



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

多系统 PPP-RTK 定位端关键技术

姓 名：刘东林

学 号：1931992

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

二〇二二年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

The key technology of multi-system PPP-RTK user terminal

Candidate:	Liu DongLin
Student Number:	1931992
School/Department:	College of Surveying and Geo-Infomatics
Discipline:	Engineering
Major:	Surveying and Mapping
Supervisor:	Prof. Wang JieXian

March, 2022

**多系统
PPP
-
RTK
定位端关键技术**

刘东林

同济大学

摘要

GNSS 精密定位方法有两种，一种是以 RTK 为代表的差分定位，另一种是精密单点定位。差分定位通过将观测值作差，以此消除卫星的轨道和钟误差、电离层延迟、对流层延迟以及接收机钟差等的影响，以此获取高精度定位结果。与差分定位中的 RTK 相比，PPP 由于误差来源多且无法消除，导致其收敛速度和定位精度远不及 RTK，这大大限制了 PPP 的发展及应用。尤其在网络 RTK 技术出现之后，RTK 的定位服务性能又得到了提升。

RTK 技术虽然具有很高的定位精度和效率，但是流动站过分依赖于参考站的观测值，存在作业距离限制；此外，流动站与参考站之间需要进行数据通讯，存在通讯负担重和作业条件限制等问题。

PPP-RTK 技术融合了 PPP 和 RTK 两种定位技术的优势，其分为服务端和客户端。服务端利用局域网所提供的观测数据，精化求解全球网提供的卫星轨道和钟差、伪距和相位偏差等，同时求解电离层和对流层延迟等参数，生成 SSR 产品，通过卫星播发给客户端使用。客户端使用服务端提供的产品，实现快速模糊度固定，得到高精度定位解。国内外的学者对 PPP-RTK 技术的研究已经有了较为丰硕的成果，但大都是事后模式，且将 BDS-3 应用于 PPP-RTK 方面还缺乏相关研究。

本文分析了国内外 RTK 的研究现状、PPP 的研究现状，以及 PPP-RTK 定位技术的发展与现状，介绍了 PPP-RTK 的定位模型（包括观测方程、随机模型以及参数估计方法），给出了 PPP-RTK 主要误差处理方法，研究了 PPP-RTK 数据预处理与质量控制策略；分析研究了 PPP-RTK 整周模糊度固定的关键技术；搭建了 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台；并基于上述平台，对 CNES 播发的多系统实时轨道钟差改正数的精度进行了评估；最后，编写了 PPP-RTK 定位程序。基于上海天文台提供的数据及产品，分别进行多系统 PPP-RTK 静态站仿动态定位和动态定位，并对定位结果进行了精度分析以及横向比较。本文的主要工作和结论如下：

（1）由 GNSS 基本观测方程推导出了星间单差 PPP-RTK 定位方程，研究了 PPP-RTK 随机模型和参数估计方法。从理论上给出了 PPP-RTK 定位方程中各类偏差的定义和处理方法。

（2）研究分析了 PPP-RTK 整周模糊度固定的关键点。首先，详细推导了 PPP-RTK 服务端估计 UPD 的方法，以及 PPP-RTK 客户端使用服务端提供的 UPD 产品实现模糊度固定的方法；其次，介绍了进行模糊度固定时常用到的

LAMBDA 算法；最后，介绍了 PPP-RTK 用户端模糊度固定检核方法、进行部分模糊度固定时模糊度子集的选取方法。

(3) 基于 BNC 平台、RTCM 格式、NTRIP 协议以及共享内存，搭建了 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台，实现了 PPP-RTK 服务端与用户端各板块之间的实时数据交互与管理。

(4) 实现了多系统实时精密轨道钟差恢复和精度分析。将 CNES 播发的实时轨道钟差改正数恢复成精密星历，使用 GFZ 提供的事后精密轨道钟差对其进行精度评估。轨道精度方面，GPS、GALILEO 和 BDS-3 绝大多数卫星径向精度在 3cm 以内；此外，统计了各系统的平均 SISRE，发现 GPS、GALILEO 实时轨道精度相当(3cm)，明显高于 BDS-2(6cm)和 BDS-3 (7cm)；BDS-3 中，C27-C28、C38-C40 的轨道精度明显低于其他卫星，且 BDS-3 实时轨道的切向精度较差，这是由于目前 BDS-3 刚建成不久，全球观测站数量还较少，随着后续观测站的增加，应该会有改善和提升。钟差精度方面，扣除基准后，统计了各系统实时钟差与事后精密钟差差异的 STD，发现 GPS 和 GALILEO 钟差精度相当(0.12ns)，BDS-3 实时钟差的 STD 除 C27-C28、C38-C40 较大外，其余卫星的均在 0.2ns 左右，相对于 BDS-2（除去 C01-C05）的 0.31ns 有一定的提升。

(5) 实现了 PPP-RTK 用户端定位解算并进行了精度分析。基于 CNES 提供的实时轨道钟差改正数，上海天文台提供的 UPD 产品、DCB 产品以及区域大气延迟产品，对某区域的 11 个测站进行多系统仿动态 PPP-RTK 定位解算。结果表明：a)定位精度方面，大部分测站在水平方向定位误差 RMS 在 12mm 以内，垂直方向定位误差 RMS 在 40 mm 以内，各测站定位误差 RMS 在北、东、高三个方向的平均值为 12.3 mm、10.9 mm、36.1 mm；b) 模糊度首历元固定比例方面，绝大部分测站定位解算时模糊度可以在第一个历元成功固定比例在 95%以上，平均为 95.49%；c)模糊度历元固定率方面，所有测站的模糊度历元固定率相当，均在 98%以上，平均固定率为 98.63%。此外，还进行了多系统动态 PPP-RTK 定位实验，将千寻位置提供的 VRS 定位结果作为参考。结果表明：在卫星通视情况较好时，动态 PPP-RTK 模糊度历元固定率与仿动态相当，即使在有所遮挡的情况下，仍能达到 80%以上的固定率。可得出，多系统动态 PPP-RTK 能够提供与 VRS 精度相当的定位服务，具有较高的可靠性。

最后，关于进一步工作的方向进行了简要的讨论。

关键词：GNSS，多系统 PPP-RTK，数据接收与内存管理平台，实时轨道钟差精度评估，区域大气延迟产品，模糊度历元固定率

ABSTRACT

There are two GNSS precision positioning methods, one is relative positioning represented by RTK, and the other is PPP. Relative positioning eliminates the effects of satellite orbit errors, clock errors, receiver clock errors, ionospheric and tropospheric refraction errors by making differences to obtain high-precision positioning results. Compared with RTK, PPP has many error sources and cannot be eliminated, resulting in its convergence time and positioning accuracy being far less than RTK.

Although the RTK technology has high positioning accuracy and efficiency, the rover relies too much on the observation value of the reference station, and there is a limit to the operating distance. In addition, data communication is required between the rover and the reference station, and there are problems such as heavy communication burden and limited operating conditions.

PPP-RTK technology combines the advantages of PPP and RTK. The server uses local area network observation data to refine the SSR products provided by the global network (wide area network), such as satellite orbit and clock error, code bias, phase bias, while solving parameters such as atmospheric delay. At the same time, the atmospheric delay and other parameters are solved, and all kinds of re-generated correction information are expressed in SSR and broadcast to the user side separately. The rover uses the products provided by the server to achieve fast ambiguity resolution and obtain high-precision positioning solutions. Scholars at home and abroad have achieved fruitful results in the research of PPP-RTK technology, but most of them are not real-time, and there is still a lack of relevant research on the application of BDS-3 to PPP-RTK.

This paper analyzes the research status of RTK and PPP at home and abroad, and the development and status of PPP-RTK positioning technology. The main work and conclusions of this paper are as follows:

(1) The PPP-RTK positioning equation is derived from the basic GNSS observation equation, and the definition and processing methods of various deviations in the PPP-RTK positioning equation are theoretically given. The PPP-RTK stochastic model and parameter estimation method are discussed.

(2) The ambiguity resolution method based on UPD estimation is deduced, and the method for the PPP-RTK client to use the UPD product provided by the server to

realize the ambiguity resolution. It also introduces the method of PPP-RTK client ambiguity resolution checking method, and the selection method of ambiguity subset when partial ambiguity resolution.

(3) Based on BNC software, RTCM format, NTRIP protocol and shared memory, a PPP-RTK data receiving and memory management platform is built, which realizes the real-time data interaction and management between the various sections of the PPP-RTK server and the client.

(4) The accuracy of orbit and clock correction provided by CNES was evaluated. In terms of orbit accuracy, the radial accuracy of most satellites of GPS, GALILEO and BDS-3 is within 3cm. In addition, the average SISRE of each system is calculated, and it is found that GPS and GALILEO are equivalent (3cm), which is significantly higher than that of BDS-2 (6cm) and BDS-3 (7cm). In BDS-3, the orbit accuracy of C27-C28 and C38-C40 is significantly lower than that of other satellites, and the tangential accuracy of BDS-3 real-time orbit is poor, this is because BDS-3 has just been built and the number of global observatories is still relatively small. With the increase of subsequent observatories, there should be improvements and upgrades. In terms of clock accuracy, after deducting the benchmark, the STD of the difference between the real clock error of each system and the precision clock error afterwards is counted, it is found that GPS and GALILEO have the same clock error accuracy (0.12ns). Except for C27-C28 and C38-C40, the STD of BDS-3 real clock difference is larger, and the other satellites are all around 0.2ns, which is a certain improvement compared to the 0.31ns of BDS-2 (excluding C01-C05).

(5) The multi-system static PPP-RTK positioning solution was performed on 11 stations in a certain area. The results show that: a) In terms of positioning accuracy, most of the station's horizontal RMS is within 12mm, the vertical RMS is within 40 mm, and the RMS of each station is the average of the three directions of north, east, and height. Are 12.3 mm, 10.9 mm, and 36.1 mm; b) In terms of the ambiguity epoch fixation rate, the ambiguity epoch fixation rate of all stations is equivalent, all above 98%, and the average fixation rate is 98.63%. In addition, a multi-system dynamic PPP-RTK positioning experiment was carried out, and the VRS positioning result provided by Qianxun SI was used as a reference. The results show that when the satellite communication is better, the dynamic PPP-RTK ambiguity epoch fixed rate is equivalent to that of the static state, and the fixed rate can still reach more than 80% even in the presence of occlusion. It can be concluded that multi-system dynamic PPP-

RTK can provide positioning services with the same accuracy as VRS, and has high reliability.

In the finality, the problems requiring further studies are discussed.

Key Words: GNSS, PPP-RTK, ambiguity resolution, data receiving and memory management platform, orbit and clock accuracy evaluation, regional atmospheric delay product, Fix Rate

目录

摘要.....	I
目录.....	VI
第 1 章 引言.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 RTK 研究现状	4
1.2.2 PPP 研究现状	5
1.2.3 PPP-RTK 研究现状	7
1.3 本文研究目标及内容.....	8
1.3.1 研究目标.....	8
1.3.2 研究内容.....	9
1.4 本章小结.....	10
第 2 章 PPP-RTK 定位理论	11
2.1.1 PPP-RTK 观测方程	11
2.1.2 PPP-RTK 随机模型	12
2.1.3 参数估计.....	13
2.2 PPP-RTK 主要误差处理	17
2.2.1 与 GNSS 卫星有关的误差.....	17
2.2.2 与 GNSS 卫星信号传播路径有关的误差.....	19
2.2.3 与 GNSS 接收机端有关的误差.....	20
2.3 数据预处理与质量控制.....	21
2.3.1 伪距粗差探测.....	21
2.3.2 相位观测值周跳探测.....	22
2.4 本章小结.....	24
第 3 章 PPP-RTK 整周模糊度固定关键技术	25
3.1 基于 UPD 估计的 PPP-RTK 模糊度固定方法.....	25
3.2 LAMBDA 算法概述	28

3.3 模糊度固定检核.....	29
3.3.1 ADOP 值	29
3.3.2 Bootstrapping 成功率.....	29
3.3.3 Ratio-test.....	30
3.4 部分模糊度子集的选取.....	30
3.4.1 高度角优先固定法.....	31
3.4.2 ADOP 优先固定法	31
3.4.3 原始模糊度精度优先固定法.....	32
3.4.4 模糊度线性组合精度优先固定法.....	32
3.5 本章小结.....	33
第 4 章 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台	34
4.1 概述.....	34
4.1.1 RTCM 格式和 NTRIP 协议	34
4.1.2 多系统实时数据和产品.....	36
4.1.3 共享内存.....	39
4.2 平台设计.....	40
4.2.1 内存管理.....	41
4.2.2 数据接收.....	41
4.3 平台实现.....	43
4.3.1 PPP-RTK 服务端	43
4.3.2 PPP-RTK 用户端	45
4.4 本章小结.....	46
第 5 章 多系统实时精密轨道钟差恢复及精度分析.....	47
5.1 多系统实时精密轨道钟差恢复.....	48
5.1.1 实时轨道恢复.....	48
5.1.2 实时钟差恢复.....	49
5.2 多系统实时精密轨道钟差精度分析.....	49
5.2.1 GPS/GALILEO/BDS 实时轨道	50
5.2.2 GPS/GALILEO/BDS 实时钟差	51
5.3 本章小结.....	52

第 6 章 PPP-RTK 定位及精度分析	53
6.1 数据及产品使用情况	53
6.1.1 实时精密卫星轨道和钟差	53
6.1.2 UPD 产品和 DCB 产品	53
6.1.3 大气延迟产品	55
6.1.4 测站数据	56
6.2 仿动态 PPP-RTK 定位性能分析	57
6.2.1 定位精度	57
6.2.2 模糊度首历元固定比例	61
6.2.3 模糊度历元固定率	61
6.3 动态 PPP-RTK 定位性能分析	62
6.3.1 定位实验一	62
6.3.2 定位实验二	65
6.4 本章小结	68
第 7 章 总结与展望	69
7.1 工作总结	69
7.2 进一步工作的方向	70
参考文献	72
致谢	76
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	77

第 1 章 引言

1.1 研究背景及意义

全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，简称 GNSS）是可以为全球用户提供三维、实时、连续和高精度的定位、导航和授时服务（Positioning, Navigation and Timing，简称 PNT）的导航系统^[1-2]。核心系统包括美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 GALILEO 和中国 BDS。

GNSS 有绝对定位和相对定位两种定位方法^[2]。绝对定位只需要单接收机便可实现，操作简单，独立灵活。GPS 最开始只能利用伪距观测值进行单点定位，称为标准单点定位（Standard Point Positioning，SPP），但是由于伪距观测值的观测噪声较大以及其他误差的存在，导致 SPP 的定位精度较低（几十米甚至上百米），无法满足大地测量高精度定位的需求。

为了获取更高精度的卫星定位结果，相对定位技术被提出：至少需要两台以上的接收机，采用差分的方式消除大部分误差后得到高精度定位结果^[3]。相对定位分为伪距和相位差分定位，伪距差分定位由于观测值精度较低，导致定位精度仍然较低；相位差分定位采用高精度的载波相位观测值，作双差之后固定模糊度，能达到厘米级甚至毫米级的动态定位（Real-time kinematic，RTK）和静态定位精度。随着定位需求的变化以及技术的发展，为了增加参考站的作用距离，广域差分定位和网络 RTK（Network RTK，NRTK）技术被提出^[4]，在参考站网中，实时估计 GNSS 各类误差，并以改正数或者虚拟观测量的形式提供给用户，使其实现实时高精度定位。但是 NRTK 技术仍然需要一定数量的地面参考站，且相对定位模式对观测值要求也较高。除此之外，参考站和流动站之间还需要实时通讯，导致通讯负担重。

为了解决相对定位中存在的问题，学者们又把目光转向了绝对定位，Zumberge 等学者于 1997 年提出了基于载波相位观测量的精密单点定位（Precise Point Positioning，PPP）^[5]。与 SPP 相比，PPP 除了使用精度更高的载波相位观测值之外，还充分考虑了 SPP 中的各种误差，通过采用精密星历、建立精确的误差改正模型等方法，将定位精度提升到了分米级（动态 PPP）甚至厘米级（静态 PPP）。最开始，由于 PPP 技术所需的精密产品有延迟，使得 PPP 技术并不具备 NRTK 技术的实时性。为了满足 PPP 用户的实时定位需求，自 2000 年以来，IGS 开始逐步对外提供实时服务，并于 2013 年对外提供实时轨道和钟差改正数，用户可用其进行实时 PPP 定位得到高精度定位解。但是相对于 NRTK 技术，实时

PPP 需要较长时间（30-60min）才能得到符合精度要求的定位解，这成为了 PPP 技术在实时领域应用和发展的最大障碍。PPP 定位效率和精度不高，主要是由于卫星和接收机的伪距硬件延迟和相位硬件延迟线性组合而成的小数部分偏差（Fractional Cycle Bias, FCB）被模糊度吸收，导致模糊度的整数特性被破坏，使得模糊度难以固定。即使不进行模糊度固定，由于电离层延迟和对流层延迟等误差的影响，使得 PPP 收敛所需时间较长，定位效率低，且收敛之后 FCB 仍存在，会降低坐标及其他参数的精度^[3]。

随着 GNSS 的发展，各国家和大量商业公司在全球范围内大量布设的连续运行参考站（Continuously Operating Reference Stations, CORS）网，为 GNSS 技术的发展与进步提供了丰富的数据资源。按布设范围以及参考站之间距离的不同，可将 GNSS 参考网分为全球网、广域网和局域网三种类型^[6]。通过处理 GNSS 参考网所获取的观测数据，可得到卫星轨道钟差、大气延迟等多种改正信息，用以实现高精度定位。不同参考网所提供改正信息的数据格式和播发方式均不相同，可用于不同类型的定位模式。

由于全球网（广域网）布设范围广，连续观测站的分布间距大，估计得到的大气延迟精度较低，不能用于高精度定位的改正^[6]。因此，全球网（广域网）产品仅提供包括卫星轨道、钟差改正数和伪距相位偏差在内的改正信息。全球网（广域网）播发的改正信息一般由状态空间表示（State Space Representation, SSR）。这导致了基于这些产品的实时 PPP 收敛时间较长，定位精度也较差，使得 PPP 技术在实时领域的应用依然受限。

而局域网由于布设的地理范围有限，测站分布比较稠密，可以对大气延迟进行精确建模并生成相应的改正产品。与全球网（广域网）提供的改正产品 SSR 相比，局域网的改正产品中还包含了电离层延迟和对流层延迟的改正信息，基于这些改正信息，流动站可采用基于局域网的 NRTK 技术，快速固定整周模糊度，获取高精度位置信息，定位精度和定位效率均明显优于 PPP。但是 RTK 技术中存在的不足依然没有解决。

针对 PPP 技术和 NRTK 技术中存在的问题，Wubben 在 2005 年提出 PPP-RTK 的概念^[7]，此技术利用局域网所获取的观测数据，精化求解全球网提供的卫星轨道和钟差、伪距和相位偏差等，同时求解电离层和对流层延迟等参数，生成 SSR 产品，通过卫星播发给用户端使用^[8]。用户端使用接收到的产品，实现快速模糊度固定，实现全球或区域的实时高精度精密单点定位，得到高精度定位解。PPP-RTK 技术充分融合了 PPP 和 NRTK 各自的优势：一是实现了基于 PPP 模式的快速高精度定位（即 PPP 模糊度快速固定）；二是相对于 NRTK，拓展了服务范围，使得定位方式更加灵活，同时，还降低了通讯负担。PPP-RTK 定位技术是

目前相关研究的热点。大量建设的 CORS 网也为 PPP-RTK 技术的应用及推广提供了良好的物质基础。

图 1-1 是中国工程院刘经南院士归纳总结的 GNSS 定位模式的发展历程，从图中可以看出，不同时期用户对导航定位精度和定位效率的追求，催生出了各种 GNSS 定位技术，不同的定位技术所追求的共同目标就是高精度高效率的定位。

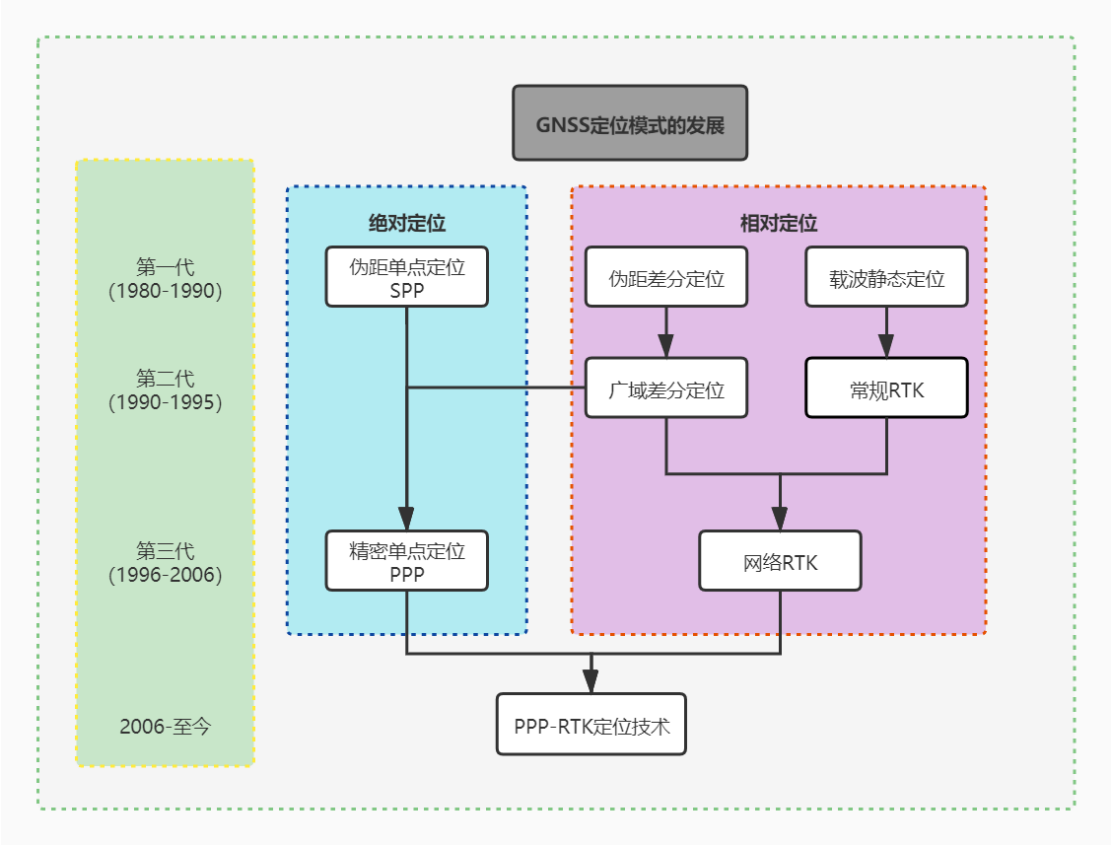


图 1-1 GNSS 定位模式的发展

自 Wubben 在 2005 年提出 PPP-RTK 的基本概念以来，PPP-RTK 技术在理论方面已经有了很大的发展，有多种 PPP-RTK 定位方法被先后提出并论证^[9]。但是目前相关研究大都停留在理论层面，已经实现的大都是事后处理或者伪实时处理，并没有将 PPP-RTK 应用于实时的实际工作和生产中。在 PPP-RTK 理论的基础上，使用实时轨道、钟差、相位偏差、大气延迟等产品，进行实时模糊度固定，实现实时快速多系统精密单点定位的相关研究并不多见。

另外，随着我国 BDS、欧洲 Galileo 的建成及投入使用，美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS 的不断完善发展，多系统组合成为研究热点。目前北斗系统已经全面建成，具备服务全球的能力，将 BDS-3 用于高精度定位的情况还很鲜见^[8]。

将 BDS-3 和 GALILEO 用于实现 PPP-RTK 定位，对将多系统 PPP-RTK 定位推向实际应用具有一定的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 RTK 研究现状

RTK 技术可以大幅削弱空间相关误差,消除共同误差,实时为用户提供厘米级的高精度定位服务。在 RTK 技术中,卫星轨道和钟差误差、卫星端和接收机端的硬件延迟偏差、大气延迟(电离层和对流层)以及其他各种误差可以通过二次差分消除,使得模糊度的整数特性得以保留并可以在短时间内固定,获取高精度定位结果。但是 RTK 技术存在局限性:作业距离有限、大范围作业需多次中间架站、误差随基线长度增大而累积、可靠性低及持续作业能力有限等。

随着 GNSS 定位技术、相关计算机技术的发展以及大量 CORS 网的不断建设,为了解决传统 RTK 技术存在的局限性,基于这些技术的 NRTK 技术被提出^[10]。NRTK 技术通过在一定区域范围内建设多个 CORS 站、实时数据处理中心和数据通信线路等基础设施,根据流动站发来的近似坐标为其解算生成差分改正信息,并通过移动网络通讯链路发送给流动用户,用户使用这些改正信息对观测值修正以获得精确定位结果^[11-12]。NRTK 相对于传统 RTK 而言,定位精度和可靠性都有了较大的提高,使得用户可以在大范围内实现快速高精度定位,定位结果的可靠性提升,且用户实现了真正的单机作业,提高了定位灵活性和持续作业能力,对作业环境的要求也进一步降低。而且不需要建立稠密的 CORS 网络,降低了成本,可以说 NRTK 技术代表了 GNSS 的一个重要发展方向。目前,NRTK 技术在 GNSS 实时高精度定位领域已经得到了广泛的应用^[13-15]。

但是 NRTK 存在两个典型的不足:首先,定位灵活性和观测值利用率与 PPP 技术相比较低,主要是因为流动站采用相对定位模式,需要参考站与流动站间的卫星共视、观测时间同步^[6],否则无法组成双差观测方程,导致流动站过分地依赖参考站的观测值。其次,对于虚拟参考站(Virtual Reference Station, VRS)技术而言,流动站需要向参考网数据处理中心提供近似位置,保持实时双向通讯,且由于受卫星钟差等分量的短期变化影响,参考站观测值的预报值精度不高,需采用较高的更新频率进行播发以保证其时效性,导致通讯负担较重。

除此之外,NRTK 仍然存在一定的距离限制,长距离 NRTK 受大气活跃程度影响较大,且建立覆盖大范围的 CORS 服务系统的总投资和运营成本相当高昂。因此 NRTK 未来的发展方向是发展长距离 NRTK^[16-18],以及随着各大卫星导航系统的建成,多系统集成的 NRTK 技术也会逐渐发展起来^[19]。

1.2.2 PPP 研究现状

经过国内外 20 余年的研究与发展，PPP 技术的定位理论、算法模型、数据处理、应用软件、实验结果分析及科学和工程应用等方面取得了丰富的成果，并逐渐趋于成熟^[20]。PPP 技术在地球科学与工程领域是非常有效的数据分析工具，如地壳变形监测、海洋潮汐测量和大气水汽监测等^[21]；实时动态 PPP 在自然灾害的早期预报和实时监测领域也有着巨大的应用前景。

近年来，随着 BDS 和 GALILEO 系统的快速建设与发展，PPP 技术的研究开始倾向于新兴卫星导航系统，由单 GPS 到多系统联合^[22-23]，主要解决各卫星导航系统间偏差^[24]、各频率观测值频间偏差的估计与建模，由模糊度浮点解到模糊度固定解^[25-27]，主要以如何固定非差模糊度为核心；从双频到单频再到多频^[28]，由组合 PPP 到非组合 PPP 等^[29]。随着 GNSS 导航定位用户对定位精度和效率的要求不断提高，以及近年来 GNSS 导航星座的不断现代化，加上我国 BDS 及欧盟 GALILEO 的快速发展完善，PPP 技术当前仍然是 GNSS 数据处理领域的研究热点^[30]，特别是 GPS、GLONASS、BDS 和 GALILEO 等多系统联合 PPP 的模糊度固定等其他研究及应用还较为有限，可以预见的是，多频多系统融合的快速高精度定位是 PPP 未来的发展趋势^[28,31-33]。

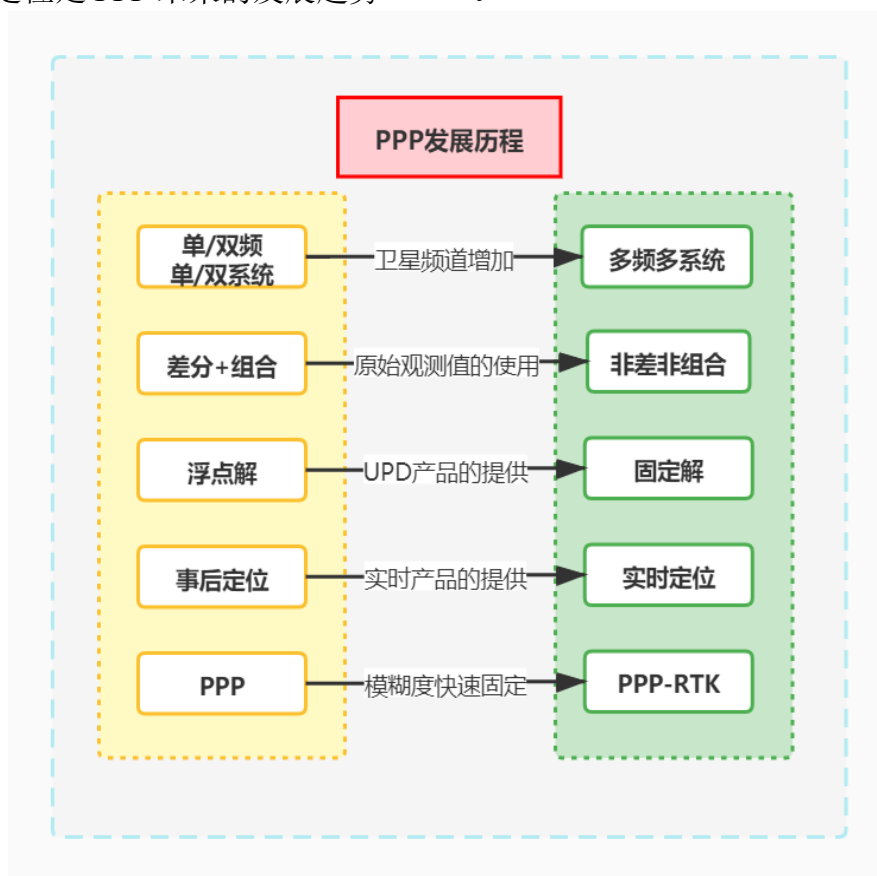


图 1-2 PPP 发展历程

由于事后 PPP 中使用的精密卫星轨道和钟差存在较大的时间延迟,难以满足实时应用的需求,因此 PPP 技术由事后处理向实时定位发展。IGS 于 2013 年正式推出了实时服务,经评估,其当时提供的 GPS 和 GLONASS 轨道精度分别为 48 mm 和 132 mm,钟差精度分别为 0.28 ns 和 0.82 ns^[34],有关学者还评估了使用 IGS 实时产品进行 PPP 定位的性能^[35]。另外,有关学者还对实时 PPP 中的各种误差处理、数据预处理、定位精度及性能等问题进行了研究^[36]。

