



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

实时多频多系统 PPP-RTK 增强服务及其完好性技术研究

作者姓名: 万丽华
指导教师: 陈俊平 研究员
中国科学院上海天文台
学位类别: 理学博士
学科专业: 天体测量与天体力学
培养单位: 中国科学院上海天文台

2026 年 6 月

**Development and Integrity Evaluation of Multi-frequency and
Multi-GNSS Precise Point Positioning and Real-Time Kinematic
Augmentation Service**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Astrometry and Celestial Mechanics
By
WAN Lihua
Supervisor: Professor CHEN Junping**

**Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences
June 2026**

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

PPP-RTK (Precise Point Positioning-Real Time Kinematic, PPP-RTK) 技术融合了 PPP (Precise Point Positioning, PPP) 的全球覆盖优势与 RTK (Real Time Kinematic, RTK) 的快速收敛特性, 是实现广域高精度实时定位服务的核心技术之一。随着自动驾驶、精准农业、无人机导航等新兴应用领域对高精度定位的需求日益迫切, PPP-RTK 技术的理论完善与工程实现具有重要理论意义和实际应用价值。然而, 当前 PPP-RTK 技术在实时精密产品生成、大气延迟精密建模、服务完好性保障以及系统工程化实现等方面仍面临诸多挑战。本文围绕上述关键问题, 从 PPP-RTK 理论模型、实时精密产品生成、多尺度大气建模、完好性监测以及星基服务系统设计与验证等方面开展了深入研究, 主要工作和贡献如下:

(1) 建立了多频多系统非差非组合 (Undifferenced and Uncombined, UDUC) PPP-RTK 数学模型。系统推导了包含 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 多系统的 UDUC PPP-RTK 函数模型, 通过重参数化策略解决了观测方程中的秩亏问题, 明确了各参数的物理含义和可估性。详细讨论了系统间偏差 (Inter-System Bias, ISB) 的处理策略和频率相关偏差 IFCB (Inter-Frequency Clock bias, IFCB) 和 DCB (Differential Code Bias, DCB) 的处理方法, 建立了多频级联模糊度固定方法和部分模糊度固定检核策略, 为 PPP-RTK 的可靠处理奠定了理论基础。

(2) 实现了多频多系统实时精密产品的高精度生成与验证。基于自主开发的 SWAS (Satellite-Based Wide-area Augmentation System, SWAS) 系统, 实现了实时精密轨道、钟差和多频相位偏差 (Uncalibrated Phase Delay, UPD) 的分步估计。实时超快速轨道精度方面, 实时预报部分 GPS/GLONASS/Galileo/BDS2/BDS3-MEO/BDS3-IGSO 3D 轨道精度分别为: 0.0442/0.0723/0.0695/0.2166/0.0790/0.2345 m; 实时钟差估计精度方面, GPS/GLONASS/Galileo/BDS2/BDS3-MEO/BDS3-IGSO 系统钟差分别为 0.0753/0.1354/0.0924/0.2969/0.1276/0.3319 ns; 轨钟综合径向误差 SISRE 较钟差而言其误差更小, 这是由于卫星钟差吸收了部分轨道的误差; 此外, 文中针对轨道边界跳变通过平滑轨道策略可以提升钟差估计精度 5%, 采用真实的轨道姿态模型后, 地影期卫星钟差精度可以提升 20%-40%; 多频 UPD 方面, 各系统超宽巷/宽巷 UPD 稳定性优于 0.05 周, 浮点模糊度在改正 UPD 产品后其小数部分在 ± 0.25 周范围内的比例超过 90%。多频多系统 PPP-IAR 定位精度在 N/E/U 方向分别达到 0.010 m、0.010 m 和 0.025 m, 达到 IGS 事后产品定位精度水平的 84.6%, 验证了实时产品完全满足 PPP-IAR 应用需求。

(3) 提出了多尺度大气建模方法并验证了 PPP-RTK 增强服务性能。在广域

电离层建模方面,提出了顾及卫星空间差异的 Sat-ASHF 模型,通过为每颗卫星估计独立的球谐系数消除了卫星间建模误差的交叉污染,建模精度达到 0.252 TECU,显著优于传统 GIM 模型,精度提升超过 90%。在局域电离层建模方面,提出了局域模型与残差格网相结合的多尺度增强策略,在站间距 50~100 km 的网络中实现了 0.02 m 的电离层改正精度,较单独使用局域模型提升 13%。在对流层建模方面,建立了基于格网插值的实时对流层湿延迟模型,广域和局域精度分别优于 0.02 m 和 0.01 m。实时 PPP-RTK 验证表明,采用广域大气的 PPP-RTK 平均固定时间缩短至约 1 min,较 PPP-IAR 缩短约 26.3%;采用局域大气的 PPP-RTK 平均固定时间缩短至 27.4 s,较 PPP-IAR 缩短约 53.8%。

(4) 构建了面向 PPP-IAR/PPP-RTK 服务产品的完好性监测框架。提出了基于无电离层 (IF) 和无几何 (GF) 组合相位残差的 SSR (StateSpace Representation, SSR) 产品质量因子 (Quality Indicator, QI) 计算方法,分别为 Orbit/Clock/UPD (简称 OCU, 下同) 产品、电离层产品和对流层产品建立了实时质量监控模型。验证表明,OCU 质量因子的可用率超过 98.0%,紧致度在 1.5~3.5 之间;电离层质量因子能够自适应反映电离层活动水平变化,对流层质量因子平稳性最好。在常规场景下,采用 QI 质量因子改善终端 PPP 定权策略,可以轻微提升 PPP 定位性能。其中,PPP-RTK 统计全天定位误差降低 1-3mm,错误固定由 0.90%降低到 0.76%;针对区域边缘测站提升效果则更明显,错误固定由 0.88%降低到 0.54%,平均收敛时间由 54.6 缩短至 33.0 s。此外,在卫星轨道机动、钟差跳变和电离层异常等典型异常场景下,完好性监测系统能够快速检测异常,并结合终端自适应加权策略可以显著降低模糊度错误固定率,提高 PPP-RTK 服务的可靠性,定位误差由米级/分米级改善到厘米级。

(5) 设计并验证了基于卫星播发的 PPP-RTK 增强服务系统。系统包括测站数据流管理、服务产品解算、卫星数据播发和服务监控四大模块,通过自定义播发协议,以 2400 bps 播发速率下可以实现中国全境的 PPP-RTK 服务覆盖。网络模拟链路验证表明,多频多系统 PPP-RTK 水平收敛时间为 39.5 s,收敛后水平和高程精度分别优于 0.01 m 和 0.023 m;卫星播发链路验证表明,静态场景下星基 PPP-RTK 水平和高程精度优于 0.01 m 和 0.025 m,平均首次固定时间 (TTFF) 为 45.1 s,整体结果和网络链路模拟结果性能差异较小;农业场景车载动态实验表明,动态 PPP-RTK 平均收敛时间为 82.7 s,受实时数据流丢包和延迟等因素影响较静态场景有所增加。

关键词: 实时 PPP-RTK, 模糊度固定, 多尺度大气建模, 完好性监测, 星基增强服务

Abstract

Precise Point Positioning-Real-Time Kinematic (PPP-RTK) technology integrates the global coverage of Precise Point Positioning (PPP) with the rapid convergence capability of Real-Time Kinematic (RTK), serving as a core technique for achieving wide-area high-precision real-time positioning services. With the growing demand for high-accuracy positioning in emerging applications such as autonomous driving, precision agriculture, and unmanned aerial vehicle navigation, the theoretical refinement and engineering implementation of PPP-RTK technology are of significant scientific and practical importance. However, current PPP-RTK technology still faces considerable challenges in real-time precise product generation, atmospheric delay modelling, service integrity assurance, and system-level engineering realization. This dissertation systematically addresses these key issues, covering the PPP-RTK mathematical model, real-time precise product generation, multi-scale atmospheric modelling, integrity monitoring, and satellite-based service system design and validation. The main contributions are summarized as follows:

(1) A multi-frequency multi-constellation undifferenced and uncombined (UDUC) PPP-RTK mathematical model is established. The UDUC PPP-RTK functional model incorporating GPS, GLONASS, Galileo, and BDS is rigorously derived, with the rank deficiency problem resolved through a re-parameterization strategy. The physical interpretation and estimability of all parameters are clarified. The inter-system bias (ISB) handling strategy and frequency-dependent error such as Inter-Frequency Clock bias (IFCB) and Differential Code Bias (DCB) treatment methods are discussed in detail. A multi-frequency cascaded ambiguity resolution method combined with partial ambiguity resolution and multiple validation strategies is developed, ensuring a high success rate and low false-fix rate.

(2) High-precision multi-frequency multi-constellation real-time precise products are generated and validated through PPP with integer ambiguity resolution (PPP-IAR). Based on the self-developed Satellite-Based Wide-area Augmentation System (SWAS), real-time precise orbit determination, precise clock estimation, and multi-frequency uncalibrated phase delay (UPD) estimation are sequentially realized. The real-time ultra-rapid predicted orbit accuracies for GPS/GLONASS/Galileo/BDS2/BDS3-MEO/BDS3-IGSO are 0.044 m, 0.072 m, 0.070 m, 0.217 m, 0.079 m and 0.235 m in 3D, respectively. The real-time clock estimation accuracies for GPS/GLONASS/Galileo/BDS2/BDS3-MEO/BDS3-IGSO are 0.075 ns, 0.135 ns, 0.092 ns, 0.297 ns, 0.128 ns and 0.332 ns, respectively. Compared with satellite clock errors, the orbit/clock combined Signal-in-Space Range Error (SISRE) is smaller, mainly because the satellite clock estimates absorb part of the orbit errors. In addition, this research shows that applying an orbit smoothing

strategy to mitigate boundary discontinuities in orbit products can improve the accuracy of clock estimation by about 5%. Furthermore, after adopting a true orbit attitude model, the accuracy of satellite clock estimates during eclipse periods can be improved by approximately 20-40%. The extra-wide-lane and wide-lane UPD stabilities for all constellations are better than 0.05 cycles, with over 90% of float ambiguity fractional parts falling within ± 0.25 cycles after applying UPD products. The multi-frequency multi-constellation PPP-IAR positioning accuracies in the N/E/U directions are 0.010 m, 0.010 m, and 0.025 m, respectively, reaching 84.6% of the accuracy achieved with IGS final products, thereby confirming that the real-time products fully meet the precision requirements for PPP-IAR applications.

(3) A multi-scale atmospheric modelling approach is proposed and validated for PPP-RTK augmentation. For wide-area ionospheric modelling, a satellite-specific adjusted spherical harmonic function (Sat-ASHF) model is proposed, which estimates independent spherical harmonic coefficients for each satellite to eliminate cross-contamination of modelling errors among satellites, achieving a modelling accuracy of 0.252 TECU that significantly outperforms conventional GIM models with an improvement of 90%. For local-area ionospheric modelling, a multi-scale enhancement strategy combining a local model with residual grids is designed, achieving an ionospheric correction accuracy of 0.02 m in networks with inter-station distances of 50–100 km, representing a 13% improvement over using the local-area model alone. For tropospheric modelling, a real-time tropospheric zenith wet delay model based on grid interpolation is established, with wide-area and local-area accuracies better than 0.02 m and 0.01 m, respectively. Real-time PPP-RTK validation demonstrates that the mean Time-To-First-Fix (TTFF) is reduced to 1 min with wide-area atmospheric augmentation (a 26.3% reduction compared to PPP-IAR) and further reduced to 27.4 s with local-area atmospheric augmentation (a 53.8% reduction compared to the 59.4 s of PPP-IAR).

(4) An integrity monitoring framework for PPP-IAR/PPP-RTK services is constructed. A quality indicator (QI) computation method based on Ionosphere-Free (IF) and Geometry-Free (GF) carrier phase residuals is proposed, with real-time quality monitoring models established for Orbit/Clock/UPD (OCU) products, ionospheric products, and tropospheric products, respectively. Validation with accumulated data shows that the OCU QI availability exceeds 98.0% with a tightness ranging from 1.5 to 3.5. The ionospheric QI adaptively reflects variations in ionospheric activity levels, while the tropospheric QI exhibits good stability. An adaptive weighting strategy based on integrity information is further proposed, which automatically excludes anomalous satellites and adjusts observation weights. Under nominal conditions, the use of the QI to improve the weighting strategy in user-side PPP processing can slightly enhance positioning performance. Specifically, for PPP-RTK, the overall daily positioning error is reduced by 1-3 mm, and the wrong

ambiguity fixing rate decreases from 0.90% to 0.76%. The improvement is more pronounced for stations located at the edges of the network, where the wrong fixing rate decreases from 0.88% to 0.54%, and the average convergence time is shortened from 54.6 s to 33.0 s. Furthermore, in typical anomaly scenarios—such as satellite orbit maneuvers, clock jumps, and ionospheric disturbances—the integrity monitoring system can rapidly detect anomalies. When combined with an adaptive weighting strategy at the user side, it can significantly reduce the ambiguity incorrect fixing rate and improve the reliability of PPP-RTK services, with positioning errors improving from meter/decimeter level to centimeter level.

(5) A satellite-based PPP-RTK augmentation service system is designed and comprehensively validated. The system comprises four major modules: station data stream management, service products generation, satellite correction broadcasting, and service monitoring. Through a custom broadcasting protocol, PPP-RTK service coverage across the entirety of China can be achieved at a broadcasting rate of 2,400 bps. Network-simulated link validation shows that the multi-frequency multi-constellation PPP-RTK achieves a horizontal convergence time of 39.5 s, with post-convergence horizontal and vertical accuracies better than 0.01 m and 0.023 m, respectively. Satellite broadcast link validation shows that, in a static scenario, the satellite-based PPP-RTK achieves horizontal and vertical accuracies better than 0.01 m and 0.025 m, respectively. The average Time-To-First-Fix (TTFF) is 45.1 s, and the performance difference between the satellite-broadcast system and the network simulation results is relatively small. A vehicle-borne dynamic experiment in an agricultural scenario shows a mean convergence time of 82.7 s, which is longer than that in the static scenario owing to packet loss and latency in the real-time data stream, yet the overall positioning performance meets the requirements of precision agriculture and other practical applications.

Key Words:

Real-time PPP-RTK, Ambiguity Resolution, Multi-scale Atmospheric Modelling, Integrity Monitoring, Satellite-based Augmentation Service

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 精密单点定位技术	2
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 实时 PPP/PPP-RTK 系统	4
1.2.2 大气建模	7
1.2.3 服务完好性监测	9
1.2.4 现有 PPP-RTK 研究的不足	12
1.3 研究目的与内容	12
1.3.1 研究目标	12
1.3.2 技术创新点	13
1.4 论文章节设计	14
1.4.1 技术路线	14
1.4.2 论文章节安排	15
第 2 章 多频多系统 PPP-RTK 数学模型与方法	17
2.1 精密单点定位原理	17
2.1.1 GNSS 误差源及改正方法	17
2.1.2 精密单点定位观测方程	22
2.1.3 不同的观测值线性组合方程	25
2.2 实时 PPP-RTK 定位原理	28
2.2.1 实时 PPP-RTK 函数模型	28
2.2.2 多系统 PPP-RTK 函数模型	31
2.2.3 多频 PPP-RTK 函数模型	32
2.3 PPP 参数估计与质量控制	34
2.3.1 Kalman 滤波	34
2.3.2 最小二乘估计	36
2.3.3 PPP 质量控制策略	37
2.4 PPP 模糊度固定与检核方法	39
2.4.1 模糊度固定基本原理	39
2.4.2 模糊度固定方法	40
2.4.3 模糊度固定与检核策略	42

2.5 本章小结.....	46
第 3 章 多频多系统产品估计与实时 PPP-IAR.....	48
3.1 GNSS 精密定轨.....	48
3.1.1 GNSS 精密定轨原理.....	48
3.1.2 实时 GNSS 精密定轨结果分析.....	55
3.1.3 轨道机动探测.....	62
3.2 卫星钟差估计.....	64
3.2.1 钟差估计原理.....	64
3.2.2 实时钟差结果分析.....	67
3.2.3 轨道跳跃对钟差的影响分析.....	72
3.2.4 姿态模型对钟差的影响分析.....	74
3.3 多频观测值偏差估计.....	77
3.3.1 多频相位偏差原理与方法.....	77
3.3.2 多频相位偏差估计结果分析.....	79
3.3.3 其他偏差估计.....	87
3.4 PPP-IAR 定位验证.....	91
3.4.1 整体 PPP-IAR 定位性能对比.....	91
3.4.2 相位偏差改正方式对比.....	93
3.4.3 IFCB 估计方案对比.....	94
3.5 本章小结.....	95
第 4 章 多尺度大气建模及实时 PPP-RTK.....	97
4.1 大气延迟提取.....	97
4.1.1 基于 PPP 浮点解的大气提取.....	97
4.1.2 基于 PPP 固定解的大气提取.....	98
4.1.3 PPP 固定解提取大气精度分析.....	98
4.2 广域电离层建模.....	100
4.2.1 广域电离层模型介绍.....	100
4.2.2 顾及卫星空间差异的 Sat-ASHF 模型.....	101
4.2.3 广域大气模型精度分析.....	104
4.3 局域电离层建模.....	110
4.3.1 局域斜向电离层建模.....	110
4.3.2 局域-残差格网模型.....	111
4.3.3 局域电离层模型精度分析.....	112
4.4 广域/局域对流层建模.....	116
4.4.1 对流层建模.....	116
4.4.2 格网对流层建模.....	117
4.4.3 对流层模型精度分析.....	117

4.5 PPP-RTK 定位验证	121
4.5.1 PPP-RTK 定位策略	121
4.5.2 PPP-RTK 结果验证	121
4.6 本章小结	124
第 5 章 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性监测	126
5.1 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性设计	126
5.1.1 完好性设计标准	126
5.1.2 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性	127
5.2 SSR 产品完好性参数计算	128
5.2.1 OCU 产品质量因子计算	129
5.2.2 大气产品质量因子计算	130
5.2.3 实时产品误差传播分析	131
5.2.4 完好性评估指标与方法	132
5.3 服务产品完好性性能分析	133
5.3.1 实验设计	133
5.3.2 相位残差特性分析	134
5.3.3 OCU 产品完好性分析	135
5.3.4 大气产品完好性分析	140
5.4 完好性信息增强的 PPP-IAR/PPP-RTK 验证	143
5.4.1 完好性定权策略设计	143
5.4.2 QI 增强的 PPP-IAR 定位性能	143
5.4.3 QI 增强的 PPP-RTK 定位性能对比	144
5.5 服务完好性案例分析	146
5.5.1 卫星轨道机动	146
5.5.2 卫星钟差跳变	146
5.5.3 电离层异常/闪烁	147
5.6 本章小结	148
第 6 章 基于卫星播发的 PPP-RTK 服务验证	149
6.1 基于卫星播发的星基增强服务架构	149
6.1.1 服务系统整体设计	149
6.1.2 SSR 消息压缩	150
6.1.3 卫星播发设计	151
6.2 实验设计	152
6.2.1 实验数据介绍	153
6.2.2 处理策略与参数配置	154
6.3 网络模拟链路 PPP-RTK 测试	155

6.3.1 多系统 PPP-IAR 效果分析	155
6.3.2 多频多系统 PPP-RTK 效果分析	156
6.3.3 不同电离层活跃程度 PPP-RTK 效果分析	158
6.4 卫星播发链路 PPP-RTK 测试	159
6.4.1 产品完整率和数据龄期统计分析	159
6.4.2 静态 PPP-RTK 效果分析	160
6.4.3 动态 PPP-RTK 效果分析	161
6.5 本章小结	162
第 7 章 总结与展望	164
7.1 工作总结	164
7.2 未来展望	165
参考文献	167
附录	185
致 谢	187
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	189

图目录

图 1-1	论文内容框架及各章节关系	15
图 3-1	GNSS 精密定轨流程图	55
图 3-2	GNSS 精密定轨测站分布	57
图 3-3	GPS 轨道径向、切向、法向误差序列图	58
图 3-4	GLONASS 轨道径向、切向、法向误差序列图	59
图 3-5	Galileo 轨道径向、切向、法向误差序列图	59
图 3-6	BDS2 轨道径向、切向、法向误差序列图	60
图 3-7	BDS3 轨道径向、切向、法向误差序列图	60
图 3-8	各个卫星实时轨道产品精度统计结果	61
图 3-9	各卫星系统实时轨道产品精度统计	62
图 3-10	BRST-FFMJ 基线间 C07 三差观测值变化情况	63
图 3-11	FAA1-THTG 基线间 C08 三差观测值变化情况	64
图 3-12	BOR11-MET3 基线间 G07 三差观测值变化情况	64
图 3-13	实时钟差估计测站分布	67
图 3-14	DOY250 天 GPS 精密钟差差异序列图	69
图 3-15	DOY250 天 GLONASS 精密钟差差异序列图	69
图 3-16	DOY250 天 Galileo 精密钟差差异序列图	70
图 3-17	DOY250 天 BDS2 精密钟差差异序列图	70
图 3-18	DOY250 天 BDS3 精密钟差差异序列图	71
图 3-19	各个卫星实时钟差产品精度统计结果	72
图 3-20	DOY250 天 BDS3 精密钟差差异序列图	72
图 3-21	是否使用轨道平滑策略对钟差估计影响分析	73
图 3-22	卫星姿态控制示意图及偏航角	75
图 3-23	名义姿态和调整的动偏姿态偏航角差异	75
图 3-24	采用名义姿态和调整的动偏姿态钟差估计结果对比	76
图 3-25	YS 和 ON 模式下卫星钟差估计精度对比图	77
图 3-26	实时 UPD 估计测站分布	80

图 3-27	GPS 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图	81
图 3-28	Galileo 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图	82
图 3-29	BDS2 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图	82
图 3-30	BDS3 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图	83
图 3-31	GPS (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图 ..	84
图 3-32	Galileo (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图	84
图 3-33	BDS2 (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图	84
图 3-34	BDS3 (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图	85
图 3-35	GPS 卫星 L1 频点相位偏差序列图	85
图 3-36	Galileo 卫星 E1 频点相位偏差序列图	86
图 3-37	BDS2 卫星 B1I 频点相位偏差序列图	86
图 3-38	BDS3 卫星 B1I 频点相位偏差序列图	87
图 3-39	GPS/GAL/BDS2/BDS3 系统第三频点 IFCB 变化序列图	88
图 3-40	GPS 不同策略计算 EWL UPD 结果对比	89
图 3-41	GAL 系统不同策略计算 EWL UPD 结果对比	89
图 3-42	BDS 系统不同策略计算 EWL UPD 结果对比	90
图 3-43	不同系统 DCB 产品综合前后稳定性对比	91
图 3-44	采用不同产品 PPP/PPP-IAR 定位结果对比	92
图 3-45	采用不同改正策略 PPP/PPP-IAR 定位结果对比	94
图 3-46	采用不同 IFCB 方案 PPP/PPP-IAR 定位结果对比	95
图 4-1	并址站提取的电离层差异序列	99
图 4-2	并址站提取的对流层差异序列	100
图 4-3	中国西部和南方区域广域电离层建模测站分布图及验证站分布图	105
图 4-4	建模测站电离层模型残差序列图	106
图 4-5	建模测站电离层模型残差分布和精度统计图	106
图 4-6	用户站 XJPA 和 XJMO 处的电离层模型精度	107
图 4-7	各用户测站的残差精度与分布	107
图 4-8	建模站 (上) 和用户站 (下) 处不同模型的精度对比 ...	108

图 4-9	活跃区域建模站（上）和用户站（下）处不同模型的精度对比.....	109
图 4-10	模型误差精度随距离的变化.....	110
图 4-11	武汉及周边区域参考站（红色）以及监控站（蓝色）分布图.....	112
图 4-12	UBHH 站局域电离层模型值与提取值差异.....	113
图 4-13	UBAS 站局域电离层模型值与提取值差异.....	113
图 4-14	局域电离层模型在不同位置处的统计精度.....	114
图 4-15	UBHH 站局域-残差电离层模型值与提取值差异.....	114
图 4-16	UBAS 站局域-残差电离层模型值与提取值差异.....	115
图 4-17	局域-残差电离层模型在不同位置处的统计精度.....	115
图 4-18	广域对流层建模测站（红色）和格网点（蓝色）分布图.....	118
图 4-19	建模站 AHFU 和 FJCT 天顶对流层模型值与提取值差异.....	118
图 4-20	监控站 GDYY 和 SDZS 天顶对流层模型值与提取值差异.....	119
图 4-21	广域天顶对流层模型在不同位置处的统计精度.....	119
图 4-22	建模站 UBHU 和 UBLZ 天顶对流层模型值与提取值差异.....	120
图 4-23	监控站 UBAS 和 UBDX 天顶对流层模型值与提取值差异.....	120
图 4-24	局域天顶对流层模型在不同位置处的统计精度.....	121
图 4-25	采用不同卫星系统 PPP-RTK 定位结果对比.....	122
图 4-26	采用不同频率组合的 PPP-RTK 定位结果对比.....	123
图 4-27	采用不同大气产品 PPP-RTK 定位结果对比.....	124
图 5-1	PPP-IAR/PPP-RTK 服务及其完好性监测示意图.....	128
图 5-2	完好性信息的监测站（蓝色圆点）及 PPP-IAR 验证站（红色三角形）分布图.....	133
图 5-3	大气建模的测站（蓝色）及大气完好性监测站（红色）分布图.....	134
图 5-4	各系统 IF 相位残差的直方图及其拟合正态分布曲线图.....	134
图 5-5	各卫星 IF 相位残差分布的非对称性分析.....	135
图 5-6	DOY205 天部分典型卫星 QI 变化序列图.....	136
图 5-7	连续多天各卫星 QI 可用率和紧致度统计图.....	137

图 5-8	不同卫星系统卫星 QI&相位残差斯坦福图	138
图 5-9	DOY 250 天所有卫星和剔除低精度产品卫星的 QI&相位残差斯坦福图	139
图 5-10	多天数据的所有卫星和剔除低精度产品卫星的 QI&相位残差斯坦福图	139
图 5-11	不同格网点处的卫星电离层 QI 序列图（上图：029.500N-114.500E；下图 023.500N-108.500E）	140
图 5-12	不同格网点的对流层 QI 序列图	141
图 5-13	不同格网点的电离层/对流层 QI 统计结果	142
图 5-14	多天数据的电离层和对流层 QI&相位残差斯坦福图	142
图 5-15	不同测站 PPP 定位结果（左图为常规 PPP-IAR，右图为 QI 信息增强的 PPP-IAR）	144
图 5-16	不同测站多天 PPP-IAR 定位误差及错误固定率统计结果	144
图 5-17	不同测站 PPP 定位结果（左图为常规 PPP-RTK，右图为 QI 信息增强的 PPP-RTK）	145
图 5-18	不同测站多天 PPP-RTK 定位误差及错误固定率统计结果	145
图 5-19	不同测站常规 PPP 与完好性增强的 PPP 的定位误差对比	146
图 5-20	不同测站常规 PPP 与完好性增强 PPP 的定位误差对比	147
图 5-21	不同测站 PPP 定位结果（左图为常规 PPP-RTK，右图为 QI 信息增强的 PPP-RTK）	148
图 6-1	基于卫星播发的 PPP-RTK 服务系统设计图	150
图 6-2	基于卫星播发的协议电文帧结构	152
图 6-3	PPP-IAR 服务验证测站分布图	153
图 6-4	广域电离层建模及 PPP-RTK 验证站分布图	153
图 6-5	使用 PPP-RTK 服务的农业用户分布图	154
图 6-6	不同测站 PPP-IAR 在北、东、高三个方向的定位误差序列	156
图 6-7	31 个用户测站 PPP-IAR 的定位精度（左）和 TTFF（右）统计结果	156
图 6-8	XJPA 和 XJMO 测站 PPP-IAR 与 PPP-RTK 的定位误差序列	157
图 6-9	28 个用户测站 PPP-IAR 和 PPP-RTK 的定位精度和 TTFF 统计结果	158

图 6-10	不同场景下各类产品丢包情况统计结果	159
图 6-11	不同场景下差分数据龄期情况统计结果	160
图 6-12	星基 PPP-RTK 服务监控站定位序列图	160
图 6-13	星基 PPP-RTK 服务监控站的定位精度和 TTFF 统计结果	161
图 6-14	星基 PPP-RTK 服务动态用户定位轨迹图	161
图 6-15	星基 PPP-RTK 服务的动态农业用户 TTFF 统计结果	162

表目录

表 1-1	不同卫星系统信号种类及调制方式	5
表 1-2	现有不足、研究目标与解决思路的对应关系	14
表 2-1	各系统使用的频率说明	33
表 2-2	三种模糊度固定方法比较	42
表 3-1	各 GNSS 系统卫星发射功率与天线推力轨道影响	51
表 3-2	超快速精密定轨策略和模型	56
表 3-3	实时精密钟差估计策略和模型	68
表 3-4	轨道平滑策略对钟差估计影响统计分析	74
表 3-5	实时 UPD 估计策略和模型	80
表 3-6	采用不同产品 PPP/PPP-IAR 定位统计结果	93
表 3-7	采用不同改正策略 PPP/PPP-IAR 定位统计结果	93
表 3-8	采用不同 IFCB 方案 PPP/PPP-IAR 定位统计结果	95
表 5-1	ICAO 对民航进近中的空间信号性能要求	127
表 6-1	星基播发协议策略及带宽速率使用	151
表 6-2	L-Band 星基播发速率配置	152
表 6-3	PPP 定位策略汇总	154
表 6-4	不同电离层条件下的 PPP-RTK 性能对比	158

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）作为现代社会的重要基础设施，在测绘、交通、农业、应急救援等领域发挥着不可替代的作用，从 1993 年全球定位系统（Global Positioning System, GPS）首次提供全球服务以来^[1]，卫星定位技术相关的应用已经超过 30 余年。截至 2025 年 12 月，全球已有超过 130 颗导航卫星在轨运行，形成了多系统、多频率、全球覆盖的卫星导航服务体系。其中，可提供全球导航定位服务的卫星系统包括：中国的北斗三代系统（the 3rd generation BeiDou Navigation Satellite System, BDS3），截止到 2026 年 3 月在轨正常提供服务的卫星有 24 颗 MEO、3 颗 IGSO（Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO）和 3 颗 GEO（Geostationary Orbit, GEO）^[2]，2026 年 4 月 BDS3 卫星将 PRN 号重构和升级使得 BDS3 卫星数量进一步增加；美国的 GPS 系统，在轨正常提供服务的卫星有 31 颗 MEO（Medium Earth Orbit, MEO）^[3]；欧盟的 Galileo 卫星系统，在轨正常提供服务的卫星有 25 颗 MEO^[4]；俄罗斯的格魯纳斯系统（Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, GLONASS），在轨正常提供服务的卫星有 24 颗^[5]。此外，还有很多国家发展了自己的区域导航卫星系统，包括中国的 BDS2 系统，日本的准天顶卫星系统（Quasi-Zenith Satellite System, QZSS）系统，以及印度的导航系统（Navigation with Indian Constellation, NAVIC）系统等。

近年来随着无人驾驶、移动物联网、人工智能等技术的发展，用户对于精准时空信息的需求，正逐渐从事后走向实时、从静态走向动态、从区域走向全球。20 世纪 90 年代，Zumberge 等人首次提出精密单点定位（Precise Point Positioning, PPP）技术^[6]，标志着 GNSS 定位从相对定位向绝对定位的重要转变，用户无需依赖基准站即可实现全球范围内的厘米级定位精度。然而，传统 PPP 技术存在收敛时间长的局限性，这主要是由于 PPP 需要通过长时间观测来分离和估计多种误差参数，包括接收机钟差、对流层延迟、电离层延迟和载波相位模糊度等。在静态模式下，PPP 通常需要 20-30 分钟才能达到厘米级定位精度^[7-8]；在动态模式下，收敛时间可能更长。这一局限性严重制约了 PPP 在实时动态应用中的推广，特别是在自动驾驶、无人机导航、测量测绘等对初始化时间要求严格的应用场景中。

此外，PPP 定位的可靠性也是制约其在涉及安全相关领域中推广的关键问题，特别是在卫星轨道机动调整期间、大气环境剧烈波动（比如电离层闪烁、强对流）场景下，精密产品精度存在明显的精度下降现象，此时保持 PPP 定位的可靠性

和一致性等具有极大的挑战。因此，建立完善的完好性监测体系，确保系统在故障情况下能够及时检测并向用户发出警告，是实现 PPP 技术在诸多应用中得到广泛推广的前提条件。

1.1.1 精密单点定位技术

精密单点定位技术通过利用精密轨道和钟差产品，使单台接收机能够实现全球范围内的厘米级定位精度。PPP 技术具有全球适用性、经济性和高精度等特点，无需建立和维护大量的基准站网络，大大降低了高精度定位的成本和复杂度，因此在大地测量、气象监测、地壳形变监测等领域得到了广泛应用^[9-10]。

为了满足日益增长的实时需求，IGS（International GNSS Service, IGS）实时工作组（Real-time Working Group, RTWG）成立于 2001 年^[11]，IGS 实时服务（Real-Time Service, RTS）于 2013 年 4 月 1 日正式启动^[12]。随着实时卫星轨道和钟差产品的稳定性和精度的不断提高，很多学者基于 RTAC（Real-Time Analysis Center, RTAC）产品进行了大量实时精密单点定位的研究，包括海上导航、精准农业和自然灾害监测等各种应用。目前，IGS 提供了多种实时服务产品以支持实时精密单点定位^[13-14]。

近年来，多个国家和地区推出了基于卫星播发的 PPP 精密定位增强服务。QZSS CLAS（Centimeter Level Augmentation System, CLAS）是全球首个提供免费 PPP-RTK（PPP Real-Time Kinematic, PPP-RTK）服务的系统，从 2018 年开始 QZSS 通过 L6D 信号播发完整的 SSR（StateSpace Representation, SSR）改正信息（含大气改正）^[15-16]，使得用户在日本及周边地区可以实现 1 min 的快速收敛。2020 年中国宣布 BDS3 提供全球服务，并且通过 PPP-B2b 信号将 GPS 和 BDS3 的改正数播发给中国及周边地区的用户^[17-18]，使得用户能够在 20 min 内实现 PPP 的收敛^[19]。随后，Galileo HAS（High Accuracy Service, HAS）宣布将通过中地球轨道卫星的 E6 信号，在全球范围内免费提供 GPS L1/L5/L2C 信号和伽利略 E1/E5b/E5a/E6/E5 信号的精确卫星轨道、钟差、差分码偏差（Differential Code Bias, DCB）和无几何相位未校正（Uncalibrated Phase Delay, UPD）参数^[20]，HAS 服务支持在全球范围内使用，且全球收敛时间小于 5 分钟，在欧洲则更短^[21]。

除政府主导的免费 PPP 服务外，多家商业公司也提供了星基增强精密定位服务（Satellite-Based Augmentation System, SBAS），比较典型的包括 Trimble RTX^[22-23]、Fugro StarFix^[24]和 Hexagon TerraStar^[25]等商业服务。这些商业服务基本均是通过 L-Band GEO 卫星播发精密改正信息，提供全球范围的厘米级定位服务。一般而言，商业服务比公开的 PPP 服务提供的产品精度更高、收敛速度更快，但需要付费订阅。

1.1.2 研究意义

GNSS 技术可以全天候不间断地为全球用户提供稳定可靠的导航、定位和授时服务，在各国经济建设和国防军事领域都发挥了重要的作用。然而，受制于卫星信号从播发到接收过程中各项误差的影响，GNSS 卫星系统自身提供的实时标准定位服务，其精度仅有 5-10 m，这极大地制约了 GNSS 技术的发展和在科研和工程领域的应用。为提高 GNSS 技术实时定位的精度和工程的实用性，科学家们先后提出了两种方案：第一种是实时差分动态定位（Real-Time Kinematic Positioning, RTK）^[26-27]，第二种是实时精密单点定位（Real-Time Precise Point Positioning, RT-PPP）^[28]。

RTK 技术通过在站间和星间作双差，可以消除信号从发射到接收过程中的公共误差项，包括：接收机端和卫星端的钟差，DCB, PCO（Phase Center Offset, PCO）、PCV（Phase Center Variation, PCV）等；同时还可以削弱轨道误差，对流层、电离层等大气延迟；因而可以实时获得高精度的定位坐标。经过几十年的发展 RTK 技术已经比较成熟，并逐渐形成了以网络 RTK（Network-RTK, NRTK）为代表的实时增强定位服务技术。得益于越来越多 CORS（Continuously Operating Reference Stations, CORS）站的投入建设和使用，目前 NRTK 技术已成为最常见的 GNSS 实时高精度定位技术，该技术可在数秒内实现 0.02-0.03 m 的定位精度。虽然 NRTK 技术能够完全满足用户对定位性能和精度的需求，但是该技术仍然有如下几点问题尚无法解决：（1）NRTK 技术依赖双向通信，在无网络的区域无法使用；在架设电台的情况下通讯距离又受限，仅能支持 10-20 km 的作业范围；（2）NRTK 技术高度依赖服务端基站密度，随着距离的增大各项误差相关性减弱，难以通过作差消除，服务端大气建模精度将迅速衰减，用户定位精度也快速衰减无法得到保证。

RT-PPP 技术采用非差模式，通过使用精密的轨道、卫星钟、偏差等产品单站即可实现模糊度固定获得厘米级的定位精度。RT-PPP 技术充分发挥了标准单点定位和相对定位的优点，作业机动灵活、成本低且具有全球覆盖能力等诸多显著优势。RT-PPP 技术经过十几年的发展已经取得很多突破性的成果，目前采用多系统多频观测数据基本可以在十几分钟左右完成初始化过程实现模糊度固定^[29]，采用事后产品的情况下多系统多频观测数据最快可在数分钟完成初始化^[30]。然而，RT-PPP 技术仍然有如下几个问题没有得到解决：（1）RT-PPP 技术高度依赖于实时产品的精度，在实时产品精度不稳定的情况下，RT-PPP 常常难以实现可靠的高精度定位；（2）RT-PPP 虽然发展迅速但是仍然需要十几分钟的初始化时间，这始终无法满足导航测绘等领域用户实时高精度的位置信息需求。

针对 RT-PPP 收敛较慢，PPP-RTK 技术的出现提供了解决路径。PPP-RTK 技术经过近十年的发展，在理论和局部验证都取得了丰富的成果^[31]，但是大范围广

域的应用难以落地，主要限制因素包括：（1）PPP 定位需要用到的实时改正数处理过程复杂，技术难度高，目前各个机构提供的产品稳定性和可靠性难以达到安全应用的标准；（2）目前 PPP-RTK 需要的大气基本在局域小范围和全球尺度的 GIM 模型，局域小范围大气高度依赖密集的参考站，全球尺度的精度有限仅对单频用户有较大的改进，因而两者的实用性都不高；（3）实时 PPP 定位技术的可靠性高度依赖于产品的数据质量，而 PPP-RTK 产品的完好性相关研究还不够成熟。

针对上述挑战，本论文围绕“多频多系统 PPP-RTK 星基增强服务关键技术”系统地研究了实时精密产品估计、多尺度大气建模、服务完好性监测和星基播发验证等关键技术，具有重要理论意义和应用价值。在理论层面，本研究将 PPP-RTK 服务的完整技术链条从精密产品生成到大气增强建模，从完好性监测到星基播发验证纳入统一的研究框架，建立了多频多系统 PPP-RTK 服务的理论体系。特别是将完好性概念从传统的 SBAS/RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM) 领域引入 SSR 产品质量监控，提出了面向 PPP-RTK 服务的完好性框架，丰富了 GNSS 完好性理论。在应用层面，本研究设计的星基 PPP-RTK 增强服务系统，能够为自动驾驶、精准农业、无人机等新兴应用提供厘米级实时定位服务，具有广域覆盖、快速收敛和质量可控的特点。研究成果可直接应用于我国北斗星基增强服务的建设和优化，对提升我国卫星导航系统的服务能力和国际竞争力具有重要的战略意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 实时 PPP/PPP-RTK 系统

1.2.1.1 多频多系统融合 PPP

近年来，全球导航卫星系统发展迅速，为多频多系统 PPP 融合定位提供了基础保障。GPS 系统作为最早建成的全球卫星导航系统，经过多次现代化升级，目前已部署 Block III 卫星，增加了 L1C 和 L5 信号，显著提升了抗干扰能力和定位精度^[32]。北斗三号系统于 2020 年全面建成并提供全球服务，标志着中国自主建设的全球卫星导航系统正式投入运行^[33]。北斗三号卫星提供 B1I、B3I、B1C、B2a、B2b 等多个频点的信号，为高精度定位提供了丰富的观测数据和增强信息^[34]。Galileo 系统作为欧盟建设的全球卫星导航系统，提供 E1、E5a、E5b、E5 和 E6 等多频信号；Galileo 系统的信号设计先进，采用 AltBOC 调制方式，具有优异的信号质量和测距精度^[35]。GLONASS 系统也在进行 CDMA 信号的现代化改造，新一代 GLONASS-K 卫星增加了 L3 频点的 CDMA 信号，提升了系统的整体性能^[36]。表 1-1 给出了各个卫星系统的频率种类及调制方式。

随着 GNSS 卫星系统的不断发展,许多学者逐步发现联合多个不同的卫星系统,可以有效地改善卫星构型和观测方程,从而加速 PPP 的收敛。2013 年 Cai 在 PPP 中引入 GLONASS 观测数据发现,虽然静态定位精度无显著的提升,但 PPP 东方向的收敛速度从 28 分钟缩短到 17 分钟^[37];随后 Li 等人也引入 GLONASS 并得到类似的结论^[38];2019 年, Li 等人利用 Galileo 和 BDS 组合解算,同样提升了 PPP 的定位精度和收敛速度^[39]。2015 年, Li 等人首次采用 GPS/BDS2/Galileo/GLONASS 四系统解算,PPP 定位精度和收敛速度得到进一步提升,采用仿实时的产品也能在十几分钟收敛到 10 cm,较 GPS 单系统相比,收敛速度缩短了 70%,定位精度提升了 25%^[40],随后大量学者开始尝试四系统解算^[41-43]。

表 1-1 不同卫星系统信号种类及调制方式

Table 1-1 Signal Types and Modulation Schemes of each System

系统	主要信号	调制方式	备注
GPS	L1 C/A	BPSK	
	L1C	TMBOC	
	L2C	BPSK	
	L5	QPSK	高精度、安全
GLONASS	L1	BPSK	FDMA
	L2	BPSK	FDMA
	L3	BPSK/QPSK	CDMA
Galileo	E1	BOC	
	E5a	BPSK	
	E5b	BPSK	
	E5	AltBOC	高精度
	E6	BPSK	商用 HAS
BDS2	B1I	QPSK	
	B2I	QPSK	
	B3I	QPSK	
	B1I	QPSK	
BDS3	B1C	QMBOC	
	B2a	BPSK	
	B2b	QPSK	PPP-B2b
	B3I	QPSK	

此外,新增的 BDS、GALILEO 和 GPS III 卫星由于支持多种频率的观测数据, Elsobeiey 等人还研究了不同的三频线性组合对于 PPP 性能的改善效果,结果表明借助三频观测值,PPP 的收敛速度和精度均能提升 10%左右^[44]。Geng 基于多频 UPD 产品,采用三频 PPP 实现瞬时单历元超宽巷和宽巷模糊度固定,单历元 PPP 解算即可获得动态分米级定位精度^[45-46]。诸多研究均表明,基于三频 PPP 可以将 PPP 收敛时间缩短至 10-15 分钟左右^[47-48],然而再引入四频和五频观

测值后，对收敛时间提升不大^[49-50]。

1.2.1.2 PPP 模糊度固定

另一种加速 PPP 收敛的途径是模糊度固定技术。通过引入卫星端的相位偏差产品，使得 PPP 能够实现整数模糊度固定，从而显著缩短收敛时间并提高定位精度。目前学术界对 PPP 模糊度固定的方法归纳为三种：UPD 方法，整数钟方法和钟差去耦法^[51-53]。

2008 年，Ge 等人通过全球 IGS 观测数据首先提取星间单差未检校的相位延迟（Uncalibrated Phase Delay, UPD）^[51]，分析发现 UPD 在时间和空间上都比较稳定；随后基于估计得到的星间单差 UPD 产品实现了 PPP 的模糊度固定，其固定率在 80% 左右；与浮点 PPP 相比，固定模糊度后的 PPP 定位精度提升了 30%。此后，不断有学者对 UPD 的估计方法进行优化和扩展^[54-56]，目前已经有不少机构公开提供 UPD 产品，用户可自行下载用于 PPP 模糊度固定，包括 ESA、WHU、CODE 和 CNES 等^[57]。

与 UPD 方法不同，整数钟方法首先估计宽巷 UPD，然后利用卫星钟差吸收卫星端窄巷 UPD，进而恢复非差模糊度的整数特性^[52]，该方法同样能实现 PPP 模糊度固定。此外，IGS 分析中心 WHU (Wuhan University, WHU) 和 CODE (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 对整数钟方法进行优化分别提出了相位 clock/bias 模型^[58] 和 common clock 模型^[59]。目前 IGS 分析中心 GFZ (GeoForschungsZentrum, GFZ)、CODE、CNES/CLS (Centre National d'Etudes Spatiales and its subsidiary Collecte Localisation Satellites, CNES/CLS) 均采用该方法并定期发布相应的整数钟产品^[60]。

此外，加拿大学者 Collins 还提出了钟差去耦法^[53]，该方法的思想是伪距对应的 GNSS 卫星钟差由伪距确定，而载波相位对应的 GNSS 卫星钟差由载波相位确定，载波相位模糊度不再受伪距硬件延迟的影响，通过对伪距和载波相位使用不同的卫星钟改正数恢复非差模糊度的整数特性，也成功固定了 PPP 模糊度。

1.2.1.3 PPP-RTK 技术的提出与发展

为了克服 PPP 收敛速度慢的缺点，Wubben 等人提出了 PPP-RTK (Precise Point Positioning-Real Time Kinematic, PPP-RTK) 技术，通过区域参考站网络提供的精密轨道、钟差、相位偏差及大气改正信息，使得用户端能够在数秒至数十秒内实现厘米级定位精度和模糊度固定^[61]。PPP-RTK 技术结合了 PPP 的全球覆盖优势和 RTK 的快速收敛特性，同时避免了 RTK 对基准站距离的严格限制，因此被认为是未来高精度定位服务的重要发展方向，目前已成为当前 GNSS 领域的研究热点和应用前沿。2010 年 Teunissen 和 2011 年 Li 等人借助密集的基准站，逐站提取精密大气延迟信息，并进行空域和时域建模，将这些增强的改正信息播

发给用户使用，实现了非差模糊度的快速固定，基本实现了 PPP-RTK 系统的原型[62-63]。

由于 PPP-RTK 兼具 PPP 和 RTK 两种技术的优势，近年来越来越成为 GNSS 领域的研究热点和前沿方向。经过近二十年的发展，国内外学者对区域增强 PPP-RTK 的研究已经积累了比较丰富的成果。Teunissen 和 Odijk 等人基于 S-system 理论分析了不同 PPP-RTK 模型下的参数可估性和改正数特性，并建立了不同模型之间的转化关系[64-65]。随后，De Oliveira 等人基于通过不同尺度的区域增强网对对流层进行建模，并将模型参数播发给用户使用，结果表明不管是密集参考网还是稀疏参考网 PPP-RTK 测试在收敛时间上均有明显的缩短[66]。2017 年，Nadarajah 又基于不同尺度的区域增强网对电离层进行建模并将模型参数播发给用户，结果表明基于采用 30 s 间隔的数据 PPP-RTK 利用小尺度电离层增强收敛到 5 cm 精度仅需要 5 分钟，大概是 10 个历元[67]。此后，许多学者针对不同的区域[68]，不同尺度的大气增强[69-70]，不同的卫星系统[71-72]均进行了大量的 PPP-RTK 测试，表明 PPP-RTK 技术在收敛时间和精度上已经具备生产应用的条件。

然而，上述 PPP-RTK 研究大多依赖站间距 70~100 km 的密集参考站网，在站间距超过 200 km 的稀疏站网条件下，电离层和对流层的空间相关性显著减弱，传统建模方法的精度急剧退化，PPP-RTK 的快速收敛难以保证。此外，现有研究主要关注定位精度和收敛速度，对 SSR 产品的完好性监测和质量保障关注不足，这两个关键问题正是制约 PPP-RTK 从区域试验走向广域业务化应用的核心瓶颈，也是本文重点研究的方向。

1.2.2 大气建模

大气延迟（包括电离层延迟和对流层延迟）是制约 PPP-IAR/PPP-RTK 收敛速度的首要因素。对于 PPP-RTK 而言，服务端提供的大气改正精度直接决定了用户端的收敛时间和定位精度。因此，如何在广域稀疏站网条件下实现高精度的大气建模，是 PPP-RTK 技术从密集网络走向广域服务必须解决的关键问题。本节将分别从电离层建模和对流层建模两个方面，系统梳理国内外研究现状。

1.2.2.1 电离层建模

在电离层建模方面，广播电离层模型是单频用户消除电离层延迟的主要手段。Klobuchar 提出的 8 参数模型被 GPS 系统沿用至今，能够消除约 50%~60% 的电离层延迟[73]。Galileo 系统则采用更为先进的 NeQuick 模型基于三维电子密度剖面积分计算斜向 TEC[74]，Setti 等人对该模型进行评估发现其改正精度优于 Klobuchar 模型约 15%~25%，在中低纬度地区优势尤为明显[75]。北斗三号系统则采用的 BDGIM 模型基于改进球谐函数展开，评估表明其在亚太地区的改正精度

优于 Klobuchar 模型约 20%~30%^[76]。Tian 等人对上述三种广播模型进行了系统对比, 指出 BDGIM 在中国区域表现最优, NeQuick 次之^[77]。

在高精度电离层产品方面, IGS 电离层工作组自 1998 年起发布生产全球电离层图模型 (Global Ionospheric Map, GIM), Hernandez-Pajares 等人对 GIM 产品进行了长期评估, 指出其全球 VTEC 精度约为 2~8 TECU^[78]。Roma-Dollase 等人利用 Jason-2 测高数据和 dSTEC 方法对比了 7 个分析中心的 GIM 产品, 发现 CODE 和 UPC 产品总体精度最优 (2~4 TECU), 低纬度地区各产品精度均有所退化^[79]。为了进一步提升稀疏站情况下的建模精度, Lyu 等人提出了一种一致性区域垂直电离层模型, 通过引入卫星特定的电离层参数化方法, 在稀疏站网条件下将电离层建模精度提升至亚 TECU 水平, 并在 PPP-RTK 中验证了该模型对收敛时间的改善效果^[80]。Zhao 等人提出了众包用户增强的 PPP-RTK 加权电离层建模方法, 利用用户终端的 PPP 解算结果反馈电离层信息, 在大尺度稀疏网络中显著提升了电离层改正精度^[81]。此外, Wang 等人提出了一种基于众包数据的鲁棒高精度电离层延迟建模方法, 通过动态 PPP 用户网络提取高精度电离层延迟, 摆脱了对密集参考站的依赖^[82]。

在区域电离层建模方面, Wielgosz 等人研究了多项式拟合法在网络 RTK 中的应用, 指出该方法在电离层暴期间精度显著退化^[83-84]。Psychas 等人将 Kriging 插值引入 PPP-RTK 电离层建模, 在 50~100 km 站间距网络中实现了 0.5~2.0 TECU 的插值精度^[85]。Xu 等人提出了两步区域电离层建模方法, 将多项式拟合与 Kriging 插值相结合, 先通过多项式捕获电离层的系统性趋势, 再利用 Kriging 对残差进行空间插值, 在不同站间距条件下均取得了优于单一方法的建模精度^[86]。Bust 和 Mitchell 详细阐述了电离层层析成像 (Computerized ionospheric tomography, CIT) 技术的发展历程^[87], Ren 等人进一步证明联合地基 GNSS 与 LEO 星座数据能够显著改善 CIT 的垂直分辨率^[88]。

尽管上述研究在不同程度上改善了稀疏站网条件下的电离层建模精度, 但现有方法仍存在不足: 在站间距超过 200 km 的广域稀疏网络中, 亚 TECU 级的建模精度仍然难以稳定实现。

1.2.2.2 对流层建模

在 GNSS 实时对流层建模与增强方面, Li 等人提出了基于大规模 GPS 参考站网的实时 PPP 区域增强方法, 证明对流层增强可将 PPP 收敛时间从约 30 分钟缩短至 10 分钟以内^[89]。Zheng 等人利用中国区域 GNSS 网建立了实时对流层格网模型, 发现 GNSS 实时 ZWD 产品精度显著优于 GPT2w 先验模型^[90]。Shi 等人提出了基于指数衰减的对流层高程改正方法, 解决了参考站与用户站高差较大时的改正问题^[91]。

在稀疏站网对流层建模方面, De Oliveira 等人系统比较了密集网络和稀疏网

络条件下的对流层湿延迟建模效果,发现稀疏网络的 ZWD 建模精度较密集网络退化约 30%~50%,但仍能将 PPP-RTK 收敛时间缩短至 10 分钟以内^[66]。Cui 等人提出了广域对流层延迟改正建模方法,通过引入高程缩放因子和空间插值技术,在大高差地区实现了优于 1 cm 的 ZWD 建模精度,有效加速了 PPP 模糊度固定^[92]。Chen 等人提出了基于尺度因子的区域天顶对流层延迟建模方法,利用 Chebyshev 多项式拟合 PPP 导出的对流层延迟,仅需播发少量尺度因子参数即可实现高精度的对流层增强^[93]。此外, Gao 等人提出了利用全球预报系统天顶湿延迟增强 GNSS PPP-RTK 的方法,通过融合 NWP 预报产品和 GNSS 实时 ZWD 估计,在 GNSS 站点稀疏的区域也能提供可靠的对流层改正^[94]。

综合来看,稀疏站网条件下的对流层建模面临两个核心挑战:一是站间距增大导致空间插值精度下降,特别是在地形起伏较大的区域;二是对流层湿分量的时空变化剧烈,先验模型难以准确捕捉其短时变化。如何在有限的参考站条件下融合多源信息实现高精度对流层建模,是本文研究的重要内容之一。

1.2.2.3 大气模型与 PPP-RTK 定量关系

在大气建模与 PPP-RTK 的结合方面, Psychas 和 Verhagen 建立了大气改正精度与 PPP-RTK 收敛时间的定量关系,指出电离层改正是决定收敛速度的首要因素,对流层改正的影响相对次要但不可忽视^[95]。Zhang 等从 PPP-RTK 统一理论框架出发,系统分析了电离层改正精度与收敛速度的定量关系,指出亚 TECU 级改正可实现近乎瞬时的模糊度固定^[96]。Zhang 等人基于新一代 GNSS 星座和信号对 PPP 和 PPP-RTK 性能进行了全面评估,指出多频多系统融合配合高精度大气改正可将 PPP-RTK 收敛时间压缩至 1 分钟以内^[97]。Cui 等人提出了大尺度分层 PPP-RTK 服务策略,通过广域-区域-局域三级大气建模架构,在站间距 300 km 以上的稀疏网络中实现了 3 分钟以内的 PPP-RTK 收敛^[98]。Li 等人对 PPP-RTK 技术进行了全面综述,指出多尺度大气建模、LEO 增强和机器学习辅助建模是未来发展的重要方向^[99]。

综上所述,大气延迟建模在电离层和对流层两个层面均取得了显著进展,但在广域等大尺度区域建模精度还有待提高,亟须发展新的理论方法以满足 PPP-RTK 对大气改正的高精度、高可靠性需求。

1.2.3 服务完好性监测

1.2.3.1 完好性监测理论

完好性 (Integrity) 这一概念最初是在民航领域内为生命安全应用而设计的,国际民航组织 (ICAO) 将其与精度 (Accuracy)、可用性 (Availability) 和连续性 (Continuity) 并列定义为导航系统四大性能指标^[100]。随后,《美国联邦无线电导航计划》进一步细化,将完好性定义为:对导航系统所提供信息正确性的可

信赖程度的一种度量，包括系统在异常发生时及时向用户发出告警的能力^[101]。目前，完好性已在特定系统中实现，包括星基增强系统和接收机自主完好性监测，并由美国航空无线电技术委员会进行标准化^[102]。

在 GNSS 导航领域，完好性监测的核心目标是确保用户在使用定位服务时，能够获得关于定位误差是否在可接受范围内的可靠信息。当系统出现故障导致定位误差超出允许限值时，系统必须在规定时间内向用户发出告警。完好性监测涉及以下几个核心指标^[100,102-103]：

(1) 告警门限 (Alert Limit, AL)

告警门限是特定操作或应用所允许的最大误差。当实际误差超过告警门限时，系统必须发出告警。不同应用场景对告警门限的要求不同，例如航空精密进近 APV-I 要求水平告警门限为 40 m，高程告警门限为 50 m；而 CAT-I 精密进近要求水平为 40 m，高程为 10~15 m。

(2) 保护级 (Protection Level, PL)

保护级是基于当前观测条件和系统状态计算的定位误差上界，其含义为在给定的完好性风险概率下，实际定位误差超过保护级的概率不大于完好性风险。

(3) 完好性风险 (Integrity Risk, IR)

完好性风险是指系统在未发出告警的情况下，实际定位误差超过告警限值的概率。ICAO 对不同运行类别规定了不同的完好性风险要求，例如航路飞行要求每小时完好性风险不超过 10^{-7} 。

(4) 告警时间 (Time to Alert, TTA)

告警时间是从系统出现危险误导信息到用户收到告警之间的最大允许时间。不同运行类别的 TTA 要求从 6 秒 (CAT-III 精密进近) 到数分钟不等。

1.2.3.2 SBAS 服务完好性

GNSS 技术虽然能够满足诸多领域内用户高精度定位的需求，但是仍然无法满足民航用户对 GNSS 导航定位精度、完好性、连续性及可用性的需求。为此，世界主要国家相继建立了星基增强系统 (Satellite-Based Augmentation System, SBAS)，包括 WAAS、EGNOS、GAGAN、MSAS、BDSBAS 等。SBAS 系统采用地球静止轨道 (Geostationary Orbit, GEO) 卫星通过 MT2-6 (Message Type, MT) 播发用户完好性信息，通过 MT2-MT5，MT24-26 等播发差分改正数来提高 GNSS 系统的稳定性、可靠性和完好性等。目前 SBAS 播发的完好性参数主要包括：用户差分测距精度 (User Differential Range Error, UDRE)、星历钟差改正精度等，用户基于这些信息可以计算出相应的保护水平^[104]。此后，国内外很多学者基于 SBAS 系统，对完好性信息的生成进行了优化和改进^[105-106]。

然而，由于这些 SBAS 系统均是基于伪距的单频星基增强系统，受电离层误差的影响，以上这些系统均无法满足国际航空无线电技术委员会组织 (Radio

Technical Commission for Aeronautics, RTCA) 规定的一类精密进近性能要求 (Category I precision approach, CAT-1)。为此, 国际民航组织发布了双频多系统 DFMC (Dual-frequency Multi-constellation, DFMC) SBAS 系统国际标准, 来削弱电离层对完好性的影响, 我国的 BDSBAS 系统也确认将通过 B2a 信号来播发 DFMC 相关的完好性信息^[107-108]。

目前对于 SBAS 完好性的研究已经积累了很多成果, 然而 PPP-RTK 系统的完好性研究尚不成熟, 仍然处在探索和验证阶段。2016 年, QZSS 首先提出了 CLAS (Centimeter Level Augmentation Service, CLAS) 服务相关的完好性设计^[109], 该设计方案指出 QZSS 播发的完好性将包含三类信息: 告警信息, SSR 用户的测距精度 (User Range Accuracy, URA), 大气改正的质量因子。随后, QZSS 服务在 2018 公开了相应的用户接口文件 IS-QZSS (Interface Specification for QZSS, IS-QZSS)^[110], 文中给出了 CLAS 完好性信息相关的播发协议。随后, 2018 年 Trimble 也提出了 CenterPoint RTX Fast 定位服务的完好性^[111], Rodriguez-Solano 更进一步分析了各类改正数质量因子的计算方法以及 RTX 系统整体完好性监测效果^[112]。随后, 不少学者针对 PPP 的方程残差进行分析, 并基于 PPP 方程残差构建实时 PPP 产品可靠性的监控方法^[113-114]。

然而, 上述研究在 PPP-RTK 完好性监测的理论深度和方法细节方面仍存在明显不足, 具体体现在以下几个方面:

(1) 质量因子的设计逻辑与计算方法。QZSS CLAS 虽然定义了三类完好性信息 (告警信息、URA、大气质量因子), 但其公开文档仅给出了播发协议层面的描述, 并未详细公开质量因子的具体计算方法和统计模型。Trimble RTX 的完好性设计同样侧重于系统架构层面, Rodriguez-Solano 等人虽然分析了各类改正数质量因子的计算方法, 但基于商业系统的内部评估, 缺乏可复现的数学框架^[112]。

(2) 服务端 SSR 产品的实时质量监控。传统的完好性研究主要关注用户端的故障检测与排除 (FDE), 对服务端 SSR 产品本身的质量监控关注不足。Xie 等人提出了实时精密卫星轨道和钟差产品的质量监控方法, 通过定义健康指标 (Health Indicator, HI) 对卫星改正数进行实时评估, 当产品质量退化时及时发出告警^[115]。然而, 现有方法大多针对轨道钟差产品, 缺乏对轨道/钟差/UPD/大气等多类 SSR 产品的统一质量因子定义和联合监控框架。

(3) 从服务端到用户端的完整完好性链路。Kim 等人基于 QZSS CLAS 的完好性消息计算了保护水平, 并与 RTK 定位误差进行了对比验证^[116]。尽管如此, 从 SSR 产品生成端的质量因子计算, 到播发链路的完好性信息编码, 再到用户端的保护水平计算和故障响应, 这一完整链路的集成设计和验证仍然十分匮乏。

综上所述, PPP-RTK 完好性监测研究虽然在近年来取得了重要进展, 但在多个方面仍有待深入。这些不足为本文提出基于相位残差的 QI 质量因子方法和自适应完好性监测框架提供了明确的研究切入点。

1.2.4 现有 PPP-RTK 研究的不足

目前, 已经有很多学者基于 PPP-RTK 技术对 GNSS 快速实时精密定位进行了大量的研究, 取得了丰硕的成果。但对于多频多系统 PPP-RTK 快速收敛和服务产品的稳定性研究, 还有一系列需要解决的问题, 主要包括:

1) 受制于实时数据流测站的分布和实时数据流的延迟, 实时产品的精度和连续性较事后产品还有一定的差距, 实时的 PPP-IAR/PPP-RTK 测试效果还不稳定, 如何进一步提升实时产品的精度将是长期面临需要解决的问题。

2) GNSS 多频多系统数据处理时涉及种类繁多的伪距偏差和相位偏差, 目前 IGS 各个机构产品形式均不统一, 各家不同形式的产品难以兼容, 终端 PPP-RTK 定位使用时难以兼容, 如何统一种类繁多的偏差项和 PPP-RTK 定位模型还有赖于对各个偏差项特性做更进一步、更细致的分析。

3) PPP-RTK 的快速收敛依赖高密度的区域站, 目前 PPP-RTK 1 min 收敛大都依赖 70-100 km 密集的跟踪站网, 这导致 PPP-RTK 系统建设的成本巨大, 如何适当地降低站密度而不影响 PPP-RTK 收敛速度和精度, 还有赖于稀疏区域站电离层和对流层模型的进一步优化。

4) 现有的 GNSS 完好性研究主要集中在传统的 RAIM/SBAS/ARAIM 方法, 面向 PPP-RTK 服务的 SSR 产品完好性监测研究较少, 实时服务 SSR 产品的完好性监测框架尚不成熟。特别是缺乏从产品端到用户端的完整完好性链路设计, 以及产品质量因子的实时计算方法, PPP-RTK 定位的可靠性和准确性如何保证, 尤其是在自动驾驶等领域仍然是一个巨大的挑战。

5) 现有的星基增强服务 (HAS、CLAS、PPP-B2b) 在产品类型、覆盖范围和定位性能方面存在显著差异。不少学者提出的高精度 PPP-RTK 服务全链路验证又不够充分, 缺乏从产品生成、大气增强、完好性监测到星基播发的全链路集成验证。

针对上述不足, 本论文将系统研究多频多系统 PPP-RTK 星基增强服务的关键技术, 力求在实时产品估计、大气建模、完好性监测和服务验证等方面取得创新性成果。

1.3 研究目的与内容

1.3.1 研究目标

本研究将搭建一套完善的实时多频多系统 PPP-RTK 增强服务, 并提出相应的完好性监测与评估方法, 以实现快速、可靠、高精度的 GNSS 定位增强服务。具体目标包括:

第一, 构建多频多系统 PPP-RTK 数学模型与方法体系。基于非差非组合观测模型, 建立统一的多系统多频 PPP-RTK 数学模型, 实现 GPS、GLONASS、

Galileo、BDS 等系统的融合处理，充分利用多系统、多频信号的优势，提升定位精度和模糊度固定速度。

第二，开发一套实时精密产品生成服务系统。基于实时精密定轨、卫星钟差估计和相位偏差产品生成的技术原理，实现多系统多频实时精密产品的自主生成，为 PPP-IAR 服务提供高质量的改正产品。

第三，提出适用于稀疏网络的广域电离层建模方法。针对站间距离超过 200 km 的稀疏参考站网络，提出新的电离层建模方法，提高电离层产品精度，加速用户端 PPP-RTK 收敛过程。

第四，建立基于质量因子（Quality Indicator, QI）的完好性监测与评估方法。提出基于相位残差特性分析的质量因子计算方法，对实时精密产品和大气改正数进行完好性监测，实现产品异常检测与告警，提升 PPP-IAR/PPP-RTK 服务的可靠性。

第五，设计并实现基于卫星播发的 PPP-RTK 增强服务。搭建包括服务端产品播发和用户端定位监控的完整 PPP-RTK 服务系统，采用 L-Band 卫星播发以上差分产品，通过用户端实时定位解算分析卫星播发的 PPP-RTK 服务系统的性能。

1.3.2 技术创新点

本研究的主要技术创新点包括：

（1）提出了适用于稀疏站网的 Sat-ASHF（Satellite-specific Adjusted Spherical Harmonic Function, Sat-ASHF）电离层建模方法。针对站间距离超过 200 km 的稀疏参考站网络，对传统调整的球谐函数模型进行改进，通过优化模型参数方法，显著提升电离层建模精度。实验结果表明，在平均基线 244.6 km 的稀疏站网条件下，改进的 ASHF 模型相比传统的 ASHF 模型精度提升约 90%，有效解决了稀疏站网条件下电离层建模精度不高的问题，为大尺度 PPP-RTK 服务提供保障。

（2）提出了基于相位残差特性的质量因子计算方法。通过深入分析 PPP-IAR 解算后的相位残差统计特性，建立了残差与实时产品误差之间的关系模型，提出 OCU（Orbit/Clock/UPD, OCU）、电离层产品、对流层产品 QI 计算方法。该方法能够实时反映卫星轨道/钟差/相位偏差产品、大气产品的质量，为用户端提供可靠的完好性信息。实验验证表明，在卫星轨道机动或产品精度下降期间，使用完好性和 QI 信息能够显著提高定位精度和结果的可靠性，同时降低错误固定率。

（3）建立了多系统多频 SSR 改正数生成与播发的完整技术体系。开发了包括实时精密轨道确定、实时钟差估计、多频相位偏差估计和大气建模的完整技术流程，实现了 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 四系统的实时精密产品自主生成，提出了基于非差非组合（UDUC）模型的原始频点相位偏差估计方法，解决终端设备不同频点组合使用的不兼容。所生成的实时产品已上传至 IGS Caster

(products.igs-ip.net) 或对应的 L-Band 通讯卫星, 为全球用户提供公开的多系统多频 SSR 改正服务。

(4) 提出了多频多系统实时 UPD 与 IFCB 联合处理策略。多频 GNSS 数据处理时, 频间钟差偏差 (IFCB) 对第三频及以上频率的模糊度固定构成严重制约。传统方法通常将 IFCB 作为独立参数提前改正再进行 UPD 估计, 流程复杂且误差耦合传递。本文提出的 IFCB 与多频 UPD 统一估计策略, 在超宽巷/宽巷/窄巷级联框架下将 IFCB 吸收至 UPD 中联合求解, 简化了处理流程并避免了分步处理带来的误差累积。

(5) 设计了局域-残差格网联合的大气建模。在局域建模的基础上利用周边参考站的模型残差构建残差格网进行精化改正, 实现了不同空间尺度大气信息的有效融合。与采用单一尺度建模相比, 联合局域-残差格网模型可以兼顾模型精度与覆盖范围需求。在使用网络播发改正数的情况下, 由于带宽无限制, 实验表明采用该方案能够进一步将模型精度提升 13%。

1.4 论文章节设计

1.4.1 技术路线

本论文围绕 PPP-RTK 实时增强服务以及完好性监测, 针对当前研究的不足之处, 提出了对应的研究目标、当前问题的解决思路以及关键解决思路等, 并最终通过卫星播发全链路验证了方法的可行性, 对应的技术路线和内容关系如表 1-2 所示。

表 1-2 现有不足、研究目标与解决思路的对应关系

Table 1-2 Correspondence between existing limitations, research objectives, and proposed solution approaches

现有不足	研究目标、思路	创新点	对应章节
实时产品精度与稳定性不足	开发实时精密 SSR 产品生成与增强服务系统	创新点(3) 创新点(4)	第 3 章
多频多系统偏差项不兼容	构建 UDUC PPP-RTK 统一模型, 基于原始频点的偏差估计	创新点(3)	第 2 章 第 3 章
稀疏站网大气建模精度不足	提出稀疏站广域电离层建模方法以及局域-残差格网大气建模	创新点(1) 创新点(5)	第 4 章
SSR 完好性监测框架不成熟	提出基于相位残差的质量因子计算和产品完好性监测方法	创新点(2)	第 5 章
卫星播发全链路集成验证不充分	设计星基 PPP-RTK 增强服务, 完整的星基增强验证体系	创新点(3)	第 6 章

1.4.2 论文章节安排

图 1-1 给出了本文内容的框架结构，包括当前研究不足之处、本研究各个关键技术与各个章节的关系等。

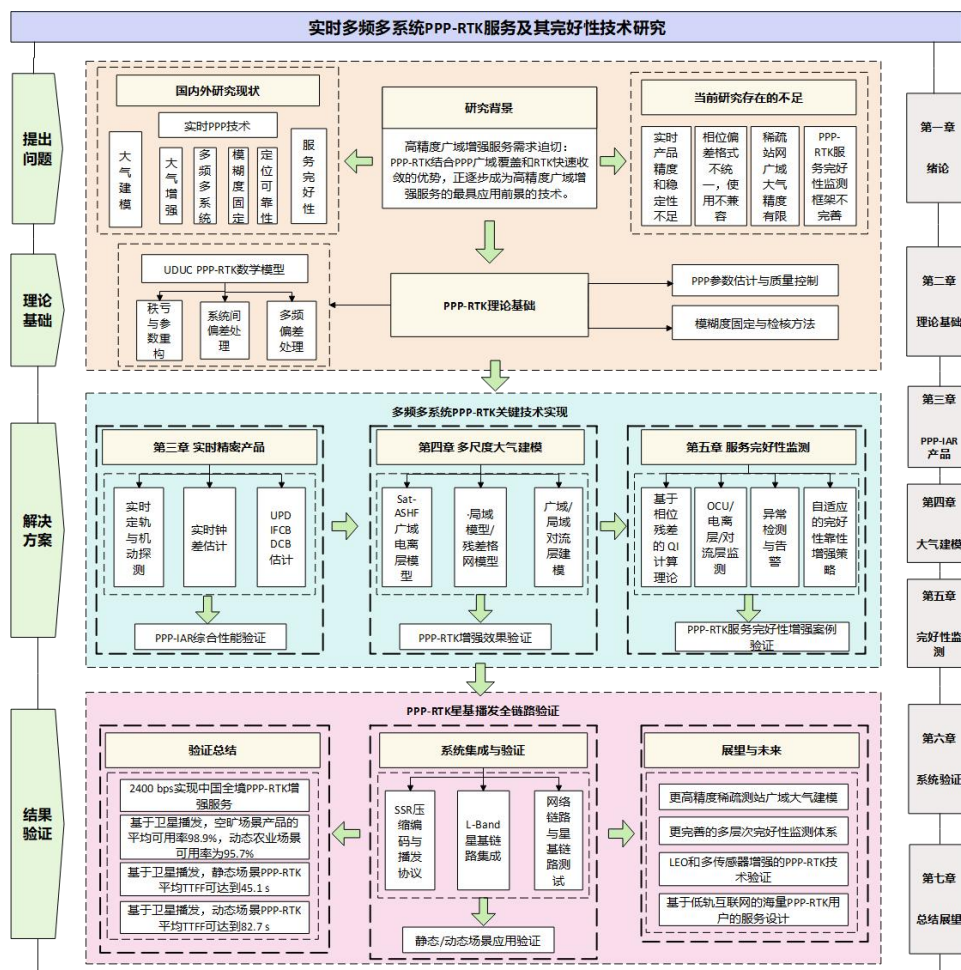


图 1-1 论文内容框架及各章节关系

Figure 1-1 Roadmap of the Research and the Relationship with Each Chapters

文章共分为七章，包括 PPP-RTK 理论基础、实时精密产品生成、区域电离层建模、完好性监测以及服务系统设计与验证等核心内容，各章节的主要内容安排如下：

第一章绪论：本章首先阐述 PPP-RTK 技术的研究背景及意义，分析高精度定位技术在自动驾驶、精准农业、无人机导航、测量测绘等领域的迫切需求，以及 PPP-RTK 技术相对于传统 RTK 和 PPP 技术的优势。然后系统综述国内外 PPP-RTK 技术的研究现状，包括理论方法、精密产品生成、大气建模与改正、完好性监测以及服务系统与应用等方面的研究进展。在此基础上，明确本研究的目标并提出本研究的技术创新点。最后，介绍论文的整体结构安排。

第二章多频多系统 PPP-RTK 数学模型与方法：本章首先介绍 GNSS 观测方程的基本形式，包括伪距观测方程和载波相位观测方程。然后，详细推导 UDUC

PPP-RTK 模型，分析模型中的参数化策略和秩亏问题的解决方法；接着阐述多频多系统融合的处理策略，以及多频观测数据的处理策略。此外，还介绍了 PPP 中常用的参数估计和抗差估计策略，最后介绍了级联模糊度固定方法，模糊度检核策略等。本章为后续章节的研究奠定理论基础。

第三章多系统多频实时产品估计与 PPP-IAR 验证：本章详细介绍实时精密产品生成的关键技术。首先阐述实时精密定轨（Real-time Precise Orbit Determination, RT-POD）技术，包括超快速轨道估计方法、轨道预测策略以及轨道产品的质量评估。然后介绍实时精密钟差估计（Real-time Precise Clock Estimation, RT-PCE）技术，包括基于 Kalman 滤波的实时钟差估计方法。接着详细阐述实时相位偏差估计（RT-UPD）技术，包括多频原始频点 UPD 的估计方法，以及 IFCB 和 DCB 等偏差的处理策略。最后，基于实测的数据，分析实时产品的精度以及 PPP-IAR 综合定位效果。

第四章多尺度大气建模及实时 PPP-RTK 验证：本章是论文的核心章节之一，重点阐述不同尺度的大气建模方法，包括广域电离层、对流层以及局域电离层和对流层。针对广域电离层，首先分析现有电离层建模方法的局限性，特别是在稀疏网络条件下的性能不足；接着提出顾及空间差异的 Sat-ASHF 电离层建模方法，阐述其在稀疏区域网络上的优化策略。针对局域电离层，提出了局域模型+残差格网的建模方案，显著提升模型的精度。考虑到播发带宽，对流层则采用稀疏的格网化的三参数多项式建模。本章的研究成果显著降低了 PPP-RTK 服务对密集参考站网络的依赖和 PPP-RTK 的收敛速度。

第五章 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性监测：本章是论文的另一核心章节，重点阐述基于相位残差特性的质量因子（QI）生成方法。首先详细介绍基于无电离层（IF）和无几何（GF）组合的相位残差的 PPP-IAR 产品 QI 生成方法，阐述 IF 残差作为产品质量指标的理论依据。其次，介绍了基于模糊度固定解的大气产品 QI 计算方法。然后通过分析 QI 与真实产品差异评价 QI 的可靠性。最后，通过实际数据验证实时产品质量监测的重要性，包括轨道机动、钟差跳变等场景下 QI 的显著意义。

第六章基于卫星播发的 PPP-RTK 服务验证：本章首先阐述系统的总体架构，包括数据流管理模块、服务解算模块、数据播发模块和系统监控模块。然后基于卫星播发的实际速率情况，设计了一套播发协议和卫星播发系统。最后通过系统测试验证了整体 PPP-RTK 的定位效果。本章的研究成果为 PPP-RTK 技术的实际应用提供了完整的系统解决方案。

第七章总结与展望：本章对全文进行总结，归纳本研究的主要工作和创新点。最后展望 PPP-RTK 技术的未来发展方向，包括更高精度的大气建模方法、更完善的完好性监测体系、多传感器的融合定位技术以及在新兴应用领域的推广等。

