



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

基于分区综合改正数的非差非组合  
定位研究

姓名：周杨

学号：1731988

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：伍吉仓教授

副指导教师：陈俊平研究员

二〇二〇年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

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

**Research on Undifferenced and  
Uncombined Positioning based on Wide Area  
Differential Service Zone Correction**

Candidate: Zhou Yan  
Student Number: 1731988  
School/Department: College of Surveying and  
Geo-Informatics  
Discipline: Engineering  
Major: Surveying and Mapping  
Supervisor: Prof. Wu JiCang

March, 2020

基于分区综合数的非差分组合定位研究

周 杨

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

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

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

现行的 BDS 广域差分系统使得北斗导航系统的定位精度提升至分米级,其通过播发等效钟差、轨道改正、电离层格网和分区综合改正数作为修正数据,其中分区综合改正数是 BDS 广域差分系统实现高精度定位的关键。

基于分区综合改正数的分区定位传统上在单频定位中使用半合法 (GRAPHIC) 组合;在双频定位中使用无电离层组合。在使用分区综合改正数时,组合方式使得原始观测值噪声被放大,制约了综合改正数的估计精度。为了提高分区综合改正数求解的精度,本文将非差非组合与分区定位结合,探索研究基于分区综合改正数的非差非组合定位方法,依次推导了非差非组合单频分区定位、直接解法非差非组合双频分区定位和附加外部电离层约束的非差非组合双频分区定位的相关理论公式,并且利用陆态网实测数据,对比分析了新方法与传统方法定位结果差异,结果表明。

非差非组合单频分区定位在三个方向的定位精度都有了明显的提升,其动态定位三维总精度提升了 9.8%,而且高精度数据的保持率也较传统单频分区提高了 12.25%;非差非组合双频分区定位的动态定位精度级别保持在同一水平,但是从收敛速度和收敛超时比例来看,附加外部电离层约束的非差非组合双频分区要优于传统双频分区,而直接解法非差非组合双频分区的收敛性没有传统双频分区的好。

**关键词:** 分区综合改正数、非差非组合、北斗定位、电离层

## Abstract

The current BDS Wide Area Differential System improves the positioning accuracy of Beidou navigation system to decimeter level. It broadcasts the Equivalent Satellite Clock, Satellite Orbit Correction, Ionosphere Grid and Zone Correction, among which the Zone Correction is the key to the high-precision positioning.

Based on the Zone Correction, the traditional method of Zone-Divided Positioning is to use Group and Phase Ionospheric Calibration in the single frequency positioning and Ionosphere-Free combination in the dual frequency positioning. But the noisy of original observations is so expended that reducing the accuracy of positioning by using the model of combination. In order to improve the accuracy of positioning by using Zone Correction, we combine the Undifferenced and Uncombined model with the Zone Correction In this paper. study the Undifferenced and Uncombined modle based on the Zone Correction, and deduce the theory about the Undifferenced and Uncombined single frequency Zone-Divided Positioning and the Undifferenced and Uncombined dual frequency Zone-Divided Positioning.by using the data of CMONOC, we compare the difference of traditional Zone-Divided Positioning, and the Undifferenced and Uncombined Zone-Divided Positioning. The results include the following.

the Undifferenced and Uncombined single frequency Zone-Divided Positioning has an obvious accuracy improvement in three positioning directions, its total three-dimensional accuracy has increased by 9.8%, and the retention rate of high-precision data has also increased by 12.25% compared with the traditional single frequency Zone-Divided Positioning; the accuracy level of the Undifferenced and Uncombined dual frequency Zone-Divided Positioning is kept at the same level, but In terms of the convergence rate and the ratio of convergence time-out, the Undifferenced and Uncombined dual frequency Zone-Divided Positioning with external ionosphere constraints is better than the traditional dual frequency Zone-Divided Positioning, while the convergence of the direct solution to the Undifferenced and Uncombined dual frequency Zone-Divided Positioning is not as good as the traditional dual frequency Zone-Divided Positioning.

**Key Words:** Zone Correction, Undifferenced and Uncombined Positioning model, Beidou navigation system, ionosphere

## 目录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 引言.....            | 1  |
| 1.1 GNSS 概述.....         | 1  |
| 1.1.1 GPS 概述.....        | 1  |
| 1.1.2 GLONASS 概述.....    | 2  |
| 1.1.3 GALILEO 概述.....    | 3  |
| 1.1.4 BDS 概述.....        | 4  |
| 1.2 BDS 星基增强系统.....      | 4  |
| 1.3 非差非组合.....           | 6  |
| 1.4 研究背景和意义.....         | 7  |
| 1.5 研究内容.....            | 7  |
| 第 2 章 GNSS 精密单点定位理论..... | 8  |
| 2.1 坐标和时间系统.....         | 8  |
| 2.1.1 坐标系统.....          | 8  |
| 2.1.2 时间系统.....          | 10 |
| 2.2 GNSS 基本观测值.....      | 12 |
| 2.2.1 基本观测值.....         | 12 |
| 2.2.2 观测值的线性组合.....      | 13 |
| 2.3 定位误差分析.....          | 15 |
| 2.3.1 钟差和硬件延迟.....       | 15 |
| 2.3.2 对流层误差.....         | 17 |
| 2.3.3 电离层误差.....         | 23 |
| 2.3.4 天线偏差.....          | 24 |
| 2.3.5 相对论误差.....         | 25 |
| 2.3.6 潮汐误差.....          | 26 |
| 2.3.7 地球自转改正.....        | 27 |
| 2.3.8 相位缠绕.....          | 27 |
| 2.4 本章小结.....            | 28 |
| 第 3 章 北斗分区综合改正数.....     | 29 |
| 3.1 分区改正数原理.....         | 29 |
| 3.1.1 分区改正数计算原理.....     | 29 |
| 3.1.2 分区设计.....          | 30 |
| 3.2 分区改正数传统定位模型.....     | 30 |
| 3.2.1 单频模型.....          | 30 |
| 3.2.2 双频模型.....          | 31 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 3.3 效果分析.....                | 31 |
| 3.3.1 单频定位性能.....            | 32 |
| 3.3.2 双频定位性能.....            | 32 |
| 3.4 本章小结.....                | 34 |
| 第4章 基于分区综合改正数的非差非组合定位.....   | 35 |
| 4.1 基于分区综合改正数的非差非组合定位理论..... | 35 |
| 4.1.1 单频定位模型.....            | 35 |
| 4.1.2 双频定位模型.....            | 37 |
| 4.1.3 电离层估计过程.....           | 40 |
| 4.1.4 虚拟观测方程先验方差.....        | 42 |
| 4.2 程序设计.....                | 47 |
| 4.3 实验结果及分析.....             | 48 |
| 4.3.1 单频动态定位实验结果及分析.....     | 48 |
| 4.3.2 双频定位实验结果及分析.....       | 51 |
| 4.4 本章小节.....                | 55 |
| 第5章 总结与展望.....               | 57 |
| 5.1 工作总结.....                | 57 |
| 5.2 展望.....                  | 58 |
| 致谢.....                      | 59 |
| 参考文献.....                    | 60 |
| 附录.....                      | 63 |
| 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....   | 64 |