然而,PPP 实时定位要想实现快速高精度定位仍然比较困难,主要原因是非校准相位延迟 (Uncalibrated Phase Bias, UPD) 被模糊度吸收,导致模糊度的整数特性被破坏,使得模糊度难以固定,阻碍了 PPP 定位精度和定位效率的进一步提高^[37]。因此,如何有效的分离出 UPD,并生成高精度 UPD 产品供用户使用,使用户实现模糊度快速准确固定,是提高 PPP 定位性能的重要基础。有学者对 FCB 偏差的特性进行了研究^[37],并尝试通过改正卫星端宽巷和窄巷的 FCB,来实现星间单差模糊度的固定^[38]。2008 年,Ge 等学者引入 UPD 这一概念,采用星间单差模型,其主体思路为:估计卫星端星间单差 UPD,实现 PPP 星间单差模糊度固定,提高了 PPP 定位精度^[39]。与星间单差模型不同,有学者提出了整数钟 (Integer Recovery Clock, IRC) PPP 模糊度固定方法^[40],其主体思路为:宽巷 UPD 正常估计,将窄巷 UPD 与卫星钟差合并,生成包含卫星端 UPD 的卫星钟差产品,将宽巷 UPD 产品与新的钟差产品提供给用户实现 PPP 快速模糊度固定。基于整数钟方法,又有学者提出了钟差去耦 PPP 模糊度固定方法^[41],其主体思路为:伪距和相位观测方程分别使用不同的卫星钟差,即有两套卫星钟差产品,其中相位钟差包含了卫星端 UPD,不单独估计 UPD,使用包含 UPD 的钟差即可达到改正 UPD 的效果,实现 PPP 快速模糊度固定。Geng 等学者证明了以上三种方法的等价性^[42]。也有学者对上述模型进行了相应的改进和扩展,对 PPP 宽巷模糊度的固定质量进行检核,并针对窄巷模糊度难以固定导致很难实现全模糊度固定的问题,提出了部分模糊度固定方法,提高了 PPP 模糊度固定成功率,从而提高定位精度^[20]。

与 NRTK 技术相比,实时 PPP 技术作业范围广、作业环境要求低以及运营成本低。实时 PPP 技术虽具有高精度和灵活性,但是,从目前已经实现的实时 PPP 系统来看,限制实时 PPP 技术应用的瓶颈依然存在^[37]。进行 UPD 改正之后,恢复了模糊度的整数特性,但是,由于受到电离层和对流层延迟等各种误差影响,实时 PPP 的初始化时间较长,往往需要经过较长的时间才能收敛到较高的精度,且定位结果的精度与可靠性均不及 NRTK,不能满足用户快速高精度定位的需求,这大大限制了其在实时领域的应用^[43]。

1.2.3 PPP-RTK 研究现状

由于 NRTK 技术和实时 PPP 技术均有局限性,使得它们在实时动态定位领域的应用都有限制。但是它们各自的优势又适用于不同的领域,且处于独立发展的状态,如何把这两种技术的优势融合,使得用户能够同时获得这两种技术服务,是 GNSS 定位领域的热点研究问题。

为此,PPP-RTK 的概念被提出,其基本思想就是融合 PPP 和 NRTK 两种技术的优势,服务端利用局域网所提供的观测数据,精化求解全球网提供的卫星轨道和钟差、伪距和相位偏差等,同时求解电离层和对流层延迟等参数,生成 SSR 产品,通过卫星播发给用户端使用。用户端使用服务端提供的产品,实现快速模糊度固定,得到高精度定位解。在改正信息的播发频率方面,根据其时间稳定性,可以制定针对各改正信息的最优播发频率,例如,对于短期内变化较为显著改正信息(卫星钟差改正数),其播发频率可以相对较高一些(5s);而对于变化较为平稳的改正信息(卫星轨道改正数和伪距相位偏差),则可以降低其播发频率(15min)。用户端使用接收到的实时轨道、钟差改正数、伪距相位偏差、高精度非差对流层延迟以及电离层延迟,对观测数据进行改正,以恢复非差模糊度的整数特性并加以固定,以实现快速的 PPP 初始化。从而实现了基于 PPP 模式的 PPP-RTK 定位技术,与仅采用 UPD 产品进行 PPP 模糊度固定相比,PPP-RTK 在高精度区域大气延迟产品的约束下,能够实现模糊度快速准确的固定,使得定位精度和定位效率均大幅提升;与 NRTK 技术相比,PPP-RTK 的定位精度和效率相当,但定位方式更加灵活,扩大了作业范围的同时也降低了作业成本,且服务端的信息播发量也大幅减少^[44]。

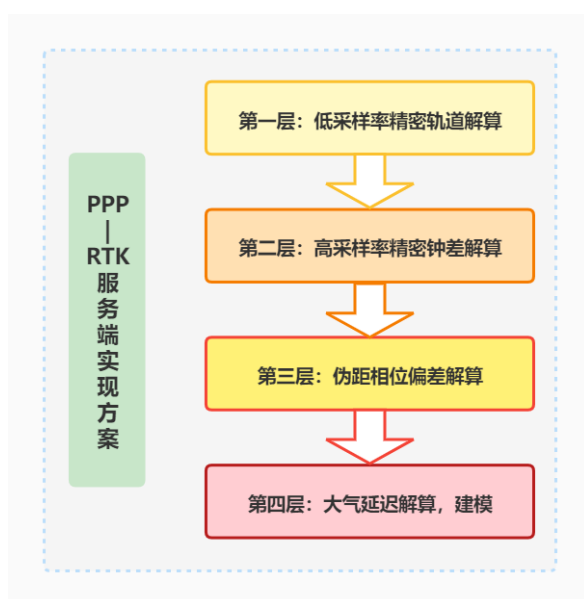


图 1-3 PPP-RTK 服务端实现方案

由上述可知,实现 PPP-RTK 技术的关键在于能够恢复相位观测值模糊度整数特性的卫星相位偏差的估计,以及能够加快模糊度固定的区域实时高精度大气延迟产品^[45-46]。

目前全球各分析中心播发的实时伪距相位偏差(DCB, UPD)有基于宽窄巷和各频点的^[20],这为 PPP-RTK 用户端观测方程的建立提供了多种方法^[47-48]。各大卫星导航商业公司也纷纷建立了自己的区域参考网,用于解算高精度区域大气延迟产品,比如国外的天宝,国内的千寻位置、华测导航等。还有日本的 CLAS 已经能够对外提供 PPP-RTK 服务。PPP-RTK 用户端的实现可总结为:基于 PPP 模型,使用 DCB 和 UPD 产品分别对伪距和相位观测方程进行改正,以恢复模糊度的整数特性,将电离层延迟和对流层延迟当成未知参数进行估计,同时以区域高精度大气延迟产品作为先验信息对电离层延迟和对流层延迟参数进行合适约束,以实现模糊度的快速固定。有学者实现了基于星间单差 PPP 模型的 PPP-RTK 定位^[9];有学者实现了基于非差非组合 PPP 模型的 PPP-RTK 定位^[49-50];有学者实现了单频 PPP-RTK^[6];还有学者已经建立多系统 PPP-RTK 的定位系统^[51]。

但是,大部分学者的研究重点大多在 PPP-RTK 服务端 UPD 的解算以及用户端模糊度固定上,对于区域大气延迟产品对 PPP-RTK 用户端定位的提高缺乏深入的研究。同时,在我国的 BDS 和欧洲 GALILEO 日趋成熟的环境下,基于 BDS 的多系统 PPP-RTK 研究还比较少见。

1.3 本文研究目标及内容

1.3.1 研究目标

通过对国内外相关文献的研究和分析,学习和掌握 PPP-RTK 定位理论和方法,对相应的定位理论进行数学模型推导;对 PPP-RTK 整周模糊度固定关键技术进行研究;搭建 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台,实现 PPP-RTK 服务端和用户端各板块之间的实时数据交互和内存管理;并对 CNES 播发的多系统实时轨道钟差改正数的精度和可用性进行评估分析;最后,开发 PPP-RTK 用户端定位程序,使用实测数据进行多系统 PPP-RTK 仿动态和动态定位实验,并对定位结果进行精度评估,深入分析影响 PPP-RTK 定位性能的关键因素,为理论验证和应用提供技术平台。将 BDS-3 和 GALILEO 用于 PPP-RTK 定位技术中,为包含 BDS-3 在内的多系统实时精密定位的相关研究和应用提供理论和研究参考。

本文的研究目标如下:

- (1) 开发一套实时数据流接收与内存管理平台,实现 PPP-RTK 服务端和用户

端各板块之间的实时数据交互与管理;

(2) 对包括 BDS-3 及 BDS-2 卫星在内的多系统实时轨道钟差改正数进行精度评估, 并将其用于 GPS/BDS/GALILEO 三系统 PPP-RTK 定位;

(3) 编写 PPP-RTK 用户端定位程序。使用 CNES 提供的 GPS/BDS/GALILEO 三系统实时精密轨道钟差产品, 上海天文台提供的实时 UPD 产品、DCB 产品和高精度区域大气延迟产品, 进行 PPP-RTK 仿动态和动态定位解算, 实现 10s 内模糊度正确固定, 并在 E、N、U 三个方向的精度达到 1.5cm、1.5cm、5.0cm 以内。

1.3.2 研究内容

围绕上述研究目标, 开展详细的研究, 具体研究内容如下:

- (1) PPP-RTK 定位理论的研究;
- (2) GPS/BDS/GAL 三系统实时观测数据预处理;
- (3) 多系统 PPP-RTK 定位端实时模糊度固定的研究;
- (4) PPP-RTK 数据接收与内存管理平台的搭建;
- (5) CNES 实时播发的 GPS/BDS/GAL 三系统 SSR 精度评估;
- (6) 多系统 PPP-RTK 仿动态和动态定位结果精度的评估;

本文的章节安排及主要内容如下:

第一章 引言。阐述了本文的相关研究背景及意义, 总结了 RTK 技术、PPP 技术以及 PPP-RTK 技术的国内外研究现状以及当前存在的不足, 由此推出本文的研究目标与研究内容。

第二章 PPP-RTK 定位理论。首先, 简单推导了 PPP-RTK 定位端的观测方程, 给出了待估参数之间的关系, 确定了 PPP-RTK 定位端所用的随机模型和推导了参数估计方法; 归纳总结了 PPP-RTK 定位过程中的主要误差, 并给出了各种误差相应的改正模型和处理方法。最后, 介绍了 PPP-RTK 定位中数据预处理与质量控制方法。

第三章 PPP-RTK 整周模糊度固定关键技术。着重推导了基于 UPD 估计的 PPP-RTK 模糊度固定方法, 包括 PPP-RTK 服务端和用户端的具体实现算法; 学习研究了在模糊度固定中扮演者重要角色的 LAMBDA 算法; 介绍了 ADOP、Bootstrapping 成功率和 Ratio-test 三种模糊度固定检核方法; 针对无法进行全部模糊度固定的情况, 给出了进行部分模糊度固定时模糊度子集的选取方法。

第四章 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台。首先介绍了 IGS 实时工作组定义的实时数据和产品的数据格式、实时数据流的传输协议和标准, 即 RTCM 格式和 NTRIP 协议, 多系统实时数据和产品的编码标准; 其次, 介绍对比了目前

常用的进程间通信方式，选择共享内存作为 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台的各模块之间的数据交互方式，以及基于 ACE 共享库实现共享内存的方法；此外，介绍了平台的设计方案，即数据接收和内存管理两部分；最后，介绍了基于此平台的 PPP-RTK 服务端和用户端实现方案。

第五章 多系统实时精密轨道钟差恢复及精度分析。首先简单介绍了多系统实时精密轨道钟差的恢复方法，以及各系统 SSR 与广播星历的匹配方法（尤其是 BDS）；使用 GFZ 提供的事后精密轨道钟差，评估了 CNES 提供的多系统实时轨道钟差改正数的精度。

第六章 PPP-RTK 定位及精度分析。首先，介绍了基于共享内存的 PPP-RTK 实时数据处理方案；介绍了 PPP-RTK 定位端所用到的实时精密轨道钟差产品、UPD 产品、DCB 产品、大气延迟产品以及测站数据；使用上述的数据和产品，分别进行多系统 PPP-RTK 仿动态和动态定位解算，并对其定位性能进行分析。

第七章 总结与展望。总结本文的主要工作和研究成果，并针对当前尚未解决的问题和存在的不足，对下一步的研究工作和方向进行了安排和展望。

1.4 本章小结

本章简要阐述了本文的研究背景及意义，分析了 RTK 技术、PPP 技术和 PPP-RTK 技术的国内外研究现状，总结了 PPP-RTK 定位技术的发展历程，指出了现阶段 PPP-RTK 定位技术在研究和应用道路上需要解决的一些关键问题，确定了本文的研究目标和研究内容。

第2章 PPP-RTK 定位理论

PPP-RTK 定位依靠精密卫星轨道和钟差、伪距和相位偏差改正数、电离层和对流层改正数等产品，对 GNSS 观测值中重要的误差进行模型改正和参数估计，以此快速得到高精度的定位结果。本章将系统的论述 PPP-RTK 定位中的函数模型、主要误差处理、数据预处理以及质量控制方法，为后续章节奠定基础。

2.1 PPP-RTK 定位模型

2.1.1 PPP-RTK 观测方程

根据 GNSS 测码伪距 P 和载波相位 L 两种观测量与相应待估参数之间的关系，构建 GNSS 基本观测方程。由于 PPP-RTK 将电离层延迟作为未知参数估计，导出 PPP-RTK 定位的非差非组合函数模型。

$$L_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + Mw_r^s \cdot ZWD_r - \gamma_i I_{r,1}^s + \lambda_i (N_{r,i}^s + B_{r,i} - B_i^s) + \varepsilon_{r,i}^s \quad (2.1)$$

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + Mw_r^s \cdot ZWD_r + \gamma_i I_{r,1}^s + b_{r,i} - b_i^s + e_{r,i}^s \quad (2.2)$$

式中， r 是测站标识， i 是频点标识， s 是卫星标识； c 表示光速； ρ_r^s 表示卫星到测站的几何距离； dt_r 和 dt^s 分别表示接收机钟差和卫星钟差； ZWD_r 表示测站的天顶对流层湿延迟， Mw_r^s 是与卫星高度角有关的湿投影函数； $I_{r,i}^s$ 表示频点 f_i 的倾斜路径电离层延迟； γ_i 是频率相关的电离层延迟放大因子（ $\gamma_i = (f_1/f_i)^2$ ）； λ_i 为频点 f_i 的载波波长； $N_{r,i}^s$ 为频点 f_i 的整周模糊度； $B_{r,i}$ 和 B_i^s 分别表示频点 i 的接收机端和卫星端相位硬件延迟； $b_{r,i}$ 和 b_i^s 分别表示频点 i 的接收机端和卫星端伪距硬件延迟； $\varepsilon_{r,i}^s$ 和 $e_{r,i}^s$ 分别表示载波相位和伪距的测量误差，卫星轨道误差已通过 SSR 产品进行改正。此外，GNSS 观测方程中，天线相位中心偏移和变化、相对论效应、固体潮、海潮等误差项，均已通过模型精确改正。

通常采用星间单差的方式，消除接收机端的钟差和硬件延迟。

$$\Delta L_{r,i}^{ps} = L_{r,i}^p - L_{r,i}^s = \Delta \rho_r^{ps} + cdt^{ps} + Mw_r^{ps} \cdot ZWD_r - \gamma_i I_{r,1}^{ps} + \lambda_i N_{r,i}^{ps} + \lambda_i B_i^{ps} + \varepsilon_{r,i}^{ps} \quad (2.3)$$

$$\Delta P_{r,i}^{ps} = P_{r,i}^p - P_{r,i}^s = \Delta \rho_r^{ps} + cdt^{ps} + Mw_r^{ps} \cdot ZWD_r + \gamma_i I_{r,1}^{ps} + b_i^{ps} + e_{r,i}^{ps} \quad (2.4)$$

PPP-RTK 技术的基本思想就是：服务端求解一定形式的改正数，包括轨道改正数、钟差改正数、卫星端的伪距和相位硬件偏差改正数、对流层改正数、电离层改正数；发送给用户端，用户端使用这些改正数实现模糊度的快速固定，得到高精度定位解。

在进行定位时，由于无法区分卫星端伪距硬件延迟与真实钟差、相位硬件延迟与真实钟差，引入 PPP-RTK 服务端提供的高精度卫星钟差改正数、卫星端的伪距和相位硬件偏差改正数，将式 (2.3) 和式 (2.4) 线性化，得：

$$\Delta l_{r,i}^{ps} = u_r^{ps} \cdot x + Mw_r^{ps} \cdot ZWD_r - \gamma_i I_{r,1}^{ps} + \lambda_i N_{r,i}^{ps} + \varepsilon_{r,i}^{ps} \quad (2.5)$$

$$\Delta p_{r,i}^{ps} = u_r^{ps} \cdot x + Mw_r^{ps} \cdot ZWD_r + \gamma_i I_{r,1}^{ps} + e_{r,i}^{ps} \quad (2.6)$$

式中， $\Delta l_{r,i}^{ps}$ 和 $\Delta p_{r,i}^{ps}$ 分别代表星间单差载波相位和伪距观测量减去计算量； u_r^{ps} 为方向余弦； x 为三维坐标增量。

根据式 (2.5) 和式 (2.6) 可建立双频星间单差非组合 PPP-RTK 观测方程，该方程得待估参数向量为：

$$X = [x, ZWD_r, I_{r,1}^{ps}, N_{r,1}^{ps}, N_{r,2}^{ps}]^T \quad (2.7)$$

待估参数包含五类：接收机的三维坐标增量、测站天顶对流层湿延迟、频点 f_1 的倾斜路径电离层延迟、频点 f_1 和 f_2 上的载波相位模糊度。对流层和电离层参数采用附加约束方式，组成附加约束方程。当某测站连续观测到 m 颗卫星时，设置截止高度角以及各卫星系统选择参考星之后还剩 n 颗卫星，对应的星间单差观测方程个数为 $4n$ ，附加约束方程个数为 $n + 1$ (n 个星间单差倾斜路径电离层延迟约束方程和 1 个测站天顶对流层湿延迟约束方程)，总方程个数为 $5n + 1$ ，总待估参数为 $4 + 3n$ ，观测自由度为 $2n - 3$ ，则至少需要 2 颗满足条件的可观测卫星（选完参考星之后），才能实现 PPP-RTK 定位解算。

2.1.2 PPP-RTK 随机模型

随机模型是根据随机变量而建立的模型。PPP 数据处理中常用的随机模型有基于卫星高度角和基于接收机信噪比等。

(1) 基于卫星高度角而确定的随机模型

将观测值噪声 σ 表示为卫星高度角 E 的函数：

$$\sigma^2 = f(E) \quad (2.8)$$

不同的高度角函数 f ，对应着不同的随机模型，其中应用最广泛的高度角函数是指数函数和正余弦函数。

指数函数模型的^[52]计算公式如下：

$$\sigma = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-E}{E_0}\right) \quad (2.9)$$

式中, a_0 、 a_1 和 E_0 均为常数; E 为卫星高度角。

国际上知名的大地测量数据处理软件 Bernese (式 2.10)、GAMIT (式 2.11)、PANDA (式 2.12) 和 EPOS 均采用正余弦函数模型:

$$\sigma^2 = a^2 + b^2 \cos^2 E \quad (2.10)$$

$$\sigma^2 = a^2 + b^2 / \sin^2 E \quad (2.11)$$

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

式中, E 为卫星高度角, a 和 b 为常数。对于相位观测值定权时, a 和 b 均取 0.003m, 伪距观测值定权时, a 和 b 均取 0.3m。

(2) 基于信噪比而确定的随机模型

Brunner 等根据接收机信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 建立了相位观测值的随机模型:

$$\sigma^2 = C_i \cdot 10^{-\frac{S}{10}} = B_i \left(\frac{\lambda_i}{2\pi}\right)^2 \cdot 10^{-\frac{S}{10}} \quad (2.13)$$

式中, C_i 为常数, 取 $C_1 = 0.00224 \text{m}^2 \text{Hz}$, $C_2 = 0.00077 \text{m}^2 \text{Hz}$ 。 B_i 表示相位跟踪环带宽 (Hz), S 为观测值的信噪比, λ_i 为该频点的波长。国内的其他学者在这个模型的基础上, 对其进行了简化和改进。

(3) 本文采用的随机模型

本文采用的是基于卫星高度角的随机模型, 计算公式如下:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 / (0.5 + 0.5 / \sin(E))^2 \quad (2.14)$$

式中, σ_0 为观测噪声的标准差; E 为卫星高度角。

2.1.3 参数估计

(1) 滤波模型

在 PPP 定位解算中, 常用的参数估计方法是最小二乘法和 Kalman 滤波。如果直接使用最小二乘法进行参数估计, 会出现高阶矩阵求逆困难、大量占用计算机资源、运算效率低下等问题, 所以通常采用递归最小二乘或序贯最小二乘估计方法。Kalman 滤波利用上一历元的状态参数估值及其协方差阵, 再根据当前历元的观测值建立方程, 得到当前的状态估值。Kalman 滤波只需存储上一历元的信息, 所需内存小、运算效率较高, 因此被广泛运用于参数估计中。

Kalman 滤波的状态方程和观测方程可表示为 (假定所有观测值之间和噪声之间相互独立, 且过程噪声和观测噪声均为零均值高斯白噪声):

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{K,k-1}X_{k-1} + \omega_k, & \omega_k \sim N(0, Q_k) \\ L_k = H_K X_k + v_k, & v_k \sim N(0, R_k) \end{cases} \quad (2.15)$$

式中, ω_k 为过程噪声向量, Q_k 为 ω_k 的方差阵 (对称非负定阵), $\Phi_{K,k-1}$ 是 $t(k-1)$ 时刻到 $t(k)$ 时刻的状态转移矩阵, X_{k-1} 是 $t(k-1)$ 时刻的状态向量, X_k 是 $t(k)$ 时刻的状态向量; L_k 是 $t(k)$ 时刻的观测向量, H_K 为其设计矩阵, v_k 为观测噪声向量, R_k 为 v_k 的方差阵 (对称正定阵)。

双频 PPP-RTK 定位中的需要估计的参数包含五类: 接收机的三维位置坐标、测站天顶对流层湿延迟、频点 f_1 和频点 f_2 的倾斜路径电离层延迟、频点 f_1 和 f_2 上的载波相位模糊度。给定状态向量的初始值 $X_0 = \hat{X}_0$ 及其方差 P_0 , 由扩展 Kalman 滤波的可递推得到 $t(k)$ 时刻的状态向量 $\hat{X}_k$:

1) 计算状态向量及其协方差阵的预测

$$\begin{cases} X_{k,k-1} = \Phi_{K,k-1}\hat{X}_{k-1} \\ P_{k,k-1} = \Phi_{K,k-1}P_{k-1}\Phi_{K,k-1}^T + Q_{k-1} \end{cases} \quad (2.16)$$

2) 计算增益矩阵

$$K_k = P_{k,k-1}H_K^T(H_K P_{k,k-1}H_K^T + R_k)^{-1} \quad (2.17)$$

3) 状态向量及其协方差阵更新

$$\begin{cases} \hat{X}_k = X_{k,k-1} + K_k(L_k - H_K X_{k,k-1}) \\ P_k = (I - K_k H_K)P_{k,k-1} \end{cases} \quad (2.18)$$

式中, I 为单位阵。在实际计算中, 为了减小计算舍入误差, 保证 P_k 的对称正定性, 一般将 P_k 的计算形式改为:

$$P_k = (I - K_k H_K)P_{k,k-1}(I - K_k H_K)^T + K_k R_k K_k^T \quad (2.19)$$

从 (式 2.16、2.17、2.18、2.19) 可知, Kalman 滤波的本质其实是一个不断预测和更新的过程, 通过融合当前历元的观测值和上一历元的状态信息, 以此得到当前状态向量的最佳估值。其流程图如下图所示:

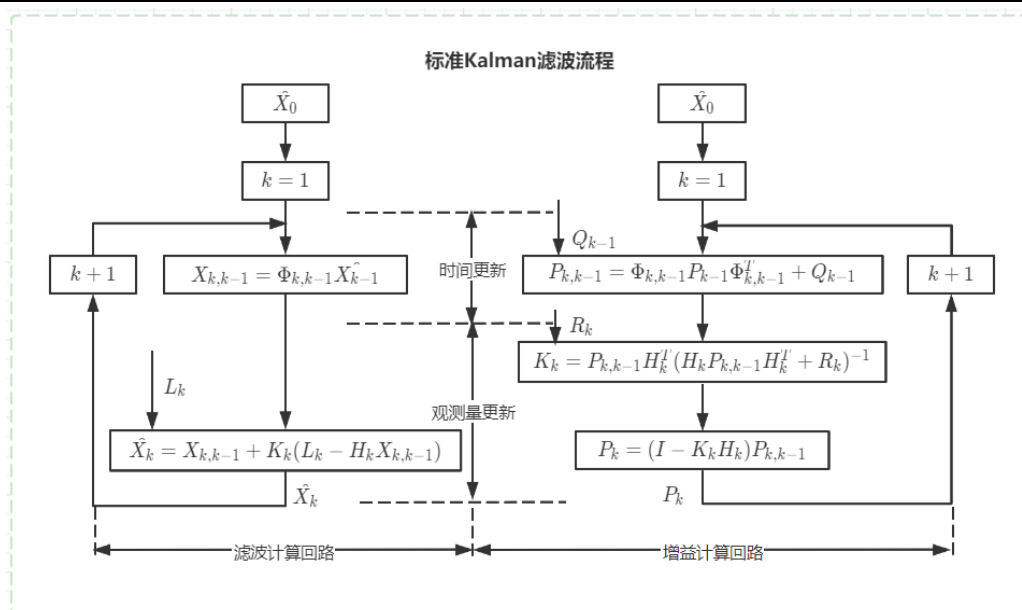


图 2-1 标准 Kalman 滤波流程图

(2) 观测模型

以双频 PPP-RTK 为例，假如某一时刻共观测到 d 颗卫星，筛选完参考卫星之后，还剩 m 颗可用卫星，则可建立 $4m$ 个观测方程和 $m+1$ 个附加约束方程，其误差方程为：

$$\underset{(5m+1) \times 1}{\underline{v}} = \underset{(5m+1) \times n}{\underline{H}} \cdot \underset{n \times 1}{\underline{X}} - \underset{(5m+1) \times 1}{\underline{l}} \quad (2.20)$$

式中， $\underline{v}$ 为观测值残差向量； $\underline{H}$ 为系数矩阵； $\underline{X}$ 为状态向量； $\underline{l}$ 为观测值减去计算量；状态向量 $\underline{X}$ 包含五类：接收机的三维坐标增量、测站的天顶对流层湿延迟、频点 f_1 的倾斜路径电离层延迟、频点 f_1 和 f_2 上的载波相位模糊度。

系数阵 $\underline{H}$ 可表示为：

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} \partial f_{(x,p_1^{c1})}^1 / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,l_1^{c1})}^1 / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,p_2^{c1})}^1 / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,l_2^{c1})}^1 / \partial \underline{X} \\ \vdots \\ \partial f_{(x,p_1^{cm})}^m / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,l_1^{cm})}^m / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,p_2^{cm})}^m / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,l_2^{cm})}^m / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,ZWD)} / \partial \underline{X} \\ \partial f_{(x,l_{r,1}^{c1})}^1 / \partial \underline{X} \\ \vdots \\ \partial f_{(x,l_{r,1}^{cm})}^m / \partial \underline{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^{c1} & b^{c1} & e^{c1} & Mw_r^{c1} & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a^{c1} & b^{c1} & e^{c1} & Mw_r^{c1} & -1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a^{c1} & b^{c1} & e^{c1} & Mw_r^{c1} & \gamma_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a^{c1} & b^{c1} & e^{c1} & Mw_r^{c1} & -\gamma_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a^{cm} & b^{cm} & e^{cm} & Mw_r^{cm} & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a^{cm} & b^{cm} & e^{cm} & Mw_r^{cm} & 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a^{cm} & b^{cm} & e^{cm} & Mw_r^{cm} & 0 & \cdots & \gamma_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a^{cm} & b^{cm} & e^{cm} & Mw_r^{cm} & 0 & \cdots & -\gamma_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$(2.21)$$

式中, a, b 和 e 表示卫地方向余弦。右上角标号 c 表示参考星的卫星号。

观测噪声 v_k 的方差阵 R_k 可根据基于卫星高度角的随机模型确定, 即:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} (\sigma_{p_1}^1)^2 & & & & & & & & & & \\ & (\sigma_{l_1}^1)^2 & & & & & & & & & \\ & & (\sigma_{p_2}^1)^2 & & & & & & & & \\ & & & (\sigma_{l_2}^1)^2 & & & & & & & \\ & & & & \ddots & & & & & & \\ & & & & & (\sigma_{p_1}^m)^2 & & & & & \\ & & & & & & (\sigma_{l_1}^m)^2 & & & & \\ & & & & & & & (\sigma_{p_2}^m)^2 & & & \\ & & & & & & & & (\sigma_{l_2}^m)^2 & & \\ & & & & & & & & & (\sigma_{ZWD})^2 & \\ & & & & & & & & & & (\sigma_{l_1}^1)^2 \\ & & & & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & & & & (\sigma_{l_1}^m)^2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

式中, σ_p 和 σ_l 分别代表伪距和相位观测值的噪声; σ_{ZWD} 代表对流层延迟产品的噪声; σ_I 代表电离层延迟产品的噪声。

(3) 状态模型

过程噪声 w_k 的方差阵 Q_k 可表示为:

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} (\sigma_X^2)_{3 \times 3} & & & \\ & (\sigma_{ZWD})^2 & & \\ & & (\sigma_{I_{r,1}}^2)_{m \times m} & \\ & & & (\sigma_{N_{r,1}}^2)_{m \times m} \\ & & & & (\sigma_{N_{r,2}}^2)_{m \times m} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

