

中图分类号: P228

单位代号: 10280

密 级: 公开

学 号: 17724567

上海大学



硕士学位论文

SHANGHAI UNIVERSITY
MASTER'S DISSERTATION

题 目	MADOCA 和北斗星基增强 系统实时产品定位性能评估
--------	--------------------------------

作 者 马壮

学科专业 物理学

校内导师 葛先辉

联培单位 中科院上海天文台

联培导师 陈俊平

完成日期 2020 年 5 月

姓名：马壮

学号：17724567

论文题目：MADCOA 和北斗星基增强系统实时产品定位性能评估

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名：

主任：王解先

委员：李国良 董中不相

校内导师：高先锋

联培导师：陈静

答辩日期：2020.6.27

姓 名：马壮

学号：17724567

论文题目：MADOCA 和北斗星基增强系统实时产品定位性能评估

原创性声明

本人声明：所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已发表或撰写过的研究成果。参与同一工作的其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： 马壮 日 期： 2020.6.27

本论文使用授权说明

本人完全了解上海大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留论文及送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 马壮

校内导师签名： 葛光峰

联培导师签名： 陈静

日 期： 2020.6.27

上海大学理学硕士学位论文

**MADOCA 和北斗星基增强系统实时
产品定位性能评估**

姓 名：马壮

校内导师：葛先辉

联培导师：陈俊平

学科专业：物理学

上海大学理学院

2020 年 5 月

A Dissertation Submitted to Shanghai University for the Degree
of Master in Science

**Real-time Product Positioning
Performance Evaluation of
MADOCA and Beidou Satellite-
based Augmentation System**

MA Candidate: Ma Zhuang

Supervisor: Ge Xianhui

Joint-Supervisor: Chen Junping

Major: Physics

Sciences College, Shanghai University

May, 2020

摘 要

基于经典电磁理论、无线电通信、天体物理学、地球物理学和相对论等物理学原理的精密单点定位能够灵活高效地获取全球范围的高精度绝对位置信息，保留接收机钟差，大气延迟等有效信息，因此可以被广泛用于精密定位、授时、大气监测等各行各业中。随着需求的日益提高，用户开始追求更高精度的实时定位服务。各个国家也提出了独立于 GPS, GLONASS 等卫星导航系统之外的星基增强系统，提供多种的定位技术和精密定位产品。如日本的 GNSS 精密轨道和钟差估计系统 MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) 和我国的北斗广域星基增强系统。因此，如何有效利用这些机构提供的实时精密产品实现实时精密单点定位精度和收敛速度的提高成为一个新的课题。

本文针对上述问题，针对 MADOCA 实时精密产品和北斗星基增强系统实时产品开展研究，因此，本文的主要工作和贡献如下：

(1) 学习并掌握 GNSS 实时精密单点定位的基本原理：重点掌握了 GNSS 精密单点定位模型、坐标系转换，主要误差的物理学原理和改正模型。

(2) 对 MADOCA 实时精密产品进行解码、处理、设计算法模型和评估分析：本文结合 MADOCA 产品的特点，编写了 MADOCA 的解码程序，并进行解码和数据处理。MADOCA 评估方面，本文着重进行了 MADOCA 与其他机构的评估结果的对比，MADOCA 的 GLONASS 精密星历的评估。主要评估了其钟差，径向、切向、法向轨道误差，空间信号测距误差 (Signal-in-Space Range Error, SISRE)，仅考虑轨道误差的 SISRE 以及精密参数的可用性，发现 MADOCA 在 GLONASS 卫星的各个产品上精度更高，且可用历元数明显高于其他机构。研究了各种模型下 MADOCA 的定位性能，结果表明使用 MADOCA 的产品，GPS 单系统定位结果与其他机构没有明显差距，收敛速度和定位精度相当，但 GPS/GLONASS 双系统定位收敛速度明显优于其他机构。

(3) 北斗星基增强系统定位研究：在掌握等效钟差、轨道改正数和北斗分

区综合改正数的计算原理的基础之上,提出了基于等效钟差,轨道改正数和北斗分区综合改正数的改正策略,基于 RTKLIB 软件修改开发了使用分区改正数的 BDS 双频实时 PPP 软件,进行 BDS 实时静态和动态的实时精密单点定位,并对其性能进行研究分析。结果表明,使用等效钟差、轨道改正和分区综合改正数可以满足用户对 BDS 单系统定位的精度需求。

(4) 基于前期 MADOCA 和北斗星基增强系统融合定位性能研究,分析了双系统定位的优势,推导了使用不同精密星历和改正策略的 GPS/BDS 双系统实时精密单点定位模型。并通过 GPS/BDS 双系统实时精密单点定位对其性能进行分析,证明了使用不同改正策略的双系统定位满足用户的基本定位需求,但程序仍需要进一步优化。

关键词: GNSS, 实时精密单点定位, 精密星历及钟差, MADOCA, 北斗分区综合改正数

ABSTRACT

Precise point positioning (PPP) based on principles of physics such as classical electromagnetism, radio communications, astrophysics, geophysics and relativity can flexibly and efficiently obtain global high-precise absolute position information and retain effective information such as receiver clock and atmospheric delay, so it can be widely used in various industries such as precise positioning, timing, and atmospheric monitoring. With the increasing demand, users begin to pursue higher-precise real-time location services. Various countries have also proposed satellite-based augmentation systems independent of satellite navigation systems such as GPS and GLONASS, which provide a variety of positioning technologies and precise products. Such as, MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) developed and implemented by Japan and China's Beidou satellite-based augmentation system. Therefore, how to effectively use real-time precise products of Beidou and other organizations to achieve real-time PPP accuracy and convergence speed becomes a new topic.

Aiming at the above problems, this paper conducts research on the MADOCA real-time precise products and Beidou satellite-based augmentation system real-time products. Therefore, the main work and contributions of this thesis are listed as follows:

(1) First studied and mastered the basic principles of GNSS real-time precise point positioning: This thesis focused on mastering the GNSS precise point positioning models, coordinate system conversion, the main errors' physics principles and correction models.

(2) Decoding, processing, designing models and evaluation of MADOCA real-time precision products: This thesis combines the characteristics of MADOCA products, compiles MADOCA decoding program. In terms of MADOCA evaluation, this thesis focuses on the comparison between the evaluation results of MADOCA and other organizations, and the evaluation of MADOCA's GLONASS precise ephemeris. Mainly evaluated its clock error, radial, along-track, cross-track error, signal-in-space range errors (SISRE), orbit-only SISRE and epoch availability. MADOCA's accuracy of each satellite product in GLONASS is higher, and epochs availability is significantly higher than other organizations. This paper studies the positioning performance of MADOCA under

various models. From the positioning results, using MADOCA's products, the GPS positioning results are not significantly different from other organizations, the convergence speed and positioning accuracy are comparable, but the GPS/GLONASS dual system positioning convergence speed is significantly better than other comparable.

(3) Research on Beidou satellite-based augmentation system: After mastering the calculation principles of equivalent clock correction, orbit correction and Beidou zone correction, a correction strategy is implemented based on equivalent clock correction, orbit correction and Beidou zone correction. Based on rtklib, BDS dual frequency real-time PPP software using Beidou zone correction is developed. Carrying out BDS real-time static and kinematic real-time PPP and evaluating its performance. The results show that the use of equivalent clock correction, orbit correction and Beidou zone correction can meet the user's accuracy requirements for BDS single system positioning.

(4) Based on the previous MADOCA and Beidou satellite-based augmentation system fusion positioning performance research, the advantages of dual-system positioning are analyzed, and the GPS/BDS dual-system real-time PPP model using different precise ephemeris and correction strategies is derived. The performance of GPS/BDS dual-system real-time PPP is analyzed, which proves that dual-system positioning using different correction strategies meets the user's basic positioning needs, but the program still needs to be further optimized.

Keywords: GNSS, Real-time Precise Point Positioning, Precise Ephemeris and Clock Difference, MADOCA, Beidou Zone Correction

目 录

摘 要.....	VI
ABSTRACT.....	VIII
第一章 绪论.....	4
1.1 研究背景和意义	4
1.2 国内外研究进展	7
1.2.1 多系统 GNSS 精密产品	7
1.2.2 实时 GNSS 精密单点定位	8
1.3 本文研究内容及章节安排.....	9
第二章 GNSS 定位理论模型与计算方法	12
2.1 精密单点定位理论模型.....	12
2.1.1 函数模型	12
2.1.2 随机模型	14
2.1.3 空间坐标系与坐标系转换模型	15
2.2 物理理论模型及误差改正.....	17
2.2.1 对流层效应原理与改正	18
2.2.2 相对论效应原理与改正	19
2.2.3 几何距离和钟差改正	19
2.2.4 差分码偏差改正	20
2.3 参数估计	21
2.3.1 最小二乘估计	22
2.3.2 卡尔曼滤波	23
2.4 数据预处理	23
2.4.1 伪距观测值的粗差探测	23
2.3.2 相位观测值的周跳探测	24
第三章 MADOCA 实时精密星历定位研究.....	26

3.1	MADOCA 实时精密星历.....	26
3.1.1	RTCM3.2	26
3.1.2	MADOCA	27
3.2	MADOCA 实时精密星历解码.....	29
3.2.1	MADOCA 数据结构	29
3.2.2	MADOCA 解码程序实现	31
3.2.3	MADOCA 数据处理	33
3.3	MADOCA 精密星历误差分析.....	33
3.3.1	误差处理与分析方法	33
3.3.2	钟差与轨道误差分析	35
3.3.3	SISRE 分析.....	38
3.3.4	历元可用性分析	39
3.3.5	小结.....	39
3.4	MADOCA 精密单点定位研究.....	40
3.4.1	定位策略与模型	40
3.4.2	GPS 实时 PPP 结果分析.....	42
3.4.3	GPS/GLONASS 双系统实时 PPP 结果分析.....	43
3.4.4	收敛时间与定位精度统计分析	45
3.5	总结	46
第四章	北斗星基增强系统定位研究.....	48
4.1	北斗星基增强系统	48
4.2	北斗广域差分等效钟差.....	48
4.3	北斗分区综合改正数	50
4.3.1	分区综合改正数原理	50
4.3.2	分区综合改正数计算方法	51
4.4	北斗星基增强系统精密单点定位研究.....	53
4.4.1	定位策略与模型	53
4.4.2	BDS 实时静态 PPP 结果分析	55

4.4.3	BDS 实时动态 PPP 结果分析	56
4.4.4	收敛时间与定位精度统计分析	57
4.5	总结	59
第五章	MADOCA 和北斗星基增强系统融合实时定位方法研究.....	60
5.1	多系统实时定位	60
5.2	使用不同改正策略的定位模型与策略.....	61
5.3	定位结果分析	62
5.4	总结	64
第六章	结论与展望.....	66
6.1	工作总结	66
6.2	未来展望	67
参考文献		68
作者在攻读硕士学位期间公开发表的论文		72
作者在攻读硕士学位期间所作的项目		73
致 谢		74
附 录		76

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

卫星定位系统是一种利用卫星信号对地面上的目标进行准确授时、定位、测速的技术，自上个世纪六十年代至今，卫星定位技术已从最初的精度低、无法授时、难以准确导航发展至现如今的高精度多系统的全球导航系统。卫星定位技术的基本原理并不复杂，在通过卫星定位系统进行定位时，用户可以通过卫星信号得到每颗观测到的卫星到用户的距离，同时又因为卫星的位置是准确可知的，所以通过三维坐标中的距离公式，利用 3 颗卫星，就可以组成 3 个方程组，求解得到用户在三维坐标中的位置。又因为卫星的时钟与接收机的时钟之间往往存在一个误差，导致额外产生一个钟差的未知数，所以卫星定位最少需要观测到 4 颗卫星。而事实上，如今用户们可以利用更高水平的接收机观测到 4 颗以上的卫星，他们将提供额外的观测信息用于更准确的计算，随着定位技术和观测技术的不断提高，卫星运行轨道、时钟误差、相对论效应、大气对流层、电离层等产生的误差得到越来越精确的改正，如今卫星定位精度可达厘米级精度。

美国于 1964 年建成了由 6 颗卫星构成的世界上第一个卫星导航系统——子午卫星系统，也称作海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。美国又于 1973 年 12 月批准通过了全球定位系统(Global Positioning System)的综合性方案，简称 GPS。至 1995 年 4 月，美国正式宣告其新一代卫星导航与定位系统 GPS 正式进入全面运行状态。1996 年，美国继续提出 GPS 现代化计划，主要目的包括：提高空间段卫星和地面段运控的水平，在 L_1 和 L_2 上增设军用码来实现军用信号和民用信号的分离，将民用信号从 1 个增加至 4 个(L_1 频点上的 C/A 码， L_1 和 L_2 频点上新增的 L1C 码和 L2C 码，Block IIF 卫星及随后的 GPS 卫星上增设的 L_5 频点)。GPS 现代化计划可以有效提高 GPS 系统的定位精度，信号的连续性，完好性和可用性以及抗无线干扰能力。自 GPS 问世以来，其全球覆盖、全天候、高精度、灵活方便等众多优点使得其已经广泛应用于导航测绘、林农渔业、地质勘探、物流交通等众多领域，并使这些行业发生了革命性的改进。因此，世界其他国家和地区也已经或者正在开展建设自己的卫星导航系统。

截至 2020 年, 世界上已建成 4 个全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS), 分别是美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS (Global Navigation Satellite System)、欧洲的 Galileo (Galileo satellite navigation system) 和中国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)。以及日本准天顶卫星系统 (Quasi-zenith Satellite System, QZSS) 和印度区域卫星导航系统 (Indian Regional Navigational Satellite System, IRNSS) 等 2 个区域的卫星导航系统^[1]。至此, 全球卫星导航系统已经由美国 GPS 主导的一元时代转变为多频多系统并存的 Multi-GNSS 时代, 随着全球卫星导航系统以及部分区域卫星导航系统的卫星星座的逐渐完善, 由此带来的多频多模观测数据可以用于进一步提高定位的精度、连续性、时效性和可靠性。而随着多系统 GNSS 技术条件的逐渐成熟, 多系统 GNSS 的融合定位及应用必将成为卫星定位未来的发展趋势。

虽然目前卫星导航系统已经应用到了广泛的日常生活中, 其米级的定位精度可以满足日常的基本定位需求。但随着相关行业的不断发展, 用户的需求总会不断提高, 要求更高精度的实时定位服务。为此, 不同的国家开发了独立于卫星定位系统以外的星基增强系统, 如美国的广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS), 欧洲的地球静止导航重叠服务 (European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS), 俄罗斯的差分改正监测系统 (Differential Corrections and Monitoring, SDCM), 日本的多功能卫星星基增强系统 (Multi-functional Satellite Augmentation System, MSAS) 以及印度的 GPS 辅助型近地轨道增强导航系统 (GPS Aided Geo Augmented Navigation, GAGAN)^[2]。中国方面, 北斗二号是区域系统, 北斗三号为全球系统并包括星基增强系统功能和全球短消息通信服务等功能。

北斗导航系统是中国自主研制的导航系统, 也是当前 GNSS 中最复杂的全球卫星导航系统, 它由地球静止轨道卫星 (Geostationary Orbit, GEO)、倾斜同步轨道卫星 (Inclined Geostationary Orbit, IGSO)、中地球轨道卫星 (Medium Earth Orbit, MEO) 3 种轨道类型的卫星构成星座, 也同时使用北斗二号区域系统和北斗三号全球系统的过渡性组合系统。2018 年 12 月, 北斗系统正式提供全球服务, 2019 年 4 月发射了北斗三号首颗 IGSO 卫星, 也是北斗三号第 20 颗组网卫星 (此前发射了 18 颗 MEO 卫星和 1 颗 IGSO 卫星), 2020 年内还计划发射 6 颗

MEO、2 颗 IGSO 和 2 颗 GEO 卫星，使得北斗三号在轨卫星达到 24 颗 MEO、3 颗 GEO、3 颗 IGSO 卫星。北斗三号的特殊星座结构使得其可以提供 6 种服务，包括卫星无线电导航服务，星基增强服务，区域短信通信服务，全球短信通信服务，国际 SAR 服务和精密单点定位服务。北斗三代届时可以达到的性能指标是：单频测量定位精度优于 7m，双频测量优于 3m，空间信号测距误差优于 0.5m，测速精度达到 0.2m/s，用户可用性高于 99%，而且亚太地区的性能将会明显优于全球性能。

为了协同 GPS 系统的民用服务，提高日本附近区域的 GPS 系统定位精度，日本宇宙航空研究开发机构（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）研发和建立了服务于主要服务区日本以及亚太周边的区域性卫星导航及增强系统，即 QZSS。2017 年 10 月 9 日 JAXA 成功发射了 QZSS 系统第 4 颗卫星，至此，QZSS 第一阶段 4 星区域系统初步完成建设，已于 2018 年正式提供 4 星系统服务，并计划于 2024 年建成 7 颗卫星组成的区域卫星导航系统^[3]。目前 QZSS 卫星空间信号精度能达 0.6m 以内，与 GPS 相当^[4]。QZSS 还提供多种增强服务。主要包括，在 L1S 信号频段上提供基于伪距定位的 SLAS（Sub-meter Level Augmentation System）增强服务^[5]，在 L6 信号频段上提供基于 PPP-RTK 的 CLAS（Centimeter Level Augmentation System）精密定位服务，以及通过 QZS-1 的 LEX 信号传输的采用国际标准格式 RTCM-SSR（Radio Technical Commission for Maritime Services-State Space Representation）的 MADOCA（Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis）产品。可以预见未来 QZSS 必将在全球 GNSS 系统中扮演越来越重要的角色，因此有必要对目前的 QZSS 系统在定位中的作用和地位进行评估。

如果将 4 大全球导航系统和 2 大区域系统，以及以上六个国家或地区所提供星基增强系统全部组合起来使用，那么已经在轨的可以正常提供服务的卫星已经达到 130 多颗，2020 年还将突破 140 颗。而且这些国家和机构还提供着多种多样的改正产品，如日本的 MADOCA 提供包括精密钟差，精密轨道等在内的实时精密改正产品，中国的北斗星基增强系统提供包括等效钟差，轨道改正数，分区改正数等实时精密改正产品。为此，如何利用多系统的不同的实时改正产品实现更高精度更快速的卫星导航定位成为日渐重要的需要。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 多系统 GNSS 精密产品

如研究背景中所述,随着 GNSS 卫星系统的持续发展,GNSS 数据应用领域的不断扩大,用户对于定位精度的需求也逐渐提高。国际大地测量协会 IAG 于 1993 年组建了国际 GPS 服务 (International GPS Service, IGS),于 1994 年 1 月 1 日正式工作。伴随着其他 GNSS 系统的逐渐建成和丰富,IGS 也逐渐扩大了自己的工作范围,并改为国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS)。IGS 由中心局、资料中心、全球 GNSS 跟踪站和分析中心和管理委员会组成,分析中心对全球 GNSS 跟踪站的观测资料进行长期连续的计算分析,全球各家分析中心的产品也将他们的 GNSS 卫星钟差、轨道等精密综合产品传送到 IGS 资料中心和分析中心,最终综合分析中心会综合 7 个分析中心独立给出的结果取加权平均值,得到最终的 IGS 产品,由中央局的信息中心和全球资料中心将 IGS 产品免费公开给用户使用。

IGS 现有比较核心的分析中心包括:瑞士欧洲定轨中心 (the Center for Orbit Determination in Europe, CODE)、德国地球科学研究所 (German Research Center for Geoscience, GFZ)、中国武汉大学测绘中心 (Wuhan University, WHU)、德国欧洲空间工作局 (European Space Agency, ESA) 以及法国国家太空研究中心 (the Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)。IGS 提供的最终产品主要包括:卫星星历数据、跟踪站的位置数据、速度数据、相位数据、时钟信息以及 RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 格式的伪距观测数据,多系统 GNSS 卫星的高质量轨道数据 (包括预测轨道数据和事后轨道数据),电离层和对流层数据以及地球自转参数等。上述数据不仅可以满足用户对定位和导航的精度需求,也可以为如卫星定轨、模拟定位算法研究等重要科研项目提供高精度的数据支持。目前 IGS 的精密星历的精度约为 5cm,卫星钟差的误差约为 0.2~0.3ns, CODE、GFZ 和 WHU 等分析中心公开提供北斗卫星事后精密钟差和精密轨道改正产品,其中可以提供 BDS 系统实时精密钟差和轨道改正产品的机构有 CNES 和 GFZ。

随着实时精密单点定位 (Real-time Precise Point Positioning, RTPPP) 需求的不断提高,CNES 使用 IGS 和 MGEX (Multi-GNSS Experiment) 监测站的数据,

于 2016 年开始为用户提供包括 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 四系统的实时改正产品,包括轨道改正数、钟差改正数、电离层模型改正、伪距/相位改正数等。用户可以接受 CNES 播发的 CLK93 实时数据流,对轨道钟差等误差项进行实时改正,来实现实时精密单点定位。

QZSS 通过 QZS-1 传输的 MADOCA 产品通过 L6E 增强信号按照国际标准格式 RTCM10403.2 每 30s 播发一次 GNSS 实时精密轨道改正数,每 1s 播发一次精密钟差改正数,目前已经提供的产品包括 GPS, GLONASS, QZSS 系统。MADOCA 也通过互联网或 FTP 服务发布其实时产品。产品格式包括 RTCM 格式以及 RINEX SP3 格式。除了精密轨道、精密钟差之外, MADOCA 还提供和时间间隔为 30s 的用户范围精度 (URA) 信息^[6]。

BDS 也在提供基本导航参数之外,利用中国地区的监测站数据,计算广域差分改正信息。目前其差分模型已经从一维等效钟差改正模型转变为四重广域差分参数模型,用户可通过接收 GEO 卫星播发的广域差分改正参数实现 BDS 卫星轨道和钟差的实时改正,实现更高定位精度和稳定性的实时精密单点定位。

因此,全球卫星导航系统的实时和事后精密钟差和精密轨道产品的评估也在最近几年经历了快速的发展。El-Mowafy 等学者对 GPS 实时精密轨道和钟差产品进行了性能评估^[7], Kazmierski、Hadas 等学者分析了轨道和钟差的衰减特性、CNES 实时产品的质量以及影响实时产品质量的因素^[8], Shaocheng Zhang 等学者对 MADOCA 的 GPS 实时精密轨道和钟差产品进行了性能评估^[9]。

1.2.2 实时 GNSS 精密单点定位

美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的研究人员 Zumbeger 等最先提出精密单点定位技术,目标通过非差单点定位算法对 GPS 数据进行解算,最终实现 N、E、U 三个方向单天解达到厘米级精度。Gao Yang 等学者通过对精密单点定位技术的深入研究,提出了 Uofc 函数模型^[10],并成功应用于商业化的精密单点定位软件中,可以实现在较长时间初始化的条件下达到静态 PPP 毫米级精度; Jan Kouda 等学者对 IGS 的各个机构发布的精密单点定位产品精度进行了分析,并详细评估了 PPP 模型中的各项误差及其对应的改正模型^[11]; 叶世榕等学者对非差 PPP 模型进行了改进,可以实现三个方向上单天解达到厘米级

的定位精度^[12]；张宝成等学者对 GPS 的非差非组合 PPP 进行了深入研究，并通过非差非组合模型实现电离层延迟和接收机硬件延迟的提取工作^[13]。

但是 GPS 单系统精密单点定位存在着诸多局限性，如在城市、山谷、森林等特殊的场所，系统可见的 GPS 卫星数目相对较少，这将严重影响 PPP 的定位精度、连续性和可靠性。而随着 GNSS 的迅速发展，多频多系统精密单点定位凸显出相较于 GPS 单系统 PPP 的优越性。蔡昌盛等学者推导出 GPS/GLONASS 双系统 PPP 的观测模型和随机模型，可以明显提高定位的收敛时间；陈俊平研究员对 GPS/GLONASS 双系统 PPP 的频间偏差（Inter-Frequency Bias, IFB）和系统间偏差（Inter-System Bias, ISB）进行了深入研究，研究了 IFB 和 ISB 的估计，以及它们在定位中的应用^[14]；李敏等学者对 GPS/BDS 双系统 PPP 与 GPS 单系统 PPP 进行了对比分析，发现虽然北斗伪距观测值受多路径影响更为严重，但其静态定位精度与 GPS 单系统定位精度相当，而动态定位的收敛时间和定位精度都优于 GPS 单系统^[15]；任晓东、张柯柯等人研究发现 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 四系统融合 PPP 的收敛速度和定位精度也明显优于单系统，特别在 U 方向优势更大^[16]。

