

博士学位论文

北斗星基增强分米级定位与 Multi-GNSS 实时单频精密单点定位研究

- 姓 名: 王阿昊
- 学 号: 1710090
- 所在院系: 测绘与地理信息学院
- 学科门类: 工学
- 学科专业: 测绘科学与技术
- 指导教师: 王解先 教授
- 副指导教师: 陈俊平 研究员

二〇二一年一月



A dissertation submitted to Tongji University in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

Research on BDS Satellited-based Augmentation System Decimeter-level Positioning and Multi-GNSS Real-time Singlefrequency Precise Point Positioning

Candidate:	Ahao Wang

Student Number: 1710090

School/Department: College of Surveying and

Geo-Informatics

Discipline: Engineering

Major:

Supervisor:

Prof. Jiexian Wang

Surveying and Mapping

Prof. Junping Chen

January, 2021

北域分定M G 实频单位斗差米位ult S 单密定究	
王阿昊	
同济大学	

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定, 同意如下各项内容:按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本; 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版,并采用影印、缩印、扫描、 数字化或其它手段保存论文;学校有权提供目录检索以及提供本学位 论文全文或者部分的阅览服务;学校有权按有关规定向国家有关部门 或者机构送交论文的复印件和电子版;在不以赢利为目的的前提下, 学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名: 王阿昊

2021年 01月 25日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文,是本人在导师指导下,进行 研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外,本学位论文 的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的 作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体, 均己在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本 人承担。

学位论文作者签名: 王阿昊

2021年 01月 25日

摘要

随着各大 GNSS 系统的不断完善和精密单点定位 (PPP) 技术的发展, GNSS PPP 在精密授时、卫星定轨、大气反演、地震预报和灾害监测等领域具有突出优 势和独特应用价值,其中实时性、高精度和低成本已成为 GNSS 用户的首要目标 与需求。北斗基本导航服务受区域监测网和卫星钟差稳定性不足等因素的影响, 仅能提供10m量级定位精度,很难满足实时高精度定位用户的需求。为此,北 斗广域差分星基增强系统(SBAS)提出四重差分改正技术,向授权伪距用户播 发卫星轨道改正数、等效钟差改正数和格网电离层改正数,其实时 SBAS 伪距定 位 95%精度在水平方向可优于 1.0 m, 高程方向优于 1.5 m。向授权相位用户除了 播发以上改正数之外,再播发分区综合改正数,其双频实时动态 SBAS PPP 定位 平均 25 min 内三维定位误差收敛至 0.5 m,收敛后水平和高程定位精度分别为 0.15 m 和 0.2 m; 单频用户平均 20 min 内三维定位误差收敛至 0.8 m, 收敛后定 位精度在水平方向为0.3m,高程方向为0.5m。本文对基于分区综合改正数的北 斗 SBAS PPP 技术进行深入研究,通过引入 GPS 观测值建立北斗/GPS 组合分区 综合改正数定位模型,极大程度提高了用户定位性能。通过大量数据测试发现, 系统端分区综合改正数短时中断或缺失会引起定位跳变,严重影响实时动态定位 的连续性,针对该实际问题,本文提出了相应的解决方案。

除了各国积极发展的 SBAS 技术外, IGS 实时工作组于 2013 年开始向全球 用户免费提供 RTS 数据流,其中包含 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星的 实时轨道改正数和实时钟差改正数,利用广播星历结合上述改正信息即可恢复出 实时精密轨道和钟差,采用此精密产品的双频 PPP 用户可实现实时厘米级精度 定位。然而,对于普通导航定位用户,双频接收机价格昂贵,作业成本高,性价 比很低,因此,低成本、高精度的实时单频 PPP 技术成为研究热点。得益于 RTS 改正信息中可提供高精度实时电离层产品,本文对三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 模型进行深入研究,同时分析了多种电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 定位的影响。综上所述,本文的主要研究内容及结论如下:

(1)介绍了多种单/双频 PPP 定位模型,包括无电离层组合模型、GRAPHIC 半和法模型和非差非组合模型;介绍了多种实时周跳探测方法及单/双频相位平 滑伪距方法;介绍了最小二乘和 Kalman 滤波两种参数估计理论;介绍了各项定 位误差及改正方法,重点分析了 GPS 民用广播星历(CNAV)误差;采用 2016-2018 年 GPS CNAV 和 LNAV(传统广播星历)数据,以 GBM 精密轨道和钟差 为参考,研究发现 CNAV 与 LNAV 卫星钟差精度基本一致,其 RMS 值约 0.4 m;

I

CNAV 轨道切向误差明显大于 LNAV,而径向和法向误差两者基本相当;两种广播星历的空间信号精度(SISRE)处于同一水平,SISRE(orb)和 SISRE 分别优于 0.3 m 和 0.5 m,较 2014-2015 年的结果(0.6 m),空间信号精度提高了 16.7%; 以 DLR 和 CODE 后处理 DCB 产品为基准,评估出 CNAV 信号间偏差(ISC)参数的精度: ISC_{L1C/A} 精度最高, RMS 值小于 0.1 ns, ISC_{L2C} 和 ISC_{L5Q5} 精度较低,分别优于 0.4 ns 和 0.35 ns。

(2)介绍了北斗分区综合改正数的计算原理和流程,建立了基于北斗四重 差分改正数的单/双频 PPP 定位模型,采用中国区域 34 个监测站(7 个 iGMAS 站和 27 个 CMONOC 站)连续一个月的观测数据,详细评估了基于分区综合改 正数的北斗 SBAS PPP 定位性能。结果表明:北斗双频静态 SBAS PPP 定位精度 在水平和高程方向分别优于 0.12 m 和 0.18 m,双频动态 SBAS PPP 定位精度相 对较低,分别优于 0.16 m 和 0.20 m;在单频 SBAS PPP 定位中,采用半和法 Ionosphere-Free 模型和附加电离层约束 Ionosphere-Weighted 模型的定位精度基本 相当,其水平和高程方向在静态模式下分别优于 0.15 m 和 0.22 m,在动态模式 下分别优于 0.33 m 和 0.40 m;单/双频、动/静态北斗 SBAS PPP 均能满足分米级 精度定位要求。在收敛性方面,双频动态 SBAS PPP 的水平和高程定位误差分别 在 15 min 和 20 min 收敛至 0.5 m;单频动态 SBAS PPP 中,Ionosphere-Weighted 模型的收敛速度快于 Ionosphere-Free 模型,两种模型均可在 30 min 内收敛至水 平定位误差小于 0.8 m,高程定位误差小于 1.0 m。

(3)首次将 GPS 系统引入分区综合改正数的计算与定位,建立了北斗/GPS 组合分区综合改正数定位模型,采用 15 个 MGEX (Multi-GNSS Experiment)测站连续二十天的观测数据,以离线模拟实时动态定位的策略进行试验。结果表明: BDS+GPS 双频动态 SBAS PPP 定位可在 5 min 内收敛至三维定位误差小于 1.0 m,收敛后定位精度在水平和高程方向分别优于 0.05 m 和 0.15 m,两项性能指标均明显优于单系统。随着分区综合改正数服务半径的扩大,双系统 SBAS PPP 的定位精度略有下降,但对收敛速度的影响不大;分区综合改正数的更新频率每增加 30 s,双系统 SBAS PPP 的水平和高程误差就增大约 0.4 cm,平均收敛时间增加约 2 min。相比于北斗分区综合改正数 1000 km 的服务半径,BDS+GPS 双系统组合定位在 1800 km 范围内仍能满足分米级精度定位要求。

(4)介绍了分区切换的概念以及其对北斗 SBAS PPP 定位的影响,研究发现相邻分区的分区综合改正数历元间变化量存在高度相关性,平均相关系数超过0.7,根据该特性,首次提出一种适用于分区切换的北斗 SBAS PPP 新算法。采用中国区域7个监测站连续10天的静态观测数据和一段时长2h的车载动态观测数,验证了新算法的有效性和正确性。相比于传统北斗 SBAS PPP 定位模型,新

II

算法在分区切换后的三维定位误差不超过 0.45 m,完全满足分米级精度定位要求,有效避免了分区切换产生的定位跳变,保证了北斗实时动态定位的连续性和 稳定性。

(5)以GBM 精密轨道和钟差为参考,评估了 RTS CLK93 实时轨道和钟差 产品的质量。结果表明:GPS 和 Galileo 卫星的实时轨道和钟差精度基本相当, 轨道 RMS 误差在径向、切向和法向分别优于 3.0 cm、4.5 cm 和 3.5 cm,钟差 STD 误差约 0.1 ns;GLONASS 卫星的产品精度较低,轨道 RMS 误差在径向约 4.5 cm, 切向和法向均超过 7.0 cm,钟差 STD 误差约 0.2 ns; BDS 卫星的产品精度最低, 轨道 RMS 误差在径向约 6.0 cm,其余方向超过 10 cm,钟差 STD 误差约 0.3 ns。 以 CODE GIM 模型为参考,评估了电离层平静期,CLK93 实时电离层产品的 STEC 精度约 3.4 TECU (RMS),中高纬度区域的电离层精度明显优于低纬度区 域,海岸线附近则略差于监测站密集的内陆地区。

(6)介绍了三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 模型:标准消电离层 Ionosphere-Corrected (IC) 模型、半和法 Ionosphere-Free (IF) 模型和附加电离层约束 Ionosphere-Weighted (IW) 模型,采用 CLK93 实时精密轨道和钟差,选取 46 个 MGEX 测站连续 14 天的静态观测数据和一段 6 h 的船载动态观测数据,对比分 析了三种单频 PPP 模型在观测值残差、定位精度和收敛速度上的差异。结果表 明:采用 MGEX 测站数据的测试中, IW 模型的定位精度最高, IF 模型次之, IC 模型最低:采用船载动态数据的测试中,IF/IW模型的定位精度在N、E和U方 向分别为 0.27/0.26 m, 0.21/0.26 m 和 0.49/0.48 m, 明显优于 IC 模型。基于不同 频点的单频 PPP 定位中, IF 和 IW 模型的定位精度基本相当, 而 IC 模型在第二 频点下的定位精度明显低于第一频点,主要是因为第二频点电离层延迟误差经过 频率转换被放大。相比于单 GPS 系统, GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动 态单频 PPP 在 IC、IF 和 IW 模型中的定位精度均有明显提高,其水平和高程 RMS 定位精度分别优于 0.3 m 和 0.5 m,收敛时间也可缩短 30%以上。IW 模型的伪距 /相位观测值残差的 RMS 值均小于 IC 和 IF 模型, 尤其是相位观测值残差不足 0.5 mm, 远小于理论精度 3.0 mm, 说明本文采用的随机游走过程估计电离层参 数的方法可有效吸收部分未模型化误差,从而提高单频定位精度;相比于 IC 和 IF 模型, IW 模型通过使用非差非组合观测值以及附加外部 CLK93 实时电离层 约束,其收敛速度较 IF 模型可提高 26%左右。

(7)介绍了两种北斗实时电离层模型: BDS-Klobuchar 和 BDS 格网模型,同时以 GPS-Klobuchar 和 CODE GIM 模型为参考,采用中国区域 10 个监测站连续一个月的观测数据,分析比较了四种电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 定位的影响。结果表明:单频 SPP 定位中,GIM 模型的定位精度最

III

高,BDS 格网模型次之,BDS-Klobuchar 和 GPS-Klobuchar 模型相对较差,BDS-Klobuchar 模型因参数更新频率高(2h更新一次),且基于改进的 Klobuchar 算法,其定位精度在高程方向和夜间时段明显优于 GPS-Klobuchar 模型;通过多系统融合数据处理,GPS+GLONASS+BDS-2+3 单频 SPP 在中国区域的三维 RMS 定位精度可优于 1.0 m;相比于单 GPS 系统,GPS+GLONASS+BDS-2 单频 PPP 的收敛速度明显加快,可在 15 min 内收敛至 0.5 m,收敛后的 RMS 定位精度在 水平方向为 1-3 cm,高程方向为 4-5 cm。静态单频 PPP 定位中,附加不同电离 层约束的 Ionosphere-Weighted 模型的收敛速度均快于半和法 Ionosphere-Free 模型,其中附加 GIM 约束的收敛速度最快,附加 BDS 格网约束的次之,而附加 BDS-Klobuchar 和 GPS-Klobuchar 约束的收敛速度基本相当。

关键词:北斗星基增强系统,精密单点定位,分区综合改正数,多系统全球卫星导航系统,实时单频定位

ABSTRACT

With the rapid development of Global Navigation Satellite System (GNSS) and the continuous improvement of precise point positioning (PPP) technology, GNSS PPP has outstanding advantages and unique application value in the field of precise timing, precise orbit determination, ionosphere/troposphere modeling, earthquake prediction, disaster monitoring, and so on. Nowadays, the primary requirements of increasingly GNSS users are real-time, high-precision, and low-cost. The legacy positioning, navigation and timing (PNT) service of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) can only obtain 10 meter-level positioning accuracy due to the limited regional monitoring network and insufficient stability of satellite clock, it is hard to meet the requirements of high-precision positioning users. Based on this background, four types of corrections are proposed by BDS satellite-based augmentation service (SBAS), the 95% positioning accuracy of the horizontal and vertical component can less than 1.0 m and 1.5 m, respectively, for authorized code users by using real-time satellite orbit/clock corrections and ionospheric grid corrections to carry out real-time SBAS standard point positioning (SPP). As for authorized carrier-phase users by using the abovementioned corrections and real-time partition comprehensive correction (PCC), the dual-frequency kinematic PPP can convergence to 0.5 m in 25 min and the positioning accuracy are 0.15 m in horizontal and 0.2 in vertical, respectively. In terms of the single-frequency kinematic PPP, the three-dimensional (3D) positioning error convergences to 0.8 m in 20 min, while the positioning accuracy is 0.3 m in horizontal and 0.5 m in vertical. This contribution is mainly focused on the BDS SBAS PPP using the real-time PCC, the positioning performance of BDS kinematic users can be effectively improved by introducing the GPS measurements. After a large number of tests, it is found that the real-time PCC in real-time kinematic positioning may be interrupted or lost due to the instability of the SBAS system, resulting in gross errors of positioning and seriously affecting the continuity of real-time kinematic positioning. In response to this problem, the corresponding solution is proposed for the first time in this contribution.

IGS real-time working group (RTWG) has been providing an open-access realtime service (RTS) since April 2013. RTS products mainly include real-time satellite orbit and clock corrections for GPS, GLONASS, BDS and Galileo. The real-time precise orbit and clock can be recovered by combining the above RTS products with

Tongji University Doctor of Philosophy Abstract

broadcast ephemeris and support real-time dual-frequency PPP to achieve centimeterlevel positioning accuracy. However, dual-frequency GNSS receiver is high-cost for most positioning users, hence the low-cost and high-precision single-frequency PPP technology has attracted increasing attention in the booming real-time applications. Thanks to the high-precision real-time ionospheric VTEC messages provided by RTS CLK93, real-time single-frequency PPP has good positioning performance. In this contribution, three widely used multi-GNSS real-time single-frequency PPP models are analyzed in-depth, and the impact of four ionospheric models on multi-GNSS singlefrequency positioning in the region of China is evaluated. In summary, some research findings and main conclusions are as follows:

(1) First, we introduce three kinds of single- or dual-frequency PPP models including the ionosphere-free model, the undifferenced and uncombined model, and the GRAPHIC (GRoup And PHase Ionospheric Correction) model. After that, real-time cycle slip detection methods, carrier phase smoothing pseudorange methods, and two kinds of parameter estimation theories including Least-squares and Kalman filter are introduced in detail. More importantly, the model for every part of the positioning error is also introduced, and the performance of the GPS civil navigation message (CNAV) and legacy navigation message (LNAV) is evaluated comprehensively. The CNAV and LNAV datasets from January 2016 to March 2018 were collected and utilized for statistical analysis, GBM precise orbit and clock products were adopted as a reference. The results indicate that the RMS (root mean square) of the CNAV clock error is almost identical to the LNAV of around 0.4 m. Compared with LNAV, the orbit error of CNAV is significantly larger in the along-track component, but no difference in the radial and cross-track component was observed. The signal-in-space range error (SISRE) and orbit-only SISRE(orb) of CNAV/LNAV during the test period amount to 0.5 m and 0.3 m, respectively, which is further improved in comparison with the results from 2014 to 2015. The agreement of the inter-signal correction (ISC) parameters with DLR and CODE DCB (Differential Code Bias) products is slightly different, where the ISC precision of L1C/A is better than 0.1 ns, and those of L2C and L5Q5 are about 0.4 ns and 0.35 ns, respectively.

(2) The calculation principle and flow of BDS real-time PCC are introduced firstly, then we propose the single- and dual-frequency PPP model using four types of BDS SBAS corrections. The positioning accuracy and convergence of BDS SBAS corrections-based PPP using one-month data collected from 34 stations (7 iGMAS+27 CMONOC) in 2019 were evaluated in detail. Results show that the RMS of the positioning errors for static/kinematic dual-frequency PPP are of 0.12/0.16 m in horizontal and 0.18/020 m in vertical component, while for single-frequency PPP are of 0.15/0.33 m and 0.22/0.40 m, respectively. In terms of convergence, the horizontal and vertical positioning errors of kinematic dual-frequency PPP can converge to 0.5 m in less than 15 min and 20 min, respectively. As to the kinematic single-frequency PPP, it can converge to 0.8 m in horizontal and 1.0 m in vertical component within 30 min, where the ionosphere-weighted PPP performs better than the ionosphere-free PPP based on the GRAPHIC model.

(3) GPS was introduced into the real-time PCC calculation and positioning, and a kinematic PPP model of BDS+GPS using the real-time PCC is proposed for the first time. The performance of BDS+GPS kinematic PPP was analyzed based on 20-day data collected from 15 MGEX (Multi-GNSS Experiment) stations. Results show that the BDS+GPS dual-frequency kinematic PPP using the real-time PCC converges to 1.0 m within 5 min on average, and the RMS of the positioning errors reaches 0.05 m in horizontal and 0.15 m in vertical component after convergence, which is much better than that of BDS-only or GPS-only PPP. With the expansion of the real-time PCC service range, the positioning accuracy of BDS+GPS PPP can be slightly reduced, but the convergence is not affected. With the updated time of the real-time PCC increases by 30 s and no more than 180 s, the positioning errors in the horizontal and vertical components of BDS+GPS PPP can be increased by 0.4 cm and the average convergence time can be increased by 2 min.

(4) Although the BDS real-time users using four types of SBAS corrections can achieve decimeter-level positioning accuracy, the real-time PCC experience discontinuities causing the re-initialization of BDS SBAS PPP. We found that the epoch-difference of PCC between two adjacent zones is highly correlated, and the average correlation coefficient is around 0.7. Based on this feature, we develop a new BDS SBAS PPP algorithm based on the switching of the real-time PCC among neighboring zones. Applying the new algorithm, BDS users switch to use the real-time PCC of the neighboring zones in case of no corrections received of the current zone, thus avoid carrier-phase based positioning re-initialization. Datasets of 7 BDS monitoring stations and a true real-time kinematic on-road track were used to evaluate the new algorithm. Results show that with the implementation of the new algorithm, the 3D positioning accuracy of BDS dual-frequency kinematic PPP is better than 0.45

m during the period of zone switching. On-road real-time single- or dual-frequency kinematic PPP shows no positioning re-initialization, and the positioning accuracy remains at the level of better than 0.5 m during the discontinuity of the real-time PCC.

(5) Taking the GBM precise orbit and clock products as reference, the quality of quad-system RTS CLK93 real-time orbit and clock for consecutive 20 days in 2019 was evaluated. Results show that the orbit accuracy of GPS and Galileo satellites shows a similar level and much better than that of GLONASS and BDS satellites, which RMS values are less than 3.0 cm, 4.5 cm and 3.5 in the radial, along-track and cross-track components, respectively. The RMS of GLONASS satellite orbit errors reaches up to 4.5 cm in the radial component and more than 7.0 cm in the along-track and cross-track components. BDS-2 satellite orbits have the worst performance in all systems, whose RMS of 6.0 cm in the radial component. The GPS and Galileo satellite clocks agree well with the final precise clocks and their STD values are about 0.1 ns. The clock accuracy of the GLONASS satellite is about 0.2 ns, and the BDS-2 clock accuracy is the lowest with 0.3 ns of all systems. The referenced STEC derived from CODE final GIM model, the average RMS of the CLK93 real-time STEC for 46 MGEX stations during the period of mild solar activity is about 3.4 TECU (Total Electron Content Units). The accuracy of the CLK93 real-time STEC for middle and high latitude stations is better than low latitude stations, and the stations located in ocean areas show relatively larger RMS values.

(6) Three widely used multi-GNSS real-time single-frequency PPP models including ionosphere-corrected (IC) model, ionosphere-free (IF) model based on the GRAPHIC observation, and ionosphere-weighted model are introduced. A comprehensive evaluation of the three models using CLK93 real-time orbit and clock products is performed in the aspect of observation residuals, positioning accuracy and convergence. Datasets with quad-system are collected from 46 MGEX stations for consecutive 14 days and 6-h kinematic shipborne test. Results show that the positioning accuracy of IW model using MGEX data is better than that of both IC and IF models. As for the kinematic shipborne test, positioning accuracy of IF/IW model is of 0.27/0/26, 0.21/0.26 and 0.49/0.48 m for the N, E and U components, respectively, which is much better than that of IC model. The positioning performance of the first frequency in the IC model is better than that of the second frequency, due to the amplified ionospheric error of the second frequency. However, this amplification has little effect on IF and IW models. Compared with the GPS-only, the performance of GPS+GLONASS+BDS-

2+Galileo real-time single-frequency PPP based on IC, IF and IW models were significantly improved, which RMS of the positioning errors is better than 0.3 m in horizontal and 0.5 m in vertical component after convergence, and the convergence time can be shortened by at least 30%. Both code and phase observation residuals of IW model are significantly smaller than those of IC and IF models. The ionospheric delay parameters estimated as a random-walk noise process in IW model can absorb parts of unmodelled errors. The IW model performs faster convergence than that of the IF model, while the IC model is difficult to converge to the decimeter-level positioning accuracy. The convergence time of the IW model is shortened by about 26% compared with the IF model.

(7) The four ionospheric models including the BDS broadcast ionospheric model (BDS-Klobuchar), the BDS ionospheric grid model (BDS-Grid), the GPS broadcast ionospheric model (GPS-Klobuchar) and the Global Ionosphere Maps (GIM) model are introduced and studied. The single-frequency SPP and PPP are used to analyze the ionospheric delay effects on the multi-GNSS positioning performance. Datasets are collected from 10 stations (2 MGEX+8 CMONOC) over one month in 2019. Results show that the performance of single-frequency SPP with GIM model shows the best, and the positioning accuracy of single-frequency SPP based on the BDS-Klobuchar and BDS-Grid model is much better than the solution with the GPS-Klobuchar model. Although both GPS-Klobuchar and BDS-Klobuchar are based on the Klobuchar model, the BDS-Klobuchar correction accuracy at night is clearly better than the GPS-Klobuchar model. The main reason is that the alpha and beta parameters of BDS-Klobuchar are updated every 2 h, whereas the GPS-Klobuchar coefficients are updated every 5-10 days. With the introduction of multi-GNSS observations, the 3D positioning accuracy of the GPS+GLONASS+BDS-2+3 single-frequency SPP can less than 1.0 m. Compared with the GPS-only solution, the positioning errors of the GPS+GLONASS+BDS-2 single-frequency PPP can converge to 0.5 m within 15 min, and the positioning accuracy after convergence can reach 1-3 cm in horizontal and 4-5 cm in vertical. Compared with the ionosphere-free PPP model based on the GRAPHIC the average convergence time of the ionosphere-weighted observation, GPS+GLONASS+BDS-2 single-frequency PPP based on the GPS-Klobuchar, BDS-Klobuchar, BDS-Grid and GIM model can be shortened by 11.2%, 11.9%, 21.3% and 39.6%, respectively.

Keywords: BeiDou Satellite-Based Augmentation Service; Precise Point Positioning; Partition Comprehensive Correction; Multi-GNSS; Real-time Single-frequency Positioning

缩写词

AC	Analysis Center	分析中心
ANTEX	Antenna Exchange Format	天线数据文件标准格式
APC	Antenna Phase Center	天线相位中心
ARP	Antenna Reference Point	天线参考点
BDGIM	BeiDou Global Broadcast Ionospheric Delay Correction Model	北斗全球预报电离层延迟改正模 型
BDS	BeiDou Navigation Satellite System	北斗全球卫星导航系统
BDT	BeiDou Time	北斗时
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CMONOC	Crustal Motion Observation Network of China	中国地壳运动观测网
CNAV	Civil Navigation Message	民用导航电文
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales	法国国家航天研究中心
CNMC	Code Noise and Multipath Correction	码噪声与多径改正
CODE	Center for Orbit Determination in Europe	欧洲定轨中心
CoM	Center-of-Mass	质心
DCB	Differential Code Bias	差分码偏差
DF-IF	Dual-Frequency Ionosphere-Free	双频无电离层组合
DLR	Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrtn	德国航空航天中心
DoY	Day of Year	年积日
ECEF	Earth-Centered, Earth-Fixed	地心地固坐标系
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	欧洲地球同步卫星导航增强服务 系统
ESA	European Space Agency	欧洲航天局
EU	European Union	欧盟
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址

GEO	Geostationary Earth Orbit	地球静止轨道卫星	
GF	Geometry-Free	电离层残差组合	
GFZ	Deutsches GeoForschungsZentrum	德国地学研究中心	
GIM	Global Ionospheric Map	全球电离层地图	
GLONASS	GLObal NAvigation Satellite System	俄罗斯全球卫星导航系统	
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球卫星导航系统	
GPS	Global Positioning System	美国全球卫星导航系统	
GPST	GPS Time	GPS 时	
GPT	Global Pressure and Temperature	全球气压与温度模型	
GRAPHIC	Group and Phase Ionospheric Correction	伪距相位半和法	
IC	Ionosphere-Corrected	电离层改正	
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service	国际地球自转服务组织	
IF	Ionosphere-Free	无电离层组合	
IFCB	Inter-Frequency Code Bias	频间码偏差	
iGMAS	International GNSS Monitoring & Assessment System	国际 GNSS 监测评估系统	
IGP	Ionospheric Grid Point	电离层格网点	
IGR	IGS Rapid	IGS 快速精密产品	
IGS	International GNSS Service	国际 GNSS 服务组织	
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit	倾斜地球同步轨道卫星	
IGU	IGS Ultra-rapid	IGS 超快速精密产品	
IPP	Ionospheric Pierce Point	电离层穿刺点	
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System	印度区域卫星导航系统	
ISB	Inter System Bias	系统间偏差	
ISC	Inter-Signal Correction	信号间改正	
ISL	Inter-Satellite Link	星间链路	
ITRF	International Terrestrial Reference Frame	国际地球参考框架	

同济大学 博士学位论文 缩写词

		内所八子 南王于世纪人 相当两
IW	Ionosphere-Weighted	电离层约束
JPL	Jet Propulsion Laboratory	喷气推进实验室
LNAV	Legacy Navigation Message	传统导航电文
LT	Local Time	当地时
MEO	Median Earth Orbit	中圆地球轨道卫星
MGEX	Multi-GNSS Experiment	多频多模 GNSS 试验
MPC	Mean Phase Center	平均相位中心
MSAS	Multi-functional Satellite Augmented Navigation	多功能卫星导航增强系统
MW	Melbourne-Wubbena	墨尔本-伍贝那组合
NAG	National Geospatial-Intelligence Agency	美国国家地理空间情报局
NTCM-BC	Neustrelitz Total Electron Content Broadcast Model	电离层中性总电子含量预报模型
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internal Protocol	基于内部协议的 RTCM 网络传输
OMC	Observation Minus Correction	观测值减改正值
PCC	Partition Comprehensive Correction	分区综合改正数
РСО	Phase Center Offset	相位中心偏移
PCV	Phase Center Variation	相位中心变化
PDOP	Position Dilution of Precision	位置精度因子
PNT	Positioning, Navigation and Timing	定位、导航和授时
РРР	Precise Point Positioning	精密单点定位
PRN	Pseudo Random Noise	伪随机噪声码
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	日本准天顶卫星导航系统
RMS	Root-Mean-Square	均方根值
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services	国际海事无线电技术委员会
RTK	Real-Time Kinematic	实时动态定位
RTPPP	Real-Time Precise Point Positioning	实时精密单点定位
RTS	Real-Time Service	实时服务

XIII

同济大学 博士学位论文 缩写词

		内切八子 府工于世纪文 缩马师
RTWG	Real Time Working Group	实时工作组
SBAS	Satellite Based Augmentation System	星基增强系统
SDCM	System for Differential Correction and Monitoring	差分改正监测系统
SF-IF	Single-Frequency Ionosphere-Free	单频无电离层组合
SHAtropE	Shanghai Astronomical Observatory Tropospheric Delay Model-Extended	上海天文台对流层延迟模型(扩 展版)
SINEX	Solution Independent Exchange	大地测量数据结果文件标准格式
SISRE	Signal in Space Range Error	空间信号测距误差
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System	卫星导航增强系统
SPP	Standard Point Positioning	伪距单点定位
SSR	State Space Representation	状态空间表达式
STD	Standard Deviation	标准差
STEC	Slant Total Electron Content	电离层斜路径总电子含量
SVN	Space Vehicle Number	航天器编号
TAI	International Atomic Time	国际原子时
TECU	Total Electron Content Units	电离层电子浓度总含量单位
TGD	Time Group Delay	时间群延迟
UDRE	User Differential Range Error	用户差分测距误差
VTEC	Vertical Total Electron Content	电离层垂直总电子含量
WAAS	Wide Area Augmentation System	广域增强系统
WGS-84	World Geodetic System-84	世界大地测量坐标系-1984年
WHU	Wuhan University	武汉大学
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay	天顶静水延迟
ZTD	Zenith Tropospheric Delay	天顶对流层延迟
ZWD	Zenith Wet Delay	天顶湿延迟
3D	Three-Dimensional	三维

ऋ
F J F

第一章	引言	1
1.1	全球卫星导航系统概述	1
1.2	国内外实时高精度定位系统研究现状	3
	1.2.1 国外星基增强系统	3
	1.2.2 北斗星基增强系统	4
	1.2.3 IGS RTS 服务系统	5
1.3	研究目标及选题意义	7
1.4	主要研究内容	8
第2章	GNSS 精密单点定位基本原理与算法	
2.1	精密单点定位模型	
	2.1.1 GNSS 原始观测模型	10
	2.1.2 双频无电离层组合模型	11
	2.1.3 单频无电离层组合模型	12
	2.1.4 非差非组合模型	12
2.2	定位误差项及改正	13
	2.2.1 卫星轨道及钟差误差	13
	2.2.2 电离层延迟误差	
	2.2.3 对流层延迟误差	19
	2.2.4 天线相位中心改正	20
	2.2.5 天线相位缠绕改正	21
	2.2.6 TGD/DCB 改正	22
	2.2.7 相对论效应改正	
	2.2.8 地球形变改正	27
2.3	数据预处理	
	2.3.1 双频周跳探测	
	2.3.2 单频周跳探测	
	2.3.3 双频相位平滑伪距	
	2.3.4 单频相位平滑伪距	
2.4	参数估计	
	2.4.1 函数模型与随机模型	
	2.4.2 最小二乘法	
	2.4.3 Kalman 滤波	
2.5	本章小结	
第3章	基于分区综合改正技术的北斗/GPS 组合精密单点定位	

3.1	分区综合改正数计算原理	
	3.1.1 单参考站计算	
	3.1.2 多参考站计算	40
3.2	北斗分区综合改正数定位模型	43
	3.2.1 双频定位模型	43
	3.2.2 单频定位模型	44
3.3	北斗分区综合改正数定位性能评估	46
	3.3.1 试验数据及处理策略	46
	3.3.2 定位精度与收敛性分析	48
3.4	北斗/GPS 组合分区综合改正数定位模型	
3.5	北斗/GPS 组合分区综合改正数定位性能评估	53
	3.5.1 试验数据及处理策略	53
	3.5.2 定位精度与收敛性分析	54
	3.5.3 服务半径对定位性能的影响分析	56
	3.5.4 播发频度对定位性能的影响分析	58
3.6	本章小结	59
第4章	北斗星基增强分米级定位的分区切换算法	61
4.1	分区切换对定位的影响	61
4.2	分区切换定位算法	63
4.3	分区切换定位算法的性能评估	66
	4.3.1 试验数据及处理策略	66
	4.3.2 北斗静态站数据测试	67
	4.3.3 车载动态数据测试	70
4.4	本章小结	73
第5章	三种 Multi-GNSS 实时单频精密单点定位模型分析	75
5.1	Multi-GNSS 实时单频 PPP 定位模型	76
	5.1.1 Ionosphere-Corrected 单频 PPP	77
	5.1.2 Ionosphere-Free 单频 PPP	78
	5.1.3 Ionosphere-Weighted 单频 PPP	78
5.2	CLK93 实时轨道和钟差	79
5.3	CLK93 实时电离层产品	
5.4	三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 定位性能比较	
	5.4.1 试验数据及处理策略	
	5.4.2 定位精度	85
	5.4.3 观测值残差	
	5.4.4 收敛性	91
	5.4.5 船载动态数据测试	93
5.5	本章小结	96

第6章	北斗实时电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频定位	立的影响分析.98
6.1	北斗电离层模型	
	6.1.1 BDS-Klobuchar 电离层模型	
	6.1.2 BDS 格网电离层模型	
6.2	Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 定位模型	
6.3	不同电离层模型对 Multi-GNSS 单频定位的影响	
	6.3.1 试验数据及处理策略	
	6.3.2 Multi-GNSS 单频 SPP 定位	
	6.3.3 Multi-GNSS 单频 PPP 定位	
6.4	本章小结	
第7章	结论与展望	
7.1	结论	
7.2	进一步研究计划	
致谢		
参考文	献	
附录 数	7据来源	
个人简	历、在读期间发表的学术论文和研究成果	

第一章 引言

1.1 全球卫星导航系统概述

全球卫星导航系统 GNSS (Global Navigation Satellite System)的出现彻底改 变了人们对时间和空间的感知与利用,其在军事作战、交通管理、海洋渔业及抗 震救灾等领域发挥了极其重要的作用(杨元喜,2016)。截止2020年7月,已经 建成的全球卫星导航系统包括美国的 GPS (Global Positioning System)、俄罗斯 的 GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System)、中国的 BDS (BeiDou Navigation Satellite System)以及欧盟的 Galileo。此外,日本和印度也正在积极 建设满足本国发展需求的区域卫星导航系统 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System) 和 IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System)。本节将对四大全球卫星 导航系统的概况进行简要介绍。

建成最早、性能最佳、应用最广的 GPS 于 1995 年开始提供全球服务,其星座由 24 颗距离地面高度 20200 km 且均匀分布的 MEO (Median Earth Orbit)卫星组成,轨道倾角约 55°,运行周期为 11 h 58 min 2 s。为了改善星座的几何构型,保证在地球上任意一点用户都能观测到至少 7 颗 GPS 卫星,截止 2020 年 7 月,共有 32 颗在轨卫星提供服务,分别为 7 颗 Block IIR-A、4 颗 Block IIR-B、 7 颗 Block IIR-M、12 颗 Block IIF 和 2 颗 Block IIIA 卫星。相比于仅提供 L1 和 L2 信号的 Block IIR 卫星,Block IIF 卫星新增了第三代信号 L5,Block IIIA 卫星新增了第四代信号 L1C,使 GPS 逐渐从双频系统发展为多频系统(ICD-GPS-240C, 2019)。一方面 GPS 的地面监测站众多且分布均匀,另一方面随着 GPS 卫星的升级换代,其搭载的原子钟性能越来越好,使得 GPS 广播星历的轨道和钟差精度逐年提高,目前 GPS 卫星的平均 RMS(Root-Mean-Square)空间信号精度(Signal in Space Range Error, SISRE)可达 0.6 m (Montenbruck et al, 2018)。

俄罗斯建设的 GLONASS 由 24 颗距离地面 19100 km 且分布在 3 个轨道面 的 MEO 卫星组成,目前包括 23 颗 GLONASS-M 卫星和 1 颗 GLONASS-K1 卫星,轨道倾角约 65°,运行周期为 11 h 15 min 44 s。与 GPS、BDS 和 Galileo 这些采用码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)技术的系统相比,GLONASS 采用频分多址(Frequency Division Multiple Access,FDMA)技术进行信号传输,即所有卫星在-7 至+6 共 14 个不同频率的信号上传输相同的码(ICD-L1,L2-GLONASS,2008)。值得注意的是,各颗卫星采用的频率号并非固定不变,

而是需要用户接收 GLONASS 广播星历实时获取。此外,GLONASS 广播星历与 其他 GNSS 完全不同,其并不提供开普勒轨道根数及相应摄动改正,而是由卫星 在参考时刻的坐标、速度及加速度组成,采用 Runge-Kutta 法进行积分即可获取 卫星位置,较其他系统更为简便。由于 GLONASS 地面监测站较少,而且星载原 子钟性能较差,钟差精度在 0.05-0.1 ps,远低于其他系统,因此目前 GLONASS 卫星的平均 RMS SISRE 在 2.0 m 以内(Montenbruck et al, 2018)。

由欧盟发起并建设的 Galileo 由 24 颗均匀分布在 3 个轨道面的 MEO 卫星组成,轨道高度为 23222 km,轨道倾角为 56°,运行周期为 14 h 4 min 45 s,该星座能保证用户在地球上任意一点可观测到至少 6 颗 Galileo 卫星。自 2016 年底提供全球服务以来,在轨运行的 Galileo 卫星从 11 颗逐渐增加至 26 颗,但目前正常运行的卫星为 24 颗,E20 和 E22 始终处于不可用状态。区别于其他卫星导航系统,Galileo 提供的频率信号多达 5 种,分别为 E1、E5、E5a、E5b 和 E6(European GNSS (Galileo) OS-SIS-ICD,2015)。Galileo 与 GPS 一样,其监测站数量众多且在全球范围内均匀分布,同时大部分卫星采用了稳定性良好的氢原子钟,使得Galileo 卫星的空间信号精度明显优于其他系统,其平均 RMS SISRE 在 0.2 m 左右(Montenbruck et al, 2018)。

中国自主研发的北斗卫星导航系统(BDS)根据"先试验、后区域、再全球"的战略步骤分阶段建设(杨元喜,2010)。2003年建成的北斗一号系统(BDS-1)由3颗GEO(Geostationary Earth Orbit)卫星组成,可提供基本的授时、定位和短报文服务。2012年底建成的北斗二号系统(BDS-2)包括5颗GEO、6颗IGSO(Inclined Geosynchronous Orbit)和3颗MEO卫星,可为中国及部分亚太地区用户提供定位精度优于10m,测速精度优于0.2m/s和授时精度优于50ns的综合PNT(Positioning, Navigation and Timing)服务(Han et al, 2011; Montenbruck et al, 2013; Shi et al, 2013)。随着2020年6月23日最后一颗北斗全球组网卫星的成功发射,北斗三号系统(BDS-3)已经具备全球服务能力,建成的BDS-3将由3颗GEO、3颗IGSO和24颗MEO卫星组成,其中GEO卫星的轨道高度为35786km,定点于东经80°、110.5°和140°; IGSO卫星的轨道高度为35786km,就道倾角为55°; MEO卫星的轨道高度为21528km,轨道倾角为55°