在 PPP-RTK 定位解算中，Kalman 滤波中所使用到的状态向量的初值、过程噪声的方差设置如下：静态坐标参数和相位模糊度参数均当作常数处理，静态坐标参数的初值由 SPP 计算得到，模糊度参数的初值由伪距和载波相位观测值扣除电离层延迟得到，初始方差均设为 $10^4 m^2$ ；大气延迟参数（电离层和对流层）利用随机游走模型估计，其初值和初始方差由 PPP-RTK 服务端提供的大气延迟产品计算得到；在动态模式下，动态坐标参数作为白噪声估计，其初值由 SPP 计算得到，初始方差设为 $10^4 m^2$ ，其余参数的初值及初始方差设置与静态相同。

观测噪声设置如下：伪距观测值设为 0.3m，载波相位观测值设为 0.003m。

(4) 确定虚拟对流层和电离层观测值的先验方差

在 PPP-RTK 中, 将高精度区域大气延迟产品作为虚拟观测值对电离层和对流层延迟施加外部约束, 因此, 需要确定虚拟观测值的先验方差, 常用的方法有常数约束、时空约束和逐步松弛法约束。常数约束法将虚拟观测值的先验方差确定为与时间无关的常数; 时空约束法考虑大气延迟的时空变化特性, 逐历元计算虚拟观测值的先验方差; 逐步松弛法是在大气延迟产品的精度不够高时, 在 PPP-RTK 定位初始阶段为了快速收敛, 赋予对流层延迟和电离层延迟更大的权重, 但是为了得到精度更高的定位解, 在定位收敛后需要逐渐减小其权重。

但是, 当大气延迟产品的精度足够高时, 可直接采用大气延迟产品所提供的大气延迟误差作为先验方差。PPP-RTK 服务端提供的区域大气延迟产品的精度足够高, 因此可直接使用大气延迟误差作为先验方差。

2.2 PPP-RTK 主要误差处理

PPP-RTK 定位采用的是非组合解算模式, 不能通过各种组合的方式来消除很多误差。因此, 要想得到 cm 级甚至 mm 级的高精度定位结果, 需要将 GNSS 观测值中的各种误差进行模型改正或者参数估计。根据误差来源的不同, 可将 GNSS 观测值中的误差大致分为与卫星有关、与传播路径有关的误差以及与接收机有关的误差。

2.2.1 与 GNSS 卫星有关的误差

(1) 卫星轨道和钟误差

卫星轨道和钟差的精度是决定 PPP-RTK 定位精度最关键的因素。

卫星轨道是由地面观测站观测并计算得到的, 卫星轨道误差的大小受到很多因素的影响。比如地面观测站的数量及其分布, 观测值的质量, 卫星定轨的数学和力学模型, 以及定轨软件的性能等。卫星轨道误差是指由卫星星历计算得到的卫星位置与卫星实际位置存在的差值。

GNSS 卫星上使用的卫星钟是高精度的原子钟, 但由于钟差、钟速的影响, 使得卫星钟面时与标准时间存在偏差, 这个偏差即为卫星钟差。

在 PPP-RTK 定位中, 采用 IGS 实时播发的广播星历和 SSR 改正数恢复得到卫星实时精密轨道和钟差。以此来消除卫星轨道和钟误差。

(2) 地球自转改正

由于地球自转, 地固系在卫星信号传播过程中而旋转, 导致卫星坐标在卫星信号发射时刻和接收时刻不一致。因此, 在进行高精度 GNSS 定位时必须考虑地

球自转改正。

改正公式如下：

$$\Delta D_{\omega} = \frac{\omega}{c} \{Y_s(X_R - X_s) - X_s(Y_R - Y_s)\} \quad (2.24)$$

式中， ω 是地球自转速度， c 是真空中光速，下标 R 的是测站坐标，下标 S 是卫星坐标， ΔD_{ω} 是距离改正。

(3) 相对论改正

相对论效应是指由于卫星钟和接收机钟的运动速度和重力位不同，从而导致两台钟之间产生相对钟误差的现象^[1]。相对论效应对伪距和相位观测值的影响是相同的。相对论改正又分为距离相对论改正和钟差相对论改正^[53]。

距离改正公式如下：

$$\Delta D_g = \frac{2GM}{c^2} \ln \left(\frac{r_{rcv} + r^{sat} + r_{rcv}^{sat}}{r_{rcv} + r^{sat} - r_{rcv}^{sat}} \right) \quad (2.25)$$

式中， G 为万有引力常数， M 为地球总质量， r^{sat} 和 r_{rcv} 分别为卫星和接收机到地心的几何距离， r_{rcv}^{sat} 为卫星到接收机的几何距离。当卫星接近地平面时 ΔD_g 取得最大值，约 19mm^[37]。

钟差改正公式如下：

$$\Delta_{rela} = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k) \quad (2.26)$$

式中， $F = -4.442807633 \times 10^{-10}$ ， e 为卫星轨道偏心率， A 为卫星轨道的长半轴， E_k 为卫星轨道偏近地点角。当 e 为 0.01 时，钟差改正最大可达 6.864m^[37]，故在 PPP-RTK 中，上述项必须进行改正。

(4) 卫星天线相位中心偏移及变化

由于卫星质心与卫星天线相位中心不一致而导致的误差称为卫星天线相位中心偏差。由于 GNSS 观测量的参考点为卫星天线相位中心，目前 IGS 各分析中心提供的精密卫星轨道钟差产品有基于卫星质心，也有基于卫星天线相位中心的，如果所用是基于卫星质心的，则需要使用 IGS 提供的 antex 文件进行卫星相位中心改正（Phase Center Offset, PCO），将其改到卫星天线相位中心。实际上，卫星瞬时天线相位中心随信号的高度角及方位角的变化而变化，进行 PCO 改正实际上是改到了卫星平均相位中心(Mean Phase Center, MPC)，卫星天线瞬时相位中心与平均相位中心的差异称为天线相位中心变化（Phase Center Variation, PCV）因此在 PCO 改正的同时还需要进行 PCV 改正^[54-55]。

(5) 天线相位缠绕

卫星为了使太阳能帆板能够始终对准太阳，需要不断地转动以调整角度，使得信号发射天线随着卫星的转动而旋转，而接收机端的天线通常指向某一固定参

考方向，导致载波相位观测值发生变化。这种现象称为天线相位缠绕效应。天线相位缠绕可能会产生分米级的偏差，因此，在 PPP-RTK 中，必须对其进行模型改正。

2.2.2 与 GNSS 卫星信号传播路径有关的误差

(1) 电离层延迟

离地高度在 50~1000km 之间的大气层称为电离层。GNSS 卫星离地高度约 20000km，远大于电离层的高度，因此，电磁波信号从 GNSS 卫星传播到地面接收机的过程中需要穿过电离层，会导致传播速度发生变化、传播路径产生弯曲，从而产生电离层延迟，在 GNSS 观测的天顶方向电离层延迟可达十几米，最大时可超过 50 米，是 GNSS 观测值中最主要的误差，在 PPP-RTK 中进行电离层延迟改正，是获取高精度定位的前提。估计高阶影响的伪距和相位观测值的电离层误差可表示为：

$$d_{ion}^{code} = \frac{40.3}{f^2} TEC + 2 \frac{s_2}{f^3} + 3 \frac{s_3}{f^4} \quad (2.27)$$

$$d_{ion}^{phase} = -\frac{40.3}{f^2} TEC - \frac{s_2}{f^3} - \frac{s_3}{f^4} \quad (2.28)$$

式中，等式右边的 3 项分别表示电离层延迟的 1、2、3 阶项， TEC 表示信号传播路径的总电子含量， f 表示相位观测值的频率， s_2 表示 2 阶项的误差系数， s_3 表示 3 阶项的误差系数。

大量文献研究表明^[56]，电离层延迟的 1 阶项约占误差总量的 99.9%。因此在 PPP-RTK 的数据处理中，仅考虑电离层延迟 1 阶项的影响。

伪距载波相位观测值中的电离层延迟大小相同，符号相反。为消除或削弱电离层延迟对 PPP-RTK 定位的影响，将电离层延迟作为未知参数进行估计，使用外部高精度电离层产品作为约束，组成附加约束方程，解算得到高精度的电离层延迟。

(2) 对流层延迟

在 GNSS 数据处理中，把地球表面到电离层之间的区域认为是对流层，即从 0km~50km 的大气层区域。GNSS 卫星信号在对流层中的传播速度受到大气折射率的影响，导致电磁波信号在传播过程中的传播路径产生弯曲，从而产生对流层延迟^[1]。对流层是非弥散性介质，即介质的介电常数与频率无关，所以在对流层中，不同频率的电磁波信号具有相同的传播速度。对流层延迟对伪距和相位观测值的影响是相同的。

对流层天顶总延迟（Zenith Tropospheric Total Delay, ZTD）可分为天顶对流

层干延迟（Zenith Tropospheric Hydrostatic Delay, ZHD）和天顶对流层湿延迟（Zenith Tropospheric Wet Delay, ZWD）。测站位置天顶方向的 ZTD 需要投影到卫星信号传播方向，以得到对应卫星观测量的倾斜路径对流层延迟。相应的，干延迟和湿延迟分量都有其投影函数，一般都采用：

$$MF(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E)+c}}} \quad (2.29)$$

式中， E 是卫星高度角； a, b, c 是对应的模型系数，不同的系数对应着不同的投影函数模型，常用的投影函数有 VMF1 和 GMF。

在 PPP-RTK 定位中，为了消除或削弱对流层延迟的影响，由于干分量延迟长时间内变化不大，可使用模型改正；湿分量延迟则变化较为显著，模型改正效果不佳，因此将其作为未知参数进行估计，使用外部高精度对流层产品作为约束，组成附加约束方程，解算得到高精度的对流层延迟。

(3) 多路径效应

GNSS 卫星信号在传播过程中，受到测站附近的一些物体反射后被接收机天线所接收，与通过直线路径到达接收机的信号产生叠加，使测量值产生系统误差。这种现象称为多路径效应。

目前对于多路径效应的处理，主要有：选择合适的站址、给接收机配置抑径板，设置截止高度角，适当延长观测时间以及通过滤波等方法来削弱其影响。在 PPP-RTK 定位中，采用设置截止高度角来削弱多路径效应。

2.2.3 与 GNSS 接收机端有关的误差

(1) 接收机钟差

接收机钟与卫星钟一样，也有误差。由于接收机使用的时钟性能远低于原子钟，其钟误差较原子钟更显著。接收机钟差对测码伪距观测值和载波相位观测值的影响是相同的。通常把每个观测历元的接收机钟差当作白噪声进行估计，在 PPP-RTK 定位中，则通过星间单差的方式消除接收机钟差。

(2) 地球固体潮

在太阳和月亮引潮力的作用下，固体地球会产生周期性形变，这种现象被称为地球固体潮。固体潮对观测站的影响可分为周期项和固定形变部分，周期项部分可以通过长期观测平滑掉，但是固定形变部分对测站坐标在高程上的影响最大可达 12cm，因此在进行 PPP-RTK 定位时，必须加以严格改正。

固体潮使用 $n \times m$ 阶 Love 数和 Shida 数的球谐函数进行表达，在 PPP-RTK

定位中,使用 IERS 提供的程序 DEHANTTIDEINEL.F 计算固体潮并进行改正^[56]。

(3) 海洋潮汐

海洋潮汐是指海水受潮汐力作用而产生的海洋水体的长期波动现象。海潮的变化要比固体潮小一个量级。

海潮使用 11 个潮波系数进行表达,在 PPP-RTK 定位中,使用 IERS 提供的程序 ARG2.F 和 HARDISP.F 计算海潮并进行改正^[56]。

固体潮和海潮的改正公式如下:

$$r_M = r_{M0} + \Delta r_{sol} + \Delta r_{ocean} \quad (2.30)$$

式中, Δr_{sol} 和 Δr_{ocean} 分别为地球固体潮和海洋潮汐改正, r_{M0} 为测站参考点坐标, r_M 为测站随时间变化的真实坐标。

(4) 接收机天线相位中心偏差及其变化

GNSS 接收机测量的是天线相位中心,量取天线高时则量取至天线参考点 (ARP),由于这两个点不重合而产生的偏差称为接收机天线相位中心偏差,且各频点的 PCO 也不一致。因此,与卫星天线相位中心改正相类似 (使用 IGS 提供的改正文件),GNSS 接收机进行天线相位中心改正。

事实上,GNSS 卫星信号的方位角、信号强度和高度角的变化,会导致接收机天线瞬时相位中心发生变化。因此,与卫星端类似,GNSS 接收机端也需要进行 PCV 改正。

2.3 数据预处理与质量控制

在 GNSS 高精度定位中,观测数据的质量至关重要,只有高质量的观测值才能得到高精度的定位解。在实际测量时,由于观测环境的复杂多样性、接收机性能、多路径效应的影响等原因,导致 GNSS 观测值中出现粗差,以及观测数据不连续等问题。如果不能对观测数据进行有效的预处理,就会使定位结果的精度和可靠性大大地降低。

因此,在 PPP-RTK 定位中,数据预处理与质量控制极为关键,它是定位解算的基础。本节将对数据预处理中的实时伪距粗差探测与剔除、实时相位周跳探测、实时接收机钟跳探测及修复进行分析。

2.3.1 伪距粗差探测

由于多路径效应等各种原因,导致实际获取的伪距观测值中不时会有百米甚至更大的粗差。在 PPP-RTK 定位中,尽管伪距观测值的权值远低于相位观测值,但含有粗差的伪距观测值仍会对定位精度造成影响,同时也会影响基于 MW 组

合的相位观测值的周跳探测，从而降低平差解的精度。因此，在 PPP-RTK 定位中，必须要对伪距观测值进行粗差探测。

对于伪距观测值中的粗差，常用的处理方法有两种：一种是粗差探测与修复，另一种是抗差估计。对于实际观测数据而言，由于粗差修复的精度和准确率都不高，所以一般只进行探测而不进行修复。

本文采用码观测值差分法进行伪距观测值粗差探测，在 GNSS 伪距观测值中，常用的有 C_1 、 P_1 和 P_2 ，构造一下检验量^[57]：

$$dC_1P_1 = C_1 - P_1 = cDCB_{C_1P_1}^{s,Q} + cDCB_{r,C_1P_1}^Q + S_{C_1P_1} + \varepsilon_{C_1P_1} \quad (2.31)$$

$$dP_1P_1 = P_1 - P_2 = cDCB_{P_1P_2}^{s,Q} + cDCB_{r,P_1P_2}^Q + S_{P_1P_2} + d_{ion} + \varepsilon_{P_1P_2} \quad (2.32)$$

式中， $DCB_{C_1P_1}^{s,Q}$ 、 $DCB_{r,C_1P_1}^Q$ 、 $DCB_{P_1P_2}^{s,Q}$ 和 $DCB_{r,P_1P_2}^Q$ 分别代表卫星和接收机端的码偏差，其稳定性较强，短时间之内波动不大，可视为常数； $S_{C_1P_1}$ 、 $S_{P_1P_2}$ 为不同码偏差之间的时变量； d_{ion} 为电离层延迟残余误差项； $\varepsilon_{C_1P_1}$ 、 $\varepsilon_{P_1P_2}$ 为观测噪声和多路径效应等误差。

将 dC_1P_1 和 dP_1P_1 作为检验量用于检测伪距观测值中的粗差，判断准则如下：

$$\begin{cases} H_0: \text{正常} & |dC_1P_1| \leq k_1 \text{ 且 } |dP_1P_1| \leq k_2 \\ H_1: \text{异常} & |dC_1P_1| > k_1 \text{ 且 } |dP_1P_1| > k_2 \end{cases} \quad (2.33)$$

式中， k_1 和 k_2 为阈值，由于 d_{ion} 的存在， $k_1 < k_2$ ， k_1 取为 30m， k_2 取为 60m^[58]。为了保证 PPP-RTK 定位解的精度和可靠性，本文在数据预处理阶段对探测到含有粗差的观测值进行剔除，未探测到的小粗差则通过抗差估计的方法进行消除。

2.3.2 相位观测值周跳探测

在 GNSS 接收机接受信号时，由于障碍物的遮挡和卫星信号失锁等原因，接收机整波计数器在某段时间内中止了正常的累积工作，从而使整周计数少了 n 周，这种突变叫做整周跳变。事实上，在实际观测中难免产生整周跳变，而且往往不止一处，因此，周跳探测与修复是 PPP-RTK 数据预处理中最主要的内容，周跳探测修复的准确性直接决定了 PPP-RTK 定位的收敛速度和精度。

在 GNSS 数据处理中，常用的双频周跳探测与修复的方法有：基于 GF 组合的周跳探测；基于 MW 组合的周跳探测。这两种方法都充分利用了双频观测值线性组合的特点。

(1) 基于 GF 组合的周跳探测

GF 组合观测值如下：

$$L_{GF}(i) = \lambda_1 \Phi_1(i) - \lambda_2 \Phi_2(i) = (\gamma_2 - 1)I_1(i) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \quad (2.34)$$

式中, i 表示观测历元号。

GF 组合又被称为电离层残差组合, 其与卫星到接收机的几何距离无关, 消除了包括轨道误差在内的多钟误差, 只剩下了载波相位观测值 L_1 、 L_1 的模糊度组合和电离层残差项。将当前历元 GF 组合观测值与前一历元 GF 组合观测值作差, 利用 GF 组合的历元间差值的绝对值 $|L_{GF}(i) - L_{GF}(i-1)|$ 作为检验量进行周跳探测。一般情况下, 短时间内电离层变化不大, 如果不发生周跳, 检验量的时间序列较为平滑。反之, 如果发生周跳, 检验量的序列会产生明显的阶跃。由式(2.34)可知, GF 组合只用到了高精度的载波相位观测值, 可以探测到较小的周跳。

(2) 基于 MW 组合的周跳探测

MW 组合使用了双频伪距和相位观测值, MW 组合观测值如下:

$$\begin{cases} \lambda_\delta \Phi_\delta(i) = \frac{(f_1 \lambda_1 \Phi_1(i) - f_2 \lambda_2 \Phi_2(i))}{(f_1 - f_2)} = \rho(i) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot I_1(i) + \lambda_\delta N_\delta \\ P_\delta(i) = \frac{(f_1 P_1(i) + f_2 P_2(i))}{(f_1 + f_2)} = \rho(i) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot I_1(i) \\ N_\delta = N_1 - N_2 = \Phi_\delta(i) - \frac{P_\delta(i)}{\lambda_\delta} \\ \lambda_\delta = c/(f_1 - f_2) \end{cases} \quad (2.35)$$

式中, i 是观测历元号, λ_δ 是宽巷波长, N_δ 是宽巷模糊度。

MW 组合消除了卫星到接收机的几何距离、卫星和接收机钟差以及大气延迟在内的多种误差, 保留了宽巷模糊度。由于 MW 组合使用了伪距观测值, 受噪声影响较大, 所以对较小周跳不敏感, 为了削弱伪距噪声和多路径误差的影响, 可以对 N_δ 进行历元间平滑, 求得多个历元间的平均值 $\overline{N}_\delta$ 及方差 σ_i^2 :

$$\overline{N}_\delta(i) = \overline{N}_\delta(i-1) + \frac{1}{i} (N_\delta(i) - \overline{N}_\delta(i-1)) \quad (2.36)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} ((N_\delta(i) - \overline{N}_\delta(i-1))^2 - \sigma_{i-1}^2) \quad (2.37)$$

则 MW 组合判断周跳的条件如下:

$$|\overline{N}_\delta(i-1) - N_\delta(i)| > 4\sigma_{i-1} \quad (2.38)$$

$$|N_\delta(i+1) - N_\delta(i)| < 1 \quad (2.39)$$

若只满足式(2.38), 则认为是粗差; 若同时满足式(2.38)和式(2.39), 则认为发生周跳。

在 PPP-RTK 定位中, 在数据预处理阶段进行周跳探测时, 不仅采用一种方法, 而是采用 GF 组合和 MW 组合进行综合判断, 只要其中一个组合判断发生周跳, 则认为载波相位观测值发生了周跳, 此时需要对模糊度参数重新初始化, 重新解算载波相位观测值的模糊度, 达到周跳修复的效果。

2.4 本章小结

本章简单介绍了 PPP-RTK 用户端的基本观测方程,给出了星间单差 PPP-RTK 定位函数模型;介绍了基于卫星高度角和基于信噪比的 PPP-RTK 随机模型;介绍了 PPP-RTK 定位中的参数估计算法,即 Kalman 滤波;介绍了 PPP-RTK 定位中必须要进行改正的各项误差,包括:与 GNSS 卫星有关的误差、与 GNSS 卫星信号传播路径有关的误差以及与 GNSS 接收机端有关的误差。最后,论述了 PPP-RTK 数据预处理与质量控制的方法,包括伪距粗差探测、相位观测值周跳探测及修复。

第3章 PPP-RTK 整周模糊度固定关键技术

在 PPP 定位解算中,模糊度固定一直是难点问题。在 PPP 的原始相位观测方程中,由于卫星端相位硬件延迟偏差被模糊度参数吸收,导致模糊度的整数特性被破坏,使得模糊度难以固定。接收机端的硬件延迟偏差被接收机钟差吸收。

在 PPP-RTK 用户端,为了实现模糊度快速固定,需要对硬件延迟偏差进行改正,相关产品由 PPP-RTK 服务端提供。这和 NRTK“服务端网处理-用户端定位”的数据处理模式相同^[6],但与 NRTK 服务端网处理采用差分模式不同的是,PPP-RTK 服务端网处理采用的是 PPP 模式,计算并提供 GNSS 卫星轨道改正数、钟差改正数、大气延迟改正数、DCB 和 UPD 改正数等产品。PPP-RTK 用户端采用的是绝对定位模式,使用服务端提供的各种改正数产品,恢复模糊度的整数特性,实现模糊度快速有效固定,提高定位的精度和效率。

基于第二章建立的多系统 PPP-RTK 定位模型算法,本章介绍了 PPP-RTK 整周模糊度固定关键技术。首先,介绍了 PPP-RTK 模糊度固定的方法:根据改正数产品类型,可分为基于 UPD 估计的方法和基于去耦钟/整数钟方法。本文选用的是基于 UPD 估计的方法,因此着重于推导基于 UPD 估计的方法;并介绍模糊度固定中的关键算法 LAMBDA 算法;同时介绍了模糊度固定的检核标准;最后介绍了进行部分模糊度固定时,模糊度子集的选取方法。

3.1 基于 UPD 估计的 PPP-RTK 模糊度固定方法

相位硬件偏差是由卫星和接收机端基准振荡器的初始相位偏差(初始相位与零相位之间的偏差)和硬件设备传播时延导致的,称为未校准相位延迟(Uncalibrated Phase Delays, UPD)。本文采用了星间单差消去了接收机端的偏差和噪声,其他误差也被一定程度的削弱,这样不仅有利于服务端计算 UPD 改正数,用户端定位时使用该方法固定模糊度也相对容易和准确。采用星间单差的方法消去接收机端的 UPD,只剩下卫星端的 UPD。基于 UPD 估计的 PPP-RTK 数据处理流程如图 4-1。即 PPP-RTK 服务端使用全球网提供的 SSR 产品和连续参考站提供的观测数据,进行 PPP 网解,解算得到宽巷和窄巷 UPD 产品,恢复成各频点 UPD 产品之后,提供给 DCB 估计板块和大气延迟估计板块,使用 UPD 进行模糊度固定解算得到高精度 DCB 产品和大气延迟产品,将这些播发给用户端使用。用户端使用接收到的一系列产品,实现快速模糊度固定,获取高精度定位解。

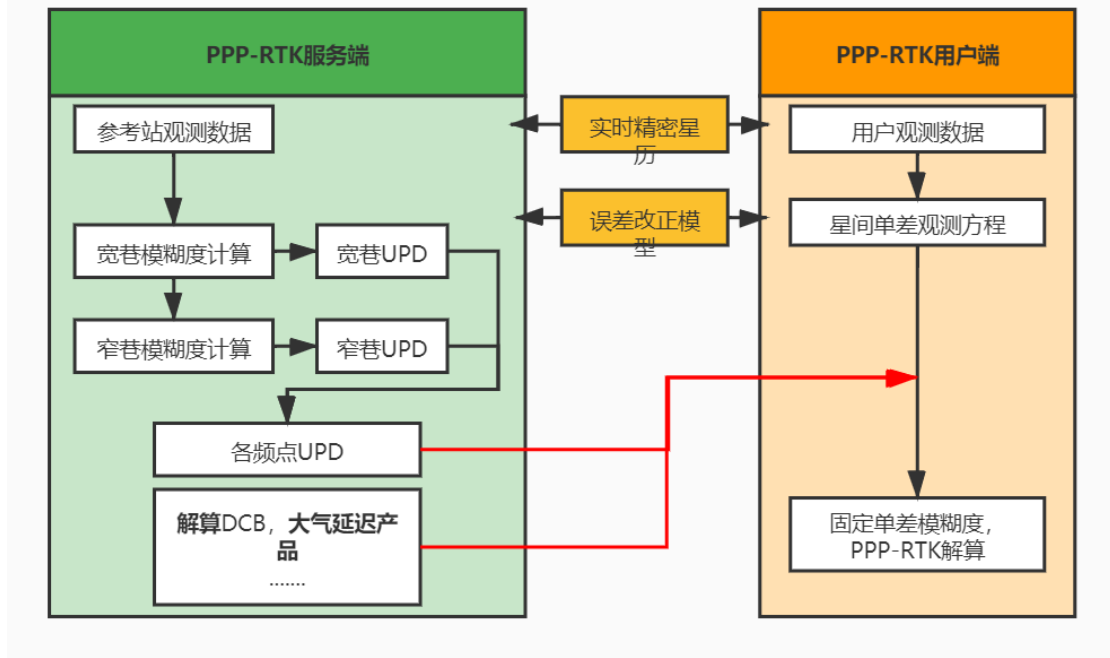


图 3-1 基于 UPD 估计的 PPP-RTK 数据处理流程

(1) PPP-RTK 服务端

基于星间差分的 UPD 与整数模糊度之间的关系如下：

$$\tilde{N}^{i,j} = N^{i,j} + \phi^{i,j} \quad (3.1)$$

式中， $\tilde{N}^{i,j}$ 表示包含 UPD 的星间单差实数模糊度； $N^{i,j}$ 表示星间单差整数模糊度； $\phi^{i,j}$ 表示卫星端的 UPD。

利用 2.1.1 中的星间单差相位观测方程组成无电离层观测方程，得到无电离层组合的浮点模糊度 $\tilde{N}_{r,W}^{ps}$ ，并将其分解为整周宽巷模糊度 $N_{r,W}^{ps}$ 和浮点窄巷模糊度 $\tilde{N}_{r,N}^{ps}$ ：

$$\begin{aligned}
 \tilde{N}_{r,W}^{ps} &= \left(\frac{f_2}{f_1 + f_2} \cdot \frac{C}{f_1 - f_2} \cdot N_{r,W}^{ps} + \frac{C}{f_1 + f_2} \tilde{N}_{r,N}^{ps} \right) \\
 &= \frac{f_2^2 \lambda_1 (N_{r,1}^{ps} + B_1^{ps}) - f_2^2 \lambda_2 (N_{r,2}^{ps} + B_2^{ps})}{f_1^2 - f_2^2} \\
 &= \frac{f_2}{f_1 + f_2} \cdot \frac{C}{f_1 - f_2} \left((N_{r,1}^{ps} + B_1^{ps}) - (N_{r,2}^{ps} + B_2^{ps}) \right) + \frac{C}{f_1 + f_2} (N_{r,1}^{ps} + B_1^{ps}) \\
 &= \frac{f_2}{f_1 + f_2} \cdot \lambda_W \cdot N_{r,W}^{ps} + \lambda_N \cdot (N_{r,N}^{ps} + B_N^{ps})
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

式中，因为 $N_{r,N}^{ps}$ 前面的系数 $C/f_1 + f_2$ 是窄巷的波长，因此将 $N_{r,N}^{ps}$ 称为窄巷模糊度，实际上其是 $N_{r,1}^{ps}$ 。

使用 MW 组合观测值计算宽巷模糊度，由于 MW 组合中有伪距观测值，观

测噪声较大, 因此需要对宽巷模糊度进行历元间平滑等处理来削弱其影响。MW 组合公式如下:

$$\begin{aligned} L_{MW} &= L_W - P_N \\ &= \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} &= \lambda_W \tilde{N}_W \\ \tilde{N}_W &= \frac{L_{MW}}{\lambda_W} \end{aligned} \quad (3.4)$$

其中 $\tilde{N}_W$ 表示实数宽巷模糊度, $\tilde{N}_W = N_W + B_W$ 。对宽巷模糊度进行星间单差:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_W^{ps} &= \langle \tilde{N}_W^p \rangle - \langle \tilde{N}_W^s \rangle \\ &= \langle \frac{L_{MW}^p}{\lambda_W} \rangle - \langle \frac{L_{MW}^s}{\lambda_W} \rangle \end{aligned} \quad (3.5)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 表示对所有历元的结果取平均, 为了避免放大观测噪声, 不直接对原始观测值作星间单差, 而是对取平均之后的宽巷模糊度作星间单差。

MW 组合观测值的波长约为 86mm, 不易受到影响。通过对实数宽巷模糊度取整, 即可分离出宽巷 UPD:

$$B_W^{ps} = \langle \tilde{N}_W^{ps} - [\tilde{N}_W^{ps}] \rangle \quad (3.6)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 表示所有测站的结果取平均, $[\cdot]$ 表示就近取整。 $[\tilde{N}_W^{ps}]$ 吸收了 UPD 中的整数部分, B_W^{ps} 仅是 UPD 的小数部分 (Fractional Cycle Bias, FCB), 因此 UPD 估计也可称作 FCB 估计。实验证明, 宽巷 UPD 产品的稳定性很好, 可以在几天之内保持较高的预报精度。在实际解算中, B_W^{ps} 可能会出现 ± 0.5 周的情况, 在观测噪声的影响下, 可能会造成分离出的 UPD 前后相差一周, 取平均值后造成结果偏差较大的情况。基于这种情况, Cabor 提出了改进公式^[38]:

$$B_W^{ps} = \arctan(\sum \sin(2\pi \tilde{N}_W^{ps}) / \sum \cos(2\pi \tilde{N}_W^{ps})) / 2\pi \quad (3.7)$$

求得宽巷 UPD 之后, 就可固定宽巷模糊度 $\hat{N}_W^{ps}$, 将星间单差宽巷模糊度整数解代回式 (3.2), 在星间单差无电离层模糊度已知的情况下, 可得到星间单差窄巷模糊度的实数解:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_N^{ps} &= \frac{f_1 + f_2}{f_1} N_{IF}^{ps} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \hat{N}_W^{ps} \\ \tilde{N}_N^{ps} &= N_N^{ps} + B_N^{ps} \end{aligned} \quad (3.8)$$