## 第1章 引言

### 1.1 GNSS 概述

全球导航卫星系统（GNSS）为无线电定位系统，最先由美国在 GPS（Global Positioning System）上进行相关论证，后续俄罗斯开发出了 GLONASS（Global Navigation Satellite System）、欧盟也紧接着制定了 GALILEO 系统。为了打破垄断，中国基于现有的全球性导航系统，开发并完善了自己的 GNSS 体系，即 BDS（BeiDou System）。以上系统都是全球部署的卫星导航系统，许多国家基于自己的需求，开发了服务与某一地区的区域性系统，这些系统包括日本的准天顶系统（Quasi-Zenith Satellite System），印度的区域导航系统（Indian Regional Navigation Satellite System）。此外，基于高精度定位的需求，又出现了增强系统用于辅助基本导航。

#### 1.1.1 GPS 概述

GPS 最早的是由 4 颗试验卫星进行阶段性的论证；在证明了卫星导航系统的初步可行性后，开始对该系统进行全面研制和试验，进一步通过发射的 7 颗 Block I 卫星探讨了卫星导航系统的应用；经过两阶段的试验工作后，于 1989 年发射第一颗工作卫星，进行卫星组网以便全球覆盖，工作卫星类型随着卫星硬件技术升级而不断更新，主要由 Block 系列构成，见图 1.1。

| LEGACY SATELLITES   |  | MODERNIZED SATELLITES  |   |  |
|---|--|--|---|--|
| BLOCK IA  | BLOCK IIR  | BLOCK IIR-M  | BLOCK IIF   | GPS III/III-F  |
| 0 operational   | 11 operational   | 7 operational  | 12 operational  | 1 operational  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users</li> <li>Precise P(Y) code on L1 &amp; L2 frequencies for military users</li> <li>7.5-year design lifespan</li> <li>Launched in 1990-1997</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>C/A code on L1</li> <li>P(Y) code on L1 &amp; L2</li> <li>On-board clock monitoring</li> <li>7.5-year design lifespan</li> <li>Launched in 1997-2004</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>All legacy signals</li> <li>2nd civil signal on L2 (L2C)</li> <li>New military M code signals for enhanced jam resistance</li> <li>Flexible power levels for military signals</li> <li>7.5-year design lifespan</li> <li>Launched in 2005-2009</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>All Block IIR-M signals</li> <li>3rd civil signal on L5 frequency (L5)</li> <li>Advanced atomic clocks</li> <li>Improved accuracy, signal strength, and quality</li> <li>12-year design lifespan</li> <li>Launched in 2010-2016</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>All Block IIF signals</li> <li>4th civil signal on L1 (L1C)</li> <li>Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity</li> <li>No Selective Availability</li> <li>15-year design lifespan</li> <li>IIIF: laser reflectors; search &amp; rescue payload</li> <li>First launch in 2018</li> </ul> |

图 1.1 GPS 卫星型号及参数

截至 2020 年 1 月 14 日，共有 31 颗工作卫星在 GPS 中服务。其卫星类型和频段可参考图 1.1。GPS 除了以上所介绍的空间星座部分，还有地面监控部分，该部分由 1 个主控站（Master Control Station）、一个备用站（Alternate Master Control Station）、4 个地面天线站（Ground Antenna）、两个远程跟踪站（Remote Tracking Station）15 个监测站（Monitor Station）组成，该部分的设备分布如图 1.2。此外 GPS 还包括用户设备部分，该部分主要通过接收 GPS 信号来获得用户的实际位置。通过研究表明，GPS 的平均定位误差在平面优于 1.9m、高程优于 3.9m。

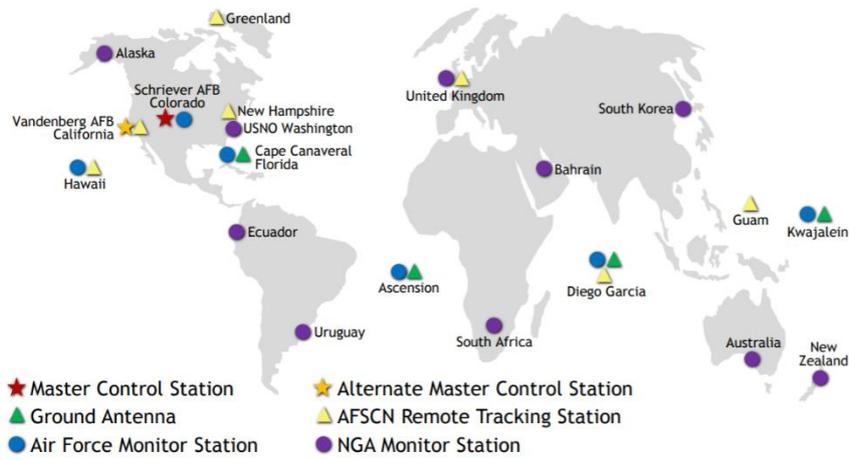


图 1.2 GPS 地面监控系统

### 1.1.2 GLONASS 概述

GLONASS 由俄罗斯自主研发，主要服务于俄罗斯自身的国防和民用需求。截至 2020 年 2 月 26 日，该系统主要由 23 颗工作卫星提供相应的服务，为了保证系统的安全性和稳定性，又通过 3 颗备份卫星、一颗 spars 卫星和一颗相位测试卫星来提供后勤保障。GLONASS 早期使用的是 FDMA 的方式播发信号，每颗卫星广播两种信号 $L_1$ 和 $L_2$ 。具体来说，频率分别为：