第 2 章 多频多系统 PPP-RTK 数学模型与方法

本章系统阐述多频多系统 PPP-RTK 的数学模型与方法基础。首先介绍精密单点定位的基本原理,包括 GNSS 误差源及改正方法、精密单点定位观测方程以及不同的观测值线性组合方程;其次建立非差非组合 PPP-RTK 的函数模型,并扩展至多系统和多频处理;然后阐述 PPP 参数估计方法和质量控制策略;最后详细介绍 PPP 模糊度固定与检核方法。

2.1 精密单点定位原理

2.1.1 GNSS 误差源及改正方法

GNSS 观测量受到多种误差源的影响,这些误差源可以按照其来源分为与卫星相关误差、与传播路径相关误差、与接收机相关误差以及与地球物理效应相关误差四大类。精确建模和改正这些误差是实现高精度定位的前提条件,下文将详细介绍每类误差的改正方法和模型。

2.1.1.1 与卫星相关的误差

(1) 卫星轨道误差

卫星轨道误差是影响定位精度的主要误差源之一,广播星历的轨道精度通常为米级,而精密星历的轨道精度可达厘米级。在 PPP 处理中,通常使用 IGS 提供的精密轨道产品来消除轨道误差的影响。Kouba 和 Héroux 系统总结了利用 IGS 轨道产品进行精密单点定位的方法,指出使用 IGS 最终精密轨道可以实现厘米级的静态定位精度^[117]。

(2) 卫星钟误差

卫星钟差误差同样是 PPP 的关键误差源,卫星原子钟的频率稳定性虽然很高,但仍然存在钟差漂移和随机波动。广播星历中的钟差参数通常采用二阶多项式模型表示:

$$dt^j(t) = a_0 + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 \quad (2-1)$$

其中, a_0 为钟差, a_1 为钟速, a_2 为钟漂, t_0 为参考时刻。广播星历钟差参数精度约为数纳秒,对应约 1-2 米的距离误差,而 IGS 精密钟差产品的精度可达 0.1 纳秒以下。

(3) 卫星天线偏差

卫星天线相位中心偏移 (Phase Center Offset, PCO) 和相位中心变化 (Phase Center variation, PCV) 描述了卫星天线的相位中心与几何参考点之间的偏差,对卫星天线而言,该项误差通常可以达到分米到米级。天线相位中心可采用如下方式进行改正:

$$\begin{aligned}
 \Delta\rho_{ant}^j &= \mathbf{R}_{sat}^j \cdot d_{pcv}^j + \Delta\phi_{pcv}^j(\alpha, z) \\
 \mathbf{R}_{sat}^j &= [\bar{e}_1 \quad \bar{e}_2 \quad \bar{e}_3]^T \\
 \bar{e}_3 &= -\frac{\mathbf{X}^j}{\|\mathbf{X}^j\|} \\
 \bar{e}_2 &= \frac{\bar{e}_3 \times (\mathbf{X}^{sun} - \mathbf{X}^j)}{\|\bar{e}_3 \times (\mathbf{X}^{sun} - \mathbf{X}^j)\|} \\
 \bar{e}_1 &= \frac{\bar{e}_2 \times \bar{e}_3}{\|\bar{e}_2 \times \bar{e}_3\|}
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

其中, \mathbf{R}_{sat}^j 为卫星质心坐标系到 ECEF 坐标系的旋转矩阵, \mathbf{X}^{sun} 和 \mathbf{X}^j 分别为太阳和卫星位置; $d_{pcv}^j = [dN, dE, dU]^T$ 为卫星天线 PCO 在卫星体坐标系中的三维偏移量; $\Delta\phi_{pcv}^j(\alpha, z)$ 为与方位角 α 和天底角 z 相关的 PCV 改正值。IGS 提供了各卫星系统的天线相位中心改正模型 (如 `igs20.atx`), 在 PPP 处理中需要使用配套的模型版本对这些偏差进行改正, PCV 一般按一定的间隔给出各个角度的改正值, 使用时一般需要通过内插计算各个实际角度的改正量。

(4) 相对论效应

相对论效应包括狭义相对论效应和广义相对论效应。由于卫星在轨道上高速运动, 其时钟相对于地面时钟存在频率偏移。相对论效应的改正量可达数十微秒级别, 对应数千米的距离误差, 必须予以精确改正。其中, 由卫星平均速度和引力势差引起的常量部分已在卫星时钟出厂时通过调整标称频率予以补偿。周期性相对论效应误差, 可通过数学公式计算^[118]:

$$\Delta t_{rel}^j = -\frac{2}{c^2} \mathbf{r}^j \cdot \dot{\mathbf{r}}^j = -\frac{2\sqrt{\mu a}}{c^2} e \sin E \tag{2-3}$$

其中, r^j 和 \dot{r}^j 分别为卫星的位置和速度向量, μ 为地球引力常数, a 为轨道半长轴, e 为轨道偏心率, E 为偏近点角。对于 GPS 卫星, 周期性相对论效应的最大改正量可达到 21 米。

(5) 卫星硬件延迟

卫星硬件延迟是指 GNSS 信号在卫星内部从信号生成到天线发射过程中, 经过各电子元器件时所产生的时间延迟。由于不同频率的信号在卫星硬件中经历的电路路径和滤波器特性不同, 各频率信号之间存在差异性的硬件延迟, 又称为差分码偏差 (Differential Code Bias, DCB)。卫星硬件延迟对相位观测值和伪距观测值都有影响, 分别称为伪距硬件延迟和载波相位硬件延迟两类。

伪距硬件延迟直接影响伪距观测值的精度, 在 PPP 数据处理中可以采用 IGS 分析中心 (如 CAS、DLR 等) 发布的卫星 DCB 产品进行改正。

载波相位硬件延迟同样存在于各频率的载波相位观测值中, 载波相位硬件延迟的特殊之处在于, 其小数部分无法与整周模糊度分离, 因此被吸收到模糊度参

数中, 导致模糊度失去整数特性。为恢复模糊度的整数性, 需要在服务端单独估计未校准相位延迟 (Uncalibrated Phase Delay, UPD) 并播发给用户, 用户端改正后可以恢复模糊度的整数特性, 从而实现 PPP 整周模糊度固定^[51]。

(6) 地球自转效应

地球自转效应, 也称为 Sagnac 效应, 是由于 GNSS 信号从卫星发射到接收机接收的传播过程中, 地球发生了自转, 导致信号传播路径发生变化而产生的距离偏差。由于信号传播时间约为 0.07 秒, 在此期间地球自转使得接收机位置在惯性坐标系中发生了位移, 因此需要对卫星位置进行地球自转改正:

$$\begin{bmatrix} X^j \\ Y^j \\ Z^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega\Delta t) & \sin(\omega\Delta t) & 0 \\ -\sin(\omega\Delta t) & \cos(\omega\Delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0^j \\ Y_0^j \\ Z_0^j \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

其中, Δt 为信号传播时间, ω_e 为地球自转角速度, (X_0^j, Y_0^j, Z_0^j) 为信号发射时刻卫星在 WGS-84 坐标系中的位置, (X^j, Y^j, Z^j) 为改正后的卫星位置。

Sagnac 效应引起的距离改正量可达数十米量级, 若不加以改正将严重影响定位精度。该改正量的大小与卫星的几何位置和信号传播时间有关, 对于 GPS 卫星, 典型的 Sagnac 改正量约为 30 m^[119]。

(7) 卫星星端多径

卫星端多径误差最早在 GPS SVN49 卫星上被发现, 该卫星由于星体内部信号反射导致伪距观测值出现显著的系统性偏差, 一度影响其正常使用^[120]。在北斗系统中, 卫星端多径问题更为突出, Hauschild 等首次报告了 BDS2 卫星信号中存在的码/载波发散现象^[121]。Wanninger 和 Beer 对这一问题进行了系统性研究, 发现 BDS2 IGSO 和 MEO 卫星的伪距观测值存在与高度角相关的系统性偏差, 并且还提出了最早的星端多径改正方案, 将高度角按 10° 间隔分段, 对每个分段内的 MP 组合残差取均值作为改正值^[122]。该方法简单有效, 为后续研究奠定了基础。改正值以查找表的形式提供, 用户在数据处理时根据卫星高度角查表进行伪距改正。

2.1.1.2 与传播路径相关的误差

大气延迟误差是 GNSS 信号传播过程中最大误差源之一, 主要包括对流层延迟和电离层延迟。地表 0-50 km 高度范围内称为对流层, 50-1000 km 高度范围内称为电离层。

(1) 电离层延迟

电离层存在大量的自由电子, 这些自由电子会影响 GNSS 信号的传播速度。电离层对 GNSS 信号的影响与电磁波的频率相关, 其中一阶项为主要分量, 忽略高阶项影响其计算方法可表示为:

$$I_i^j = \frac{40.3}{f_i^2} STEC = \frac{40.3}{f_i^2} mf_{iono}(e) \cdot VTEC \quad (2-5)$$

其中, f_i 为信号频率, $STEC$ 为斜路径总电子含量 (单位: TECU), $VTEC$ 为天顶方向总电子含量, $mf_{iono}(e)$ 为电离层映射函数, e 为卫星高度角。薄层模型假设下的电离层映射函数可表示为:

$$mf_{iono}(e) = \frac{1}{\cos z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cos e}{R_E + H_{ion}}\right)^2}} \quad (2-6)$$

其中, R_E 为地球平均半径, H_{ion} 为电离层薄层高度 (通常取 350-450 km), z' 为电离层穿刺点处的天顶角。对于 L1 频率, 天顶方向电离层延迟通常为 2-50 TECU, 对应约 0.3-8 米的距离误差。在双频或多频 PPP 处理中, 可以通过无电离层组合 (Ionosphere-Free, IF) 消除一阶电离层延迟的影响; 在非差非组合模型 PPP 中, 电离层延迟通常作为未知参数进行估计; 而在 PPP-RTK 中通过由外部模型进行约束解算。

(2) 对流层延迟

对流层延迟是 GNSS 信号穿过对流层时产生的信号传播延迟。对流层延迟与信号频率无关, 无法通过多频组合消除, 需要通过模型和参数估计的方式来消除对应的误差。对流层总延迟可以表示为干延迟和湿延迟两部分之和:

$$T_{trop} = mf_h(e) \cdot ZHD + mf_w(e) \cdot ZWD \quad (2-7)$$

其中, ZHD 为天顶干延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD), ZWD 为天顶湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD), $mf_h(e)$ 和 $mf_w(e)$ 分别为干延迟和湿延迟的映射函数 (如 VMF3 映射函数), e 为卫星高度角。干延迟约占对流层总延迟的 80-90%, 可以通过 Saastamoinen 模型精确计算^[123]:

$$ZHD = \frac{0.0022768 \cdot P}{1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00028 \cdot H} \quad (2-8)$$

其中, P 为测站气压 (hPa), ϕ 为测站纬度, H 为测站椭球高 (km)。

ZWD 由大气中水汽的折射效应引起, 虽然仅占 ZTD 的约 10-20%, 但由于水汽的时空分布高度不均匀, ZWD 的变化幅度可达数厘米至数十厘米, 且 ZWD 难以精确建模, 通常在 PPP 处理中作为未知参数进行估计^[124], 初始值可由经验模型提供, 如 GPT 模型^[125]等。

2.1.1.3 与接收机相关的误差

(1) 接收机钟误差

接收机钟差是由接收机内部时钟与 GNSS 时间系统之间的偏差引起的。接收机通常使用石英晶体振荡器, 其频率稳定性远低于卫星原子钟, 因此接收机钟差

的变化较大。在 PPP 处理中，接收机钟差作为未知参数在每个历元独立估计，通常采用白噪声模型。

(2) 相位缠绕误差

载波相位缠绕效应 (Phase Wind-up) 是由于卫星和接收机天线的相对取向变化引起的载波相位周期性的变化。相位缠绕改正量 $\Delta\phi_{pw}$ 可通过以下公式计算^[126]:

$$\Delta\phi_{pw} = \text{sign}(\vec{k} \cdot (D' \times D)) \cdot \arccos\left(\frac{D' \times D}{|D'| |D|}\right) \quad (2-9)$$

其中， \vec{k} 为卫星到接收机的单位方向向量， D' 和 D 分别为卫星和接收机天线的有效偶极子向量。卫星天线有效偶极子向量 D' 由卫星姿态确定：

$$\begin{aligned} D' &= \vec{e}'_x - \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{e}'_x) + \vec{k} \times \vec{e}'_y \\ D &= \vec{e}_x - \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{e}_x) + \vec{k} \times \vec{e}_y \end{aligned} \quad (2-10)$$

其中， \vec{e}'_x 和 \vec{e}'_y 为卫星质心坐标系的 x 轴和 y 轴在地心地固坐标系下的单位向量； \vec{e}_x 和 \vec{e}_y 为测站地方坐标系的 x 轴和 y 轴单位向量在地心地固坐标系下的单位向量。对于静态接收机，相位缠绕主要由卫星姿态变化引起；对于动态接收机，还需要考虑接收机天线取向的变化，相位缠绕效应的最大改正量可达半个载波周期。

(3) 接收机天线误差

接收机天线 PCO 和 PCV 与卫星天线类似，需要使用天线校准模型进行改正。IGS 提供了常用接收机天线的校准参数。接收机天线的 PCO 和 PCV 改正和卫星的天线改正类似：

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{ant}^j &= \mathbf{R}_{enu} \cdot d_{pcv,r} + \Delta\phi_{pcv,r}(\alpha, z) \\ \mathbf{R}_{enu} &= \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \\ \vec{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (2-11)$$

其中， R_{enu} 为站心坐标系到 ECEF 坐标系的旋转矩阵， $d_{pcv,r}$ 为接收机天线 PCO 偏移量， $\Delta\phi_{pcv,r}(\alpha, z)$ 为与方位角 α 和天顶角 z 相关的天线相位中心偏差，需要根据模型提供的值内插获得。

(3) 多路径误差

多路径效应是 GNSS 信号经过反射体反射后与直射信号叠加产生的误差。多路径效应的大小取决于接收机周围的反射环境，通常在厘米至分米级。多路径效应难以通过模型精确消除，通常通过选择良好的观测环境、使用抗多路径天线和观测数据处理方法来减小其影响。

(4) 接收机硬件延迟

接收机硬件延迟和卫星硬件延迟类似，是信号在接收机传播时产生，PPP 解算时该参数和钟差和电离层等参数存在相关性，通常采用重参数化的形式和钟差

和电离层延迟一起估计。

2.1.1.4 地球物理效应

地球物理效应包括固体潮汐（Solid Earth Tide）、海潮负荷（Ocean Tide Loading）和极潮位移（Pole Tide）等。这些效应引起测站坐标的周期性变化，幅度可达数十厘米。在高精度 PPP 处理中，需要使用相应的地球物理模型（如 IERS Conventions 2010）对这些效应进行改正。

(1) 固体潮汐

固体潮汐是由日月引力引起的地球固体部分的弹性形变，在径向上的最大位移可达约 40 厘米，其改正公式根据 IERS Conventions 2010，二阶项的位移向量为：

$$\Delta r_{earth_tide} = \sum_{j=1}^2 \frac{GM_j}{GM_E} \left(\frac{R_E}{r_j}\right)^3 [h_2 \frac{\vec{r}_j}{\|\vec{r}_j\|} \left(\frac{\vec{r}_j}{\|\vec{r}_j\|} \cdot \frac{\vec{r}_r}{\|\vec{r}_r\|}\right) - l_2 \left(\frac{\vec{r}_j}{\|\vec{r}_j\|} \left(\frac{\vec{r}_j}{\|\vec{r}_j\|} \frac{\vec{r}_r}{\|\vec{r}_r\|} \frac{\vec{r}_r}{\|\vec{r}_r\|}\right)\right)] R_E \quad (2-12)$$

其中， j 分别代表月球和太阳， GM_j 和 GM_E 分别为天体和地球的引力常数， R_E 为地球平均半径， r_j 为天体到地心的距离， \vec{r}_j 和 \vec{r}_r 分别为天体和测站的方向向量， h_2 和 l_2 为 Love 数和 Shida 数（ $h_2 \approx 0.6078$ ， $l_2 \approx 0.0847$ ）。

(2) 海潮负荷

海潮负荷是由海洋潮汐引起的地壳形变，沿海地区的径向位移可达数厘米，其改正量通过 11 个分潮叠加计算：

$$\Delta r_{ocean_tide} = \sum_{j=1}^{11} A_k \cos(\omega_k t + \chi_k - \phi_k) \quad (2-13)$$

其中， A_k 和 ϕ_k 分别为第 k 个分潮的振幅和相位（由海潮负荷模型如 FES2014b 提供）， ω_k 为分潮角频率， χ_k 为天文辐角。

(3) 极潮位移

极潮位移是由地球自转极的运动引起的测站位移，其改正公式为：

$$\Delta r_{pole_tide} = -33 \sin 2\phi (m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \quad (2-14)$$

其中， ϕ 和 λ 分别为测站纬度和经度， m_1 和 m_2 为极移参数（由 IERS 公报提供）。

2.1.2 精密单点定位观测方程

精密单点定位技术利用单台接收机的观测数据，结合精密卫星轨道和钟差产品，实现高精度定位。PPP 的核心在于建立准确的函数模型和合理的随机模型，以充分利用伪距和载波相位观测量中的信息。本节将详细阐述 PPP 的函数模型和随机模型。

2.1.2.1 PPP 函数模型

GNSS 接收机可以同时接收伪距和载波相位两种观测量，伪距观测量通过测量信号传播时间获得接收机到卫星的距离，精度约为分米至米级；载波相位观测量通过测量载波信号的相位获得高精度的距离测量，精度可达毫米级，但包含未知的整周模糊度，需要作为参数额外估计。

在对 2.1.1 节中各类误差源进行改正或参数化处理后，可以建立 PPP 的基本观测方程。对于接收机 r 观测卫星 j 在频率 i 上的伪距和载波相位观测方程可以表示为^{[6],[117]}：

$$\begin{aligned} P_{i,r}^j &= \rho_r^j + c(dt_r - dt^j) + \gamma_i I_r^j + m_r^j T_r + (B_{i,r} - B_i^s) + IFB_r + \varepsilon(P_{i,r}^j) \\ L_{i,r}^j &= \rho_r^j + c(dt_r - dt^j) - \gamma_i I_r^j + m_r^j T_r + \lambda_i N_{i,r}^j + \lambda_i (b_{i,r} - b_i^s) + IFCB^j + \varepsilon(L_{i,r}^j) \end{aligned} \quad (2-15)$$

其中， $P_{i,r}^j$ 和 $L_{i,r}^j$ 分别为伪距和载波相位观测量（单位：米）； ρ_r^j 为接收机到卫星的几何距离； c 为光速； dt_r 和 dt^j 分别为接收机和卫星钟差； $\gamma_i = f_i^2 / f_1^2$ 为频率因子， f_i 为第 i 个频率； I_r^j 为第一频率上的斜路径电离层延迟； m_r^j 为对流层映射函数； T_r 为天顶对流层湿延迟； $B_{i,r}$ 和 B_i^s 分别为接收机和卫星的伪距硬件延迟； λ_i 为第 i 个频率的波长； $N_{i,r}^j$ 为整周模糊度； $b_{i,r}$ 和 b_i^s 分别为接收机和卫星的载波相位硬件延迟（即未校准相位延迟 UPD）； IFB_r 为接收机端的频间偏差， $IFCB^j$ 为卫星端的频间钟偏差，在多频观测量参与解算时均需要考虑； $\varepsilon(\cdot)$ 为观测噪声。

由于观测方程中的钟差参数、伪距/相位偏差和电离层等参数之间存在线性相关性会带来秩亏问题，需要对参数进行重参数化。通过吸收公共偏差项，重参数化后的观测方程可以表示为^[127]：

$$\begin{aligned} P_{i,r}^j &= \rho_r^j + c(d\tilde{t}_r - d\tilde{t}^j) + \gamma_i \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + IFB_r + \varepsilon(P_{i,r}^j) \\ L_{i,r}^j &= \rho_r^j + c(d\tilde{t}_r - d\tilde{t}^j) - \gamma_i \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^j + IFCB^j + \varepsilon(L_{i,r}^j) \end{aligned} \quad (2-16)$$

且：

$$\left\{ \begin{aligned} d\tilde{t}_r &= dt_r + d_{IF,r} / c \\ d\tilde{t}^j &= dt^j + d_{IF}^j / c \\ \tilde{I}_r^j &= I_r^j + \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_1^j + B_2^j) \\ \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^j &= (\lambda_i N_{i,r}^j + b_{i,r} - b_i^s) + (d_{IF}^s - d_{IF,r}) + \gamma_i \cdot \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_1^j + B_2^j) \end{aligned} \right.$$

其中， $d_{IF,r}$ 和 d_{IF}^j 分别为接收机和卫星的 IF 组合伪距硬件延迟，波浪号“~”表示重参数化后的参数。重参数化后的接收机钟差 $d\tilde{t}_r$ 吸收了接收机端的 IF 组合硬件延迟；卫星钟差 $d\tilde{t}^j$ 吸收了卫星端的 IF 组合硬件延迟；电离层延迟 \tilde{I}_r^j 包含了卫星和接收机硬件延迟伪距偏差；模糊度 $\tilde{N}_{i,r}^j$ 包含了卫星和接收机的相位偏差分量，不再具有整数特性。

在 PPP 数据处理中，几何距离 ρ_r^j 可以通过接收机坐标和卫星精密轨道计

算得到。将接收机坐标在近似位置处进行线性化展开：

$$\begin{aligned}\rho_r^j &= \rho_{r,0}^j + \frac{\partial \rho}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial \rho}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial \rho}{\partial Z} \Delta Z \\ \rho_{r,0}^j &= \sqrt{(X^j - X_r)^2 + (Y^j - Y_r)^2 + (Z^j - Z_r)^2}\end{aligned}\quad (2-17)$$

其中， ρ_0 为根据近似坐标计算的几何距离， (X_r, Y_r, Z_r) 和 (X^j, Y^j, Z^j) 分别为接收机和卫星在地心地固坐标系（ECEF）中的三维坐标， ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为坐标改正量。偏导数构成了观测方程的设计矩阵中的方向余弦元素。综合以上分析，PPP 的待估参数向量可以表示为：

$$x = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, d\tilde{I}_r, T_r, \tilde{I}_r^1, \tilde{I}_r^2, \dots, \tilde{I}_r^n, \tilde{N}_{1r}^1, \tilde{N}_{1r}^2, \dots, \tilde{N}_{ir}^n, IFB_r, IFCB^j]$$

其中， n 为可见卫星数，每颗卫星均有一个独立的电离层参数。对于多频观测，每颗卫星在每个频率上都有独立的模糊度参数。公式（2-16）中 $IFCB^j$ 参数一般由于和模糊度参数强相关，难以直接分离。通常， $IFCB^j$ 还有另外两种处理策略，第一种是采用 GF-IF 组合提前估计并加以改正，详细估计方法将在 2.2.3.1 节详细介绍；第二种是将其和模糊度参数合并当做一个参数统一估计。

2.1.2.2 PPP 随机模型

随机模型描述了观测量的统计特性，对于 PPP 的定位精度和收敛速度具有重要影响。合理的随机模型能够正确反映不同观测量的精度差异，从而在参数估计中给予高质量观测更大的权重。

（1）基于高度角的随机模型

最常用的 PPP 随机模型是基于卫星高度角的加权模型。由于低高度角卫星的信号传播路径更长，受对流层和多路径效应的影响更大，其观测噪声也相应增大，基于高度角的随机模型可以表示为^[128]：

$$\sigma^2(E) = a^2 + \frac{b^2}{\sin^2(e)} \quad (2-18)$$

其中， e 为卫星高度角， a 和 b 为经验常数。对于伪距观测，典型取值为 $a=0.3$ m、 $b=0.3$ m；对于载波相位观测，典型取值为 $a=0.003$ m、 $b=0.003$ m。该模型简单实用，能够有效反映高度角对观测精度的影响。

（2）基于信噪比的随机模型

信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）直接反映了接收信号的质量，因此也被用于构建随机模型，基于 SNR 的随机模型为^[129]：

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \cdot 10^{-(SNR - SNR_0)/10} \quad (2-19)$$

其中， σ_0^2 为参考信噪比 SNR_0 对应的方差。该模型能够更直接地反映信号质量的变化，特别是在多路径效应严重的环境中具有优势。

（3）伪距与载波相位的权比

在 PPP 处理中, 载波相位观测量的精度远高于伪距观测量。通常, 载波相位的观测噪声约为 2-3 mm, 而伪距的观测噪声约为 0.3-1.0 m。因此, 载波相位与伪距的权比通常设置为:

$$\frac{\sigma_P^2}{\sigma_L^2} = \left(\frac{\sigma_P}{\sigma_L}\right)^2 \approx \left(\frac{0.3}{0.003}\right)^2 = 10000 \quad (2-20)$$

即载波相位的权重约为伪距的 10000 倍。这一权比关系确保了载波相位在参数估计中占据主导地位, 从而实现毫米级的定位精度。

(4) 观测量的协方差矩阵

假设不同卫星、不同频率的观测量之间相互独立, 则观测量的协方差矩阵为对角矩阵:

$$R = \text{diag}(\sigma_{P,1}^2, \sigma_{P,2}^2, \dots, \sigma_{P,n}^2, \sigma_{L,1}^2, \sigma_{L,2}^2, \dots, \sigma_{L,n}^2) \quad (2-21)$$

其中, 每个对角元素由公式 (2-18) 或公式 (2-19) 计算得到。在实际处理中, 还需要考虑不同 GNSS 系统之间的权重差异。由于各系统的轨道精度、钟差精度和信号质量存在差异, 通常对不同系统设置不同的先验权重因子。例如, GPS、Galileo 和 BDS3 系统的权重因子通常设为 1.0, BDS2 系统设为 0.5-0.8, GLONASS 系统设为 0.8-1.0。

(5) 方差分量估计

为了更准确地确定不同观测量类型和不同系统之间的权重关系, 可以采用方差分量估计 (Variance Component Estimation, VCE) 方法。Helmert 方差分量估计的基本思想是利用残差信息来调整各类观测量的方差因子^[130]:

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{\mathbf{v}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{v}_k}{n_k - \text{tr}(\mathbf{N}^{-1} \mathbf{N}_k)} \quad (2-22)$$

其中, \mathbf{v}_k 为第 k 类观测量的残差向量, \mathbf{P}_k 为对应的权矩阵, n_k 为观测量个数, \mathbf{N} 为法方程系数矩阵, \mathbf{N}_k 为第 k 类观测量对法方程的贡献。通过迭代计算, VCE 方法能够自适应地确定最优权重, 提高 PPP 的定位精度和可靠性。

2.1.3 不同的观测值线性组合方程

在 GNSS 数据处理中, 通过对不同频率的观测量进行线性组合, 可以消除或削弱特定误差源的影响, 或形成具有特殊性质的组合观测量。以下介绍几种常用的线性组合及其特性。为简化推导, 以下将公共项 $\rho_r^j + c(d\tilde{t}_r - d\tilde{t}^j) + m_r^j T_r$ 简记为 ρ^* , 并省略噪声项。

2.1.3.1 无电离层组合 (Ionosphere-Free, IF)

无电离层组合通过两个频率的观测量线性组合消除一阶电离层延迟的影响。对于频率 f_1 和 f_2 , IF 组合系数可表示为^[131]:

$$\begin{aligned}\alpha_{12} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \\ \beta_{12} &= \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\end{aligned}\quad (2-23)$$

其中, $\alpha_{12} + \beta_{12} = 1$, 确保几何距离项不变, 将伪距和相位观测值代入, 忽略多频偏差项, 略去推导无电离层组合方程可表示为:

$$\begin{aligned}P_{IF,r}^j &= \rho_r^j + c(d\tilde{t}_r - d\tilde{t}^j) + m_r^j T_r + \varepsilon(P_{IF,r}^j) \\ L_{i,r}^j &= \rho_r^j + c(d\tilde{t}_r - d\tilde{t}^j) + m_r^j T_r + \lambda_{IF} \tilde{N}_{IF,r}^j + \varepsilon(L_{IF,r}^j)\end{aligned}\quad (2-24)$$

且:

$$\lambda_{IF} \tilde{N}_{IF,r}^j = \alpha_{12} \lambda_1 \tilde{N}_{1,r}^j + \beta_{12} \lambda_2 \tilde{N}_{2,r}^j = \frac{cf_2}{f_1^2 - f_2^2} (\tilde{N}_{1,r}^j - \tilde{N}_{2,r}^j) + \frac{c}{f_1 + f_2} \tilde{N}_{1,r}^j$$

IF 组合的优势在于消除了电离层一阶项的影响, 占整个电离层延迟的 99.9% 以上 [117], 但其噪声水平约为原始观测量的 3 倍。IF 组合模糊度不再具有整数特性, 且波长 λ_{IF} 较短, 对于 GPS 而言约为 0.106 m, 不利于模糊度固定。IF 组合简化了 PPP 解算过程中参数估计, 因而是传统 PPP 处理中最常用的组合方式。

2.1.3.2 无几何组合 (Geometry-Free, GF)

几何无关组合通过两个频率的载波相位观测值差消除几何距离相关的所有误差影响, 包括卫星与接收机几何距离、钟差、对流层延迟等, 仅保留与频率相关的电离层延迟信息, 对于频率 f_1 和 f_2 , GF 组合表达式如下 [132]:

$$\begin{aligned}P_{GF} &= P_1 - P_2 = (\gamma_1 - \gamma_2) \tilde{I}_r^j + \varepsilon(P_{GF}) \\ L_{GF} &= L_1 - L_2 = (-\gamma_1 + \gamma_2) \tilde{I}_r^j + \lambda_1 \tilde{N}_1 - \lambda_2 \tilde{N}_2 + \varepsilon(L_{GF})\end{aligned}\quad (2-25)$$

无几何组合方程形式简单, 主要用于: 电离层延迟估计与监测; 载波相位周跳探测以及接收机 DCB 标定等。其缺点是无法提供定位信息, 仅用于辅助分析。

2.1.3.3 超/宽巷组合 (Extra-Wide-Lane, EWL/WL)

宽巷组合利用两个频率上载波相位观测值进行差分, 获得较长波长的组合观测值。对于频率 f_1 和 f_2 而言, 其宽巷组合可表示为 [133]:

$$L_{WL,r}^j = \frac{f_1 L_{1,r}^j - f_2 L_{2,r}^j}{f_1 - f_2} = \rho^* - \frac{f_1(f_1 + f_2)}{f_2(f_1 - f_2)} \tilde{I}_r^j + \lambda_{WL} \tilde{N}_{WL,r}^j + \varepsilon(L_{WL})\quad (2-26)$$

且:

$$\begin{aligned}\lambda_{WL} &= \frac{c}{f_1 - f_2} \\ \tilde{N}_{WL,r}^j &= \tilde{N}_{1,r}^j - \tilde{N}_{2,r}^j\end{aligned}$$

其中 λ_{WL} 为宽巷波长, 对 GPS L1/L2 而言, 其波长约为 0.862 m。

宽巷组合虽然波长较长，有利于模糊度固定；但是电离层延迟被放大约 2.6 倍，在长基线或电离层活跃期需要特别注意，此外观测噪声也被放大。在 PPP-RTK 级联模糊度固定中，宽巷模糊度通常通过 MW 组合多历元平滑后固定，其固定成功率在正常条件下可达 99% 以上^[51]。

超宽巷组合和宽巷组合类似，只不过采用频率更相近的两个观测值进行组合，比如 GPS L2/L5，Galileo E5a/E5，BDS B2a/B3I 等。超宽巷模糊度对应的波长更长，因而可以通过伪距辅助在单历元内完成固定。

2.1.3.4 窄巷组合 (Narrow-lane, NL)

窄巷组合利用两个频率上的观测值的生成较短波长但具有较低噪声的组合观测值。窄巷组合定义为^[134]：

$$\begin{aligned} L_{NL,r}^j &= \frac{f_1 L_{1,r}^j + f_2 L_{2,r}^j}{f_1 + f_2} = \rho^* + \frac{f_1(f_1 - f_2)}{f_2(f_1 + f_2)} \tilde{I}_r^j + \lambda_{NL} \tilde{N}_{NL,r}^j + \varepsilon(L_{NL}) \\ P_{NL,r}^j &= \frac{f_1 P_{1,r}^j + f_2 P_{2,r}^j}{f_1 + f_2} = \rho^* - \frac{f_1(f_1 - f_2)}{f_2(f_1 + f_2)} \tilde{I}_r^j + \varepsilon(P_{NL}) \end{aligned} \quad (2-27)$$

且：

$$\begin{aligned} \lambda_{NL} &= \frac{c}{f_1 + f_2} \\ \tilde{N}_{NL,r}^j &= \tilde{N}_{1,r}^j + \tilde{N}_{2,r}^j \end{aligned}$$

窄巷组合波长较短（约 0.107 m），模糊度固定难度较大；但是观测噪声较低，约为原始观测值的 0.7 倍且电离层延迟系数较小，对电离层敏感性低。在 PPP-RTK 中，窄巷模糊度的固定是实现厘米级定位精度的关键步骤，通常需要精确的电离层改正或较长的收敛时间来实现^[135]。

2.1.3.5 MW 组合 (Melbourne-Wübbena, MW)

Melbourne-Wübbena (MW) 组合是由 Melbourne 和 Wübbena 分别独立提出，是一种同时利用伪距和载波相位观测值的特殊组合，其核心特性是同时消除几何距离和电离层延迟，仅保留宽巷模糊度信息。MW 组合定义为载波相位宽巷组合与伪距窄巷组合之差^[136-137]：

$$MW_r^j = L_{WL,r}^j - P_{NL,r}^j = \frac{f_1 L_{1,r}^j - f_2 L_{2,r}^j}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_{1,r}^j + f_2 P_{2,r}^j}{f_1 + f_2} \quad (2-28)$$

将公式 (2-26) 和公式 (2-27) 代入，略去推导过程，可得：

$$MW_r^j = \lambda_{WL} \tilde{N}_{WL,r}^j + \varepsilon(MW) \quad (2-29)$$

MW 组合观测值同时消除几何距离和电离层延迟，仅保留宽巷模糊度，因此广泛用于宽巷模糊度的估计和周跳探测。其缺点是受伪距噪声影响较大，通常需要多历元平滑以提高精度。

2.1.3.6 GF-IF 组合

GF-IF 组合是一种同时消除几何距离和电离层延迟的载波相位组合，需要至少三个频率的观测值。对于三频观测（频率 f_1 、 f_2 、 f_3 ），GF-IF 组合定义为^[138]：

$$L_{GFIF,r}^j = e_1 L_{1,r}^j + e_2 L_{2,r}^j + e_3 L_{3,r}^j \quad (2-30)$$

其中，组合系数 e_1 、 e_2 、 e_3 需同时满足以下两个约束条件：消除几何距离和消除电离层延迟：

$$\begin{cases} e_1 + e_2 + e_3 = 0 \\ e_1 \gamma_1 + e_2 \gamma_2 + e_3 \gamma_3 = 0 \end{cases} \quad (2-31)$$

由两个约束方程和三个未知数，组合系数有一个自由度，可令 e_1 为一已知值可求解 e_2 和 e_3 ，如：

$$\begin{cases} e_1 = 1 \\ e_2 = \frac{f_2^2(f_3^2 - f_1^2)}{f_1^2(f_3^2 - f_2^2)} \\ e_3 = \frac{f_3^2(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2(f_3^2 - f_2^2)} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} e_1 = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} - \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_3^2)} \\ e_2 = \frac{-f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \\ e_3 = \frac{f_3^2}{(f_1^2 - f_3^2)} \end{cases}$$

将公式 (2-15) 代入公式 (2-30)，由于几何距离和电离层延迟均被消除，GF-IF 组合简化为：

$$L_{GFIF,r}^j = e_1 \lambda_1 \tilde{N}_{1,r}^j + e_2 \lambda_2 \tilde{N}_{2,r}^j + e_3 (\lambda_3 \tilde{N}_{3,r}^j + IFCB_r^3) + \varepsilon(L_{GFIF}) \quad (2-32)$$

GF-IF 组合由于 GF-IF 组合消除了几何距离和电离层延迟，仅保留模糊度和硬件延迟信息，其历元间变化仅由模糊度跳变引起，因而被广泛用于三频周跳探测。其次，在模糊度固定后，可通过 GF-IF 组合验证各频率模糊度的一致性。此外，长期稳定的 GF-IF 组合残差还可以用于监测卫星端 IFCB 的变化。

2.2 实时 PPP-RTK 定位原理

PPP-RTK 技术在传统 PPP 的基础上，通过引入服务端生成的精密改正产品来增强用户端的定位性能，实现了用户端的快速模糊度固定和厘米级定位。本节将详细阐述 PPP-RTK 的非差非组合函数模型、多系统扩展模型和多频处理模型。

2.2.1 实时 PPP-RTK 函数模型

2.2.1.1 PPP-RTK 实时改正数

(1) 轨道改正数

实时 PPP 定位时，通常采用实时精密轨道改正数来降低轨道误差的影响。实时轨道改正数通常以径向（radial）、切向（along-track）和法向（cross-track）

三个分量的形式播发，精密卫星位置通过以下公式计算：

$$r_{prec}^j = r_{broadcast}^j + \mathbf{R}^j \begin{bmatrix} \delta r_{radial} \\ \delta r_{along} \\ \delta r_{cross} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

其中， $r_{broadcast}^j$ 为广播星历计算的卫星位置， $\mathbf{R}^j = [\mathbf{e}_{radial} \ \mathbf{e}_{along} \ \mathbf{e}_{cross}]$ 为从卫星固定坐标系 (RAC) 到地心地固坐标系 (ECEF) 的旋转矩阵，由卫星位置向量 r^j 和速度向量 \dot{r}^j 确定：

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{along} = \frac{\dot{r}^j}{|\dot{r}^j|} \\ \mathbf{e}_{cross} = \frac{\dot{r}^j \times r^j}{|\dot{r}^j \times r^j|} \\ \mathbf{e}_{radial} = \mathbf{e}_{along} \times \mathbf{e}_{cross} \end{cases} \quad (2-34)$$

(2) 钟差改正数

实时钟差改正数是基于广播星历钟差计算的增量，在获得精密钟差改正数 δdt^j 后，将其叠加在广播钟差之上可以获得 0.1 ns 精度的实时钟差产品：

$$dt_{prec}^j(t) = dt_{broadcast}^j(t) + \delta dt^j(t) \quad (2-35)$$

由于钟差改正数播发间隔一般为 5 s 甚至更高，实际使用时还需要结合延迟情况进行外推预报使用。

(3) 相位小数偏差

根据公式 (2-16) 可知重参数化后的模糊度 $\tilde{N}_{i,r}^j$ 包含了卫星和接收机的相位偏差和伪距偏差，不再具有整数特性，其中卫星端的相位偏差可以通过服务端播发的 UPD 产品加以修正。UPD 产品可以分解为 (超) 宽巷 UPD 和窄巷 UPD，为了便于实时播发和使用，通常将 UPD 产品分解到每个频点，即获得相位小数偏差 b_i^j ，其转换过程文献进行了介绍^[139]。终端在改正卫星相位小数偏差 b_i^j 后，其模糊度还吸收了接收机端的偏差项，通过星间单差消除接收机端的相位偏差后，其模糊度可以恢复整数特性。

(4) 伪距硬件延迟

重参数化后的模糊度 $\tilde{N}_{i,r}^j$ 同样包含了卫星和接收机的伪距硬件延迟，其中卫星伪距硬件延迟可以通过 DCB 产品进行改正，DCB 产品通常具有较高的稳定性，可以在服务端提前估计并播发给终端用户。服务端 DCB 估计时通常采用无电离层组合约束，即令 IF 组合的码偏差为零^[140]，因而有：

$$d_{IF}^j = \frac{f_1^2 B_1^j - f_2^2 B_2^j}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2-36)$$

再结合：

$$DCB_{12}^j = B_1^j - B_2^j \quad (2-37)$$

各个频点的伪距硬件延迟可以通过下式计算：

$$B_1^j = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} DCB_{12}^j$$

$$B_2^j = \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} DCB_{12}^j \quad (2-38)$$

对于第三个或第 i 个频率 f_i ，其伪距偏差可表示为：

$$B_i^j = B_1^j - DCB_{1i}^j \quad (2-39)$$

(5) 电离层改正数

电离层改正是 PPP-RTK 加速收敛的关键，通过提供区域电离层模型值可以将电离层参数的不确定性从分米级降低到厘米级，从而显著加速 PPP 收敛。电离层改正可以通过两种方式应用：(a) 将电离层模型值直接作为观测值的改正项，从观测方程中消除电离层参数。这种方式收敛最快，但对电离层模型的精度要求较高；(b) 将电离层模型值作为虚拟观测，加入参数估计中：

$$I_{model,r}^j = \tilde{I}_r^j + \varepsilon_I, \varepsilon_I \sim N(0, \sigma_I^2) \quad (2-40)$$

其中， σ_I 为电离层模型的精度，反映了约束的强度。当 σ_I 较小时（如厘米级）约束较强，收敛速度快；当 σ_I 较大时（如分米级）约束较弱，但定位精度更高。虚拟观测约束方式在实际应用中更为灵活，可以根据电离层模型的精度自适应调整约束强度。

(6) 对流层改正数

对于对流层改正，在 PPP-RTK 处理中通常采用先验模型加参数估计的策略。先验模型用于计算天顶干延迟和部分湿延迟，残余的天顶湿延迟和对流层梯度参数作为未知参数在 Kalman 滤波中估计。在区域增强服务中，还可以利用参考站网络估计的对流层参数生成区域对流层改正产品，进一步提高用户端的对流层改正精度，其使用方法和电离层类似，可以直接改正，也可以当作虚拟观测加入参数估计中。

2.2.1.2 实时 PPP-RTK 函数模型

由于可以采用外部的大气参数约束，因而 PPP-RTK 通常采用非差非组合（Undifferenced and Uncombined, UDUC）的形式而不是无电离层组合模式。用户端在收到各类改正产品后，将其代入公式(2-16)后可获得非差非组合 PPP-RTK 的观测方程^[127]：

$$\begin{aligned}
 P_{i,r}^j &= \rho_{r,corr}^j + c(\tilde{d\tilde{t}}_r - \tilde{d\tilde{t}}_{corr}^j) + \gamma_i \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + IFB_r + \varepsilon(P_{i,r}^j) \\
 L_{i,r}^j &= \rho_{r,corr}^j + c(\tilde{d\tilde{t}}_r - \tilde{d\tilde{t}}_{corr}^j) - \gamma_i \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^j + IFCB^j + \varepsilon(L_{i,r}^j) \\
 \tilde{I}_r^j &= \tilde{I}_{model,r}^j + \varepsilon_I, \varepsilon_I \sim N(0, \sigma_I^2) \\
 T_r &= T_{model,r} + \varepsilon_T, \varepsilon_T \sim N(0, \sigma_T^2)
 \end{aligned} \tag{2-41}$$

且:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \tilde{d\tilde{t}}_r &= dt_r + d_{IF,r} / c \\
 \tilde{d\tilde{t}}^j &= dt^j + d_{IF}^j / c \\
 \tilde{I}_r^j &= I_r^j + \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_{corr,1}^j + B_{corr,2}^j) \\
 \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^j &= (\lambda_i N_{i,r}^j + b_{i,r} - b_{corr}^j) + (d_{corr,IF}^s - d_{IF,r}^s) + \gamma_i \cdot \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_{corr,1}^j + B_{corr,2}^j)
 \end{aligned} \right.$$

其中, $\rho_{r,corr}^j$ 为使用精密轨道改正后的几何距离, $\tilde{d\tilde{t}}_{corr}^j$ 为精密钟差, $\tilde{I}_{model,r}^j$ 和 $T_{model,r}$ 分别为电离层模型值和对流层模型值, $B_{corr,1}^j$ 和 $B_{corr,2}^j$ 分别为频率 f_1 和 f_2 上的硬件延迟改正量, b_{corr}^j 为卫星相位小数偏差改正数, $d_{corr,IF}^s$ 为无电离层组合的伪距偏差, 通常为 0, 其余参数同公式 (2-16)。

2.2.2 多系统 PPP-RTK 函数模型

2.2.2.1 多系统观测方程

多系统 PPP-RTK 融合 GPS (G)、BDS (C)、Galileo (E) 和 GLONASS (R) 四大卫星导航系统的观测数据, 以增加可见卫星数量、改善几何构型、提高定位精度和可靠性。Li 等人系统评估了多 GNSS 实时精密定位的精度和可靠性, 证明了多系统融合可以显著提高定位性能^[141], 多系统 PPP-RTK 的观测方程可以统一表示为:

$$\begin{aligned}
 P_{i,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d\tilde{t}}_r - \tilde{d\tilde{t}}_{corr}^j) + ISB_r^s + \gamma_i^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + IFB_r^s + \varepsilon(P_{i,r}^{s,j}) \\
 L_{i,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d\tilde{t}}_r - \tilde{d\tilde{t}}_{corr}^j) + ISB_r^s - \gamma_i^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \lambda_i^s \tilde{N}_{i,r}^j + IFCB^j + \varepsilon(L_{i,r}^{s,j})
 \end{aligned} \tag{2-42}$$

其中, 上标 $s \in \{G, C, E, R\}$ 表示卫星系统标识; ISB_r^s 为系统间偏差 (Inter-System Bias), 以 GPS 为参考系统时, $ISB_r^G = 0$; $\gamma_i^s = (f_i^s)^2 / (f_i^s)^2$ 为各系统对应的电离层系数; λ_i^s 为各系统各频率对应的波长。

2.2.2.2 系统间偏差处理策略

系统间偏差 (Inter-System Bias, ISB) 是多系统 GNSS 数据处理中的关键参数, 它反映了不同卫星系统之间由于信号结构、硬件特性和时间基准差异而产生的系统性偏差。ISB 包括系统间钟差偏差和系统间硬件延迟偏差, ISB 的处理策略直接影响多系统融合的效果。在多系统 PPP-RTK 处理中, 通常以 GPS 为参考系统, 为其他系统估计 ISB 参数。

ISB 的处理策略取决于其时间特性, 对于 GPS 和 Galileo 之间的 ISB, 由于两者使用相同的频率基准, ISB 通常较为稳定, 可以建模为常数或随机游走过程。对于 GPS 和 GLONASS 之间的 ISB, 由于 GLONASS 使用 FDMA (频分多址) 技术, ISB 与频率相关, 处理更为复杂。Teunissen 提出了新的 GLONASS FDMA 模型, 为处理 GLONASS 的频率间偏差提供了理论框架^[142]。

需要特别指出的是, BDS2 和 BDS3 之间也存在 ISB, 需要作为独立系统进行处理。本研究中, BDS2 和 BDS3 的接收机钟差分别估计, 每个系统采用白噪声模型。这种处理方式的原因在于, BDS2 和 BDS3 虽然同属北斗卫星导航系统, 但两者在信号体制、原子钟类型和硬件延迟特性等方面存在差异。BDS2 卫星主要使用铷原子钟, 而 BDS3 卫星采用了更高精度的氢原子钟, 两者的钟差特性存在显著差异。此外, BDS2 的 B1I 信号中心频率为 1561.098 MHz, 与 GPS L1 (1575.42 MHz) 不同, 而 BDS3 新增的 B1c 信号与 GPS L1 共用相同频率, 这进一步增加了 BDS2 和 BDS3 之间硬件延迟的差异性。

对于 GLONASS 系统, 由于其采用频分多址 (FDMA) 技术, 每颗卫星使用不同的载波频率, 导致接收机端的硬件延迟与频率相关。这种频率相关的硬件延迟使得 GLONASS 的模糊度固定比其他采用码分多址 (CDMA) 的系统更加困难。因此, 在本研究的多系统 PPP-RTK 处理中, GLONASS 仅参与浮点解估计, 不参与模糊度固定, 但其观测信息仍然对改善几何构型和提高定位精度有重要贡献。

2.2.3 多频 PPP-RTK 函数模型

2.2.3.1 与频率相关的误差

多频 GNSS 观测为 PPP-RTK 提供了更多的观测冗余和更强的模型约束能力。然而, 多频处理也带来了与频率相关的额外误差项, 需要在模型中加以考虑。

(1) 频间钟偏差 (IFCB)

Montenbruck 等人在构建三频无几何无电离层组合观测值时首先发现 GPS 载波相位观测值中存在与卫星、时间以及频率相关的系统偏差^[143]。该系统偏差具有时变特性, 在钟差估计过程中被吸收到卫星钟差中, 从而导致使用不同频率组合观测值估计得到的卫星钟差之间存在随时间变化的偏差, 因此被称为频间钟偏差 (Inter-Frequency Clock Bias, IFCB), IFCB 的定义为:

$$IFCB_i^j = (dt_i^j + b_i^j) - (dt_i^j + b_i^j) \quad (2-43)$$

其中, dt_i^j 和 b_i^j 分别为卫星 j 在频率 i 上的钟差和载波相位硬件延迟。IFCB 的估计方法以及 IFCB 的特性已经有大量的研究^[144-145], 不少学者指出 GPS 系统 L5 频点 IFCB 呈现周期性的变化, 且其幅度在 3 分米之内; BDS 系统第三频点 IFCB 较小基本在 2 cm 之内。因而, 在多频 PPP-RTK 处理中, IFCB 需要作为附加参数进行估计或利用外部产品进行改正。通过组建三频载波相位组合消除几何距离

和电离层延迟后，利用残余的系统性偏差即可实现 IFCB 的估计^[146]：

$$L_{IFCB} = L_3 - \alpha_{13} L_1 + \alpha_{23} L_2 \quad (2-44)$$

其中， α_{13} 和 α_{23} 为频率相关的组合系数。该组合消除了几何距离和一阶电离层延迟，残余项主要包含 IFCB 和载波模糊度。通过在历元间作差消除模糊度后获得 $\Delta L_{IFCB} = L_{IFCB}(t_{i+1}) - L_{IFCB}(t_i)$ 利用全球参考站网络的数据，对每颗卫星的 IFCB 进行最小二乘估计后取平均，即可获得卫星端 IFCB 的估计值。

(2) 频间偏差 (IFB)

频间偏差是指接收机在不同频率上的伪距硬件延迟差异。对于非 IF 组合的多频处理，IFB 表示为：

$$IFB_{r,i} = (d_{i,r} - d_{1,r}) - \gamma_i (d_{1,r} - d_{2,r}) \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 - f_i^2} \quad (2-45)$$

IFB 的稳定性取决于接收机类型和环境温度，通常在数小时内保持稳定，可以建模为常数或随机游走过程。

2.2.3.2 多频观测方程

PPP 解算时采用多频观测值有很多优势，首先，增加了观测冗余，提高了参数估计的精度和可靠性；其次，可以构建更多的线性组合，如 EWL/WL 等，有利于快速模糊度固定；此外，能够更好地分离电离层延迟和硬件延迟参数。以 GPS 三频 (L1/L2/L5) 为例，下式给出了多频 PPP-RTK 的观测方程：

$$\begin{aligned} P_{1,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d}_r - \tilde{d}_{corr}^j) + ISB_r^s + \gamma_1^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \varepsilon(P_{1,r}^{s,j}) \\ L_{1,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d}_r - \tilde{d}_{corr}^j) + ISB_r^s - \gamma_1^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \lambda_1^s \tilde{N}_{1,r}^j + \varepsilon(L_{1,r}^j) \\ P_{2,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d}_r - \tilde{d}_{corr}^j) + ISB_r^s + \gamma_2^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \varepsilon(P_{2,r}^{s,j}) \\ L_{2,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d}_r - \tilde{d}_{corr}^j) + ISB_r^s - \gamma_2^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \lambda_2^s \tilde{N}_{2,r}^j + \varepsilon(L_{2,r}^j) \\ P_{5,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d}_r - \tilde{d}_{corr}^j) + ISB_r^s + \gamma_5^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + IFB_r^s + \varepsilon(P_{5,r}^{s,j}) \\ L_{5,r}^{s,j} &= \rho_{r,corr}^{s,j} + c(\tilde{d}_r - \tilde{d}_{corr}^j) + ISB_r^s - \gamma_5^s \tilde{I}_r^j + m_r^j T_r + \lambda_5^s \tilde{N}_{5,r}^j + IFCB^j + \varepsilon(L_{5,r}^j) \end{aligned} \quad (2-46)$$

其中， $\gamma_1 = 1$ ， $\gamma_2 = f_1^2 / f_2^2 = 1.6469$ ， $\gamma_5 = f_1^2 / f_5^2 = 1.7928$ 。除 GPS 以外，本文其他系统均采用多频观测数据，各个系统使用的频率如下表 2-1 所示。

表 2-1 各系统使用的频率说明

Table 2-1 Frequency Used for each Satellite System

卫星系统	频率 1/MHz	频率 2/MHz	频率 3/MHz	频率 4/MHz
GPS	L1 /1575.42	L2 /1227.60	L5/1176.45	-
GLONASS	L1 /1602+k×0.5625	L2 /1246+k×0.4375	-	-
Galileo	E1 /1575.42	E5a /1176.45	E5b /1207.14	-
BDS2	B1I /1561.098	B3I /1268.52	B2I /1207.14	-

BDS3	B1I /1561.098	B3I /1268.52	B2a /1176.45	B1c /1575.42
------	---------------	--------------	--------------	--------------

2.3 PPP 参数估计与质量控制

PPP-RTK 数据处理涉及大量参数的实时估计, 包括接收机位置、钟差、对流层延迟、电离层延迟和模糊度等。参数估计方法的选择和质量控制策略的设计直接影响定位精度和可靠性。

2.3.1 Kalman 滤波

Kalman 滤波是 PPP 数据处理中最常用的参数估计方法, 它通过递推方式将历史观测信息与当前观测信息进行最优融合, 特别适合处理动态参数和时间序列数据。

2.3.1.1 标准卡尔曼滤波

标准卡尔曼滤波(Standard Kalman Filter, SKF)由 Kalman 于 1960 年提出^[147], 其基本思想是在最小均方误差准则下, 利用状态方程和观测方程递推地估计系统状态。

状态方程描述了参数随时间的演化规律:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{\Phi}_{k,k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (2-47)$$

其中, \mathbf{x}_k 为 k 时刻的状态向量, $\mathbf{\Phi}_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵, \mathbf{w}_{k-1} 为过程噪声向量, 满足 $\mathbf{w}_{k-1} \sim N(0, \mathbf{Q}_{k-1})$ 。

观测方程描述了观测量与状态参数之间的关系:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2-48)$$

其中, \mathbf{z}_k 为观测向量, \mathbf{H}_k 为设计矩阵, \mathbf{v}_k 为观测噪声向量, 满足 $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k)$ 。

Kalman 滤波的递推过程分为预测和更新两个步骤:

预测步骤:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{\Phi}_{k,k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{\Phi}_{k,k-1}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{\Phi}_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \end{aligned} \quad (2-49)$$

更新步骤:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{P}_{k|k-1} \end{aligned} \quad (2-50)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 和 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 分别为预测状态估计和预测协方差矩阵; \mathbf{K}_k 为 Kalman 增益矩阵; $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 和 $\mathbf{P}_{k|k}$ 分别为更新后的状态估计和协方差矩阵。

在 PPP 处理中, 状态向量通常包括接收机坐标、钟差、对流层延迟、电离

层延迟和模糊度参数等。不同参数具有不同的时间特性，需要采用不同的随机模型。白噪声模型适用于快速变化或每历元独立的参数，如接收机钟差。白噪声模型假设参数在相邻历元之间没有相关性，每个历元独立估计：

$$x_k = x_0 + w_k, w_k \sim N(0, \sigma_w^2) \quad (2-51)$$

其中， σ_w 为过程噪声标准差，对于接收机钟差通常设置为较大值（如 10^4 米），以允许参数在每个历元自由变化。

随机游走模型适用于缓慢变化的参数，如对流层湿延迟和电离层延迟：

$$x_k = x_{k-1} + w_k, w_k \sim N(0, q \cdot \Delta t) \quad (2-52)$$

其中， q 为过程噪声功率谱密度， Δt 为时间间隔。对于对流层湿延迟， q 通常设置为 $(5\text{mm}/\sqrt{\text{hour}})^2$ ；对于对流层梯度参数， q 通常设置为 $(0.5\text{mm}/\sqrt{\text{hour}})^2$ 。

常数模型适用于不随时间变化的参数，如载波相位模糊度（在无周跳的情况下）：

$$x_k = x_{k-1} \quad (2-53)$$

常数模型的过程噪声为零。当发生周跳时，需要重新初始化模糊度参数。

2.3.1.2 扩展卡尔曼滤波

当观测方程为非线性时，需要采用扩展卡尔曼滤波（Extended Kalman Filter, EKF）。在 PPP 中，几何距离 ρ_r^j 与接收机坐标之间的关系是非线性的：

$$\rho_r^j = \sqrt{(X^j - X_r)^2 + (Y^j - Y_r)^2 + (Z^j - Z_r)^2} \quad (2-54)$$

EKF 通过在当前状态估计处对非线性函数进行一阶 Taylor 展开来线性化：

$$\rho_r^j \approx \rho_0 + e_r^{j,T} \Delta r \quad (2-55)$$

其中， ρ_0 为利用近似坐标计算的几何距离， e_r^j 为接收机指向卫星的单位方向向量：

$$e_r^j = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial X} \\ \frac{\partial \rho}{\partial Y} \\ \frac{\partial \rho}{\partial Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X^j - X_{r,0}}{\rho_0} \\ \frac{Y^j - Y_{r,0}}{\rho_0} \\ \frac{Z^j - Z_{r,0}}{\rho_0} \end{bmatrix} \quad (2-56)$$

$\Delta r = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]^T$ 为坐标改正量。线性化后的观测方程即可应用标准 Kalman 滤波进行处理。在 PPP 中，由于初始坐标的近似值通常可以通过伪距单点定位获得（精度约数米），线性化误差较小，EKF 能够快速收敛。

2.3.1.3 自适应卡尔曼滤波

标准 Kalman 滤波假设过程噪声和观测噪声的统计特性是已知的，但在实际 PPP 处理中，噪声模型往往不够准确，可能导致滤波发散或收敛缓慢。自适应卡尔曼滤波 (Adaptive Kalman Filter, AKF) 通过实时调整噪声参数来提高滤波的鲁棒性^[148]。一种常用的自适应方法是基于新息 (Innovation) 序列的自适应因子法，新息向量定义为：

$$d_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (2-57)$$

新息的理论协方差矩阵为：

$$C_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (2-58)$$

当实际新息显著偏离理论值时，引入自适应因子 α_k 对预测协方差进行膨胀：

$$P_{k|k-1}^{adapt} = \alpha_k P_{k|k-1} \quad (2-59)$$

自适应因子的计算方法有多种，其中一种常用的方法为：

$$\alpha_k = \begin{cases} 1, & \text{if } \|d_k\| \leq c_0 \\ \frac{c_0}{\|d_k\|} \left(\frac{c_1 - \|d_k\|}{c_1 - c_0} \right)^2, & \text{if } c_0 < \|d_k\| \leq c_1 \\ \frac{c_0}{\|d_k\|}, & \text{if } \|d_k\| > c_1 \end{cases}$$

其中， c_0 和 c_1 为阈值参数，通常取 $c_0 = 1.5$ ， $c_1 = 4.5$ 。自适应卡尔曼滤波在 PPP 的动态定位和实时处理中具有重要应用价值，能够有效应对模型误差和观测异常^[149]。

2.3.2 最小二乘估计

2.3.2.1 加权最小二乘

加权最小二乘 (Weighted Least Squares, WLS) 是一种经典的参数估计方法^[150]，适用于静态定位或单历元处理。对于线性观测方程：

$$z = Hx + v \quad (2-60)$$

其目标函数是：

$$\min_x (z - Hx)^T P (z - Hx) \quad (2-61)$$

加权最小二乘估计是在目标函数最小的准则下估计参数，略去推导可得：

$$\hat{x} = (H^T P H)^{-1} H^T P z \quad (2-62)$$

估计的协方差矩阵为：

$$Q_{\hat{x}} = (H^T P H)^{-1} \quad (2-63)$$

WLS 方法的优点是计算简单、物理意义明确，但它不能利用历史观测信息，

GNSS 数据处理过程中，WLS 主要用于事后处理模式和伪距单点定位阶段。

2.3.2.2 序贯最小二乘

序贯最小二乘（Sequential Least Squares, SLS）是 WLS 的递推形式，它将新的观测量逐步加入已有的估计中，避免了每次都需要处理全部观测数据的计算负担^[151]。序贯最小二乘的更新公式为：

$$\begin{aligned}\hat{x}_{t+1} &= \hat{x}_t + K(z_{t+1} - H_{t+1}\hat{x}_t) \\ K &= Q_t H_{t+1}^T (H_{t+1} Q_t H_{t+1}^T + R_{t+1})^{-1} \\ Q_{t+1} &= (I - K H_{t+1}) Q_t\end{aligned}\quad (2-64)$$

可以看出，序贯最小二乘的更新公式与 Kalman 滤波的更新步骤形式完全一致。事实上，当 Kalman 滤波的状态转移矩阵为单位矩阵且过程噪声为零时，Kalman 滤波退化为序贯最小二乘。序贯最小二乘适用于参数随时间不变（或变化缓慢）的情况，如 PPP 静态定位中的坐标参数和模糊度参数。

2.3.3 PPP 质量控制策略

在 PPP 实际数据处理中，完整的质量控制流程包括以下几个环节：首先，对原始观测数据进行预处理，包括剥除低高度角卫星观测、剔除信噪比过低的观测、检查观测数据的完整性等。其次，进行周跳探测和修复，确保载波相位观测的连续性。然后，在参数估计过程中采用抗差估计方法，降低粗差观测的影响。最后，对估计结果进行后验残差分析，评估定位解的质量。当后验残差超过预设阈值时，需要对相应的观测进行降权或剔除处理，并重新进行参数估计。质量控制是 GNSS 数据处理最为关键的一环，其确保了 PPP 定位结果的可靠性和稳定性。

2.3.3.1 数据预处理

数据预处理是 PPP 质量控制的第一道防线，其目的是在参数估计之前识别和处理观测数据中的异常。数据预处理步骤主要包括：

（1）周跳探测与修复

周跳（Cycle Slip）是载波相位观测中最常见的异常，它表现为模糊度参数的突变。常用的周跳探测方法包括：MW 组合法、GF 组合法和 TurboEdit 方法等^[152]。

MW 组合法是利用 Melbourne-Wübbena 组合的时间序列进行周跳探测。由于 MW 组合消除了几何距离和电离层延迟的影响，仅包含宽巷模糊度和噪声，因而当 MW 组合的历元间差值超过阈值时，即可判定发生周跳：

$$|\Delta MW_k| = |MW_k - \overline{MW}_{k-1}| > \tau_{MW}$$

其中， \overline{MW}_{k-1} 为前 $k-1$ 个历元的 MW 组合均值， τ_{MW} 为探测阈值，通常取 2-3

个宽巷波长。

GF 组合法是利用无几何组合 (Geometry-Free) 的时间序列进行周跳探测。由于 GF 组合消除了几何距离和钟差的影响, 主要包含电离层延迟和模糊度, 因而当 GF 组合的历元间变化超过阈值时, 判定发生周跳:

$$|\Delta GF_k| = |GF_k - GF_{k-1}| > \tau_{GF}$$

其中, τ_{GF} 为探测阈值, 通常取 0.05-0.15 m。

TurboEdit 方法是 Blewitt 提出的, 该方法综合利用 MW 和 GF 组合进行周跳探测, 能够有效识别各种类型的周跳, 包括小周跳该方法。首先利用 MW 组合探测宽巷周跳, 然后利用 GF 组合探测窄巷周跳, 两者结合可以实现对任意大小周跳的可靠探测。

(2) 粗差探测与剔除

伪距观测量中可能存在粗差 (Gross Error), 如多路径效应引起的异常值。常用的粗差探测方法包括伪距-载波相位一致性检验和历元间差分检验。伪距-载波相位一致性检验利用同一频率上伪距和载波相位观测量之间的差值进行检验:

$$|P_{i,r}^j - L_{i,r}^j - 2\gamma_i \tilde{I}_r^j| > \tau_p$$

当差值超过阈值 τ_p (通常取 10-50 m) 时, 判定该伪距观测量存在粗差并予以剔除。

2.3.3.2 抗差估计

抗差估计 (Robust Estimation) 是在参数估计过程中降低异常观测量影响的有效方法。与传统的粗差剔除不同, 抗差估计通过调整观测量的权重来减弱异常值的影响, 而不是简单地将其剔除。

当 GNSS 中存在异常观测量时, 标准最小二乘估计和 Kalman 滤波的结果都会受到严重影响, 抗差估计通过降低粗差观测的权重来减小其影响。等价权函数法是最常用的抗差估计方法, 其基本思想是根据标准化残差的大小, 对观测量的权重进行调整:

$$\bar{p}_i = p_i \cdot w(\tilde{v}_i) \quad (2-65)$$

其中, p_i 为原始权重, $\tilde{v}_i = v_i / \sigma_{v_i}$ 为标准化残差, $w(\tilde{v}_i)$ 为等价权函数。Yang 等人提出了适用于 GNSS 数据处理的 IGG-III 抗差估计方案, 其等价权函数为^[153]:

$$w(\tilde{v}_i) = \begin{cases} 1, & |\tilde{v}_i| \leq k_0 \\ \frac{k_0}{|\tilde{v}_i|} \left(\frac{k_1 - |\tilde{v}_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |\tilde{v}_i| \leq k_1 \\ 0, & |\tilde{v}_i| > k_1 \end{cases} \quad (2-66)$$

其中, k_0 和 k_1 为阈值参数, 通常取 $k_0 = 1.5$, $k_1 = 3.0$ 。当标准化残差小于 k_0 时, 保持原始权重不变; 当标准化残差在 k_0 和 k_1 之间时, 逐渐降低权重; 当标准化

残差超过 k_1 时，将权重设为零，等效于剔除该观测量。

在 PPP 数据处理中，抗差估计特别适用于以下场景：第一，实时处理中由于数据传输延迟或中断导致的异常观测；第二，城市峡谷等复杂环境中的多路径效应；第三，电离层活跃期的异常电离层延迟。通过将抗差估计与 Kalman 滤波相结合，可以构建抗差卡尔曼滤波（Robust Kalman Filter），在保持滤波效率的同时提高对异常观测的鲁棒性。

2.4 PPP 模糊度固定与检核方法

模糊度固定是 PPP 和 PPP-RTK 实现厘米级定位精度的关键步骤。通过将载波相位模糊度从浮点解固定为整数值，可以显著提高定位精度并缩短收敛时间。Geng 等人系统研究了 PPP 实时模糊度固定方法，证明了 PPP-RTK 可以实现与传统 RTK 相当的定位精度^[154]，本节将详细介绍 PPP 模糊度固定的基本原理、固定方法和检核策略。

2.4.1 模糊度固定基本原理

如 2.1.2 节所述，在 UDUC PPP 模型中，重参数化后的模糊度 $\tilde{N}_{i,r}^j$ 包含了卫星和接收机的载波相位硬件延迟，不再具有整数特性。要实现模糊度固定，首先需要恢复模糊度的整数特性。对于卫星端相位偏差，可以通过 UPD 产品进行改正。UPD 产品提供每颗卫星的小数相位偏差估计值，用户端在接收到 UPD 产品后，将其从模糊度浮点解中扣除，即可恢复卫星端的整数特性。对于接收机端相位偏差，由于所有卫星具有相同接收机偏差，可以通过卫星间单差或加权平均的方式消除^[155]。根据卫星小数偏差改正信息的表示方式，PPP 模糊度固定方法可以分为三类。

2.4.1.1 基于 OSB 的模糊度固定

相位观测值偏差（Observable-Specific Signal Bias, OSB）是由 Schaer 提出，其核心思想是为每颗卫星的每个信号分别估计一个偏差改正值^[156]。OSB 改正直接作用于原始观测量，使得改正后的观测量具有一致的基准，其估计获得的模糊度可以直接进行固定。

对于载波相位观测量，OSB 改正的表达式为：

$$L_{i,r}^{j,corr} = L_{i,r}^j - OSB_{\phi,i}^j \quad (2-67)$$

其中， $OSB_{\phi,i}^j$ 为卫星 j 在频率 i 上的载波相位 OSB 改正值。经过 OSB 改正后，模糊度参数可以表示为：

$$\bar{N}_{i,r}^j = N_{i,r}^j + \frac{b_{i,r}}{\lambda_i} \quad (2-68)$$

由于接收机端的相位硬件延迟 $b_{i,r}$ 对同一频率上的所有卫星相同，通过星间求差可以消除，从而恢复整数特性。

OSB 方法的优点是概念清晰、实现简单，且与观测量的频率和类型直接对应。国际 IGS 的多个分析中心已经在其实时产品中提供了 OSB 格式的相位偏差改正，包括 CNES/CLS, CAS 和 CHC 等。

2.4.1.2 基于整数钟的模糊度固定

整数钟 (Integer Recovery Clock, IRC) 方法由 Laurichesse 等人提出，该方法的核心思想是在钟差估计过程中，将卫星端的载波相位硬件延迟吸收到钟差参数中，使得估计得到的钟差产品本身就包含了相位偏差信息^[157]。在 IRC 方法中，卫星钟差的估计采用以下约束：

$$\tilde{dt}_{IRC}^j = dt^j + d_{IF}^j / c + \frac{b_{NL}^j}{\lambda_{NL} \cdot c} \quad (2-69)$$

其中， b_{NL}^j 为卫星 j 的窄巷相位偏差。通过这种方式，用户端在使用 IRC 钟差产品后，窄巷模糊度自动恢复整数特性：

$$\bar{N}_{NL,r}^j = N_{NL,r}^j + \frac{b_{NL,r}}{\lambda_{NL}} \quad (2-70)$$

IRC 方法的优点是用户端不需要额外的相位偏差改正，只需使用 IRC 钟差产品即可实现模糊度固定。但其局限性在于，IRC 钟差产品与特定的组合模型，通常是 IF 组合绑定，灵活性不如 OSB 方法，且不易于扩展为多频的数据处理。法国国家空间研究中心 (CNES) 的实时产品采用了 IRC 方法。

2.4.1.3 基于去耦合钟的模糊度固定

去耦合钟 (Decoupled Clock, DC) 方法由 Collins 等人提出，传统 PPP 中，伪距和载波相位观测量共享同一个钟差参数，但实际上两者的硬件延迟不同。DC 方法将伪距钟差和载波相位钟差分开估计^[158]：

$$\begin{aligned} \tilde{dt}_P^j &= dt^j + d_{IF,P}^j / c \\ \tilde{dt}_L^j &= dt^j + b_{IF,L}^j / c \end{aligned} \quad (2-71)$$

其中， \tilde{dt}_P^j 和 \tilde{dt}_L^j 分别为伪距钟差和载波相位钟差。用户端使用 DC 钟差产品后，载波相位观测方程中的卫星端相位偏差被消除，模糊度恢复整数特性。DC 方法的优点是不需要对伪距和载波相位的硬件延迟做任何假设，模型更加灵活，但是增加了钟差产品的数量。

2.4.2 模糊度固定方法

在使用服务端相位偏差改正恢复了模糊度的整数特性后，用户端 PPP 需要采用合适的搜索和固定方法将浮点模糊度固定为整数值。

2.4.2.1 ROUND 方法

ROUND 方法直接取整法，是最简单的模糊度固定方法，它将每个浮点模糊度独立地取整为最近的整数。ROUND 方法的核心公式如下：

$$\tilde{N}_i = \text{round}(\hat{N}_i) \quad (2-72)$$

其中， \hat{N}_i 为浮点模糊度估计值， \tilde{N}_i 为固定后的整数模糊度。ROUND 方法的成功率（即正确固定的概率）取决于浮点模糊度的精度。对于单个模糊度，成功率为：

$$P_s = P(|\hat{N}_i - N_i| < 0.5) = 2\Phi\left(\frac{0.5}{\sigma_{\hat{N}_i}}\right) - 1 \quad (2-73)$$

其中， $\sigma_{\hat{N}_i}$ 为浮点模糊度的标准差， $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。ROUND 方法的优点是计算简单、速度快，但它忽略了模糊度之间的相关性，因此在模糊度精度较低或相关性较强时，固定成功率会显著下降。

2.4.2.2 LAMBDA 方法

最小二乘模糊度降相关调整（Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment, LAMBDA）方法由 Teunissen 提出，是目前最广泛使用的模糊度固定方法。LAMBDA 方法通过整数最小二乘准则搜索最优整数模糊度^[159]：

$$\tilde{N} = \underset{N \in \mathbb{Z}^n}{\text{argmin}} (\hat{N} - N)^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N} - N) \quad (2-74)$$

其中， \hat{N} 为浮点模糊度向量， $Q_{\hat{N}}$ 为模糊度的协方差矩阵， \tilde{N} 为最优整数解。

LAMBDA 方法的核心包括两个步骤：

（1）降相关变换（Z-transformation）

原始模糊度的协方差矩阵通常具有较强的相关性，导致搜索空间呈扁平的椭球形状，搜索效率低下。LAMBDA 方法通过整数变换矩阵 Z 对模糊度进行降相关处理：

$$\begin{aligned} \hat{a} &= Z^T \hat{N} \\ Q_{\hat{a}} &= Z^T Q_{\hat{N}} Z \end{aligned} \quad (2-75)$$

变换后的协方差矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的条件数显著降低，搜索空间更接近球形，从而大幅提高搜索效率。 Z 矩阵通过 LDLT 分解和整数高斯变换迭代构建，满足 $|\det(Z)|=1$ ，保证变换的可逆性和整数性。

（2）整数搜索

在降相关后的空间中，利用搜索算法在超椭球体内搜索最优整数解：

$$(\hat{a} - a)^T Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - a) \leq \chi^2 \quad (2-76)$$

其中， χ^2 为搜索半径的平方。LAMBDA 方法采用逐维搜索策略，利用 LDLT 分解的三角结构，从最后一维开始逐步确定每一维的搜索范围，高效地枚举所有候

选整数解。

(2) 逆变换

搜索完成后，得到最优解 \tilde{a}_1 和次优解 \tilde{a}_2 ，最后通过逆变换恢复原始模糊度空间的整数解：

$$\tilde{N} = Z^{-T} \tilde{a}_1 \tag{2-77}$$

2.4.2.3 最优整数估计方法

最优整数估计 (Best Integer Equivariant, BIE) 方法由 Teunissen 提出，它是一种介于浮点解和固定解之间的估计方法。BIE 估计不是将模糊度固定为单一的整数值，而是计算所有可能整数值的加权平均^[160]：

$$\tilde{N}_{BIE} = \sum_{z \in Z^n} z \cdot w(z) \tag{2-78}$$

其中，权重函数为：

$$w(z) = \frac{\exp(-\frac{1}{2}(\hat{N} - z)^T Q_{\hat{N}}^{-1}(\hat{N} - z))}{\sum_{z' \in Z^n} \exp(-\frac{1}{2}(\hat{N} - z')^T Q_{\hat{N}}^{-1}(\hat{N} - z'))} \tag{2-79}$$

BIE 估计的优点是它在均方误差意义下是最优的整数等变估计，且不存在固定失败的问题。当模糊度精度较高时，BIE 估计趋近于 LAMBDA 的固定解；当精度较低时，BIE 估计趋近于浮点解。因此，BIE 方法在 PPP 收敛过程中具有平滑过渡的优势，能够在模糊度尚未完全收敛时就提供改善的定位精度。

然而，BIE 方法的计算量较大，需要对大量整数候选值进行加权求和。在实际应用中，通常只考虑搜索空间内的有限个候选值来近似计算。表 2-2 给出了三种模糊度固定策略的对比。

表 2-2 三种模糊度固定方法比较

Table 2-2 comparison of ambiguity resolution methods

方法	原理	计算复杂度	成功率	适用场景
ROUND	独立取整	O (n)	低 (忽略相关性)	模糊度精度极高时
LAMBDA	整数最小二乘	O (n ³)	高 (考虑相关性)	通用场景
BIE	加权平均	O (n ³ · m)	不适用	收敛过程中

2.4.3 模糊度固定与检核策略

2.4.3.1 级联模糊度固定策略

多频级联模糊度固定策略是利用不同频率组合的波长差异，按照从长波长到短波长的顺序逐步固定各级模糊度。级联固定策略的优势在于：第一，充分利用了多频信号的冗余信息；第二，长波长模糊度的固定为短波长模糊度提供了强约束，降低了搜索空间的维度；第三，逐步固定的方式提高了整体的固定可靠性。

级联模糊度固定流程如下所示：

(1) EWL 模糊度固定及状态更新

EWL 模糊度由第二频率和第三频率的原始模糊度作差形成。以 GPS L2 和 L5 为例，EWL 波长约为 5.861 米，单历元即可实现可靠固定。基于 UDUC 的原始模糊度，通过下式转换关系可获得 EWL 模糊度^[155]：

$$\hat{N}_{EWL}^j = \hat{N}_{2,r}^j - \hat{N}_{f,r}^j + (b_{EWL,r} - b_{EWL}^j) \quad (2-80)$$