式中, N_{IF}^{ps} 为星间单差的实数无电离层模糊度; $\tilde{N}_N^{ps}$ 为星间单差的实数窄巷模糊度; N_N^{ps} 为与 $\tilde{N}_N^{ps}$ 最接近的整数模糊度, B_N^{ps} 为窄巷 UPD。

窄巷 UPD 的求解方式与宽巷的相同。由于各种偏差的影响, 窄巷 UPD 的变化幅度远大于宽巷的, 因此其有效时限远低于宽巷 UPD, 要想获得高精度的窄巷 UPD 产品, 需要保持较高的估计频率。

$$B_N^{ps} = \langle \tilde{N}_N^{ps} - [\tilde{N}_N^{ps}] \rangle \quad (3.9)$$

根据星间单差宽窄巷 UPD 产品，可恢复得到各频点的星间单差 UPD 产品。通过各种媒介播发给用户端。

(2) PPP-RTK 用户端

用户端对原始观测方程进行星间单差，使用服务端提供的各频点的星间单差 UPD 改正各频点星间单差模糊度的浮点解，恢复其整数特性。

$$\hat{N}_{r,i}^{ps} = \tilde{N}_{r,i}^{ps} - B_i^{ps} \quad (3.10)$$

式中， B_i^{ps} 表示频点 i 的星间单差 UPD； $\tilde{N}_{r,i}^{ps}$ 表示频点 i 包含 UPD 的星间单差模糊度。

但此时 $\hat{N}_{r,i}^{ps}$ 还不是模糊度的固定解，仍然包含着其他噪声和偏差，需使用 LAMBDA 算法对其进行搜索固定。

3.2 LAMBDA 算法概述

LAMBDA 算法全称为最小二乘模糊度降相关平差 (Least-squares AMBiguity Decorelation Adjustment, LAMBDA)，包括两个过程，首先通过 Z 变换降低模糊度之间的相关性，然后在降相关后的模糊度搜索空间进行整数模糊度的搜索，从而提高搜索整数模糊度的效率。

$$\min_a \|\hat{a} - a\|_{Q_{\hat{a}\hat{a}}}^2 \quad a \in Z^n \quad (3.11)$$

式中， $\hat{a}$ 为原始模糊度向量， a 为其整数向量解。

第一步，对 $\hat{a}$ 进行 Z 变换，降低其相关性。降相关之后的模糊度参数和其协方差阵为：

$$\begin{cases} \hat{z} = Z\hat{a} \\ Q_{\hat{z}\hat{z}} = ZQ_{\hat{a}\hat{a}}Z^T \end{cases} \quad (3.12)$$

式中， $\hat{z}$ 为降相关之后的实数模糊度向量， $Q_{\hat{z}\hat{z}}$ 为其协方差矩阵； Z 为可逆整数变换矩阵，需要满足两个条件：矩阵中所有元素均为整数； $|Det(Z)| = 1$ 。经过 Z 变换之后，式 (3.12) 的问题就转化为：

$$\min_z \|\hat{z} - z\|_{Q_{\hat{z}\hat{z}}}^2 \quad z \in Z^n \quad (3.13)$$

式中， z 为 $\hat{z}$ 的整数向量解。

原始模糊度向量的协方差矩阵可分解为 $Q_{\hat{a}\hat{a}}^{-1} = L^T D L$ ，如果变换矩阵 Z 和 L 完全相等，则 $Q_{\hat{z}\hat{z}}$ 可转化为：

$$Q_{\hat{z}\hat{z}} = ZQ_{\hat{a}\hat{a}}Z^T = Z^T L^{-T} D^{-1} L^{-1} Z = D^{-1} \quad (3.14)$$

实际情况中，由于整数条件的限制，达不到完全降相关的效果。矩阵 Z 通常只是矩阵 L 的近似取整。矩阵 Z 的构建遵循两个原则：（1）尽可能的降低模糊度参数之间的相关性，使变换后的模糊度方差阵接近对角阵；（2）尽可能的将变换后模糊度参数向量按照精度从低到高的顺序排列。

第二步，在整数变换之后的模糊度搜索空间内，搜索得到最优模糊度向量。LAMBDA 算法中，模糊度搜索空间的形态由其协方差阵决定，降相关的实质就是将一个超椭球空间转化为一个近圆空间，提高搜索效率。模糊度搜索空间的体积可通过体积函数进行控制，体积的大小是模糊度搜索空间内备选整数模糊度向量个数的指标。

3.3 模糊度固定检核

模糊度的正确固定是 PPP-RTK 用户端获取高精度定位解的前提。错误的模糊度固定解反而会导致用户端产生分米级或更大的定位偏差。因此，在通过 LAMBDA 算法搜索得到模糊度的整数解之后，需要采用一些判别方法对其进行质量检核。下面介绍在模糊度质量检核中常用到的三种判别指标：ADOP 值、Bootstrapping 成功率和 Ratio 值。

本文采用计算 Ratio 值作为模糊度检核策略。

3.3.1 ADOP 值

ADOP 值是指模糊度精度因子（ambiguity dilution of precision, ADOP），可以将其用来描述模糊度参数的精度特性^[59]。其计算公式为：

$$ADOP = \sqrt{\det(Q_N)}^{1/n} \quad (3.15)$$

式中，ADOP 值的单位为周； Q_N 是模糊度参数估值的方差协方差矩阵； $\det(Q_N)$ 是指矩阵 Q_N 行列式的值； n 是指待估模糊度参数的个数。由式（3.15）可看出，ADOP 值包含了模糊度的方差和协方差信息，能够全方位的描述模糊度的平均精度信息，ADOP 值越小，代表着模糊度参数的精度越高，则成功固定这组模糊度的概率就越高。相关文献表明^[59]，ADOP 值越小，模糊度固定率越高。

3.3.2 Bootstrapping 成功率

Bootstrapping 成功率也是模糊度固定的一个检核标准，能反映出模糊度固定解接近模糊度真值的概率^[60]。其计算公式为：

$$P = \prod_{i=1}^n \left(2\Phi\left(\frac{1}{2\sigma_{i|I}}\right) - 1 \right) \quad (3.16)$$

其中

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (3.17)$$

式中, n 为模糊度的个数; $\sigma_{i|I}$ 表示第 i 个模糊度以前面 $i-1$ 个模糊度固定到整数为条件的条件方差的均方根。

Bootstrapping 成功率计算较简单, 通过计算 Bootstrapping 成功率, 能够知道模糊度固定解的可靠性, 这是一个理论上非常严密的评价指标。但是, Bootstrapping 成功率与观测值的质量之间没有建立直接的关联, 如果观测值中存在未被探测到的偏差, 则会导致计算得到的模糊度固定成功率虚高。因此, 不能仅以 Bootstrapping 成功率作为模糊度固定解的评价指标, 还需要结合其他检核方法进行多重验证。

3.3.3 Ratio-test

通过 LAMBDA 算法确定的最优模整数糊度向量, 需要在统计上明显优于次优整数解。Ratio-test 就是证明最优解明显优于次优解的一个测试, 通过量化次优解和最优解的模糊度残差的二次范数的比值来进行, 即:

$$\frac{S_{opt2}}{S_{opt1}} = R > \gamma \quad (3.18)$$

式中, S_{opt1} 和 S_{opt2} 分别表示模糊度整数向量的最优解和次优解; γ 为一个阈值, R 为 Ratio 值。当 Ratio 值大于阈值时, 则认为模糊度固定解为正确解, 若 Ratio 值小于阈值则认为模糊度固定错误。若阈值过大, 正确的模糊度整数解会被丢弃掉; 若阈值过小, 则会把错误的模糊度整数解认为是正确的, 导致定位解算结果出现较大的误差。大量的文献研究表明, γ 的经验值为 3, 因此本文也将其定为 3。Ratio 值可作为表示模糊度整数解的可靠性指标, 其值越大说明模糊度整数解越可靠。

3.4 部分模糊度子集的选取

PPP-RTK 用户端在进行模糊度固定时, 通常先尝试固定所有卫星的模糊度参数, 即全模糊度固定 (Full ambiguity resolution, FAR), 正确固定的模糊度数量越多, 参数解的精度越高可靠性越强。根据 LAMBDA 算法的原理, 进行全模糊度固定时, 由于待估参数的数量较多导致计算量较大, 以及实际情况中部分卫星的观测数据质量不高, 使得很难成功固定所有模糊度, 因此全模糊度固定并非

最好的选择。针对这种情况,可以采取只固定其中一部分模糊度的策略,即部分模糊度固定(Partial ambiguity resolution, PAR),以此来保证模糊度固定的成功率,提高定位解的精度。在进行部分模糊度固定时,如何选取模糊度子集是关键,使得既能保证模糊度固定的成功率,又能尽可能多的固定模糊度个数。下面介绍在进行部分模糊度子集选取时常用的几种方法:基于卫星高度角、基于模糊度 ADOP 值、基于模糊度的原始精度以及基于模糊度线性组合精度^[37]。

3.4.1 高度角优先固定法

一般情况下,相对于观测站,高度角越低的卫星更容易受到多路径效应的影响,导致其伪距观测值精度较低;此外,卫星高度角越低就意味着卫星信号在电离层和对流层中的传播时间越长,其观测值受大气延迟的影响就越大。一些精度较差的卫星观测值会污染其他观测值,降低模糊度浮点解的精度,影响模糊度的固定成功率和正确率,因此,在进行 PPP-RTK 定位解算时,设置截止卫星高度角(10°),以保证低高度角的卫星观测值不参与定位解算。

卫星高度角一定程度上反映了卫星观测值的精度,因此可根据卫星高度角来选取模糊度子集。该方法的具体流程为:在设置截止卫星高度角的前提下,如果无法进行全模糊度固定,按照卫星高度角的大小对模糊度浮点解进行排序,依次剔除高度角最小的卫星的模糊度之后,对剩下的模糊度进行固定,直至模糊度子集能够成功固定并通过相应的检核^[61]。

卫星高度角优先固定法是一种比较简单有效的方法,但是没有严密的理论支撑。且剔除高度角较低的卫星会导致卫星的几何结构强度变差,反而不利于模糊度固定。

3.4.2 ADOP 优先固定法

一般来说,模糊度子集的 ADOP 值越小,表示其整体精度越高,固定的成功率就越高。因此,可以设置 ADOP 值的阈值,筛选出模糊度子集实现部分模糊度固定。

具体的实现过程为:如无法固定模糊度全集,则依次剔除一个或几个模糊度,使得剩下的模糊度子集的 ADOP 值最小,并对其进行固定,直到模糊度子集能够成功固定并通过相应的检核。若所有模糊度的个数为 n ,当剔除一个模糊度时,需要进行 $C_n^{n-1} = n - 1$ 次计算才能确定 ADOP 值最小的模糊度子集,依此类推。因此,这种子集选取方法的计算量较大,所需时间较长^[61],在实时高精度定位数据处理中,需要考虑算法的效率,因此一般不选择此法。

3.4.3 原始模糊度精度优先固定法

原始模糊度的精度可用其方差来表示，方差越小，意味着浮点模糊度的精度越高，被正确固定的概率越高^[37]。原始模糊度精度优先固定法的具体流程为：根据浮点模糊度的方差大小，依次剔除方差最大的模糊度之后，对剩下的模糊度进行固定，直至模糊度子集能够成功固定并通过相应的检核为止。

该方法简单方便，不需要进行过多的运算，但该方法仅考虑了模糊度的方差，没有考虑模糊度之间的协方差，缺乏严密的理论支撑。与卫星高度角优先固定法类似，该方法容易剔除卫星高度角低的卫星的模糊度，导致卫星的几何结构强度变差，反而不利于模糊度固定。

3.4.4 模糊度线性组合精度优先固定法

当模糊度参数之间相关性较强且精度也较低的时，很难直接固定原始模糊度参数，前面介绍的几种方法均在原始模糊度层面进行子集选取，并没有降低模糊度参数之间相关性，也很难达到很好的模糊度固定效果。研究表明，将模糊度参数进行线性组合，可有效降低其相关性，从而提高固定率，线性组合可在观测值层面进行^[61]，也可在模糊度参数之间进行^[37]。观测值层面的线性组合是将伪距和相位观测值在频率之间进行线性组合，基于低噪声、长波长、消电离层延迟等准则来确定线性组合系数，在保持模糊度整数特性的同时，更长的波长也让组合观测值的抗噪声能力更强，提高模糊度固定成功率。

不同于观测值层面的线性组合事先就限定了组合系数，参数层面的线性组合根据原始模糊度的浮点解以及其方差协方差矩阵，通过 LAMBDA 算法对模糊度进行整数 Z 变换以达到降相关的效果，实质上就是自动在模糊度参数层面对模糊度进行了线性组合，同时按精度对组合模糊度进行了排序。已有研究证明，通过 LAMBDA 算法降相关得到的模糊度线性组合明显优于观测值层面的各种线性组合。

本文采用模糊度线性组合精度优先固定法作为部分模糊度子集选取方法。

Wang 和 Feng 提出了一种通过模糊度线性组合选取最优模糊度子集的算法^[62]（简称“WF 法”）。该方法首先通过 LAMBDA 算法中的整数 Z 变换对原始模糊度浮点解进行降相关，并计算降相关后的模糊度向量的 Bootstrapping 成功率 P_s ，如果 P_s 大于事先设置的阈值，则尝试进行全模糊度固定，否则依次剔除精度最差的模糊度并重新计算剩余模糊度向量的 P_s ，直到其大于阈值。选出符合条件的模糊度子集之后，搜索其整数解并进行 Ratio 值检验，若通过则将其作为模糊度固定解，否则以浮点解作为最终解。如果最后剩余模糊度数量少于 4 仍不满

足条件，则也以浮点解作为最终解。

研究表明，WF 法选取出的模糊度子集固定成功率较高，特别是在进行多系统 PPP-RTK，模糊度参数数量较多时，部分模糊度固定可操作性更高。

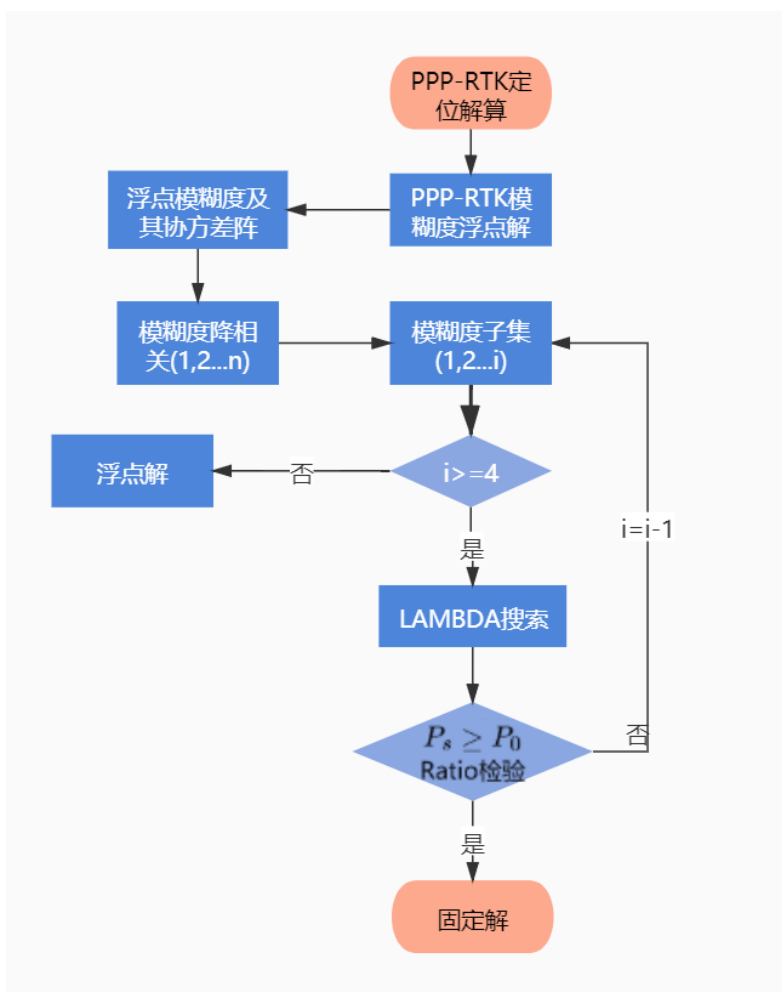


图 3-2 WF 算法流程

3.5 本章小结

本章首先介绍了基于UPD估计的PPP-RTK模糊度固定的关键技术，推导了PPP-RTK服务端估计UPD的算法，并给出了PPP-RTK用户端使用UPD产品进行模糊度固定的方法；还介绍了在模糊度固定中起着重要作用的LAMBDA算法；此外，还介绍了模糊度固定检核策略，分别介绍了：ADOP值、Bootstrapping成功率、Ratio-test三种方法的优缺点；最后，介绍了在无法进行全模糊度固定的情况下，进行部分模糊度固定时，模糊度子集的选取方法，分别介绍了：基于卫星高度角、基于模糊度ADOP值、基于原始模糊度精度和基于模糊度线性组合精度的模糊度子集选取方法，并对各种方法的优缺点进行了总结。

第 4 章 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台

PPP-RTK 是一种实时高精度定位方式，不管是服务端还是用户端，各模块之间均有数据交互的需求。比如服务端的 DCB 和 UPD 解算模块，需要与实时观测数据和实时精密星历接收模块进行数据交互；大气延迟产品解算模块要与 DCB 和 UPD 解算模块进行数据交互等。

各模块之间进行数据交互，实质是多进程之间通信（Inter-Process Communication, IPC）。在实际应用中，常用的进程间通信方式有信号量、管道、套接字等，不同的 IPC 方式各有特点，总的来说，共享内存是最快的 IPC 方式，它是针对其他 IPC 方式运行效率低而专门设计的。由于 PPP-RTK 服务端和用户端多进程之间通信的数据量较大，且对运行效率有较高的要求，因此本文选择共享内存作为进程间通信方式。

基于第二章建立的多系统 PPP-RTK 定位模型算法以及第三章介绍的多系统 PPP-RTK 整周模糊度固定关键技术，本章提出一套基于实时数据流和共享内存的多系统 PPP-RTK 数据处理方案，并建立了 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台。首先介绍了 IGS 实时工作组定义的数据格式和数据传输协议，多系统实时数据和产品的编码标准，以及用于进程间通信的共享内存；其次，介绍了 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台的设计方案，包括平台的开发环境、数据接收及内存管理的设计；最后，介绍了平台在 PPP-RTK 服务端和用户端的具体实现方案。

4.1 概述

自 IGS 实时工作组成立以来，经过 20 余年的发展，多系统实时数据和产品的数据格式、实时数据流的传输协议和标准，均已较成熟和稳定。

4.1.1 RTCM 格式和 NTRIP 协议

（1）RTCM 格式

RTCM 数据格式是 1983 年 11 月国际海运事业无线电技术委员会 104 特别委员会（Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee No.104）为了推广应用差分 GPS 而制定的 GNSS 差分数据通用格式^[63]。该标准给出了 GNSS 实时应用中应有的数据流内容及其格式，包括测站坐标、接收机天线、观测数据、卫星广播星历、轨道钟差改正数、伪距相位硬件偏差、大气延迟

产品等。此外，该标准还为 GNSS 实时应用提供了通信接口，目前被广泛应用于 GNSS 实时数据及产品的编码解码。

(2) NTRIP 协议

RTCM 标准定义了 GNSS 实时数据和产品数据流的内容和数据格式，NTRIP (NetWorked Transport of RTCM via Internet Protocol) 是 RTCM 数据流的网络传输协议。NTRIP 网络主要由 3 个部分组成：Ntrip 客户端 (NtripClient)、Ntrip 服务端 (NtripServer) 和 Ntrip 处理中心 (NtripCaster)。

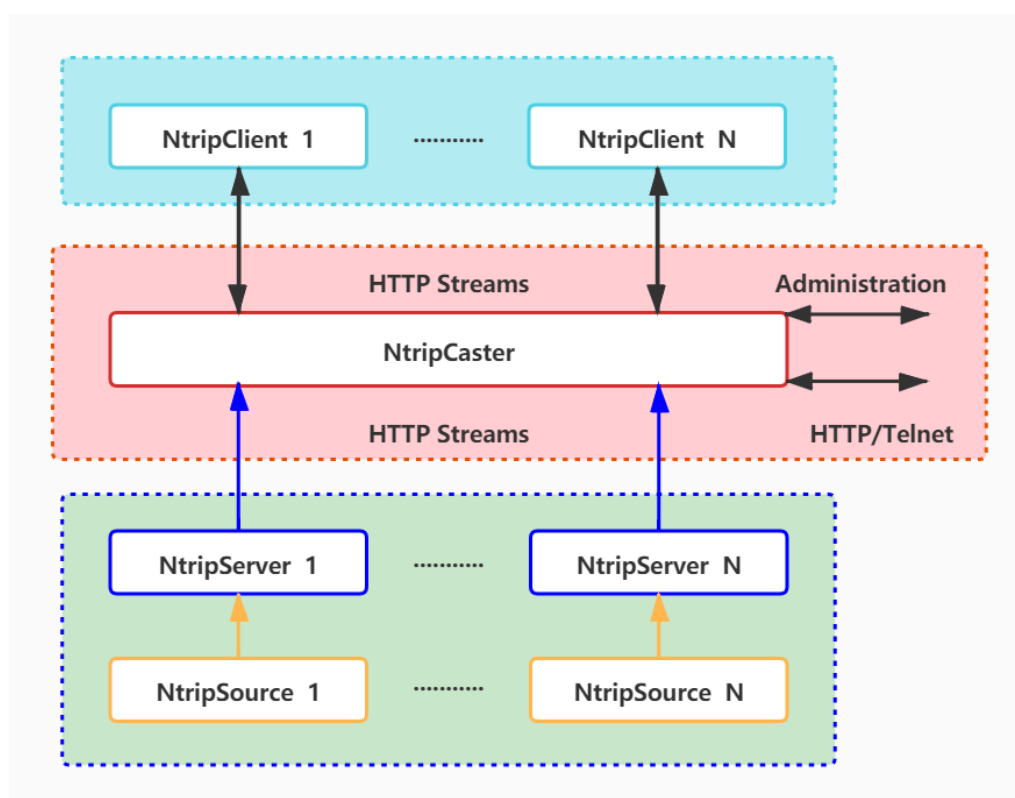


图 4-1 Ntrip 系统组成

基于 NTRIP 协议的通讯系统如图 4-1 所示。NtripSource 和 NtripServer 一般已经集成为一个连续运行参考站，将实时数据流发送给 NtripCaster；NtripCaster 一般就是一台固定 IP 地址的服务器，它负责接收、发送实时数据流；NtripClient 一般就是用户流动站，通过连接到 NtripCaster 接收实时数据流，实现定位解算。NTRIP 协议具有安全性高、可扩展性强、易实现、兼容多种数据传输方式、支持移动通讯网络等优点，在 GNSS 实时领域被广泛应用。

4.1.2 多系统实时数据和产品

(1) 实时数据

多系统实时数据包括参考站实时观测数据和广播星历。目前最新的 RTCM3.3 已经全面支持 GPS+GLONASS+Galileo+SBAS+QZSS+BDS，表 4-1 和表 4-2 分别给出了多系统实时广播星历和观测数据的编码标准。

表 4-1 多系统实时广播星历编码类型

信息类型	描述	卫星系统	编码标准
1019	Ephemeris	GPS	RTCM 3.1
1020	Ephemeris	GLONASS	RTCM 3.1
1045	Ephemeris	Galileo(F/Nav)	RTCM 3.3
1046	Ephemeris	Galileo(I/Nav)	RTCM 3.3
1043	Ephemeris	SBAS	RTCM
1044	Ephemeris	QZSS	RTCM 3.2
63	Ephemeris	BDS	RTCM 3.3

表 4-2 多系统实时观测数据编码类型

信息类型	描述	卫星系统	编码标准
1001-4	Conventional Messages	GPS	RTCM 3.1
1009-12	Conventional Messages	GLONASS	RTCM 3.1
1071-77	Multiple Signal Messages	GPS	RTCM 3.3
1081-87	Multiple Signal Messages	GLONASS	RTCM 3.3
1091-97	Multiple Signal Messages	Galileo	RTCM 3.3
1101-07	Multiple Signal Messages	SBAS	RTCM 3.3
1111-17	Multiple Signal Messages	QZSS	RTCM 3.3
1121-27	Multiple Signal Messages	BDS	RTCM 3.3

(2) 实时产品

为了支持 GNSS 在实时领域的应用, IGS 于 2011 年提出以 SSR (State Space Representation) 信息的形式对外播发各类实时产品, 包括轨道改正数、钟差改正数、URA、伪距偏差、相位偏差、电离层延迟等。表 4-3 给出了多系统实时产品的编码类型。

表 4-3 多系统实时产品编码类型

信息类型	描述	卫星系统	编码标准
1057	Orbit Corrections	GPS	RTCM 3.1
1063	Orbit Corrections	GLONASS	RTCM 3.1
1240	Orbit Corrections	Galileo	RTCM 3.1
1246	Orbit Corrections	SBAS	RTCM 3.1
1252	Orbit Corrections	QZSS	RTCM 3.1
1258	Orbit Corrections	BDS	RTCM 3.1
1058	Clock Corrections	GPS	RTCM 3.1
1064	Clock Corrections	GLONASS	RTCM 3.1
1241	Clock Corrections	Galileo	RTCM 3.1
1247	Clock Corrections	SBAS	RTCM 3.1
1253	Clock Corrections	QZSS	RTCM 3.1
1259	Clock Corrections	BDS	RTCM 3.1
1059	Code Biases	GPS	RTCM 3.1
1065	Code Biases	GLONASS	RTCM 3.1
1242	Code Biases	Galileo	RTCM 3.1
1248	Code Biases	SBAS	RTCM 3.1
1254	Code Biases	QZSS	RTCM 3.1
1260	Code Biases	BDS	RTCM 3.1
1061, 1062	User Range Accuracy, HR	GPS	RTCM 3.1
1067, 1068	User Range Accuracy, HR	GLONASS	RTCM 3.1
1244, 1245	User Range Accuracy, HR	Galileo	RTCM 3.1
1250, 1251	User Range Accuracy, HR	SBAS	RTCM 3.1
1256, 1257	User Range Accuracy, HR	QZSS	RTCM 3.1
1262, 1263	User Range Accuracy, HR	BDS	RTCM 3.1
1060	Comb. Orbits & Clocks	GPS	RTCM 3.1
1066	Comb. Orbits & Clocks	GLONASS	RTCM 3.1
1243	Comb. Orbits & Clocks	Galileo	RTCM 3.1

续表 4-3

1243	Comb. Orbits & Clocks	Galileo	RTCM 3.1
1249	Comb. Orbits & Clocks	SBAS	RTCM 3.1
1255	Comb. Orbits & Clocks	QZSS	RTCM 3.1
1261	Comb. Orbits & Clocks	BDS	RTCM 3.1
1264	VTEC	GNSS	RTCM 3.1
1265	Phase Biases	GPS	RTCM 3.1
1266	Phase Biases	GLONASS	RTCM 3.1
1267	Phase Biases	Galileo	RTCM 3.1
1268	Phase Biases	SBAS	RTCM 3.1
1269	Phase Biases	QZSS	RTCM 3.1
1270	Phase Biases	BDS	RTCM 3.1

表 4-4 总结了目前国际上个分析中心和科研机构对外提供的实时 SSR 产品（实时轨道和钟差改正数），从表中可以看出，目前大部分分析中心提供的 SSR 信息均有 GPS+GLO+GAL+BDS 四系统的实施轨道和钟差改正数，但是由于 BDS-3 刚建成不久，所以目前只有 CAS、CNES、WHU 等几家分析中心提供包含部分 BDS-3 卫星的 SSR 信息，其余分析中心提供四系统 SSR 产品的均只包含 BDS-2 卫星的 SSR 信息。相信随着 BDS-3 的全面建成和全球观测站的不断增加，将会有越来越多的分析中心提供包含所有 BDS 卫星在内的多系统 SSR 产品。

表 4-4 各分析中心提供的实时轨道和钟差

挂载点	卫星系统	基准	分析中心
SSRA00CAS0	GPS+GLO+GAL+BDS	APC	CAS
SSRA00CNE0	GPS+GLO+GAL+BDS	APC	CNES
SSRA00DLR0	GPS+GLO+GAL+BDS	APC	DLR
SSRA00ESA0	GPS	APC	ESA
SSRA00GFZ0	GPS+GLO+GAL+BDS	APC	GFZ
SSRA00GMV0	GPS+GLO+GAL+BDS	APC	GMV
SSRA00NRC0	GPS	APC	NRC
SSRA00WHU0	GPS+GLO+GAL+BDS	APC	WHU
SSRA01BKG0	GPS+GLO	APC	BKG
SSRA01IGS0	GPS	APC	IGS
SSRA02IGS0	GPS	APC	IGS
SSRA03IGS0	GPS+GLO	APC	IGS
SSRC00BKG0	GPS	COM	BKG

续表 4-4

SSRC00CAS0	GPS+GLO+GAL+BDS	COM	CAS
SSRC00CNE0	GPS+GLO+GAL+BDS	COM	CNES
SSRC00DLR0	GPS+GLO+GAL+BDS	COM	DLR
SSRC00ESA0	GPS	COM	ESA
SSRC00GFZ0	GPS+GLO+GAL+BDS	COM	GFZ
SSRC00GMV0	GPS+GLO+GAL+BDS	COM	GMV
SSRC00WHU0	GPS+GLO+GAL+BDS	COM	WHU
SSRC01BKG1	GPS+GLO	COM	BKG
SSRC01IGS0	GPS	COM	IGS
SSRC21IGS0	GPS	COM	IGS

4.1.3 共享内存

共享内存(shared memory) 指在多个处理器的计算机系统中, 可以被不同中央处理器 (CPU) 访问的大容量内存。共享内存常用于一个程序的多进程间通信, 多个程序间也可以通过共享内存来实现通信^[64]。

如图 4-2, 进程 A 和 B 的进程控制块和地址空间都是独立的, 因此两个进程通过页表将虚拟地址映射的物理内存也是不同的, 为了实现进程通信, 需要将它们链接到一段共享的内存块, 即共享内存, 两个进程可以对这块内存进行访问, 当其中一个进程往共享内存中写入数据时, 另一个进程能够察觉到共享内存中数据发生变化, 并能从中读取数据, 两个进程通过共享内存实现了通信。