精密单点定位所使用的各类精密产品一般具有一定的时延（包括最终星历和快速星历），不能满足用户对于实时定位和导航的需求。于是 JPL 的研究人员 Muellerschoen 等提出全球实时 PPP 技术，所以自 2013 年起，国际 GNSS 服务机构开始提供实施精密定位产品。叶世榕等学者使用精密卫星预报轨道和实时卫星钟差进行实时 PPP，定位精度优于 40cm^[12]；耿涛等学者使用武汉大学开发的 panda 软件和全球 IGS 站实时观测数据进行实时 PPP，定位精度达到 10~20cm^[17]；刘志强、王解先等学者利用 IGS 实时数据流，可以实现厘米级实时静态和动态定位^[18]。另一方面，随着多系统 GNSS 的发展，促进了多系统实时 PPP 的发展，胡豪杰等学者深入研究了 GPS/BDS 实时 PPP 的定位性能，虽然北斗系统的 MEO 和 IGSO 卫星实时轨道和钟差产品精度不如 GPS 的相关产品，但双系统组合实时 PPP 静态和动态收敛速度都明显优于 BDS 单系统，定位精度与 GPS 单系统相当且优于 BDS 单系统^[19]。

1.3 本文研究内容及章节安排

作者在攻读硕士学位期间通过承担的课题工作，建立和拓展的科研课题，对以下内容进行了研究和学习：基于软件 `rtklib` 对多频多系统 GNSS 精密单点定位进行了详细的学习和研究；对基于 RTCM3.2 的解码处理进行了深入研究；对 MADOCA 的实时精密星历和钟差产品进行解码，并通过与 CNES 的实时产品、GFZ 的事后产品进行对比分析其性能和 GPS 单系统、GPS/GLONASS 组合系统的定位性能；基于软件 `rtklib` 的二次开发对使用等效钟差，轨道改正数，北斗分区综合改正数的定位性能进行评估；深入分析和推导了同时使用不同类型的星历和卫星系统的实时精密单点定位模型并通过实时动态精密单点定位进行性能评估。

全文具体的章节安排如下：

第一章首先介绍了本文的研究背景及意义；简单介绍了各个国家的星基增强系统的发展现状；重点介绍了目前 GNSS 实时精密产品的发展现状，多系统 GNSS 精密单点定位的详细情况；对本文的研究内容，研究目标和创新点进行介绍。

第二章主要介绍了 PPP 基本原理。重点介绍了模型和参数估计方法；重点阐述了包括伪距观测值粗差探测和载波相位周跳探测在内的数据预处理方法；对钟差改正、几何距离和钟差改正等精密单点定位过程中的主要定位误差进行了详细的研究、推导和改正。

第三章首先介绍了 MADOCA 和 RTCM3.2，重点介绍了 MADOCA 精密产品的数据结构、解码流程和数据处理，自行编写了 MADOCA 的解码程序。以往对 MADOCA 实时产品的评估只专注于对其本身精度的评定，所以本文着重进行了 MADOCA 与其他机构的评估结果的对比。评估了其钟差，径向、切向、法向轨道误差，空间信号测距误差 (Signal-in-Space Range Error, SISRE)，仅考虑轨道误差的 SISRE 以及精密参数的可用性，并通过实例进行 GPS 单系统或 GPS/GLONASS 组合系统在使用不同机构的实时精密产品下的定位精度和收敛时间，进一步对 MADOCA 的产品性能和优势进行分析。

第四章介绍了北斗星基增强系统，研究了等效钟差、轨道改正数和北斗分区综合改正数的原理，并掌握了等效钟差，北斗分区综合改正数的计算原理。在此基础上，学习和实现了基于等效钟差，轨道改正数和北斗分区综合改正数的改正策略，进行 BDS 实时静态和动态的精密单点定位，并对其性能进行评估。

第五章分析了双系统定位的优势，推导了使用不同精密星历和改正策略的 GPS/BDS 双系统实时精密单点定位模型。然后进行了 HKSL 测站实时动态精密单点定位，并对该方法进行了性能评估。

第六章，总结与展望。对本文的工作进行了总结，分析研究过程中的收获，提高和不足，并对未来的发展方向进行了简要的讨论。

第二章 GNSS 定位理论模型与计算方法

2.1 精密单点定位理论模型

为了尽可能的提高精密单点定位解算结果的精度、稳定性、连续性以及缩短收敛时间，需要建立最优的函数模型、随机模型和坐标系。函数模型表示观测值与待估参数之间的数学关系，随机模型表示需要观测的变量之间的关系。

随着精密单点定位的快速发展，针对不同数据情况或应用情况，已经有多种成熟的函数模型，常用的如双频无电离层组合模型、非差非组合模型、Uofc 模型和无模糊度模型。他们的主要区别在于是否为组合观测值，以及采用不同的方式处理电离层或模糊度。本文主要采用的为无电离层组合模型。

2.1.1 函数模型

在 GNSS 精密单点定位过程中，一般认为观测值主要包括伪距观测值和载波相位观测值，以双频 GNSS 为例，假设存在 L_1 和 L_2 两个频段，则此时的观测方程可以表示为：

$$P_i = \rho + c(dt_r - dt^s) + T + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_1 + b_{Pi}^r - b_{Pi}^s + \varepsilon_{Pi} \quad (2.1)$$

$$L_i \equiv \lambda_i \Phi_i = \rho + c(dt_r - dt^s) + T + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_1 - \lambda_i N_i + b_{Li}^r - b_{Li}^s + \varepsilon_{Li} \quad (2.2)$$

上式中， P_i 表示伪距观测值（单位：m）， L_i 表示载波相位观测值（单位：m）， Φ_i 表示相位观测值（单位：周）， λ_i 表示 L_i 频段的频率 f_i 对应的波长， ρ 表示接收机到卫星之间的几何距离， $c = 2.99792456 \times 10^8 m/s$ 表示真空中的光速， dt_r 和 dt^s 分别表示接收机和卫星端的钟差， T 为对流层延迟（包括干延迟和湿延迟），通常干延迟用模型进行改正，湿延迟作为参数进行估计， I_1 表示 L_1 频段的频率 f_1 的电离层延迟， b_{Pi}^r 、 b_{Pi}^s 分别表示与频率相关的接收机或卫星端的伪距硬件延迟偏差， N_i 为载波相位整周模糊度（单位：周）， b_{Li}^r 、 b_{Li}^s 分别表示与频率相关的接收机或卫星端相位延迟偏差， ε_{Pi} 、 ε_{Li} 分别表示伪距观测值或载波相位观测值的多路径误差等各项误差之和。其中， dt_r 、 dt^s 的单位为秒， ρ 、 λ_i 、 T 、 I_1 、 b_{Pi}^r 、

b_{Pi}^s 、 b_{Li}^r 、 b_{Li}^s 、 ε_{Pi} 、 ε_{Li} 的单位为米。而其他方面的误差，如相对论效应、天线相位中心偏差等可以通过现有的准确模型进行彻底的改正。

如式 2.1 和 2.2 这样的函数模型即非差非组合的精密单点定位模型，它将电离层延迟作为参数进行估计，非差非组合有利于控制原始观测值的观测噪声不会因组合而放大，同时也可以降低电离层延迟对定位的影响。但电离层延迟难以准确估计，而双频无电离层组合模型可以解决这一问题。

(1) 双频无电离层组合模型

同样以双频伪距观测值和载波相位观测值为例，精密单点定位的双频无电离层组合观测方程可以表示为：

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \rho + c(dt_r - dt^s) + T + b_{PIF}^r - b_{PIF}^s + \varepsilon_{PIF} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} L_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 \\ &= \rho + c(dt_r - dt^s) + T - \lambda_{IF} N_{IF} + b_{LIF}^r - b_{LIF}^s + \varepsilon_{LIF} \end{aligned} \quad (2.4)$$

在 PPP 的数据处理过程中，因为使用了精密星历和精密钟差，卫星轨道误差和卫星钟差都可以不再考虑，硬件延迟带来的偏差也可以被接收机钟差和模糊度吸收，所以，在进一步改正各项误差之后，可以将无电离层组合的观测方程由式 2.3 和 2.4 简化为：

$$P'_{IF} = \rho + c \cdot dt_r + T + \varepsilon'_{PIF} \quad (2.5)$$

$$L'_{IF} = \rho + c \cdot dt_r + T - \lambda_{IF} N_{IF} + \varepsilon'_{LIF} \quad (2.6)$$

N_{IF} 表示无电离层组合载波相位观测值的模糊度（单位：周）， λ_{IF} 为组合观测值的波长， P'_{IF} 和 L'_{IF} 表示简化后的无电离层组合伪距观测值和载波相位观测值， ε'_{PIF} 和 ε'_{LIF} 表示其他误差和噪声， λ_{IF} 、 P'_{IF} 、 L'_{IF} 、 ε'_{PIF} 和 ε'_{LIF} 的单位都为米。

最终无电离层组合模型需要估计的参数主要包括：接收机坐标、接收机钟差、对流层湿延迟和无电离层组合载波相位模糊度。如果可以连续观测到 n 颗卫星，则对应的观测方程为 $2n$ ，自由度为 $n-5$ ，待估参数为 $5+n$ ，所以至少需要观测到 5 颗卫星。

(2) Uofc 模型

Uofc (University of Calgary) 模型与无电离层模型类似，它利用了无电离层

模型的载波观测值,然后又计算了双频伪距观测值和载波相位观测值的平均值作为第二个观测值,因此 Uofc 模型又称作“半和模型”。同样以双频 GNSS 为例,假设存在 L_1 和 L_2 两个频段,在经过精密星历和精密轨道进行误差改正之后,其 Uofc 的函数模型可以表示为:

$$P_{IF}^{1'} = \frac{P_1 + L_1}{2} = \rho + c \cdot dt_r + T + 0.5\lambda_1 N_1 + 0.5\varepsilon_{P_{IF}^{1'}} \quad (2.7)$$

$$P_{IF}^{2'} = \frac{P_2 + L_2}{2} = \rho + c \cdot dt_r + T + 0.5\lambda_2 N_2 + 0.5\varepsilon_{P_{IF}^{2'}} \quad (2.8)$$

$$L'_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 = \rho + c \cdot dt_r + T - \lambda_{IF} N_{IF} + \varepsilon'_{L_{IF}} \quad (2.9)$$

上式中, $P_{IF}^{1'}$ 、 $P_{IF}^{2'}$ 分别表示简化后的 L_1 和 L_2 频段上伪距和相位的半和模型组合观测值,单位为米。Uofc 模型需要估计的参数主要包括:接收机坐标、接收机钟差、对流层湿延迟 L_1 和 L_2 频段上载波相位模糊度。如果可以连续观测到 n 颗卫星,则对应的观测方程为 $3n$, 自由度为 $n-5$, 待估参数为 $5+2n$, 所以至少需要观测到 5 颗卫星。

2.1.2 随机模型

(1) 高度角随机模型

一般来说,GNSS 观测过程中的多路径效应、大气延迟等误差会受到高度角的影响,GNSS 卫星的高度角越低,影响会越明显。所以可以建立一个基于卫星高度角作为变量来表示观测噪声的随机模型,即高度角随机模型。最常见的高度角随机模型为正余弦函数模型和指数函数模型。

正余弦函数模型一般可以表示为:

$$\sigma^2 = a^2 + b^2/\sin^2 E \text{ 或 } \sigma^2 = a^2 + b^2 \cos^2 E \quad (2.10)$$

指数函数模型一般可以表示为:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \left(1 + a e^{-\frac{E}{E_0}} \right)^2 \quad (2.11)$$

上式中, σ_0 表示观测值天顶方向上的先验中误差, E_0 表示参考高度角, a 表示放大因子。

而在一些软件中,也采取如下的高度角定权策略:

$$\sigma^2 = \begin{cases} a^2, & E \geq 30^\circ \\ \frac{a^2}{4\sin^2 E}, & E < 30^\circ \end{cases} \quad (2.12)$$

(2) 信噪比随机模型

信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 表示信号强度与噪声之间的比值, 它一般会受到多路径效应, 大气延迟, 接收机内部电路等多方面的综合影响, 在一定程度上可以通过 SNR 来表现数据的质量。Ward 等学者利用 SNR 观测信息建立了载波相位观测值的随机模型:

$$\sigma^2 = \frac{B_n}{10^{\frac{c}{10N_0}}} \left(1 + \frac{1}{2 \times T \times 10^{\frac{c}{10N_0}}} \right) \quad (2.13)$$

上式中, B_n 表示相位跟踪环带宽 (单位: Hz), T 表示一体化检测波时间 (单位: s), T 一般认为约等于导航数据的位长。但考虑到实际状况下, 观测值噪声的方差量级非常小, 可以忽略不计, 所以式 2.13 可以简化为:

$$\sigma^2 = B_n \times 10^{-\frac{c}{10N_0}} \quad (2.14)$$

为了统一方差的单位, 一般使用 C_n 表示 B_n , $C_n = B_n \times (\lambda/2\pi)^2$, λ 表示对应频率的波长 (单位: 米), 所以, 式 2.14 可以表示为:

$$\sigma^2 = C_n \times 10^{-\frac{c}{10N_0}} \quad (2.15)$$

因为 SNR 并不是 GNSS 精密单点定位过程中必须获得的参数, 所以, 一般情况下, 用户无法直接获得实测的 SNR, 但是在 GNSS 观测文件中, 载波相位观测值最后两位增设了信号强度指数 I , 所以可以通过以下公式计算得到信号强度所对应的 SNR:

$$\frac{c}{N_0} = \begin{cases} 9, & \text{int}\left(\frac{I}{5}\right) > 9 \\ \text{int}\left(\frac{I}{5}\right), & \text{其他} \end{cases} \quad (2.16)$$

2.1.3 空间坐标系与坐标系转换模型

在 GNSS 卫星定位时需要建立空间坐标系统, 通常用定位目标或卫星在某种空间坐标系下的坐标来表示其在空间中的位置。通常包括惯性坐标系和地球坐标系两大类。惯性坐标系是指在空间静止或做匀速直线运动的坐标, 通常很适合用

来描述在地球引力作用下的卫星运行状态,然而考虑到地球自转轴会绕北黄极做缓慢地旋转,同时还存在局部小幅旋转,所以很难建立一个严格的惯性坐标系。而且考虑到惯性坐标系与地球自转无关,所以地球上的某个固定位置在惯性坐标系里的坐标会随着地球自转而时刻发生改变。地球坐标系是随着地球一起公转和自转的一种坐标系,这样以来地球坐标系上的任意一点不会因地球旋转或自转轴旋转而改变坐标。

最常用的两种地球坐标系为地心直角坐标系和地心大地坐标系,他们都是以地球质心(即地心)为坐标原点 O ,所以他们也统称地心地固坐标系。地心直角坐标系的 Z 轴与地球自转轴重合并指向地球北极, X 轴指向地球赤道与参考子午面的交点,通常采用英国伦敦的格林尼治子午面,以右手直角坐标系法则构成 Y 轴,以 (X, Y, Z) 表示某点在地心直角坐标系中的坐标。地心大地坐标系以大地纬度、大地经度和大地高度表示某点在坐标系中的位置,以 (Φ, λ, h) 表示,它能更直观地表示该点在地球中的位置,更适合表示地面和地面附近的坐标。本文在定位过程中最常使用的是 WGS-84 直角坐标系是一个相当精确的协议地心直角坐标系,它同时定义了建立相应的地心大地坐标系所需的基准,描述了相应的地球重力场模型和修正后的基本大地参数。

有时定位的最后结果还需要表示为目标用户所在位置的站心坐标系,以其所在的位置作为坐标原点,以目标所在位置相互垂直的东向、北向和天向作为三个坐标轴,以 (E, N, U) 表示。站心坐标系与地心大地坐标系的 h 轴方向是一致的,也是一种地球坐标系。

在 GNSS 定位过程中,计算卫星位置和目标位置通常需要在 WGS-84 直角坐标系下完成,而最终为了方便用户获取自己的位置信息,又需要以地心大地坐标系或站心坐标系来表示,所以需要建立经常在不同坐标系下进行转化。以下是它们的转化模型:

(1) 地心大地坐标系 (Φ, λ, h) 转换到地心直角坐标系 (X, Y, Z)

$$\begin{aligned} X &= (N + h)\cos\Phi\cos\lambda \\ Y &= (N + h)\cos\Phi\sin\lambda \\ Z &= [N(1 - e^2) + h]\sin\Phi \end{aligned} \quad (2.17)$$

其中, N 为基准椭球的卯酉圆曲率半径, e 为椭球的偏心率。

(2) 地心直角坐标系 (X, Y, Z) 转换到地心大地坐标系 (Φ, λ, h)

$$\begin{aligned}\lambda &= \arctan\left(\frac{X}{Y}\right) \\ h &= \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos\Phi} - N \\ \Phi &= \arctan\left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N + h}\right)^{-1}\right]\end{aligned}\quad (2.18)$$

因为计算 h 和 Φ 都需要先求出对方,所以通常假设 Φ 的值为 0 ,再依次求得 λ 、 h 和 Φ ,再继续迭代来逼近 h 和 Φ 的值。

(3) 地心直角坐标系(X, Y, Z)转换到站心坐标系(E, N, U)

假设站心坐标系原点在地心直角坐标系的坐标为 (x, y, z) ,则转换模型如下式所示,

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} X - x \\ Y - y \\ Z - z \end{bmatrix}\quad (2.19)$$

其中 S 为坐标转换矩阵,矩阵中的 (Φ, λ, h) 即该点在地心大地坐标系中的坐标,坐标转换矩阵如下式所示,

$$S = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\Phi\cos\lambda & -\sin\Phi\sin\lambda & \cos\Phi \\ \cos\Phi\cos\lambda & \cos\Phi\sin\lambda & \sin\Phi \end{bmatrix}\quad (2.20)$$

(4) 站心坐标系(E, N, U)转换到地心直角坐标系(X, Y, Z)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}\quad (2.21)$$

2.2 物理理论模型及误差改正

GNSS 精密定位过程中,信号从卫星发射开始,直至被接收机接收到信号结束,整个传播过程中都会受到各种因素的影响而产生定位误差。主要可以分为与 GNSS 卫星相关的误差、与接收机相关的误差、与 GNSS 卫星信号传播路径相关的误差三类,每一种误差产生的影响和改正策略都不相同。与 GNSS 卫星相关的误差包括卫地距误差、卫星钟差、相对论效应、天线相位中心偏移、天线相位缠绕和差分码偏差等误差;与接收机相关的误差有接收机钟差、地球自转改正误差、固体潮汐改正、海洋负荷改正和观测噪声等误差;与传播路径相关的误差包括多路径效应、电离层延迟和对流层延迟等。其中绝大多数误差都可以使用准确的数学模型估计和精密产品来改正,电离层延迟误差可以通过无电离层模型来解

决，还有一部分误差可以被其他定位参数吸收或者作为待估量进行估计。因此，本文只针对以下几项重要且常见的误差进行介绍。

2.2.1 对流层效应原理与改正

高度 50km 以下的大气层是对流层，而对流层占据了整个大气层中的绝大多数质量。通常 GNSS 卫星信号在对流层中的传播速度为 $V = c/n$ ， c 表示真空中的光速， n 表示其折射率，折射率的值由气压、气温和相对湿度等因素决定。除此之外，信号的传播路径也会发生弯曲。这些因素一起导致的测量系统偏差即对流层延迟。

因为对流层属于非色散介质，对流层折射产生的影响与 GNSS 信号自身频率大小没有关系，所以对流层延迟可以分为干延迟和湿延迟两个部分，干延迟主要由大气压力和温度影响，湿延迟主要由信号传播路径上不同高度和大气湿度影响，其中干分量延迟可以占对流层总延迟的 90%，而湿延迟分量仅占 10% 左右，分别可以用 $\Delta trop_{zpd}$ 和 $\Delta trop_{zpw}$ 表示接收机天顶方向的干延迟分量和湿延迟分量，如果用对流层延迟和其映射函数的乘积来表示，公式如下所示：

$$\Delta trop = \Delta trop_{zpd} M_d(E) + \Delta trop_{zpw} M_w(E) \quad (2.22)$$

上式中， $\Delta trop$ 即信号传播路径上的对流层总延迟， $M_d(E)$ 和 $M_w(E)$ 分别表示干延迟分量和湿延迟分量与卫星高度角相关的映射函数， E 即卫星高度角。

由于湿延迟分量难以用模型进行精确改正，所以在精密单点定位过程中，通常将干延迟和湿延迟分开，干延迟通过对流层模型进行改正，湿延迟则通过参数估计的方式作为待估量进行改正。对流层延迟改正模型中常见的有 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型。

Saastamoinen 模型如下所示：

$$\begin{cases} trop_{zpd} = 0.002277 \times \frac{P_0}{g} \\ trop_{zpw} = \frac{0.002277 \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e_0}{g} \\ g = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00028 h_0 \end{cases} \quad (2.23)$$

上式中， P_0 表示接收机所在位置的大气压， T 表示接收机所在位置的气温， e_0 表示接收机所在位置的水气压， φ 表示接收机所在纬度， h_0 表示接收机所在高

程。

2.2.2 相对论效应原理与改正

根据广义相对论，一束在重力场中向下下落的光的频率会变高，而上升的光频率会降低，卫星所在的高度上重力与地球相比明显较小，因此会使人们在地面上接收到一个更高的频率信号，所以距离地球越远的卫星时钟将走的越快。但根据狭义相对论，运动的坐标系中的时间会走的更慢一些，一束光从一个运动的发射装置发射出去被静止的接收器接收到时，频率会变低，这种时间膨胀会让围绕地球高速飞行的卫星上的时钟走得慢一些。

结合广义相对论与狭义相对论产生的影响，在 GNSS 定位过程中，因为太空中卫星钟与地面上接收机钟的运动速度有着明显的差距，同时所处的引力位也不同，而不同的状态都会使得时钟振荡器产生频移现象，这种由于相对论原因产生的卫星钟与接收机钟的相对钟差误差即为相对论效应。通常，在 GNSS 卫星发射时，可以通过将卫星钟的基准频率调低一点来解决相对论效应。但由于地球重力场变化、地球运动影响、卫星轨道高度角不同等原因，相对论改正数值并非常数，还会产生一项非圆形轨道造成的小周期误差，如下式所示：

$$\Delta\rho = -\frac{2}{c}x \cdot \dot{x} \quad (2.24)$$

上式中， x 表示卫星的位置矢量， \dot{x} 表示卫星的速度矢量， $\Delta\rho$ 为相对论改正值，利用精密星历定位时常用此公式改正相对论效应。

2.2.3 几何距离和钟差改正

卫星到用户接收机的几何距离一般可以表示成：

$$\rho = \sqrt{(X - X^S)^2 + (Y - Y^S)^2 + (Z - Z^S)^2} \quad (2.25)$$

其中， (X, Y, Z) 表示接收机所在的位置坐标， (X^S, Y^S, Z^S) 表示卫星坐标。通常，用户可以使用广播星历里面的参数计算出对应时刻的卫星坐标。GPS 广播星历的精度优于 2m，而 BDS 广播星历的精度一般情况下可以优于 4.5m，但都无法满足精密单点定位的需求，所以，一般可以通过使用各种精密星历产品来改正广播星历产生的几何距离误差。常见的精密星历产品有：快速精密星历（IGR）、最

