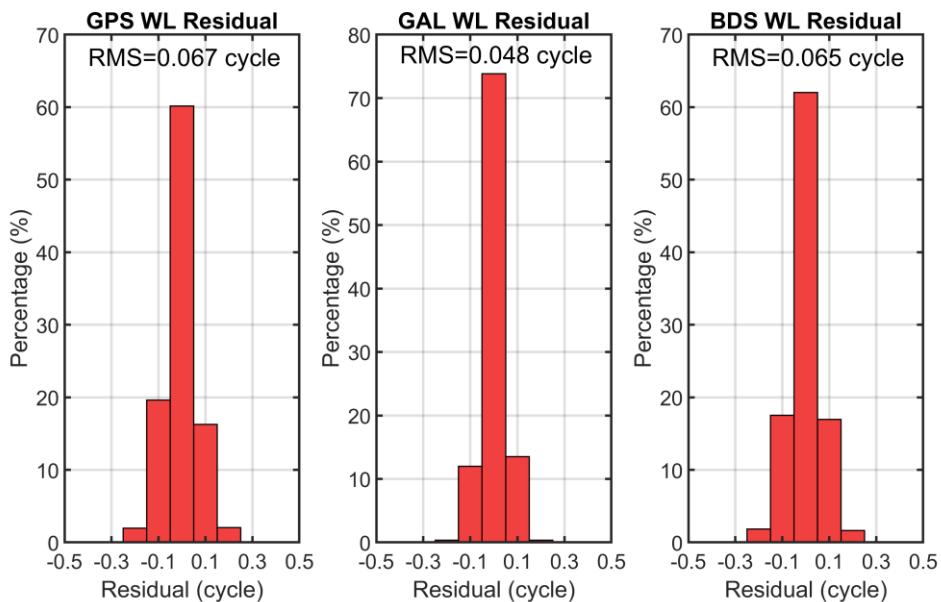


图 4-4 GPS、Galileo 和 BDS 三个系统的宽巷 FCB 残差

Figure 4-4 The residual of wide lane for GPS/Galileo/BDS

图 4-5 中窄巷模糊度的残差水平与窄巷 FCB 的时序稳定性表现一致, GPS 的窄巷模糊度残差分布在 0.15 周以内的比例约为 99.90%, 窄巷残差的 RMS 为 0.039 周; Galileo 卫星的窄巷残差在 0.15 周以内的占 99.91%, 窄巷残差的 RMS 为 0.040 周; 虽然 BDS 窄巷 FCB 的时序稳定性明显差于 GPS, BDS 窄巷模糊度残差低于 0.05 周的比例低于 GPS 和 Galileo, 但 BDS 卫星的窄巷模糊度残差仍有 98.05% 分布在 0.15 周以内, RMS 为 0.065 周。

4.3.2 模糊度固定验证

以上 GNSS 相位小数偏差产品的评估说明了估计的相位小数偏差产品与观测值之间有较好的一致性。本小节将通过静态和动态定位验证 PPP 模糊度固定的效果。选取了连续 5 天 7 个测站的观测数据进行 PPP 验证, 采用 GPS、Galileo 和 BDS-3 单系统和 GPS/Galileo/BDS-3 组合四种策略验证估计的相位偏差产品。下面从定位精度、收敛时间和固定率情况三个方面评估 FCB 产品的质量。

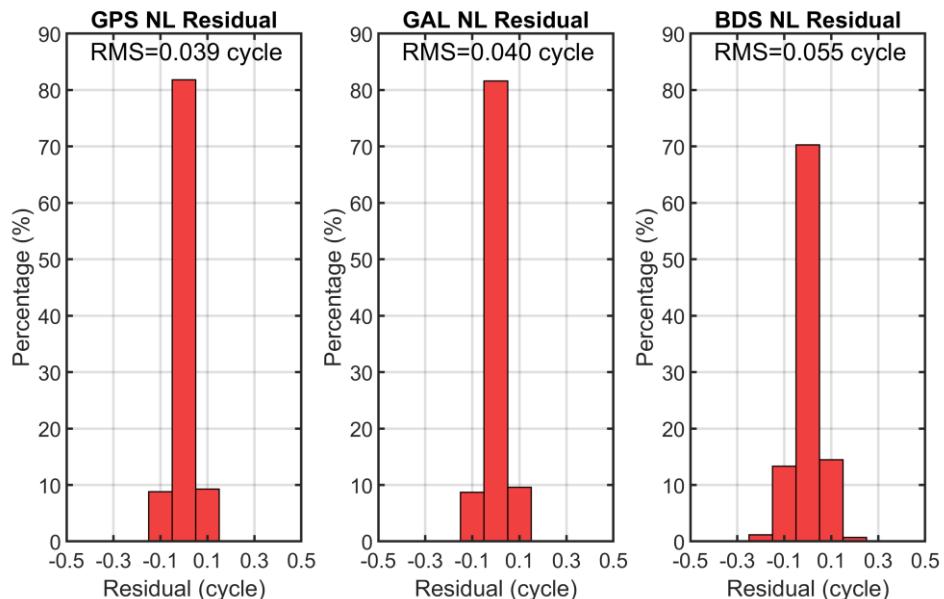


图 4-5 GPS、Galileo 和 BDS 三个系统的窄巷 FCB 残差
Figure 4-5 The residual of narrow lane for GPS/Galileo/BDS

4.3.2.1 静态 PPP 验证

图 4-6 给出了 ABPO 测站静态 PPP 的浮点解及固定解在北、东和高程方向的误差序列, 包括了 GPS、Galileo、BDS-3 单系统及三系统组合的定位结果。注意到图中不同策略的结果, 模糊度固定解在模糊度固定后都有较为明显的精度提升, 并且在平面的两个方向表现尤为明显。对于单系统而言, GPS 定位的收敛速度和精度好于 Galileo 和 BDS-3, BDS-3 的定位收敛相对较慢是由于其前两小时的可用卫星数量一直处于 5 颗左右。

表 4-2 列出了测试的 5 天内静态定位 1 小时的定位收敛精度的统计结果, 统计的为最后一个历元的定位误差。GPS 模糊度固定解的北、东、天三个方向上分别提升了 4.4%、24.8% 和 8.0%, 相比之下模糊度固定对东方向的精度提升最明显。以连续 10 个历元三维位置优于 10 cm 为收敛准则, GPS 单系统浮点解平均收敛时间为 36.6 min, 固定解平均收敛时间为 33.9 min, 提升了 7.4%; GPS/Galileo/BDS 的收敛速度最快, 固定解平均收敛时间为 10.5 分钟。GPS、Galileo 和 BDS 单系统的固定解定位相比于浮点解定位提升最大, 北、东、天三

个方向上分别提升了 70.2%、87.0% 和 36.3%。

表 4-2 静态 PPP 1 小时定位精度统计

Table 4-2 The accuracy of hourly static PPP

	GPS		Galileo		BDS		GPS/Galileo/BDS	
	浮点解	固定解	浮点解	固定解	浮点解	固定解	浮点解	固定解
N/cm	2.05	1.96	2.30	1.57	1.60	1.60	1.31	0.39
E/cm	3.10	2.33	3.40	2.33	6.80	5.40	3.30	0.43
U/cm	3.26	3.00	6.00	5.00	2.90	2.40	2.23	1.42

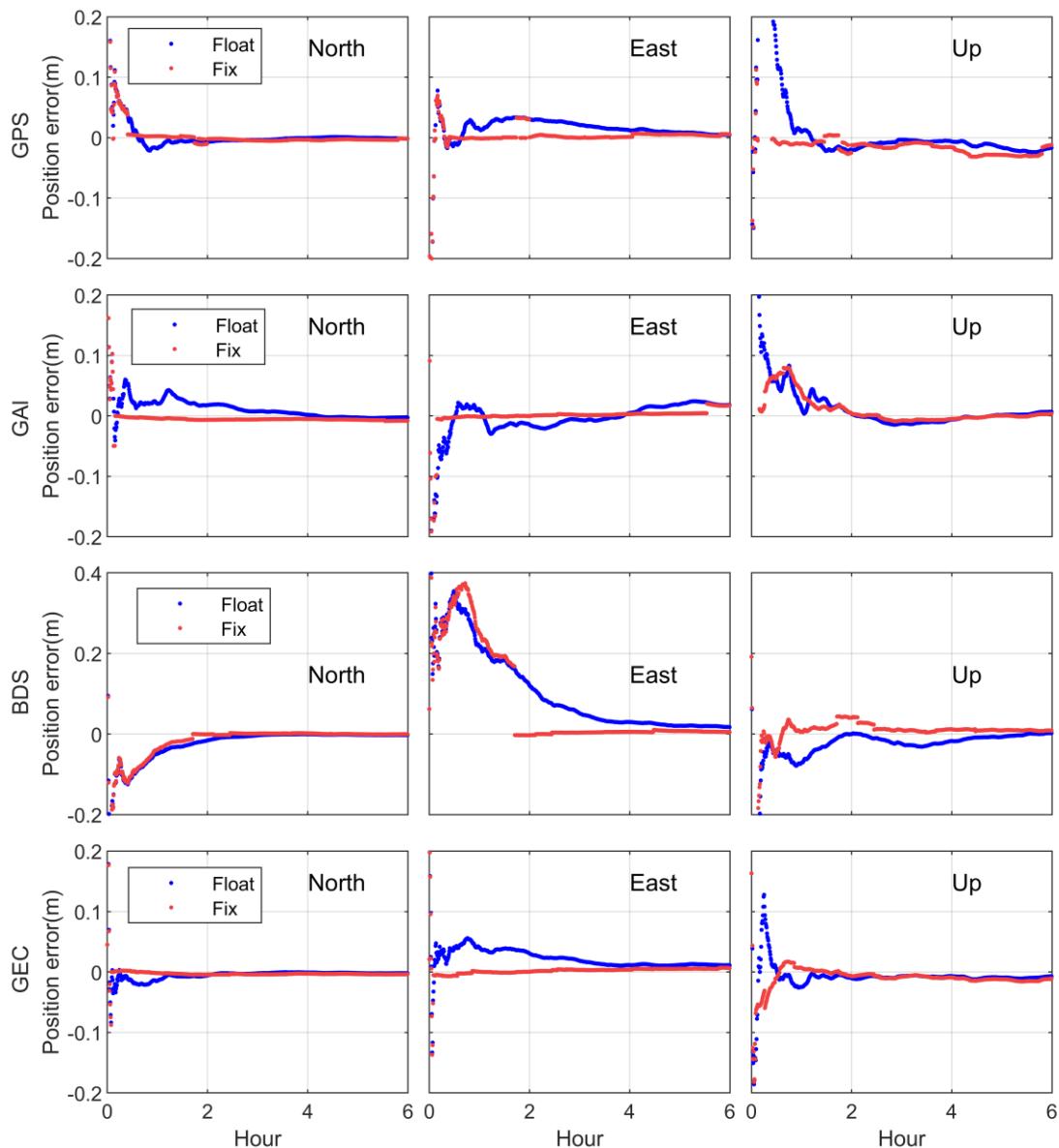


图 4-6 GPS/Galileo/BDS 静态 PPP 定位误差时序

Figure 4-6 The time series of positioning errors for GPS/Galileo/BDS static PPP

4.3.2.2 动态 PPP 验证

图 4-7 给出了不同策略下静态仿动态定位误差的时间序列，模糊度固定的动态定位收敛速度更快，收敛后定位结果的稳定性要更好。统计了每个测站 2 小时

以内三维误差收敛至 20cm 后的精度情况如表 4-3 所列, 统计表明 GPS 单系统固定解在北、东和天三个方向的动态定位精度分别提升了 24.3%、4.7% 和 3.1%, 平均收敛时间从 34.5 min 减少至 31.2 min, 收敛速度提高了 9.5%。Galileo 和 BDS 单系统的模糊度固定解的定位精度均有不同程度的提高。GPS/Galileo/BDS 三系统的固定解提升最显著, 北、东和高程三个方向分别提升了 35.6%、76.4% 和 33.4%, 平均收敛时间从 17.1 min 到 9.6 min。

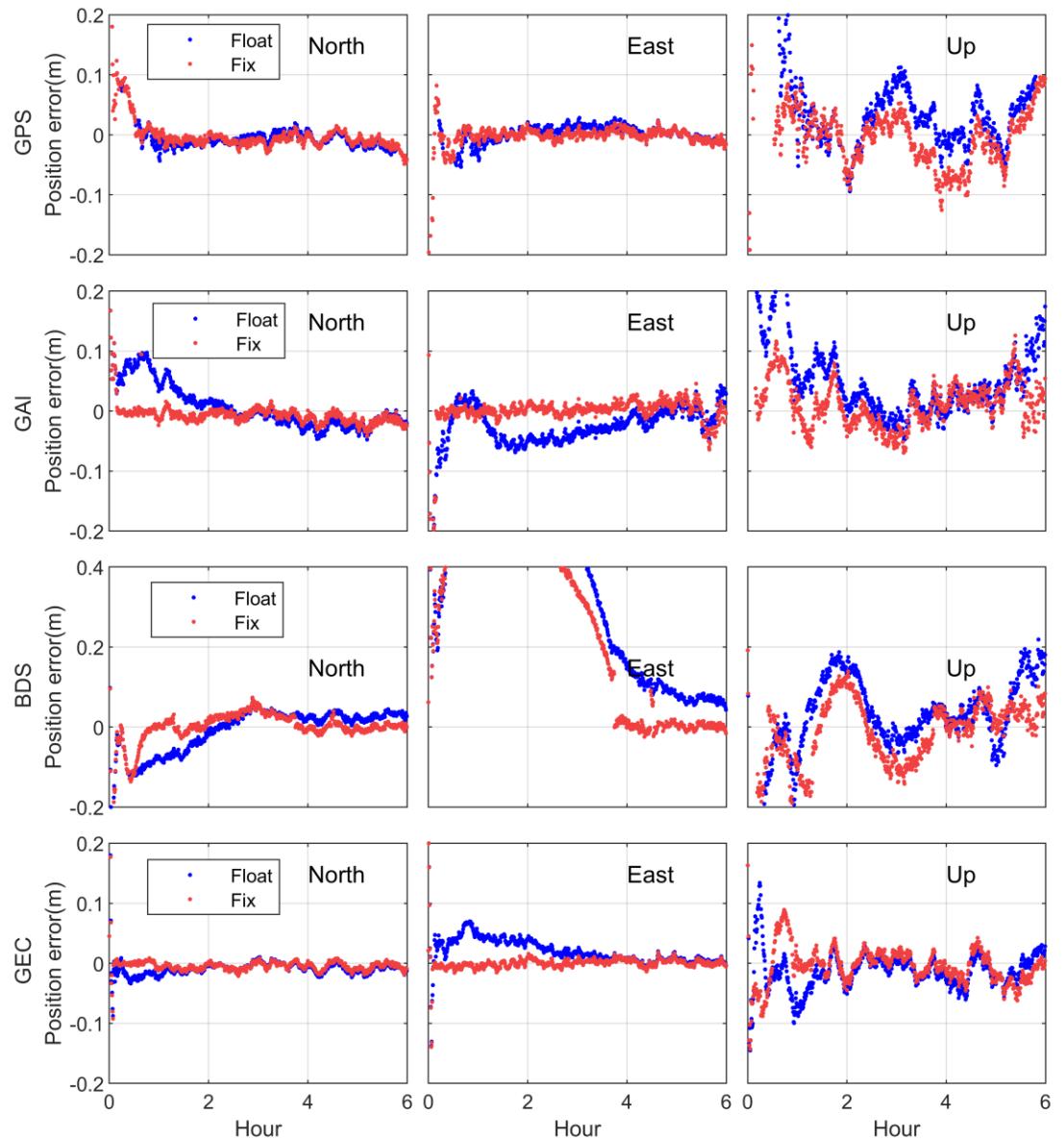


图 4-7 GPS/Galileo/BDS 动态 PPP 定位误差时序

Figure 4-7 The time series of positioning errors for GPS/Galileo/BDS kinematic PPP

表 4-3 动态 PPP 2 小时定位精度统计

Table 4-3 The accuracy of kinematic PPP

GPS	Galileo	BDS	GPS/Galileo/BDS
-----	---------	-----	-----------------

	浮点解	固定解	浮点解	固定解	浮点解	固定解	浮点解	固定解
N/cm	5.34	4.04	7.60	6.94	6.39	5.99	2.89	1.86
E/cm	7.93	7.56	6.52	5.27	11.52	8.89	5.13	1.21
U/cm	10.50	10.17	12.82	11.53	11.91	10.44	6.73	4.48

此外, 图 4-8 给出了实验期间不同测站的动态 PPP 定位从首次固定开始的模糊度固定比例, 动态 PPP 首次固定后, GPS 单系统定位的模糊度固定率约 76.1%, Galileo 和 BDS 固定率约 59.9% 和 84.6%, 不同测站的观测数据差异导致固定率差异较大。随着卫星数量的增多, 三系统的动态定位的固定解表现很稳定, 模糊度固定率为 99.3%。