$$\begin{aligned} L_1 &= 1602 + n \times 0.5625(\text{Mhz}) \\ L_2 &= 1246 + n \times 0.4375(\text{Mhz}) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式（1.1）中 $n$ 为卫星的频率编号，同一颗卫星满足 $L_1/L_2 = 9/7$ 。

| Satellite series | Launch    | Current status               | Clock error                               | FDMA signals           |                        | CDMA signals |             |                   | Interoperability CDMA signals |             |             |
|------------------|-----------|------------------------------|---|------------------------|------------------------|--------------|-------------|-------------------|-------------------------------|-------------|-------------|
|                  |           |                              |   | 1602 +<br>n×0.5625 MHz | 1246 +<br>n×0.4375 MHz | 1600.995 MHz | 1248.06 MHz | 1202.025 MHz      | 1575.42 MHz                   | 1207.14 MHz | 1176.45 MHz |
| GLONASS          | 1982–2005 | Out of service               | $5 \times 10^{-13}$                       | L1OF, L1SF             | L2SF                   |              |             |                   |                               |             |             |
| GLONASS-M        | 2003–     | In service                   | $1 \times 10^{-13}$                       | L1OF, L1SF             | L2OF, L2SF             | -            | -           | L3OC <sup>†</sup> |                               |             |             |
| GLONASS-K1       | 2011–     | In service                   | $5 \times 10^{-14}$ , $1 \times 10^{-13}$ | L1OF, L1SF             | L2OF, L2SF             | -            | -           | L3OC              |                               |             |             |
| GLONASS-K2       | 2019–     | Test satellite manufacturing | $5 \times 10^{-15}$ , $5 \times 10^{-14}$ | L1OF, L1SF             | L2OF, L2SF             | L1OC, L1SC   | L2OC, L2SC  | L3OC              |                               |             |             |
| GLONASS-V        | 2023–2025 | Design phase                 |   | -                      | -                      | L1OC, L1SC   | L2OC, L2SC  | L3OC              |                               |             |             |
| GLONASS-KM       | 2030–     | Research phase               |   | L1OF, L1SF             | L2OF, L2SF             | L1OC, L1SC   | L2OC, L2SC  | L3OC, L3SC        | L1OCM                         | L3OCM       | L5OCM       |

<sup>†</sup>O: open signal (standard precision), "S": obfuscated signal (high precision); "F":FDMA, "C":CDMA; n=-7,-6,-5,...,6  
<sup>\*</sup>GlONASS-M spacecraft produced since 2014 include L3OC signal

图 1.3 GLONASS 卫星规划建设

随着 GLONASS 的不断更新，俄罗斯开始在新型卫星上调制新的信号，在前期工作中已经更新了 CDMA 信号  $L_3OC$ ，后续还会有更多新信号。GLONASS 的建设规划如图 1.3。

### 1.1.3 GALILEO 概述

欧盟于 1999 年开始 GALILEO 计划，该系统将由 30 颗中轨卫星构成，在每个轨道面上分布均匀的卫星数目，包括 9 颗提供服务的卫星以及 1 颗用于备用的星。其卫星类型和发射计划见图 1.4。

| Block        | Launch Period | Satellite launches |         |         | Currently in operational orbit and healthy |
|--------------|---------------|--------------------|---------|---------|--|
|              |               | Full success       | Failure | Planned |  |
| GIOVE        | 2005–2008     | 2                  | 0       | 0       | 0  |
| IOV          | 2011–2012     | 4                  | 0       | 0       | 3  |
| FOC          | From 2014     | 20                 | 2*      | 12      | 20   |
| <b>Total</b> |               | 26                 | 2       | 12      | 23   |

图 1.4 GALILEO 卫星发射规划

GALILEO 卫星承载有两个有效荷载，其中导航荷载上装有铷钟和氢钟，其观测信号通过专用的 CDMA 的 C 波段上行链路到卫星；SAR 荷载主要用于转发警报。

和 GPS 一样，GALILEO 也包括地面监控和用户设备部分。地面部分由 GALILEO 中心和 GALILEO 传感器提供支持

GALILEO 系统可以为用户提供多种导航服务，其中最重要的是开放服务，该服务信号通过 1164—1214MHz 以及 1563-1591MHz 两个频率向用户播发，两个频段的信号的水平误差小于 4m，垂直误差小于 8m，单个频段水平误差小于 15m，垂直误差小于 35m。

### 1.1.4 BDS 概述

北斗导航系统（BDS）是中国自主开发的卫星系统。该系统致力于为全球用户服务。主要功能包括定位，导航和授时服务的 GNSS 系统，该系统已成功应用于测绘，电信，水利，交通，防灾减灾和公共安全等诸多领域<sup>[2]</sup>。