其中， b_{EWL}^j 可以直接使用 UPD 产品改正， $b_{EWL,r}$ 可以估计为每个星座所有可见卫星 \hat{N}_{EWL}^j 的加权平均小数部分。超宽巷因为其波长远大于观测噪声，通常采用 ROUND 方法即可实现高成功率的固定。

(2) WL 模糊度固定及状态更新

WL 模糊度由第一频率和第二频率的原始模糊度作差形成，由于宽巷模糊度和电离层相关性较强，因而通常需要数分钟的观测才能和电离层参数逐步分离，模糊度固定时为提高固定解的准确性也需要采用 LAMBDA 方法。基于 UDUC 的原始模糊度，通过下式转换关系可获得 WL 模糊度：

$$\hat{N}_{WL}^j = \hat{N}_{1,r}^j - \hat{N}_{2,r}^j + (b_{WL,r} - b_{WL}^j) \quad (2-81)$$

(3) 虚拟观测约束及状态更新

超宽巷和宽巷模糊度固定后，需要将其作为虚拟观测方程约束回代更新模糊度状态及方差阵，其约束方程如下：

$$\begin{bmatrix} res_{ewl}^j \\ res_{wl}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{N}_{1,r}^j \\ \hat{N}_{2,r}^j \\ \hat{N}_{3,r}^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{ewl,r} - b_{ewl}^j \\ b_{wl,r} - b_{wl}^j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{N}_{ewl}^j \\ \tilde{N}_{wl}^j \end{bmatrix} \quad (2-82)$$

虚拟观测方程的方差设为 1.0×10^{-6} ，即给予极高的权重。通过这种约束，PPP 浮点解的精度得到显著提高，收敛时间大幅缩短，从而促进更快的 NL 模糊度固定。

(4) NL/L1 模糊度固定

NL 模糊度的波长约为 0.107 米（GPS L1/L2），固定难度最大，但对定位精度的提升最为显著。作为可选，采用 UDUC 组合 PPP 定位时，由于直接估计了各个频点的原始模糊度，因而也可以直接固定 L1 模糊度，而无需组建 NL 窄巷模糊度。NL/L1 模糊度的固定均需要基于超宽巷/宽巷约束更新后的浮点 NL/L1 模糊度及其协方差进行，为提高固定解的准确性此时通常也需要采用 LAMBDA 方法。

2.4.3.2 部分模糊度固定方法

在实际应用中，由于部分卫星的观测质量较差、多路径效应严重或模糊度浮

点解精度不足，不一定能够同时固定所有卫星的模糊度。全模糊度固定方法在这种情况下可能导致固定失败或错误固定。部分模糊度固定（Partial Ambiguity Resolution, PAR）策略允许仅固定满足条件的部分模糊度子集，从而在保证固定可靠性的同时最大化固定的模糊度数量^[161]。PAR 的核心问题在于：如何从全部模糊度中筛选出一个最优子集，使得该子集既能以足够高的成功率被正确固定，又能对定位精度产生显著改善，常用额度模糊度子集筛选方法包括：

(1) 基于 Bootstrapping 成功率排序的子集选择

Bootstrapping 成功率排序准则（Bootstrapping Success Rate Sorting Criterion, BSSC）是目前 PPP 部分模糊度固定中应用最为广泛的子集选择方法^[162]。该方法在 LAMBDA 降相关变换后的空间中操作，利用条件模糊度方差的有序性进行子集选择。BSSC 方法从最精确的第 n 个条件模糊度开始，逐步向前添加模糊度，同时计算当前子集的 bootstrapping 成功率：

$$P_{s,B} = P(\tilde{a}_B = B) = \prod_{i=1}^n (2\Phi(\frac{1}{2\sigma_{\tilde{a}_{i|l}}}) - 1) > P_0 \quad (2-83)$$

其中， P_0 为用户预设的最小成功率阈值（通常取 0.99 或 0.999）， $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。当添加第 $k-1$ 个模糊度后成功率低于 P_0 时停止添加，选择第 k 到第 n 个共 $n-k+1$ 个降相关模糊度作为待固定子集。未被选入子集的前 $k-1$ 个模糊度则通过条件调整进行更新，但不进行整数固定。BSSC 方法的优势在于计算简单、理论基础清晰，且成功率可以精确计算。然而，该方法是纯模型驱动的，不考虑实际观测数据的质量，也不包含验证步骤。

(2) 基于仰角和精度预筛选的改进 PAR 方法

Li 和 Zhang 提出了一种改进的 PAR 方法^[163]，在 BSSC 的基础上增加了预筛选步骤和迭代验证机制，该方法的具体步骤如下：

第一步：利用仰角准则和标准差准则进行预筛选移除低精度模糊度估计值。仰角低于截止角（如 15° ）的卫星模糊度被排除，标准差超过预设阈值的模糊度也被排除，避免其对降相关变换和子集选择产生负面影响。

第二步：对筛选后的模糊度进行 Z 变换，获得降相关后的模糊度及其条件方差。

第三步：计算当前子集的 bootstrapping 成功率。若成功率低于预设阈值 P_0 （如 0.999），则移除条件方差最大的模糊度，重新计算成功率，重复此过程直到成功率满足要求或模糊度数量不足。

第四步：对选定的子集进行 LAMBDA 搜索，获得最优和次优整数候选值，并进行 Ratio 检验。若 Ratio 检验失败（Ratio 值小于阈值），则继续移除模糊度并重复搜索，直到 Ratio 检验通过或无法继续缩减。

(3) 基于固定失败率 Ratio 检验的子集选择

Verhagen 等提出了一种同时基于模型和数据驱动的子集选择方法,利用固定失败率 Ratio 检验 (Fixed Failure Rate Ratio Test, FF-RT) 进行子集筛选^[162]。该方法的核心思想是:通过逐步移除和添加卫星模糊度,找到能够通过 FF-RT 验证的最大子集。具体步骤为:

第一步:选择初始模糊度集合(可以是前一历元固定的集合或全部模糊度);

第二步:对初始集合进行 LAMBDA 搜索和 FF-RT 检验;

第三步:若检验失败,逐个移除卫星的模糊度,每次选择移除后残差平方和最小的子集;

第四步:重复直到某个子集通过 FF-RT 或无法继续缩减;

第五步:若某子集被接受,尝试添加之前未考虑的卫星模糊度(如新升起的卫星),以扩大固定子集。

该方法的优势在于决策同时依赖于模型强度和实际观测数据,能够自动处理新升起卫星的模糊度纳入问题。其缺点是计算量较大,因为需要多次运行 LAMBDA 搜索。

(4) 基于 ADOP 的子集选择

模糊度精度因子 (Ambiguity Dilution of Precision, ADOP) 是 Teunissen 提出的衡量模糊度可固定性的标量指标^[164],定义为:

$$ADOP = \sqrt{\det Q_a}^{1/n} \quad (2-84)$$

其中, $\sqrt{\det Q_a}$ 为模糊度协方差矩阵的行列式, n 为模糊度维数。ADOP 反映了模糊度估计精度的几何平均水平, ADOP 越小,模糊度固定的成功率越高。经验表明,当 ADOP 小于 0.12 周时, bootstrapping 成功率通常高于 99.9%。

基于 ADOP 的子集选择方法通过设置 ADOP 阈值来筛选模糊度子集^[165]。具体而言,从全部模糊度开始,逐步移除对 ADOP 贡献最大的模糊度,直到子集的 ADOP 低于预设阈值。该方法的优势在于 ADOP 是一个综合性指标,能够同时反映模糊度精度和相关性的整体特征,且计算效率较高。

2.4.3.3 模糊度固定检核策略

模糊度固定后,需要对固定结果进行检核,以确保固定的正确性。常用的检核方法包括:

(1) Ratio 检验

Ratio 检验是最常用的模糊度固定检核方法,它比较 LAMBDA 搜索得到的最优解和次优解的目标函数值之比:

$$R = \frac{(\hat{N} - \check{N}_2)^T Q_{\check{N}}^{-1} (\hat{N} - \check{N}_2)}{(\hat{N} - \check{N}_1)^T Q_{\check{N}}^{-1} (\hat{N} - \check{N}_1)} \quad (2-85)$$

其中, \check{N}_1 和 \check{N}_2 分别为最优和次优整数解。当 $R > R_{threshold}$ 时,接受模糊度固定结

果。传统的固定阈值通常取 $R_{threshold} = 2.0$ 或 3.0 。

然而，固定阈值的选择对固定成功率和错误固定率有重要影响。Verhagen 和 Teunissen 提出了基于固定失败率（Fixed Failure Rate, FFR）的自适应 Ratio 检验方法^[166]，根据模糊度的维数和精度自适应地确定阈值：

$$R_{threshold} = R_{FFR}(n, P_{ff}) \quad (2-86)$$

其中， n 为模糊度维数， P_{ff} 为预设的固定失败率（通常取 0.1% 或 1%）。

（2）时间一致性检验

检查相邻历元的模糊度固定结果是否一致。如果某颗卫星的模糊度在相邻历元发生跳变，可能是错误固定，需要重新评估。

（3）固定解坐标检核

在模糊度固定后，利用固定解重新计算坐标，并与浮点解坐标进行比较：

$$T = \Delta r^T (Q_{float} - Q_{fixed})^{-1} \Delta r \sim \chi^2(3) \quad (2-87)$$

当检验统计量 T 超过 χ^2 分布的临界值时，拒绝固定结果，其中 $\Delta r = \hat{r}_{fixed} - \hat{r}_{float}$ 。该方法从定位结果的角度对模糊度固定进行检核，能够有效识别错误固定导致的坐标异常。

（4）无电离层组合残差检验

采用 UDUC 非差非组合模型进行 PPP 解算时，由于参数数量较多，模糊度错误固定导致的观测方程残差有一部分会被其他参数所吸收，导致验后残差不明显。此时，如果将整数模糊度、产品改正数和其他所有估计参数代入 (2.1-24) 中构建一个无电离层组合的方程：

$$\begin{aligned} v_{IF}^j &= L_{i,r}^j - (\rho_r^j + c(d\tilde{t}_r - d\tilde{t}^j)) + m_r^j T_r + \lambda_{IF} \tilde{N}_{IF,r}^j \\ \lambda_{IF} \tilde{N}_{IF,r}^j &= \alpha_{12} \lambda_1 \tilde{N}_{1,r}^j + \beta_{12} \lambda_2 \tilde{N}_{2,r}^j \end{aligned} \quad (2-88)$$

式中，对流层和接收机钟差可采用浮点解结果代入。由于电离层参数被消除，对于服务端已知测站坐标的情况下，该残差对模糊度错误固定变得非常敏感，因而可以根据残差大小来判断各卫星模糊度是否固定错误。

本研究采用级联固定策略结合 Ratio 检验和部分模糊度固定方法，以确保模糊度固定的高成功率和低错误固定率。具体而言，对于超宽巷模糊度采用 ROUND 方法固定并利用时间序列一致性检核；对于宽巷模糊度采用 LAMBDA 方法固定并利用 Ratio 检验和时间序列一致性检核；对于窄巷模糊度采用 LAMBDA 方法固定并利用 Ratio 检验、残差一致性检验和固定解坐标检核等多种方法；当全模糊度固定失败时，自动切换为部分模糊度固定模式。

2.5 本章小结

本章系统阐述了多频多系统 PPP-RTK 的数学模型与方法，为后续章节的实

时精密产品生成、电离层建模和完好性监测奠定了理论基础。主要内容总结如下：

(1) 精密单点定位原理。本节首先全面分析了 GNSS 观测中的各类误差源，包括与卫星相关的误差、与传播路径相关的误差、与接收机相关的误差以及地球物理效应，并给出了每类误差的数学改正模型。在此基础上，建立了 PPP 的函数模型和随机模型，给出了伪距和载波相位观测方程的完整表达。

(2) PPP-RTK 数学模型。本节建立了非差非组合 (UDUC) PPP-RTK 函数模型，通过重参数化策略解决了观测方程中的秩亏问题，明确了各参数的物理含义和可估性。在此基础上，将模型扩展至多系统和多频处理，详细讨论了系统间偏差 ISB 的处理策略，以及与频率相关的误差的处理方法。

(3) PPP 参数估计与质量控制。本节介绍了 PPP 中常用的参数估计方法，包括标准卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波和自适应卡尔曼滤波，以及加权最小二乘和序贯最小二乘方法，分析了各方法的适用条件和优缺点。在质量控制方面，详细讨论了数据预处理中的周跳探测方法和粗差探测方法，以及参数估计过程中的抗差估计方法，为 PPP-RTK 的可靠处理提供了保障。

(4) PPP 模糊度固定与检核方法。本节系统介绍了 PPP 模糊度固定的基本原理。在模糊度固定方法方面，详细阐述了 ROUND 方法、LAMBDA 方法和 BIE 方法的数学原理和多频级联模糊度固定策略实现步骤。在检核策略方面，介绍了部分模糊度固定方法和多种检核方法，确保了模糊度固定的高成功率和低错误固定率。

第 3 章 多频多系统产品估计与实时 PPP-IAR

实时精密产品是 PPP 技术实现厘米级定位的基础保障，实时产品的质量也一直是制约 PPP 定位精度的关键因素。随着多频多系统 GNSS 的快速发展，实时精密产品的生成面临新的机遇和挑战。一方面，多系统联合处理可以显著增加可见卫星数量和改善几何构型；另一方面，不同系统之间的信号差异、频间偏差和系统间偏差等问题增加了产品估计的复杂性。

本章围绕多频多系统实时精密产品的生成与验证展开，系统阐述精密定轨、卫星钟差估计、多频观测值偏差估计的原理与方法，并基于自主开发的卫星广域增强系统（Satellite-Based Wide-area Augmentation System, SWAS）生成的实时产品，对 PPP-IAR 性能进行全面验证。

3.1 GNSS 精密定轨

精密轨道产品是 PPP 定位的核心输入之一，IGS 自 1994 年成立以来，一直致力于提供高精度的 GNSS 轨道和钟差产品^[167]。近年来，随着实时应用需求的增长，IGS 于 2013 年正式启动了 IGS 实时服务（Real-Time Service, RTS），为全球用户提供实时精密轨道和钟差改正^[168]。

本节首先介绍 GNSS 精密定轨的基本原理，包括轨道力学模型、姿态模型、轨道预报方法和轨道产品综合方法，然后分析实时超快速轨道的精度以及机动相关的处理策略。

3.1.1 GNSS 精密定轨原理

3.1.1.1 摄动力模型

卫星绕地球运动时受到多种力的综合影响，除去地球引力外，其他的作用力均可认为是摄动力。Montenbruck 和 Gill 对各类摄动力的量级和建模方法进行了系统总结^[169]，影响 GNSS 卫星运动的摄动力可分为保守摄动力和非保守摄动力两大类。保守摄动力主要包括：地球非球形引力^[170]，N 体引力^[171]以及固体潮、海潮等引起的地球形变摄动力^[172]等。目前对于卫星的保守力摄动模型的研究已经非常成熟，可以通过模型精确改正，此处不再赘述。非保守摄动力主要包括：太阳光压、地球反照辐射和天线推力摄动力等，这些摄动力的精确确定轨道积分的前提条件。

（1）太阳光压

太阳光压（Solar Radiation Pressure, SRP）是 GNSS 卫星最主要的非保守力摄动源，其量级约为 10^{-7} m/s^2 ，对轨道的累积效应显著。由于不同卫星系统的卫星构型差异显著（如：GPS Block IIF/IIIA 为圆柱体构型，Galileo 和 BDS3 为长

方体构型)，对不同类卫星的太阳光压建模是精密定轨中的关键难题^[173-175]。

目前广泛使用的经验光压模型为 CODE 分析中心开发的 ECOM (Extended CODE Orbit Model) 系列模型。Beutler 等提出的经典 ECOM 模型在 DYB 坐标系中将光压加速度表示为^[176]：

$$a_{sp} = D(u)e_D + Y(u)e_Y + B(u)e_B \quad (3-1)$$

其中， u 为卫星的轨道角距 (argument of latitude)； $D(u)$ 、 $Y(u)$ 和 $B(u)$ 为 D/Y/B 坐标系三个方向上的加速度，在 ECOM 模型中可以表示为^[177]：

$$\begin{cases} D(u) = D_0 + D_c \cos(u) + D_s \sin(u) \\ Y(u) = Y_0 + Y_c \cos(u) + Y_s \sin(u) \\ B(u) = B_0 + B_c \cos(u) + B_s \sin(u) \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， D_0 、 Y_0 、 B_0 为待估常数光压系数， D_c 、 D_s 、 Y_c 、 Y_s 、 B_c 和 B_s 为周期项待估模型系数。Springer 等人发现 GPS 卫星定轨时只需要估计 D、Y、B 三个方向的常数项参数和 B 方向的周期项参数就可以得到高精度轨道，随后该模型获得了广泛应用，即 ECOM 5 参数模型，此时 D_c 、 D_s 、 Y_c 和 Y_s 均为零^[178]。

D/Y/B 坐标系中：D 指向太阳方向、Y 沿太阳能帆板轴、B 补全右手系，且有：

$$\begin{cases} e_D = \frac{r_s - r}{|r_s - r|} \\ e_Y = \frac{e_r \times e_D}{|e_r \times e_D|} \\ e_B = e_D \times e_Y \end{cases} \quad (3-3)$$

其中 r_s 和 r 分别代表太阳和卫星位置向量， e_r 为卫星的单位向量。

由于卫星形状的变化，ECOM 模型对 GLONASS 和 Galileo 卫星不完全适用。因此，Arnold 等针对 Galileo 等长方体构型卫星提出了 ECOM2 模型，在 ECOM 基础上增加了 D 和 B 方向的分别引入偶数和奇数的周期项^[179]：

$$\begin{cases} D(u) = D_0 + \sum_{i=1}^{n_D} \{D_{2i,c} \cos(2i\Delta u) + D_{2i,s} \sin(2i\Delta u)\} \\ Y(u) = Y_0 \\ B(u) = B_0 + \sum_{i=1}^{n_B} \{B_{2i-1,c} \cos((2i-1)\Delta u) + B_{2i-1,s} \sin((2i-1)\Delta u)\} \end{cases} \quad (3-4)$$

目前常用的 ECOM2 模型是 ECOM2 D4B1 模型，即 $n_D = 2$ 且 $n_B = 1$ ，也称为 ECOM2 9 参数模型。ECOM2 模型共包含 9 个待估参数，能够更好地适应长方体构型卫星的光压特性。Prange 等的研究表明，ECOM2 模型共包含 9 个待估参数，能够更好地适应长方体构型卫星的光压特性，该模型对 Galileo 卫星的轨

道精度较 ECOM 提升约 20-30%^[180]。

经验的光压模型通常需要较长时间的数据累积,才能逐步确定其光压模型的形式,对于新发射的卫星类型,其效果往往不是最佳。基于此情况,许多学者提出了半经验型和半分析型光压模型,比较典型的是 Box-wing 模型^[181-182]。Box-wing 模型将卫星受照面光学参数、太阳帆板尺度因子、太阳帆板旋转滞后角等参数通过卫星长期在轨观测数据进行估计,得到精确校正的卫星光学参数等信息。该模型采用了卫星物理参数,同时可以对光学参数进行调整,无需长时间的数据积累即可得到较精确的光压模型,对于新发射的卫星光压模型精化有较大应用价值^[183-184]。

(2) 地球反照辐射

除太阳光压外,地球自身的辐射也会对 GNSS 卫星产生不可忽略的非保守力摄动。地球反照辐射压 (Earth Radiation Pressure, ERP) 包含两个物理分量:可见光反射分量 (Albedo) 和红外热辐射分量 (Infrared Emission)。前者源于太阳辐射被地球表面和大气层反射后到达卫星,后者源于地球自身作为热辐射体向外发射的长波红外辐射。Knocke 等首次系统研究了地球辐射压对卫星轨道的影响,指出其量级约为太阳光压的 10%~25%^[185]。

地球反照辐射的建模通常采用离散化方法,将地球表面划分为若干面元,逐一计算每个面元对卫星的辐射贡献并求和。Rodriguez-Solano 等基于 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 卫星观测数据获取全球反照率和发射率分布,系统研究了地球反照辐射对卫星轨道和测站坐标估计的影响。在一定假设条件下,卫星处地球反照辐射光强的可表示为^[186-187]:

$$S_{erp} = \frac{\pi R_E^2 S_0}{\|r\|} \left[\frac{2\gamma}{3\pi^2} ((\pi - \varepsilon) \cos \varepsilon + \sin \varepsilon) + \frac{1 - \gamma}{4\pi} \right] \quad (3-5)$$

式中, R_E 为地球半径, γ 为地球表面辐射率, ε 表示卫星-地球-太阳构成的夹角。将公式 (3-5) 代入公式 (3-6) 即可根据地球反照辐射光强和卫星面板几何光学参数计算出地球反照辐射摄动力加速度:

$$a_{erp} = S_{erp} \left(\frac{r_{AU}}{\|r_s\|} \right)^2 \frac{A \cos \theta}{Mc} \left[(a + \delta) e_D + \left(\frac{2}{3} \delta + 2\rho \cos \theta \right) e_N \right] \quad (3-6)$$

其中, r_{AU} 为天文单位, A 为卫星体面积、 M 为卫星质量, θ 为辐射光的入射角, e_D 为卫星与太阳方向的单位向量, e_N 为卫星面板的法向向量, δ 为卫星的反射系数。

对于 GNSS 卫星,地球反照辐射的加速度量级约为 10^{-9} m/s^2 ,主要影响轨道的径向分量,可引起 1~2 cm 的系统性径向偏差。此外,红外辐射分量的贡献约占总地球辐射压的 60% 以上^[187]。在本研究的精密定轨处理中,采用 Rodriguez-Solano 等提出的解析模型,基于 CERES 全球反照率和发射率数据对

地球反照辐射进行建模改正。

(3) 天线推力

GNSS 卫星在发射导航信号时, 电磁波携带动量。根据动量守恒定律, 卫星在发射信号的同时会受到一个方向相反的反作用力, 即天线推力 (Antenna Thrust)。虽然单个光子的动量极小, 但 GNSS 卫星持续不断地以数十至数百瓦的功率发射 L 波段信号, 累积效应不可忽略。天线推力产生的加速度可表示为^[188]:

$$a_{ant} = \frac{r}{\|r\|} \frac{P}{Mc} \quad (3-7)$$

其中, P 为卫星天线的总发射功率 (单位: W)。该加速度的方向沿卫星天线指向, 即沿卫星-地球连线方向背离地球 (径向向外方向)。由于 GNSS 卫星的导航天线始终指向地球, 天线推力的效果等价于在径向方向上产生一个恒定的向外加速度, 其作用与太阳光压的径向分量方向相反。

Steigenberger 等利用德国航空航天中心地面站的 30 米口径高增益天线, 系统测量了 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS2 卫星的 L 波段总发射功率 (各个功率估计结果如表 3-1 所示), 并评估了天线推力对精密定轨的影响^[188]。

表 3-1 各 GNSS 系统卫星发射功率与天线推力轨道影响

Table 3-1 Impact of Satellite Transmission Power and Antenna Thrust on Orbits for Various GNSS Satellites

卫星系统	卫星类型	总发射功率/W	卫星质量/kg	径向影响/mm
GPS	Block IIA	50~76	~1100	1~2
	Block IIR/IIR-M	50~76	~1100	1~2
	Block IIF	200~240	~1600	5~6
	Block IIIA	~240	~2200	~4
GLONASS	GLONASS-M	20~135	~1400	1~5
Galileo	IOV	~95	~700	~15
	FOC	200~265	~700	~26
BDS2	MEO/IGSO	130~185	~900	3~5

值得注意的是, Galileo FOC 卫星由于质量较小 (约 700 kg) 而发射功率较高 (200~265 W), 天线推力对其轨道的影响最为显著, 径向偏差可达约 26 mm。Steigenberger 和 Montenbruck 指出, 在 Galileo 精密定轨中忽略天线推力将导致显著的系统性径向偏差^[189]。

3.1.1.2 卫星运动方程及其解

GNSS 卫星的运动受到多种力的作用, 其轨道可通过求解牛顿运动方程来确定。Beutler 系统阐述了卫星轨道确定的理论基础, 卫星在地心惯性坐标系 (J2000.0) 中的运动方程可表示为二阶常微分方程^[176]:

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{|r|^3}r + f(r, \dot{r}, p, t) \quad (3-8)$$

其中, r 和 \dot{r} 分别为卫星在惯性系中的位置和速度矢量, GM 为地球引力常数, 第一项为地球中心引力加速度, f 为各种摄动力的合力, 包括保守力和非保守力, p 为力模型中的待估动力学参数 (如太阳光压系数)。

卫星精密定轨过程中, 公式 (3-1) 中的任意卫星位置和速度矢量并非已知, 而是需要对卫星的变分方程进行积分获得, 利用变分方程和参考时刻的卫星轨道初始参数可以计算出任意时刻的卫星轨道和速度。假设卫星的状态参数为 $x = (r, v, p)^T$, 则卫星运动的一阶微分方程可表示为:

$$\dot{x} = F(x, t) = (\dot{r}, \dot{v}, \dot{p})^T \quad (3-9)$$

一般的, 卫星的初始状态 x_0 可用广播星历或者预报星历近似获取, 动力学参数的初值可以设为 0, 即:

$$x_0 = \begin{cases} r|_{t_0} = r_0 \\ v|_{t_0} = v_0 \\ p|_{t_0} = p_0 \end{cases}$$

那么对一阶微分方程的求解可以转为对状态参数和各项力模型参数积分。将公式 (3-9) 在时刻 t^* 处按泰勒级数展开可得:

$$\dot{x}|_{t^*} = F(\dot{x}^*, t^*) + \left. \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \right|_* (x - x^*) \quad (3-10)$$

考虑到卫星的速度, 位置和动力学参数之间没有相关性, $\left. \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \right|_*$ 可进一步展开表示为:

$$\frac{\partial F(x, t)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{r}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial p} \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{v}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{v}}{\partial p} \\ \frac{\partial \dot{p}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{p}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{p}}{\partial p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ \frac{\partial \dot{r}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial p} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

令 $X = x - x^*$, $A = \left. \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \right|_*$, 那么方程 (3-3) 可表示为:

$$\dot{X} = \dot{x} - \dot{x}^* = AX \quad (3-11)$$

公式 (3-11) 的解可以进一步表示为:

$$X = \Phi(t, t_0)X_0 \quad (3-12)$$

$\Phi(t, t_0)$ 为状态转移矩阵, 是根据 t_0 时刻的状态变化量计算出 t 时刻的状态变化量, 且有:

$$\Phi(t, t_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial r_0} & \frac{\partial r}{\partial v_0} & \frac{\partial r}{\partial p_0} \\ \frac{\partial v}{\partial r_0} & \frac{\partial v}{\partial v_0} & \frac{\partial v}{\partial p_0} \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \Phi(t_0, t_0) = I$$

对公式 (3-12) 求导, 进一步可获得:

$$\begin{cases} \dot{\Phi}(t, t_0) = A\Phi(t, t_0) \\ \Phi(t_0, t_0) = I \end{cases} \quad (3-13)$$

一般而言, 已知状态转移矩阵的初值, 对变分方程公式 (3-13) 积分即可求得计算任意历元相对于参考历元的状态转移矩阵 $\Phi(t, t_0)$, 其中偏导数矩阵 A 可以通过力模型计算。然后对公式 (3-12) 进行数值积分, 即可求得解算时刻的状态参数 $x = (r, v, p)^T$ 。

3.1.1.3 轨道参数求解及轨道预报

(1) 轨道参数求解

轨道参数的求解可以基于非差观测方程也可以基于双差观测方程, 目前主流的精确定轨软件中采用这两种方法的均有。以 IGS 分析中心为例, 基于非差方程计算轨道参数的软件有: 武汉大学的 PNADA^[190-191], ESA 的 NAPEOS 软件^[192], GFZ 的 EPOS.P8 软件^[193], JPL 的 GipsyX/RTGx 软件^[194]等; 基于双差解算轨道参数的软件有: CODE 的 Bernese 软件^[195], MIT 的 GAMIT/GLOBK 软件^[196]等。本文参考 Bernese 软件, 采用双差解算轨道参数, 略去推导过程, 将双差观测方程线性化可直接获得公式用于估计轨道参数、光压参数等^[197]:

$$LC_{kl}^{ij}(t) = \rho_{kl}^{ij}(t, X_{r_0}, X^s(t)) + \frac{\partial \rho_{kl}^{ij}}{\partial X_r} \Delta X_r + \frac{\partial \rho_{kl}^{ij}}{\partial X^s(t)} \theta(t, t_0) \Delta X^s(t_0) + \Delta T_{kl}^{ij}(t) + \lambda_c N_{kl}^{ij} + \varepsilon'_\phi \quad (3-14)$$

其中 LC_{kl}^{ij} 为地面站 k 、 l 对卫星 i 、 j 的双差无电离层组合观测值, ρ_{kl}^{ij} 为相应的双差站星距, $\theta(t, t_0)$ 为状态转移矩阵, $T_{kl}^{ij}(t)$ 为对流层延迟, λ_c 为组合相位观测值的波长, N_{kl}^{ij} 为相位模糊度, X_{r_0} 为测站近似坐标, ΔX_r 为测站坐标改正, $X^s(t)$ 为卫星相应的轨道参数及力学参数 (包括经验力参数、光压参数等), $\Delta X^s(t_0)$ 为参考历元 t_0 的轨道参数的改正, ε'_ϕ 为相应的观测噪声, 根据最小二乘原理利用以上方程便可估计相应的轨道参数或其他参数。

(2) 轨道预报

实时应用中, 由于批处理定轨固有的时间延迟, 无法直接获得实时轨道产品。因此, 通常估计超快速轨道, 然后通过数值积分外推轨道的策略来提供实时的轨道产品。IGS 自 2000 年起开始提供超快速轨道产品, 其前半段为观测弧段, 后半段为预报弧段^[198]。

轨道预报的基本原理是基于已确定的轨道初始状态,通过数值积分运动方程式(3-9)获得未来时刻的轨道位置^[176]:

$$\begin{aligned} r(t) &= r_0 + \int_{t_0}^t \dot{r}(\tau) d\tau \\ \dot{r}(t) &= \dot{r}_0 + \int_{t_0}^t \ddot{r}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (3-15)$$

预报轨道精度随预报时间的增长而逐渐降低,主要受以下因素影响^[199]:

- (1) 力模型的不完善性,特别是太阳光压模型的误差在地影区显著增大;
- (2) 初始状态的轨道精度,包括位置、速度和力模型参数的估计误差;
- (3) 地影区卫星姿态模型的不确定性导致光压加速度计算偏差。

Dai 等的研究表明, GPS 超快速轨道在预报 6 小时后的径向精度约为 2-3 cm, 24 小时后退化至 5-8 cm^[200]。

3.1.1.4 轨道产品综合

轨道产品综合是提高轨道产品精度和可靠性的重要手段, IGS 最终精密轨道即为多个分析中心产品的加权综合结果^[201]。此外,为了提高实时 PPP 的性能, IGS 也提供了利用各个分析中心轨道综合实时产品^[202-203]。

(1) 参考框架统一

不同分析中心生成的轨道产品可能基于不同的参考框架或框架实现^[204], 因此在进行轨道综合之前,必须将所有产品统一到同一参考框架下。框架统一通常采用 Helmert 七参数相似变换^[205]:

$$r_{unified} = T + (1+s)R(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)r_{ori} \quad (3-16)$$

其中, $T = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ 为平移向量, s 为尺度因子, R 为由三个微小旋转角 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 构成的旋转矩阵。当旋转角很小时,旋转矩阵可线性化为:

$$R = I + \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 0 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

七参数通过最小二乘方法利用公共卫星的轨道坐标进行估计。在实际处理中,通常选取 GPS 卫星作为公共卫星进行框架对齐,因为 GPS 卫星的轨道精度最高且各 AC 之间的一致性最好。

(2) 粗差探测与加权综合

轨道综合的核心步骤包括粗差探测和加权平均。Ferland 和 Piraszewski 采用迭代加权中位数 (Iterative Weighted Median) 方法进行粗差探测,具体步骤为^[205]:

- (a) 计算各 AC 轨道产品相对于加权中位数的残差;
- (b) 利用中位数绝对偏差 (MAD) 估计残差的稳健标准差: $\hat{\sigma} = 1.4826MAD$;
- (c) 剔除残差超过 $3\hat{\sigma}$ 的异常值;
- (d) 迭代上述过程直至收敛。

对于通过粗差检验的轨道产品,采用方差分量估计 (Variance Component

Estimation, VCE)方法确定各 AC 产品的权重[202]。设第 k 个 AC 的轨道产品为 r_k ，其方差因子为 σ_k^2 ，则加权综合轨道为：

$$r_{cmb} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{r_k}{\sigma_k^2}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sigma_k^2}} \quad (3-18)$$

其中，n 为参与综合的 AC 数量。VCE 方法通过迭代估计各 AC 的方差因子，使综合结果的精度最优。

3.1.2 实时 GNSS 精密定轨结果分析

3.1.2.1 实验设计

本研究基于自编软件（CHCNAV Precise Orbit Determination, CPOD）设计了一套精密定轨解算方案，自动实现 GPS、GLONASS、Galileo、BDS2 和 BDS3 等卫星超快速轨道的计算和发布。该方案将基于全球 GNSS 跟踪站提供的小时文件，实现每 3 小时更新的超快速轨道产品计算，并预报 24 小时播发给用户。卫星精密定轨过程涉及卫星初轨/数据准备、数据质量控制、参数估计、轨道提升等步骤，整个定轨数据处理流程如图 3-1 所示[206]。

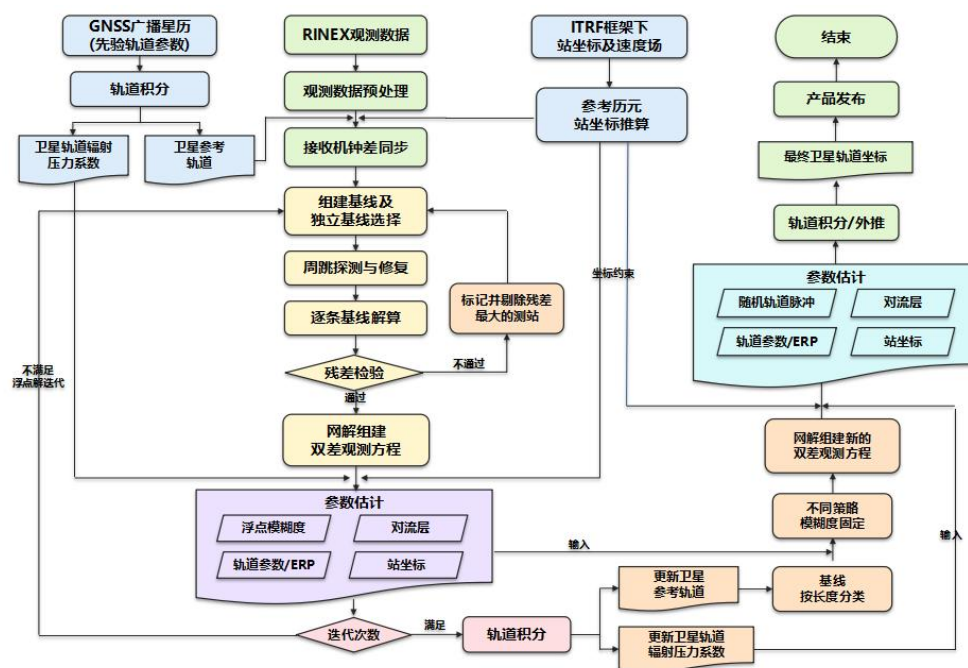


图 3-1 GNSS 精密定轨流程图

Figure 3-1 Flow Chart of Precise Orbit Determination

该定轨流程主要包含以下四部分：

- 1) 数据准备、格式转换部分：包括广播星历的合并及格式转换、观测数据格式转换、测站当前坐标推算等；
- 2) 数据预处理部分：包括接收机钟差同步、基线生成及选择、周跳探测修复、数据筛选等；

3) 轨道初步更新: 根据观测数据获得浮点解坐标结果, 同时解算卫星轨道参数, 并对先验轨道进行更新; 如若初始轨道精度较低, 该过程可能需要迭代;

4) 最终轨道确定: 利用更新的卫星轨道求取固定解结果, 同时准确估计卫星轨道参数, 根据轨道参数获取卫星轨道坐标。

本文超快速精密定轨采用双差模型, 观测值采用 IF 组合, 其中光压模型使用 CODE 提出的 ECOM 系列模型^[177-179], 地球反照辐射模型采用文献^[186]中的方法, GNSS 卫星天线功率取自文献^[188], 其他策略均在表 3-2 中给出。

表 3-2 超快速精密定轨策略和模型

Table 3-2 Strategies and Models for Ultra-Rapid Precise Orbit Determination

	误差项	策略/模型
基本策略	卫星系统	GPS、GLONASS、Galileo、BDS2 (nonGEO)、BDS3 (nonGEO)
		GPS/GLONASS:L1 L2
	使用频率	Galileo: E1 E5a BDS2/BDS3: B1 B3
	观测模型	IF 无电离层组合
	对流层策略	湿延迟+梯度
	对流层映射函数	GMF
	采样率	30 s
	截止高度角	5°
	参考框架及坐标	IGS20 from SINEX
	初始轨道/EOP	广播星历/IERS Bullet_A
	天线模型	igs20_2335.atx
	行星引力摄动	DE405, 考虑日月、木星、金星、火星等
	地球重力场	EGM2008
力学模型	固体潮、海潮	根据 IERS2010 改正
	大气阻力	未考虑
	地球反照辐射	All GNSS 考虑
	天线推力	All GNSS 考虑
	光压模型	Galileo/BDS3 采用 ECOM2 GPS/BDS2/GLONASS 卫星采用 ECOM

GNSS 精密定轨时, 为了尽可能保证每颗卫星的几何构型, 测站选择需要尽可能均匀分布, 图 3-2 给出了精密定轨使用的 116 个测站分布情况, 这些测站几乎全部能提供 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 四系统的最少双频观测值。为了尽可能地增加观测量数据提高超快速轨道的精度, 批处理计算时采用的是过去 48 小时的 hourly 文件数据。采用 hourly 文件数据和采用实时数据流相比, 可供选择的测站数更多, 一方面能更好地保证测站的分布合理性, 另一方面对数据流的实时性要求不高, 保证每个计算时段内测站数据流基本稳定充足。

实时超快速轨道计算时，大概需要等待 30 分钟的时间收集足够的测站观测数据，整个轨道计算过程大概需要 60 分钟。一旦精密超快速轨道计算完成后，程序会自动去 IGS 精密产品对应的 FTP 上下载各个分析中心的超快速产品，然后开始进行轨道综合，最终获得综合后的轨道产品，再播发给用户使用。目前提供 GRCE 超快速轨道的产品的 IGS 分析中心包括 WHU、CNES 和 CAS，另外 CODE 和 GFZ 提供 GRE 三系统超快速产品。

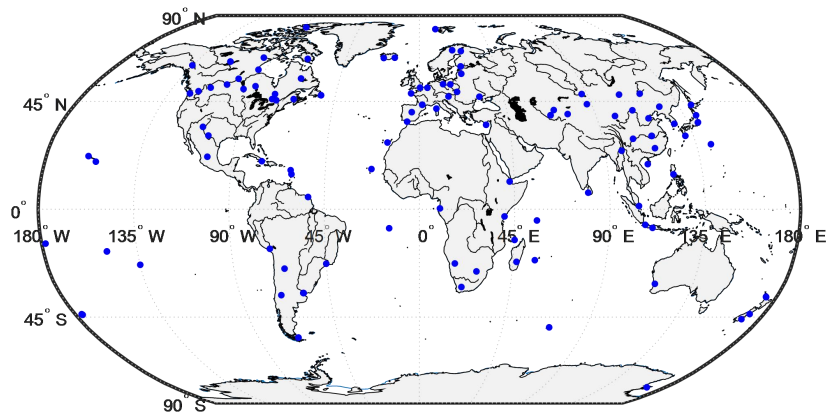


图 3-2 GNSS 精密定轨测站分布

Figure 3-2 Distribution of Stations Used for POD

3.1.2.2 实时轨道产品精度分析

精密轨道的评估过程比较简单，只要将获得的轨道产品和参考轨道进行对比即可。由于超快速轨道存在 2-3 小时的延迟，实际用户用到的轨道是通过外推获得的，为了客观反映用户所获得的轨道产品精度，本文将各个时段用户实际用到的预报部分轨道合并成单个轨道文件，然后再与参考轨道进行对比。以 GFZ 发布的 GBM 事后产品作参考，图 3-3 给出了 GPS 在径向（radial）、切向（along）和法向（cross）三个方向 2025 年 DOY 250 的差异序列图。除 G30 卫星外，所有 GPS 卫星在三个方向上的最大差异均在 0.20 米以内。G30 卫星轨道精度略差于其他卫星，主要是由于这颗卫星在 DOY250 天处于地影期。此外，从图中还可以看出，每隔三小时左右轨道存在不连续的跳跃情况，这是由于每三小时超快速轨道更新一次时，每次更新轨道各颗卫星均存在 cm 级别的不连续，且法向和切向的不连续性比径向更为明显。总体而言，所有卫星轨道差异的 RMS 在径向、切向和法向分别为 0.0184 m、0.0373 m、0.0252 m，结果表明，本文计算获得的超快速卫星轨道产品均具有较高精度。

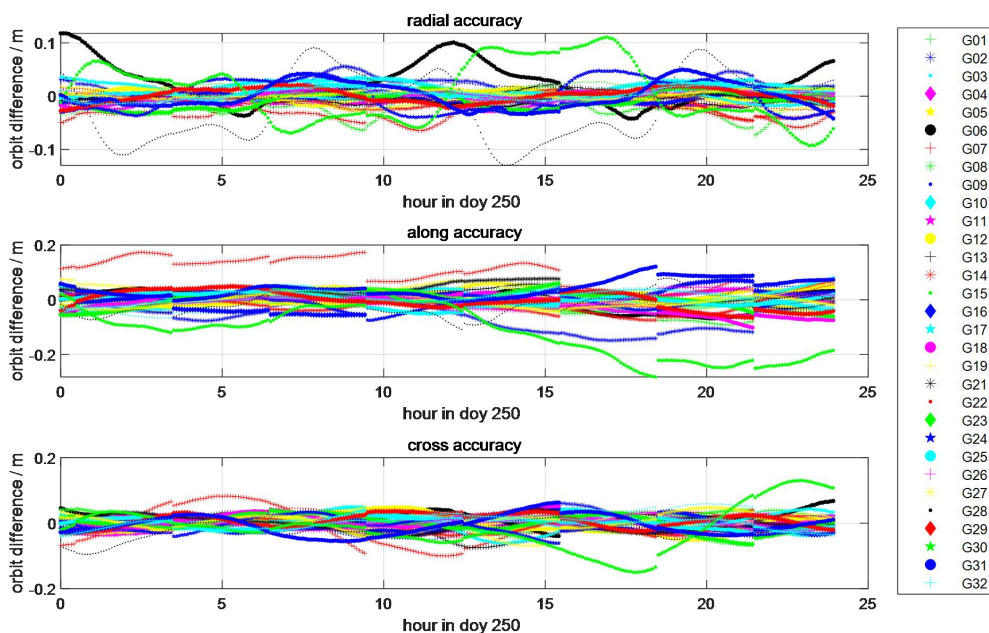


图 3-3 GPS 轨道径向、切向、法向误差序列图
 Figure 3-3 Orbit Differences in radial/along/cross for GPS

图 3-4 给出了 GLONASS 在径向、切向和法向三个方向 2025 年 DOY 250 的差异序列图。如图所示，GLONASS 卫星的轨道差异表现出比 GPS 更明显的波动。所有卫星差异的 RMS 在径向、切向、法向分别为 0.0259 m、0.0530 m、0.0422 m。伽利略卫星的波动幅度与 GPS 卫星相近，图 3-5 给出了 Galileo 卫星在径向、切向和法向三个方向的差异序列图。由图可知，图中多颗 Galileo 卫星出现轨道明显偏离较大的情况，这是由于 Galileo 其中一个轨道面进入地影期导致，接近三分之一的卫星产品精度均受到影响，其余非地影卫星基本上轨道差异均在 0.2 m 之内。所有 Galileo 非地影卫星差异的 RMS 在径向、切向、法向分别为 0.0295 m、0.0426 m、0.0333 m。此外，部分地影 Galileo 卫星轨道在切向和法向随着预报时间的增加，轨道误差存在明显的发散现象，主要是由于地影期轨道参数和动力学参数估计精度降低导致。此外，部分卫星的法向误差呈现一定的周期性，这和卫星轨道本身周期性变化相关。

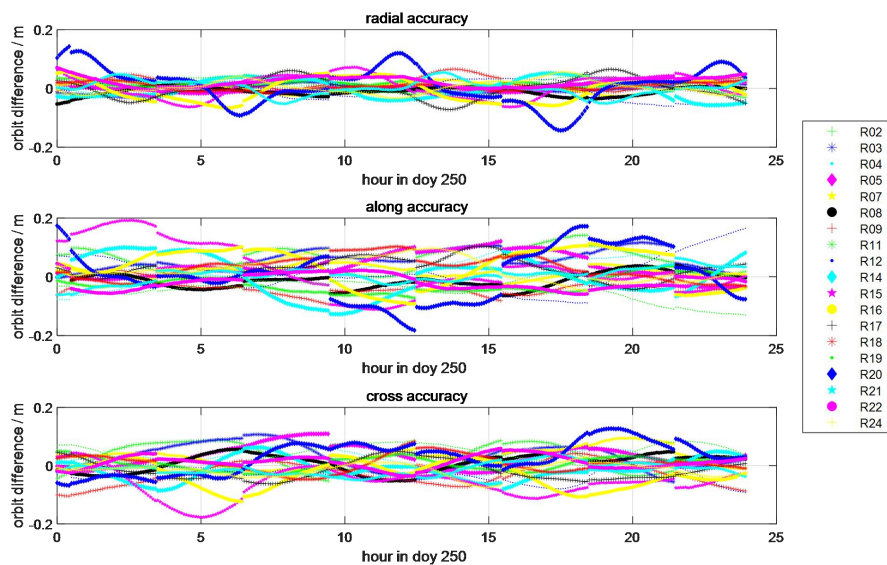


图 3-4 GLONASS 轨道径向、切向、法向误差序列图
 Figure 3-4 Orbit Differences in radial/along/cross for GLONASS

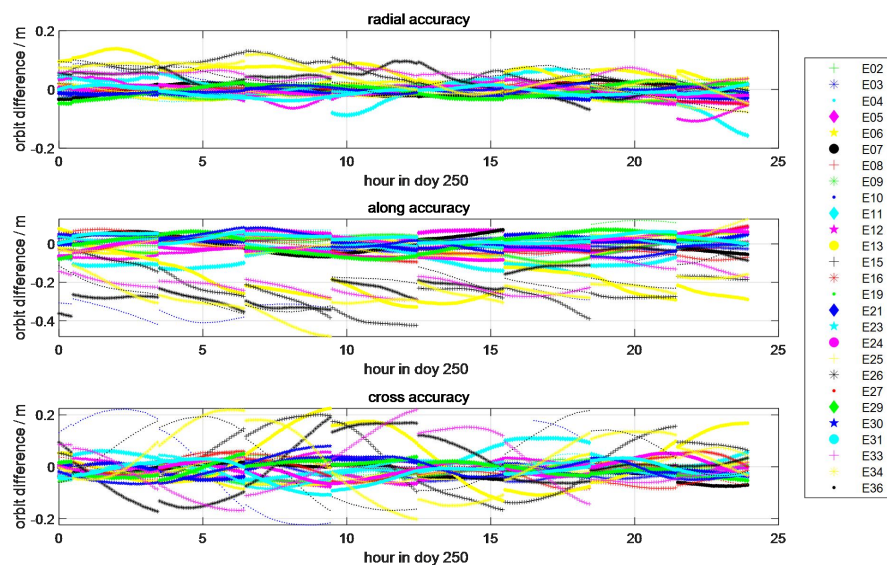


图 3-5 Galileo 轨道径向、切向、法向误差序列图
 Figure 3-5 Orbit Differences in radial/along/cross for Galileo

图 3-6 给出了 BDS2 在径向、切向和法向三个方向的差异序列图。如图所示，如图所示，和其他卫星相比，BDS2 卫星的轨道产品精度显著下降。一方面这是由于 BDS2 卫星大部分是 IGSO 卫星，其地面跟踪站几何构型较差，另一方面 BDS2 卫星观测值精度也差于其他卫星等原因整体导致 BDS2 卫星产品精度差于其他卫星系统。总体而言，除即将进入地球本影的 C06 和 C09 卫星外，大多数卫星在三个方向上的差异均在 0.30 m 以内。所有卫星差异的 RMS 在径向、切向、

法向分别为 0.1177 m、0.1094 m、0.1180 m。BDS3 卫星较 BDS2 产品精度明显更好,如图 3-7 所示,BDS3-MEO 卫星达到了与 GPS 和 Galileo 相当的精度水平。所有 MEO 卫星差异的 RMS 在径向、切向、法向分别为 0.0327 m、0.0468 m、0.0369 m。然而,与 MEO 卫星相比,包括 C38 和 C40 在内的 IGSO 卫星的精度显著下降,其轨道差异最大可以达到 0.3 m。图中 C39 的轨道差异未给出,这是由于这颗卫星轨道异常,参考轨道也未提供 C39 的产品。

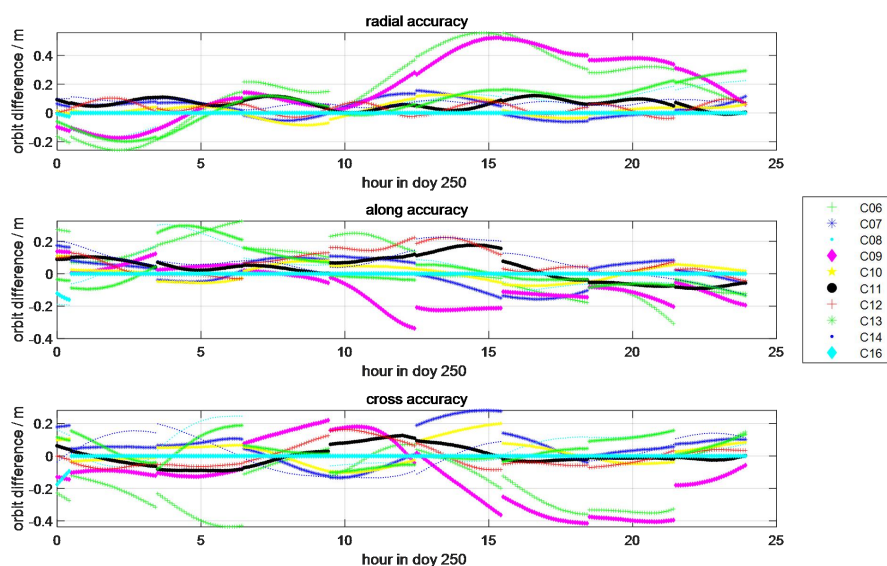


图 3-6 BDS2 轨道径向、切向、法向误差序列图
Figure 3-6 Orbit Differences in radial/along/cross for BDS2

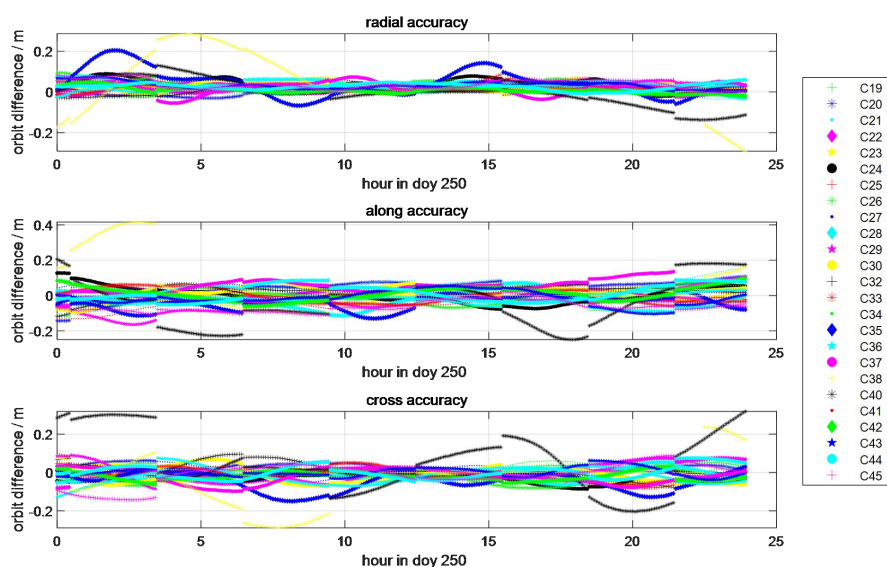


图 3-7 BDS3 轨道径向、切向、法向误差序列图
Figure 3-7 Orbit Differences in radial/along/cross for BDS3

3.1.2.3 实时轨道统计精度

将用户端实际收到的轨道产品实时存储下来,事后将其与参考轨道作差进行分析。图 3-8 给出了 2025 年 9 月份实时轨道产品的精度统计情况,整个期间轨道播发连续稳定运行,未有中断的情况。为了消除粗差对统计结果的影响,分析中剔除了 BDS2 卫星径向轨道误差超过 0.35 米、其他卫星径向轨道误差超过 0.25 米的数据。由图可知, GPS 卫星轨道展现出最高的精度,大部分卫星的轨道精度 3D 优于 0.05 m。Galileo 卫星精度紧随 GPS 之后,绝大部分卫星轨道 3D 精度优于 0.08 m; GLONASS 和 BDS3-MEO 卫星的精度相当且略差于 Galileo 和 GPS 卫星,部分 GLONASS 和 BDS3-MEO 卫星 3D 轨道精度达到 0.10 m。整体而言,大部分 GPS/Galileo/GLONASS/BDS3-MEO 卫星的径向和法向精度分别优于 0.03 m 和 0.05 m,而存在大量卫星切向误差超过 0.05 m。BDS2-MEO 卫星轨道精度略差,3D 误差精度基本上在 0.15 m 左右。此外, BDS2-IGSO 和 BDS3-IGSO 卫星的精度显著下降,基本上大部分的 BDS2-IGSO 和 BDS3-IGSO 卫星的 3D 轨道误差都存在超过 0.20 m 的情况。

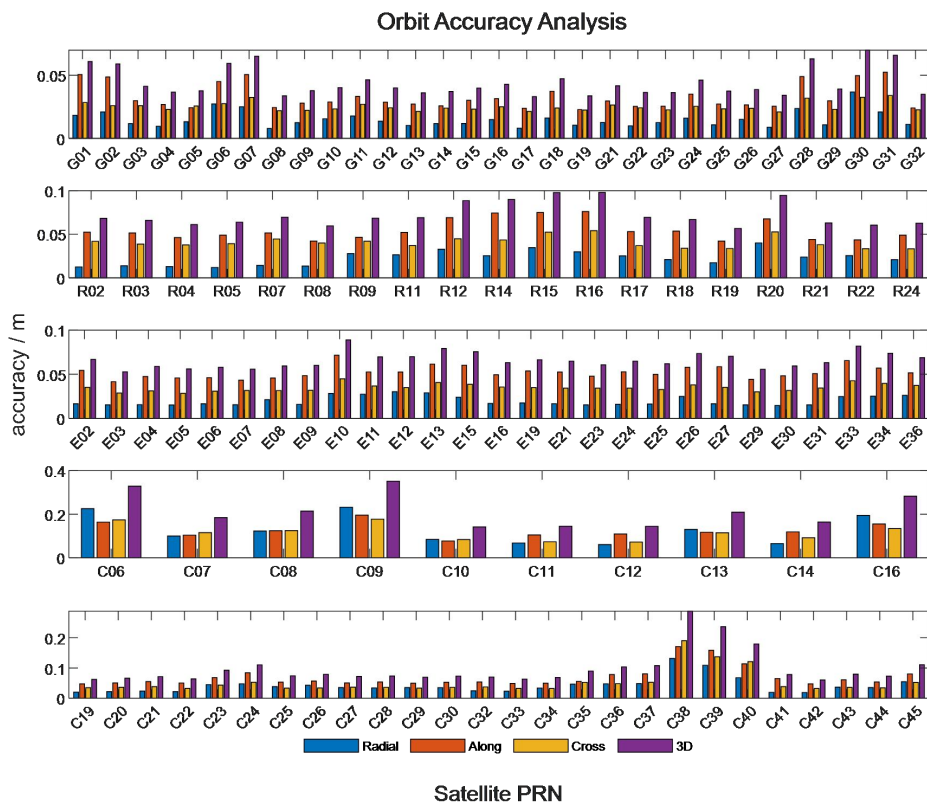


图 3-8 各个卫星实时轨道产品精度统计结果

Figure 3-8 Statistical Results of Orbit for each Satellite

图 3-9 给出了不同卫星系统实时轨道产品的精度统计情况。整体而言, GPS 系统的整体统计精度最优,其径向、切向、法向和 3D 的平均误差分别为 0.0150

/0.0328/0.0251/0.0442 m；其次是 Galileo 卫星，其径向、切向、法向和 3D 的平均误差分别为 0.0197/0.0522/0.0348/0.0659 m；GLONASS 和 BDS3-MEO 轨道精度基本在一个量级，其中 GLONASS 卫星在径向、切向、法向和 3D 的平均误差分别为 0.0226/0.0547/0.0409/0.0723 m；BDS3-MEO 卫星在径向、切向、法向和 3D 的平均误差分别为 0.0346/0.0587/0.0392/0.0790 m。BDS2 卫星和 BDS3-IGSO 卫星轨道精度相对较差，主要是由于大部分高轨道卫星其地面跟踪站的几何构型偏差，导致方程结构差估计轨道产品的精度有限，其中 BDS2 卫星在径向、切向、法向和 3D 的平均误差分别为 0.1284/0.1270/0.1161/0.2166 m；BDS3-IGSO 卫星在径向、切向、法向和 3D 的平均误差分别为 0.1030/0.1477/0.1495/0.2345 m。

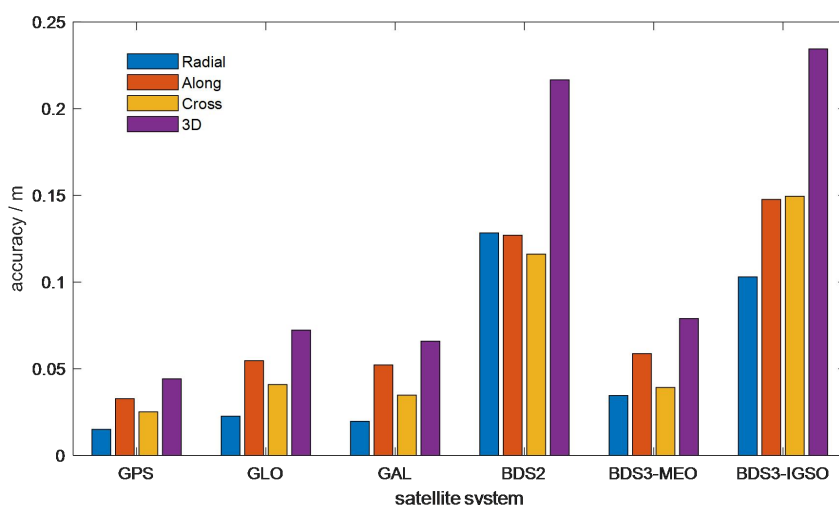


图 3-9 各卫星系统实时轨道产品精度统计

Figure 3-9 Statistical Results of Orbit for each System

3.1.3 轨道机动探测

卫星轨道机动是卫星系统维护的常规操作，Ye 等指出，GPS 卫星平均每月进行 1-2 次轨道机动，BDS 卫星的机动频率更高^[207]。轨道机动期间，卫星的实际轨道偏离预报轨道，这会导致产品精度急剧下降。融入了机动卫星后，整个轨道确定过程将变得异常，因而如何实时准确地探测轨道机动是保证轨道精度的重要问题。

略去推导，在公式 (2-15) 基础上，先后构建站间、星间和历元间三次差可得：

$$\nabla\Delta L_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1}) = \nabla\Delta\rho_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1}) + \nabla\Delta T_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1}) - \nabla\Delta I_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1}) + \nabla\Delta\eta_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1}) \quad (3-19)$$

式中，模糊度参数 N 已消除，仅剩余残余电离层误差项 $\nabla\Delta I_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1})$ 、残余对流层误差项 $\nabla\Delta T_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1})$ 、随机噪声项 $\nabla\Delta\eta_{kl}^{n,j}(t_i, t_{i-1})$ 以及卫地距相关项

$\nabla\Delta\rho_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 。测量定位或精密定轨过程中，由于观测数据的采样间隔较短因而电离层和对流层变化较小，即 $\nabla\Delta I_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 和 $\nabla\Delta T_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 均接近于 0。 $\nabla\Delta\rho_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 则取决于卫星、测站相对位置的变化，定轨过程中使用的测站均为固定站，因而卫星与测站间速度相对平稳，即 $\nabla\Delta\rho_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 也接近 0。换言之，在没有周跳的情况下可以认为三差观测值 $\nabla\Delta L_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 近似为 0。

然而，当卫星轨道发生机动时，卫星被施加了一个加速度，导致卫星速度发生变化，进而引起 $\nabla\Delta\rho_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 在卫星加速过程发生变化，即历元间差分观测值 $\nabla\Delta\rho_{kl}^{n,J}(t_i, t_{i-1})$ 将不为 0 且随卫星额外施加的加速度变化而变化，那么基于历元间三差 GNSS 观测量的变化情况即可实现卫星轨道机动的实时探测。

以 BDS2 系统 C07 号卫星为例，图 3-10 给出了其中一次机动过程中三差观测值的变化情况。由图可知，对于机动卫星 C07 而言，其三差观测值在机动发生前在 0.0 附近波动，而在机动期间其三差观测值则出现显著变化，这是由于卫星机动一期间通常需要对卫星施加加速度，使得卫星速度发生变化，进而引起卫星与测站之间的相对位置变化趋势发生变化。机动期间三差观测值随卫星所受加速度的变化而变化，一般加速过程会持续一段时间，这就使得三差观测值将在短期内持续变大或变小。机动实施完成之后，三差观测值将会缓慢的变化，最后又逐渐稳定并趋于 0.0 附近。作为对比，图 3-11 和图 3-12 分别给出了 C08 和 G07 两颗正常卫星在同一时间段的三差观测值变化情况，由图可知，卫星 C08 和 G02 的三差观测值均在 0.0 附近随机波动。

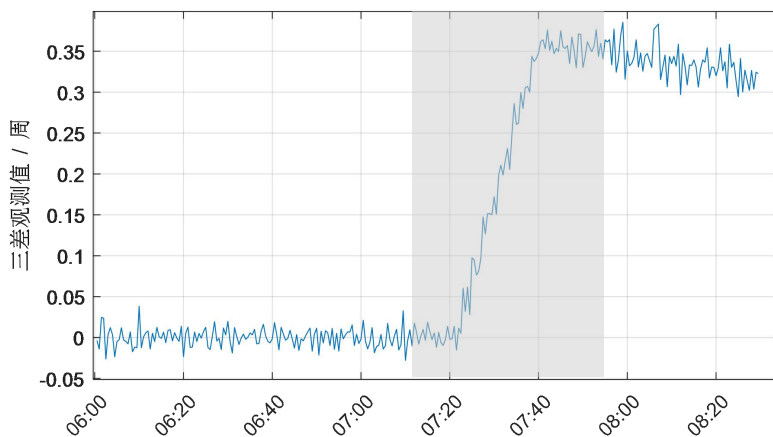


图 3-10 BRST-FFMJ 基线间 C07 三差观测值变化情况

Figure 3-10 Triple-difference observations of C07 along the BRST-FFMJ before and after the orbit maneuver

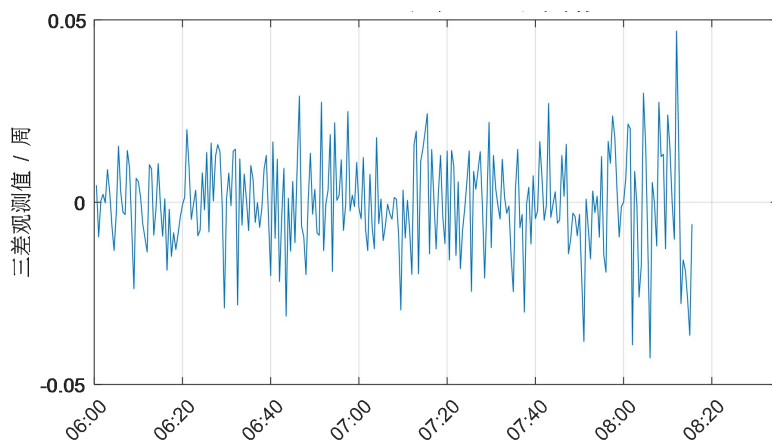


图 3-11 FAA1-THTG 基线间 C08 三差观测值变化情况

Figure 3-11 Triple-difference observations of C08 along the FAA1-THTG before and after the orbit maneuver

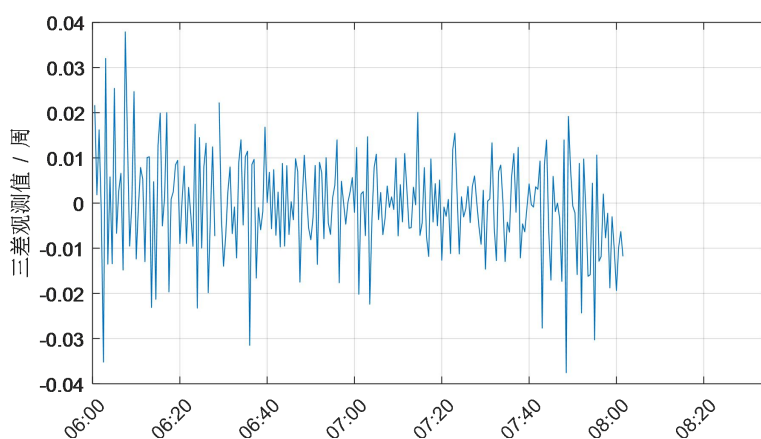


图 3-12 BOR11-MET3 基线间 G07 三差观测值变化情况

Figure 3-12 Triple-difference observations of G07 along the BOR11-MET3 before and after the orbit maneuver

3.2 卫星钟差估计

卫星钟差是 PPP 定位中另一个关键的误差源，Hauschild 和 Montenbruck 指出，与轨道产品相比，卫星钟差的变化更为频繁（原子钟频率漂移、相位跳变等），需要以更高的频率（通常为 1-5 秒）进行更新。本节介绍钟差估计的基本原理和方法，分析实时钟差产品的精度，并讨论姿态模型对钟差估计的影响。

3.2.1 钟差估计原理

3.2.1.1 精密钟差估计

精密钟差估计（Precise Clock Estimation, PCE）主要思路是利用非差伪距与载波观测方程一起联立解算钟差参数，其过程与 PPP 解算非常类似。为提高计算效率，通常采用无电离层组合（IF）观测量。在估计过程中，测站坐标、卫星

轨道和码偏差作为已知量固定，待估未知参数包括卫星/接收机钟差、对流层天顶湿延迟和无电离层组合模糊度。略去推导，其观测方程可表示为^[208-209]：

$$\begin{aligned} L_{3,r}^j &= \rho_r^j + c(dt_r - dt^j) + m_r^j T_r^j + \lambda_3 B_{3,r}^j + \varepsilon(L_{3,r}^j) \\ P_{3,r}^j &= \rho_r^j + c(dt_r - dt^j) + m_r^j T_r^j + \varepsilon(P_{3,r}^j) \end{aligned} \quad (3-20)$$

其中： c 为光速，上标 j 表示卫星，下标 r 表示接收机； $L_{3,r}^j$ 为无电离层组合载波观测量； $P_{3,r}^j$ 为无电离层组合伪距观测量； ρ_r^j 为卫星至接收机几何距离； dt_r 和 dt^j 为接收机及卫星钟差； m_r^j 和 T_r^j 为对流层映射函数及天顶延迟； λ_3 为无电离层组合波长； $B_{3,r}^j$ 为无电离层组合浮点模糊度； $\varepsilon(L_{3,r}^j)$ 为载波观测值残差； $\varepsilon(P_{3,r}^j)$ 为伪距观测值残差。

假设在某一历元同时有 m 个观测站数据，平均每个测站观测到 n 颗星，可以将多个测站的观测方程连立可获得： $m \cdot n \cdot 2$ 个观测方程，假设共有 s 颗卫星此时需要估计的参数包括： $m \cdot n$ 个模糊度， s 个卫星钟差， m 个接收机钟差和 m 个对流层参数。参数估计一般采用 Kalman 滤波，卫星和接收机钟差采用白噪声模式，对流层参数采用随机游走过程，模糊度采用常数估计。

采用非差模式估计精密钟差时，由于接收机钟差和卫星钟差相关性很强，方程本身存在秩亏（Rank Deficiency），需要通过施加基准约束来解决，常用的基准策略包括：选择测站钟差为基准；选择卫星钟差为基准；零均值约束法。虽然全球已经有不少 IGS 地面跟踪站采用了外接的原子钟提供时间基准，这些测站钟差具有较高的稳定性，但是在实时钟差估计时，实时数据中断不可避免，采用单个测站的钟差为基准时一旦测站掉线，那么基准切换时会导致钟差整体跳变。采用单个卫星钟差做基准时同样存在相同的问题，为了保证钟差基准的一致性，本文采用零均值约束法，即要求所有卫星钟差的加权平均为零：

$$\sum_{j=1}^n w^j \cdot dt^j = 0 \quad (3-21)$$

其中， n 为该系统的可见卫星数量， w^j 为权重（通常取等权或按钟差精度加权），零均值约束的优点是基准稳定，不受单颗卫星异常的影响。

3.2.1.2 历元间差分估计

基于非差 PPP 估计卫星钟原理清晰明了，但是存在大量的模糊度参数，计算效率被大大限制。由于这些大量的模糊度参数与钟差结果无关，考虑到实时钟差估计对解算效率的要求，有些学者提出了历元间差分（Epoch-Differenced, ED）钟差估计策略^[210]，该策略通过对相邻历元的观测方程求差，消除模糊度参数和其他缓变参数，从而简化估计模型。对公式（3-20）在历元间作差可获得载波历元间差分的方程如下：

$$\Delta L_{3,r}^j = \Delta dt_r(i) - \Delta dt^j(i) + \Delta m_r^j(i) \cdot T_r(i) + \Delta \varepsilon(L_{3,r}^j) \quad (3-22)$$

其中 $\Delta dt_r(i)$ 和 $\Delta dt^j(i)$ 分别为接收机和卫星历元间钟差变化量。同理对伪距构建历

元差分方程如下：

$$\Delta P_{3,r}^j = dt_r(0) - dt^j(0) + \sum_{p=1}^{i-1} \Delta dt_r(p) - \sum_{p=1}^{i-1} \Delta dt^j(p) + \Delta m_r^j(i) \cdot T_r(i) + \Delta \alpha(P_{3,r}^j) \quad (3-23)$$

其中 $dt_r(0)$ 和 $dt^j(0)$ 分别为接收机和卫星初始钟差。公式 (3-22) 和公式 (3-23) 中待估参数包括： $dt_r(0)$ 、 $dt^j(0)$ 、 $\Delta dt_r(i)$ 、 $\Delta dt^j(i)$ 、 $\Delta dt_r(i)$ 和 T_r^j ，多个测站构建观测方程即可解算上述未知参数，最后获得各卫星当前历元钟差可表示为下式所示：

$$dt^j(p) = dt^j(0) + \sum_{p=1}^{i-1} \Delta dt^j(p) \quad (3-24)$$

历元间差分策略的优点是待估参数仅包括接收机和卫星钟差的变化量，大幅简化了估计模型、计算效率高、不受模糊度参数的影响。但其缺点是只能估计钟差的变化量，需要一个初始钟差值（通常来自伪距单点定位解或广播星历）作为起算值。由于初始值精度有限，且历元差分的误差会随时间累积，长时间运行后钟差的绝对精度会逐渐退化。因而本文在实时钟差估计时实际采用的是非差模式估计的绝对精密钟差产品。

3.2.1.3 钟差的短期预报

在实时应用中，当数据中断或网络延迟导致用户无法及时获得最新的钟差改正数，因而对钟差进行短期预报以维持服务和定位的连续性是必不可少的，钟差短期预报通常采用多项式拟合或线性外推方法^[211]：

$$dt(t) = a_0 + a_1 t + \frac{\beta a_2 t^2}{2} + \sum_{l=0}^k A_l \sin(\omega t + \varphi_l) \quad (3-25)$$

其中， a_0 、 a_1 和 a_2 为多项式系数； β 为选择因子，与卫星钟类型相关，当搭载的为铯钟时 $\beta = 0$ ，搭载的氢/铷钟时 $\beta = 1$ ； A_l 和 φ_l 为根据频谱分析获得的各个卫星钟的周期项系数。

实时钟差预报时，由于预报使用时间不长，采用短期的钟差数据即可，比如 5 min，因而可以忽略周期项，仅采用多项式系数即可。为了提高预报的精度，实际针对上式建模时，估计多项式系数时会将不同时刻的观测量赋予不同的权重，权重可以根据下式计算：

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{如:BDS 氢钟} \\ i\Delta t & \text{如:GPS 铷钟} \\ (i\Delta t)^2 & \text{如:GLO 铯钟} \end{cases} \quad (3-26)$$

其中， Δt 为采样间隔， i 为离当前历元的样本个数。由于原子钟的频率漂移特性，钟差预报精度随预报时间的增长而迅速下降。一般而言，30 s 内的钟差精度可保持在亚纳秒级，但钟差延迟超过 1 min 后精度将显著变化，延迟超过 5 min 后恶化至纳秒级。因此，实时钟差产品的更新频率和延迟控制对于保证 PPP 定位性能至关重要，本文钟差播发间隔为 5 s，实时定位时基本上保证钟差延迟不超过

20 s。

3.2.2 实时钟差结果分析

3.2.2.1 实验设计

实时钟差估计对数据流的实时性要求高，因而采用的测站和精密定轨采用的测站不完全相同。为了保证计算的时效性，实时钟差估计要求测站数据流的延迟不超过 3 s，由于当前 IGS 提供多系统实时数据流的测站有限，本文采用的测站有部分来自商业公司自建的测站。图 3-13 给出了实验所采用的测站分布情况（总共 128 个），几乎所有测站均包含 GREC 四系统观测数据，仅少数个别测站提供的数据不包含北斗观测值（图中红色圆点）。

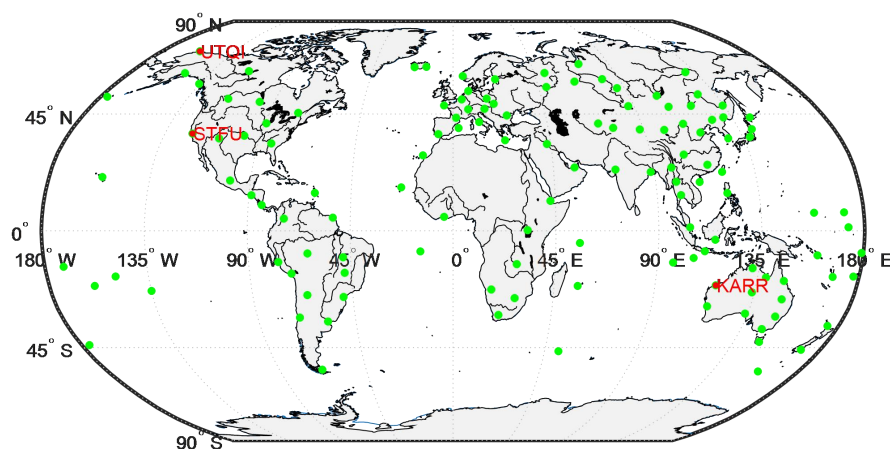


图 3-13 实时钟差估计测站分布

Figure 3-13 Distribution of Stations Used for PCE

实时钟差计算时，由于不可避免存在部分数据流延迟较大的情况，解算无需所有测站数据流数据均正常才开始解算，而是兼顾解算的时效性和产品性能。一方面如果产品的延迟较大那么终端 PPP 解算性能将无疑受到影响；另一方面如果提供实时数据流的测站数较少，那么几何结果差带来的产品精度降低也不可避免。本文在实时钟差计算时延迟等待采用如下原则：

- (1) 延迟 ≤ 1 s，有效测站数据流超过 80%，执行钟差解算；
- (2) 延迟 ≤ 2 s，有效测站数据流超过 90%，执行钟差解算；
- (3) 延迟 ≥ 3 s，无需再等待数据流，直接解算；

除了接收机钟差、卫星钟差和模糊度参数外，其他 GNSS 相关的误差项其处理策略均列于表 3-3 所示，其中对流层、天线相位缠绕等公共误差项处理采用的模型均和定轨过程使用的模型一致。