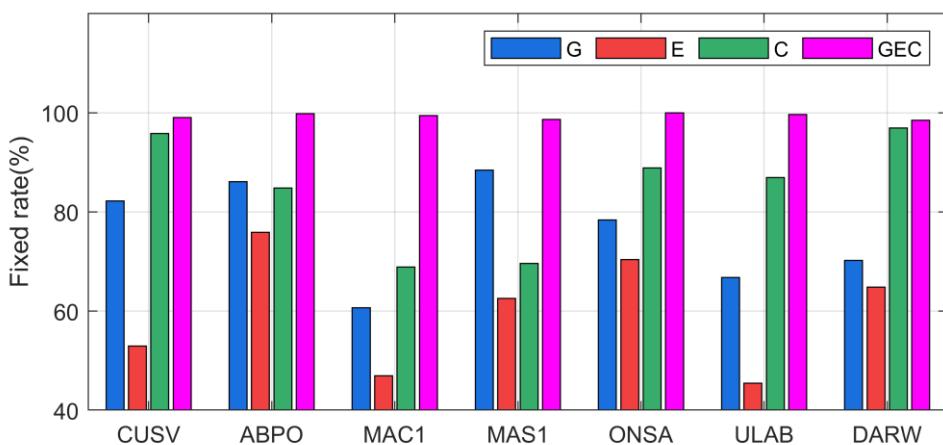


图 4-8 不同策略和测站的模糊度固定比例
Figure 4-8 The Fixed rate of ambiguity for different strategies and stations

4.4 小结

模糊度股固定技术是实现高精度定位和提高收敛速度的关键技术, 本章介绍了基于非差无电离层组合的 FCB 估计模型, 并给出了 FCB 估计的数据处理流程, 利用武汉大学的后处理轨道和钟差产品估计了相位偏差产品, 并对估计的 FCB 产品展开评估分析, 得出了一下结论:

(1) 基于后处理产品估计的 FCB 产品在天内、天与天之间的时间序列都表现较好的稳定性, 其中 GPS、Galileo 和 BDS 的宽巷 FCB 产品天内稳定性优于 0.05 周, GPS 和 Galileo 的窄巷 FCB 产品优于 0.09 周, BDS 的窄巷 FCB 产品稍差, 优于 0.161 周, 证明 BDS 的轨道和钟差产品精度要不如 GPS 和 Galileo。此外 FCB 产品的验后残差和观测值有较好的一致性。

(2) 基于非差无电离层组合算法估计的 FCB 产品展开定位验证, 结果表明本章估计的 FCB 产品有效的提高了精密定位的收敛速度和收敛精度, 其中对平面东西方向提升效果最为明显, 验证了算法的有效性。

第 5 章 顾及轨道误差的实时相位小数偏差估计算法

5.1 引言

虽然相位偏差估计和 PPP-AR 理论发展已经较为成熟, 但大多数的研究主要集中于后处理模式, 即目前发布的 FCB 产品主要基于事后高精度轨道和钟差产品。而后处理模式在估计相位偏差时通常基于高精度的轨道和钟差, 忽略了卫星轨道和钟差误差的影响, 对于使用后处理精密产品或者快速产品尚可满足需求。对于实时模式下的 FCB 估计, 目前相关的研究仍然较少, 仅有 CNES 等少数几个 IGS 机构发布了实时 FCB 产品(Loyer, 2012)。

实时窄巷 FCB 估计会吸收卫星轨道误差, 导致窄巷 FCB 的时间稳定度和残差分布变差。为解决轨道误差对 FCB 估计的影响, Wang 和 Li 等人通过将轨道误差、窄巷 FCB 以及测站对流层残差联合估计, 采用“0”约束的方式解决秩亏问题, 但由于方程参数数量及其强相关问题导致其估计的 FCB 时间稳定度反而变差, 且 FCB 产品需要比较长的收敛时间(Wang, 2014; Li et al. 2014a); Li 认为基于非差 PPP 处理的残差中吸收了轨道误差、模糊度残差以及对流层残差, 将其与窄巷模糊度分离估计, 窄巷 FCB 残差减少了 13.2%(Li, 2016)。Liu 等人利用区域观测网络, 考虑了北斗 GEO 的轨道误差的影响, 对 GEO 卫星的窄巷 FCB 和轨道误差同时估计, 对 GPS 和 BDS 双系统的定位在模糊度固定率上有显著的提升(Liu, 2018)。

但实际上随着 PPP 处理的逐渐收敛, 每颗卫星的轨道误差作为测站视向方向的各向异性误差还是会被无电离层模糊度浮点解所吸收, 因此本小节将从轨道误差对 PPP 定位影响分析入手, 提出了一种顾及轨道误差的相位偏差估计算法并基于武汉大学的实时产品进行了算法验证。

5.2 轨道误差对 PPP 的影响分析

5.2.1 轨道误差对视向的影响

轨道误差对测距的影响可以根据地心、卫星和测站之间的角度关系来表达, 而卫星的天底角与卫星的高度角的关系可近似表达为(Schmid, 2003):

$$\sin \theta = \frac{R \cdot \sin z}{r} = \frac{R \cdot \cos \alpha}{r} \quad (5-1)$$

其中 α 表示地面站观测的卫星高度角, θ 表示卫星的天底角, z 表示接收机的天顶角; R 表示地球的半径, r 表示卫星和地心之间的距离。以北斗卫星为例, GEO/IGSO 卫星轨道高度约为 35786 千米, 其卫星的天底角最大约为 8.7° ; MEO 卫星轨道高度为 21528 千米, 其卫星的天底角最大约为 13.2° 。下表给出了各卫星导航系统的卫星的天底角最大范围。

表 5-1 不同截至高度角的 GNSS 卫星的天底角最大值
Table 5-1 The nadir angle of GNSS satellites with different cut-off altitude angles

截至高度角/ 度	GPS	GLONASS	Galileo	BDS GEO/IGSO	BDS MEO
0°	14.50	12.45	13.90	8.70	13.21
30°	12.52	10.76	12.00	7.53	11.42
40°	11.06	9.50	10.60	6.66	10.09
60°	7.19	6.19	6.90	4.34	6.56

卫星轨道径向误差 dR 对测站视向方向 $d\rho$ 的影响可用公式 5-2 表达。在 30° 截止高度角时北斗 MEO 卫星轨道径向在视向方向的投影误差约为 2.0%，且考虑其与实时精密钟差的强耦合性，在应用实时产品进行精客单点定位时径向误差的视向投影影响在毫米级甚至更小。

$$d\rho = dR \cdot (1 - \cos \theta) \quad (5-2)$$

卫星切向和法向误差 dAC 对视向误差的影响可由公式 5-3 表达，在 30° 截止高度角时北斗 MEO 卫星切向和法向误差在视向方向的投影最大约为 19.8%。由第三章的结论指出，虽然实时产品的北斗卫星轨道切向误差 RMS 约为 9 cm，法向误差约为 5 cm，但实际上真实情况下北斗卫星的实时轨道误差最大值能达到 30~50 cm，法向误差最大能达到 10~15 cm。在这种情况下，切向和法向的误差投影在 30° 截止高度角可能超过窄巷 FCB 波长的半周甚至一周。即使这些误差在精客单点定位的过程中一定程度上会被模糊度参数所吸收，但仍可能导致窄巷 UPD 解算出现偏差，进而影响窄巷模糊度的固定效果。因此受实时产品轨道精度的限制，特别是实时的北斗产品，为提高实时相位小数偏差估计的精度，轨道误差的影响是不可忽略的。

$$d\rho = dAC \cdot \sin \theta = \frac{dAC \cdot R \cdot \cos \alpha}{r} \quad (5-3)$$

5.2.2 轨道误差对模糊度估值的影响分析

由 4.2 节可知，不同量级的轨道误差直接影响相位小数偏差估计的稳定性和残差，本小节对轨道误差和模糊度估值的关系展开分析。在相同的处理策略下，固定测站坐标后利用不同量级轨道误差的产品做精客单点定位试验，以武汉大学的后处理精密产品解算的模糊度参数作为参考，分析轨道误差对模糊度估值的影响。图 5-1 给出了基于不同轨道精度产品解算的模糊度差异，体现了模糊度估值的相对变化。从图中可以注意到，基于 GBM 后处理精密产品和同为精密产品的 WUM 得到的模糊度估值之间的差异较小，在短期内呈常数变化，C20 和 C32 两颗卫星在可视弧段内的模糊度估值差异变化均少于 2 cm。然而基于 CNES 实时产品的模糊度估值波动较为明显，C20 和 C32 在观测弧段内模糊度估值相比于 WUM 解算的模糊度变化了接近 6 cm。由此可见，受轨道误差的影响，基于实时

产品 PPP 处理时模糊度参数需要一定的收敛时间, 一个观测弧段内接近 0.6 周的观测量变化是实时相位偏差产品时间序列稳定性差的主要原因之一。

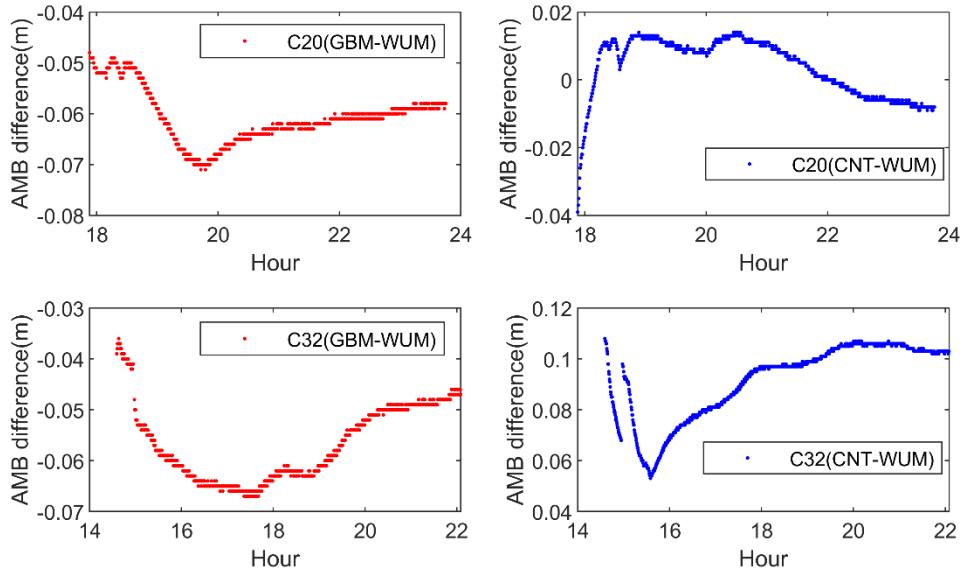


图 5-1 不同轨道精度产品的模糊度估值差异

Figure 5-1 The difference in ambiguity by using different orbital accuracy products

图 5-2 给出了基于实时产品的无电离层模糊度估值和高度角的变化关系。从图中可以看出, 在卫星可视范围内不同测站的无电离层模糊度估值都不是一个常数, 而是随卫星高度角发生较为稳定的连续变化, 估值浮动可能超过 20cm, 而我们可以将这部分波动认为是受模糊度参数的收敛和轨道误差的影响。在实时相位小数偏差计算时, 这部分波动会一定程度上被卫星和接收机的相位偏差所吸收, 进而影响到相位偏差估计的准确性。此外, 无电离层模糊度估值在经过最高高度角前后有显著的趋势特征, 在测站可视开始到最高高度角的过程中, 模糊度参数收敛的同时还受轨道误差和噪声的影响, 模糊度估值的波动比较明显; 而在经过高度最高点后, 模糊度的变化变得相对平滑, 但此时轨道误差的影响还在, 且模糊度估值变化仍可能超过 10 cm, 大于窄巷波长。因此可以认为, 无电离层模糊度估值精度与模糊度的收敛程度正相关, 实时相位偏差估计的权重模型依据 PPP 的协因数矩阵定权更为合理。同时当卫星相对于测站处于上升期, 且高度角小于 40° 的观测值应该给予进一步降权, 保证卫星窄巷偏差估计的准确性。

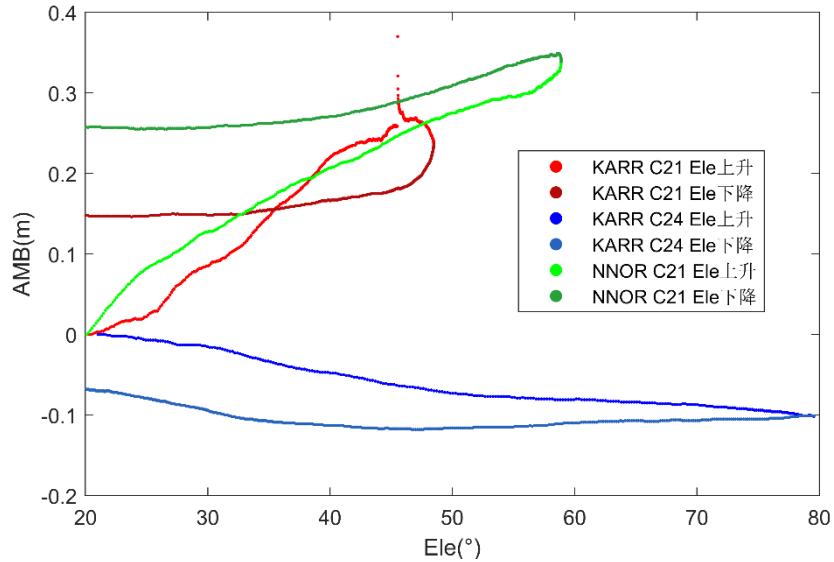


图 5-2 无电离层模糊度估值和高度角的关系

Figure 5-2 The relationship between ionospheric-free ambiguity and altitude angle

5.3 顾及轨道误差的 FCB 产品评估

5.3.1 顾及轨道误差的 FCB 估计算法

基于以上分析可知, 利用实时产品估计相位小数偏差时, 轨道误差的影响无法完全忽略, 本文提出了一种顾及轨道误差的实时相位偏差估计算法。在 PPP 处理无电离层模糊度和宽巷的估计方式不变, 此时轨道误差被窄巷模糊度浮点解吸收, 因此顾及轨道误差的窄巷 FCB 观测方程可列为:

$$\begin{aligned} \lambda_{NL} \bar{N}_{NL}^S &= \lambda_{IF}^S \bar{N}_{IF}^S - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \bar{N}_{WL}^S \\ &= \lambda_{NL} (b_{r,NL}^S - b_{NL}^S) + \lambda_{NL} N_{NL}^S + d_{r,orb}^S \end{aligned} \quad (5-4)$$

根据卫星和接收机的向量关系, 轨道误差 $d_{r,orb}^S$ 在地心地固坐标系下可以列为:

$$d_{r,orb}^S = l_r^S \cdot \Delta x^S + m_r^S \cdot \Delta y^S + n_r^S \cdot \Delta z^S \quad (5-5)$$

式中, (l_r^S, m_r^S, n_r^S) 是测站和接收机位置的方向向量, $(\Delta x^S, \Delta y^S, \Delta z^S)$ 表示卫星轨道在地心地固坐标系的坐标误差。

由于轨道和实时钟差的“互补”关系, 卫星轨道径向误差基本被实时钟差所吸收, 因此实际对模糊度估值影响更大是轨道切向和法向误差, 因此轨道径向误差可以忽略不计, 根据地心地固坐标系和卫星轨道坐标系的转换关系, 轨道误差 $d_{r,orb}^S$ 又可以写成:

$$d_{r,orb}^S = \begin{bmatrix} l_r^S & m_r^S & n_r^S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{radial}^S \\ \mathbf{e}_{along}^S \\ \mathbf{e}_{cross}^S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta A^S \\ \Delta C^S \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

其中, ΔA^S 表示卫星轨道切向误差, ΔC^S 为卫星轨道的法向误差。此时窄巷 FCB 观测方程需要估计的参数轨道切向误差、轨道法向误差、卫星窄巷 FCB 以及接收机 FCB 四个参数。

在考虑卫星和接收机相位偏差基准的条件下法方程仍存在奇异问题, 因此我们根据实际的轨道误差量级引入虚拟观测方程约束轨道参数。此外轨道误差是随时间缓慢变化, 在实时卡尔曼滤波估计窄巷 FCB 时, 时间状态转移矩阵更新时, 需要给估计的轨道参数增加随机游走以保证参数估计的准确性。更为细节的问题在于, 目前实时轨道产品均采用定轨-预报的模式, 在切换轨道过程中衔接点跳变是不可避免的, 特别对于北斗卫星的实时轨道精度较差, 其跳变的量级也要比 GPS 和 Galileo 卫星要高的多, 因此在已知更新预报轨道的时间和跳变大小时, 为模糊度或轨道随机游走参数增加动态调整, 避免在更新卫星轨道时窄巷 FCB 发生跳变导致整周数取错。