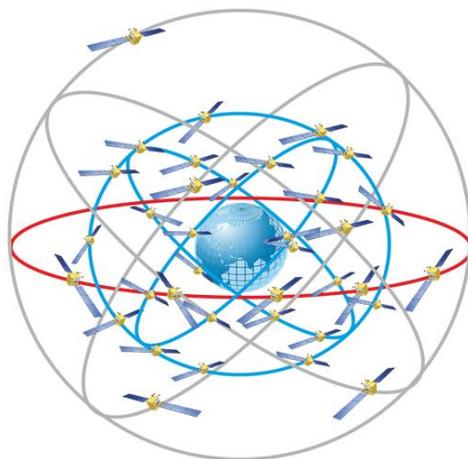


图 1.5 BDS 卫星分布图

BDS 于 2012 年 12 月 27 日开始正式提供服务，BDS-3 于 2020 年基本建设完成。现阶段投入运行的 BDS-2 的卫星部分由三种卫星构成，即 GEO、IGSO 和 MEO 卫星。根据北斗最新发布的 ICD，新一代的导航系统的空间星座将由 3 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星和 24 颗 MEO 卫星构成，其结构见图 1.5<sup>[3]</sup>。

BDS 的地面运控系统由一个主控站，两个注入站和 31 个分布在中国境内的监测站构成。地面系统主要用于观测数据的采集，卫星轨道解算，卫星星历生成和导航电文注入。

BDS 采用三频信号服务，是第一个支持三个频段的卫星系统，其三个频点的频率分别为 1561.098MHz，1207.14 MHz 和 1268.52 MHz。BDS 的性能已通过大量验证，标准定位坐标水平精度一般小于 6 m(95%)，坐标高程精度一般小于 10m(95%)，坐标三维精度一般小于 12m(95%)。北斗伪距差分定位由于受到伪距噪声和多径的影响，使得东、北和高程分量的 RMS 分别为 0.71, 1.14 和 1.90m, 三维位置 RMS 为 2.28m，定位精度落后于 GPS 的单频伪距差分定位<sup>[4]</sup>。对于载波相位差分定位来说，BDS 的定位精度在水平方向的 RMS 保持在 1cm 左右，高程方向的 RMS 优于 2cm<sup>[5]</sup>。

## 1.2 BDS 星基增强系统

全球四大导航系统提供基本导航服务。其使用的广播星历精度较差，使得定位结果只能到达米级。考虑到对高精度定位的日益需求。各国在原本的导航系统上开始研发相配套的增强系统来提高定位精度，其中星基增强系统具有广泛的应用。

美国最开始开展了 WAAS，随后各国也在原有系统的基础上对其进行完善。中国在 BDS 上也开始了星基广域增强系统和差分系统的研究工作。以北斗系统为基础，通过播放四维改正数以减小并修正 BDS 基本导航中存在的各种误差，使得定位精度提高到分米级。这些改正数包括修正卫星钟差和卫星轨道径向误差的等效钟差改正数、修正轨道法相和切向误差的轨道改正数，消除电离层延迟误差的格网电离层改正数和修正各类综合误差的分区综合改正数<sup>[6,7]</sup>，见图 1.6。

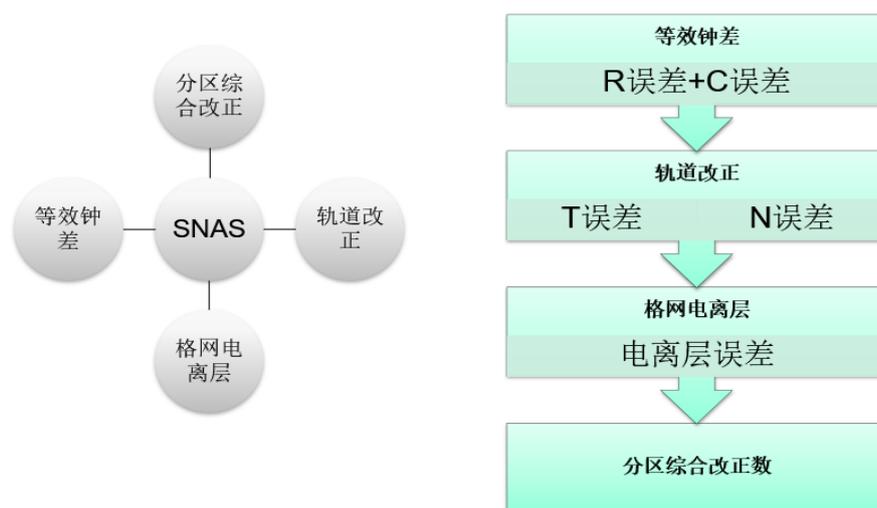


图 1.6 BDS 星基增强系统播发参数

等效钟差改正数是由平滑后的伪距观测值计算过得到的，由于北斗广播星历中的卫星轨道是由多星定轨解算得到的，而其卫星钟差是由星地时间同步得到的，所有轨道和钟差之间不满足自洽性，而等效钟差的作用主要是修正两类方法的卫星钟差之间的偏差值，它不仅包含了钟差改正值，也包括轨道径向改正值<sup>[8]</sup>。等效钟差的量级一般在 3m 以内，通过实验可以得到，经等效钟差改正后，用户的距离误差由 0.91m 降低至 0.26m，用户平均定位误差由 3.11m 提高至 1.22m。

轨道改正数是在等效钟差模型的基础上，进一步提出的对星基广域差分系统的补充。由于等效钟差模型中没有考虑到轨道的切向和法向分量误差，所以轨道改正数用于修正这两类误差，并使得用户实时定位伪距定位 95%精度可以达到水平方向优于 1m，高程方向优于 1.5m。

格网电离层主要服务于单频用户，由分布在中国境内的北斗监测站解算得到，

其电离层修正精度略高于北斗 8 参数和 14 参数电离层模型。

以上改正数使得北斗的定位精度有了明显的提升,但是还没有使得北斗的整体性能提升到分米级,所以在以上改正数的基础上,又提出了分区综合改正数。分区综合改正数以区域为基础,计算相位分区综合改正数和伪距分区综合改正数<sup>[9]</sup>,伪距改正数包括了钟差和轨道改正后的残余误差、接收机钟差误差、对流层残余误差;而相位改正数除了包含以上的误差外,还包含模糊度信息<sup>[10]</sup>。本文第 3 章将会对分区改正数的原理和性能进行详细的分析。