表 3-3 实时精密钟差估计策略和模型
Table 3-3 Strategies and Models for PCE

误差项	策略/模型
卫星系统	GPS、GLONASS、Galileo、 BDS2 (nonGEO)、BDS3 (nonGEO)
使用频率	GPS/GLONASS: L1 L2 Galileo: E1 E5a BDS2/BDS3: B1 B3
观测模型	IF 无电离层组合
对流层策略	湿延迟+梯度
对流层映射函数	GMF
截止高度角	5°
参考框架及坐标	IGS20 from SINEX
轨道产品	实时超快速轨道预报部分
天线模型	igs20_2335.atx
估计方法	Extended Kalman filter
采样率	5 s

3.2.2.2 实时钟差精度分析

实时钟差产品的精度评估可以通过与事后精密钟差产品的比较来实现^[212]。不过由于每个 IGS 分析中心钟差产品都有各自的基准，因而在比较之前，需要消除不同 AC 之间钟差基准的不一致性。本文平均钟差产品精度时，采用 Kouba 和 Springer 提出的标准方法：对每个历元计算所有公共卫星钟差差值的加权平均，将其作为基准偏差予以扣除^[213]。

同样以 GBM 事后产品为参考，图 3-14 给出了 2025 年 DOY 250 这一天的 GPS 实时钟差产品和事后产品的差异序列图。由图可知，GPS 卫星钟差差异波动整体幅度较小，基本保持在 0.1 m 之内。其次，从图中还可以看出，大部分卫星存在分米级的系统性差异，这种系统性偏差主要由初始钟差差异引起，该差异会被模糊度吸收，因此对用户定位无影响。此外，由于卫星钟差产品吸收了径向上的轨道误差，导致钟差差异在超快速轨道切换时也出现与径向同量级的跳跃。全天的统计结果表明，GPS 卫星钟差差异的 STD 为 0.0750 ns。

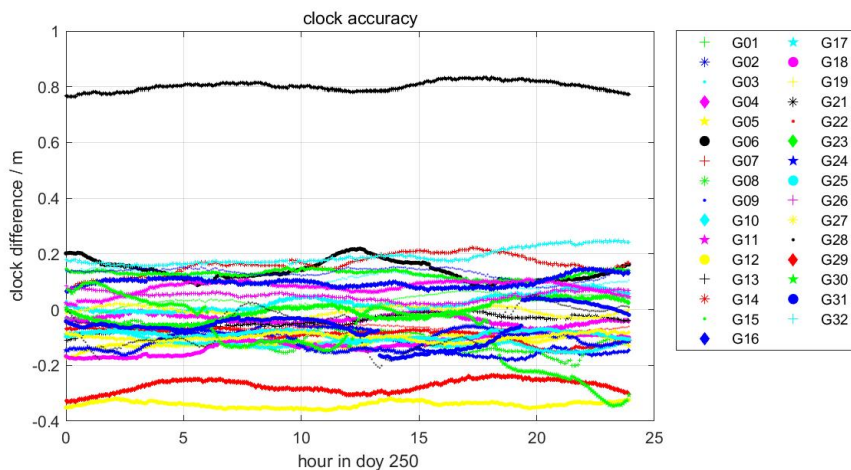


图 3-14 DOY250 天 GPS 精密钟差差异序列图

Figure 3-14 Clock Differences for GPS in DOY 250

图 3-15 给出了 2025 年 DOY 250 这一天的 GLONASS 实时钟差产品和事后产品的差异序列图。由图可知，GLONASS 卫星钟差差异波动整体幅度比 GPS 卫星略大，除 R20 卫星外其他卫星波动基本保持在 0.15 m 之内。R20 卫星波动明显超过其他卫星，这是由于其轨道产品精度较低导致，和图 3-4 中轨道精度结果一致。此外，GLONASS 卫星钟差差异在超快速轨道切换时也表现相同的跳跃现象，其中 R20 卫星由于轨道跳跃比较大，因而钟差的跳跃也更为明显。全天的统计结果表明，GLONASS 卫星钟差差异的 STD 为 0.1463 ns。图 3-16 给出了 Galileo 实时钟差产品和事后产品的差异序列图。由图可知，部分地影期的 Galileo 卫星钟差差异波动整体幅度较大超过了 0.25 m；其他卫星基本保持在 0.15 m 之内，和 GPS 基本相当且略优于 GLONASS 卫星。全天的统计结果表明，Galileo 非地影卫星钟差差异的 STD 为 0.1079 ns。

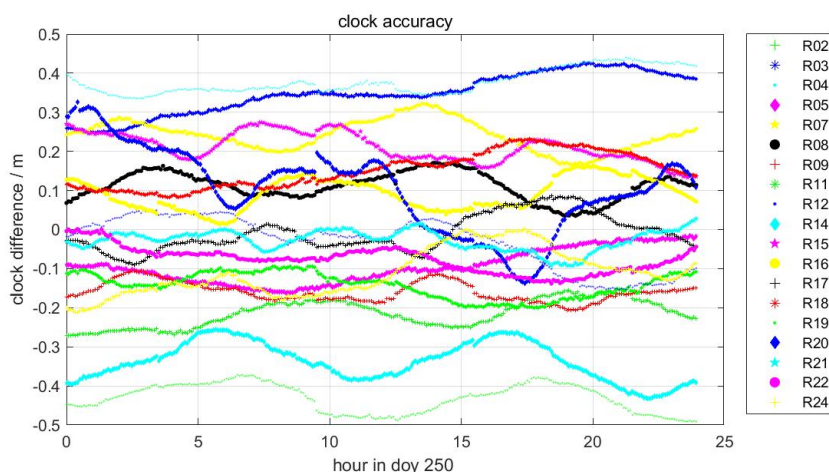


图 3-15 DOY250 天 GLONASS 精密钟差差异序列图

Figure 3-15 Clock Differences for GLONASS in DOY 250

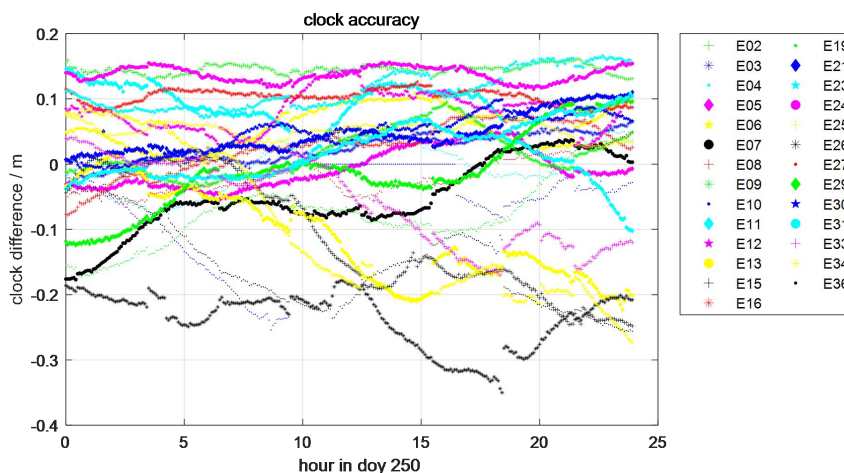


图 3-16 DOY250 天 Galileo 精密钟差差异序列图
Figure 3-16 Clock Differences for Galileo in DOY 250

图 3-17 给出了 BDS2 实时钟差产品和事后产品的差异序列图，由图可知，BDS2 卫星钟差差异波动整体幅度比较大，在所有卫星系统中表现最差，大部分的最大波动均超过 0.25 m。一方面，这是由于 BDS2 卫星轨道产品精度本身较低造成，另一方面也是由于 BDS2 卫星上搭载的原子钟性能较差导致。此外，由于 BDS2 卫星轨道切换时轨道的跳跃更大，因而钟差差异的跳跃现象也更为显著。全天的统计结果表明，BDS2 卫星钟差差异的 STD 为 0.2758 ns。图 3-18 给出了 BDS3 实时钟差产品和事后产品的差异序列图。由图可知，BDS3 卫星钟差差异波动幅度显著优于 BDS2。除去 IGSO 卫星，钟差波动基本保持在 0.10 m 之内，与 GPS 和 Galileo 卫星基本相当。全天的统计结果表明，BDS3-MEO 卫星钟差差异的 STD 为 0.1016 ns；BDS3-IGSO C38 受轨道波动影响其卫星钟差差异的 STD 为超过 0.50 ns，C40 卫星钟差差异的 STD 为 0.2499 ns，和其他 BDS2 卫星处在相同量级。

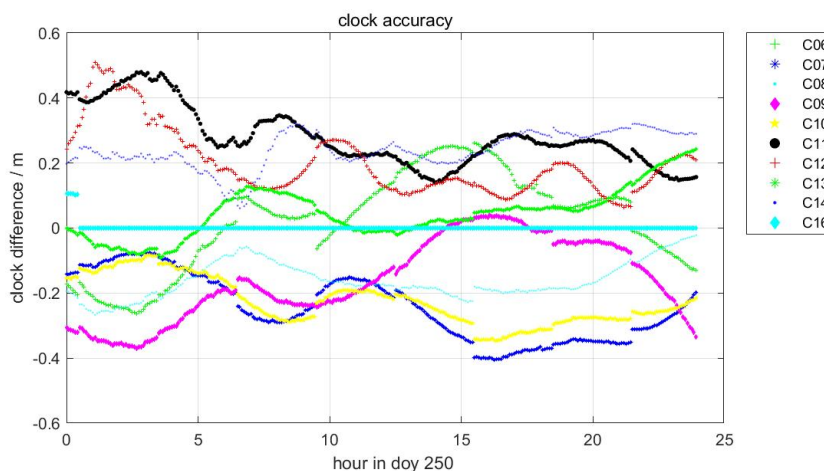


图 3-17 DOY250 天 BDS2 精密钟差差异序列图
Figure 3-17 Clock Differences for BDS2 in DOY 250

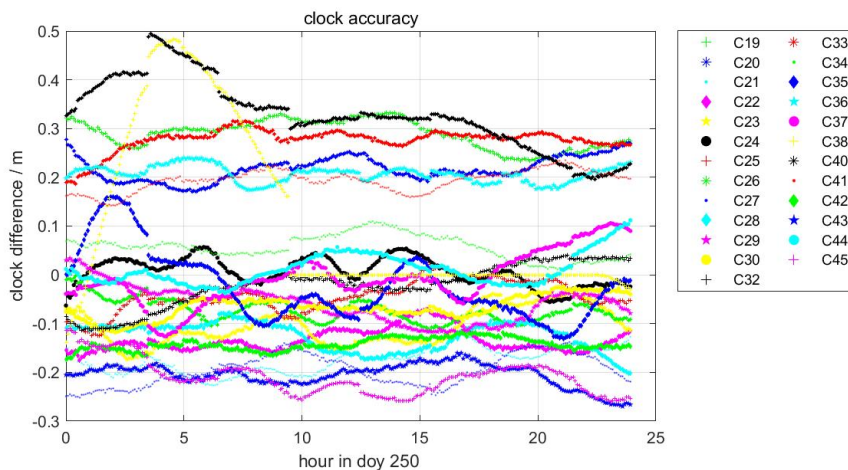


图 3-18 DOY250 天 BDS3 精密钟差差异序列图
Figure 3-18 Clock Differences for BDS3 in DOY 250

3.2.2.3 实时钟差统计精度

同样将用户端实际收到的钟差产品实时存储下来，事后将其与参考钟差产品作差进行分析。图 3-19 给出了 2025 年 9 月份实时钟差产品的精度统计情况，作为参考，轨道和钟差综合误差（即空间信号测距误差 SISRE）也在图中给出。期间产品播发连续稳定运行，未有中断的情况。由图可知，GPS 卫星钟差精度最高，大部分卫星的钟差精度优于 0.08 ns；Galileo 卫星精度紧随其后，大部分卫星的钟差精度优于 0.10 ns；GLONASS 和 BDS3-MEO 卫星的精度相当大部分卫星钟差精度在 0.10-0.15 ns 之间，部分 GLONASS 和 BDS3-MEO 卫星精度超过 0.20 ns。此外，BDS2-IGSO 和 BDS3-IGSO 卫星的钟差精度明显差于其他卫星，基本上大部分卫星的 3D 钟差误差都存在超过 0.20 ns，部分卫星如 C38 因轨道跳跃导致钟差出现多次收敛情况，导致钟差误差甚至达到了 0.50 ns。

图 3-20 给出了不同卫星系统实时钟差产品的精度统计情况。整体而言，GPS 系统的整体统计精度最优，所有卫星钟差和 SISRE 的平均误差分别为 0.0753 / 0.0539 ns；Galileo 卫星钟差也表现出较高的产品精度，所有卫星钟差和 SISRE 的平均误差分别为 0.0924 / 0.0589 ns；其次是 BDS3-MEO 卫星，其卫星钟差和 SISRE 的平均误差分别为 0.1276 / 0.0919 ns；GLONASS 卫星紧随其后基本表现出和 BDS3-MEO 相当的水平，其卫星钟差和 SISRE 的平均误差分别为 0.1354 / 0.1091 ns。BDS2 卫星和 BDS3-IGSO 卫星精度相对较差，其中 BDS2 卫星钟差和 SISRE 的平均误差分别为 0.2969 / 0.2191 ns；BDS3-IGSO 卫星钟差和 SISRE 的平均误差分别为 0.3319 / 0.1056 ns。此外，图 3-20 还表明所有卫星的 SISRE 误差均小于钟差本身，这是由于轨道径向误差和钟差相互抵消，而切向和发现误差对 SISRE 贡献又很小。对于轨道精度较差的卫星（如 C38 等 IGSO 卫星）这个现象更为明显，因为钟差产品估计时将吸收绝大部分轨道的径向综合误差，使得信号测距径

向综合误差更小。

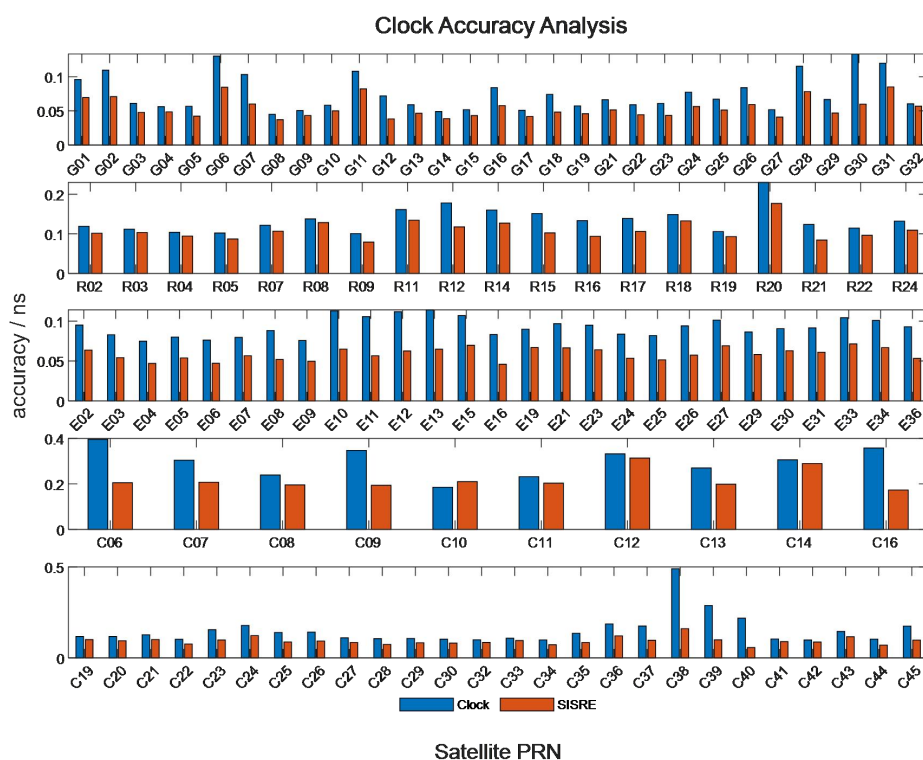


图 3-19 各个卫星实时钟差产品精度统计结果

Figure 3-19 Statistical Results of Clock for each Satellite

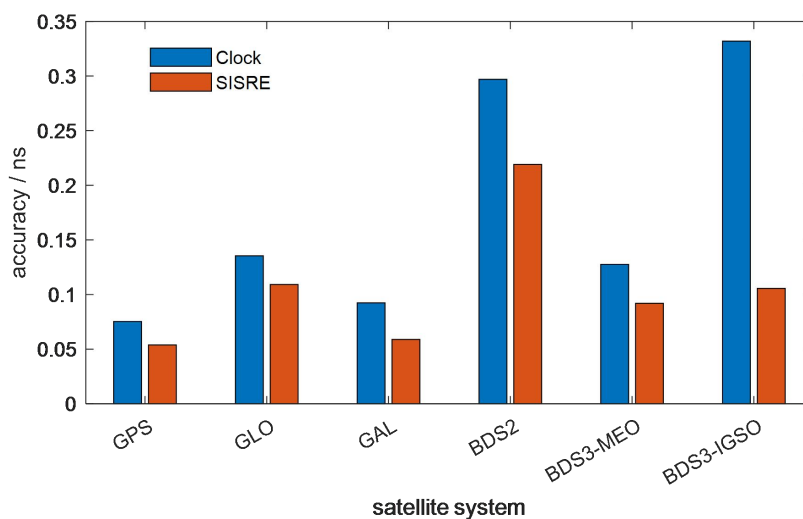


图 3-20 DOY250 天 BDS3 精密钟差差异序列图

Figure 3-20 Clock Differences for BDS3 in DOY 250

3.2.3 轨道跳跃对钟差的影响分析

超快速轨道切换时难免在切换的历元存在跳变，尤其是北斗 IGSO 卫星切换轨道跳变最大可能达到 2-3dm，此时对于钟差估计而言可能会有显著的影响。一

般的，可在轨道切换时对超快速轨道进行平滑处理，保证切换前后的连续性。以2025年11月某天数据为例，图3-21给出了采用轨道平滑与不采用平滑策略估计的实时 BDS2 卫星钟差结果对比。由图可知，采用轨道平滑后，轨道不存在跳跃的情况，同步估计的钟差也变得连续。

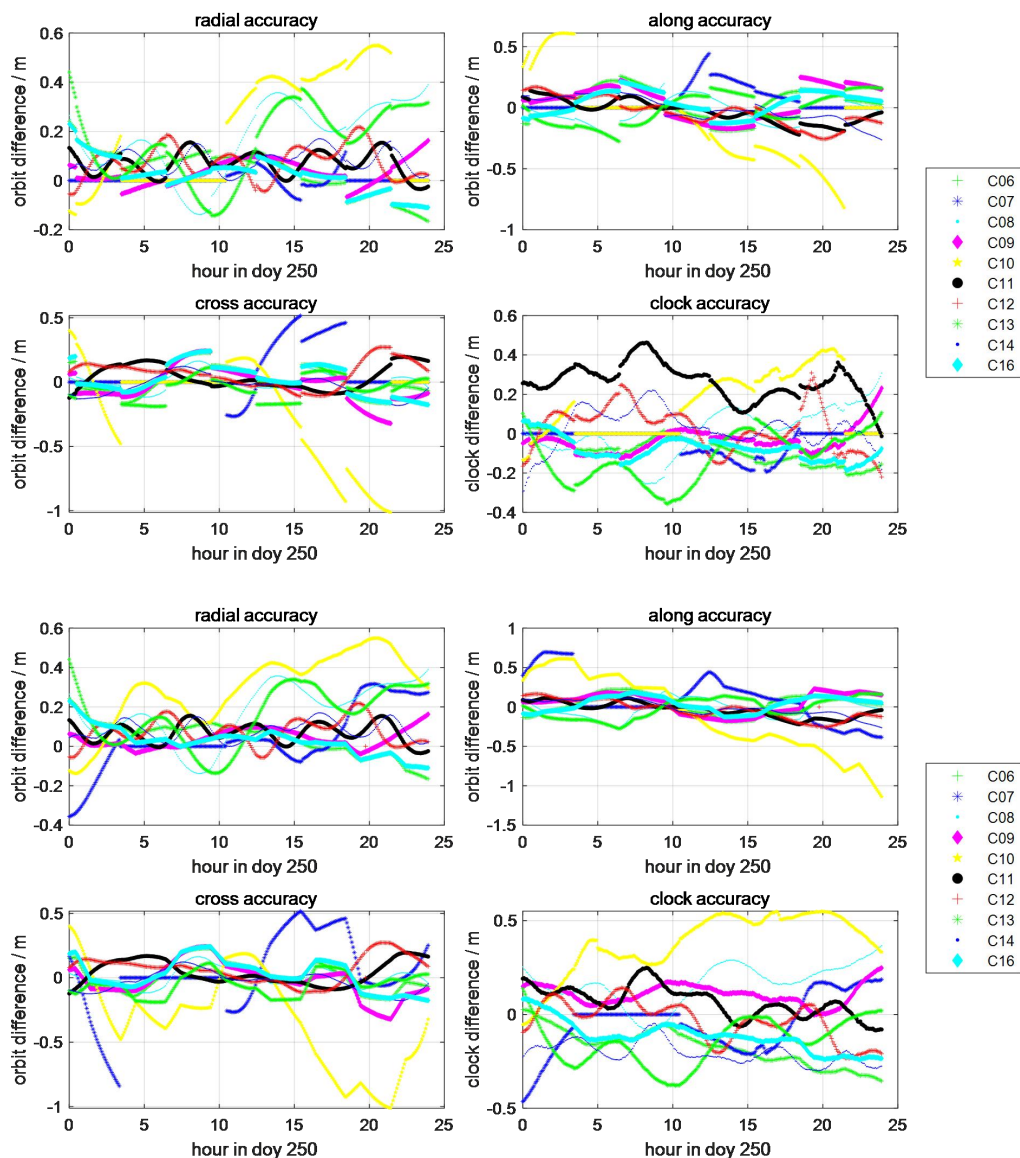


图 3-21 是否使用轨道平滑策略对钟差估计影响分析

Figure 3-21 Clock Differences for BDS2 Between Raw Orbit and Smoothed Orbit

表 3-4 给出了 11 月份采用轨道平滑和不平滑策略估计钟差的精度统计结果。整体而言，平滑轨道的精度基本变化不大，GPS/GLONASS/GAL/BDS3-MEO 系统的结果统计差异均在 0.002 m 之内；BDS2 和 BDS3-IGSO 差异略大，但也均在 0.01 m 之内。然而，从钟差估计结果的统计精度看，基本表现为轻微的提升，所有系统整体提升幅度在 5% 左右。

表 3-4 轨道平滑策略对钟差估计影响统计分析

Table 3-4 Impact of Smooth Strategies on Precise Clock Estimation

轨道策略	系统	R/m	A/m	C/m	Clock/m	SISRE/m
直接切换	GPS	0.018	0.039	0.030	0.028	0.019
	GLONASS	0.029	0.067	0.042	0.054	0.040
	GAL	0.021	0.054	0.035	0.031	0.020
	BDS2	0.124	0.154	0.176	0.098	0.058
	BDS3-MEO	0.046	0.080	0.051	0.051	0.033
	BDS3-IGSO	0.142	0.129	0.139	0.133	0.026
轨道平滑	GPS	0.019	0.040	0.030	0.026	0.016
	GLONASS	0.030	0.069	0.043	0.052	0.036
	GAL	0.022	0.056	0.036	0.031	0.018
	BDS2	0.125	0.151	0.173	0.096	0.053
	BDS3-MEO	0.046	0.080	0.050	0.046	0.028
	BDS3-IGSO	0.143	0.128	0.133	0.125	0.023

3.2.4 姿态模型对钟差的影响分析

GNSS 卫星为了保证服务的连续性和稳定性，必须维持特定的空间指向：以确保导航天线稳定指向地心向服务区提供最优信号；驱动太阳能帆板持续对准太阳，最大化能源收集效率，这一过程是通过卫星姿态控制来实现的。正常情况下，GNSS 卫星采用名义姿态模型，比较常用的是动偏模式（Yaw-Steering, YS），在该模式下卫星本体 Z 轴指向地心，太阳能帆板的旋转 Y 轴则垂直于太阳矢量。然而，在特定轨道几何条件下，尤其是当太阳与卫星轨道面接近平行时，维持名义姿态所需的偏航角速率会趋于无穷大，超出卫星的物理机动能力。这种情况通常发生在卫星轨道“正午”和“午夜”点附近，以及卫星穿越地球阴影的阶段，为了应对这些情况，卫星必须执行特殊的姿态机动以保证天线和太阳能帆板的朝向 [214-215]。姿态机动期间不同卫星系统、不同的卫星类型采用不同的姿态控制模型，比如零偏（Orbit-Normal, ON）模式，连续动偏模式（Continuously YS, CYS）等，这些姿态机动模式都会导致卫星姿态偏离名义状态，图 3-22 给出了卫星姿态控制示意图 [216]。

以 2025 年 11.1 号为例，其间多颗 Galileo 卫星（包括 E02, E16, E21, E23, E25, E27, E30, E31）进入地影，部分 GPS 卫星（包括 G03, G10, G20, G25）进入地影；采用名义姿态和调整的动偏姿态 [217]（Dynamic YS）分别计算了对应卫星的偏航角，图 3-23 给出了部分卫星对应偏航角差异，作为对比 R02 和 C06 非地影卫星偏航角变化也在图中给出。由图可知，在地影姿态调整期间，卫星姿态差异在几度到上百度之间，持续时间通常在数分钟到几十分钟之间。其间如果不考虑真实的姿态变化，卫星的 PCO 改正、天线相位缠绕改正等将带来巨大的误差。

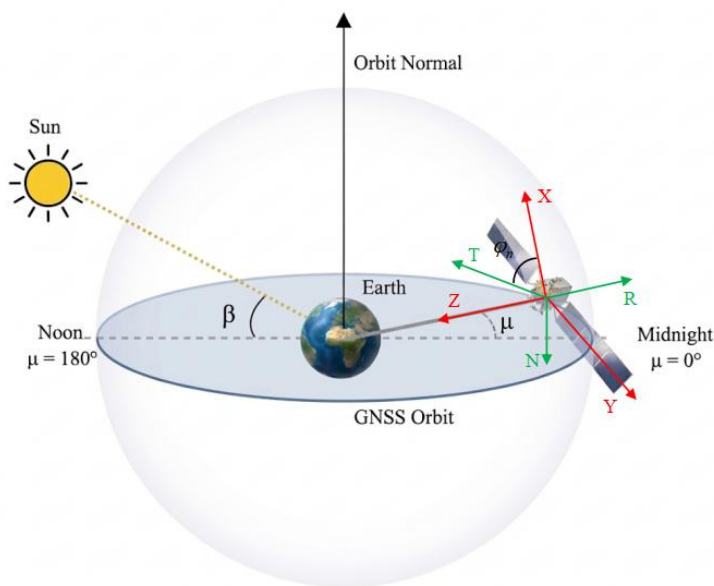


图 3-22 卫星姿态控制示意图及偏航角

Figure 3-22 Yaw-attitude Control of Satellite and yaw angle

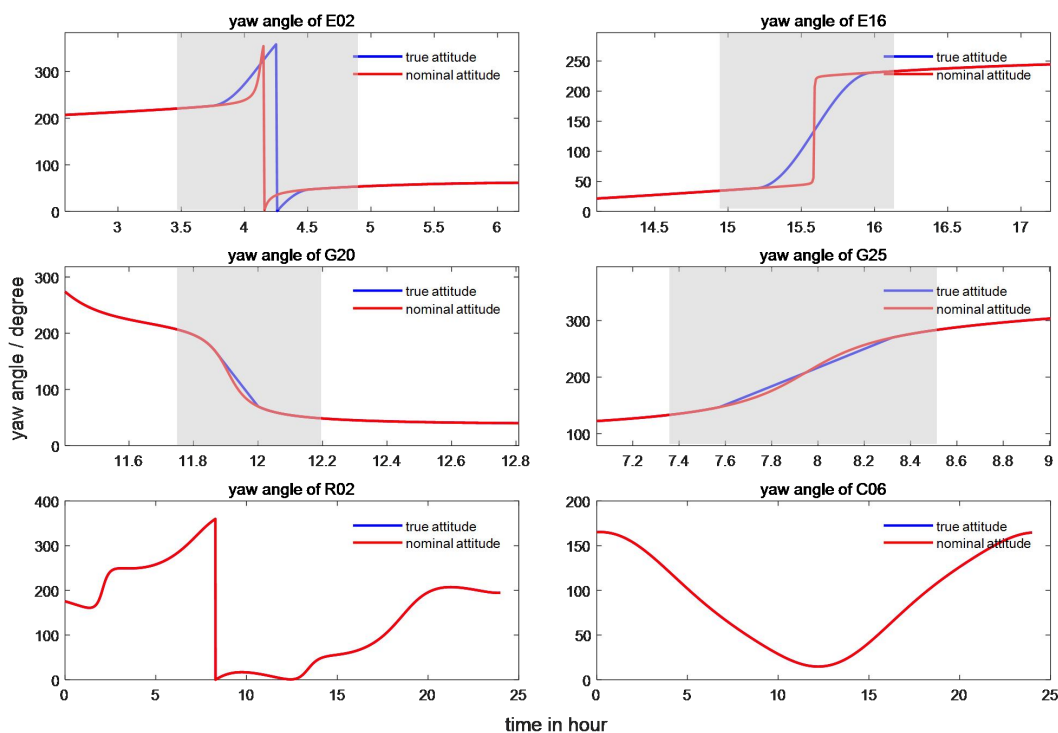


图 3-23 名义姿态和调整的动偏姿态偏航角差异

Figure 3-23 Difference of Yaw Angle between YS mode and Dynamic YS mode

相应的，分别采用名义姿态和调整的动偏姿态分别计算了精密钟差，以 Galileo 卫星为例，图 3-24 给出了对应的钟差结果对比。由图可知，在姿态调整期间假设继续使用名义姿态，那么钟差评估结果会有轻微的跳变，这是由于事后 IGS 参考轨道钟差产品估计时采用的真实姿态；而在采用调整的动偏姿态后重新

估计精密钟差，这些跳变全部消失，同时钟差的波动变得也更小，产品精度得到了提升。

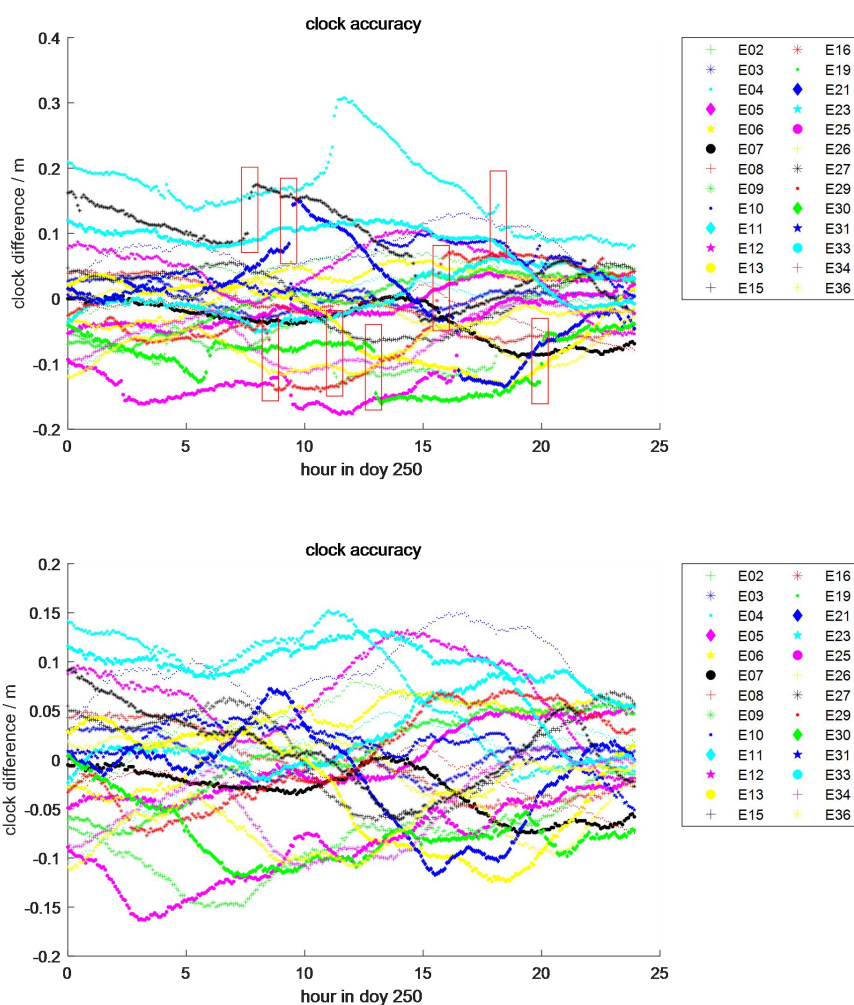


图 3-24 采用名义姿态和调整的动偏姿态钟差估计结果对比

Figure 3-24 Comparison of clock estimates between YS mode and Dynamic YS mode

图 3-25 给出了钟差精度的统计结果对比。由图可知，针对地影卫星，采用调整的动偏姿态后，卫星钟差估计的精度得到显著的提升，不同卫星提升幅度在 20%-40%之间。对于其他非地影卫星，钟差精度基本上保持不变。

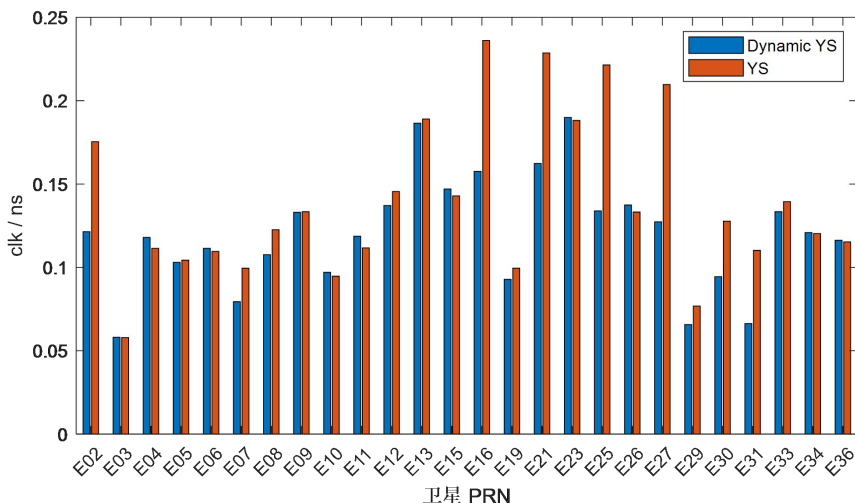


图 3-25 YS 和 ON 模式下卫星钟差估计精度对比图

Figure 3-25 Clock accuracy comparison between YS and ON mode

3.3 多频观测值偏差估计

卫星 UPD 估计原理其主要思想在于分离相位观测值中的整数部分和小数部分。考虑到需要估计多频的 UPD 参数，采用无电离层组合的形式时将会涉及大量的组合方式，尤其对 GALILEO 和 BDS3 来说，拥有 5 种频率时组合形式将有十几种，因而本研究选择采用非差非组合 PPP 模型来估计多频 UPD。

3.3.1 多频相位偏差原理与方法

3.3.1.1 多频相位偏差估计

在 2.2 节中我们已经详细给出了多频多系统的 PPP 函数模型，根据 UDUC PPP 函数模型公式 (2-43)，我们可以获得各个频点原始的模糊度，那么根据这些原始模糊度，即可组建相应的超宽巷/宽巷、窄巷模糊度。假设第一、第二频点分别为 i 和 j ，那么有：

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{wl,r}^s &= \tilde{N}_{i,r}^s - \tilde{N}_{j,r}^s \\ \lambda_{IF} \tilde{N}_{IF,r}^s &= \alpha_{ij} \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^s + \beta_{ij} \lambda_j \tilde{N}_{j,r}^s = \frac{c f_j}{f_i^2 - f_j^2} (\tilde{N}_{i,r}^s - \tilde{N}_{j,r}^s) + \frac{c}{f_i + f_j} \tilde{N}_{i,r}^s \end{aligned} \quad (3-27)$$

式中， $\tilde{N}_{wl,r}^s$ 和 $\tilde{N}_{IF,r}^s$ 为含有接收机和卫星段硬件延迟影响的宽巷和无电离层组合浮点模糊度。假设 $\langle \tilde{N}_{wl,r}^s \rangle$ 和 $\langle \tilde{N}_{i,r}^s \rangle$ 分别为含有超宽巷、宽巷和窄巷硬件延迟整周影响的整周模糊度， $f_{wl,r}$ 和 $f_{nl,r}$ 分别为接收机端宽巷、窄巷 UPD； f_{wl}^s 和 f_{nl}^s 分别为卫星端宽巷、窄巷 UPD，那么公式 (3-27) 可重新表示为：

$$\begin{aligned}\tilde{N}_{wl,r}^s &= \tilde{N}_{i,r}^s - \tilde{N}_{j,r}^s = \langle \tilde{N}_{wl,r}^s \rangle + f_{wl,r} - f_{wl}^s \\ \tilde{N}_{nl,r}^s &= (\alpha_{ij}\lambda_i\tilde{N}_{i,r}^s + \beta_{ij}\lambda_j\tilde{N}_{j,r}^s) / \lambda_{nl} - \frac{f_j}{f_i - f_j} \tilde{N}_{wl,r}^s = \langle \tilde{N}_{nl,r}^s \rangle + f_{nl,r} - f_{nl}^s\end{aligned}\quad (3-28)$$

由于公式(3-28)中卫星和接收机 UPD 强相关,因而在估计宽巷和窄巷 UPD 时,还需要各引入一个基准解决方程秩亏,针对基准方式的选取参考文献^[218]给出了详细的介绍。在 UPD 基准选择上,本研究采用的是零均值约束法,即通过添加一个约束方程,使得系统内所有卫星相位偏差的加权平均值为零,其表达形式和钟差的基准类似:

$$\sum_{j=0}^n w^j \cdot f^j = 0 \quad (3-29)$$

其中, n 为该系统的所有卫星, w^j 为权重(通常取等权或按精度加权),零均值约束的优点是基准稳定,不受单颗卫星异常的影响。需要指出的是,由于 UPD 估计是区分系统,区分组合类型单独估计,因而在引入约束时,需要每个系统每个频点组合单独添加约束方程。假设有 N 个测站,每个测站可跟踪到 M 颗卫星,总卫星数为 N_s ,那么总共有 $M*N$ 个观测值;未知数个数为测站和卫星数之和: N_s+N ;那只要满足 $M*N > N_s+N$ 即可以通过最小二乘或者 kalman 滤波估计实时的卫星和接收机相位小数偏差。

UPD 的估计过程首先采用公式(3-28)的第一行,组建宽巷 UPD 的方程组,然后结合约束方程公式(3-29)实时估计获得卫星和接收机的相位小数偏差 f_{wl}^s 和 $f_{wl,r}$ 。在获得宽巷小数偏差后,可以恢复对应的窄巷浮点模糊度:

$$\begin{aligned}\tilde{N}_{nl,r}^s &= (\alpha_{ij}\lambda_i\tilde{N}_{i,r}^s + \beta_{ij}\lambda_j\tilde{N}_{j,r}^s) / \lambda_{nl} - \frac{f_j}{f_i - f_j} \tilde{N}_{wl,r}^s \\ &= (\alpha_{ij}\lambda_i\tilde{N}_{i,r}^s + \beta_{ij}\lambda_j\tilde{N}_{j,r}^s) / \lambda_{nl} - \frac{f_j}{f_i - f_j} \text{ROUND}(\tilde{N}_{wl,r}^s - f_{wl,r} + f_{wl}^s) \\ &= \langle \tilde{N}_{nl,r}^s \rangle + f_{nl,r} - f_{nl}^s\end{aligned}\quad (3-30)$$

类似的,同样采用最小二乘或者 kalman 滤波结合约束方程(3-29)即可估计实时的窄巷相位小数偏差 $f_{nl,r}$ 和 f_{nl}^s 。

针对多频观测值,只要采用非差非组合公式(2-41)同步估计了对应频点的浮点模糊度,那么即可构建对应频点与第一频点的宽巷或者超宽巷模糊度。假设第 k 频点模糊度为 $\tilde{N}_{k,r}^s$,那么有:

$$\tilde{N}_{ewl(i,k),r}^s = \tilde{N}_{i,r}^s - \tilde{N}_{k,r}^s = \langle \tilde{N}_{ewl,r}^s \rangle + f_{ewl,r} - f_{ewl}^s \quad (3-31)$$

类似的,采用最小二乘或者 kalman 滤波结合约束方程公式(3-29)即可估计实时的超宽巷相位小数偏差 $f_{ewl,r}$ 和 f_{ewl}^s 。可以看出,采用非差非组合估计多频的相位小数偏差过程十分简单,且和估计宽巷相位小数偏差的过程一模一样。数据处理过程中,无论有多少个频点参与计算,只需要将对应第 k 频点的原始模糊度和第一频点组超宽巷模糊度后,重复宽巷小数偏差估计过程即可以实现依次循环处

理剩余所有频点。

3.3.1.2 原始相位偏差恢复

实时估计超宽巷、宽巷和窄巷模糊度的做法虽然简便，但是如果直接播发给用户，则用户需要采用相同的超宽巷、宽巷和窄巷组合才能实现模糊度固定，这显然给用户使用造成了一定的麻烦。一方面，用户端使用的频点可以不尽相同，不少用户观测数据可能频点不全，无法组建相同的组合模糊度；另一方面，不少终端算法可能并未采用宽巷-窄巷模式的模糊度固定方案，这一类用户需要去适配对应的算法才能实现模糊度的快速固定。

为了更好地方便用户的使用，实际上播发非差原始的相位偏差会更加通用。假设实时估计获得的宽巷和窄巷小时偏差分别为 f_{wl}^s 和 f_{nl}^s ，那么有^[219-220]：

$$\begin{aligned} b_1^j &= f_{nl}^j - \frac{f_2}{f_1 - f_2} f_{wl}^j \\ b_2^j &= f_{nl}^j - \frac{f_1}{f_1 - f_2} U_{wl}^j \end{aligned} \quad (3-32)$$

针对多频观测值，同样在获得超宽巷小数偏差后 f_{ewl}^s ，对应第 k 频点的原始相位小数偏差可以表示为：

$$b_k^j = f_{ewl}^j - b_1^j \quad (3-33)$$

在 2.2.1.1 节我们已经介绍了对应的伪距偏差如何恢复到各个频点，再结合恢复后的相位小数偏差，即可实现伪距和相位原始 OSB 形式产品的播发。终端用户在接收到对应的 OSB 产品，可以直接改正到观测量上实现模糊度固定，也可以在模糊度固定阶段改正实现宽窄巷模糊度固定。

3.3.2 多频相位偏差估计结果分析

3.3.2.1 实验设计

为了保证计算的时效性，实时 UPD 的对测站数据流的延迟和钟差类似，均要求数据流延迟不超过 3 s，测站选择标准和钟差估计采用的测站基本相同。由于 UPD 估计时计算效率较高，因而可以适当多使用一些跟踪站数据，图 3-26 给出了实验所采用的测站分布情况（总共 147 个），几乎所有测站均包含 GREC 四系统观测数据，仅少数测站提供的数据不包含北斗观测值（蓝色圆点）。

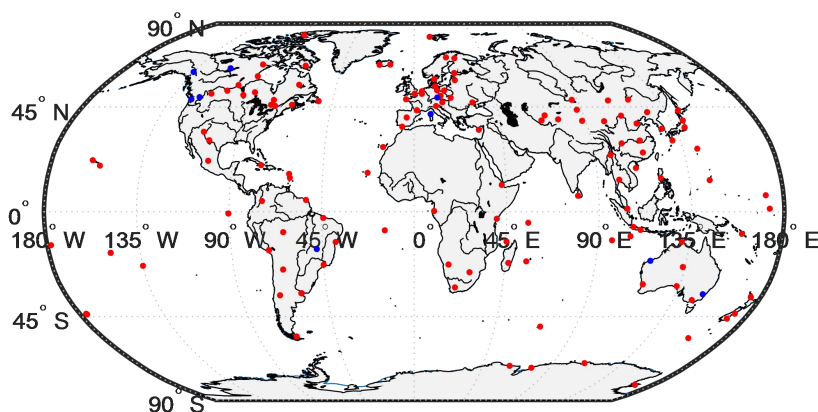


图 3-26 实时 UPD 估计测站分布

Figure 3-26 Distribution of Stations Used for UPD

实时 UPD 估计时，为了兼顾解算的时效性和产品性能，其延迟等待过程和钟差采用一致的原则。为了保证产品间的一致性，对流层、天线相位缠绕等公共误差项处理采用的模型均和定轨、钟差估计使用的模型一致，其余策略均列于表 3-5。

表 3-5 实时 UPD 估计策略和模型

Table 3-5 Strategies and Models for UPD

误差项	策略/模型
卫星系统	GPS、GLONASS、Galileo、BDS2 (nonGEO)、 BDS3 (nonGEO)
	GPS:L1 L2 L5
	GLONASS:L1 L2
使用频率	Galileo: E1 E5a E5b
	BDS2: B1I B3I B2I
	BDS2/BDS3: B1I B3I B2a B1c
观测模型	UDUC 非差非组合 PPP 模型
对流层策略	湿延迟+梯度
对流层映射函数	GMF
截止高度角	5°
参考框架及坐标	IGS20 from SINEX
轨道产品	实时超快速轨道预报部分
天线模型	igs20_2335.atx
估计方法	Extended Kalman filter
采样率	5 s

3.3.2.2 相位稳定性分析

UPD 产品的稳定性是衡量其质量的重要指标，稳定的 UPD 产品意味着用户端可以使用较长时间间隔的 UPD 改正而不显著影响模糊度固定性能。由于超宽

巷和宽巷 UPD 不受轨道和钟差误差影响,且卫星超宽巷和宽巷 UPD 本身具有高稳定性,因而可以通过直接分析其稳定性以评估产品精度。

图 3-27 展示了年积日 250 到 270 三周时间内 GPS 超宽巷和宽巷 UPD 的时间序列。由于本文估计的 UPD 均为实时 5 s 滤波估计,因而图中给出的是单天内的均值。图中,上面子图为第一频率与第三频率之间的超宽巷 UPD,即 L1-L5 相位延迟偏差;下面子图为第一频率与第二频率之间的宽巷 UPD,即 L1-L2 相位延迟偏差。整体而言,GPS 卫星的超宽巷和宽巷 UPD 日间稳定性极好,L1-L5 超宽巷多天的变化 STD 为 0.0344 周,L1-L2 宽巷多天的变化 STD 为 0.0232 周。周稳定性。超宽巷 L1-L5 的稳定性略差于 L1-L2 可能是由于 L5 频点存在 IFCB 误差未改正彻底。此外,部分卫星在相邻日期间偶尔会出现约 0.2 周的跳变,这主要是由于采用的事后卫星差分码偏差 DCB 产品在这些天之间存在细微跳变所致。

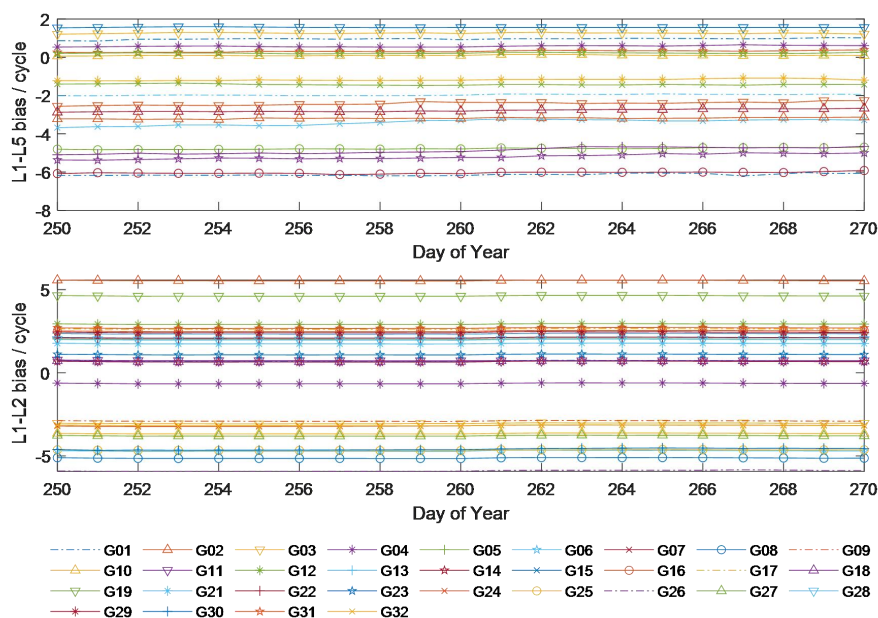


图 3-27 GPS 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图

Figure 3-27 EWL and WL UPDs for GPS satellites from DOY 250 to DOY 270

图 3-28 展示了 Galileo 对应时段的超宽巷和宽巷 UPD 的时间序列。整体而言,Galileo 卫星的超宽巷和宽巷 UPD 日间稳定性和 GPS 相当,具体而言 E1-E5b 的多天的 STD 为 0.0488 周,E1-E5a 多天的 STD 为 0.0331 周。E1-E5b 超宽巷稳定性略微差于 E1-E5a,这是由于部分测站只提供 E5a 观测值,导致 E5b 整体的观测量数量略少导致的。

图 3-29 展示了 BDS2 对应时段的超宽巷和宽巷 UPD 的时间序列。整体而言,BDS2 卫星的超宽巷和宽巷 UPD 日间稳定性存在细微的波动,其稳定性显著低于 GPS 和 Galileo 卫星。具体而言,B1I-B2I 多天的 STD 为 0.0787 周,B1I-B3I 多天的 STD 为 0.0858 周。BDS2 宽巷/超宽巷稳定性较差,一方面是由于 BDS2

轨道钟差产品的精度较低，导致提取的浮点模糊度精度不高；另一方面是观测 BDS2 观测量精度也明显低于其他卫星。

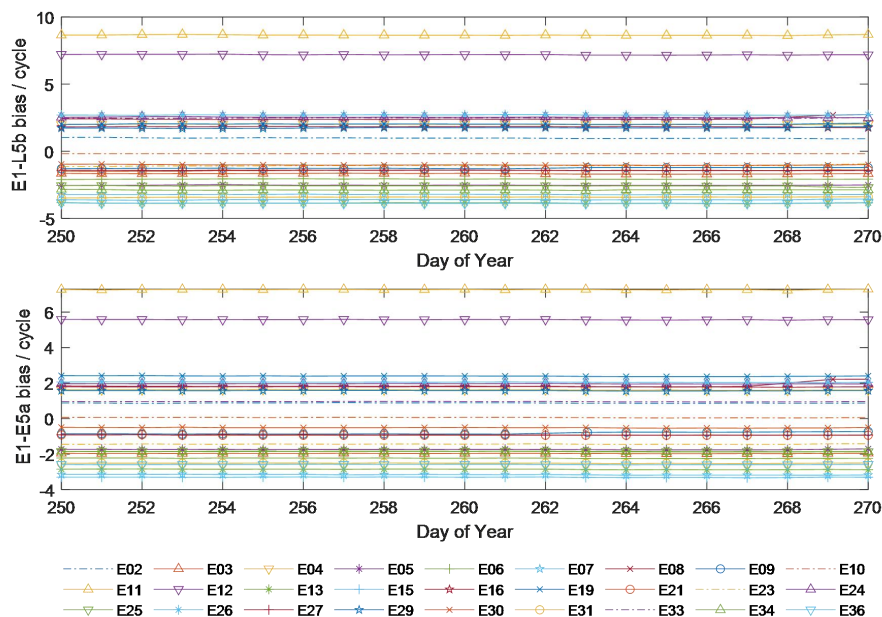


图 3-28 Galileo 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图

Figure 3-28 EWL and WL UPDs for Galileo satellites from DOY 250 to DOY270

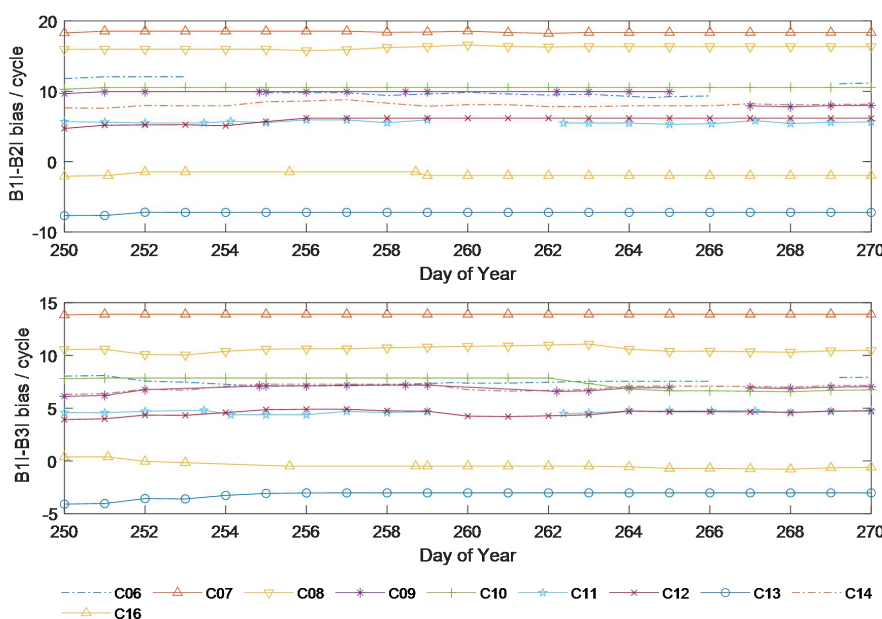


图 3-29 BDS2 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图

Figure 3-29 EWL and WL UPDs for BDS2 satellites from DOY 250 to DOY 270

图 3-30 展示了 BDS3 对应时段的超宽巷和宽巷 UPD 的时间序列。图中，上面子图为第一频率与第四频率之间的 B1I-B1c 超宽巷 UPD，整体表现非常稳定，其多天的 STD 为 0.0132 周；中间子图为第一频率与第三频率之间的 B1I-B2a 超宽巷 UPD，多天的 STD 为 0.0501 周；下面子图为第一频率与第二频率之间的

B1I-B3I 宽巷 UPD，多天的 STD 为 0.0482 周。整体而言，由于 B1I-B1c 超宽巷模糊度波长为 20.93 m，因而其稳定性最好，B1I-B2a 和 B1I-B3I 两者均属于宽巷波长，因而其稳定性相当。

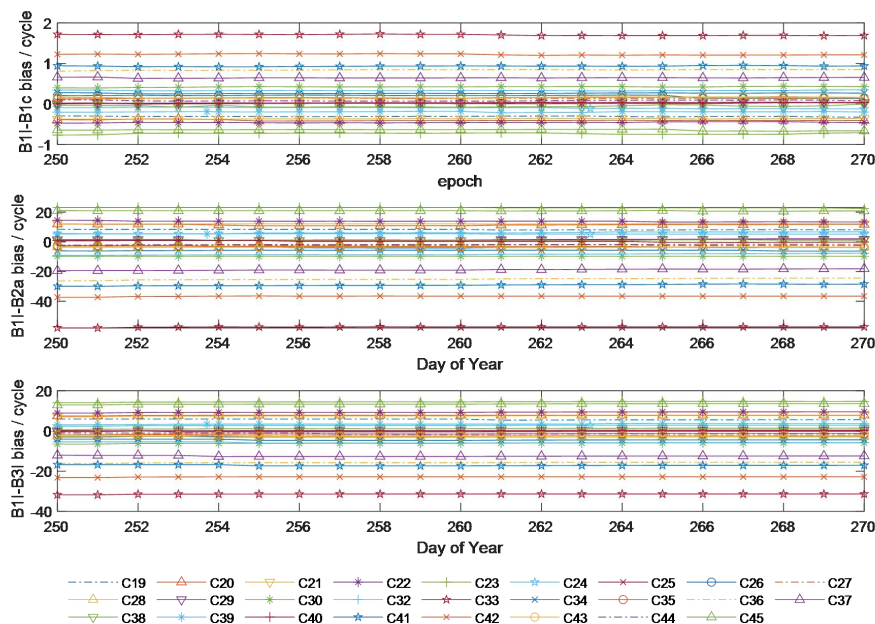


图 3-30 BDS3 不同卫星超宽巷/宽巷 UPD 多天波动序列图

Figure 3-30 EWL and WL UPDs for BDS3 satellites from DOY 250 to DOY270

3.3.2.3 模糊度整数特性分析

模糊度的整数特性是 UPD 产品质量最有效的检验手段，用户在收到服务端播发的产品后，将其用于 PPP 解算，获得的浮点模糊度在改正 UPD 产品后应该具备整数特性，换言之，改正 UPD 产品后浮点模糊度小数部分概率分布情况可以用来评价产品的精度和使用效果。

图 3-31 展示了 GPS 卫星不同模糊度组合（包括超宽巷、宽巷和窄巷）小数部分的概率分布。如图所示，GPS 卫星 L1-L5 超宽巷组合与 L1-L2 宽巷组合表现相似，约有 97%~98.0%的模糊度小数部分在 0.25 周以内，92%~94.0%在 0.15 周以内。窄巷组合的表现略有下降，约有 90.5%的小数部分在 0.15 周以内。图 3-32 给出了 Galileo 卫星的小数部分的概率分布，Galileo 卫星超宽巷和宽巷小数部分在 0.15 周以内的比例比 GPS 高出约 2-3%，而窄巷的比例则与 GPS 相当。图 3-33 和图 3-34 表明 BDS2（84.62%）和 BDS3（85.89%）卫星的窄巷 UPD 在 0.15 周以内的整数特性显著下降，这可能归因于北斗卫星轨道和钟差产品精度的降低。需要指出的是，B1-B1c 模糊度组合的小数部分表现最佳，在 0.15 周以内的比例高达约 98.47%，这得益于其 20.93 米的超长波长；而 B1-B2a 宽巷组合的小数部分在 0.15 周以内的比例为 89.66%，略低于其他宽巷组合，这是由于约 8%的测站未提供 B2a 观测数据导致观测数据量变少。

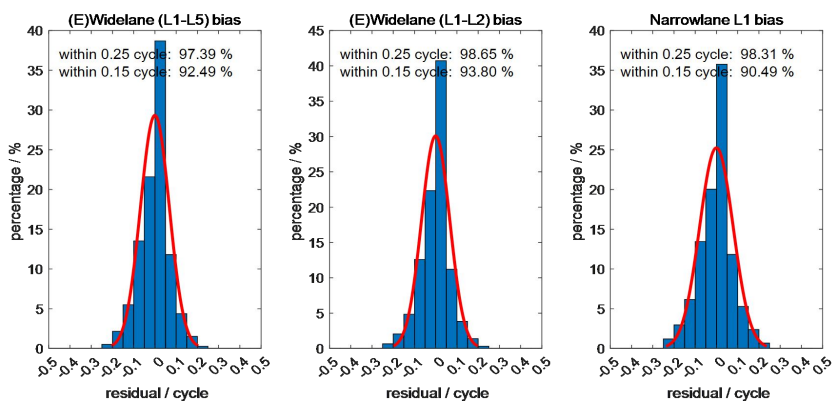


图 3-31 GPS (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图

Figure 3-31 Distributions of fraction part of (extra-) wide-lane/narrow-lane ambiguity for GPS

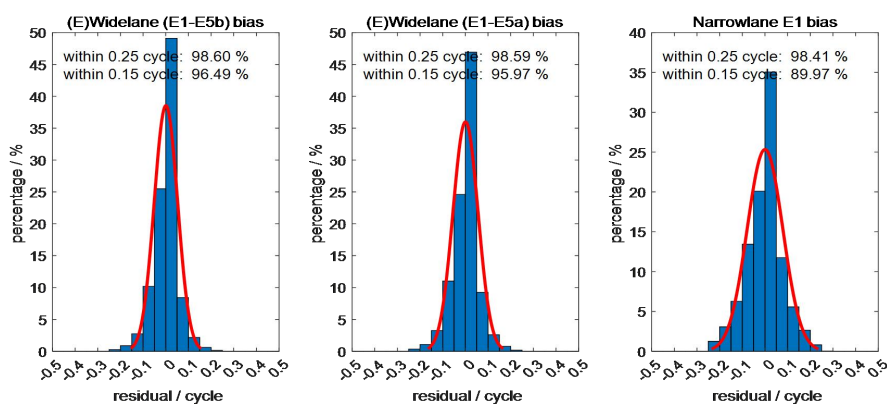


图 3-32 Galileo (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图

Figure 3-32 Distributions of fraction part of (extra-) wide-lane/narrow-lane ambiguity for Galileo

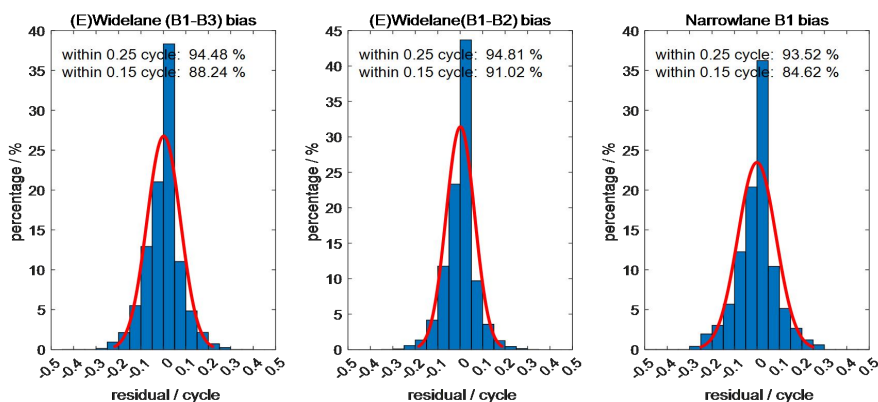


图 3-33 BDS2 (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图

Figure 3-33 Distributions of fraction part of (extra-) wide-lane/narrow-lane ambiguity for BDS2

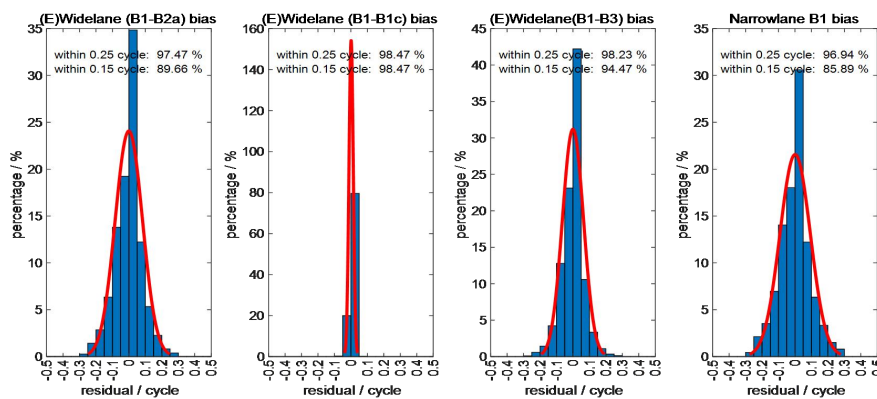


图 3-34 BDS3 (超) 宽巷/宽巷浮点模糊度小数部分概率分布图

Figure 3-34 Distributions of fraction part of (extra-) wide-lane/narrow-lane ambiguity for BDS3

3.3.2.4 原始 OSB 稳定性分析

实际播发过程使用的是各个原始频点的相位偏差，图 3-35~图 3-38 分别给出了 GPS/Galileo/BDS2/BDS3 系统各个卫星在 DOY 250 天第一频点的相位偏差序列图。由图可知，GPS 卫星基本单天内最大波动均在 ± 0.5 周，和宽巷或超宽巷 UPD 相比，波动幅度明显更大。这主要是由于原始频点的相位偏差不但包含各个卫星的相位偏差本身，还吸收了轨道钟差产品的残余误差项，导致原始频点或者窄巷 UPD 均会存在各位显著的波动，由于终端使用的轨道钟差产品包含相同的误差，因而该残余误差不会直接影响 PPP 定位。

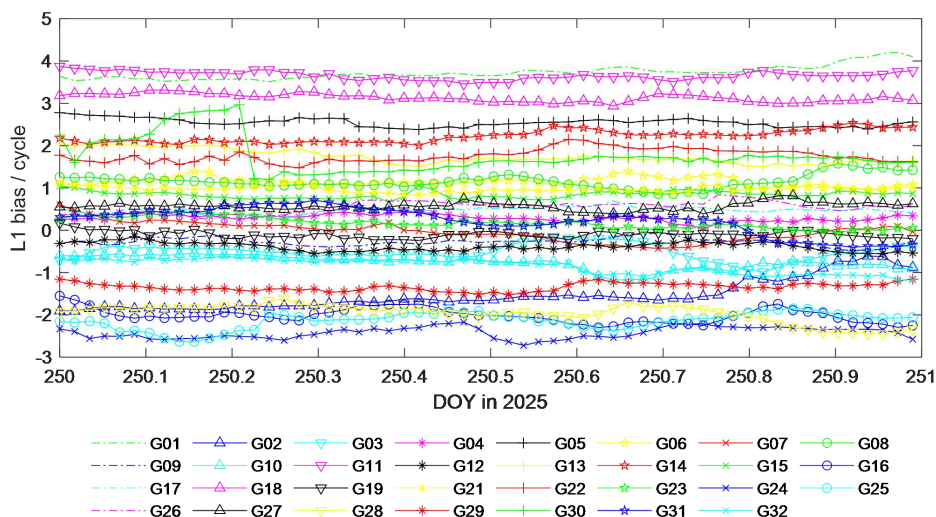


图 3-35 GPS 卫星 L1 频点相位偏差序列图

Figure 3-35 Variations of OSB for GPS satellite at first frequency

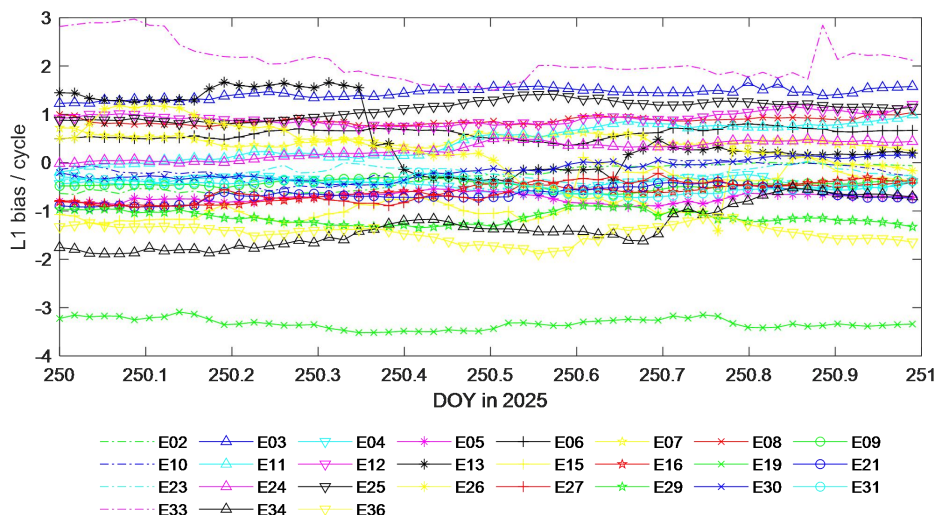


图 3-36 Galileo 卫星 E1 频点相位偏差序列图

Figure 3-36 Variations of OSB for Galileo satellite at first frequency

Galileo 和 BDS3 系统各卫星的相位偏差波动程度和 GPS 相当，但存在个别卫星相位偏差跳跃现象，比如 E13/C29 卫星，跳跃幅度接近整周数。这主要是由于长期实时滤波估计时，当相位偏差估计值接近播发协议最大可以播发的数值后，为了防止产品数值超限无法播发对其进行的整周扣除操作。此外，图 3-37 还可以看出，C11 和 C12 卫星相位偏差存在明显的中断，主要是 C11 和 C12 为 BDS2-MEO 卫星，当前运行到西半球后能同一个站同步观测到的 BDS2 较少，造成无法计算测站的相位偏差，最终导致这几颗卫星观测数据不足难以估计实时相位偏差。

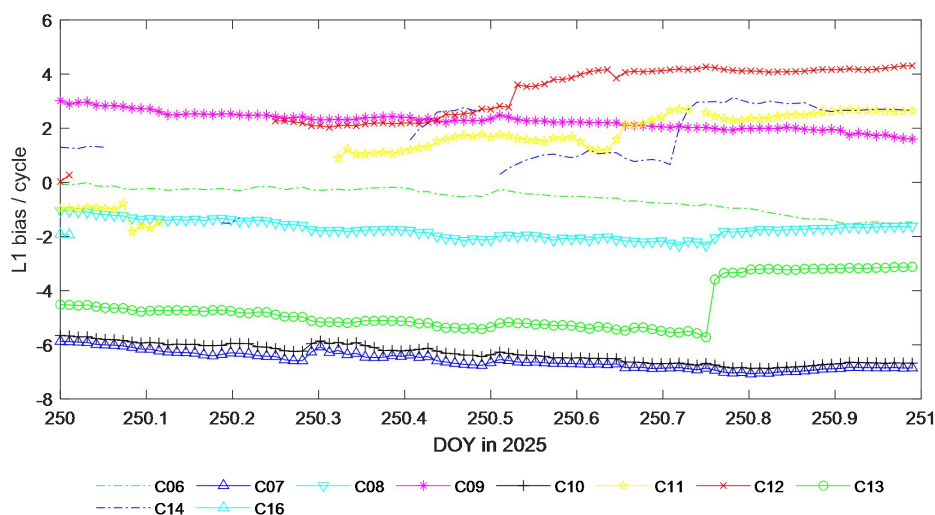


图 3-37 BDS2 卫星 B11 频点相位偏差序列图

Figure 3-37 Variations of OSB for BDS2 satellite at first frequency

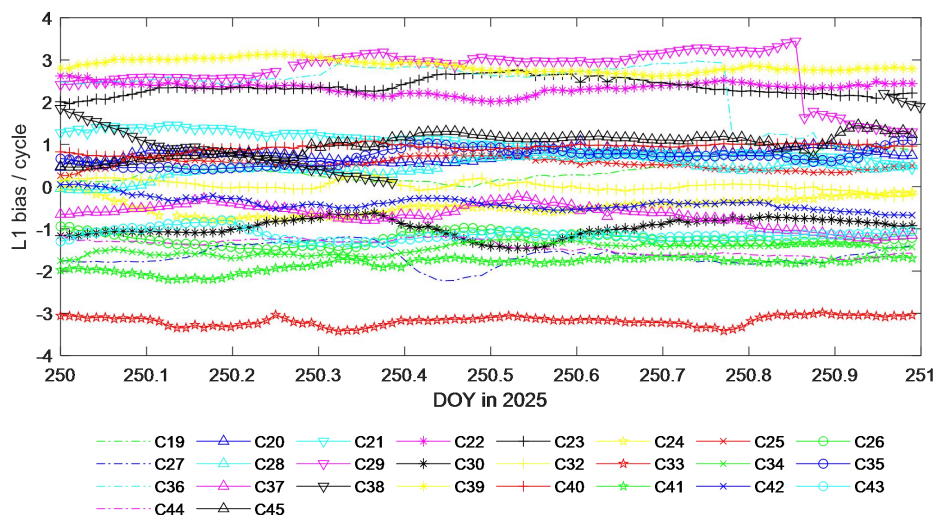


图 3-38 BDS3 卫星 B1I 频点相位偏差序列图

Figure 3-38 Variations of OSB for BDS3 satellite at first frequency

3.3.3 其他偏差估计

3.3.3.1 IFCB 估计与处理策略

不同系统第三/四/五频点 IFCB 幅度差异不同，在估计多频 UPD 参数时如果考虑 IFCB 的影响，那么宽巷 UPD 的稳定性可能被破坏，图 3-39 给出了不同系统 IFCB 实时估计结果。由图可知，GPS-IIF 卫星（包括：G03/G06/G08/G09/G10/G24/G25/G26/G27/G30/G32）的 IFCB 存在明显周期的波动，且其量级较大，最大可以达到分米。虽然 GPS-IIIA 卫星（包括：G01/G04/G11/G14/G18/G21/G23/G28）第三频点也存在 IFCB，但其量级明显小于 GPS-IIF 卫星，整体量级在 mm 到 cm 左右。其次，Galileo 各个卫星第三频点 IFCB 基本表现相同的量级，在 mm 到 cm 左右。BDS2 和 BDS3 卫星第三频点 IFCB 表现出和 Galileo 类型的特性。此外，由图还可以看出，由于采用的是历元间消几何和电离层组合的方式实时估计的 IFCB，因而存在误差累积的现象，在一天之内能够明显看到 IFCB 估计值显著的发散现象。

为了分析 IFCB 后 UPD 产品估计的影响，本节分别给出了两种 UPD 产品的对比：（1）EWL UPD with IFCB Corrected，该方案在估计 UPD 之前，先实时估计 IFCB，并将其估计结果作为已知值代入 PPP 函数模型公式 (2-41) 加以改正，然后再进行正常的 UPD 产品估计；（2）EWL UPD without IFCB Corrected，该方案不再估计实时 IFCB，而是将其和任意第三频点的模糊度合并当作一个参数估计，由于模糊度中包含了 IFCB 参数，因为模糊度估计时并非当作常量来估计而是采用随机游走的方式估计任意第三频点的模糊度。

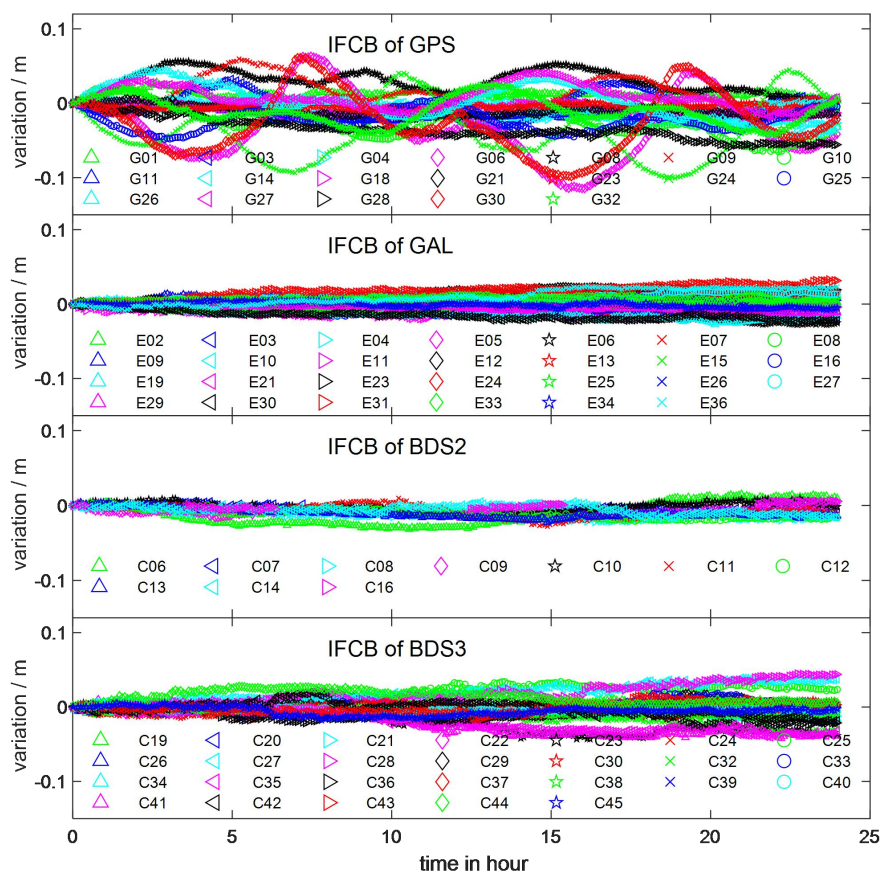


图 3-39 GPS/GAL/BDS2/BDS3 系统第三频点 IFCB 变化序列图

Figure 3-39 IFCB variation for third-frequency of GPS, GAL BDS2 and BDS3 system

图3-40给出了两种方案获得的GPS卫星的EWL UPD对比情况。由图可知，采用方案（1）获得EWL UPD表现得更为稳定（上子图），EWL在一天内的波动幅度最大不超过0.1周，而采用方案（2）获得EWL UPD表现出和IFCB相似的周期性变化（中子图），其变化幅度也和IFCB接近。作为对比，本文还给出了第三种方案获得的UPD，即将方案（1）获得UPD产品和IFCB产品叠加获得综合EWL UPD with IFCB Corrected + IFCB Correction，其变化情况也在图中给出（下子图）。由图对比可知，方案（3）和方案（2）给出的UPD变化序列图几乎完全吻合，最大的差异不超过0.05周。

图3-41和图3-42分别给出了Galileo和BDS卫星的不同策略获得的EWL UPD对比情况。由图可知，由于Galileo和BDS卫星本身IFCB较小，因而两种方案获得的UPD都比较平稳。此外，第三种方案恢复的UPD和方案（2）给出的UPD变化序列图也几乎完全吻合，最大的差异不超过0.05周，这和GPS呈现的结论一致。