终精密星历（IGS）以及超快速精密星历（IGU）。如果是实时精密单点定位，则需要通过实时接收实时精密星历产品，获得实时的轨道改正数，将广播轨道改正为精密轨道。

另一个卫星端的主要误差为卫星钟差。一般认为卫星时钟存在频率漂移，其导致的 GPS 标准时和卫星时钟产生的差值即卫星钟差。该误差同样会直接影响到卫星位置的计算，从而在计算卫星与接收机之间的距离时产生误差。

在使用广播星历进行定位时，考虑到卫星上原子钟受到的钟速、钟漂、频漂等因素影响，通常将卫星钟差通过广播星历中的钟差参数进行改正，如下式所示：

$$\Delta t = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (2.26)$$

上式中， a_0 、 a_1 和 a_2 分别表示广播星历提供的三个参数钟差、钟速、钟漂值， t 表示卫星信号发射的时刻， t_0 表示星历钟差的参考时刻。但是广播星历的参数精度较低，改正后的卫星钟差仍存在 10ns 左右的误差，可以满足一般定位的需求。所以，可以通过使用精密星历来进一步提高卫星钟差的精度。

不同的机构和 IGS 的分析中心可以提供不同时间间隔的精密钟差产品，一般为 30s 和 5min 两种，用户可以通过函数内插的方式来获取观测时刻的精密钟差改正数值，从而满足实时精密单点定位的需求。

2.2.4 差分码偏差改正

不同类型不同频率的导航信号在接收机和卫星内部传播时总会产生硬件延迟，包括差分码偏差硬件延迟（Different Code Bias, DCB）和载波相位偏差硬件延迟。目前精密单点定位过程中，模糊度仍常作为带估量进行估计为浮点解，所以载波相位硬件延迟会被模糊度吸收。另一方面，DCB 包括接收机端的硬件延迟偏差和卫星端的硬件延迟偏差，其中 GPS、Galileo、BDS 系统的接收机端 DCB 通常会被接收机钟差所吸收。但 GLONASS 系统采用的是频分多址的技术，其接收机端的 DCB 又可以分为平均硬件延迟和与频率相关的硬件延迟，GLONASS 系统的平均硬件延迟 DCB 同样会被接收机钟差所吸收，但与频率有关的硬件延迟 DCB 无法被吸收。

对于 GPS 系统而言，假设卫星钟差以 L_1 频段为基准，那么 L_2 频段的卫星钟差可以表示为：

$$dt_2^s = dt_1^s + DCB_{12}^s \quad (2.27)$$

上式中， dt_1^s 和 dt_2^s 分别表示 L_1 和 L_2 频段对应的卫星钟差， DCB_{12}^s 表示 L_1 和 L_2 频段的DCB。通常，GPS、GLONASS、Galileo系统的卫星钟差即通过 L_1 和 L_2 频段的无电离层组合观测值计算得到。进行单频精密单点定位时需要将DCB参数正确归算到对应的单频信号上，BDS系统略有不同，BDS系统的广播钟差是以 B_3 为基准计算得到的，精密钟差由 B_1 和 B_2 频段的无电离层组合观测值计算得到的。

GPS将其导航电文中 L_1 频段的的天线相位中心与 L_1 和 L_2 频段的无电离层组合的参考点时间延迟定义为TGD (Time Group delay)。BDS则提供两个硬件延迟改正参数 TGD_1 和 TGD_2 。

因此，GPS系统改正后的 L_1 和 L_2 频段对应的卫星钟差可以表示为：

$$dt_1^s = dt_{IF}^s - TGD = dt_{IF}^s + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} DCB_{12}^s \quad (2.28)$$

$$dt_2^s = dt_{IF}^s - \frac{f_1^2}{f_2^2} TGD = dt_{IF}^s + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} DCB_{12}^s \quad (2.29)$$

BDS系统改正后的卫星钟差可以表示为：

$$dt_1^s = dt_3^s - TGD_1 \quad (2.30)$$

$$dt_2^s = dt_3^s - TGD_2 \quad (2.31)$$

2.3 参数估计

在实际计算过程中，往往是不能通过测量直接获得的，也很难直接计算出准确的结果，所以通常需要建立数学关系，联系起观测值和待估值，即用参数估计来表示测量和计算过程。假设在观测值 Z 与待估参数 x 之间存在关系 H ，那么观测方程可以表示为：

$$Z = HX + \Delta \quad (2.32)$$

上式中 H 为列满秩矩阵，而观测误差一般认为符合期望为 0 的高斯分布，即 $\Delta \sim N(0, D)$ 。因此观测值 Z 的分布符合 $Z \sim N(HX, D)$ 。最小二乘估计就是一种建立在这样的参数估计方法基础之上的一种估计方法。

2.3.1 最小二乘估计

假设观测值 \hat{Z} 和观测值真值 Z 之间的差值为 v ，可以表示为：

$$v = \hat{Z} - Z = H\hat{X} - Z \quad (2.33)$$

v 即最小二乘估计的准则中残差，即观测值残差，这个方程即误差方程。所以最小二乘估计的准则可以表示为：

$$\sum_{i=1}^{i=l} v_i^2 = \min \quad (2.34)$$

所以在误差方程产生的无穷多组解中，能够满足上式的解就是最小二乘解 \hat{X}_{LS} 。

在实际测量过程中，观测值还存在着不同的精度，精度好的观测值比精度差的观测值在估计和测量过程中会产生更大的影响，所以应当赋予观测值方差不同的权重来实现其精度不同的价值。

定义 $W = \sigma_0^2 D^{-1}$ ，最小二乘估计的准则变为：

$$v^T W v = \min \quad (2.35)$$

定义 $\Phi(\hat{X}) = v^T W v = \min$ ，并将误差方程代入，可以得到：

$$\begin{aligned} \Phi(\hat{X}) &= (H\hat{X} - Z)^T W (H\hat{X} - Z) \\ &= \hat{X}^T H^T W H \hat{X} - \hat{X}^T H^T W Z - Z^T W H \hat{X} + Z^T W Z \end{aligned} \quad (2.36)$$

然后使其导数为零，可以得到下式：

$$\frac{\partial \Phi(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = 2H^T W H \hat{X} - 2H^T W Z = 0 \quad (2.37)$$

所以参数估计方程可以表示为：

$$\hat{X}_{LS} = (H^T W H)^{-1} H^T W Z \quad (2.38)$$

并且可以将残差表示为：

$$v = -(I - H(H^T W H)^{-1} H^T W) Z \quad (2.39)$$

此时，残差还可以继续用于迭代计算来减少线性化带来的误差，最终经过 k 次迭代后的参数估计结果将是：

$$\hat{X}_{LS} = X_0 + \hat{x}_{LS}^{(1)} + \dots + \hat{x}_{LS}^{(k)} \quad (2.40)$$

最小二乘估计的期望为 X ，残差的期望为 0 。

2.3.2 卡尔曼滤波

卡尔曼 (Kalman) 滤波与最小二乘估计类似, 它是一种基于一组观测序列及系统动力学模型来求出估值的参数估计方法, 其表达式如下:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1}X_{k-1} + w_k \\ L_k = H_kX_k + v_k \end{cases} \quad (2.41)$$

上式中, $L_k(k = 1, 2 \dots n)$ 表示一组观测序列, 假设系统的状态初值 $X_0 = \hat{X}_0$, 那么在已知系统状态噪声和观测噪声的统计性质的前提下, 计算任意时刻的卡尔曼滤波估计 \hat{X}_k 的过程如下文所示。

状态预测方程为:

$$X_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1}\hat{X}_{k-1} \quad (2.42)$$

定义参数的协因数阵为 P , 初始方差阵为 P_0 , 则协方差预测方程可以表示为:

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1}P_{k-1}\Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \quad (2.43)$$

定义观测值的协方差阵为 R , 则滤波增益方程为:

$$K_k = P_{k,k-1}H_k^T(H_kP_{k,k-1}H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.44)$$

那么状态参数估计方程可以表示为:

$$\hat{X}_k = X_{k,k-1} + K_k(L_k - H_kX_{k,k-1}) \quad (2.45)$$

状态协方差估计方程为:

$$P_k = (I - K_kH_k)P_{k,k-1} \quad (2.46)$$

2.4 数据预处理

2.4.1 伪距观测值的粗差探测

一般情况下, 伪距观测值的粗差探测与周跳的探测是一起进行的, 但是在实际定位过程中, 有一些异常观测值是由伪距导致的, 周跳探测过程中可能会使得正常的观测值也被剔除, 导致一些正常观测数据丢失或者浪费。一般可以采用伪距观测值求差的方法来探测较大的粗差。例如常见的相同频率不同类型的伪距观测值 C1、P1, 不同频率相同类型的伪距观测值 P1、P2 之间, 可以使用求差的方法来探测伪距观测值粗差。首先, 建立探测方程式:

$$dC1P1 = C1 - P1 = d_s^{C1P1} + d_r^{C1P1} + s_{C1P1} + \varepsilon \quad (2.47)$$

$$dP1P2 = P2 - P1 = d_s^{P1P2} + d_r^{P1P2} + s_{P1P2} + d_I + v \quad (2.48)$$

上式中， $dC1P1$ 和 $dP1P2$ 分别为 $C1P1$ 和 $P1P2$ 伪距观测值之间分别的差值， d_s^{C1P1} 、 d_r^{C1P1} 、 d_s^{P1P2} 和 d_r^{P1P2} 分别为接收机或卫星端的伪距硬件延迟偏差， s_{C1P1} 和 s_{P1P2} 分别为不同类型的伪距偏差之间的时变量， d_I 为电离层延迟的残余误差， ε 和 v 分别为 $dC1P1$ 和 $dP1P2$ 的观测噪声、多路径效应等综合误差。

从式 2.47 和 2.48 中不难可以分析出， $dC1P1$ 和 $dP1P2$ 主要与接收机或卫星端的伪距硬件延迟偏差以及求差后的观测噪声、多路径效应等综合误差相关，相对比较稳定，可以以此作为标准判断较大的粗差，一般判断的标准为：

$$\begin{cases} H_0: \text{无粗差, } |dC1P1| \leq k1 \text{ 且 } |dP1P2| \leq k2 \\ H_1: \text{有粗差, } |dC1P1| > k1 \text{ 且 } |dP1P2| > k2 \end{cases} \quad (2.49)$$

式 2.49 中， $k1$ 和 $k2$ 表示探测阈值， $k1 < k2$ ， $k1$ 通常取值 10， $k2$ 通常取值 30。

2.3.2 相位观测值的周跳探测

GNSS 定位过程中，由于接收机钟的稳定性不如卫星钟，接收机钟差会随着测量过程逐渐发生漂移，使得接收机钟难以与卫星钟保持同步，产生钟跳。但一般认为钟跳产生的系统偏差在一定程度上会被接收机钟差吸收，不影响 GNSS 定位解算。因此，本文仅讨论周跳探测的方法，介绍两种双频周跳探测的方法：MV 组合法和无几何距离组合法。

(1) MW 组合法

双频 MW 组合法是伪距窄巷组合和载波宽巷组合的差值，即求取了伪距组合观测值和载波相位组合观测值的差值，其差值公式为：

$$L_{MW} = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 - f_2 P_2) = \frac{c}{f_1 - f_2} (N_2 - N_1) + v \quad (2.50)$$

$$\lambda_w = \frac{c}{f_1 - f_2} \quad (2.51)$$

上式中， L_{MW} 为双频 MW 组合观测值， λ_w 为组合波长值， N_1 和 N_2 分别为双频模糊度值， v 为观测噪声、多路径效应等综合误差。MW 组合法可以消除伪距观测值、接收机钟差、卫星钟差、电离层延迟和对流层延迟等的影响，仅与宽巷模糊度、观测噪声和多路径效应相关。所以，如果双频观测值没有发生周跳， L_{MW}

应当不会发生明显的变化，仅受到综合误差的影响，接近一个稳定的数值。

此时，再通过历元间求差，获得周跳探测值，公式如下所示：

$$\Delta L_{MW} = L_{MW}(t-1) - L_{MW}(t) = \frac{c}{f_1 - f_2} (\Delta N(t-1) - \Delta N(t)) \quad (2.52)$$

由上式不难得出结论，如果发生了周跳，周跳探测值 ΔL_{MW} 将会产生明显的变动，如果没有发生周跳，仅受综合误差影响的 ΔL_{MW} 将只会在零均值附近微小的波动，由此可以判断出是否产生了周跳。

但是，如果双频载波观测值同时发生了相同的周跳，历元间求差会消除该相同的周跳，MW组合法将无法准确探测出周跳，所以需要在通过其他多种周跳探测方法进行探测。

(2) 无几何距离组合法

双频无几何距离组合法是通过消除接收机钟差、卫星钟差、伪距观测值和对流层延迟等误差产生的影响，考虑电离层延迟误差、模糊度、观测噪声和多路径效应产生的影响。双频条件下，其载波相位观测值做差，可以得到无几何距离组合法观测值：

$$L_{GF} = L_1 - L_2 = \delta I + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + \varepsilon \quad (2.53)$$

上式中， L_{GF} 为无几何距离组合法观测值， δI 为电离层延迟误差， ε 为观测噪声、多路径效应等综合误差。

无几何距离组合法是通过相同历元的载波相位观测值之差 L_{GF} 再求历元间的差值得到周跳探测值的。因为测噪声、多路径效应等综合误差产生的影响非常微小且稳定，可以忽略不计。而历元间的电离层延迟误差应当也是一个稳定的值，在求差之后电离层误差产生的影响也可以忽略不计。所以，周跳探测值可以表示为：

$$\Delta L_{GF} = L_{GF}(t+1) - L_{GF}(t) = \Delta I + \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 + \Delta \varepsilon \quad (2.54)$$

如MW组合法分析类似，使用无几何距离组合法可以通过 ΔL_{GF} 的对应阈值（一般阈值 $\delta = 0.5$ ）来探测周跳，判断式为：

$$\begin{cases} |\Delta L_{GF}| < \delta, & \text{无周跳} \\ |\Delta L_{GF}| > \delta, & \text{有周跳} \end{cases} \quad (2.55)$$

第三章 MADOCA 实时精密星历定位研究

3.1 MADOCA 实时精密星历

3.1.1 RTCM3.2

随着多系统 GNSS 的不断拓展,用户的精度和可靠性需求越来越高,差分定位技术、精密单点定位技术等定位技术在进一步满足用户的需求的同时,也对大量的电文传输提出新的要求。1983 年,RTCM SC-104 委员会提出了差分导航全球卫星系统的差分数据格式来确定卫星信号传输过程中差分信息的存储、产生和交换协议。1990 年 1 月公布的 V2.0 版本将差分定位精度由 8-10m 提高到 2-3m,但该版本没有载波相位差分信息,只有伪距差分信息。于是,随后又不断提出 RTCM2.X 版本,逐渐增加实时动态定位(Real Time Kinematic, RTK)的新电文, GLONASS 差分导航电文以及载波相位电文等,并广泛应用于测绘等众多领域之中。

但 RTCM2.X 还存在着诸多明显的问题,如奇偶校验模式、校验码之间不独立,解码过程繁琐困难,浪费带宽等等,于是 2004 年 RTCM 委员会提出 V3.0 版本,并逐渐升级为 2013 年推出的 RTCM3.2^[20]。该版本不仅弥补了 RTCM2.X 的诸多缺陷,还增加了网络差分改正数, GPS、GLONASS 卫星轨道参数,提供了对 Galileo 和 BDS 系统的支持,统一多系统数据的存储和发送,实现多系统信息融合^[21]。

RTCM3.2 版本采用的是 SC-104 公布的版本标准,使用 OSI (Open System Interconnection) 标准参考模型定义了 5 个层面——物理层、数据链路层、传输层、表示层以及应用层。对于编码和解码而言,最重要的是传输层和表示层。传输层定义了发送和接收 RTCM3.2 的数据结构,定义了传输协议和校验方法,并决定以二进制形式进行数据传输。表示层定义了整个数据结构细节上的详细规则,如数据字段,消息类型等方面,其中数据以位为存储单位,有效减少了传输数据的长度,对于没有占用的字节位用“0”补满。

为了满足逐渐增加的多频多系统的需求,RTCM3.2 在保留了之前的版本的基础之上,还引入了多信号电文组(MSM)。MSM 是 RTCM3.2 的核心标准,可

以兼容原有的格式中的 DGNSS/RTK 的数据，也可以实现实时传输、保存基于网络的 RINEX 格式观测值。MSM 的通用性更好，很适合编码、解码，将来一定会发展成为实时 GNSS 数据传输的重要标准。

3.1.2 MADOCA

MADOCA-SEAD (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis Supply of “MADOCA-PPP”-Enabled Advanced Demonstration system) 是日本 QZSS 系统开发的一套使用卫星轨道和钟差的精确改正信息进行精密单点定位的系统。它可以精确地估算 GPS, QZSS, GLONASS, Galileo 和 BDS 等 Multi-GNSS 的轨道和钟差，并提供估算的产品作为卫星导航的改正信息，称之为 MADOCA-products。但实际上，目前 MADOCA 仅能提供 GPS、QZSS 和个别 QZSS 卫星的改正信息。图 3.1 为 MADOCA-SEAD 系统的原理图^[6]。

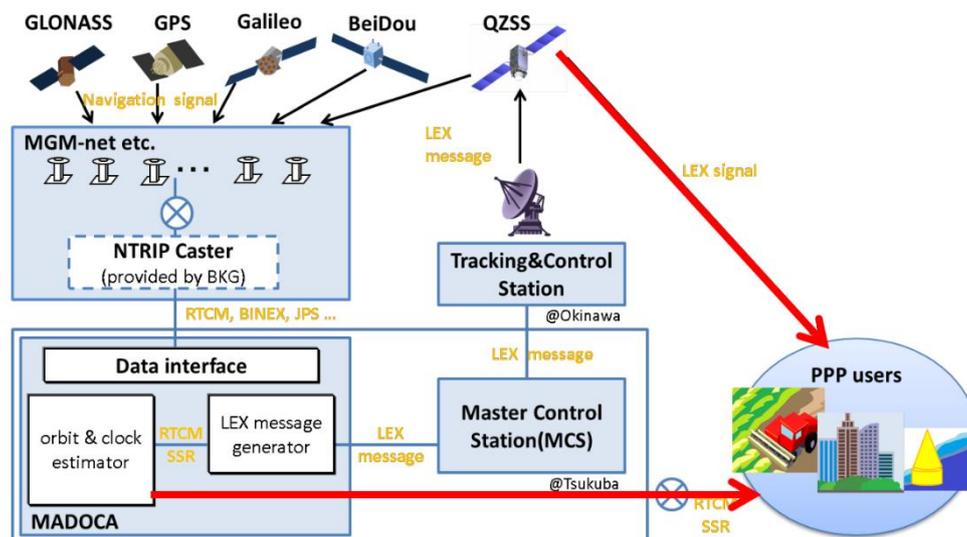


图 3.1 MADOCA-SEAD 系统原理图

MADOCA 的精密产品主要通过以下三种途径获得：

(1) 通过网络

通过网络获取的 MADOCA 实时精密产品遵循国际标准格式“RTCM10403.2”，并使用 NTRIP 协议。

(2) 通过卫星

MADOCA-SEAD 可以根据国际标准格式“RTCM10403.2”将 MADOCA 实时精密产品存储为低速率格式，并通过 QZS-1 卫星的 LEX 信号传输给用户或测

站。

(3) 通过 FTP 服务

MADOCA-SEAD 可以遵循国际标准格式“RTCM10403.2”或者 RINEX SP3 格式，将 MADOCA 的实时精密产品发布在 JAXA 的 FTP 服务器上。

MADOCA-SEAD 采用的是“RTCM10403.2”中的“RTCM SSR (State Space Representation)”格式，与其他精密星历和钟差格式相同，在该格式下，为卫星轨道改正，钟差改正，URA，码偏差改正以及其他 MADOCA-SEAD 产品等每种改正信息类型定义了专属的“信息类型编号 (Message Type Number)”，如表 3.1 所示。

表 3.1 MADOCA-SEAD 提供的各种改正信息编号及长度^[1]

Message Type Number	Message Name	No. of bits
1057	SSR GPS Orbit Correction	$68+135*NS^{[2]}$
1059	SSR GPS Code Bias	$67+11*NS+19\sum NCB^{[3]}$
1061	SSR GPS URA	$67+12*NS$
1062	SSR GPS High Rate Clock Correction	$67+28*NS$
1063	SSR GLONASS Orbit Correction	$65+134*NS$
1065	SSR GLONASS Code Bias	$64+10*NS+19\sum NCB$
1067	SSR GLONASS URA	$64+11*NS$
1068	SSR GLONASS High Rate Clock Correction	$64+27*NS$
1246	SSR QZSS Orbit Correction	$66+133*NS$
1248	SSR QZSS Code Bias	$65+9*NS+19\sum NCB^{[4]}$
1250	SSR QZSS URA	$65+10*NS$
1251	SSR QZSS High Rate Clock Correction	$65+26*NS$
11	SSR GPS Carrier Phase Bias	$69+28*NS+49\sum NPB$
13	SSR QZSS Carrier Phase Bias	$67+26*NS+49\sum NPB$

[1]除表中所示改正信息类型以外，MADOCA-SEAD 还计划提供如 BDS、Galileo 的卫星轨道、钟差、URA、码偏差改正等信息，但目前还未正式提供对应的产品，也未能从卫星信号中解码得到对应的格式，故暂不列入表中。

[2]NS: 卫星数目。

[3]NCB: 每颗卫星的码偏差数目。

[4]NPB: 每颗卫星的载波相位数目, MADOCA-SEAD 为每颗卫星的每个频率提供载波相位偏差改正。

MADOCA 的产品还 发布在 JAXA 的官方网站上, 发布的 MADOCA 产品包括, RTCM SSR 格式、LEX 格式和 RINEX SP3 格式的 MADOCA 实时精密产品, RINEX SP3 格式的 MADOCA 最终, 快速, 超快精密产品。MADOCA 计划为 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 和 QZSS 提供包括轨道改正、钟差改正、码偏差和相位偏差改正、电离层和对流层改正, URA, 高速钟差纠正等 10 项改正信息。

3.2 MADOCA 实时精密星历解码

3.2.1 MADOCA 数据结构

MADOCA-SEAD 可以通过 QZS-1 号卫星的 LEX 实验信号低数据速率传输 MADOCA 产品, 该信号也被称作“MADOCA-LEX”, 以“12”作为 LEX 信息类型 ID。每条 LEX 信息一共有 2000 个 bits 组成, 包括 49bits 标头, 1695bits 数据段和 256bits 的 Reed-Solomon。每条 LEX 信息只需要一秒的传输时间。MADOCA 产品数据结构如图 3.2 所示。

(1) 标头 (Header)

标头由 32bits 的随机接入前导码(Preamble), 8bits 的卫星数目(PRN Number), 8bits 的信息类型 ID (Message Type ID) 和 1bit 的警示标志 (Alert Flag) 组成。随机接入前导码位于整个 LEX 信号最前面, 用于判断一个 LEX 信号的开始, 其编码一定为“0001101011001111111110000011101”。每段数据在随机接入前导码之后都有一个 8bits 的 PRN 号, 表示这一段数据由哪颗卫星发送, 如果 PRN 编号为 1~32, 则为 GPS 卫星, 如果 PRN 编号为 193~197, 则为 QZSS 卫星。PRN 编号后面是 8bits 的信息类型 ID, MADOCA-SEAD 使用的信息类型 ID 为“12”, 即“00001100”。最后是警示标志, 警示标志指示每段信号的健康状态。因为 LEX 信号是实验信号, 所以警示标志始终设置为“1”。