基于实时产品估计的轨道改正数和 FCB 产品一起播发给用户使用, 基于星间单差的实现精客单点定位的模糊度固定。

5.4 顾及轨道误差的 FCB 产品质量评估

第三章中我们评估了现有的实时产品轨道和钟差质量情况, 本节我们将采用 WHU 的实时轨道和钟差估计 FCB 产品。值得注意的是, 现今 GNSS 实时轨道产品中普遍表现为 GPS 精度最优, BDS 相对较差, 因此本节的试验策略为使用 GPS/BDS 双系统做参数估计, 在一定程度上加速与测站相关的对流层参数收敛速度和收敛精度, 保证轨道误差和 FCB 的准确性。对第四章的非差 FCB 估计算法和本章提出的顾及轨道误差 FCB 估计算法结果进行对比分析, 下文将分别以方案一和方案二描述两种算法的 PPP 定位结果, 然后分别从时间稳定度、残差分布以及模糊度固定效果三个方面展开评估。

5.4.1 时间稳定度

以 2022 年 DOY 24 的 FCB 结果为例, 首先 DOY 24 天的 WHU 实时北斗卫星轨道的切向和法向误差的均方根误差和 95% 分位数在图 5-3 中列出。从图中可以看出, WHU 实时产品的 BDS 轨道的法向误差均方根误差优于 5.4cm, 95% 分位的法向误差在 10cm 左右, 因此法向误差的影响相对较小。而 MEO 卫星轨道切向误差均方根误差大约为 8.9 cm, 95% 的切向误差达到 17.8 cm, 个别卫星轨道切向误差最大为 30.6 cm, 由 30°高度角计算, 切向轨道误差的投影误差最大可

达 5cm 以上，也就是理论上可以对窄巷模糊度浮点解产生 0.5 周的影响。

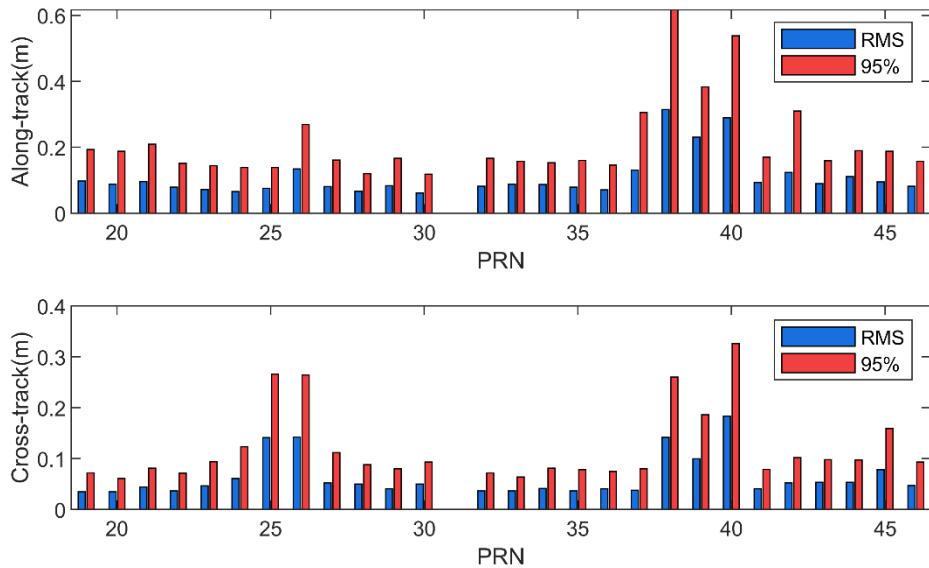


图 5-3 DOY24 WHU 实时产品轨道切向和法向误差

Figure 5-3 The along-track and cross-track errors of WHU real-time product

下图给出了非差无电离层组合算法估计 FCB 和顾及轨道误差估计窄巷 FCB 的稳定性。基于 WHU 实时产品，方案一和方案二的 BDS 窄巷 FCB 时间序列稳定性相当，窄巷 FCB 稳定性约为 0.20 周，但方案二中大多数卫星的窄巷 FCB 稳定性要稍好于方案一。

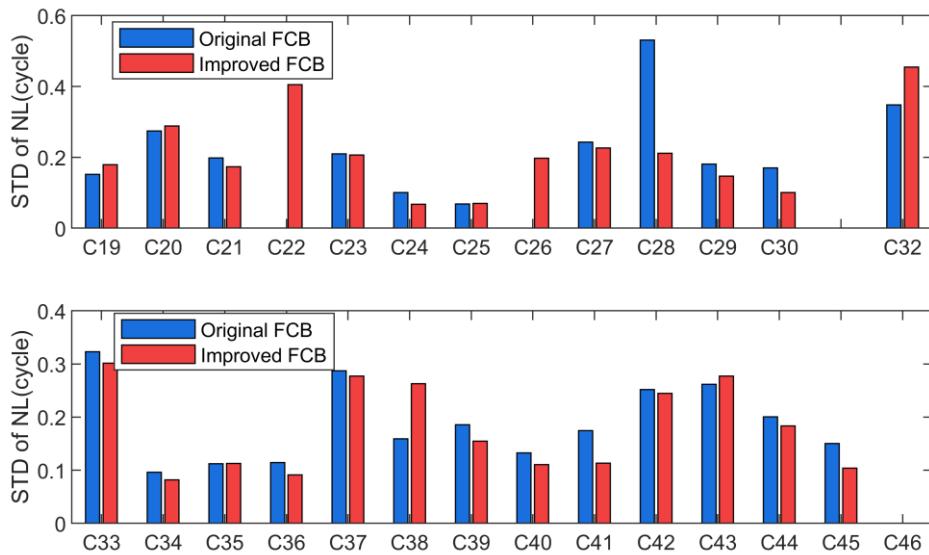


图 5-4 原始 FCB 和顾及轨道误差估计的窄巷 FCB 稳定性

Figure 5-4 The STD of original FCB and improved FCB

5.4.2 残差分布特征

图 5-5 给出了两种方案计算的 FCB 参数验后残差分布情况。方案一的窄巷

模糊度残差均方根误差约为 0.101 周, 方案二的窄巷模糊度残差均方根误差约为 0.087 周, 方案二的顾及轨道误差 FCB 估计算法残差水平降低了 13.86%。方案一的估计结果大约有 44.23% 的残差分布在 0.05 周以内, 顾及轨道误差的 FCB 算法有 59.46% 的残差分布在 0.05 周以内; 方案一有 86.81% 的窄巷模糊度残差在 0.15 周以内, 而方案二的窄巷残差在 0.15 周以内的比例约占 91.29%。从残差水平分布上看, 本文提出的顾及轨道误差的 FCB 估计算法利用切向和法向误差在一定程度上分离了无电离层模糊度吸收的轨道误差部分。

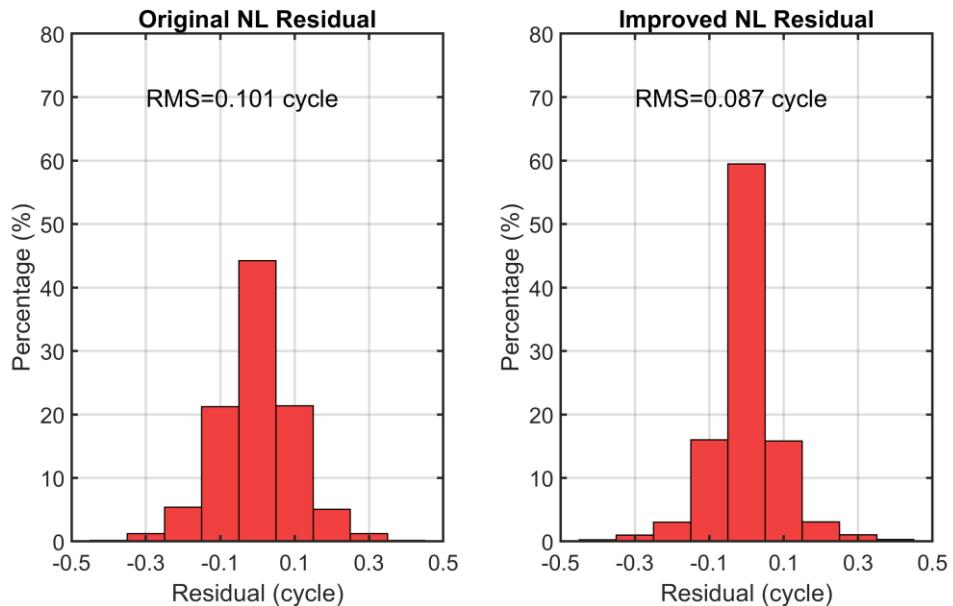


图 5-5 两种方案 FCB 估计算法的验后残差分布

Figure 5-5 The NL residual of original FCB and improved FCB

5.4.3 模糊度固定验证

图 5-6 给出了 GAMG 站分别使用两种方案估计的 FCB 产品进行静态 PPP 前两个小时的定位误差时间序列。由于两种估计算法的差异仅在于是否考虑轨道误差的影响, 因此基于两种方案估计的 FCB 产品在应用定位时的误差变化趋势是一致的, 但顾及轨道误差的 FCB 产品定位的首次固定时间更早。受实时轨道和钟差的精度影响, 静态 PPP 定位出现了明显的模糊度固定错误的情况发生。显然顾及轨道误差的方案二模糊度固定成功率优于方案一, 特别是在达到收敛精度之前的其固定错误的概率更低。此外图 5-7 中列出了多个测站 1 小时的静态 PPP 定位收敛精度情况, 基于方案二的 FCB 产品的收敛精度在北、东和天三个方向普遍优于方案一的定位结果。基于方案一的 FCB 产品静态 PPP 收敛 1 小时三个方向分别平均能够达到 2.18 cm、4.91 cm 和 5.05 cm, 基于方案二的 FCB 产品收敛 1 小时三个方向分别达到了 2.18 cm、4.51 cm 和 4.73 cm, 在三个方向上分别提升了 0%、8.2% 和 6.3%。

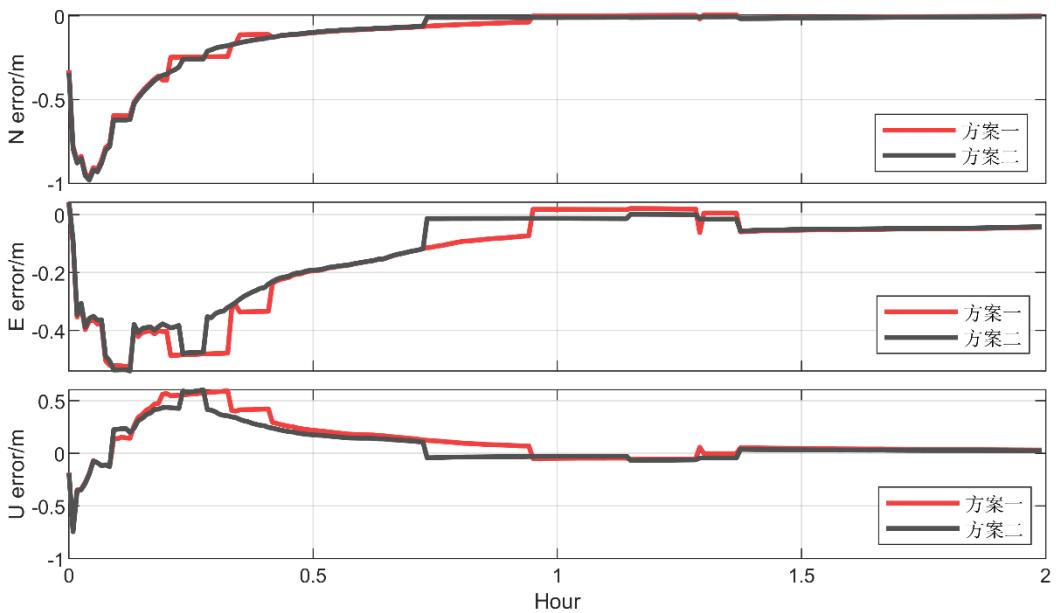


图 5-6 GAMG 测站静态 PPP 定位误差时间序列
Figure 5-6 The time series of positioning errors for static PPP

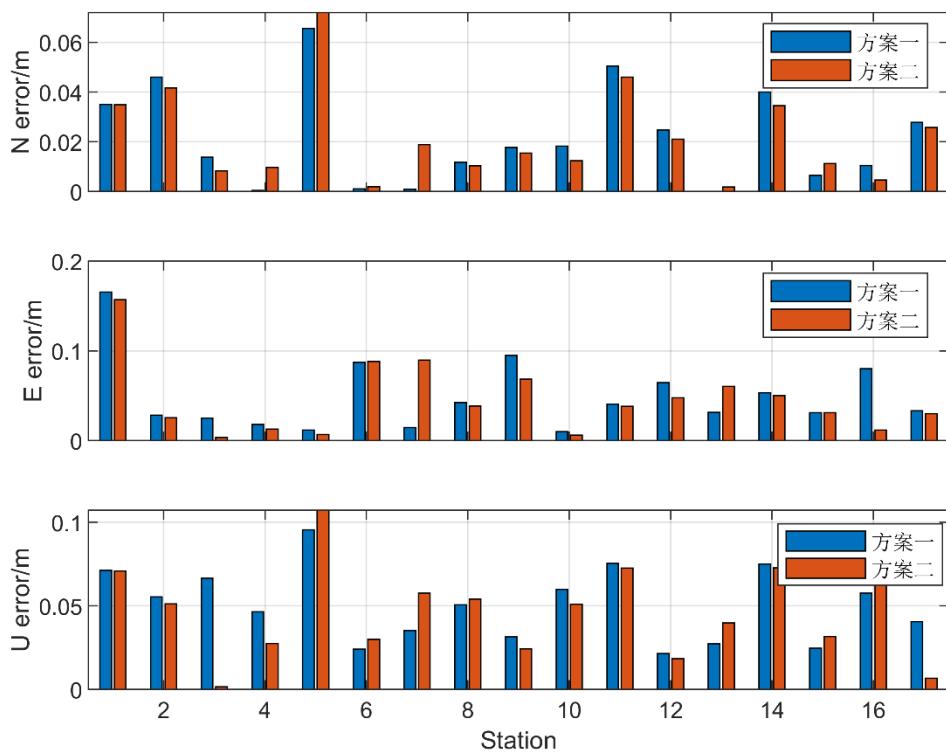


图 5-7 不同测站静态 PPP 定位 1 小时的收敛精度
Figure 5-7 The accuracy of hourly static PPP for different stations

对于动态 PPP 定位，两种 FCB 产品在定位误差的时间序列上的结论和静态 PPP 一致。顾及轨道误差的 FCB 产品在实时定位应用时，优势在于初始收敛的过程中，在 PPP 定位收敛以后的区分不大。因此图 5-8 给出了动态 PPP 定位的 1 小时三个方向定位误差的统计结果。整体而言，方案一动态 PPP 定位在 1 小时

三个方向的收敛精度约为 3.88 cm、7.18 cm 和 9.63 cm, 方案二 1 小时的动态 PPP 在三个方向的收敛精度分别为 3.27 cm、6.38 cm 和 8.0 cm, 分别提升了 15.7%、11.1% 和 16.9%。相比于静态 PPP 的结果, 顾及轨道误差的 FCB 产品在动态定位应用效果更显著。

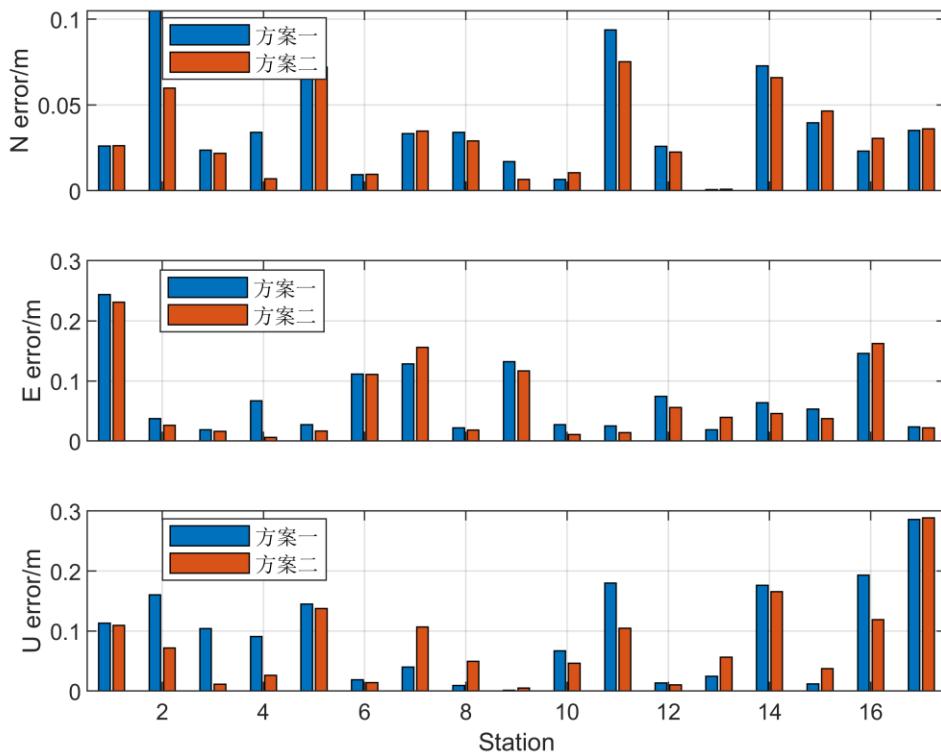


图 5-8 不同测站动态 PPP 定位 1 小时的收敛精度
Figure 5-8 The accuracy of hourly kinematic PPP for different stations