综上所述，提前估计IFCB并在PPP方程中作为已知产品进行改正，获得的超宽巷UPD不受IFCB影响，表现为日间波动非常平稳；将IFCB和模糊度当作一个参数统一估计时，虽然超宽巷UPD估值呈现周期性的波动，但服务端无需要再播发额外的产品，对用户而言使用更为简单，且产品的使用效果完全等价。因而，

考虑到用户的使用方便以及播发数据量，本文更倾向采用方案(2)进行多频UPD估计。

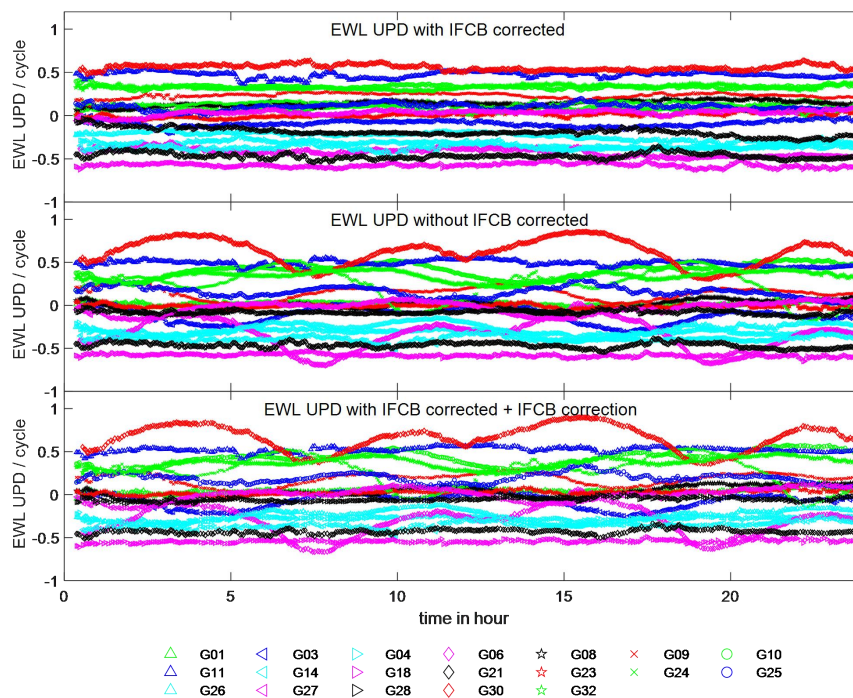


图 3-40 GPS 不同策略计算 EWL UPD 结果对比

Figure 3-40 EWL UPD Comparison from Different Strategies for GPS

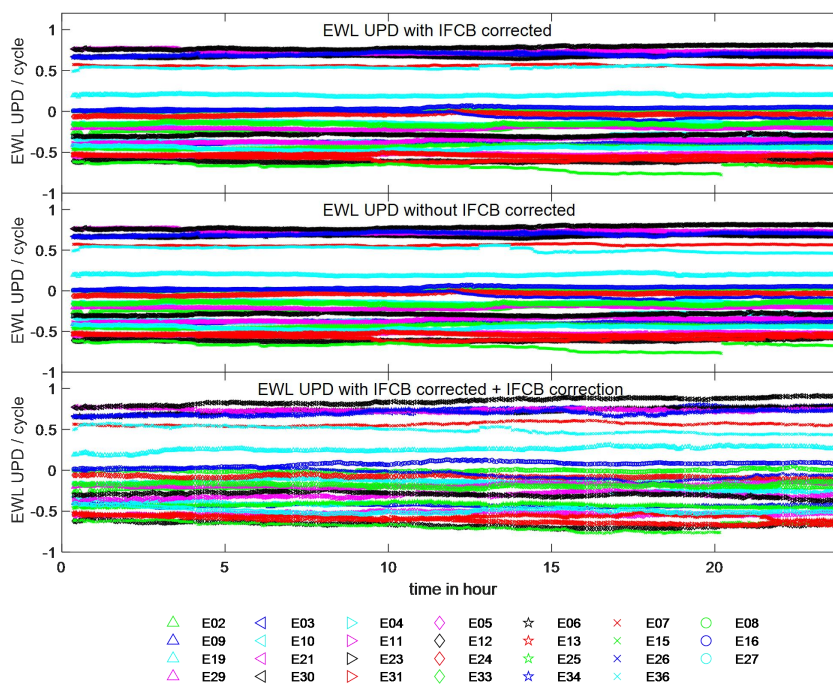


图 3-41 GAL 系统不同策略计算 EWL UPD 结果对比

Figure 3-41 EWL UPD Comparison from Different Strategies for GAL

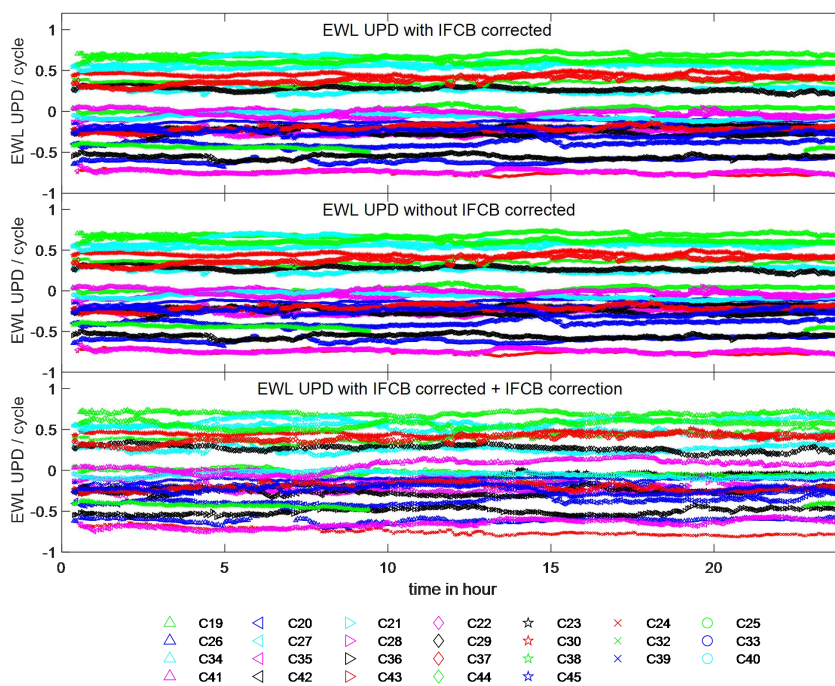


图 3-42 BDS 系统不同策略计算 EWL UPD 结果对比
 Figure 3-42 EWL UPD Comparison from Different Strategies for BDS

3.3.3.2 DCB 综合及处理策略

差分伪距硬件偏差DCB作为卫星端一项主要的误差源,在使用伪距进行定位时必须考虑。过去由于采用双频P1-P2无电离层组合进行PPP定位,不考虑DCB影响时也可以,该项误差会被吸收到电离层参数中。但是在采用多频观测值进行PPP定位时,第三频的伪距偏差无法消除和吸收因而必须在伪距上加以改正。DCB产品具有长期稳定性,因而对时效性要求低无需要实时估计。当前能够稳定提供DCB产品的IGS机构包括: CODE、ESA、CAS、GBM和WHU等。ESA/DLR由于已经退出IGS组织,因而也不再提供新的产品; CODE和GBM提供多种方法获得的DCB产品,但目前仍然只有三系统双频的产品; WHU和CAS提供全系统全频点的产品,但其稳定性存在问题,发布的产品偶尔出现跳变的现象。

虽然DCB具有长期稳定的特征,然而单天数据估计精度往往噪声和波动较大。考虑到已有不少公开的比较稳定的DCB产品作为输入,本研究不再实时估计DCB产品,而是采用IGS公开的DCB产品进行多天综合的方式来提升DCB产品的精度。DCB产品的综合过程最关键在于不同天产品/不同机构产品基准的统一,基准统一的过程如下[221]:

- 1) 从不同 DCB 产品中, 选取所有产品的公共卫星;
- 2) 根据公共卫星, 计算各自产品新的基准 $d(i)$;
- 3) 各产品的基准差异分析, 确定一个公共的基准 d_{ref} ;
- 4) 使用新的基准, 将 DCB 产品进行转换, 获得相同基准下的 DCB 产品;

获得统一基准的DCB产品后, DCB的综合比较简单, 只要考虑常用的粗差探测后, 对多个产品进行加权平均即可。图3-43给出了各个卫星日间稳定性对比, 由图可知, 基本所有卫星在综合后其日间稳定性均得到了提升。整体而言, 所有GPS卫星DCB的平均稳定性从0.235 ns提升到了0.203 ns, 提升了13.6%; GLONASS卫星DCB的平均稳定性提升得更为明显, 从0.123 ns提升到了0.074 ns, 提升了39.8%; Galileo卫星DCB的平均稳定性的提升最为显著, 从0.224 ns提升到了0.102 ns, 提升了54.5%; BD卫星DCB的平均稳定性也得到明显的改善, 从0.252 ns提升到了0.219 ns, 提升了13.1%。

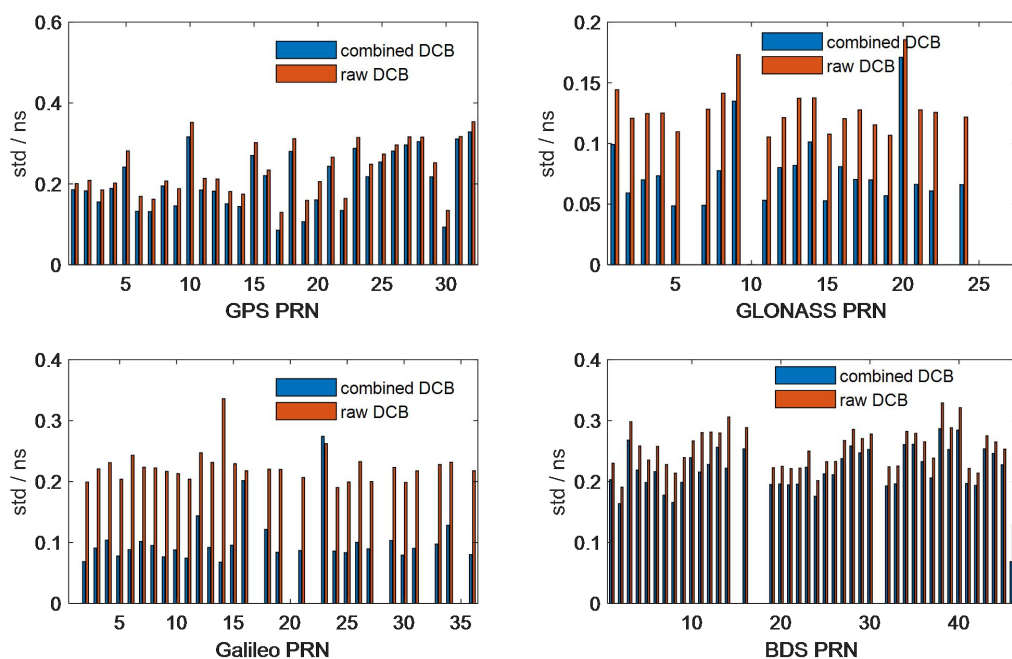


图 3-43 不同系统 DCB 产品综合前后稳定性对比

Figure 3-43 DCB Comparison before and after combination for each System

3.4 PPP-IAR 定位验证

3.4.1 整体 PPP-IAR 定位性能对比

为全面评估上述方案生成的实时产品的性能, 本节将采用实际的移动站数据进行 PPP-IAR 定位解算。作为对比, IGS 事后产品进行 PPP-IAR 定位的结果也加入对比分析。

分别选取了 AHTN (中国), KRGG (太平洋)、TLSE (法国) 和 ZIM2 (德国) 四个分布离散的测站进行 PPP 解算。图 3-44 分别给出采用实时产品浮点 PPP 解算、采用实时产品 PPP-IAR 解算和采用 GBM 事后产品 PPP-IAR 解算的定位结果对比。为了初步分析 PPP 收敛速度, 计算时每 6 小时重置一次, 采用 5 s 解算间隔, 图中红色直线代表 PPP 重置时刻。由图可知, PPP 浮点解算存在一定的收敛时间,

且即使收敛1个小时后，定位结果也可能存在2-3 cm系统偏差，比如：测站TLSE在E方向。采用模糊度固定后，整体定位误差波动更小，定位精度得到显著提高。另外，由图还可以看出，采用事后IGS产品进行PPP-IAR解算后，定位结果更加稳定，整体粗差出现的概率更低。此处粗差定义为：水平定位误差超过0.05 m或高程定位精度超过0.10 m。

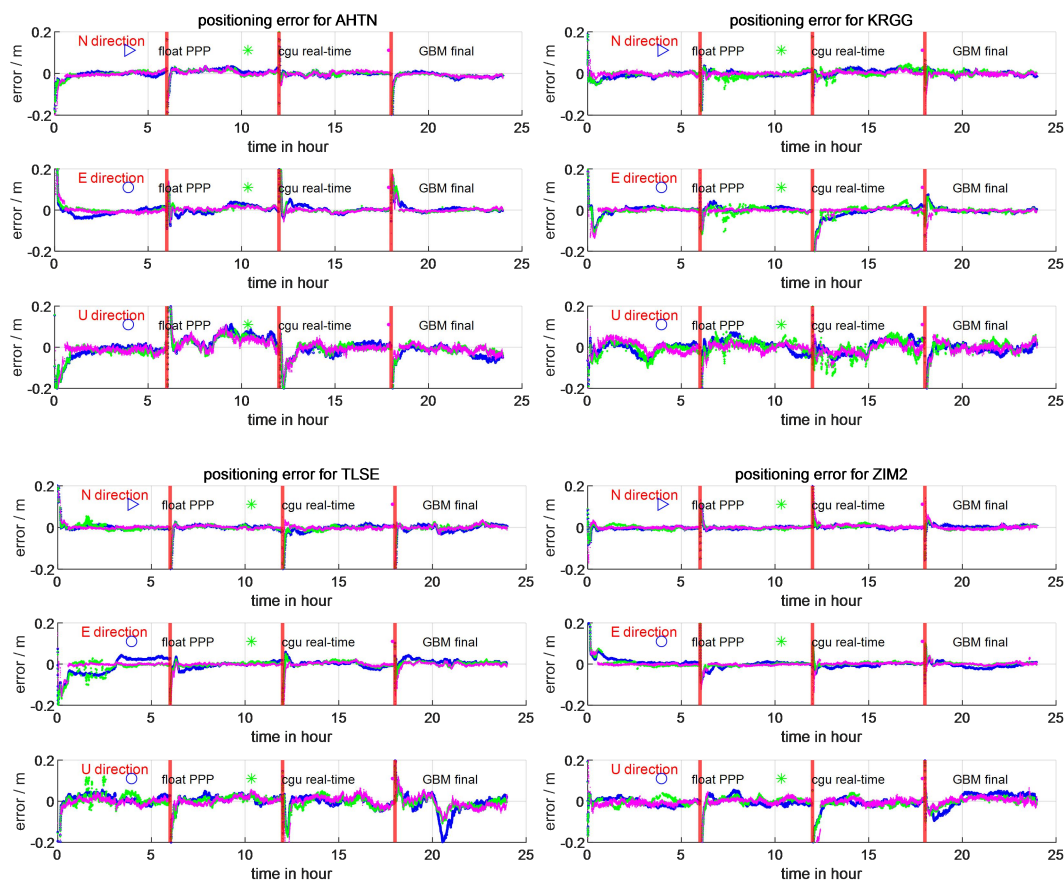


图 3-44 采用不同产品 PPP/PPP-IAR 定位结果对比

Figure 3-44 PPP/PPP-IAR solution for stations with different products

表3-6给出了所有测站定位精度，固定率和粗差率的统计结果，其中RT-float定位精度从收敛后1小时开始统计，PPP-IAR从模糊度固定开始统计。整体而言，采用模糊度固定后，所有测站在NEU方向的平均定位精度由0.0099/0.0165/0.0304 m分别改善到0.0098/0.0095/0.0245 m，整体3D定位精度提升了22%，另外粗差的概率也得到显著的改善，尤其是测站TLSE粗差率从6.42%降低到 0.26%。此外，采用事后产品能够有效的降低粗差的概率，与实时产品相比，平均粗差率由0.51%降低到0.14%。对于定位精度，虽然采用事后产品能进一步的提升，但提升的幅度相对比较小，平均3D定位精度由0.0280 m改善到了0.0237 m。

表 3-6 采用不同产品 PPP/PPP-IAR 定位统计结果

Table 3-6 Statistical Results of PPP/PPP-IAR for stations with different products

策略	测站	固定率/%	精度/m			粗差率/%
			N	E	U	
RT float	AHTN	-	0.0118	0.0165	0.0352	0.87
	KRGG	-	0.0126	0.0140	0.0283	0.19
	TLSE	-	0.0098	0.0221	0.0337	6.42
	ZIM2	-	0.0057	0.0135	0.0243	1.07
RT	AHTN	91.66	0.0102	0.0077	0.0272	0.00
	KRGG	90.93	0.0131	0.0135	0.0315	1.53
PPP-IAR	TLSE	91.27	0.0092	0.0098	0.0238	0.26
	ZIM2	91.69	0.0068	0.0068	0.0154	0.26
POST	AHTN	92.80	0.0108	0.0086	0.0275	0.39
	KRGG	92.54	0.0078	0.0059	0.0232	0.04
GBM PPP-IAR	TLSE	92.80	0.0068	0.0059	0.0222	0.00
	ZIM2	92.81	0.0058	0.0047	0.0128	0.00

3.4.2 相位偏差改正方式对比

图3-45给出采用不同相位偏差改正策略时PPP-IAR定位结果：（1）相位偏差直接改正原始观测值；（2）模糊度固定时改正相位偏差。由图可知，两种方法PPP-IAR结果差异非常小，定位结果基本保持一致差异在mm，仅少量历元定位结果出现cm级别差异。差异大的历元主要是固定的卫星数存在不一致，或者是初始化阶段固定的历元不完全相同。

表3-7给出了采用不同相位偏差改正方案对应的测站定位精度，固定率和粗差率的统计结果。整体而言，不同的改正方案其PPP-IAR性能几乎相当，整体定位精度差异不超过2 mm，模糊度固定率和粗差率的差异也在0.1%左右。

表 3-7 采用不同改正策略 PPP/PPP-IAR 定位统计结果

Table 3-7 Statistical Results of PPP/PPP-IAR for stations with different correction strategy

改正方式	测站	固定率/%	精度/m			粗差率/%
			N	E	U	
改正到 观测值	AHTN	91.67	0.0101	0.0079	0.0273	0.00
	KRGG	90.52	0.0127	0.0121	0.0309	1.03
	TLSE	91.13	0.0089	0.0126	0.0256	1.59
	ZIM2	91.69	0.0074	0.0061	0.0158	0.00
改正到 模糊度	AHTN	91.66	0.0102	0.0077	0.0272	0.00
	KRGG	90.93	0.0131	0.0135	0.0315	1.53
	TLSE	91.27	0.0092	0.0098	0.0238	0.26
	ZIM2	91.69	0.0068	0.0068	0.0154	0.26

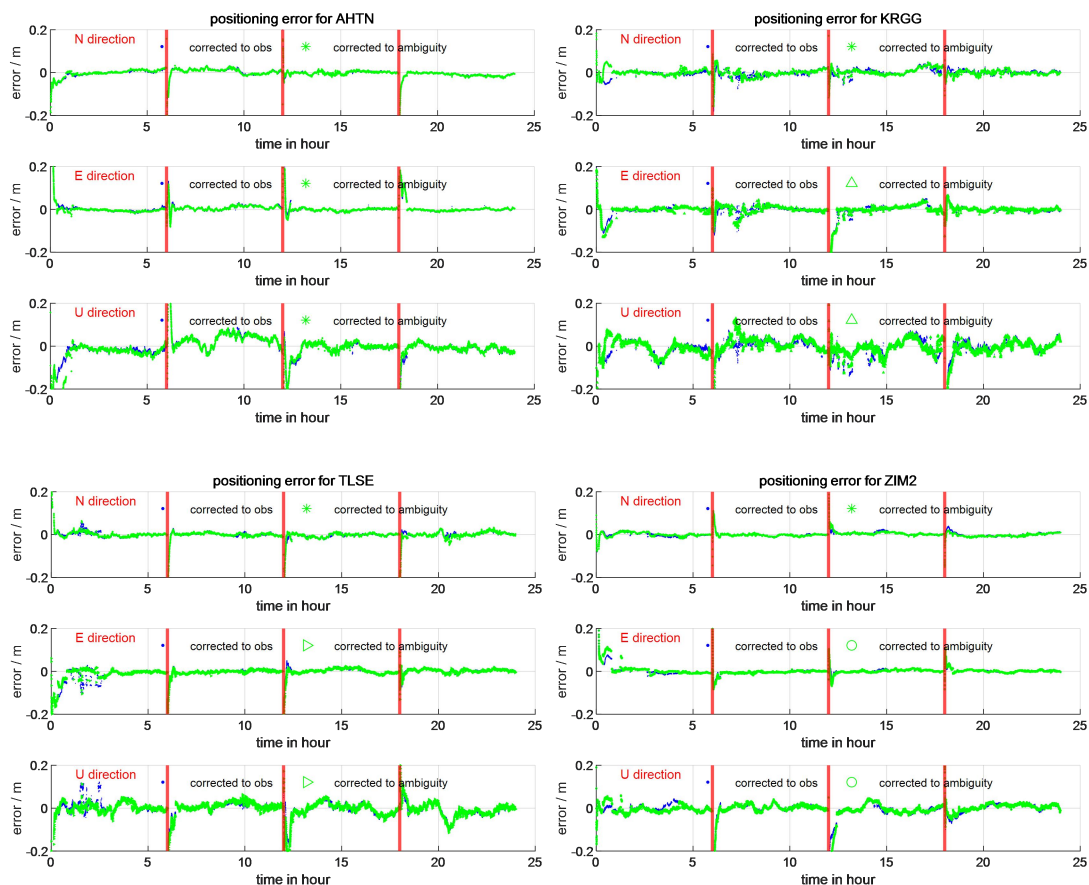


图 3-45 采用不同改正策略 PPP/PPP-IAR 定位结果对比

Figure 3-45 PPP/PPP-IAR solution for stations with different correction strategy

3.4.3 IFCB 估计方案对比

图3-46给出采用不同IFCB处理策略时PPP-IAR定位结果：（1）IFCB提前改正；（2）IFCB和模糊度当作参数统一估计。由图可知，两种方法PPP-IAR结果几乎没有差别。定位结果基本重合，其差异均在2 mm之内，模糊度的固定率和粗差情况也表现得很一致。

表3-8给出了采用不同IFCB方案时所有测站定位精度，固定率和粗差率的统计结果。整体而言，无论是从定位精度、模糊度固定率还是粗差率看，两者的差异都非常小，几乎可以忽略，这说明两种方案无论是从原理上还是使用效果上都几乎等价。

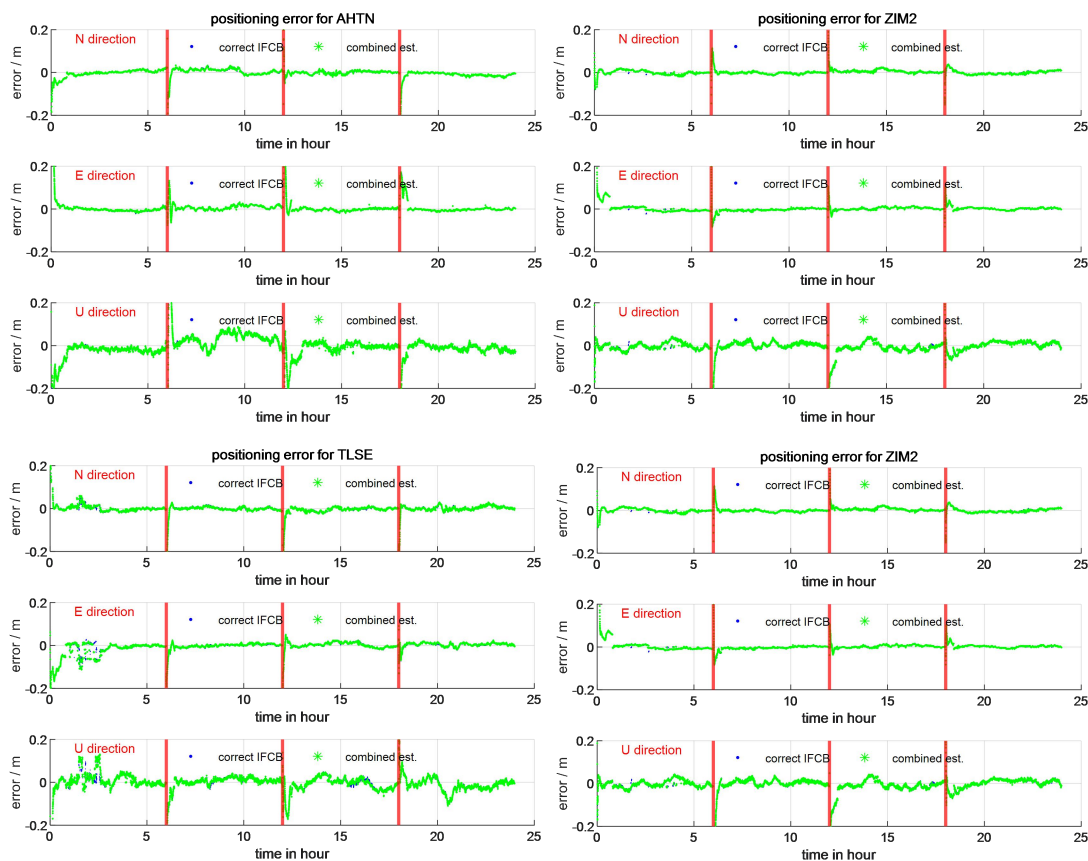


图 3-46 采用不同 IFCB 方案 PPP/PPP-IAR 定位结果对比
Figure 3-46 PPP/PPP-IAR solution for stations with different IFCB method

表 3-8 采用不同 IFCB 方案 PPP/PPP-IAR 定位统计结果
Table 3-8 Statistical Results of PPP/PPP-IAR for stations with different IFCB method

IFCB 策略	测站	固定率/%	精度/m			粗差率/%
			N	E	U	
提前改正	AHTN	91.67	0.0101	0.0079	0.0273	0.00
	KRGG	90.52	0.0127	0.0121	0.0309	1.03
	TLSE	91.13	0.0089	0.0126	0.0256	1.59
统一估计	ZIM2	91.69	0.0074	0.0061	0.0158	0.00
	AHTN	91.67	0.0101	0.0078	0.0272	0.00
	KRGG	90.35	0.0128	0.0135	0.0310	1.31
	TLSE	90.67	0.0096	0.0149	0.0272	2.15
	ZIM2	91.69	0.0074	0.0062	0.0159	0.00

3.5 本章小结

本章系统阐述了多频多系统实时精密产品的生成原理与方法，并基于自主开发的SWAS系统对PPP-IAR性能进行了全面验证。主要结论如下：

- (1) 在精密定轨方面，本研究提供的超快速实时轨道，预报部分

GPS/GLONASS/Galileo/BDS2/BDS3-MEO/BDS3-IGSO 3D 轨道精度分别为：0.0442/0.0723/0.0695/0.2166/0.0790/0.2345 m。

(2) 在钟差估计方面，采用扩展卡尔曼滤波方法以5秒间隔实时估计卫星钟差。GPS/GLONASS/Galileo/BDS2/BDS3-MEO/BDS3-IGSO系统钟差精度分别为0.0753/0.1354/0.0924/0.2969/0.1276/0.3319 ns；轨钟综合径向误差SISRE较钟差而言其误差更小，这是由于卫星钟差吸收了部分轨道的误差。

(3) 在多频UPD估计方面，本研究采用超宽巷/宽巷/窄巷估计组合相位偏差，然后将相位偏差还原到各个原始的频点。实时估计多频UPD产品结果表明：GPS、Galileo和BDS3的超宽巷/宽巷UPD最为稳定（STD < 0.05周），BDS2超宽巷/宽巷UPD稳定性略低，在0.08周左右。浮点模糊度使用UPD产品改正后，其小数部分分布结果表明：各系统EWL/WL/NL模糊度在 ± 0.25 周范围内的比例均超过90%。

(4) 在PPP-IAR验证方面，采用IFCB和UPD统一估计的策略和提前改正IFCB方案相比，两者效果几乎等价。此外，多频多系统PPP-IAR定位统计精度在N/E/U方向分别为0.0098/0.0095/0.0245 m。和采用IGS事后产品性能相比，定位结果精度达到事后产品结果的84.6%，这说明实时产品已经完全满足PPP-IAR应用对产品精度的需求。

第4章 多尺度大气建模及实时 PPP-RTK

大气延迟是GNSS精密定位中最主要的误差源之一，包括电离层延迟和对流层延迟两大类。在传统PPP处理中，电离层延迟通常通过无电离层组合消除，对流层延迟则作为未知参数在滤波过程中估计。然而，这种处理策略无法充分利用多频观测信息，且收敛时间较长。PPP-RTK技术的核心思想是将参考站网络提取的精密大气延迟改正模型播发给用户，从而加速模糊度固定和收敛过程。

本章围绕多尺度大气建模及实时PPP-RTK服务展开，系统阐述大气延迟提取方法、广域和局域电离层建模、对流层建模等。最后采用实时的大气产品和用户数据，基于PPP-RTK模型验证了方法和模型的适用性。

4.1 大气延迟提取

GNSS信号在从卫星传播至地面接收机的过程中，需要穿越地球大气层。大气层对GNSS信号的影响主要来源于两个区域：电离层和对流层，两者具有截然不同的物理特性。电离层延迟具有色散特性，即其大小与信号频率有关^[222]；对流层是地球大气层中从地表到约50 km高度的区域，其对GNSS信号的延迟具有非色散特性，即与信号频率无关^[223]；这种差异构成了大气延迟分离与提取的理论基础。

4.1.1 基于PPP浮点解的大气提取

在2.2节中公式(2-41)已经给出了非差非组合(UDUC)PPP函数模型，公式中 T_r 和 \tilde{I}_r^j 参数即为对应的对流层延迟和电离层延迟估计值。

在PPP浮点解模式下，模糊度参数以实数形式估计，不进行整数固定。此时，电离层延迟参数吸收了卫星和接收机端的硬件延迟偏差，其估计值可以表示为：

$$\tilde{I}_r^j = I_r^j + \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_{corr,1}^j + B_{corr,2}^j) \quad (4-1)$$

其中， $B_{corr,1}^j$ 和 $B_{corr,2}^j$ 分别为频率 f_1 和 f_2 上的卫星硬件延迟改正量； $B_{corr,1}^j$ 和 $B_{corr,2}^j$ 分别为频率 f_1 和 f_2 上接收机硬件延迟改正量。此外，由于模糊度未固定，电离层估计值中实际还包含了未分离的卫星和接收机相位偏差项，这些因素均限制了电离层提取的精度，其精度通常在0.5~2.0 TECU量级^[224]。

对于对流层延迟，PPP浮点解中的天顶湿延迟 T_r 通过Kalman滤波估计，浮点解的对流层估计精度主要受限于：(1)低高度角映射函数的精度，(2)PPP的收敛速度。一般在收敛初期ZWD估计精度较低，但PPP稳定后可达5-10 mm水平。

浮点解大气提取的主要优势在于其实现简单、计算效率高，且不依赖于外部的相位偏差产品。然而，浮点解大气提取的主要局限性在于：(1)模糊度未固定导致参数之间的相关性较强，估计参数中含有未分离的硬件延迟偏差；(2)

收敛初期的大气估计精度不稳定，难以满足高精度的PPP-RTK应用。

4.1.2 基于 PPP 固定解的大气提取

电离层延迟的提取核心在于利用不同频率观测值之间的差异，对于任意两个频率 f_i 和 f_k 的载波相位观测，构造GF组合：

$$L_{GF}^j = L_i^j - L_k^j = (-\gamma_i + \gamma_k)\tilde{I}_r^j + \lambda_i\tilde{N}_i - \lambda_k\tilde{N}_k + \varepsilon(L_{GF}) \quad (4-2)$$

当模糊度 \tilde{N}_i 和 \tilde{N}_k 被固定为整数后，可从GF组合中精确提取电离层延迟：

$$\tilde{I}_r^j = \frac{-(L_i^j - L_k^j) + \lambda_i\tilde{N}_i - \lambda_k\tilde{N}_k}{\gamma_i - \gamma_k} \quad (4-3)$$

与浮点解 (4-1) 提取的电离层相比，固定解中的差分相位偏差项在模糊度固定过程中通过UPD产品进行改正，电离层估计值仅包含接收机码偏差和相位偏差相关的延迟项。接收机相关的偏差项在同一个系统可以通过单差形式加以消除，因而固定解电离层的精度可以显著提高电离层的提取精度，一般而言可以固定解电离层的提取精度可以达到mm-cm级。

同理，在获得斜向电离层观测值后，将其代入式 (2-41) 中，即可获得斜向对流层延迟：

$$STD = L_{1,r}^j - (\rho_r^j + c(d\tilde{I}_r - d\tilde{I}^j) - \gamma_1\tilde{I}^j + \lambda_1\tilde{N}_{1,r}^j) \quad (4-4)$$

由于大气提取时采用的测站均为已知坐标的监控站，因而式中 ρ_r^j 可以准确计算。当坐标已知且模糊度正确固定，斜向对流层的提取精度可以达到mm-cm精度而不受映射函数影响。此外，模糊度固定后的PPP解中的天顶湿延迟估计精度也得到显著提升，可达3-5 mm水平。

4.1.3 PPP 固定解提取大气精度分析

由于缺乏高精度的产品为参考值，无法评价GNSS提取的电离层或对流层的绝对精度。此处采用并址站的方式分别提取大气，然后两个测站提取的大气对比，来评价提取的精度。图4-1分别给出了上海奉贤FEXI-SHSL和广东成月GDUE-GDUEA两个位置并址站PPP固定解提取的电离层差异。由图可知，FEXI-SHSL并址站提出的电离层差异非常小，其中GAL和BDS卫星的电离层差异均在mm级别，GPS提取的电离层差异达到了几个厘米；从统计结果看，并址站提取的电离层GPS/GAL/BDS卫星的平均差异分别为0.0162/0.0016/0.0023 m，这说明固定解提取的电离层大气可达mm级的精度。虽然GPS差异明显高于其他系统，这和并址站采用的接收机类型相关（FEXI为和芯板卡，SHSL为天宝板卡），并非GPS提取精度低，这可以由GDUE-GDUEA并址站结果证明（GDUE/GDUEA均为和芯板卡）。从图中可以看出，GDUE-GDUEA并址站GPS/GAL/BDS系统电离层差异基本均在2 cm以内，各系统差异统计结果分别为0.0035/0.0056/0.0021 m。

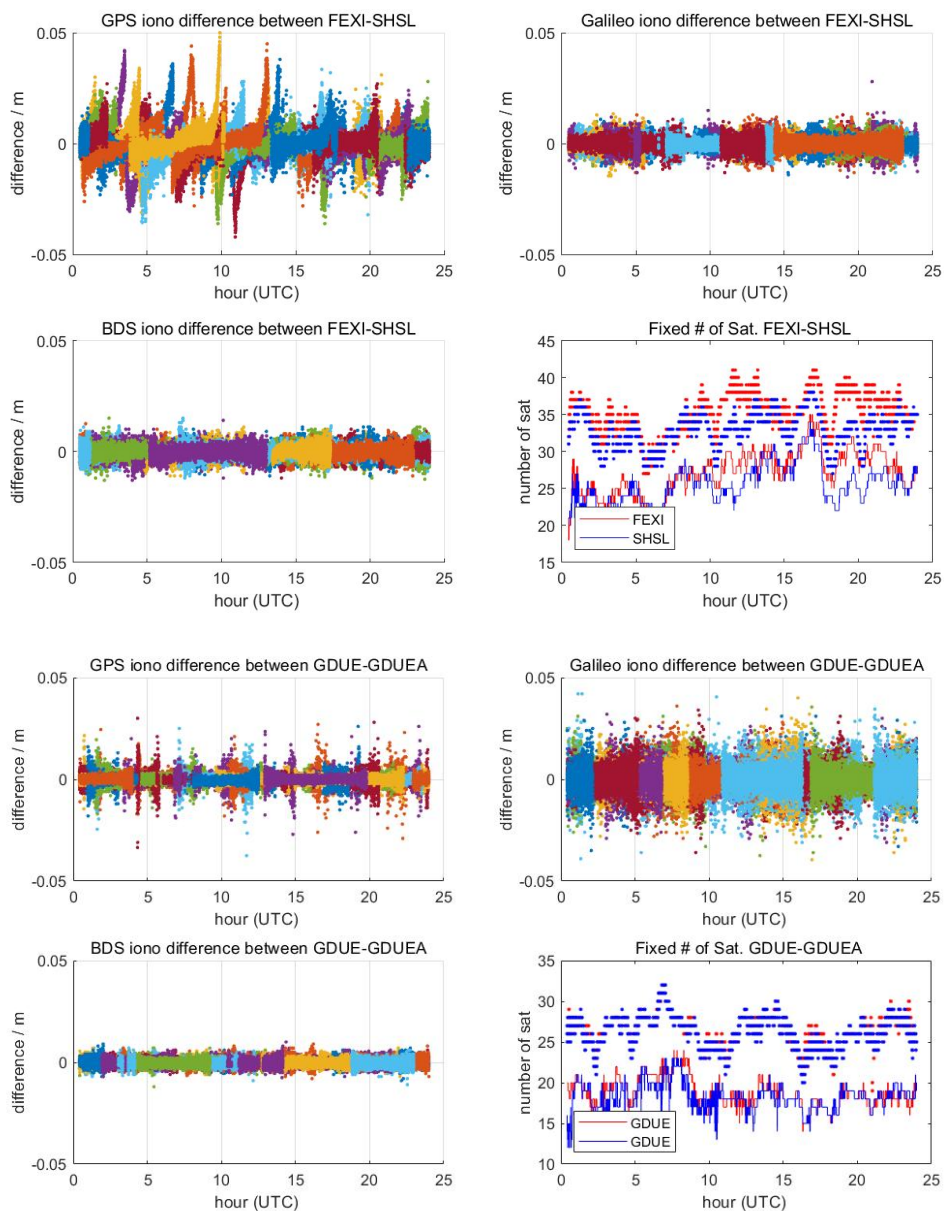


图 4-1 并址站提取的电离层差异序列

Figure 4-1 Ionospheric Variation from co-location stations

图4-2分别给出了两个位置并址站PPP固定解提取的对流层差异。由图可知，相邻并址站提取的对流层差异非常小，不同站差异均在mm级别。统计结果表明，并址站提取的对流层平均差异分别为0.0026 m和0.0018 m。

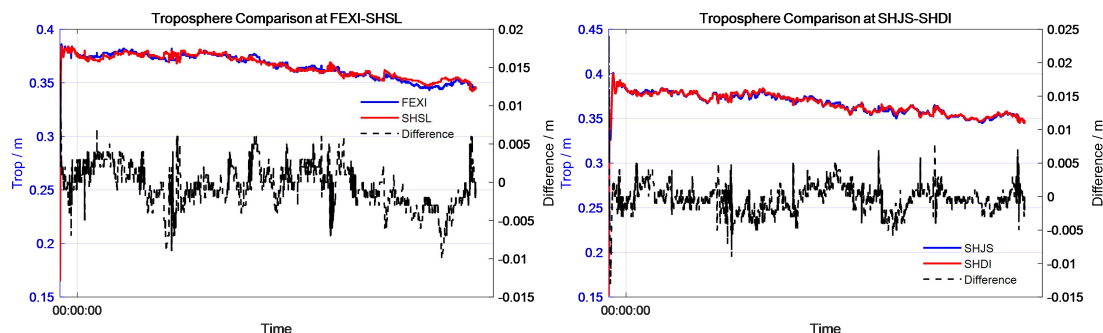


图 4-2 并址站提取的对流层差异序列

Figure 4-2 ZTD Variation from co-location stations

4.2 广域电离层建模

4.2.1 广域电离层模型介绍

电离层延迟是PPP定位中最主要的误差源，其空间和时间变化特性使得精确建模成为PPP-RTK技术的关键挑战。广域电离层建模旨在利用稀疏的区域参考站观测数据，建立覆盖较大范围的电离层延迟模型，为用户提供电离层改正信息。目前已有不少学者针对性地发布了多种广域电离层模型，其中常用的广域电离层模型主要分为以下几类：

(1) 全球电离层地图（Global Ionosphere Map, GIM）

GIM模型是基于高阶球谐函数（Spherical Harmonics, SH）展开估计全球电离层模型的经典方法。Schaer在其博士论文中系统阐述了基于GPS观测的全球电离层映射方法，利用球谐函数展开表示全球VTEC分布^[225]。IGS电离层工作组自1998年起协调各分析中心生成GIM，目前CODE、JPL、ESA、UPC、CAS等机构持续提供GIM产品^[226]。采用球谐函数展开方法生成的GIM，穿刺点上的电子总浓度 $V_{tec}(\varphi, \lambda)$ 在日固参考系中可表示为：

$$V_{tec}(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi) \cdot (\tilde{A}_{nm} \cos(m\lambda) + \tilde{B}_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (4-5)$$

其中： (φ, λ) 为穿刺点的地理纬度和经度， $\tilde{P}_{nm}(\cdot)$ 为正则化的勒让德函数， \tilde{A}_{nm} 和 \tilde{B}_{nm} 为待估计的球谐系数， n 和 m 为球谐系数的阶次，全球GIM模型通常取15阶。

(2) 广播电离层模型

自20世纪90年代以来，随着GNSS卫星系统的发展，国际上已经发布了多种广播电离层模型。比较有代表性的包括：GPS系统采用的Klobuchar广播电离层模型，Galileo系统采用的NeQuick广播电离层模型，以及BDS3系统采用的BDGIM全球广播电离层改正模型等。

Klobuchar模型用一个夜间常数和八个余弦函数来模拟电离层延迟的日变化。虽然该模型计算简单，但是使用非常方便，且能够消除约50%~60%的电离层延

迟^[227]。与Klobuchar模型的二维VTEC描述不同，NeQuick是一个三维电子密度模型，能够通过沿信号路径的数值积分直接计算STEC^[228]。BDGIM基于修正的球谐函数展开，使用9个改正参数描述全球VTEC分布^[229]：

$$V_{tec}(\varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i(\varphi, \lambda) + \sum_{i=1}^J \beta_i B_i(\varphi, \lambda) \quad (4-6)$$

其中， α_i 为播发的9个电离层改正参数； β_i 为17个无需播发的电离层参数，需要根据已知的多个电离层周期项和谐和函数计算，具体可以参考； A_i 和 B_i 为预定义的球谐基函数，其计算方法为：

$$A_i = \begin{cases} P_{nm} \sin(\varphi) \cos(m\lambda), m \geq 0 \\ P_{nm} \sin(\varphi) \sin(-m\lambda), m < 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

结果表明，BDGIM可以消除约75%~81%的电离层误差，优于GPS Klobuchar模型。

(3) 电离层层析模型

电离层层析成像将电离层三维电子密度分布离散化为体素，利用沿不同路径穿过电离层的GNSS信号，通过数学重建算法，反演出电离层电子密度在三维空间中的分布。通过反演获得三维电离层模型^[230]。该方法可以避免薄壳假设的局限性，使得我们能够看到电离层在不同高度层的结构，而不仅仅是总含量的二维投影，但是该方法需要大量的观测数据和计算资源，也不适合实时播发给用户使用。

(4) ASHF球冠谐模型

为了提高广域电离层模型的精度，不少学者针对区域电离层建模进行了深入研究，研究表明针对几千km范围内电离层采用全球球谐函数的阶次过高会导致过拟合，而阶次过低则无法捕捉区域细节。Haines提出了球冠谐函数方法，但其非整数阶勒让德函数的计算复杂度较高^[231]。为此，De Santis等提出了调整球谐函数（Adjusted Spherical Harmonics Function, ASHF）方法^[232]，通过在球冠坐标系中使用标准球谐函数来近似球冠谐函数，大幅简化了计算过程。

4.2.2 顾及卫星空间差异的 Sat-ASHF 模型

虽然目前全球GIM模型在IGS分析机构得到广泛地推广应用，但其模型精度普遍在2-8 TECU，针对单频PPP用户可以有效地提升定位性能，但难以满足高精度PPP-RTK使用要求。尤其对于要求在数分钟实现PPP快速收敛的需求，电离层模型的精度需求在1 TECU之内，无论是目前常用的广播电离层模型还是GIM模型都难以满足要求。

随着PPP-RTK应用得越来越广泛，对电离层模型的精度也要求越来越高。本研究以改进的球冠谐函数为基础，针对1000-3000 km范围大小的区域精密电离层建模提出了一种顾及卫星空间差异的Sat-ASHF（Sat-specified Adjusted Spherical

Harmonics Function, Sat-ASHF) 模型, 将广域大气建模的精度大幅地提升。

基于GNSS提取的电离层分量描述通常基于电离层单层假设 (Single Layer Model, SLM), 该模型假设所有自由电子均集中在一个无限薄的外壳中, 将电离层简化为位于固定高度处的无限薄球壳上^[225]。基于电离层单层假设, 斜向电离层观测量可以通过映射函数投影至天顶垂直方向, 略去推导, 直接给出下式^[233-234]:

$$\begin{aligned}\tilde{I}^j &= I^j + \beta(DCB_r - DCB^j) \\ I^j &= M(z) \cdot Vtec(\varphi, \lambda) \\ M(z) &= 1 / \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R + H_{ion}} \sin(z)\right)^2}\end{aligned}\quad (4-8)$$

其中, z 为卫星高度角, R 和 H_{ion} 分别为地球半径和单层假设的电离层高度, (φ, λ) 为穿刺点的地理纬度和日固系下穿刺点经度。 $Vtec(\varphi, \lambda)$ 为穿刺点上的电子总浓度, 且可表示为:

$$Vtec(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi) \cdot (\tilde{A}_{nm} \cos(m\lambda) + \tilde{B}_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (4-9)$$

其中, $\tilde{P}_{nm}(\cdot)$ 为正则化的勒让德函数, \tilde{A}_{nm} 和 \tilde{B}_{nm} 为待估计的球谐系数, 对系数 \tilde{B}_{nm} 有 $m \neq 0$, n 和 m 为球谐系数的阶次。公式 (4-8) 即为通常所说的GIM模型采用的球谐函数模型, 全球电离层建模时, 高阶的球谐VTEC模型是一个不错的选择, 目前大部分IGS机构发布的全球电离层模型均是采用这种方式, 且模型阶数一般取 $n=m=15$ 。

然而全球的VTEC建模精度较低, 且需要全球分布的跟踪站, 在实际情况下通常区域球VTEC谐模型更为实用。由于区域VTEC球谐系数间相关性较大, 采用区域数据解算时实际待估参数法方程矩阵是病态的, 此时需要将其在转换至球冠坐标系下进行建模, 假设球冠坐标系的中心点地理经纬度为 (φ_0, λ_0) , 球冠半角为 θ , 那么有^[235]:

$$\begin{aligned}Vtec(\varphi', \lambda') &= \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi') \cdot (\tilde{A}_{nm} \cos(m\lambda') + \tilde{B}_{nm} \sin(m\lambda')) \\ \varphi' &= \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\theta} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_c \right) \\ \lambda' &= \lambda_c \\ \varphi_c &= \arccos[\sin(\varphi_0) \sin(\varphi)] + \cos(\varphi_0) \cos(\varphi) \cos(\lambda - \lambda_0) \\ \lambda_c &= \arcsin[\sin(\lambda - \lambda_0) \cos(\varphi) / \sin(\varphi_c)]\end{aligned}\quad (4-10)$$

其中, (φ_c, λ_c) 为球冠坐标系下穿刺点的地理纬度和日固系下经度, (φ', λ') 为投影后的穿刺点坐标, 其他参数含义同上。通常欧洲区域或中国区域相近类似大小的区域, n 和 m 可取 $[3, 6]$, θ 可取 $[30, 45]$ 度, 球冠坐标系的极点中心地理经纬度为区域内测站的平均经纬度, 即区域地理中心。公式 (4-10) 中, n 和 m 可以取值相同, 也可以取值不同。在实际应用中, n 和 m 的选取需要平衡模型分辨率和参数可分离性, 一方面模型系数越多, 参数相关性越强, 但对应的电离层拟合精度也

会更高，模型参数个数可以通过 $N_{\text{count}} = (n+1)(n+1) - (n-m+1)(n-m)$ 计算，当 $n=m=3$ 时，模型系数总共有16个。

公式(4-10)中所有卫星观测方程统一建模，式中不同卫星共用一套电离层模型参数 \tilde{A}_{nm} 和 \tilde{B}_{nm} 。然而，实际不同卫星的信号传播路径差别很大，导致不同卫星的穿刺点位置和角度不同，采用一套电离层模型实际难以准确地表达不同卫星的斜向电离层延迟差别。为此，本文提出了一种顾及卫星空间差异的Sat-ASHF模型，其核心原理是通过为每颗卫星估计独立的球谐系数来提高建模精度，相应的每个卫星的建模过程可表示为^[127]：

$$\begin{aligned} Vtec(\varphi^{s'}, \lambda^{s'}) &= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi^{s'}) \cdot (\tilde{A}_{nm} \cos(m\lambda^{s'}) + \tilde{B}_{nm} \sin(m\lambda^{s'})) \\ \varphi^{s'} &= \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\theta} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi^s_c \right) \\ \lambda^{s'} &= \lambda_c \\ \varphi^s_c &= \arccos[\sin(\varphi^s_0) \sin(\varphi) + \cos(\varphi^s_0) \cos(\varphi - \varphi^s_0)] \\ \lambda^s_c &= \arcsin[\sin(\lambda - \lambda^s_0) \cos(\varphi) / \sin(\varphi_c)] \end{aligned} \quad (4-11)$$

其中： $(\varphi^s_c, \lambda^s_c)$ 为球冠坐标系下卫星相关的穿刺点的地理纬度和日固系下经度， $(\varphi^{s'}, \lambda^{s'})$ 为投影后卫星相关的穿刺点坐标，其他参数含义同上。由于每颗星穿刺点位置差异较大，因而球冠坐标系的极点中心地理经纬度 (φ_0, λ_0) 也可以采用各个卫星自己的中心点坐标，每颗星的球冠坐标系极点坐标可以根据测站和卫星的平均穿刺点来确定，即：

$$\begin{aligned} \varphi^s_0 &= \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \varphi_{r,IPP}^s \\ \lambda^s_0 &= \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \lambda_{r,IPP}^s \end{aligned} \quad (4-12)$$

和传统ASHF模型所有卫星的电离层采用同一组VTEC参数不同，顾及卫星空间差异的Sat-ASHF模型在区域VTEC建模时每颗卫星估计一套不同的模型系数。假设总共有 n_s 个卫星，那么模型参数个数为 $N_{\text{count}} * n_s$ ，虽然待估参数成倍的增加了，但模型精度可以得到显著的提升。改进Sat-ASHF模型的核心优势在于：

(1) 消除卫星间电离层建模误差的交叉污染。在传统模型中，一颗卫星的建模误差会通过共同参数传播到其他卫星，卫星独立模型避免了这一问题。

(2) 隐式吸收卫星端硬件延迟残差。由于每颗卫星的球谐系数独立估计，卫星端DCB的残余误差可以被各自的系数吸收，无需额外的偏差参数。

(3) 更好地适应电离层的空间非均匀性。不同方向的电离层延迟可能存在显著差异（如南北梯度），卫星独立模型可以更灵活地描述这种非均匀性。

特别的，由于公式(4-8)中提取的电离层延迟包含卫星和接收机的硬件延迟，卫星的硬件延迟可以通过产品改正，但接收机硬件延迟无法改正，需要在电

高层建模时同步估计。为保证单个卫星参数估计的稳定性，实际上所有卫星参数是统一建模，共同估计一个接收机硬件延迟参数。假设有 n_t 测站，那么改进的 Sat-ASHF 模型的参数总数为： $N_{count} \times n_s + n_t$ 。当 $n=m=3$ 时，区域内共有 50 个测站，同步观测的卫星为 30 颗，那么总参数数量为 $16 \times 30 + 50 = 530$ 个，观测值数量为 $30 \times 50 = 1500$ 。虽然参数数量显著增加，但观测方程的数量远大于参数数量，未知数仍可以采用最小二乘或者滤波解算进行估计。为了保证球谐系数的时间连续性，改进的 Sat-ASHF 模型采用 Kalman 滤波进行参数估计，参数随机模型采用随机游走模式：

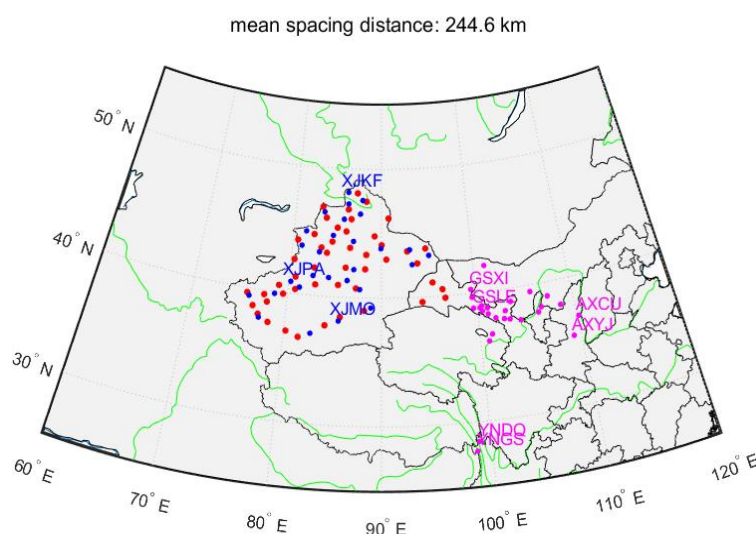
$$x_k = x_{k-1} + w_k, w_k \sim N(0, Q_k) \quad (4-13)$$

其中，过程噪声 Q_k 的设置反映了电离层的时间变化特性。低阶模型系数反映大尺度结构可以设置较大的过程噪声；高阶系数反映小尺度变化，过程噪声可以设置得较小。

4.2.3 广域大气模型精度分析

4.2.3.1 实验设计

为分析本文提出的估计卫星空间差异的 Sat-ASHF 模型效果，以中国西部区域为例，利用中国新疆和甘肃西部区域内总计 48 个连续跟踪站实时计算了区域内广域高精度的大气模型，覆盖范围宽度在 1500-2000 km 左右。图 4-3 给出了用于电离层建模的测站分布（红色圆点），测站平均站间距约为 244.6 公里。此外，为了评估模型精度，在区域内均匀地选取了 28 个验证站，其分布也在图中给出（蓝色圆点）。最后，为了分析广域 Sat-ASHF 模型精度与中心点距离的相关性，在覆盖区域外按距离增加依次选择了多个验证站，其分布情况也在图 4-3 给出（紫色圆点）。为了分析模型在不同电离层活跃程度下的通用性，作为对比南方电离层活跃区域的建模精度也进行了分析，区域内测站的分布情况也在图 4-3 给出。



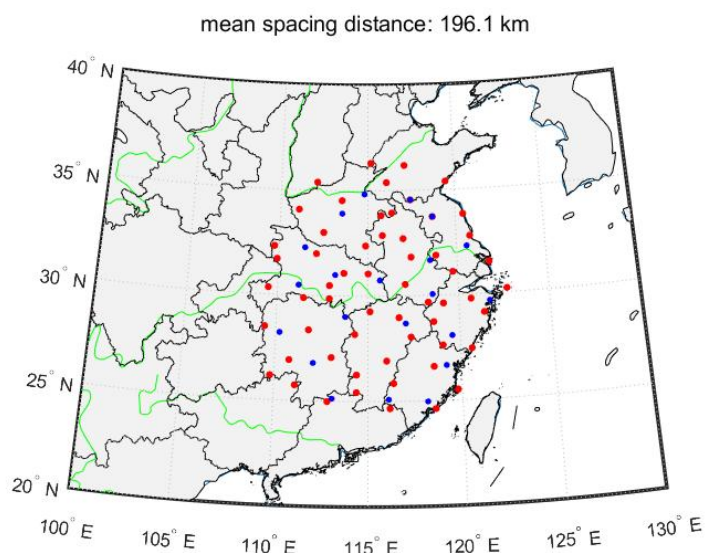
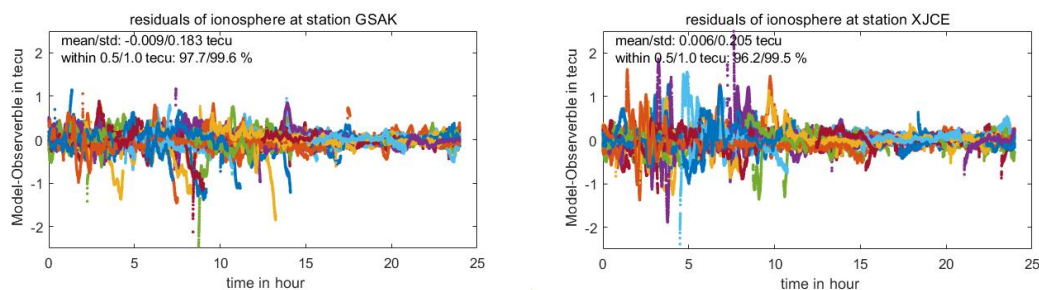


图 4-3 中国西部和南方区域广域电离层建模测站分布图及验证站分布图
 Figure 4-3 Distribution of stations used for ionospheric modelling and for PPP-IAR/PPP-RTK validation (blue dots) at different regions

4.2.3.2 广域模型精度分析

(1) 模型内符合残差

为了解Sat-ASHF模型的初步精度，首先对建模测站的模型残差进行了详细分析。以位于该区域东、北、西、南边界处的测站GSAK、XJCE、XJCU和XJRW为例，图4-4分别给出了四个测站的电离层建模残差，图中不同颜色代表不同的卫星。由图可知，大多数残差在0.5 TECU以内波动，超过99.0%的残差落在1.0 TECU以内，XJRW测站的残差出现数小时的中断是由于实时数据流中断所致。这四个测站所有卫星残差的平均标准差（STD）分别约为0.183、0.205、0.242和0.196 TECU。这表明尽管覆盖区域跨度大，半径超过950 km，但即使对于区域边界处测站，该模型也能很好地拟合电离层观测量。



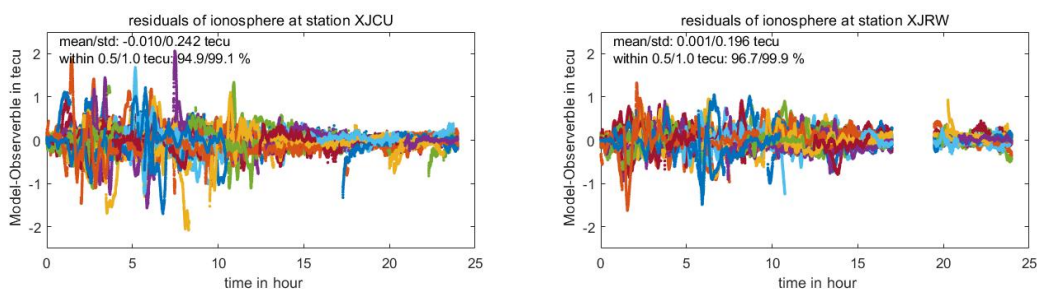


图 4-4 建模测站电离层模型残差序列图

Figure 4-4 Residuals of ionosphere from station GSAK/ XJCE/XJCU/XJRW

图4-5给出了所有电离层建模测站的残差精度和分布情况，图中蓝色和青绿色直方图分别代表残差在0.5 TECU和1.0 TECU以内的百分比，红色直方图通过计算残差的标准差展示了每个测站的电离层模型精度。如图所示，所有测站的残差在0.5 TECU以内的比例超过88%，在1.0 TECU以内的比例超过96%。此外，所有测站的精度水平相当，介于0.161至0.333 TECU之间，这说明Sat-ASHF模型在区域内不同位置处建模精度大体相当。统计结果表明，所有测站的平均精度约为0.252 TECU，进一步表明本文提出的Sat-ASHF模型具有较高的精度。

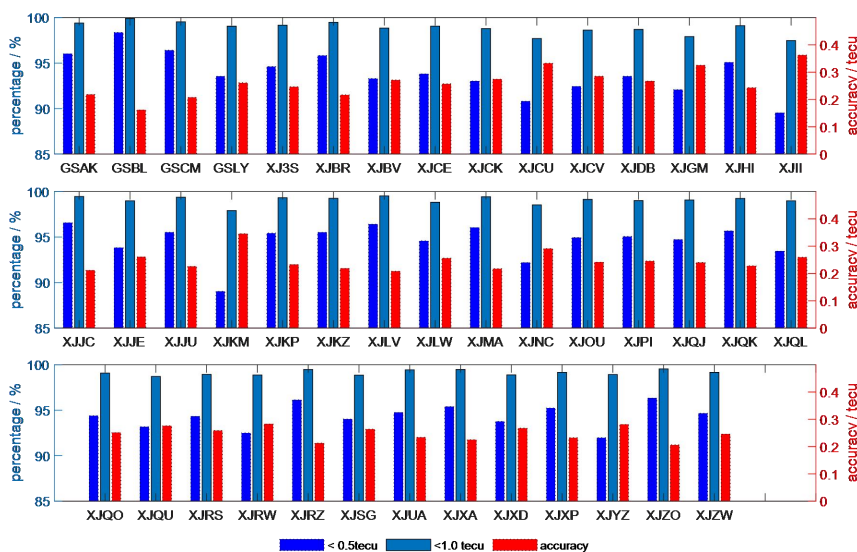


图 4-5 建模测站电离层模型残差分布和精度统计图

Figure 4-5 Accuracy and distributions of residuals of each station used for ionosphere modelling

(2) 用户站模型精度验证

电离层模型的精度采用用户测站验证过程如下：首先，采用PPP方法，利用已知坐标处理用户测站的GNSS观测数据。其次，在模糊度解算后提取每颗卫星的电离层延迟。然后，基于电离层模型计算用户测站处每颗观测卫星的电离层模型值。最后，计算所有用户测站提取的电离层延迟与计算出的模型值之间的差异。

图4-6展示了位于区域西边界和南边界的用户站XJPA和XJMO处，每颗卫星（不同颜色代表不同卫星）的电离层差异。如图所示，提取的电离层延迟与模型值之间的差异大部分在-0.5 TECU至0.5 TECU之间，两个测站的残差在0.5 TECU以内的比例均超过95%，在1.0 TECU以内的比例均超过99%。此外，部分时间个别卫星的残差超过1.0 TECU并持续数分钟，这通常发生在卫星进入低高度角（低于20度）区域时。图中还可以看出，部分历元有些电离层差异较为离散，这主要是由于PPP-IAR部分卫星模糊度错误固定，导致提取的电离层存在偏差解引起的。

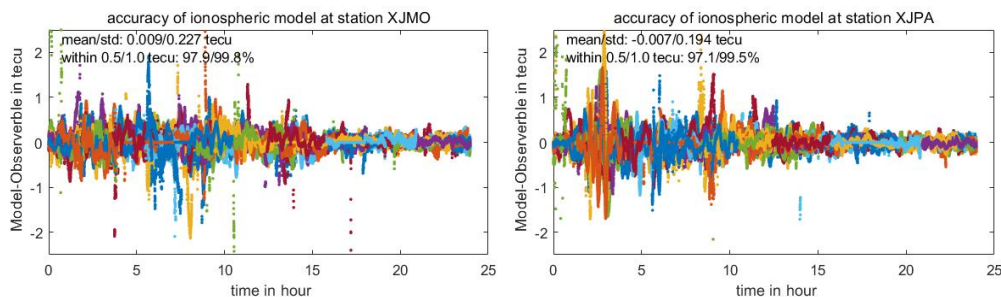


图 4-6 用户站 XJPA 和 XJMO 处的电离层模型精度

Figure 4-6 Accuracy of ionospheric model at user station XJPA and XJMO

图4-7所示给出了所有用户站的统计结果，如图所示，所有测站的残差在0.5 TECU以内的比例介于82%至96%之间；残差在1.0 TECU以内的比例均超过96%。所有用户站模型精度的平均值约为0.324 TECU，与建模测站相比，精度显著下降了22.2%。最大的测站模型误差为0.726 TECU，出现在位于区域北边界的XJKF测站。

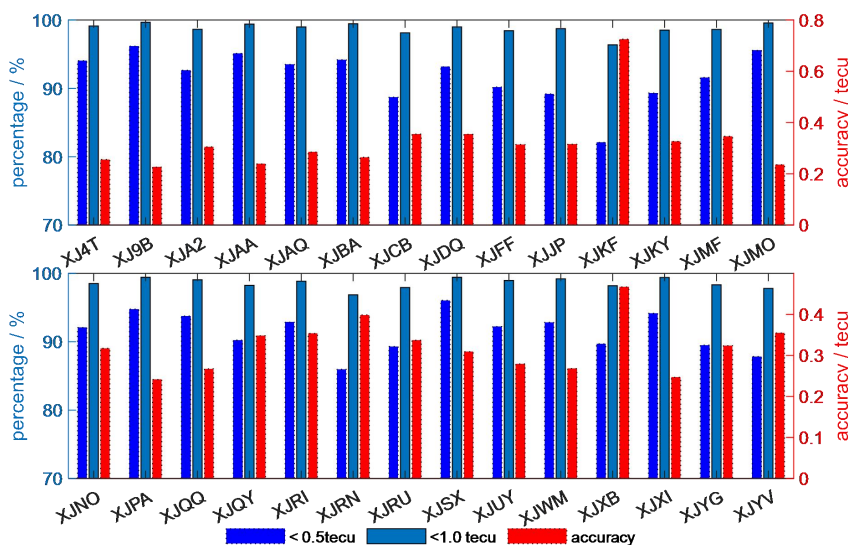


图 4-7 各用户测站的残差精度与分布

Figure 4-7 Accuracy and distributions of residuals of each user station

(3) 与传统的 ASHF 模型对比

为了分析改进的Sat-ASHF与传统ASHF模型的差别，将传统ASHF的电离层精度与本文方法进行对比，统计结果在图4-8给出。对于所有建模测站，传统ASHF模型的电离层精度范围约为1.998 TECU至5.164 TECU，而改进的Sat-ASHF模型的精度范围为0.162 TECU至0.363 TECU。统计结果表明，改进的Sat-ASHF模型的平均精度为0.252 TECU，相较于传统ASHF方法的2.578 TECU，精度提升了90.2%。对于所有用户站，其整体电离层精度略低于建模测站；然而从统计结果上看可以得到相似的结论，改进的Sat-ASHF模型平均精度为0.324 TECU，相较于传统ASHF模型的3.130 TECU，精度提升了89.6%。

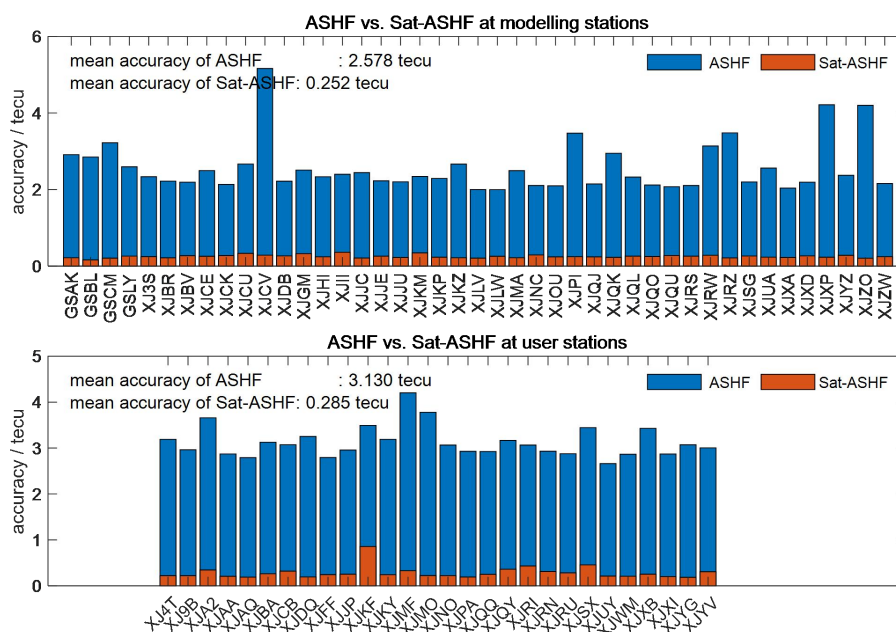


图 4-8 建模站（上）和用户站（下）处不同模型的精度对比

Figure 4-8 Accuracy of different models at both modelling stations (upper) and user stations (bottom)

(4) 中国南方区域 ASHF 模型精度差异对比

电离层模型精度不但和模型本身相关，还与建模区域本身的电离层变化情况相关，在电离层活跃区域模型精度会显著的下降。以中国南方区域电离层活跃区域为例，图4-9给出了对应测站位置处模型精度的统计结果，和西部区域相比，无论是建模站还是用户监控站，其模型精度显著下降。其中，采用ASHF模型时，建模站和用户站平均模型误差分别为6.93 TECU/7.86 TECU；采用Sat-ASHF模型时，建模精度也同样存在大幅度下降，建模站和用户站平均模型误差分别为0.635 TECU/0.646 TECU。Sat-ASHF模型相较于传统ASHF方法，其精度提升比例也在90%左右。

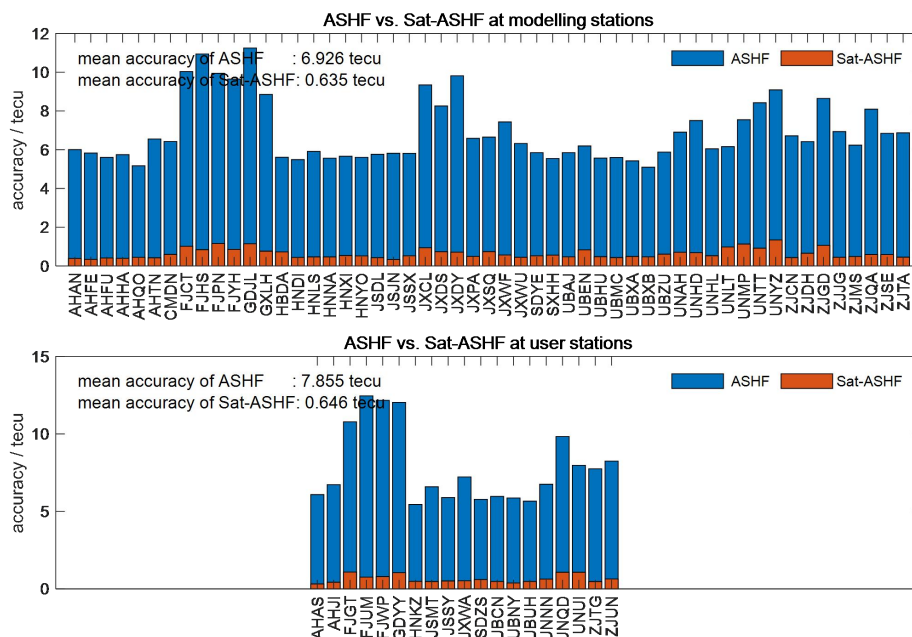


图 4-9 活跃区域建模站（上）和用户站（下）处不同模型的精度对比
Figure 4-9 Accuracy of different models at both modelling stations (upper) and user stations (bottom) for Ionospheric active Regions

4.2.3.3 模型精度与中心点距离相关性分析

实时定位时难免有些用户处在区域边界和区域外，为了分析模型在覆盖区域外的适用性，在建模区域的东部和南部额外选择了部分用户站用于评估模型在区域外的精度。如图4-3紫色所示，距离模型中心最近的测站是GSXI（1188公里）和GSLE（1245公里），模型覆盖半径为976.8公里。图4-10展示了不同测站处模型精度与其距模型中心距离的关系。由图可知，随着距离增加模型性能急剧下降，特别是当距离超过1500公里时。在这种情况下，电离层系数不再有助于改善PPP解算，甚至可能引入负面影响。然而，在覆盖区域边缘，即使距离超过覆盖半径（最远至1300公里），模型仍然有效，在此距离之内精度仍优于0.55 TECU。此外由图4-10可以看出，位于覆盖区域南部的YNDQ（1921公里）和YNGS（1975公里）测站，其电离层精度最差达到18.0 TECU；相比之下位于覆盖区域东部的最远测站AXYJ（2174公里）和AXCU（2179公里）电离层模型精度则衰减得较慢，其精度约为10 TECU。这说明电离层模型精度在向南方向比向东方向衰减得更显著，这一信息对用户至关重要，用户可以据此调整大气参数的约束方差，以获得更好的PPP-RTK结果。

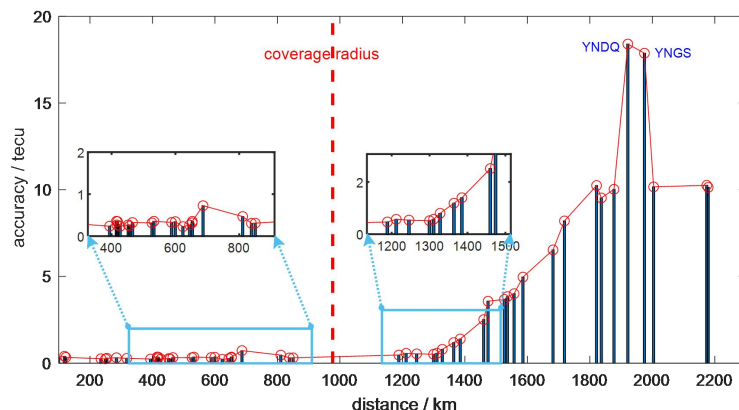


图 4-10 模型误差精度随距离的变化

Figure 4-10 Accuracy of model error with respect to distance

4.3 局域电离层建模

广域电离层模型提供了大尺度的电离层延迟改正,但由于电离层的空间非均匀性和小尺度扰动,广域模型在局部区域的精度可能不足以满足PPP-RTK快速收敛的需求。局域电离层建模旨在利用用户周围更为密集的参考站信息,进一步提高电离层改正的精度,实现从广域到局域的多尺度增强。

4.3.1 局域斜向电离层建模

传统电离层建模方法基于薄壳假设,将三维电离层简化为二维薄壳,通过映射函数将斜向延迟转换为垂直延迟进行建模。然而,薄壳假设在低仰角和高电离层活动条件下会引入显著的建模误差^[236]。斜向电离层建模直接对斜向电离层延迟进行建模,避免了映射函数误差的影响。

对于小范围内的地基增强网,由于各测站与卫星连线对应的穿刺点位置差异不大,各视线方向电离层延迟也相近,因而常常对斜向的电离层延迟直接建模,这样可以显著地提高电离层模型的精度。采用一阶多项式模型拟合斜向电离层建模,其原理可用如下公式表示^[237-238]:

$$\begin{aligned} \tilde{I}^j &= I^j + \beta(DCB_r - DCB^j) \\ I^j &= a_0 + a_1(lat^j - lat_0^j) + a_2(lon^j - lon_0^j) \end{aligned} \quad (4-14)$$

式中, lat^j 和 lon^j 为卫星穿刺点的经纬度; lat_0^j 和 lon_0^j 为区域参考点对应的穿刺点经纬度,区域的参考点一般取所有测站的中心位置; a_i 为待求解的模型系数,其他参数意义同上。公式(4-15)中,接收机硬件延迟 DCB_r 难以实时估计,且在模型中无法和模型 a_0 分离。为方便使用,通常构建星间单差方程对电离层进行建模,假设参考星为 ref,此时公式(4-15)可改写为:

$$\begin{aligned}
I^j - I^{ref} &= \tilde{I}^j - \tilde{I}^{ref} - DCB^j + DCB^{ref} \\
&= a_0^j + a_1^j (lat^j - lat_0^j) + a_2^j (lon^j - lon_0^j) \\
&\quad - (a_0^{ref} + a_1^{ref} (lat^{ref} - lat_0^{ref}) + a_2^{ref} (lon^{ref} - lon_0^{ref}))
\end{aligned} \tag{4-15}$$

当卫星 j 的观测方程个数超过 4 个后，上述观测方程模型系数可以采用最小二乘或者滤波解算进行估计。为了保证球谐系数的时间连续性，一般推荐采用 Kalman 滤波进行参数估计，过程噪声根据经验设置。一般的，当建模区域变得比较大时，模型精度会逐步降低，比如覆盖范围超过 200 km，可以通过提高多项式模型的阶数来改善建模的精度。

4.3.2 局域-残差格网模型

为了兼顾局域模型精度和区域覆盖范围，还可以采用局域模型+残差格网的多尺度电离层增强策略来改善区域电离层模型的使用效果，其实现过程如下：

(1) 局域斜向电离层建模。首先按 4.3.1 中的方法，采用多项式模型对局域大气进行建模。

(2) 测站模型残差计算。利用 (1) 中的模型计算各参考站位置处的电离层改正值，然后再计算模型残差：

$$\delta I^j = \tilde{I}^j - I_{model}^j \tag{4-16}$$

其中， \tilde{I}^j 为从 PPP-IAR 固定解提取的真实电离层延迟， I_{model}^j 为根据区域模型的计算获得的测站位置处的模型值，残差 δI^j 反映了区域多项式模型未能捕捉的局部电离层变化项。