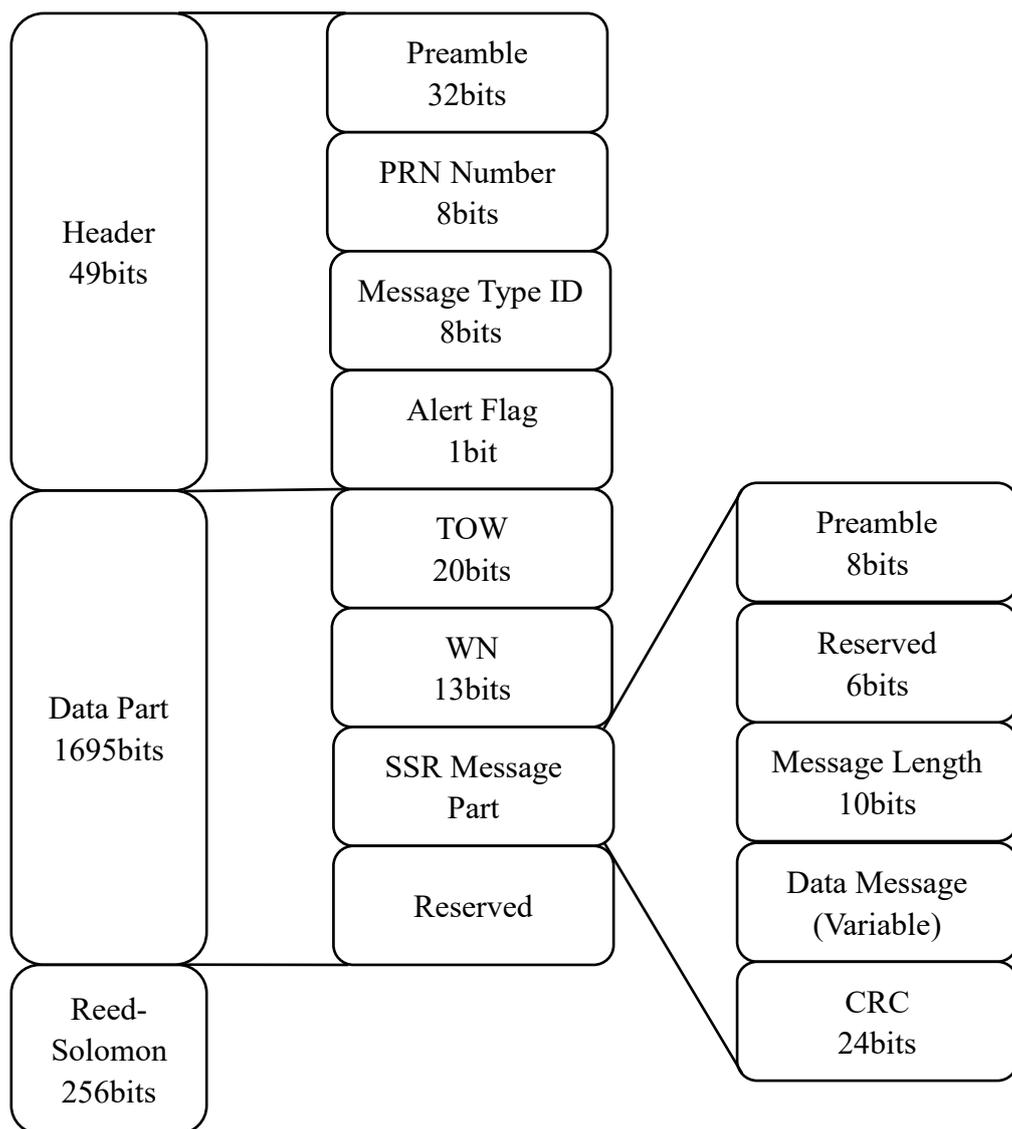


图 3.2 MADOCA-LEX 数据结构

(2) 数据段 (Data Part)

在标头之后，紧接着是 1695bits 的数据段，这一部分可以存储任何数据，并且在 MADOCA-SEAD 中存储了各种 SSR 改正信息。数据段由 20bits 的 TOW (Time of Week)，13bits 的 WN (Transmission Week Number)，SSR 数据段和字节数不定的保留位 (Reserved) 组成。TOW 表示下一个一秒钟的 LEX 信号由这一周的第几秒开始，有效范围为 0~604799，一周的最后一段数据的 TOW 设置为“0”，一周的第一段数据的 TOW 设置为“1”。数据段的第 21~33bit 是 WN，用二进制表示 GPS 周。数据段剩余的部分则是正式基于 RTCM SSR 格式的 MADOCA 产品，所传输的内容与通过网络传输的内容几乎相同。仅存储每个 RTCM SSR 数据的“SSR 数据可变长度信息”，不存储其他信息（如随机接入前

导码，保留位，RTCM SSR 总长度和总 CRC 校验）来节约数据量，空白的位数全部设置为“0”。最后是保留位，保留位的长度等于 1695-SSR 数据段的长度，且全部设置为“0”。

每段 SSR 数据段又包括 8bits 的 SSR 的随机接入前导码（Preamble），6bits 的保留位（Reserved），10bits 的数据长度（Message Length），可变长度的 SSR 数据（Variable Length Data Message）和 24bits 的 CRC 校验。数据结构如图 3.2 所示。8bits 的随机接入前导码固定为“1101 1111（DF）”，而随后的 6bits 保留位为“000000”，最后以 24bits 的 CRC 校验结束，并立刻开始下一个 SSR 数据包，或者进入位数不定的保留位（全部为“0”）表示该 MADOCA-LEX 信息结束。

3.2.2 MADOCA 解码程序实现

作者自行编写了 MADOCA 的解码程序，由 MADOCA 最原始的二进制数据解码获取精密实时星历产品。MADOCA 实际解码过程与 RTCM3.2 暂时存在少许出入，所以作者编写的 MADOCA 解码程序以 MADOCA 官方文件为主要参考文献，结合实际解码过程中遇到的问题加以修正，最终完成解码程序。

如 3.1.2 中所述，目前可以通过网络，卫星和 FTP 服务获取 MADOCA 数据，本文使用的 MADOCA 原始数据源于 JAXA 官网提供的 FTP 服务下载原始二进制文件，为 RTCM SSR 格式。二进制文件的数据从 SSR Message Part 部分开始。需要通过随机接入前导码找到文件开始的位置，然后读取 6bits 的保留位，10bits 的数据长度，整段 SSR 数据段以及 24bits 的 CRC 校验位。如果 CRC 校验通过，则进入解码正式数据内容部分。

以解码 GPS 轨道改正数为例，GPS 轨道改正数的数据类型编号为 1057，正式数据部分的前 12bits 为数据类型编码，如果解到 1057 则说明以下内容需要按照 SSR GPS 轨道改正数的解码格式进行解码。后面依次按位读取 GPS 时，SSR 更新间隔，IOD SSR，卫星总数（NS）等信息。然后是每颗卫星的改正信息，继续依次按位读取每颗卫星的卫星号，GPS IODE，径向（Radial）、切向（Along-track）和法向（Cross-track）的改正数，径向、切向和法向改正的速度增量。根据卫星总数可以得知，各颗卫星的改正数据一共占 $135 * NS$ 位，当读到最后一位，则进入 CRC 校验位，由于之前已经做过 CRC 校验，可以跳过 24bits 直接读取下

一个 SSR 数据段。每一个 SSR 数据段的解码程序流程图如图 3.3 所示。

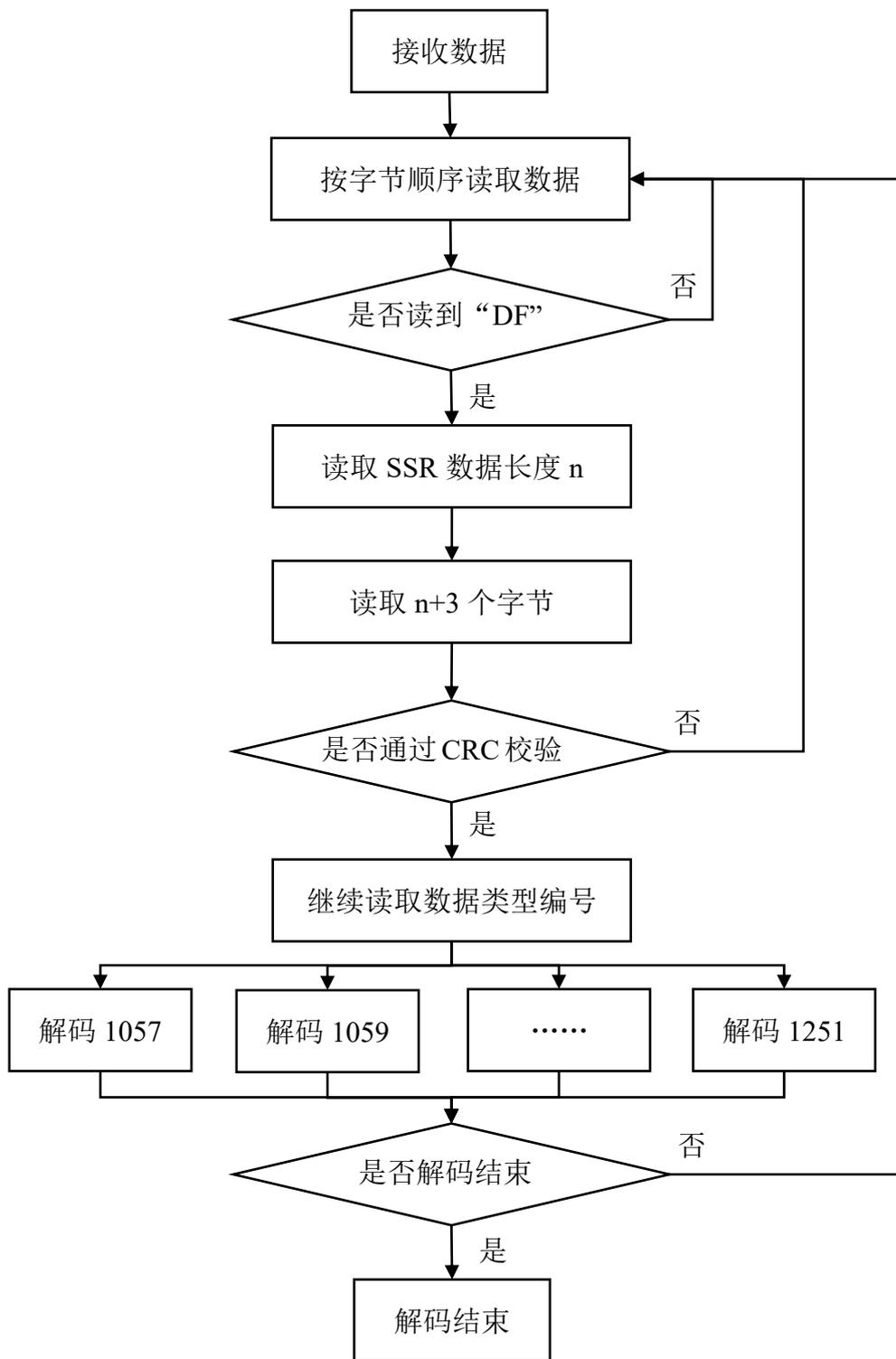


图 3.3 解码程序流程图

由于存在数据缺失或者读取失误的可能性，且往往一个新的 SSR 数据段会从一个完整的字节开始，所以虽然每一个 SSR 数据段是相连的，但仍需要重新检索随机接入前导码。

在实际解码过程中，可以解到的改正信息有 GPS、GLONASS 和 QZSS 的轨道改正数，钟差改正数，码偏差改正数，URA 和高速钟差改正。目前码偏差改正数和高速钟差改正只能解码到没有数据的空 SSR 数据段，原因应该是 MADOCA 仍在建设中，未能提供所有的改正信息。而通过 QZS-1 卫星的 L6D 信号进行解码目前还可以额外解码到 Galileo 系统的增强信息，以及 GPS、QZSS 和 Galileo 系统的相位偏差改正、电离层和对流层改正，但不能解码得到 GLONASS 系统的改正信息^[22]。

3.2.3 MADOCA 数据处理

使用作者自己编写的解码程序，通过将 MADOCA 提供的 RTCM3.2 SSR 格式的二进制文件进行解码可以得到 GPS 和 GLONASS 系统的卫星轨道改正数，钟差改正数等改正信息，时间间隔为 30s。通过将 RTCM 格式文件解码得到的改正参数对广播电文中的卫星轨道和钟差参数进行改正，可以得到 RINEX SP3 格式的精星历文件，生成的 SP3 文件中精密轨道和精密钟差的时间间隔都为 30s。

MADOCA 同时还提供 RINEX SP3 格式的 GPS、QZSS 和 GLONASS 系统的精密轨道和精密钟差。通过对比该 SP3 文件和本文解码生成的 SP3 文件，精度上保持高度一致，定位结果并无明显区别，都可以满足实时精密单点定位的需要。证明本文解码获取精密星历产品的有效性和稳定性。为方便对 MADOCA 精密星历产品进行分析和评估，也为了方便与其他机构的精密星历产品进行对比，本文后续实验使用的 MADOCA 产品皆为该方式获取的 SP3 格式文件。

3.3 MADOCA 精密星历误差分析

3.3.1 误差处理与分析方法

基于以上方法本文获取了 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日，为期 4 个星期的 MADOCA 精密星历产品。生成的 SP3 文件中精密轨道和钟差时间间隔都为 30s，作为对比，还获取了相同时间的 CNES 的实时精密轨道和钟差产品。时间间隔同样为 30s。在此基础上，以 GFZ 提供的事后精密星历产品作为参考真值，分别计算对比 MADOCA 和 CNES 的实时产品的钟差误差，法向、切向、径向轨道误

差, SISRE, 仅考虑轨道误差的 SISRE (后文以 SISRE(orb)表示) 和精密参数的可用性 (Product Availability)。在定位性能评估方面, 以 RTKLIB 作为软件平台, 在全球范围内均匀选取了 12 个 IGS 站 2019 年 2 月共 28 天的数据, 对比使用 MADOCA 和 CNES 实时精密产品进行 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 双系统动态实时精密单点定位, 评估 MADOCA GPS/GLONASS 的实时产品精度、可用性和定位性能。

本文使用的精密星历是以卫星质心为参考点的卫星位置, 因此不需要进行卫星天线相位偏差改正。精密星历中 CLK92 挂载点改正数也是基于卫星质心, 而 CLK91 和 CLK93 挂载点的 SSR 是基于卫星天线相位中心, 需要在评估时改正卫星相位偏差^[23], 之后可通过下式将轨道差异旋转至卫星轨道坐标系下:

$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ C \end{bmatrix} = G_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

上式中, R、A、C 分别为实时产品在卫星轨道坐标系中径向、切向和法向的误差, $G_{3 \times 3}$ 为旋转矩阵, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为实时精密轨道误差, 即 MADOCA 和 CNES 实时产品与 GFZ 之差。

理论上, 不同的 IGS 分析中心提供的同一颗 GNSS 卫星的精密钟差产品应该是相同的数值, 但一般每种钟差产品都有各自的时间参考基准, 选取了不同的参考钟, 不同机构的钟差产品因此会产生一个较大的时标偏差, 在 PPP 定位中, 该偏差会被接收机钟差吸收而不会产生影响, 但如果进行不同机构的钟差产品对比, 则需要消除该偏差。通常可以选择某颗参考星作为基准, 计算二次差来消除所有卫星的公共偏差, 但这种方法需要一颗非常稳定且精准的参考星, 实际操作难度较大。也可以通过减去所有卫星钟差的平均数的方式来消除公共偏差, 但如果存在偏差较大的卫星钟差会严重影响该方法的准确性。本文最后选取同一历元同一系统所有卫星钟差的中位数来消除公共偏差的方法^[24], 这样可以有效避免卫星粗差的影响。

首先, 将同一历元下的来自分析中心的实时精密钟差与作为参考真值的 GFZ 事后精密钟差相同卫星的钟差数据做差; 然后再将得到的差值根据 GNSS 系统的不同分为 GPS 钟差和 GLONASS 钟差, 分别求得 GPS 钟差差值的中位数以及 GLONASS 钟差差值的中位数; 最后, 分别以这两颗中位数卫星作为基准, 求出

其他卫星钟差数据与 GFZ 做差后的做差后的值与同一系统的基准卫星的钟差差值的差。处理过程可以用公式表达为：

$$\Delta\Delta T_i^j = \Delta T_i^j(AC) - \Delta T_i^j(GFZ) \quad (3.2)$$

$$\Delta\Delta T_i^{j'} = \Delta\Delta T_i^j - \Delta T_i^{med}(S) \quad (3.3)$$

上式中， $\Delta T_i^j(AC)$ 分别对应 $\Delta T_i^j(MADOCA)$ 和 $\Delta T_i^j(CNES)$ ，表示 MADOCA 或 CNES 提供的第 j 颗卫星的第 i 个历元的实时钟差数值， $\Delta T_i^j(GFZ)$ 表示 GFZ 提供的第 j 颗卫星的第 i 个历元的事后钟差数值， $\Delta T_i^{med}(S)$ 分别对应 $\Delta T_i^{med}(G)$ 和 $\Delta T_i^{med}(R)$ ，表示 GPS 或 GLONASS 系统的第 i 历元内所有卫星的 $\Delta\Delta T_i^j$ 的中位数， $\Delta\Delta T_i^{j'}$ 表示最后用于对比的钟差数值。

除此之外，还可以通过空间信号测距误差来综合反映精密星历和钟差的整体误差，其计算公式为：

$$SISRE = \sqrt{(\alpha \cdot R - Clk)^2 + \beta(A + C)^2} \quad (3.4)$$

式中 α 和 β 分别是各方向的投影系数，不同轨道高度的卫星其取值不同，GPS 卫星 $\alpha = 0.98$ ， $\beta = 1/49$ ；GLONASS 卫星 $\alpha = 0.98$ ， $\beta = 1/45$ ^[25]。

如果综合考虑三个方向上轨道误差引起的空间信号误差，可用 SISRE(orb)表示，其计算公式如下：

$$SISRE(orb) = \sqrt{(\alpha \cdot R)^2 + \beta(A + C)^2} \quad (3.5)$$

不同机构对于轨道和钟差的粗差的控制方法并不相同，为了进一步降低粗差对产品评估和定位性能的影响，本文设定了固定阈值来剔除粗差，认为阈值范围内的产品即符合可用性的产品。

3.3.2 钟差与轨道误差分析

根据上述评估策略与对比方法，本文首先计算了 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日，为期 4 个星期的 MADOCA 和 CNES 精密星历产品每颗 GPS 或 GLONASS 卫星的径向、切向、法向轨道误差以及钟差误差。图 3.4 为 MADOCA 和 CNES 的 G28 和 R13 卫星的三个方向上轨道误差对比图。其中蓝色表示 MADOCA，红

色表示 CNES。

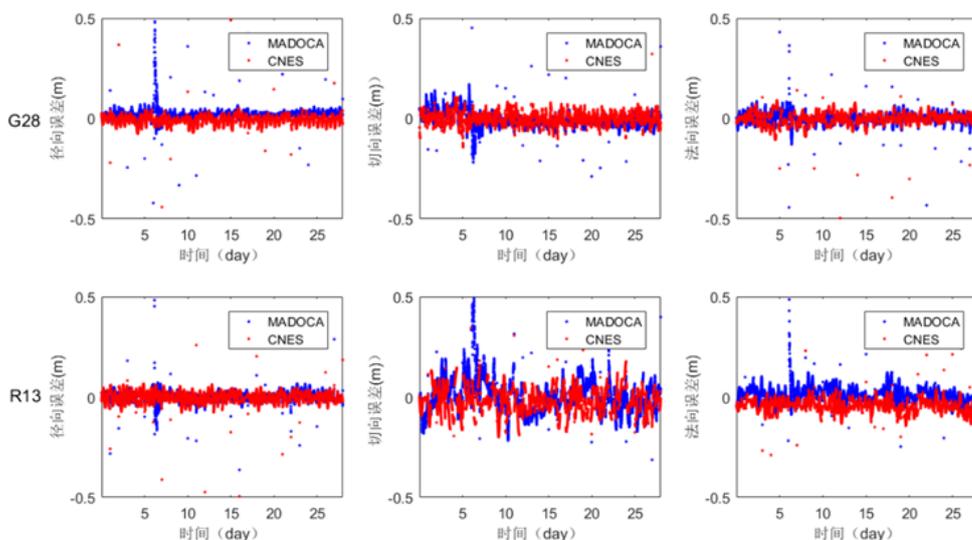


图 3.4 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 MADOCA 与 CNES 的 G28 和 R13 卫星的径向、切向、法向轨道误差对比

其他卫星的对比结果与 G28 和 R13 一致。如图所示，所有卫星在径向方向上的轨道误差优于其他两个方向，GLONASS 卫星的切向轨道误差相对较大，但整体而言三个方向上的卫星轨道误差都在 0.1m 以内，大多在 3-6cm 内，基本满足实时产品的精度要求。除 2 月 7 日 MADOCA 所有产品精度都有短暂的波动外，MADOCA 与 CNES 的精密轨道精度相差不大，CNES 的 GPS 精密轨道在径向、切向、法向三个方向上精度略优于 MADOCA。

图 3.5 为 MADOCA 和 CNES 的 G16、G28、R01 和 R13 卫星的钟差误差对比图，其中蓝色表示 MADOCA，红色表示 CNES。其他卫星的对比结果与图 3.5 一致，同样，除 2 月 7 日 MADOCA 所有产品精度都有短暂的波动外，GPS 卫星钟差误差明显小于 GLONASS，GPS 卫星钟差误差都在 $\pm 0.2\text{m}$ 以内，GLONASS 卫星钟差误差都在 $\pm 1\text{m}$ 以内，MADOCA 与 CNES 的精密钟差精度相差不大，CNES 的 GPS 精密钟差精度略优于 MADOCA。

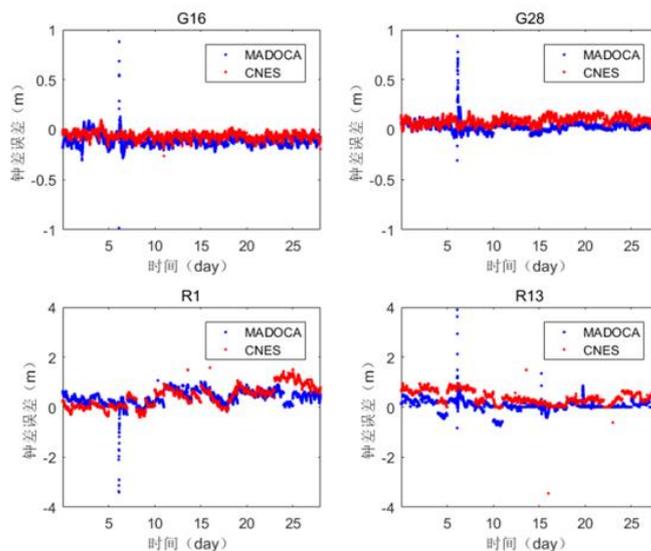


图 3.5 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 MADOCA 与 CNES 的 G16、G28、R1 和 R13 卫星的钟差误差对比

消除了整体的时标偏差后，每颗卫星的钟差仍包含一个均值偏差，但在精密单点定位中，这一部分均值偏差可以被模糊度吸收，对定位结果并无影响，因此本文又计算了各个 GPS 或 GLONASS 卫星在 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 4 周的时间内各颗卫星钟差误差的标准差 (Standard Deviation, STD)，而不是 RMS。如图 3.6 所示，灰色柱状图表示 MADOCA，白色柱状图表示 CNES，图中缺失的部分为原始数据有较长时间段不存在或不可用。

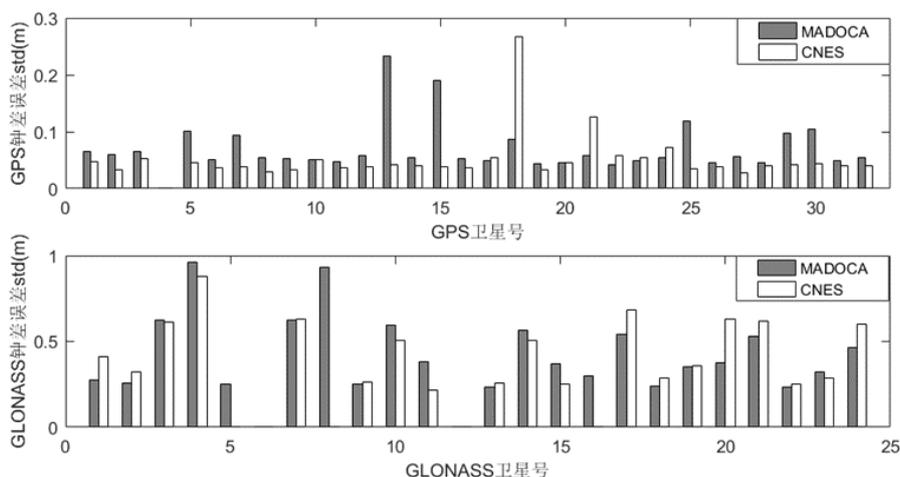


图 3.6 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 GPS 和 GLONASS 各个卫星钟差误差标准差