(BDS-SIS-ICD, 2019)。图 1.1 为 2020 年 7 月 7 日 BDT (BeiDou Time) 02:00 的 BDS 卫星星下点轨迹图。值得注意的是, BDS 是世界上第一个提供 B1、B2 和 B3 三频信号服务的卫星导航系统。与 GPS 等其他系统不同的是, BDS 采用 GEO、IGSO 和 MEO 的混合星座设计,其中 GEO 卫星因高轨及静止特性导致定 轨精度较低,对于 B1 单频用户, BDS-2 所有卫星的平均 RMS SISRE 仅 1.0 m 左 右,而 IGSO 和 MEO 卫星的空间信号精度可优于 0.7 m (Montenbruck et al,

2018)。随着多颗 BDS-3 卫星的发射,星间链路(Inter-Satellite Link, ISL)技术的应用以及更高稳定性的铷原子/氢原子钟的使用,目前 BDS 所有卫星的平均 RMS SISRE 已优于 0.7 m,仅对 BDS-3 卫星而言,其空间信号精度可在 0.5 m 以内(Zhang et al, 2020)。



图 1.1 BDS 卫星星下点轨迹图(http://www.beidou.gov.cn/xt/xlxz/)

1.2 国内外实时高精度定位系统研究现状

由于目前广播星历提供的卫星轨道和钟差精度有限,GNSS 的基本导航服务 仅能满足米级用户的定位需求,为了提高实时定位精度,拓宽 GNSS 的应用领 域,各大卫星导航系统都建立了相应的广域差分星基增强系统(Satellite Based Augmentation System, SBAS),如美国的 WAAS(Wide Area Augmentation System)、 欧盟的 EGNOS(European Geostationary Navigation Overlay Service)、中国的 SNAS (Satellite Navigation Augmentation System)、俄罗斯的 SDCM (System for Differential Correction and Monitoring)和日本的 MSAS (Multi-functional Satellite Augmented Navigation)等。除此之外,全球 GNSS 组织 IGS (International GNSS Service)在 2001 年建立了 RTWG (Real Time Working Group)实时工作组,并于 2013 年 4 月 1 日正式发布了 RTS (Real-Time Service)服务,为用户免费提供高 精度的卫星轨道/钟差改正数、伪距/相位偏差以及电离层产品。

1.2.1 国外星基增强系统

最为著名的广域差分星基增强系统 WAAS 由美国联邦航空局和交通部于

1992 年开始建设,地面部分由约 30 个美国境内的地面监测站组成,空间部分由 3 颗位于西经 98°、107°和 133°的 GEO 卫星组成,这些卫星主要负责实时播 发经计算校正后的卫星轨道改正、卫星钟差改正以及电离层延迟等大气误差改正 信息。整体而言,WAAS 系统可提供优于 3.0 m 的定位精度,而在美国南部等 WAAS 卫星的主要覆盖区域,其定位精度一般优于 1.0 m,可满足民用航空中 I 类精密进近的要求(GPS WAAS PS, 2008)。

EU (European Union)和 ESA (European Space Agency)共同负责开发建设的 EGNOS 可支持 GPS、GLONASS 和 Galileo 三个系统,由 40 个地面监测站和 3 颗位于西经 15.5°、东经 21.3°以及东经 65.5°的 GEO 卫星组成。2009 年 10 月起免费向用户提供定位精度约 1.0 m 的公开服务,2011 年 3 月和 2012 年 7 月 陆续开始提供生命安全服务和数据访问服务,其定位精度均优于 1.0 m (EGNOS O-SDD, 2017; EGNOS SoL-SDD, 2019)。

俄罗斯建设的 GLONASS 卫星导航增强系统 SDCM 由 3 颗 GEO 卫星组成, 其分别位于西经 16°(Luch-5A)、东经 167°(Luch-5B)和东经 95°(Luch-4)。截止 2014 年, SDCM 地面段共包括 19 个国内站和 6 个境外站,为了提高系 统服务性能,尽可能在全球范围内均匀设站,俄罗斯计划在 2020 年前共部署 82 个 SDCM 监测站,其中国内 29 个,境外 53 个。SDCM 系统在广域范围内可提 供米级精度定位,其中水平方向 1-1.5 m,高程方向 2-3 m,对于在参考站周围 200 km 范围内的用户,可实现 2-6 cm 的厘米级实时定位。(Urlichich et al, 2011; 卢 璐, 2014)。

MSAS 星基增强系统由日本民航局开发建设,其空间段由 2 颗分布于东经 140° (MTSAT-1R)和 145° (MTSAT-2)的 GEO 卫星组成,地面段由 2 个主 控站和 8 个监测站组成。MSAS 系统可提供卫星轨道改正数、卫星钟差改正数及 电离层延迟改正数,其定位精度在水平和高程方向分别优于 0.7 m 和 1.0 m。(郝 茂森, 2020)。

1.2.2 北斗星基增强系统

中国自主研发的 BDS 系统在设计之初就综合考虑了基本服务(Legacy PNT) 与星基增强服务(SBAS)的一体化,其中,基本服务免费向用户提供基本导航 信息,而星基增强服务则为授权用户提供广域差分和完好性等信息。

早期的北斗 SBAS 系统仅播发 2 类改正数,即等效钟差改正数和格网电离层 改正数(Cao et al, 2012; Wu et al, 2014)。等效钟差改正数的计算综合使用了 CNMC(Code Noise and Multipath Correction)(Chang et al, 2015)平滑的伪距观 测值和历元间差分的载波相位观测值,其不仅包含卫星钟差的改正还包含了卫星

轨道在径向分量上的误差改正(陈俊平,2017)。由于电离层延迟误差的一阶项可在双频 IF(Ionosphere-Free)观测量中被消除,故格网电离层改正数主要服务于北斗单频用户,电离层格网由320个格网点(Ionospheric Grid Point, IGP)组成,覆盖范围为北纬7.5-55°和东经70-145°,播发频度为6 min,在中国的大部分区域其电离层延迟误差的改正精度优于0.5 m(Wu et al, 2014)。基于上述2类星基增强参数和北斗广播星历实施伪距单点定位(Standard Point Positioning, SPP),单、双频伪距用户的定位精度可分别提高30%和50%,但三维定位误差仍大于1 m(Cao et al, 2012)。

随着北斗 SBAS 系统的升级改造,自 2017 年 1 月起开始播发新增的卫星轨 道改正数和分区综合改正数。卫星轨道改正数可修正等效钟差改正数中未考虑的 轨道切向和法向分量上的误差,使用户差分距离误差(User Differential Range Error, UDRE)提高至 0.5 m,同时使得 BDS 实时伪距用户的 95%定位精度在水 平方向优于 1.0 m,高程方向优于 1.5 m (陈俊平, 2017)。为了充分利用高精度 载波相位观测值,有效提高北斗实时用户的定位性能,在北斗广播星历、卫星轨 道改正数和等效钟差改正数的基础上,系统生成并播发了相位分区综合改正数, 该星基增强参数的服务半径可达 1000 km,其包含了服务区域内卫星轨道、卫星 钟差、接收机钟差、对流层延迟以及模糊度的综合误差,叠加使用上述 4 种星基 增强参数的 BDS 用户可实现实时动态分米级精度定位,已有的大量研究表明, 双频动态精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)的三维定位误差可在 10 min 内收敛至 1.0 m,收敛后的水平定位精度优于 0.1 m,高程定位精度优于 0.2 m;单频动态 PPP 的三维定位误差平均 20 min 可收敛至 0.8 m,收敛后的定位精 度在水平和高程方向分别优于 0.3 m和 0.5 m (Chen et al, 2015;陈俊平, 2017b; 2018; Zhang et al, 2017; 张益泽, 2019)。

1.2.3 IGS RTS 服务系统

PPP 作为一种高精度绝对定位技术在 GNSS 领域被广泛使用,其在精密授时、低轨卫星定轨、大范围移动测量、水汽反演、电离层监测等方面具有独特的价值与优势(Defraigne et al, 2015; 李建成, 2009; 袁修孝, 2007; 张小红, 2010; Ren et al, 2016)。该技术克服了 SPP 和相对定位的缺点,融合了各自的优点,用户无需架设基准站,仅用一台 GNSS 接收机即可获得测站在全球范围内任意一点的高精度位置信息(Zumberge et al, 1997; Kouba et al, 2001)。尽管 PPP 可以实现静态毫米级、动态厘米级的高精度定位(Geng et al, 2009; Zhang et al, 2013),但其必须依赖时延高达 13 天的事后(Final)精密轨道和钟差产品,致使其在许多实时定位领域无法得到应用。鉴于此, IGS 组织发布了时延 17 h 的快速产品

(IGS Rapid, IGR)和时延3h的超快速产品(IGS Ultra-rapid, IGU),其中IGU 产品能满足用户的实时需求,但其24h预报部分(Predicted-half)的轨道和钟差 精度较低会严重影响 PPP 的定位精度(Melgard et al, 2009; Elsobeiey et al, 2016)。

为了满足实时高精度定位用户的需求, IGS RTWG 工作组在 2007 年 6 月发 布了 "Call for Participation in the IGS Real-time Pilot Project"(http://www.rtigs.net) 计划,并于 2011 年 8 月宣布该试点项目已具备初步运行能力,可提供 GNSS 实 时精密轨道和钟差改正数,截止 2013 年 4 月 1 日, IGS RTS 系统正式向全球用 户免费提供服务 (Caissy et al, 2012)。根据海事无线电技术委员会 RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) v3.x 的标准, RTS 产品被格式化为 SSR(State Space Representation)信息并基于 NTRIP(Networked Transport of RTCM via Internal Protocol)协议通过互联网进行播发(RTCM Special Committee, 2016)。 在 IGS RTWG 的规划中, SSR 信息的设计被分为三个阶段: (1) 播发卫星轨道 改正数、卫星钟差改正数和伪距偏差 (Code Bias),支持用户进行双频 RTPPP (Real-Time Precise Point Positioning); (2) 播发电离层 VTEC (Vertical Total Electron Content)产品,支持用户进行单频 RTPPP; (3)播发卫星相位偏差 (Phase Bias)、对流层改正数和电离层 STEC (Slant Total Electron Content) 产品,支持 用户实现模糊度快速固定的 PPP-RTK (Real-Time Kinematic) (Teunissen et al, 2015)。

目前,大多数 IGS 分析中心(Analysis Center, AC) 仅能播发第一阶段 SSR 信息,许多学者对各 GNSS 系统的实时轨道和钟差改正精度做出评估,其中 GPS 和 Galileo 精度最高,实时 3D (Three-Dimensional) 轨道 RMS 为 4-5 cm,实时 钟差 STD (Standard Deviation) 约 0.1 ns; GLONASS 产品的精度次之,实时轨 道 RMS 在径向分量约 5 cm, 切向和法向分量为 6-10 cm, 实时钟差 STD 约 0.2 ns; BDS-2 中 GEO 卫星因其高轨静止特性,实时轨道 RMS 在径向分量上已超过 50 cm, IGSO 和 MEO 卫星的实时轨道 RMS 在不同分量上约 6 cm (径向)、16 cm (切向)和 18 cm (法向),对于非 GEO 卫星, BDS-2 的实时钟差 STD 在 0.3 ns 左右 (Hadas et al, 2015; Cao et al, 2018; Kazmierski et al, 2018; Wang et al, 2018, 2018b)。采用上述高精度 RTS 轨道和钟差产品进行定位, GPS-only 静态 双频 RTPPP 用户可获得水平方向 1-2 cm 和高程方向 2-3 cm 的定位精度, 而动态 双频 RTPPP 的定位精度在水平和高程方向分别可达 3-4 cm 和 6-8 cm(Kazmierski et al, 2018; Zhang et al, 2018)。Wang et al (2019) 采用 RTS CLK93 产品对 BDSonly 双频 RTPPP 进行研究,结果表明在静态和动态模式下 3D 定位误差收敛至 0.2 m 分别需要 100 min 和 136 min, 收敛后的定位精度在静态模式下与 GPS-only 结果基本一致,而在动态模式下相对较差,水平定位精度在10-16 cm,高程定位

精度约30 cm。随着多频多模融合技术的发展,基于 RTS 产品的多系统组合 RTPPP 已经成为研究热点,相比于 GPS-only, GPS+GLONASS+BDS+Galileo 双频 RTPPP 的收敛速度、静态坐标重复率、动态坐标精度及定位的连续性和稳定性均有明显 提高(Cao et al, 2018; Kazmierski et al, 2018, 2018b; Wang et al, 2018b)。

近些年,随着单频 PPP 技术的发展,使用低成本单频 GNSS 接收机的用户 也可获得分米级至亚米级的定位精度(van Bree et al, 2012; de Bakker et al, 2017)。 由于单频定位中电离层延迟误差无法被双频 IF 组合量所消除,故单频 RTPPP 的 性能与电离层产品的精度高度相关(Shi et al, 2012)。目前,仅有一家 IGS 分析 中心 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)通过 CLK90、CLK91、CLK92 和 CLK93 数据流提供实时电离层 VTEC 产品。Nie et al (2019)对 2017-2018 年连 续 374 天的 CNES VTEC 产品进行精度评估,研究表明 CNES VTEC 产品与 IGS 事后 GIM(Global Ionospheric Map)产品的精度相当,两者差异在 1-2 TECU(Total Electron Content Units),采用 CNES VTEC 产品基于传统单频 PPP 模型可实现水 平亚米级,高程米级的定位精度。Liu et al (2018)将 CNES VTEC 产品作为外部 电离层约束引入非差非组合(Undifferenced and Uncombined)单频 RTPPP 模型, 可以实现水平方向优于 0.2 m,高程方向优于 0.4 m 的分米级精度定位。

1.3 研究目标及选题意义

随着 GNSS PPP 技术在移动端导航、工程测量、精准农业、地震预报、灾害 监测等领域的突出贡献, GNSS 用户不仅注重定位的高精度,而且更在意作业的 低成本和实时性。

北斗二号系统受区域监测网布站和卫星钟差稳定性不足等因素的影响,只能 提供优于 10 m 的定位精度,很难满足实时高精度定位用户的需求。为此,北斗 广域差分星基增强系统(SBAS)提出四重差分改正技术,借助卫星轨道改正数、 等效钟差改正数、格网电离层改正数和分区综合改正数,以 PPP 数据处理策略, 实现了北斗实时动态分米级精度定位。北斗 SBAS 系统将中国区域划分为 18 个 分区,每个分区的服务半径不超过 1000 km,在实际应用过程中,受系统端稳定 性不足或用户跨区域运动等因素的影响,定位中一直沿用的分区综合改正数会出 现短时中断或缺失的现象,导致定位跳变或重收敛,严重影响了实时动态定位的 连续性与稳定性。另一方面,北斗 SBAS 系统目前仅能提供 14 颗 BDS-2 卫星的 星基增强参数,在城市、山区等信号遮挡严重的区域,星座几何构型严重不良, 定位精度无法满足分米级要求,甚至会出现定位失败的情况。针对上述问题,本 文对北斗 SBAS PPP 技术进行了深入研究,在定位端提出相应解决方案,为我国

北斗广域差分系统的建设与改造提供了重要参考。

除了各国自建的广域差分星基增强系统,IGS 实时工作组于 2013 年开始向 用户免费提供 RTS 数据流,其中包括 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星的 实时轨道改正数、实时钟差改正数以及实时电离层 VTEC 信息。目前绝大部分研 充都集中在基于 RTS 数据流的实时双频 PPP 定位,对于实时单频 PPP 定位的研 究非常少,而双频接收机价格昂贵,用户作业成本很高,因此,高精度、低成本 的实时单频 PPP 技术成为近些年的研究热点。本文详细分析了三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 模型在观测值残差、定位精度和收敛速度上的差异,将 RTS CLK93 实时电离层产品作为外部约束施加在非差非组合单频 PPP 模型中,以期提高实 时单频 PPP 的定位性能,为单频用户提供更优质的解决方案。

1.4 主要研究内容

第一章介绍了各大 GNSS 系统的概况与特点、国内外实时高精度定位系统的研究现状以及本文的研究目标与选题意义。

第二章介绍了 GNSS 精密单点定位的基本原理与算法,包括单/双频定位模型、定位误差及改正方法、数据预处理策略和参数估计理论,同时,评估了 GPS 民用广播星历 CNAV 轨道、钟差及信号间偏差 ISC 参数的精度。

第三章介绍了北斗分区综合改正数的计算原理与流程,全面评估了单/双频、 动/静态模式下北斗分区综合改正数的定位性能。建立了北斗/GPS 组合分区综合 改正数定位模型,在双系统定位性能评估的基础上,分析了分区综合改正数服务 半径、播发频度对定位精度和收敛速度的影响。

第四章介绍了分区切换对北斗分区综合改正数定位性能的影响,提出一种基于分区切换的北斗 SBAS PPP 新算法,通过北斗监测站静态观测数据和车载动态测试验证了分区切换算法的有效性与正确性,保证了北斗实时动态分米级精度定位的连续性与稳定性。

第五章介绍了三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 定位模型,评估了 RTS CLK93 实时卫星轨道、实时卫星钟差和实时电离层产品的精度,采用 MGEX (Multi-GNSS Experiment)监测站静态观测数据和船载动态观测数据,深入分析了三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 模型在观测值残差、定位精度和收敛性上的差异。

第六章介绍了两种北斗实时电离层模型: BDS-Klobuchar 和 BDS 格网电离 层模型,同时引入 GPS-Klobuchar 和后处理 GIM 模型为参考,采用中国区域 MGEX 和 CMONOC 监测站多系统观测数据,全面评估并分析了四种电离层模 型在中国区域对 Multi-GNSS 单频 SPP 和 PPP 定位的影响。

第七章对论文进行了详细总结,并提出进一步的研究计划。

图 1.2 为本文各章节研究内容之间的关系,以 GNSS 精密单点定位理论与方法为基础,一方面针对北斗分区综合改正数定位性能进行全面评估,建立北斗/GPS 组合分区综合改正数定位模型,研究 GPS 引入后对北斗实时动态分米级精度定位性能的影响,并提出基于分区切换的北斗 SBAS PPP 新算法,进一步保证北斗实时动态定位的连续性和稳定性。另一方面,基于 RTS 实时数据流产品,深入分析三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 定位模型的性能差异,同时对两种北斗实时电离层模型和两种传统全球电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频 SPP 和 PPP 定位性能的影响进行分析。此外,还对 GPS 民用广播星历 CNAV 轨道、钟差及 ISC 参数的精度进行评估。



图 1.2 各章节研究内容之间的关系

第2章 GNSS 精密单点定位基本原理与算法

本节将从 PPP 定位模型、各项误差改正、参数估计方法、数据预处理等方面 进行详细阐述与总结,为后续多系统 GNSS 实时高精度单点定位的相关研究奠定 理论基础。

2.1 精密单点定位模型

2.1.1 GNSS 原始观测模型

GNSS 观测值主要有两类:测码伪距(Code) *P* 和载波相位(Carrier Phase) *L*,其原始观测方程可表示为(Hoffmann-Wellenhof et al, 1992; Li et al, 2015; Zhou et al, 2019):

$$\begin{cases} P_{r,j}^{S} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (d\overline{t_{r}} - d\overline{t^{S}}) + T_{r}^{S} + \mu_{j}^{S} \cdot I_{r,1}^{S} + (B_{r,j} - b_{j}^{S}) + \varepsilon_{P_{j}} \\ L_{r,j}^{S} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (d\overline{t_{r}} - d\overline{t^{S}}) + T_{r}^{S} - \mu_{j}^{S} \cdot I_{r,1}^{S} + \lambda_{j}^{S} \cdot \overline{N_{j}^{S}} + (D_{r,j} - d_{j}^{S}) + \varepsilon_{L_{j}} \end{cases}$$
(2.1)

上式中,上标*S*表示 GNSS 系统,本文用 G、R、C、E 分别表示 GPS、GLONASS、 BDS 和 Galileo 系统;下标 r 和 j (j=1,2)分别表示接收机编号和观测值频率; ρ_r^s 为卫星与接收机间的几何距离,单位 m; c为真空中的光速,单位 m/s; $d\bar{t}_r$ 和 $d\bar{t}^s$ 分别表示真实的接收机钟差和卫星钟差,单位 s; T_r^s 为斜路径对流层延迟 误差,单位 m; μ_j^s 是与频率 f_j^s 相关的电离层延迟放大系数 ($\mu_j = (f_1^s / f_j^s)^2$); $I_{r,1}^s$ 为第一频点上斜路径电离层延迟误差,单位 m; N_j^s 为整周模糊度,单位 cycle (周); λ_j^s 为频率对应的载波波长 ($\lambda_j^s = c / f_j^s$),单位 m/cycle; $B_{r,j}$ 和 b_j^s 分别为 接收机端和卫星端的伪距硬件延迟,单位 m; $D_{r,j}$ 和 d_j^s 分别为接收机端和卫星端 的相位硬件延迟,单位 m; ε_{P_j} 和 ε_{L_j} 分别为伪距和相位的观测噪声,主要包含多 路径效应和其它未模型化误差,单位 m。除此之外,GNSS 观测方程中涉及到的 卫星端和接收机端天线相位中心改正、相对论效应改正、潮汐负荷改正(固体潮、 海潮和极潮)、卫星天线相位缠绕改正等都已事先通过相应模型进行改正。

由于真实的钟差与硬件延迟线性相关,故在未添加外部基准约束的情况下两 者无法直接分离,定位时通常将其合并为一个钟差参数,即:

$$dt_{r,P} = dt_{r} + B_{r,j}, \quad dt^{S,P} = dt^{S} + b_{j}^{S}$$
(2.2)

$$dt_{r,L} = d\overline{t_r} + D_{r,j}, \quad dt^{S,L} = d\overline{t^S} + d_j^S$$
(2.3)

上式中 $dt_{r,p}$ 和 $dt^{s,p}$ 分别是"伪"接收机伪距钟差和"伪"卫星伪距钟差, $dt_{r,L}$ 和 $dt^{s,L}$ 分别为"伪"接收机相位钟差和"伪"卫星相位钟差,此时,式(2.1)中的 载波相位模糊度 $\overline{N_{i}^{s}}$ 仍具有整周特性。

在采用钟差去耦模型(Decoupled Clock Model)固定非差模糊度时即假设伪 距和载波相位具有不同的钟差,载波相位模糊度不受伪距硬件延迟的影响 (Collins et al, 2008),但在传统 PPP 模型中,通常将伪距钟差和相位钟差视为 一致,故式(2.1)可改写为:

$$\begin{cases} P_{r,j}^{S} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (dt_{r} - dt^{S}) + T_{r}^{S} + \mu_{j}^{S} \cdot I_{r,1}^{S} + \varepsilon_{P_{j}} \\ L_{r,j}^{S} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (dt_{r} - dt^{S}) + T_{r}^{S} - \mu_{j}^{S} \cdot I_{r,1}^{S} + \lambda_{j}^{S} \cdot N_{j}^{S} + \varepsilon_{L_{j}} \end{cases}$$
(2.4)

其中:

$$\begin{cases} dt_r = d\overline{t_r} + B_{r,j} \\ dt^s = d\overline{t^s} + b_j^s \end{cases}$$
(2.5)

$$\lambda_j^S \cdot N_j^S = \lambda_j^S \cdot \overline{N_j^S} + (D_{r,j} - d_j^S) - (B_{r,j} - b_j^S)$$
(2.6)

上式中*dt*, 和*dt^s*分别为统一后的接收机钟差和卫星钟差, 值得注意的是, 新的载 波相位模糊度 N^s_j 因包含了接收机端和卫星端的伪距/相位硬件延迟, 已不再具备 整周特性。

2.1.2 双频无电离层组合模型

双频无电离层组合(Dual-Frequency Ionosphere-Free, DF-IF)模型因能消除 电离层误差一阶项(占总误差量的 99%以上)而在 PPP 领域被广泛使用 (Hoffmann-Wellenhof et al, 1992; Kouba et al, 2001),以 f_1 和 f_2 频点为例,其 观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_{IF} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_r^S + c \cdot (dt_{r,IF} - dt_{IF}^S) + T_r^S + \varepsilon_{P_{IF}} \\ L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_r^S + c \cdot (dt_{r,IF} - dt_{IF}^S) + T_r^S + \lambda_{IF}^S \cdot N_{IF}^S + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases}$$
(2.7)

其中:

$$\begin{cases} dt_{r,IF} = d\overline{t_r} + B_{r,IF} = d\overline{t_r} + \frac{f_1^2 B_{r,1} - f_2^2 B_{r,2}}{f_1^2 - f_2^2} \\ dt_{IF}^S = d\overline{t^S} + b_{IF}^S = d\overline{t^S} + \frac{f_1^2 b_1^S - f_2^2 b_2^S}{f_1^2 - f_2^2} \end{cases}$$
(2.8)

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

2.1.3 单频无电离层组合模型

根据式(2.1)可知,在伪距和相位观测值中电离层延迟误差的大小相等、方向相反,因此可通过伪距相位观测值求和再取平均的方式建立单频无电离层组合(Single-Frequency Ionosphere-Free, SF-IF)模型,又称为GRAPHIC(Group And PHase Ionospheric Correction)半和法模型,该模型广泛应用于单频精密定位与定轨中(Yunck, 1993; Montenbruck, 2003),其观测方程可表示为:

$$\frac{P_j + L_j}{2} = \rho_r^S + c \cdot (dt_r - dt^S) + T_r^S + \frac{\lambda_j^S \cdot N_j^S}{2} + \frac{\varepsilon_{P_j} + \varepsilon_{L_j}}{2}$$
(2.9)

半和法模型的优势是消除了电离层延迟误差对单频 PPP 的影响,但载波相 位观测值的观测噪声被明显放大,这将对 PPP 的收敛速度产生一定的负面影响 (Cai et al, 2013)。

2.1.4 非差非组合模型

上述双频无电离层组合模型和 GRAPHIC 半和法模型虽然通过观测值的线 性组合消除了电离层延迟误差对定位的影响,但同时也放大了观测噪声并丢失了 重要的电离层信息,使得无电离层组合模型在当前多频多模 GNSS 数据处理及电 离层建模中很难被应用。非差非组合模型作为一种统一的 GNSS 数据处理模型, 适用于任何 GNSS 系统的任何频率的观测值(张宝成,2010;张小红,2013;李 博峰,2015; Lou et al, 2016; Zhou et al, 2019),其单/双频观测方程可表示为:

$$\begin{cases}
P_{1} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (dt_{r} - dt^{S}) + T_{r}^{S} + I_{r,1}^{S} + \varepsilon_{P_{1}} \\
P_{2} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (dt_{r} - dt^{S}) + T_{r}^{S} + \mu_{2}^{S} \cdot I_{r,1}^{S} + \varepsilon_{P_{2}} \\
L_{1} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (dt_{r} - dt^{S}) + T_{r}^{S} - I_{r,1}^{S} + \lambda_{1}^{S} \cdot N_{1}^{S} + \varepsilon_{L_{1}} \\
L_{2} = \rho_{r}^{S} + c \cdot (dt_{r} - dt^{S}) + T_{r}^{S} - \mu_{2}^{S} \cdot I_{r,1}^{S} + \lambda_{2}^{S} \cdot N_{2}^{S} + \varepsilon_{L_{2}}
\end{cases}$$
(2.10)

上式中,各个符号的含义与式(2.1)保持一致。与式(2.7)和式(2.9)相比, 非差非组合模型在单、双频情况下都需要多估计一个电离层参数*I*^s_{r1}。

2.2 定位误差项及改正

相比于相对定位技术, PPP 这种机动灵活、不受作用距离限制的单站作业模 式有效降低了作业成本,但各种定位误差无法通过差分方式进行消除,因此想要 获得高精度定位结果,必须对各种误差项进行精细化处理。在 GNSS 信号的传播 过程中,各项误差大致可分为三类:

(1)与卫星端有关的误差,包括卫星轨道及钟差误差、卫星天线相位中心 偏差(Phase Center Offset, PCO)及相位中心变化(Phase Center Variation, PCV) 误差、卫星天线相位缠绕(Phase Windup)、相对论效应等。

(2) 与接收机端有关的误差,包括接收机钟差误差、接收机天线 PCO/PCV 误差、地球形变误差(固体潮、海潮、极潮)、观测噪声等

(3)与信号传播路径有关的误差,包括电离层延迟误差、对流层延迟误差、 多路径效应误差等。

2.2.1 卫星轨道及钟差误差

式(2.1)中接收机与卫星间的几何距离可表示为:

$$\rho_r^S = \sqrt{(X_r - X^S)^2 + (Y_r - Y^S)^2 + (Z_r - Z^S)^2}$$
(2.11)

上式中(X_r , Y_r , Z_r)和(X^s , Y^s , Z^s)分别为接收机和卫星在地心地固坐标系(Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF)中的坐标。由此可知,在进行单点定位前必须获取接收机的概略坐标和卫星的精确坐标,卫星坐标一般由星历计算而来,其计算值与真实值间的差异称为卫星轨道误差。此外,卫星上虽然搭载了精度极高的原子钟,但受钟速和钟漂的影响,其在实际运行中仍与国际原子时(International Atomic Time, TAI)存在微小差异,该差异即为卫星钟差,卫星钟差也可通过星历计算获得。

目前应用最广泛的星历主要有两类:精密星历和广播星历。精密星历包含精密钟差和精密轨道,精密钟差的更新频率为 30 s 或 5 min,其精度在 0.02-0.06 ns, 任意时刻的卫星钟差可通过线性或二次项内插获得。精密轨道的更新频率为 5 min 或 15 min,其直接给出卫星在 ECEF 中的坐标,任意时刻的卫星坐标可通 过 10 阶拉格朗日多项式内插法获得(李征航,2010),表 2.1 为 Montenbruck et al (2017)统计的各大 GNSS 系统精密轨道的精度,其中 R、A、C 和 3D 分别表 示卫星轨道在径向(Radial)、切向(Along-track)、法向(Cross-track)和三维综 合方向的误差。

GNSS 系统	R/cm	A/cm	C/cm	3D/cm
GPS	1-3	2-4	2-3	3-6
GLONASS	4-11	4-12	3-9	6-17
Galileo-IOV	6-10	10-18	9-20	16-29
Galileo-FOC	4-10	10-19	6-14	14-26
BDS-GEO	54	298	410	510
BDS-IGSO	11-23	24-39	17-23	32-51
BDS-MEO	3-11	10-21	6-10	12-26

表 2.1 GNSS 卫星精密星历的轨道精度

精密星历虽然具有很高的精度,但其为事后处理产品,一般滞后于星历日期 12-18 天才能获得,故无法满足实时定位用户的需求。为此,IGS 提供了广播星 历用于计算实时轨道与钟差,但其精度较低。对于 GPS、BDS 和 Galileo 系统, 其传统广播星历(Legacy Navigation Message, LNAV)包含了3个用于计算卫星 钟差的参数和16个用于计算卫星轨道的参数(见表 2.2);对于 GLONASS 系统, 其广播星历直接提供了卫星位置、速度和加速度项,用户可通过龙格库塔积分法 获得卫星坐标,上述各大 GNSS 系统根据广播星历计算卫星轨道与钟差的方法具 体可参考其官方 ICD 文件(ICD-GPS-240C, 2019; ICD-L1,L2-GLONASS, 2008; European GNSS (Galileo) OS-SIS-ICD, 2015; BDS-SIS-ICD, 2019)。以精密星历 为参考, Montenbruck et al (2015)评估了各大 GNSS 系统的广播星历精度,结 果见表 2.3,其中 T 表示卫星钟差误差,需要注意的是,BDS 卫星的结果仅针对 MEO 和 IGSO 卫星而言。

参数	含义
a_{f_0}	卫星钟差常数项, sec
a_{f_1}	卫星钟差漂移项, sec/sec
a_{f_2}	卫星钟差漂移速率, sec/sec ²
\sqrt{A}	半长轴平方根,m ^{1/2}
Δn	平近点角的长期变化率, rad/sec
t _{oe}	星历参考时刻(星期中的秒),sec
$M_{_0}$	参考时刻的平近点角,sec
е	扁心率
Ω_0	参考时刻升交点赤经,rad

表 2.2 LNAV 广播星历参数
i_0	参考时刻轨道倾角,rad
ω	近地点角距, rad
Ω	升交点赤经变化率, rad/sec
iDot	轨道倾角变化率, rad/sec
C_{rc}	轨道半径的余弦调和改正项,m
C_{rs}	轨道半径的正弦调和改正项,m
C_{uc}	纬度幅角的余弦调和改正项, sec
C_{us}	纬度幅角的正弦调和改正项, sec
C_{ic}	轨道倾角的余弦调和改正项, sec
C_{is}	轨道倾角的正弦调和改正项, sec

表 2.3 GNSS 卫星广播星历的轨道与钟差精度

GNSS 系统	R/cm	A/cm	C/cm	T/cm	
GPS	18	105	44	69	
GLONASS	35	241	133	190	
Galileo	63	265	229	162	
BDS	50	242	131	87	

上述广播星历的精度评估均基于 LNAV,其通过 L1C/A 码进行传输,随着 GPS 现代化的推进和发展,2010 年起基于 L2(L2C)和 L5(L5I5 和 L5Q5)波 段的新的导航信号被使用,与此同时,一种通过新波段进行传输的民用广播星历 (Civil Navigation Message, CNAV) 被提出,并于 2014 年 4 月 28 日开始提供服 务(Montenbruck et al, 2013b; Steigenberger et al, 2015)。与 LNAV 相比, CNAV 在编码机制、信息结构和参数设置上均有所不同,在卫星轨道计算方面新增了 2 个参数:半长轴变化率 A 和平近点角短期变化率 Δn_A ,基于 18 参数计算卫星坐 标的算法可参考文献 IS-GPS-705D(2014)和 Yin et al(2014)。此外,CNAV 还 增加 4 个 ISC(Inter-Signal Correction)参数来表示 L1C/A、L2C、L5I5 和 L5Q5 信号分别与 L1P(Y)信号间的差异。

为了对 GPS CNAV 广播星历的精度进行评定,并分析其与 LNAV 性能的差 异,选择 2016 年 1 月 1 日至 2018 年 3 月 3 日共约两年的 CNAV 和 LNAV 数据 进行处理,以 GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum)提供的 GBM 事后精密星 历为参考,按 5 min 采样间隔计算卫星轨道误差(R、A、C)和卫星钟差误差(T), 同时计算 R-T 和 SISRE 等指标。在进行广播星历与精密星历的比较时,需要注 意以下几点: (1)精密星历中卫星坐标基于协议地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF),而广播星历计算的卫星坐标处于 WGS-84 (World Geodetic System-84)坐标系,两种参考框架间的差异在 1-2 cm (Petit et al, 2010),由于广播星历的轨道精度较低,只能达到分米级,故在比较时两种参考框架间的差异可忽略不计;

(2)广播星历和精密星历都有各自的时间基准,在比较卫星钟差时需要消除两者钟差基准间的差异,一般是在每个历元扣除所有卫星广播星历钟差与精密 星历钟差差异的平均值(Montenbruck et al, 2015),但该方法易受粗差的影响导 致其偏离真实的基准差异,故本文采用广播星历钟差与精密星历钟差差异的中位 数作为基准进行扣除(张益泽, 2016);

(3)精密星历基于卫星质心(Center-of-Mass, CoM),而广播星历基于卫星 天线相位中心(Antenna Phase Center, APC),故在轨道比较时需要进行卫星端 PCO改正。值得注意的是,精密星历采用的PCO值来自于 igs.atx 文件,而广播 星历采用的PCO值由制造卫星的厂家标定,两种PCO值间的差异会被卫星钟差 所吸收,故在卫星钟差比较时必须扣除两者之间的差异,表 2.4 为 Montenbruck et al (2015)计算的 GPS 广播星历的 PCO 值。

GPS	X/m	Y/m	Z/m
Block II A	+0.279	0.000	+0.920
Block II R-A	0.000	0.000	+1.610
Block II R-B/M	0.000	0.000	-0.040
Block II F	+0.394	0.000	+1.160

表 2.4 GPS 广播星历中采用的 PCO 值

经过上述三步处理后的广播星历的轨道误差(Δ*X*,Δ*Y*,Δ*Z*)为 ECEF 中的坐标, 还需根据每个历元卫星的状态向量计算旋转矩阵(杨赛男,2015),将其转换至 卫星轨道坐标系,获得其在径向(R)、切向(A)和法向(C)分量上的误差。 为了反映广播星历的整体精度,可通过计算 SISRE 和 SISRE (orb)进行评估, 其计算公式为:

SISRE =
$$\sqrt{(\alpha \cdot R - T)^2 + \beta \cdot (A^2 + C^2)}$$
 (2.12)

$$SISRE(orb) = \sqrt{(\alpha \cdot R)^2 + \beta \cdot (A^2 + C^2)}$$
(2.13)

上式中α和β分别为广播星历误差在不同分量上的投影系数,其值见表 2.5,可以看出, R-T 作为轨道径向误差和钟差误差的合成误差在 SISRE 中起主要作用,且能反映卫星空间测距误差的方向,而 SISRE (orb)主要反映了不同方向轨 道误差的综合误差。此外,对超过 15 m 的 SISRE 值将被视为粗差进行剔除。

表 2.5 不同 GNSS 系统 SISRE 的投影系数						
_	投影系数	GPS	GLONASS	Galileo	BDS- GEO/IGSO	BDS-MEO
	α	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98
	β	1/49	1/45	1/61	1/126	1/54

由于 CNAV 是通过新的 L2 和 L5 信号进行播发,故在测试期间仅有 19 颗 GPS 卫星可利用,图 2.1 显示了测试期间每颗卫星 CNAV 和 LNAV 广播星历误 差在不同分量上的 RMS 值, 横坐标为卫星编号, 用 SVN(Space Vehicle Number) 和与之对应的 PRN (Pseudo Random Noise) 号进行标识,图中黑色虚线左侧为 Block IIR-M 卫星, 右侧为 Block IIF 卫星。表 2.6 统计了这两类卫星 CNAV 和 LNAV 广播星历误差在不同分量上的平均 RMS 值及其平均空间信号精度,其中 第 4-5 列中括号内的值为剔除 SVN G65 和 G72 卫星后的统计结果。从图 2.1 和 表 2.6 可以看出, CNAV 轨道的径向误差略小于 LNAV, 但其切向误差明显更大, 这主要与 CNAV 中新增的两个轨道参数有关, 该现象也出现在 Steigenberger et al (2015)的研究中。对于卫星钟差误差, CNAV 和 LNAV 的精度基本一致, 大部 分卫星的钟差精度可优于 0.3 m, 但个别卫星如 SVN G65 和 G72 卫星由于搭载 了铯原子钟导使其钟差精度分别高达 1.29 m 和 0.98 m, 当剔除这两颗卫星后, Block IIF 卫星的钟差精度将从 0.41 m 降至 0.26 m,将明显优于 Block IIR-M 卫 星的 0.42 m。在卫星轨道综合误差的评估中,由于 CNAV 轨道的切向误差更大, 使得 CNAV 的 SISRE (orb) 精度略低于 LNAV, 但两者的 RMS 值都优于 0.3 m; 对于 SISRE, CNAV 和 LNAV 的精度基本一致,其 RMS 值可达到 0.5 m,该精 度相比于 Steigenberger et al (2015) 评估的 0.6 m (2014-2015 年期间) 提高了约 16.7%,这也说明目前 GPS 广播星历的精度已处于分米量级(Wang et al, 2017; 2019b)。

17



图 2.1 GPS CNAV 与 LNAV 广播星历误差的比较(2016-01-01 至 2018-03-03)

识差公昌	Block IIR-M/m		Block IIF/m		ALL/m	
庆左万里 -	LNAV	CNAV	LNAV	CNAV	LNAV	CNAV
R	0.14	0.13	0.21(0.20)	0.19(0.18)	0.18	0.17
А	1.13	1.65	1.08(1.04)	1.48(1.45)	1.10	1.54
С	0.46	0.45	0.41(0.41)	0.42(0.42)	0.43	0.43
Т	0.42	0.42	0.42(0.28)	0.41(0.26)	0.42	0.41
R-T	0.43	0.42	0.49(0.36)	0.46(0.33)	0.47	0.45
SISRE (orb)	0.23	0.28	0.26(0.25)	0.29(0.28)	0.25	0.28
SISRE	0.46	0.49	0.52(0.39)	0.52(0.39)	0.50	0.51

表 2.6 GPS CNAV 与 LNAV 广播星历误差及空间信号精度统计

2.2.2 电离层延迟误差

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

$$I = 40.28 \cdot 10^{16} \cdot STEC / f^2 \tag{2.14}$$

上式中 *f* 为信号频率, *STEC* 为信号传播路径上总电子含量。可以看出, 电离层 延迟的大小主要与信号频率和电离层中电子密度有关, 此外, 电离层延迟对伪距 和相位观测值的影响正好相反。一些研究表明在白天时电离层延迟误差较大, 晚 上的影响较小, 当在太阳活跃期, GNSS 信号穿过电离层而引起的延迟最大可到

100 m (Liu et al, 2016).