(3) 残差格网建模。将残差在规则格网上进行插值，建立残差格网模型，对于格网点处的残差值计算，可以采用反距离加权插值或 Kriging 插值方法^[239-240]。格网分辨率根据参考站密度确定，通常可取 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 至 $1^\circ \times 1^\circ$ 。空间插值时权重与参考站到用户站的距离成反比，可表示为：

$$w_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n d_j^{-p}} \tag{4-17}$$

其中， d_i 为第 i 个参考站到格网点的距离， p 为距离衰减指数（通常取 2）。

(4) 用户端电离层改正。用户端的电离层改正由局域多项式模型和局域残差两部分组成，其计算过程和建模过程相反：

$$I_{corr}^j = \delta I_{grid}^j + I_{model}^j \tag{4-18}$$

其中， δI_{grid}^j 为格网残差模型计算的局域残差电离层改正部分，通常取最近格网点残差或者周边多个格网点残差通过内插得到。

局域-残差格网模型使用灵活，可以根据实际的测站分布、覆盖范围等条件灵活地考虑是否需要增加残差格网模型。这种多尺度策略的优势在于局域模型捕捉了电离层的大尺度结构，残差格网补偿了小尺度变化和建模误差，两者结合可

以提供厘米级的电离层改正精度。此外，局域-残差格网模型还可以更进一步扩展为广域-局域-残差等多级的电离层建模方案，这种方案可以灵活适配不同区域不同测站分布的情况，大大改善了模型的整体实用性和模型精度。

4.3.3 局域电离层模型精度分析

4.3.3.1 实验设计

为了验证局域大气建模的效果，下面以武汉地区为例，采用该区域内密集的参考站进行区域大气建模。图 4-11 给出了武汉及周边区域参考站以及监控站分布情况，该区域内建模测站平均站间距为 45.38 km。采用局域-残差模型时，残差格网分辨率设置为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

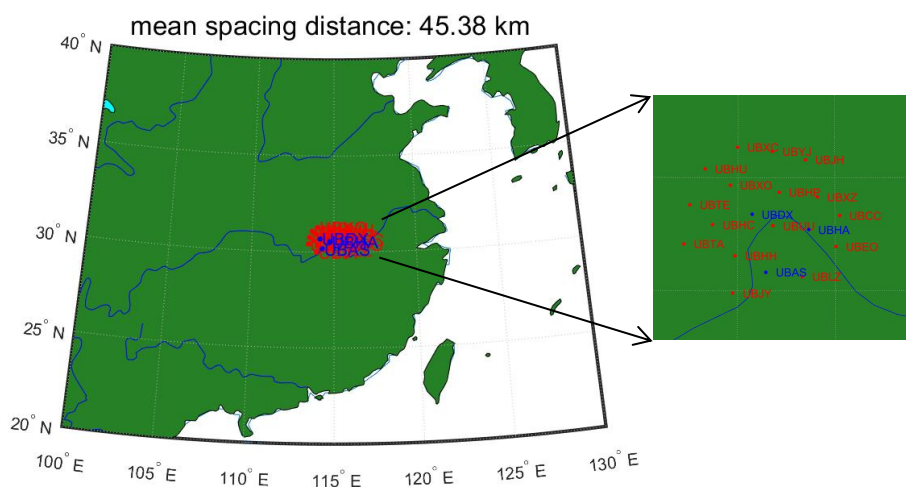


图 4-11 武汉及周边区域参考站（红色）以及监控站（蓝色）分布图

Figure 4-11 Distribution of stations used for ionospheric modelling and for monitoring around WUHAN area

4.3.3.2 局域模型精度分析

(1) 多项式建模精度

图 4-12 给出了区域内建模站 UBHH 局域电离层模型值与提取值各颗卫星的差异，图中不同颜色代表不同的卫星，左图卫星截止高度角为 13° ，右图卫星截止高度角为 20° 。由图可知，UBHH 站模型值和提取值的差异比较小，平均误差在 0.01-0.02 m；且 99% 以上的差异均在 0.05 m 之内。此外，从左边子图还可以看出，不少卫星在刚进入观测或者即将离开观测时，其模型误差存在明显的上升趋势，最大差异可以达到 0.10 m 以上。将卫星高度角限制在 20° 以上时，模型误差超过 0.05 m 的历元数显著地降低，由原来的 0.95% 下降到 0.47%。

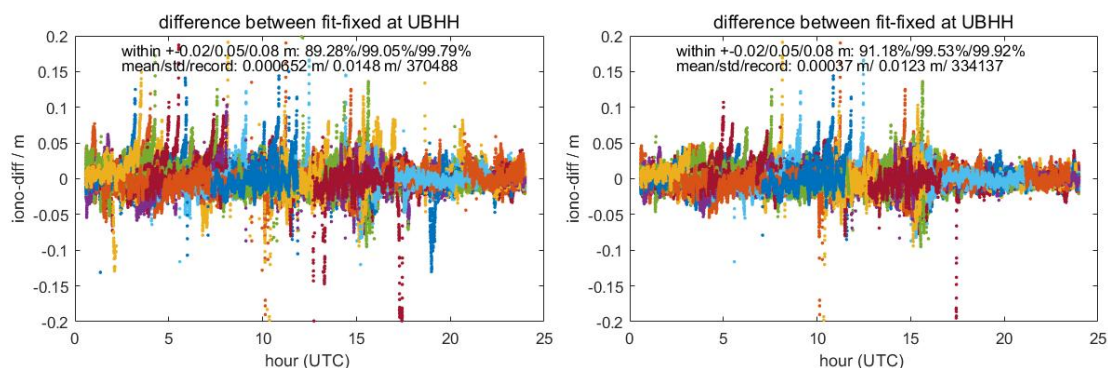


图 4-12 UBHH 站局域电离层模型值与提取值差异

Figure 4-12 Difference between local model value and GF retrieved ionosphere at UBHH

图 4-13 给出了区域内监控站 UBAS 局域电离层模型值与提取值各颗卫星的差异，图中不同颜色代表不同的卫星，左图卫星截止高度角为 13° ，右图卫星截止高度角为 20° 。由图可知，UBAS 模型值和提取值的差异较建模站 UBHH 有所增大，平均误差在 0.02 m 左右；差异在 0.05 m 之内的比例下降 2% 左右。同时，由图还可以看出，部分卫星在高度角变低后，模型值和提取值的差异逐步变大，最大可达到 0.30 m，但差异超过 0.10 m 的比率总体在 1% 以内。此外，将截止高度角增加到 20° 后，误差超过 0.05 m 和 0.08 m 的比例均分别降低了 0.57% 和 0.23%，这也客观说明在低高度角时模型的精度有所降低。

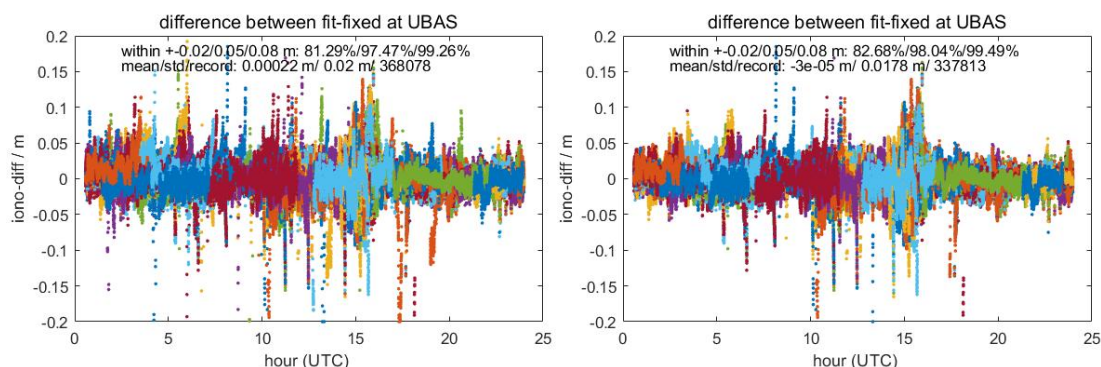


图 4-13 UBAS 站局域电离层模型值与提取值差异

Figure 4-13 Difference between local model value and GF retrieved ionosphere at UBAS

图 4-14 给出了高度角为 13° 区域内所有站连续多天模型精度的统计值，红色虚线左边为建模站，右边为监控站。由图可知，所有建模站的模型精度在 0.008 m-0.015 m 之间，平均值模型精度为 0.011 m，且 99.5% 的差异小于 0.05 m，99.99% 以上的差异小于 0.08 m，这表明局域电离层模型内符合精度非常高。对监控站而言，其模型精度平均值为 0.023 m，且 96.5% 的差异小于 0.05 m，98.8% 以上的差异小于 0.08 m。虽然监控站结果较参考站精度有所变差，但仍然能保证 95% 以上的误差小于 0.05 m；如果适当调整截止高度角到 20° ，那么终端定位获取到的各卫星电离层改正数将能保证 97.4% 优于 0.05 m，这完全可以满足终端 PPP-RTK

数十秒内实现定位收敛的要求。

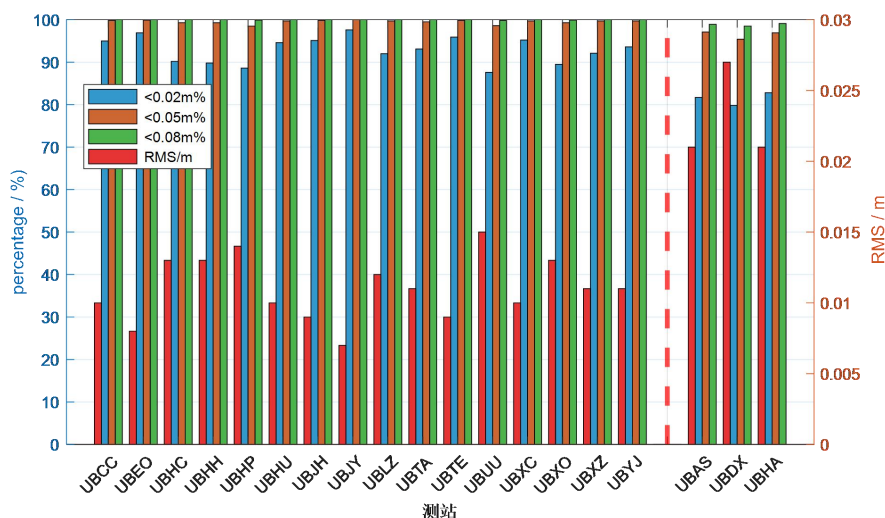


图 4-14 局域电离层模型在不同位置处的统计精度
Figure 4-14 Ionosphere Accuracy of local model at different sites

(2) 局域-残差格网模型精度

图 4-15 给出了区域内建模站 UBHH 局域-残差电离层模型值与提取值各颗卫星的差异，图中不同颜色代表不同的卫星，上图卫星截止高度角为 13°，下图卫星截止高度角为 20°。由图可知，采用局域-残差电离层模型后，模型值和提取值的差异更小，平均误差小于 1 cm；且 99.5% 以上的差异均在 5 cm 之内，较单一局域模型均有明显的提升。此外，从下面子图还可以看出，将卫星高度角限制在 20° 以上时，模型精度的提升基本上已经很微弱了，这是由于采用 13° 高度角时局域-残差电离层模型精度已经非常高，且粗差概率也处在非常低的水平。

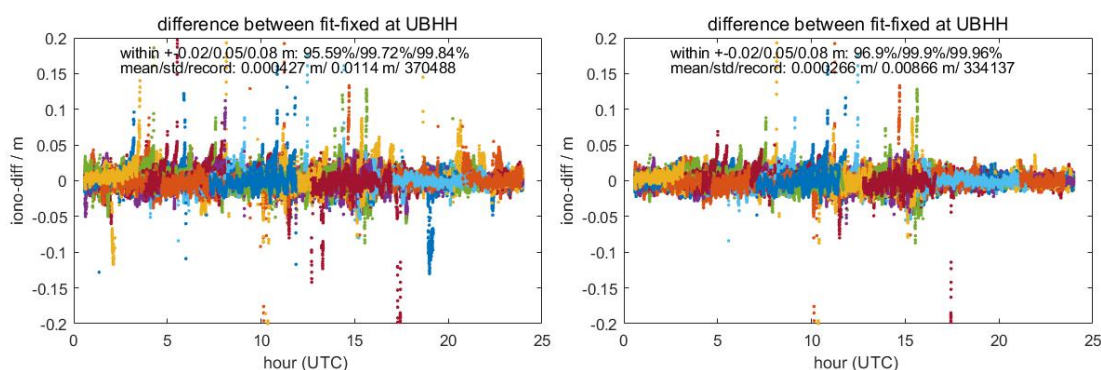


图 4-15 UBHH 站局域-残差电离层模型值与提取值差异
Figure 4-15 Difference between local-residual model value and GF retrieved ionosphere at UBHH

图 4-16 给出了区域内监控站 UBAS 局域-残差电离层模型值与提取值各颗卫星的差异，图中不同颜色代表不同的卫星，左图卫星截止高度角为 13°，右图卫

星截止高度角为 20°。由图可知，采用局域-残差电离层模型后，模型值和提取值的差异更小，平均误差在 0.015-0.02 m 之间；差异在 0.05 m 之内的比例超过 98.1%。需要指出的是，虽然局域-残差模型精度有了进一步的提升，但在低高度角时 PPP-IAR 模糊度错误固定并无改变，因而误差超过 dm 的情况仍然存在。

图 4-17 给出了高度角为 13°区域内所有站连续多天局域-残差模型精度的统计值，红色虚线左边为建模站，右边为监控站。由图可知，所有建模站的模型精度在 0.008-0.010 m 之间，平均值模型精度为 0.008 m，较单一局域模型 (0.011 m) 提升了 27%；且模型误差小于 0.05 m 的比例为 99.90%，误差小于 0.08 m 的比例为 99.99%。对监控站而言，其模型精度平均值为 0.020 m，较单层模型 (0.023 m) 提升了 13%；且模型误差小于 0.05 m 的比例为 97.8%，误差小于 0.08 m 的比例为 99.3%。整体而言，采用局域-残差电离层模型后，电离层模型的精度较单一局域模型提升在 10% 以上。

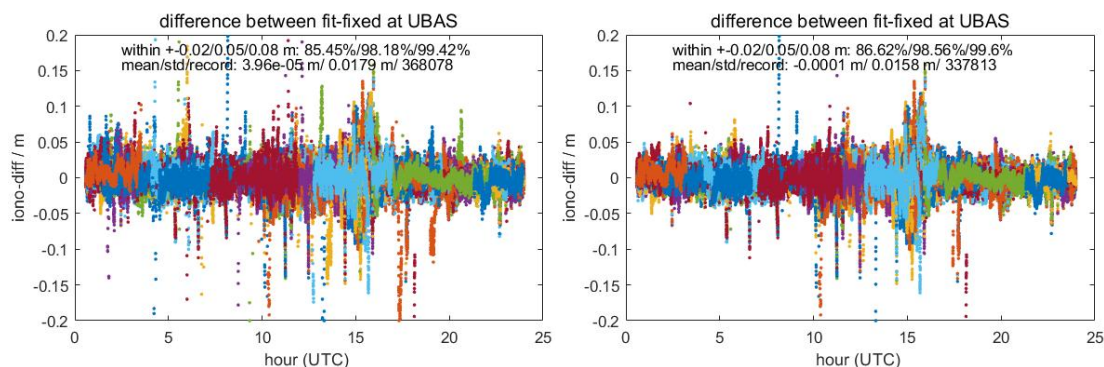


图 4-16 UBAS 站局域-残差电离层模型值与提取值差异

Figure 4-16 Difference between local-residual model value and GF retrieved ionosphere at UBAS

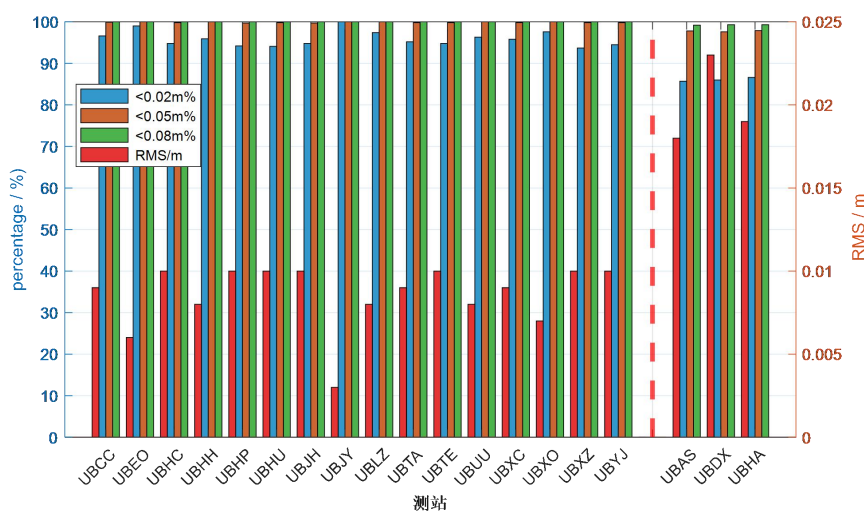


图 4-17 局域-残差电离层模型在不同位置处的统计精度

Figure 4-17 Ionosphere Accuracy of local-residual model at different sites

4.4 广域/局域对流层建模

对流层延迟虽然不具有色散特性，但其空间变化，特别是高程方向的变化对 PPP-RTK 定位精度有重要影响。精确的对流层建模可以加速 PPP-RTK 的收敛过程，特别是在高程方向上^[241]。整体而言，对流层的空间变化较电离层明显小很多，因而针对对流层的建模一般不再区分局域和广域，而采用统一的方法。

4.4.1 对流层建模

4.4.1.1 高程归算

对流层延迟随高程的变化非常显著，天顶湿延迟在低海拔地区可达 200-300 mm，而在高海拔地区可能仅有数十毫米。在 PPP-RTK 服务中，参考站和用户站之间的高程差异会导致对流层改正的系统偏差，因此在使用对流层产品需要进行高程归算，高程改正的精度直接影响 PPP-RTK 在山区等高程变化剧烈地区的性能。同理，在区域对流层建模前也需要将各个测站提取的对流层延迟进行高程归算。天顶干延迟的高程归算比较简单，可以将 h_0 和 h 代入公式(4-19)计算出高程差导致的对流层差异。

天顶湿延迟的高程归算通常采用指数衰减模型^[242]：

$$ZWD(h) = ZWD(h_0) \cdot \exp\left(-\frac{h-h_0}{\lambda_{ZWD}}\right) \quad (4-19)$$

其中， h_0 为参考高程， h 为目标高程， λ_{ZWD} 为经验的衰减因子，通常取 2000-3000 m。

4.4.1.2 多项式模型

由于对流层干延迟可以采用统一的模型准确的计算，因而在 PPP-RTK 应用中实际只需要对对流层湿延迟进行建模和播发。和电离层类似，对流层延迟改正建模同样也可分为垂向建模和斜向建模两种。垂向对流层建模较为简单，PPP 模糊度固定后直接将各个测站的天顶对流层延迟估计值作为输入量建模，然后采用多项式建模，其原理和电离层局域多项式建模相似，可以表示如下：

$$\begin{aligned} ZWD_r &= a_0 + a_1(lat_r - lat_0) + a_2(lon_r - lon_0) \\ ZWD_r &= ZTD_r - ZHD_m \end{aligned} \quad (4-20)$$

其中， ZTD_r 为各测站天顶对流层总延迟， ZWD_r 为各测站天顶对流层湿延迟估值， ZHD_m 为模型计算获得的干延迟； (lat_0, lon_0) 为建模的中心点，一般取所有测站的中心位置； (lat_r, lon_r) 为测站坐标经纬度。由于各个测站高程不同，因而在建模前还需要将各个测站处的天顶对流层延迟统一归算到椭球参考面。

斜向对流层建模和垂向建模类似，只不过输入量为公式(4-4)中获得的斜向对流层，其建模原理如下：

$$\begin{aligned} SWD_r &= a_0 + a_1(lat_r - lat_0) + a_2(lon_r - lon_0) + a_3(H_r - H_0) \\ STD_r &= SWD_r + m_r^j ZHD_m \end{aligned} \quad (4-21)$$

式中，由于输入量斜向对流层未进行高程归算，因而模型中还需要增加一个高程相关的模型系数。由于本研究面向卫星播发的 PPP-RTK 服务设计，斜向对流层模型需要消耗较大的播发带宽，实时应用时实用性不高，后续将不再分析。

4.4.2 格网对流层建模

实时播发对流层延迟参数时，考虑到播发带宽的影响，还可以采用格网对流层建模，将参考站的 ZWD 估计值插值到规则格网上。用户获得格网对流层改正参数后，即可计算任意位置处的 ZWD 改正。对流层湿延迟格网的建立过程和电离层残差格网的建模方法相似，可以归纳如下：

(1) 对流层天顶湿延迟高程归算。首先从各参考站的 PPP-IAR 固定解中提取天顶湿延迟估计值，然后对各参考站的 ZWD 进行高程归化，将其统一到参考高程面，高程归算方法参照公式 (4-19)。

(2) 在规则格网上进行格网建模。将归算后的 ZWD 在规则格网上进行插值，建立 ZWD 格网模型，对于格网点处的 ZWD 计算，可以采用反距离加权插值或 Kriging 插值方法^[239-240]。格网分辨率根据参考站密度确定，通常对于局域对流层建模可取 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 至 $1^\circ \times 1^\circ$ ；对于广域对流层建模可取 $2^\circ \times 2^\circ$ 至 $3^\circ \times 3^\circ$ 。

(3) 用户端对流层延迟改正。用户端在获得区域内所有格网点数据后，查找最近的几个格网点对流层延迟改正，然后根据距离内插出得到用户位置处参考高程面上的 ZWD 值；然后利用高程归算公式将 ZWD 从参考高程面转换到用户实际高程。

4.4.3 对流层模型精度分析

4.4.3.1 实验设计

为了便于对比广域模型和局域模型的精度，因而选择的广域和局域模型的实验区域存在重叠，重新选择了广域对流层建模测站其分布图如图 4-18 所示。由于区域覆盖范围大，采用多项式模型数据量大，因而广域对流层建模一般采用格网天顶 ZWD 建模，格网分辨率采用 $2^\circ \times 2^\circ$ ，图中蓝色星号表示格网点分布，部分边缘区域由于测站较少模型系数无法计算，故而没有格网点。局域对流层建模则采用和 4.3.3.1 中相同的测站配置，由于所选区域较小因而无需划分区域。具体的测站分布情况，此处不再重复介绍。

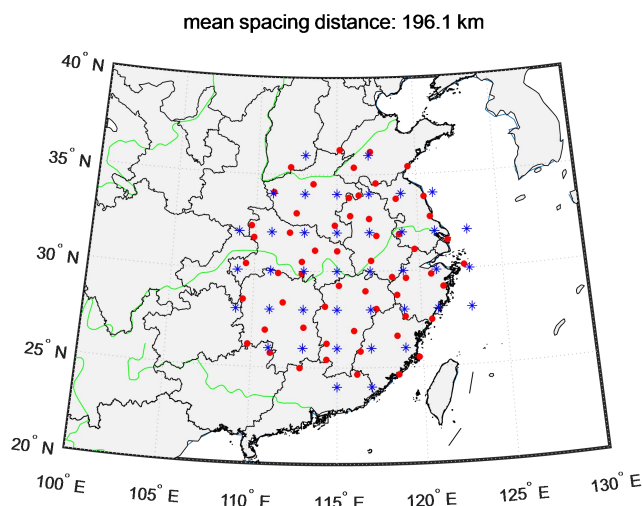


图 4-18 广域对流层建模测站（红色）和格网点（蓝色）分布图

Figure 4-18 Distribution of stations and grid points for Regional ZWD Modelling

4.4.3.2 广域对流层模型精度

对流层模型的精度评价和电离层模型类似，均是利用测站位置处提取对流层延迟和利用模型系数计算获得的模型值作对比，两者的差异可以用来衡量模型的精度。

图 4-19 给出了区域内建模站 AHFU（左）和 FJCT（右）天顶对流层模型值与提取值的差异。由图可知，天顶方向对流层模型值（红色）和提取值（蓝色）非常接近，其中 AHFU 站 ZWD 的差异小于 0.02 m 的比例达到 100%，FJCT 站 ZWD 的差异小于 0.02 m 的比例略低，但也超过 85%。全天统计结果表明，虽然距离格网点距离超过 100 km，但模型仍然具有比较高的精度，AHFU 和 FJCT 站全天差异的 RMS 分别为 0.0050/0.0069 m。图 4-20 给出了区域内监控站 GDYY（左）和 SDZS（右）天顶对流层模型值与提取值的差异。和建模站的情况类似，监控站对流层模型值和提取值差异也基本上均在 2 cm 之内，GDYY 和 SDZS 站全天差异的 RMS 分别为 0.0026/0.0046 m。

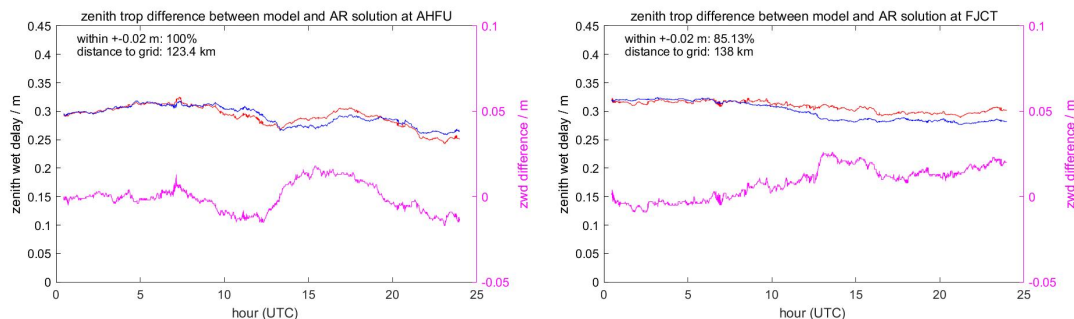


图 4-19 建模站 AHFU 和 FJCT 天顶对流层模型值与提取值差异

Figure 4-19 ZWD Difference between modeled and PPP estimated at AHFU and FJCT

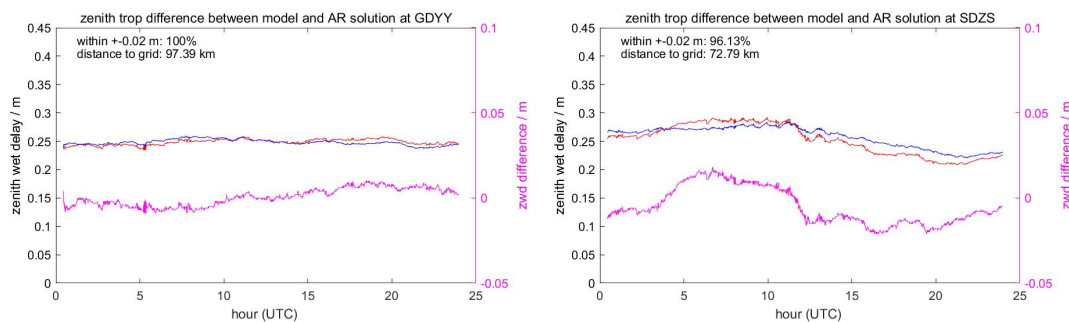


图 4-20 监控站 GDYY 和 SDZS 天顶对流层模型值与提取值差异

Figure 4-20 ZWD Difference between modeled and PPP estimated at GDYY and SDZS

图 4-21 给出了区域内所有监控站连续多天模型精度的统计值，由图可知，区域内所有监控站对流层精度非常相近，仅测站 UNNM 由于离格网点距离较远（132 km）模型平均精度达到 0.013 m，其余测站精度均在 mm 级别；所有测站对流层模型平均精度为 0.004 m；且模型误差小于 0.020 m 的比例也达到 96.1%。建模站数量较多，未在图中给出，不同站模型精度在 0.005-0.010 m 之间，平均值模型精度为 0.003 m，且模型误差小于 0.020 m 的比例平均为 97.8%。整体而言，对流层模型具有较高的精度，无论是内符合还是外符合，其精度基本可以保证在 0.01-0.02 m。

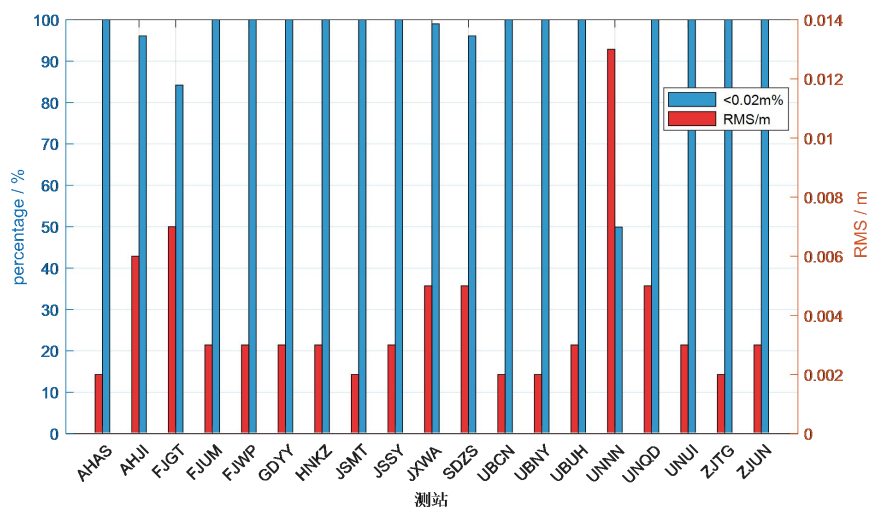


图 4-21 广域天顶对流层模型在不同位置处的统计精度

Figure 4-21 ZWD Accuracy of regional model at different sites

4.4.3.3 局域对流层模型精度

图 4-22 给出了区域内建模站 UBHU（左）和 UBLZ（右）天顶对流层模型值与提取值的差异。由图可知，天顶方向对流层模型值（红色）和提取值（蓝色）非常接近，两个站差异在 0.02 m 之内的占比均为 100%，UBHU 和 UBLZ 站全天差异的 RMS 分别为 0.0019/0.0010 m。图 4-23 给出了区域内监控站 UBAS（左）

和 UBDX（右）天顶对流层模型值与提取值的差异。和建模站的情况类似，监控站对流层模型值和提取值差异也均在 0.020 m 之内，UBAS 和 UBDX 站全天差异的 RMS 分别为 0.0021/0.0028 m。

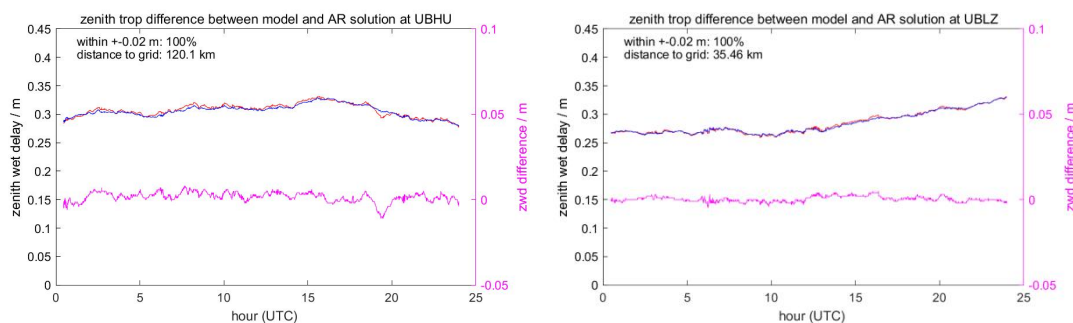


图 4-22 建模站 UBHU 和 UBLZ 天顶对流层模型值与提取值差异

Figure 4-22 ZWD Difference between modeled and PPP estimated at UBHU and UBLZ

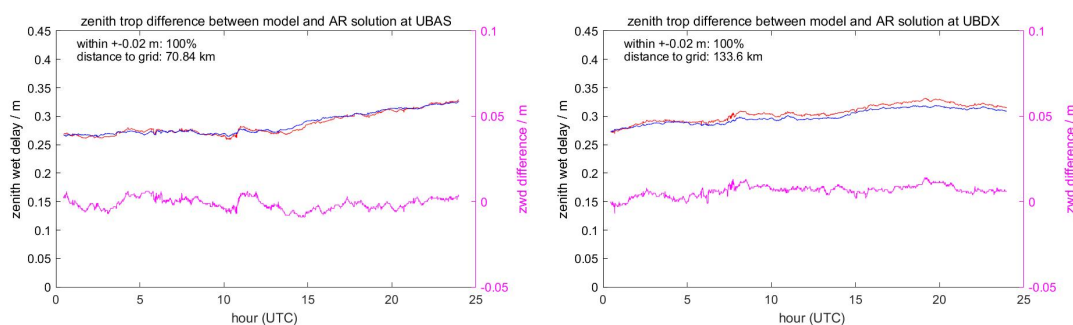


图 4-23 监控站 UBAS 和 UBDX 天顶对流层模型值与提取值差异

Figure 4-23 ZWD Difference between modeled and PPP estimated at UBAS and UBDX

图 4-24 给出了区域内所有站连续多天模型精度的统计值，红色虚线左边为建模站，右边为监控站。由图可知，所有建模站的模型精度在 0.001-0.005 m 之间，平均值模型精度为 0.0026 m，且模型误差小于 0.020 m 的比例平均为 100.0%。区域内所有监控站对流层精度和建模站结果非常相近，对流层模型平均精度为 0.0027 m；且模型误差小于 0.020 m 的比例也达到 100.0%。整体而言，局域对流层模型具有较高的精度，无论是内符合还是外符合，其精度基本可以保证在 0.01 m 之内。

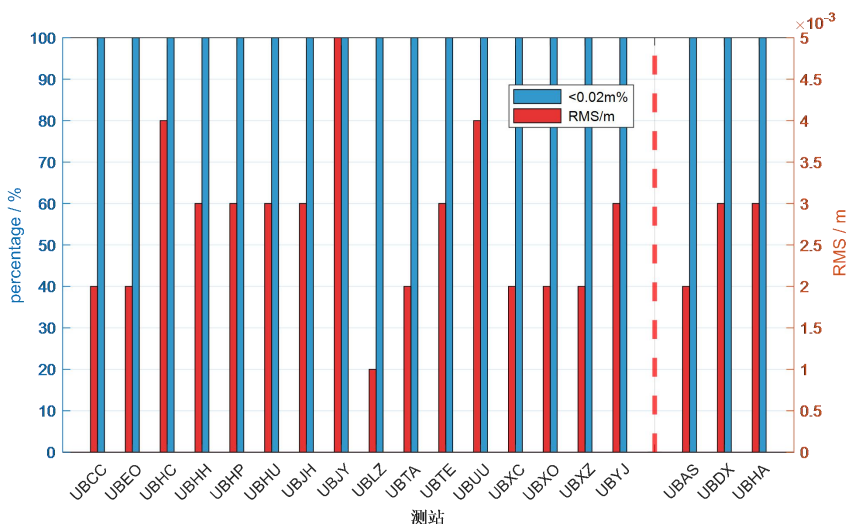


图 4-24 局域天顶对流层模型在不同位置处的统计精度
Figure 4-24 ZWD Accuracy of local model at different sites

4.5 PPP-RTK 定位验证

4.5.1 PPP-RTK 定位策略

终端用户在获得大气改正参数后，为了加速 PPP 收敛需要将其引入到观测方程。通常将获得的大气参数用来构建一个额外的伪观测方程，以电离层约束为例，其方法如下[243]：

$$v = \tilde{I}^j - (I_m^j + DCB_r), \quad \sigma_{I_m}^2 \quad (4-22)$$

其中， I_m^j 为根据模型参数计算获得电离层延迟， $\sigma_{I_m}^2$ 为模型的计算精度， \tilde{I}^j 同上为观测方程待估参数。由于接收机 DCB_r 未知且通常不单独估计，因而公式(4-22)实际需要采用单差的形式以消除接收机 DCB_r ，即：

$$v' = v_j - v^{ref} = (\tilde{I}^j - I_m^j) - (\tilde{I}^{ref} - I_m^{ref}), \quad \sigma_{I_m}^2 + \sigma_{I_m^{ref}}^2 \quad (4-23)$$

同理对流层延迟也可以构建如下所示的伪观测方程：

$$v_T = T - T_m, \quad \sigma_{T_m}^2 \quad (4-24)$$

其中， T_m 为根据模型参数计算获得的对流层延迟， $\sigma_{T_m}^2$ 为对应的模型计算精度。公式(4-23)和公式(4-24)联合公式(2-41)便可实现终端PPP-RTK定位，实现PPP的快速收敛。

4.5.2 PPP-RTK 结果验证

4.5.2.1 不同系统的 PPP-RTK 对比

PPP 快速收敛得益于越来越多的可用卫星，采用多系统解算可以极大地改善卫星的几何分布，从而加快参数的分离。图 4-25 给出了不同站采用广域大气时

利用不同的卫星系统组合进行 PPP-RTK 定位的结果,图中测站采用 1 s 采样间隔的 CORS 站数据,且每个小时重置解算一次。由图可知,采用 GPS/GLONASS 双系统解算时定位结果较差,具体表现为收敛慢,定位精度也显著下降,大量弧段存在不收敛或定位波动大的现象;采用 GPS/GLONASS/BDS 三系统解算时,定位精度的稳定性得到改善,但还存在部分时间收敛较慢的情况。所有测站统计结果表明,采用 PPP-RTK-GR 解算时 95%的弧段首次固定时间为 2406 s,且存在部分时段 1 小时内仍然无法实现正常模糊度固定的情况;采用 PPP-RTK-GRC 解算时收敛速度得到显著的改善,95%/99%的弧段首次固定时间为 92/239 s;采用 PPP-RTK-GRCE 解算时 95%/99%的弧段首次固定时间为 77/85 s。实验结论进一步说明,PPP 的收敛速度高度依赖卫星数,在卫星数较少或者环境存在遮挡情况下,PPP 的定位效果将严重受影响。

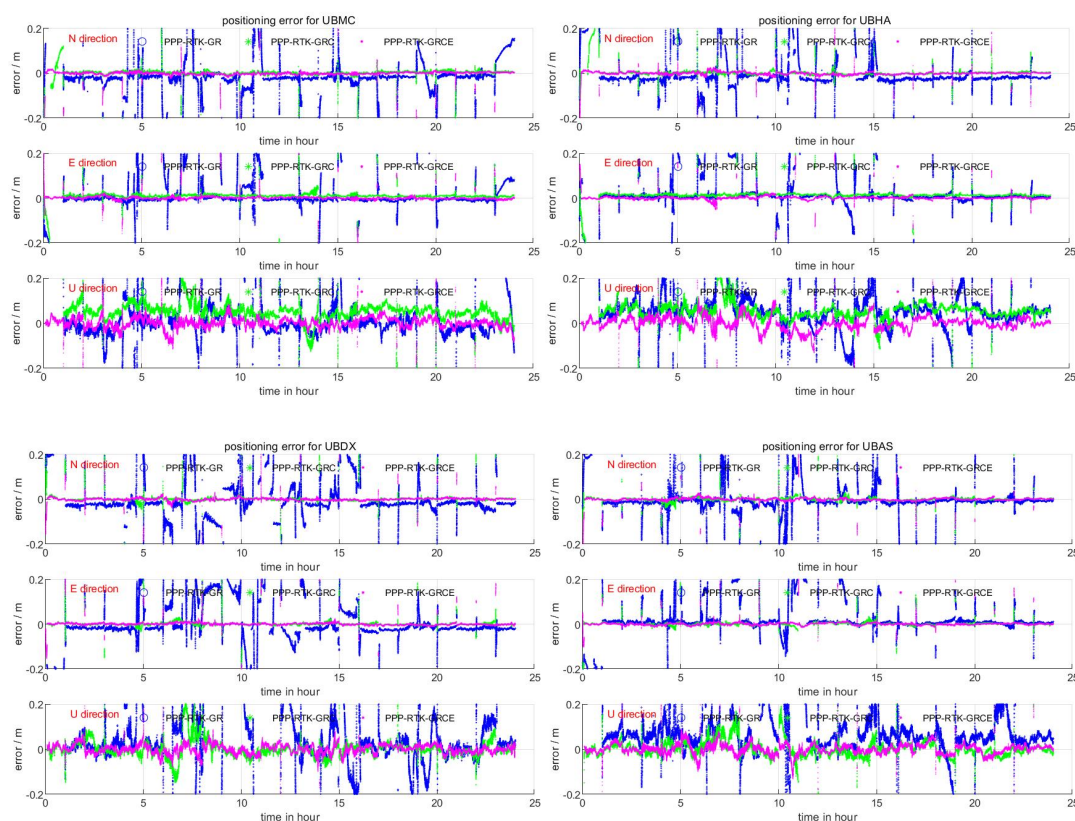


图 4-25 采用不同卫星系统 PPP-RTK 定位结果对比
Figure 4-25 PPP-RTK solution for stations with different systems

4.5.2.2 不同频点的 PPP-RTK 对比

采用三频或者多频观测值时,一方面由于可以构建多种超宽巷组合观测值,通过超宽巷模糊度固定来加速收敛;另一方面引入了更多的观测值也可以改善方程的结果,预处理等过程中质量控制策略也可以得到改善,因而多频观测值的引入已知是 PPP 性能提升的重要因素。

图 4-26 给出了不同站分别各个系统采用不同频率的定位结果对比, 图中 G2 代表采用 L1/L2, E2 采用 E1/E5a, C2 代表采用 B1/IB3I, G 代表采用 L1/L2/L5, E 采用 E1/E5a/E5b, C 代表采用 B1I/B3I/B2a/B2I, 全系统多频结果在 4.5.2.1 中已经给出, 此处不再重复介绍。整体而言, 采用双频解算时, 定位精度和收敛有一定的降低, 但 PPP 还是保持了较快的收敛速度和较高的定位精度。所有测站统计结果表明, 不同频率组合解算, 其水平/高程定位精度均优于 0.02/0.04 m。然而, 采用不同频率组合时, 收敛速度的差异比较明显, 比如全系统均采用双频时, 95%的时段收敛速度为 96 s, 而 BDS/GAL 系统采用双频时 95%的时段收敛速度为 89 s, 仅 BDS 采用双频时 95%的时段收敛速度为 86 s; 全系统采用三频时 95%的时段收敛速度为 77 s。

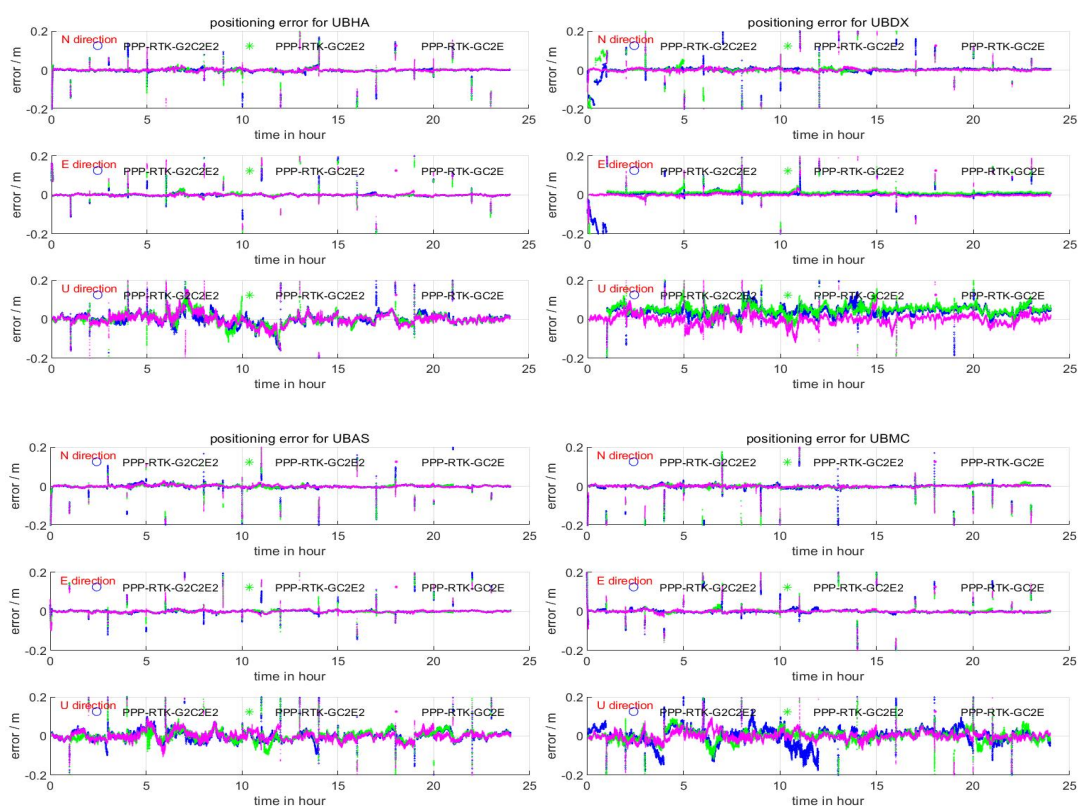


图 4-26 采用不同频率组合的 PPP-RTK 定位结果对比

Figure 4-26 PPP-RTK solution for stations with different frequencies

4.5.2.3 不同尺度大气的 PPP-RTK 对比

不同尺度的大气产品其精度不同, 那么在 PPP-RTK 解算时引入大气约束施加的约束方差必然有区别。如果大气产品精度不够而仍然给与较高的权重约束, 那解算过程不但起不到约束效果反而可能存在负面效果; 反之, 如果产品精度足够高, 而给予的约束方差过大, 那么则无法起到加速 PPP-RTK 收敛的效果, 因而大气产品的精度需要和约束条件适配, 才能起到加速收敛的正向效果。本节验证时, 根据电离层模型实际的评估结果, 采用经验的约束方差, 如局域大气电离

层约束方差采用 0.05 m，广域大气约束方差采用 0.10 m，对流层均采用 0.02 m 约束方差。

图 4-27 给出了不同站分别采用 PPP-IAR，PPP-RTK-regional（广域大气）和 PPP-RTK-local（局域大气）产品的定位结果对比，图中采用的为 1 s 采样间隔的 CORS 站数据，且每个小时重置解算一次。整体而言，由于 CORS 站观测环境较好，即使是 PPP-IAR 收敛速度也较快，定位精度水平方向优于 0.02 m，高程方向优于 0.04 m。所有测站统计结果表明，采用 PPP-IAR 解算时 95%/99% 的弧段首次模糊度固定的时间为 98/114 s；采用 PPP-RTK-regional 解算时 95%/99% 的弧段首次模糊度固定的时间为 77/85 s；采用 PPP-RTK-local 解算时 95%/99% 的弧段首次模糊度固定的时间为 53/72 s。引入广域大气后，平均收敛时间由 59.4 s 变为 43.8 s，缩短了 26.3%；引入局域大气后收敛速度又进一步缩短了 27.6%，平均收敛速度达到 27.4 s 以内。

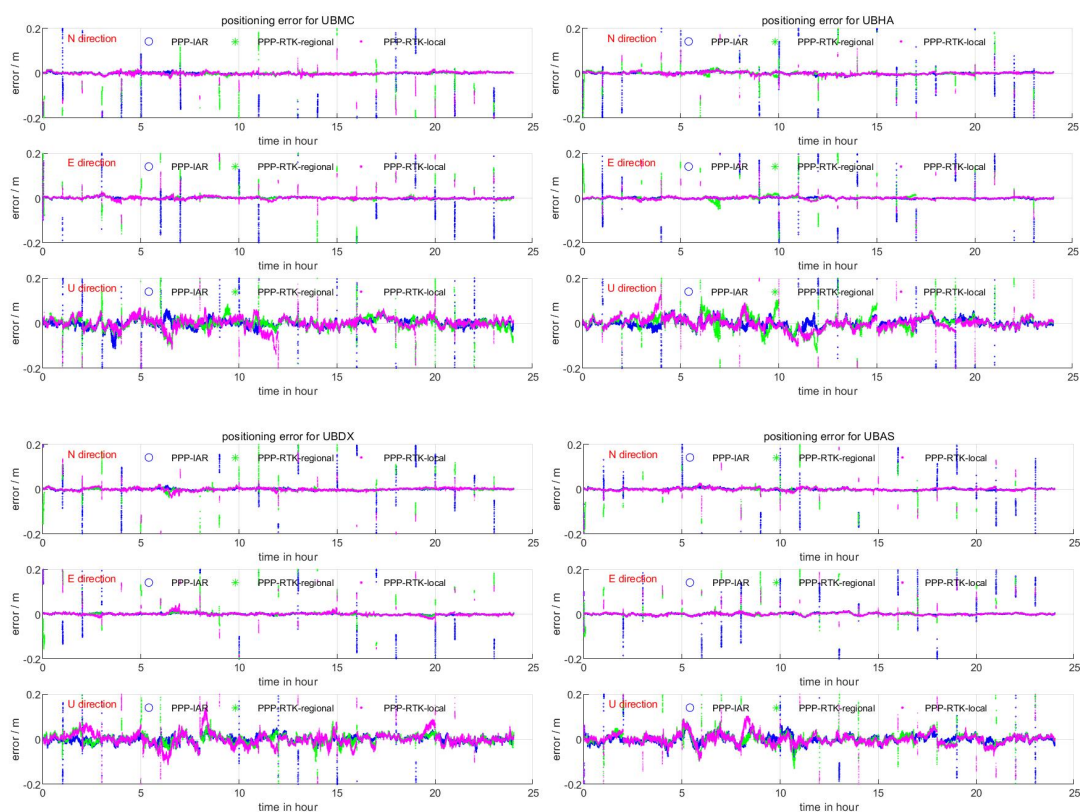


图 4-27 采用不同大气产品 PPP-RTK 定位结果对比

Figure 4-27 PPP-RTK solution for stations with different atmospheric products

4.6 本章小结

本章围绕多尺度大气建模及实时 PPP-RTK 服务展开，系统研究了大气延迟提取、广域和局域电离层建模、对流层建模以及 PPP-RTK 增强服务初步验证。主要研究内容和结论如下：

(1) 大气延迟提取精度分析。本章基于 PPP-IAR 固定解提取的大气，利用并址站分析可知，电离层和对流层提取的精度分别可以优于 0.020/0.003 m。

(2) 广域电离层建模。本章提出了一种顾及卫星空间差异的 Sat-ASHF 模型，通过为每颗卫星估计独立的球谐系数，消除了卫星间建模误差的交叉污染。实验结果表明，改进 Sat-ASHF 模型在建模站上的平均精度为 0.252 TECU，明显优于传统的 GIM 模型，提升幅度超过 90%。

(3) 局域电离层建模。本章设计了局域-残差格网的多尺度电离层增强策略，在局域模型的基础上利用局部参考站的残差信息进行精化改正。多尺度模型在站间距 50-100 km 的网络中可提供 0.02 m 的电离层改正精度，较单独使用局域模型提升 13%。

(4) 对流层建模。本章建立了基于格网插值的实时对流层湿延迟模型，结合高程归算为不同高程的用户提供对流层改正。其中，广域对流层格网模型的精度优于 0.02 m，局域对流层格网模型的精度优于 0.01 m。

(5) PPP-RTK 增强服务验证。基于上述不同尺度大气建模方法，设计并验证了实时 PPP-RTK 增强服务系统。实验结果表明，基于 CORS 站 1 s 静态数据验证表明，采用广域大气的 PPP-RTK 的平均固定时间由约 1 min 缩短到 43.8 s，较 PPP-IAR 缩短了约 26.3%；采用局域大气的 PPP-RTK 的平均固定时间可以缩短到 27.4 s，较 PPP-IAR 的 59.4 s 缩短了约 53.8%。

第 5 章 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性监测

精密单点定位技术的快速发展,使得单站厘米级甚至毫米级的实时定位精度成为可能。然而,高精度定位服务在安全相关应用中的推广,不仅要求定位结果具有高精度,更要求系统能够及时检测并告警异常状态,即具备完好性保障能力。完好性是衡量服务系统可信度的核心指标,其本质是对服务性能是否超出允许范围的概率性保证。

本章系统介绍完好性的基本概念和指标体系,并在此基础上提出面向 PPP-IAR/PPP-RTK 增强服务的产品完好性设计,最后基于实际数据分析了本文提供的 PPP-IAR/PPP-RTK 增强服务对应的完好性监测及其性能表现。

5.1 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性设计

5.1.1 完好性设计标准

SBAS 通过地球静止轨道卫星向用户播发差分改正和完好性信息,是目前航空领域广泛使用的完好性增强方案,而 ICAO 中给出的告警门限也是针对 SBAS 系统而言的,其在不同的应用场景各个完好性指标如表 5-1 所示^{[100],[244]}。由于 SBAS 面向的用户是伪距单点定位,因而其指标相对较为宽松,而 PPP-RTK 技术采用相位观测值定位,对定位精度和实时产品性能要求更高。近年来,很多公开或私有的 PPP 增强服务陆续推向实际应用,相应的实时 PPP 增强服务的完好性理论等也逐步得到完善和更新。Fujita 等人为 QZSS 的 CLAS 服务设计相应的完好性功能,给出了区域增强系统中实施完好性监测的示例^[245]。此外,一些商业星基增强服务,如 Trimble 提出的 CenterPoint RTX 服务,也提供了其产品的完好性信息^[246-247]。

据此,本研究提出的 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性监测正是针对服务各类产品进行监控,在一定的完好性风险 IR 下及时将误差超限的产品警告通过网络或卫星播发给用户。监控的产品主要涉及轨道、钟差、相位小数偏差、对流层和电离层延迟等,由于轨道、钟差、相位小数偏差产品在用户端均反映在等效测距误差,因而实际监控时将这三类产品合并统一监控。

表 5-1 ICAO 对民航进近中的空间信号性能要求
Table 5-1 Requirements of Signal in Spaces in Category I precision approach

飞行阶段	水平精度/ 告警门限 (95%)	垂直精度/ 告警门限 (95%)	完好性	告警 时间	连续性	可用性
远洋航路	2.0/2.0 nmi	N/A	$1\sim 1\times 10^{-7}/h$	5 min	$1\times 10^{-4}/h\sim 10^{-8}/h$	0.99~0.99999
本土航路	0.4/1.0 nmi	N/A	$1\sim 1\times 10^{-7}/h$	15 s	$1\times 10^{-4}/h\sim 10^{-8}/h$	0.99~0.99999
NPA	220 m/0.3 nmi	N/A	$1\sim 1\times 10^{-7}/h$	10 s	$1\times 10^{-4}/h\sim 10^{-8}/h$	0.99~0.99999
APV-I	16/40 m	20/50 m	$1\sim 2\times 10^{-7}/h$	10 s	$1\sim 8\times 10^{-6}/15\text{ s}$	0.99~0.99999
APV-II	16/40 m	8/20 m	$1\sim 2\times 10^{-7}/h$	6 s	$1\sim 8\times 10^{-6}/15\text{ s}$	0.99~0.99999
CAT-I	16/40 m	4-6/10-15 m	$1\sim 2\times 10^{-7}/h$	6 s	$1\sim 8\times 10^{-6}/15\text{ s}$	0.99~0.99999
CAT-II/III	<6.5/ <17 m	<2.9/ 5.3 m	$1\sim 2\times 10^{-7}/h$	2 s	$<8\times 10^{-6}/15\text{ s}$	0.99~0.99999

5.1.2 PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性

PPP-IAR/PPP-RTK 服务完好性监测的输入为 PPP-IAR 服务生成的轨道、钟差、相位偏差产品和伪距偏差产品，以及 PPP-RTK 服务生成的电离层模型和对流层模型。图 5-1 展示了 PPP-IAR/PPP-RTK 增强服务与完好性监测的整体架构，以及服务产品和完好性数据在各个模块中的传输关系。整个系统包括：PPP-IAR 服务模块，PPP-RTK 服务模块，PPP-IAR 产品监控模块以及 PPP-RTK 大气产品监控模块，完好性信息的告警与播发等。

PPP-IAR 服务模块由实时精密定轨 RT-POD、实时精密钟差估计 RT-PCE、实时相位延迟估计 RT-UPD 以及事后差分码偏差估计 Post-DCB 组成。在 PPP-IAR 增强系统提供的实时改正信息基础上，PPP-RTK 服务模块结合区域参考站的模糊度固定解，可以进一步构建广域/局域电离层和对流层模型。当 PPP-IAR 改正数和 PPP-RTK 改正数生成后，这些信息被输入至完好性系统。在 PPP-IAR 的完好性系统中，依次生成轨道/钟差/UPD 产品的综合质量指标(Quality Indicator, QI)及完好性信息。PPP-RTK 完好性系统中，利用输入的大气模型产品可进一步生成相应的大气质量指标与完好性信息。要特别指出的是，用于完好性监测的监测站与用于改正数生成的参考站相互独立。最终，所有改正数及 QI 信息通过播发系统传输，并通过 L 波段卫星上行发送至终端用户。此外，当任一改正产品的 QI 值超过完好性系统定义的保护界限时，系统将生成完好性告警信息并向用户广播。

本文所提出的完好性监测方法，其 QI 的生成基于有限数量独立监测站的残差统计量完成，因而计算量并不大。当出现数据中断或可用卫星数量不足时，QI 估计将暂时中止，并持续发布完好性告警，直至系统恢复可靠估计，从而确保在不利环境条件下仍具备稳健性能。

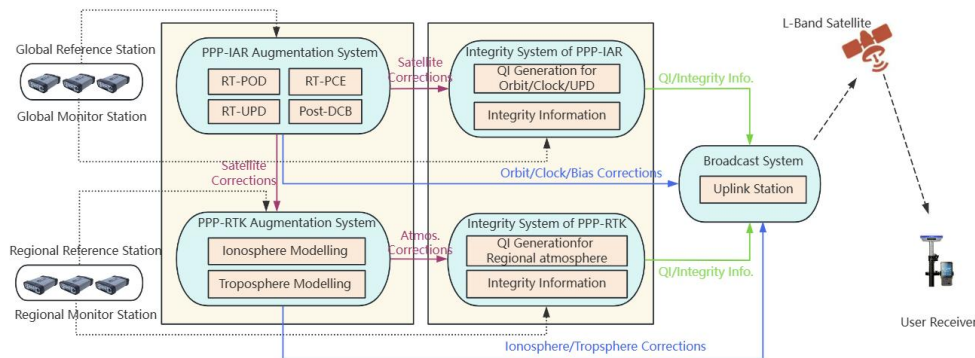


图 5-1 PPP-IAR/PPP-RTK 服务及其完好性监测示意图

Figure 5-1 Flow chart of Integrity and PPP-IAR/PPP-RTK augmentation system

类似于民航领域的完好性要求，其基本原则是依据相关安全标准进行定义。根据《道路车辆功能安全标准》ISO 26262，汽车安全完整性等级（Automotive Safety Integrity Level, ASIL）划分为 A 至 D 四个等级，其对应的完好性风险范围为 10^{-5} 至 10^{-8} /小时^[248]。 10^{-8} /小时完好性风险指标主要是面向无人自动驾驶等生命安全相关的领域，本文主要面向的是农业自动驾驶和测量测绘等领域，因而选取每小时 10^{-5} 的完好性风险作为完好性系统的设计目标。此外完好性事件发生后，需要将告警信息及时播发给用户，基于不同的途径播发完好性信息延时不同，一般基于移动互联网延迟需在 2 s 以内，基于 L-Band 播发延迟需小于 12 s。

目前，本研究已实现对 GPS、Galileo 和北斗改正数的全流程生成与监测。需要强调的是，针对 PPP-IAR 产品和大气产品，系统按卫星逐颗发送独立的完好性标志及 QI 值，这意味着即便某颗卫星处于告警状态，用户仍可利用其余卫星进行可靠定位。此外，随改正数一并发送的 QI 值反映了各卫星改正产品的质量水平，用户可据此调整 PPP 随机模型及质量控制策略。

尽管本文提出的 QI 并未构成类似星基增强系统（SBAS）或接收机自主完好性监测（RAIM）所采用的完整保护级计算框架，但其在概念上发挥了与用户测距精度（URA）参数相似的作用。例如，用户可对具有较大 QI 值的卫星进行降权处理，甚至完全剔除该卫星参与 PPP 解算，这种策略在基于 RAIM 的定位处理中已被广泛采用。从这一意义上看，所提出的 QI 可视为一种适用于实时 PPP 增强服务的补充型完好性组件。

5.2 SSR 产品完好性参数计算

SSR 产品完好性参数的计算是整个完好性框架的核心环节。本节详细介绍 OCU 产品（轨道、钟差、UPD 的组合）、电离层改正和对流层改正三类产品的质量因子计算方法，以及实时产品误差在完好性计算过程中的传播分析。

5.2.1 OCU 产品质量因子计算

5.2.1.1 产品误差提取

在模糊度固定后，从观测值中扣除几何距离以及其他估计参数之和，可获得相位与伪距残差。电离层延迟通过采用 IF 组合观测予以消除。略去推导，无电离层组合残差可表示为：

$$\begin{aligned} Res_{ocu,r}^j &= P_{if,r}^j - \left\{ \rho_r^j + c(\hat{d}i_r^j - d\tilde{t}^j) + m_r^j \hat{T}_r^j + \varepsilon(P_{if,r}^j) \right\} \\ Res_{ocu,r}^j &= L_{if,r}^j - \left\{ \rho_r^j + c(\hat{d}i_r^j - d\tilde{t}^j) + m_r^j \hat{T}_r^j + \lambda_i \hat{N}_{if,r}^j + \varepsilon(L_{if,r}^j) \right\} \end{aligned} \quad (5-1)$$

其中：

$$\begin{aligned} \rho_r^j &= \|X^j - X_r\| \\ \lambda_i \hat{N}_{if,r}^j &= \lambda_{nl} \hat{N}_{nl,r}^j + \frac{f_2}{f_1 + f_2} \lambda_{wl} \hat{N}_{wl,r}^j \end{aligned}$$

式中， X^j 和 $d\tilde{t}^j$ 分别表示卫星轨道位置和卫星钟差参数，这些参数由实时精密改正产品提供； X_r 表示监测站已知的精确坐标； \hat{T}_r^j 和 $\hat{d}i_r^j$ 分别表示模糊度固定后的天顶湿延迟参数和接收机钟差参数； $\hat{N}_{if,r}^j$ 表示无电离层模糊度，可由已固定的宽巷模糊度和窄巷模糊度组合得到。

无电离层组合的残差中包含多种误差：高阶电离层延迟、残余对流层延迟、多路径效应以及卫星轨道、钟差及硬件延迟改正中的残余误差^[249]。其中，对流层残差和高阶电离层延迟通常处于毫米级；由于监测站配备扼流圈天线，并剔除了低高度角观测数据，多路径误差可忽略不计。

需要强调的是，无电离层相位残差并不代表卫星改正误差相对于其绝对真实值的全部误差成分，而仅包含那些无法被 PPP 滤波器中其他估计参数吸收的误差部分（详见 5.2.3 节）。在实际解算过程中，大部分与卫星相关的改正误差通常会被对应卫星的相位残差所吸收^[250]。因此，无电离层相位残差可作为评估实时改正产品误差的可靠指标。另外，为消除接收机相关误差（如：接收机钟差、接收机相位硬件延迟等），在残差统计分析前需对每一卫星系统的残差减去其系统平均值。

5.2.1.2 产品质量指标计算

假定每个卫星各监测站的 IF 伪距和相位残差服从高斯正态分布（该假设在 5.3.2 节中进行了验证），那么根据每颗卫星实时的多个站的残差并结合预设的漏警概率（miss-alert probability），即可推导得到卫星残差的上界（Upper Bound, UB）。在给定置信区间条件下，卫星残差的上界可表示为：

$$UB_{ocu}^j = |u_{ocu}^j| + K(P_{MA}) \delta_{ocu}^j \quad (5-2)$$

其中：

$$K(P_{MA}) = f^{-1}\left(1 - \frac{P_{MA}}{2}\right)$$

式中, UB_{ocu}^j 表示该卫星相位或伪距残差的上界; u_{ocu}^j 和 δ_{ocu}^j 分别表示该卫星在当前历元由所有监测站残差构成的样本均值和标准差; $K(P_{MA})$ 为与漏警概率 P_{MA} 对应的高斯分位数; f^{-1} 表示标准正态分布累积分布函数的反函数。鉴于伪距观测噪声相对较大, 难以满足高精度定位质量监测的要求, 后续分析中不再对伪距残差进行讨论, 本研究涉及的完好性监测也均是基于相位分析的。

如前所述, 仅基于无电离层残差的统计分析可能低估真实的空间信号测距误差 (Signal-In-Space Range Error, SISRE), 因为部分实时产品误差会被 PPP 滤波中估计的各类参数所吸收。为补偿这一效应, 引入平均 SISRE 作为附加的基础产品误差, 用以反映卫星轨道与钟差产品的历史性能水平。通过引入 SISRE 项后, 虽然 SISRE 并非主导误差来源, 但 QI 可在各种运行条件下保持稳健和可信。那么对应的实时精密轨道、钟差及 UPD 产品综合质量因子 QI 可以计算如下:

$$QI_{ocu}^j = SISRE_{ocu}^j + UB_{ocu}^j \quad (5-3)$$

其中, QI_{ocu}^j 表示基于绝对相位残差计算得到的卫星改正产品的质量指标; $SISRE_{ocu}^j$ 为基于历史长期累积的实时产品统计获得的产品综合误差。针对 SISRE 目前已有许多研究进行了系统论述, 文章^[251-252]等详细地给出了卫星的 SISRE 值计算方法, 此处不再赘述。在计算各卫星 SISRE 时, 首先将实时产品与参考产品统一至同一参考基准, 随后计算包含轨道、钟差及 UPD 误差在内的综合 SISRE 值。

5.2.2 大气产品质量因子计算

5.2.2.1 电离层产品质量因子计算

电离层残差的生成方式不同于轨道、钟差和 UPD 综合改正数的残差生成方法。电离层产品误差通过第一频率与第二频率原始观测值的几何无关组合计算得到, 可表示为:

$$Res_{iono,r}^j = L_{gf,r}^j - \left\{ \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) I_{model} + \lambda_1 \hat{N}_{1,r}^j - \lambda_2 \hat{N}_{2,r}^j + B_{gf}^j - B_{gf,r} + \varepsilon(L_{gf,r}^j) \right\} \quad (5-4)$$

其中, $L_{gf,r}^j$ 表示原始观测值的 GF 组合; $\hat{N}_{i,r}^j$ 原始模糊度的固定解; B_{gf}^j 表示由改正产品提供的卫星端 GF 伪距偏差组合; $B_{gf,r}$ 表示接收机端 GF 伪距偏差组合。由于 $B_{gf,r}$ 未知, 因此计算时通过采用各卫星系统电离层残差的系统平均值予以消除。此外, 为消除电离层斜向延迟的影响, 利用电离层改正数将电离层模型值 I_{model} 从残差中扣除。

类似地, 电离层改正数的质量指标 (QI) 计算如下:

$$\begin{aligned} QI_{iono}^j &= ME_{iono}^j + UB_{iono}^j \\ UB_{iono}^j &= \left| u_{iono}^j \right| + K(P_{MA})\delta_{iono}^j \end{aligned} \quad (5-5)$$

其中, QI_{iono}^j 表示电离层模型的质量指标, UB_{iono}^j 表示卫星电离层模型残差的上界, u_{iono}^j 和 δ_{iono}^j 分别表示该卫星实时电离层残差统计的均值和标准差。为确保质量指标能够界定实际电离层模型误差, 在实时统计基础上, 利用历史数据统计得到电离层模型的平均误差 ME^j , 并将其作为附加项加入上界中。

5.2.2.2 对流层产品质量因子计算

对流层残差的生成方式与轨道、钟差和 UPD 组合残差的生成方式类似。唯一的区别在于, 公式 (5-1) 中估计的对流层参数 \hat{T}_r^j 被对流层模型值 $\hat{T}_{r,mod}^j$ 所替代, 那么对流层产品的残差可表示为:

$$\begin{aligned} \hat{Res}_{trop,r}^j &= L_{if,r}^j - \left\{ \rho_r^j + c(\hat{d}\tilde{t}_r - \tilde{d}\tilde{t}^j) + m_r^j \hat{T}_{r,mod}^j + \lambda_i \hat{N}_{if,r}^j + \varepsilon(L_{if,r}^j) \right\} \\ &= L_{if,r}^j - \left\{ \rho_r^j + c(\hat{d}\tilde{t}_r - \tilde{d}\tilde{t}^j) + m_r^j \hat{T}_r^j + \lambda_i \hat{N}_{if,r}^j + \varepsilon(L_{if,r}^j) \right\} + (m_r^j \hat{T}_r^j - m_r^j \hat{T}_{r,mod}^j) \\ &= Res_{ocu,r}^j + (m_r^j \hat{T}_r^j - m_r^j \hat{T}_{r,mod}^j) \end{aligned} \quad (5-6)$$

因此, 用于完好性监测的区域对流层残差包含轨道、钟差、UPD 以及对流层改正的组合误差, 即所有几何改正误差的综合影响。为了从对流层残差中消除轨道、钟差和 UPD 的综合误差 (即 OCU), 通过将公式 (5-1) 计算得到的 OCU 残差值直接代入并扣除可得:

$$Res_{trop,r}^j = \hat{Res}_{trop,r}^j - Res_{ocu,r}^j = (m_r^j \hat{T}_r^j - m_r^j \hat{T}_{r,mod}^j) \quad (5-7)$$

类似地, 对流层改正数的质量指标计算如下:

$$\begin{aligned} QI_{trop}^j &= ME_{trop}^j + UB_{trop}^j \\ UB_{trop}^j &= \left| u_{trop}^j \right| + K(P_{MA})\delta_{trop}^j \end{aligned} \quad (5-8)$$

其中, QI_{trop}^j 表示对流层模型的质量指标, UB_{trop}^j 表示卫星对流层模型残差的上界, u_{trop}^j 和 δ_{trop}^j 分别表示该卫星实时对流层残差统计的均值和标准差。为确保质量指标能够界定实际对流层模型误差, 在实时统计基础上, 同样利用历史数据统计得到对流层模型的平均误差 ME_{trop}^j , 并将其加入上界中。

5.2.3 实时产品误差传播分析

假设轨道、钟差、DCB 以及 UPD 产品均包含一定误差, 则公式 (2-41) 可改写为:

$$\begin{aligned} P_{i,r}^j &= \rho_{r,true}^j + \Delta\rho_{r,error}^j + c(\hat{d}\tilde{t}_r - \tilde{d}\tilde{t}_{true}^j - \Delta\tilde{d}\tilde{t}_{error}^j) + \gamma_i(\tilde{I}_r^j + \Delta B_{12,error}^j) + m_r^j T_r + IFB_r + \varepsilon(P_{i,r}^j) \\ L_{i,r}^j &= \rho_{r,true}^j + \Delta\rho_{r,error}^j + c(\hat{d}\tilde{t}_r - \tilde{d}\tilde{t}_{true}^j - \Delta\tilde{d}\tilde{t}_{error}^j) - \gamma_i(\tilde{I}_r^j + \Delta B_{12,error}^j) + m_r^j T_r + \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^j \\ &\quad + IFCB^j + \Delta b_{error}^j + \varepsilon(L_{i,r}^j) \end{aligned} \quad (5-9)$$

且,

$$\begin{cases} \tilde{I}_r^j = I_r^j + \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_{1,true}^j + B_{2,true}^j) \\ \lambda_i \tilde{N}_{i,r}^j = (\lambda_i N_{i,r}^j + b_{i,r} - b_{true}^j) + (d_{IF}^s - d_{IF,r}^j) + \gamma_i \cdot \beta(B_{r,1} - B_{r,2} - B_{1,true}^j + B_{2,true}^j) \end{cases}$$

下标 **true** 表示产品的真实值, 下标 **error** 表示对应的误差分量。将所有观测量表示为向量形式后, 观测模型可重写为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5-10)$$

其中, \mathbf{y} 为观测向量; \mathbf{x} 表示待估参数向量 (包括接收机坐标、接收机钟差、对流层、电离层以及模糊度等); \mathbf{p} 表示产品误差向量 (包括轨道、钟差及 UPD 误差); \mathbf{H} 为设计的系数矩阵; \mathbf{B} 为将产品误差映射到观测空间的投影矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测噪声向量。则参数估计结果可表示为:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{y} \quad (5-11)$$

将该估计结果代回观测模型, 可得:

$$\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{B} \mathbf{p} + (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5-12)$$

因此, 由产品误差引起的参数估计偏差可表示为:

$$\text{bias}(\mathbf{x}) = \mathbf{L} \cdot \mathbf{p} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{B} \mathbf{p} \quad (5-13)$$

后验载波相位残差为:

$$\text{res} = \mathbf{y} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W})(\mathbf{B} \mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (5-14)$$

其中由产品误差所引起的残差分量可表示为:

$$\text{res}_{pro} = (\mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W}) \mathbf{B} \mathbf{p} \quad (5-15)$$

由此可以清楚地看出, 后验残差由两部分组成: 一部分来源于产品误差在观测空间中的投影, 另一部分来源于观测噪声。

5.2.4 完好性评估指标与方法

为全面评估 SSR 产品完好性监测框架的性能, 本节定义以下评估指标^[253-254]:

(1) 可用率 (Availability): 质量因子有效输出的历元比例。连续不间断的输出意味着完好性信息能够持续提供给用户。

(2) 紧致度 (Tightness): 质量因子与实际误差之间的比值。紧致度越接近 1, 表示质量因子对实际误差的包络越紧密:

$$T = \frac{QI}{\delta_{error}} \quad (5-16)$$

其中 δ_{error} 表示真实的产品误差, 且 $\delta_{error} > SISRE_{ocu}^j$, $\delta_{error} > ME_{trop}^j$, $\delta_{error} > ME^j$ 。紧致度 $T > 1$ 表示质量因子保守, $T < 1$ 表示质量因子乐观。理想的紧致度应在 1.5~3.0 之间, 既保证安全性又不过度保守。

(3) 完好性可用率 (Integrity Availability): QI 小于告警限值的历元比例。该指标反映了在给定告警限值下, 完好性监测系统指标下服务能够正常运行的比例。

(4) 误导信息概率 (Probability of Misleading Information, PMI)：实际 QI 误差超过保护级的历元比例，PMI 应远小于完好性风险要求。

5.3 服务产品完好性性能分析

5.3.1 实验设计

OCU 完好性信息基于全球分布的监测站生成，理论上完好性监测站应当独立于改正产品生成所使用的参考站；然而，由于能够提供实时数据流的全球站点数量有限，部分监测站同时参与了实时产品生成，图 5-2 给出了 OCU 完好性监测站的分布情况。此外，完好性信息的有效性同样需要依靠 PPP-IAR 进行评估，通过对比引入完好性信息与未引入完好性信息的解算结果，来分析 PPP-IAR 性能的改进效果，图 5-2 同时给出了 29 个用于 PPP-IAR 验证的用户站分布情况。

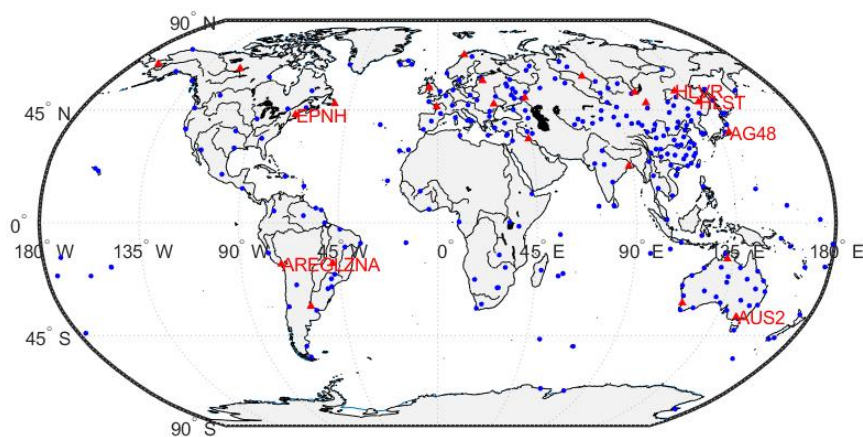


图 5-2 完好性信息的监测站 (蓝色圆点) 及 PPP-IAR 验证站 (红色三角形) 分布图
Figure 5-2 Distribution of stations used for integrity information (blue dots) generation and for validation of PPP-IAR (red triangles)

为分析大气完好性对于 PPP-RTK 定位的改进效果，本节选取了大气活跃区域作为研究对象。以中国南部区域为例，图 5-3 展示了用于电离层和对流层建模的 51 个测站分布情况，区域内测站的平均间距约为 203.3 km。此外，用于大气完好性信息生成的监测站也在图 5-3 中给出，区域大气完好性监测站与用于电离层和对流层建模的测站彼此独立。完好计算时首先将区域按 $3^\circ \times 3^\circ$ 格网进行划分，QI 计算到每个独立的格网点上，然后再将格网点 QI 结果依次播发给用户端使用。

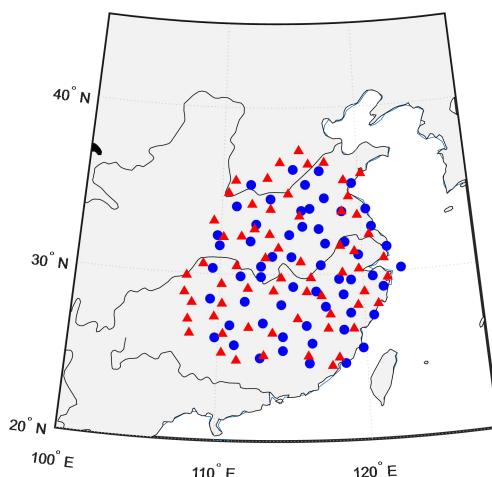


图 5-3 大气建模的测站（蓝色）及大气完好性监测站（红色）分布图

Figure 5-3 Distribution of stations used for atmospheric modelling (blue) and for integrity information of Atmosphere (red).