### 1.3 非差非组合

相对于无电离层组合,非差非组合既可以获得较为准确的电离层延迟信息,也可以引入外部的电离层约束来减小模糊度收敛的时间。基于以上优势,在精密单点定位中(PPP)首先引入了这一模型。考虑到多频 GNSS 观测时的弹性以及避免了线性组合中存在的噪声放大的问题,非差非组合为 GNSS 领域提供了一种新的思维。

非组合模型首先由 Keshin 等人提出。2011 年,李玮等人使用非差非组合 PPP 来获取电离层延迟,其实证明了电离层的活动对电离层延迟误差的精度影响不大<sup>[11]</sup>。2013 年,辜声峰研究了多频 GNSS 统一数据处理方法,其基础是通过引入信号特征性时延偏差,使得信号同步;并且在钟差和时延参数去相关这个问题上进行了深入研究,考虑了非差非组合模型各类物理几何参数<sup>[12]</sup>;此外还设计了一种通过迭代约束处理的方法来在非差非组合中分离 UPD。张小红也证明了非差非组合在减小观测噪声方面具有显著优势<sup>[13]</sup>。2014 年,张宝成研究员等对非组合中的各种函数模型和参数模型进行了讨论<sup>[14]</sup>。2015 年,李博峰教授证明了无电离层组合, Uofc 组合和非组合 PPP 定位模型的等价性<sup>[15]</sup>;此外,汪晓龙等人率先在 BDS 上用非差非组合模型对于周跳进行探测和修复,实验表明,新的模型具有很好的稳定性和可行性<sup>[16]</sup>。2016 年,Guo 等人在三频中对非差非组合进行了评估,实验与无电离层组合进行了分析比较<sup>[17]</sup>。2017 年,Liu 等人在多系统非差非组合方面进行了全面的论述和分析,此外,他们还进一步在区域电离层建模中引入非差非组合模型,论证了新模型的可行性,表明了非差非组合在电离层 VTEC 建模时表现更为优秀<sup>[18]</sup>。2018 年,周峰对多系统非差非组合 PPP 的相关内容进行了深入研究,特别是在 GLONASS 的 IFB 以及多系统 GNSS 的 ISB 进行了相应的建模和分析;此外还深入的阐述了单频、双频定位中非差非组合的理论基础,并通过静态实验和动态实验证明了非差非组合在单频中的优越性<sup>[19]</sup>。

总的来说,非差非组合定位在越来越多的领域开始体现出其优点,随着对该

方法的不断理解，这种新的定位模式将发挥更为重要的作用。

## 1.4 研究背景和意义

传统的分区定位一般是通过消去电离层的线性组合来降低电离层延迟的影响，在单频中引入的是 GRAPHIC 组合，通过相位和伪距的线性组合来消除电离层的影响；在双频中引入的是无电离层组合。这些组合只能去除一阶电离层延迟的影响，其剩余的误差小于总延迟的 1%，可认为被完全消去。需要注意的是，以上方法虽然有效，但通过线性组合放大了观测方程的噪声，在 GRAPHIC 组合中，相位中引入伪距，大幅增加了相位观测方差的噪声，直接影响了分区综合改正数的使用效率。

所以受到非差非组合定位在 PPP 中使用的启发，可以考虑在 BDS 广域差分系统中使用非差非组合，通过引进电离层参数，使得分区综合改正数模型的强度得到较大的提升，有利于提升定位结果的精度，也有利于定位的快速收敛。

参考已有的文献以及非差非组合 PPP 的使用效果，可以分别讨论单频分区定位和双频分区定位中相应理论，并通过大量的实验数据来了解新模式下分区定位的效果，为后续相应的分区综合改正数的应用提供参考。

## 1.5 研究内容

基于本文的所要研究的主要课题，其研究内容分为以下几个部分：

第一章介绍了 GNSS 现阶段的发展情况，参考 BDS 现有的广域差分系统以及传统的分区改正数处理手段，通过引入非差非组合这种新模式，论述了本文的研究背景、意义。

第二章介绍 GNSS 的理论基础，包括各种时间系统、空间系统、观测模型、线性组合以及影响定位的重要误差源。

第三章介绍现阶段分区综合改正数的理论，包括分区综合改正数的原理、分区综合改正数的计算方法、分区综合改正数的使用以及通过实际的数据来展示相应的定位效果，以证明广域差分系统对 BDS 定位的提升。

第四章介绍非差非组合的相关理论，并在分区综合改正数中引入非差非组合模型。将分别阐述单频和双频两种定位模式，通过对两种模式的观测方程进行建模和优化、对误差进行分析，进而开发出基于分区综合改正数的非差非组合定位程序，并通过实验数据来验证单频和双频的实际定位效果。

第五章对全文进行了总结。此外还对其中的不足之处进行了展望。

## 第2章 GNSS 精密单点定位理论

精密单点定位（PPP）一是卫星定位中常用的高精度定位方法。PPP 依靠精密的卫星轨道和钟差，对重要的误差源进行各种线性组合、模型化或者参数化，以期得到高精度的定位结果。本章将系统的论述 PPP 中常见的坐标和时间系统、GNSS 的观测方程和各种组合、各类误差源在精密定位中如何处理。

### 2.1 坐标和时间系统

#### 2.1.1 坐标系

##### (1) . 天球坐标系

天球坐标系是一种惯性坐标系。一般是假设该坐标系的原点和三个坐标轴是静止不动的，其示意图见图 2.1。

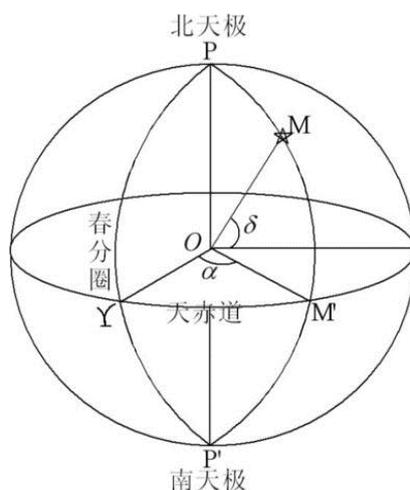


图 2.1 天球坐标系

地球围绕太阳进行运转，其自转轴的方向也在变化。在天球坐标系中定义了黄极这一虚拟极，自转轴将围绕这它缓慢旋转。由于自转轴的运动规律不能直观展示出来，为了能够表达这个变化过程，天文学中引进了长周期运动一岁差、短周期运动一章动。