对于 GNSS 双频用户,一般可利用不同频率观测值的线性组合来消除电离层 延迟误差的一阶项,其占总误差的 99%以上,而二阶项误差仅为数毫米,故在大 多数情况下可忽略不计(Morton, 2009)。对于单频用户,电离层延迟误差将成 为单点定位中最大的误差源之一,因此需要采用外部电离层模型进行改正,常用 的电离层模型如下:

(1)Klobuchar 模型。该模型由 8 个参数组成,可通过广播电文播发给用户, 是一种被广泛使用的实时预报模型,虽然具有结构简单易于计算的优点,但该模 型对电离层延迟误差的改正效果仅为 50%左右,很难满足高精度单频用户的需求

(Klobuchar, 1987; Feess et al, 1987).

(2) BDS Klobuchar 模型。该模型是一种改进的 Klobuchar 模型,由中国区 域地面监测网计算生成,通过北斗广播电文对 8 参数进行播发,主要服务于 BDS 用户。相比于 5-10 天更新一次的传统 Klobuchar 模型,BDS Klobuchar 模型的参 数每 2 h 更新一次,长期的数据分析表明其在中国区域对电离层延迟误差的改正 效果可优于 60% (Wu et al, 2013)。

(3) BDS 电离层格网模型。为了满足北斗实时高精度定位用户的需求, BDS SBAS 系统提供一种实时区域电离层格网模型,该模型以 6 min 更新频率向授权 用户播发 320 个格网点(IGP)的垂直电离层延迟误差,用户根据临近的 3-4 个 IGP 采用内插法即可获得穿刺点(Ionospheric Pierce Point, IPP)的电离层延迟误差。电离层格网的范围为北纬 7.5°至 55°和东经 70°至 145°,格网点的采样间隔为 2.5°(纬度)和 5°(经度),可服务中国超过 95%的区域,用电离层格 网的精度优于 0.5 m (Wu et al, 2014)。

(4) GIM 模型。该模型是一种事后全球电离层格网模型,无法应用于实时 定位,主要由 JPL (Jet Propulsion Laboratory)和 CODE (Center for Orbit Determination in Europe)两家 IGS 分析中心提供,采用全球 IGS 参考站网的观 测数据计算而成,其产品为格网点的垂直总电子含量(VTEC),格网的范围为纬 度-87.5°至+87.5°和经度-180°至+180°,格网点的采样间隔为 2.5°(纬度) 和 5°(经度),所有格网点的 VTEC 每隔 2h 更新一次,利用该模型内插计算穿 刺点 VTEC 的方法可参考(Schaer et al, 1998)。大量研究表明,GIM 模型的全 球电离层改正精度在 2-8 TECU,换算为距离在天顶方向为 0.32-1.28 m(Jee et al, 2010; Cai et al, 2017)。

2.2.3 对流层延迟误差

对流层是大气最下层接近地表的一层,其质量占整个大气层的75%,包含了

几乎所有水蒸气和气溶胶。相对于电离层,GNSS 信号穿过对流层并不会发生色 散效应,即在传播路径上所有频点的信号受到对流层延迟的影响是相同的,因此 无法通过不同频率观测值线性组合的方式对对流层延迟误差进行消除。对流层延 迟可表示为:

$$T = M_{w}^{dry} \cdot ZHD + M_{w}^{wet} \cdot ZWD \tag{2.15}$$

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

由式(2.15)可知,对流层延迟主要由两部分组成,即干延迟和湿延迟。干 延迟主要由大气中的干燥气体引起,占对流层总延迟的90%左右,一般可通过先 验模型进行精确改正;湿延迟主要由水汽引起,因与水汽的密度分布高度相关, 故很难用模型精确表达,其大小约占对流层总延迟的10%,在 PPP 中常作为未 知参数进行估计,估计方法有随机游走过程和分段线性函数(王解先,2011;Yuan et al, 2014)。

早期的对流层延迟改正模型有 Hopfield 模型(Hopfield, 1969)、Saastamoinen 模型(Saastamoinen, 1972)、EGNOS 模型(Penna et al, 2001)以及 UNB 系列 模型(UNB1-UNB4)(Collins et al, 1997; Leandro et al, 2007),目前精度最高 应用最广泛的全球电离层模型为 GPT(Global Pressure and Temperature)模型, 其更新版本有 GPT2、GPT2w和 GPT3(Boehm et al, 2007; Kouba, 2009; Lagler et al, 2013; Bohm et al, 2015; Landskron et al, 2017),此外,还有区域对流层 延迟改正模型 SHAtropE(Shanghai Astronomical Observatory Tropospheric Delay Model-Extended),其 ZTD 的精度约 3.5 cm,在中国区域可优于 UNB3m 和 GPT3 模型(Chen et al, 2020)。对于映射函数,NMF(Niell, 1996)、GMF(Boehm et al, 2006)和 VMF1(Boehm et al, 2006b)的表达形式相似,在对流层延迟误差 的计算上差异很小。

2.2.4 天线相位中心改正

GNSS 接收机获取的观测值是接收机天线相位中心(APC)至卫星天线相位中心的距离,而 PPP 中采用的精密星历提供的卫星坐标基于卫星质心(CoM),两者之间存在差异,如图 2.2 所示。同理,接收机 APC 与其天线参考点(Antenna Reference Point, ARP)也不一致,故在 PPP 解算接收机坐标并归算至 ARP 的过程中需要对卫星端和接收端的 PCO 进行改正。值得注意的是,APC 并非是一个固定的点,它会随卫星高度角和方位角的变化而变化,因此,PCO 改正后的点其

实是平均相位中心(Mean Phase Center, MPC),为了获得每个历元真正的 APC,还需要进行 PCV 改正(Schmid, 2016)。

原则上,卫星端的天线相位中心偏差会在出厂前利用机器人进行标定,但在 复杂的太空环境下,卫星端的 PCO/PCV 会产生变化,因此 IGS 会定期发布 ANTEX(Antenna Exchange Format)文件对卫星和大部分 IGS 监测站的 PCO/PCV 重新进行标定,目前最新的文件为 igs14.atx。需要注意的是,不同 IGS 分析中心 对 BDS 卫星的 PCO 标定不同,CODE 采用 IGS 经验值(0.6 m, 0.0 m, 1.1 m), WHU(Wuhan University)使用自己计算的值(Guo et al, 2016),GFZ 采用 ESA 提供的值(Dilssner, 2014),因此,当 BDS 用户采用不同分析中心的精密产品实 施 PPP 时需要使用与之对应的 PCO 值。



图 2.2 天线相位中心改正示意图(王明华, 2020)

2.2.5 天线相位缠绕改正

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

$$\Delta \varphi = \operatorname{sign}(\boldsymbol{\zeta}) \cdot \operatorname{arccos}\left(\frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{D}}{|\mathbf{D}'| \cdot |\mathbf{D}|}\right)$$
(2.16)

$$\begin{cases} \boldsymbol{\zeta} = \overrightarrow{\mathbf{k}} \cdot (\overrightarrow{\mathbf{D}} \times \overrightarrow{\mathbf{D}}) \\ \mathbf{D} = \overrightarrow{\mathbf{a}} - \overrightarrow{\mathbf{k}} (\overrightarrow{\mathbf{k}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{a}}) - \overrightarrow{\mathbf{k}} \times \overrightarrow{\mathbf{b}} \\ \mathbf{D} = \overrightarrow{\mathbf{a}} - \overrightarrow{\mathbf{k}} (\overrightarrow{\mathbf{k}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{a}}) - \overrightarrow{\mathbf{k}} \times \overrightarrow{\mathbf{b}} \end{cases}$$
(2. 17)
$$\begin{aligned} \mathbf{D} = \overrightarrow{\mathbf{a}} - \overrightarrow{\mathbf{k}} (\overrightarrow{\mathbf{k}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{a}}) - \overrightarrow{\mathbf{k}} \times \overrightarrow{\mathbf{b}} \\ \begin{cases} \overrightarrow{\mathbf{i}} = \overrightarrow{\mathbf{j}} \times \overrightarrow{\mathbf{k}} \\ \overrightarrow{\mathbf{j}} = \overrightarrow{\mathbf{k}} \times \overrightarrow{\mathbf{u}}_{e} \end{cases}$$
(2. 18)

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

从式(2.16)至(2.18)可以看出,天线相位缠绕与卫星和接收机的相对位 置都有关,因此,在零偏状态下的 BDS 卫星可不改正相位缠绕误差,因为其对 于静态接收机始终不变,可被相位模糊度完全吸收(张益泽,2017)。

2.2.6 TGD/DCB 改正

由式(2.1)至(2.3)可知,若以L1频点的"伪"卫星钟差为基准,则L2 频点的"伪"卫星钟差可表示为:

$$dt_2^S = dt_1^S + (b_2^S - b_1^S) = dt_1^S + DCB_{12}^S$$
(2.19)

上式中, *DCB*^s₁₂为卫星端 L1L2 频点间的伪距硬件延迟,称为 DCB (Differential Code Bias)。同理可得,双频无电离层组合的"伪"卫星钟差为:

$$dt_{IF}^{s} = \frac{f_{1}^{2} \cdot dt_{1}^{s} - f_{2}^{2} \cdot dt_{2}^{s}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}}$$

$$= \frac{f_{1}^{2} \cdot dt_{1}^{s} - f_{2}^{2} \cdot (dt_{1}^{s} + DCB_{12}^{s})}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}}$$

$$= dt_{1}^{s} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \cdot DCB_{12}^{s}$$

(2.20)

对于 GPS 系统,上式中右侧第二项称为 TGD (Time Group Delay),即:

$$TGD = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot DCB_{12}^s$$
(2.21)

由于 GPS 广播星历中提供的卫星钟差是基于 L1L2 双频无电离层组合的钟差,故其单频 L1、L2 的卫星钟差为:

$$\begin{cases} dt_1^S = dt_{IF}^S - TGD = dt_{IF}^S + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot DCB_{12}^S \\ dt_2^S = dt_{IF}^S - \frac{f_1^2}{f_2^2} \cdot TGD = dt_{IF}^S + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot DCB_{12}^S \end{cases}$$
(2.22)

GLONASS 广播星历的卫星钟差也是基于 L1L2 双频无电离层组合,但至今 并未给出 TGD 信息(ICD-L1,L2-GLONASS, 2008); Galileo 系统共播发 F/NAV 和 I/NAV 两种广播星历,其中 F/NAV 的卫星钟差基于 E1E5a 组合,I/NAV 广播 星历的卫星钟差基于 E1E5b 组合,每种广播星历都提供对应的 TGD 参数,其用 法与式(2.22)类似(European GNSS (Galileo) OS-SIS-ICD, 2015)。

与上述各系统均不同, BDS 广播星历的卫星钟差基于 B3 频点, 其 B1、B2 频点与 B3 频点间的伪距硬件延迟可表示为:

$$\begin{cases} TGD_1 = b_1^S - b_3^S = -DCB_{13}^S \\ TGD_2 = b_2^S - b_3^S = -DCB_{23}^S = (DCB_{12}^S - DCB_{13}^S) \end{cases}$$
(2.23)

通过换算, BDS 单、双频卫星钟差可表示为:

$$\begin{cases} dt_1^S = dt_3^S - TGD_1 \\ dt_2^S = dt_3^S - TGD_2 \end{cases}$$
(2.24)

$$\begin{cases} dt_{12}^{s} = dt_{3}^{s} - \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} TGD_{1} + \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} TGD_{2} \\ dt_{13}^{s} = dt_{3}^{s} - \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{3}^{2}} TGD_{1} \\ dt_{23}^{s} = dt_{3}^{s} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{2}^{2} - f_{3}^{2}} TGD_{2} \end{cases}$$

$$(2.25)$$

PPP 中使用的精密钟差都是基于双频无电离层组合,其中 GPS 和 GLONASS 采用 L1L2 频点,Galileo 采用 E1E5a 频点,BDS-2 采用 B1B2 频点,BDS-3 采用 B1B3 频点。与此同时,IGS 各分析中心还提供事后解算的高精度 DCB 产品,对于单频和非 L1L2 基准频点组合的 PPP 用户,其卫星钟差的转换关系如下:

$$\begin{cases} dt_{1}^{s} = dt_{IF}^{s} + \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} DCB_{12}^{s} \\ dt_{2}^{s} = dt_{IF}^{s} + \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} DCB_{12}^{s} \\ dt_{3}^{s} = dt_{IF}^{s} - \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} DCB_{13}^{s} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} (DCB_{12}^{s} - DCB_{13}^{s}) \end{cases}$$

$$(2.26)$$

$$\begin{cases} dt_{13}^{S} = dt_{IF}^{S} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} DCB_{13} - \frac{f_{3}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{3}^{2}} (DCB_{12} - DCB_{13}) \\ dt_{23}^{S} = dt_{IF}^{S} - (\frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} + \frac{f_{2}^{2}}{f_{2}^{2} - f_{3}^{2}}) DCB_{13} - \frac{f_{3}^{2}}{f_{2}^{2} - f_{3}^{2}} (DCB_{12} - DCB_{13}) \end{cases}$$

$$(2.27)$$

对于 GPS 民用广播星历 CNAV 播发的 4 个 ISC 参数,其本质也是不同频点 间的伪距硬件延迟,表 2.7 给出了 ISC 参数与不同 IGS 分析中心提供的 DCB 产 品之间的转换关系(Steigenberger et al, 2015)。

CNAV ISC	DLR	CODE
ISC _{L1C/A}	$-DCB_{C1C-C1W}$	DCB_{P1-C1}
ISC _{L2C}	$-DCB_{C2W-C2S} + DCB_{C1W-C2W}$	$DCB_{P2-C2} + DCB_{P1-P2}$
ISC _{L515}	/	/
ISC _{L5Q5}	$-DCB_{C1C-C5Q} - DCB_{C1C-C1W}$	/

表 2.7 ISC 与 DCB 之间的转换关系

为了评估 CNAV 中 TGD 和 ISC 参数的精度,选择 2016 年 1 月 1 日至 2018 年 3 月 3 日的数据进行处理,由于 DLR(Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrtn) 和 CODE 提供的事后 DCB 产品精度在 0.1-0.2 ns (Montenbruck et al, 2014; Wang et al, 2016),故可作为本次评估的参考值。需要说明的是,TGD、ISC 和 DCB 参数在解算时卫星端和接收机端的硬件延迟是相关的,因此必须引入一个参考基 准才能对两者进行分离。DLR 和 CODE 计算 DCB 时采用"零均值"基准约束, 即单个系统内所有卫星的 DCB 之和为 0,而 CNAV 中 TGD 和 ISC 参数的计算 采用某台经过硬件延迟标定的 NAG (National Geospatial-Intelligence Agency)监 测站作为参考基准,故两种产品比较前必须将不同的参考基准转换至统一的参考 基准才能消除系统误差,具体的基准转换方法可参考文献(王宁波, 2016)。

图 2.3 为测试期间各颗卫星 TGD、ISCLIC/A、ISCL2C 和 ISCL5Q5 参数相对于 DLR 和 CODE 事后 DCB 产品的平均偏差及 STD,其中 STD 用误差棒表示。表 2.8 对 TGD 和各类 ISC 参数的均值变化及 RMS 误差进行统计。由于测试期间还 没有 GNSS 接收机可以接收 L5I5 信号,且 DLR 和 CODE 无法提供对应频点的 DCB 产品,故本文未对 ISCL5I5 参数的精度做出评估。从图 2.3 和表 2.8 可以看 出,CNAV-TGD 参数相对于 DLR-DCB 产品的平均偏差明显大于 CODE-DCB 产 品,其均值变化在(-0.46 ns~0.50 ns),精度约 0.4 ns,这主要是由于 DLR-DCB 产品为单天解,而 CODE-DCB 产品为月均值解,其精度更高且更稳定。对于 ISCLIC/A 参数,CNAV 相对于 DLR 和 CODE 产品的精度基本相当,其均值误差 最大不超过 0.14 ns,精度均优于 0.1 ns; ISCL2C 参数的精度特点与 CNAV-TGD 参 数类似,其相比于 CODE-DCB 产品的精度明显高于 DLR-DCB 产品。由于 CODE 无法提供对应于 ISC_{L5Q5} 参数的 DCB 产品,故本文仅比较了 ISC_{L5Q5} 参数与 DLR-DCB 产品的差异,其均值变化范围在(-0.27 ns~0.41 ns),精度约 0.34 ns。整体 而言,ISC_{L1C/A} 参数精度最高,可优于 0.1 ns, ISC_{L2C} 和 ISC_{L5Q5} 参数精度次之, 但都优于 0.4 ns (Wang et al, 2019b)。





图 2.3 CNAV 中 TGD 和 ISC 参数相对于 DLR 和 CODE 事后 DCB 产品的平均偏差及 STD

TYPE	CNAV-D	LR/ns	CNAV-CODE/ns	
	Variation	RMS	Variation	RMS
TGD	$-0.46\sim0.50$	0.40	$-0.26\sim 0.29$	0.21
ISC _{L1C/A}	$\textbf{-0.09} \sim 0.10$	0.07	$\textbf{-0.10} \sim 0.14$	0.08
ISC _{L2C}	$-0.55\sim0.79$	0.40	$\textbf{-0.20} \sim 0.44$	0.23
ISC _{L5Q5}	$-0.27 \sim 0.41$	0.34	—	—

表 2.8 CNAV 中 TGD 和 ISC 参数精度统计

2.2.7 相对论效应改正

GNSS 卫星一般在距离地面 2-3 万公里的高空以约 4 km/s 的速度绕地球运行,根据爱因斯坦狭义相对论原理,高速运动的卫星上搭载的原子钟比地面原子钟每天变慢约 7000 ns;根据广义相对论原理,卫星上原子钟距离地球较远,其所受地球质量引起的时空弯曲度较小,因此,卫星钟比地面钟每天快约 45000 ns。综合考虑广义与狭义相对论可知,GNSS 卫星钟比地面钟每天快约 38000 ns,换算为距离是 11.4 km,如此大的距离误差是 GNSS 定位所不能接受的。为此,GNSS 卫星的时钟基准频率从 10.23 MHz 人为调整至 10.2299999954326 MHz,这样一来,经过相对论效应的影响,地面接收机认为的卫星钟的频率刚好恢复至 10.23 MHz (王明华, 2020)。

在 GNSS 单点定位中,相对论效应改正可分为两类:距离相对论改正和钟差 相对论改正。

(1)距离相对论改正。由于 GNSS 信号在传播过程中受 Shapiro 延迟的影响,当经过一个大引力场时因时空弯曲度减小使信号速度变慢,故式(2.1)中计

算的星地间欧氏几何距离与真实值并不一致,为此需要进行距离相对论改正,其 改正公式如下(Ashby, 2003):

$$d_{Shapiro} = \frac{2\mu}{c^2} \cdot \ln(\frac{R_r + R^S + \rho_r^S}{R_r + R^S - \rho_r^S})$$
(2.28)

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

(2)钟差相对论改正。由于相对论效应的影响,相同的原子钟在地面和卫星上具有不同的钟速,其中常数部分与卫星轨道长半轴相关,可以在卫星出厂前人为校准,周期项部分与卫星轨道偏心率相关,用户必须在定位时实时改正。当卫星钟差采用精密星历时,其改正公式为(Ashby, 2003):

$$d_{rela} = -\frac{2}{c^2} \cdot \mathbf{r}^S \cdot \mathbf{v}^S \tag{2.29}$$

上式中, r^s和v^s分别为卫星坐标向量和卫星速度向量。

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

$$d_{rela} = -4.442807633 \times 10^{-10} \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k)$$
(2.30)

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

2.2.8 地球形变改正

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

$$d_M = d_{M0} + d_{solid} + d_{ocean} + d_{pole}$$

$$(2.31)$$

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

(1)固体潮改正。固体潮是受太阳和月球的引力而造成的地球形变,主要 由与纬度相关的固定形变和与时间相关的半日及一日周期振幅形变组成,可用多 次多阶的 Love 数和 Shida 数的球谐函数表示(Gerard, 2010),其计算方法可参 考 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service)在其服务器 上提供的 DEHANTTIDEINEL.F 程序包 (ftp://tai.bipm.org//iers/conv2010/ chapter7/dehanttideinel/)。在中纬度地区,固体潮的形变最大能超过 10 cm,其对 精密单点定位的影响主要表现在高程方向,是必须考虑的一项误差改正(<u>张益泽</u>, 2017)。

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

(3) 极潮改正。极潮是由地球自转轴的偏移造成,其改正公式为:

$$\begin{cases} dN = -9 \cdot \cos 2\varphi((X_p - \overline{X_p}) \cdot \cos \lambda - (Y_p - \overline{Y_p}) \cdot \sin \lambda) \\ dE = 9 \cdot \sin \varphi((X_p - \overline{X_p}) \cdot \sin \lambda + (Y_p - \overline{Y_p}) \cdot \cos \lambda) \\ dU = -33 \cdot \sin 2\varphi((X_p - \overline{X_p}) \cdot \cos \lambda - (Y_p - \overline{Y_p}) \cdot \sin \lambda) \end{cases}$$
(2.32)

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

由式(2.32)可知,极潮改正主要与接收机位置和极移有关,其周期呈现出 季节性和钱德勒周期性,最大变化可达0.8s,换算为距离约2.4cm。对于24h以 内或更短时间的静态精密单点定位,由于极潮变化非常小且大部分可被接收机钟 差吸收,故此改正可忽略不计(张益泽,2017)。

2.3 数据预处理

在 PPP 参数估计前,对观测数据进行预处理是非常关键的一步,由于 GNSS 信号的中断或失锁,载波相位观测值会不时地发生周跳,而周跳对实时 PPP 定位的连续性有严重影响,因此必须采用合理有效的周跳探测方法对相位观测值进行质量控制。由式(2.1)可知, PPP 观测模型中未模型化误差主要包含观测噪声和多路径效应,其中观测噪声通常为波长的 1%,故伪距观测噪声约为 0.3 m,相位观测噪声约为 0.003 m。根据多路径效应理论,载波相位观测值的多路径误差最大不超过波长的 1/4,通常都小于 1 cm,而伪距观测值的多路径误差更大,其值在 1-5 m (董大南, 2018; 王明华, 2020)。为了减小伪距观测噪声和多路径效应误差对 PPP 定位的影响,可采用高精度相位观测值对伪距进行平滑,以提高伪距观测值的质量。本节将对 PPP 数据预处理中常用的实时单、双频周跳探测方法和

实时相位平滑伪距方法进行归纳与总结。

2.3.1 双频周跳探测

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

(1) GF 组合周跳探测法。根据式(2.1) 可建立 GF 组合为:

$$\begin{cases} P_{GF} = P_2 - P_1 = (\mu_2^S - \mu_1^S) \cdot I_{r,1}^S - B_{r,12} + b_{12}^S + \varepsilon_{P_{GF}} \\ L_{GF} = L_1 - L_2 = (\mu_2^S - \mu_1^S) \cdot I_{r,1}^S + (\lambda_1^S \cdot \overline{N_1^S} - \lambda_2^S \cdot \overline{N_2^S}) + D_{r,12} - d_{12}^S + \varepsilon_{L_{GF}} \end{cases}$$
(2.33)

上式中, P_{GF} 和 L_{GF} 为电离层残差观测值, $B_{r,12}$ 和 $D_{r,12}$ 为L1和L2频点间接收机 端硬件延迟差异, b_{12}^{s} 和 d_{12}^{s} 为L1和L2频点间卫星端硬件延迟差异, $\varepsilon_{P_{GF}}$ 和 $\varepsilon_{L_{GF}}$ 为GF组合后的伪距和相位观测噪声。

由式(2.33)可知,伪距 GF 组合了包含两个频点的电离层延迟差异、卫星端及接收机端硬件延迟差异和 GF 组合后的观测噪声,在此基础上,相位 GF 组合还包含了两个频点的模糊度差异。由于硬件延迟差异和观测噪声在历元间的变化量非常小可忽略不计,故在未发生周跳时,GF 组合的历元间变化量即为两个频点间电离层延迟差异的变化量。伪距 GF 组合中没有模糊度信息,其电离层延迟差异的变化量可被相位 GF 组合所利用。由于伪距 GF 组合后的观测噪声被放大到 42 cm,远大于载波相位观测值波长,为了减小其对周跳探测的影响,一般需对伪距 GF 组合值进行 N 阶多项式拟合,因此,GF 组合周跳探测量可表示为:

$$\Delta L_{GF} = L_{GF} - P_{fit} = \lambda_1^S \cdot \overline{N_1^S} - \lambda_2^S \cdot \overline{N_2^S}$$
(2. 34)

上式中, P_{μ} 为伪距 GF 组合 N 阶多项式拟合值。

GF 组合周跳的判别条件为:

$$\begin{cases} |\Delta L_{GF}(k) - \Delta L_{GF}(k-1)| > 6 \cdot (\lambda_2^S - \lambda_1^S) \\ |\Delta L_{GF}(k+1) - \Delta L_{GF}(k)| < 1 \cdot (\lambda_2^S - \lambda_1^S) \end{cases}$$
(2.35)

当相位 GF 组合同时满足式(2.35)中两式,即认为发生周跳;当仅满足式(2.35)中第一式,则认为是粗差。

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

$$P_{N} = \frac{f_{1}P_{1} + f_{2}P_{2}}{f_{1} + f_{2}}$$
(2.36)

相位宽巷组合可表示为:

$$L_{W} = \frac{f_{1}L_{1} - f_{2}L_{2}}{f_{1} - f_{2}}$$
(2.37)

将式(2.36)和(2.37)进行组合,即可得到MW组合的公式为:

$$L_{W} - P_{N} = \frac{c}{f_{1} - f_{2}} \cdot (\overline{N_{1}^{S}} - \overline{N_{2}^{S}}) + \frac{f_{1} \cdot (D_{r,1} - d_{1}^{S}) - f_{2} \cdot (D_{r,2} - d_{2}^{S})}{f_{1} - f_{2}} - \frac{f_{1} \cdot (B_{r,1} - b_{1}^{S}) + f_{2} \cdot (B_{r,2} - b_{2}^{S})}{f_{1} + f_{2}} + \varepsilon_{MW}$$

$$(2.38)$$

由式(2.38)可知, MW 组合消除了大部分定位误差,组合后的相位观测值 波长 *c* / (*f*₁ - *f*₂)较原始单频波长也大大增加,同时卫星端和接收机端的硬件延迟 差异基本稳定不变,故 MW 组合周跳探测量可表示为:

$$N_{MW} = N_1^S - N_2^S = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 - f_2}{c \cdot (f_1 + f_2)} \cdot (f_1 P_1 + f_2 P_2)$$
(2.39)

上式中 N_{MW} 为宽巷模糊度, Φ 为以周为单位的载波相位观测值。

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

$$\begin{cases} |N_{MW}^{mean}(k-1) - N_{MW}(k)| > 4\sigma \cdot (k-1) \\ |N_{MW}(k+1) - N_{MW}(k)| < 1 \end{cases}$$
(2.40)

上式中 *N_{MW}* 为前 k-1 个历元 MW 组合观测量的平均值, σ为前 k-1 个历元 MW 组合观测量的标准差。当 MW 组合同时满足式(2.40)中两式,即认为发生周跳; 当仅满足式(2.40)中第一式,则认为是粗差。

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

2.3.2 单频周跳探测

由于单频观测数据无法组成 GF 和 MW 组合,故无法采用 TurboEdit 法进行 周跳探测。较为常见的单频周跳探测方法有高次差法、多项式拟合法、小波分析 法、多普勒法、星地间差分法等。多项式拟合法中载波相位历元间的变化很难确 定是由周跳造成还是由接收机自身的运动造成,故仅适用于静态或匀速运动的接 收机定位(罗峰,2007)。为了消除运动状态对单频周跳探测的影响,通常采用 单频伪距相位做差的方法进行探测,其模型为:

$$L-P = 2 \cdot \mu_j^S \cdot I_{r,1}^S + \lambda_j^S \cdot \overline{N_j^S} - Q + \varepsilon_{LP}$$
(2. 41)

上式中,Q为伪距相位间硬件延迟的差异,其变化很小可忽略不计; ε_{LP} 为伪距相位组合后的观测噪声。

由式(2.41)可知,伪距相位组合主要包含了电离层延迟差异和模糊度信息, 在短期内,电离层延迟的变化较为稳定,因此可通过多项式拟合法对电离层延迟 误差进行预报。该方法的主要缺点是易受伪距观测噪声的影响,因此其在实时动 态定位中的成功率会降低,对于匀速运动或静态接收机,通常会在使用此方法的 基础上再结合多项式拟合法对单频观测值的周跳进行综合判断(张益泽,2017)。

2.3.3 双频相位平滑伪距

最经典的双频相位平滑伪距方法是 Hatch 滤波(Hatch, 1982),其公式可表达为:

$$\begin{cases} \overline{P_{IF}(t_{1})} = P_{IF}(t_{1}) \\ \overline{P_{IF}(t_{k})} = \frac{1}{k} \cdot P_{IF}(t_{k}) + (\frac{k-1}{k}) \cdot (\overline{P_{IF}(t_{k-1})} + L_{IF}(t_{k}) - L_{IF}(t_{k-1})) \end{cases}$$
(2.42)

Hatch 滤波实际上是采用算术平均数提取伪距观测值的低频成分,再利用时间差分的方法提取相位观测值的高频部分,从而达到减弱多路径效应对伪距观测值的影响(郭建锋,2008)。有文献指出,当 Hatch 滤波中相位平滑伪距的次数达到一定程度,其平滑后的伪距观测值精度与相位无电离层组合观测值的精度基本相当(常志巧,2015)。

针对单频观测值的相位平滑伪距, Wu et al (2012) 提出了一种 CNMC 算法, 该算法可实时减弱伪距观测值多路径效应误差。以 L1 频点的伪距观测值为例, 在未发生周跳的情况下,可用一个常数偏差 CBias₁统一表示卫星端和接收机端的 硬件延迟以及相位组合模糊度信息,通过计算该常数偏差即可获得伪距多路径误 差。

在初始时刻t₁,假设伪距多路径误差为0,常数偏差的初值即为:

$$CBias_{1}(t_{1}) = P_{1}(t_{1}) - L_{1}(t_{1}) - \frac{2f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}}(L_{1}(t_{1}) - L_{2}(t_{1}))$$
(2.43)

在未发生周跳的情况下,多历元数据累积的常数偏差计算公式为:

$$CBias_{1}(t_{k}) = CBias_{1}(t_{k-1}) + \frac{1}{k} \cdot [P_{1}(t_{k}) - L_{1}(t_{k}) - CBias_{1}(t_{k-1}) - \frac{2f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} (L_{1}(t_{k}) - L_{2}(t_{k}))]$$

$$(2.44)$$

多路径误差改正后的伪距观测值为:

$$\begin{cases} \overline{P_1(t_1)} = P_1(t_1) \\ \overline{P_1(t_k)} = L_1(t_k) + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_k) - L_2(t_k)) + CBias_1(t_k) \end{cases}$$
(2.45)

由式(2.45)可以看出,CNMC 算法对单频伪距观测值的平滑其实使用了双频相位观测值计算的电离层延迟信息,因此该方法并不是严格意义上的单频相位 平滑伪距方法。相关研究已证明 CNMC 算法与 Hatch 滤波在本质上是等价的, 两者的主要区别在于 Hatch 滤波仅能对双频无电离层组合伪距观测值进行平滑 (常志巧,2015)。

2.3.4 单频相位平滑伪距

由于伪距和相位观测值中电离层延迟的大小相等,方向相反,且在一定时期内电离层延迟的变化较为稳定,故可利用滑动时间窗口内历元间相位观测值的变化来对伪距观测值进行平滑,该方法即为 Divergene-Free Smoother 法,其仅采用单频观测数据即可实现,是真正意义上的单频相位平滑伪距方法(Sanz Subirana, 2013)。

以L1 频点的观测数据为例,其公式为:

$$\begin{cases} P_{1}(t_{1}) = P_{1}(t_{1}) \\ \overline{P_{1}(t_{k})} = \frac{1}{k} \cdot P_{1}(t_{k}) + (\frac{k-1}{k}) \cdot (\overline{P_{1}(t_{k-1})} + L_{1}(t_{k}) - L_{1}(t_{k-1})) \end{cases}$$
(2.46)

需要注意的是,滑动时间窗口的设置对 Divergence-Free Smoother 的平滑效 果影响很大,一般观测数据采样率越高,滑动窗口时间的设置越短。有研究表明, 当电离层延迟变化较为稳定时,300s 至 1800s 的滑动窗口的平滑效果基本相当; 当电离层延迟变化较大时,1800s 的平滑结果会出现发散现象,而 300s 的结果与 真实值更为接近(张益泽,2017)。

2.4 参数估计

2.4.1 函数模型与随机模型

(1) 伪距单点定位。在单点定位中,当接收机在某一历元观测到 4 颗及以 上卫星时即可完成伪距单点定位(SPP)。与精密单点定位(PPP)不同的是,SPP 中卫星轨道和钟差通常采用广播星历进行改正,广播星历中提供的 TGD 参数可 对卫星端硬件延迟进行改正,对流层延迟则直接使用模型进行改正,无需对湿延迟分量进行参数估计,因为这部分误差对于 SPP 这种米级精度定位技术可忽略。

以双频无电离层组合模型为例,参考式(2.7)中伪距观测方程,对同一历元 中 n 颗卫星建立定位模型,其对其进行线性化可得:

$$\begin{bmatrix} P_{IF,1} - \rho_1 - D_1 \\ \vdots \\ P_{IF,n} - \rho_n - D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_0 - X^{S,1}}{\rho_0} & \frac{Y_0 - Y^{S,1}}{\rho_0} & \frac{Z_0 - Z^{S,1}}{\rho_0} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X_0 - X^{S,n}}{\rho_0} & \frac{Y_0 - Y^{S,n}}{\rho_0} & \frac{Z_0 - Z^{S,n}}{\rho_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ c \cdot dt_r \end{bmatrix}$$
(2.47)

上式中, $D = c \cdot dt^{s} - T$; $[X_{0}, Y_{0}, Z_{0}]$ 为接收机概略坐标, $[X^{s}, Y^{s}, Z^{s}]$ 为卫星坐标; ρ_{0} 为接收机概略坐标与卫星间的几何距离; $[dX, dY, dZ, c \cdot dt_{r}]$ 为 SPP 中待估的 未知参数。

对式(2.47)进行平差计算后,可得接收机坐标为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix}$$
(2. 48)

值得注意的是,当接收机概略坐标与真实坐标间的差距过大(如超过 1000 m),需要对接收机坐标进行迭代运算,因为此时在坐标线性化时舍弃的二次项误 差太大,为了不进行迭代,一般采用 Bancroft 算法对接收机概略坐标进行计算, 其坐标误差通常在 100 m 以内(Bancroft, 1985)。

(2)精密单点定位。精密单点定位(PPP)最大的特点就是不仅使用伪距观测值,还使用了高精度载波相位观测值,因此需要对相位模糊度参数进行求解。此外,PPP的定位精度可达mm至cm级,故对流层延迟不能只使用模型进行改正,还需对天顶湿延迟分量进行参数估计。

以双频无电离层组合模型为例,参考式(2.7)的伪距/相位观测方程,并对 其进行线性化可得:

$$\begin{bmatrix} P_{IF,1} - \rho_{1} - D_{P,1} \\ L_{IF,1} - \rho_{1} - D_{L,1} \\ \vdots \\ P_{IF,n} - \rho_{n} - D_{L,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{0} - X^{S,1}}{\rho_{0}} & \frac{Y_{0} - Y^{S,1}}{\rho_{0}} & \frac{Z_{0} - Z^{S,1}}{\rho_{0}} & 1 & M_{w,1} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{X_{0} - X^{S,1}}{\rho_{0}} & \frac{Y_{0} - Y^{S,1}}{\rho_{0}} & \frac{Z_{0} - Z^{S,1}}{\rho_{0}} & 1 & M_{w,1} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{X_{0} - X^{S,n}}{\rho_{0}} & \frac{Y_{0} - Y^{S,n}}{\rho_{0}} & \frac{Z_{0} - Z^{S,n}}{\rho_{0}} & 1 & M_{w,n} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{X_{0} - X^{S,n}}{\rho_{0}} & \frac{Y_{0} - Y^{S,n}}{\rho_{0}} & \frac{Z_{0} - Z^{S,n}}{\rho_{0}} & 1 & M_{w,n} & 0 & \cdots & 0 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ c \cdot dt_{r} \\ ZWD \\ N_{1} \\ \vdots \\ N_{n} \end{bmatrix}$$
(2. 49)

上式中, M_w为对流层湿延迟的映射函数, *ZWD*为对流层天顶方向湿延迟改正参数, *N*为以 m 为单位的载波相位模糊度参数,其余符号的含义与式(2.47)相同。

对于 SPP 和 PPP, 其定位模型可统一简化为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{x} \tag{2.50}$$

上式中, *y* 为观测值残差, 即 OMC (Observation Minus Correction), *G* 为与接收 机概略坐标、卫星位置、对流层湿延迟映射函数相关的设计矩阵, *x* 为待估参数, 主要包括接收机坐标改正量、接收机钟差改正量、对流层延迟湿分量和相位模糊 度参数等。

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

$$\sigma^2 = \sigma_{orb}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{ion}^2 + \sigma_{trop}^2 + \sigma_{noise}^2$$
(2.51)

上式中, σ_{orb} 和 σ_{clk} 分别表示卫星轨道和钟差改正精度,对于不同 GNSS 系统的 广播星历和精密星历,其精度差异较大,具体可参考 2.2.1 小节; σ_{ion} 表示电离层 延迟改正精度,当采用双频或单频无电离层组合模型时,这一项可不用考虑; σ_{trop} 表示对流层延迟改正精度,在 SPP 中通常设置为经验值,而在 PPP 中由于湿延 迟分量被当做参数进行估算,故不考虑此项改正精度; σ_{noise} 表示观测值噪声的精 度,其中已包含多路径效应误差,在 PPP 解算中,对于 GPS 观测值,其伪距和 相位精度分别设置为 0.3 m 和 0.003 m。