5.5 小结

本章对轨道误差对精密单点定位处理的视向距离和模糊度估值的影响展开分析, 轨道径向误差大约 98% 左右可以被钟差和模糊度吸收, 而切向和法向则由于各向异性的投影差异导致会有最大 19.8% 的投影误差, 因此基于实时轨道估计 FCB 产品时, 轨道误差是不可忽略的。

考虑到实时产品轨道误差的量级对 FCB 估计的影响, 本文提出了一种顾及轨道误差的实时相位偏差产品估计算法, 并对算法的有效性做了评估验证。结果表明, 顾及轨道误差的 FCB 产品的时间稳定性与非差无电离层组合 FCB 估计结果相当, 但残差部分有轨道切向和法向所吸收, 窄巷模糊度残差降低了 13.86%。窄巷模糊度的残差分布更接近于 0 分布。此外分别利用静态和动态 PPP 验证了新算法计算的 FCB 产品, 在初始收敛过程中, 顾及轨道误差的产品性能表现更好。相比于非差无电离层组合的 FCB 估计算法, 顾及轨道误差的 FCB 产品在 1

小时的静态 PPP 收敛条件下在三个方向上分别提升了 0%、8.2% 和 6.3%；动态 PPP 定位在三个方向上收敛分别提升了 15.7%、11.1% 和 16.9%。

第 6 章 基于北斗短报文通信的时空服务平台

北斗短报文通讯业务是北斗导航系统的特色服务之一,区别于其他卫星导航系统,为 RDSS 用户提供位置报告、应急搜救和报文通信三类基本业务。相比于北斗二号区域卫星导航系统,北斗三号卫星导航系统对其短报文特色服务做了进一步升级,拓宽了区域报文通讯的容量,并且从区域通讯扩展到全球范围。随着北斗卫星导航事业的发展,北斗系统短报文通讯业务已广泛应用于交通运输、海洋渔业、防灾救灾、林业和电力等领域(宋漆, 2022; 李静, 2022)。

6.1 北斗全球短报文概述

6.1.1 北斗短报文业务介绍

北斗三号卫星全球短报文系统的报文通信业务提供端对端的双向报文通信、组播和广播通信三种模式(Yang, 2021)。一般来说,作为普通型用户仅支持双向通信,而授权用户或指挥型接收机可使用组播和广播通信业务。北斗二号普通型用户单条短报文长度不超过 628 比特(BD420007-2015, 2015),而北斗三号实现了 MEO 卫星全球覆盖,又有星间链路互通互联的优势,将北斗特有的短报文业务由区域拓展到全球,其中 14 颗 MEO 卫星和 3 颗 GEO 卫星具备短报文上行接入能力,能够实现全球范围内的 2 重覆盖。北斗三号的全球短报文业务单条报文长度不超过 40 个汉字,即 560 比特;区域短报文单次报文长度不超过 1000 个汉字,即 14000 比特(蔡洪亮, 2021)。而普通型短报文用户的上行发送频度最快仍为 1 分钟。

现今实时精密定位服务主要通过地面网络或者卫星播发,其中 IGS-RTS 服务基于 RTCM 标准协议规定的播发频度最快为 5 秒,播发速率超过每秒 1000 bit。QZSS 系统为日本及周边区域提供厘米级的高精度实时定位增强服务 (CLAS),采用自定义的数据格式,同时支持 PPP-RTK 和 PPP-AR 服务,传输速率达到 2000 bps(IS-QZSS-L6-005, 2022)。但全球范围仍有部分地区如海洋、荒漠无人区或偏远山区等受环境或经济条件约束无法实现通讯网络的全覆盖。而这些地区面临应急救援、地质灾害监测等问题上,有高精度定位的需求却缺乏相应的通讯能力。北斗三号的全球短报文为此提供了数据传输手段,本章即在此基础上设计基于北斗短报文通讯的时空服务平台,实现北斗短报文和 GNSS 终端结合的精密差分定位平台,服务模式如图 6-1 所示,满足在无互联网、无通讯卫星条件下的全球精密单点定位需求。然而相比于网络或卫星传输,基于北斗短报文实现精密差分改正数的播发面临更多的资源限制,因此基于北斗全球短报文通讯的时空服务平台主要需要解决在有限的资源和播发频度的限制下,如何保证高精度定位的精度、

连续性和稳定性。

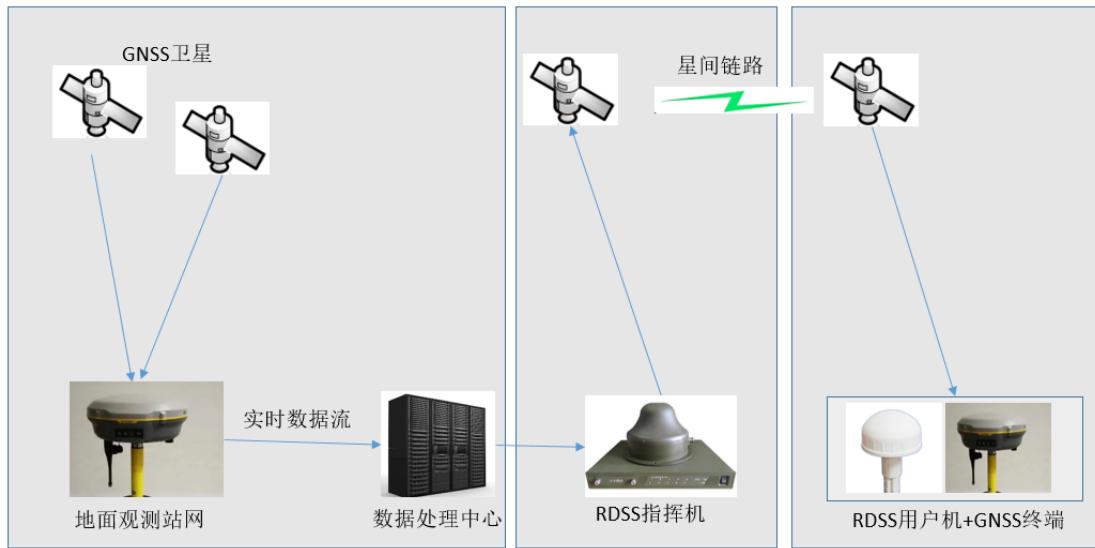


图 6-1 基于北斗全球短报文的时空服务平台服务模式

Figure 6-1 The service mode of positioning, navigation, and timing services platform

6.1.2 北斗短报文通信质量评估

本节对北斗短报文通信质量展开评估, 以 1 分钟的发射频度连续发送 24 小时北斗短报文信息, 每条短报文的信息容量均超过 480 bit, 在服务端和用户终端分别记录收发信息和时间标识用于统计通信质量。

通信时延

图 6-2 给出了 2023 年 DOY 64 天的北斗短报文在中国区域范围内的信息传输延迟情况。北斗短报文传输时延普遍低于单条短报文的播发频度, 其中传输延迟最大约 50 秒, 最短的传输时延约 2 秒, 传输时延优于 10 秒的比例约占 88.52%。

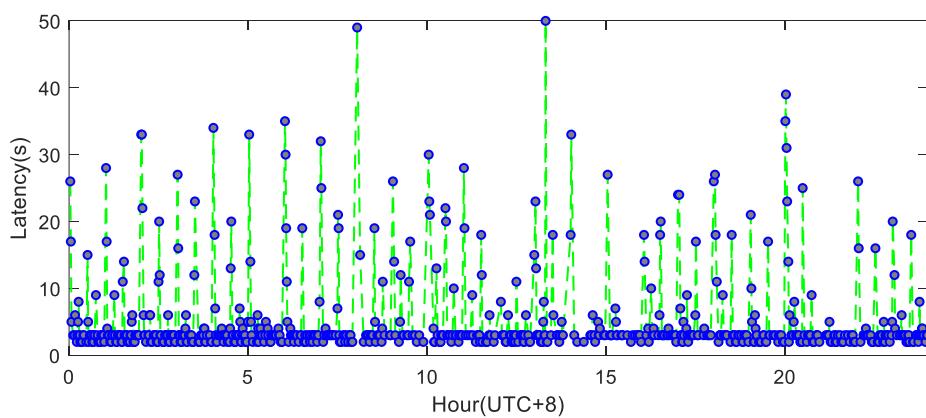


图 6-2 北斗短报文的信息传输时延

Figure 6-2 The transmission latency of BDS short message

丢包率

对每小时短报文接收的报文数量进行统计, 图 6-3 分别给出了 2023 年年积日 62 天和 64 天的北斗短报文数据统计情况, 时间横轴采用北京时间表示。从图

中可以明显看出在北京时间的 9 点到 17 点之间短报文的数据丢失情况显著高于其他时段，这可能与北斗短报文用户在线的数量和使用频度有关。测试过程中北斗短报文每小时共发送 60 条报文信息，成功接收到的短报文数量最多为 48 条，最少为 16 条；整体上来说北斗短报文的丢包率约为 36.35%；经核对，丢包的数据大部分可能由于卫星存在一定的转发处理负荷，数据丢失主要发生在卫星接收并转发回北斗地面运控的过程。

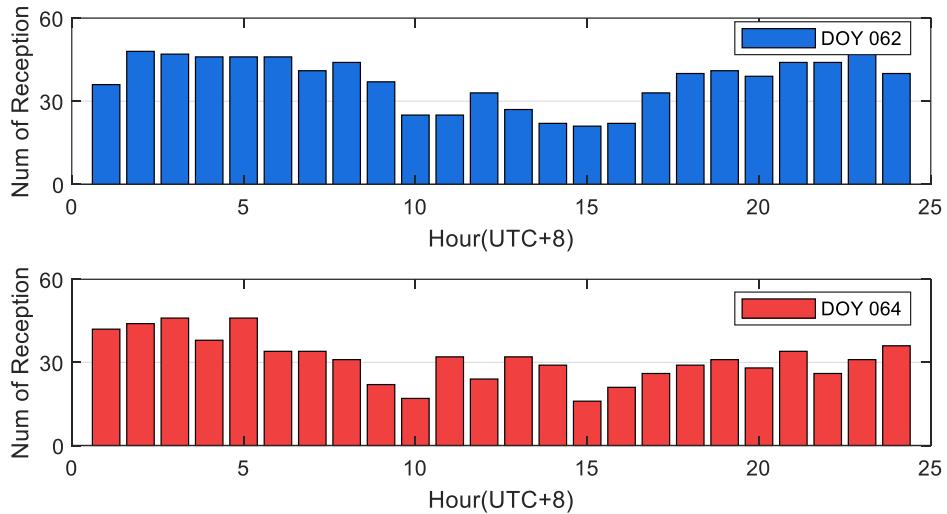


图 6-3 北斗短报文用户端接收的报文数量

Figure 6-3 The number of received messages

由于数据丢包频度相对较高，考虑到精密差分改正数的时效性，图 6-4 统计了相邻两组精密差分改正数的接收时间间隔。其中接收时间间隔差异在 1 分钟以内的约占 44.67%，相邻两组短报文的接收时间间隔在 5 分钟以内约占 96.18%，但仍有少量数据长达 10 分钟一直无法获取新的数据信息。

误码率

误码率是衡量数据传输正确性的基本指标。将本地记录的报文信息和回收解码的信息进行二进制码比对。试验期间北斗区域短报文单条短报文误码率最高约 48.97%，24 小时的整体误码率约为 5.60%，其中单条短报文误码率超过 30% 的数量约占 10.67%。

由于实验地点和设备的局限性，仅测试了北斗区域短报文，无法获取星间链路传输的短报文通信性能。一般来说，报文通信经过星间链路的传输时延大约在 3 秒至 20 秒之间。但已有的评估表明由于发送频度的约束，通信时延的影响会明显小于丢包率的影响。

因此基于北斗全球短报文作为通信手段播发实时精密差分信息的关键问题可以划分为三类，如图 6-5 所示。其中精密差分产品的精度作为服务端的固有误差存在，一定程度上只能通过提高服务系统的稳定性和实时性，从算法层面提高

服务端产品计算的模型精度,保证服务端提供的精密差分产品的精度水平;其次,北斗短报文的播发频度约束、数据传输时间延迟和通信的丢包等情况会导致精密差分产品的外推预报误差,特别对于连续丢包的情况下,大多数精密差分产品在5分钟内才能收到,也就是服务端的精密产品要顾及长时间无法获取最近的改正产品时,如何保证高精度定位的连续性和稳定性;最后是通信误码的概率要求基于北斗短报文通信需要有对数据编码的验证手段,确保使用的改正数信息是准确无误的。综上所述基于北斗全球短报文通信的时空服务平台编码设计重点考虑丢包率和误码率对精密度单点定位服务带来的精度衰减。

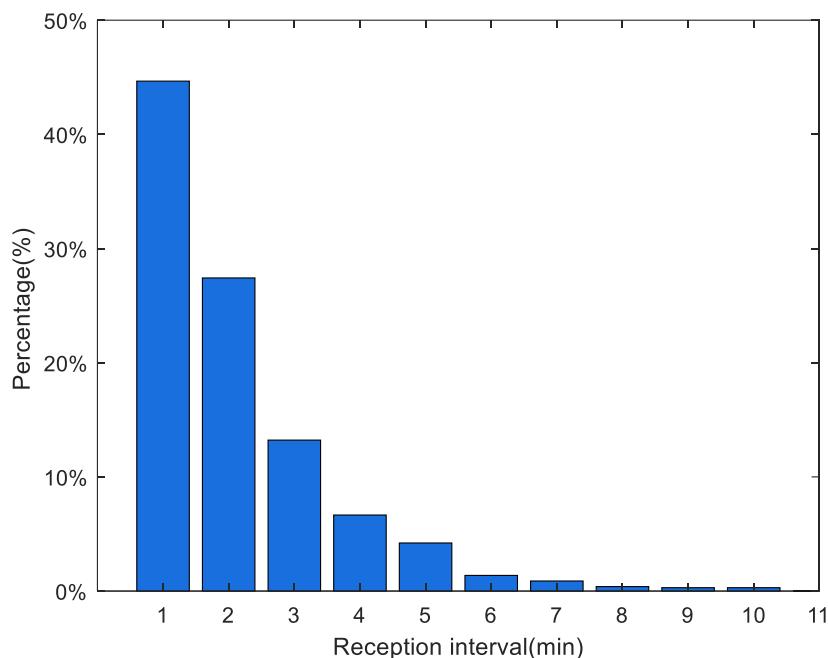


图 6-4 接收时间间隔百分比统计

Figure 6-4 The time interval between two messages

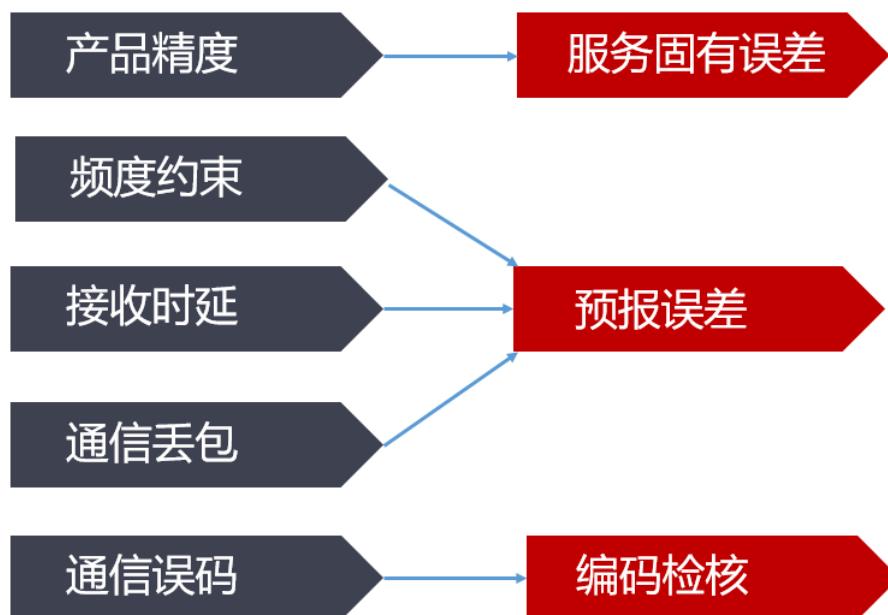


图 6-5 基于北斗全球短报文的时空服务平台约束

Figure 6-5 Constraints of PNT platform based on Beidou short message

6.2 基于北斗短报文通信的编码设计

虽然一台指挥型短报文终端最多能够安置 64 张 IC 卡(Li et al. 2019)，但考虑经济成本仍需设计单卡或少量的 IC 卡实现精密差分改正数的传输方案，首先可以利用短报文终端的位置报告功能。用户的短报文终端通过位置查询请求功能获取用户接收机的概略位置，再将该位置和卫星系统信息发送给服务端；服务端按用户端的概略位置确定用户端可见的卫星，将这些卫星的精密差分改正信息编码并发送给用户端，进而实现高精度的精密单点定位。其次就是要设计合理的编码策略。