各颗卫星的钟差精度具有良好的一致性，也可以进一步验证上述的结论。CNES 的绝大多数 GPS 卫星的钟差误差要略优于 MADOCA，MADOCA 的大多

数 GLONASS 卫星的钟差误差要优于 CNES，且存在 3 颗 GLONASS 卫星只有 MADOCA 有数据，CNES 没有可用数据。

3.3.3 SISRE 分析

上述对轨道和钟差的计算和分析是具体到径向、切向、法向轨道误差以及钟差误差各自的精度情况，而实际上三个方向的轨道误差以及钟差误差具有一定的相关性，单独评估其中某一项不足以证明其精度的情况。所以，本文又计算了 MADOCA 和 CNES 实时精密星历的所有卫星的 SISRE 和 SISRE(orb)做进一步验证。图 3.7 为 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 MADOCA 与 CNES 的 G28 和 R13 卫星的 SISRE 和 SISRE(orb)，蓝色表示 MADOCA，红色表示 CNES，其他卫星的对比结果与图 3.7 一致。

从图中不难看出，MADOCA 与 CNES 的 SISRE 和 SISRE(orb)相差不大；GPS 卫星的 SISRE 明显小于 GLONASS 卫星，GPS 卫星的 SISRE 都在 0.2m 以内，GLONASS 卫星的 SISRE 都在 1m 以内，说明 SISRE 的精度结果与精密钟差误差的结果保持一致，这是由于钟差误差占据了 SISRE 的主要部分；同样，MADOCA 和 CNES 的两个系统的卫星 SISRE(orb)都在 0.1m 以内，说明 SISRE(orb)的精度结果与三个方向的轨道精度的结果保持一致，同样符合计算结果。

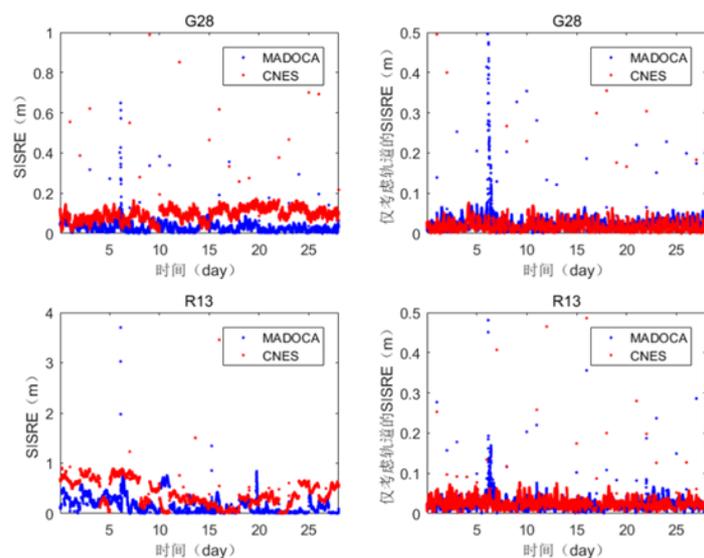


图 3.7 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 MADOCA 与 CNES 的 G28 和 R13 的 SISRE 和仅考虑轨道的 SISRE 对比

3.3.4 历元可用性分析

虽然很多情况下，CNES 的实时精密星历产品精度略优于 MADOCA，特别是 GPS 卫星，但以上的结果均为使用可用历元及剔除粗差之后的计算结果。在已经满足实时 PPP 的要求下，历元可用性成为更加重要的一个指标。为了验证 MADOCA 实时产品的可用性，同样选取了 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 4 周的 MADOCA 和 CNES 的实时数据，利用固定阈值来剔除粗差，定义精密钟差误差、三个方向的轨道误差、SISRE 和 SISRE(orb)都在阈值范围内的历元为可用历元，其占总历元的百分比为产品的可用性。如图 3.8 所示，上图的取值范围为 0%-100%，下图的取值范围为 95%-100%。由图中可以看出，两家机构的大多数卫星的可用历元时长可以达到 98%以上，且在 98%以上的区间内，CNES 的可用性优于 MADOCA；但在 0%-98%的区间内，MADOCA 的可用性优于 CNES，MADOCA 所有卫星都有 75%以上的可用性，而 CNES 有 2 颗 GPS 卫星和 6 颗 GLONASS 卫星的精密产品几乎不可用。所以总的来说，MADOCA 的精密产品具有更好的可用性。

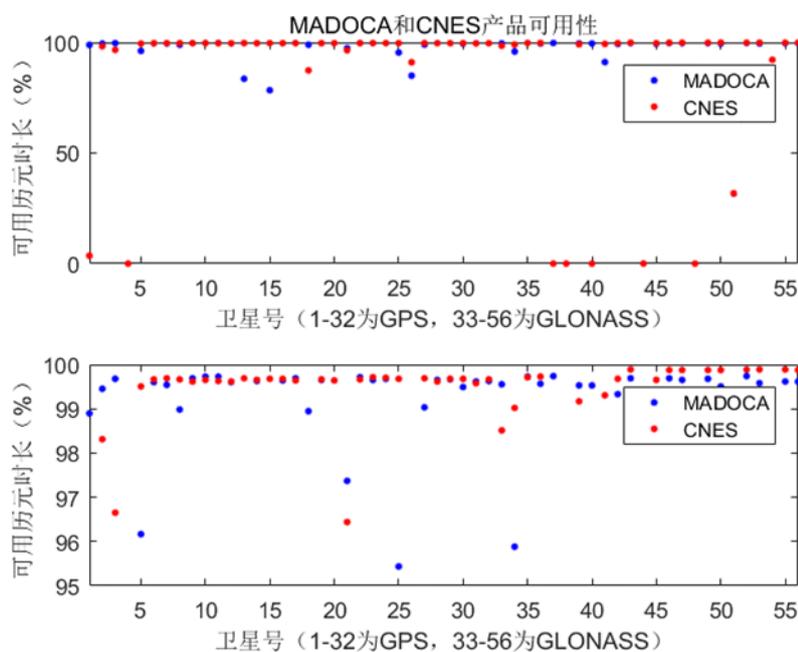


图 3.8 2019 年 1 月 28 日至 3 月 3 日 MADOCA 与 CNES 的各个卫星可用历元时长占比

3.3.5 小结

表 3.2 为两家机构的精密钟差误差的 STD, SISRE、SISRE(orb)、径向、切向、法向轨道误差的 RMS 以及可用性, 表 3.2 进一步验证了前文的结论。MADOCA 与 CNES 的产品精度保持一致, MADOCA 的 GPS 实时精密产品略差于 CNES, 但 MADOCA 的 GLONASS 实时精密产品的 SISRE 优于 CNES。而在可用性方面, MADOCA 的实时精密产品的可用性, 特别是 GLONASS 卫星的可用性明显优于 CNES。

表 3.2 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日 MADOCA 和 CNES 的精密钟差误差的 STD, SISRE, 仅考虑轨道的 SISRE, 径向、切向, 法向轨道误差的 RMS 以及可用性汇总

	MADOCA/G	CNES/G	MADOCA/R	CNES /R
Clock/m	0.082	0.066	0.494	0.494
SISRE/m	0.168	0.137	0.817	0.945
SISRE(orb)/m	0.041	0.031	0.045	0.034
Radial/m	0.037	0.030	0.043	0.031
Along-track/m	0.061	0.040	0.093	0.092
Cross-track/m	0.046	0.033	0.052	0.052
Product Availability/%	94.5	92.6	86.8	75.7

总的来说, 这些结果表明, MADOCA 的 GPS 和 GLONASS 实时产品都达到了与其他机构一致的水平, 可以满足实时精密单点定位用户的需求。两者之间的差距不大, 各有更优秀的方面, MADOCA 在 GLONASS 卫星的实时精密钟差产品以及两个系统的实时精密产品可用性方面优于 CNES。

3.4 MADOCA 精密单点定位研究

3.4.1 定位策略与模型

在实际实时定位过程中, 卫星钟差与轨道径向误差具有强相关性, 将精密轨道和钟差分开对比评估是无法全面准确地反应产品的实时定位性能。因此, 本文这一部分通过模拟实时 PPP, 从定位的角度进一步评估和对比 MADOCA 实时精密产品的性能。

表 3.3 为 PPP 的处理策略。本文使用的软件为 RTKLIB, 使用的卫星轨道和

钟差改正产品是 MADOCA 和 CNES 的实时精密产品, 其中 MADOCA 是解码二进制文件并改正广播星历得到的 SP3 文件, CNES 使用的是实时 SP3 文件。本文采用双频无电离层模型模拟实时 PPP, GPS 系统使用 L1、L2 频点, GLONASS 系统采用 G1、G2 频点, 码和相位观测值的权重为 1: 10000, DCB 改正使用了 CAS 的 MGEX DCB 产品。SAAS 模型采用标准模型参数, 地面气压 $P_0 = 1013.25\text{mbar}$, 地面温度 $T_0 = 15^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\text{rh} = 0$ (湿延迟作为待估参数进行估计)。系统间偏差采用随机游走模型作为参数进行估计。使用 IGS 每周的 SINEX 文件提供的测站坐标作为定位误差的参考真值。

表 3.3 PPP 数据处理策略

项目	策略
软件平台	RTKLIB
时间	2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日
参数估计方法	Kalman 滤波
观测值	载波相位和码观测值
对流层延迟	SAAS 模型改正+湿延迟估计
电离层延迟	无电离层组合
卫星轨道及钟差	MADOCA 或 CNES 实时精密产品
测站坐标	静态/动态模式估计
待估参数	测站坐标, 测站钟差, 模糊度, 对流层湿延迟改正, 系统间偏差 (如果是 GPS/GLONASS)

在全球范围内选取 12 个 IGS 站 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 28 天的数据, 分布如图 3.9 所示, 用于对比使用 MADOCA 和 CNES 进行 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 双系统实时动态 PPP 定位。

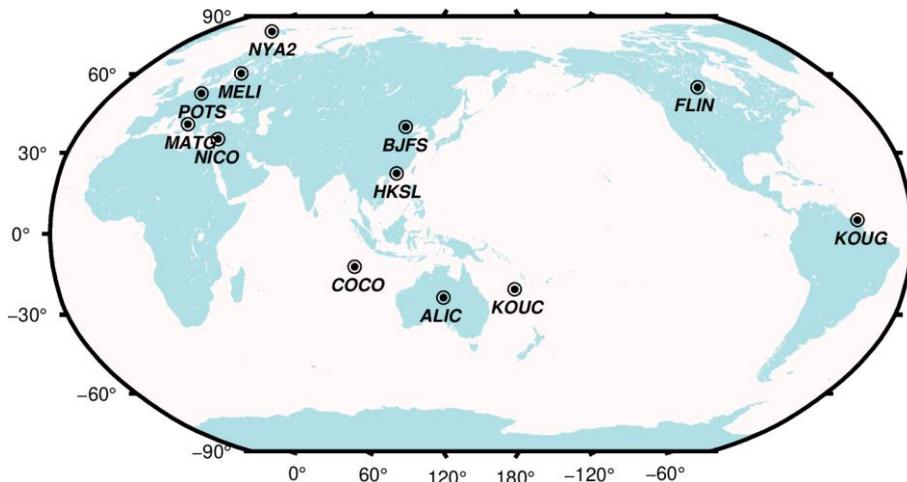


图 3.9 用于评估 PPP 的 12 个 IGS 站分布

3.4.2 GPS 实时 PPP 结果分析

由于不同测站或者不同年积日的实验结果较为相似，因此本文仅列出 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站的计算结果。图 3.10 为 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站分别使用 MADOCA 和 CNES 实时精密产品的 GPS 静态 PPP 定位结果，从上到下分别表示 N 方向，E 方向，U 方向，蓝色表示 MADOCA，红色表示 CNES 的结果。图 3.11 为同一天 HKSL 测站的 GPS 动态 PPP 定位结果，表示的内容如图 3.10 一致。

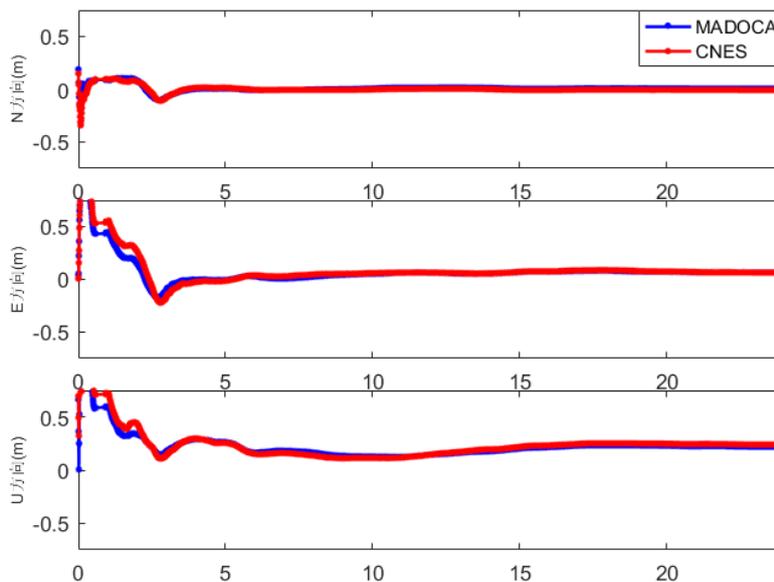


图 3.10 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站 GPS 实时静态 PPP NEU 方向坐标误差

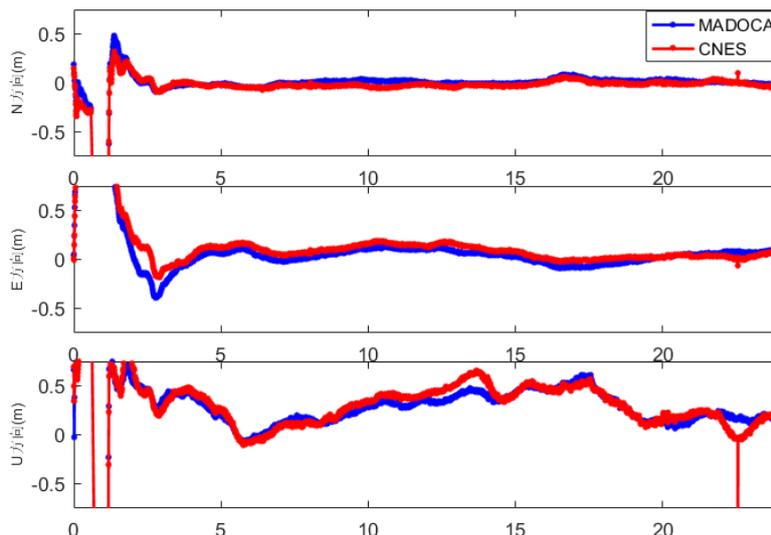


图 3.11 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站 GPS 实时动态 PPP NEU 方向坐标误差

从图 3.10 和图 3.11 中不难看出，使用 MADOCA 或 CNES 的实时产品做 GPS 单系统实时 PPP 定位，无论是静态还是动态结果非常一致，几乎没有显著差别，静态定位精度在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.3m，动态定位精度在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m。细节方面，使用 MADOCA 做 GPS 单系统 PPP 静态定位的收敛速度略快于使用 CNES，而使用 MADOCA 做 GPS 单系统 PPP 动态定位的稳定性也略优于使用 CNES。但总的来说，都可以满足 GPS 实时定位的需求。

3.4.3 GPS/GLONASS 双系统实时 PPP 结果分析

本小节也仅列出 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站的计算结果，图 3.12 为 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站分别使用 MADOCA 和 CNES 实时精密产品的 GPS/GLONASS 双系统实时静态 PPP 定位结果，图 3.13 为 GPS/GLONASS 双系统实时动态定位结果，图中标识与上文中一致。

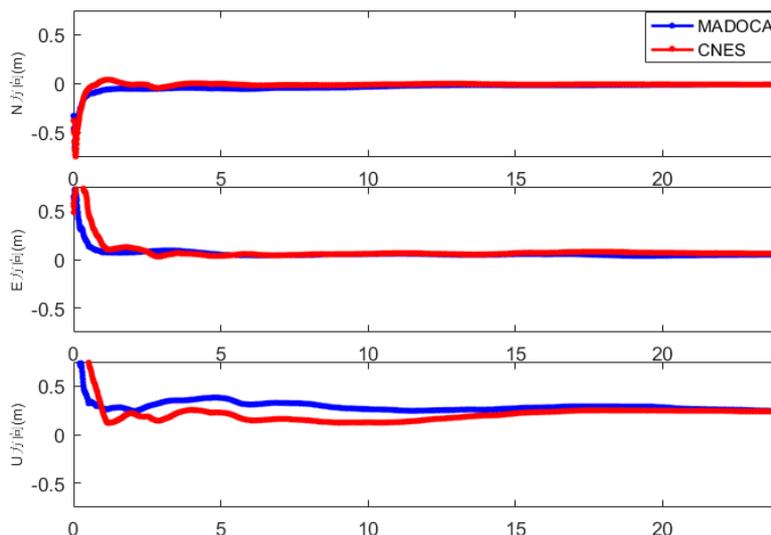


图 3.12 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站 GPS/GLONASS 实时静态 PPP NEU 方向坐标误差

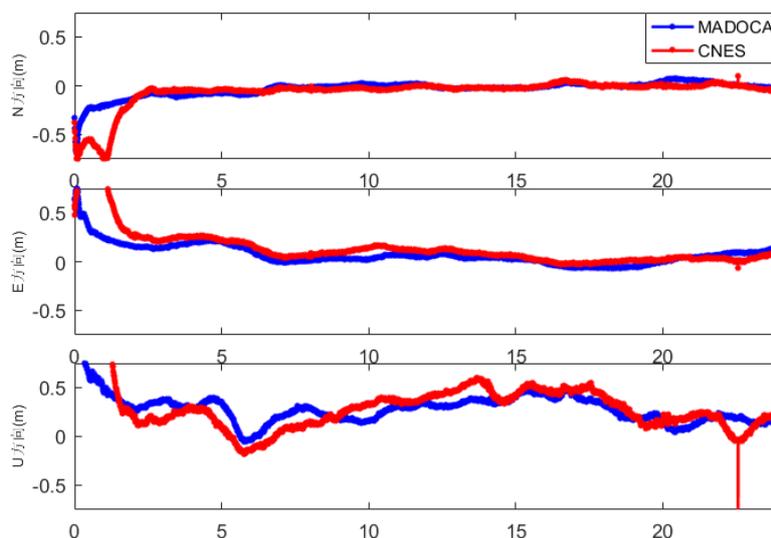


图 3.13 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站 GPS/GLONASS 实时动态 PPP NEU 方向坐标误差

从图 3.12 中可以看出使用 MADOCA 或 CNES 的实时产品做 GPS/GLONASS 双系统实时静态 PPP 定位的结果非常一致，静态定位精度在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.3m，与 GPS 单系统静态实时 PPP 定位精度保持一致，动态定位东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m。但从图 3.13 中可以看出，使用 MADOCA 的实时产品做 GPS/GLONASS 双系统 PPP 动态定位收敛速度相比 CNES 有明显优势，特别是 N 方向和 E 方向收敛速度明显优于 CNES，稳定性方面也略优于 CNES，双系统动态实时定位精度方面与 GPS 单系统保持一致。

3.4.4 收敛时间与定位精度统计分析

为了进一步验证使用 MADOCA 可以有效提高双系统定位收敛速度, 本文还计算了所有测站 28 天的平均收敛时间, 如图 3.14 所示, 判断收敛的条件为连续 20 个历元平面坐标误差低于 0.2m 且三维坐标误差低于 1m。从图中可以看出, 使用 MADOCA 或 CNES 的实时产品的 GPS 动态 PPP 收敛速度几乎相同, 但使用 MADOCA 的 GPS/GLONASS 双系统收敛速度明显优于 CNES。我们已知使用双系统定位的收敛速度明显优于单系统, 但在此基础上, 使用 MADOCA 比 CNES 有着更明显的提高, 所以可以认为 MADOCA 的精密产品可以更有效地提高双系统定位的收敛速度。结合前文的评估和分析, MADOCA 与 CNES 的钟差和轨道精度相差较小, 但 MADOCA 的历元可用性明显优于 CNES, 即 CNES 的精密产品存在较多粗差或数据缺失, 这一点在 GLONASS 系统上尤为明显, 所以可能因此导致使用 MADOCA 精密产品进行 GPS/GLONASS 双系统定位收敛速度比使用 CNES 精密产品更快。

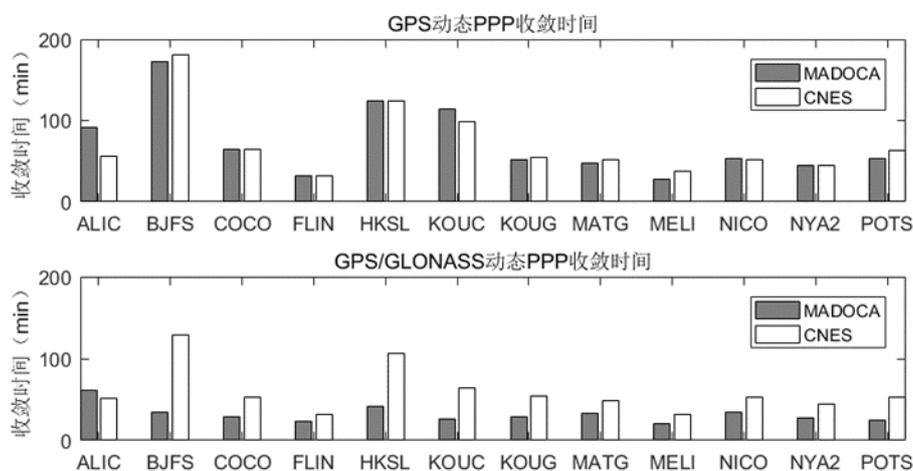


图 3.14 12 个 IGS 站 GPS 或 GPS/GLONASS 动态 PPP 收敛时间

表 3.4 为使用两种不同的改正数进行单系统或双系统实时动态定位的 12 个测站平均收敛时间的数值对比。从表中不难看出, 绝大多数情况下, 无论使用 MADOCA 还是 CNES 的实时产品, GPS/GLONASS 双系统定位相较于 GPS 单定位可以明显提高定位的收敛速度。

表 3.4 GPS 或 GPS/GLONASS 实时动态 PPP 收敛时间 (单位: min)

测站	MADOCA/G	MADOCA/G+R	CNES/G	CNES/G+R
ALIC	95	65	65	55
BJFS	180	190	45	130
COCO	65	70	35	55
FLIN	35	40	30	40
HKSL	125	130	45	105
KOUC	115	100	35	65
KOUG	55	60	35	55
MATG	55	60	40	55
MELI	30	40	25	40
NICO	55	60	40	55
NYA2	50	55	35	50
POTS	55	65	30	55

alic	90.8	60.9	55.7	51.2
bjfs	173.0	34.0	180.8	129.3
coco	64.3	29.5	65.1	52.5
flin	32.6	23.2	32.0	32.0
hksl	124.2	41.8	124.5	105.7
kouc	113.8	26.0	99.3	63.6
koug	51.3	28.6	54.7	54.1
matg	47.1	32.5	52.0	49.0
meli	27.4	20.3	38.0	31.5
nico	53.7	34.2	51.2	52.7
nya2	44.8	27.6	44.2	44.4
pots	52.8	25.3	63.0	52.8