岁差是一种周期持续 25800 年的圆周运动。它定义为平北天极以北黄极为中心，以黄赤交角为半径进行顺时针旋转。章动的周期为 18.6 年的圆形运动，它定

义为真北天极围绕平北天极进行顺时针旋转。

天球坐标系按照天极的类型可以分为真（极）天球坐标系和平天球坐标系。真天球坐标系的原点为地球质心  $M$ ， $X$  轴指向真春分点， $Z$  轴指向真北天极， $Y$  轴垂直于  $XMZ$ ；平天球坐标系的原点为地球质心  $M$ ， $X$  轴指向平春分点， $Z$  轴指向平天北极， $Y$  轴垂直于  $XMZ$  平面。由平天球坐标系转换到真天球坐标系，需要进行岁差和章动的旋转。

岁差和章动是由引力所引起的，地极的位置除了受到这两者的影响外，还将受到极移的影响。

## (2) . 地球坐标系

地球坐标系和地球相关联，用于描述地球上的物体的位置。地球坐标系受到极移的影响，可以分为平（协议）地球坐标系和真（极）地球坐标系。

其中平地球坐标系的地极为国际协议地极原点  $CIO$ ，具有两种形式：地心空间直角坐标系和地心大地坐标系。两者的坐标原点相同——地球质心，但是一个是通过三维坐标来表达位置，一个是通过经纬度和高程来表达。其中前者的  $X$  轴指向格林尼治起始子午面与地球平赤道的交点， $Z$  轴指向国际协议地极原点  $CIO$ 。后者的椭球短轴和地球自转轴重合。两种坐标系可以进行相应的转换。

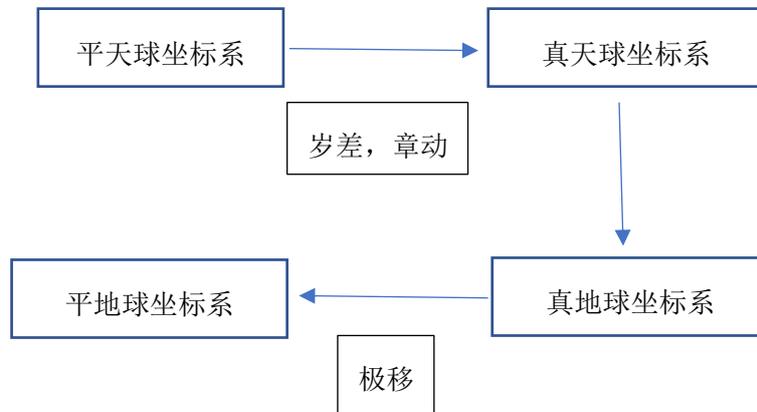


图 2.2 天球坐标系转换关系

真地球坐标系的原点为地球质心  $M$ ， $X$  轴指向平格林尼治起始子午面与地球真赤道的交点， $Z$  轴指向地球的瞬时极， $Y$  轴垂直于  $XMZ$  平面。考虑到真地球坐标系和平地球坐标系在  $Z$  轴的指向存在偏差，所以可以通过极移旋转实现两者的转换。

真天球坐标系和真地球坐标系的  $Z$  轴和中心都是一致的，而两个坐标系之间的  $X$  轴存在一个真春分点时角。综合来看，天球坐标系和地球坐标系之间的

转换关系如图 2.2。

### (3) . GNSS 常用坐标系

GPS 测量中使用的是 WGS-84 坐标系, 该坐标系属于平地球坐标系, 其坐标系原点为地球质心  $M$ ,  $X$  轴指向 BIH1984.0 定义的零子午面和 CTP 赤道的交点,  $Z$  轴指向 BIH1984.0 定义的协议地极,  $Y$  轴垂直于  $XMY$  平面。该坐标系在不断的精化中, 2001 年, 改进后的 WGS-84 坐标系于 ITRF2000 的符合精度为  $\pm 1\text{cm}$ 。

GLONASS 测量中使用的是 PZ-90 坐标系, 其坐标系原点为地球质心  $M$ ,  $Z$  轴指向地球赤道和 BIH 定义的零子午线交点,  $Z$  轴指向 IERS 推荐的地极原点 CTP,  $Y$  轴垂直于  $XMZ$  平面。

GALILEO 测量基于 GALILEO 地球参考框架 ITRF96, 其原点为地球质心  $M$ ,  $Z$  轴指向赤道和 BIH 定义的零子午线交点,  $Z$  轴指向 IERS 推荐的地极原点 CTP,  $Y$  轴垂直于  $XMZ$  平面。

2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 是由中国连续的基准站、大地控制网、天文大地网和空间大地网联合平差所建立的, 该坐标系属于大地坐标系, 为中国的 BDS 所采用的坐标系统。目前该坐标系和 ITRF 的一致性为  $5\text{cm}$ 。CGCS2000 的原点为地球质量中心,  $Z$  轴指向 IERS 的参考极,  $X$  轴指向 IERS 参考子午面与同  $Z$  轴正交的赤道面的交线。其参考椭球的几何中心和坐标系的原点一致, 旋转轴与坐标系的  $Z$  轴保存相同。

## 2.1.2 时间系统

### (1) . 世界时系统

世界时以地球自转为基准, 包括以下几种形式:

恒星时: 以春分点为参考点, 并由该点的周日视运动所确定。恒星时是以春分点通过本地子午线圈时为原点计算的, 具有地方性。考虑到岁差章动对地球自转轴的影响, 春分点的位置也不是固定的, 所以恒星时可以分为真恒星时和平恒星时。