6.2.1 用户端的信息编码

用户端编码的信息功能是向服务端发送概略位置并请求服务，其信息编码主要包括历元时刻、接收机概略坐标、卫星系统以及服务请求标识等。考虑到丢包和误码率的情况可能发生，在设计用户端的编码时增加了 4 个奇偶校验位用于验证信息的正确性，保证服务端能正确的识别用户机位置。短报文的电文长度固定，实际上在之前的试验中我们发现当误码发生时，错误比特位后面的二进制信息会全部转化为 0，依此设计了奇偶校验位，校验位占用 2bit，其中第一个比特固定设置为 1，若解码时该位置不为 1 即可认为发生了丢包或误码，该段信息无效；其次再利用第二个比特的奇校验验证数据的正确性。后续章节的奇偶校验位均采用才算法，不再一一说明。在用户端的请求协议中增加了服务协议类型，方便服务端提供多种协议类型为不同需求的用户提供专用编码服务。本文的设计中用户端信息编码需要 72bit，信息编码的详细策略如表 6-1 所示：

协议：方便特定类型用户端应用精密差分定位的需求，形成一对一的服务模式，用户端需通知服务端自己的报文协议类型。

定位请求：同于控制用户端是请求精密定位还是停止精密定位，避免浪费服务端的 IC 卡资源。若长时间未收到用户端发来的请求，服务端同样会终止北斗短报文的通信链路。

卫星系统掩码：用户端需表明自身具备支持哪些卫星导航系统

经度、纬度和高程：用户端通过北斗 RNSS 模式获取的自身概略位置，方便服务端筛选卫星。

报文信息头	72 bit										
	协议信息 2bit	定位请求 1bit	系统掩码 3bit	奇偶校验位 2bit	经度 22bit	奇偶校验位 2bit	纬度 22bit	奇偶校验位 2bit	纬度 22bit	奇偶校验位 2bit	报文尾校验

图 6-6 用户端信息编排
Figure 6-6 User information orchestration

表 6-1 用户端北斗短报文信息编码参数说明

Table 6-1 The encoding strategies of BDS short message for user

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	说明
1	协议	2	无	0/1	-	-	选择约定的精密差分编码协议 0:取消改正数播发请求; 1:请求精密差分改正数
2	定位请求	1	无	0/1	-	-	
3	卫星系统掩码	3	无	0/1	-	-	0:不使用 1:使用; GPS/Galileo/BDS3 分别占用 1 bit
4	奇偶校验位	2	无	-	-	-	比特位 0 固定为 1; 比特位 1 是从“协议”到前置比特位的奇校验值
5	经度	22	有	± 180	0.0001	度	用户概略位置
6	奇偶校验位	2	无	-	-	-	同参数 4
7	纬度	21	有	± 90	0.0001	度	用户概略位置
8	奇偶校验位	2	无	-	-	-	同参数 4
9	高程	15	有	± 16383	1.0	米	用户概略位置
10	奇偶校验位	2	无	-	-	-	同参数 4

6.2.2 基于原始 SSR 的信息编码

6.2.2.1 编码设计

与 IGS 播发的实时精密差分改正数的方式类似, 利用北斗全球短报文播发基于广播星历轨道和钟差的实时钟差、径向、切向和法向改正数, 其生成方式与实时 SSR 改正数生成算法一致。精密差分改正数的信息公共部分编码如图 6-5 所示:



图 6-7 基于原始 SSR 的信息头部编排
Figure 6-7 The header struct for original SSR encoding strategies

其中报文信息头是短报文协议所规定的字段, 包括起始标识、报文帧长、发送方地址、信息类别、收方地址等信息。报文信息头后面就是用户所使用的通信内容, 该部分最大可用 560bit。为了节省信息资源, 精密改正数的参考时刻和星历的 TOE 参考时刻分别使用每 2 小时的分钟计数和每天内的 10 分钟计数表示。基于以上编码最多可以编排 12 颗可见卫星, 详细的编码参数说明如表 6-2 所示:

表 6-2 基于原始 SSR 的信息头部编码说明
Table 6-2 The header encoding strategies for the original SSR

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	参数说明
1	协议	2	无	0-3	-	-	选择约定的精密差分编码协议
2	卫星系统掩码	3	无	0/1	-	-	0:不使用 1:使用; GPS/Galileo/BDS3 分别占用 1 bit
3	参考时刻	7	无	0-119	1	分钟	周期内的分钟计数, 周期为 2 小时
4	卫星掩码	36	无	0/1	-	-	卫星掩码, 北斗卫星仅播发 IGSO/MEO, 且 C19 在第一个比特位
5	星历 TOE 时刻	8	无	0-1439	10	分钟	以 10 分钟为基础单位的周期内计 数, 周期为 1 天

接下来是每一颗卫星的精密改正数的信息编排方式, 以下给出了两种信息编码方案:

方案一: 直接将卫星各项改正数编码, 此方案每个卫星需要 45bit, 单条短报文最多编排 11 颗卫星。具体的编码方案见表 6-3 所示。

方案二: 由第四章可知, 卫星径向误差对视向的影响最大不超过 3%, 因此采用径向误差和钟差误差的差值及其变化率作为编码参数, 具体的编码方案见表 6-4 所示, 该方案最多可以编排 12 颗卫星。

表 6-3 基于原始 SSR 的信息编码方案一

Table 6-3 The satellites encoding strategies for the first original SSR

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	参数说明
1	钟差改正数	13	有	± 40.95	0.01	米	历元参考时刻钟差改正
3	径向改正数	10	有	± 5.11	0.01	米	历元参考时刻轨道径向改正
4	切向改正数	10	有	± 10.22	0.02	米	历元参考时刻轨道切向改正
5	法向改正数	10	有	± 10.22	0.02	米	历元参考时刻轨道法向改正
6	奇偶校验位	2	无	-	-	-	

表 6-4 基于原始 SSR 的信息编码方案二

Table 6-4 The satellites encoding strategies for the second original SSR

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	参数说明
1	$dClk - dR$	13	有	± 40.95	0.01	米	参考时刻径向等效误差
2	ΔdR	7	有	± 0.063	0.001	厘米	参考时刻径向等效误差的变化率
3	切向改正数	10	有	± 10.22	0.02	米	历元参考时刻轨道切向改正
4	法向改正数	10	有	± 10.22	0.02	米	历元参考时刻轨道法向改正
5	奇偶校验位	2	无	-	-	-	

需要注意的是, 由于精密钟差改正数是基于 B1B3 无电离层组合频点, 因此播发的钟差改正数实际上包含了 DCB 的差异, 导致钟差相关的编码数据有效范围远高于轨道改正数的编码, 若用户端适配基于 B1B3 无电离层组合的精密差分改正数算法, 每颗卫星还可额外节省 3 比特。

6.2.2.2 参数精度衰减分析

每颗卫星的精密差分改正参数使用前都需进行一次奇偶校验, 以此保证使用

的精密差分改正数的正确性。但当某些卫星的奇偶校验未通过, 上一个历元获取的改正数将被延续使用, 这就面临在 2 分钟甚至更长的时间间隔下精密差分改正信息的精度衰减问题。卫星轨道的误差变化相对缓慢, 且切向和法向误差对距离测量的影响更小。因此综合考虑方案一和方案二, 以参考历元的精密差分改正数作为真值, 统计径向和钟差的综合误差的精度衰减情况。图 6-6 给出了 2023 年 3 月 4 日在不同的时间延迟下实时精密差分改正数的综合精度衰减情况。

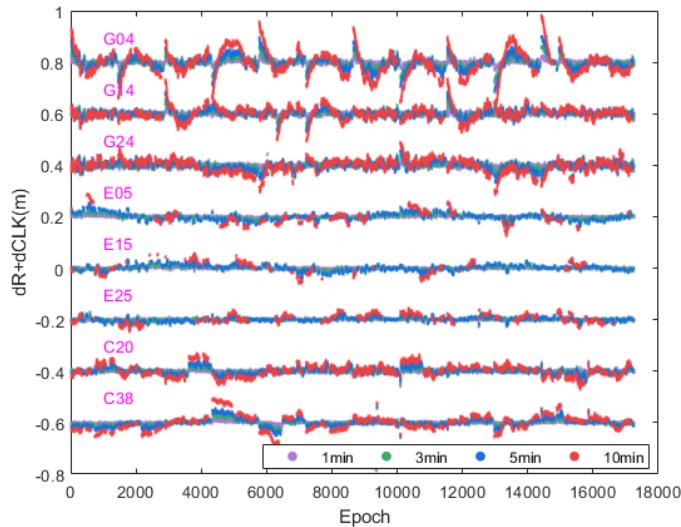


图 6-8 方案 1 编码方案的参数精度衰减分析

Figure 6-8 The precision attenuation based on the original SSR strategies

一般来说短期内卫星钟差改正数相对稳定, 而受卫星轨道径向误差的周期性影响, GPS 某些卫星的径向误差变化较大导致卫星轨道切换后在 10 分钟延迟条件下有明显的精度衰减, 且衰减存在一定的短期趋势。表 6-5 给出了不同延迟下径向和钟差精密改正数精度衰减统计值, 其中 GPS 卫星径向和钟差的改正数精度在 5 分钟的均方根误差约 3.6 cm, 最大改正误差达 29.7 cm; Galileo 卫星改正数的精度衰减最慢, 在 5 分钟的延迟条件下改正数精度衰减的均方根误差约 1.3cm, 改正精度衰减最大约 16.4cm; 北斗卫星的改正数精度衰减在 5 分钟的延迟下均方根误差约 1.7 cm, 改正精度衰减最大值约 9.8 cm。

表 6-5 不同延迟下改正数精度衰减统计

Table 6-5 The accuracy of corrections in different latency

延迟时间	GPS		Galileo		BDS	
	RMS/m	MAX/m	RMS/m	MAX/m	RMS/m	MAX/m
1 min	0.018	0.139	0.005	0.079	0.005	0.032
3 min	0.029	0.249	0.009	0.111	0.011	0.062
5 min	0.036	0.297	0.013	0.164	0.017	0.098
10 min	0.050	0.398	0.023	0.186	0.032	0.189

6.2.3 基于视向误差的信息编码

6.2.3.1 编码设计

第三章基于实时产品的定位评估中,卫星数量的增加对精客单点定位的收敛时间有显著的提高。当已知用户机的概略位置时,上一节的 SSR 改正数可以转化为卫星与测站的视向误差(OSR, Observation Space Representation),以视向误差作为编码参数压缩单颗卫星占用的容量,将节省的比特用于播发更多的卫星改正数以提升精客单点定位的收敛速度和精度。但此时用户机需要提高给服务端的位置报告频度以保证视向误差转换的可靠性。由于可播发的卫星数量增加,基于视向误差的信息编码的信息头部设计如图 6-7 所示,卫星掩码的编码数量增加到 95 bit,覆盖 GPS/Galileo/BDS 卫星系统。具体的编码参数如表 6-6 所示。

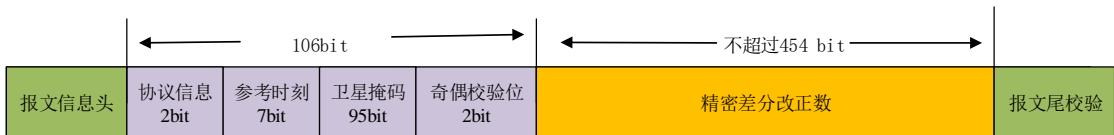


图 6-9 基于视向误差的信息头部编排

Figure 6-9 The header struct for the OMC enconding strategies

表 6-6 基于视向误差的信息编码头部参数说明

Table 6-6 The header enconding strategies for the OMC corrections

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	参数说明
1	协议	2	无	0-3	-	-	选择约定的精密差分编码协议
3	参考时刻	7	无	0-119	1	分钟	周期内的分钟计数,周期为 2 小时 1-27 : C19-C30,C32-C46
4	卫星掩码	95	无	0/1	-	-	28-59 : G01-G32 60-95 : E01-E36
5	奇偶校验位	2	无	-	-	-	-

下面给出基于视向误差的 2 种编码方案:

方案三: 已知用户终端概略位置的条件下,生成测站和卫星之间的视向改正数; 此方案单颗卫星占用 25 bit, 最多可以编排 18 颗卫星。

方案四: 在方案 1 的基础上,给出参考时刻视向改正数的变化率; 此方案单颗卫星占用 32 bit, 最多可以编排 14 颗卫星。

表 6-7 方案 3 的参数编码说明

Table 6-7 The enconding strategies for the fisrt OMC strategies

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	参数说明
1	<i>IODN</i>	10	无	0-1023	1	-	参考 IGS-SSR V1.0
2	<i>OSR</i>	13	有	± 40.95	0.01	米	参考时刻视向改正数
3	奇偶校验位	2	无	-	-	-	-

表 6-8 方案 4 的参数编码说明

Table 6-8 The enconding strategies for the second OMC strategies

序号	参数	比特数	符号位	有效范围	量化数值	单位	参数说明
1	$IODN$	10	无	0-1023	1	-	参考 IGS-SSR V1.0
2	OSR	13	有	± 40.95	0.01	米	参考时刻视向改正数
3	ΔOSR_{orb}	7	有	± 0.063	0.001	厘米	参考时刻视向改正数变化率
4	奇偶校验位	2	无	-	-	-	-

6.2.3.2 参数精度衰减分析

以 ABPO 站在 2023 年年积日 62 天的观测数据为例，在给定真实坐标的条件下，计算视向改正数在不同时延下的参数衰减情况，如图 6-8 所示。1 分钟延时下 OSR 改正数误差不超过 2.7 cm，5 分钟延时下 OSR 改正数的精度缩减最大不超过 7.5cm，10 分钟的时延下 OSR 的衰减精度变化较为明显，最大误差 12.9 cm，但所有卫星改正数精度衰减的均方根误差仅 1.3cm，具体的参数精度衰减情况见表 6-9、表 6-10、表 6-11 所示。因此针对数据播发可能发生的时延自适应修正用户终端的算法，也能实现高精度的精密度单点定位。

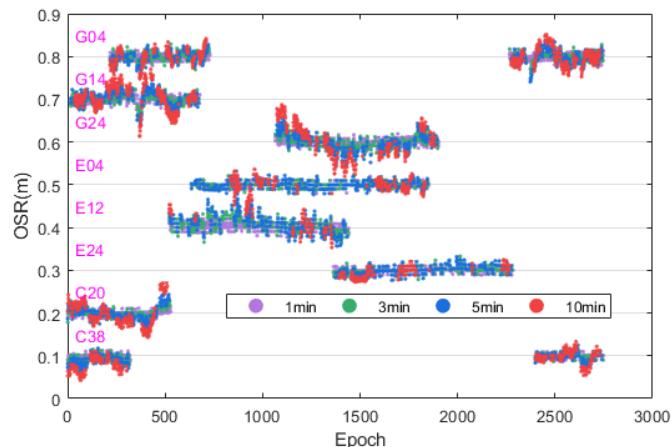


图 6-10 ABPO 测站在不同时延下 OSR 的参数衰减情况

Figure 6-10 Accuracy attenuation of OSR at ABPO with different latency

表 6-9 GPS 卫星 OSR 参数衰减

Table 6-9 Accuracy attenuation of OSR for GPS

GPS-PRN	预报 1 分钟		预报 3 分钟		预报 5 分钟		预报 10 分钟	
	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max
1	0.009	0.026	0.017	0.042	0.025	0.060	0.044	0.091
2	0.012	0.026	0.020	0.041	0.018	0.021	-	-
3	0.008	0.023	0.014	0.045	0.020	0.066	0.034	0.092
4	0.009	0.026	0.015	0.060	0.020	0.091	0.029	0.072
5	0.012	0.024	-	-	-	-	-	-
6	0.009	0.026	0.016	0.051	0.022	0.052	0.035	0.082
7	0.012	0.025	0.014	0.027	-	-	-	-
8	0.013	0.025	0.016	0.020	-	-	-	-
9	0.008	0.024	0.015	0.051	0.022	0.060	0.040	0.104
10	0.011	0.025	0.025	0.037	0.030	0.030	-	-
11	0.009	0.027	0.016	0.065	0.022	0.087	0.036	0.121
12	0.012	0.025	0.022	0.042	-	-	-	-