进一步基于一个月数据,本文还统计这 12 个测站 28 天收敛后的平均 RMS,如图 3.15 所示。使用 MADOCA 与 CNES 的精密产品的 RMS 一致,说明 MADOCA 的实时产品在精度上可以满足 PPP 的需求,在定位精度上没有明显的差别,也可以证明上述轨道和钟差评估工作的有效性。

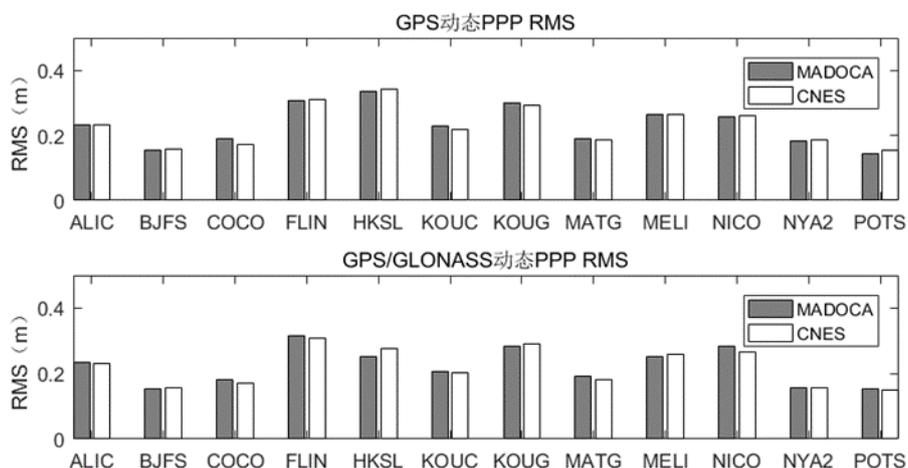


图 3.15 12 个 IGS 站 GPS 或 GPS/GLONASS 动态 PPP 收敛后的 RMS

3.5 总结

本章简单介绍 RTCM3.2 和 MADOCA 发展现状,针对 MADOCA 的数据结

构和解码方法，编写了解码程序，并进行解码和数据处理。通过与 CNES 的实时精密产品进行对比分析，从钟差误差、轨道误差、SISRE、SISRE(orb)和可用性等角度评估 MADOCA 实时精密产品的准确性和稳定性，并验证了使用 MADOCA 实时精密产品的 GPS 单系统、GPS/GLONASS 双系统静态和动态的实时 PPP 性能。结果表明：

(1) MADOCA 实时精密产品与 CNES 实时精密产品准确性，稳定性等方面已达到同一水平。轨道误差范围在 3-6cm 内，GPS 钟差误差在 $\pm 0.2\text{m}$ 内，GLONASS 钟差误差在 $\pm 1\text{m}$ 内。

(2)在 4 周时间内，GPS 精密产品可用时段约为 95%，GLONASS 约为 87%；MADOCA 的 GPS 精密产品略差于 CNES，但可用性方面（特别是 GLONASS）明显优于 CNES。

(3)在 PPP 评估方面，使用 MADOCA 或 CNES 精密产品的实时 PPP 定位精度一致，定位精度在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m，且使用 MADOCA 精密产品进行 GPS/GLONASS 双系统定位相较于 CNES 收敛速度明显更快。

第四章 北斗星基增强系统定位研究

4.1 北斗星基增强系统

如绪论中所述,为了进一步满足用户日益增长的定位精度和实时定位的需求,各个国家的导航系统都建立了自己的广域星基增强系统,如美国的 WAAS,欧洲的 EGNOS,俄罗斯 SDCM,和日本的 MSAS。IGS 也为满足这一部分需求,为星基增强系统提供实时的卫星轨道改正和卫星钟差改正信息,以 RTCM SSR 格式发布。这些广域星基增强系统可以通过 GEO 卫星的导航信号增强转发器向用户实时播发包括广播星历,精密轨道改正,精密钟差改正,电离层格网改正等实时改正信息,来实现卫星定位过程的实时需求和定位精度的提高。然而,目前只有 CNES 可以提供 BDS 系统的实时轨道改正和钟差改正数据。

与其他国家的星基增强系统不同,我国的 BDS 广域星基增强系统是把轨道误差与钟差误差综合在一起,以等效钟差的形式来提供精密星历和卫星钟差的综合等效差分改正数。由于我国 BDS 系统监测站区域网的分布仅限于中国境内,BDS 系统的星基增强系统也只能基于中国境内的监测站和相位平滑伪距观测值来计算等效钟差。其 UDRE 约为 0.5m。因此,这种等效钟差具有处理简单,精度满足的优点,但同时也存在着卫星精密星历误差在不同方向上投影存在差异的隐患,如卫星轨道的某个方向存在较大误差时,等效钟差的改正精度也会随之明显降低。

在实际 BDS 系统的广域星基增强系统的建设中,因为通常采用双频无电离层模型消除电离层误差,所以一般不需要考虑电离层格网改正,而是需要分别获取卫星轨道改正数和等效钟差改正数。下文将主要从等效钟差改正数的计算原理展开叙述。

4.2 北斗广域差分等效钟差

目前 BDS 系统在其导航电文中播发包含了广域增强系统的等效钟差改正数的差分信息和卫星完好性。本文认为由于卫星轨道的径向误差在中国境内的投影差异非常小,很难将卫星轨道的径向误差和卫星钟差完全分离,所以一般定义等

等效钟差包含着卫星钟差误差和卫星轨道误差的投影误差。因此，等效钟差 ESC 可以表示为：

$$ESC = \delta_{clk} + \delta_{orb} \quad (4.1)$$

上式中，ESC 表示等效钟差改正数， δ_{clk} 表示实际卫星钟差改正数， δ_{orb} 表示卫星轨道的投影误差。

在等效钟差的计算过程中，需要中国境内的所有监测站获取同一历元的实时数据，最高数据采样率为 1Hz，并将主控站获取的所有实时数据建立无电离层组合的伪距观测方程：

$$P_{IF} = \rho + c(dt_r - dt^s) + T - \Delta_{rela} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.2)$$

上式中，因为监测站的坐标是已知的，所以可以将其固定。 T 为对流层误差，可以通过使用对流层模型和实测气象数据进行精确改正。电离层误差已经通过双频无电离层模型进行消除。由于北斗星基增强系统自身的原因，无法将卫星的径向误差的投影误差和卫星钟差完全分离，所以就将卫星轨道使用广播星历或其他方式进行固定，对剩余的卫星钟差进行参数估计。其他误差，如 Δ_{rela} 相对论效应等也可以通过模型进行精确改正，或者被 ε_{PIF} 噪声误差吸收，所以需要进行参数估计的只有上述卫星等效钟差和 dt_r 接收机钟差。

所以，参数估计的方程可以表示为：

$$P_i^j = \delta_{r,i} - \delta_{ESC}^j + \varepsilon_i^j \quad (4.3)$$

上式中， P_i^j 表示测站 i 相对于卫星 j 的伪距观测值剩余残差， $\delta_{rec,i}$ 表示测站 i 的接收机钟差， δ_{ESC}^j 表示卫星 j 的等效钟差。在固定某个测站的接收机钟差的基础上，对同一个历元的每个监测站观测到的所有卫星，可以建立观测模型如下：

$$\begin{bmatrix} P_1^1 \\ P_1^2 \\ \vdots \\ P_n^1 \\ P_n^2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 1 & -1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{r,1} \\ \delta_{r,2} \\ \vdots \\ \delta_{ESC}^1 \\ \delta_{ESC}^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

为了进一步消除伪距观测噪声，一般可以使用相位平滑伪距的方法，目前北斗星基增强系统采用的是 CNMC 算法来进行相位平滑伪距。

通过对等效钟差改正数文件进行分析，不难得出结论，等效钟差的量级一般

在 3m 以内，与 BDS 系统的广播星历钟差误差的量级接近。符合等效钟差的定义。另一方面，由于 BDS 卫星轨道参数是使用区域监测网的观测数据进行精密定轨之后，再经过广播星历拟合之后得到的，所以等效钟差也会产生明显的周期性变化。等效钟差中的周期性变化特性即区域监测网定轨过程中不能与卫星钟差分离的卫星轨道径向误差。GEO 卫星是对地球相对静止的，而 IGSO 和 MEO 卫星有相对于地球的运动，所以可以减少卫星轨道径向误差与卫星钟差的相关性，进而减少等效钟差的周期性变化特性，GEO 卫星的等效钟差的或周期性则尤为明显。

在实际等效钟差的计算过程中，分布合理情况下的测站数目，卫星频率和区域监测网提供的轨道误差不会对等效钟差精度产生影响，但不同频率的 DCB 和 TGD 的精度会导致等效钟差产生系统性偏差，卫星机动时，误差过大的卫星轨道切向和法向产生的轨道误差对等效钟差会产生不可忽略的精度影响。除此之外，等效钟差的计算精度主要受区域监测网的网络限制和伪距观测值误差的影响。

仅使用等效钟差的伪距观测值和相位观测值的精密定位中，在选取合适的相位伪距误差方程权重后，精密定位的精度可以明显优于伪距定位精度，达到亚米级的精度。

4.3 北斗分区综合改正数

4.3.1 分区综合改正数原理

BDS 的星基增强系统目前主要播发的增强参数包括上述等效钟差改正数和格网电离层改正数，通过 D2 导航电文广播实时播发给接收机和用户。使用现有的 BDS 增强参数和 BDS 广播星历可以将双频伪距定位精度提高 50%，单频伪距定位精度提高 30%，但精密定位的三维精度仍大于 1m。

因此我国也在持续开展对分米级星基增强系统的开发与研究，试图通过提升空间信号性能，增加新的轨道改正信息来对用户的实时精密定位的精度进一步提升。于是，BDS 系统的广域分米级星基增强系统计算并播发了使用高精度相位观测值计算的分区综合改正数。

假设存在两个相距 340km 的北斗区域监测站 R1 和 R2，使用事后精密星历

进行 BDS 单系统无电离层模型的精密单点定位，分别计算定位后的相位残差。不难从中发现，虽然相距 340km，但他们的相位残差的变化趋势是保持高度一致的，这说明除了相位观测值的随机噪声之外，两个测站的其他残余误差也保持高度一致，可能存在非常接近的卫星轨道，卫星钟差，对流层误差和多路径效应误差。

如果使用 BDS 卫星广播星历和星基增强系统提供的改正信息计算无电离层组合相位观测值的残差，并将这两个测站观测到的所有卫星的相位观测值残差进行对比，不难从中发现，两个测站所有卫星的残差也呈高度一致的线性关系。

已知相位观测值估计的模糊度初值往往并不准确，导致相位观测值残差会产生不同的偏差，相位观测值残差中除了模糊度初值偏差以外，还存在未能通过广域星基增强系统提供的改正信息正确改正的卫星轨道偏差、卫星钟差偏差和对流层模型改正残差。如果可以使用第一个测站的综合改正信息用于改正第二个测站的对应的相位观测值，那么相位观测值残差中未能准确估计的模糊度偏差也会被模糊度参数完全吸收，剩余的部分也因为第一个测站的综合改正信息得到高精度的改正，从而提高第二个测站定位的精度和收敛速度。

基于以上分析得到的原理，可以认为在一定范围内，通过 BDS 广域星基增强系统改正信息改正过的相位观测值包含着非常近似的误差残差，如改正后的剩余卫星轨道误差，卫星钟差误差，对流层和电离层改正误差，这一部分难以分离和改正的综合改正信息即北斗分区综合改正数。

当然北斗分区综合改正数存在的相关性会随着测站距离的提高而减弱，因此在 BDS 广域分米级星基增强系统的实际计划之中，将中国划分成了 18 个分区，使用全国分布的监测站各自计算各个分区的相位综合改正数，最后通过 GEO 卫星实时播发给用户。此时播发的相位分区综合改正数可以与广域星基增强系统播发的等效钟差改正数和卫星轨道改正数一起使用进行改正。伪距观测值使用等效钟差和轨道改正数进行改正，相位观测值使用等效钟差、轨道改正数和相位分区综合改正数改正。

4.3.2 分区综合改正数计算方法

分区综合改正数的计算方法主要分为三步：计算单个参考站的伪距相位观测

值残差；计算同一分区不同参考站的伪距相位观测值残差的历元间变化；将同一分区各个参考站的伪距相位观测值残差的历元间变化进行整理并与参考历元合并^[26]。以下将进行详细的方法介绍。

假设存在 B1B2 双频伪距观测值和相位观测值，对于单个参考站而言，可以得到以下公式：

$$P_{IF,r} = \rho + d\rho_r + c(dt_r + \delta t_0 - dt^s - \delta t^s) + T + dT_r - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.5)$$

$$L_{IF,r} = \rho + d\rho_r + c(dt_r + \delta t_0 - dt^s - \delta t^s) + T + dT_r - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF}(N_0 + dN_r) + \frac{c}{f_1 + f_2}W + \varepsilon_{PIF} \quad (4.6)$$

上式中， δ_{ESC} 表示北斗广播星历的等效钟差改正数， δ_{orb} 表示北斗广播星历的轨道改正数， ρ 表示广播星历计算得到的几何距离， δt^s 表示广播星历计算得到的卫星钟差， $d\rho_r$ 表示广播星历经过等效钟差和轨道改正后的几何距离残余误差， δt^s 表示经过等效钟差和轨道改正后卫星钟差残余误差， δt_0 表示参考站接收机钟差的近似值， dt_r 表示接收机钟差近似值的残余误差， T 和 dT_r 分别表示实测气象数据或者对流层延迟模型计算得到的对流层延迟和对流层延迟的残余误差， N_0 和 dN_r 分别表示模糊度的近似值和模糊度近似值的残余误差。

所以，将上述两式整理可以得到伪距观测值和相位观测值的综合改正数：

$$dP_{IF,r} = d\rho_r + c(dt_r - dt^s) + dT_r + \varepsilon_{PIF} \quad (4.7)$$

$$dL_{IF,r} = d\rho_r + c(dt_r - dt^s) + dT_r + \lambda_{IF}dN_r + \varepsilon_{PIF} \quad (4.8)$$

而对于监测站附近的用户 u 而言，同样可以建立类似式 4.5 和式 4.6 的观测方程，并将式 4.7 和式 4.8 代入，可得：

$$P_{IF,u} = \rho_u + d\rho_u - d\rho_r + c(\delta t - dt_r) - c(\delta t^s + dt_u^s - dt_r^s) + T + dT_u - dT_r - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + dP_{IF,r} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.9)$$

$$L_{IF,u} = \rho_u + d\rho_u - d\rho_r + c(\delta t - dt_r) - c(\delta t^s + dt_u^s - dt_r^s) + T + dT_u - dT_r - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF}(N_0 + dN_r) + \frac{c}{f_1 + f_2}W + dL_{IF,r} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.10)$$

可以认为，在较短的时间内，卫星的钟差误差、轨道误差、对流层改正残余误差的变化量可以忽略，那么当用户 u 距离参考站比较近时，可以认为用户 u 和参考站的卫星轨道、卫星钟差、对流层延迟的残余误差可以相互抵消，于是，得到以下公式：

$$P_{IF,u} = \rho_u + c(\delta t - dt_r) - c\delta t^s + T - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + dP_{IF,r} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.11)$$

$$L_{IF,u} = \rho_u + c(\delta t - dt_r) - c\delta t^s + T - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF}(N_0 + dN_r) + \frac{c}{f_1 + f_2}W + dL_{IF,r} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.12)$$

这样，上式中的参考站接收机钟差的近似值误差可以被用户 u 的接收机钟差吸收，参考站的模糊度近似值误差可以被用户 u 的模糊度吸收。所以，只需要得到广播星历、卫星钟差改正、轨道改正、伪距和相位的综合改正数就可以对用户 u 进行实时精密定位了。

考虑到单个参考站可能会存在诸多隐患，如数据中断，数据质量波动，数据延迟等问题。为了保证用户进行实时精密定位的稳定性和连续性，可以通过基于多个参考站获得综合改正数的方式解决这一问题。

首先，假设某个点位为该区域的中心，以合适的距离规划一片区域作为一个分区，计算该分区内所有参考站的每颗卫星的伪距和相位综合改正数，后文皆称之为分区综合改正数。可以将该分区内同一历元的每个分区改正数通过加权平均来获取该分区这一历元的分区综合改正数。设定 w_i 为第 i 个参考站的权值，则计算公式为：

$$\delta P_{zone} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i dP_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.13)$$

$$\delta L_{zone} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i dL_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.14)$$

然后就可以得到基于参考历元和前后历元的变化量的分区综合改正数，可以表示为：

$$\delta L_{zone}(t_i) = \delta L_{zone}(t_{i-1}) + \frac{\sum_{i=1}^n w_i (dL_i(t_i) - dL_{i-1}(t_{i-1}))}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.15)$$

上式中， $dL_i(t_i) - dL_{i-1}(t_{i-1})$ 表示前后两个历元的相位改正数的变化量。此时，如果发现某颗卫星发生了周跳，就可以将该颗卫星剔除。如果某个参考站发生问题，也可以将其暂时从系统中剔除。

4.4 北斗星基增强系统精密单点定位研究

4.4.1 定位策略与模型

对于北斗分区综合改正的定位性能评估,即用户在仅使用广播星历、等效钟差、轨道改正数和北斗分区综合改正数进行伪距和相位实时精密定位的性能评估。本文将使用 BDS 系统双频无电离层组合观测值进行性能评估。

因为分区综合改正数的计算是通过无电离层组合观测值计算,所以北斗分区综合改正数可以用于 B1B2 双频实时定位,也可以用于 B1B3 双频实时定位。其无电离层组合观测模型为:

$$P_{IF} = \rho + c(\delta t - \delta t^s) + T - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \delta P_{zone} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.16)$$

$$L_{IF} = \rho + c(\delta t - \delta t^s) + T - \Delta_{rela} + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF}N + \frac{c}{f_1 + f_2}W + \delta L_{zone} + \varepsilon_{PIF} \quad (4.17)$$

本文选取了 6 号分区的 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 28 天的数据进行 BDS 双频无电离层模型实时静态和动态精密单点定位。

使用的软件是基于 RTKLIB 二次开发的 BDS 分区改正程序,本文作者在原有的单系统 PPP 功能的基础上,增加了读取双频观测的等效钟差,精密轨道和分区改正数的功能,增加了正确解算等效钟差,精密轨道和分区改正数并用于 PPP 的功能,实现基于分区综合改正数的 BDS 实时精密单点定位。表 4.1 为定位所使用的策略和参数估计方法。

表 4.1 PPP 数据处理策略

项目	策略
时间	2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日
参数估计方法	Kalman 滤波
观测值	载波相位和伪距双频观测值
数据采样率	30s
卫星轨道及钟差	广播星历
广域差分改正信息	等效钟差, 轨道改正数, 分区改正数
对流层延迟	SAAS 模型
电离层延迟	无电离层组合
测站坐标	静态/动态模式估计
待估参数	测站坐标, 测站钟差, 模糊度

本文采用双频无电离层模型模拟实时 PPP, 使用 B1、B2 频点, 码和相位观

测值的权重为 1: 10000。系统间偏差采用随机游走模型作为参数进行估计。使用 IGS 每周的 SINEX 文件提供的测站坐标作为定位误差的参考真值。

4.4.2 BDS 实时静态 PPP 结果分析

2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 28 天的数据进行 BDS 双频实时静态 PPP 定位，图 4.1 为 2019 年 2 月 1 日 HKSL 站实时静态 PPP 定位 N、E、U 三个方向的误差结果。图中蓝色表示 N 方向，绿色表示 E 方向，红色表示 U 方向。图 4.2 为其静态 PPP 定位三维坐标误差。其他单天解的结果与这一天结果类似。

从图 4.1 和 4.2 中不难看出，实时静态定位精度收敛后在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m，三维坐标误差小于 0.4m。三个方向都可以在极短的时间内收敛至 1m，三维坐标误差可以在 1 个小时内收敛至 0.5m，可以满足一般对于实时静态精密定位的要求。

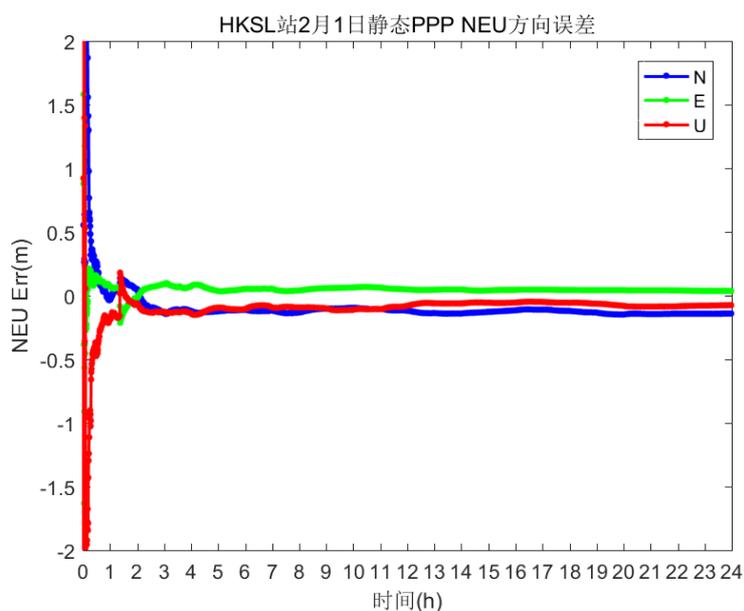


图 4.1 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日实时静态 PPP NEU 方向误差

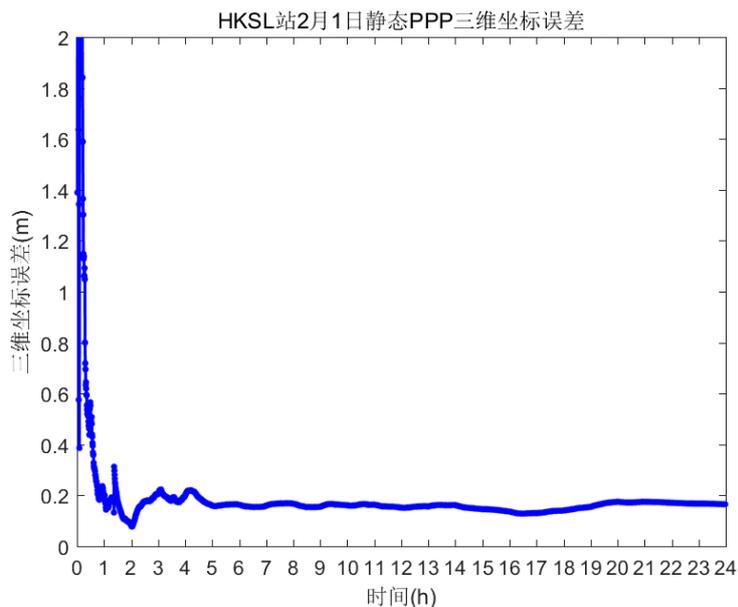


图 4.2 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日实时静态 PPP 三维坐标误差

4.4.3 BDS 实时动态 PPP 结果分析

2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 28 天的数据进行 BDS 双频实时动态 PPP 定位，图 4.3 为 2019 年 2 月 1 日 HKSL 站实时动态 PPP 定位 N、E、U 三个方向的误差结果。图 4.4 为其动态 PPP 定位二维平面坐标的误差结果。图 4.5 为其动态 PPP 定位三维坐标误差。其他单天解的结果与这一天结果类似。