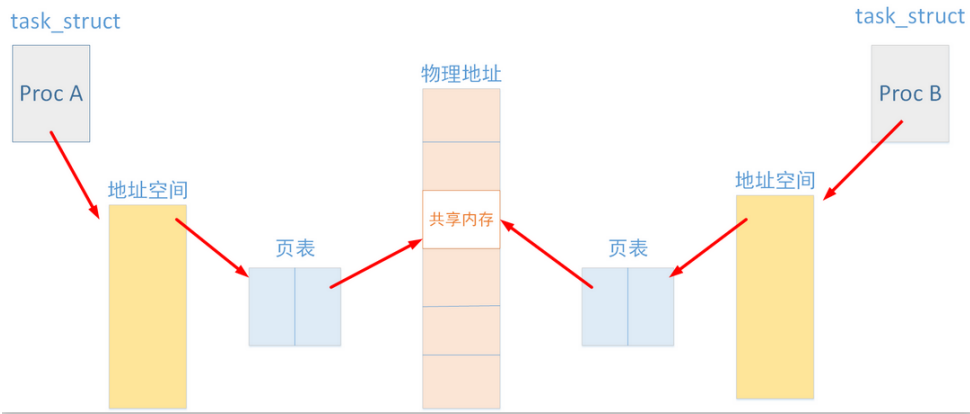


图 4-2 共享内存的通信原理

不同进程之间共享的内存通常安排为同一段物理内存, 开辟的每一块共享内存都有专属的关键字, 所有进程通过页目录表把共享内存段链接到各进程对应的地址空间, 这样便能访问共享内存地址, 当共享内存中的数据发生变化, 所有链

接到这块共享内存的进程都能察觉到。共享内存是 IPC 通信当中传输速度最快的通信方式，而且函数的接口也比较简单，多个正在运行的进程之间共享和传递的数据直接从内存里存取、放入，不需要在进程之间复制，大大降低了在大规模数据处理过程中内存的消耗，加快了程序的效率。

但是，共享内存的使用中也存在一些陷阱，比如没有同步与互斥功能，使得多个进程可同时在共享内存中进行读操作和写操作，这样可能会造成共享内存中的数据混乱，很容易导致程序崩溃。因此，要确保一个进程在写的时候共享内存不被访问，需要采用信号量来实现对共享内存的同步与互斥。

4.2 平台设计

基于 RTCM 格式、NTRIP 协议和共享内存，本文开发了一个用于多系统实时数据接收及管理的程序 RTSHM，用于实现 PPP-RTK 服务端和用户端的数据接收以及各板块之间的数据交互与管理，下面简单介绍 RTSHM 的设计及实现方案。平台的总体设计包含数据接收和内存管理两部分。本平台基于 Linux，使用 C++ 语言开发。

数据接收具体流程为：RTSHM 通过调用相应的函数连接相应的端口，接收相应类型的数据，并将转换成相应的数据结构，调用共享内存接口函数将其放入共享内存。包括 PPP-RTK 服务端：观测数据的接收、广播星历的接收以及 SSR 产品的接收；PPP-RTK 用户端：观测数据、广播星历、SSR（轨道钟差改正数）、UPD、DCB 以及大气延迟产品的接收。

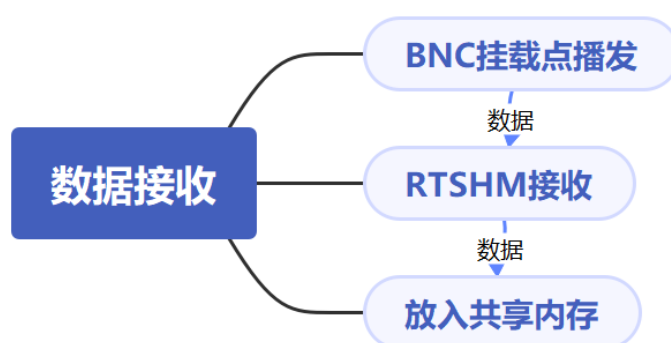


图 4-3 数据接收

PPP-RTK 服务端和用户端的内存管理部分均可分为：广播星历共享内存管理、观测数据共享内存管理、SSR（轨道钟差改正数）共享内存管理、精密星历

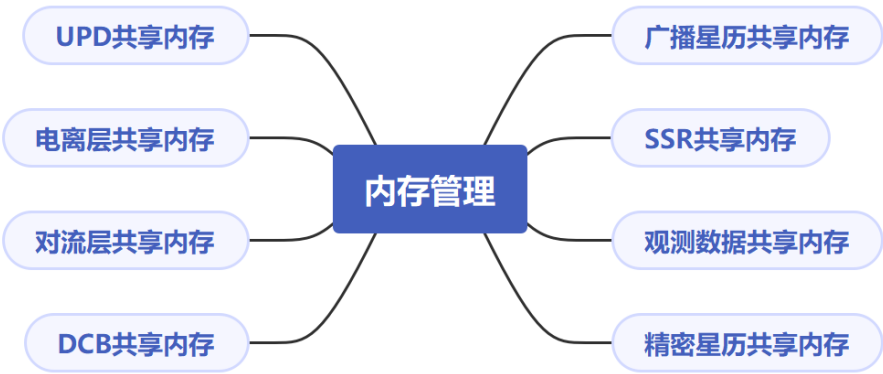


图 4-4 共享内存管理

4. 2. 1 内存管理

本平台的内存管理是基于 ACE 来实现的。ACE 是一个面向对象的工具开发包，它实现了通信软件的基本设计模式。ACE 的功能强大，但是本平台仅使用 ACE 进行共享内存管理，不涉及其他部分。

4. 2. 2 数据接收

自 2001 年 IGS 成立实时工作组以来，经过近 20 年的不断发展与完善，实时数据和产品的数据格式、传输协议和播发标准已经较为成熟，这为 GNSS 在实时领域的应用奠定了良好的基础。

在 PPP-RTK 中,基于 Ntrip 协议的多系统实时数据产品的播发/接收过程为: NtripServer 负责将广播星历和所有参考站的观测数据上传到 NtripCaster。PPP-RTK 服务端使用 NtripCaster 分配的 IP 地址连接到 NtripCaster, 获取广播星历和观测数据,对其处理得到轨道钟差改正数、伪距相位硬件偏差、大气延迟产品等,并将这些产品上传到 NtripCaster。NtripClient 代表着 PPP-RTK 用户端,使用 NtripCaster 分配的 IP 地址连接到 NtripCaster, 获取 PPP-RTK 定位所需的数据和产品, 进行定位解算。具体过程如下图:

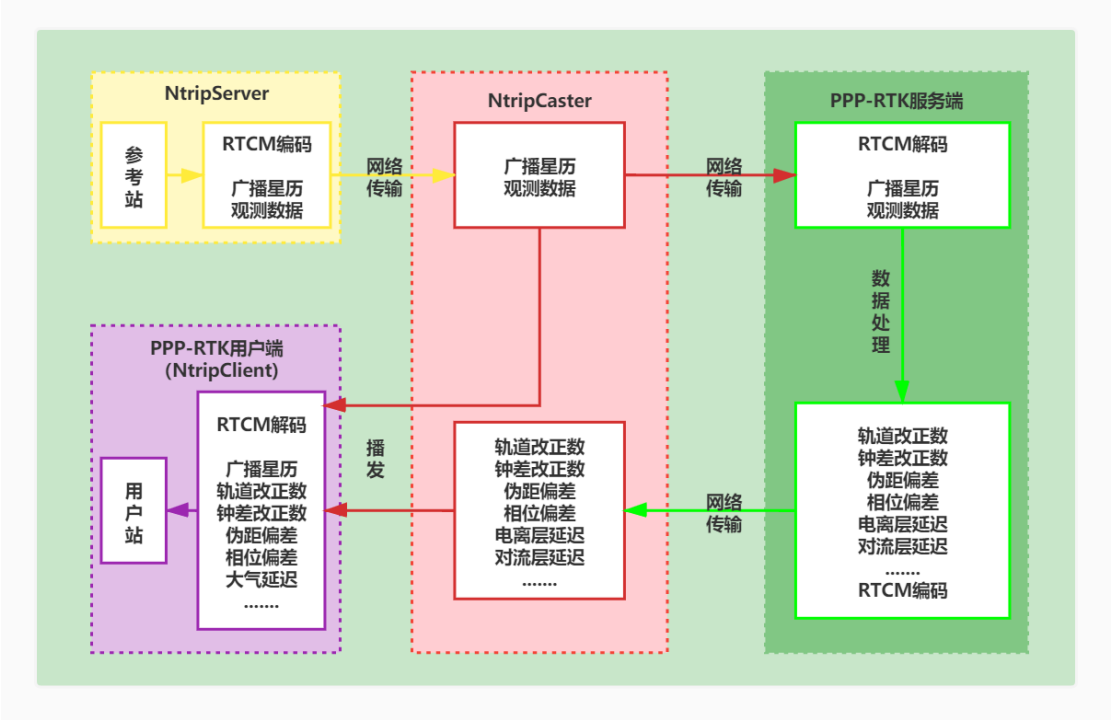


图 4-5 PPP-RTK 实时数据产品播发/接收过程

实时数据和产品的快速高效获取是多系统 PPP-RTK 实施的基础。目前使用最广泛的实时数据和产品获取软件为 BKG 提供的 BNC(BKG Ntrip Client)，BNC 功能强大。本平台也采用 BNC 作为实时数据和产品的获取软件，即将 BNC 作为访问 NtripCaster 的工具，通过 BNC 解码相应挂载点的数据，再将解码后的数据通过相应的端口播发。图 4-6 为 BNC 运行流程图。

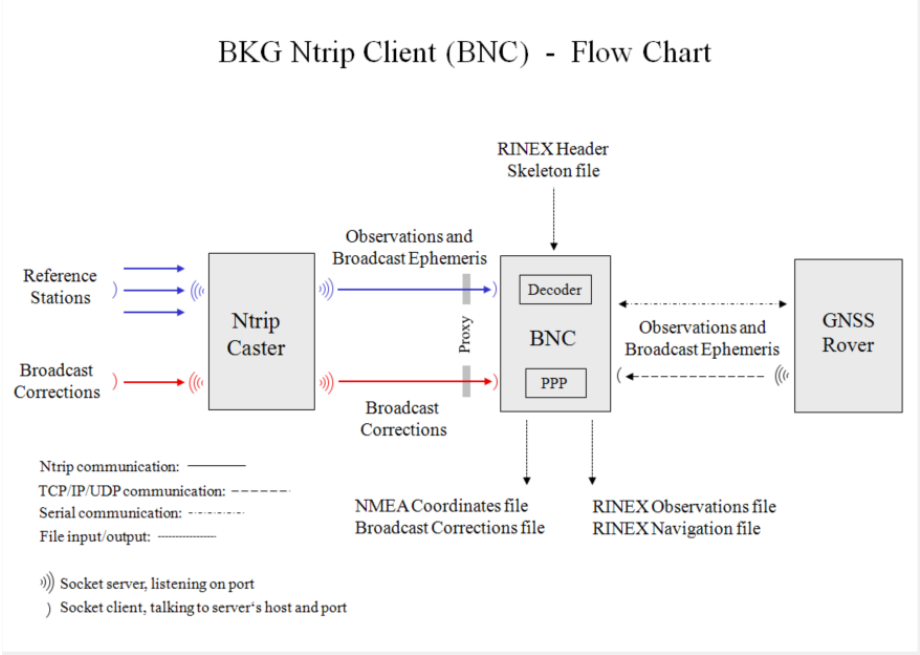


图 4-6 BNC 运行流程图

4.3 平台实现

PPP-RTK 数据接收与内存管理平台的实现分为服务端和用户端两部分，具体实施方案如下：

4.3.1 PPP-RTK 服务端

(1) SSR 共享内存和广播星历共享内存

使用 BNC 连接到 SSR 的挂载点，通过 BNC 的相应端口播发多系统 SSR，使用 RTSHM 接收 SSR，通过调用接口函数将接收到的单历元 SSR 数据放入共享内存。

使用 BNC 连接到广播星历的挂载点，通过 BNC 的相应端口播发多系统广播星历，使用 RTSHM 接收广播星历。由于 GLONASS 广播星历的格式与 GPS、BDS、GALILEO 的不同，因此，为 GLONASS 广播星历单独开设了一个共享内存，GPS、BDS、GALILEO 的广播星历则放入同一个共享内存。通过调用接口函数将 GPS、BDS、GALILEO 一颗卫星的广播星历放入共享内存，将 GLONASS 一颗卫星的广播星历放入共享内存。

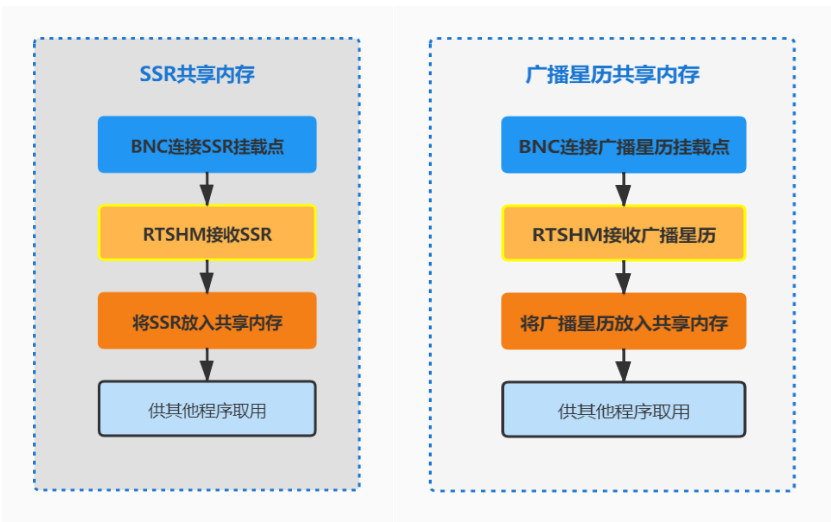


图 4-7 SSR 共享内存和广播星历共享内存

(2) 精密星历共享内存

首先从 SSR 共享内存获取最新写入的 SSR 数据，根据所获取 SSR 数据，从广播星历共享内存中获取 SSR 中卫星的广播星历，计算 SSR 数据所对应时间的卫星轨道和卫星钟差，加上 SSR 改正之后，得到精密星历并将其放入共享内存，以供其他程序调用。

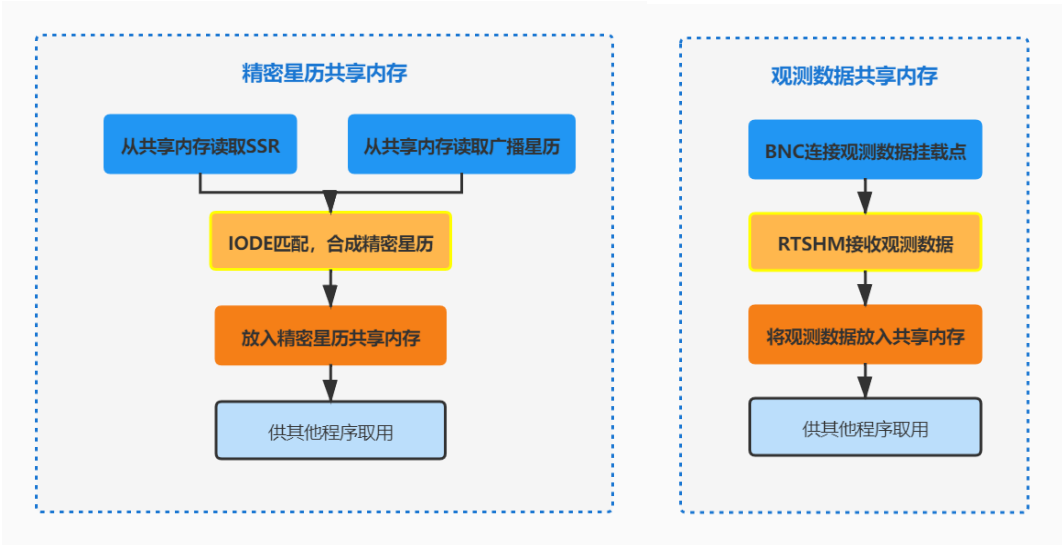


图 4-8 精密星历共享内存、观测数据共享内存

(3) 观测数据共享内存

使用 BNC 连接到观测数据的挂载点，通过 BNC 的相应端口播发所选测站的观测数据，使用 RTSHM 中的接口函数接收观测数据。通过调用接口函数将单历元所有测站的观测数据放入共享内存，以供其他程序取用。

(4) UPD 和 DCB 共享内存

PPP-RTK 服务端的 UPD 解算软件将 UPD 解算结果按照相应的数据结构，调用 RTSHM 中的接口函数将单历元的 UPD 放入共享内存，以供其他程序调用。DCB 解算软件将 DCB 解算结果按照相应的数据结构，调用 RTSHM 中的接口函数将单历元的 DCB 放入共享内存。

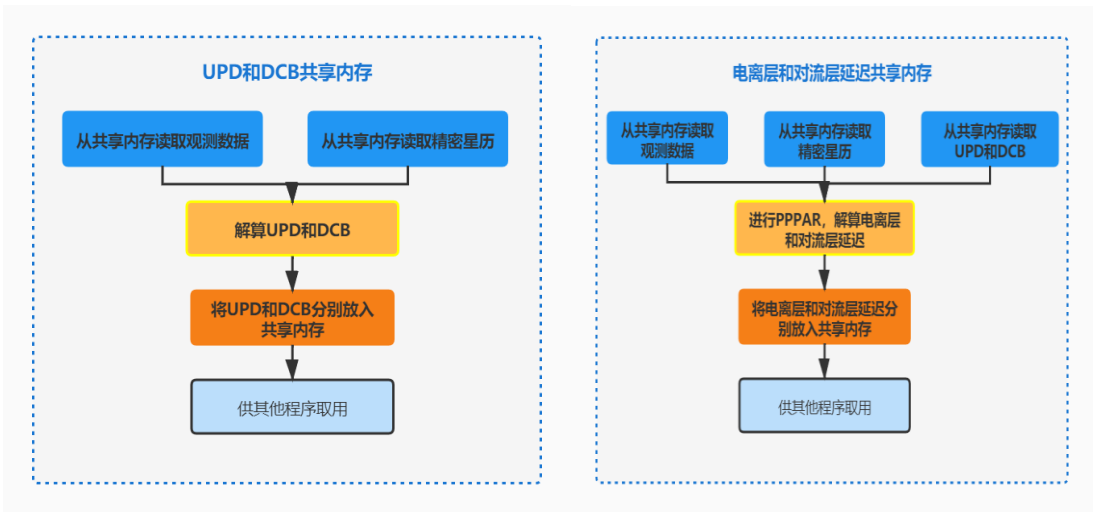


图 4-9 UPD 和 DCB 共享内存、电离层和对流层延迟共享内存

(5) 电离层和对流层延迟共享内存

大气延迟解算软件将电离层和对流层延迟参数估计结果按照相应的数据结构，调用 RTSHM 中的接口函数将单历元的电离层和对流层数据放入共享内存。大气延迟建模软件从共享内存获取最新的电离层和对流层数据用于建模，将电离层延迟建模结果放入共享内存，将对流层建模结果放入共享内存，以供其他程序的调用。

4.3.2 PPP-RTK 用户端

PPP-RTK 用户端的观测数据共享内存、SSR 共享内存、广播星历共享内存和精密星历共享内存的实现与服务端一致。

(1) 电离层和对流层延迟、UPD 和 DCB 共享内存

使用 BNC 连接到大气延迟产品、UPD 和 DCB 产品的挂载点，通过 BNC 的相应端口播发，使用 RTSHM 连接相应的端口，接收大气延迟产品、UPD 和 DCB 产品，将接收到的各种产品按照相应的数据结构放入共享内存，以供 PPP-RTK 定位程序取用。

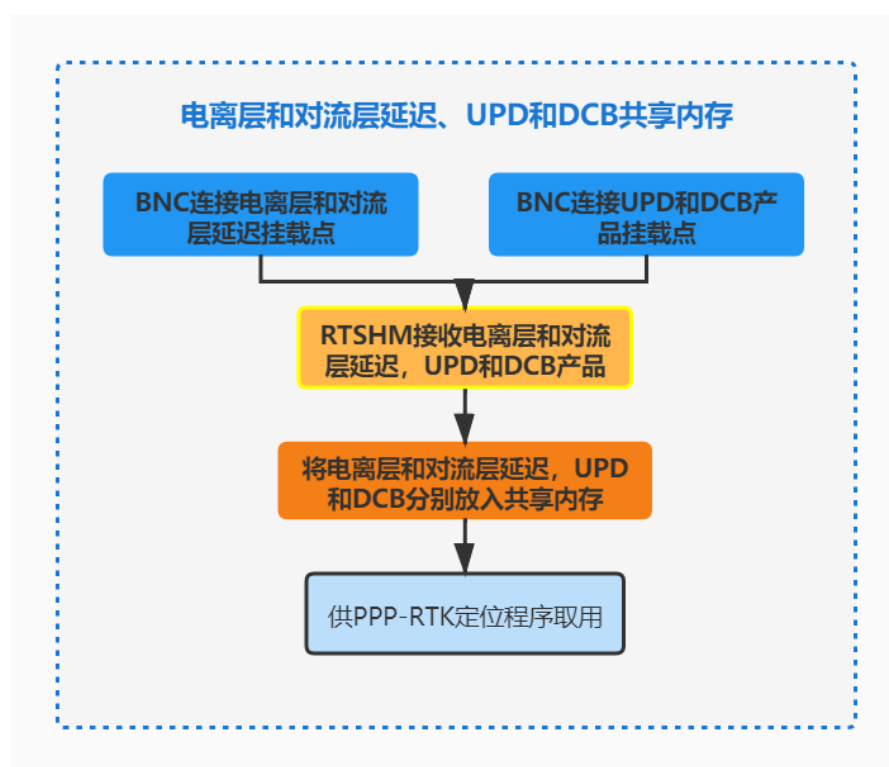


图 4-10 电离层和对流层延迟、UPD 和 DCB 共享内存

(2) PPP-RTK 定位实现

先从共享内存读取测站观测数据和精密星历，组成星间单差观测方程，再从共享内存读取 DCB 和 UPD 改正数对观测值进行改正，从共享内存读取电离层和对流层延迟，组成星间单差附加约束方程，对星间单差模糊度进行固定，得到高精度定位解。

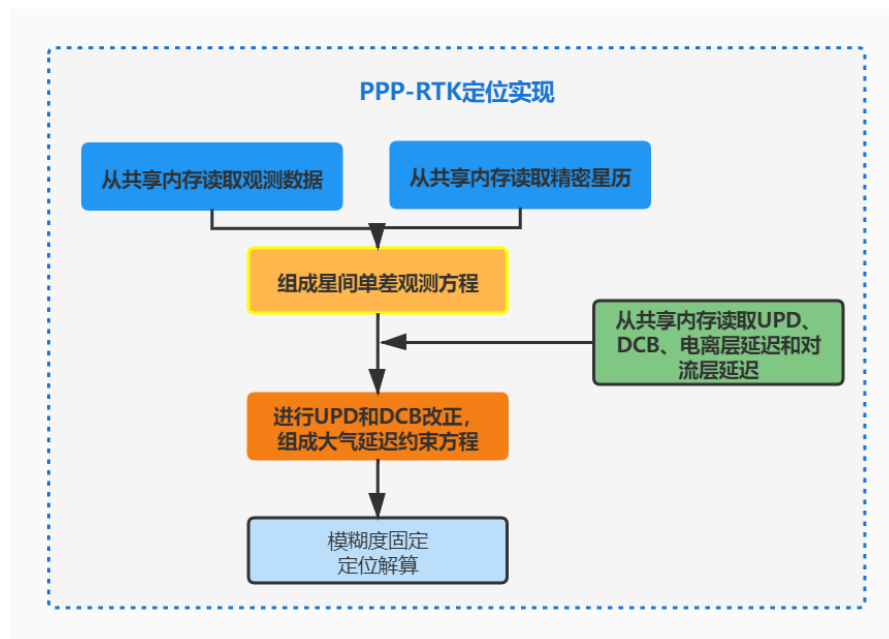


图 4-11 PPP-RTK 定位实现

4.4 本章小结

本章提出一套基于实时数据流和共享内存的多系统 PPP-RTK 数据处理方案，建立了 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台。首先介绍了 IGS 实时工作组定义的实时数据和产品的数据格式、实时数据流的传输协议和标准，即 RTCM 格式和 NTRIP 协议，多系统实时数据和产品的编码标准，对比了目前常用的进程间通信方式，选择共享内存作为 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台的各模块之间的数据交互方式，以及基于 ACE 共享库实现共享内存的方法；其次，介绍了平台的设计方案，即平台的开发环境，数据接收以及内存管理两部分的设计；最后，介绍了基于此平台的 PPP-RTK 服务端和用户端实现方案。

第 5 章 多系统实时精密轨道钟差恢复及精度分析

高精度卫星轨道和钟差产品是进行 GNSS 精密定位和定时所必需的,实时精密卫星轨道钟差产品是进行实时 PPP 和 PPP-RTK 定位的基础,虽然 IGS 提供超快速、快速产品,但其实时性和产品精度均不能满足实时高精度定位的要求,限制了 GNSS 在实时领域的应用。

为了满足用户实时定位的需求,IGS 于 2013 年开始对外提供多系统实时精密产品,该产品基于 RTCM 格式,包含卫星轨道钟差改正数,使用 NTRIP 协议传输播发。最初,对外提供实时产品的机构并不多,且只提供单 GPS 或者 GPS+GLONASS 双系统的改正数产品,这主要是由于当时 BDS 和 GALILEO 尚未完全建成及投入使用。随着 BDS 和 GALILEO 的建成和不断完善,CNES 率先于 2015 年 11 月开始提供四系统(GPS/GLONASS/BDS/GALILEO)实时产品,目前,国际上已有包括 BKG、CNES、CAS、DLR、ESA、GFZ、GMV、NRC、WUH 等多家机构提供实时 SSR 产品^[24]。SSR 产品中包括轨道和钟差改正数,伪距和相位偏差,电离层改正^[67]。截至 2022 年 1 月 1 日,已有多家分析中心提供四系统实时产品,包括但不限于 CAS、CNES、DLR、GMV、GFZ、WHU,少数分析中心的产品中还包含 BDS-3,且产品精度及可靠性均较高,这为多系统实时精密定位的发展提供了数据基础。

随着卫星定轨和钟差建模的模型和算法的不断改进,多系统实时产品的精度不断提高^[67],将实时产品用于实时精密定位的研究及应用也越来越多^[68-69]。已有学者分析过多家分析中心提供的多系统实时产品的质量,发现 GPS 实时产品的质量明显优于 GLONASS^[70-71],且各系统之间的实时产品质量存在显著差异^[66],总的来说,GPS 和 GALILEO 的产品精度明显优于 GLONASS 和 BDS-2。由于 BDS-3 刚建成及投入使用的时间较短,目前对于 BDS-3 实时产品质量分析以及将其用于多系统实时精密定位的研究并不多^[72-75]。

本章在第二章构建的多系统 PPP-RTK 定位模型与算法、以及第四章搭建的 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台的基础上,系统研究了多系统实时精密轨道和钟差的恢复方法、SSR 与广播星历的匹配,以及评估分析了 CNES 播发的多系统实时轨道钟差改正数产品的可用性和精度,为后续进行多系统 PPP-RTK 伪动态定位和动态定位提供数据支持。

5.1 多系统实时精密轨道钟差恢复

IGS 实时产品通常以 RTCM-SSR 的形式通过 NTRIP 协议对外播发，其中实时轨道和钟差均是相对于实时广播星历的改正数，因此用户接收到的实时轨道钟差产品实际上是一组改正参数，不能直接用于定位，需要结合实时广播星历，将其恢复为实时精密轨道和钟差产品才能用于精密定位。

5.1.1 实时轨道恢复

SSR 中的轨道改正数基于卫星轨道坐标系，而常用的卫星轨道产品基于地心地固系，因此，需要将改正数转换到地心地固系中，对使用广播星历计算出的卫星坐标进行改正之后，得到精密卫星坐标。其改正过程及如下：

1. 计算坐标转换矩阵：

$$\begin{cases} \vec{e}_a = \vec{v} / |\vec{v}| \\ \vec{e}_c = \vec{r} \times \vec{v} / |\vec{r} \times \vec{v}| \\ \vec{e}_r = \vec{e}_a \times \vec{e}_c \end{cases} \quad (5.1)$$

$$R = [\vec{e}_r \ \vec{e}_a \ \vec{e}_c]$$

式中， $\vec{r}$ 和 $\vec{v}$ 分别是卫星在地心地固系下的位置和速度向量，可通过广播星历计算得到， $\vec{e}_r$ 、 $\vec{e}_a$ 和 $\vec{e}_c$ 分别为卫星径向、切向和法向在地心地固系中的单位向量。 R 为卫星轨道坐标系到地心地固系的转换矩阵。

2. 根据 SSR 中卫星在参考时刻 t_0 的位置和速度改正向量 δO_0 和 $\delta \dot{O}_0$ ，计算当前时刻的坐标改正数：

$$\begin{bmatrix} \Delta_r \\ \Delta_a \\ \Delta_c \end{bmatrix}_t = \delta O_0 + \delta \dot{O}_0(t - t_0) \quad (5.2)$$

式中， Δ_r 、 Δ_a 和 Δ_c 为 t 时刻的卫星坐标改正向量。

3. 将卫星轨道坐标系下的坐标改正数转换到地心地固系下：

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{bmatrix}_t = R \cdot \begin{bmatrix} \Delta_r \\ \Delta_a \\ \Delta_c \end{bmatrix}_t \quad (5.3)$$

式中， Δ_x 、 Δ_y 和 Δ_z 为 t 时刻卫星在地心地固系的坐标改正数。

4. 使用地心地固系下的坐标改正数对使用广播星历计算得到的卫星坐标进行改正，得到精密卫星轨道产品：

$$\begin{bmatrix} X_{rel} \\ Y_{rel} \\ Z_{rel} \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} X_{brdc} \\ Y_{brdc} \\ Z_{brdc} \end{bmatrix}_t - \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{bmatrix}_t \quad (5.4)$$

式中, X_{brdc} 、 Y_{brdc} 和 Z_{brdc} 为根据广播星历计算出的卫星坐标, X_{rel} 、 Y_{rel} 和 Z_{rel} 为改正后的精密卫星坐标。

5.1.2 实时钟差恢复

类似于SSR中提供的卫星轨道信息, SSR中提供的精密钟差信息也是相对改正量, 不同的是它不是直接以改正数的形式给出, 而是与广播星历中的钟差参数一样, 以二次多项式来描述卫星钟差的变化并播发拟合系数。其改正过程及公式如下:

1.根据SSR中参考时刻 t_0 的钟差拟合系数, 计算当前时刻的钟差改正数:

$$\delta t_c = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2 \quad (5.5)$$