为了简化式(2.51),可将观测方程噪声划分为与高度角相关和与高度角无关的两部分(Zhang et al, 2019):

$$\sigma^2 = \sigma_{SISRE}^2 + \sigma^2(Ele) = \sigma_{orb}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma^2(Ele)$$
(2.52)

$$\sigma(Ele) = (0.5 + \frac{0.5}{\sin(Ele)}) \cdot \sigma_0 \tag{2.53}$$

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

综上所述,与式(2.50)对应的随机模型可表示为:

$$\mathbf{W} = \frac{1}{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix}$$
(2.54)

上式中, W 为观测值权阵, R 为观测值的协方差阵。

2.4.2 最小二乘法

根据式(2.50)和(2.54)可得数学模型为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \mathbf{R} \tag{2.55}$$

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

根据最小二乘原理,可建立待估参数的法方程为:

$$(\mathbf{G}^{T}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{G}) \cdot \mathbf{\hat{x}} = \mathbf{G}^{T}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y}$$
(2.56)

式(2.56)的最小二乘最优无偏解为:

$$\begin{cases} \stackrel{\circ}{\mathbf{x}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \\ \mathbf{P} = (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \end{cases}$$
(2.57)

上式中,P为参数的协方差阵,因为是对称正定矩阵,故可用 Cholesky 分解法进行求逆。

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

$$\begin{cases} \mathbf{y}_1 = \mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_1, & \mathbf{R} \\ \mathbf{y}_2 = \mathbf{G}_2 \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_2, & \mathbf{R} \end{cases}$$
(2.58)

其参数解为:

$$\begin{cases} \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}} = [\mathbf{G}_{1}^{T} \mathbf{R}_{1}^{-1} \mathbf{G}_{1} + \mathbf{G}_{2}^{T} \mathbf{R}_{2}^{-1} \mathbf{G}_{2}]^{-1} \cdot [\mathbf{G}_{1}^{T} \mathbf{R}_{1}^{-1} \mathbf{y}_{1} + \mathbf{G}_{2}^{T} \mathbf{R}_{2}^{-1} \mathbf{y}_{2}] \\ \mathbf{P} = [\mathbf{G}_{1}^{T} \mathbf{R}_{1}^{-1} \mathbf{G}_{1} + \mathbf{G}_{2}^{T} \mathbf{R}_{2}^{-1} \mathbf{G}_{2}]^{-1} \end{cases}$$
(2.59)

其递归算法为:

$$\begin{cases} \overset{\wedge}{\mathbf{x}_{1}} = \mathbf{P}_{1} \cdot [\mathbf{G}_{1}^{T} \mathbf{R}_{1}^{-1} \mathbf{y}_{1}] \\ \mathbf{P}_{1} = [\mathbf{G}_{1}^{T} \mathbf{R}_{1}^{-1} \mathbf{G}_{1}]^{-1} \\ \overset{\wedge}{\mathbf{x}_{2}} = \mathbf{P}_{2} \cdot [\mathbf{G}_{1}^{T} \mathbf{R}_{1}^{-1} \mathbf{y}_{1} + \mathbf{G}_{2}^{T} \mathbf{R}_{2}^{-1} \mathbf{y}_{2}] \\ \mathbf{P}_{2} = [\mathbf{P}_{1}^{-1} + \mathbf{G}_{2}^{T} \mathbf{R}_{2}^{-1} \mathbf{G}_{2}]^{-1} \end{cases}$$
(2. 60)

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

2.4.3 Kalman 滤波

在 GNSS 定轨与定位领域, Kalman 滤波是更为常用的参数估计方法, 其主要由状态预测和参数更新两部分组成(杨元喜, 2006)。

对于第 n-1 和 n 历元,参数和协方差阵的预测模型为:

$$\begin{cases} \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}^{-}(n) = \mathbf{\theta}(n-1) \cdot \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}^{-}(n-1)} \\ \mathbf{P}_{\stackrel{\wedge}{x}(n)}^{-} = \mathbf{\theta}(n-1) \cdot \mathbf{P}_{\stackrel{\wedge}{x}(n)}^{-} \cdot \mathbf{\theta}^{T}(n-1) + \mathbf{Q}(n-1) \end{cases}$$
(2.61)

上式中,带有上标"-"的参数为预测值,带有"^"的参数为滤波值; θ为参数 的状态转移矩阵,**Q**为过程噪声矩阵。

第 n 历元的观测模型和式(2.61)可以组成类似式(2.58)的观测模型:

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} \hat{\mathbf{x}}^{-}(n) \\ \mathbf{y}(n) \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{G}(n) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(n) \\ \mathbf{P}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^{-} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}(n) \end{bmatrix} \end{cases}$$
(2. 62)

式(2.62)的最小二乘解为:

$$\begin{cases} \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}}(n) = \mathbf{P}_{x(n)} \cdot \left[(\mathbf{P}_{x(n)}^{-})^{-1} \cdot \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}}^{-}(n) + \mathbf{G}^{T}(n) \cdot \mathbf{R}^{-1}(n) \cdot \mathbf{y}(n) \right] \\ \mathbf{P}_{x(n)}^{-} = \left[(\mathbf{P}_{x(n)}^{-})^{-1} + \mathbf{G}^{T}(n) \cdot \mathbf{R}^{-1}(n) \cdot \mathbf{G}(n) \right]^{-1} \end{cases}$$
(2.63)

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

$$\begin{cases} \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}}(n) = \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}^{-}}(n) + \mathbf{K}(n) \cdot [\mathbf{y}(n) - \mathbf{G}(n) \cdot \stackrel{\wedge}{\mathbf{x}^{-}}(n)] \\ \mathbf{P}_{\stackrel{\wedge}{x}(n)} = \mathbf{P}_{\stackrel{\wedge}{x}(n)} \cdot [\mathbf{I} - \mathbf{K}(n) \cdot \mathbf{G}(n)] \end{cases}$$
(2. 64)

$$\mathbf{K}(n) = \mathbf{P}_{\hat{x}(n)}^{-} \cdot \mathbf{G}^{T}(n) \cdot [\mathbf{G}(n) \cdot \mathbf{P}_{\hat{x}(n)}^{-} \cdot \mathbf{G}^{T}(n) + \mathbf{R}(n)]^{-1}$$
(2.65)

上式中, K为 Kalman 滤波的增益矩阵。

通过矩阵恒等变换公式可以证明式(2.63)和式(2.64)的等价性,即说明 基于序贯平差法的 Kalman 滤波与传统的 Kalman 滤波其本质一样(张益泽,2017)。

在 GNSS 静态定位中,坐标改正量参数始终不变,接收机钟差参数当做随机 噪声进行处理,对流层湿延迟参数推荐使用随机游走模型,在未发生周跳的历元, 其相位模糊度参数也不变,因此 Kalman 滤波的状态转移矩阵0和过程噪声矩阵 Q 可定义为:



在 GNSS 动态定位中,由于接收机的运动速度常常未知,故其坐标改正量参数采用随机噪声模型,其余待估参数的处理与静态定位保持一致,其状态转移矩阵0和过程噪声矩阵0可定义为:

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & & \\ & \mathbf{0} & & \\ & & \mathbf{0} & & \\ & & & \mathbf{1} & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_{dX}^2 & & & \\ & \sigma_{dY}^2 & & \\ & & \sigma_{dZ}^2 & & \\ & & & \sigma_{dt_r}^2 & \\ & & & \sigma_{trop}^2 & \\ & & & & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(2.67)

不管动态还是静态定位,其先验信息都可设置为:

$$\mathbf{Q}_{0} = \begin{bmatrix} 1^{2} \mathrm{km}^{2} & & & \\ & 1^{2} \mathrm{km}^{2} & & \\ & & 1^{2} \mathrm{km}^{2} & & \\ & & 300^{2} \mathrm{km}^{2} & & \\ & & & 0.1^{2} \mathrm{m}^{2} & \\ & & & & 20^{2} \mathrm{m}^{2} \end{bmatrix}$$
(2.68)

2.5 本章小结

本章简要介绍了 3 种经典的 GNSS 单/双频精密单点定位模型,系统性总结 了 GNSS 信号传播过程中产生的各项定位误差及其改正方法,重点对 GPS 民用 广播星历 CNAV 的轨道和钟差精度进行了长期评估与分析,并比较了 4 种 ISC 参数与不同 IGS 分析中心后处理 DCB 产品间的差异。在数据预处理阶段,给出 了常用的单/双频实时周跳探测方法,并对不同的相位平滑伪距方法进行比较与 总结。参数估计部分,介绍了 SPP 和 PPP 的函数模型与随机模型,并详细推导 了最小二乘法和 Kalman 滤波的公式,这些内容都为后续章节提供了扎实的理论 基础与依据。

第3章 基于分区综合改正技术的北斗/GPS 组合精密单点定 位

北斗二号系统(BDS-2)的基本导航服务在亚太区域仅能提供优于 10 m 的 定位精度,这极大限制了其在高精度定位领域的应用,为此,BDS-2 增强导航服 务可通过 GEO 卫星向授权用户播发广域差分星基增强参数和完好性信息以提高 其服务性能。北斗星基增强导航服务共播发 4 种改正数,其中等效钟差改正数、 轨道改正数和格网电离层改正数均利用 CNMC 滤波后的伪距观测值进行计算, 可对卫星轨道和钟差以及电离层延迟误差进行高精度修正,使用户差分距离误差 UDRE 达到 0.5 m。分区综合改正数(Partition Comprehensive Correction, PCC) 则利用了高精度载波相位观测值,首先按照北斗监测站的分布,将中国区域均匀 划分为 18 个分区;其次,在每个分区内利用参考站的相位观测值,计算该分区 内每个参考站对每颗卫星的综合改正数,并进行分区内多个参考站综合改正数的 归算,获取每个分区对每颗卫星的 PCC;最后,通过 GEO 卫星向地面北斗授权 用户播发实时 PCC。分区综合改正数是对距离用户 1000 km 范围内的卫星轨道 误差、卫星钟差、测站钟差、对流层延迟误差及模糊度误差的残余误差的综合建 模,用户接收到其所在分区的 PCC 采用精密单点定位处理策略即可实现北斗实 时动态分米级精度定位。

目前可用的 4 种广域差分星基增强参数均基于 BDS-2 卫星 (14 颗),主要服 务于中国及周边地区,在建筑物密集的城市、植被繁茂的山区等 GNSS 信号遮挡 严重的区域, BDS-2 卫星的可见性急剧下降,大大降低了基于分区综合改正技术 的北斗实时动态定位的性能。为了增加卫星的可用数目、改善星座几何构型,可 引入多系统 GNSS 观测值进行组合定位,以提高北斗分区综合改正 PPP 的定位 精度和收敛时间,并增强实时动态定位的连续性和稳定性。

3.1 分区综合改正数计算原理

北斗广域差分星基增强系统在设计时将中国区域均匀的划分为 18 个分区,利用每个分区内 3-5 个北斗监测站的观测数据计算 PCC,并通过 GEO 卫星(C01-C05)实时播发给授权用户,其中 C01 和 C02 卫星播发 1-9 分区的 PCC,C03 和 C04 卫星播发 7-14 分区的 PCC,C05 卫星播发 12-18 分区的 PCC (Chen et al, 2020b)。图 3.1 为北斗分区示意图,其中红色圆点表示分区中心,黄色、绿色和

紫色圆圈分别表示距离分区中心 1000 km、600 km 和 300 km 的服务半径。可以 看出,当服务半径为 600 km 时,可覆盖中国 90%的区域,而当服务半径达到 1000 km 时,即可覆盖全国及周边少部分区域。



图 3.1 北斗广域差分星基增强系统分区设计与服务半径

3.1.1 单参考站计算

BDS-2 卫星的 PCC 计算采用 B1B2 双频无电离层组合观测值,对于单个参考站 ref,其观测方程为:

$$\begin{cases} P_{IF,ref}^{S} = \rho_{ref}^{S} + d\rho_{ref}^{S} + c \cdot (dt_{ref,IF} + \delta t_{ref,IF}) - c \cdot (dt_{ref,IF}^{S} + \delta t_{ref,IF}^{S}) + T_{ref}^{S} + dT_{ref}^{S} \\ + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \varepsilon_{P_{IF}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_{IF,ref}^{S} = \rho_{ref}^{S} + d\rho_{ref}^{S} + c \cdot (dt_{ref,IF} + \delta t_{ref,IF}) - c \cdot (dt_{ref,IF}^{S} + \delta t_{ref,IF}^{S}) + T_{ref}^{S} + dT_{ref}^{S} \\ + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{IF}^{S} \cdot (N_{ref,IF}^{S} + dN_{ref,IF}^{S}) + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases}$$

$$(3.1)$$

上式中, δ_{orb} 和 δ_{ESC} 分别为北斗广域差分星基增强参数中的轨道改正数和等效钟 差改正数; ρ_{ref}^{s} 为利用广播星历计算的星地间几何距离, $d\rho_{ref}^{s}$ 为广播星历轨道经 过轨道改正数修正后的剩余误差; $dt_{ref,IF}$ 和 $\delta t_{ref,IF}$ 分别为参考站接收机钟差的近 似值和接收机钟差近似值的误差; $dt_{ref,IF}^{s}$ 和 $\delta t_{ref,IF}^{s}$ 分别为利用广播星历计算的卫 星钟差和经过等效钟差改正数修正后的剩余误差; T_{ref}^{s} 和 dT_{ref}^{s} 分别为利用现有对 流层延迟模型计算的对流层延迟误差和未改正的对流层残余误差; $N_{ref,IF}^{s}$ 为相位 模糊度近似值, $dN_{ref,IF}^{s}$ 为相位模糊度近似值与真值间的差异。

将式(3.1)中未模型化的残余误差进行综合,即可获得单参考站的伪距/相

位 PCC 为(张益泽, 2017):

$$\begin{cases} dP_{IF,ref}^{S} = d\rho_{ref}^{S} + c \cdot (\delta t_{ref,IF} - \delta t_{ref,IF}^{S}) + dT_{ref}^{S} + \varepsilon_{P_{IF}} \\ dL_{IF,ref}^{S} = d\rho_{ref}^{S} + c \cdot (\delta t_{ref,IF} - \delta t_{ref,IF}^{S}) + dT_{ref}^{S} + \lambda_{IF}^{S} \cdot dN_{ref,IF}^{S} + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases}$$
(3.2)

对于距离参考站较近的用户站 user,同样可以建立形如式(3.1)的观测方程,将式(3.2)代入用户站观测方程,即可获得:

$$\begin{cases} P_{IF,user}^{S} = \rho_{user}^{S} + d\rho_{user}^{S} - d\rho_{ref}^{S} + c \cdot (dt_{user,IF} + \delta t_{user,IF} - \delta t_{ref,IF}) \\ -c \cdot (dt_{user,IF}^{S} + \delta t_{user,IF}^{S} - \delta t_{ref,IF}^{S}) + T_{user}^{S} + dT_{user}^{S} - dT_{ref}^{S} \\ + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + dP_{IF,ref}^{S} + \varepsilon_{P_{IF}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_{IF,user}^{S} = \rho_{user}^{S} + d\rho_{user}^{S} - d\rho_{ref}^{S} + c \cdot (dt_{user,IF} + \delta t_{user,IF} - \delta t_{ref,IF}) \\ -c \cdot (dt_{user,IF}^{S} + \delta t_{user,IF}^{S} - \delta t_{ref,IF}^{S}) + T_{user}^{S} + dT_{user}^{S} - dT_{ref}^{S} \\ + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{IF}^{S} \cdot (N_{user,IF}^{S} + dN_{user,IF}^{S} - dN_{ref,IF}^{S}) + dL_{IF,ref}^{S} + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases}$$

$$(3.3)$$

上述参考站和用户站在数秒至数分钟的较短时间差异内,共视卫星的轨道误差、钟差误差和对流层延迟误差的残余误差变化量非常小,并且参考站与用户站的距离较近,因此两者间的共模误差可以相互抵消。同时,参考站接收机钟差近似值的误差可以被用户站接收机钟差吸收,参考站卫星相位模糊度近似值的误差也可以被用户站卫星相位模糊度吸收,故式(3.3)可改写为:

$$\begin{cases}
P_{IF,user}^{S} = \rho_{user}^{S} + c \cdot (dt_{user,IF} + \delta t_{user,IF}) - c \cdot dt_{user,IF}^{S} + T_{user}^{S} + \delta_{orb} + \delta_{ESC} \\
+ dP_{IF,ref}^{S} + \varepsilon_{P_{IF}} \\
L_{IF,user}^{S} = \rho_{user}^{S} + c \cdot (dt_{user,IF} + \delta t_{user,IF}) - c \cdot dt_{user,IF}^{S} + T_{user}^{S} + \delta_{orb} + \delta_{ESC} \\
+ \lambda_{IF}^{S} \cdot (N_{user,IF}^{S} + dN_{user,IF}^{S}) + dL_{IF,ref}^{S} + \varepsilon_{L_{IF}}
\end{cases}$$
(3.4)

由式(3.4)可知,北斗用户使用广播星历、等效钟差改正数、轨道改正数和 分区综合改正数即可对各项定位误差进行精细化处理,从而实现北斗实时精密单 点定位。

3.1.2 多参考站计算

单个参考站难免会出现数据传输延迟,数据中断或接收机故障等问题,为了确保 PCC 播发的连续性与稳定性,通常需要在每个分区内设置 3-5 个参考站进行多站综合解算。

在每个分区内,对于每个参考站都能计算出形如式(3.2)的 PCC,在理想 状态下,可以根据不同参考站距离分区中心的远近程度,采用距离加权平均法计 算该分区的 PCC,其公式如下:

$$\begin{cases} \delta P_{pcc} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot dP_i^S}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \\ \delta L_{pcc} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot dL_i^S}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \end{cases}$$
(3.5)

上式中, δP_{pcc} 和 δL_{pcc} 分别多参考站归算后的伪距 PCC 和相位 PCC; W_i 为第i个参考站的权重,n表示某个分区内使用的参考站数目。

由式(3.2)和(3.5)可以看出,多参考站归算的相位 PCC 包含了每个参考 站对同一颗卫星的相位模糊度近似值的残余误差,即:

$$dN = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot dN_i^S}{\sum_{i=1}^{n} W_i}$$
(3.6)

当分区内某个参考站在某一历元无法观测到某颗卫星,或某个参考站观测到 某颗卫星发生周跳需要重新初始化时,式(3.6)中的*dN_i^s*就会发生变化,此时 *dN*会出现明显跳变,因此,多参考站综合解算时必须对模糊度进行归算,以保 证相位 PCC 的连续性。

在未发生周跳的连续弧段内,卫星的相位模糊度近似值误差 *dN*^s_i 保持不变,因此可通过参考历元叠加前后历元变化量的方法逐历元更新相位模糊度近似值误差,从而保证 *dN*^s_i 的连续性,以此计算相位 PCC 为:

$$\delta L_{pcc}(t_k) = \delta L_{pcc}(t_{k-1}) + \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot [dL_i^S(t_k) - dL_i^S(t_{k-1})]}{\sum_{i=1}^{n} W_i}$$
(3.7)

上式中, $dL_i^s(t_k) - dL_i^s(t_{k-1})$ 为未发生周跳时某颗卫星前后历元间相位综合改正数的变化量, 当发生周跳时, 对该卫星进行剔除即可。

根据式(3.2)和(3.5)可知,多参考站综合计算的 PCC 包含了每个参考站的接收机钟差近似值误差,故在理想状态下,可通过距离加权平均法进行归算,即:

$$\delta t_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot \delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}$$
(3.8)

但在某些历元,某颗卫星无法被所有参考站观测到,若仍采用式(3.8)进行 计算,将导致参考站上不同卫星的接收机钟差近似值误差不一致,此时无法被用 户端接收机钟差参数所吸收。由于δt_i不能像相位模糊度那样在连续弧段内保持 不变,因此无法像模糊度参数那样通过前后历元间变化进行计算。为了保证所有 卫星具有相同的δt_{ref}以被用户站接收机钟差吸收,在不同参考站上观测到的卫星 不一致时,选择分区内可以观测到卫星数目最多或数据质量最好的参考站为基准 站进行计算,再按照式(3.7)对模糊度进行归算。



综上所述,分区综合改正数的计算流程如下:

图 3.2 北斗分区综合改正数计算流程图

由于 PCC 的播发频率较高,每 36s 播发一次,而北斗 GEO 卫星的星上资源 有限,因此目前 BDS-2 广域差分星基增强系统只能播发相位 PCC。图 3.3 为 2019 年2月1日至2月28日第6分区不同类型北斗卫星的相位 PCC 时序图, 其中横 坐标为年积日(Day of Year, DoY)。可以看出, GEO 卫星因全域可见且具有静 地高轨特性, 其相位 PCC 具有很好的连续性和稳定性,长期或短期历元间变化 量及粗差数量均明显小于 IGSO 和 MEO 卫星。C06(IGSO 卫星)和 C11(MEO 卫星)卫星相位 PCC 的可用时间仅占整个测试期间的 62.67%和 22.18%, 这主要 与北斗地面监测站对 IGSO 和 MEO 卫星的跟踪观测能力有关。经统计, C01、 C06 和 C11 卫星的相位 PCC 均值分别为-0.13 m、0.04 m 和 0.59 m,相应的 STD 值分别为 0.25 m、0.32 m 和 0.65 m。



图 3.3 不同类型北斗卫星相位分区综合改正数时序图

3.2 北斗分区综合改正数定位模型

对于北斗授权用户,获得 PCC 后还必须匹配使用对应时刻的等效钟差改正数和轨道改正数,对于单频定位用户,还需使用格网电离层改正数以修正电离层延迟误差。需要注意的是,PCC 的计算基于双频无电离层组合观测值,故其既可用于任意频点组合的双频用户定位,也可用于任意频点的单频用户定位。

3.2.1 双频定位模型

对于 B1B2 或 B1B3 北斗定位用户,采用双频无电离层组合法对电离层延迟 误差一阶项进行消除,其观测方程为:

$$\begin{cases} P_{IF}^{S} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{IF}} - dt_{IF}^{S}) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_{IF}} \\ L_{IF}^{S} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{IF}} - dt_{IF}^{S}) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{IF}^{S} \cdot \overline{N_{IF}^{S}} + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_{IF}} \end{cases}$$
(3.9)

上式中, $d\overline{t_{IF}}$ 为接收机钟差真值, $\overline{N_{IF}^{s}}$ 为载波相位整周模糊度,其余参数的含义与式(3.1)和(3.5)相同。根据分区综合改正数的计算原理可知,PCC已经包含了分区服务半径内对流层延迟误差的残余误差,故与传统精密单点定位模型相比,无需再对对流层延迟误差的湿分量进行参数估算(张益泽,2017)。

基于分区综合改正技术的北斗双频无电离层组合 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [dx, d\overline{t_{IF}}, \overline{N_{IF}^{S}}]$$
(3.10)

上式中, dx 表示接收机在 X、Y、Z 方向的坐标误差。

3.2.2 单频定位模型

(1) Ionosphere-Corrected 模型。电离层延迟误差作为单频定位中最大的误差源之一,严重影响和制约了单频定位的精度和收敛速度。相比于北斗 Klobuchar 8 参数电离层模型,广域差分星基增强系统提供的格网电离层改正模型的精度更高,其改正精度可达 0.5 m (Wu et al, 2014)。以 B1 频点为例,传统的改正电离 层延迟误差的 Ionosphere-Corrected 单频定位模型为:

$$\begin{cases} P_1^S = \rho + c \cdot (d\overline{t_1} - dt_1^S) + T + I_1^S + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_1} \\ L_1^S = \rho + c \cdot (d\overline{t_1} - dt_1^S) + T - I_1^S + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_1^S \cdot \overline{N_1^S} + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_1} \end{cases}$$
(3.11)

上式中, *I*₁为利用北斗格网电离层改正模型计算的 B1 频点的电离层延迟误差。 基于分区综合改正技术的北斗 Ionosphere-Corrected 单频 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [dx, d\overline{t_1}, \overline{N_1^S}]$$
(3.12)

(2) Ionosphere-Free 模型。由于电离层改正模型的精度再高也无法对电离 层延迟误差进行完全消除,因此 Ionosphere-Corrected 单频 PPP 的精度无法达到 最优。考虑到电离层延迟误差在伪距和相位观测值上的影响相反且大小相等,故 可采用经典的 GRAPHIC 半和法模型进行单频定位,仍以 B1 频点为例,其定位 模型为:

$$\begin{cases} P_{1}^{s} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{1}} - dt_{1}^{s}) + T + I_{1}^{s} + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_{1}} \\ \frac{P_{1}^{s} + L_{1}^{s}}{2} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{1}} - dt_{1}^{s}) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \frac{\lambda_{1}^{s} \cdot \overline{N_{1}^{s}}}{2} + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_{1}} \end{cases}$$
(3.13)

基于分区综合改正技术的北斗 Ionosphere-Free 单频 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [dx, d\overline{t_1}, \frac{\overline{N_1^s}}{2}]$$
(3.14)

(3) Ionosphere-Weighted 模型。由于北斗格网电离层改正模型的精度很高,因此可采用附加外部电离层约束的非差非组合 Ionosphere-Weighted 模型进行单频定位,此时需要对每颗卫星的电离层延迟参数进行额外估算,仍以 B1 频点为例,其定位模型为:

$$\begin{cases} P_{1}^{S} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{1}} - dt_{1}^{S}) + T + I_{1}^{S} + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_{1}} \\ L_{1}^{S} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{1}} - dt_{1}^{S}) + T - I_{1}^{S} + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{1}^{S} \cdot \overline{N_{1}^{S}} + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_{1}} \\ \tau_{1} = I_{1}^{S} + \varepsilon_{\tau_{1}} \end{cases}$$
(3.15)

上式中, $\tau_1 = I_1^s + \varepsilon_{\tau_1}$ 为由北斗格网电离层改正数组成的虚拟观测值,其可对待估的电离层延迟参数施加约束。

基于分区综合改正技术的北斗 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [dx, d\overline{t_1}, I_1^s, \overline{N_1^s}]$$
(3.16)

常用的电离层约束方法有逐步松弛约束法、时空约束法和常数约束法(周峰, 2018)。本文采用经典的时空约束法,即考虑电离层延迟误差的时空变化特性来计算虚拟电离层观测值的先验方差(Zhang et al, 2013b):

$$\sigma_{ion}^{2} = \frac{1}{m^{2}} \cdot \begin{cases} \sigma_{ion,0}^{2} + \sigma_{ion,1}^{2} \cdot \cos(B) \cdot \cos(\frac{t-14}{12}\pi), & 8 < t < 20 \text{ or } B < \frac{\pi}{3} \\ \sigma_{ion,0}^{2}, & otherwise \end{cases}$$
(3.17)

$$m = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 Z}{(1 + H_{ion} / R_{Earth})}}$$
(3.18)

上式中, *m* 为电离层映射函数; *Z* 为测站视线方向天顶角; H_{ion} 为假设的电离层 单层球壳的高度,对于北斗格网电离层模型是 375 km; R_{Earth} 为地球平均半径; *B* 为电离层穿刺点 IPP 的纬度; *t* 为 IPP 对应的当地时 LT (Local Time); $\sigma_{ion,0}^2$ 和 $\sigma_{ion,1}^2$ 为天顶电离层延迟的方差,对于北斗格网电离层模型均可设置为 0.25 m² (Wang et al, 2019c)。

3.3 北斗分区综合改正数定位性能评估

3.3.1 试验数据及处理策略

选取 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日(DoY 32-59) 7 个 iGMAS (International GNSS Monitoring & Assessment System)监测站和 27 个 CMONOC(Crustal Motion Observation Network of China)监测站的观测数据实施基于分区综合改正数的北 斗实时 PPP 定位。18 个分区中心和 34 个定位站的位置分布见图 3.4,其中粉色 表示分区中心,蓝色表示 iGMAS 测站,绿色表示 CMONOC 测站。

定位测试采用 Net_Diff 软件(http://202.127.29.4/shao_gnss_ac/Net_diff/Net_diff.html),该软件由中国科学院上海天文台研制,集GNSS数据下载、定位解算和结果分析于一体,支持GPS/GLONASS/BDS/Galileo/QZSS/IRNSS 六系统SPP/PPP/RTK 等定位模式,还支持基于北斗星基增强参数的北斗实时SBASSPP/PPP定位(Chen et al, 2020b; Zhang et al, 2020b)。本测试的定位模式包括动、静态和单、双频,其中双频采用B1B2和B1B3无电离层组合模型,单频采用B1/B2/B3 Ionosphere-Free 模型(即GRAPHIC 半和法)和附加外部电离层约束的Ionosphere-Weighted 模型,未考虑传统的Ionosphere-Corrected 单频 PPP 模型是因为其受电离层模型精度的影响较大,且定位精度明显低于Ionosphere-Free 模型(Wang et al, 2020)。

基于 PCC 的北斗实时 PPP 的数据处理策略及改正模型见表 3.1,值得注意 的是,BDS IGSO/MEO 卫星的伪距和相位观测值先验精度分别设置为 0.5 m 和 0.005m,对于卫星轨道和钟差质量较差,且存在明显多径误差的 GEO 卫星,其 观测值精度需降权至 IGSO/MEO 卫星的一半(Montenbruck et al, 2018)。由于定 位时卫星轨道和钟差采用广播星历,因此不需要对卫星端 PCO 和 PCV 进行改 正。为了增加计算样本,将每个测站的单天观测数据均匀划分为 4 段,每段 6 h,此时所有测站在测试期间共产生 3808(34 个测站*28 天*4 段)组定位结果,基于上述所有定位结果对各种模式下的定位精度和收敛速度进行统计分析。



图 3.4 定位站与分区中心位置分布图

表 3.1 北斗分区综	合改正数定位处理策	盱略
-------------	-----------	----

参数	模型/策略	
频点	BDS: B1/B2/B3	
采样率	30 s	
截止高度角	10°	
卫星轨道与钟差	广播星历	
TGD 参数	广播星历	
SBAS 参数	轨道改正数、等效钟差改正数、格网电离层改正数、 相位分区综合改正数	
对流层延迟	GPT2w+SAAS+VMF1 (Boehm et al, 2015)	
电离层延迟	双频: B1/B2 或 B1/B3 无电离层组合; 单频: 北斗格网电离层改正模型	
相对论效应	模型改正	
相位缠绕	模型改正	
潮汐改正	固体潮、海潮、极潮模型改正(Gerard and Luzum, 2010)	
参数估计	Kalman 滤波	
测站坐标	静态:估计,常数; 动态:估计,白噪声	
接收机钟差	估计,白噪声	
相位模糊度	浮点解	

3.3.2 定位精度与收敛性分析

图 3.5 为 SNMX 测站在 2019 年 2 月 6 日进行 B1B2 双频动、静态定位和 B1 单频动、静态定位的定位误差时序图,该定位站距离第 9 分区的中心 411 km。 可以看出,无论动态还是静态定位,双频 PPP 的收敛时间均明显小于单频 PPP, 其 3D 定位误差可在 15 min 收敛至 1.0 m, 20min 收敛至 0.5 m。对于单频 PPP, Ionosphere-Weighted 模型的收敛速度明显快于 Ionosphere-Free 模型,尤其体现在 水平方向,这主要是因为 GRAPHIC 观测量具有较大伪距噪声(Montenbruck, 2003),且北斗格网电离层改正模型的精度较高,可以在基于原始观测值的 Ionosphere-Weighted 模型中作为外部电离层约束来加快定位收敛,整体而言,单 频 PPP 的 3D 定位误差可在 1 h 内收敛至 1.0 m。



图 3.5 基于分区综合改正数的北斗实时 PPP 定位误差(SNMX 测站, 2019 年 DoY 37)

为了评估动态 PPP 中定位误差的分布规律,对所有测站在整个测试期间的 3808 组结果进行统计,绘制了单频和双频 PPP 在水平和高程方向上的定位误差 分布直方图,如图 3.6。可以看出,双频和单频 PPP 的水平定位误差大部分集中 在 0.3 m 和 0.5 m 以内,高程定位误差的分布概率随定位误差的增大而减小,呈 现近似线性回归的特点。对于 B1B2 双频 PPP,约 79.8%的水平定位误差优于 0.3 m,88.1%的高程定位误差优于 0.5 m;而对于 B1B3 双频 PPP,约 74.7%的水平 定位误差优于 0.3 m,86.9%的高程定位误差优于 0.5 m。对于 B1/B2/B3 单频 PPP, Ionosphere-Free 模型和 Ionosphere-Weighted 模型的定位误差分布规律相似,超过



76%的水平定位误差优于 0.5 m,约 89%的高程定位误差优于 0.7 m。



图 3.6 基于分区综合改正数的北斗实时 PPP 定位误差概率分布图(每个直方图代表 10 cm 定位误差范围,例:90 代表[80-90] cm 定位误差)

表 3.2 统计了不同定位模式下所有测站所有天 3808 组定位误差的 RMS 值, 其中静态定位统计每组(6h)结果的最后一个历元的定位误差,动态定位统计每 组结果中收敛历元至最后一个历元的定位误差,收敛条件定义为三维定位误差小 于 1.0 m 且连续 20 个历元不超过 1.0 m。可以看出,静态双频 PPP 定位精度在水 平和高程方向分别为 0.12 m 和 0.18 m,动态双频 PPP 定位精度略低,分别约 0.16 m 和 0.20 m。对于单频 PPP,无论动态还是静态模式,Ionosphere-Free 模型和 Ionosphere-Weighted 模型的定位精度基本相当,其静态定位在水平和高程方向分 别为 0.15 m 和 0.22 m,动态定位在水平和高程方向分别为 0.33 m 和 0.40 m。整 体而言,单频 PPP 定位精度略差与双频 PPP,但两者都能达到分米级(0.5 m) 定位要求。

为了评估基于分区综合改正数的北斗实时 PPP 动态定位的收敛性,截取每 组定位结果中前 1 h 的数据,每隔 5 min 计算一次水平和高程方向的平均定位误差,绘制动态双频和单频 PPP 的收敛曲线,如图 3.7。可以看出,对于双频 PPP, B1B2 组合的收敛速度略快于 B1B3 组合,其主要原因是 B1B3 无电离层组合的 噪声放大因子约 3.53,明显大于 B1B2 无电离层组合的 2.90,伪距噪声的不同导致了收敛速度的差异,总体而言,两者的水平定位误差可在 15 min 内收敛至 0.5 m。对于单频 PPP,Ionosphere-Weighted 模型的初始化定位误差明显小于 Ionosphere-Free 模型,且收敛速度更快,尤其体现在水平方向,这主要归功于北斗格网电离层改正模型的高精度,以及非差非组
合模型有效避免了伪距噪声因线性组合而放大。整体而言,采用分区综合改正技术的北斗单频 PPP,其水平和高程定位误差可在 30 min 内分别收敛至 0.8 m 和 1.0 m。

静态/m 动态/m 定位模型 水平 高程 水平 高程 B1B2 Iono-Free 0.113 0.180 0.158 0.203 B1B3 Iono-Free 0.124 0.178 0.164 0.206 B1 Iono-Free 0.140 0.229 0.401 0.335 B2 Iono-Free 0.140 0.217 0.389 0.313 B3 Iono-Free 0.146 0.212 0.322 0.399 B1 Iono-Weighted 0.171 0.230 0.325 0.388 B2 Iono-Weighted 0.217 0.377 0.161 0.332 B3 Iono-Weighted 0.170 0.211 0.343 0.392

表 3.2 不同频点不同定位模型下基于分区综合改定数的北斗实时 PPP 定位精度 RMS 统计





图 3.7 基于分区综合改正数的北斗实时 PPP 的平均收敛时间统计

3.4 北斗/GPS 组合分区综合改正数定位模型

由于目前北斗广域差分星基增强系统播发的 PCC 仅针对 BDS-2 卫星,仅 14 颗可用,故在城市和山区等信号遮挡严重的区域很难保证良好的星座几何构型,导致北斗实时动态定位性能的下降,甚至无法完成定位。为了解决这一实际问题并拓宽分区综合改正技术的应用场景,可采用多系统融合数据处理方法,将 GPS 系统引入 PCC 的计算和定位,通过增加可用卫星数,改善星座几何构型来提高

北斗实时 PPP 的定位精度和收敛速度。

在 BDS+GPS 融合数据处理中, PCC 的计算方法与单北斗系统保持一致, 在 定位时则需要考虑系统间偏差 ISB(Inter System Bias)的影响, 故 BDS+GPS 双 频分区综合改正数定位的观测方程为(王阿昊, 2019):

$$\begin{cases} P_{IF}^{C} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{IF}} - dt_{IF}^{C}) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_{IF}^{C}} \\ L_{IF}^{C} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{IF}} - dt_{IF}^{C}) + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{IF}^{S} \cdot \overline{N_{IF}^{C}} + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_{IF}^{C}} \\ P_{IF}^{G} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{IF}} - dt_{IF}^{G}) + ISB^{G} + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \delta P_{pcc} + \varepsilon_{P_{IF}^{G}} \\ L_{IF}^{G} = \rho + c \cdot (d\overline{t_{IF}} - dt_{IF}^{G}) + ISB^{G} + T + \delta_{orb} + \delta_{ESC} + \lambda_{IF}^{S} \cdot \overline{N_{IF}^{G}} + \delta L_{pcc} + \varepsilon_{L_{IF}^{G}} \end{cases}$$
(3. 19)

上式中,上标 C 和 G 分别表示 BDS 卫星和 GPS 卫星; *ISB^G*为 GPS 卫星相对于 BDS 卫星的系统间偏差,其余参数的含义与式(3.9)相同。

基于分区综合改正技术的 BDS+GPS 双频 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [dx, d\overline{t_{IF}}, ISB^G, \overline{N_{IF}^S}]$$
(3. 20)

3.5 北斗/GPS 组合分区综合改正数定位性能评估

3.5.1 试验数据及处理策略

北斗广域差分星基增强系统采用的北斗监测站仅能接收 BDS 卫星观测数据, 为验证本文提出的 BDS+GPS 组合分区综合改正数定位模型的性能,选取 15 个 MGEX 观测站多系统数据,采用离线模拟实时处理的策略进行试验。首先设置一 定数量的参考站作为分区中心,实时计算 BDS+GPS 双系统 PCC; 然后,将生成 的改正数以数据流的方式实时播发给分区内用户站;最后,用户站将接收到的双 系统 PCC 叠加使用广播星历,以精密单点定位的方式模拟实时动态定位。

测试时间自 2019 年 2 月 1 日至 2 月 20 日,所选 MGEX 测站平均可观测 BDS 卫星不少于 6 颗,其测站分布如图 3.8 所示,其中蓝色圆点表示 6 个计算 PCC 的参考站,红色圆点表示 9 个用于 PPP 定位的用户站。参考站与用户站的 选取依据为两者距离不超过 2000 km,目的是保证单 BDS 或单 GPS 定位解算时, 用户站与参考站在相同历元的共视卫星数不少于 4 颗,参考站与用户站的距离见 表 3.3,9 组配对站的平均距离约 906 km。试验对单 BDS、单 GPS 和 BDS+GPS 组合双频动态定位 3 种模式进行解算,具体的数据处理策略大致与表 3.1 相似, 不同的是,在双系统定位时需要额外估算 ISB 参数,且参考站与用户站的参考已 知坐标来自 SINEX (Solution Independent Exchange)周解文件,坐标精度可优于 1 cm。值得注意的是,由于采用分布稀疏的 MGEX 监测站数据进行模拟试验, 故并未计算 GPS 和 BDS 卫星的等效钟差改正数和轨道改正数,其残余的卫星钟 差误差和轨道误差将包含在分区综合改正数内,相较于中国区域播发的北斗分区 综合改正数,本试验模拟解算的分区综合改正数量级较大,但并不影响用户定位 性能,用户在 SBAS PPP 定位时同样不使用等效钟差改正数和轨道改正数,直接 匹配相应的分区综合改正数即可。