太阳时: 以真太阳作为参考的太阳时称为真太阳时, 一个真太阳日包含二十四个真太阳时。由于真太阳时并不满足稳定的要求, 因此基于该时间系统的平均性定义了平太阳时, 一个平太阳日包含二十四个平太阳时。

世界时: 世界时和平太阳时的尺度保存一致, 差别在于平太阳时是以平正午为 0 时起算的, 而世界时是以平子夜为 0 时起算的。所以两者的关系可以表示为:

$$UT_0 = \theta_{Gm} + 12(h) \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中  $UT_0$  为世界时,  $\theta_{Gm}$  为平太阳时。两者相差 12 小时。

考虑到极移对地球自转的影响, 导致世界时  $UT_0$  不稳定, 所以在  $UT_0$  中引入极移改正:

$$\begin{aligned} UT_1 &= UT_0 + \Delta\lambda \\ UT_2 &= UT_1 + \Delta T_s \end{aligned} \quad (2.2)$$

式 (2.2) 中  $\Delta\lambda$  为观测瞬间地极相对 CIO 的极移改正,  $\Delta T_s$  为地球自转速度的季节性变化改正。

(2). 原子时

原子时的秒定义为铯原子 133 基态在零磁场跃迁辐射振荡 9192631170 周所持续的时间。由于微观世界的原子具有稳定的运动规律, 使得基于原子跃迁而定义的原子时在时间尺度上可以认为是均匀的。原子时的原点定位为:

$$AT = UT_2 - 0.0039'' \quad (2.3)$$

式 (2.3) 中  $AT$  为原子时,  $UT_2$  为世界时。

(3). 协调世界时

地球的自转速度不是均匀的, 存在缓慢减速的趋势, 这就导致原子时和世界时之间差距在不断的变大, 所以定义了一种新的时间系统, 即协调世界时。

| 实施年份  | 6月30日23:59:60 | 12月31日23:59:60 | 实施年份  | 6月30日23:59:60 | 12月31日23:59:60 |
|-------|---------------|----------------|-------|---------------|----------------|
| 1972年 | +1秒           | +1秒            | 1989年 | —             | +1秒            |
| 1973年 | —             | +1秒            | 1990年 | —             | +1秒            |
| 1974年 | —             | +1秒            | 1992年 | +1秒           | —              |
| 1975年 | —             | +1秒            | 1993年 | +1秒           | —              |
| 1976年 | —             | +1秒            | 1994年 | +1秒           | —              |
| 1977年 | —             | +1秒            | 1995年 | —             | +1秒            |
| 1978年 | —             | +1秒            | 1997年 | +1秒           | —              |
| 1979年 | —             | +1秒            | 1998年 | —             | +1秒            |
| 1981年 | +1秒           | —              | 2005年 | —             | +1秒            |
| 1982年 | +1秒           | —              | 2008年 | —             | +1秒            |
| 1983年 | +1秒           | —              | 2012年 | +1秒           | —              |
| 1985年 | +1秒           | —              | 2015年 | +1秒           | —              |
| 1987年 | —             | +1秒            | 2016年 | —             | +1秒            |

图 2.3 跳秒记录

该时间系统具有两个特点: 一是秒长保持和原子时的秒长一样; 二是每隔一段时间将产生跳秒来使得协调世界时尽可能接近世界时, 两者的关系为:

$$TAI = UTC + n(s) \quad (2.4)$$

式 (2.4) 中  $TAI$  为国际原子时,  $UTC$  为协调世界时,  $n$  为跳秒次数。到 2019 年为止, 全球进行了 27 次跳秒, 具体可见图 2.3。

## (1) . GNSS 时间系统

在导航定位中,需要较为精确的时间系统,不同的导航系统根据自身的需求定义了相应的时间系统。

GPS 使用 GPST 作为其时间系统。它与国际原子时 TAI 相差一个常数 19s。由于 GPST 在 1980 年 1 月 6 日 0 时与协调世界时定义一致,所以两者的关系可以表示为式:

$$GPST = UTC + n - 19 \quad (2.5)$$

式 (2.5) 中  $n$  为 TAI 和 UTC 相差的整秒速。到 2019 年,  $n$  为 37。

GLONASS 使用 GLONASSST 作为时间系统,需要注意的是,该时间系统是基于 UTC(SU)。UTC(SU)和国际计量局定义的 UTC 存在微秒量级的差距。GLONASSST 和 UTC(SU)存在 3 小时的时间差,所以综合考虑, GLONASSST 和 GPST 的关系见式。

$$GLONASSST = GPST - n + 19(s) + 3(h) \quad (2.6)$$

式 (2.6) 中  $n$  的定义和式 (2.5) 一样。

GALILEO 的时间系统为 GST,其相对于 TAI 具有偏移,偏移值将通过地面监测站进行观测并播发给用户。

BDS 的时间系统为 BDST,时间的起点为 UTC 时间 2006 年 1 月 1 日。与 GPST 存在一个固定的差值 14s。

## 2.2 GNSS 基本观测值

### 2.2.1 基本观测值

## (1) . 伪距观测方程

通过 GNSS 接收机内部的复制码可以得到伪距观测方程:

$$P_r^s = \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + c \times (d_r - d^s) + \varepsilon_p \quad (2.7)$$

式 (2.7) 中  $P_r^s$  为伪距观测值;  $\rho_r^s$  为卫地距,通过卫星质心到接收机参考点之间的几何距离;  $c$  为光速;  $dt_r$  和  $dt^s$  分别为接收机钟差和卫星钟差;  $I_r^s$  为信号传播方向上的电离层延迟,与频率相关;  $T_r^s$  为信号传播方向上的对流层延迟;  $d_r$  为接收机的伪距硬件延迟;  $d^s$  为卫星的伪距硬件延迟;  $\varepsilon_p$  包括地球自转改正、潮汐改正、相对论改正、多路径改正、天线相位中心改正和伪距测量误差。

伪距的精度和码元有密切联系,对于 C/A 码来说,其码元宽度为 293m,所以 C/A 码得到的伪距精度为 0.293;对于 P 码来说,其码元宽度为 C/A 码的 1/10,所以 P 码得到的伪距精度为 0.029。