式中, $[C_0, C_1, C_2]$ 为参考时刻 t_0 的钟差拟合系数, δt_c 为 t 时刻卫星钟差改正数。

2.将 t 时刻的钟差改正数对广播星历中的卫星钟差进行改正, 得到精密卫星钟差产品:

$$T_{rel} = T_{brdc} + \delta t_c / c \quad (5.6)$$

式中, T_{brdc} 为广播星历计算得到的卫星钟差, T_{rel} 为改正后的精密卫星钟差。 c 为真空中的光度。

5.2 多系统实时精密轨道钟差精度分析

基于上述介绍的实时精密轨道钟差恢复的方法, 使用 MGEX 提供的实时广播星历和 IGS 提供的多系统实时轨道钟差改正数 (以 CNES 提供的为例), 合成精密轨道产品和精密钟差产品, 并与 GFZ 提供的事后精密产品 GBM 进行对比分析, 评估了三系统(GPS/GALILEO/BDS)实时轨道和钟差的精度。评估时间段为 2021 年年积日 280-290, 共 10 天。在轨道精度评估中, 统计了实时轨道和事后轨道在径向、切向和法向差异的 RMS, 并计算了 SISRE, 其计算公式如下:

$$SISRE_{orb} = \sqrt{\omega_R^2 \cdot R^2 + \omega_{A,C}^2 \cdot (A^2 + C^2)} \quad (5.7)$$

式中, ω_R 和 $\omega_{A,C}$ 为相应的加权因子; R 、 A 、 C 分别为卫星在径向、切向和法向的轨道误差。

在钟差精度评估中, 基准统一后, 统计了实时钟差和事后钟差差异的 STD, 以此为钟差精度评估标准。

5.2.1 GPS/GALILEO/BDS 实时轨道

图 5-1 给出了 GPS/GALILEO/BDS 三系统实时轨道与 GFZ 事后精密轨道差异的统计, 表 5-1 给出了 GPS/GALILEO/BDS 三系统实时轨道平均精度的统计。从轨道三个方向的 RMS 来看, 所有系统的实时轨道精度在径向最优、法向次之、切向最差, GPS、GALILEO 和 BDS-3 绝大多数卫星径向精度在 3cm 以内。BDS-3 中 C27-C28、C38-C40 的轨道精度较差 (径向精度 15cm), 明显低于其他卫星 (径向精度 4cm), 所有卫星的平均径向精度为 7.7cm, 后续应该会有改善和提升; 且 BDS-3 实时轨道的切向精度较差, 这是由于目前 BDS-3 刚建成不久, 全球观测站数量还较少。BDS-2 中除去 C01-C05 (GEO 卫星轨道精度较差), 其余卫星径向精度在 6cm 左右。BDS-3 大部分卫星的轨道精度相对于 BDS-2 (除去 C01-C05) 均有明显的提升。从 SISRE 来看, GPS 和 GALILEO 均在 3cm 左右, BDS-2 和 BDS-3 均在 7cm 左右, 三系统实时轨道的精度评估结果与 CNES 公布的精度相符合。

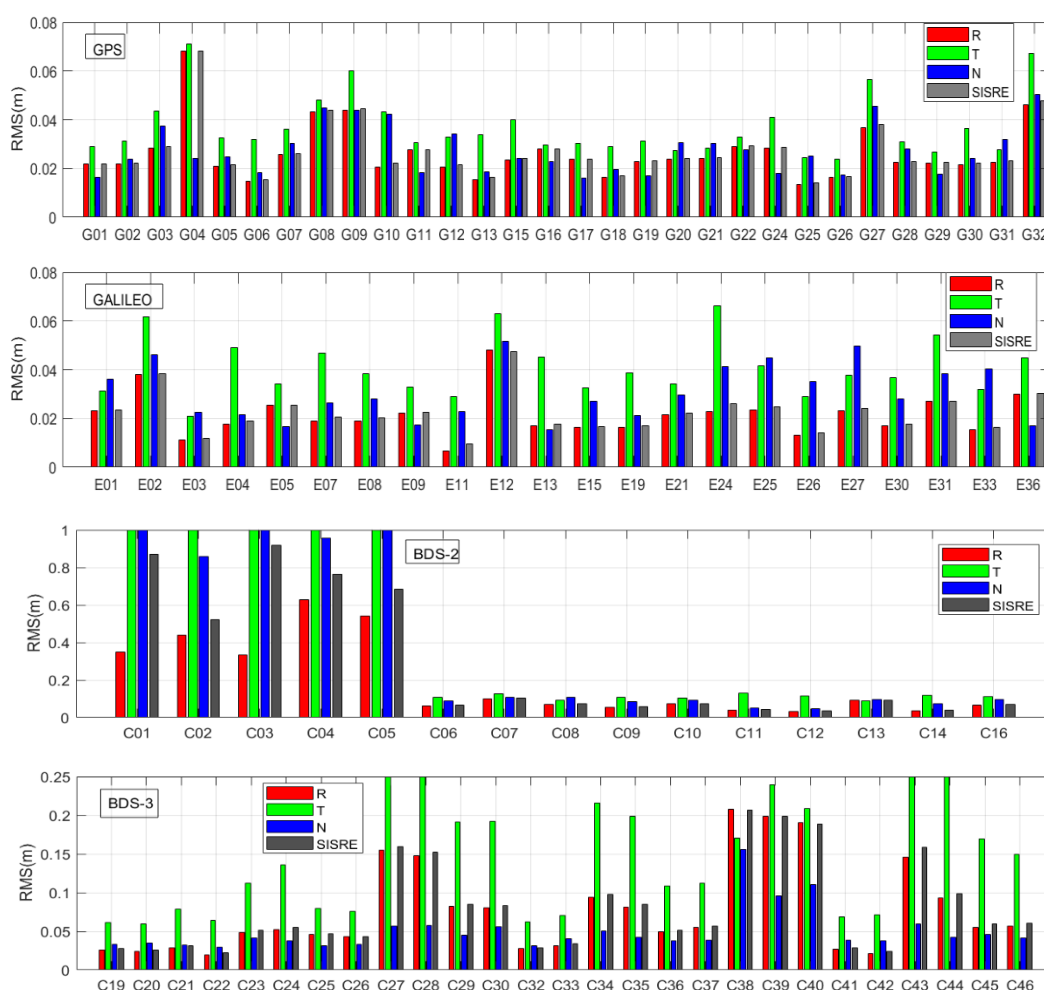


图 5-1 CNES 实时多系统轨道与 GFZ 事后产品差异统计

5.2.2 GPS/GALILEO/BDS 实时钟差

图 5-2 给出了 GPS/GALILEO/BDS 三系统实时精密钟差与 GFZ 事后精密钟差差异的统计,表 5-1 给出了 GPS/GALILEO/BDS 三系统实时精密钟差平均 STD 的统计。从中可以看出, GPS 和 GALILEO 实时精密钟差的 STD 最优,所有卫星的 STD 处于相同水平,平均值均为 0.12ns 左右; BDS-3 实时精密钟差的 STD 除 C27-C28、C38-C40 较大外(均大于 0.5ns),其余卫星的均在 0.2ns 左右。BDS-2 中,除去 C01-C05 (GEO 卫星钟差精度较差),其余卫星钟差的 STD 均在 0.3ns 左右,平均值为 0.31ns。通过统计分析可发现, BDS-3 大部分卫星的钟差精度相对于 BDS-2 来说均有所提高。三系统实时精密钟差的精度评估结果与 CNES 公布的精度相符合。



图 5-2 CNES 实时多系统钟差与 GFZ 最终产品差异统计

表5-1 多系统实时轨道钟差平均精度统计

	Orbit(cm)				Clock(ns)
	R	T	N	SISRE	STD
GPS	2.65	3.70	2.74	2.70	0.12
GALILEO	2.15	4.09	3.08	2.24	0.11
BDS-2	6.25	10.99	8.47	6.54	0.31
BDS-3	7.73	15.75	5.02	8.01	0.31

5.3 本章小结

多系统实时产品的精度对其在实时领域的应用至关重要，本章介绍了实时精密卫星轨道钟差的恢复方法，以及各系统 SSR 改正数与广播星历的匹配等重要问题。

使用 GFZ 提供的事后精密轨道钟差，评估了 IGS 提供的多系统实时轨道钟差改正数的精度（以 CNES 提供的为例）。轨道精度方面，GPS、GALILEO 和 BDS-3 绝大多数卫星径向精度在 3cm 以内；此外，统计了各系统的平均 SISRE，发现 GPS、GALILEO 实时轨道精度相当(3cm)，明显高于 BDS-2(6cm)和 BDS-3 (7cm)；BDS-3 中，C27-C28、C38-C40 的轨道精度明显低于其他卫星，且 BDS-3 实时轨道的切向精度较差，这是由于目前 BDS-3 刚建成不久，全球观测站数量还较少，随着后续观测站的增加，应该会有改善和提升。钟差精度方面，扣除基准后，统计了各系统实时钟差与事后精密钟差差异的 STD，发现 GPS 和 GALILEO 钟差精度相当(0.12ns)，BDS-3 实时钟差的 STD 除 C27-C28、C38-C40 较大外，其余卫星的均在 0.2ns 左右，相对于 BDS-2（除去 C01-C05）的 0.31ns 有一定的提升。

其中 BDS-3 相对于 BDS-2，轨道和钟差精度均有较大提升，评估结果与 CNES 公布的精度水平相符合。

第6章 PPP-RTK 定位及精度分析

PPP-RTK 服务端提供的产品性能需要经过用户端的实际定位检验，只有用户端能够实现实时高效率高精度定位，才能说明服务端提供的产品性能和可靠性高。

基于第二章建立的多系统 PPP-RTK 定位模型算法，第三章介绍的多系统 PPP-RTK 整周模糊度固定的方法，第四章搭建的多系统 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台，第五章的多系统实时精密轨道钟差的精度分析。本章简单介绍了 PPP-RTK 用户端所用到的实时数据及产品的数据格式及产品质量。最后，使用实时数据和产品进行静态站仿动态 PPP-RTK 定位解算和动态 PPP-RTK 定位解算，并分别对其定位结果的精度进行了分析。

6.1 数据及产品使用情况

PPP-RTK 服务端向用户端提供实时精密卫星轨道和钟差产品、UPD 产品、DCB 产品以及大气延迟产品，结合用户端的实时观测数据，才能实现实时快速高精度定位。服务端提供的产品质量，决定了用户端的定位效率和定位精度。

6.1.1 实时精密卫星轨道和钟差

多系统实时精密卫星轨道和钟差采用第五章中的方法，均采用 CNES 播发的多系统 SSR 产品，结合 MGEX 播发的实时广播星历恢复得到。精密卫星轨道和钟差的采样率均为 5s。精度评估结果见第五章。

6.1.2 UPD 产品和 DCB 产品

多系统 UPD 产品为中科院上海天文台提供，产品的形式为每颗卫星宽巷 UPD，L1 频点 UPD，窄巷 UPD，采样率为 10s。图 6-1 为上海天文台 UPD 产品的残差分布。

多系统 DCB 产品为中科院上海天文台提供，采样率为 1h。图 6-2 为上海天文台 DCB 产品与中国空天院（CAS）DCB 产品的差异。

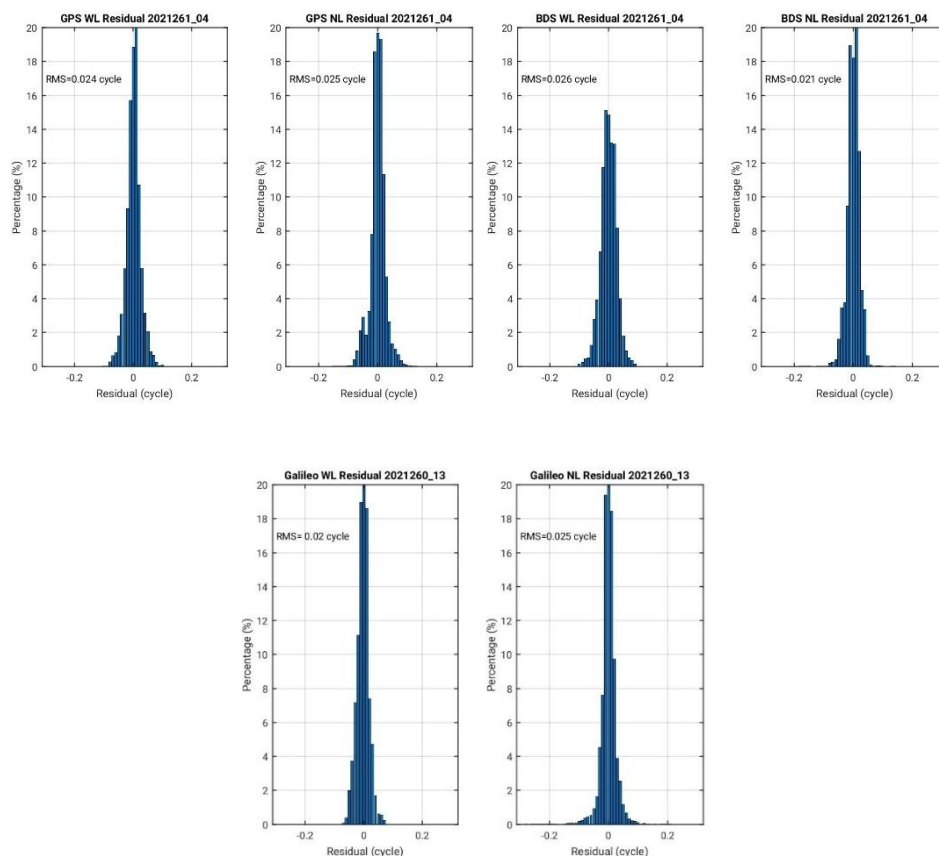


图 6-1 多系统 UPD 产品残差分布

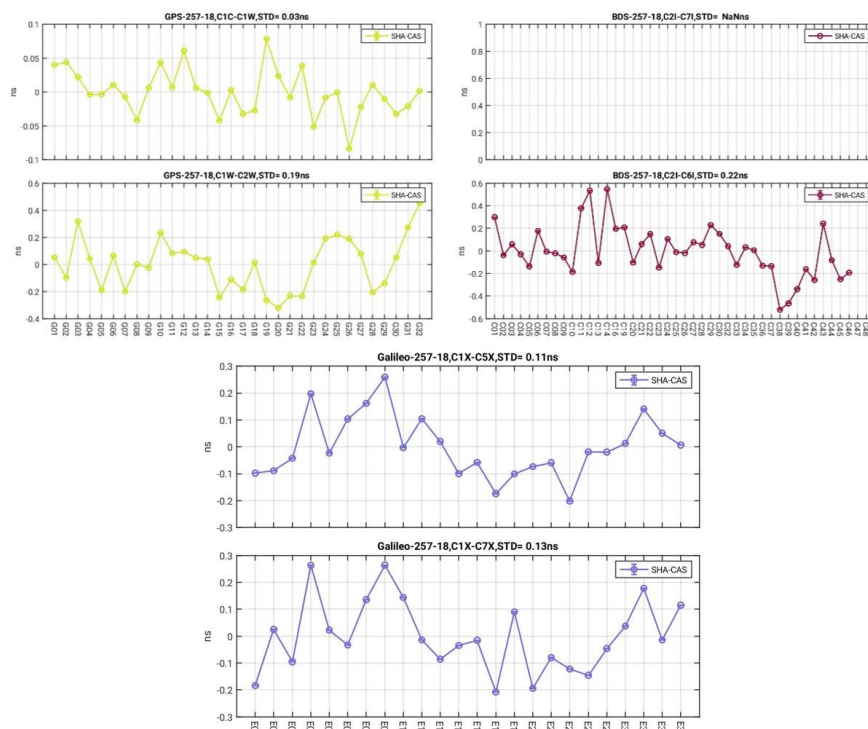


图 6-2 DCB 产品与中国空天院 (CAS) DCB 产品的差异

6.1.3 大气延迟产品

大气延迟产品分为电离层 STEC 产品、电离层 STEC 残差格网产品和对流层格网产品，产品由中科院上海天文台提供，采样率为 5s。图 6-3 为 PPP-RTK 服务端测站 SHXH 电离层延迟偏差的估计和插值结果；图 6-4 为其对流层延迟偏差的估计和插值结果。

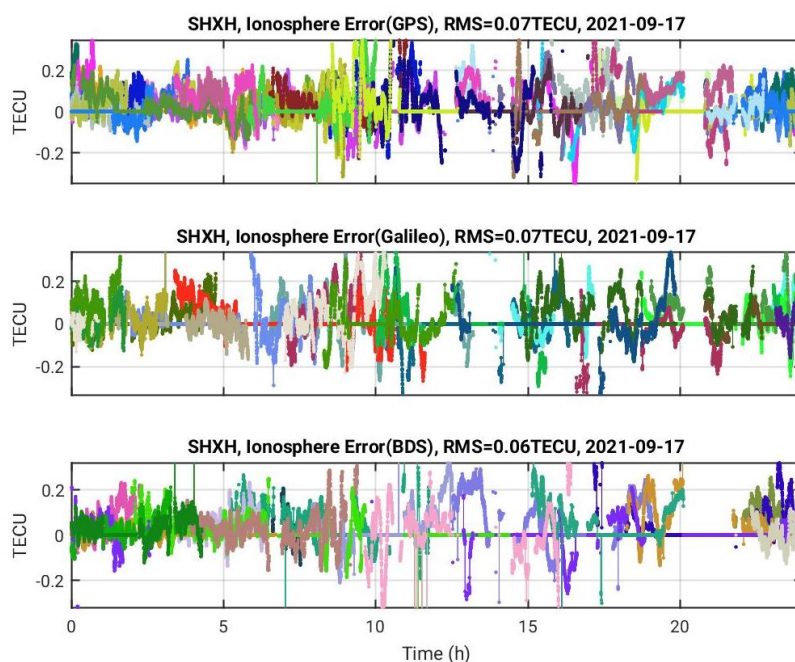


图 6-3 站 SHXH 上电离层延迟偏差的估计和插值

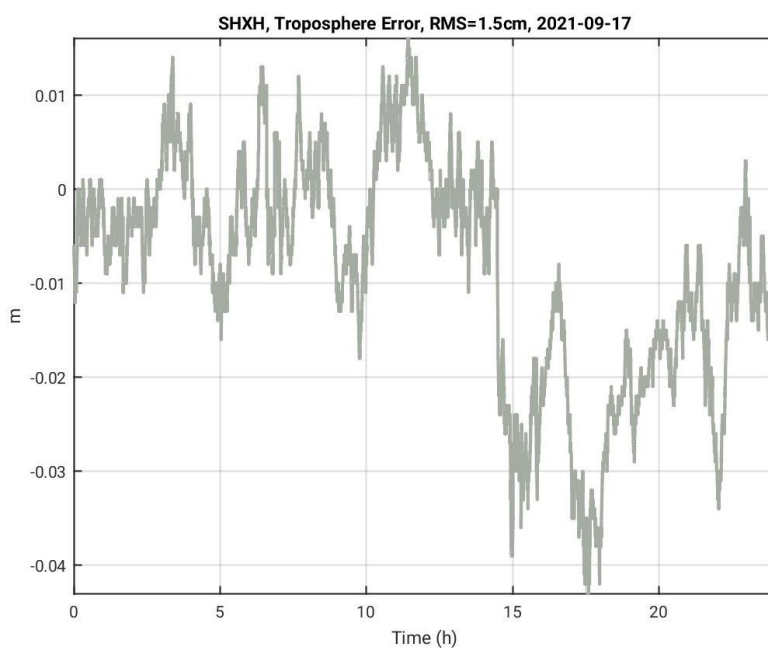


图 6-4 站 SHXH 上对流层延迟偏差的估计和插值

6.1.4 测站数据

某区域所有测站分布如图 6-5 所示。PPP-RTK 服务端选用 CZWJ、SZXC、SHZX、HZLS、JSTZ、SHXH、SHWX、JXTX、SHJS、HZDQ 共 10 个测站进行大气延迟产品建模，其分布和该区域的格网划分如图 6-6 所示。

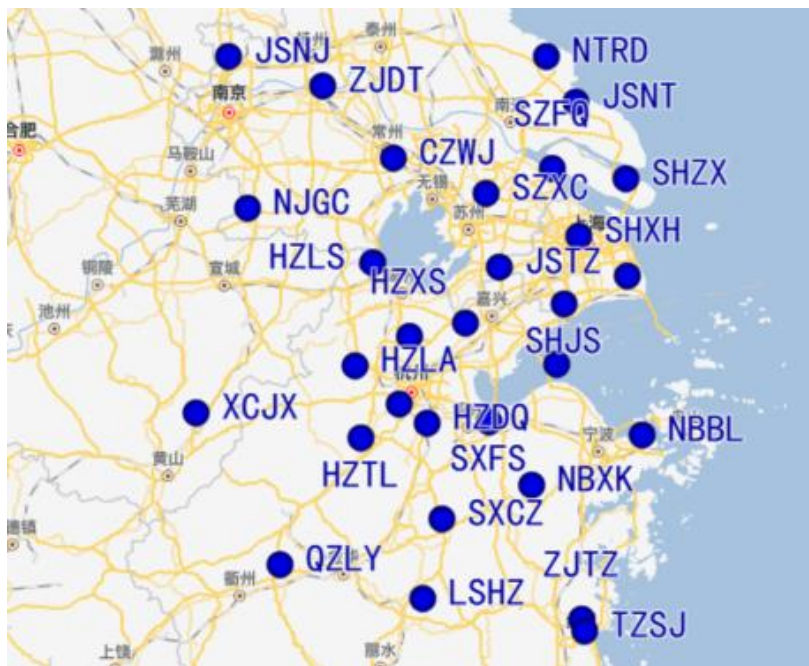


图 6-5 某区域连续观测站分布

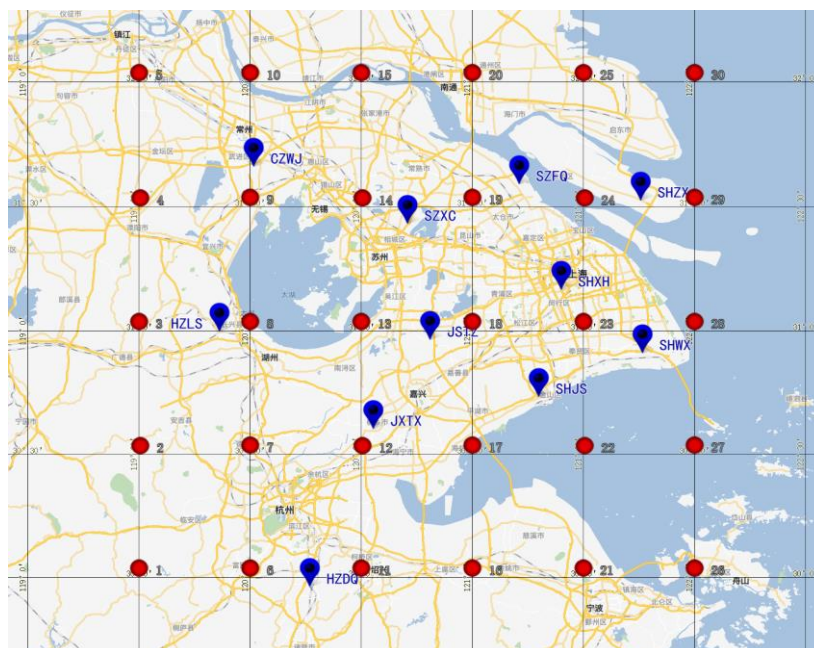


图 6-6 某区域参考站分布及格网划分

6.2 仿动态 PPP-RTK 定位性能分析

为了验证多系统 PPP-RTK 静态站仿动态定位的性能, PPP-RTK 用户端选用 CZWJ、SZXC、SHZX、HZLS、JSTZ、SHXH、SHWX、JXTX、SHJS、HZDQ、SZFQ 共 11 个测站进行定位解算。所有测站配备的接收机都支持 GPS+BDS+GALILEO 三系统导航信号和实时数据流, 以便于多系统实时 PPP-RTK 的实施。实时数据的处理时间为 2021 年年积日 253-272, 共 20 天, 各种数据的使用情况见上一节 6.1。

6.2.1 定位精度

图 6-7 给出了测站 CZWJ 和所有测站仿动态 PPP-RTK 定位解在北、东、高分量上的坐标偏差的分布情况。从左半子图可看出, 测站 CZWJ 水平方向的坐标偏差绝大部分在 25mm 以内, 高程方向的坐标偏差绝大部分在 50mm 以内; 从右半子图可看出, 所有测站定位解的坐标偏差分布情况基本一致。另外, 从图中可以看出, 所有测站定位误差在北、东、高三个方向 RMS 分别为 12mm、11mm、33mm。

图 6-8 给出了各测站多系统仿动态 PPP-RTK 不同方向定位误差 RMS, 统计时选取模糊度固定之后的定位结果。从图中可以看出, 大部分测站在水平方向定位误差 RMS 在 12mm 以内, 垂直方向定位误差 RMS 在 40 mm 以内, 各测站定位误差 RMS 在北、东、高三个方向的平均值为 12.3 mm、10.9 mm、36.1 mm。另外, 从图中还可得出, 各测站三维位置误差绝大多数在 40mm 左右, 平均值为 41.0mm。

图 6-9 给出了 CZWJ、HZDQ 和 SZFQ 三个测站多系统仿动态 PPP-RTK 定位误差在北、东、高三个方向的时间序列 (年积日 258), 从图中可以看出, 各测站水平方向定位误差基本上在 $\pm 2\text{cm}$ 内波动, 且波动较为平稳, 垂直方向定位误差绝大多数在 $\pm 10\text{cm}$ 内波动, 且波动较为剧烈, 这可能是实时轨道钟差精度变化所导致。