图 3.8 MGEX 测站分布图(6个参考站+9个用户站)

分区中心参考站	用户站	距离/km
HKSL	HKWS	43
MOBS	STR1	456
	PARK	613
	CEDU	1213
HOB2	TID1	832
	STR2	841
COCO	XMIS	985
LAUT	KOUC	1419
KARR	ALIC	1749

表 3.3 参考站 (分区中心) 与用户站的距离

3.5.2 定位精度与收敛性分析

考虑到北斗分区综合改正数的服务半径最大为1000km,本文首先对距离分

区中心(参考站)1000 km 范围内的用户站定位性能进行评估,图 3.9 为 2019 年 2 月 1 日(DoY 32)STR1 站和 TID1 站基于分区综合改正数的双频动态 PPP 定位结果。可以看出,两个用户站在 BDS+GPS 双频动态 PPP 定位中 N、E、U 三 个方向的定位误差均能迅速收敛至 0.5 m 以内,尤其体现在水平方向,相比之下,单 BDS 或单 GPS 定位的收敛时间明显更长。当定位收敛后,单 BDS 和单 GPS 的定位结果在水平方向可稳定在 0.2 m 以内,高程方向可稳定在 0.6 m 以内,而 对于 BDS+GPS 组合定位,其水平方向误差可优于 0.1 m,高程方向误差可优于 0.4 m,较单系统定位精度有明显提升。整体而言,采用分区综合改正技术,不但 可有效消除一定区域内各种未模型化共模误差,提高定位精度,还可以大大缩短 收敛时间,实现分米级精度定位的快速收敛。

为量化 BDS+GPS 组合定位的性能,收敛条件定义为三维定位误差收敛至 1.0 m 且连续 20 个历元不再超过 1.0 m,定位精度为单天解收敛后第一个历元至最 后一个历元定位误差的 RMS 值。需要说明的是,对于单 BDS 定位,因可用卫星 数较少而导致部分历元定位结果异常,此时需进行粗差剔除,阈值标准设置为 2.0 m,其粗差剔除率约 1%。表 3.4 和表 3.5 分别统计了 1000 km 范围内 6 个用户站 连续 20 天的双频动态 PPP 平均收敛时间和 RMS 定位精度,其中 C 和 G 分别表示 BDS 系统和 GPS 系统。可以看出,BDS+GPS 双频动态 PPP 的平均收敛时间 不超过 5 min,较单 GPS 定位的 7.4 min 和单 BDS 定位的 13.3 min 有很大程度提高,其定位精度在 N、E、U 方向上分别优于 4 cm、5 cm 和 15 cm,也明显优于 单系统。对于单系统定位,GPS 的定位精度在各个方向上均优于 BDS,其主要原 因在于 BDS 可用卫星数较少,星座几何构型不佳。整体而言,当 PCC 的服务半 径在 1000 km 以内时,BDS+GPS 双频动态 PPP 的三维定位精度最高,可优于 16 cm,而 GPS 和 BDS 的定位精度不超过 30 cm,仍满足分米级精度定位要求。



图 3.9 STR1 站和 TID1 站基于分区综合改正数的双频动态 PPP 定位误差(N: 红色; E: 绿色; U: 蓝色)

田口子	7	望均收敛时间/m	in
用广站	С	G	C+G
HKWS	5.7	9.0	2.6
STR1	23.9	4.2	3.2
PARK	16.7	6.7	3.3
TID1	9.8	7.3	3.1
STR2	12.3	9.7	3.4
XMIS	11.6	7.6	3.6
平均值	13.3	7.4	3.2

表 3.4 1000 km 范围内 6 个用户站分区综合改正数定位的平均收敛时间

表 3.5 1000 km 范围内 6 个用户站分区综合改正数定位的 RMS 定位精度

田中学		N/cm	l		E/cm			U/cm			3D/cm	
用厂站	С	G	C+G	С	G	C+G	С	G	C+G	С	G	C+G
HKWS	6.2	9.8	2.5	9.5	10.2	3.4	16.4	15.8	5.3	20.0	21.2	6.8
STR1	11.2	7.6	4.3	10.0	10.3	4.4	28.5	18.2	13.7	32.2	22.2	15.0
PARK	11.3	10.3	4.6	16.6	12.9	5.2	29.7	23.6	18.0	35.8	28.8	19.3
TID1	12.2	6.5	4.0	14.1	11.6	4.9	27.2	22.7	16.8	33.0	26.2	18.0
STR2	12.0	7.9	4.5	14.4	12.3	5.1	29.0	23.3	17.5	34.5	27.5	18.8
XMIS	5.1	5.3	3.7	9.0	11.1	5.9	19.2	17.0	14.6	21.8	21.0	16.2
平均值	9.7	7.9	3.9	12.3	11.4	4.8	25.0	20.1	14.3	29.6	24.5	15.7

3.5.3 服务半径对定位性能的影响分析

以上试验主要针对距离分区中心 1000 km 范围内的用户站,为了突出多系统 融合定位的优势,探究 PCC 服务半径与定位性能的关系,增加了 3 组作用距离 大于 1000 km 的用户站数据进行试验,其中 CEDU 距离分区中心 MOBS 站 1213 km,KOUC 站距离分区中心 LAUT 站 1419 km,ALIC 站距离分区中心 KARR 站 1749 km。图 3.10 给出了 2019 年 2 月 1 日 CEDU、KOUC 和 ALIC 三个用户站 单 BDS 和 BDS+GPS 双频动态 PPP 的定位误差,其中第四行表示用户站与参考 站间可用的共视卫星数。可以看出,随着用户站与分区中心距离的增大,单 BDS 定位误差因共视卫星数的减少而出现剧烈波动,甚至部分历元无法完成定位。以 KOUC 站为例,前 3 h 可用的 BDS 共视卫星数仅 4-5 颗,导致单 BDS 定位始终

无法收敛至 1.0 m; 对于 ALIC 站,虽然可用的 BDS 共视卫星数与 KOUC 站大 致相同,但因 PCC 的作用距离高达 1800 km,使得用户站与参考站间共模误差 的一致性大大下降,因此有超过一半的定位误差不能优于 1.0 m。采用 BDS+GPS 分区综合改正数定位,不仅能在 BDS 共视卫星数较少的情况下完成高精度定位,还能实现定位的快速收敛,借助于高精度的 GPS 系统 PCC,甚至在 1800 km 的 作用范围下,仍能完成分米级精度定位要求,同时定位稳定性和连续性也大大优 于单 BDS 系统。



图 3.10 CEDU、KOUC 和 ALIC 站基于分区综合改正数的双频动态 PPP 定位误差(红色: BDS 定位;蓝色:BDS+GPS 定位)

为了研究 PCC 服务半径与定位性能的关系,采用图 3.8 中 15 个 MGEX 测站 2019 年连续 20 天的观测数据,任意选取一个参考站作为分区中心计算 PCC,在 1800 km 服务半径内搜索可用的用户站实施基于分区综合改正数的 BDS+GPS 双频动态 PPP 定位,共有 28 组用户站和参考站匹配成功,最后对每个用户站的平均收敛时间和 RMS 定位精度进行统计。图 3.11 绘制了 28 个用户站的定位性能与 PCC 服务半径的关系,可以看出,在 1800 km 范围内,BDS+GPS 双频动态 PPP 的三维定位精度不超过 0.3 m,所有用户站的平均定位精度可优于 0.18 m。采用线性函数对服务半径和定位精度进行拟合可知,用户站定位精度与服务半径呈现一定的正相关性,即随着服务半径的增大,用户站定位误差也随之增大,这主要与用户站和参考站间各项未模型化共模误差的相关性降低有关。在平均收敛时间和服务半径的线性拟合中发现,两者并无明显相关性,所有用户站的平均收



敛时间在 4 min 左右,收敛最慢的用户站也不超过 10 min。

图 3.11 分区综合改正数服务半径与 RMS 三维定位误差(左图)和平均收敛时间(右图)的统计关系

3.5.4 播发频度对定位性能的影响分析

北斗广域差分星基增强系统播发的 PCC 的更新频率为 36 s,这主要是受 GEO 卫星星地接口资源的限制,当引入 GPS 系统后,需要播发的 PCC 数量将成倍增 加,这将对 GEO 卫星的数据传输和播发能力形成严峻考验。由于 PCC 属于快变 参数,且每颗卫星每个历元都要播发,因此需要对 BDS+GPS 双系统 PCC 的播 发频度进行重新设计,评估不同播发时延下 PCC 对用户定位性能的影响。

选取表 3.3 中 9 个用户站 2019 年连续 20 天的观测数据进行基于分区综合改 正数的 BDS+GPS 双频动态 PPP 定位,其中 PCC 的计算间隔设置为 30 s 至 180 s,收敛条件定义为三维定位误差小于 1.0 m 且连续 20 个历元不再超过 1.0 m, 定位精度统计为收敛后定位误差的 RMS 值。图 3.12 对每个用户站在不同 PCC 播发频度下的 RMS 定位精度和平均收敛时间进行统计,可以看出,随着 PCC 播 发时延的增加,用户站定位精度缓慢下降,而平均收敛时间则逐步增大。当 PCC 的更新频率达到 180 s 时,所有用户站的平面定位精度仍能优于 0.15 m,高程定 位精度优于 0.3 m,完全可以达到分米级精度定位要求,但收敛时间相比于 30 s 更新频率有较大增加,距离较远的 KOUC 站的平均收敛时间达到 15 min。表 3.6 统计了所有用户站的平均 RMS 定位精度和平均收敛时间,可以看出,当 PCC 的 播发时延每增加 30 s,平面和高程定位精度下降 0.4 cm,平均收敛时间增加约 2



图 3.12 不同播发频度下,不同用户站基于分区综合改正数的 BDS+GPS 双频动态 PPP 定位 精度和收敛时间

表 3.6 不同播发频度下,所有用户站基于分区综合改正数的 BDS+GPS 双频动态 PPP 平均 RMS 定位精度和平均收敛时间

八旦			更新频	页率		
万里	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
平面误差 / cm	7.3	7.8	8.3	8.7	9.1	9.4
高程误差 / cm	16.5	16.9	17.3	17.8	18.0	18.3
收敛时间 / min	3.8	5.7	7.4	9.1	10.3	11.6

3.6 本章小结

本章对 BDS-2 广域差分星基增强系统进行简要介绍,重点阐述了分区综合 改正数的计算原理和实时定位模型,采用 7 个 iGMAS 测站和 27 个 CMONOC 测 站连续一个月的观测数据对北斗分区综合改正数定位性能进行评估。对于北斗实 时双频 PPP,其静态定位精度可优于 0.18 m,动态定位精度可优于 0.2 m,水平 和高程定位误差分别在 15 min 和 20 min 收敛至 0.5 m;对于北斗实时单频 PPP, 采用基于 GRAPHIC 观测量的 Ionosphere-Free 模型和附加电离层约束的 Ionosphere-Weighted 模型的定位精度基本相当,静态定位精度可优于 0.25 m,动态定位精度可优于 0.4 m; Ionosphere-Weighted 模型因采用高精度北斗格网电离层改正模型约束,其收敛速度明显快于 Ionosphere-Free 模型,水平和高程定位误差可在 30 min 内收敛至 0.8 m 和 1.0 m。

由于 BDS-2 卫星仅 14 颗,在信号遮挡严重的区域,北斗分区综合改正数定 位的性能将大大降低,为了增加可用卫星数,优化星座几何构型,采用多系统融 合数据处理策略,建立了 BDS+GPS 双系统分区综合改正数定位模型。采用 15 个 MGEX 测站连续 20 天的观测数据对单系统和双系统分区综合改正数定位模 型的性能进行评估,结果表明,GPS 观测值的引入可有效提高分区综合改正数定 位的定位精度,同时大大缩短收敛时间。当 PCC 的服务半径扩大至 1800 km 时, BDS+GPS 双频动态 PPP 的定位精度仍能满足分米级精度定位要求,定位的连续 性和稳定性也显著提高。通过对 PCC 服务半径和定位性能的相关性分析可知, 随着服务半径的增加,用户定位精度会缓慢下降,但三维定位误差仍能小于 0.3 m,而收敛速度与服务半径并无明显相关性。由于北斗 GEO 卫星星上资源有限, GPS 系统的引入势必会增加数据传播和播发的负担,通过对不同播发时延下 PCC 对定位性能的影响分析可知,其更新频率每增加 30 s,平面和高程定位精度会下 降 0.4 cm,平均收敛时间会增加约 2 min,当更新频率设置为 180 s 时, BDS+GPS 双频动态 PPP 的定位精度仍能优于 0.3 m,且收敛时间在 10 min 左右。

第4章 北斗星基增强分米级定位的分区切换算法

北斗广域差分星基增强系统主要播发实时轨道改正数、实时等效钟差改正数、 实时格网电离层改正数和分区综合改正数,其中基于相位观测值计算的 PCC 包 含了 1000 km 范围内卫星轨道/钟差误差、测站钟差误差、对流层延迟误差以及 模糊度残余误差的综合误差。使用 PCC 以 PPP 数据处理策略进行定位,双频动 态用户三维定位误差可在 7 min 内收敛至 1.0 m,收敛后水平定位精度优于 0.15 m,高程定位精度优于 0.2 m (陈俊平, 2018;张益泽, 2019)。

总体而言,北斗用户在距离分区中心 1000 km 范围内采用分区综合改正技术 可实现实时分米级精度定位,但在大量大范围测试中发现,分区综合改正数定位 存在诸多不稳定情况,其普遍原因在于 GEO 卫星播发的 PCC 会出现短时中断的 问题。由于 PCC 的使用原则为"就近原则",即用户需采用距离其概略位置最近 的分区中心播发的 PCC,因此,当某一分区的相位 PCC 因故障出现中断,这一 分区内的用户就必须切换使用临近分区的相位 PCC;另一方面,当车载、船载等 用户在实时动态定位中出现跨分区运动,为确保定位性能不降低,用户也要从旧 分区切换至邻近分区,以保证其概略位置始终距离分区中心最近。本章针对这一 实际问题,提出了适用于分区切换的北斗星基增强分米级定位算法。

4.1 分区切换对定位的影响

北斗广域差分星基增强参数中卫星轨道改正数、等效钟差改正数和格网电离 层改正数均可服务于 BDS-2 所有区域,而分区综合改正数只能服务距离分区中 心 1000 km 范围内的北斗用户。图 4.1 为 2018 年 10 月 25 日 01 和 04 两个相邻 分区的相位 PCC 时序图,其中 00:00:00 -14:59:59 为 01 分区 PCC, 15:00:00-23:59:59 为 04 分区 PCC。可以看出,在 15:00:00 将 01 分区的 PCC 切换至 04 分 区后,每颗卫星的相位 PCC 都出现明显跳变,有的卫星 PCC 变化量甚至超过 0.5 m,这对于利用相位观测值计算的 PPP 定位来说是不可接受的误差。

针对以上分区切换造成的相位 PCC 不连续的情况,目前北斗官方 ICD 文件 并未给出解决方案。根据传统 PPP 定位模型,当 01 分区的相位 PCC 在 15:00:00 发生中断后,通常有 3 种处理策略:

(1)因高精度相位 PCC 的缺失, 仅采用轨道改正数、等效钟差改正数和格 网电离层改正数进行普通北斗星基增强定位;

61

(2)对 01 分区的相位 PCC 进行拟合推估,外推预报一段时间,继续进行 分区综合改正数定位;



(3) 直接使用邻近的 04 分区的相位 PCC 进行分区综合改正数定位。

图 4.1 相邻分区(01 和 04)切换前后的相位分区综合改正数

上述 3 种处理策略中,第 1 种策略因未使用相位 PCC,导致区域内未模型 化共模误差无法被抵消,故无法获得分米级精度定位结果;第 2 种策略的定位性 能主要取决于相位 PCC 的中断时间,3.5.4 小节的研究证明,当相位 PCC 的预报 时间超过 3 min,其定位性能将显著下降。

针对第 3 种策略,选用 st07 北斗监测站数据进行基于分区综合改正数的北 斗双频动态 PPP 定位,结果如图 4.2 所示,其中在 15:00:00 进行分区切换,切换 前后分别采用 01 和 04 分区的相位 PCC。图 4.2 (a)为分区切换前后未进行任何 操作的结果,其 N、E、U 方向定位误差均迅速增大且不再收敛,主要原因是切 换后 04 分区的相位 PCC 相比于 01 分区的差异可达分米级,这对于相位观测值 的影响类似于周跳。为此,我们在分区切换时刻人为引入周跳,重新固定所有卫 星的相位模糊度,其定位结果见图 4.2 (b),可以看出,分区切换后用户需要数 十分钟的收敛时间才能恢复至分米级精度定位,虽然比图 4.2 (a)的结果有了很 大程度的提高,但严重影响了实时动态定位的连续性和稳定性。



图 4.2 st07 测站基于 01 和 04 分区综合改正数的北斗双频动态 PPP 定位误差

4.2 分区切换定位算法

根据 3.1 小节分区综合改正数的计算原理可知,相位 PCC 包含了指定区域 内环境剩余误差以及初始相位模糊度偏差,并且每个分区对每颗卫星的偏差并不 一致。因此,在实时动态定位中,当需要进行分区切换时,切换后相位 PCC 的 变化量主要由两部分组成:(1)两个分区中心所在区域的环境剩余误差差异;(2) 两个分区间每颗共视卫星相位模糊度初值误差的差异。

虽然每个分区对每颗卫星的相位 PCC 的绝对值不同,但可以对相邻分区所 有共视卫星的相位 PCC 历元间变化量进行对比分析。图 4.3 为 2018 年 10 月 25 日 01 分区和 04 分区 5 颗共视卫星(2 颗 GEO、3 颗 IGSO)相位 PCC 历元间变 化量的相关性统计图,可以看出,01 和 04 两个相邻分区的相位 PCC 历元间变 化量呈现较高的线性相关,平均相关系数约 0.86。对这两个分区当天所有共视卫 星的相位 PCC 历元间变化量进行统计,其平均相关系数也高达 0.73。

63



图 4.3 两个相邻分区的相位 PCC 历元间变化量关系

采用 2018 年 10 月 25 日至 10 月 27 日连续 3 天所有北斗分区的相位 PCC 数据(采样率 36 s),统计所有相邻分区的相位 PCC 历元间变化量的相关性,相邻分区的选择依据为两分区中心间的距离不超过 1300 km。需要说明的是,在测试期间,18 分区并未提供相位 PCC 产品,故本文仅对 1-17 分区进行统计。图 4.4 为满足要求的 22 组相邻分区中所有共视卫星的相位 PCC 历元间变化量的平均相关系数,其中横坐标为配对分区的编号(例:"10-11"表示 10 分区和 11 分区配对),柱状图顶部标有相邻分区中心间距离,单位:km。可以看出,经过大数据量统计分析,所有相邻分区间相位 PCC 历元间变化量均呈现出较强相关性,平均相关系数达到 0.70 (见图 4.4 中粉色虚线),即说明相邻分区间相位 PCC 历元间变化量的差异约占总误差的 30%。考虑到相位 PCC 改正后的北斗卫星空间信号精度约 0.2 m (周建华, 2017),故该差异可引起大约 0.06 m 的误差。



图 4.4 相邻分区间相位分区综合改正数历元间变化量的平均相关系数统计

根据相邻分区间相位 PCC 历元间变化量具有高度相关性这一特点,可在分 区切换时,将新分区的卫星 *i* 的相位 PCC 历元间变化量加在旧分区的相位 PCC 上,逐历元计算一个"伪"相位 PCC *δLⁱ_{pcc}*,其公式如下(陈俊平和王阿昊, 2019):

$$\delta L^{i}_{pcc}\Big|_{t} = \delta L^{i}_{pcc}\Big|_{t-1} + \Delta L^{i}_{pcc}\Big|_{t}$$

$$(4.1)$$

$$\Delta L^{i}_{pcc}\Big|_{t} = \begin{cases} \delta L^{i}_{pcc,a}\Big|_{t} - \delta L^{i}_{pcc,a}\Big|_{t-1} &, \quad t < t_{0} \\ \delta L^{i}_{pcc,b}\Big|_{t} - \delta L^{i}_{pcc,b}\Big|_{t-1} &, \quad t \ge t_{0} \end{cases}$$

$$(4.2)$$

上式中, ΔL_{pcc}^{i} 为卫星 *i* 的相位 PCC 前后相邻历元间变化量; *a* 表示切换前的分区, *b* 表示切换后的分区; t_{0} 表示进行分区切换的历元。

由于 Δ*L*_{pce} 在新旧分区之间的差异仅为几个厘米,故采用式(4.1)和(4.2) 可有效防止相位 PCC 在分区切换后出现大幅度跳变,从而保证分区综合改正数 定位的连续性和稳定性。

图 4.5 为基于上述算法从 01 分区切换到 04 分区后,由 04 分区计算的"伪" 相位 PCC 与 01 分区原有相位 PCC 间的差异,经统计,两者的差值 RMS 值为 0.062 m,与前文相关性分析得出的 0.06 m 误差保持一致,说明该算法可有效保 证相位 PCC 的连续性,并满足北斗星基增强分米级精度定位的要求。值得注意 的是,对于切换时刻两个分区的非共视卫星(如 C05、C08、C12-C14)无需对 "伪"相位 PCC 进行归算,在切换后定位时重新初始化其模糊度即可。当未发 生分区切换时,Δ*Lⁱ_{pcc}*其实与原分区的相位 PCC 完全一致,故该算法同样适用于 不切换分区的普通北斗星基增强 PPP 定位。



图 4.5 "伪"相位分区综合改正数与原分区实际相位分区综合改正数间的差异

4.3 分区切换定位算法的性能评估

4.3.1 试验数据及处理策略

将式(4.1)和(4.2)计算的"伪"相位 PCC 分别代入式(3.9)和式(3.13), 即建立起基于分区切换算法的北斗双频 PPP 和单频 PPP 定位模型。在静态数据 模拟动态定位中,选取中国境内均匀分布的7个北斗监测站2018年3月14日至 3月23日连续10天的观测数据进行测试;在真实时动态定位中,采用2017年 7月12日新疆某地山区的车载动态数据进行测试。无论静态模拟动态还是真动 态定位,均采用 Kalman 滤波对待估参数进行逐历元解算,待估参数包括:测站 坐标误差、接收机钟差和各颗卫星的相位模糊度参数。电离层延迟误差一阶项在 双频定位中通过无电离层组合观测值进行消除,在单频定位中采用 GRAPHIC 观 测量进行消除;对流层延迟误差直接采用 GPT2w+SAAS+VMF1 模型进行改正, 具体的数据处理策略与表 3.1 保持一致。

本文定义传统的北斗星基增强 PPP 定位模型为算法1(Model1),基于分区 切换算法的北斗星基增强 PPP 定位模型为算法2(Model2)。采用相同的动、静 态观测数据,按照上述数据处理策略,分别实施基于算法1和算法2的实时动态 定位,以对新算法(Model2)进行评估和验证。

4.3.2 北斗静态站数据测试

图 4.6 为北斗 18 个分区中心和 7 个静态监测站的分布图,各个测站的 ECEF 坐标已精确测定,位置精度可优于 2 cm。表 4.1 给出了各个测站所处分区与邻近 分区中心间的距离,其中 Zone 1 表示测站所处分区,Zone 2 表示测站邻近分区, 选取原则为测站距离分区中心尽量不超过 1000 km。



图 4.6 北斗分区中心(蓝色)和静态监测站(红色)分布图

测站	Zone 1	Zone 2	Zone 1 和 Zone 2 分区 中心间距离/km
st01	01	04	581
st02	07	06	928
st03	17	16	1085
st04	14	09	578
st05	16	17	1085
st06	05	11	790
st07	10	01	637

表 4.1 北斗监测站所处分区与邻近分区中心间的距离

图 4.7 为 2018 年 3 月 16 日 st02、st03 和 st05 测站北斗双频动态 PPP 的定位 结果,每4h人为进行一次分区切换,切换时刻如图中黑色虚线所示,其中 00:00:00 至 03:59:59 采用 Zone 1 分区的相位 PCC, 04:00:00 至 07:59:59 采用 Zone 2 分区

的相位 PCC,以此类推,交替使用分区。可以看出,每个测站在分区切换前均能 迅速收敛至 1.0 m 内,且各个方向的定位误差均能保持在分米级精度,说明分区 综合改正数可以很好的消除指定区域内各项未模型化共模误差,实现北斗高精度 实时动态单点定位。当发生分区切换后,算法 1 的定位结果出现明显的重收敛现 象,此时需要重新固定所有卫星的模糊度参数,算法 2 的定位结果则保持平稳, 因使用的"伪"相位 PCC 与原分区相位 PCC 具有较好的一致性,从而保证了实 时动态定位的连续性和稳定性。





图 4.7 st02(a)、st03(b)和 st05(c)测站基于算法 1 和算法 2 的北斗双频动态 PPP 定位 误差

已有文献表明,基于分区综合改正数的北斗双频动态 PPP 定位的平均收敛时间一般不超过 10 min(陈俊平,2018;张益泽,2019),故本文将分区切换后连续 5 min(10个历元)的各方向定位误差的 RMS 值作为精度指标,对于单个测站连续 10天的定位结果,共有 50 组(10天*5次切换)计算样本,图 4.8 统计了每个测站基于算法 1 和算法 2 的前 5 min定位误差 RMS 值。可以看出,大多数测站基于算法 2 的定位精度明显优于算法 1,特别是在高程方向,算法 2 的水平方向 RMS 定位误差不超过 0.3 m,高程方向则优于 0.5 m。表 4.2 对所有测站的三维定位误差的 RMS 值进行统计,可以看到,算法 2 在分区切换后 5 min内的整体定位精度约 0.45 m,完全满足分米级精度定位要求,即证明本文提出的新算法可有效保证分区切换后实时动态定位的连续性与稳定性。



图 4.8 所有测站分区切换后基于算法 1 和算法 2 的 RMS 定位误差统计

迎电学上	三维定位误差 RMS/m			
初业	算法1	算法 2		
st01	1.36	0.29		
st02	2.00	0.80		
st03	2.44	0.30		
st04	1.55	0.41		
st05	3.06	0.39		
st06	2.29	0.66		
st07	1.33	0.31		
平均值	2.00	0.45		

表 4.2 北斗监测站

4.3.3 车载动态数据测试

为了验证提出的分区切换算法在真正的实时动态定位中的性能,于 2017 年 7月12日在新疆某地山区进行了一次时长约2h(10:35:00 至 12:30:00)的车载 实时动态定位测试,行车路线如图4.9所示。图中红色标志为架设的静态基准站, 接收机型号为司南 M300,可采集 GPS+GLONASS+BDS 三系统观测数据,基准 站精确坐标以 GPS 静态 PPP 单天解最后一个历元为准;车载测试使用的接收机 型号为司南 T300,也可采集三系统观测数据,行驶路线的最远点距离基准站约 30 km,车载轨迹的参考坐标采用 GPS+GLONASS 双系统差分定位解,其模糊度 固定阈值设为 2,模糊度固定率约 84%。



图 4.9 车载测试路线图

图 4.10 为测试期间 10:48:00 至 12:18:00 基于分区综合改正数的北斗双频动态 PPP 定位误差,其中 Zone 13、Zone 16 和 Zone 17 分别表示采用的相位 PCC 来自于 13、16 和 17 分区,由图 4.6 可知,13 和 17 分区均为 16 分区的邻近分 区;GBM 则表示采用 GFZ 分析中心提供的后处理精密轨道和钟差产品的北斗双 频动态 PPP 定位结果。可以看出,基于分区综合改正数的北斗实时动态 PPP 定 位精度在水平方向上略好于基于 GBM 事后精密产品的传统 PPP 定位,而在高程 方向上则略差。采用不同分区的相位 PCC,其水平定位误差基本相当,RMS 定 位精度可优于 0.5 m;对于高程方向定位误差,基于 17 分区的结果略差于 13 和 16 分区,主要原因是车载测试地点距离 17 分区中心最远,达到 1000 km 左右,指定区域内对流层误差的残余误差相关性降低,影响了分区综合改正数在高程方向的定位效果。需要说明的是,在 11:33:00 至 11:48:00 期间,车载接收机信号因 受到部分遮挡,其可用卫星数骤降至不足 4 颗(见图 4.10 中第 4 行子图),导致 动态定位出现多次重收敛现象。



图 4.10 分别基于分区综合改正数和 GBM 精密产品的北斗双频实时动态 PPP 定位误差

在以上车载定位测试中人为进行分区切换试验,切换时刻设置为11:15:00 和12:05:00,在11:15:00 由 Zone 16 分区切换至 Zone 13 分区,在12:05:00 由 Zone 13 分区再切换至 Zone 16 分区。图 4.11 (a)为基于算法 1 和算法 2 的北斗单频 实时动态 PPP 定位误差,可以看出,采用分区综合改正数的单频 PPP,其水平定 位误差可在 13 min 左右收敛至 1.0 m 内,当进行分区切换后,算法 1 的高程定位 误差将产生 4-5 m 的跳变,而算法 2 的水平和高程定位误差均保持了良好的连续 性。图 4.11 (b)为基于算法 1 和算法 2 的北斗双频实时动态 PPP 定位误差,可 以看出,采用分区综合改正数的双频 PPP 定位,其水平定位误差可在 3 min 内收 敛至 1.0 m,高程方向则在 5 min 内收敛至 1.0 m,当发生分区切换后,算法 2 的 定位误差连续无中断,仍能满足分米级精度定位要求。整体而言,采用新提出的 分区切换算法计算的"伪"相位 PCC 进行定位,既能适用于动、静态观测数据,又能满足单、双频定位要求,充分证明了该算法的有效性与正确性。

72



图 4.11 基于算法 1 和算法 2 的北斗车载实时动态 PPP 定位误差

4.4 本章小结

本章对相位分区综合改正数在北斗星基增强 PPP 定位的应用过程中遇到的

问题进行阐述,详细分析了分区切换造成相位 PCC 跳变的根本原因。通过定位测试指出,北斗官方 ICD 文件提供的星基增强 PPP 算法在分区切换后存在较大定位误差,严重影响实时动态定位的连续性。

根据相邻分区的相位 PCC 历元间变化量具有高度相关性这一特点,提出一种基于分区切换的北斗星基增强 PPP 定位算法,采用 7 个北斗监测站连续 10 天的静态观测数据和一段约 2 h 的车载动态数据对新算法的有效性进行了评估验证。结果表明,在静态数据模拟动态定位中,当进行分区切换时采用新算法实施双频 PPP,其水平和高程定位误差可分别优于 0.3 m 和 0.5 m,满足分米级精度定位要求;在车载动态分区切换定位测试中,单/双频 PPP 定位误差在 N、E、U方向上均能保持平稳且无明显跳变,充分说明了新算法的有效性与正确性。基于分区切换的北斗星基增强 PPP 算法可极大推广北斗星基增强分米级精度定位服务的应用领域和范围,同时满足实时动态用户的连续性与稳定性定位要求。

第5章 三种 Multi-GNSS 实时单频精密单点定位模型分析

为了满足高精度 GNSS 用户实时定位的需求, IGS 实时工作组 RTWG 于 2013 年 4 月 1 日开始向用户免费提供 RTS 服务。RTS 产品主要包括四大 GNSS 系统 的卫星轨道改正数和钟差改正数,基于广播星历叠加上述实时改正数,双频 PPP 用户即可实现实时厘米级至分米级精度定位(Chen et al, 2013; Kazmierski et al, 2018)。在大多数 PNT 服务中,由于双频 GNSS 接收机的价格昂贵,因此越来越 多的用户更倾向于使用成本低、精度高的单频接收机(van Bree et al, 2012; de Bakker et al, 2017)。

电离层延迟误差作为实时单频 PPP 中最大的误差源之一,需要进行恰当的 处理。广泛使用的电离层预报模型有 Klobuchar 模型(Klobuchar, 1987)、NeQuick 模型(Bidaine, 2012)、BDGIM(BeiDou Global Broadcast Ionospheric Delay Correction Model)模型(Yuan et al, 2019)和 NTCM-BC(Neustrelitz Total Electron Content Broadcast Model)模型(Hoque et al, 2015),上述模型在全球范围内的 电离层延迟改正精度仅 50-75%,很难满足高精度单频 PPP 用户的定位需求。为 了提高电离层误差的预报精度,CNES分析中心在 CLK93 实时数据流中提供一 种实时电离层 VTEC 产品,该产品与 IGS 事后 GIM 模型相比,其电离层改正精 度(RMS 值)在 1-3 TECU(Nie et al, 2019)。如此高精度的实时电离层产品应 用于标准单频 PPP 模型(即 Ionosphere-Corrected 模型),可实现亚米级水平定位 和米级高程定位精度。Liu et al (2019)将 CLK93 VTEC 产品作为先验约束应用 于附加电离层约束的非差非组合单频 PPP 模型(即 Ionosphere-Weighted 模型), 可获得分米级精度定位,且缩短了动态定位的收敛时间。

然而,上述研究主要针对 GPS+GLONASS 或 GPS+Galileo 的双系统静态数 据模拟动态单频 PPP 定位,缺乏对 GPS+GLONASS+BDS+Galileo 四系统组合单 频 PPP 以及真正的实时动态定位性能的研究。此外,GRAPHIC 半和法模型(即 Ionosphere-Free 模型)因能消除电离层延迟误差一阶项,而被广泛应用于单频 PPP 定位(Yunck, 1993; Cai et al, 2013),但目前仍没有相关文献对基于 IGS RTS 产 品的实时 Ionosphere-Free 单频 PPP 定位性能进行介绍。综上所述,本章将采用 CNES CLK93 数据流(实时轨道、实时钟差和实时电离层模型)对 GPS+GLONASS+BDS+Galileo 四系统组合的 Ionosphere-Corrected、Ionosphere-Free 和 Ionosphere-Weighted 实时单频 PPP 定位模型及性能进行深入研究,从观 测值残差、定位精度和收敛时间三个方面进行对比分析。

5.1 Multi-GNSS 实时单频 PPP 定位模型

与采用事后精密轨道和钟差产品的标准 PPP 原始观测方程(式(2.1))相比, 实时 PPP 因采用实时轨道和钟差,故需在式(2.1)的基础上额外考虑卫星轨道 误差,其观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_{r,j}^{s} = \rho_{r}^{s} + d\theta^{s} + c \cdot (d\overline{t_{r}} - d\overline{t^{s}}) + T_{r}^{s} + \mu_{j}^{s} \cdot I_{r,1}^{s} + (B_{r,j} - b_{j}^{s}) + \varepsilon_{P_{j}} \\ L_{r,j}^{s} = \rho_{r}^{s} + d\theta^{s} + c \cdot (d\overline{t_{r}} - d\overline{t^{s}}) + T_{r}^{s} - \mu_{j}^{s} \cdot I_{r,1}^{s} + \lambda_{j}^{s} \cdot \overline{N_{j}^{s}} + (D_{r,j} - d_{j}^{s}) + \varepsilon_{L_{j}} \end{cases}$$
(5.1)

上式中, *dθ^s*为卫星轨道误差; 其余参数含义与式 (2.1) 相同。

式(5.1)中卫星轨道和钟差均采用 CNES CLK93 实时产品,其卫星钟差的 解算基于双频无电离层组合(IF)观测值,可表示为:

$$dt_{IF}^{S} = d\overline{t^{S}} + \frac{f_{1}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \cdot b_{1}^{S} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \cdot b_{2}^{S}$$

$$= d\overline{t^{S}} + b_{1}^{S} - \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \cdot DCB_{12}^{S}$$
(5.2)

上式中, $DCB_{12}^{s} = b_{2}^{s} - b_{1}^{s}$ 为卫星端第一频点与第二频点间伪距硬件延迟;采用 CNES 实时 DCB 产品改正,即可获得单频 PPP 定位中使用的卫星钟差:

$$d\overline{t^{s}} = dt_{IF}^{s} - b_{1}^{s} + \frac{f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \cdot DCB_{12}^{s}$$
(5.3)

将式(5.3)代入式(5.1),并参考 2.2 小节对各项定位误差进行模型改正, 则式(5.1)可改写为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{k} = \mathbf{A}_{k} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot d\overline{t_{r,k}} + \mathbf{M}_{k} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k} + \mathbf{B}_{1} + \varepsilon_{P_{k}} \\ \mathbf{L}_{k} = \mathbf{A}_{k} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot d\overline{t_{r,k}} + \mathbf{M}_{k} \cdot ZWD - \mathbf{I}_{k} + \overline{\mathbf{N}_{1}} + \mathbf{D}_{1} - \mathbf{d}_{1} + \mathbf{b}_{1} + \varepsilon_{L_{k}} \end{cases}$$
(5.4)

上式中, *k* 表示历元, S 表示卫星号; $\mathbf{P}_{k} = [P_{k}^{1},...,P_{k}^{s}]^{T}$ 和 $\mathbf{L}_{k} = [L_{k}^{1},...,L_{k}^{s}]^{T}$ 分别代 表第 *k* 历元 S 颗卫星伪距和相位观测值减去计算值 (OMC); \mathbf{x}_{k} 为接收机坐标误 差, \mathbf{A}_{k} 为接收机坐标误差的方向余弦; \mathbf{e}_{s} 为单位向量; $\mathbf{M}_{k} = [M_{k}^{1},...,M_{k}^{s}]^{T}$ 为对 流层湿延迟的映射系数, *ZWD* 为对流层湿延迟误差; $\mathbf{I}_{k} = [I_{k}^{1},...,I_{k}^{s}]^{T}$ 为倾斜路径 电离层延迟误差; $\overline{\mathbf{N}_{1}} = [\overline{N_{1}^{1}},...,\overline{N_{1}^{s}}]^{T}$ 为整周相位模糊度; $\mathbf{B}_{1} = [B_{1}^{1},...,B_{1}^{s}]^{T}$ 和 $\mathbf{D}_{1} = [D_{1}^{1},...,D_{1}^{s}]^{T}$ 分别为接收机端伪距和相位硬件延迟; $\mathbf{b}_{1} = [b_{1}^{1},...,b_{1}^{s}]^{T}$ 和

由于接收机端伪距和相位硬件延迟均与频率有关,因此其对所有 CDMA 系

统(例:GPS、BDS和Galileo)的卫星是相同的,而在FDMA系统(例:GLONASS) 中每颗卫星对应一个接收机端硬件延迟。式(5.4)中未知参数过多会导致法方程 秩亏,故可将硬件延迟参数与接收机钟差和相位模糊度参数进行合并,定义出新 的待估接收机钟差*dt*,和待估模糊度参数N为(Li et al, 2019):

$$dt_r = \begin{cases} d\overline{t_r} + \mathbf{B}_1, \text{ for CDMA} \\ d\overline{t_r} + \mathbf{B}_1^1, \text{ for FDMA} \end{cases}$$
(5.5)

$$\mathbf{N} = \begin{cases} \overline{\mathbf{N}_{1}} + (\mathbf{d}_{1} - \mathbf{b}_{1}) - \mathbf{e}_{s} \cdot (\mathbf{D}_{1} - \mathbf{B}_{1}), \text{ for CDMA} \\ \overline{\mathbf{N}_{1}} + (\mathbf{d}_{1} - \mathbf{b}_{1}) - \mathbf{D}_{1} + \mathbf{e}_{s} \cdot \mathbf{B}_{1}^{1}, \text{ for FDMA} \end{cases}$$
(5.6)