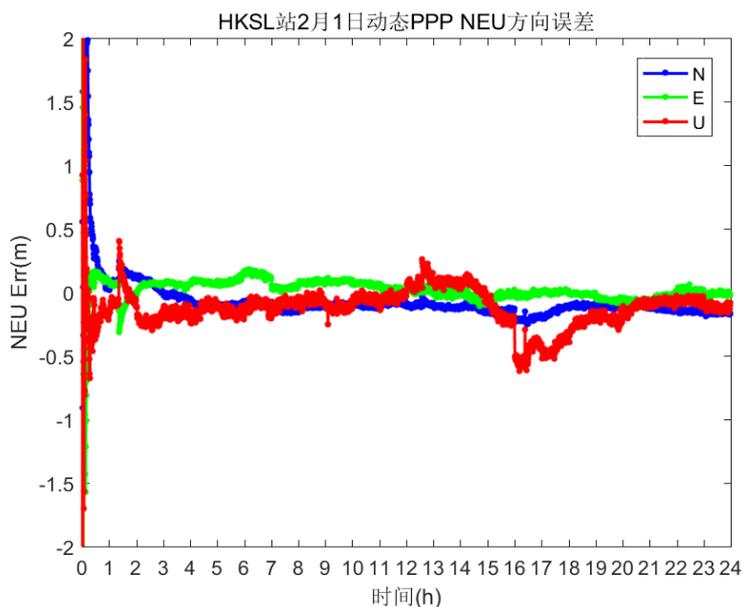


图 4.3 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日实时动态 PPP NEU 方向误差

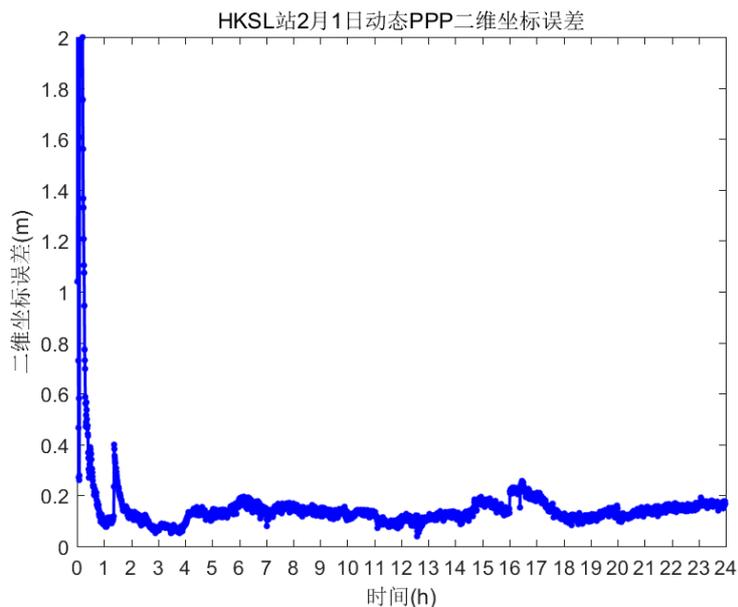


图 4.4 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日实时动态 PPP 二维坐标误差

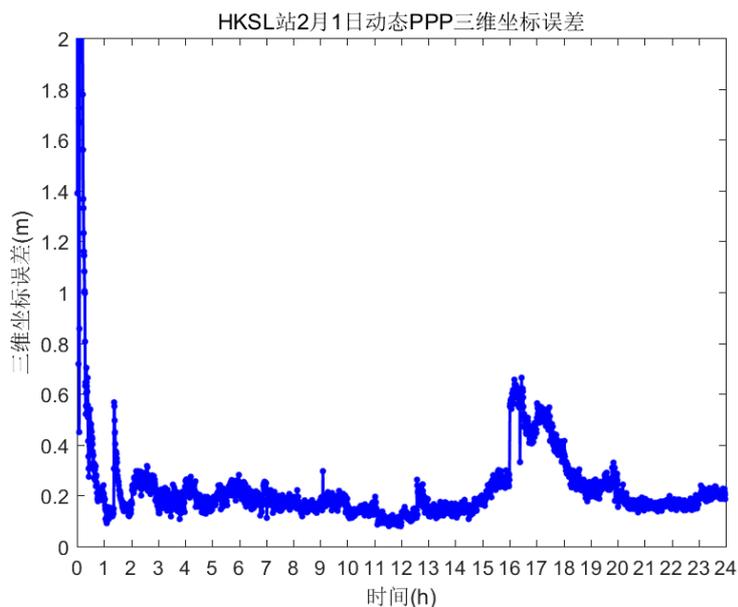


图 4.5 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日实时动态 PPP 三维坐标误差

从图 4.4 和 4.5 中不难看出，实时动态定位精度收敛后平面坐标误差优于 0.2m，三维坐标误差优于 0.5m，二维平面坐标可以在 30min 内收敛至 0.5m，而三维坐标可以在 30min 内收敛至 1m，最终收敛至 0.5m 以内。可以满足一般对于实时动态精密定位的要求。证明分区综合改正模型可以有效地提高北斗星基增强系统的定位性能，满足用户对于分米级定位的需求。

4.4.4 收敛时间与定位精度统计分析

为了进一步验证使用北斗分区改正数的定位性能, 本文还计算了 HKSL 站 2019 年 2 月共 28 天动态 PPP 定位的收敛时间, 如图 4.6 所示。判断收敛的条件为连续 20 个历元二维坐标误差低于 0.5m, 三维坐标误差低于 1m。从图中可以看出除个别天数存在数据质量问题外, 绝大多数定位结果都可以在 30min 左右满足收敛的要求, 28 天平均收敛时间为 32.8min。这一点相比于第三章中无论是使用 MADOCA 还是 CNES 的 GPS 单系统动态 PPP 都具有明显的优势。

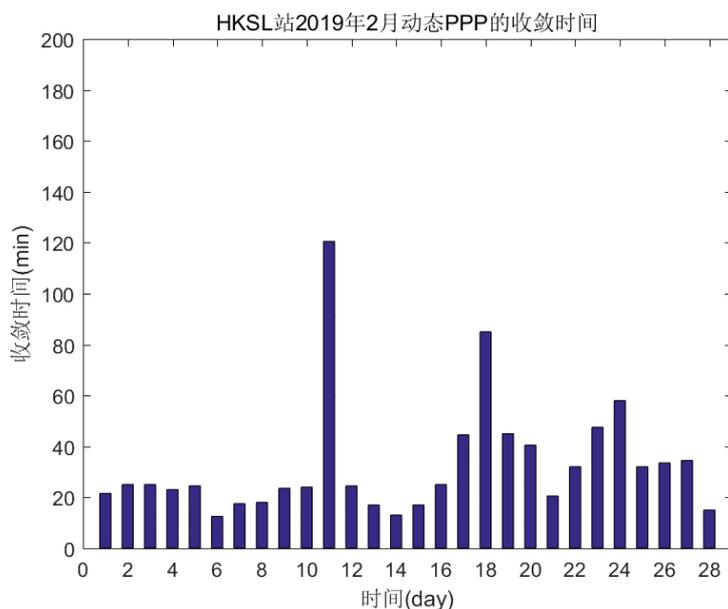


图 4.6 HKSL 站 2019 年 2 月 28 天的收敛时间

进一步基于 2019 年 2 月一个月的数据, 本文还统计了 28 天每天的平均 RMS, 如图 4.7 所示, 绝大多数定位结果在收敛后的 RMS 在 0.5m 左右, 说明使用北斗星基增强系统改正信息的 BDS 单系统动态 PPP 在精度上可以满足需求。28 天的平均 RMS 为 0.395m, 接近 GPS 单系统动态 PPP 的定位精度。

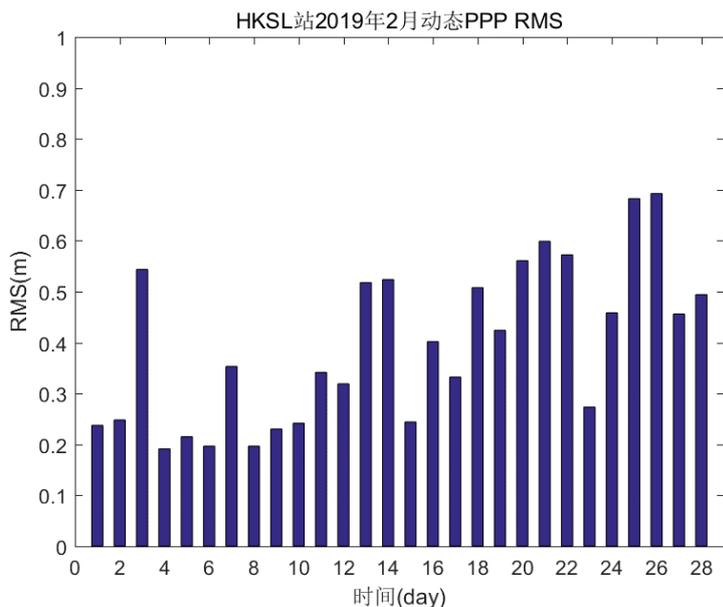


图 4.7 HKSL 站 2019 年 2 月 28 天的 RMS

4.5 总结

本章首先详细介绍北斗星基增强系统，掌握了等效钟差、轨道改正和北斗分区综合改正的计算原理，基于等效钟差、轨道改正数和北斗分区综合改正数的改正策略，改进 BDS 单系统 RTPPP 定位程序，通过对某一分区测站为期 28 天的观测定位验证了北斗分组改正数的定位性能。结果表明：

(1) 基于等效钟差，轨道改正和分区改正数的 BDS 系统实时静态定位东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m，三维坐标误差小于 0.4m。三个方向都可以在极短的时间内收敛至 1m，三维坐标误差可以在 1 个小时内收敛至 0.5m。

(2) 基于等效钟差，轨道改正和分区改正数的 BDS 实时动态定位平面坐标误差优于 0.2m，三维坐标误差优于 0.5m，二维平面坐标可以在 30min 内收敛至 0.5m，而三维坐标可以在 30min 内收敛至 1m，最终收敛至 0.5m 以内。

以上结果证明使用等效钟差、轨道改正数和分区改正数可以有效提高北斗星基增强系统的服务性能，可以满足用户分米级定位的需求。

第五章 MADOCA 和北斗星基增强系统融合实时定位方法研究

5.1 多系统实时定位

众所周知，GPS 单系统在某一时刻可以观测到的 GPS 卫星数目有限，且在如山谷、高楼等环境干扰严重的情况下可以观测到的卫星数目将更少，导致精密单点定位的连续性、可靠性和精度大大降低，甚至无法保证定位的最低需求，而使用多系统同时进行实时 PPP 则可以有效提高卫星的观测数目。而对于 BDS 系统而言，由于监测站数目和分布有限，轨道和钟差精度还需进一步提高等原因，单系统定位的精度相较于 GPS 单系统定位还存在一定的差距，更加需要联合多系统同时定位。

第三章中，本文使用了 MADOCA 和 CNES 分别进行 GPS 单系统或 GPS/GLONASS 双系统定位，结果表明 GPS/GLONASS 双系统定位相较于 GPS 单系统定位可以明显提高定位的收敛速度。GPS 和 BDS 在系统的设计角度，信号播发原理，定位原理等方面都有着较好的共同性，所以接收机可以同时接收这两类卫星导航系统的卫星信号进行双系统组合定位。

GPS 系统采用的时间系统是 GPS 时 (GPST), GPST 的零时刻是 UTC 时的 1998 年 1 月 6 日的零时刻, BDS 系统采用的时间系统为北斗时 (BDST), BDST 的零时刻是 UTC 时的 2006 年 1 月 1 日的零点时刻。因此, 一般进行双系统定位时, 需要将时间系统统一为 GPST。

GPS 系统采用的是 WGS-84 坐标系, 而 BDS 系统采用的是 CGCS2000 坐标系, 但得到的实时精密卫星轨道产品都是在 ITIF14 框架下的改正数, 使用这类改正产品进行实时精密单点定位时解算得到的接收机坐标也将对应于 ITIF14 框架, 因此坐标基准已经得到统一。

此时可以建立 GPS/BDS 无电离层组合实时精密单点定位观测方程:

$$P_{IF}^G = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + \Delta_{clk}^G + \Delta_{orb}^G + \varepsilon_P^G \quad (5.1)$$

$$L_{IF}^G = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + N + \Delta_{clk}^G + \Delta_{orb}^G + \varepsilon_L^G \quad (5.2)$$

$$P_{IF}^C = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + \Delta_{clk}^C + \Delta_{orb}^C + ISB^C + \varepsilon_P^C \quad (5.3)$$

$$L_{IF}^C = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + \Delta_{clk}^C + \Delta_{orb}^C + ISB^C + N + \varepsilon_L^C \quad (5.4)$$

上式中上标 G 表示 GPS 卫星，C 表示 BDS 卫星，其他符号与前文相同， Δ_{clk} 和 Δ_{orb} 表示实时精密钟差改正和轨道改正， ISB^C 表示 BDS 卫星相较于 GPS 卫星的系统间偏差。此时，卫星钟差通过实时精密钟差改正可以认为已经消除了卫星相关的硬件延迟偏差，而与接收机相关的硬件延迟偏差会被接收机钟差所吸收并进行参数估计。

在实际实时精密单点定位解算过程中，由于 BDS 卫星轨道与钟差精度较低等原因，BDS 卫星观测值在 GPS/BDS 的组合定位中通常需要进行降权处理。一般设定 GPS 和 BDS 的观测值的中误差之比为 2: 1，即：

$$\sigma_{G,P}:\sigma_{C,P} = \sigma_{G,L}:\sigma_{C,L} = 2:1 \quad (5.5)$$

σ_P 和 σ_L 分别表示伪距观测值和相位观测值的中误差。

目前 CNES 是主要的同时可以提供 GPS、BDS 等多系统实时精密改正产品的机构，但通过连续接受其 SSR 实时数据流进行统计发现，BDS 中的 GEO 卫星改正数据完整率明显较低，无法满足用户的定位需求，而 IGSO 和 MEO 卫星也存在少量卫星无法正常提供改正信息的问题。所以如果不同的卫星系统使用不同的改正策略，则可以解决这一问题。

5.2 使用不同改正策略的定位模型与策略

由前文可以得知，同一机构提供的实时精密定位改正数据和策略有时并非所有 GNSS 系统的最佳选择。第三章证明了 MADOCA 的实时精密产品可以满足 GPS 系统实时精密定位的改正需求，并且 MADOCA 具有较好的稳定性和可用性。第四章论述了北斗分区综合改正对于 BDS 系统实时精密定位收敛速度和定位精度的提高。所以这一章提出不同系统使用不同改正策略的双系统实时定位模型。

即使用 MADOCA 提供的精密轨道和精密钟差改正 GPS 广播星历，用于提高 GPS 的定位精度；使用等效钟差、轨道改正数改正 BDS 广播星历，使用相位分区综合改正数直接改正 BDS 相位观测值，用于提高 BDS 的定位精度。

根据式 5.1-5.4 也不难得出采用不同改正策略的双系统定位的观测方程：

$$P_{IF}^G = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + \Delta_{clk} + \Delta_{orb} + \varepsilon_P^G \quad (5.6)$$

$$L_{IF}^G = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + N + \Delta_{clk} + \Delta_{orb} + \varepsilon_L^G \quad (5.7)$$

$$P_{IF}^C = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + ISB^C + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \varepsilon_P^C \quad (5.8)$$

$$L_{IF}^C = \rho + c \cdot \delta t - c\delta t^s - \Delta_{rela} + T + ISB^C + N + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \delta L_{zone} + \varepsilon_L^C \quad (5.9)$$

上式中, Δ_{clk} 和 Δ_{orb} 表示 MADOCA 提供的 GPS 精密钟差和精密轨道, δ_{ESC} 表示 BDS 卫星等效钟差, δ_{orb} 表示 BDS 卫星轨道改正数, δL_{zone} 表示 BDS 卫星相位分区综合改正数。其他符号与前文相同。

双系统使用不同改正策略的双频实时 PPP 定位策略如表 5.1 所示:

表 5.1 PPP 数据处理策略

项目	策略
参数估计方法	Kalman 滤波
卫星轨道和钟差	广播星历
改正信息	GPS 使用 MADOCA 精密钟差、精密轨道 BDS 使用等效钟差、轨道改正数、分区综合改正数
观测值	载波相位和伪距双频观测值
对流层延迟	SAAS 模型改正
电离层延迟	无电离层组合
待估参数	测站坐标, 测站钟差, 模糊度, 对流层湿延迟改正, 系统间偏差

在实际实验设计和数据处理过程中, 通过 FTP 服务获取 MADOCA 实际播发的二进制文件, 进行解码并与广播星历一起解算得到模拟实时的 SP3 格式的精密星历用于 GPS 定位的改正。BDS 定位使用广播星历+等效钟差+轨道改正数+北斗分区综合改正数进行改正, 综合考虑 ISB, 模糊度等误差影响, 最终实现双系统无电离层模型的实时精密单点定位。

5.3 定位结果分析

本文选取了 6 号分区的 HKSL 站 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 28 天的数据进行 GPS/BDS 双频无电离层模型实时动态 PPP。使用的软件是基于 RTKLIB 二次开发的多系统 PPP 实时定位程序。GPS 使用 L1, L2 频点, BDS 使用 B1, B2 频点, 其他设置与第三章第四章相同。

图 5.1 为 2019 年 2 月 11 日 HKSL 站实时动态 PPP 定位 N、E、U 三个方向的误差结果。图 5.2 为其动态 PPP 定位三维坐标误差。其他单天解的结果与这一天结果类似。

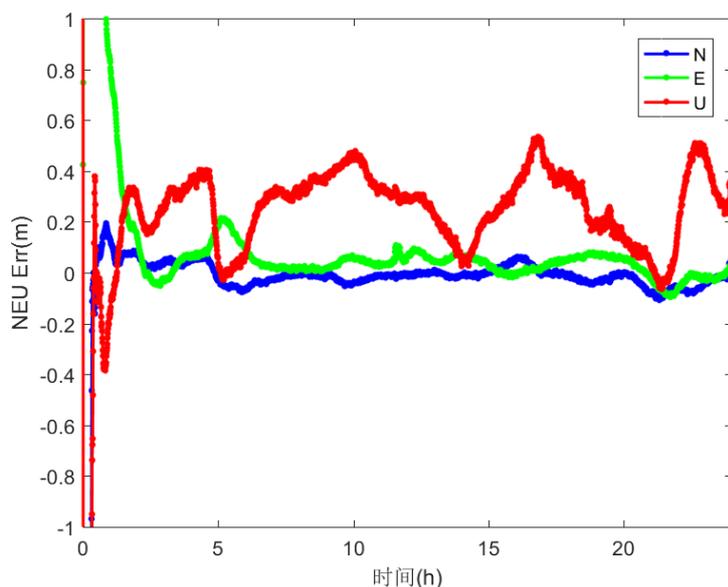


图 5.1 HKSL 站 2019 年 2 月 11 日实时动态 PPP NEU 方向误差

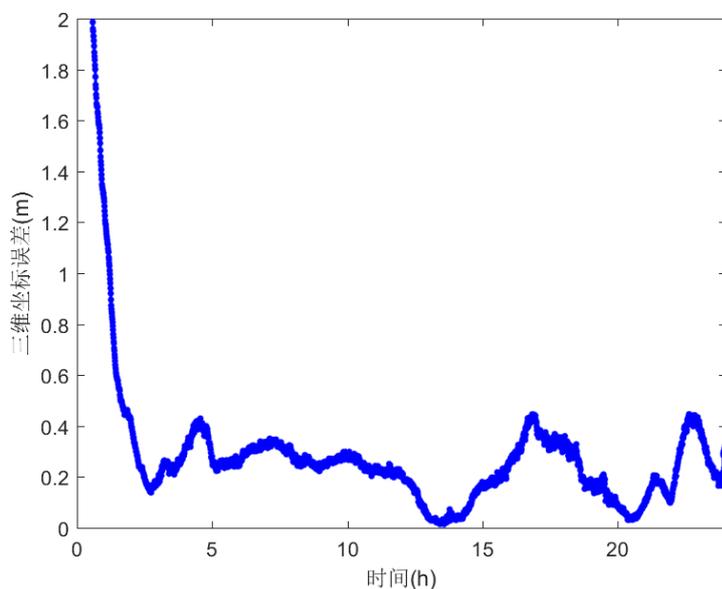


图 5.2 HKSL 站 2019 年 2 月 11 日实时动态 PPP 三维坐标误差

从图 5.1 和 5.2 中不难看出，实时动态定位精度收敛后在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.5m，三维坐标误差小于 0.5m。定位结果可以满足实时精密单点定位的米级需求，但相较于 GPS 单系统使用实时精密产品的 RTPPP 并没

有明显提升。

本文还计算了 HKSL 站 2019 年 2 月共 28 天动态 PPP 定位的收敛时间和 RMS，判断收敛的条件为连续 20 个历元二维坐标误差低于 0.2m，三维坐标误差低于 1m。图 5.3 为 28 天的每天的平均 RMS。

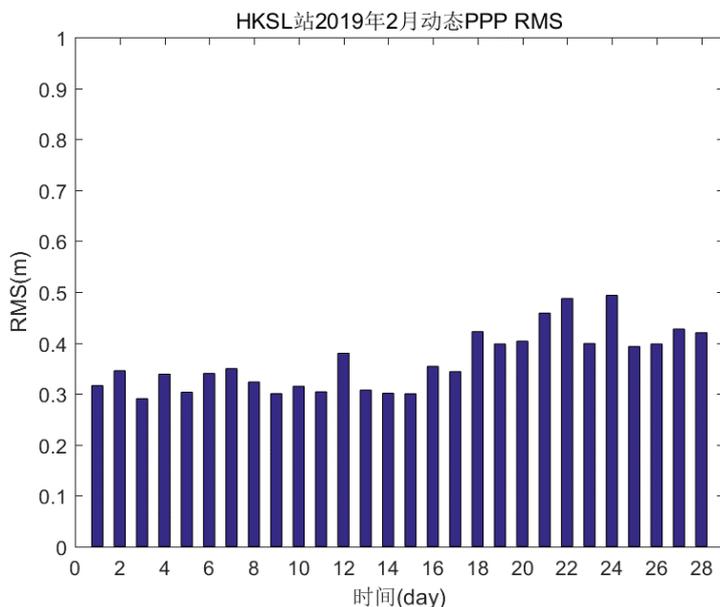


图 5.3 HKSL 站 2019 年 2 月 28 天的 RMS

从图 5.3 中不难看出，定位结果在收敛后的 RMS 大多在 0.4m 以内，说明同时使用 MADOCA 和北斗星基增强系统改正信息的 GPS/BDS 双系统动态 PPP 在精度上可以满足需求。28 天的平均 RMS 为 0.365m，较 BDS 单系统定位结果有所提高，但略差于 GPS 单系统定位结果。

但同时使用 MADOCA 和北斗星基增强系统的双系统定位 28 天的平均收敛时间为 110.4min，虽然相较于 GPS 单系统的收敛速度有所提升，但明显差于使用北斗星基增强系统的 BDS 单系统的收敛速度。其原因是多方面的，结合定位精度的对比情况进行分析，主要由于以下几个方面：（1）实时精密产品的机构不同而产生的误差，在定位中需要额外处理；（2）RTKLIB 软件缺乏对 BDS 系统的优化，本文在软件二次开发时需要进一步改进；（3）不同的实时定位系统融合程序需要进一步优化。

5.4 总结

本章首先针对多系统实时定位模型,对比分析多系统定位的优势和原因,然后提出了不同系统采用不同改正策略的实时精密单点定位的方法,并对论证模型和改正策略的可行性。最后通过对 HKSL 测站为期 28 天的观测定位验证了上述方法的定位性能。结果表明:

(1)实时动态定位精度收敛后在东、北方向上优于 0.1m,天顶方向优于 0.5m,三维坐标误差小于 0.5m,28 天的平均 RMS 为 0.365m。定位结果可以满足实时精密单点定位的米级需求,但相较于 GPS 单系统使用实时精密产品的 RTPPP 并没有明显提升。

(2)收敛速度相较于 GPS 单系统略有提升,但明显差于使用北斗星基增强系统的 BDS 单系统的收敛速度。其原因可能为实时精密产品的机构不同而产生的误差,在定位中需要额外处理;RTKLIB 软件缺乏对 BDS 系统的优化;不同的实时定位系统融合程序需要进一步优化。