5.3.2 相位残差特性分析

由于完好性信息的计算是基于残差服从正态分布的假设为前提的，因此在开展完好性分析之前，有必要对 PPP 相位残差的分布特性进行验证。图 5-4 展示了所有测站上不同卫星的残差分布情况，图中不同颜色代表不同卫星。可以看出，不同卫星系统的残差分布特征存在一定差异。根据拟合的正态分布曲线，GPS 和 GAL 卫星的残差分布较为一致，且离散程度较低；而 BDS2 和 BDS3 的残差分布离散性略高，且部分 BDS2 卫星表现出明显的非零均值。然而，几乎所有卫星的残差直方图均呈现清晰的单峰分布特征，这基本符合完好性监测方案基于的残差正态分布假设。

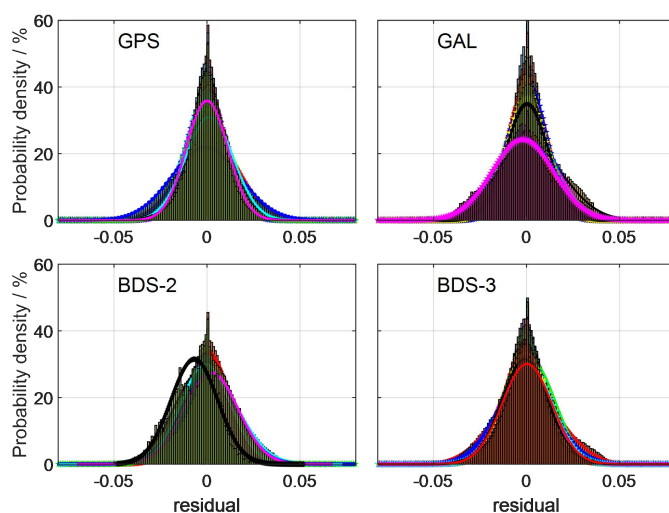


图 5-4 各系统 IF 相位残差的直方图及其拟合正态分布曲线图

Figure 5-4 Histogram and fitted normal distribution curves of the IF phase residuals of each System

图 5-5 给出了各颗卫星 IF 组合相位残差分布的箱线图，其中横轴表示卫星 PRN 号，纵轴表示残差值。在每个箱线图中，中央红线表示中位数，下边界和上边界分别对应 25%和 75%分位数。如图所示，除 C09 和 C16 卫星表现出轻微的非零均值偏差外，大多数卫星的相位残差分布均符合近似理想的正态分布特征。此外，几乎所有箱线图的上下界均落在 ± 0.05 m 范围内，少数卫星（如 G30、E10、E26 和 E33）处于地影期因而产品精度较差，其箱线图边界接近 0.05 m。同理，部分 BDS2 和 BDS3-IGSO 卫星的箱线图上下界也接近 ± 0.05 m，这与其实时改正产品精度较低密切相关。由第三章的分析我们知道，BDS2 以及部分 BDS3-IGSO 卫星的空间信号测距误差（SISRE）实际会高于其他卫星，但其相位残差分布并未表现出显著差异，仅离散程度和标准差呈现略高。这也说明仅基于残差统计可能低估产品的真实空间信号误差。因此，在公式（5-3）中引入 $SISRE_{ocu}^j$ 历史经验值作为附加补偿是非常必要的，以实现 QI 对真实误差的完整包络。

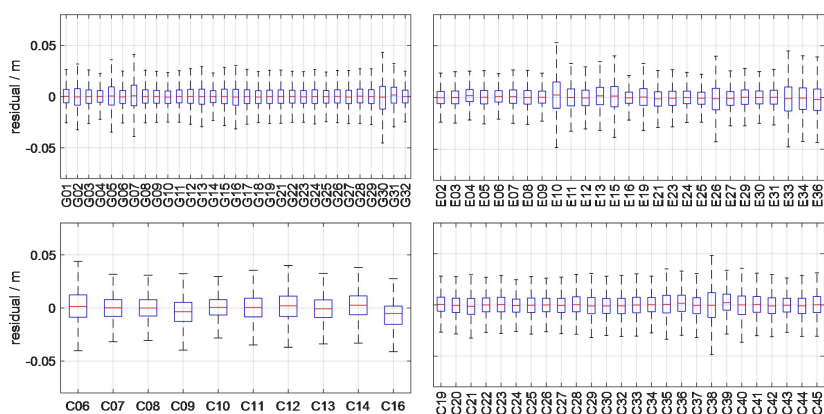


图 5-5 各卫星 IF 相位残差分布的非对称性分析

Figure 5-5 Asymmetry of IF phase residuals distribution of each satellite

5.3.3 OCU 产品完好性分析

5.3.3.1 QI 波动序列图分析

图 5-6 展示了 2025 年第 250 积日若干典型卫星的 QI（洋红色点）与 SISRE（黑色点）变化序列。为消除 QI 序列中的粗差，对原始 QI 进行了平滑处理（蓝色点）。由图可知，大多数卫星（如 G03、G15、G27、E02、C21、C32）的 SISRE 基本上均低于 0.05 m，而其 QI 则大部分介于 0.05 m 至 0.10 m 之间。整体而言，QI 基本上能够包络住 SISRE，且两者的差异维持在厘米级水平，这表明本研究提出 QI 计算方法能够有效表征产品的实际精度，QI 的精度误差在厘米级。此外，从图中还可以看出 E15 和 E26 的 SISRE 显著大于 E02，这主要是由于 E15 和 E26 在地影期间轨道与钟差产品精度的下降，且产品精度的下降同样反映在其 QI 值上，使得 E15 和 E26 的 QI 值也显著地大于 E02。类似地，BDS2 和 BDS3-IGSO 卫星产品精度较低，其 QI 值整体也较大，这进一步说明 QI 能够有效反映产品真

实的精度水平。

需要指出的是，全天的 QI 序列图中存在部分卫星（如 E15、C07、C11、C13、C21 和 C32）在少量历元时间内 QI 低于 SISRE，但两者差异均小于 0.05 m。这种情况下，尽管 QI 未能完全包络 SISRE，但由于偏差较小且整体保持厘米级差异，该 QI 产品仍可满足用户实际使用的需求。图中卫星 C11 在 UTC 2:47-7:34 期间 QI 存在数据中断，这是由于当 C11 运行到西半球上空时，由于同步跟踪的 BDS2 卫星较少，PPP 无法实现系统内模糊度固定，进而无法计算 QI。

从图中还可以看出在轨道切换时（如 E26、C13）QI 也出现剧烈的波动，这主要是由于钟差产品无法吸收轨道产品切换时切向和法向差异，导致这些误差吸收到残差项，进而体现在 QI 上。同时，在 E15、E26、C07 和 C40 等多颗卫星的 QI 序列中还可以看到明显的跳变，这些跳变通常与参与 QI 计算的测站数量突然变化（例如：E26 在 UTC 12:30 左右，测站中断导致），以及超快速轨道更新产品不连续（例如：C40 在 UTC4:00 左右），这些因素都会直接影响公式 (5-2) 中均值和标准差的计算，从而影响 QI 值。总体而言，这些现象反映了完好性监测对实时跟踪站几何结构和产品精度变化具有较高敏感性。

最后，当平滑后的 QI 超过 0.3 m，或实时产品估计重启不超过 7200 s 时，对应历元将被标记为不可用。这些异常历元被编码为完好性告警信息并广播给用户。当用户接收到此类告警信息时，即可在 PPP 处理过程中剔除相应卫星。

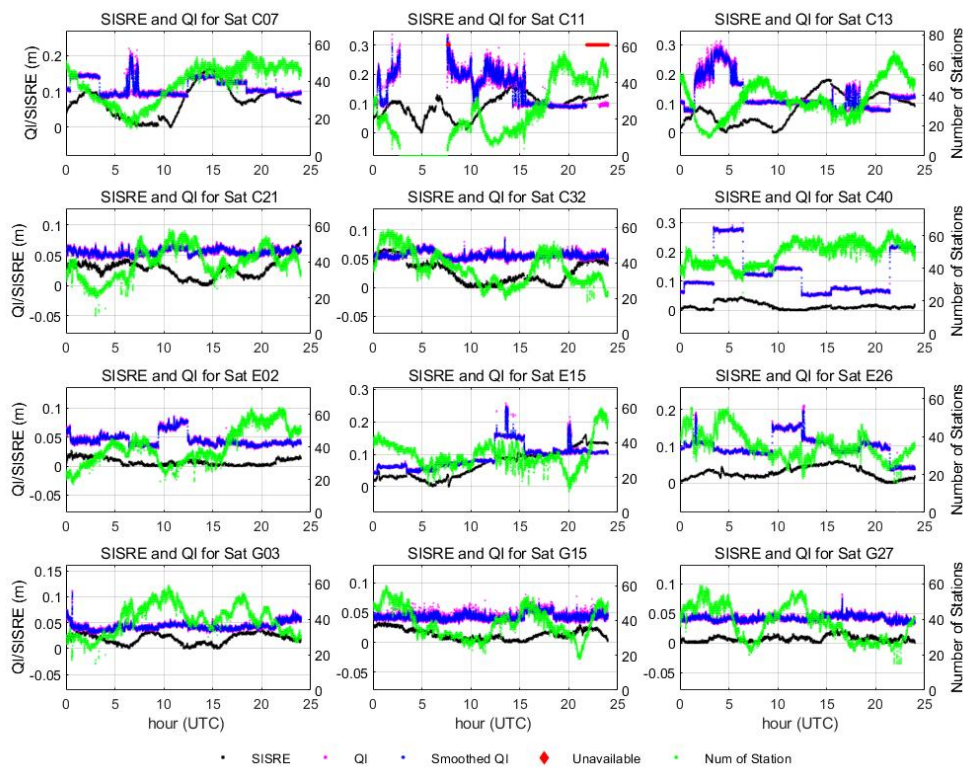


图 5-6 DOY205 天部分典型卫星 QI 变化序列图

Figure 5-6 QI variation for selected example satellites in DOY 250 of 2025

针对 QI 产品的评价首先可以分析其可用率，其次可以分析 QI 的紧致度。图 5-7 分别给出连续多天 GPS/Galileo/BDS2/BDS3 各个卫星的可用性以及紧致度。由图可知，GPS, Galileo 和 BDS3 的可用性基本接近 100%，而 BDS2-MEO 卫星由于难以全球同步观测多颗，导致模糊度未能全程固定，因而 QI 产品无法计算。统计结果表明：GPS/Galileo/BDS2/BDS3 四系统 QI 产品的可用率分别为 99.6%/99.9%/79.5%/98.3%。紧致度作为反映 QI 产品精度的指标，其需要在一定范围内保证 QI 能包络住误差本身，但又不至于太松。图 5-7 统计结果表明，GPS/Galileo/BDS2/BDS3 四个系统 QI 产品的紧致度分别为 1.89/2.19/1.56/1.73，均介于 1.5-3.5 之间，符合系统的设计要求。整体而言 BDS2 和 BDS3-IGSO 卫星 QI 的利用率明显低于其他卫星。

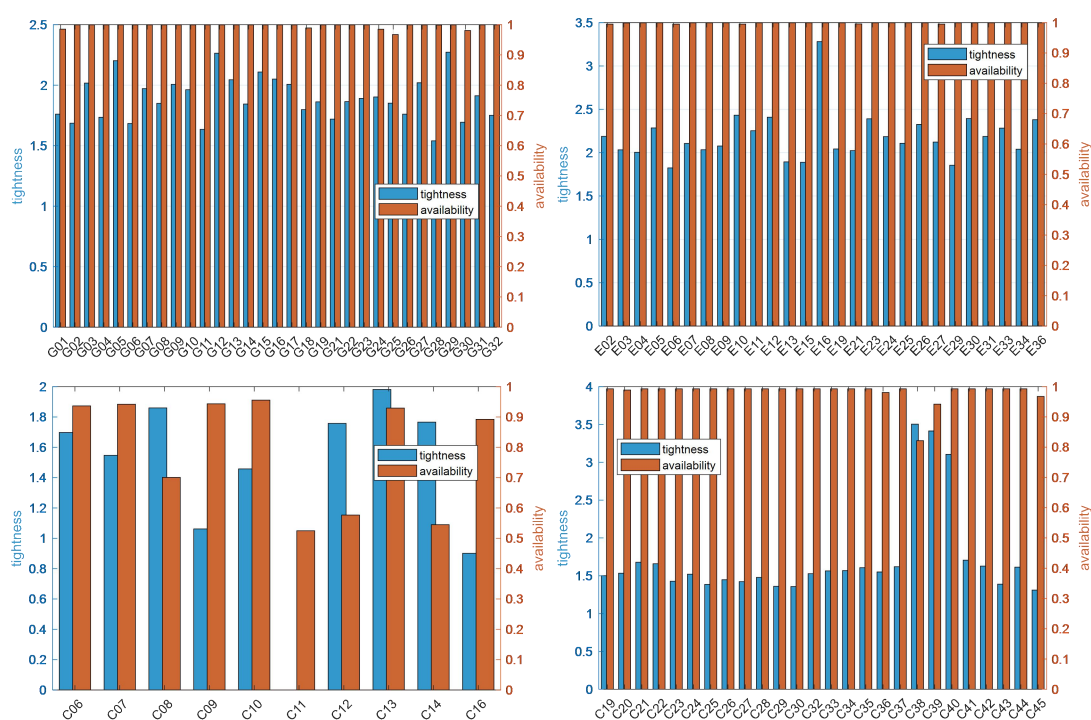


图 5-7 连续多天各卫星 QI 可用率和紧致度统计图

Figure 5-7 Statistical results of QI Availability and tightness for each satellite for multi-days

5.3.3.2 QI Stanford 图分析

为进一步验证所提出 QI 方法的性能，将各卫星系统实时产品的 QI 结果以经典的 Stanford 图形式进行展示。Stanford 图是一种二维热力图，可以直观地展示相位残差、QI 以及告警限值 AL 之间的关系。Stanford 图划分为若干区域：正常运行区 (Nominal Operations, NO)、误导信息区 (Misleading Information, MI)、相位残差小于 AL 的系统不可用区 (System Unavailable with phase residual smaller than AL, SU1)、相位残差大于 AL 的系统不可用区 (System Unavailable with phase residual greater than AL, SU2)、危险运行区 (Hazardous Operations, HO) 以及系

统不可用且存在误导信息区 (System Unavailable & Misleading Information, SU&MI)。本研究中, 针对实时卫星产品设定的 AL 阈值为 0.20 m, 该阈值是基于实时 PPP 处理的性能需求确定的, 当误差大于 0.20 m 时, 可能会影响 PPP 的定位性能。

图 5-8 给出了 2025 年第 250 积日各卫星系统的 Stanford 图。从图中可以看出, 对于 GPS 和 Galileo 系统, 约 99.9% 的数据点分布在 NO 和 SU 区域 (包括 SU1 和 SU2) 内, 表明 QI 能够有效包络超过 99.9% 的残差误差。约 0.1% 和 0.2% 的数据点分别落入 GPS 和 Galileo 的 MI 区域, 在这些历元中, QI 未能正确反映产品误差情况, 可能对用户产生误导。此外, 落入 SU 区域的数据点比例低于 0.1%, 说明对于 GPS 和 Galileo 而言, QI 信息缺失或误告警的概率非常低。

相比之下, 对于 BDS2 系统, 落入 SU 区域的数据点比例约为 12.5%, 这一结果与其产品精度水平相关。由于 BDS2 卫星产品精度相对较低, 其平均 SISRE 为 0.0647 m, 导致大量历元的 QI 超过 0.2 m。类似地, 约 2.1% 的 BDS3 数据点落入 SU 区域, 这主要源于其三颗 IGSO 卫星产品精度较低。

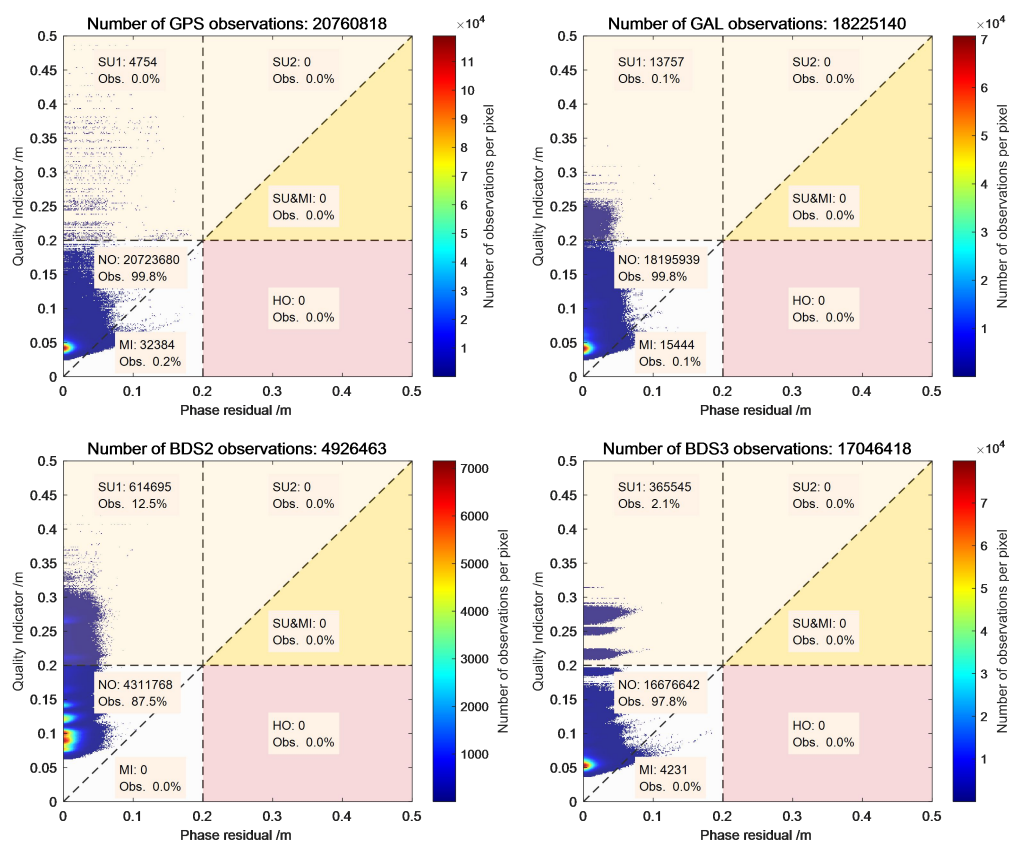


图 5-8 不同卫星系统卫星 QI&相位残差斯坦福图

Figure 5-8 Stanford diagram showing the absolute phase residuals compared to the corresponding QI for each system in DOY 250

图 5-9 展示了所有卫星系统综合的 Stanford 图, 结果表明 SU 区域所占比例仅为 1.3%。作为对比, 扣除 BDS3-IGSO、BDS2 以及部分处于地影期卫星后的

Stanford 图也在图中给出。由图可知，剔除这些产品精度较低的卫星后，SU 区域所占比例几乎降至 0%，仅剩 2762 个数据点。剩余少量数据点的主要原因在于：部分卫星在海洋区域上空时，地面跟踪站空间分布不足，导致观测数量不够充分，从而在某些历元中引入较大的 QI 计算误差。

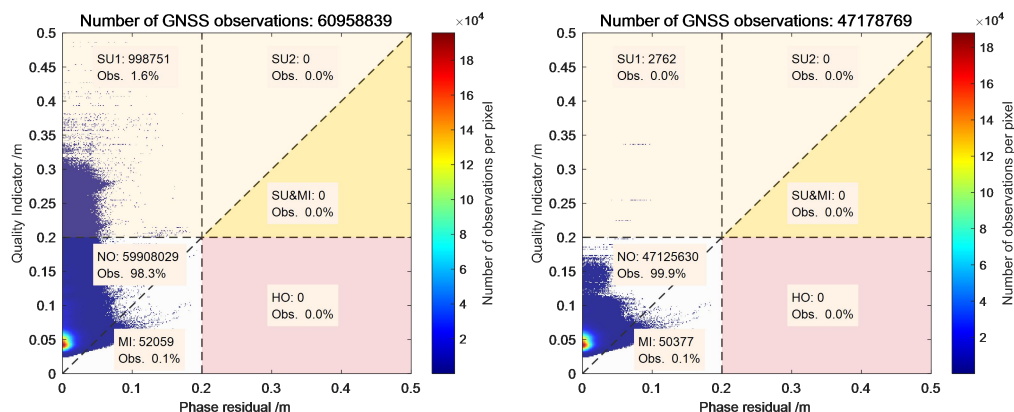


图 5-9 DOY 250 天所有卫星和剔除低精度产品卫星的 QI&相位残差斯坦福图
Figure 5-9 Stanford diagram showing the absolute phase residual compared to the corresponding QI for all GNSS satellites in DOY 250

图 5-10 所示的 Stanford 图基于多日观测数据，其结论与 DOY 250 单日结果一致。从数据的分布显示可以看出，98.6%的数据点位于正常运行区（NO），1.3%位于系统不可用区（SU），仅有 0.1%位于误导信息区（MI），表明实时产品具有较高的可用性和精度。与单日分析结果类似，SU 区域中占比 1.3%的主要来源是 BDS2 和 BDS3-IGSO 卫星，这一点可由剔除 BDS2 和 BDS3-IGSO 卫星后的 Stanford 图得到验证（右图）。此外，在剔除 BDS2 和 BDS3-IGSO 卫星后，由于 QI 超过告警阈值而导致误警概率仅为 0.019%（74994/379412794）。

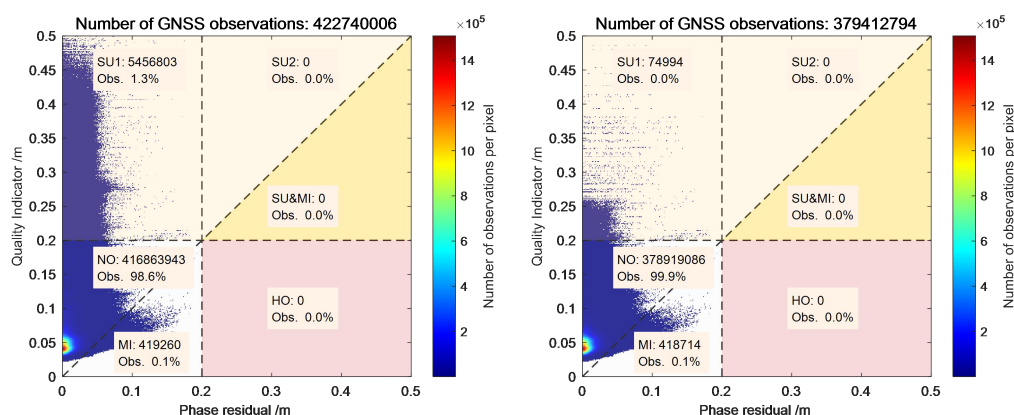


图 5-10 多天数据的所有卫星和剔除低精度产品卫星的 QI&相位残差斯坦福图
Figure 5-10 Stanford diagram showing the absolute phase residual compared to the corresponding QI for all GNSS satellites from multi-days

5.3.4 大气产品完好性分析

5.3.4.1 大气 QI 波动序列图分析

对广域大气而言，由于覆盖的区域比较广，因而不同位置处模型精度通常略有差异，图 5-11 给出了两个不同格网点位置处卫星电离层 QI 波动序列，不同颜色代表不同的卫星。其中，上图格网点坐标为 029.500N-114.500E，靠近区域的中心位置，下图格网点坐标为 023.500N-108.500E，在区域边缘外。

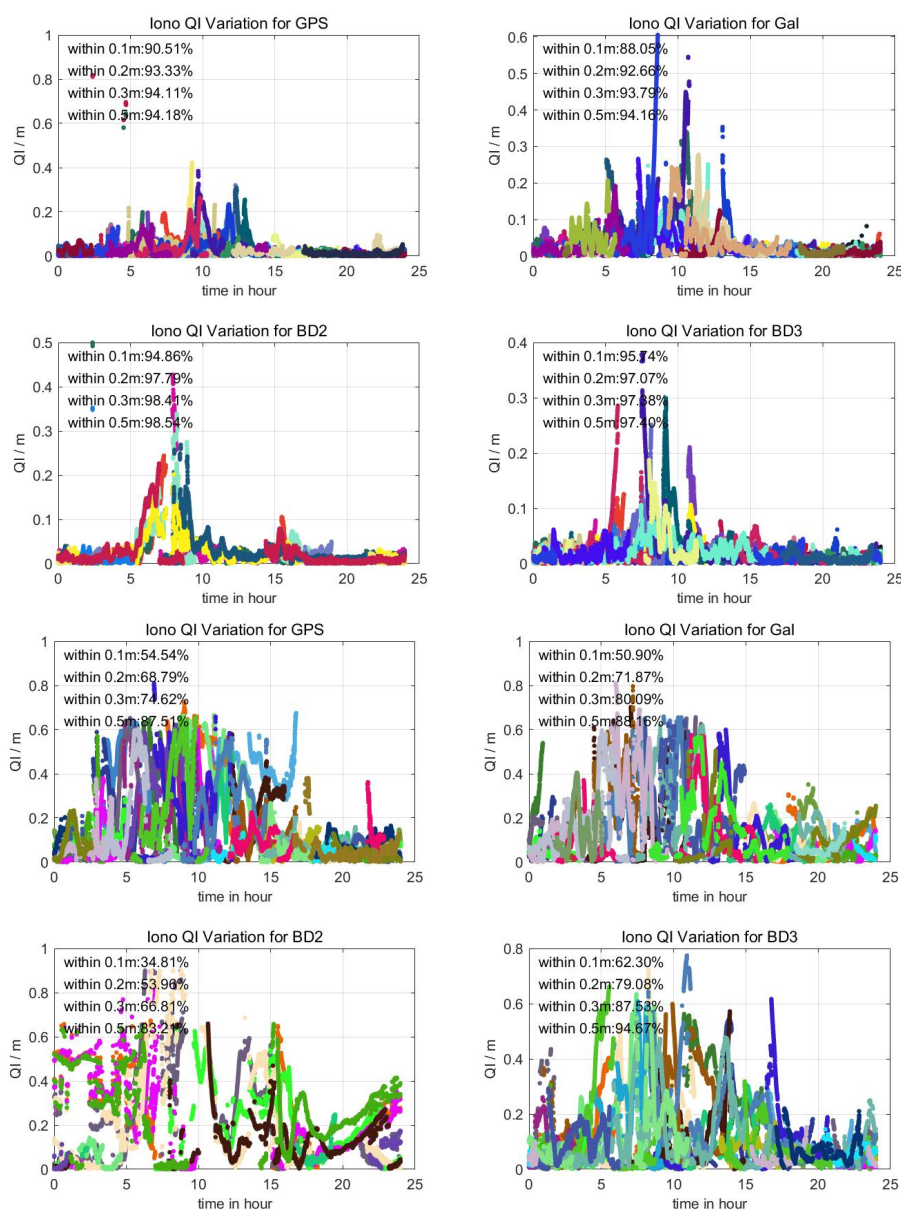


图 5-11 不同格网点处的卫星电离层 QI 序列图（上图：029.500N-114.500E；下图 023.500N-108.500E）

Figure 5-11 Satellite Ionospheric QI for different grid points (upper:029.500N-114.500E; bottom:023.500N-108.500E)

由图 5-11 上子图可知，在区域内的格网点，其 QI 变化相对较缓；且在当地

时间 13:00-20:00 时段内, 部分卫星 QI 量级和波动比较剧烈, 这和模型不同时段的实际真实精度相吻合。下子图区域外格网点整体 QI 波动较为剧烈, 且整体量级高于区域内格网点, 且卫星 QI 统计结果显示在当地时间 13:00-20:00 时段模型精度有 10% 以上的比例超过 0.5 m。

图 5-12 给出了区域内所有格网点对流层 QI 波动序列, 不同颜色代表不同的格网点。由图可知, 对流层 QI 变化比较平稳, 且其量级整体要小于电离层。此外, 不同的格网点, 其 QI 的量级存在系统性的差异。这说明在不同格网点位置处, 对流层模型精度有显著的区别, 且在区域内的格网点 QI 显著小于区域边缘。

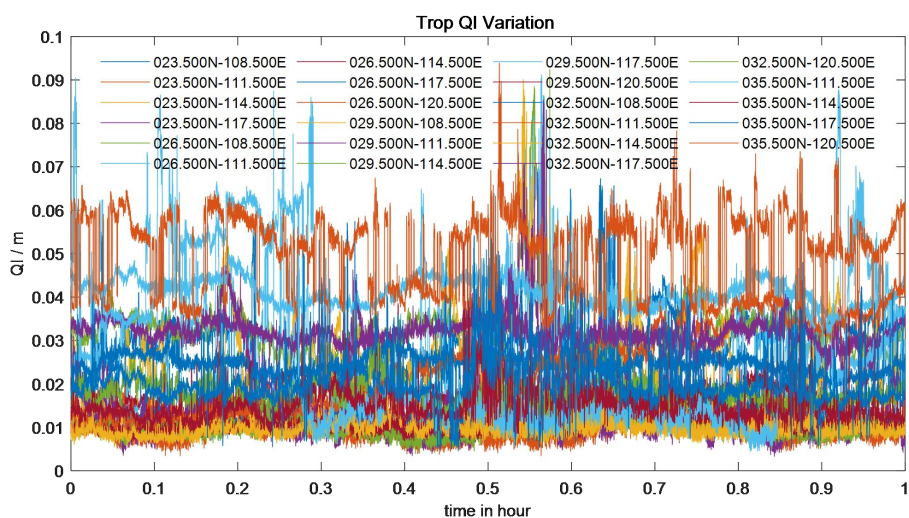


图 5-12 不同格网点的对流层 QI 序列图

Figure 5-12 Tropospheric QI for different grid points

图 5-13 给出了区域内所有格网点电离层/对流层 QI 统计结果, 区域的中心点为 (29.5N, 115.5E), 各个格网点离中心点的距离也在图中给出 (红线, 单位为度)。由图可知, 不同格网点其电离层和对流层 QI 略有差异, 这在实际各个位置处的大气精度相关。整体而言, 在区域内对流层 QI 基本上在 0.05 m 以内, 电离层 QI 平均在 0.10 m 之内。此外, 在区域边缘 QI 显著地增大, 这直接说明区域边缘位置处模型精度存在下降。因而, 采用格网 QI 信息播发后, 能够改善采用经验方差给约束方程定权策略, 进而给定位结果带来提升。

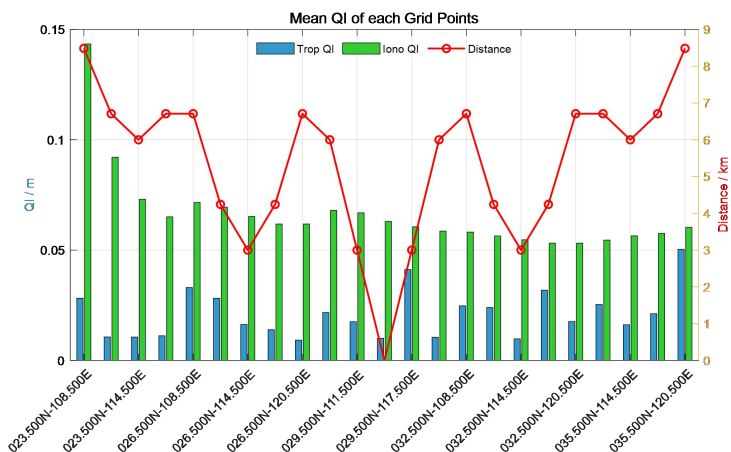


图 5-13 不同格网点的电离层/对流层 QI 统计结果

Figure 5-13 Statistical Results of Ionospheric/Tropospheric QI for different grid points

5.3.4.2 大气 QI Stanford 图分析

大气的完好性是基于格网点分别计算的，统计分析时将区域内所有格网点汇总，图 5-14 给出了连续多天数据统计的电离层和对流层 Stanford 图。从图中可以看出，对于电离层而言其波动幅度较大，存在 0.8% 的 QI 超过 0.5 m。此外，约 98.8% 的数据点分布在 NO 和 SU 区域（包括 SU1 和 SU2）内，表明 QI 能够有效包络超过 98.8% 的残差误差。然而，约 1.2% 的数据点落入 MI 区域，在这些历元中，QI 未能正确反映产品误差情况，可能对用户产生误导。就对流层而言，其变化幅度较小，基本上 QI 均小于 0.1 m，且存在约 7.9% 的数据分布在 MI 区间。此外，有 8867 个数据分布在 HO 区域，这说明对流层存在误差过大且漏警的情况，但其发生的概率较小，仅万分之三的概率，另外分析发现这些 HO 区域的数据点大部分是发生在区域外边缘的格网点，而仅考虑区域内格网点时，仍然满足 10^{-5} 的完好性设计指标。

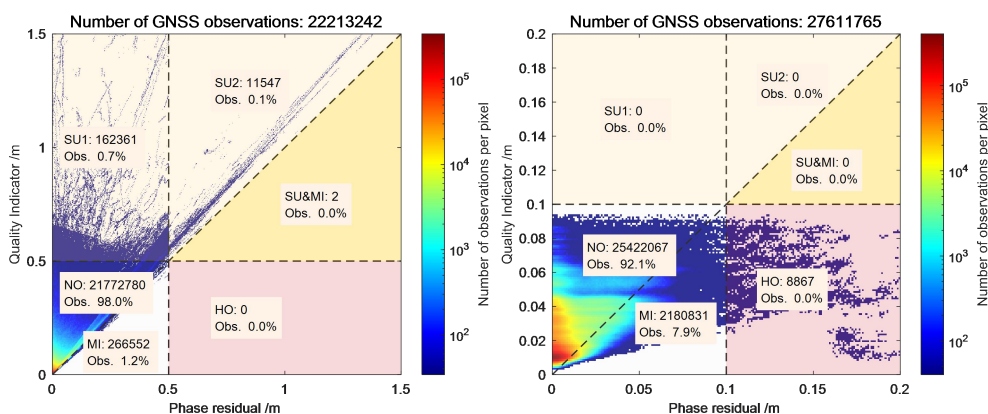


图 5-14 多天数据的电离层和对流层 QI&相位残差斯坦福图

Figure 5-14 Stanford diagram showing the absolute phase residual compared to the corresponding QI for troposphere and ionosphere from multi-days

5.4 完好性信息增强的 PPP-IAR/PPP-RTK 验证

5.4.1 完好性定权策略设计

传统的 PPP-IAR 处理通常采用基于高度角或者载噪比的经验加权模型，这种方法无法反映 SSR 产品质量的实时变化，当某颗卫星的产品质量下降时，可能导致定位精度下降甚至模糊度固定错误。本文提出的完好性加权策略包含两个方面：（1）异常剔除策略：当某颗卫星的 OCU 质量因子超过阈值时，将该卫星从定位解算中剔除；同样当大气质量因子超过阈值时，该卫星大气产品不参与 PPP-RTK 大气约束方程构建；（2）自适应加权策略：对于未被剔除的卫星，根据 OCU 和大气的质量因子调整观测权重，观测方程最终的权重可表示为：

$$\sigma_{obs}^2 = \sigma_{prior}^2 + \sigma_{ocu,QI}^2 \quad (5-17)$$

其中， σ_{prior}^2 为原始基于高度角或者载噪比的经验方差， $\sigma_{ocu,QI}^2$ 为基于 OCU 质量因子计算获得的方差。同理，公式 (4-23) 和公式 (4-25) 中的 PPP-RTK 定位解算采用的电离层和对流层约束方程也可以基于电离层和对流层质量因子重新计算获得 $\sigma_{iono,QI}^2$ 和 $\sigma_{trop,QI}^2$ 。

5.4.2 QI 增强的 PPP-IAR 定位性能

为了分析 QI 对 PPP 定位的改善效果，将 QI 信息引入 PPP 解算过程，并将其与常规 PPP 的性能进行对比。选取了图 5-2 中 DOY 250 至 DOY 256 期间 29 个监测站观测数据为例进行 PPP 解算，且每 60 分钟重新初始化一次。这些测站均可同时跟踪 GPS、GLONASS、Galileo、BDS2 和 BDS3 卫星，并具备至少三频观测能力。

以 AUS2、HLVR 和 LZNA 测站为例，图 5-15 展示了各测站的定位误差及收敛情况。结果表明，在模糊度固定后，三个测站的定位精度均达到厘米级，水平方向和高程方向的定位精度均优于 0.025 m 和 0.040 m。此外，所有测站的模糊度固定率均超过 97%，表明 PPP 通常在两分钟内完成收敛。值得注意的是，尽管整体收敛速度较快，但在某些时段定位精度比较差，例如 AUS2 测站在 UTC 9:00 至 10:00 期间。将 QI 信息引入 PPP 后，定位标准差变化很小约 1-2 mm，但错误固定率存在轻微改善。由于每个测站均可通过事后处理获得精确参考坐标，本研究将水平偏差超过 0.05 m 或高程偏差超过 0.10 m 的解定义为错误固定。引入 QI 信息后，AUS2、HLST 和 LZNA 测站的错误固定率分别降低了 0.21%、0.07% 和 0.13%。

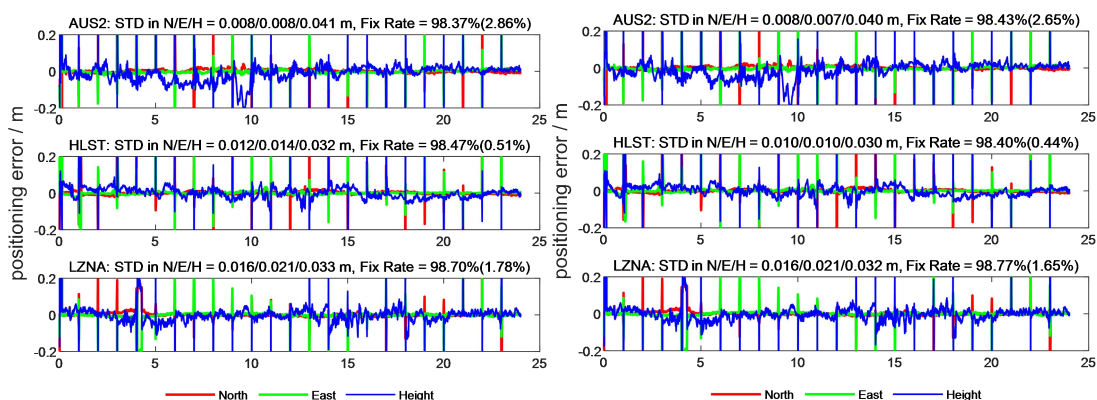


图 5-15 不同测站 PPP 定位结果(左图为常规 PPP-IAR, 右图为 QI 信息增强的 PPP-IAR)
 Figure 5-15 Performance of PPP for each station (Left panel represents normal PPP-IAR; right panel represents enhanced PPP-IAR with QI information).

图 5-16 展示了 DOY 250 至 DOY 256 期间所有测站在北、东、高三个方向上的定位误差统计结果。所有测站的平均精度分别约为 0.012 m (北向)、0.014 m (东向) 和 0.031 m (高程)。此外, 平均错误固定率约为 2.225%; 其中, G026 和 G030 测站的错误固定率最高, 这些错误固定主要集中在 PPP 重启后。作为对比, 图中右侧给出了引入 QI 信息后的 PPP-IAR 统计结果。由图可知, 引入 QI 信息对定位精度的提升较小, 但有效降低了错误固定率, 尤其在 G026 测站表现更为明显。此外, 所有测站的首次固定时间 TTFF (Time-To-First-Fix) 统计表明, 在 PPP 处理中引入 QI 信息后, TTFF 由 129.2 s 缩短至 127 s, 也存在轻微的改善。

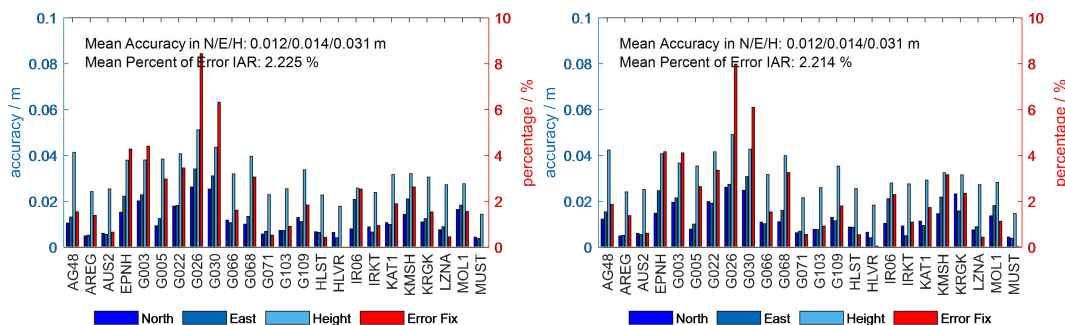


图 5-16 不同测站多天 PPP-IAR 定位误差及错误固定率统计结果
 Figure 5-16 Statistical results of positioning error and wrong-fix rate of PPP-IAR at different stations from DOY 250 to DOY 256.

5.4.3 QI 增强的 PPP-RTK 定位性能对比

为了分析 QI 的效果, 此处以区域边缘处 GDHS、GDMY 和 GDZA 测站为例, 每 30 分钟重置一次 PPP, 图 5-17 展示了各测站的定位误差及收敛情况。结果表明, 在模糊度固定后, 三个测站的定位精度均达到厘米级, 水平方向和高程方向的定位精度均优于 0.010 m 和 0.040 m。此外, 所有测站的模糊度固定率均超过

93%，表明 PPP 通常在两分钟内完成收敛。将 QI 信息引入 PPP 后，定位标准差变化很小约 1-3 mm，但错误固定率存在可观的改善。其中，GDHS、GDMY 和 GDZA 测站的错误固定率分别降低了 1.25%、0.05%和 0.43%。

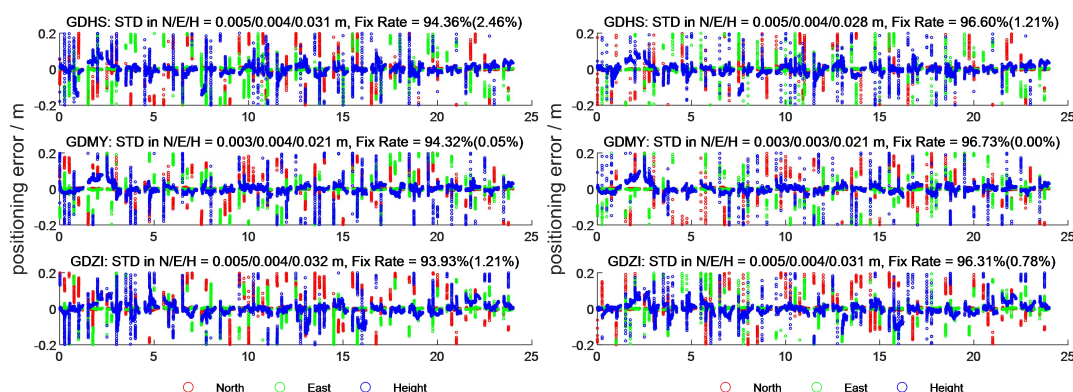


图 5-17 不同测站 PPP 定位结果(左图为常规 PPP-RTK,右图为 QI 信息增强的 PPP-RTK)
 Figure 5-17 Performance of PPP for each station (Left panel represents normal PPP-RTK; right panel represents enhanced PPP-RTK with QI information).

图 5-18 展示了区域内和区域边缘所有测站在北、东、高三个方向上的定位误差统计结果，平均精度分别约为 0.004 m（北向）、0.004 m（东向）和 0.028 m（高程），此外平均错误固定率约为 0.875%。其中，UBTP, GDHS 和 GDZI 测站的错误固定率最高，这些错误固定主要集中在 PPP 重启后。作为对比，图中右侧给出了引入 QI 信息后的 PPP-RTK 统计结果。由图可知，引入 QI 信息对定位精度的提升较小基本保持不变，但有效降低了错误固定率，尤其是针对区域边缘的测站，其错误固定由 0.875%降低到 0.540%，如 GDHS 测站表现最为明显；而针对区域内测站由于模型精度较为稳定，引入 QI 改善不明显。此外，所有区域边缘测站的首次固定时间 TTFF 统计表明，在 PPP 处理中引入 QI 信息后，TTFF 由 54.6 缩短至 33.0 s，也存在显著的改善。

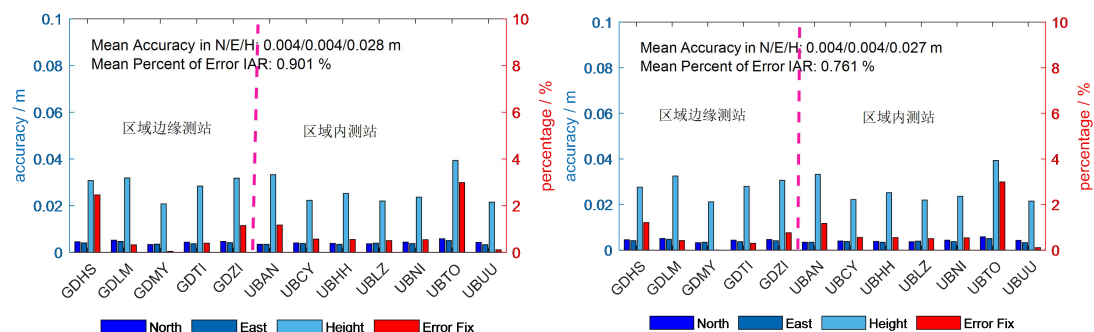


图 5-18 不同测站多天 PPP-RTK 定位误差及错误固定率统计结果
 Figure 5-18 Statistical results of positioning error and wrong-fix rate of PPP-RTK at different stations.

5.5 服务完好性案例分析

5.4 节分析指出在常规条件下，QI 信息对 PPP 性能提升有限。但在实时产品出现异常时，其重要性则尤为突出。通过广播完好性信息，可显著提升定位性能。本节详细分析三种异常场景：轨道机动、钟差重收敛、电离层异常/闪烁。通过对比分析常规 PPP-IAR 和引入完好性信息的增强 PPP-IAR，从而量化完好性信息所带来的性能改进。

5.5.1 卫星轨道机动

轨道机动作为卫星系统维护的重要操作，几乎每月都会发生。以 2025 年 4 月 26 日 G25 卫星的轨道机动为例，其产品综合误差自 UTC 15:00 后开始逐渐增大，到 UTC 21:00 时误差已达到 0.8 m。UTC 21:25 之后，服务器端轨道钟差产品估计过程实时探测到轨道机动，并停止估计与播发该卫星产品。图 5-19 展示了 2025 年 4 月 26 日部分监测站在此期间定位性能的变化情况，图中灰色阴影部分表示卫星机动持续时间。由图可知，卫星分米级的轨道机动对定位结果的影响相对有限，这是由于缓慢累积的综合产品误差部分被模糊度参数吸收，因而定位结果仅出现轻微的波动。引入完好性信息后，终端 PPP 根据 QI 信息调整卫星权重，不同测站的定位波动幅度减少了 0.01-0.02 m，使得定位精度有轻微的提升。

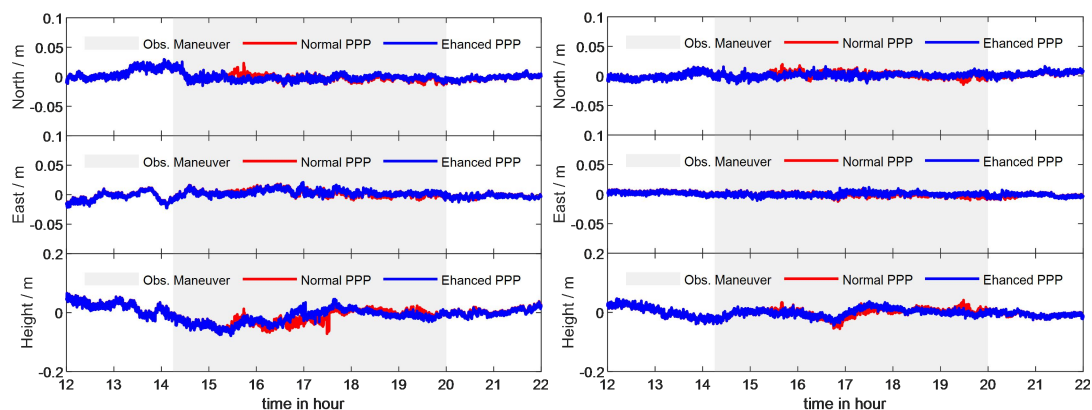


图 5-19 不同测站常规 PPP 与完好性增强的 PPP 的定位误差对比

Figure 5-19 Positioning errors of both normal PPP and integrity enhanced PPP at the AG48 (left) and HLST (right) station

5.5.2 卫星钟差跳变

实时产品估计时，常常存在粗差数据未被正确探测剔除的情况，这有时会导致抗差过程不通过检核，从而触发了滤波器重置。以 2025 年 2 月 2 日 UTC 13:01:00 发生的实时钟差产品异常为例，其间服务端多颗 GPS 卫星钟差估计被重置，包括 G03、G04、G08 和 G27。在该事件期间，多个监测站（如 AREG、EPNH、G003 和 G103）同时观测到一颗或多颗异常重置的卫星。图 5-20 给出了

部分监测站常规 PPP 和完好性增强 PPP 下的定位误差，图中灰色阴影表示异常时段。结果表明，在 UTC 13:01:00 时定位误差显著的跳跃，这与钟差产品重置历元完全对应，主要是由于多个卫星作为粗差引入了 PPP，解算过程中难以同时探测出多个异常卫星，因而解算结果被污染。然而，当引入完好性信息后，终端自动剔除这些异常卫星，定位精度得到显著改善：水平方向波动由数分米降低至 0.05 m 以内，高程方向波动由几分米降低至 0.08 m 以内。

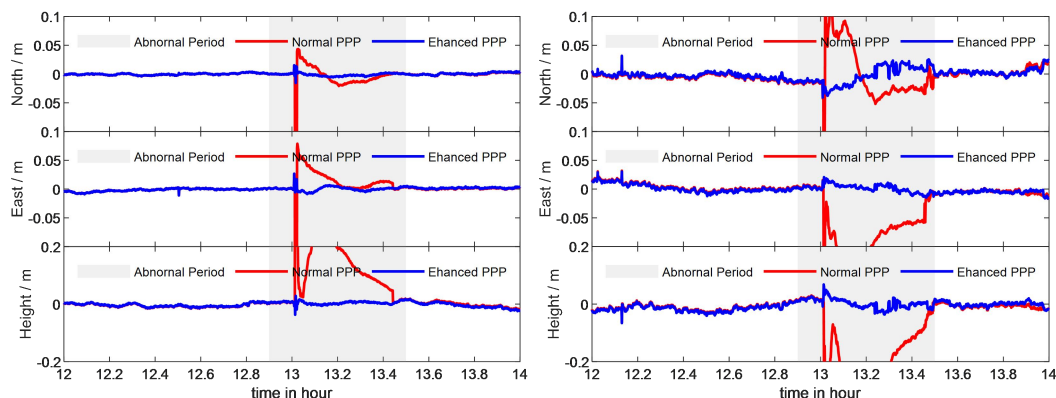


图 5-20 不同测站常规 PPP 与完好性增强 PPP 的定位误差对比

Figure 5-20 Positioning errors of both normal PPP and integrity enhanced PPP at the AREG (left) and EPNH (right) station.

5.5.3 电离层异常/闪烁

PPP-RTK 定位时电离层改正约束根据经验参数给定，然而在活跃时段由于电离层变化剧烈其建模精度衰减严重，根据经验给定的约束过于乐观，使得约束太小完全偏离了真实的模型精度，此时 PPP-RTK 定位将受到严重的影响，特殊情况 PPP-RTK 不但无法起到加速的效果，还会导致大量的模糊度错误固定。

以 2026/02/03 号巴西区域电离层活跃/闪烁为例，图 5-21 给出了电离层活跃期间 PPP-RTK 定位波动序列，作为对比考虑 QI 作为定权指标后的 PPP-RTK 定位结果也在图中给出。由图可知，PPP 收敛阶段由于采用经验的定权策略严重高估了电离层模型精度，导致约束后模糊度偏离真实滤波值，使得模糊度固定到错误的整数周上，多个测站数据表明，错误固定持续几分钟到几十分钟不等。而采用电离层 QI 作为定权因素后，不但避免了模糊度错误固定，还使得几分钟内 PPP 实现了正常的收敛。统计结果表明，采用电离层 QI 参与定权，在电离层活跃期可以避免 60%以上的错误约束和固定。

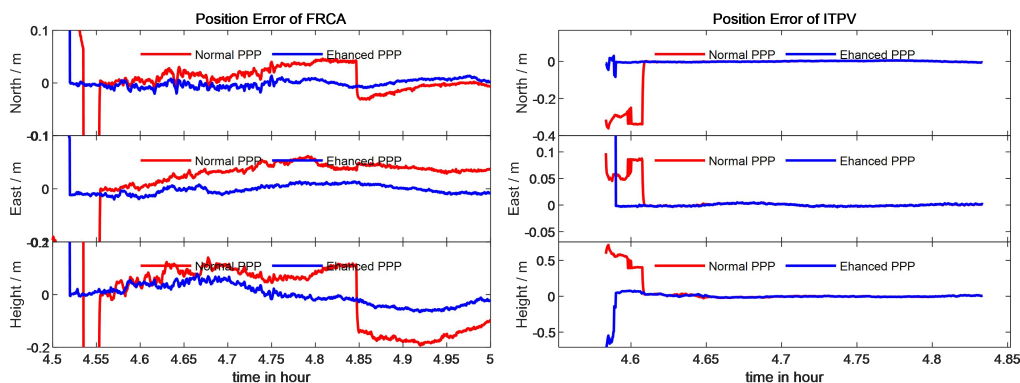


图 5-21 不同测站 PPP 定位结果(左图为常规 PPP-RTK,右图为 QI 信息增强的 PPP-RTK)

Figure 5-21 Performance of PPP for each station (Left panel represents normal PPP-RTK, right panel represents enhanced PPP-RTK with QI information)

5.6 本章小结

本章系统地提出了面向 PPP-IAR/PPP-RTK 服务的完好性监测框架，主要工作和结论包括：

(1) 建立了 SSR 产品完好性监测理论。系统梳理了完好性的基本概念、指标体系等。在此基础上，提出了面向 SSR 产品的完好性监测方法，该方法将传统的基于 URA 的完好性概念扩展到 SSR 改正数，为高精度定位服务的完好性保障提供了新的方法。

(2) 提出了基于 IF/GF 相位残差的 SSR 产品质量因子计算方法。分别为 OCU 产品（轨道+钟差+UPD）、电离层和对流层产品建立了实时质量因子计算模型，并分析了各类产品误差在用户端的传播机制。累积的数据验证表明，除 BDS2 以外 OCU 质量因子的可用率超过 98.0%，紧致度在 1.5~3.5 之间；电离层质量因子能够自适应地反映电离层活动水平的变化，对流层质量因子的平稳性较好。

(3) 提出了基于完好性信息的自适应加权策略。通过将质量因子融入 PPP-IAR/PPP-RTK 处理流程，实现了异常卫星的自动剔除和观测权重的自适应调整。实验结果表明，OCU 完好性定权策略在常规时段能够小幅地降低 PPP-IAR 错误固定率，对应定位精度改善很小；大气 QI 完好性定权策略在常规时段能够小幅地改善 PPP-RTK 效果，但在区域边缘，可以显著改善模糊度错误固定率。

(4) 通过三个典型异常场景验证了完好性监测的实用性。在卫星轨道机动、卫星钟差跳变等场景下，完好性监测系统能够快速检测到异常；通过将告警信息播发给终端用户，尤其是钟差跳变情况下极大地提高 PPP 的稳定性；在电离层异常/闪烁场景下，系统自适应调整约束强度，模糊度错误固定率显著的降低。

第 6 章 基于卫星播发的 PPP-RTK 服务验证

本章将基于前面章节提出的理论方法和技术成果，将其集成为完整的星基 PPP-RTK 增强服务系统，通过卫星链路将实时 SSR 改正数据播发至用户端，并对 PPP-IAR 和 PPP-RTK 的定位性能进行系统性验证。

首先，本章介绍星基增强服务的系统架构设计，包括系统部署，播发链路设计和 SSR 消息压缩编码等。然后，介绍 PPP-IAR 和 PPP-RTK 验证测试所采用的数据；最后，基于实时采集的数据，分别对 PPP-IAR 和 PPP-RTK 的定位性能进行评估和对比分析。

6.1 基于卫星播发的星基增强服务架构

6.1.1 服务系统整体设计

随着 GNSS 现代化进程的推进，通过卫星信号直接播发精密改正信息的星基增强服务已成为高精度定位服务的重要发展方向^[255]。与传统的地基网络 RTK 服务相比，星基增强服务具有覆盖范围广、基础设施依赖小、部署成本低等显著优势。目前，国际上已有多个星基精密定位增强服务投入运行或处于测试阶段，主要包括 Galileo 系统的 HAS, BDS 系统的 B2b-PPP 以及 QZSS 系统的 CLAS 服务等。图 6-1 给出了星基增强 PPP-RTK 系统的整体设计图，一般而言，星基增强 PPP-RTK 系统主要包括四部分：

(1) 测站数据流管理系统

测站数据流管理是整个系统的前置环节，必须保证数据流的稳定可靠，后续的步骤才能开展。数据管理系统主要功能是通过互联网实时将全球和区域的参考站数据汇总，并将历元异常的数据流剔除，然后将对齐的历元数据送入下游解算引擎。

(2) 服务数据解算系统

服务数据解算是整个系统的核心，负责实时 SSR 产品的生成，包括精密轨道，卫星钟差，相位/伪距偏差、大气改正等产品。本研究除产品生成外，解算系统还涉及产品质量因子的计算、产品完好性监测模块和异常产品的告警等。

(3) 服务播发系统

服务播发系统首先将改正数产品/完好性信息等按照压缩编码协议打包为 SSR 消息，然后通过上行注入链路发送至播发卫星，进而通过卫星将其广播给实时作业的用户。考虑到任何系统可能存在宕机的情况，服务解算系统和播发系统等都需要备份。

(4) 服务监控系统

为确保播发服务的可靠性和连续性，需要从多个层面对系统和播发状态进行监控，主要涉及：产品完整性监控，实时检查每个播发周期内各类 SSR 消息是否完整播发，统计消息丢失率和延迟率；播发链路监控，通过独立的监测接收机实时接收和解码播发信号，验证 SSR 消息的正确性和时效性；端到端时延监控，记录从产品生成到用户端接收的全链路时延，当时延超过阈值时触发告警；产品一致性监控，将播发的 SSR 产品与服务端的原始产品进行比对，检测编码/解码过程中可能引入的误差。

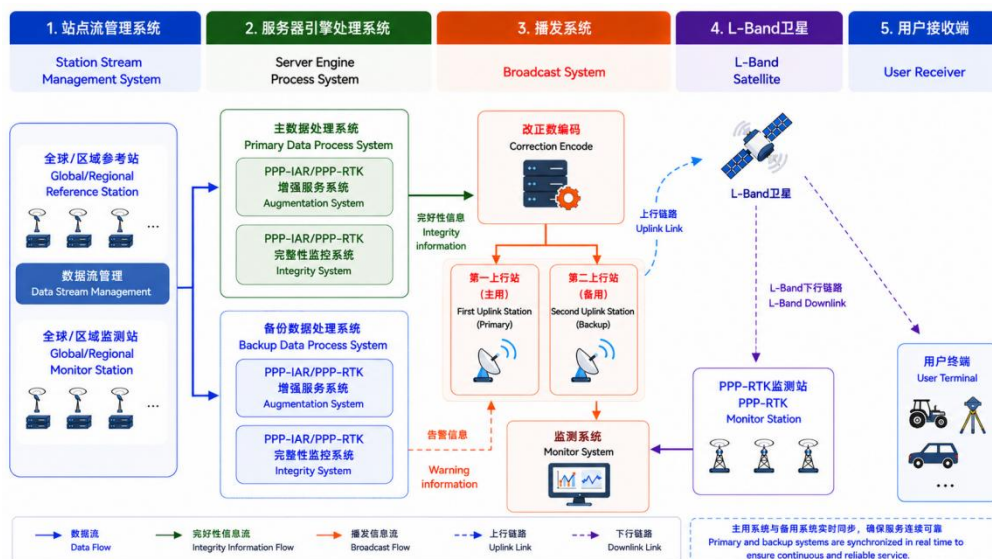


图 6-1 基于卫星播发的 PPP-RTK 服务系统设计图

Figure 6-1 System Design of Satellite-based PPP-RTK augmentation system

6.1.2 SSR 消息压缩

对于地基增强服务，差分信息通常经过移动网络播发，由 RTCM SC-104 委员会制定的 RTCM3 格式已被广泛接受为行业标准^[256]。此外，PPP 与 PPP-RTK 的数据格式也正在 RTCM SC-104 中进行标准化，即 RTCM-SSR。然而，基于卫星播发的数据速率较为有限，全球或区域 PPP 服务通常可提供的典型数据速率约为 500 bps，而广域级别的 PPP-RTK 服务约为 2000 bps 左右。基于地面的移动通信服务，可用数据速率可达到数百 kbps，远高于卫星播发服务的速率。因此，星基播发的协议格式需要具有很高的数据效率以减少吞吐量，同时具备通用性以支持多种通信方式，例如卫星服务和地面通信服务。

近年来，已经提出了多种 PPP/PPP-RTK 的开放协议格式，比如：Compact SSR。Compact SSR 格式由日本 QZSS CLAS 服务开发，针对卫星播发的带宽约束进行了优化^[257]，Galileo HAS 的格式同样基于 Compact SSR 设计^[258]。由于不同的星基服务侧重点不同，需要播发的额外信息各异，重新设计一套对应的数据产品协议必不可少。本研究基于实际要求，重新设计了一套数据产品协议，主要各类电文类型及播发策略如下表 6-1 所示。实际卫星播发的产品时，由于 L-Band

卫星覆盖区可见卫星数有限,因而无需将全部 GNSS 卫星产品播发,而是根据实际覆盖范围内的卫星数播发,一般的 L-Band 覆盖范围内卫星 GPS+GLO+GAL+BDS 在 70-90 颗左右,表中带宽速率按 80 颗卫星计算。

此外,由于电离层参数是按卫星播发,每个卫星有 16 个参数,其消耗的速率带宽较大。同时为了保证电离层模型的精度,每个子区域内覆盖的范围不能过大,否则电离层空间差异较大,3 阶 Sat-ASHF 函数模型难以保障电离层产品的精度。为此,本文每个电离层模型覆盖的区域大小设置在 150-200 万平方公里,中国全境可以分为 6-7 个区,每个区域边缘保留一定幅度的重叠。大气改正数是基于模糊度固定解提取的大气进行建模获得的,因而电离层产品仅播发有固定解的卫星。一般而言,每个区域内可以实现电离层建模的卫星最多不超过 30 颗,本文实际播发时根据卫星高度角和建模精度等指标择优选择部分卫星播发,且保证 GPS/Galileo/BDS2/BDS3 系统播发的卫星数分别不超过 6/5/5/6 颗。对流层产品播发的为天顶湿延迟改正,单组模型参数播发量低,其播发总量主要受格网数影响,为了控制播发量对流层按 2~3° 格网划分,每个区大概有 25-35 个格网数。

表 6-1 星基播发协议策略及带宽速率使用

Table 6-1 Broadcast strategies and data rate consumed for each sub-message type

服务类别	策略和模型	播发间隔/s	数据速率/bps
PPP-IAR 服务	轨道+钟差 (combined)	30	~221
	High-Rate 钟差	5	~264
	Code/Phase Bias	30	~431
	总计	-	~916
PPP-RTK 服务	广域电离层 (单个区)	30	~167
	格网对流层 (单个区)	90	~42
	总计 (按全国 7 个区算)	-	~1463
Integrity 服务	轨钟 UPD 完好性	30	~37
	广域电离层完好性 (单个区)	90 (按需)	~221
	格网对流层完好性 (单个区)	90 (按需)	~15
	总计 (全国按 7 个区算)	-	~1689
其他消息服务	PCO 更新信息	按需	<5
	异常告警信息	按需	<5
	总计	-	<10

6.1.3 卫星播发设计

差分数据通过自定义的协议编码后,需要将对应的信息调制 L-Band 通讯卫星信息电文中。本研究采用的通讯卫星下行链路的信号频段通常为 1525 Mhz-1559 MHz,调制方式采用 BPSK,编码方式一般卷积编码。通讯卫星播发协议的电文帧结构如图 6-2 所示。

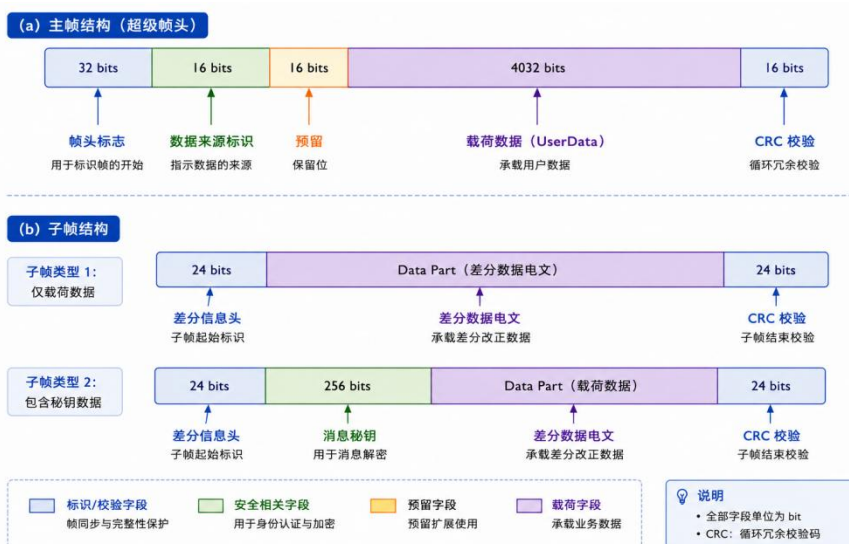


图 6-2 基于卫星播发的协议电文帧结构

Figure 6-2 Frame structure of the satellite-broadcast protocol message

图中载荷数据可以包含消息密钥和不含密钥两种，是否包含在差分信息头中根据标志符来指定。数据部分（Data Part）即为各类差分改正数据，包括多种信息类型，包括：轨道、钟差、伪距偏差、相位偏差、电离层、对流层、完好性等。由图还可以看出，每一帧包含的数据载荷为 4032 bits，选择不同的通讯播发速率时，用户收集完整的一帧信息所需的时间不同，比如选择 2400 bps 速率时，需要 1.68 s 播发一帧，表 6-2 给出了对应的是信号播发速率相关策略选择，播发的速率越大需要的功率越高，根据实际需要本文选择的为策略 3。

表 6-2 L-Band 星基播发速率配置

Table 6-2 Data Rate Configurations Broadcast with L-Band Satellite

播发速率策略	用户数据速率/bps	时间/s	信号带宽/kHz
策略 1	600	6.72	2.5
策略 2	1200	3.36	5.0
策略 3	2400	1.68	7.5
策略 4	4800	0.84	15.0

6.2 实验设计

由于 PPP-RTK 系统需要播发大气增强信息，基于卫星链路播发数据带宽有限，因而实际提供的服务通常是 PPP-RTK 和 PPP-IAR 相结合，在卫星覆盖区域内通过 L-Band 通讯卫星的全球波束播发 PPP-IAR 产品，然后在局部地区通过卫星区域波束播发大气产品。比如中国东北和新疆区域存在大量农业用户，且当地移动通讯网络连接不稳定，采用星基播发的 PPP-RTK 服务可以保证用户定位的

精度和连续性。

6.2.1 实验数据介绍

由于接收 L-Band 卫星信号的监控站分布和数量有限，首先使用移动网络播发产品并选取中国境内大量的 CORS 测站数据进行模拟验证。这些测站观测环境无遮挡，数据时段采用 2024 年 DOY 280-DOY 293 共 2 周。图 6-3 展示了用于 PPP-IAR 服务验证的 31 个测站的分布，由于 PPP-IAR 覆盖区域广，因而选取的测站在全国均匀分布。此外，为了分析 PPP-RTK 的实时性能，利用改进的 Sat-ASHF 模型基于中国新疆地区的 48 个测站估计了广域电离层改正数，测站分布如图 6-4（红色圆点）所示。同时，还选取了 28 个用于 PPP-RTK 验证 CORS 测站，其分布同样展示在图 6-4 中（蓝色圆点）。

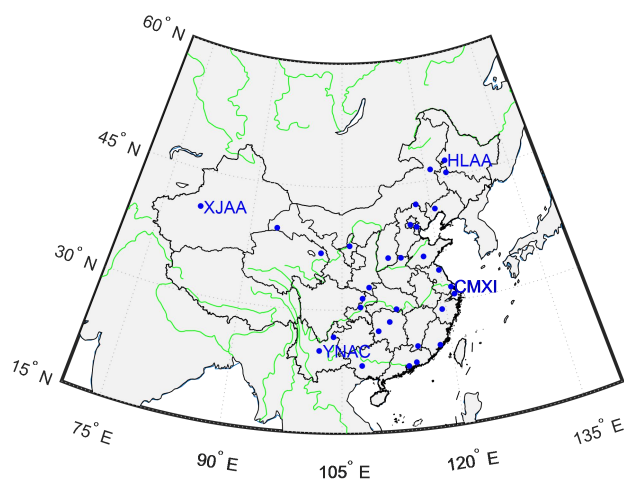


图 6-3 PPP-IAR 服务验证测站分布图

Figure 6-3 Distribution of User stations utilized for PPP-IAR validation

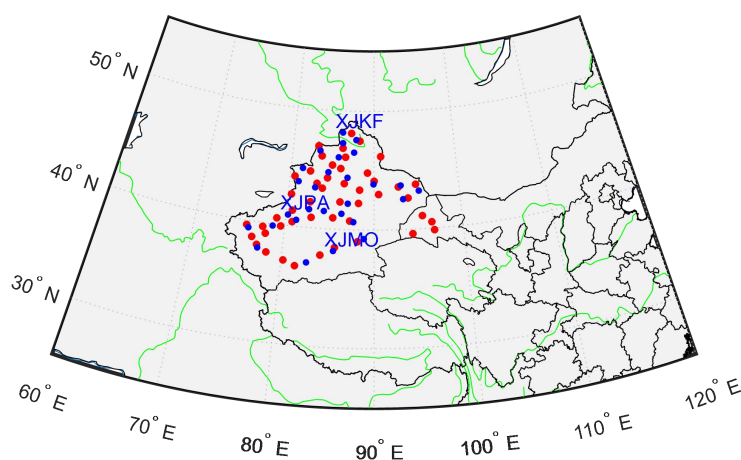


图 6-4 广域电离层建模及 PPP-RTK 验证站分布图

Figure 6-4 Distribution of stations used for ionospheric modelling and for PPP-RTK validation

此外，为了验证通过真实卫星链路播发的 PPP-RTK 定位效果，本文以农业自动驾驶为应用场景，在全国范围采集了上百个利用星基 PPP-RTK 服务进行耕种作业用户数据。由于用户作业时间不同，为保证数据量，选取了 2024 年秋播期间（10 月-12 月）数据进行分析，用户分布如图 6-5，圆圈大小表示用户使用次数。

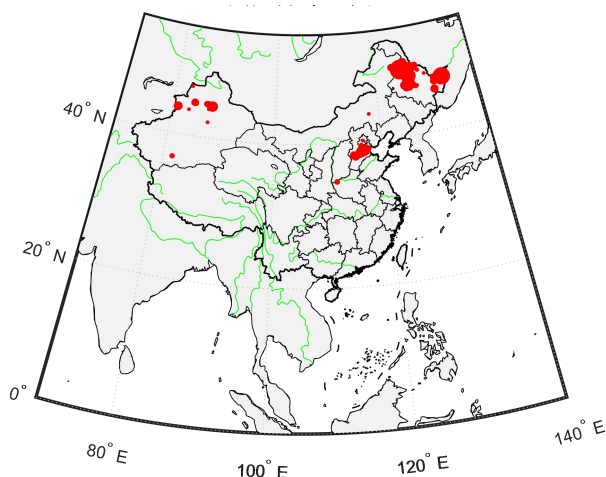


图 6-5 使用 PPP-RTK 服务的农业用户分布图

Figure 6-5 Distribution of agriculture user equipment with PPP-RTK system

6.2.2 处理策略与参数配置

用户端 PPP 数据处理时，采用 1 s 采样率的观测数据进行滤波解算和模糊度固定，高频数据仅推算输出定位结果。此外，终端 PPP 会根据实时收到的差分数据判断，如果存在大气产品则使用 PPP-RTK 解算，否则采用 PPP-IAR 解算。为保证定位性能效果最优，PPP 处理过程中采用通用模型均与服务端保持一致，这些模型包括先验对流层模型、映射函数、潮汐位移改正、PCO/PCV 改正、卫星姿态以及相位缠绕等，其余 PPP 处理策略在表 6-3 中详细给出。

表 6-3 PPP 定位策略汇总

Table 6-3 Strategies used for User PPP

类别	策略和模型
观测方程	UDUC 非差非组合
使用频率	GPS: L1/L2/L5; GLONASS: L1/L2; GAL: E1/E5a/E5b BDS2: B1I/B3I/B2I; BDS3: B1I/B3I/B2a/B1c
模糊度固定	GPS, GAL, BDS2 和 BDS3
高度角	10 度参与滤波，15 度参与 AR
对流层	ZWD+梯度估计
电离层	随机游走

接收机钟差	各个系统单独估计, 白噪声
伪距/相位方差	300:1
系统权重比	GPS:GLONASS:GAL:BDS2:BDS3 = 1:2:1:2:1
AR 策略	M-LAMBDA
定权方式	高度角+QI 定权
参数估计	1 s Kalman 滤波
其他	和 RT-UPD 保持一致

6.3 网络模拟链路 PPP-RTK 测试

6.3.1 多系统 PPP-IAR 效果分析

以 CMXI、HLAA、XJAA 和 YNAC 四个测站为例, 这四个测站分别位于中国的东、北、西和南部, 如图 6-3 中所示。PPP 数据处理时采用的是动态 PPP 模式, 且每 15 分钟重新初始化一次, 因此每个测站每天可以获得 96 个观测弧段。图 6-6 展示了 DOY 280 当天在北、东和高程三个方向上的定位误差及其收敛速度。从图可以看出, 一旦实现模糊度固定, 初始化即完成定位误差即可达到厘米级水平。四个测站在北向和东向的定位误差均在 0.01 m 以内, 而高程方向的误差在 0.03 m 以内。此外, 四个站的模糊度固定率均超过 94%, 意味着收敛阶段持续 6% 的时间, 即 $15 \times 60 \times 0.06 = 54$ s。尽管大多数弧段初始化能够在 1 分钟内完成, 但仍存在部分历元在模糊度固定之后水平误差超过 0.05 m、高程误差超过 0.10 m 的情况, 将这些历元定义为错误固定, 其占总历元数的比例称为错误固定率。那么, YNAC 测站的错误固定率最高达到 0.32%。造成错误固定的原因在于, 在模糊度初始阶段, 通常容易出现固定卫星数量可能少于 10 颗, 从而降低了定位精度。此外, 模糊度解算过程中偶尔出现的部分卫星错误固定也可能导致定位精度低。

对全部 31 个测站一周的观测数据进行批量处理, 共有超过 20,000 个观测弧段 (96 弧段/天/测站 \times 7 天 \times 31 测站) 数据。图 6-7 给出了所有弧段的定位误差以及 TTFF (Time-To-First-Fix) 统计结果。本文将 TTFF 定义为模糊度首次成功固定并在至少连续 20 个历元内保持正确, 同时水平精度优于 0.05 m、高程精度优于 0.10 m。统计结果表明, 所有弧段的平均定位误差在水平方向优于 0.01 m, 高程方向为 0.022 m, 平均 TTFF 为 50.2 s, 这表明实时 PPP-IAR 具有优异的性能。此外, 95% 的弧段能够在 101 s 内完成模糊度固定, 99% 的弧段在 304 s 内完成固定。定位精度收敛情况统计表明, 若要满足 95% 弧段的定位精度达到 0.10 m 和 0.05 m, 初始化时间分别需要 100 s 和 332 s。需要注意的是, 仍有 0.41% 的弧段在 15 分钟后仍未完成模糊度固定。