表 6-1 展示了各测站仿动态 PPP-RTK 的定位误差统计情况, 模糊度首历元固定成功率以及模糊度历元固定率。

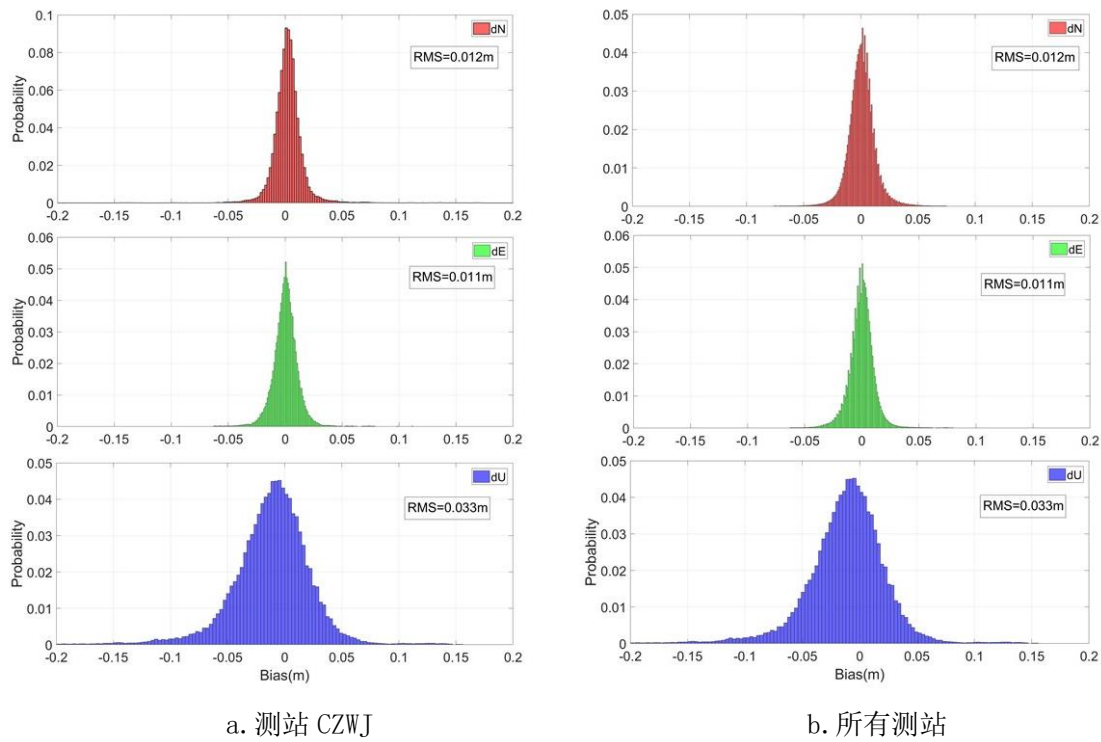


图 6-7 仿动态 PPP-RTK 固定解的坐标偏差分布

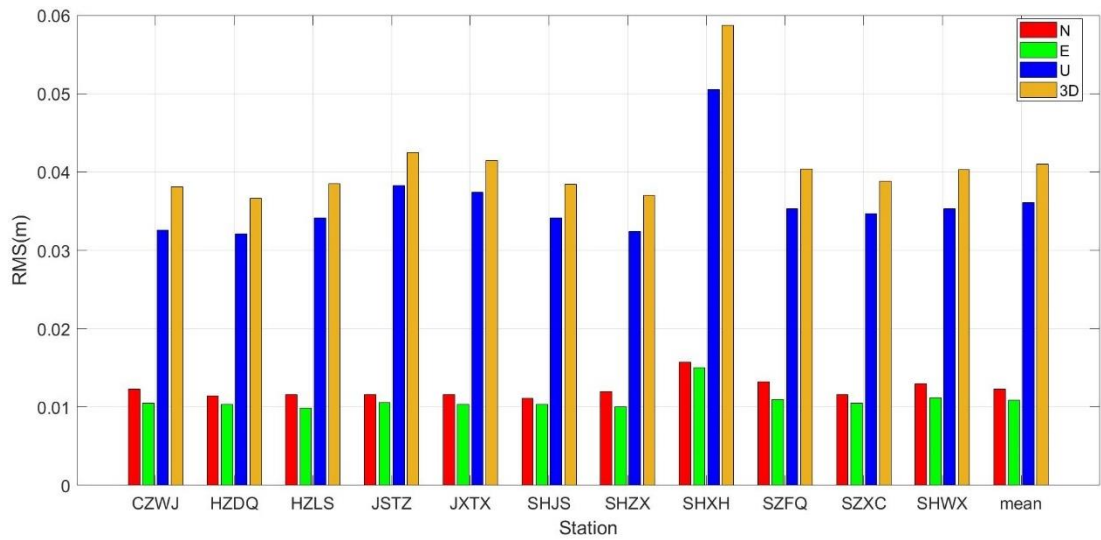
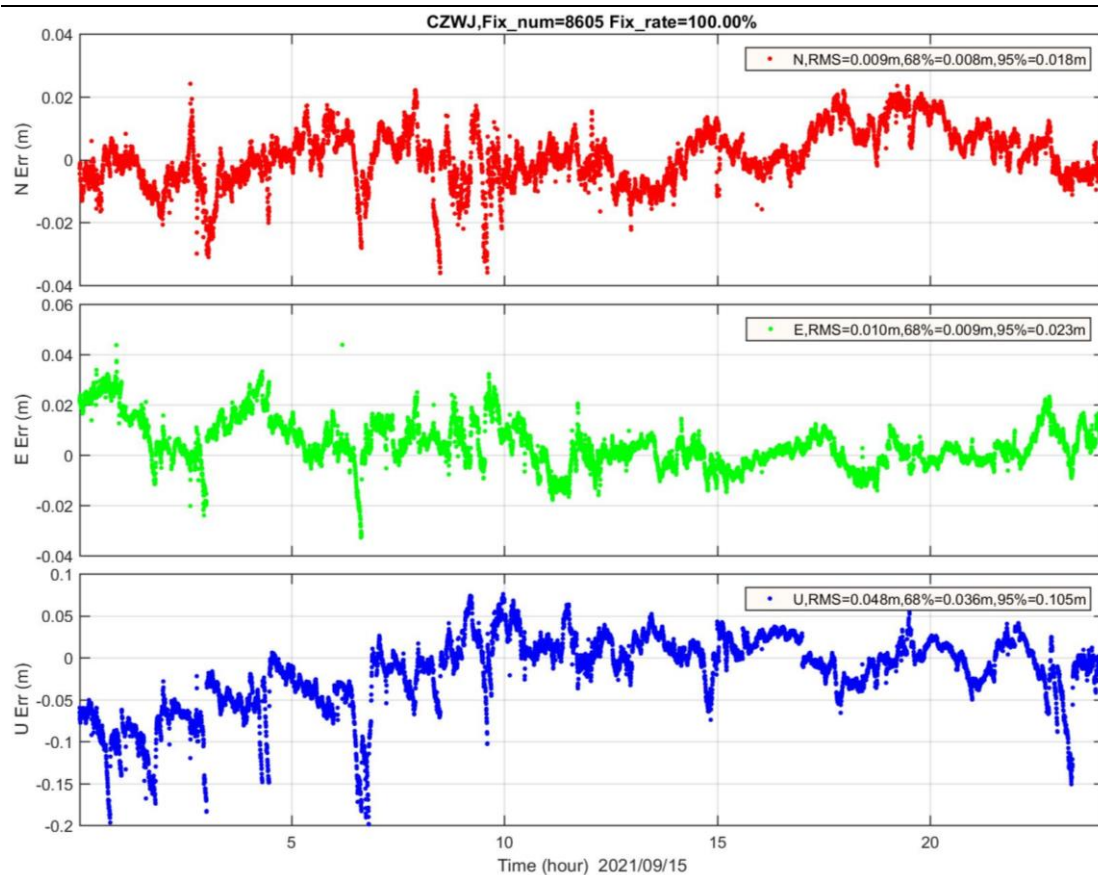
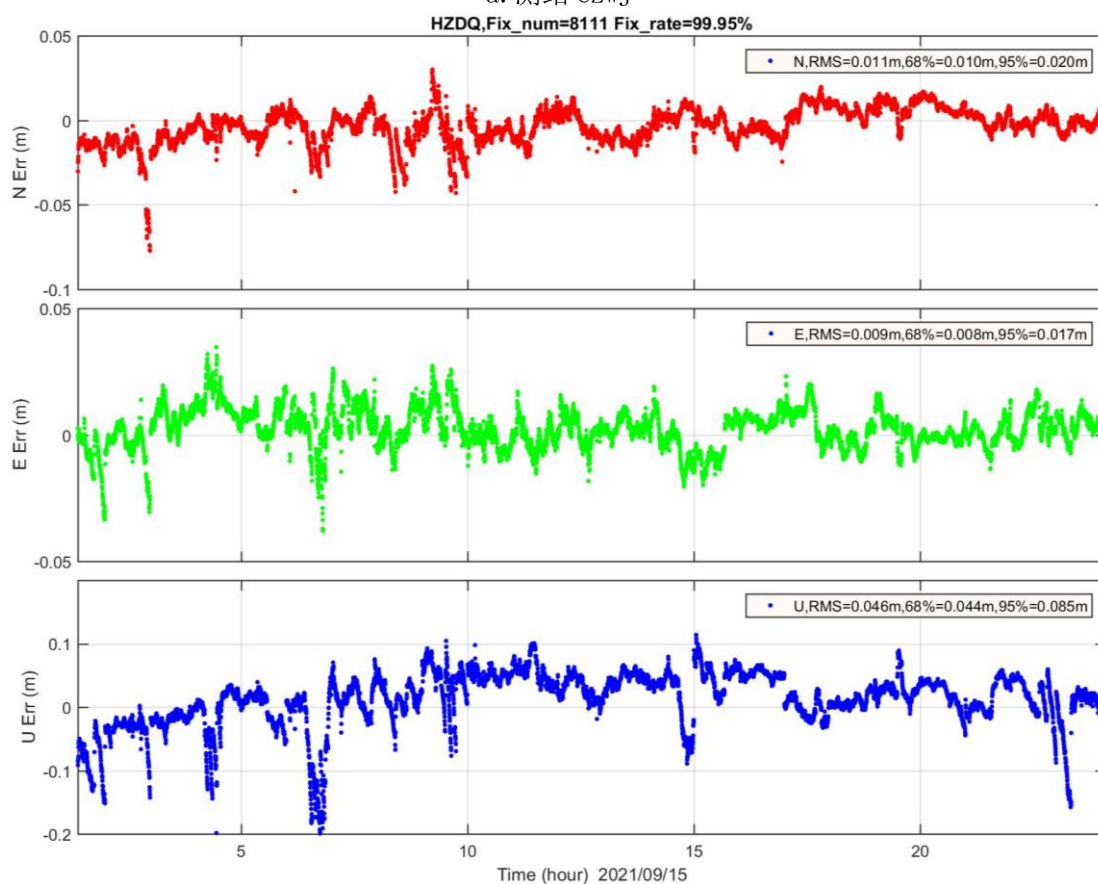


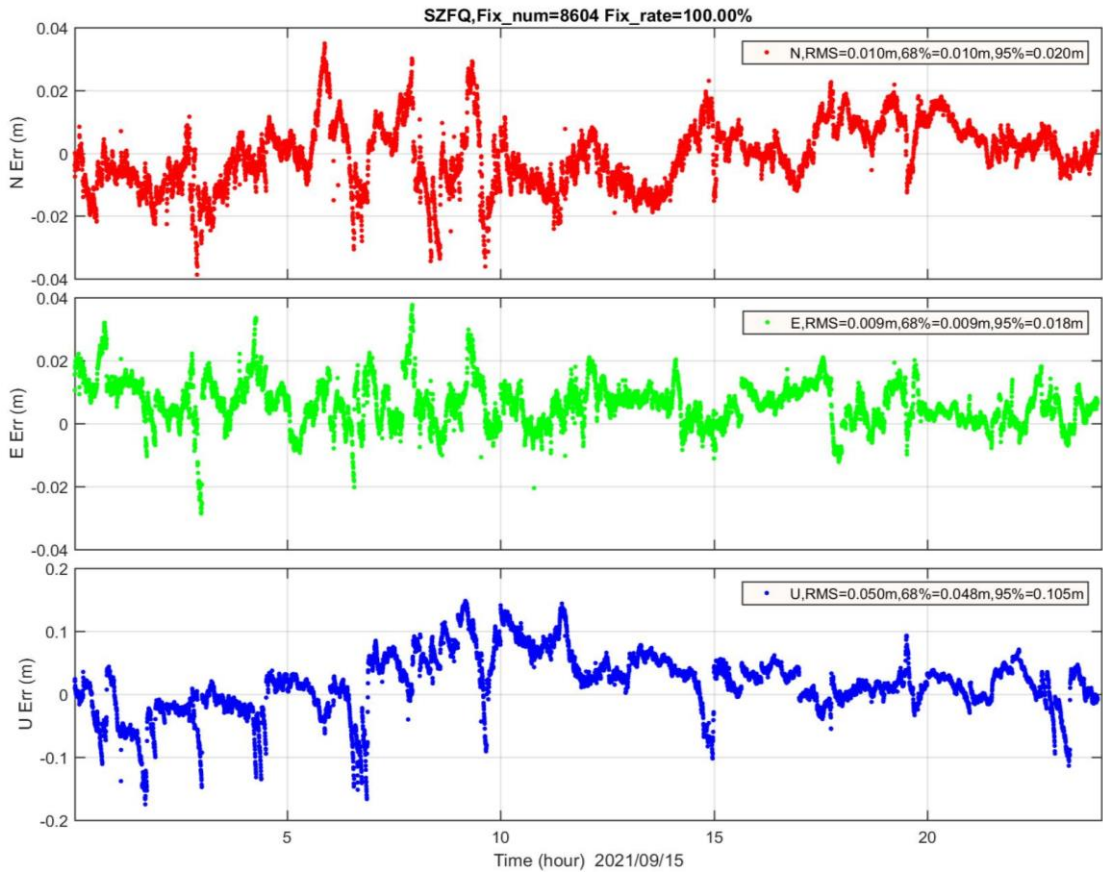
图 6-8 各测站仿动态 PPP-RTK 固定解精度



a. 测站 CZWJ



b. 测站 HZDQ



c. 测站 SZFQ

图 6-9 测站 CZWJ、HZDQ 和 SZFQ 仿动态 PPP-RTK 定位误差时间序列

表 6-1 各测站仿动态 PPP-RTK 定位结果统计

测站	RMS				首历元	历元固
	N/cm	E/cm	U/cm	3D/cm	固定 (%)	定率 (%)
CZWJ	1.23	1.05	3.26	3.81	94.21	98.78
HZDQ	1.14	1.03	3.21	3.66	95.80	98.83
HZLS	1.16	0.99	3.41	3.85	95.26	98.23
JSTZ	1.16	1.06	3.83	4.25	95.98	98.63
JXTX	1.16	1.03	3.74	4.15	95.67	98.68
SHJS	1.11	1.03	3.41	3.84	95.48	98.92
SHZX	1.20	1.00	3.24	3.70	96.17	98.93
SHXH	1.57	1.50	5.05	5.87	93.31	98.30
SZFQ	1.32	1.10	3.53	4.04	96.80	98.83
SZXC	1.16	1.05	3.47	3.88	95.51	98.37
SHWX	1.30	1.12	3.53	4.03	96.19	98.43
mean	1.23	1.09	3.61	4.10	95.49	98.63

6.2.2 模糊度首历元固定比例

图 6-10 给出了观测期间 11 个测站仿动态 PPP-RTK 固定解首历元成功固定模糊度的比例。可以看出，绝大部分测站 95% 以上的模糊度可以在第一个历元成功固定，平均固定比例为 95.49%。



图 6-10 各测站仿动态 PPP-RTK 固定解首历元固定比例

6.2.3 模糊度历元固定率

图 6-11 给出了观测期间 11 个测站仿动态 PPP-RTK 固定解的模糊度平均历元固定率。可以看出，所有测站的模糊度历元固定率相当，均在 98% 以上，平均固定率为 98.63%。

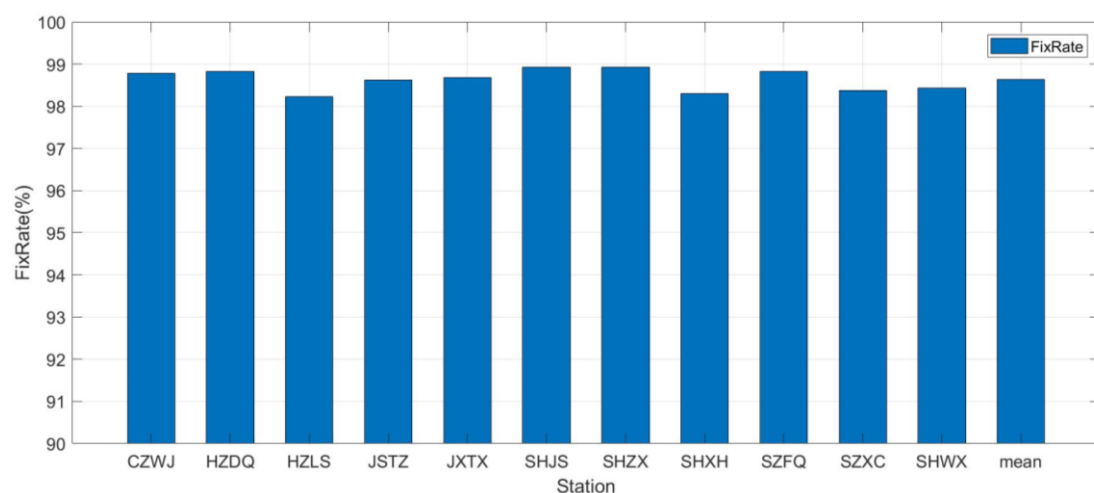


图 6-11 各测站仿动态 PPP-RTK 固定解平均历元固定率

6.3 动态 PPP-RTK 定位性能分析

为了验证多系统动态 PPP-RTK 定位的性能，在图 6-12 所示的区域内，进行实时动态定位实验，采用车载接收机进行数据采集，配备的接收机都支持 GPS + BDS + GALILEO 三系统导航信号和实时数据流，以便于多系统实时动态 PPP-RTK 的实施。采用千寻位置提供的 VRS 定位结果作为基准，对多系统动态 PPP-RTK 定位结果进行精度评估。

6.3.1 定位实验一

动态定位实验一由浙江省宁波市慈溪市到浙江省杭州市上城区，具体路线如图 6-19 所示，总里程约 140km，测试时间为 2021 年 1 月 25 号 6:40-9:40 (UTC)，全程共三小时，采样率为 1s。

对定位结果进行精度评估，评估结果如图 6-13 所示。其中，模糊度历元固定率为 97%，在定位开始的前几个历元就能实现模糊度固定。以 VRS 定位结果作为基准对 PPP-RTK 动态定位固定解的结果进行精度评估，以 STD 为精度评估标准，其中，N 方向的 STD 为 14mm，E 方向的 STD 为 15mm，U 方向的 STD 为 37mm，可得出动态 PPP-RTK 定位结果与 VRS 定位结果契合度较高，具有较高的可靠性。

从图 6-13 中可看出，在测试期间 9:14-9:21，有些历元模糊度固定失败，分析原因，画出测试期间可用卫星数量图，如图 6-14 所示，由于这段时间可用卫星数量急剧下降至 0，导致模糊度固定失败，从图 6-15 中各卫星可视时间也可得出相同的结论。

此外，图 6-16 给出了定位测试期间的周跳时间序列。

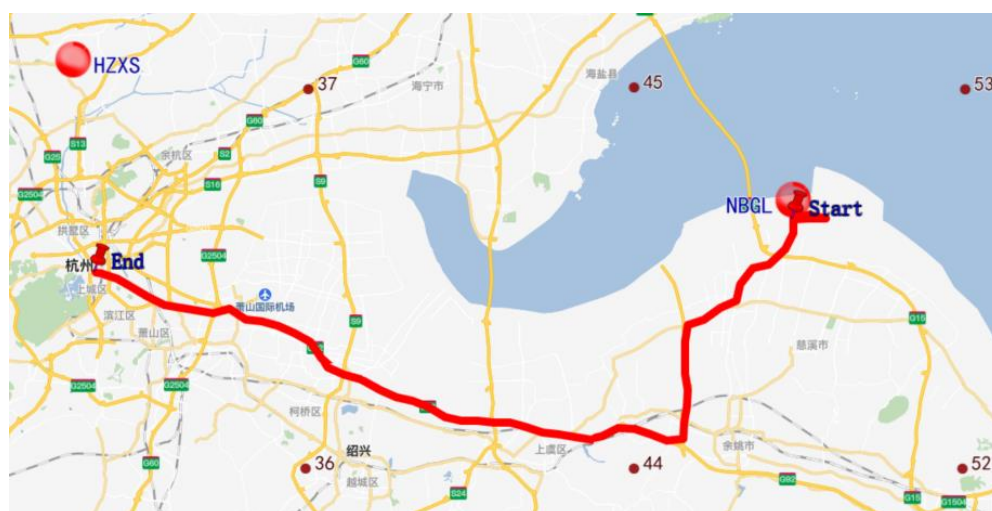


图 6-12 宁波到杭州

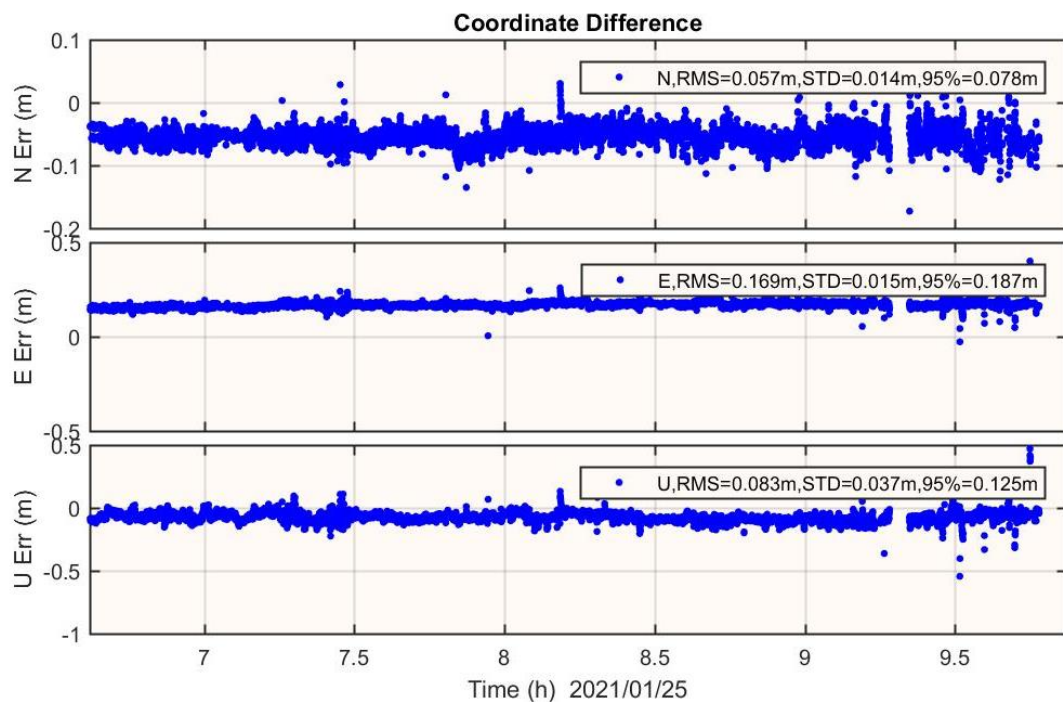


图 6-13 PPP-RTK 动态定位与 VRS 定位结果坐标差时间序列

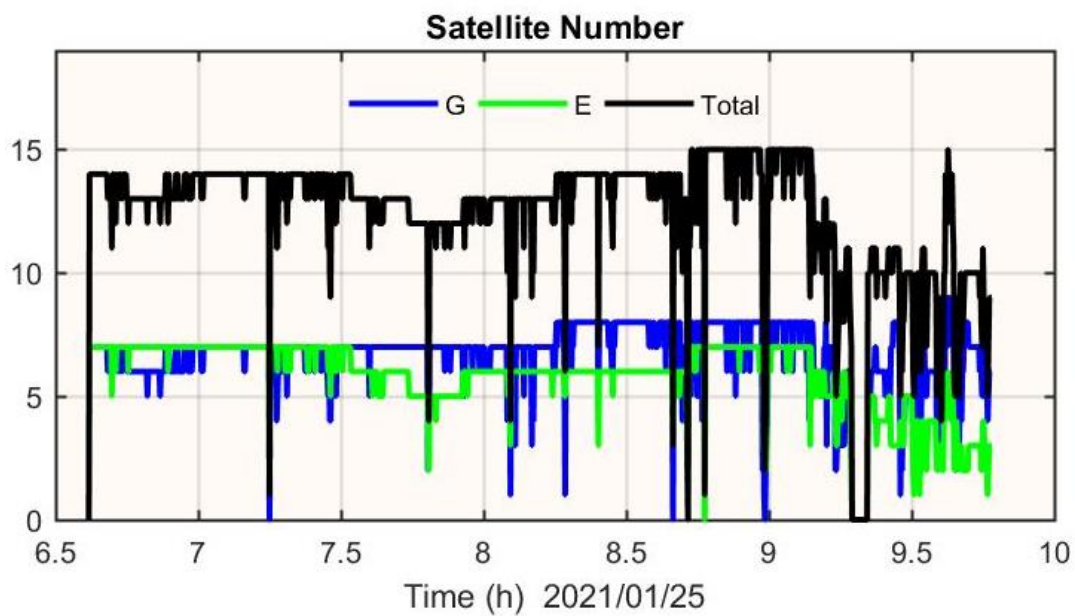


图 6-14 可用卫星数量

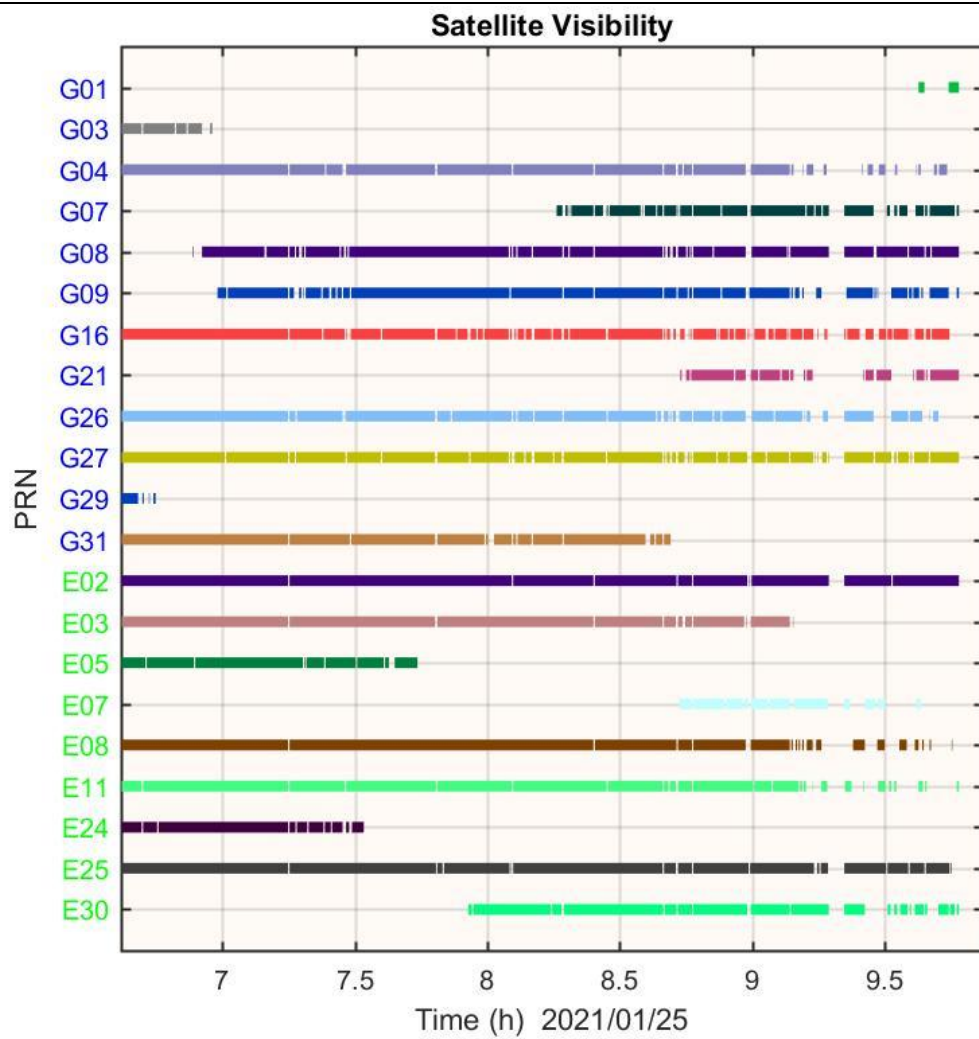


图 6-15 各卫星可视时间

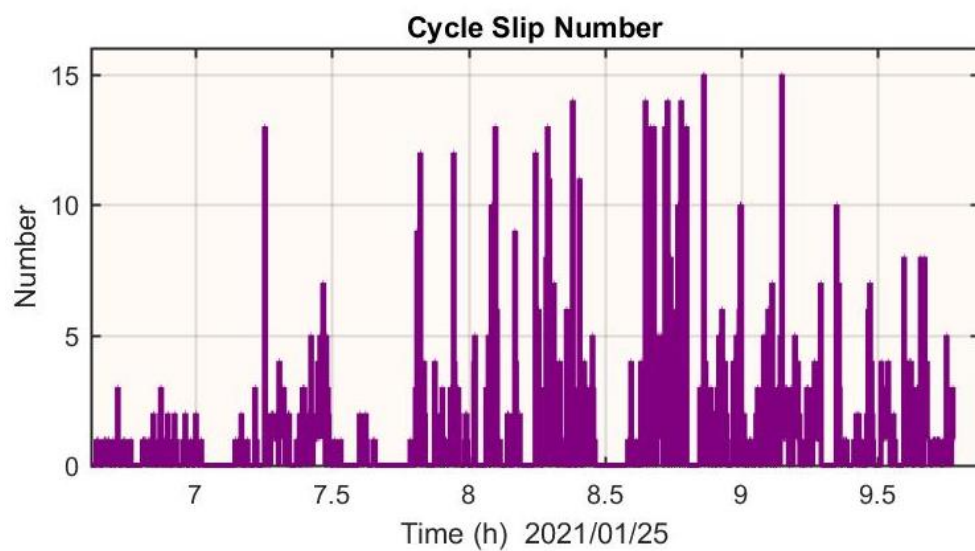


图 6-16 周跳时间序列

6.3.2 定位实验二

动态定位实验二为上海市外环高架，具体路线如图 6-17 所示，总里程约 100km，测试时间为 2021 年 1 月 28 日 3:30-5:20 (UTC)，总时长约一小时五十分钟，采样率为 1s。

对定位结果进行精度评估，评估结果如图 6-18 所示。其中，模糊度历元固定率为 80%，在定位开始的前几个历元就能实现模糊度固定。以 VRS 定位结果为基准对 PPP-RTK 动态定位固定解的结果进行精度评估，以 STD 为精度评估标准，其中，N 方向的 STD 为 25mm，E 方向的 STD 为 21mm，U 方向的 STD 为 55mm。从图 6-18 中可看出，在测试期间，好几个时间段模糊度固定失败，分析原因，画出测试期间可用卫星数量图，如图 6-19 所示，模糊度固定失败的时间段对应的可用卫星数量较少甚至为 0，从图 6-20 中各卫星可视时间也可得出相同的结论。

与实验一相比，模糊度历元固定率和定位精度均有所下滑，这是由于上海外环高架的遮挡情况比实验一要严重，导致某些时间段可用卫星数量较少。但是，定位精度依然处于较高的水平，说明即使在有遮挡的情况下，双系统动态 PPP-RTK 定位依然具有较高的可靠性。