式(5.5)中,**B**₁为 CDMA 系统中接收机端伪距硬件延迟,**B**¹为 FDMA 系统中第 一颗卫星对应的接收机伪距硬件延迟;与卫星端有关的硬件延迟均被模糊度参数 所吸收。

根据式(5.5)可知,接收机钟差仅包含了第一颗卫星的接收端伪距硬件延迟,对于其他 GLONASS 卫星则必须考虑不同频率间伪距硬件延迟偏差 IFCB (Inter-Frequency Code Bias)的影响,常用的估计方法有将 IFCB 模型化为频率数的线性函数,或对每颗 GLONASS 卫星估计一个伪距 IFCB 参数 (Shi et al, 2013; Zhou et al, 2018)。

将式 (5.5) 和 (5.6) 代入式 (5.4), 即可获得实时单频 PPP 的函数模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{k} = \mathbf{A}_{k}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k} + \mathbf{M}_{k} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k} + \delta \mathbf{B} + \varepsilon_{P_{k}} \\ \mathbf{L}_{k} = \mathbf{A}_{k}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k} + \mathbf{M}_{k} \cdot ZWD - \mathbf{I}_{k} + \mathbf{N} + \varepsilon_{L_{k}} \end{cases}$$
(5. 7)

上式中, $\delta \mathbf{B} = [B_1^2 - B_1^1, \dots, B_1^s - B_1^1]^T$ 为 GLONASS 系统需要估算的 IFCB 参数。

5.1.1 Ionosphere-Corrected 单频 PPP

式(5.7)中对电离层延迟误差的处理仍未进行介绍,在标准单频 PPP 定位中,通常采用外部电离层模型直接对电离层延迟误差进行改正,即为 Ionosphere-Corrected 单频 PPP 模型。由于电离层预报模型的精度有限,无法 100%消除电离层延迟误差,故 Ionosphere-Corrected 单频 PPP 的定位精度较低,高程方向只能达到米级。本章将采用 CLK93 VTEC 产品对电离层延迟误差进行改正,其四系统组合 Ionosphere-Corrected 实时单频 PPP 定位模型可表达为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{k}^{G} = \mathbf{A}_{k}^{G}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k}^{G} + \mathbf{M}_{k}^{G} \cdot ZWD + \varepsilon_{P_{k}}^{G} \\ \mathbf{P}_{k}^{R} = \mathbf{A}_{k}^{R}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \mathbf{M}_{k}^{R} \cdot ZWD + \delta\mathbf{B} + \varepsilon_{P_{k}}^{R} \\ \mathbf{P}_{k}^{C} = \mathbf{A}_{k}^{C}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \mathbf{M}_{k}^{C} \cdot ZWD + \varepsilon_{P_{k}}^{C} \\ \mathbf{P}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{E}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD + \varepsilon_{P_{k}}^{E} \end{cases}$$
(5.8)

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{k}^{G} = \mathbf{A}_{k}^{G} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k}^{G} + \mathbf{M}_{k}^{G} \cdot ZWD - \mathbf{N}_{k}^{G} + \varepsilon_{L_{k}}^{G} \\ \mathbf{L}_{k}^{R} = \mathbf{A}_{k}^{R} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \mathbf{M}_{k}^{R} \cdot ZWD - \mathbf{N}_{k}^{R} + \varepsilon_{L_{k}}^{R} \\ \mathbf{L}_{k}^{C} = \mathbf{A}_{k}^{C} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \mathbf{M}_{k}^{C} \cdot ZWD - \mathbf{N}_{k}^{C} + \varepsilon_{L_{k}}^{C} \\ \mathbf{L}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{E}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD - \mathbf{N}_{k}^{E} + \varepsilon_{L_{k}}^{E} \end{cases}$$

$$(5.9)$$

上式中,G、R、C和E分别表示GPS、GLONASS、BDS和Galileo卫星;接收 机钟差以GPS系统为基准,其它系统则需要额外估计系统间偏差ISB参数,故 多系统组合Ionosphere-Corrected实时单频PPP的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [x, dt_r^G, ISB^{R/C/E}, ZWD, \delta B, N^{G/R/C/E}]$$
(5.10)

5.1.2 Ionosphere-Free 单频 PPP

根据电离层延迟误差在伪距和相位观测值上等大反向的特性,可以采用 GRAPHIC 组合量消除 99%的电离层延迟误差,即建立 Ionosphere-Free 单频 PPP 模型。值得注意的是,GRAPHIC 观测量采用了同一频点的伪距和相位观测值, 为避免定位时法方程秩亏,还需要引入式(5.8)的伪距观测方程,其中电离层延 迟误差可用预报的 Klobuchar-8 参数模型或 CNES VTEC 实时产品进行改正。因 此,四系统组合 Ionosphere-Free 实时单频 PPP 定位模型可表达为:

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{P}_{k}^{G} + \mathbf{L}_{k}^{G}}{2} = \mathbf{A}_{k}^{G} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k}^{G} + \mathbf{M}_{k}^{G} \cdot ZWD - \frac{\mathbf{N}_{k}^{G}}{2} + \frac{\varepsilon_{P_{k}}^{G} + \varepsilon_{L_{k}}^{G}}{2} \\ \frac{\mathbf{P}_{k}^{R} + \mathbf{L}_{k}^{R}}{2} = \mathbf{A}_{k}^{R} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \mathbf{M}_{k}^{R} \cdot ZWD + \frac{\delta \mathbf{B}}{2} - \frac{\mathbf{N}_{k}^{R}}{2} + \frac{\varepsilon_{P_{k}}^{R} + \varepsilon_{L_{k}}^{R}}{2} \\ \frac{\mathbf{P}_{k}^{C} + \mathbf{L}_{k}^{C}}{2} = \mathbf{A}_{k}^{C} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \mathbf{M}_{k}^{C} \cdot ZWD - \frac{\mathbf{N}_{k}^{C}}{2} + \frac{\varepsilon_{P_{k}}^{C} + \varepsilon_{L_{k}}^{C}}{2} \\ \frac{\mathbf{P}_{k}^{E} + \mathbf{L}_{k}^{E}}{2} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{E}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD - \frac{\mathbf{N}_{k}^{E}}{2} + \frac{\varepsilon_{P_{k}}^{E} + \varepsilon_{L_{k}}^{E}}{2} \end{cases}$$
(5.11)

多系统组合 Ionosphere-Free 实时单频 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [x, dt_r^G, ISB^{R/C/E}, ZWD, \frac{\delta B}{2}, \frac{N^{G/R/C/E}}{2}]$$
(5.12)

5.1.3 Ionosphere-Weighted 单频 PPP

在非差非组合 PPP 定位模型中,电离层延迟误差常被当做未知参数进行估计,许多研究表明,无任何外部电离层约束的非差非组合估算电离层单频 PPP 模型与 Ionosphere-Free 单频 PPP 模型实质上具有等价性,理论上可对 100%的电离

层延迟误差进行消除,故其定位精度很高,可达分米级,但收敛性相对较差(Li et al, 2019; Su et al, 2019)。为了提高估算电离层单频 PPP 定位的收敛速度,可引入外部高精度电离层观测量(例:GIM 模型、CLK93 VTEC 实时产品)作为先验约束,添加虚拟观测方程(式(5.15)),建立附加电离层约束的 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 模型,关于虚拟电离层观测值的定权问题,可参考式(3.17)和(3.18)采用经典的时空约束法。综上所述,四系统组合 Ionosphere-Weighted 实时单频 PPP 定位模型可表达为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{k}^{G} = \mathbf{A}_{k}^{G} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k}^{G} + \mathbf{M}_{k}^{G} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k}^{G} + \varepsilon_{P_{k}}^{G} \\ \mathbf{P}_{k}^{R} = \mathbf{A}_{k}^{R} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \mathbf{M}_{k}^{R} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k}^{R} + \delta\mathbf{B} + \varepsilon_{P_{k}}^{R} \\ \mathbf{P}_{k}^{C} = \mathbf{A}_{k}^{C} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \mathbf{M}_{k}^{C} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k}^{C} + \varepsilon_{P_{k}}^{C} \\ \mathbf{P}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{E}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k}^{E} + \varepsilon_{P_{k}}^{E} \\ \mathbf{P}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{E}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD + \mathbf{I}_{k}^{E} + \varepsilon_{P_{k}}^{E} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \mathbf{L}_{k}^{G} = \mathbf{A}_{k}^{G} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \mathbf{M}_{k}^{R} \cdot ZWD - \mathbf{I}_{k}^{R} - \mathbf{N}_{k}^{R} + \varepsilon_{L_{k}}^{R} \\ \mathbf{L}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{R} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \mathbf{M}_{k}^{R} \cdot ZWD - \mathbf{I}_{k}^{R} - \mathbf{N}_{k}^{R} + \varepsilon_{L_{k}}^{R} \\ \mathbf{L}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD - \mathbf{I}_{k}^{C} - \mathbf{N}_{k}^{C} + \varepsilon_{L_{k}}^{C} \\ \mathbf{L}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \mathbf{M}_{k}^{E} \cdot ZWD - \mathbf{I}_{k}^{C} - \mathbf{N}_{k}^{C} + \varepsilon_{L_{k}}^{C} \end{cases} \end{cases}$$

$$(5. 14)$$

$$\mathbf{\tau}_{k} = \mathbf{I}_{k} + \varepsilon_{\tau_{k}} \tag{5.15}$$

多系统组合 Ionosphere-Weighted 实时单频 PPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [x, dt_r^G, ISB^{R/C/E}, ZWD, I^{G/R/C/E}, \delta B, N^{G/R/C/E}]$$
 (5.16)

5.2 CLK93 实时轨道和钟差

目前, CLK93 数据流提供的实时产品主要包括 5 种:卫星轨道改正数、卫星 钟差改正数、伪距偏差、相位偏差和 VTEC 改正数,其中 VTEC 改正数的播发频 度为 60 s,其余产品的播发频度均为 5 s,上述产品被定义为 RTCM-SSR 信息格 式,可采用 NTRIP 协议通过互联网向用户免费播发(RTCM Special Committee, 2016)。值得注意的是,卫星轨道/钟差改正数为精密轨道/钟差与广播星历轨道/ 钟差的差异,因此不能直接应用于 PPP 定位,需通过相关算法对实时轨道和钟差 进行恢复(Hadas et al, 2015; Kazmierski et al, 2018)。

为了评估 CLK93 实时轨道和钟差的精度,采用 BNC 软件(BKG NTRIP Client, https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download) 接收 2019 年 4 月 27 日至 5 月 10 日(DoY 117-130) 连续 14 天的 CLK93 数据,以 GFZ 分析中心提供的 GBM 精密轨道和

钟差作为参考,对 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 四系统的实时轨道和钟差产 品质量进行分析,其中轨道比较的采样率为5 min,钟差比较的采样率为30 s。 测试期间,因网络故障或传输中断,CLK93 数据的可用率约为95.25%。在 PPP 定位时,若遇到实时轨道缺失,可用 IGS 超快速精密轨道替代(EI-Mowafy et al, 2017);若出现实时钟差缺失,因超快速精密钟差的精度较低,通常需要采用已 有的 CLK93 钟差数据进行多项式拟合预报,其短期内钟差精度可满足 PPP 定位 要求(Hadas et al, 2015)。在进行 CLK93 实时产品与 GBM 精密产品比较前,需 要注意以下两点:(1) GBM 精密轨道和钟差产品均基于卫星质心(CoM),而 CLK93 实时轨道和钟差基于天线相位中心(APC),因此需要采用 igs14.atx 天线 文件进行 PCO 改正(Montenbruck et al, 2018);(2) GBM 和 CLK93 钟差产品 的时间基准不一致,每颗卫星在每个历元均需扣除所有卫星 CLK93-minus-GBM 的中位数,以消除两种钟差产品之间的系统偏差(Zhang et al, 2019)。

图 5.1 为四大 GNSS 系统每颗卫星的 CLK93 实时轨道误差在径向(Radial)、 切向(Along-track)和法向(Cross-track)分量上的精度,需要说明的是,测试期 间 CLK93 数据提供的 BDS 产品仅包含 BDS-2 卫星,且 GEO 卫星(C01-C05) 因轨道误差太大而被排除在外(Wang et al, 2019)。整体而言,GPS 和 Galileo 卫 星的轨道精度相当,且明显好于 GLONASS 和 BDS-2 卫星;在不同轨道方向上, 所有卫星的径向误差最小,其次是法向,最大的是切向,但是 GLONASS-K 型 R09 卫星是个例外,其轨道径向误差超过 0.2 m,故在后续定位试验中不再使用 该卫星。表 5.1 统计了每个 GNSS 系统所有卫星的平均 RMS 轨道误差,其中 GPS 卫星的轨道精度最高,其径向/切向/法向轨道误差可优于 2.6/3.6/2.8 cm; Galileo 卫星的径向轨道误差与 GPS 卫星类似,但切向和法向轨道误差略大,分别为 4.3 cm 和 3.3 cm; GLONASS 卫星的径向轨道误差可优于 4.5 cm,但切向和法向分 别超过 7 cm 和 11 cm,该结果与 Kazmierski et al (2018b)和 Wang et al (2019) 中基本一致;由于 BDS-2 区域跟踪网的限制,其轨道误差在三个方向均最大,切 向和法向分量甚至超过 12 cm。

80



图 5.1 不同 GNSS 卫星 CLK93 实时轨道误差在径向、切向和法向分量上的 RMS 值

CNICC 至休		STD		
GIN55 杀统	径向/cm	切向/cm	法向/cm	钟差/ns
GPS	2.59	3.61	2.75	0.10
GLONASS	4.36	11.34	7.37	0.22
BDS-2	6.00	14.71	12.74	0.30
Galileo	2.74	4.24	3.29	0.10

表 5.1 不同 GNSS 系统 CLK93 实时轨道和钟差精度统计

不同于卫星轨道的精度评估,卫星钟差的质量分析常用 STD 值作为精度指标,因为各颗卫星钟差的均值误差可被 PPP 定位中的模糊度参数所吸收(Lu et al,2017)。图 5.2 显示了四大 GNSS 系统每颗卫星的 CLK93 实时钟差误差的 STD 值,对于每个系统内所有卫星的平均 STD 钟差误差,可见表 5.1。可以看出,GPS 和 Galileo 卫星的钟差精度可优于 0.1 ns,而 GLONASS 卫星的钟差精度在 0.2 ns 左右,性能最差的 BDS-2 卫星的钟差精度高达 0.3 ns,上述 STD 精度与 Lu et al (2017)的结果基本相当。对于 CLK93 实时精密轨道和钟差的综合评估可采用 SISRE 精度指标,其统计结果详见 Kazmierski et al (2018b)。



图 5.2 不同 GNSS 卫星 CLK93 实时钟差误差的 STD 精度

5.3 CLK93 实时电离层产品

由于 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 模型中电离层约束需要附加在 STEC 上, 故需要对 CLK93 实时电离层产品的 STEC 精度进行评估。另一方面,为了参考 式 (3.17)和(3.18)对虚拟电离层观测值的先验方差进行确定,需要对 CLK93 实时电离层和事后 GIM 模型在 STEC 上的差异进行比较。因此,选取 46 个全球 分布的 MGEX 测站(见图 5.3)连续 14 天(2019 年 4 月 27 日至 5 月 10 日, DoY 117-130)的 GPS+GLONASS+BDS+Galileo 四系统观测数据,以 30 s 采样率 分别计算基于 CLK93 VTEC 产品和 CODE GIM 模型的 STEC 观测值,并统计两 者间差异的 RMS 值。需要说明的是,CODE 分析中心提供的 GIM 模型精度(约 2-6 TECU)在所有 IGS 分析中心里最高(Cai et al, 2017),故可作为 CLK93 STEC 精度评估的参考值。



图 5.3 46 个 MGEX 监测站分布图

图 5.4 显示了测试期间太阳活动指数 F10.7 和地磁指数 Kp,可以看出,整个测试期间内 F10.7 不超过 80 sfu, Kp 指数在绝大多数时间内小于 3,故说明该段时间的太阳活动较为温和且电离层变化不大。



图 5.4 测试期间太阳活动指数 F10.7 和地磁指数 Kp

图 5.5 对测试期间内 46 个 MGEX 测站 CLK93 STEC 误差的均值和 RMS 值 进行统计,可以看出,全球范围内 CLK93 STEC 误差的均值变化为-4.46~2.85 TECU,所有测站的平均误差约-0.72 TECU;在 RMS 统计方面,所有测站的平均 精度约 3.4 TECU,误差最大的测站(HKSL 站)约 5.9 TECU,其位于中国东南 部,处于低纬度地区(22.4°N);误差最小的测站(KIRO 站)约 1.44 TECU, 位于高纬度地区(67.9°N)。通常来说,CLK93 STEC 误差在低纬度区域明显大

于中高纬度区域,这与其他电离层模型的特点相一致(Rovira-Garcia et al, 2020)。 另一方面,虽然处于中高纬度地区,但是靠近海岸线的 KOKB 站和 TONG 站的 CLK93 STEC 误差却明显较大,其主要原因是海洋周围的监测站较少,在没有足 够观测值的情况下,使用球谐函数模型进行电离层建模很难精细化表达电离层特 性(Wang et al, 2020b)。



图 5.5 测试期间 46 个 MGEX 测站 CLK93 STEC 误差的(a)均值和(b) RMS 值

5.4 三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 定位性能比较

5.4.1 试验数据及处理策略

为了评估和比较三种 Multi-GNSS 实时单频 PPP 模型的定位性能,选取如图 5.3 所示 46 个 MGEX 测站自 2019 年 4 月 27 日至 5 月 10 日(DoY 117-130)连续 14 天的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 观测数据,以 30 s 采样率进行单系统 或多系统实时动态定位。需要说明的是,观测数据为事后采集,采用的实时精密 轨道/钟差产品由广播星历叠加 CLK93 实时轨道/钟差改正数快速恢复所得,在定 位端以逐历元读文件方式进行模拟实时动态定位。

定位测试采用 Net_Diff 软件(http://202.127.29.4/shao_gnss_ac/Net_diff/Net_diff.html),观测值的随机模型采用式(2.52)和(2.53),详细的数据处理策

略及模型见表 5.2。GPS/Galileo 伪距和相位观测值的先验精度分别设置为 0.3 m 和 0.003 m (Zhou et al, 2019; Kiliszek et al, 2020);由于 GLONASS 和 BDS-2 卫星的实时轨道和钟差精度较低,其观测值先验精度分别设置为 GPS 的 2 倍和 4 倍 (Cao et al, 2018)。需要注意的是,由于 BDS-2 GEO 卫星的实时轨道和钟 差精度太低,本次测试未使用 C01-C05 卫星数据。此外,为了方便叙述,定义 SF1 和 SF2 分别为每个 GNSS 系统第一频点和第二频点的观数数据,其中 SF1 包括 L1、B1 和 E1 观测值, SF2 包括 L2、B2 和 E5a 观测值。

参数	处理策略及模型
频点	GPS/GLONASS: L1/L2; BDS: B1/B2; Galileo: E1/E5a
截止高度角	10°
卫星轨道和钟差	CLK93实时轨道/钟差改正数+广播星历
对流层延迟误差	干延迟: GPT2w + SAAS + VMF模型改正(Boehm et al, 2015) 湿延迟:随机游走过程,估计
电离层延迟误差	Ionosphere-Corrected和Ionosphere-Free模型: CLK93 VTEC Ionosphere-Weighted模型: CLK93 VTEC + 随机游走过程,估计
接收机端PCO/PCV	GPS和GLONASS: igs14.atx文件改正 BDS-2和Galileo: 采用GPS改正值
卫星端PCO/PCV	GPS、GLONASS和Galileo: igs14.atx文件改正 BDS-2 PCO采用ESA改正值,BDS-2 PCV未考虑
DCB改正	CLK93实时DCB产品
潮汐改正	考虑固体潮、海潮和极潮(Gerard and Luzum, 2010)
相对论效应	模型改正
相位缠绕	模型改正
测站参考坐标	SINEX周解文件
参数估计	Kalman滤波
测站坐标误差	白噪声,估计
接收机钟差	白噪声,估计
系统间偏差ISB	随机游走过程,估计
GLONASS IFCB	模型化为频率号的线性函数
相位模糊度	浮点解

表 5.2 Multi-GNSS 实时单频 PPP 数据处理策略及模型

5.4.2 定位精度

图 5.6 为 2019 年 5 月 6 日 GMSD 测站 GPS、GPS+GLONASS 和 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 SF1 PPP 定位误差,其中 IC 表示

Ionosphere-Corrected 模型, IF 表示 Ionosphere-Free 模型, IW 表示 Ionosphere-Weighted 模型; G、R、C和E分别表示 GPS、GLONASS、BDS-2和 Galileo。整体而言,不同的单频 PPP 定位模型,其水平定位误差可优于 0.5 m,高程定位误差在 1.0 m 左右。IF 和 IW 模型的定位精度相当,均优于 IC 模型,尤其体现在高程方向,其主要原因是 IF 和 IW 模型中电离层延迟误差通过 GRAPHIC 观测量和参数估计两种方法被完全消除,而 IC 模型中使用的 CLK93 VTEC 产品精度有限,残余的电离层误差影响了定位精度。相比于 IW 模型, IF 模型的定位精度稍差,主要是因为 IF 模型中 GRAPHIC 观测量引入了一半的伪距噪声,其远远大于非差非组合 IW 模型中相位观测值噪声。相比于 GPS 单系统,GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 组合单频 PPP 的定位误差在 N、E、U 方向上均有所提高,同时增强了定位稳定性,避免了个别历元出现定位跳变,这都归功于可用卫星数的增加和星座几何构型的优化。



图 5.6 GMSD 测站采用不同单频 PPP 模型基于 SF1 的实时动态定位误差

理论上,电离层延迟误差作为与频率相关的误差项,其对不同频点的单频 PPP 定位的影响也不同。以 GMSD 测站 2019 年 5 月 6 日的观测数据为例,计算 基于 SF1 和 SF2 的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 PPP 定位误 差,见图 5.7。可以看出, IF 和 IW 模型不同频点的定位误差基本相当,采用非 差非组合观测值的 IW 模型的误差曲线更平滑,其定位精度也略优于 IF 模型。
IC 模型的 SF1 和 SF2 定位误差差异较大,主要体现在高程方向,同时 SF2 定位 误差明显大于 SF1,其主要原因是采用 CLK93 VTEC 产品计算的电离层延迟误 差基于第一频点,当进行 SF2 定位时,需乘以频率转换系数,从而导致电离层延 迟误差的增大,而 IF 和 IW 模型中电离层延迟误差通过 GRAPHIC 观测量和参数估计两种方法被精确处理,故其 SF1 和 SF2 定位精度基本一致。



图 5.7 GMSD 测站 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 SF1 和 SF2 PPP 定位误差

为了定量分析不同模式下单频 PPP 的定位精度,对 46 个 MGEX 测站连续 14 天的动态定位误差进行 RMS 统计,结果见表 5.3。需要说明的是,为了避免 不同的收敛速度对定位精度的影响,截取每天第 2-24 h 的定位误差进行统计。可 以看出,对于单系统或多系统定位,IW 模型的三维定位精度优于 IC 和 IF 模型, 尤其体现在高程方向; IF 和 IW 模型的 N、E、U 定位误差在 SF1 和 SF2 上十分 接近,而 IC 模型的三维定位误差在 SF1 和 SF2 间相差超过 0.3 m。相比于 GPS 单系统,GPS+GLONASS 和 GPS+Galileo 双系统基于 SF1 的 IC/IF/IW 模型三维 定位精度可分别提高 9.7/9.3/10.1%和 7.3/12.4/10.7%。而 BDS-2 系统的引入,对 GPS 定位精度的提升很小,尤其体现在 IF 和 IW 模型中,其 GPS+BDS-2 与 GPS 的定位精度基本相当,其主要原因是 CLK93 中 BDS-2 卫星的轨道和钟差精度较低,且本次测试仅使用 9 颗 C06-C14 卫星,其在全球范围内对星座几何构型的 优化不强。当采用 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 四系统组合时,不同模型的

单频 PPP 定位精度均会再次提高,四系统组合 IC 模型的水平和高程定位精度可分别优于 0.3 m 和 0.5 m;对于 IF 和 IW 模型,四系统组合的水平定位精度基本相当,约 0.2 m,高程定位精度则分别优于 0.40 m 和 0.33 m。整体而言,通过多系统组合,实时动态单频 PPP 可满足分米级精度定位要求。

GNSS	定位		SF1 RI	MS/m		SF2 RMS /m						
系统	模型	Ν	Е	U	3D	Ν	Е	U	3D			
G	IW	21.1	25.8	40.4	52.3	21.5	24.9	39.6	51.4			
G	IF	23.3	23.4	48.0	58.3	24.7	26.3	48.1	60.1			
G	IC	25.9	31.7	57.1	70.2	40.3	50.2	85.9	107.4			
GR	IW	19.6	23.6	35.6	47.0	19.5	22.6	35.4	46.3			
GR	IF	21.4	21.5	43.4	52.9	21.6	21.7	41.1	51.3			
GR	IC	25.0	29.4	50.4	63.4	36.6	45.4	72.0	92.7			
GC	IW	21.4	26.3	40.6	52.9	21.1	25.4	38.1	50.5			
GC	IF	23.1	23.2	47.6	57.8	24.5	26.1	47.7	59.6			
GC	IC	26.6	29.1	53.1	66.1	41.2	44.9	76.3	97.6			
GE	IW	20.2	22.9	35.3	46.7	18.6	21.0	34.3	44.3			
GE	IF	20.5	20.7	42.0	51.1	21.9	22.9	41.7	52.4			
GE	IC	24.9	30.4	51.9	65.1	39.0	48.9	77.3	99.3			
GRCE	IW	18.8	20.7	31.9	42.9	17.9	19.8	32.2	41.8			
GRCE	IF	18.9	19.1	38.5	47.0	19.7	20.0	37.3	46.6			
GRCE	IC	24.7	27.4	47.4	60.0	36.2	41.8	66.6	86.5			

表 5.3 不同模式下实时动态单频 PPP 定位精度统计

图 5.8 展示了 46 个 MGEX 测站连续 14 天在不同定位模式下基于 SF1 的动态单频 PPP 三维 RMS 定位误差,需要说明的是,由于 GPS+BDS-2 的定位精度 与单 GPS 几乎一样,故未展示 GPS+BDS-2 的结果;另一方面,由于 IC 模型的 定位精度明显差于 IF 和 IW 模型,故也未展示 IC 的结果。可以看出,对于 IF 模型而言,单 GPS 系统共有 32 个测站的三维定位精度超过 0.5 m,而四系统组合 后将锐减至 14 个。通过附加 CLK93 VTEC 电离层约束建立 IW 模型,不管单系 统还是多系统,几乎所有测站的三维定位精度均有所提高,经统计,仅有 4 个测 站在四系统组合 IW 模型下的三维定位精度超过 0.5 m。对于 IW 模型,海岸线附近的测站虽然处于中高纬度地区,但其三维定位精度却更低,其主要原因是由于 海洋附近监测站太少,CLK93 实时电离层产品的精度降低所导致,这也与 5.3 小节 CLK93 STEC 精度评估的结果相符合。



图 5.8 46 个 MGEX 测站实时动态单频 SF1 PPP 三维定位精度(DoY 117-130, 2019)(a) 单 GPS IF 模型;(b)单 GPS IW 模型;(c) GPS+GLONASS IF 模型;(d) GPS+GLONASS IW 模型;(e) GPS+Galileo IF 模型;(f) GPS+Galileo IW 模型;(g) GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo IF 模型;(h) GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo IW 模型

5.4.3 观测值残差

理论上,单频 PPP 模型的观测值残差包含一些未模型化误差(如观测噪声) 和电离层残余误差,故可对 IC、IF 和 IW 模型的观测值残差进行统计分析(Pan et al, 2019)。以 GMSD 测站 2019 年 5 月 6 日的观测数据为例,分别基于 IC、 IF 和 IW 模型计算 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 四系统的伪距和相位观测值 残差,其概率分布如图 5.9 所示。整体而言,三种实时单频 PPP 模型的伪距和相 位观测值残差均近似服从正态分布。由于 IW 模型采用原始观测值,故其伪距和 相位观测值残差的均值和 RMS 值都小于 IC 和 IF 模型,这也解释了为何 IW 模 型的定位精度最高。值得注意的是,IW 模型的 RMS 相位观测值残差小于 0.5 mm, 远小于相位观测值的理论精度 3.0 mm,说明本文采用的随机游走过程估计电离 层延迟参数的方法可以吸收大部分未模型化误差,从而进一步提高实时单频 PPP 的定位精度。对于伪距观测值残差, IC 和 IF 模型的精度相当,但基于 SF2 的残 差精度明显低于 SF1,说明非第一频点的电离层延迟误差被放大;对于相位观测 值残差,IC 模型的 RMS 误差是 IF 模型的 2-3 倍,其主要原因是 IC 模型中包含 了部分电离层残余误差,而 IF 模型中电离层延迟误差被完全消除。





图 5.9 GMSD 测站基于 IC、IF 和 IW 模型的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 伪距和相位观 测值残差概率分布图(Doy 126, 2019)

5.4.4 收敛性

在实时动态单频 PPP 定位中,除了定位精度,用户更关心的是收敛时间。以 LEIJ 测站 2019 年 5 月 6 日的观测数据为例,基于 IC、IF 和 IW 模型进行 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 SF1 PPP 定位,每隔 6 h 重新初始 化所有卫星的模糊度信息,单天内可观察到 4 次收敛,其定位误差如图 5.10。可 以看出,IW 模型的收敛速度最快,3 次重收敛的定位误差几乎没有明显中断, 主要原因是电离层延迟误差在 IW 模型中通过参数估计的方法被完全消除,恰当 的电离层先验约束又降低了参数间相关性,从而提高了收敛速度(Shi et al, 2012)。 相比于 IC 模型,IF 模型的初始化及重收敛误差更大,需要 20-30 min 才能收敛 至 1.0 m,且定位误差的波动更为剧烈,主要是因为 GRAPHIC 观测量引入了一 半的伪距噪声。IC 模型采用的非差非组合观测值,定位误差曲线较为平滑,由于 CLK93 实时电离层产品精度较高(接近 GIM 模型),其初始化和重收敛速度都 更接近于 IW 模型。理论上,当电离层模型的精度足够高,可消除 99%以上电离 层延迟误差时,IC 模型的收敛速度将最快,可以超过 IW 和 IF 模型(Li et al, 2019)。



图 5.10 LEIJ 测站基于 IC、IF 和 IW 模型的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 SF1 PPP 定位误差(DoY 126, 2019)

图 5.11 统计了测试期间所有测站基于 IF 和 IW 模型实时动态单频 PPP 定位 的平均收敛时间,其中 2D 表示 N 和 E 方向定位误差收敛至 0.5 m 且连续 30 个 历元不再超过 0.5 m 的平均收敛时间,3D 表示在满足 2D 条件的基础上,U 方向 定位误差收敛至 1.0 m 且连续 30 个历元不再超过 1.0 m 的平均收敛时间。需要 说明的是,由于 IC 模型的定位精度较低,很多测站无法满足 3D 收敛条件,故 未对 IC 模型的收敛时间进行统计。整体而言,无论单系统还是多系统定位,IW 模型的收敛速度均快于 IF 模型;在不同频点的统计结果中,IW 模型在 SF1 和 SF2 模式下的收敛速度基本相当,而 IF 模型在 SF1 模式下的收敛速度却快于 SF2, 其主要原因是 IF 模型中 SF2 的伪距观测值残差较大,其包含的电离层残余误差 从 SF1 转换至 SF2 时被放大。通过多系统数据融合,IF 和 IW 模型的平均收敛 时间均有所减少,相比于单 GPS 系统,GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 的 IF/IW 实时动态单频 PPP 的 3D 收敛时间可减少 39.9/31.3% (SF1 模式)和 46.3/38.1%*

(SF2 模式)。四系统组合 IW 模型在 SF1 和 SF2 模式下的平均收敛时间为 24.8 min 和 24.1 min,相比于 IF 模型,其收敛速度分别提高了 26.2%和 28.9%。

92



图 5.11 基于 IF 和 IW 模型的实时动态单频 PPP 平均收敛时间统计

5.4.5 船载动态数据测试

上述评估均为静态站模拟动态定位,为了评估 IC、IF 和 IW 模型在真正的 实时动态定位中的性能,于 2020 年 1 月 15 日在日本东京港基于船载动态观测数 据进行了实时动态单频 PPP 定位测试。图 5.12 为船载接收机运动轨迹图,测试 时间自 GPST(GPS Time) 00:47:19 至 05:55:49,参考站的接收机型号为 TRIMBLE NETR9,船载移动站的接收机型号为 TRIMBLE SPS855,上述接收机均可采集 GPS、GLONASS、BDS-2、Galileo 和 QZSS 观测数据,采样率为 1 s。使用 Net_Diff 软件基于五系统观测值进行双差 RTK 解算获得参考站精确坐标,其坐标精度约 3-4 cm (Zhang et al, 2019b)。



图 5.12 船载接收机运动轨迹图 (DoY 15, 2020)

具体的数据处理策略及设置见表 5.2,由于测试期间 CLK93 数据流中 Galileo 实时轨道和钟差产品均缺失,故本次测试仅实施 GPS+GLONASS+BDS-2 实时动 态单频 PPP 定位。此外,由于船载接收机观测噪声较大,将严重影响 IF 模型的 定位性能,故在数据预处理阶段需对伪距观测值进行 CNMC 实时滤波(常志巧, 2015)。图 5.13 为不同模式下实时动态单频 SF1 PPP 定位误差,其 N、E、U 方 向的 RMS 定位精度标记在图上;图 5.14 为测试期间三系统可用卫星数和对应的 PDOP (Position Dilution of Precision)值。可以看出, IF 和 IW 模型的定位精度 基本相当,其水平和高程 RMS 定位误差分别小于 0.3 m 和 0.5 m,高程方向精度 明显好于 IC 模型。在 GPST 00:58:31 至 00:58:37 时船载接收机信号被大桥遮挡 (如图 5.15),可用卫星数急剧下降,PDOP 值超过 2,因此 IC 和 IF 模型均出现 明显的定位重收敛现象,定位误差最大超过 3 m。然而,IW 模型的定位误差并 未出现中断,充分说明了附加电离层约束的非差非组合单频 PPP 模型可有效缩 短重收敛时间,保证实时动态 PPP 定位的连续性和稳定性。此外,若 Galileo 实 时轨道和钟差产品可用,随着星座几何构型的优化,基于四系统的实时动态单频 PPP 定位性能将进一步得到提高。

94



图 5.13 在不同定位模式下基于船载动态观测数据的实时动态单频 SF1 PPP 定位误差(DoY 15, 2020)



图 5.14 船载测试期间 GPS+GLONASS+BDS-2 可用卫星数及 PDOP 值



图 5.15 GPST 00:58:00 至 00:58:59 期间基于 IC (绿色)、IF (黄色)和 IW (红色) 模型的 船载实时动态单频 PPP 定位轨迹图

5.5 本章小结

本章首先对 CLK93 实时轨道、钟差和电离层产品的精度进行评估,然后建 立了 Ionosphere-Corrected、Ionosphere-Free 和 Ionosphere-Weighted 三种广泛使用 的 Multi-GNSS 单频 PPP 定位模型,分别从观测值残差、定位精度和收敛性三个 方面进行比较。采用 46 个 MGEX 测站连续 14 天的静态观测数据和一段约 5 h 的船载动态观测数据,基于 IC、IF 和 IW 模型进行实时动态单频 PPP 定位测试, 其主要结论有:

(1) 对于 CLK93 实时轨道, GPS 和 Galileo 卫星的径向、切向和法向误差的 RMS 值分别优于 3.0 cm、4.5 cm 和 3.5 cm; GLONASS 和 BDS-2 卫星的精度较低,其径向仅优于 4.5 cm 和 6.0 cm。对于 CLK93 实时钟差, GPS 和 Galileo 卫星处于同一水平,其 STD 精度约 0.1 ns,GLONASS 和 BDS-2 卫星分别为 0.22 ns 和 0.3 ns。对于 CLK93 实时电离层产品,以 CODE GIM 模型为参考,其 STEC 在全球范围内的精度约 3.4 TECU,且具有中高纬度地区的电离层精度明显好于低纬度地区的特点。

(2) IC、IF 和 IW 三种模型的伪距/相位观测值残差均近似服从正态分布, IW 模型的伪距/相位观测值残差明显小于 IC 和 IF 模型,尤其是相位观测值残差, 其 RMS 值不足 0.5 mm,远小于相位观测值本身的精度 3.0 mm,说明本文采用 的随机游走过程估计电离层延迟误差参数的方法可吸收大部分未模型化误差; IC 和 IF 模型基于 SF2 的伪距观测值残差 RMS 值明显大于 SF1,说明电离层延迟误 差从 SF1 转换至 SF2 后被放大;对于相位观测值残差, IC 模型的 RMS 误差是 IF 模型的 2-3 倍,主要是因为 IC 模型中包含了部分电离层模型改正后的残余误 差。

(3) IF 和 IW 模型中电离层延迟误差被完全消除,故其在 SF1 和 SF2 模式下的定位精度基本相当,而 IC 模型因包含了部分电离层残余误差,故在 SF2 模式下的定位精度略大于 SF1。相比于单系统,多系统组合的定位精度在 IC、IF 和 IW 模型中均得到提高,对于 IF 和 IW 模型,采用 MGEX 静态数据的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 PPP 定位,其水平和高程 RMS 定位精度可分别优于 0.2 m 和 0.4 m,对于 IC 模型,则分别优于 0.3 m 和 0.5 m。在船载实时动态单频 PPP 测试中,使用 GPS+GLONASS+BDS-2 观测值的 IF/IW 模型的定位精度明显好于 IC 模型,其N、E、U 方向的 RMS 定位精度分别为 0.27/0.26 m、0.21/0.26 m 和 0.49/0.48 m,即说明多系统融合的单频 PPP 定位可满足实时动态分米级精度定位要求。

(4) IW 模型通过附加外部电离层约束降低了待估参数间相关性,同时采用 非差非组合观测值的噪声较小,有效提高了收敛速度,相比于 IF 模型, IW 模型 的平均收敛时间可至少缩短 25%。另一方面, IW 模型在重收敛时,其定位误差 基本不会产生跳变,有效保证了实时动态 PPP 定位的连续性和稳定性。

97

第6章 北斗实时电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频定位的影响分析

伪距单点定位(SPP)和精密单点定位(PPP)作为两种绝对定位技术都拥有 各自的优势和局限,SPP广泛应用于实时 GNSS 服务,如车载导航、手机定位等, 但其定位精度只能达到米级; PPP 利用了高精度载波相位观测值可实现分米级至 厘米级,甚至毫米级精度定位,但其受精密轨道和钟差产品的时延影响很难提供 实时服务。目前,大部分 GNSS 用户和应用都在追求低成本、高精度和实时性, 因此实时单频 PPP 技术受到越来越多的关注。