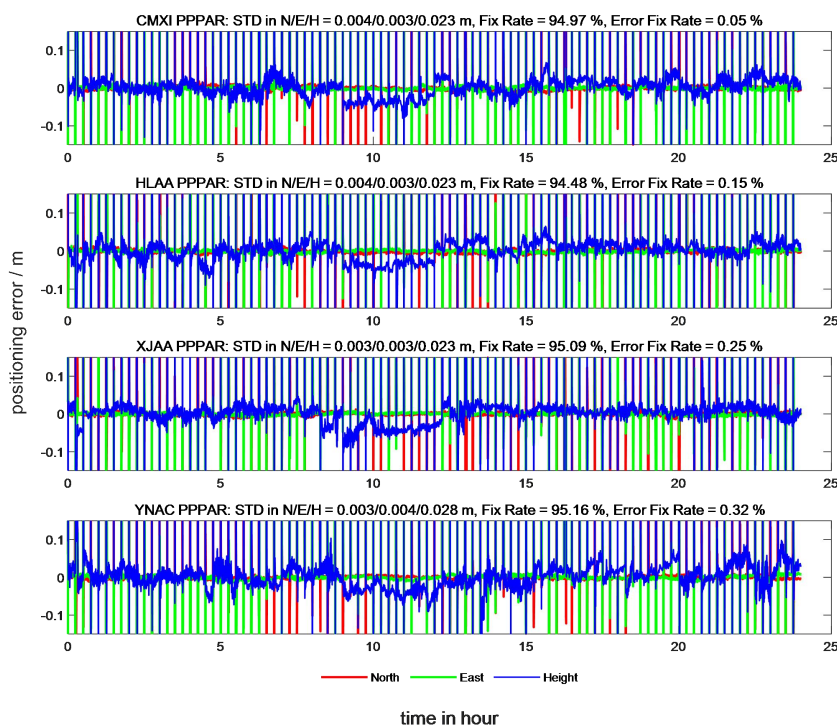


图 6-6 不同测站 PPP-IAR 在北、东、高三个方向的定位误差序列

Figure 6-6 Positioning error series of PPP-IAR at four different stations in north, east and height direction

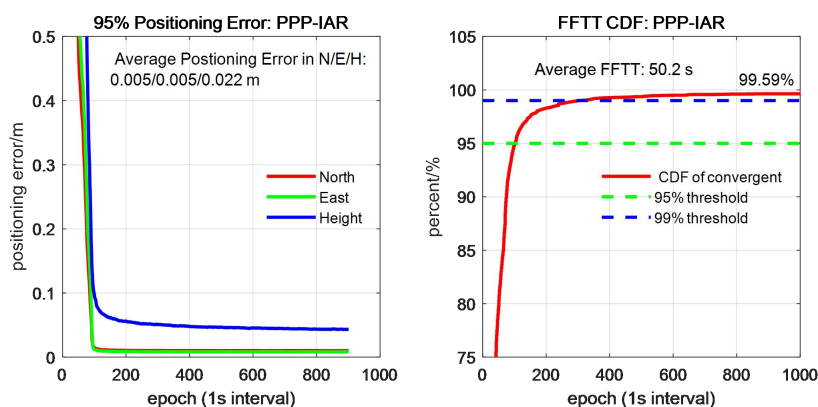


图 6-7 31 个用户测站 PPP-IAR 的定位精度 (左) 和 TTF (右) 统计结果

Figure 6-7 Statistical positioning accuracy (left) and TTF (right) of PPP-IAR from 31 user stations

6.3.2 多频多系统 PPP-RTK 效果分析

为了分析广域电离层模型精度，处理了新疆区域 28 个用户测站的数据，将 PPP-IAR 和 PPP-RTK 结果进行对比验证。以 XJPA 和 XJMO 测站为例，图 6-8 展示了这两个测站的定位误差和收敛时间。从结果可知，与 PPP-IAR 相比，PPP-RTK 在 XJPA 测站的高程方向定位误差由 0.032 m 减少到 0.024 m 精度，精度提升了 25%，而在 XJMO 测站的精度略微提升。此外，从收敛时间看采用

PPP-RTK 后显著缩短, 其中 XJMO 测站缩短约 14.4 s, XJPA 测站缩短约 19.4 s。同时, 在 PPP-IAR 解中存在一些定位误差超过 0.01 m 的历元, 而在使用电离层产品后, 这些错误固定的历元数量几乎减少了一半。

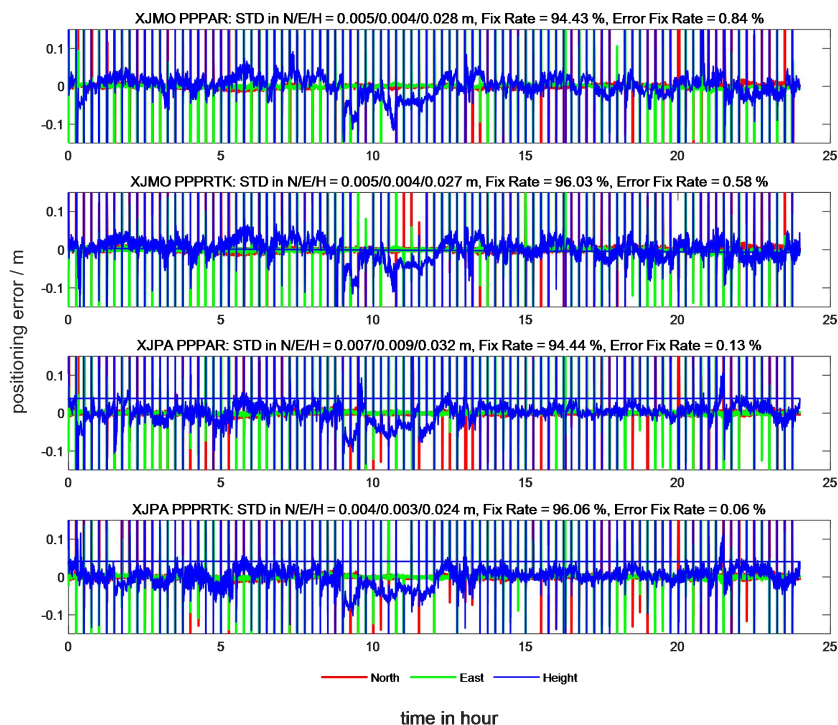


图 6-8 XJPA 和 XJMO 测站 PPP-IAR 与 PPP-RTK 的定位误差序列

Figure 6-8 Positioning error series of PPP-IAR and PPP-RTK at station XJPA and XJMO

图 6-9 给出了来自 28 个用户测站超过 18,000 个观测弧段的 PPP-IAR 与 PPP-RTK 定位误差和 TTFF 统计结果。结果表明, PPP-RTK 平均定位精度相较 PPP-IAR 略有提升。然而, 在定位精度收敛速度方面, PPP-RTK 明显更快: PPP-RTK 仅需 86 s 即可在水平/高程方向达到 0.05 m/0.10 m 的精度, 而 PPP-IAR 则需要 165 s。此外, PPP-RTK 的平均 TTFF 显著降低 36.9%, 从 62.1 s 降至 39.5 s。对于 PPP-RTK 而言, 95% 的弧段在 86 s 内完成模糊度固定, 99% 的弧段在 197 s 内完成固定; 相比之下, PPP-IAR 分别为 164 s (95%) 和 368 s (99%)。此外, 统计表明 PPP-IAR 中存在 0.19% 的弧段未完成模糊度固定, 而 PPP-RTK 几乎解决了这一问题, 仅有 0.03% 的弧段未固定。

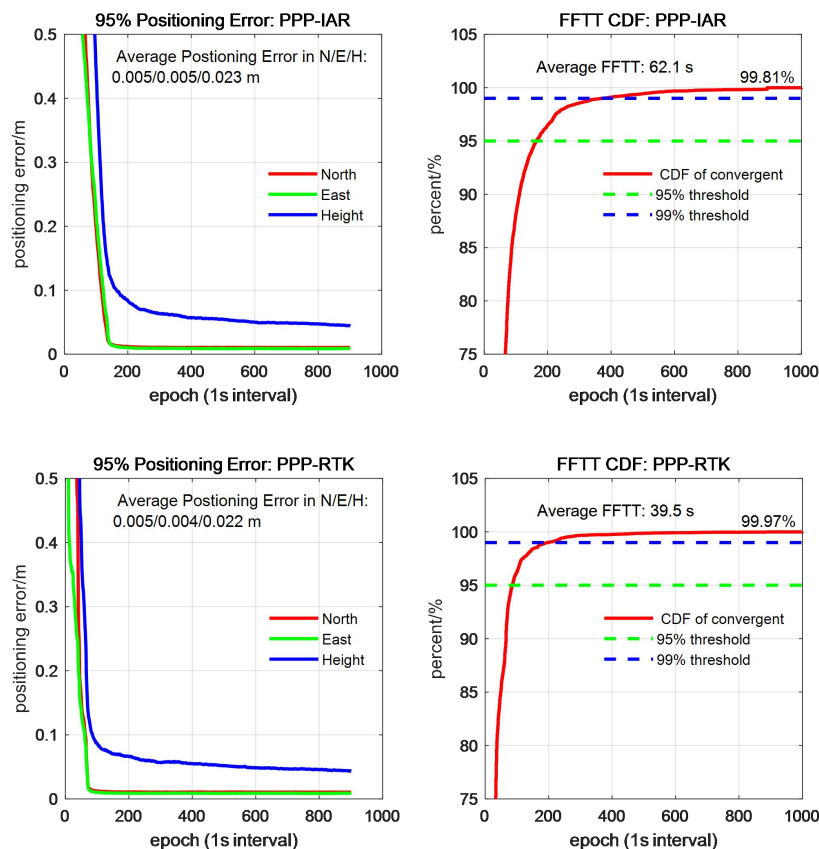


图 6-9 28 个用户测站 PPP-IAR 和 PPP-RTK 的定位精度和 TTFF 统计结果
 Figure 6-9 Statistical positioning accuracy and TTFF of PPP-IAR and PPP-RTK from 28 user stations

6.3.3 不同电离层活跃程度 PPP-RTK 效果分析

为了评估本文提出的 Sat-ASHF 电离层模型的通用性，根据地磁 Kp 指数将观测时段划分为平静、中等活跃和严重活跃等不同电离层等级，并对 PPP-IAR 与 PPP-RTK 的定位性能的提升情况进行比较，其对比结果汇总于表 6-4。结果表明，无论电离层活跃情况如何，PPP-RTK 在平均 TTFF、三维定位精度以及误固定率方面均优于 PPP-IAR。其中，三种场景下收敛时间分别缩短了 27.3%，41.1% 和 39.6%；错误固定分别降低了 27.7%，31.1%和 33.2%。该结论定量地证明了改进的 Sat-ASHF 模型在正常及扰动电离层环境下均能够提升定位精度和鲁棒性。

表 6-4 不同电离层条件下的 PPP-RTK 性能对比

Table 6-4 Performance of PPP-RTK under different ionospheric conditions

电离层活跃等级	Geomagnetic Kp index	PPP-IAR 性能			PPP-RTK 性能		
		TTFF/s	3D/m	error-fix rate	TTFF/s	3D/m	error-fix rate
平静	<3.0	51.2	0.019	0.47%	37.2	0.019	0.34%
重度	3.0~6.0	65.7	0.024	1.22%	38.7	0.022	0.84%
严重	>6.0	69.5	0.03	2.50%	42.7	0.028	1.67%

6.4 卫星播发链路 PPP-RTK 测试

6.4.1 产品完整率和数据龄期统计分析

基于卫星播发的 PPP-RTK 定位和网络模拟的 PPP-RTK 定位效果相比，主要有三方面不同，使得定位性能存在一定程度的衰减：1) 实时产品经过卫星播发时，需要将产品流转发到上星系统，然后由地面上星系统将产品实时注入 L-Band 卫星，最后再由卫星将信息广播给各个用户，因而播发的链路较移动网络播发时间要长，使得用户收到的产品龄期更大；2) 由于信息注入 L-Band 卫星和广播给用户过程中信号均是以电磁波信息在大气中传播，那么传播过程中必然存在信息丢包和信息误码无法解析的情况；3) 由表 6-1 通过卫星播发的产品其播发频率做了调整，由于定位解算需要接收到相应的产品后才可以开始，这会导致收敛时间相应的增加 1-30 s。

图 6-10 给出了在静态空旷和实际农户作业条件下接收到的产品丢包情况，由图可知，整体空旷条件下产品丢包的情况很少，各类产品的完整率均在 98% 以上，所有产品的平均可用率为 98.92%。而农业用户实际作业下，产品存在轻微的丢包情况，各类产品的完整率在 95% 到 98% 之间波动，所有产品的平均可用率为 95.69%。

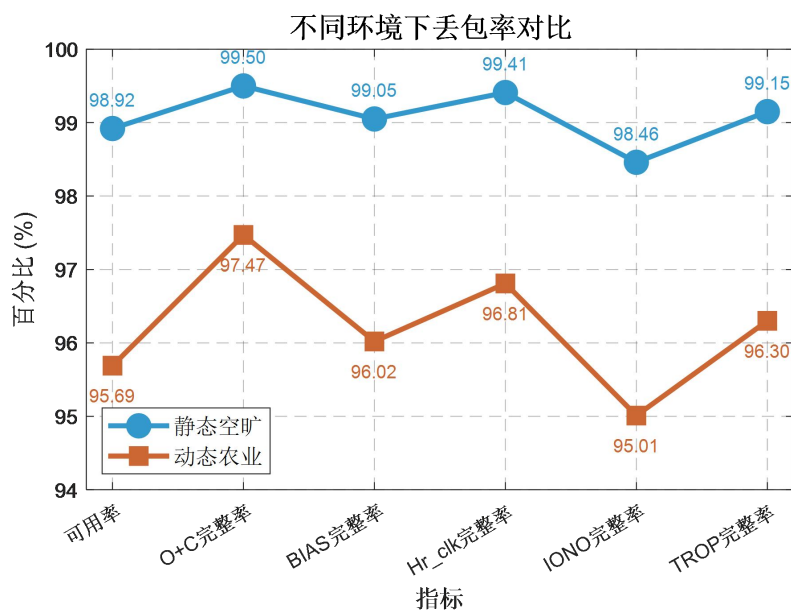


图 6-10 不同场景下各类产品丢包情况统计结果

Figure 6-10 Statistics of data loss for different products at two scenarios

图 6-11 给出了在静态空旷和实际农户作业条件下定位结果龄期统计情况，由图可知，整体空旷条件下监控站改正数产品基本 99% 的龄期在 15 s 以内，平均龄期为 11.0 s。而农业用户实际作业下，产品由于存在轻微的丢包现象，这会导致用户产品的龄期增加，图 6-10 结果表明实际用户龄期仅能保证 90% 左右的比例龄期在 15 s 之内，所有时段平均龄期为 13.5 s。

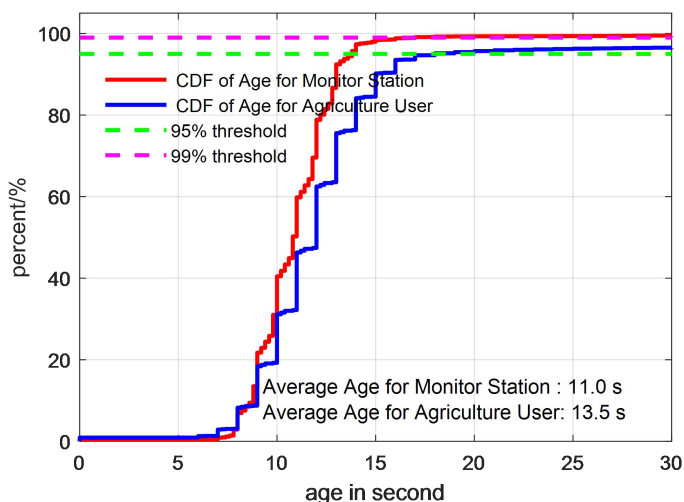


图 6-11 不同场景下差分数据龄期情况统计结果

Figure 6-11 Statistics of ages for different products at two scenarios

6.4.2 静态 PPP-RTK 效果分析

以 0008/000B/000E/000F 四个测站为例，图 6-12 给出了在静态空旷条件下几个示例测站的定位收敛情况，PPP 每小时重启一次。从结果可知，四个测站的定位精度水平均优于 0.01 m，高程均优于 0.03 m。此外，四个站的模糊度固定率均超过 98%，这意味着大多数弧段初始化能够在 1-2 分钟内完成。此外，由于采用的是 PPP-RTK 定位，这四个测站模糊度错误固定的比例相对较低，均不超过 0.2%。整体而言，基于星基链路播发的 PPP-RTK 服务，在空旷环境下定位结果和网络模拟链路的 PPP-RTK 服务整体性能在相同的水平。

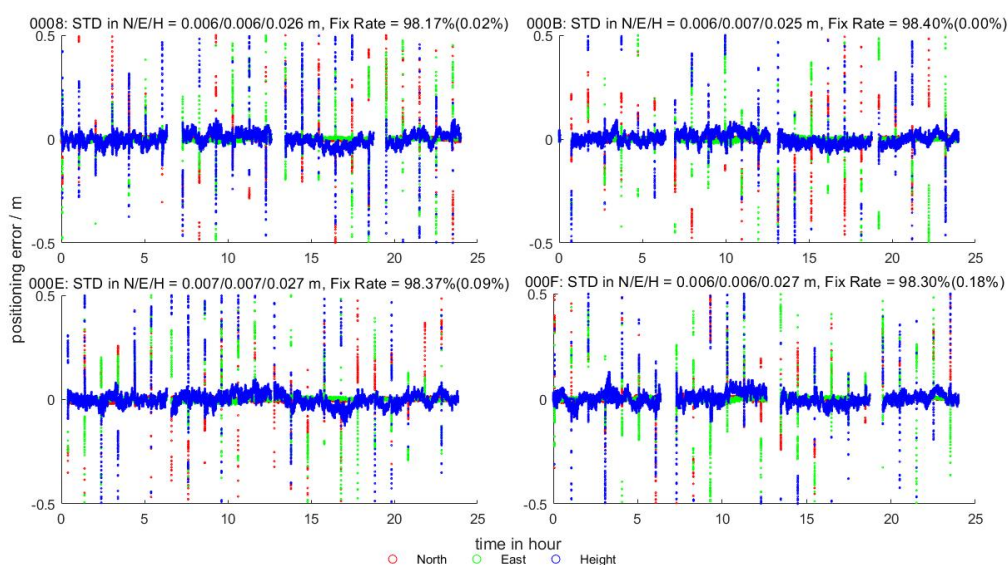


图 6-12 星基 PPP-RTK 服务监控站定位序列图

Figure 6-12 Position Error of Monitor Station for satellite-based PPP-RTK system

图 6-13 给出了来自全国范围内 12 个星基监控站 PPP-RTK 定位误差和 TTFF

统计结果。结果表明，通过卫星链路播发的 PPP-RTK 服务，在静态空旷环境下其定位精度表现较高，水平和高程方向平均优于 0.01 m 和 0.025 m。此外，PPP-RTK 的平均 TTFF 为 45.1 s，比通过网络模拟链路的 39.5 s 略高。同时，统计表明卫星链路播发的 PPP-RTK 其错误固定率仍然在 0.38%，显著高于网络模拟链路 PPP-RTK 服务的 0.03%。

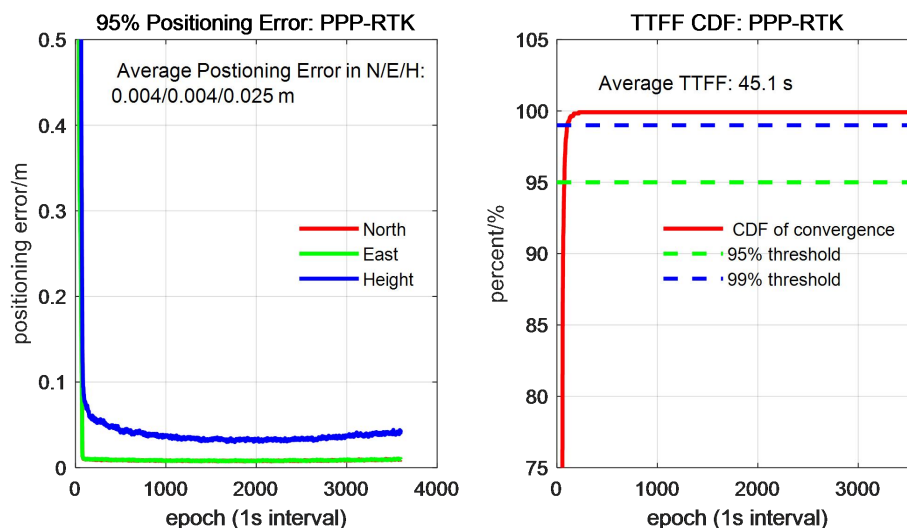


图 6-13 星基 PPP-RTK 服务监控站的定位精度和 TTFF 统计结果

Figure 6-13 Statistical positioning accuracy and TTFF of PPP-RTK from monitor stations

6.4.3 动态 PPP-RTK 效果分析

图 6-14 给出了在真实农业农户作业条件下定位结果轨迹图，由于动态作业没有绝对的定位参考值，因而此处分析时仅考虑收敛时间。以用户 12437010003D 为例，由图可知，用户开机启动后首先单点定位持续了 15 s，随后接收到 L-Band 差分信息后开始 PPP 解算，经过大概 4 min 50 s 后模糊度固定，此后一直维持固定解状态，这说明整个过程 PPP 比较稳定，收敛完成后固定率维持在 100%。

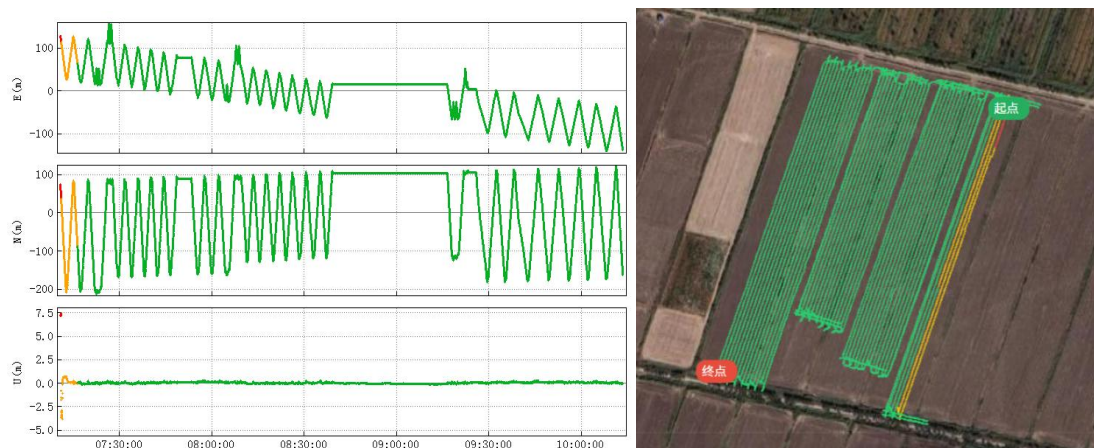


图 6-14 星基 PPP-RTK 服务动态用户定位轨迹图

Figure 6-14 Position Error of Dynamic User for satellite-based PPP-RTK System

图 6-15 给出了秋播期间所有用户定位收敛情况，虽然农业用户基本在农田作业，环境大部分属于完全空旷，但仍然存在少量用户作业场景存在遮挡，其性能将受到较大的影响。收敛时间统计时，单点状态由于未接收到差分数据因而不参与统计，TTFF 从首次浮点解开始统计。由图可知，卫星链路播发的 PPP-RTK 服务，其动态用户收敛时间明显长于静态用户，统计结果表明平均 PPP-RTK 收敛时间为 82.7 s，远高于静态空旷场景下 45.1 s。此外，统计结果显示，要保证 95%和 99%的用户收敛，所需时间分别为 190 s 和 299 s。

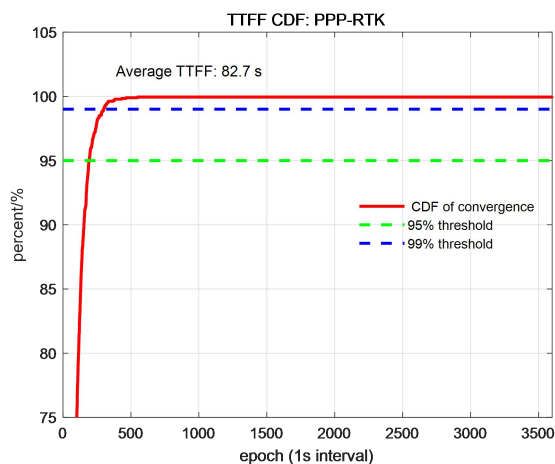


图 6-15 星基 PPP-RTK 服务的动态农业用户 TTFF 统计结果

Figure 6-15 Statistical TTFF of PPP-RTK from dynamic User

6.5 本章小结

本章将前几章建立的理论方法和技术成果集成为一套完整的星基 PPP-RTK 增强服务系统，并对其定位性能进行了系统性验证。主要内容如下：

(1) 服务架构设计：本文设计的星基 PPP-RTK 增强服务系统包括：测站数据流管理系统、服务数据解算系统、服务播发系统和服务监控系统。通过自定义的数据流协议，采用 2400 bps 播发速率即可实现中国全境的 PPP-RTK 服务。

(2) 网络模拟链路 PPP-RTK 性能验证：基于新疆 28 个测站数据分析，结果表明，多频多系统 PPP-RTK 的固定解水平收敛时间为 39.5 s，且收敛后水平和高程方向精度分别优于 0.01 m 和 0.023 m。基于全国 31 个参考站数据，PPP-IAR 结果表明，平均收敛时间为 50.2 s；但需要指出的是 PPP-IAR 存在千分之几的模糊度错误固定，大部分出现在重收敛阶段。

(3) 卫星播发链路 PPP-RTK 性能验证：基于中国区域 12 个星基监控站的数据分析，结果表明在静态空旷环境下其星基 PPP-RTK 定位精度表现较好，水平和高程方向精度优于 0.01 m 和 0.025 m。此外，PPP-RTK 的平均 TTFF 为 45.1 s，比通过网络模拟链路的 39.5 s 略高。

(4) 星基 PPP-RTK 动态场景验证：基于农业场景车载动态实验表明，动态

用户收敛时间明显长于静态用户，星基 PPP-RTK 平均收敛时间为 82.7 s，远高于静态空旷场景下 45.1 s，这与实时数据流丢包、延迟较大等因素相关。

第 7 章 总结与展望

7.1 工作总结

本文围绕 PPP-RTK 技术从理论模型到工程应用的完整链路，全面研究了多频多系统 PPP-RTK 数学模型、实时精密产品生成、多尺度大气延迟建模、服务完好性监测以及卫星播发的 PPP-RTK 增强服务系统设计与验证等关键问题。全文的主要研究工作总结如下：

(1) 建立了多频多系统 UDUC PPP-RTK 数学模型与方法体系。本文系统推导了包含 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 等系统的非差非组合 PPP-RTK 函数模型，通过重参数化策略解决了模型中的秩亏问题，明确了各类参数的物理含义与可估性。在多系统融合处理方面，详细讨论了系统间偏差 (ISB) 和频率相关误差 (如 IFCB、DCB) 的处理策略；在模糊度固定方面，建立了超宽巷/宽巷/窄巷多频级联固定方法，并结合部分模糊度固定和多种检核策略，确保了模糊度固定的高成功率和低错误固定率。上述理论方法为后续各章的研究提供了统一的数学框架。

(2) 实现了多频多系统实时精密产品的高精度估计与 PPP-IAR 验证。基于自主开发的 SWAS 系统，实现了实时精密轨道确定、钟差估计和多频 UPD 估计的一体化处理。实时超快速轨道方面，GPS/GLONASS/Galileo/BDS3-MEO 的三维精度分别为 0.044 m、0.072 m、0.070 m 和 0.079 m，BDS2 和 BDS3-IGSO 3D 精度较差分别为 0.217 m 和 0.235 m；实时钟差方面，GPS/Galileo/BDS3-MEO 精度分别为 0.075 ns、0.092 ns 和 0.128 ns，BDS2 和 BDS3-IGSO 钟差精度比其他系统明显差，分别达到了 0.297 ns 和 0.332 ns；此外，文中针对轨道边界跳变通过平滑轨道策略可以提升钟差估计精度 5%，采用真实的轨道姿态模型后，地影期卫星钟差精度可以提升 20-40%；多频 UPD 方面，各系统超宽巷/宽巷 UPD 稳定性优于 0.05 周，浮点模糊度小数部分分布结果表明各系统 EWL/WL/NL 模糊度在 ± 0.25 周范围内的比例均超过 90%。采用上述实时产品的多频多系统 PPP-IAR 定位精度在 N/E/U 方向分别达到 0.010 m、0.010 m 和 0.025 m，达到 IGS 事后产品定位精度水平的 84.6%。此外，IFCB 与 UPD 统一估计策略与提前改正 IFCB 方案的效果几乎等价，验证了实时产品已完全满足 PPP-IAR 应用对精密产品的精度需求。

(3) 提出了不同尺度大气建模方法并验证了 PPP-RTK 增强效果。在大气延迟提取方面，通过并址站分析表明，PPP-IAR 固定解提取的电离层和对流层精度分别优于 0.020 m 和 0.003 m，而浮点解提取的电离层平均差异达 5~10 cm，难以满足高精度大气建模需求。在广域电离层建模方面，提出了顾及卫星空间差异的

Sat-ASHF 模型, 通过为每颗卫星估计独立的球谐系数消除了卫星间建模误差的交叉污染, 建模精度达到 0.252 TECU。在局域电离层建模方面, 设计了局域模型与残差格网相结合的多尺度增强策略, 在 50~100 km 站间距网络中实现了 0.02 m 的改正精度, 较单独使用局域模型提升 13%。在对流层建模方面, 建立了基于格网插值的实时对流层湿延迟模型, 广域和局域精度分别优于 0.02 m 和 0.01 m。实时 PPP-RTK 验证表明, 采用广域大气增强的 PPP-RTK 平均固定时间约为 1 min, 较 PPP-IAR 缩短约 26.3%; 采用局域大气增强的 PPP-RTK 平均固定时间为 27.4 s, 较 PPP-IAR 的 59.4 s 缩短约 53.8%。

(4) 构建了面向 PPP-IAR/PPP-RTK 服务的完好性监测框架。本文提出了基于 IF/GF 相位残差的 SSR 产品质量因子 QI 计算方法, 分别为 OCU 产品(轨道+钟差+UPD)、电离层产品和对流层产品建立了实时质量监控模型, 并分析了各类产品误差在用户端的传播机制。累积数据验证表明, OCU 质量因子的可用率超过 98.0%, 紧致度在 1.5~3.5 之间; 电离层质量因子能够自适应反映电离层活动水平变化, 对流层质量因子平稳性最好。在此基础上, 提出了基于完好性信息的自适应加权策略, 将质量因子融入 PPP-IAR/PPP-RTK 处理流程, 实现了异常卫星的自动剔除和观测权重的自适应调整。在常规场景下, 采用 QI 质量因子改善终端 PPP 定权策略, 可以小幅提升 PPP 定位性能。在卫星轨道机动、钟差跳变和电离层扰动三个典型异常场景下, 完好性监测系统均能快速检测异常, 尤其在钟差跳变场景下极大提高了 PPP 的稳定性, 在电离层磁暴场景下显著降低了模糊度错误固定率。

(5) 设计并验证了基于卫星播发的 PPP-RTK 增强服务系统。本文将前述理论方法和技术成果集成为一套完整的星基 PPP-RTK 增强服务系统(即 SWAS), 包括测站数据流管理、服务数据解算、卫星数据播发和服务监控四大模块。通过自定义播发协议, 以 2400 bps 的播发速率可以实现中国全境的 PPP-RTK 服务覆盖。网络模拟链路验证表明, 多频多系统 PPP-RTK 水平收敛时间为 39.5 s, 收敛后水平和高程精度分别优于 0.01 m 和 0.023 m; 全国 31 站 PPP-IAR 平均收敛时间为 50.2 s。卫星播发链路验证表明, 静态场景下星基 PPP-RTK 水平和高程精度分别优于 0.01 m 和 0.025 m, 平均 TTFF 为 45.1 s; 和模拟链路相比, 整体性能差异较小。农业场景车载动态实验表明, 动态 PPP-RTK 平均收敛时间为 82.7 s, 受实时数据流丢包和延迟等因素影响较静态场景有所增加, 但整体定位性能满足精准农业等应用需求。

7.2 未来展望

尽管本文在 PPP-RTK 的理论方法、产品生成、大气建模、完好性监测和系统验证等方面取得了一系列研究成果, 但 PPP-RTK 技术在走向大规模商业化应

用的过程中仍面临诸多挑战。以下从几个方面对未来研究方向进行展望。

(1) 更高精度的自适应大气建模方法。本文提出的多尺度大气建模方法在常规电离层条件下取得了较好效果,但在电离层暴等极端空间天气条件下,模型精度仍有较大退化。未来可探索基于机器学习和深度学习的电离层预测方法,利用历史数据训练电离层时空变化的非线性模型,提高极端条件下的建模精度。此外,融合数值天气预报(NWP)数据的对流层建模方法也值得深入研究,通过同化 GNSS 对流层产品与 NWP 模式数据,有望进一步提升对流层改正的时空分辨率和精度。

(2) 更完善的多层次完好性监测体系。本文建立的基于 IF 相位残差的质量因子方法为 SSR 产品完好性监测提供了有效手段,但目前的完好性框架主要面向产品层面,尚未建立从产品到用户端定位结果的完整完好性链路。未来需要研究面向用户端的保护水平计算方法,建立从 SSR 产品质量到用户定位完好性的定量映射关系;同时,本文在进行完好性系统设计时采用的为 10^{-5} 完好性风险,并不能满足自动驾驶等安全关键应用对完好性的严格要求,未来还需要将完好性要求进一步提升到 10^{-7} 甚至 10^{-8} ,并设计对应的完好性监测系统。此外,还可以进一步研究多源完好性信息的融合方法,将卫星端、网络端和用户端的完好性信息进行综合评估,构建端到端的完好性保障体系。

(3) LEO 增强的 PPP-RTK 技术。低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星具有信号强度高、几何变化快的优势,能够显著改善 GNSS 定位的几何构型,加速模糊度收敛。未来随着大规模 LEO 星座(如 SpaceX Starlink、中国星网 GW 星座等)的部署,LEO 增强的 PPP-RTK 有望实现秒级甚至瞬时收敛。

(4) 多传感器融合的高精度定位技术。PPP-RTK 技术在开阔环境下已展现出优异的定位性能,但在城市峡谷、室内外过渡区域等复杂环境中,GNSS 信号遮挡和多径效应严重制约了定位的连续性和可靠性。未来需要研究 PPP-RTK 与惯性导航系统(INS)、视觉定位、激光雷达(LiDAR)等多传感器的深度融合方法,通过多源信息互补实现复杂环境下的高精度连续定位。

(5) 面向大规模用户的 PPP-RTK 服务优化。本文设计的星基 PPP-RTK 系统以 2400 bps 的播发速率可以实现中国全境覆盖,但随着用户规模的增长和应用场景的多样化,服务系统面临播发带宽有限、用户差异化需求难以满足等挑战。如何利用现有的播发速率真正覆盖全部区域,仍然有待于更大尺度的大气建模精度的优化。未来可研究基于海量终端用户数据的实时电离层协同建模,利用用户数据和服务端参考站数据,构建云-端一体的电离层模型。同时,可探索基于低轨通信网络的 PPP-RTK 改正数播发方式,利用高带宽、低延迟的通信链路为用户提供更精细的差分改正信息,进一步提升 PPP-RTK 的收敛速度和定位精度。

参考文献

- [1] Spilker Jr, James J., et al., eds. Global positioning system: theory and applications, volume I[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [2] Zhu Y, Zhang Q, Mao Y, et al. Comprehensive performance review of BDS-3 after one-year official operation[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 883-899.
- [3] U.S. Coast Guard Navigation Center. GPS Constellation[EB/OL]. <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>, 2026-02-09.
- [4] European GNSS Service Centre. Constellation Information[EB/OL]. <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>, 2026-02-09.
- [5] Information-Analytical Center for Positioning, Navigation and Timing. GLONASS Constellation Status[EB/OL]. <https://www.glonass-iac.ru/en/sostavOG/>, 2026-02-09.
- [6] 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.
- [7] Kouba J, Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.
- [8] Chen J, Li H, Wu B, et al. Performance of real-time precise point positioning[J]. *Marine Geodesy*, 2013, 36(1): 98-108.
- [9] Karabatić A, Weber R, Haiden T. Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(10): 1691-1703.
- [10] Hefty J, Gerhatova L. Potential of precise point positioning using 1 Hz GPS data for detection of seismic-related displacements[J]. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2012, 9(3): 167.
- [11] Agrotis L, Caissy M, Ruelke A, et al. Real-time service technical report 2014[J]. IGS Central Bureau, 2014: 187.
- [12] Hadas T, Bosty J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 93-105.
- [13] Elsobeiey M, Al-Harbi S. Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 565-571.
- [14] Li B, Ge H, Bu Y, et al. Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 12.
- [15] Miya M, Fujita S, Sato Y, et al. Centimeter level augmentation service (CLAS) in Japanese quasi-zenith satellite system, its user interface, detailed design, and

- plan[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016). 2016: 2864-2869.
- [16] Namie H, Kubo N. Performance evaluation of centimeter-level augmentation positioning L6-CLAS/MADOCA at the beginning of official operation of QZSS[J]. IEEJ Journal of Industry Applications, 2021, 10(1): 27-35.
- [17] Gao W, Zhou W, Tang C, et al. High-precision services of BeiDou navigation satellite system (BDS): Current state, achievements, and future directions[J]. Satellite Navigation, 2024, 5(1): 20.
- [18] Kan H, Hu Z, Chen G, et al. Performance comparison of orbit and clock augmentation corrections from PPP-B2b, HAS and CLAS[J]. Advances in Space Research, 2024, 74(2): 668-681.
- [19] Tao J, Liu J, Hu Z, et al. Initial assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 131.
- [20] Fernandez-Hernandez I, Chamorro-Moreno A, Cancela-Diaz S, et al. Galileo high accuracy service: initial definition and performance[J]. GPS Solutions, 2022, 26(3): 65.
- [21] Zhang L, Yang H, Gao Y, et al. Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(12): 2942-2954.
- [22] Chen X, Allison T, Cao W, et al. Trimble RTX, an innovative new approach for network RTK[C]//Proceedings of the 24th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2011). 2011: 2214-2219.
- [23] Weinbach U, Brandl M, Chen X, et al. Introducing the next generation of Trimble's RTX Positioning Service[C]//Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021). 2021: 424-442.
- [24] Liu X, Goode M, Tegedor J, et al. Real-time multi-constellation precise point positioning with integer ambiguity resolution[C]//2015 International association of institutes of navigation world congress (IAIN). IEEE, 2015: 1-7.
- [25] Sheridan K, Alves P, Masterson S, et al. Terrastar x: Precise point positioning with fast convergence and integrity[C]//Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019). 2019: 1916-1943.
- [26] Blewitt G. Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B8): 10187-10203.
- [27] Wang J. Stochastic Modeling for Real-Time Kinematic GPS/GLONASS Positioning[J]. Navigation, 1999, 46(4): 297-305.
- [28] Chen K. Real-time precise point positioning and its potential

- applications[C]//Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004). 2004: 1844-1854.
- [29] Li B, Ge H, Bu Y, et al. Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 1-17.
- [30] Su K, Jin S, Jiao G. Assessment of multi-frequency global navigation satellite system precise point positioning models using GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo and QZSS[J]. *Measurement science and technology*, 2020, 31(6): 064008.
- [31] Hou P, Zha J, Liu T, et al. Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 051002.
- [32] Thoenert S, Steigenberger P, Montenbruck O, et al. Signal analysis of the first GPS III satellite[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 92.
- [33] Yang Y, Mao Y, Sun B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1.
- [34] Liu T, Chen H, Song C, et al. Beidou-3 precise point positioning ambiguity resolution with B1I/B3I/B1C/B2a/B2b phase observable-specific signal bias and satellite B1I/B3I legacy clock[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(2): 488-502.
- [35] Padokhin A M, Mylnikova A A, Yasyukevich Y V, et al. Galileo E5 AltBOC signals: application for single-frequency total electron content estimations[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3973.
- [36] Urlichich Y, Subbotin V, Stupak G, et al. GLONASS modernization[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011). 2011: 3125-3128.
- [37] Cai C, Gao Y. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 223-236.
- [38] Li P, Zhang X. Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18: 461-471.
- [39] Li X, Li X, Liu G, et al. Triple-frequency PPP ambiguity resolution with multi-constellation GNSS: BDS and Galileo[J]. *Journal of geodesy*, 2019: 1-18.
- [40] Li X, Ge M, Dai X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *Journal of geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [41] Cai C, Gao Y, Pan L, et al. Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo[J]. *Advances in space research*, 2015, 56(1): 133-143.
- [42] Pan Z, Chai H, Kong Y. Integrating multi-GNSS to improve the performance of precise point positioning[J]. *Advances in space research*, 2017, 60(12):

- 2596-2606.
- [43] Liu T, Yuan Y, Zhang B, et al. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations[J]. *Journal of geodesy*, 2017, 91: 253-268.
- [44] Elsobeiey M. Precise point positioning using triple-frequency GPS measurements[J]. *The journal of navigation*, 2015, 68(3): 480-492.
- [45] Geng J, Bock Y. Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution[J]. *Journal of geodesy*, 2013, 87: 449-460.
- [46] Geng J, Guo J, Meng X, et al. Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(1): 1-15.
- [47] Li P, Jiang X, Zhang X, et al. GPS+ Galileo+ BeiDou precise point positioning with triple-frequency ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 1-13.
- [48] Chen C, Chang G. PPPLib: An open-source software for precise point positioning using GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS, and QZSS with multi-frequency observations[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(1): 18.
- [49] Li X, Liu G, Li X, et al. Galileo PPP rapid ambiguity resolution with five-frequency observations[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(1): 1-13.
- [50] Su K, Jin S. Analytical performance and validations of the Galileo five-frequency precise point positioning models[J]. *Measurement*, 2021, 172: 108890.
- [51] 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: 389-399.
- [52] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149.
- [53] 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.
- [54] Geng J, Shi C, Ge M, et al. Improving the estimation of fractional-cycle biases for ambiguity resolution in precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(8): 579-589.
- [55] Li X, Ge M, Zhang H, et al. A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 405-416.
- [56] 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.
- [57] Banville S, Geng J, Loyer S, et al. On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution[J]. *Journal of geodesy*, 2020, 94(1): 1-15.

- [58] Geng J, Chen X, Pan Y, et al. A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10): 2053-2067.
- [59] Schaer S, Villiger A, Arnold D, et al. The CODE ambiguity-fixed clock and phase bias analysis products: generation, properties, and performance[J]. *Journal of geodesy*, 2021, 95(7): 1-25.
- [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(11): 991-1003.
- [61] Wübbena G, et al. PPP-RTK: Precise Point Positioning using state-space representation in RTK networks[C]. *Proceedings of ION GNSS*, 2005: 2584-2594.
- [62] Teunissen, P. J. G., Odijk, D., & Zhang, B. PPP-RTK: Results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A*, 2010, 42(4), 223–230.
- [63] Li X, Zhang X, Ge M. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158.
- [64] Teunissen P J G, Khodabandeh A. Review and principles of PPP-RTK methods[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 217-240.
- [65] Odijk D, Zhang B, Khodabandeh A, et al. On the estimability of parameters in undifferenced, uncombined GNSS network and PPP-RTK user models by means of S-system theory[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(1): 15-44.
- [66] De Oliveira P S, Morel L, Fund F, et al. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 237-250.
- [67] Nadarajah N, Khodabandeh A, Wang K, et al. Multi-GNSS PPP-RTK: from large-to small-scale networks[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1078.
- [68] Li Z, Chen W, Ruan R, et al. Evaluation of PPP-RTK based on BDS-3/BDS-2/GPS observations: a case study in Europe[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 1-12.
- [69] Ma H, Zhao Q, Verhagen S, et al. Assessing the Performance of Multi-GNSS PPP-RTK in the Local Area[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3343.
- [70] Banville S, Collins P, Zhang W, et al. Global and regional ionospheric corrections for faster PPP convergence[J]. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 2014, 61(2): 115-124.
- [71] Aggrey J, Bisnath S. Improving GNSS PPP convergence: The case of atmospheric-constrained, multi-GNSS PPP-AR[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 587.
- [72] Li X, Wang B, Li X, et al. Principle and performance of multi-frequency and multi-GNSS PPP-RTK[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 7.
- [73] Klobuchar J A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS

- users[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1987 (3): 325-331.
- [74] Nava B, Coisson P, Radicella S M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model[J]. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, 2008, 70(15): 1856-1862.
- [75] Setti P T, Alves D B M, Silva C M. Klobuchar and Nequick G ionospheric models comparison for multi-GNSS single-frequency code point positioning in the Brazilian region[J]. Boletim de Ciências Geodésicas, 2019, 25(3): e2019016.
- [76] Yuan Y, Wang N, Li Z, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. Navigation, 2019, 66(1): 55-69.
- [77] Tian Y, Li S, Shen H, et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models[J]. Astrophysics and Space Science, 2022, 367(8): 78.
- [78] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3): 263-275.
- [79] Roma-Dollase D, Hernández-Pajares M, Krankowski A, et al. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(6): 691-706.
- [80] Lyu S, Yan X, Tang T, et al. A consistent regional vertical ionospheric model and application in PPP-RTK under sparse networks[J]. Navigation, 2023, 70(3): navi.568.
- [81] Zhao Q, Pan S, Gao W, et al. Crowdsourcing user-enhanced PPP-RTK with weighted ionospheric modeling[J]. Remote Sensing, 2025, 17(6): 1099.
- [82] Wang B, Zhu J, Wu Z, et al. A novel robust high-precision ionospheric delay modeling for PPP-RTK using crowdsourced data[J]. Space Weather, 2026, 24(2): e2025SW004789.
- [83] Wielgosz P, Kashani I, Grejner-Brzezinska D. Analysis of long-range network RTK during a severe ionospheric storm[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(9): 524-531.
- [84] Jakowski N, Béniguel Y, De Franceschi G, et al. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques[J]. Journal of Space Weather and Space Climate, 2012, 2: A22.
- [85] Psychas D, Verhagen S, Liu X, et al. Assessment of ionospheric corrections for PPP-RTK using regional ionosphere modelling[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(1): 014001.
- [86] Xu Z, Cai C, Pan L, et al. A Two-Step Regional Ionospheric Modeling Approach for PPP-RTK[J]. Sensors, 2024, 24(7): 2307.
- [87] Bust G S, Mitchell C N. History, current state, and future directions of

- ionospheric imaging[J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(1).
- [88] Ren X, Mei D, Zhang X, et al. Electron density reconstruction by ionospheric tomography from the combination of GNSS and upcoming LEO constellations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(10): e2020JA029074.
- [89] Li X, Ge M, Dousa J, et al. Real-time precise point positioning regional augmentation for large GPS reference networks[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 61-71.
- [90] Zheng F, Lou Y, Gu S, et al. Modeling tropospheric wet delays with national GNSS reference network in China for BeiDou precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(5): 545-560.
- [91] Shi J, Xu C, Guo J, et al. Local troposphere augmentation for real-time precise point positioning[J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, 66(1): 30.
- [92] Cui B, Wang J, Li P, et al. Modeling wide-area tropospheric delay corrections for fast PPP ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 56.
- [93] Chen H, Wang N, Li Z, et al. Scale-factor-based regional zenith tropospheric delay modeling for real-time precise point positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2025.
- [94] Gao R, Liu Z, Odolinski R, et al. Improving GNSS PPP-RTK through global forecast system zenith wet delay augmentation[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 66.
- [95] Psychas D, Verhagen S. Real-time PPP-RTK performance analysis using ionospheric corrections from multi-scale network processing[J]. *Sensors*, 2020, 20(11): 3171.
- [96] Zhang B, Hou P, Odolinski R. PPP-RTK: from common-view to all-in-view GNSS networks[J]. *Journal of geodesy*, 2022, 96(12): 102.
- [97] Zhang X, Yang Y, Yang H, et al. Performance of PPP and PPP-RTK with new-generation GNSS constellations and signals[J]. *Satellite Navigation*, 2025, 6(1): 17.
- [98] Cui B, Jiang X, Wang J, et al. A new large-area hierarchical PPP-RTK service strategy[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 134.
- [99] Li X, Huang J, Li X, et al. Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 28.
- [100] ICAO J. International standards and recommended practices[C]//Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. 1996, 1.
- [101] Esper M, Chao E L, Wolf C F. 2019 federal radionavigation plan[R]. United States. Dept. of Defense, 2020.
- [102] MOPS. (2016). Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment (MOPS). RTCA DO-229E.
- [103] Blanch J, Walter T, Enge P. Optimal positioning for advanced RAIM[J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2013, 60(4): 279-289.

- [104] SC-159. Minimum operational performance standards for global positioning system/satellite-based augmentation system airborne equipment. 2016. RTCA DO-229 (pp. 1–500).
- [105] Zheng S, Gao M, Huang Z, et al. Satellite integrity monitoring for satellite-based augmentation system: an improved covariance-based method[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 1-11.
- [106] Jin B, Chen S, Li D, et al. Performance analysis of SBAS ephemeris corrections and integrity algorithms in China region[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 1-14.
- [107] Cao Y, Chen J, Liu L, et al. Development status and service performance preliminary analysis for BDSBAS[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4314.
- [108] Shao B, Ding Q, Wu X. Estimation method of SBAS dual-frequency range error integrity parameter[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-8.
- [109] Hirokawa R, Sato Y, Fujita S, et al. Compact SSR messages with integrity information for satellite based PPP-RTK service[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016). 2016: 3372-3376.
- [110] Cabinet Office. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6–001)[J]. 2018.
- [111] Weinbach U, Brandl M, Chen X, et al. Integrity of the Trimble CenterPoint RTX Correction Service[C]//Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018). 2018: 1902-1909.
- [112] Rodriguez-Solano C, Brandl M, Chen X, et al. Integrity real-time performance of the trimble RTX correction service[C]//Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019). 2019: 485-507.
- [113] Xie M, Wang N, El-mowafy A, et al. Characterizing PPP ambiguity resolution residuals for precise orbit and clock corrections integrity monitoring[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(2): 69.
- [114] Guangyu Z, Zheng F, Chuang S H I. Development and validation of an integrity monitoring framework of real-time PPP correction data[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38(8): 103434.
- [115] Xie M, Liu A, Li Z, et al. Quality monitoring of real-time precise satellite orbit and clock corrections for Generating Health Indicators[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116707.
- [116] Kim E, Song J, Shin Y, et al. Fault-free protection level equation for CLAS PPP-RTK and experimental evaluations[J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3570.
- [117] Kouba J, Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.

- [118] Force U S A. NAVSTAR GPS space segment/navigation user interfaces[J]. ICD-GPS-200, IRN-200C-002, Rev. C, 1997.
- [119] Kaplan, Elliott D., and Christopher Hegarty, eds. Understanding GPS/GNSS: principles and applications[M]. Artech house, 2017.
- [120] Hauschild A, Montenbruck O, Thölert S, et al. A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part 1: receiver tracking and IQ constellation[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 19-28.
- [121] Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J M, et al. Characterization of compass M-1 signals[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 117-126.
- [122] Wanninger L, Beer S. BDS triple-frequency linear combinations for ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(5): 413-424.
- [123] Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites[J]. The use of artificial satellites for geodesy, 1972, 15: 247-251.
- [124] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [125] Böhm 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.
- [126] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. Manuscripta geodaetica, 1993, 18(2): 91-98.
- [127] Wan L, Chen J, Zhang Y, et al. Assessment of Multi-frequency Precise Point Positioning (PPP) Augmentation System Enhanced with Ionospheric Corrections Based on Real-time Corrections[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2026.
- [128] Eueler H J, Goad C C. On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using orbit information[J]. Bulletin géodésique (1976-1995), 1991, 65(2): 130-143.
- [129] Amiri-Simkooei A R, Tiberius C. Assessing receiver noise using GPS short baseline time series[J]. GPS Solutions, 2007, 11(1): 21-35.
- [130] Großmann W. Grundzüge der Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate nebst Anwendung in der Geodäsie[M]. Springer-Verlag, 2013.
- [131] Odijk D. Ionosphere-free phase combinations for modernized GPS[J]. Journal of surveying engineering, 2003, 129(4): 165-173.
- [132] Schaer S, Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System[M]. Zürich, Switzerland: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, 1999.
- [133] Cocard M, Bourgon S, Kamali O, et al. A systematic investigation of optimal

- carrier-phase combinations for modernized triple-frequency GPS[J]. *Journal of geodesy*, 2008, 82(9): 555-564.
- [134] Nykiel G, Figurski M. Precise point positioning method based on wide-lane and narrow-lane phase observations and between satellites single differencing[C]//*Proceedings of the 2016 international technical meeting of the institute of navigation*. 2016: 1055-1066.
- [135] Teunissen P J G, Khodabandeh A. Review and principles of PPP-RTK methods[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 217-240.
- [136] Melbourne W G. The case for ranging in GPS-based geodetic systems[C]//*Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the Global Positioning System*. US Department of Commerce Rockville, Maryland, 1985: 373-386.
- [137] Wübbena G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI4100 code and carrier measurements, paper presented at 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System[J]. *Int. Assoc. of Geod.*, Rockville, Md, 1985.
- [138] Duong V, Harima K, Choy S, et al. An assessment of wide-lane ambiguity resolution methods for multi-frequency multi-GNSS precise point positioning[J]. *Survey Review*, 2020.
- [139] Li X, Huang J, Li X, et al. Review of PPP-RTK: Achievements, challenges, and opportunities[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 28.
- [140] Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. *GPS satellite surveying*[M]. John Wiley & Sons, 2015.
- [141] Li X, Ge M, Dai X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *Journal of geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [142] Teunissen P J G. A new glonass fdma model[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 100.
- [143] Montenbruck O, Hugentobler U, Dach R, et al. Apparent clock variations of the Block IIF-1 (SVN62) GPS satellite[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16: 303-313.
- [144] Li H, Zhou X, Wu B. Fast estimation and analysis of the inter-frequency clock bias for Block IIF satellites[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17: 347-355.
- [145] Li P, Jiang X, Zhang X, et al. GPS+ Galileo+ BeiDou precise point positioning with triple-frequency ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 78.
- [146] Pan L, Zhang X, Li X, et al. Characteristics of inter-frequency clock bias for Block IIF satellites and its effect on triple-frequency GPS precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 811-822.
- [147] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. 1960.
- [148] Yang Y, Gao W. An optimal adaptive Kalman filter[J]. *Journal of Geodesy*,

- 2006, 80(4): 177-183.
- [149] Yang Y, He H, Xu G. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning[J]. *Journal of geodesy*, 2001, 75(2): 109-116.
- [150] Cohen A, Migliorati G. Optimal weighted least-squares methods[J]. *The SMAI journal of computational mathematics*, 2017, 3: 181-203.
- [151] Carayannis G, Manolakis D, Kalouptsidis N. A fast sequential algorithm for least-squares filtering and prediction[J]. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 1983, 31(6): 1394-1402.
- [152] Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data[J]. *Geophysical research letters*, 1990, 17(3): 199-202.
- [153] Yang Y, Song L, Xu T. Robust estimator for correlated observations based on bifactor equivalent weights[J]. *Journal of geodesy*, 2002, 76(6): 353-358.
- [154] Geng J, Teferle F N, Meng X, et al. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning[J]. *Advances in space research*, 2011, 47(10): 1664-1673.
- [155] Wan L, Chen J, Chen Z, et al. Development and integrity evaluation of a real-time precise point positioning augmentation service based on characterization of phase residuals[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2026, Accepted.
- [156] Schaer S. SINEX BIAS—Solution (software/technique) INdependent EXchange format for GNSS BIASes version 1.00[C]//IGS workshop on GNSS biases, Bern, Switzerland. 2016.
- [157] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149.
- [158] 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.
- [159] Teunissen P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation[J]. *J. Geod.*, 1995, 70: 65-82.
- [160] Teunissen P J G. Theory of integer equivariant estimation with application to GNSS[J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(7): 402-410.
- [161] Teunissen P J G, Joosten P, Tiberius C. Geometry-free ambiguity success rates in case of partial fixing[C]//Proceedings of the 1999 national technical meeting of the institute of navigation. 1999: 201-207.
- [162] Verhagen S, Teunissen P J G, van der Marel H, et al. GNSS ambiguity resolution: which subset to fix[C]//IGNSS symposium. 2011: 15-17.
- [163] Li P, Zhang X. Precise point positioning with partial ambiguity fixing[J]. *Sensors*, 2015, 15(6): 13627-13643.
- [164] Teunissen P J G. A new class of GNSS ambiguity estimators[J]. *Artificial Satellites*, 1997, 32(4): 243-252.

- [165] Yue C, Dang Y, Xue S, et al. A novel partial ambiguity resolution based on ambiguity dilution of precision[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3070.
- [166] Verhagen S, Teunissen P J G. New global navigation satellite system ambiguity resolution method compared to existing approaches[J]. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2006, 29(4): 981-991.
- [167] 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(3-4): 191-198.
- [168] El-Diasty M, Elsobeiey M. Precise point positioning technique with IGS real-time service (RTS) for maritime applications[J]. *Positioning*, 2015, 6(04): 71-80.
- [169] Montenbruck O, Gill E. *Satellite Orbits: Models, Methods, and Applications*[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [170] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2012, 117(B4).
- [171] Folkner W M, Williams J G, Boggs D H, et al. The planetary and lunar ephemerides DE430 and DE431[J]. *Interplanetary network progress report*, 2014, 196(1): 42-196.
- [172] Luzum B, Petit G. The IERS Conventions (2010): Reference systems and new models[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2012, 10(H16): 227-228.
- Rodriguez-Solano C J, Hug
- [173] Hugentobler U, Steigenberger P, et al. Reducing the draconitic errors in GNSS geodetic products[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(6): 559-574.
- [174] Duan B, Hugentobler U. Enhanced solar radiation pressure model for GPS satellites considering various physical effects[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 42.
- [175] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. Adjustable box-wing model for solar radiation pressure impacting GPS satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(7): 1113-1128.
- [176] Beutler G. *Methods of celestial mechanics: volume I: physical, mathematical, and numerical principles*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [177] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, et al. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): theory and initial results[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1994, 19: 367-386.
- [178] Springer T A, Beutler G, Rothacher M. A new solar radiation pressure model for GPS satellites[J]. *GPS Solutions*, 1999, 2(3): 50-62.
- [179] Arnold D, Meindl M, Beutler G, et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(8):

- 775-791.
- [180] Prange L, Villiger A, Sidorov D, et al. Overview of CODE's MGEX solution with the focus on Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(12): 2786-2798.
- [181] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. Adjustable box-wing model for solar radiation pressure impacting GPS satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(7): 1113-1128.
- [182] Montenbruck O, Steigenberger P, Hugentobler U. Enhanced solar radiation pressure modeling for Galileo satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 283-297.
- [183] 许小龙. BDS/GNSS 实时精密轨道确定系统关键技术研究[D]. 武汉大学, 2019.
- [184] 匡开发. GNSS 卫星实时精密定轨技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [185] Knocke P, Ries J, Tapley B. Earth radiation pressure effects on satellites[C]//Astrodynamics conference. 1988: 4292.
- [186] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P, et al. Impact of Earth radiation pressure on GPS position estimates[J]. *Journal of geodesy*, 2012, 86(5): 309-317.
- [187] Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(5): 853-868.
- [188] Steigenberger P, Thoelet S, Montenbruck O. GNSS satellite transmit power and its impact on orbit determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 609-624.
- [189] Steigenberger P, Montenbruck O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 319-331.
- [190] Jing-Nan L, Mao-Rong G E. PANDA software and its preliminary result of positioning and orbit determination[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 603-609.
- [191] 秦志伟. GNSS 卫星实时精密定轨关键技术研究 [D]. 长安大学, 2023. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2023.002879.
- [192] Springer T, Dilssner F, Escobar D, et al. NAPEOS: The ESA/ESOC tool for space geodesy[C]//Geophysical research abstracts. 2011, 13: EGU2011-8287.
- [193] Schreiner P A, Neumayer K, König R. GFZ Rapid Science and Near Real Time Orbit Products[J]. 2022.
- [194] Bertiger W, Bar-Sever Y, Dorsey A, et al. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research[J]. *Advances in space research*, 2020, 66(3): 469-489.
- [195] Prange L, Orliac E, Dach R, et al. CODE's five-system orbit and clock solution-the challenges of multi-GNSS data analysis[J]. *Journal of geodesy*, 2017,

- 91(4): 345-360.
- [196] Herring T A, King R W, McClusky S C. Introduction to gamit/globk[J]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2010, 400: 401.
- [197] Dach R, Lutz S, Walser P, et al. Bernese GNSS software version 5.2[J]. Astronomical Institute, University of Bern, 2015, 858(10.7892).
- [198] Springer T A, Hugentobler U. IGS ultra rapid products for (near-) real-time applications[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(6-8): 623-628.
- [199] Hadas T, Bosy J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. GPS Solutions, 2015, 19(1): 93-105.
- [200] Dai X, Lou Y, Dai Z, et al. Real-time precise orbit determination for BDS satellites using the square root information filter[J]. GPS Solutions, 2019, 23(2): 45.
- [201] 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(3): 191-198.
- [202] Mansur G, Sakic P, Brack A, et al. Combination of GNSS orbits using least-squares variance component estimation: G. Mansur et al[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(11): 92.
- [203] Chen G, Guo J, Geng T, et al. Multi-GNSS orbit combination at Wuhan University: strategy and preliminary products[J]. Journal of Geodesy, 2023, 97(5): 41.
- [204] Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions: Z. Altamimi et al[J]. Journal of Geodesy, 2023, 97(5): 47.
- [205] Ferland R, Piraszewski M. The IGS-combined station coordinates, earth rotation parameters and apparent geocenter[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3-4): 385-392.
- [206] 万丽华,魏立龙,王磊.基于全球台站的GNSS卫星精密定轨策略分析[J].测绘地理信息,2019,44(04):53-58.DOI:10.14188/j.2095-6045.2017331.
- [207] Ye F, Yuan Y, Tan B, et al. A robust method to detect BeiDou navigation satellite system orbit maneuvering/anomalies and its applications to precise orbit determination[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1129.
- [208] Hauschild A, Montenbruck O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning[J]. GPS Solutions, 2009, 13(3): 173-182.
- [209] Zuo X, Jiang X, Li P, et al. A square root information filter for multi-GNSS real-time precise clock estimation[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1): 1-14.
- [210] Ge M, Chen J, Douša J, et al. A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime[J]. GPS Solutions, 2012,

- 16(1): 9-17.
- [211] Huang G, Zhang Q, Xu G. Real-time clock offset prediction with an improved model[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 95-104.
- [212] Li B, Ge H, Bu Y, et al. Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 12.
- [213] Kouba J, Springer T. New IGS station and satellite clock combination[J]. *GPS Solutions*, 2001, 4(4): 31-36.
- [214] 戴小蕾. 基于平方根信息滤波的 GNSS 导航卫星实时精密定轨理论与方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [215] 夏风雨. 姿态、光压和天线模型对北斗精密定轨影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- [216] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS satellite geometry and attitude models[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1015-1029.
- [217] Ebert K, Oesterlin W. Dynamic yaw steering method for spacecraft[J]. *European patent specification EP 1526072B1*, 2008.
- [218] 李星星. GNSS 精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [219] 李昕. 多频率多星座 GNSS 快速精密定位关键技术研究. 2021. 武汉大学, PhD dissertation.
- [220] Li X, Huang J, Li X, et al. Review of PPP-RTK: Achievements, challenges, and opportunities[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 28.
- [221] Wang N, Li Z, Montenbruck O, et al. Quality assessment of GPS, Galileo and BeiDou-2/3 satellite broadcast group delays[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(9): 1764-1779.
- [222] Klobuchar J A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, AES-23(3): 325-331.
- [223] Hopfield H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(18): 4487-4499.
- [224] Zhang B. Three methods to retrieve slant total electron content measurements from ground-based GPS receivers and performance assessment[J]. *Radio Science*, 2016, 51(7): 972-988.
- [225] Schaer S, Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System[M]. Zürich, Switzerland: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, 1999.
- [226] Roma-Dollase D, Hernández-Pajares M, Krankowski A, et al. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 691-706.

- [227] Klobuchar J A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1987 (3): 325-331.
- [228] Nava B, Coisson P, Radicella S M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model[J]. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, 2008, 70(15): 1856-1862.
- [229] Yuan Y, Wang N, Li Z, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. Navigation, 2019, 66(1): 55-69.
- [230] Olivares-Pulido G, Terkildsen M, Arsov K, et al. A 4 D tomographic ionospheric model to support PPP-RTK: G. Olivares-Pulido et al[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1673-1683.
- [231] Haines G V. Computer programs for spherical cap harmonic analysis of potential and general fields[J]. Computers & Geosciences, 1988, 14(4): 413-447.
- [232] De Franceschi G, De Santis A, Pau S. Ionospheric mapping by regional spherical harmonic analysis: new developments[J]. Advances in Space Research, 1994, 14(12): 61-64.
- [233] Roma-Dollase D, Hernández-Pajares M, García-Rigo A, et al. Real time global ionospheric maps: a low latency alternative to traditional GIMs[J]. Radio Science, 2016, 47(0).
- [234] Li Z, Wang N, Hernández-Pajares M, et al. IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94: 1-16.
- [235] Liu T, Zhang B, Yuan Y, et al. Real-Time Precise Point Positioning (RTPPP) with raw observations and its application in real-time regional ionospheric VTEC modeling[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92: 1267-1283.
- [236] Brunini C, Azpilicueta F. GPS slant total electron content accuracy using the single layer model under different geomagnetic regions and ionospheric conditions[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(5): 293-304.
- [237] Psychas D, Verhagen S, Liu x, et al. Assessment of ionospheric corrections for PPP-RTK using regional ionosphere modelling[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(1): 014001.
- [238] Wan L, Wu x, Zhang P, et al. Performance analysis of real-time PPP-RTK with multi-scale enhancement network[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings: Volume I. Springer Singapore, 2021: 690-704.
- [239] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data[C]//Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference. 1968: 517-524.
- [240] Orús R, Hernández-Pajares M, Juan J M, et al. Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique[J]. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, 2005, 67(16): 1598-1609.

- [241] Tregoning P, Herring T A. Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23).
- [242] Kouba J. Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(4): 193-205.
- [243] Zhang H, Gao Z, Ge M, et al. On the convergence of ionospheric constrained precise point positioning (IC-PPP) based on undifferential uncombined raw GNSS observations[J]. *Sensors*, 2013, 13(11): 15708-15725.
- [244] Ochieng W Y, Sauer K, Walsh D, et al. GPS integrity and potential impact on aviation safety[J]. *The journal of navigation*, 2003, 56(1): 51-65.
- [245] Fujita S, Sato Y, Miya M, et al. Design of Integrity Function on Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System[C]//*Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*. 2016: 3258-3263.
- [246] Weinbach U, Brandl M, Chen x, et al. Integrity of the Trimble centerpoint RTx correction service[C]//*proceedings of the 31st international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2018)*. 2018: 1902-1909.
- [247] Rodriguez-Solano C, Brandl M, Chen x, et al. Integrity real-time performance of the trimble RTx correction service[C]//*proceedings of the 32nd international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2019)*. 2019: 485-507.
- [248] Griessnig G, Schnellbach A. Development of the 2nd Edition of the ISO 26262[C]//*Systems, Software and Services Process Improvement: 24th European Conference, EuroSPI 2017, Ostrava, Czech Republic, September 6–8, 2017, Proceedings 24*. Springer International Publishing, 2017: 535-546.
- [249] Xie M, Wang N, El-mowafy A, et al. Characterizing PPP ambiguity resolution residuals for precise orbit and clock corrections integrity monitoring[J]. *GPS Solutions*, 2025b, 29(2): 69.
- [250] El-Mowafy A. Real-time precise point positioning using orbit and clock corrections as quasi-observations for improved detection of faults[J]. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(4): 769-787.
- [251] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment—Methodology and results[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12): 3020-3038.
- [252] Geng J, Yan Z, Wen Q, et al. Integrated satellite clock and code/phase bias combination in the third IGS reprocessing campaign[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(3): 150.
- [253] Ahmad K A B, Sahnoudi M, Macabiau C. Characterization of GNSS receiver

- position errors for user integrity monitoring in urban environments[C]//ENC-GNSS 2014, European Navigation Conference. 2014.
- [254] Pullen S, Joerger M. GNSS integrity and receiver autonomous integrity monitoring (RAIM)[J]. Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, 2020, 1: 591-617.
- [255] Hein G W. Status, perspectives and trends of satellite navigation[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 22.
- [256] RTCM Special Committee. RTCM standard 10403.3 differential GNSS (global navigation satellite systems) services-version 3[J]. RTCM Special Committee, 2016, 104.
- [257] Hirokawa R, Sato Y, Fujita S, et al. Compact SSR messages with integrity information for satellite based PPP-RTK service[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016). 2016: 3372-3376.
- [258] European Commission - European GNSS Agency - European Space Agency, Galileo High Accuracy Service E6-B Signal-In-Space Message Specification v1.2. 2020.

附录

[单击输入附录内容]

如果存在多个附录则删除该页，保留“附录一”，“附录二”等，其中“附录”二字（多个附录则为“附录一”等）与题名间空一个汉字符位。

致 谢

时光荏苒，数载光阴弹指而过。百页论文，落笔方知重，博士求学生涯即将画上句号。窗外春意盎然生机勃勃，一如多年前我踏入学校时的模样。回望这段研究之路，有困顿时的踟蹰不前，也有豁然处的柳暗花明；有独坐深夜的孤灯冷雨，也有并肩攻关的热血长谈。此刻提笔，想记下的不只是感谢，更是这些年沉淀下来的心境与成长。

研究的过程总是在焦虑中摸索前行，PPP-RTK 课题体系庞大、工程复杂，初涉其中，如入深林，四顾茫然。读文献时觉得处处皆路，动手时又觉得处处皆壁。代码调不通的深夜，实验结果与预期相悖的沮丧，论文被拒后反复推敲仍不得其解的无力，这些时刻曾让我怀疑自己是否适合这条路。但正是这些至暗之处，磨出了最需要的东西：不是聪明，而是耐心；不是天赋，而是韧性。此时才慢慢学会一件事：科研/工作没有捷径，唯有日拱一卒，功不唐捐。

转折往往发生在不经意间，导师常说做研究要解决真问题，不要追着热点跑。这句话初听平常，践行方知其深。当不再急于求成，而是沉下心来审视每一个不对劲的细节时，思路反而渐次打开。电离层模型的灵感，来自一次对电离层残差异常的追问；完好性监测的框架，源于多次轨道机动引发的定位异常。事后回想，所谓灵感不过是长期积累的自然溢出。观察得久了，规律自会浮现；追问得深了，答案自会靠近。导师的指引，不在于告诉答案，而在于教会我们如何提出正确的问题。授人以鱼不如授人以渔，师恩之重，言短情长。

博士期间最大的收获是什么？我想不是某篇论文，也不是某个算法，而是一种面对复杂世界时的心态与方法。大问题要拆成小问题，小问题要落到实处；数据要敬畏，假设要审慎；做得出的要做扎实，做不到的要坦然承认。完美是方向，不是终点。一个模型、一套算法不可能穷尽所有场景，但只要特定条件下比已有方法更进一步，便有其存在的意义。这种务实而不失追求、谦逊而不失信念的态度，是我在团队内耳濡目染、渐次习得的。

感谢课题组陈俊平老师、张益泽老师等老师的悉心指导；感谢柳培钊、侯阳飞等同门的并肩同行；感谢华测导航郭慧军、虞顺、曾琪等一起工作的同事们。那些一起熬夜调系统的长夜，一起争论方案面红耳赤的午后，一起在食堂吐槽生活又彼此打气的傍晚，这些琐碎而真实的片段，拼成了博士生涯中最温热的底色。独行者速，众行者远。这条路上，幸而有你们同行。

感谢我的父母，你们不懂 PPP-RTK 为何物，却从未怀疑过我所做之事的意义。每次电话末尾那句别太累了，轻描淡写，却是我扛住压力时最稳的支点。感谢我的伴侣在焦躁时的包容、低落时的陪伴、忙碌时在我背后给予的支持。世间

学问千万种，唯有家人的爱，不需要推导，不需要验证，笃定而恒久。

回首博士生涯，这段路远比预想的艰难，也远比预想的值得。PPP-RTK 技术正从实验室走向民生应用，自动驾驶、精准农业、低空经济，高精度定位的需求从未像今天这样迫切而广泛。我希望未来的自己能继续扎根于此，把这些年积累的认知转化为真正落地的技术，让卫星信号穿越大气层后抵达的不只是接收机，更是每一个需要精准服务的人。不求高远，但求笃行；不求速成，但求致远。

最后，感谢论文评审专家和答辩委员会各位老师的宝贵意见。论文的完成是终点亦是下一程的起点，愿以所学，回馈所托；愿此去山高水长，归来仍心怀热望。

万 丽 华

2026 年 3 月于上海

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历:

2009年9月——2013年6月,在武汉大学测绘学院获得学士学位。

2013年9月——2016年6月,在武汉大学测绘学院获得硕士学位。

2014年10月——2016年6月,在慕尼黑工业大学获得硕士学位。

2021年9月——2026年6月,在中国科学院/中国科学院大学上海天文台攻读博士学位。

工作经历:

2016年7月——2021年8月,在上海华测导航技术股份有限公司任GNSS算法工程师。

已发表(或正式接受)的学术论文:(书写格式同参考文献)

Wan L, Chen J, Shi X, et al. Development and Integrity Evaluation of a Real-Time Precise Point Positioning Augmentation Service Based on Characterization of Phase Residuals[J]. Geodesy and Geodynamic, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2026.02.004>.

Wan L, Chen J, Zhang Y, et al. Assessment of Multi-frequency Precise Point Positioning (PPP) Augmentation System Enhanced with Ionospheric Corrections Based on Real-time Corrections[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2026, 75:1-17.

Wan L, Guo H, Huang Z, et al. On the design and performance analysis of BDS3 ground based augmentation system service[C]//China Satellite Navigation Conference. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 255-269.

Wan, L., Chen, J., & Yu, S. The Impact of Navigation Satellite Attitude Models on GNSS Data Processing. World SCI-TECH R&D, 2026. 万丽华,陈俊平,虞顺.导航卫星姿态模型对GNSS数据处理的影响[J/OL].世界科技研究与发展,1-14[2026-06-13].<https://doi.org/10.16507/j.issn.1006-6055.2026.04.014>.

Tian, Y., Gong, X., Zheng, F., Shi, C., Wang, J., & Wan, L. An instantaneous and reliable precise point positioning integer ambiguity resolution method based on multistage residual tests. GPS Solutions, 2026, 30(1): 6.

Li, Z., Xiang, Y., Pei, L., Wan, L., & Wang, C. Oversampling AdaBoost Cycle Slip Detection Method for Small Sample Data in GNSS Signal Processing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2025: 1-11.

Bao, L., Zeng, Q., & Wan, L. Convergence performance analysis of BDS3/GPS PPP-B2b. Nanjing Xinxing Gongcheng Daxue Xuebao, 2022, 14(6), 731-736. 包

林鹏,曾琪,万丽华.BDS3/GPS PPP-B2b 定位收敛性能分析[J].南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(06): 731-736.

申请或已获得的专利: (书写格式同参考文献, 无专利时此项不必列出)

万丽华, 冯育涛, 李宏祥, 徐恩强, 陈林, 杨致祥, 刘祥云, 潘杰. 卫星轨道机动探测方法、装置、设备和存储介质: 上海市, CN110927756B[P]. 2022-08-23
【授权】

万丽华, 曹勇, 耿雷, 张超, 刘合丽, 刘金盾, 汪俊, 席志杰. 一种观测数据处理方法、装置、终端设备及存储介质: 上海市, CN109752739B[P]. 2023-01-17
【授权】

万丽华, 张鹏, 郭慧军, 李海军, 吴亮亮, 叶芳飞, 刘维超, 赵斐斐. 基于实时 PPP 模糊度固定技术的区域格网电离层建模方法: 上海市, CN112034500B[P]. 2024-11-05 【授权】

万丽华, 林文强, 李海军, 张统治, 谢华忠, 赵宝森, 林仲军, 解忙忙. 一种实时动态定位方法、装置、电子设备及存储介质: 上海市, CN116088019B[P]. 2025-12-30 【授权】

万丽华, 虞顺, 郭慧军. 电离层延迟模型构建和定位方法、装置、设备及存储介质: 上海市, CN118707551A[P]. 2024-09-27 【申请】

参加的研究项目及获奖情况:

参加国家自然科学基金项目: 12403075, 42474034 等。