第六章 结论与展望

6.1 工作总结

作者主要对使用两种完全不同的实时精密产品的实时 PPP 进行了深入的研究。主要研究内容与结论如下：

(1)通过实际编写 MADOCA 的 RTCM SSR 格式的二进制文件的解码程序，深入研究学习了 MADOCA 的数据结构，解码流程和数据处理方法。通过 FTP 服务下载了四周的 MADOCA 实时精密数据，并将二进制文件解码获取的 SSR 改正信息用于 GPS 和 GLONASS 广播星历的改正之中，最终获得 SP3 格式的精密钟差和精密轨道改正数。

(2)以 GFZ 提供的事后精密星历作为参考真值，以 CNES 提供的实时精密星历作为对比组，对 MADOCA 的实时精密星历进行多方面的评估。主要评估了钟差，径向、切向、法向轨道误差，SISRE，SISRE(orb)以及历元可用性。MADOCA 实时精密产品与 CNES 实时精密产品准确性，稳定性等方面已达到同一水平。轨道误差范围在 3-6cm 内，GPS 钟差误差在 $\pm 0.2\text{m}$ 内，GLONASS 钟差误差在 $\pm 1\text{m}$ 内。MADOCA 的 SISRE 与 SISRE(orb)的评估进一步验证了轨道和钟差评估工作的可靠性，证明 MADOCA 精密星历完全满足实时精密单点定位的需求。GPS 精密产品可用时段约为 95%，GLONASS 约为 87%；MADOCA 的 GPS 精密产品略差于 CNES，但可用性方面（特别是 GLONASS）明显优于 CNES。

(3)使用 MADOCA 或 CNES 精密产品的实时精密单点定位，定位精度保持一致，GPS 单系统静态定位在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.3m，动态定位东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m，使用 MADOCA 的稳定性略优于 CNES；而 GPS/GLONASS 双系统定位精度与 GPS 单系统十分近似，但使用 MADOCA 的动态定位的收敛速度相较于 CNES 明显更快。

(4)学习研究了等效钟差、轨道改正和北斗分区综合改正的原理，并掌握了等效钟差，北斗分区综合改正数的计算原理。基于 RTKLIB 软件修改开发了使用分区改正数的 BDS 双频实时 PPP 软件。基于等效钟差，轨道改正数和北斗分区综合改正数的改正策略，进行 BDS 实时静态和动态的实时精密单点定位，并

对其性能进行评估。结果表明实时静态定位在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.4m，三维坐标误差小于 0.4m。实时动态定位收敛后平面坐标误差优于 0.1m，三维坐标误差优于 0.5m，二维平面坐标可以在 30min 内收敛至 0.5m，而三维坐标可以在 30min 内收敛至 1m，最终收敛至 0.5m 以内。

(5) 研究和推导了 GPS 系统和 BDS 系统使用不同精密星历和改正策略的实时精密单点定位模型和观测方程，并对其性能进行评估。结果表明实时动态在东、北方向上优于 0.1m，天顶方向优于 0.5m，三维坐标误差小于 0.5m。收敛速度优于 GPS 单系统，差于基于北斗星基增强系统的 BDS 单系统。

6.2 未来展望

(1) 在对 MADOCA 进行学习和研究时，可以解码获得的可以使用的 MADOCA 实时数据还仅限于 GPS、GLONASS 和 QZSS 的精密钟差和精密轨道，而在本文撰写期间，MADOCA 已经可以提供如码偏差改正、电离层和对流层改正，以及 Galileo 的改正信息。那么如何更好的使用更多改正信息的 MADOCA 实时精密星历成为下一步需要考虑的工作。

(2) 尽管对 GPS/BDS 使用不同改正策略和改正信息的程序已经进行了很长时间的修改，但仍然没有得到满意的定位结果，程序仍需要进一步改进。

(3) 研究生期间一直使用的无电离层组合观测模型进行各种学术研究，也没有尝试进行模糊度的固定，接下来可以考虑解决这一问题。

(4) 另一方面，在研究生初期阶段，曾经学习过一段时间的非差非组合的理论知识，非差非组合的观测值可以保留更多的观测信息，如果有机会的话，也可以考虑开展这一部分的工作。

(5) 考虑到当前多频多系统 GNSS 和实时精密定位的发展趋势，如何更好地编码、解码、使用卫星播发的各类改正信息成为不可避免的重要问题，希望可以在今后的学习工作中，重点开展这一部分的研究工作。

参考文献

- 【1】. 刘健, 曹冲. 全球卫星导航系统发展现状与趋势 [J]. 导航定位学报, 2020, 8(01): 1-8.
- 【2】. 郭树人, 刘成, 高为广, 等. 卫星导航增强系统建设与发展 [J]. 全球定位系统, 2019, 44(02): 1-12.
- 【3】. Zhang Y., Kubo N., Chen J. P., et al. Assessment of the Contribution of QZSS Combined GPS/BeiDou Positioning in Asia-Pacific Areas [M]. Singapore: China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proceedings, 2018.
- 【4】. Montenbruck O., Steigenberger P., Hauschild, André. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective [J]. Gps Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- 【5】. JAXA. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Sub-meter Level Augmentation Service. <https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/ps-is-qzss.html>, 2017.
- 【6】. JAXA. Interface Specification for MADOCA-SEAD. https://ssl.tksj.jaxa.jp/madoca/public/doc/Interface_Specification_B_en.pdf, 2019.
- 【7】. El-Mowafy A., Deo M., Kubo N. Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections [J]. Gps Solutions, 2017, 21(3): 937-947.
- 【8】. Kazmierski K., Sosnica K., Hadas T. Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning [J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 11.
- 【9】. Zhang S. C., Du S. K., Li W., et al. Evaluation of the GPS Precise Orbit and Clock Corrections from MADOCA Real-Time Products [J]. Sensors, 2019, 19(11): 2580.
- 【10】. Gao Y., Shen X. B. A new method if carrier phase based precise point positioning [J]. Journal of Navigation, 2002, 49(2): 109-116.
- 【11】. Jan K. A guide to using International GNSS Service (IGS) products [J]. Maryland Biological Stream Survey Data Versar Inc, 2009, 4(3): 106-141.
- 【12】. 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- 【13】. 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差 [J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 447-453.
- 【14】. Chen J. P. GPS/GLONASS System Bias Estimation and Application in GPS/GLONASS Combined Positioning [C]. Wuhan: In China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings, 2013.
- 【15】. Li M., Qu L., Zhao Q., et al. Precise point positioning with the BeiDou navigation satellite system [J]. Sensors, 2014, 14(1): 927-943.
- 【16】. 任晓东, 张柯柯, 李星星, 等. BeiDou、Galileo、GLONASS、GPS 多系统融合精密单点 [J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1307-1313.
- 【17】. 耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 等. 基于 PANDA 软件的实时精密单点定位研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(4): 312-315.
- 【18】. 刘志强, 王解先. 广播星历 SSR 改正的实时精密单点定位及精度分析 [J]. 测绘科学, 2014, 39(1): 15-19.
- 【19】. 胡豪杰. BDS/GPS 实时精密单点定位性能分析 [C]. 成都: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2020.

- 【20】. RTCM Special Committee. RTCM Standard 10403.2 Differential GNSS. <https://rtcm.myshopify.com/collections/differential-global-navigation-satellite-dgnss-standards>, 2013.
- 【21】. 于晓东, 吕志伟, 王兵浩, 等. DGNSS 数据传输格式 RTCM3.2 的介绍及解码研究 [J]. 全球定位系统, 2015, 40(03): 37-41.
- 【22】. 何旭蕾. QZSS 系统 L6 信号解析 [C]. 成都: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2020.
- 【23】. 王伟. CNES 实时轨道和钟差产品精度评估 [C]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2019.
- 【24】. 张益泽, 陈俊平, 周建华, 等. 北斗广播星历偏差分析及改正 [J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 64-71.
- 【25】. 张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017.
- 【26】. 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 [J]. 测绘学报, 2018, 47(09): 1161-1170.
- 【27】. Guo F., Li X., Zhang X., et al. Assessment of precise orbit and clock products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX) [J]. Gps Solutions, 2017, 21(1): 279-290. Wuhan:
- 【28】. Safoora Z., Kan W., Teunissen P. J. G. Australia-first high-precision positioning results with new Japanese QZSS regional satellite system [J]. Gps Solutions, 2018, 22(4): 101-.
- 【29】. 程春. 北斗卫星实时和事后精密星历产品的性能评估 [C]. 武汉: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2018.
- 【30】. Han C., Yang Y., Cai Z. BeiDou Navigation Satellite System and its time scales [J]. Metrologia, 2011, 48(4): S213-S218.
- 【31】. Kai Z., Zhang X. H., Li X. X., et al. Mitigation of Unmodeled Error to Improve the Accuracy of Multi-GNSS PPP for Crustal Deformation Monitoring September 2019 Remote Sensing [J]. ReaserchGate, 2019, 11(19).
- 【32】. 张琳. QZSS 导航系统在亚太地区的初步性能评估 [J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(05): 618-623.
- 【33】. Guohui W., Cuilin K., Changsheng C., et al. Real-time PPP based on the Quasi-Zenith Satellite System MADOCA-LEX signal [J]. Iet Radar Sonar & Navigation, 2018, 12(5): 494-498.
- 【34】. Nie Z. X., Zhou P. Y., Liu F., et al. Evaluation of Orbit, Clock and Ionospheric Corrections from Five Currently Available SBAS L1 Services: Methodology and Analysis [J]. Remote Sensing, 2019, 11(4).
- 【35】. Heßelbarth A., Wanninger L. SBAS orbit and satellite clock corrections for precise point positioning [J]. Gps Solutions, 2013, 17(4): 465-473.
- 【36】. Li L., Jia C., Zhao L., et al. Real-Time Single Frequency Precise Point Positioning Using SBAS Corrections [J]. Sensors, 2016, 16(8): 1261.
- 【37】. 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 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(02): 159-165.
- 【38】. 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 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(07): 1075-1082.
- 【39】. 臧楠, 李博峰, 沈云中. 3 种 GPS+BDS 组合 PPP 模型比较与分析 [J]. 测绘学

- 报, 2017, 46(12): 1929-1938.
- 【40】. 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 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(05): 561-565.
- 【41】. 王兵浩, 李兆南, 周建华, 等. 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(02): 160-166.
- 【42】. 曹冲. 全球卫星导航系统的最新动向与发展趋势 [J]. 卫星与网络, 2010(04): 22-25.
- 【43】. 李珊珊, 杨泳, 徐开俊, 等. 差分数据通信格式 RTCM3.2 解码算法研究 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2019, 30(03): 65-69+73.
- 【44】. 史永明, 刘季, 张振伟, 等. 关于建设北斗星基广域增强系统研究 [J]. 北京测绘, 2014(03): 97-100.
- 【45】. 李冉, 胡小工, 曹月玲, 等. 北斗广域增强系统星钟和星历误差改正算法研究 [J]. 天文学进展, 2019, 37(01): 98-110.
- 【46】. 李敬龙. 基于 BDS_GPS 双系统的定位算法实现与精度分析 [J]. 科技视界, 2018(13): 34-36+108.
- 【47】. Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- 【48】. Ken H., Suelynn C., Yaka W., et al. Transmission of Augmentation Messages for Precise Point Positioning Utilizing Japanese QZSS LEX Signal [J]. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 2014: 2467-2477.
- 【49】. 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估 [J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(01): 72-81.
- 【50】. 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 [J]. 测绘学报, 2019, 48(07): 822-830.
- 【51】. 王兵浩, 李兆南. 北斗广域差分分区综合改正数评估 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(05): 511-515.
- 【52】. 房成贺, 陈俊平, 兰孝奇, 等. 联合 BDS/GPS 的北斗广域差分实时电离层延迟格网改正方法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(02): 63-71.
- 【53】. 陈俊平, 陈倩. 北斗高精度星基广域差分关键技术及应用 [J]. 科技成果管理与研究, 2019: 86-87.
- 【54】. El-Mowafy A. Predicting orbit and clock corrections during their outage in real-time positioning using GPS, GLONASS and QZSS for natural hazard warning systems [J]. Journal of applied geodesy, 2019, 13(2): 69-79.
- 【55】. Wang G., Kuang C., Cai C., et al. Real time precise point positioning based on the QZSS MADOCA-LEX signal [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(5).
- 【56】. 邵佳妮, 冯炜, 申俊飞. QZSS 系统及其信号设计 [J]. 测绘科学, 2009, 34(S2): 225-227.
- 【57】. 江永生. QZSS 增强信号对 GPS 定位增强效果的分析 [J]. 北京测绘, 2019, 33(08): 969-973.
- 【58】. 楼益栋, 郑福, 龚晓鹏, 等. QZSS 系统在中国区域增强服务性能评估与分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(03): 298-303.
- 【59】. 刘春保. 日本卫星导航能力发展 [J]. 国际太空, 2018(08): 53-58.

- 【60】. Elsobeiey M., Al-Harbi A. Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using IGS Real-Time Service [J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(3): 566-571.
- 【61】. 余忠伦, 高雅萍, 杨立财. SSR 改正数更新频率及中断时间间隔对实时 PPP 的影响分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(11): 1153-1158.
- 【62】. 夏凤雨, 叶世榕, 赵乐文, 等. 基于 SSR 改正的实时精密单点定位精度分析 [J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(3): 52-57.
- 【63】. Zhang L., Yang H. Z., Gao Y., et al. Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12): 2942-2954.
- 【64】. 张小红, 柳根, 郭斐, 等. 北斗三频精密单点定位模型比较及定位性能分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 2124-2130.
- 【65】. 陈振, 王权, 秘金钟, 等. 新一代国际标准 RTCM V3.2 及其应用 [J]. *导航定位学报*, 2014, 2(04): 87-93.
- 【66】. Wang Z. Y., Li Z. S., Wang L., et al. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers [J]. *Isprs International Journal of Geo Information*, 2018, 7(3): 85-.
- 【67】. He F., Zhou S. S., Hu X. G., et al. Satellite-station time synchronization information based real-time orbit error monitoring and correction of navigation satellite in Beidou System [J]. *Science China(Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2014, 57(07): 1395-1403.
- 【68】. Cao Y. L., Hu X. G., Wu B., et al. The wide-area difference system for the regional satellite navigation system of COMPASS [J]. *Science China(Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2012, 55(07): 1307-1315.
- 【69】. Odijk D., Nadarajah N., Zaminpardaz S., et al. GPS, Galileo, QZSS and IRNSS differential ISBs: estimation and application [J]. *Gps Solutions*, 2017, 21(2): 439-450.

作者在攻读硕士学位期间公开发表的论文

- 【1】. 马壮, 陈俊平, 刘姣, 等. MADOCA GPS/GLONASS 实时精密星历产品的性能评估 [J]. 天文学进展. (第一作者, 中文核心, 已接收)

作者在攻读硕士学位期间所作的项目

- 【1】. 北斗系统平稳过渡相关技术验证，参与人
- 【2】. 空天地一体化，参与人
- 【3】. 坐标参考基准精化，参与人

致 谢

本文是在导师陈俊平研究员的悉心指导和帮助下完成的。首先，我衷心地感谢我的两位指导老师葛先辉教授和陈俊平研究员。从大四通过中科院上海天文台的研究生复试起，一直到临近毕业，论文即将完成之际，陈老师自始至终心系我的学习和科研状况，不断鼓励和鞭策我前行。陈老师严谨的治学态度，精益求精的严格要求，孜孜不倦的指导帮助，思维开阔的交流方式，无微不至的关怀照顾都为我研究生期间的学习，科研和生活提供了巨大的帮助。记得从刚刚大学毕业，陈老师就对我们给予了很高的期望，每周一次的组会讨论，不厌其烦的答疑解惑，亲切和蔼的交流沟通，为我硕士的研究选题，科研进展付出了大量的心血。陈老师忘我的工作热情，求是拓新的科研态度以及事必躬亲的为人作风一直激励着我学习上进，努力科研。

然后，感谢硕士期间上海大学和中科院上海天文台的老师们对我的悉心栽培和教导。特别感谢导师葛先辉老师对我细心耐心地传道、授业、解惑，对我的学习工作一直关心和指导，使得我作为一名上海大学和中科院联合培养的同学在两边都感受到了母校的亲切感，信赖感和感动。正是有了老师们的教授和帮助，才使我成长至今。

感谢同组的师兄师姐王阿昊、王彬、谭伟杰、刘姣、柳培钊、白天阳、侯阳飞、孟令东、董志华、陈倩、王恒、张益泽，在我刚刚回到天文台时就对我的关心和帮助，你们的细心指点和讨论交流让我及时解决科研道路上的迷惑，发现自己的不足，让我更好地发挥自己的优点。还要感谢同组的伍冠滨、周杨、于超，天文台的席克伟、黄超等学长学姐，硕士科研期间得到了你们太多的帮助和陪伴，让我不断地成长和前进。

感谢我的室友张宇和高超，天文台的唐璐、李秋霞等同学们，同组的师弟师妹们！感谢你们在我成长中的陪伴和鼓励！感谢上海大学的室友凌中火、司哲、廖良祥，以及李冰玉，张学聪，肖康等同学，为苦恼于理论物理的研一生活提供了诸多帮助和超多的快乐。

感谢父母的辛勤培养，感谢亲朋好友一直以来的关注和支持！感谢本论文参考文献的所有作者，感谢科研和生活中与我指导和帮助的范均怡、宋富强等人以

及武汉大学的同学们!

最后,感谢即将评审本文的专家和老师,感谢上海大学和中科院上海天文台的教育和培养!

作者: 马壮

2020年5月

附 录

附录一：MADDOCA 解码关键部分源代码

```

int DecodeMADDOCA(FILE* Fin, Initial* Init, FILE *Fout)
.....

if ((Buff[k] == 0xd3) && ((Buff[k+1] & 0xfc) == 0x00)){
MADDOCA madoca;

madoca.MLength = getbitu(Buff,14+k*8,10)+3;
madoca.MSGNum = getbitu(Buff,24+k*8,12);
madoca.EpochTime = getbitu(Buff,36+k*8,20);
if (madoca.MSGNum == 1057 && Orbit2Clock == 0){
AllEpochTime = madoca.EpochTime;
Orbit2Clock = 1;}
else if (Orbit2Clock != 1){
flag = madoca.MLength;
i = 999 - flag;
break;}
else if (madoca.MSGNum == 1058){
Orbit2Clock = 0;}
DecodeSSR(&madoca,Buff+3+k);
DataPrint(&madoca, AllIODE, Fout);
.....}

int DecodeGPSOrbit(MADDOCA * madoca, unsigned char Buff[]){
madoca->SatN = getbitu(Buff,62,6);
int pos = 68;
for (int i=0;i<madoca->SatN;i++){
madoca->ssr[i].SatID = getbitu(Buff,pos,6);          pos+=6;
madoca->ssr[i].IODE = getbitu(Buff,pos,8);          pos+=8;
}
}

```

```

madoca->ssr[i].R      = getbits(Buff,pos,22)*1E-4;  pos+=22;
madoca->ssr[i].A      = getbits(Buff,pos,20)*4E-4;  pos+=20;
madoca->ssr[i].C      = getbits(Buff,pos,20)*4E-4;  pos+=20;
madoca->ssr[i].DotR   = getbits(Buff,pos,21)*1E-6;  pos+=21;
madoca->ssr[i].DotA   = getbits(Buff,pos,19)*4E-6;  pos+=19;
madoca->ssr[i].DotC   = getbits(Buff,pos,19)*4E-6;  pos+=19;}
return 1;}

```

```

int DecodeGPSClock(MADOCA* madoca, unsigned char Buff[]){
madoca->SatN = getbitu(Buff,61,6);
int pos = 67;
for (int i=0;i<madoca->SatN;i++){
madoca->ssr[i].SatID      = getbitu(Buff,pos,6);      pos+=6;
madoca->ssr[i].DClock[0] = getbits(Buff,pos,22)*1E-4; pos+=22;
madoca->ssr[i].DClock[1] = getbits(Buff,pos,21)*1E-6; pos+=21;
madoca->ssr[i].DClock[2] = getbits(Buff,pos,27)*2E-8; pos+=27;}
return 1;}

```

```

int DecodeGPSCodeBias(MADOCA* madoca, unsigned char Buff[]){
madoca->SatN = getbitu(Buff,61,6);
int pos = 67;
int mode;
double bias;
const int *codes = codes_gps;
for (int i=0;i<madoca->SatN;i++){
madoca->ssr[i].SatID = getbitu(Buff,pos,6);  pos+=6;
madoca->ssr[i].nbias = getbitu(Buff,pos,5);  pos+=5;
for (int j=0;j<madoca->ssr[i].nbias;j++){
mode = getbitu(Buff,pos,5);      pos+=5;
bias = getbits(Buff,pos,14)*0.01;  pos+=14;

```

```
if (mode<17){
madoca->ssr[i].Bias[codes[mode]] = (float)bias;}}}
return 1;}

int DecodeGPSHighClock(MADOCA* madoca, unsigned char Buff[]){
madoca->SatN = getbitu(Buff,61,6);
int pos = 67;
for (int i=0;i<madoca->SatN;i++){
madoca->ssr[i].SatID = getbitu(Buff,pos,6);      pos+=6;
madoca->ssr[i].HrClock = getbits(Buff,pos,22)*1E-4;  pos+=22;}
return 1;}

```

附录二：GPS/BDS 使用不同改正策略的 RTPPP 关键部分源代码

```
static int decode_obsdata(FILE *fp, char *buff, double ver, int mask, sigind_t
*index, obsd_t *obs){
    .....
    if (orbt_opt == 1){
        int k = 0;
        u = 0;
        if (orbtfid == 0){
            for (i = 0; i < orbtdata.n; i++){
                targetTime = timeadd(orbtdata.data[i].time, delayTime);
                dt = timediff(timeadd(obs->time, GLtsys == 0 ? 0 : 14), targetTime);
                if (dt >= 0 && dt < 360){
                    if (orbtdata.data[i].sigid == GLsigid){
                        u += 1;
                        orbtU = u;
                        for (jj = 0; jj < 3; jj++){
                            (tempOrbt + k)->dX[jj] = orbtdata.data[i].dX[jj];
                            (tempOrbt + k)->sat = orbtdata.data[i].sat;
                            (tempOrbt + k)->time = orbtdata.data[i].time;
                            (tempOrbt + k)->sigid = orbtdata.data[i].sigid;
                            (tempOrbt + k)->index = orbtdata.data[i].index;
                        }
                        orbtfid = 1;
                        k++;}
                    else continue;}
                else if (dt<-359)break;}}
            .....

static int ifmeas(const obsd_t *obs, const nav_t *nav, const double *azel, const
prcopt_t *opt, const double *dantr, const double *dants, double phw, double *meas,
double *var){
```

```
.....  
if (pcor_opt == 1){  
if (opt->nf == 6){          //BDS B1+B2  
if (obs->flag[0] >= 0.0 && obs->flag[1] >= 0.0 && fabs(obs->corr[0]) > 0.0 &&  
fabs(obs->corr[1]) > 0.0 && fabs(obs->corr[0]) < 8.0 && fabs(obs->corr[1]) < 8.0){  
c11 = gamma2 / (gamma2 - 1.0);  
c21 = -1.0 / (gamma2 - 1.0);  
mpcor = c11*obs->corr[0] + c21*obs->corr[2];  
mmpcor[0] = obs->corr[0]; //log  
mmpcor[1] = obs->corr[2];}  
else return 0.0;}  
else if (opt->nf == 7){ //BDS B1+B3  
if (obs->flag[0] >= 0.0 && obs->flag[1] >= 0.0 && fabs(obs->corr[0]) > 0.0 &&  
fabs(obs->corr[1]) > 0.0 && fabs(obs->corr[0]) < 8.0 && fabs(obs->corr[1]) < 8.0){  
c11 = gamma1 / (gamma1 - 1.0);  
c21 = -1.0 / (gamma1 - 1.0);  
mpcor = c11*obs->corr[0] + c21*obs->corr[1];  
mmpcor[0] = obs->corr[0]; //log  
mmpcor[1] = obs->corr[1];}  
else return 0.0;}  
.....  
meas[0] += mpcor;  
meas[1] += mpcor;  
mmpcor = mpcor;}  
.....
```