在单频定位中, 电离层延迟误差的恰当处理是一个巨大的挑战, 因为其对 GNSS 信号的影响在太阳活跃期甚至可以达到 100 m (Liu et al, 2016)。在单频 **PPP**中,通常有三种处理方式:(1)直接使用外部电离层模型对电离层延迟误差 进行修正,广泛使用的有 Klobuchar 预报模型和实时/事后 GIM 模型。近些年来, 北斗二号系统通过改进 Klobuchar 模型,建立了适用于中国区域的 BDS-Klobuchar 模型,被广泛应用于北斗 PNT 服务。为了满足北斗实时高精度单频用户的需求, 北斗广域差分星基增强系统提出了 BDS 格网电离层模型,其主要服务于中国及 周边区域。对于 Galileo 系统建立的 NeQuick 模型,其不仅具备实时性,而且对 电离层延迟误差的改正精度可达 70%以上。采用上述电离层模型实施单频 PPP 定位可获得水平分米级,高程米级的定位精度。(2)不依赖于外部电离层模型, 根据电离层延迟误差对伪距和相位观测值的影响等大反向的特点,在定位端使用 GRAPHIC 观测值即可消除电离层延迟误差,该方法可大大提高单频 PPP 定位精 度,但由于引入了一半的伪距噪声,其收敛时间将被延长。(3)将电离层延迟误 差当做参数进行估计,直接使用原始观测值建立附加电离层约束的单频 PPP 模 型,其不仅可以完全消除电离层延迟误差的影响,还能加快收敛速度,同时提取 的电离层误差观测量可用于大气建模。

目前,大多数研究主要集中在使用 GIM 模型的传统单频 PPP 定位,还没有相关文献提及 BDS-Klobuchar 模型和 BDS 格网电离层模型对 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 的影响,因此,本文将填补这一空白,并重点分析上述两种北斗电离层模型作为附加约束时对 Multi-GNSS 单频 PPP 定位性能的影响。

98

6.1 北斗电离层模型

基于中国区域北斗监测站网建立的实时电离层模型主要由两个,分别为 BDS-Klobuchar 模型和 BDS 格网电离层模型,其均为北斗二号的产物,故主要 服务中国及周边区域。

6.1.1 BDS-Klobuchar 电离层模型

BDS-Klobuchar模型是一种基于大地测量参考框架的改进版 Klobuchar模型, 也包含($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$)8个参数,由中国区域北斗监测站网数据计算 而成,并通过 BDS 广播电文进行播发。相比于传统的 GPS-Klobuchar 模型,其 在算法和表达式上有诸多相似之处,例如,两种模型都采用余弦曲线的振幅和周 期来表示白天的电离层延迟变化,而夜间的电离层延迟则用经验常数表示。

基于 B1I 频点的 BDS-Klobuchar 电离层垂直延迟改正 I_z^{ν} 的计算公式为 (BDS-SIS-ICD, 2019):

$$I_{z}^{V}(t) = \begin{cases} 5 \times 10^{-9} + A_{2} \cdot \cos\left[\frac{2\pi \cdot (t - 50400)}{A_{4}}\right], & |t - 50400| < \frac{A_{4}}{4} \\ 5 \times 10^{-9} & , & |t - 50400| \ge \frac{A_{4}}{4} \end{cases}$$
(6.1)

$$t = \text{MOD}[(t_E + \lambda_M \cdot 43200/\pi), 86400]$$
 (6.2)

上式中, t为电离层穿刺点 (IPP) M 处的地方时, 取值范围 0-86400 s; t_E 为接收 机测量时刻的 BDT, 单位 s; λ_M 为 IPP 的地理经度, 单位为弧段。

式(6.1)中 A₂和 A₄分别为白天电离层延迟余弦曲线的幅度和周期,其计算 公式为:

$$A_{2} = \begin{cases} \sum_{n=0}^{3} \alpha_{n} \cdot \left| \frac{\phi_{M}}{\pi} \right|^{n}, & A_{2} \ge 0\\ 0, & A_{2} < 0 \end{cases}$$
(6.3)

$$A_{4} = \begin{cases} 172800 , A_{4} \ge 172800 \\ \sum_{n=0}^{3} \beta_{n} \cdot \left| \frac{\phi_{M}}{\pi} \right|^{n}, 172800 > A_{4} \ge 72000 \\ 72000 , A_{4} < 72000 \end{cases}$$
(6.4)

式 (6.3) 和 (6.4) 中的 ϕ_M 为 IPP 的地理纬度,单位为弧段,其与式 (6.2) 中 λ_M 的计算公式为:

$$\phi_{M} = \arcsin(\sin\phi_{U} \cdot \cos\psi + \cos\phi_{U} \cdot \sin\psi \cdot \cos A)$$
(6.5)

$$\lambda_{M} = \lambda_{U} + \arcsin(\frac{\sin\psi \cdot \sin A}{\cos\phi_{M}})$$
(6.6)

上式中, ϕ_U 为接收机的地理纬度, λ_U 为接收机的地理经度,单位均为弧度;A为卫星方位角,单位为弧度; ψ 为接收机和 IPP 的地心张角,单位为弧度,其计算公式为:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin(\frac{R}{R+h} \cdot \cos E) \tag{6.7}$$

上式中, *R* 为地球半径, 取值 6378 km; *E* 为卫星高度角, 单位弧度; *h* 为 BDS-Klobuchar 建模时设定的单层球壳高度, 取值 375 km。

定位时,上述计算的电离层垂直延迟误差 I_z^{ν} 需要通过投影函数转换至传播路径上 $I_{BU}(t)$,其计算公式为:

$$I_{B1I}(t) = \frac{I_{z}^{V}(t)}{\sqrt{1 - (\frac{R}{R+h} \cdot \cos E)^{2}}}$$
(6.8)

BDS-Klobuchar 模型与 GPS-Klobuchar 模型最大的不同是更新频率,BDS-Klobuchar 模型的 8 个参数每 2 h 更新一次,而 GPS-Klobuchar 模型平均 10 天更新一次,在太阳活跃期会缩短至 5 天。相关研究表明,BDS-Klobuchar 模型在中纬度地区具有更高的电离层改正精度,而在电离层活跃区域的精度相对较低。由于 BDS-Klobuchar 模型综合考虑了多项中国区域电离层的复杂特性,其对电离层延迟误差的平均改正精度可超过 60% (Wu et al, 2013)。

6.1.2 BDS 格网电离层模型

北斗广域差分星基增强系统为服务北斗实时高精度单频用户,将中国区域自 北纬 7.5-55°和东经 70-145°分别按 2.5°和 5°进行划分,通过 GEO 卫星以 6 min 更新频率向用户播发 320 个格网点(IGP)的垂直电离层延迟改正。单频用 户定位时,先对电离层穿刺点附近的 4 个 IGP 值进行内插获取垂直电离层延迟 改正,再按投影函数将其转换至倾斜路径即可,详细算法可参考 Wu et al(2014)。

图 6.1 为 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日编号 IGP 16 的格网电离层改正值时 序图,采样率为 6 min。单天解呈现出很强的规律性,每天中午都接近电离层延 迟误差的最大值,且白天的电离层延迟明显大于夜晚。电离层延迟误差的最大值 与最小值间的差异超过 2.2 m,整个测试期间的 STD 值约 0.44 m,图中单天解的 均值曲线(红色)可以很好的反映测试期间电离层的活跃程度。相关研究表明, BDS 格网电离层模型在中国 95%的区域的 RMS 改正精度可优于 0.5 m (Wu et al, 2014)。



图 6.1 编号 IGP 16 连续一个月的格网电离层改正值(DoY 32-58, 2019)

6.2 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 定位模型

广泛使用的 Multi-GNSS 单频 PPP 定位模型有标准 Ionosphere-Corrected 单频模型、基于 GRAPHIC 观测量的 Ionosphere-Free 单频模型和附加电离层约束的 非差非组合 Ionosphere-Weighted 模型,其详细公式可参考本文第 5.1 小节。

对于 GNSS 单频 SPP 定位,其第 j 频点的原始观测方程为:

$$P_{r,j}^{s} = \rho_{r}^{s} + d\theta^{s} + c \cdot (dt_{r} - dt^{s}) + T_{r}^{s} + \mu_{j}^{s} \cdot I_{r,1}^{s} + \varepsilon_{P_{j}}$$
(6.9)

$$\begin{cases} dt_r = d\overline{t_r} + B_{r,j} \\ dt^S = d\overline{t^S} + b_j^S \end{cases}$$
(6.10)

上式中,各项参数的含义与式(2.1)相同。需要说明的是,与单频 PPP 模型不同,单频 SPP 中卫星端伪距硬件延迟 *b_j* 是通过广播星历中提供的 TGD 参数进行改正。

单频 SPP 定位因只采用伪距观测值和广播星历轨道及钟差,其定位精度只能达到米级。为了追求解算的实时性和高效性,通常采用外部电离层和对流层模

型直接对大气延迟误差进行改正,而无需再估算电离层参数和对流层延迟湿分量。 此外,对于 GLONASS 卫星的 IFCB 参数也无需估计,其对米级精度定位的影响 不大。综上所述,以 GPS 卫星的接收机钟差为基准,四系统组合的 SPP 定位模 型可表达为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{k}^{G} = \mathbf{A}_{k}^{G} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot dt_{r,k}^{G} + \varepsilon_{P_{k}}^{G} \\ \mathbf{P}_{k}^{R} = \mathbf{A}_{k}^{R} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{R}) + \varepsilon_{P_{k}}^{R} \\ \mathbf{P}_{k}^{C} = \mathbf{A}_{k}^{C} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{C}) + \varepsilon_{P_{k}}^{C} \\ \mathbf{P}_{k}^{E} = \mathbf{A}_{k}^{E} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{e}_{s} \cdot (dt_{r,k}^{G} + ISB_{k}^{E}) + \varepsilon_{P_{k}}^{E} \end{cases}$$
(6. 11)

上式中,各项参数的含义与式(5.4)相同。因此,GPS+GLONASS+BDS+Galileo 单频 SPP 的待估参数为:

$$\mathbf{X} = [x, dt_r^G, ISB^{R/C/E}]$$
(6. 12)

6.3 不同电离层模型对 Multi-GNSS 单频定位的影响

6.3.1 试验数据及处理策略

为了评估 BDS-Klobuchar 电离层模型和 BDS 格网电离层模型对 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 定位的影响,同时加入 GPS-Klobuchar 模型和 GIM 模型作为参考 进行对比分析。选取 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日(DoY 32-58)中国区域内 2 个 MGEX 测站和 8 个 CMONOC 测站的 GPS、GLONASS 和 BDS-2+3 观测数据 进行 Multi-GNSS 动态单频 SPP 和静态单频 PPP 定位,其中 MGEX 测站和 CMONOC 测站分别采用 LEICA GR50 和 TRIMBLE NETR9 接收机,所有测站的 位置分布见图 6.2。需要说明的是,单频 PPP 定位测试仅针对 Ionosphere-Free 和 Ionosphere-Weighted 模型,因为根据本文第五章相关结论可知,Ionosphere-Corrected 模型的定位性能明显不如 IF 和 IW 模型。



图 6.2 2 个 MGEX 测站(蓝色)和 8 个 CMONOC 测站(红色)的位置分布图

为了反映测试期间电离层的活跃程度,图 6.3 给出了测试期间太阳活动指数 F10.7 和地磁指数 Kp 的时序图,其中所有时刻的 F10.7 不超过 72 sfu,绝大部分 时间内 Kp 值小于 3,故证明测试期间太阳活动较为平和,且电离层的变化相对 稳定。



图 6.3 测试期间太阳活动指数 F10.7 和地磁指数 Kp

多系统卫星轨道及钟差产品采用 GFZ 分析中心提供的 brdm 广播星历和 GBM 精密星历; 电离层模型共使用 4 种: BDS-Klobuchar 模型、GPS-Klobuchar 模型、BDS 格网电离层模型和 CODE GIM 模型, 值得注意的是, 在 Ionosphere-

Weighted 单频 PPP 模型中,需要对虚拟电离层观测值进行定权,其中 BDS-Klobuchar 模型和 GPS-Klobuchar 模型的电离层先验方差设置为电离层延迟改正 值的平方,因为上述两种模型对电离层延迟误差的改正精度在 50-60%左右;对于 BDS 格网电离层模型和 GIM 模型,采用式(3.17)和(3.18)的时空约束法 进行定权,其中 $\sigma_{ion,0}^2$ 和 $\sigma_{ion,1}^2$ 对于 GIM 模型可设置为 0.09,对于 BDS 格网电离层 可设置为 0.25 (Wang et al, 2019c)。

定位测试采用 Net_Diff 软件(http://202.127.29.4/shao_gnss_ac/Net_diff/Net_diff.html),观测值的随机模型采用式(2.52)和(2.53),具体的数据处理策略及模型见表 6.1。GPS 和 GLONASS 的相位观测值先验精度设置为 0.003 m, 伪距观测值精度分别设置为 0.3 m 和 0.6 m (Pan et al, 2017)。由于 BDS 卫星轨道及钟差产品的精度明显低于 GPS 系统,故对其观测值进行降权处理 (Montenbruck et al, 2018),其中 IGSO 和 MEO 卫星的伪距观测值精度设置为 0.6 m,GEO 卫星的伪距观测值精度设置为 1.2 m;对于相位观测值精度,IGSO 和 MEO 卫星均为 0.005 m,而 GEO 卫星为 0.01 m。为了方便叙述,现定义 SF1 和 SF2 分别表示每个 GNSS 系统第一频点和第二频点的观测数据。

参数	策略/模型
频点	GPS和GLONASS: L1/L2; BDS: B1/B2
采样率	30s
截止高度角	10°
卫星轨道和钟差	SPP: brdm广播星历 PPP: GBM精密星历
TGD改正	SPP: 广播星历参数
DCB改正	PPP: IGS MGEX后处理DCB产品
PCO/PCV改正	GPS和GLONASS: igs14.atx文件 BDS PCO采用ESA改正值,BDS PCV未考虑
对流层延迟误差	干延迟: GPT2w + SAAS + VMF模型改正(Boehm et al, 2015) 湿延迟:随机游走过程,估计
电离层延迟误差	SPP:不同电离层模型改正 PPP:不同电离层模型改正 + 随机游走过程,估计
潮汐改正	考虑固体潮、海潮和极潮(Gerard and Luzum, 2010)
相对论效应	模型改正
相位缠绕	模型改正
测站参考坐标	MGEX测站: SINEX周解文件 CMONOC测站: 已知精确坐标,精度优于2 cm

表 6.1 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 数据处理策略及模型

参数估计	SPP: 最小二乘; PPP: Kalman滤波
测站坐标误差	SPP: 白噪声,估计 PPP: 常数,估计
接收机钟差	白噪声,估计
系统间偏差ISB	随机游走过程,估计
GLONASS IFCB	模型化为频率号的线性函数
相位模糊度	浮点解

6.3.2 Multi-GNSS 单频 SPP 定位

根据表 6.1 可知, 在单频 SPP 定位中除了所用的电离层改正模型不同, 其余 的数据处理策略均保持一致,故可通过单频 SPP 的定位性能来反映不同电离层 改正模型的精度。图 6.4 为 2019 年 2 月 5 日 SNMX 测站在不同模式下基于单系 统和多系统的单频 SF1 SPP 定位误差,其中 G、R 和 C 分别表示 GPS、GLONASS 和 BDS 系统; GPS-Klo 表示 GPS-Klobuchar 模型, BDS-Klo 表示 BDS-Klobuchar 模型, BDS-Grid 表示 BDS 格网电离层模型, GIM 表示 CODE 后处理 GIM 模型。 整体而言, 单频 SPP 的高程定位误差明显大于水平定位误差: 通过多系统数据融 合, 增加可用卫星数, 优化星座几何构型, 不同电离层模型下的 GPS+GLONASS+BDS 单频 SPP 的定位精度均有明显提高;在采用不同电离层改 正模型的单频 SPP 定位中, GIM 模型的定位误差曲线最为平滑, 尤其在高程方 向,明显小于其他电离层模型。虽然 GPS-Klo 和 BDS-Klo 均基于 Klobuchar 模 型,但 BDS-Klo 单频 SPP 的定位误差明显小于 GPS-Klo,尤其在高程方向和夜 间(LT: 21:00-05:00), 原因一是 GPS-Klo 模型的参数源于经验模型, 而 BDS-Klo 模型的参数由北斗地面监测站网的实际观测数据计算而来,更能反映中国区 域短期内复杂的电离层变化特性;原因二是BDS-Klo模型参数每2h更新一次, 而 GPS-Klo 模型需要 5-10 天,作为一种预报模型,其精度在长时间外推后很难 得到保证。



图 6.4 SNMX 测站采用不同电离层模型基于(a)单系统和(b)多系统的单频 SF1 SPP 定位误差(DoY 36, 2019);

图 6.5 为 10 个测站在 2019 年 2 月 5 日基于单系统或多系统的可见卫星数平 均值和 PDOP 平均值。可以看出,由于测试区域在中国境内,故 BDS 卫星的平 均可见数目大于 GPS 卫星,所有测站平均可观测到 10 颗以上 BDS 卫星,对应 的 PDOP 值小于 1.5。相比于 BDS 和 GPS 系统,GLONASS 可见卫星数目最少, 其 PDOP 值在 SF1 和 SF2 频点均超过 2.4,当采用多系统数据融合,其平均 PDOP 值可保持在 1.5 以下。



图 6.5 10 个测站不同模式下基于 SF1 和 SF2 的平均可见卫星数和平均 PDOP 值统计(DoY 36, 2019)

表 6.2 统计了 10 个测站在测试期间(DoY 32-58)基于不同电离层模型的单频 SPP 在 N、E、U 及三维(3D)方向的 RMS 定位误差。可以看出,基于 GIM 模型的 GPS+GLONASS+BDS 单频 SPP 的定位精度在各个方向上均为最高,其水平 RMS 定位误差可优于 0.5 m,高程 RMS 定位误差可优于 0.8 m。一方面是由于多系统组合定位改善了星座几何构型,降低了 PDOP 值;另一方面是因为

GIM 模型作为后处理电离层产品,具有最高的电离层延迟改正精度。在 3 种单系统单频 SPP 定位中,GLONASS 的定位精度最低,其主要原因是在中国区域GLONASS 卫星的可见性最差,平均 PDOP 值大于 2.4,此外,GLONASS 卫星的广播星历轨道和钟差精度也较低,同时因采用 FDMA 技术而出现的 IFCB 偏差对伪距定位的性能也有一定影响。

随着 2017 年更多的 BDS-3 卫星的陆续发射,在 2018 年底 BDS 已开始提供 全球 PNT 服务。本次测试所用的 10 个测站均可接收到 BDS-3 卫星的 B1 和 B3 频点观测值,而 BDS-2 卫星仅提供 B1 和 B2 频点观测值,故如图 6.5 所示,在 中国区域基于 B1 频点的 BDS 可见卫星数大于 GPS 卫星数 3-6 颗,而基于 B2 频 点的 BDS 可见卫星数与 GPS 卫星数基本相当,这也是 BDS 单频 SF1 SPP 定位 精度优于 GPS 的原因,而在 PDOP 值相近的 SF2 模式下,由于 BDS-2 卫星中 5 颗 GEO 卫星的轨道和钟差精度太低,导致其定位误差略大于 GPS 单频 SF2 SPP 定位。

相比于 GPS-Klo 模型,基于 BDS-Klo、BDS-Grid 和 GIM 模型的 GPS 单频 SF1/SF2 SPP 的三维定位精度可分别提高 31.8/37.9%、36.3/49.7%和 42.2/54.3%, 其中 SF2 的定位精度提升比例明显大于 SF1,其主要原因是 SF2 的电离层延迟 误差经频率转换后被放大。对于 GLONASS 单频 SF1/SF2 SPP 定位,基于 BDS-Klo、BDS-Grid 和 GIM 模型的定位精度均比 GPS-Klo 模型提高了至少 25%。整体而言,基于 GIM 模型的单频 SPP 的定位精度最优,而基于 BDS-Klo 和 BDS-Grid 模型的定位精度明显好于 GPS-Klo 模型,通过多系统组合定位,GPS+GLONASS+BDS 单频 SPP 的三维定位精度最高可优于 1.0 m。

CNECSS	电离层模型		SF1 R	MS/m		SF2 RMS/m			
UN35示机		Ν	Е	U	3D	Ν	Е	U	3D
G	GPS-Klo	0.883	0.512	2.347	2.583	1.200	0.606	3.437	3.750
G	BDS-Klo	0.770	0.474	1.508	1.762	1.016	0.546	2.090	2.398
G	BDS-Grid	0.732	0.506	1.384	1.645	0.839	0.583	1.647	1.942
G	GIM	0.684	0.456	1.246	1.493	0.835	0.494	1.469	1.764
R	GPS-Klo	1.358	1.705	3.604	4.224	1.689	1.758	4.626	5.258
R	BDS-Klo	1.288	1.694	3.213	3.856	1.611	1.736	4.051	4.698
R	BDS-Grid	1.312	1.701	3.019	3.705	1.547	1.733	3.659	4.340
R	GIM	1.164	1.681	2.875	3.529	1.336	1.735	3.273	3.940
С	GPS-Klo	0.777	0.519	2.007	2.245	1.191	0.664	3.436	3.721
С	BDS-Klo	0.669	0.490	1.422	1.654	1.007	0.632	2.383	2.670

表 6.2 基于不同电离层模型的单频 SPP 定位精度统计

С	BDS-Grid	0.628	0.499	1.261	1.496	0.912	0.591	1.739	2.054
С	GIM	0.593	0.473	1.110	1.347	0.892	0.589	1.672	1.986
GR	GPS-Klo	0.855	0.510	2.263	2.499	1.172	0.601	3.269	3.577
GR	BDS-Klo	0.738	0.469	1.453	1.701	0.998	0.536	2.024	2.333
GR	BDS-Grid	0.694	0.505	1.364	1.612	0.786	0.575	1.559	1.841
GR	GIM	0.633	0.451	1.171	1.407	0.787	0.487	1.424	1.704
GC	GPS-Klo	0.724	0.420	1.989	2.201	1.094	0.540	3.077	3.376
GC	BDS-Klo	0.601	0.370	1.368	1.551	0.891	0.482	1.576	1.887
GC	BDS-Grid	0.515	0.379	0.907	1.111	0.694	0.457	1.343	1.581
GC	GIM	0.495	0.349	0.788	0.998	0.706	0.426	1.185	1.455
GRC	GPS-Klo	0.718	0.419	1.952	2.165	1.080	0.541	2.907	3.215
GRC	BDS-Klo	0.597	0.367	1.333	1.516	0.864	0.471	1.496	1.803
GRC	BDS-Grid	0.494	0.370	0.873	1.070	0.671	0.447	1.293	1.525
GRC	GIM	0.490	0.347	0.781	0.989	0.701	0.423	1.176	1.443

第6章 北斗实时电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频定位的影响分析

6.3.3 Multi-GNSS 单频 PPP 定位

在 Multi-GNSS 静态单频 PPP 定位测试中,共有 5 种模型: Ionosphere-Free 模型,附加 GPS-Klo、BDS-Klo、BDS-Grid 和 GIM 电离层约束的 Ionosphere-Weighted 模型。图 6.6 为 2019 年 2 月 4 日 00:00:00 至 04:00:00 期间 QHGC 测站 基于不同模式的静态单频 SF1 PPP 定位误差,可以看出,基于 GRAPHIC 观测量 的 IF 模型的定位收敛时间明显大于附加电离层约束的 IW 模型,其中附加 GIM 约束的 IW 模型在 N、E 和 U 方向的收敛速度均最快,而附加 GPS-Klo 和 BDS-Klo 约束的 IW 模型的收敛时间基本相当,其主要原因是两种电离层模型的改正 精度相似,均在 50%左右。在多系统组合定位中,GPS+GLONASS+BDS 静态单 频 PPP 定位的收敛速度明显快于单系统,尤其在高程方向,基本可在 15 min 内 收敛至分米级。



图 6.6 QHGC 测站基于不同模式的静态单频 SF1 PPP 定位误差(DoY 35, 2019)

为了定量比较不同静态单频 PPP 模型的定位精度和收敛速度,收敛标准定 义为水平方向定位误差小于 0.3 m 且不再超过 0.3 m, 同时高程方向定位误差小 于 0.5 m 且不再超过 0.5 m,收敛时间即为单天解第一个历元至收敛历元,定位 精度则为收敛历元至最后一个历元的 RMS 定位误差。图 6.7 给出了 10 个测站在 测试期间(DoY 32-59)基于不同模式的静态单频 SF1/SF2 PPP 定位的平均收敛 时间,表 6.3 统计了所有测站所有天在不同模式下静态单频 PPP 的 RMS 定位误 差。可以看出, 基于 Ionosphere-Free 模型的 BDS 单频 PPP 的定位性能最差, 其 定位精度在水平和高程方向分别超过5 cm 和 15 cm, 平均收敛时间大于 100 min, 主要原因是 BDS 卫星精密轨道和钟差产品的精度较其它系统更低,且包含 5 颗 静地高轨的 GEO 卫星,同时 GRAPHIC 观测值增加了一半的伪距噪声,影响了 PPP 定位的初始化时间;次要原因是 BDS 卫星的 PCV 误差暂时无法得到改正。 相比于单 GPS 系统, GLONASS 单频 PPP 的定位精度和收敛速度均略低, 主要 体现在高程方向,对于附加电离层约束的 GLONASS IW 模型,其收敛速度较 IF 模型仅提高约 15%, 即在 35 min 左右可满足收敛条件。值得注意的是, 对于 GLONASS 系统,附加不同电离层约束的 IW 模型的收敛时间却基本相当,并未 出现电离层模型精度越高就收敛越快的现象,其主要原因是电离层倾斜误差和 IFCB 都与频率相关,在进行参数估计时会存在较强的相关性,从而限制了 IW 模 型对收敛速度的提高(Schonemann et al, 2011)。

通过多系统组合定位,星座几何构型得到优化,PDOP 值相应减小,不仅可

提高定位精度还能缩短收敛时间,对于 IF 模型,GPS+GLONASS+BDS 单频 PPP 的收敛时间较单 GPS 系统可提高 32%左右。将电离层先验信息作为约束条件引入单频 PPP 定位建立 IW 模型,其附加 GPS-Klo、BDS-Klo、BDS-Grid 和 GIM 电离层约束的 GPS+GLONASS+BDS 单频 SF1 PPP 的收敛时间较 IF 模型可分别提高 11.2%、11.9%、21.3%和 39.6%。附加 BDS-Grid 和 GIM 电离层约束的单频 PPP 的三维 RMS 定位精度基本相当,与 IF 模型的定位精度差异不超过 1 cm,而附加 GPS-Klo 和 BDS-Klo 电离层约束的定位精度则相对较低,与 IF 模型的差异达到 2 cm,这主要是受 Klobuchar 模型自身精度较低的影响。整体而言,GPS+GLONASS+BDS 静态单频 PPP 的水平定位精度在 1-3 cm,高程定位精度在 4-5 cm;附加 GIM 电离层约束的单频 PPP 模型拥有最快的收敛速度和最高的定位精度,附加 BDS-Grid 电离层约束的单频 PPP 定位性能明显优于 GPS-Klo 和 BDS-Klo 模型。



图 6.7 测试期间 10 个测站基于不同模式的单频 PPP 定位的平均收敛时间

表 6.3 基于不同模式的单频 SPP 定位精度统计									
GNSS		SF1 RMS/cm				SF2 RMS/cm			
系统	定位惧型	N	Е	U	3D	N	Е	U	3D
G	Iono-Free	1.43	3.06	5.01	6.09	1.56	3.04	9.13	9.91
G	GPS-Klo-Cons	2.12	4.12	5.14	6.98	2.30	4.90	9.99	11.54
G	BDS-Klo-Cons	2.14	3.58	5.18	6.70	2.37	4.40	10.29	11.67
G	BDS-Grid-Cons	2.43	3.36	5.01	6.58	2.25	4.00	8.80	10.15
G	GIM-Cons	2.24	3.34	4.88	6.38	2.34	3.59	9.10	10.31
R	Iono-Free	1.80	3.64	5.92	7.19	1.91	3.86	8.59	9.62
R	GPS-Klo-Cons	2.44	4.58	7.14	8.89	2.38	5.20	10.31	11.86
R	BDS-Klo-Cons	2.38	4.14	7.34	8.80	2.38	4.76	10.52	11.81
R	BDS-Grid-Cons	2.49	4.12	6.62	8.18	2.56	4.69	8.86	10.45
R	GIM-Cons	2.34	4.09	6.44	8.05	2.29	3.85	9.23	10.43
С	Iono-Free	5.83	8.20	18.29	20.92	5.59	7.20	15.47	18.04
С	GPS-Klo-Cons	6.80	9.33	19.52	22.77	5.67	8.52	15.31	18.82
С	BDS-Klo-Cons	6.84	8.88	19.88	22.90	5.37	7.04	15.56	18.31
С	BDS-Grid-Cons	7.08	9.31	18.07	21.58	5.90	8.18	15.33	18.52
С	GIM-Cons	6.47	8.66	17.61	20.96	5.37	7.43	14.61	17.65
GR	Iono-Free	1.40	2.46	4.85	5.66	1.27	2.47	8.56	9.14
GR	GPS-Klo-Cons	1.87	3.64	5.15	6.66	1.89	4.35	9.97	11.14
GR	BDS-Klo-Cons	1.85	3.15	5.27	6.47	1.98	4.15	10.28	11.49
GR	BDS-Grid-Cons	1.89	2.88	4.79	5.96	2.02	3.37	8.73	9.76
GR	GIM-Cons	1.83	3.01	4.63	5.91	1.89	3.13	8.94	9.86
GC	Iono-Free	1.44	3.04	4.92	6.01	1.55	3.03	9.00	9.78
GC	GPS-Klo-Cons	2.08	4.10	5.14	6.95	2.27	5.02	9.66	11.36
GC	BDS-Klo-Cons	2.10	3.70	5.19	6.76	2.22	4.48	10.16	11.52
GC	BDS-Grid-Cons	2.40	3.45	5.05	6.65	2.41	4.28	8.81	10.35
GC	GIM-Cons	2.16	3.34	4.89	6.35	2.33	3.48	9.10	10.27
GRC	Iono-Free	1.42	2.43	4.84	5.65	1.40	2.40	8.55	9.11
GRC	GPS-Klo-Cons	1.89	3.83	5.01	6.62	1.96	4.29	10.06	11.28
GRC	BDS-Klo-Cons	1.97	3.16	5.12	6.38	2.00	3.96	10.37	11.45
GRC	BDS-Grid-Cons	2.02	2.98	4.99	6.21	2.15	3.50	8.43	9.58
GRC	GIM-Cons	1.95	2.91	4.64	5.90	2.11	3.27	8.77	9.79

第6章 北斗实时电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频定位的影响分析

112

6.4 本章小结

本章对 2 种北斗实时电离层模型(BDS-Klobuchar 模型和 BDS 格网电离层 模型(BDS-Grid))进行简要介绍,同时引入 GPS-Klobuchar 模型和 CODE GIM 模型作为参考,建立了 Multi-GNSS 单频 SPP 模型、Ionosphere-Free 单频 PPP 模 型、附加 GPS-Klobuchar、BDS-Klobuchar、BDS-Grid 和 GIM 电离层约束的 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 模型,重点分析了上述 4 种电离层模型在中国区域 对 Multi-GNSS 单频 SPP 和 PPP 定位的影响。

选取中国境内 2 个 MGEX 测站和 8 个 CMONOC 测站连续 28 天的多系统观 测数据进行不同模式的单频 SPP/PPP 定位,结果表明:采用 GIM 模型的单频 SPP 具有最高的定位精度,采用 BDS-Klobuchar 和 BDS-Grid 模型的单频 SPP 的定位 精度明显优于 GPS-Klobuchar 模型,尤其体现在 N 和 U 方向。虽然 GPS-Klobuchar 和 BDS-Klobuchar 模型具有相似的原理和公式,但 BDS-Klobuchar 模型的参数每 2 h 更新一次且源于实测数据,故其电离层改正精度明显优于 GPS-Klobuchar 模 型,尤其在夜晚的精度更高。

在单频 PPP 定位中,通过引入外部电离层先验信息,建立虚拟电离层观测方 程,可以很好的降低参数间相关性,同时采用的非差非组合原始观测值具有较低 的噪声影响,故 Ionosphere-Weighted 模型可以很好的加快 PPP 定位收敛速度。 相比于 Ionosphere-Free 模型,附加 GPS-Klobuchar、BDS-Klobuchar、BDS-Grid 和 GIM 电离层约束的 GPS+GLONASS+BDS 单频 SF1 PPP 定位的收敛速度可分 别提高 11.2%、11.9%、21.3%和 39.6%。由于 GLONASS IFCB 和电离层延迟参 数均与频率有关,故在参数估计时存在很强的相关性,从而导致 GLONASS Ionosphere-Weighted 单频 PPP 模型相比于 Ionosphere-Free 模型收敛速度的提高 较为有限,通常不超过 15%。附加 BDS-Grid 和 GIM 电离层约束的 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 定位精度与 Ionosphere-Free 模型基本相当,均优于附加 GPS-Klobuchar 和 BDS-Klobuchar 模型的结果。整体而言,通过多系统融合数据处理, 附加外部高精度电离层约束等方法,可以有效提高单频 PPP 的定位精度和收敛 速度,其 GPS+GLONASS+BDS 静态单频 PPP 的水平和高程定位精度分别在 1-3 cm 和 4-5 cm。

第7章 结论与展望

7.1 结论

随着各大 GNSS 系统的完善和 PPP 技术的发展,其在精密授时、精密定轨、 大气反演、地球动力学和灾害监测等领域具有突出优势和独特价值,为了进一步 拓宽 PPP 技术的应用领域,实时性、高精度和低成本已成为 GNSS 用户的首要 目标和需求。

北斗卫星导航系统 (BDS) 在设计之初就综合考虑了基本导航服务和广域差 分星基增强服务 (SBAS) 的一体化,其中,基本导航服务仅提供优于 10 m 的定 位精度,很难满足实时高精度用户的定位需求。为此,BDS 广域差分系统提出四 重星基增强参数:卫星轨道改正数、等效钟差改正数、格网电离层改正数和分区 综合改正数,基于上述改正数叠加广播星历即可实现北斗实时动态分米级精度定 位。由于 BDS-2 仅包含 14 颗可用卫星,故在城市、山区等信号遮挡严重的区域 很难获得理想的星座几何构型,故严重影响了北斗 SBAS PPP 的定位性能。因此, 可通过引入 GPS 卫星观测值进行多系统融合数据处理,提高北斗实时动态定位 的性能。因为分区综合改正数的服务半径不超过 1000 km,且用户遵循"就近原 则"进行匹配,故当某一分区综合改正数出现缺失或动态用户进行跨区运动时, 北斗 SBAS 用户都需要进行分区切换,以使用邻近分区的综合改正数,为了保证 实时动态定位的连续性和稳定性,本文提出了一种基于分区切换的北斗 SBAS PPP 定位新算法。

除了各国自建的广域差分星基增强系统外, IGS 实时工作组于 2013 年开始 向用户免费提供 Multi-GNSS RTS 服务,该服务主要包含 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星的实时轨道改正数、实时钟差改正数和实时电离层 VTEC 信息。 采用广播星历叠加上述改正数即可实现双频 PPP 实时动态厘米级精度定位,但 双频接收机价格昂贵,普通导航定位用户一般不会选择,故采用低成本单频接收 机的单频 PPP 技术成为近些年的研究热点。本文首先对 RTS CLK93 数据流中四 大 GNSS 系统的卫星轨道和钟差产品进行精度评估,再比较实时电离层 VTEC 产 品与后处理 GIM 模型在 STEC 精度上的差异,最后将上述 RTS 产品应用于三种 Multi-GNSS 单频 PPP 模型,对比分析不同模型在定位精度和收敛速度上的差异。 单频 SPP/PPP 技术受电离层延迟误差的影响较大,故可作为电离层模型精度的 间接评价指标,本文重点分析了四种电离层产品在中国区域对 Multi-GNSS 单频

114

SPP/PPP 定位性能的影响。此外,还评估了 GPS 民用广播星历轨道、钟差和信号间偏差参数的精度。具体研究成果及结论如下:

- 详细阐述了北斗分区综合改正数的计算原理和流程,建立了基于北斗 (1)四重星基增强参数的单/双频精密单点定位模型,采用中国区域7个 iGMAS 测站和 27 个 CMONOC 测站连续一个月的观测数据,对北斗 分区综合改正数定位性能进行评估。结果表明:北斗双频静态 SBAS PPP 的 RMS 定位精度在水平和高程方向分别优于 0.12 m 和 0.18 m, 双频动态 SBAS PPP 定位精度略低,分别优于 0.16 m 和 0.20 m;基 于 Ionosphere-Free 和 Ionosphere-Weighted 模型的北斗单频 SBAS PPP 定位精度基本相当,其水平和高程定位精度在静态模式下分别优于 0.15 m 和 0.22 m, 动态模式下分别优于 0.33 m 和 0.40 m; 整体而言, 北斗分区综合改正数定位在单/双频、动/静态模式下均能满足分米级 精度定位要求。在收敛性方面,北斗双频动态 SBAS PPP 定位误差在 水平方向平均 15 min 收敛至 0.5 m,高程方向则需要 20 min;单频动 态 SBAS PPP 中, Ionosphere-Weighted 模型收敛速度快于 Ionosphere-Free 模型,两种模型均可在 30 min 内收敛至水平定位误差小于 0.8 m, 高程定位误差小于 1.0 m。
- (2)将 GPS 系统引入分区综合改正数计算和定位数据处理,建立了北斗/GPS 组合分区综合改正数定位模型,选取澳大利亚地区 15个 MGEX测站连续 20 天的观测数据,采用离线模拟实时动态定位的策略进行试验。结果表明:BDS+GPS 双频动态 SBAS PPP 的三维定位误差收敛至 1.0 m 所需的时间平均不超过 5 min,收敛后 RMS 定位精度在水平和高程方向分别优于 0.05 m 和 0.15 m,两项指标均明显优于单系统定位。随着分区综合改正数服务半径的扩大,BDS+GPS 双频动态 SBAS PPP 的定位精度会略微下降,但对收敛时间的影响不大,在 1800 km 范围内,双系统组合定位的三维定位误差仍小于 0.3 m,平均收敛时间不超过 5 min。当分区综合改正数的播发时延每增加 30 s,BDS+GPS 双频动态 SBAS PPP 的水平和高程定位误差就增大 0.4 cm,平均收敛时间增加约 2 min,当播发时延增加至 180 s,双系统组合定位仍能满足分米级精度定位要求。
- (3) 详细介绍了分区切换对北斗分区综合改正数定位的影响,研究发现相 邻分区的分区综合改正数历元间变化量存在高度相关性,其平均相关 系数超过 0.7,基于该特性提出了一种适用于分区切换的北斗 SBAS PPP 定位新算法,采用中国区域 7 个北斗监测站连续 10 天的静态观

测数据和一段时长约 2h 的车载动态观测数据,验证了新算法的有效 性和正确性。结果表明:相比于传统北斗 SBAS PPP 定位模型,新算 法在分区切换后的三维定位误差约 0.45 m,满足分米级精度定位要 求,有效避免了分区切换引起的定位跳变,保证了北斗用户实时动态 定位的连续性和稳定性。