13	0.012	0.025	0.018	0.038	0.015	0.029	-	-
14	0.008	0.024	0.013	0.042	0.017	0.061	0.028	0.080
15	0.012	0.025	0.020	0.045	0.036	0.047	-	-
16	0.011	0.025	0.018	0.040	-	-	-	-
17	0.012	0.030	0.021	0.050	0.021	0.025	-	-
18	0.008	0.024	0.015	0.044	0.021	0.054	0.037	0.101
23	0.008	0.024	0.014	0.050	0.019	0.075	0.031	0.102
24	0.008	0.026	0.014	0.051	0.018	0.058	0.032	0.090
25	0.009	0.027	0.015	0.054	0.022	0.088	0.038	0.135
26	0.008	0.025	0.013	0.042	0.018	0.052	0.033	0.097
27	0.009	0.028	0.020	0.066	0.028	0.089	0.049	0.126
28	0.008	0.025	0.011	0.036	0.015	0.048	0.025	0.062
29	0.012	0.026	0.013	0.032	0.009	0.016	-	-
30	0.008	0.024	0.012	0.049	0.015	0.054	0.022	0.068
31	0.012	0.024	0.021	0.037	0.048	0.048	-	-
32	0.009	0.024	0.016	0.047	0.022	0.065	0.037	0.121

表 6-10 Galileo 卫星 OSR 参数衰减

Table 6-10 Accuracy attenuation of OSR for Galileo

GAL-PRN	预报 1 分钟		预报 3 分钟		预报 5 分钟		预报 10 分钟	
	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max
2	0.006	0.020	0.009	0.030	0.010	0.034	0.015	0.027
3	0.007	0.024	0.010	0.034	0.013	0.048	0.027	0.068
4	0.006	0.021	0.009	0.025	0.011	0.033	0.016	0.043
5	0.007	0.023	0.011	0.030	0.014	0.040	0.025	0.060
7	0.007	0.024	0.010	0.032	0.011	0.034	0.014	0.032
8	0.006	0.020	0.008	0.022	0.009	0.031	0.011	0.024
9	0.007	0.023	0.010	0.033	0.013	0.040	0.016	0.040
10	0.006	0.021	0.008	0.030	0.010	0.032	0.014	0.050
11	0.008	0.023	0.014	0.040	0.020	0.052	0.032	0.062
12	0.009	0.023	0.015	0.050	0.021	0.062	0.032	0.087
15	0.006	0.014	0.007	0.017	0.007	0.017	-	-
19	0.011	0.023	0.021	0.049	0.027	0.053	-	-
21	0.006	0.020	0.007	0.021	0.009	0.021	0.012	0.026
24	0.006	0.020	0.007	0.031	0.009	0.024	0.011	0.030
25	0.006	0.021	0.008	0.040	0.010	0.039	0.015	0.042
26	0.006	0.020	0.009	0.033	0.011	0.029	0.023	0.048
27	0.005	0.015	0.008	0.022	0.010	0.022	0.009	0.021
30	0.006	0.013	0.008	0.020	0.009	0.022	0.017	0.037
31	0.006	0.023	0.008	0.023	0.010	0.033	0.014	0.030
33	0.007	0.021	0.010	0.035	0.013	0.038	0.022	0.048
34	0.006	0.020	0.010	0.021	0.014	0.028	0.027	0.048
36	0.006	0.023	0.010	0.032	0.013	0.045	0.015	0.037

表 6-11 BDS 卫星 OSR 参数衰减

Table 6-11 Accuracy attenuation of OSR for BDS

BDS-PRN	预报 1 分钟		预报 3 分钟		预报 5 分钟		预报 10 分钟	
	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max
19	0.008	0.023	0.019	0.052	0.029	0.073	0.053	0.141

20	0.006	0.021	0.011	0.031	0.016	0.043	0.028	0.065
21	0.008	0.022	0.012	0.039	0.017	0.050	0.030	0.077
22	0.007	0.021	0.011	0.035	0.015	0.048	0.027	0.076
23	0.007	0.021	0.010	0.033	0.014	0.042	0.023	0.071
24	0.010	0.024	0.023	0.050	0.037	0.072	0.070	0.131
25	0.008	0.024	0.015	0.050	0.022	0.073	0.039	0.107
26	0.007	0.020	0.012	0.030	0.017	0.039	0.031	0.069
27	0.007	0.022	0.011	0.031	0.016	0.042	0.029	0.063
28	0.007	0.023	0.012	0.033	0.017	0.044	0.031	0.084
29	0.008	0.023	0.017	0.043	0.026	0.072	0.050	0.121
30	0.008	0.024	0.015	0.050	0.023	0.070	0.043	0.130
32	0.006	0.014	0.009	0.024	0.013	0.034	0.021	0.056
33	0.009	0.021	0.021	0.060	0.034	0.090	0.064	0.150
34	0.006	0.020	0.010	0.033	0.013	0.044	0.022	0.058
36	0.007	0.023	0.013	0.034	0.019	0.043	0.034	0.068
37	0.007	0.020	0.009	0.028	0.012	0.038	0.019	0.051
38	0.006	0.022	0.010	0.030	0.014	0.038	0.024	0.056
39	0.006	0.020	0.011	0.030	0.016	0.040	0.029	0.068
40	0.007	0.022	0.011	0.031	0.016	0.041	0.029	0.069
41	0.007	0.022	0.009	0.029	0.012	0.030	0.018	0.041
42	0.009	0.020	0.015	0.050	0.022	0.072	0.037	0.122
43	0.007	0.023	0.010	0.031	0.014	0.042	0.022	0.060
44	0.007	0.024	0.011	0.032	0.016	0.044	0.029	0.076
45	0.007	0.023	0.011	0.040	0.017	0.052	0.030	0.080
46	0.006	0.021	0.010	0.024	0.014	0.032	0.023	0.055

6.2.4 北斗短报文信息编码定位应用

本节对上述的四种北斗短报文的信息编码方案的应用进行分析, 分别使用模拟数据收发的仿真文件和按照实际丢包误码情况的收发文件对基于北斗短报文通信的精密度单点定位服务展开分析。

(1) 模拟数据分析

在无时间延迟和丢包的条件下, 按照四种方案的编码设计模拟短报文接收的实时精密度改正数数据。精密度改正数播发的卫星优先选择北斗卫星, 多余的信息容量播发 GPS 和 Galileo。图 6-9 给出了 ABPO 站 2023 年 DOY 62 天四种方案 6 小时的用户定位情况, 而图 6-10 展示的是 ABPO 测站的可用卫星数量。四种信息编码方案的本质性不同在于其能够编码的卫星数量差异, 从图中可以看出, 方案 3 的卫星数量明显多余其他方案, 其收敛的速度最快, 且定位的误差序列更平稳。图 6-11 给出 ABPO 测站 6 小时内定位误差统计结果。总体来说, 方案一和方案二的定位精度相当, 由于其播发卫星数量的限制, 定位精度差于另外两种方案; 方案三的收敛速度最快, 定位精度最高, 6 小时的动态单点定位精度能够达到平面 3.0cm、高程 6.2cm 的定位精度; 由此可见保证足够多的卫星数量在低频度的播发条件下也能保持较高的定位精度水平, 而基于 SSR 的参数预报的方案并不能更好的改善定位效果。

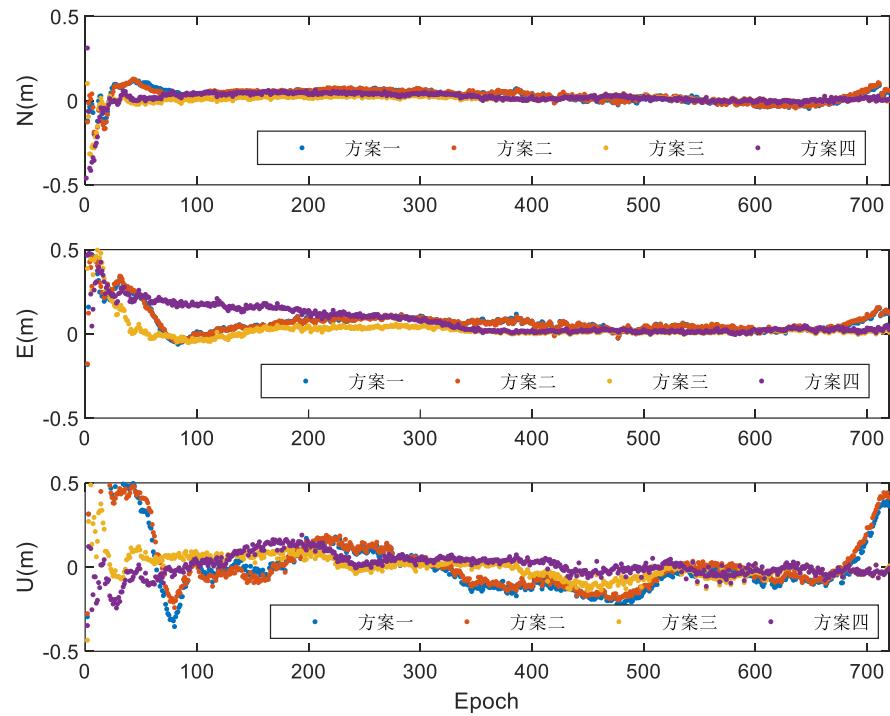


图 6-11 模拟短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差序列

Figure 6-11 The positioning errors for simulating kinematic PPP based on BDS CMC

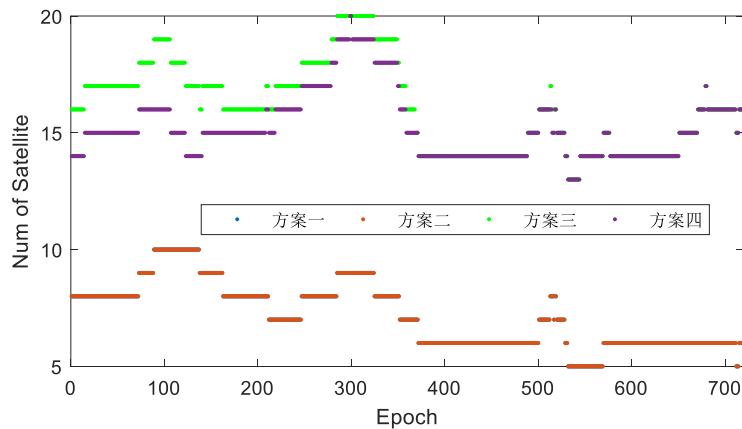


图 6-12 模拟短报文通信数据的 ABPO 测站可用卫星数量

Figure 6-12 Number of available satellites for simulating kinematic PPP based on BDS CMC

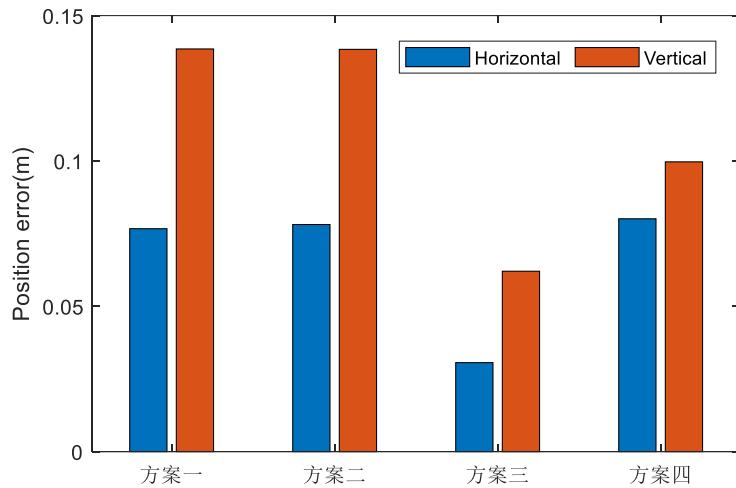


图 6-13 模拟短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差统计

Figure 6-13 The positioning errors for simulating kinematic PPP based on BDS CMC

(2) 实测数据分析

利用北斗短报文指挥机实时播发和回收短报文信息，并将收集的数据进行事后的精密度单点定位测试。图 6-12 给出了实测短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差序列。和模拟数据的定位结果相比，受改正数据缺失的影响基于实测数据的定位误差波动更为明显，存在一些明显的跳变点。图 6-13 给出了实测数据北斗短报文的 ABPO 测站可用卫星数量。在模拟数据中，方案三和方案四的可用卫星数量在很长一段时间内时相当的，然而基于实测数据，部分短报文信息没有通过奇偶校验被判定为无效改正数，而方案四中单颗卫星的编码数量需求要多于方案三，由此在误码的情况下，导致方案四某些卫星长时间没有更新导致卫星不可用，所以在短报文定位出现了明显的差异性。由此可见，更多的可用卫星数量是保证基于北斗短报文的精密度定位稳定性的重要条件。在基于实测北斗短报文通信的精密度单点定位的方案中，方案三最优，能够实现 6 小时的动态精密度单点定位平面 6.3cm 高程 15.2cm；受报文信息丢失的影响，定位收敛速度受限，三维位置收敛至 0.5m 平均需要 36 分钟。

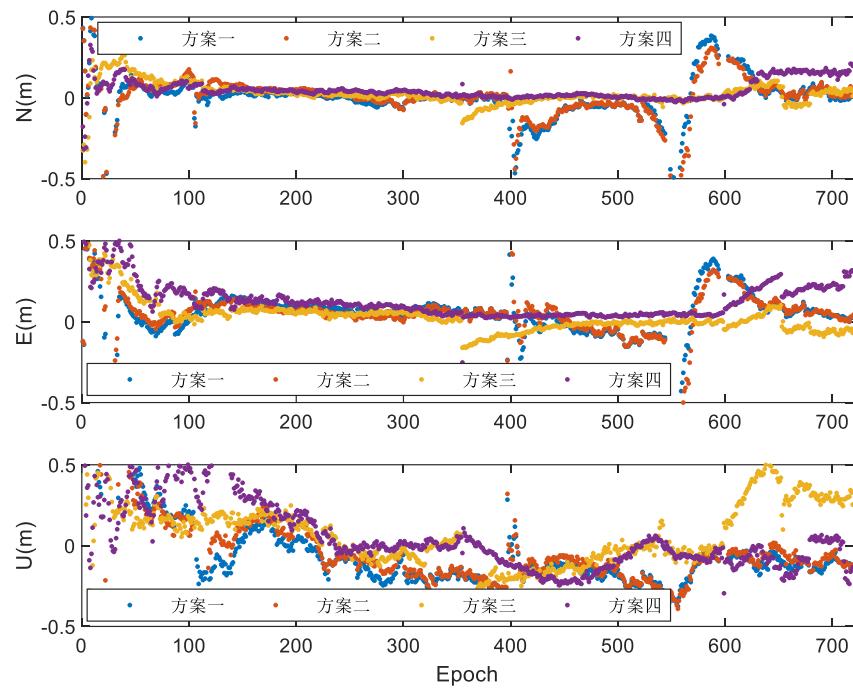


图 6-14 实测短报文通信数据的 ABPO 测站定位误差序列
Figure 6-14 The positioning errors for real-time kinematic PPP based on BDS CMC

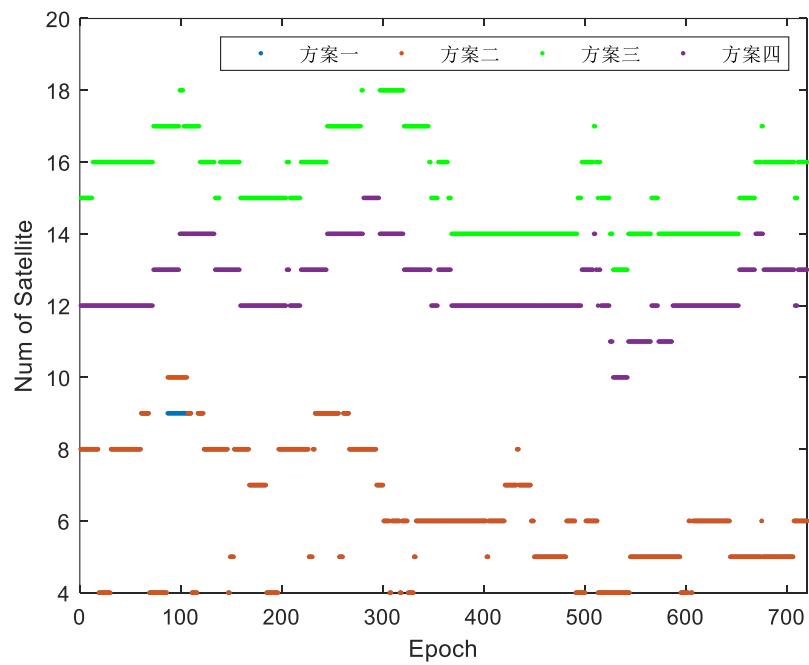


图 6-15 实测数据北斗短报文的 ABPO 测站可用卫星数量
Figure 6-15 Number of available satellites for real-time kinematic PPP based on BDS CMC