此外，图 6-21 给出了定位测试期间的周跳时间序列。

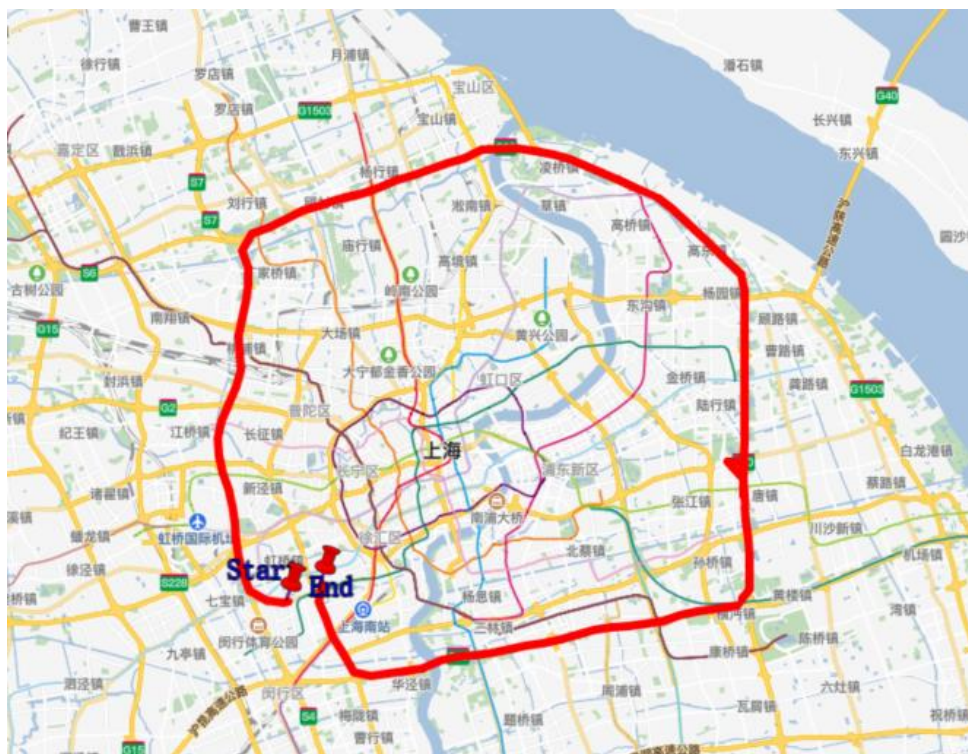


图 6-17 上海外环高架

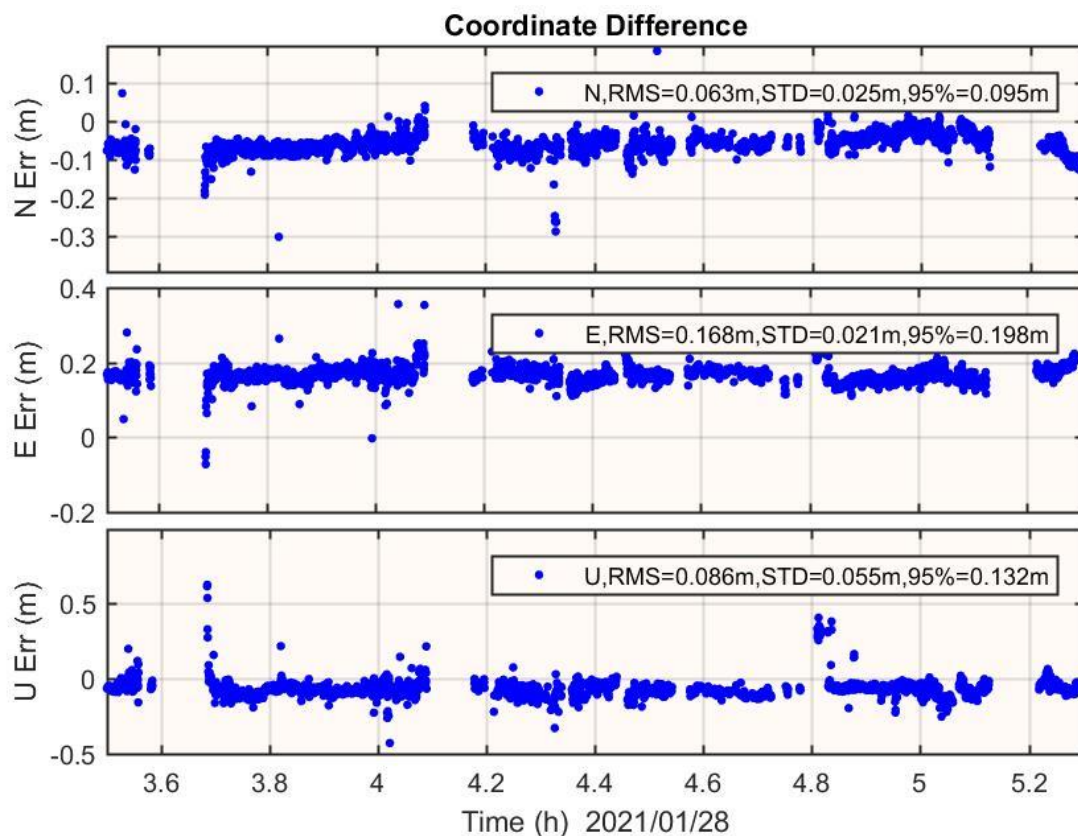


图 6-18 PPP-RTK 动态定位与 VRS 定位结果坐标差时间序列

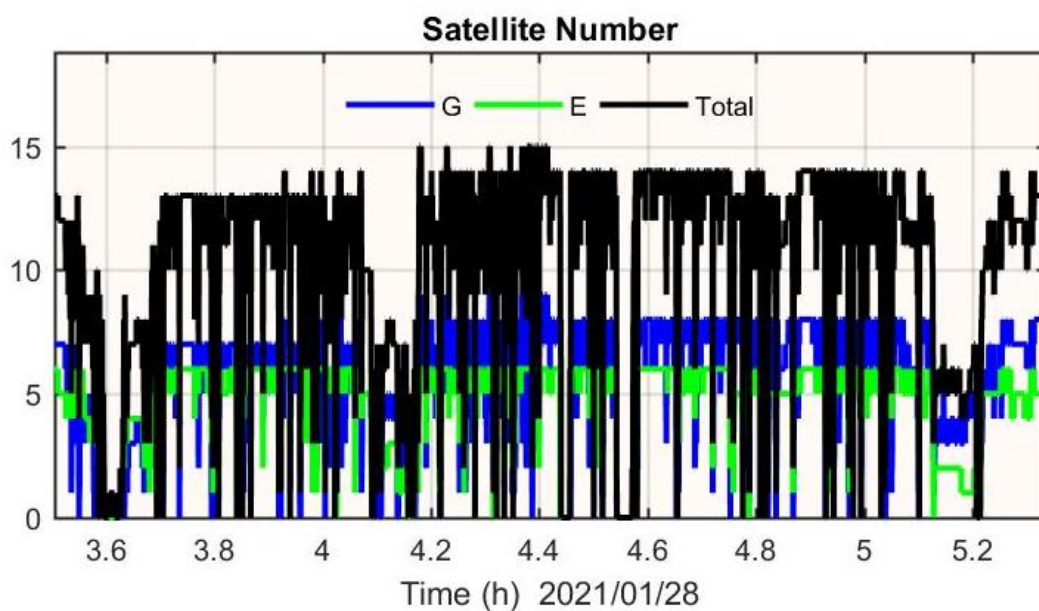


图 6-19 可用卫星数量

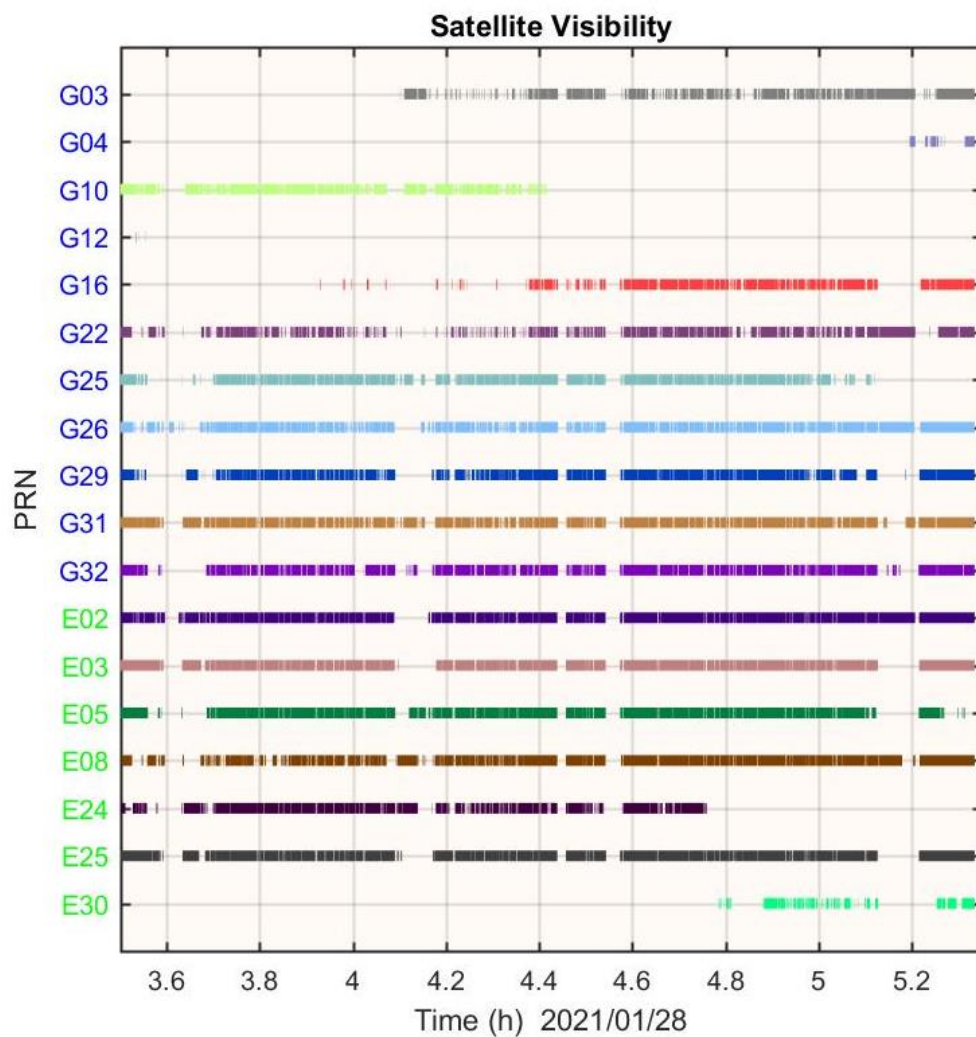


图 6-20 各卫星可视时间

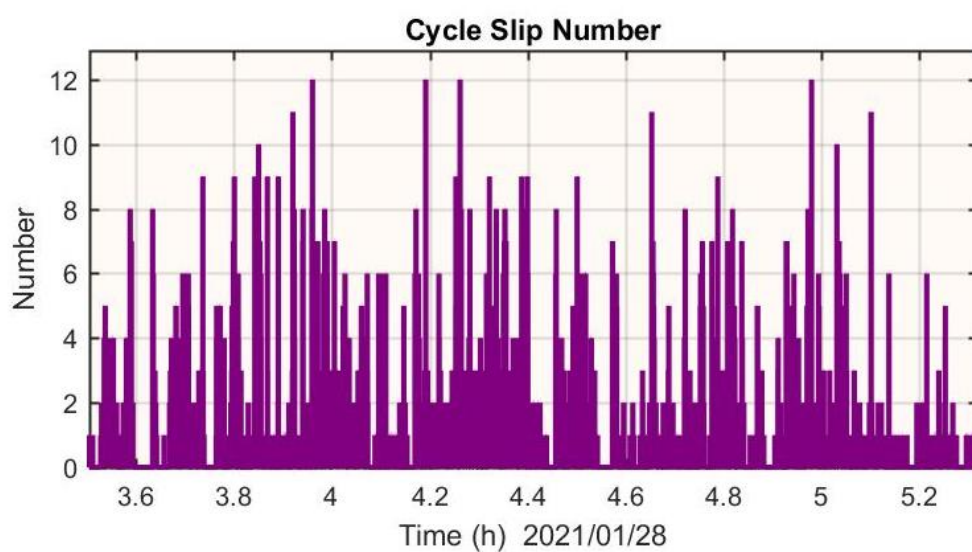


图 6-21 周跳时间序列

6.4 本章小结

基于 CNES 提供的实时轨道钟差改正数, 上海天文台提供的 UPD 产品、DCB 产品以及区域大气延迟产品, 首先对某区域的 11 个测站进行多系统静态站仿动态 PPP-RTK 定位解算。结果表明: (1) 定位精度方面, 大部分测站在水平方向定位误差 RMS 在 12mm 以内, 垂直方向定位误差 RMS 在 40 mm 以内, 各测站定位误差 RMS 在北、东、高三个方向的平均值为 12.3 mm、10.9 mm、36.1 mm; (2) 模糊度首历元固定比例方面, 绝大部分测站定位解算时模糊度可以在第一个历元成功固定比例在 95%以上, 平均为 95.49%; (3) 模糊度历元固定率方面, 所有测站的模糊度历元固定率相当, 均在 98%以上, 平均固定率为 98.63%。

此外, 还进行了多系统动态 PPP-RTK 定位实验, 将千寻位置提供的 VRS 定位结果作为参考。结果表明: (1) 定位精度方面, 多系统动态 PPP-RTK 能够提供与 VRS 精度相当的定位服务, 具有较高的可靠性; (2) 基本上能实现在定位开始的 5s 内实现模糊度正确固定; (3) 在卫星可视条件较好的情况下, 能实现 97%的模糊度历元固定率, 在有遮挡的情况下, 依然能实现 80%左右的模糊度历元固定率。

第7章 总结与展望

7.1 工作总结

本文简要回顾了 GNSS 的发展史，介绍了国内外 RTK 的研究现状、PPP 的研究现状，系统的分析了 PPP-RTK 定位技术的发展与现状、关键问题与挑战、优势与前景、强大的市场需求，阐明了 PPP-RTK 技术是现代 GNSS 技术发展的必然趋势。从而引出本文的研究目标以及研究内容。

在此基础上，深入研究了 PPP-RTK 技术的定位理论和方法，包括 PPP-RTK 定位模型（观测方程、随机模型以及参数估计方法）、主要误差处理、数据预处理与质量控制策略；并针对多系统实时数据预处理、多系统精密实时轨道钟差恢复与精度评估、整周模糊度固定、数据接收与内存管理等关键问题进行了深入研究，制定了对应的解决方案。最后，编程实现上述算法，开发了一套 PPP-RTK 用户端定位程序，并通过评估 CNES 提供的 SSR 的精度、用实测数据进行多系统静态站仿动态和动态 PPP-RTK 定位实验，验证算法的正确性、程序的计算性能以及产品的服务精度。本文的具体研究工作和成果主要如下：

1. 系统推导了基于 GNSS 基本观测方程的星间单差 PPP-RTK 的函数模型和随机模型，根据 PPP 的数据处理策略，梳理了 PPP-RTK 模型中各类偏差的定义和处理方法。探讨了 PPP-RTK 的滤波模型和参数估计方法。

2. 介绍了 PPP-RTK 模糊度固定的关键技术。重点研究了基于 UPD 估计的模糊度固定方法，详细推导了 PPP-RTK 服务端估计 UPD 的方法，以及 PPP-RTK 用户端使用服务端提供的 UPD 产品实现模糊度固定的方法。此外，还介绍了 LAMBDA 算法的实现、模糊度固定检核以及部分模糊度固定子集选取。

3. 在 Linux 下搭建了 PPP-RTK 数据接收与内存管理平台。基于 BKG 提供的 BNC 软件、NTRIP 协议、RTCM 格式以及 ACE 共享内存，开发了数据接收与内存管理的程序，实现了 PPP-RTK 服务端与用户端各板块之间的实时数据交互与管理。

4. 基于现有的 IGS 实时服务产品，实现了多系统实时精密轨道钟差恢复和精度分析。使用 GFZ 提供的事后精密轨道钟差，评估了 CNES 提供的多系统实时轨道钟差改正数的精度。结果表明：（1）轨道精度方面，GPS、GALILEO 和 BDS-3 绝大多数卫星径向精度在 3cm 以内，BDS-3 中，C27-C28、C38-C40 的轨道精度明显低于其他卫星，且 BDS-3 实时轨道的切向精度较差，这是由于目前 BDS-3 刚建成不久，全球观测站数量还较少，随着后续观测站的增加，应该会

有改善和提升。(2) 钟差精度方面, 扣除基准后, 统计了各系统实时钟差与事后精密钟差差异的 STD, 发现 GPS 和 GALILEO 钟差精度相当(0.12ns), BDS-3 实时钟差的 STD 除 C27-C28、C38-C40 较大外, 其余卫星的均在 0.2ns 左右, 相对于 BDS-2 (除去 C01-C05) 的 0.31ns 有一定的提升。其中 BDS-3 相对于 BDS-2, 轨道和钟差精度均有较大提升, 评估结果与 CNES 公布的精度水平相符合。

5. 实现了 PPP-RTK 用户端仿动态和动态定位解算并进行了精度分析。基于 CNES 提供的实时轨道钟差改正数, 上海天文台提供的 UPD 产品、DCB 产品以及区域大气延迟产品, 对某区域的 11 个测站进行多系统静态站仿动态 PPP-RTK 定位解算。结果表明: (1) 定位精度方面, 大部分测站在水平方向定位误差 RMS 在 12mm 以内, 垂直方向定位误差 RMS 在 40 mm 以内, 各测站定位误差 RMS 在北、东、高三个方向的平均值为 12.3 mm、10.9 mm、36.1 mm; (2) 模糊度首历元固定比例方面, 绝大部分测站定位解算时模糊度可以在第一个历元成功固定比例在 95%以上, 首平均为 95.49%; (3) 模糊度历元固定率方面, 所有测站的模糊度历元固定率相当, 均在 98%以上, 平均固定率为 98.63%。

此外, 还进行了多系统动态 PPP-RTK 定位实验, 将千寻位置提供的 VRS 定位结果作为参考。结果表明: 在卫星通视情况较好时, 动态 PPP-RTK 模糊度历元固定率与仿动态相当, 即使在有所遮挡的情况下, 仍能达到 80%以上的固定率。可得出, 多系统动态 PPP-RTK 能够提供与 VRS 精度相当的定位服务, 具有较高的可靠性。

7.2 进一步工作的方向

本文梳理了 PPP-RTK 的理论与算法, 并使用实测数据实现了多系统 PPP-RTK 仿动态和动态定位, 研究取得了初步的成功, 但仍有一些工作有待完成和深入研究, 将重点从以下几个方面展开:

1. 进一步完善和优化多系统 PPP-RTK 定位模型算法及数据处理策略, 提高多系统 PPP-RTK 定位的精度和可靠性。针对新一代卫星的特性改善已有的多系统 PPP-RTK 定位算法, 并进行性能评估。另外, 本文的多系统 PPP-RTK 定位基于双频观测值, 下一步将研究多系统三频及更多频观测值的 PPP-RTK 定位模型与算法。

2. 算法和定位程序的不断优化与更新升级。尽管已经对算法和定位程序继续进行仿动态和动态实时定位测试, 但采用的动态数据有限且未对定位程序进行最新的实验测试, 下一步将采用更多不同场景不同条件下的动态数据进行算法验证, 积累测试结果, 以此改进和优化算法和程序中的不足之处。

3. 将算法和定位程序在移动端实现。目前 PPP-RTK 定位仅处于研究阶段，还未集成到移动端硬件上，其在实际工程中的应用效果还有待验证，下一步应将 PPP-RTK 定位程序集成到 GNSS 接收机中，进行各种工程应用场景的测试，以检验其定位精度，推动 PPP-RTK 在实际生产中的广泛应用。

参考文献

- [1] 李征航、黄劲松.GPS 测量与数据处理.2010: 武汉大学出版社.
- [2] 刘腾. 多模 GNSS 非组合精密单点定位算法及其电离层应用研究[D].中国科学院大学,2017.
- [3] 彭文杰. 基于稀疏网的 PPP-RTK 理论与应用[D].武汉大学,2017.
- [4] 戴志强. GNSS 实时精密定位服务系统若干关键技术研究[D].武汉大学,2016.
- [5] Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, et al(1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. J Geophys Res Solid Earth 102:5005-5017. Doi:10.1029/96JB03860.
- [6] 张宝成,ODIJK Dennis.一种能实现单频 PPP-RTK 的 GNSS 局域参考网数据处理算法[J].地球物理学报,2015,58(07):2306-2319.
- [7] Wübbena G, Schmitz M, Bagge A. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks[J]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2005:2584-2594.
- [8] Zhao Li,Wu Chen,Rengui Ruan,Xuexi Liu. Evaluation of PPP-RTK based on BDS-3/BDS-2/GPS observations: a case study in Europe[J]. GPS Solutions: The Journal of Global Navigation Satellite Systems,2020,24(4).
- [9] 张润涛. 基于局域参考站的 PPP-RTK 定位技术研究[D].解放军信息工程大学,2017.
- [10] 王彦恒. 基于固定虚拟参考站的星型网络 RTK 关键技术研究[D].东南大学,2019.
- [11] 姚宜斌,胡明贤,许超钤.基于 DREAMNET 的 GPS/BDS/GLONASS 多系统网络 RTK 定位性能分析[J].测绘学报,2016,45(09):1009-1018.
- [12] Rabah M, Basiouny M, Ghanem E, et al. Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery[J]. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2018, 7(2): 220-226
- [13] 肖松涛.基于 VRS 的城市道路改建测量方案设计与实施[J]. 测绘与空间地理信息,2017,40(12):161-162+166.
- [14] Aslanidis N, Kotsakis C. Evaluation of NRTK-Based Heighting Techniques from Different Continuously Operating GNSS Reference Networks in Greece[C]//International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016. 2016: 193.
- [15] Jun Xu, Zhi Jiang,and Liang Chen."Rapid PPP Integer Ambiguity Resolution Assisted with RTK Technology Based on VRS".第十届中国卫星导航年会论文集——S07 卫星导航增强技术.Ed., 2019, 5.
- [16] 吴显兵. 广域实时精密差分定位系统关键技术研究[D].长安大学,2016.
- [17] 陈德忠. 北斗中长距离基准站模糊度快速固定及区域误差建模方法研究[D].武汉大学,2016.
- [18] 张明. GPS/BDS 长距离网络 RTK 关键技术研究[D].武汉大学,2016.
- [19] 沈明星. GNSS 网络 RTK 参考站间三频模糊度解算方法研究[D].武汉大学,2019.
- [20] 潘宗鹏. GNSS 精密单点定位及其质量控制的理论和方法[D].战略支援部队信息工程大学,2018.
- [21] 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[D].同济大学,2019.

- [22] 戴志强. GNSS 实时精密定位服务系统若干关键技术研究[D].武汉大学,2016.
- [23] 王进,杨元喜,张勤,黄观文,韩军强.多模 GNSS 融合 PPP 系统间偏差特性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(04):475-481.
- [24] 周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究[D].华东师范大学,2018.
- [25] 王广兴. 北斗观测值特性分析及其在 PPP 模糊度固定应用中的研究[D].武汉大学,2016.
- [26] 赵兴旺,王庆,潘树国,邓健.LAMBDA 算法的部分模糊度固定及性能分析[J].中国惯性技术学报,2010,18(06):665-669.
- [27] 卢立果.GNSS 整数最小二乘模糊度解算理论与方法研究[J].测绘学报,2017,46(09):1204.
- [28] 张小红,胡家欢,任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1084-1100.
- [29] 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.
- [30] 赵爽. BDS/GPS 实时精密单点定位方法研究[D].战略支援部队信息工程大学,2018.
- [31] 张小红,李星星,李盼.GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1399-1407.
- [32] 曹新运.多系统实时精密单点定位及非差模糊度固定[J].测绘学报,2020,49(08):1068.
- [33] 李晓涛. GNSS 系统间 PPP 模糊度固定理论方法及软件实现[D].武汉大学,2018.
- [34] Hadas T, Bosy J (2015) IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. GPS Solutions 19(1): 93-105.
- [35] Elsobeiey M, Al-Harbi S (2016) Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service. GPS Solut 20(3):565-571.
- [36] Ding W, Teferle FN, Kazmierski K, Laurichesse D, Yuan Y (2017). An evaluation of real-time troposphere estimation based on GNSS precise point positioning. J Geophys Res Atmos, 122(5):2779-2790.
- [37] 李盼. GNSS 精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D].武汉大学,2016.
- [38] Gabor MJ, Nerem RS. GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single difference[C].In:Proceedings of ION GNSS 12th International Technical Meeting of the Satellite Division,Nashville, US, 1999, pp 1569-1578.
- [39] M. Ge,G. Gendt,M. Rothacher,C. Shi,J. Liu. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations[J]. Journal of Geodesy,2008,82(7):
- [40] Laurichesse D , Mercier F , Berthias J P , et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. Navigation, 2009, 56(2):135–149.
- [41] Collins P , Bisnath S , Lahaye F , et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing[J]. Navigation, 2010, 57(2):123–135.
- [42] Jianghui Geng,Xiaolin Meng,Alan H. Dodson,Felix N. Teferle. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison[J]. Journal of Geodesy,2010,84(9):
- [43] 姚宜斌,冯鑫滢,彭文杰,刘磊.基于 CORS 的区域大气增强产品对实时 PPP 的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(12):1739-1748.
- [44] J. Geng,F.N. Teferle,X. Meng,A.H. Dodson. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning[J]. Advances in Space Research,2010,47(10).
- [45] P. S. Oliveira,L. Morel,F. Fund,R. Legros,J. F. G. Monico,S. Durand,F. Durand. Modeling

- tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK[J]. GPS Solutions,2017,21(1).
- [46] D Psychas,S Verhagen,X Liu,Y Memarzadeh,H Visser. Assessment of ionospheric corrections for PPP-RTK using regional ionosphere modelling[J]. Measurement Science and Technology,2019,30(1).
- [47] Teunissen P J G, Odijk D, Zhang B. PPP-RTK: Results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution[J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A, 2010, 42(4):223-230.
- [48] Baocheng Zhang,Yongchang Chen,Yunbin Yuan. PPP-RTK based on undifferenced and uncombined observations: theoretical and practical aspects[J]. Journal of Geodesy,2019,93(7).
- [49] Li X, Ge M, Zhang H, et al. A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning[J]. Journal of Geodesy, 2013a, 87(5): 405-416.
- [50] Gu S, Shi C, Lou Y, et al. Generalized-Positioning for Mixed-Frequency of Mixed-GNSS and Its Preliminary Applications[M]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2013:399-428.
- [51] A. Khodabandeh,P. J. G. Teunissen. PPP-RTK and inter-system biases: the ISB look-up table as a means to support multi-system PPP-RTK[J]. Journal of Geodesy,2016,90(9).
- [52] Han S. Quality Control Issues Relating to Instantaneous Ambiguity Resolution for Real-time GPS Kinematics Positioning [J]. Journal of Geodesy[J] 1997, 71(6): 351-361.
- [53] Ashby N. Relativity in the Global Positioning System. Living Reviews in Relativity, 2003, 55(1):1.
- [54] Schmid R,Dach R,Collilieux X,Ggi A J,Schmitz M,Dilssner F.Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx:status and potential improvements[J].Journal of Geodesy,2016,90(4):343-364.
- [55] Schmid R,Rothacher M,Thaller D,Steigenberger P.Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas[J].GPS Solutions,2005,9(4):283-293.
- [56] Petit G, Luzum B. IERS conventions (2010)[R]. BURRAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES SEVRES (FRANCE), 2010.
- [57] Gao Y, Lahaye F, Héroux P, et al. Modeling and estimation of C1-P1 bias in GPS receivers[J]. Journal of Geodesy, 2001, 74(9): 621-626.
- [58] Zhang X, Guo F, Zhou P. Improved precise point positioning in the presence of ionospheric scintillation[J]. GPS Solutions, 2014, 18(1): 51-60.
- [59] Teunissen P , D Odijk. Ambiguity Dilution of Precision: definition, properties and application[J]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1997.
- [60] Teunissen P J G. Influence of ambiguity precision on the success rate of GNSS integer ambiguity bootstrapping[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(5): 351-358.
- [61] 马立烨. GNSS 部分模糊度解算方法研究[D].武汉大学,2019.
- [62] Jun Wang,Yanming Feng. Reliability of partial ambiguity fixing with multiple GNSS constellations[J]. Journal of Geodesy,2013,87(1):
- [63] 刘基余.RTCM SC-104 数据格式及其应用——GNSS 卫星导航定位方法之四[J].数字通信世界,2016(S2):1-4.

- [64] 高珂, 陈荔城, 范东睿,等. 多核系统共享内存资源分配和管理研究[J]. 计算机学报, 2015, 38(5):1020-1034.
- [65] 李群, 谢立, 孙钟秀. 分布式共享内存的技术和实现[J]. 计算机研究与发展, 1997(5):327-331.
- [66] Kazmierski, K., Zajdel, R. & Sośnica, K. Evolution of orbit and clock quality for real-time multi-GNSS solutions. GPS Solut 24, 111 (2020).
- [67] Georgia Katsigianni,Sylvain Loyer,Felix Perosanz,Flavien Mercier,Radosław Zajdel,Krzysztof Sośnica. Improving Galileo orbit determination using zero-difference ambiguity fixing in a Multi-GNSS processing[J]. Advances in Space Research,2019,63(9).
- [68] Tianjun Liu,Weiping Jiang,Denis Laurichesse,Hua Chen,Xuexi Liu,Jian Wang. Assessing GPS/Galileo real-time precise point positioning with ambiguity resolution based on phase biases from CNES[J]. Advances in Space Research,2020,66(4).
- [69] Mingwei Di,Anmin Zhang,Bofeng Guo,Jiali Zhang,Rongxia Liu,Mengyuan Li. Evaluation of Real-Time PPP-Based Tide Measurement Using IGS Real-Time Service[J]. Sensors,2020,20(10).
- [70] 张锡越. BDS/GNSS 实时精密单点定位算法研究与实现[D].中国测绘科学研究院,2017.
- [71] 尹炬尧. 基于 SSR 改正的实时精密单点定位研究与应用[D].长安大学,2018.
- [72] 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(01):15-19+109.
- [73] 赵爽,杨力,郅尧.基于 SSR 信息的 GPS 实时精密单点定位性能分析[J].大地测量与地球动力学,2019,39(09):952-955.
- [74] 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.
- [75] 刘伟平,郝金明,吕志伟,谢建涛,刘婧,焦博.北斗三号空间信号测距误差评估与对比分析[J].测绘学报,2020,49(09):1213-1221.

致谢

2015年9月，我与同济相遇，与同济测绘相遇，正式成为一名同济人，开始了一场为期四年的美丽邂逅！四年很长，那时毕业对我来说还很遥远，所以我在同济的图书馆、运动场等地方尽情的挥洒着我的青春；四年也很短，转眼间，本科毕业就悄然而至，大家纷纷挥手告别，奔向属于自己的远方。

所幸，2019年9月，我跟同济又开始了一场全新的邂逅，给自己的同济时光续约了三年。时光荏苒，两年半的硕士生涯已接近尾声，在同济的时光也进入倒计时，这段学习生活经历给予我的成长与进步，让我对身边的一切充满感恩与不舍。

首先感谢我的导师王解先老师和陈俊平老师。两位老师学识渊博，因材施教，待人和善，竭尽所能的给予我们科研上的指导和生活上的关心，使得我们乐于学习并学有所得，他们低调务实和精益求精的作风，深深的影响着我们。感谢曾经教育和帮助过我的所有老师，涓涓师恩，铭记于心。

感谢王老师门下各位同门：李浩军老师、王明华师兄、张益泽师兄、王阿昊师兄、侯阳飞师兄、孟令东师兄、任营营师兄、崔浩猛师兄、杨乾峰师兄，还有李鹏远师弟。

感谢在410一起学习和玩耍的宋瑞庆师兄、肖晶鑫师兄、何一辛师兄、刘金锦、宋鑫友、刘俊钊、谭国威师弟，还有廖敏言师姐、李玉婷师姐、叶珍师姐，卞畏畏，陈玉倩师妹和丁慧敏师妹。

感谢天文台一起开组会和写代码的各位同门：王彬师兄、于超师兄、宋子远师兄、丁君生师兄和唐文杰，还有刘姣师姐、王茹圆师姐和崔洁。

感谢中科院上海天文台和浙江时空道宇科技有限公司提供的数据和产品，让我能够顺利完成实验测试。

真诚的感谢师兄师姐师弟师妹以及同届同学给予的帮助，他们不仅在学术上给我指引，在生活中也予以很大的帮助，从他们身上我学到了很多知识。

衷心的感谢我的家人和好友们对我的关心、支持、理解和帮助。

最后，感谢同济！

是终点也是起点，毕业在即，学海无涯。我会怀着感恩之心继续前行！

2022年3月

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

刘东林, 男, 1996 年 10 月生。

2015 年进入同济大学测绘与地理信息学院进行本科教育

2019 年 6 月本科毕业于同济大学, 并被授予工学学士学位

2019 年 9 月开始于同济大学测绘与地理信息学院攻读硕士学位。

已发表论文:

[1]刘东林,王解先.一种计算不规则物体体积和重心坐标的方法[J].工程勘察,2021,49(08):46-50.

[2]刘东林,陈俊平,王解先,侯阳飞,宋子远.多系统实时精密轨道钟差恢复及精度分析[A].中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心.第十二届中国卫星导航年会论文集——S03 导航信号与信号处理[C].中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心:中国卫星导航学术年会组委会,2021:7.

[3]刘东林,王解先.稳健估计方法在点云圆柱拟合中的应用[J/OL].测绘地理信息:1-5[2021-09-08].<https://doi.org/10.14188/j.2095-6045.2019501>.