- (4) 以 GBM 精密轨道和钟差产品为参考,对 RTS CLK93 实时轨道和钟差精度进行评估,同时比较了 CLK93 实时电离层产品与后处理 GIM模型在 STEC 上的精度差异。结果表明:GPS 和 Galileo 卫星的实时轨道和钟差精度基本相当,明显优于 GLONASS 和 BDS-2 卫星,其RMS 轨道误差在径向、切向和法向分量上分别优于 3.0 cm、4.5 cm 和 3.5 cm,STD 钟差误差约 0.1 ns;对于 GLONASS 卫星,其径向 RMS 轨道误差约 4.5 cm,切向和法向均超过 7.0 cm,STD 钟差误差约 0.2 ns;受限于区域观测网定轨,BDS-2 卫星的径向 RMS 轨道误差最大,达到 6.0 cm,切向和法向均超过 10.0 cm,STD 钟差误差更是 GPS 卫星的三倍。在电离层平静期,CLK93 实时电离层产品与 GIM 模型的STEC 差异约 3.4 TECU (RMS),中高纬度地区 MGEX 测站的电离层STEC 精度明显优于低纬度地区,海岸线附近 MGEX 测站的电离层STEC 精度明显优于内陆地区。
- (5) 采用 CLK93 实时轨道、钟差和电离层产品,选取 46 个 MGEX 测站 连续 14 天的静态观测数据和一段约 6 h 的船载动态观测数据,进行 Ionosphere-Corrected、Ionosphere-Free 和 Ionosphere-Weighted 实时动 态单频 PPP 定位测试。结果表明:无论单系统还是多系统定位, IW 模型的定位精度均最优, IF 模型次之, IC 模型最差;在不同频点的 单频 PPP 定位中, IF 和 IW 模型的定位精度基本相当, 而 IC 模型在 SF2 模式下的定位精度明显低于 SF1, 主要是由于 SF2 电离层延迟误 差经过频率转换被放大;相比于单 GPS 系统,基于 IC、IF 和 IW 模 型的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时动态单频 PPP 定位精度均 明显提高,其水平和高程方向 RMS 定位误差可分别优于 0.3 m 和 0.5 m, 满足实时动态分米级精度定位要求。在观测值残差分析中, IW 模 型的伪距/相位观测值残差明显小于 IC 和 IF 模型,尤其是相位观测 值残差 RMS 值不足 0.5 mm, 远小于其理论精度 3.0 mm, 说明采用 随机游走过程估计电离层延迟参数的方法可吸收大部分未模型误差, 从而提高了实时动态单频 PPP 的定位精度。相比于 IC 和 IF 模型, IW 模型通过使用原始观测值和附加外部高精度电离层约束,其收敛

速度得到明显提高,较 IF 模型可提高 26%左右;通过多系统融合数 据处理,基于 IF 和 IW 模型的 GPS+GLONASS+BDS-2+Galileo 实时 动态单频 PPP 定位的收敛时间比单 GPS 系统可缩短 30%以上。

- (6) 主要介绍了两种北斗实时电离层模型: BDS-Klobuchar 和 BDS 格网 电离层模型,同时以 GPS-Klobuchar 和 GIM 模型为参考,选取中国 区域2个MGEX测站和8个CMONOC测站连续一个月的观测数据, 研究了四种电离层模型在中国区域对 Multi-GNSS 单频 SPP/PPP 定位 的影响。结果表明: 在单频 SPP 定位中, 不管单系统还是多系统, GIM 模型的定位精度最优, BDS 格网电离层模型的精度次之; 虽然 BDS-Klobuchar 和 GPS-Klobuchar 模型有诸多相似之处,但 BDS-Klobuchar 模型的定位精度在高程方向和夜间时段明显优于 GPS-Klobuchar 模型; 通过多系统组合定位, GPS+GLONASS+BDS-2+3 单 频 SPP 的三维 RMS 定位精度可优于 1.0 m。在静态单频 PPP 定位中, Ionosphere-Free 模型的收敛时间明显大于附加不同电离层约束的 Ionosphere-Weighted 模型,其中附加 GIM 约束的 IW 模型的收敛速度 最快,附加 BDS 格网电离层约束的收敛速度次之,而附加 BDS-Klobuchar 和 GPS-Klobuchar 约束的收敛速度基本相当;相比于单 GPS 系统, GPS+GLONASS+BDS-2 单频 PPP 的收敛速度明显加快, 尤其 在高程方向,可在 15 min 内收敛至 0.5 m,收敛后的水平定位精度在 1-3 cm, 高程定位精度在 4-5 cm。
- (7)选取 2016年1月至 2018年3月共约2年的 CNAV 和 LNAV 数据,以 GBM 精密轨道和钟差产品为参考,对比分析上述两种广播星历的轨道和钟差误差,同时以 DLR 和 CODE 后处理 DCB 产品为参考,对不同的 ISC 参数精度进行评估。结果表明: CNAV 和 LNAV 的卫星钟差精度基本相同,其 RMS 值约 0.4 m; CNAV 轨道的切向误差明显大于 LNAV,径向和法向误差两者基本相同;两种广播星历的 SISRE (orb)精度(RMS)可优于 0.3 m, SISRE 精度约 0.5 m,相比于 2014-2015年的 SISRE 值(0.6 m),精度提高了约 16.7%。在 ISC 参数的精度评估中,ISCL1C/A 的精度最高,可优于 0.1 ns, ISCL2C 和 ISCL5Q5 的精度次之,分别优于 0.4 ns 和 0.35 ns。

7.2 进一步研究计划

鉴于个人科研水平有限, 部分研究并未充分展开或深入, 拟计划在未来的科

研工作中进一步完成如下工作:

- (1)本文主要对北斗广域差分系统播发的 BDS-2 星基增强参数及定位性 能进行研究,而目前 BDS-3 卫星的四重星基增强参数已向授权用户 提供服务,故后续工作需要对 BDS-2+3 全星座北斗分区综合改正数 定位性能展开评估与研究。
- (2) 针对分区切换对北斗实时动态 SBAS PPP 定位性能的影响,本文提出 了一种基于定位端的改进算法,但产生分区切换的根本原因还是在于 系统端参数的缺失,因此可以在系统端对缺失的相位分区综合改正数 进行实时拟合与推估,从根本上解决参数缺失的问题。
- (3) 附加电离层约束的 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 模型在定位精度和 收敛速度上均优于 Ionosphere-Corrected 和 Ionosphere-Free 模型,但 其提升比例主要取决于外部电离层模型的精度,故可采用区域参考站 网的多系统观测数据进行区域电离层建模,利用更高精度的区域电离 层产品作为附加约束,进一步提高实时单频 PPP 的收敛速度。
- (4) 在 Ionosphere-Weighted 单频 PPP 模型中,电离层虚拟观测值的定权 方法均基于经验值,如常数法、时空约束法或逐步松弛法,并未准确 表达各个测站上不同卫星的电离层特性,因此,可以对电离层虚拟观 测值的定权方法进行深入研究,以提高实时单频 PPP 的收敛速度。
- (5)为了验证三种单频 PPP 模型在真实环境下的定位性能,后续工作将 采用低成本单频接收机进行定位测试,平衡单频 PPP 收敛时间与硬 件成本的关系,确定一种高性价比的单频 PPP 模型与数据处理策略。

致谢

十一月十六日, 立冬已过, 上海的天气依旧温暖舒适, 感受不到丝毫寒意。 不知不觉间, 已在同济学习生活五年有余, 这是人生中最重要的五年, 也是个人 成长最快的五年。回想当初保研择校时的犹豫和迷茫, 现在发自内心的全是幸运 与感恩!

诚挚的感谢导师王解先教授,您在科研上的指导和生活上的关心让我倍感温暖与鼓舞,感谢您给予我硕转博的机会,让我有更好的平台去潜心科研,去编织自己的梦想。王老师渊博的知识,严谨的治学态度,低调儒雅的气质和高超的编程能力深深影响了包括我在内的所有师门弟子,您的学术造诣和处世态度是我终生学习的榜样。

诚挚的感谢导师陈俊平研究员,您在我的课题研究、论文写作、程序编写、 国内外学术会议交流等诸多方面倾注了大量心血和时间,让我有幸能参与到北斗 二号系统相关建设项目,在拓宽视野、积累科研经验的同时,丰富了我的人生阅 历并坚定了自己的职业追求。陈老师平易近人,治学严谨,对待学生认真负责, 在学术问题的讨论上细致入微,总能启发我不断思考,并提出创新性意见和想法, 令我受益匪浅,是我科研路上的榜样与领路人!同时也要感谢澳大利亚新南威尔 士大学的 Jinling Wang 教授和加拿大卡尔加里大学的 Yang Gao 教授给予我海外 博士生联合培养的机会,非常遗憾由于疫情原因未能成行,希望以后有机会再到 贵校进行学术交流。

特别感谢张益泽博士的支持和帮助,尤其在学术上,张师兄作为"PPP 百科 全书",总能耐心的为我答疑解惑。张师兄不仅理论基础扎实,编程能力出众, 而且治学严谨、为人随和,乐于分享自己的科研成果与想法,是一位有态度有追 求的科研工作者,始终是我的良师益友和榜样!同时也要感谢李浩军、王虎和王 明华三位师兄,你们不仅与我分享了自己的诸多经历,更为我的职业生涯规划提 出许多宝贵建议。

感谢测绘与地理信息学院伍吉仓、沈云中、王穗辉、楼立志、李博峰、刘春、 乔刚、倪卫蓉、王超等老师在硕博课程及日常事务中的帮助和支持。感谢北京卫 星导航中心周建华总师、胡彩波主任、赵鹤主任对北斗广域差分星基增强系统建 设的指导,感谢卫星导航定位总站的樊家琛、姜意、王威、李跃跃、刘辰等对系 统监控和项目测试的跟进和配合。感谢神舟天鸿公司的苗新潮、周同等对系统移 植和算法测试的大力支持。

感谢硕博连读期间来自王彬博士、王兵浩博士、吴伟伟博士、陈倩博士、巩 秀强博士、王恒、马福建、刘学习等的指导与学术交流。感谢陈老师课题组的杨 赛男、章洁君、黄善其、谭伟杰、房成贺、侯阳飞、孟令东、刘娇、柳培钊、于 超、宋子远、丁君生、董志华、吴冠滨、马壮、周扬、王茹圆、唐文杰等,与你 们一起讨论和交流让组会更加高效且丰富。

感谢在 410 教研室一起学习和生活过的胡凤铭、赵靖文、段兵兵、辛杰、杨 飞、胡强、卢娟、张泽峰、陈猛、王岩、朱聪聪、张丽、严宇、鲍金、任营营、 崔浩猛、杨乾峰、李乃一、廖汐琳、丁阳、廖敏妍、宋鑫友、肖晶鑫、刘金靖、 刘东林等师兄师姐师弟师妹们。

感谢好友赵紫良、陈启超在数学建模竞赛和平时生活中的关照与帮助。感谢 "小天才群"的王彤、何凯、高沛东、吴博文、慕浩楠、王睿、杜昕、焦健、陶 立,你们的多才多艺和整活能力,让平凡的生活增添了一抹亮丽的颜色。

最后要对我的父母(王建新先生、张萍女士)、我的姐姐(王阿囡女士、王 阿婷女士)和姐夫(赵瑞峰先生)表达最深的感激之情,感谢你们这么多年来的 默默支持和无私奉献,你们的关怀和付出是我科研路上前进的最大动力。特别要 感谢我的未婚妻褚明晓女士,在同济的相识、相知与相爱,是我们人生中最大的 收获,期待与你在明年夏天一起步入婚姻的殿堂,共同书写我们的幸福生活!

> 王阿昊 2020年11月

参考文献

- Ashby, N. Relativity in the Global Positioning System. Living Reviews in Relativity, 2003, 55(1): 1.
- [2] Bancroft, S. An algebraic solution of the GPS equations. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1985, 21(1): 56-59.
- [3] BeiDou Navigation Satellite System (BDS)-Signal In Space (SIS)-Interface Control Document (ICD), 2019.
- [4] Bidaine, B. Ionosphere modelling for Galileo single frequency users. Ph.D Thesis, University of Liege, Liege, Belgium, 2012.
- [5] Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202.
- [6] Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. Geophysical Research Letters, 2006, 33, L07304.
- [7] Boehm, J., Werl, B., Schuh, H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium – Range Weather Forecasts operational analysis data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006b, 111(B2): 1059-1075.
- [8] Boehm, J., Heinkelmann, R., Schuh, H. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. Journal of Geodesy, 2007, 81: 679-683.
- [9] Boehm, J., Moller, G., Schindelegger, M., et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). GPS Solutions, 2015, 19: 433-441.
- [10] Cai, C., Gong, Y., Gao, Y., et al. An approach to speed up single-frequency PPP convergence with quad-constellation GNSS and GIM. Sensors, 2017, 17, 1302.
- [11] Cai, C., Liu, Z., Luo, X. Single-frequency ionosphere-free precise point positioning using combined GPS and GLONASS observations. The Journal of Navigation, 2013, 66(3): 417-434.
- [12] Caissy, M., Agrotis, L., Weber, G., et al. Coming soon: the international GNSS real-time service. GPS World, 2012, 23: 52-58.
- [13] Cao, X., Li, J., Zhang, S., et al. Performance assessment of uncombined precise point positioning using multi-GNSS real-time streams: computational efficiency and RTS interruption. Advances in Space Research, 2018, 62: 3133-3147.
- [14] Cao, Y., Hu, X., Wu, B., et al. The wide-area difference system for the regional satellite navigation system of Compass. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7): 1307-1315.
- [15] Chen, J., Li, H., Wu, B., et al. Performance of real-time precise point positioning. Marine Geodesy, 2013, 36(1): 98-108.
- [16] Chen, J., Zhang, Y., Yang, S., et al. A new approach for satellite based GNSS augmentation system: from sub-meter to better than 0.2 meter era. In Proceedings of the ION 2015 Pacific

PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, 2015.

- [17] Chen, J., Wang, J., Wang, A., et al. SHAtropE A regional gridded ZTD model for China and the surrounding areas. Remote Sensing, 2020, 12, 165.
- [18] Chen, J., Wang, A., Zhang, Y., et al. BDS satellite-based augmentation service correction parameters and performance assessment. Remote Sensing, 2020b, 12, 766.
- [19] Collins, J.P., Langley, R.B. A tropospheric delay model for the user of the wide area augmentation system. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick: Fredericton, NB, Canada, 1997.
- [20] Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F., et al. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. Navigation, 2010, 57(2): 123-135.
- [21] de Bakker, P.F., Tiberius, C.C.J.M. Real-time multi-GNSS single-frequency precise point positioning. GPS Solutions, 2017, 21: 1791-1803.
- [22] Defraigne, P., Aerts, W., Pottiaux, E. Monitoring of UTC(k)'s using PPP and IGS real-time products. GPS Solutions, 2015, 19: 165-172.
- [23] Dilssner, F., Springer, T., Schonemann, E., et al. Estimation of satellite antenna phase center corrections for BeiDou. IGS Workshop, Pasadena, USA, 2014.
- [24] EGNOS Open Service Definition Document (O-SDD) Issue 2.3. ESA, 2017.
- [25] EGNOS Safety of Life Service Definition Document (SoL-SDD) Issue 3.3. ESA, 2019.
- [26] EI-Mowafy, A., Deo, M., Kubo, N. Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbits and clock corrections. GPS Solutions, 2017, 21(3): 937-947.
- [27] Elsobeiey, M., Al-Harbi, S. Performance of real-time precise point positioning using IGS real-time service. GPS Solutions, 2016, 20: 565-571.
- [28] European GNSS (Galileo) Open Service (OS)-Signal In Space (SIS)-Interface Control Document (ICD), 2015.
- [29] Feess, W., Stephens, S. Evaluation of GPS ionospheric time-delay model. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 3: 332-338.
- [30] Geng, J., Teferle, F.N., Shi, C., et al. Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data. GPS Solutions, 2009, 13: 263-270.
- [31] Gerard, P., Luzum, B. IERS Conventions. IERS Technical 2010 Note 36. Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main, Germany, 2010.
- [32] GPS WAAS PS. Global positioning system wide area augmentation system (WAAS) performance standard, Federal Aviation Administration (FAA), 2008.
- [33] Guo, J., Xu, X., Zhao, Q., et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: Strategy, result validation, and comparison. Journal of Geodesy, 2016, 90(2): 1-17.
- [34] Hadas, T., Bosy, J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. GPS Solutions, 2015, 19: 93-105.
- [35] Han, C., Yang, Y., Cai, Z. BeiDou navigation satellite system and its time scales. Metrologia, 2011, 48: 213-218.
- [36] Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. Global Positioning System: Theory and Practice, Springer, New York, 1992.
- [37] Hopfield, H.S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Journal of Geophysical Research, 1969, 74: 4487-4499.
- [38] Hoque, M., Jakowski, N. An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems. Journal of Geodesy, 2015, 89(4): 391-406.
- [39] Interface Control Document (ICD)-L1, L2-GLONASS, 2008.
- [40] Interface Control Document (ICD)-GPS-240C, 2019.
- [41] IS-GPS-705D. Interface specification IS-GPS-705D: navstar GPS space segment/user segment L5 interfaces. Technical Report Global Positioning System Directorate Systems Engineering & Integration, 2014.
- [42] Jee, G., Lee, H.B., Kim, Y.H., et al. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: Ionospheric perspective. Journal of Geophysical Research Space Physics, 2010, 115, A10319.
- [43] Kazmierski, K., Sosnica, K., Hadas, T. Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning. GPS Solutions, 2018, 22: 11.
- [44] Kazmierski, K., Hadas, T., Sosnica, K. Weighting of multi-GNSS observations in real-time precise point positioning. Remote Sensing, 2018b, 10, 84.
- [45] Kiliszek, D., Kroszczynski, K. Performance of the precise point positioning method along with development of GPS, GLONASS and Galileo systems. Measurement, 2020, 164, 108009.
- [46] Klobuchar, J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23: 325-331.
- [47] Kouba, J., Heroux, P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.
- [48] Kouba, J. Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses. Journal of Geodesy, 2009, 83: 199-208.
- [49] Lagler, K., Schindelegger, M., Bohm, J., et al. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. Geophysical Research Letters, 2013, 40: 1069-1073.
- [50] Landskron, D., Bohm, J. VMF3/GPT3: Refined discrete and empirical troposphere mapping functions. Journal of Geodesy, 2017, 92: 349-360.
- [51] Leandro, P.F., Langley, R.B., Santos, M.C. UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. GPS Solutions, 2007, 12: 65-70.
- [52] Li, B., Zang, N., Ge, H., et al. Single-frequency PPP models: analytical and numerical comparison. Journal of Geodesy, 2019, 93: 2499-2514.
- [53] Liu, T., Wang, J., Yu, H., et al. A new weighting approach with application to ionospheric delay constraint for GPS/GALILEO real-time precise point positioning. Applied Sciences, 2018, 8, 2537.
- [54] Li, X., Ge, M., Dai, X., et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. Journal of Geodesy, 2015, 89: 607-635.
- [55] Liu, Z., Yang, Z. Anomalies in broadcast ionospheric coefficients recorded by GPS receivers over the past two solar cycles (1992-2013). GPS Solutions, 2016, 20: 23-37.
- [56] Lou, Y., Zheng, F., Gu, S., et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw singlefrequency and dual-frequency measurement models. GPS Solutions, 2016, 20(4): 849-862.
- [57] Lu, C., Chen, X., Liu, G., et al. Real-time tropospheric delays retrieved from multi-GNSS observations and IGS real-time product streams. Remote Sensing, 2017, 9, 1317.
- [58] Melgard, T., Vigen, E., Jong, K.D., et al. G2-the first real-time GPS and GLONASS precise

orbit and clock service. In Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, USA, 2009, 1885-1891.

- [59] Montenbruck, O. Kinematic GPS positioning of LEO satellites using ionosphere-free single frequency measurements. Aerosp. Sci. Technol., 2003, 7: 396-405.
- [60] Montenbruck, O., Hauschild, A., Steigenberger, P., et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system. GPS Solutions, 2013, 17: 211-222.
- [61] Montenbruck, O., Hauschild, A., Steigenberger, P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps. Navigation, 2014, 61: 191-201.
- [62] Montenbruck, O., Langley, R.B., Steigenberger, P. First live broadcast of GPS CNAV message. GPS World, 2013b, 24, 14.
- [63] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. GPS Solutions, 2015, 19: 321-333.
- [64] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment methology and results. *Advances in Space Research*, 2018, 03, 041.
- [65] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. Advances in Space Research, 2017, 59: 1671-1697.
- [66] Morton, Y.T., Zhou, Q., Frank, V.G. Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements. Radio Science, 2009, 44(1): 328-334.
- [67] Niell, A.E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B2): 3227-3246.
- [68] Nie, Z., Yang, H., Zhou, P., et al. Quality assessment of CNES real-time ionospheric products. GPS Solutions, 2019, 23: 11.
- [69] Pan, L., Zhang, X., Liu, J. A comparison of three widely used GPS triple-frequency precise point positioning models. GPS Solutions, 2019, 23, 121.
- [70] Pan, L., Zhang, X., Liu, J., et al. Performance evaluation of single-frequency precise point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. The Journal of Navigation, 2017, 70(3): 465-482.
- [71] Penna, N., Dodson, A., Chen, W. Assessment of EGNOS tropospheric correction model. The Journal of Navigation, 2001, 54(1): 37-55.
- [72] Petit, G., Luzum, B. IERS Conventions. IERS Technical 2010 Note 36. Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main, Germany, 2010.
- [73] Ren, X., Zhang, X., Xie, W., et al. Global ionospheric modelling using multi-GNSS: Beidou, Galileo, GLONASS and GPS. Scientific Reports, 2016, 6: 33499.
- [74] Rovira-Garcia, A., Ibanez-Segura, D., Orus-Perez, R., et al. Assessing the quality of ionospheric models through GNSS positioning error: methodology and results. GPS Solutions, 2020, 24, 4.
- [75] RTCM Special Committee. RTCM Standard 10403.3 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services-Version 3, No.104. RTCM: Arlington, TX, USA, 2016.
- [76] Saastamoinen, J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio

ranging satellites. In the Use of Artificial Satellites for Geodesy, American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 1972, 247-251.

- [77] Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J.M., Hernandez-Pajares, M. GNSS Data Processing: Volume I: Fundamentals and Algorithms. ESA communications, Netherlands, 2013.
- [78] Schaer, S., Gartner, W., Feltens, J. IONEX: The ionosphere map exchange format vision 1. In proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, 1998.
- [79] Schmid, R., Dach, R., Collilieux, X., et al. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. Journal of Geodesy, 2016, 90(4): 343-364.
- [80] Schonemann, E.S., Becker, M., Springer, T. A new approach for GNSS analysis in a multi-GNSS and multi-signal environment. Journal of Geodetic Science, 2011, 1: 204-214.
- [81] Shi, C., Gu, S., Lou, Y., et al. An improved approach to model ionospheric delays for singlefrequency precise point positioning. Advances in Space Research, 2012, 49: 1698-1708.
- [82] Shi, C., Zhao, Q., Hu, Z., et al. Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites. GPS Solutions, 2013, 17: 103-119.
- [83] Shi, C., Yi, W., Song, W., et al. GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS precise point positioning. GPS Solutions, 2013, 17: 439-451.
- [84] Steigenberger, P., Montenbruck, O., Hessels, U. Performance evaluation of the early CNAV navigation message. In Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Dana Point, California, 2015, 155-163.
- [85] Su, K., Jin, S., Hoque, M.M. Evaluation of ionospheric delay effects on multi-GNSS positioning performance. Remote Sensing, 2019, 11, 171.
- [86] Teunissen, P., Khodabandeh, A. Review and principles of PPP-RTK methods. Journal of Geodesy, 2015, 89(3): 217-240.
- [87] Urlichich, Y., Subbotin, V., Stupak, G., et al. GLONASS modernization. 24th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland OR, 2011, 19-23.
- [88] van Bree, R.J.P., Tiberius, C.C.J.M. Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment. GPS Solutions, 2012, 16: 259-266.
- [89] Ventura-Traveset, J., Gauthier, L., Toran, F., et al. The European EGNOS project: mission, program and system. In: Ventura-Traveset, J., FlamentD (eds) EGNOS—the European geostationary navigation overlay system: a cornerstone of Galileo. European Space Agency, 2006, SP-1303: 3–19.
- [90] Wang, A., Chen, J., Wang, J. Precision analysis of CNAV broadcast ephemeris and its impact on the user positioning. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2017 Proceedings, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2017, 437: 431-440.
- [91] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., et al. Performance evaluation of the CNAV broadcast ephemeris. The Journal of Navigation, 2019b, 72(5): 1331-1344.
- [92] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., et al. Comparison of three widely used multi-GNSS real-time single-frequency precise point positioning models using the International GNSS Service real-time service. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(11): 1726-1734.
- [93] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., et al. Evaluating the impact of CNES real-time ionospheric products on multi-GNSS single-frequency positioning using the IGS real-time service. Advances in Space Research, 2020b, 66(11): 2516-2527.
- [94] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., et al. Performance of selected ionospheric models in Multi-

Global Navigation Satellite System single-frequency positioning over China. Remote Sensing, 2019c, 11, 2070.

- [95] Wang, L., Li, Z., Ge, M., et al. Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service. Remote Sensing, 2018b, 10, 337.
- [96] Wang, L., Li, Z., Ge, M., et al. Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service. GPS Solutions, 2019, 23: 66.
- [97] Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. Journal of Geodesy, 2016, 90: 209-228.
- [98] Wang, Zhi., Li, Z., Wang, L., et al. Assessment of multiple GNSS real-time SSR products from different analysis centers. International Journal of Geo-Information, 2018, 7, 85.
- [99] Wu, J.T., Wu, S.C., Hajj, G.A., et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. In Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference, Durango, CO, San Diego, CA, 1992, 1647-1660.
- [100] Wu, X., Hu, X., Wang, G., et al. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning. Advances in Space Research, 2013, 51: 959-968.
- [101] Wu, X., Zhou, J., Gang, W., et al. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(7): 1297-1306.
- [102] Wu, X., Zhou, J., Tang, B., et al. Evaluation of COMPASS ionospheric grid. GPS Solutions, 2014, 18(4): 639-649.
- [103] Yin, H., Morton, Y., Carroll, M., et al. Performance analysis of L2 and L5 CNAV broadcast ephemeris for orbit calculation. In Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, 2014, 761-768.
- [104] Yuan, Y., Wang, N., Li, Z., et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results. Navigation, 2019, 66(1): 55-69.
- [105] Yuan, Y., Zhang, K., Rohm, W., et al. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(6): 10044-10057.
- [106] Yunck, T.P. Coping with the atmosphere and ionosphere in precise satellite and ground positioning. In: Vallance-Jones A (ed.), Environmental effects on spacecraft positioning and trajectories, American Geophysical Union (AGU). Geophysical Monograph, 1993, 73(13): 1-16.
- [107] 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. Sensors, 2013b, 13: 15708-15725.
- [108] Zhang, L., Yang, H., Gao, Y., et al. Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers. Advances in Space Research, 2018, 61: 2942-2954.
- [109] Zhang, X., Li, P., Guo, F. Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data for global single receiver. Advances in Space Research, 2013, 51: 153-161.
- [110] Zhang, Y., Chen, J., Yang, S., et al. Initial assessment of BDS zone correction. In Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC). Berlin: Springer, 2017, 271-281.

- [111] Zhang, Y., Chen, J., Gong, X., et al. The update of BDS-2 TGD and its impact on positioning. Advances in Space Research, 2020b, 65(11): 2645-2661.
- [112] Zhang, Y., Kubo, N., Chen, J., et al. Initial positioning assessment of BDS new satellites and new signals. Remote Sensing, 2019, 11, 1320.
- [113] Zhang, Y., Kubo, N., Chen, J., et al. Contribution of QZSS with four satellites to multi-GNSS long baseline RTK. Journal of Spatial Science, 2019b, 65(1): 41-60.
- [114] Zhang, Y., Kubo, N., Chen, J., et al. Apparent clock and TGD biases between BDS-2 and BDS-3. GPS Solutions, 2020, 24: 27.
- [115] Zhou, F., Dong, D., Li, Pan., et al. Influence of stochastic modeling for inter-system biases on multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning. GPS Solutions, 2019, 23: 59.
- [116] Zhou, F., Dong, D., Ge, M., et al. Simultaneous estimation of GLONASS pseudorange interfrequency biases in precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. GPS Solutions, 2018, 22, 19.
- [117] 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. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [118] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(7): 079508.
- [119] 陈俊平,杨赛男,周建华,等.综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型.测 绘学报,2017,46(5):537-546.
- [120] 陈俊平, 胡一帆, 张益泽, 等. 北斗星基增强系统性能提升初步评估. 同济大学学报 (自然科学版), 2017b, 45(7): 1075-1082.
- [121] 陈俊平, 张益泽, 周建华, 等. 分区综合改正: 服务于北斗分米级星基增强系统的差分 改正模型. 测绘学报, 2018, 47(9): 1161-1170.
- [122] 陈俊平, 王阿昊, 张益泽, 等. 北斗广域差分分米级定位的分区切换算法. 测绘学报, 2019, 48(7): 822-830.
- [123] 董大南,陈俊平,王解先.GNSS 高精度定位原理.北京:科学出版社,2018.
- [124] 郭建锋, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 双频 GPS 数据的最优相位平滑伪距算法研究. 自然科 学进展, 2008, 18: 221-224.
- [125] 郝茂森, 贾小林, 曾添, 等. QZSS 亚米级增强服务和 MSAS 增强定位性能评估. 导航 定位与授时, 2020, 05: 1-10.
- [126] 李建成, 张守建, 邹贤才, 等. GRACE 卫星非差运动学厘米级定轨. 科学通报, 2009, 54(16): 2355-2362.
- [127] 李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、UofC 和非组合精密单点定位观测模型比较. 测绘学报, 2015, 44(7): 734-740.
- [128] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理(第二版). 武汉大学出版社, 2010.
- [129] 卢璐, 马银虎, 陈海龙. 俄罗斯卫星导航增强系统 SDCM 现状与发展. 第五届中国卫 星导航学术年会电子文集, 2014, 48-51.
- [130] 罗峰,姚宜斌,宋伟伟. 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳. 全球定位系统, 2007, 32(5): 9-13.
- [131] 王阿昊, 陈俊平, 张益泽, 等. 基于分区综合改正数的北斗卫星导航系统和 GPS 组合的动态精密单点定位. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 447-455.

- [132] 王解先,陈俊平. GPS 精密定位软件研制与应用. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 764-767.
- [133] 王明华. 基于 GPS PPP 的高时空分辨率 ZTD/PW 精度评估及气象学应用: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2020.
- [134] 王宁波, 袁运斌, 张宝成, 等. GPS 民用广播星历中 ISC 参数精度分析及其对导航定 位的影响. 测绘学报, 2016, 45(8): 919-928.
- [135] 杨元喜. 自适应动态导航定位. 测绘出版社, 2006.
- [136] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.
- [137] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.
- [138] 杨赛男,陈俊平,曹月玲,等. 空间信号精度的算法设计与实验分析. 天文学进展, 2015, 33(2): 250-258.
- [139] 袁修孝, 付建红, 楼益栋. 基于精密单点定位技术的 GPS 辅助空中三角测量. 测绘学 报, 2007, 36(3): 251-255.
- [140] 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 基于 GPS 双频原始观测值的精密单点定位算法及应用. 测绘学报, 2010, 39(5): 478-483.
- [141] 张小红,何锡扬,郭博峰,等. 基于 GPS 非差观测值估计大气可降水量. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(7): 806-810.
- [142] 张小红, 左翔, 李盼. 非组合与组合 PPP 模型比较及定位性能分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(5): 561-565.
- [143] 张益泽,陈俊平,周建华,等.北斗广播星历偏差分析及改正.测绘学报,2016,45(S2): 64-71.
- [144] 张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2017.
- [145] 张益泽,陈俊平,杨赛男,等.北斗广域差分分区综合改正数定位性能分析.武汉大 学学报(信息科学版), 2019, 44(2): 159-165.
- [146] 周峰. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [147] 周建华.北斗导航与广域差分的性能提升及实验验证. 第八届中国卫星导航学术年会, 上海, 2017.

附录 数据来源

字符说明:

yyyy: 年份 (4位)
yy: 年份 (最后 2 位)
ddd: 年积日 (3 位)
wwww: GPS 周 (4 位)
wwwwd: GPS 周 (前 4 位) +周内天 (最后 1 位)

MGEX 观测数据(GPS+GLONASS+BDS+Galileo):

ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/data//campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/ddd/

LNAV 广播星历 (GPS+GLONASS+BDS+Galileo):

ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/data/campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/brdm/B RDM00DLR_S_yyyyddd0000_01D_MN.rnx

CNAV 广播星历 (GPS):

ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/data/campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/cnav/BR DX00DLR_S_yyyyddd0000_01D_MN.rnx

MGEX 精密轨道和钟差(GPS+GLONASS+BDS+Galileo):

ftp://ftp.gfz-

potsdam.de//pub/GNSS/products/mgnss/yyyy/wwww/GBM0MGXRAP_yyyyddd000 0_01D_05M_ORB.SP3 (轨道)

ftp://ftp.gfzpotsdam.de//pub/GNSS/products/mgnss/yyyy/wwww/GBM0MGXRAP_yyyyddd000 0_01D_30S_CLK.CLK (钟差)

GBU 超快速精密星历(GPS+GLONASS):

ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/GNSS/products/ultra/wwwww/gfuwwwwd.sp3

同济大学 博士学位论文 附录

MGEX DCB 文件 (GPS+GLONASS+BDS+Galileo):

ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/products/mgex/dcb/yyyy/DLR0MGXFIN_yyyy ddd0000_03L_01D_DCB.BSX

ATX 天线文件:

http://www.epncb.oma.be/ftp/station/general/

GIM 文件:

ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/products/ionex/yyyy/ddd/codgddd0.yyi 或 ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/products/ionex/yyyy/ddd/igsgddd0.yyi

SINEX 文件:

ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/products/yyyy/wwww/igsyyPwwwwd_all.snx

EOP 文件:

https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html

海潮模型系数:

http://holt.oso.chalmers.se/loading

VMF1 模型系数:

http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/yyyy/

个人简历、在读期间发表的学术论文和研究成果

个人简历:

王阿昊,男,籍贯甘肃平凉,中国共产党党员,1992年10月生。 2015年7月毕业于中国矿业大学,环境与测绘学院,测绘工程专业,获工学学士学位。 2015年9月进入同济大学,测绘与地理信息学院,测绘科学与技术专业,攻读硕士学位。 2017年3月在同济大学,测绘与地理信息学院,测绘科学与技术专业,攻读博士学位。 2015年9月至2021年3月在中国科学院上海天文台联合培养。

博士期间已发表论文:

- Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., Wang, J., Wang, B. Performance Evaluation of the CNAV Broadcast Ephemeris [J]. The Journal of Navigation, 2019, 72(5), 1331-1344. (SCI)
- [2] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., Meng, L., Wang, J. Performance of Selected Ionospheric Models in Multi-Global Navigation Satellite System Single-Frequency Positioning over China [J]. Remote Sensing, 2019, 11, 2070. (SCI)
- [3] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., Meng, L., Wang, B., Wang, J. Evaluating the impact of CNES real-time ionospheric products on multi-GNSS single-frequency positioning using the IGS real-time service [J]. Advances in Space Research, 2020, 66(11), 2516-2527. (SCI)
- [4] Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., Wang, J. (2020). Comparison of three widely used multi-GNSS real-time single-frequency precise point positioning models using the International GNSS Service real-time service [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(11), 1726-1734. (SCI)
- [5] Chen, J., Wang, A., Zhang, Y., Zhou, J., Yu, C. BDS Satellite-Based Augmentation Service Correction Parameters and Performance Assessment [J]. Remote Sensing, 2020, 12, 766. (SCI)
- [6] Chen, J., Wang, J., Wang, A., Ding, J., Zhang, Y. SHAtropE-A Regional Gridded ZTD Model for China and the Surrounding Areas [J]. Remote Sensing, 2020, 12, 165. (SCI)
- [7] Zhang, Y., Wang, H., Chen, J., Wang, A., Meng, L., Wang, E. Calibration and Impact of BeiDou Satellite-Dependent Timing Group Delay Bias. Remote Sensing, 2020, 12, 192. (SCI)
- [8] Zhang, Y., Kubo, N., Chen, J., Chu, F., Wang, A., Wang, J. Apparent Clock and TGD Biases between BDS-2 and BDS-3. GPS Solutions, 2020, 24, 27. (SCI)
- [9] Wang, M., Wang, J., Dong, D., Meng, L., Chen, J., Wang, A., Cui, H. Performance of BDS-3: Satellite Visibility and Dilution of Precision. GPS Solutions, 2019, 23, 56. (SCI)
- [10] Wang, A., Chen, J., Wang, J. Precision Analysis of CNAV Broadcast Ephemeris and Its Impact on the User Positioning [C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2017 Proceedings, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2017, 437, 431-440. (EI)
- [11] 王阿昊, 陈俊平, 张益泽, 王解先, 王彬. 基于分区综合改正技术的 BDS/GPS 组合动态

精密单点定位 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3), 447-455. (EI)

- [12] 陈俊平, 王阿昊, 张益泽, 周建华, 王兵浩, 王解先. 北斗广域差分分米级定位的分区切换算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(7), 822-830. (EI)
- [13] 于超,陈俊平,陈倩,王阿昊.北斗系统长期空间信号测距精度评估及精度提升分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6), 1064-1071. (EI)
- [14] 王兵浩,周建华,陈俊平,张益泽,王阿昊.北斗 WADS 分区综合改正数拟合模型及定位分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(4),565-573. (EI)
- [15] 王兵浩, 李兆南, 周建华, 张益泽, 师一帅, **王阿昊**. 北斗广域差分信息与 CNES 实时改 正信息的性能评估对比[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(2), 160-166. (EI)

发明专利:

[1] 陈俊平, 王阿昊, 巩秀强, 张益泽, 王彬, 谭伟杰. 一种基于分区切换的星基增强用户定位方法. CN 201811216334.7[P], 2018.

参加的学术会议:

- [1] 第八届中国卫星导航学术年会,2017-05,上海,中国。(口头学术报告)
- [2] 全国博士生学术论坛(测绘科学与技术),2017-10,焦作,中国。(口头学术报告)
- [3] CPGPS 全球华人导航定位年会,2018-07,西安,中国。(口头学术报告)
- [4] International Symposium on GNSS, 2018-11, 巴厘岛,印度尼西亚。(口头学术报告)

参与的科研项目:

[1] 上海市 2020 年度"科技创新行动计划"学术/技术带头人项目:"通导遥一体"导航时空 信息处理关键技术研究, 2020.06-2023.05.

获奖经历:

- [1] 第八届中国卫星导航学术年会"青年优秀论文"——三等奖,2017-05。
- [2] 2017 全国博士生学术论坛(测绘科学与技术)——优秀报告奖, 2017-10。
- [3] "北斗二号空间信号精度提升"项目荣获卫星导航定位科技进步奖——特等奖(名次: 16/20),2018-08。
- [4] 2018-2019 学年同济大学优秀博士生奖学金, 2019-11
- [5] 2019-2020 学年同济大学优秀博士生奖学金, 2020-11
- [6] 2019-2020 学年同济大学优秀学生, 2021-01