6.3 基于北斗短报文通信的时空服务平台框架

基于北斗短报文通信的时空服务软件平台基于 C/Fortran 混合编程, 可在 Linux 系统下稳定运行, 软件主要包括实时数据收发、精密差分参数计算与生成、内存管理、北斗短报文服务管理几大模块, 具体的组成如图 6-14 所示。其中实时数据收发、精密差分参数计算与生成和内存管理直接依托与上海天文台 GNSS 分析中心的实时 PPP-RTK 处理系统, 实时 PPP-RTK 处理系统具备生成精密轨道改正数、实时钟差改正数、GNSS 相位偏差和大气建模等, 该系统为北斗短报文服务管理模块提供精密差分改正数。数据处理中心的所有实时数据产品均通过内存管理软件实现业务的交互, 内存管理软件通过 ACE 开源框架搭建, 实现了对内存信息的管理和拓展。

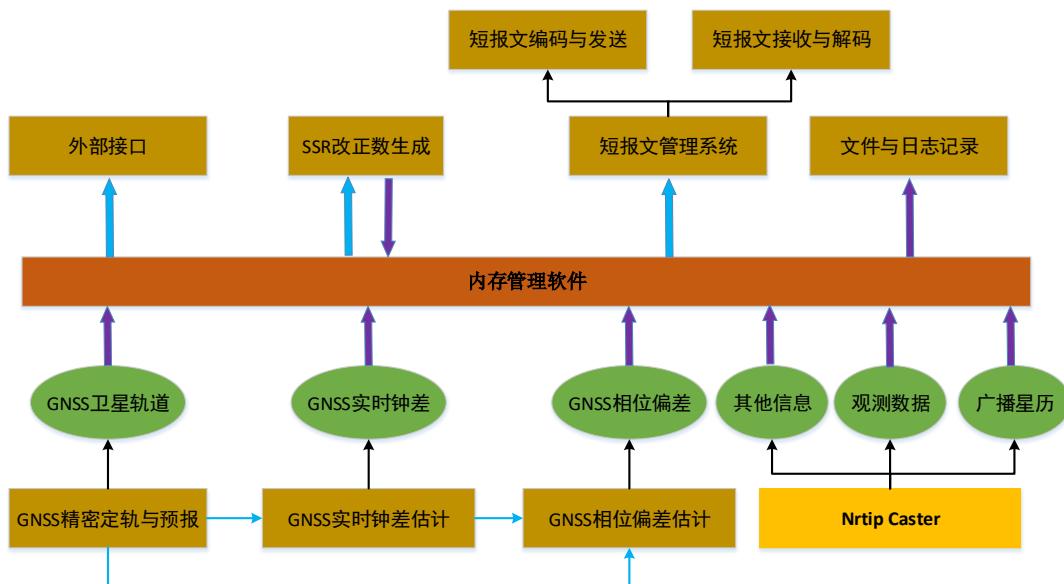


图 6-16 基于北斗短报文通信的时空服务平台框架

Figure 6-16 Framework of positioning, navigation, timing service platform based on Beidou short message communication

实时数据收发模块: 即通过 Ntrip Caster 对 IGS 观测网络的实时数据进行接收, 同时将数据存储。

精密差分参数计算与生成: 分为几大部分, 分别为 GNSS 精密定轨与预报、GNSS 实时钟差估计和 GNSS 相位偏差估计三大模块。

SSR 改正数生成模式: SSR 改正数模块通过内存中获取的实时精密轨道、钟差和相位偏差产品, 结合当前时刻的广播星历生成对应的 SSR 改正数。

北斗短报文管理系统集成了涉及北斗短报文通信相关的业务模块, 主要功能包括短报文 IC 卡管理、报文信息接收与解码、报文信息编码与发送、用户数据交互与可视卫星计算等, 为基于北斗短报文通信的时空服务提供端对端的完整数据链。

短报文 IC 卡管理模块: 该模块为记录当前与指挥机通信的 IC 卡状态, 记录

用户机的概略位置，为生成精密差分改正数和信息编码存储状态信息。

报文编码与发送模块：该模块的主要功能分为编码和解码两部分，编码是根据用户机的情况获取相应的可见卫星，为用户生成区域的精密差分改正数，并将信息其按照规定的协议编码成二进制数，通过与用户机通信的指挥机 IC 卡发送给卫星。

报文接收与解码模块：该模块利用短报文指挥机接收到的信息，根据协议类型进行解码，协议类型主要包括用户端请求、精密差分改正数解码等。

数据交互与可视卫星计算模块：该模块主要是通过功能内存交互，同时兼顾通过用户端的概略位置，根据请求的协议计算最佳的播发卫星，提供用户机的可视卫星数据。

6.4 小结

本章搭建了基于北斗短报文通信的时空服务平台，首先对北斗短报文的通信质量情况进行了评估，依据北斗短报文的播发特性设计了用户端和服务端的信息编码，在压缩编码的同时还保留了数据可靠性和正确性的验证手段，并验证了平台的精客单点定位服务性能。最后就基于北斗短报文通信的时空服务平台的总体框架设计和功能模块划分做了简要介绍。

第 7 章 总结与展望

7.1 论文主要结论

本文以实时精密单点定位的模糊度固定为目标, 系统地介绍了 GNSS 数据处理的基础理论和模型, 分析了当前 GNSS 星历产品的空间信号精度, 并分别基于后处理和实时的轨道和钟差产品对 GNSS 模糊度固定理论展开研究分析。具体的研究和结论如下:

(1) 详细阐述了 GNSS 星历产品评估的算法, 评估了 2022 年 GNSS 各系统广播星历的轨道和钟差精度。结果表明截止 2022 年底, GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS-3 的空间信号精度分别达到了 0.43 m、2.43 m、0.18 m 和 0.56 m。相比于先前的评估结果, GPS 和 Galileo 系统随着新系列卫星的更新, 其空间信号精度均有所提升。而 BDS-3 基于星间星地联合的定轨与时间同步体制, 其广播轨道和钟差的稳定性更高, 仅利用区域观测网达到了与 GPS 相当的空间信号精度。

(2) 给出了当前实时轨道和钟差产品的基本信息和恢复算法, 对当前的 12 个实时流的产品做了全面的评估分析, 包括数据延迟、数据可用性、轨道和钟差精度以及定位收敛时间和精度。其中各家分析中心的实时产品延迟平均在 6.2 s~18.9 s, IGS 组合的实时产品延迟在 30.7 s~37.8 s; 各产品的数据可用性以 GPS 最高, 数据可用性均高于 98.5%, 而 Galileo 和 BDS 的可用性差异较大, 分别高于 94.2% 和 85.9%。统计分析了不同实时产品 GNSS 卫星的轨道和钟差精度, 并进行了 30 天的精密单点定位试验。试验表明: 播发时延会降低 PPP 的收敛速度和收敛精度, 对动态 PPP 的影响最为明显; 多系统组合的动态 PPP 能够显著提高收敛速度和定位精度, 基于 GREC 四个系统组合的实时静态 PPP 和动态 PPP 最优的三维定位精度分别达到了 3.5 cm 和 5.2 cm。

(4) 介绍了基于非差无电离层组合模型的相位小数偏差估计算法和流程, 给出了用户端模糊度固定的流程; 基于后处理的精密产品估计 GNSS 卫星相位小数偏差并对其进行了验证评估, 结果表明: 基于非差无电离层组合模型估计的相位小数偏差在天内、天与天之间的时间序列都表现较好的稳定性, 其中 GPS、Galileo 和 BDS 的宽巷相位偏差天内稳定性分别优于 0.05 周、0.024 周和 0.034 周, 窄巷 FCB 稳定性分别优于 0.057 周、0.044 周和 0.129 周, 且从残差分布上看和观测值都有较好的一致性。并基于非差无电离层组合算法估计的 FCB 产品展开定位验证, 结果表明 FCB 产品有效的提高了精密定位的收敛速度和收敛精度。

(4) 深入地研究了轨道误差对精密单点定位的影响, 提出了一种顾及轨道

误差的相位小数偏差估计算法，并基于 WHU 实时轨道和钟差产品，对提出的算法进行验证。结果表明：与非差无电离层组合模型的估计算法相比，新算法的相位小数偏差的时间稳定度相当，窄巷模糊度残差减少了 13.6%。通过模糊度固定的定位验证得出结论：新算法的首次模糊度固定时间更早，且在初始收敛时段表现优于非差无电离层组合模型。基于顾及轨道误差的 FCB 产品的静态 PPP 在 1 小时定位三个方向分别提升了 0%、8.2% 和 6.3%，动态 PPP 的小时解定位三个方向上分别提升了 15.7%、11.1% 和 16.9%。

(5) 针对在海域、无人区或其他无互联网络的环境，存在高精度的实时定位需求却缺乏相应的通讯手段。本文提出利用 RDSS 和 GNSS 终端的结合，基于北斗短报文播发精密差分改正数，满足在特殊的环境下实现高精度定位的需求。对北斗区域播发短报文的通信质量展开分析，根据北斗报文通信的特征，设计了针对丢码误码的奇偶校验位保证数据的正确性，提出了四种压缩编码的方式并分别验证了基于不同信息编码方式的定位效果，由于短报文通信的不稳定性，使用基于视向距离改正的方式能够播发最大数量卫星，能够提高基于短报文定位的稳定性。此外依托课题组的实时 PPP-RTK 服务系统，搭建了基于北斗短报文的时空服务平台。

7.2 工作展望

鉴于本人的时间和学术水平限制，部分研究未能充分展开，拟计划在未来的科研工作中进一下完成以下内容：

(1) 考虑实时轨道切换的相位小数偏差估计算法

当前实时产品的精密轨道改正数仍以定轨和预报的模式为主，这就涉及在两组定轨的结果切换时的衔接误差，而当前北斗的轨道产品本身精度就要差于 GPS 和 Galileo，其轨道切向的衔接误差最大可能 30 cm，这可能会导致相位小数偏差估计的轨道误差不准确性。因此在顾及轨道误差的相位小数偏差估计算法中，研究考虑实时轨道切换的相位小数偏差估计算法是提高实时相位小数偏差产品质量的有效途径。

(2) 基于区域网的实时非差钟差和模糊度固定算法研究

在区域观测网内，轨道误差对测站的影响几乎一致，轨道误差在各向异性的投影大部分会被实时钟差吸收，因此基于本文的结论，顾及轨道误差的区域观测网的实时非差钟差和相位小数偏差估计是可行的，特别是在北斗 B2b 信号或广播星历轨道误差条件下，可能实现基于区域网的顾及轨道误差的实时模糊度固定。

(3) 基于北斗短报文通信的时空服务平台拓展和优化

本文由于试验的环境条件限制，未能完成涉及星间链路的短报文试验。而基于北斗全球短报文通信需要重点验证星间链路通信的性能，后续考虑增加涉及星

间链路的北斗全球短报文实验，完善基于北斗短报文通信的时空服务平台的相关功能，提高平台的可维护性和稳定性；此外当北斗全球短报文通信的不稳定时，用户终端的算法还有进一步优化的空间。

参考文献

- [1] Agrotis L, Caissy M, Ruelke A, et al. Real-time service technical report 2014[J]. IGS Central Bureau, 2014: 187.
- [2] Ashby, N. Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 2003, 55(1):1.
- [3] BeiDou Navigation Satellite System (BDS)-Signal In Space (SIS)-Interface Control Document (ICD), 2019.
- [4] BISNATH S, GAO Y. Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations[G]. SIDERIS M G. *Observing our Changing Earth*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, 133: 615–623.
- [5] Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202.
- [6] Boehm J, Heinkelmann R, Schuh H. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications[J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(10):679-683.
- [7] Boehm J, Moeller G, Schindelegger M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3):433-441.
- [8] Cai, C., Gong, Y., Gao, Y., et al. An approach to speed up single-frequency PPP convergence with quad-constellation GNSS and GIM. *Sensors*, 2017, 17, 1302.
- [9] Chen C, Xiao G, Chang G, et al. Assessment of gps/galileo/bds precise point positioning with ambiguity resolution using products from different analysis centers[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3266.
- [10] Chen, J.; Li, H.; Wu, B.; Zhang, Y.; Wang, J.; Hu, C. Performance of real-time precise point positioning. *Mar. Geod.* 2013, 36, 98–108.
- [11] Chen, J. P., Wang, J. G., Yu, C. et al. Improving BDS broadcast ephemeris accuracy using ground-satellite-link observations. *Satell Navig* 3, 11 (2022).
- [12] Chen, L.; Zhao, Q.; Hu, Z.; Jiang, X.; Geng, C.; Ge, M.; Shi, C. GNSS Global Real-Time Augmentation Positioning: Real-Time Precise Satellite Clock Estimation, Prototype System Construction and Performance Analysis. *Adv. Space Res.* 2018, 61, 367–384
- [13] COLLINS PAUL, LAHAYE FRANCOIS, HEROUX PIERRE, et al. Precise Point Positioning with Ambiguity resolution using the Decoupled Clock Model [C]. ION GNSS 2008, 2008.
- [14] Collins P. Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities[C]//Proceedings of the 2008 national technical meeting of the institute of navigation. 2008: 720-732.
- [15] Collins P, Henton J, Mireault Y, et al. Precise point positioning for real-time

determination of co-seismic crustal motion[C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009). 2009: 2479-2488.

[16] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, et al. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing[J]. Navigation, 2010, 57(2): 123-135.

[17] Creel T, Dorsey AJ, Mendicki PJ et al. Summary of accuracy improvements from the GPS legacy accuracy improvement initiative (L-AII) [C]. In: Proceedings of ION GNSS 2007, pp 2481-2498.

[18] Dow J M, Neilan R E, Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(7):689-689.

[19] Disclaimer of Liability (Centimeter Level Augmentation Service) IS-QZSS-L6-005, Cabinet Office September,2022

[20] Elsobeiey, M.; Al-Harbi. S.; Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service. GPS Solut, 2016, 20, 565-571.

[21] European GNSS (Galileo) Open Service (OS)-Signal In Space (SIS)-Interface Control Document (ICD), 2015.

[22] Feess, W., Stephens, S. Evaluation of GPS ionospheric time-delay model. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 3: 332-338.

[23] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(7):389-399.

[24] Gabor M J, Nerem R S. GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences[C]//Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). 1999: 1569-1578.

[25] GAO Y., SHEN X. A New Method for Carrier-Phase-Based Precise Point Positioning[J]. Navigation, 2002, 49(2): 109-116.

[26] Gerard, P., Luzum, B. IERS Conventions. IERS Technical 2010 Note 36. Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main, Germany, 2010.

[27] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations[J]. Journal of geodesy, 2008, 82(7): 389.

[28] Griffiths, J. Combined orbits and clocks from IGS second reprocessing. J. Geod. 2019, 93, 177-195.

[29] Geng J, Meng X, Dodson A H, et al. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison[J]. Journal of geodesy, 2010, 84: 569-581.

[30] Geng J, Meng X, Dodson A H, et al. Integer ambiguity resolution in precise point

positioning: method comparison[J]. *Journal of geodesy*, 2010, 84: 569-581.

[31] Geng, J., Chen, X., Pan, Y. et al. A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University. *J Geod* 93, 2053–2067 (2019).

[32] Geng, J.; Yang, S.; Guo, J. Assessing IGS GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 phase bias products with PRIDE PPP-AR. *Satell. Navig.* 2021, 2, 17.

[33] Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. *Global Positioning System: Theory and Practice*, Springer, New York, 1992.

[34] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (1993), *Global Positioning System: Theory and Practice* [M], Springer, New York.

[35] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. *GNSS — Global Navigation Satellite Systems*[M]// *GNSS--global navigation satellite systems*: 2008.

[36] Hauschild, A., Montenbruck, O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning. *GPS Solut.* 2009, 13, 173–182.

[37] Hadas, T.; Bosy, J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solut.* 2015, 19, 93–105.

[38] IGS RTWG. IGS State Space Representation (SSR) Format Version 1.00. 2020. Available online: https://files.igs.org/pub/data/format/igs_ssrr_v1.pdf (accessed on 10 October 2022).

[39] Interface Control Document (ICD)-GPS-240C, 2019.

[40] Interface Control Document (ICD)-L1, L2-GLOASS, 2008.

[41] Interface Control Document (ICD)-GPS-240C, 2019.

[42] Jee, G., Lee, H.B., Kim, Y.H., et al. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: Ionospheric perspective. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2010, 115, A10319.

[43] KOUBA J, HéROUS P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products [J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.

[44] Kazmierski, K., Zajdel, R. & Sośnica, K. Evolution of orbit and clock quality for real-time multi-GNSS solutions. *GPS Solut.* 2020, 24, 111.

[45] Klobuchar, J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23: 325-331.

[46] LAURICHESSE D., MERCIER F., BERTHIAS J.P., et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and Satellite precise orbit determination[J]. *Navigation*, 2009, 65(2): 135-149.

[47] Laurichesse D. The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011). 2011: 654-662.

[48] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results[C]//Proceedings of the 23rd

International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010). 2010: 2534-2544.

[49] Laurichesse D. Phase biases estimation for undifferenced ambiguity resolution[C]//PPP-RTK & Open Standards Symposium. 2012: 12-13.

[50] Li, B., Zhang, Z., Zang, N. et al. High-precision GNSS ocean positioning with BeiDou short-message communication. *J Geod* 93, 125–139 (2019).

[51] Li Y, Gao Y, Shi J. Real-time PPP Ambiguity resolution with satellite FCBs estimated considering obit errors[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014). 2014: 1008-1019.

[52] LI P., ZHANG X., REN X., et al. Generating GPS satellite fractional cycle bias for ambiguity-fixed precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 771–782.

[53] Li X, Zhang X. Improving the estimation of uncalibrated fractional phase offsets for PPP ambiguity resolution[J]. *The Journal of Navigation*, 2012, 65(3): 513-529.

[54] Li, X.; Ge, M.; Zhang, H.; Nischan, T.; Wickert, J. The GFZ Real-Time GNSS Precise Positioning Service System and Its Adaption for COMPASS. *Adv. Space Res.* 2013, 51, 1008–1018.

[55] Li X, Li X, Yuan Y, et al. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo[J]. *Journal of geodesy*, 2018, 92: 579-608.

[56] Li Y, Gao Y, Shi J. Improved PPP ambiguity resolution by COES FCB estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(5): 437-450.

[57] Liang H, Gao G X, Walter T, et al. Statistical Characterization of GLONASS Broadcast Ephemeris Errors[J]. *Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2011, 10(1): 3109-3117.

[58] Leandro R F. Precise point positioning with GPS: a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis[J]. *Geodesy and Geomatics Engineering*, 2009.

[59] Liu, Z., Yang, Z. Anomalies in broadcast ionospheric coefficients recorded by GPS receivers over the past two solar cycles (1992-2013). *GPS Solutions*, 2016, 20: 23-37.

[60] Loyer S, Perosanz F, Mercier F, et al. Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center[J]. *Journal of geodesy*, 2012, 86: 991-1003.

[61] Liu Y, Ye S, Song W, et al. Estimating the orbit error of BeiDou GEO satellites to improve the performance of multi-GNSS PPP ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22: 1-14.

[62] Leandro R, Santos M, Langley R B. UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance[J]. *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation Ntm*, 2006, 52(1):564-573.

[63] Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6):1069.

[64] Luba O, Boyd L, Gower A, et al. GPS III system operations concepts[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2005, 20(1): 10-18.

[65] Morton, Y.T., Zhou, Q., Frank, V.G. Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements. *Radio Science*, 2009, 44(1): 328-334.

[66] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 2015, 19: 321-333.

[67] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment – methodology and results. *Advances in Space Research*, 2018, 03, 041.

[68] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, 2017, 59: 1671-1697.

[69] Malys, S., O'Neill, C., 2017. Coincidence level among terrestrial reference frames available through GNSS broadcast messages. In: 12th Meeting of Int. Comm. on GNSS (ICG). UNOOSA.

[70] Mruthyunjaya L, Ramasubramanian R. IRNSS SIS ICD for standard positioning service[J]. URL: <https://www.isro.gov.in/irnssprogramme>, 2017.

[71] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, Prospects and Challenges[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7):1671-1697.

[72] NASA. Global positioning system III satellite laser ranging implementation team honored with award[EB/OL]. (2014-02-25).

[73] Neilan R, Fisher S, Walia G, et al. IGS Central Bureau technical report 2015[J]. IGS Central Bureau, 2015: 9.

[74] Petit G, Luzum B, Al E. IERS Conventions (2010)[J]. *IERS Technical Note*, 2010, 36:1 - 95.

[75] Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-004), Cabinet Office, November, 2017.

[76] Revnivykh S. GLONASS status and modernization. In Proceedings of ION GNSS 2012, Nashville, TN, pp 3931–3949.

[77] RTCM 10403.3; Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services. RTCM: Arlington, TX, USA, 2016; Version 3, No. 104.

[78] Schmid R, Rothacher M. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 77: 440-446.

[79] Stürze, A.; Mervart, L.; Weber, G.; Rülke, A.; Wiesensarter, E.; Neumaier, P. The New Version 2.12 of BKG Ntrip Client (BNC). In Proceedings of the Geophys. Res. Abstr; 2016; Vol. 18, p. 12012.

[80] Shi J, Gao Y. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods[J]. GPS solutions, 2014, 18: 519-528.

[81] Schaer, S., Gartner, W., Feltens, J. IONEX: The ionosphere map exchange format version 1. In proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, 1998.

[82] Weber, G.; Mervart, L.; Lukes, Z.; Rocken, C.; Dousa, J. Real-time clock and orbit corrections for improved point positioning via NTRIP. In Proceedings of the ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, Fort Worth, TX, USA, 25–28 September 2007.

[83] Wang M. Ambiguity Resolution with Precise Point Positioning[D]. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary,(2014).

[84] Wang, L., Li, Z., Ge, M. et al. Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service. GPS Solut 23, 66 (2019).

[85] Wang Z, Li Z, Wang L, et al. Assessment of multiple GNSS real-time SSR products from different analysis centers[J]. ISPRS international journal of geoinformation, 2018, 7(3): 85.

[86] Wu, J.T., Wu, S.C., Hajj, G.A., et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. In Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference, Durango, CO, San Diego, CA, 1992, 1647-1660.

[87] Wu Z Q, Zhou S S, Hu X G, et al. Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser[J]. GPS Solut, 2018, 22:43.

[88] Wu Y , Liu X , Liu W , et al. Long-term behavior and statistical characterization of BeiDou signal-in-space errors[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4):1907-1922.

[89] Wu, X., Hu, X., Wang, G., et al. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning. Advances in Space Research, 2013, 51: 959-968.

[90] Wu, X., Zhou, J., Tang, B., et al. Evaluation of COMPASS ionospheric grid. GPS Solutions, 2014, 18(4): 639-649.

[91] Wubbena G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements[C]//Proceedings 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system. US Department of Commerce, 1985: 403-412.

[92] Xiao G, Sui L, Heck B, et al. Estimating satellite phase fractional cycle biases based on Kalman filter[J]. GPS solutions, 2018, 22(3): 82.

[93] Xiao, X.; Shen, F.; Lu, X.; Shen, P.; Ge, Y. Performance of BDS-2/3, GPS, and Galileo Time Transfer with Real-Time Single-Frequency Precise Point Positioning.

[94] Yuan, Y., Zhang, K., Rohm, W., et al. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. Journal of Geophysical Research:

Atmospheres, 2014, 119(6): 10044-10057.

[95] Yan, C.; Wang, Q.; Zhang, Y.; Ke, F.; Gao, W.; Yang, Y. Analysis of GNSS Clock Prediction Performance with Different Interrupt Intervals and Application to Real-Time Kinematic Precise Point Positioning[J]. Adv. Space Res. 2020, 65, 978–996

[96] Yang Y, Liu L, Li J, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2135-2143.

[97] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1997, 102(B3):5005-5017.

[98] ZHANG B., OU J., YUAN Y., et al. Extraction of line-of-sight ionospheric observables from GPS data using precise point positioning[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(11): 1919–1928.

[99] Zhang, L.; Yang, H.; Gao, Y.; Yao, Y.; Xu, C. Evaluation and Analysis of Real-Time Precise Orbits and Clocks Products from Different IGS Analysis Centers[J]. Adv. Space Res. 2018, 61, 2942–2954.

[100] Zhang, Y., Kubo, N., Chen, J., et al. Initial positioning assessment of BDS new satellites and new signals. Remote Sensing, 2019, 11, 1320.

[101] BD420007-2015. 中国第二代卫星导航系统重大专项标准: 北斗用户终端 RDSS 单元性能要求及测试方法[S].

[102] 蔡昌盛. GPS/GLONASS 组合精密单点定位理论与方法[D].中国矿业大学,2008.

[103] 蔡洪亮,孟铁男,耿长江等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J].测绘学报,2021,50(04):427-435.

[104] 郭树人,蔡洪亮,孟铁男等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(07):810-821.

[105] 耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 等. 基于 PANDA 软件的实时精密单点定位研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007(04): 312-315.

[106] 韩保民,欧吉坤.基于 GPS 非差观测值进行精密单点定位研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2003(04):409-412.

[107] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理(第二版). 武汉大学出版社, 2010.

[108] 李博峰. 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(07): 734-740.

[109] 李浩军, 王解先, 陈俊平, 等.基于 GNSS 网络的实时精密单点定位及精度分析[J].地球物理学报, 2010, 53(6): 1302-1307.

[110] 李静,龙强,臧志斌等.北斗卫星导航系统在电力行业的应用研究[J].电力信息与通信技术,2022,20(10):87-97.

[111] 李盼.GNSS 精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D].武汉大学,

2016.

[112] 李星星. GNSS 精密度单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉大学, 2013.

[113] 李星星, 张伟, 袁勇强等. GNSS 卫星精密定轨综述: 现状、挑战与机遇[J]. 测绘学报, 2022, 51(07): 1271-1293.

[114] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密度单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 234-240.

[115] 刘基余. 全球导航卫星系统及其应用[M]. 测绘出版社, 2015.

[116] 刘帅, 孙付平, 郝万亮, 等. 整数相位钟法精密度单点定位模糊度固定模型及效果分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1230-1237.

[117] 刘天骏. GPS/Galileo 非差非组合实时精密度单点定位快速收敛与模糊度固定[D]. 中国矿业大学, 2019.

[118] 刘万科, 任杰, 曾琪, et al. 2013-2015 年 BDS 空间信号测距误差的精度评估[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3).

[119] 潘宗鹏. 实时精密度单点定位及模糊度固定[D]. 解放军信息工程大学, 2015.

[120] 潘军洋, 胡小工, 唐成盼等. 北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定[J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2671-2679.

[121] 宋添, 庞波波, 翁艳云等. 北斗短报文在全球海上遇险与安全通信领域的应用与展望[J]. 中国航海, 2022, 45(04): 65-69.

[122] 杨元喜. 自适应动态导航定位. 测绘出版社, 2006.

[123] 杨宇飞. 利用星间链路提升北斗 PNT 服务空间信号精度理论与方法研究[D]. 战略支援部队信息工程大学, 2019.

[124] 袁运斌, 侯鹏宇, 张宝成. GNSS 非差非组合数据处理与 PPP-RTK 高精度定位[J]. 测绘学报, 2022, 51(07): 1225-1238.

[125] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007 年.

[126] 王解先, 陈俊平. GPS 精密定位软件研制与应用. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 764-767.

[127] 王进. GNSS 多频精密度单点定位及快速模糊度固定算法研究[D]. 长安大学, 2020.

[128] 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 基于 GPS 双频原始观测值的精密度单点定位算法及应用[J]. 测绘学报, 2010, 39(05): 478 - 483.

[129] 张宝成, 欧吉坤, 李子申, 等. 利用精密度单点定位求解电离层延迟[J]. 地球物理学报, 2011, 54(04): 950 - 957.

[130] 周峰. 多系统 GNSS 非差非组合精密度单点定位相关理论和方法研究[D]. 华东师范大学, 2018.

[131] 朱威强. 多模 GNSS 同步兼容技术研究[D]. 沈阳理工大学, 2016.

- [132] 郑艳丽.GPS 非差精室断点定位模糊度固定理论与方法研究[D].武汉大学, 2013.
- [133] 张小红.动态精度单点定位(PPP)的精度分析[J].全球定位系统,2006(01):7-11+22.
- [134] 张益泽,陈俊平,周建华, 等. 北斗广播星历偏差分析及改正[J]. 测绘学报, 2016(S2):68-75.
- [135] 张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究: [D]. 上海: 同济大学, 2017.

致 谢

倏忽之间，来天文台读书已有六载，初闻、初见、初识历历在目。行文至此，落笔为终，纵有万般不舍，终有离别之时。即当远离，感激涕零。

首先感谢我的导师陈俊平研究员。陈老师为人严谨、学识渊博、平易近人。一直以来，陈老师都以温和的态度和独到的眼光指导我在科研项目上的问题，激发我的思维，使我受益匪浅。感谢陈老师让我有机会参与北斗运控有关的项目，不仅拓宽了我的视野，各个方面都有所接触，还让我能够迅速的适应很多工作。得遇良师，春风化雨，人生至幸。

感谢上海天文台天文地球动力学中心的胡小工研究员、周善石研究员、曹月玲研究员、廖新浩研究员、黄勇研究员、齐朝祥研究员，周旭华研究员等各位老师在授课和科研上的指导。感谢北京交通大学的巴晓辉研究员在 GNSS 信号处理方面的授课指导和答疑解惑。感谢长安大学的黄观文教授对我求学和科研上的帮助。

感谢北京卫星导航中心的周建华总师对项目的指导，感谢胡彩波、赵鹤、朱伟刚、张之学、窦晓晶、刘萧、樊家琛、姜意、王威、王兵浩等人在项目上的帮助和支持，有幸与你们一起推进项目、排查问题和讨论方案，为完善和建设北斗做出贡献。作为北斗人，你们认真务实的态度让我敬佩。感谢项目组的苗新潮和周同等人，是你们让我进一步加深了对计算机系统和软件的理解，使我能快速熟悉在北斗运控的工作。

感谢课题组的王彬副研究员、张益泽副研究员和谭伟杰副研究员，感谢你们对项目和科研上的帮助，与你们的协力合作让项目上的很多事情可以顺利完成。特别感谢陈倩师姐，在北京的项目和生活上的帮助和关心。感谢课题组的柳培钊、董志华、刘姣、王阿昊、孟令东、侯阳飞等师兄师姐，感谢同门同级的伍冠滨、马壮、周杨，感谢丁君生、宋子远、王茹圆、唐文杰、崔洁、刘东林、朱红玉等师弟师妹，和你们一起学习、讨论丰富了我的生活。

感谢天文台的李凯师兄、邵璠师兄、赵兴隆师兄、陶恩哲师兄、熊永孟师兄对我的关心和帮助。感谢同级的李伟、武剑鸣、杨戬、吴德、苏珂、门琳琳、田秋凝等同学，与你们一起学习和约饭的日子为我的硕博生活增添了许多欢乐时光。

特别感谢我的姐姐，在我读书期间对我的关心和支持，十七年来一直默默地替我撑着一片天，承担着属于我的那份家庭责任。感谢我的女朋友徐可馨博士，感谢你的陪伴，特别是在我生病和emo 的时候一直陪在我身边照顾和鼓励我。

最后，致十余年来我最思念的人，但愿不负其所期。

上海
2023 年 4 月

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:

2013年9月——2017年7月，在长安大学地质工程测绘学院获得学士学位。

2017年9月——2023年5月，在中国科学院大学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] 于超, 陈俊平, 陈倩, 王阿昊. 北斗系统长期空间信号测距精度评估及精度提升分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1064-1071.
- [2] 于超, 陈俊平, 陈倩, 王彬. 基于北斗系统兼容信号的星基增强性能分析[J]. 第十一届中国卫星导航年会电子文集, 2020.
- [3] 陈俊平, 于超*, 王阿昊, 张益泽, 宋子远. 北斗二号/三号融合的分米级星基增强算法与性能分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(1):019507.
- [4] Yu C, Zhang Y, Chen J, et al. Performance Assessment of Multi-GNSS Real-Time Products from Various Analysis Centers[J]. Remote Sensing, 2022, 15(1): 140.

参加的研究项目及获奖情况:

2018年获“华测杯”全国软件大赛三等奖

博士研究生一等学业奖学金（2019~2021年度）

中国科学院大学三好学生（2020~2021年度）

2021年上海天文台“抗疫先进个人”称号

2022年获中科院上海分院“科技攻关新星”荣誉称号

2022年获军队科技进步奖一等奖(20/20)