## (2) . 载波相位观测方程

载波是定位中重要的观测信息，用于调制测距码和导航电文。因为载波的波长较短，所以依靠载波获得的测距精度非常高。载波观测方程如式：

$$L_r^s = \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda N + \varepsilon_L \quad (2.8)$$

式(2.8)中 $L_r^s$ 为相位观测值； $\rho_r^s$ 、 $c$ 、 $dt_r$ 、 $dt^s$ 、 $I_r^s$ 、 $T_r^s$ 和伪距观测方程中符号的定义一样； $\lambda$ 为频点对应的波长； $N$ 为模糊度，包含了卫星端和接收机端的初始相位偏差和硬件延迟，可以详细表示为 $N = f \times (b_r - b^s) + N_0 + (\varphi_r - \varphi^s)$ ，其中 $f$ 为频点对应的频率， $b_r$ 和 $b^s$ 的定义为接收机和卫星的相位硬件延迟， $N_0$ 为整周模糊度， $\varphi_r$ 为零时刻接收机信号的初始相位， $\varphi^s$ 为零时刻卫星信号的初始相位，一般来说接收机和卫星的初始相位是一致的，所以 $N = f \times (b_r - b^s) + N_0$ ； $\varepsilon_L$ 包含除了与 $\varepsilon_P$ 包含相同的信息外，还包含额外的相位缠绕误差以及相位测量误差。

当接收机锁定卫星信号并开始观测时，只能测量出相位中的小数部分，而相位中的整数部分是无法通过观测手段获取并固定的，该整数部分叫初始整周模糊度。当卫星被锁定并持续观测时，整数模糊度的积累值可以通过计数器测出，但是一旦卫星失锁，那么模糊度的整数性将被破坏，需要重新锁定并产生新的整周模糊度初值。

由于相位具有很高的精度，所以模糊度的确定成功为定位中影响定位精度和收敛时间的重要因素，国内外有大量关于模糊度的讨论和研究。

## 2.2.2 观测值的线性组合

通过对原始伪距观测值  $P_1$  和  $P_2$  和相位观测值  $L_1$  和  $L_2$  进行各种组合，可以得到不同的虚拟观察值，这些组合值具有特别的功能。本节将解算 PPP 中常用的几种线性组合。

### (1) . 无电离层组合 (Ionosphere-Free combination, IF)

无电离层组合常用于双频定位中，考虑到不同频点之间电离层和频率的平方成反比关系，所以可以通过无电离层组合来消去伪距或者相位中的电离层延迟。

对于伪距观测方程来说，电离层组合的表达式为：

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.9)$$

对于相位观测方程来说，电离层组合的表达式为：

$$L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.10)$$

需要注意的是，无电离层组合消除了部分影响，但是组合相位观测方程中的模糊度也不是整数，此外，无电离层组合的噪声为：

$$\sigma_{IF} = \frac{\sqrt{f_1^4 + f_2^4}}{f_1^2 - f_2^2} \sigma \quad (2.11)$$

式 (2.11) 中  $\sigma$  为非组合伪距或者相位的观测噪声。可以看出，无电离层组合观测方程中的噪声相对于非组合具有放大的效应，对于不同的系统来说，频点的频率不同，放大的效应也有所区别。

### (2) . 宽巷组合 (Wide-Lane combination, WL)

宽巷组合的表达式为：

$$\begin{aligned} P_W &= \frac{f_1 P_1 - f_2 P_2}{f_1 - f_2} \\ L_W &= \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

考虑到组合的波长为  $\lambda_W = c/(f_1 - f_2)$ 。所以对于相位的宽巷组合来说，其模糊度可以表示为：

$$\begin{aligned} \lambda_W N_W &= \frac{f_1 \lambda_1 N_1 - f_2 \lambda_2 N_2}{f_1 - f_2} \\ N_W &= N_1 - N_2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

可以看出， $N_W$  为  $N_1$  和  $N_2$  的差值，使得  $N_W$  可以保留整数性，而且  $\lambda_W$  的值较大，可以方便的固定模糊度，而且还常用于周跳的探测和修复。

### (3) . 窄巷组合 (Narrow-Lane combination, NL)

窄巷组合可以表示为：

$$\begin{aligned} P_N &= \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \\ L_N &= \frac{f_1 L_1 + f_2 L_2}{f_1 + f_2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

窄巷组合对应的波长为  $\lambda_N = c/(f_1 + f_2)$ 。其对应的模糊度为：

$$N_N = N_1 + N_2 \quad (2.15)$$

该组合同样保留了模糊的整周特性，但波长较短，不利于模糊的固定。因为组合后观察值的噪声为线性组合中最小的一个，所以常用于短基线中。

### (4) . M-W 组合 (Melbourne-Wubben combination, MW)

M-W 组合由 Melbourne 和 Wubben 两人分别提出，组合的公式为：

$$\frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} + \frac{c(N_1 - N_2)}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = 0 \quad (2.16)$$

M-W 组合实际可视为相位的 WL 组合与伪距的 NL 组合的差值，消去了电离层延迟、卫星钟差、接收机钟差和卫地距。由于该组合中模糊度的波长较长，

所以常用于周跳的探测和模糊度的固定。

(5) . 电离层残差组合 ((Geometry-Free combination, GF)

电离层残差组合的表达式为:

$$\begin{aligned} P_{GF} &= P_1 - P_2 \\ L_{GF} &= L_1 - L_2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

该组合消除了卫星到接收机的几何距离、接收机钟差、卫星钟差、对流层等误差,使得组合观测值中只有电离层项和模糊度项。考虑到电离层的缓慢变化性,该组合在粗差剔除、周跳探测和修复中有很好的优势。

(6) . 半合法组合 (Group and Phase Ionospheric Calibration, GRAPHIC)

半合法组合又叫单频码相位半合观测值组合,该组合常用于单频定位中,通过伪距和相位的组合,可以消除电离层延迟。其表达式为<sup>[20]</sup>:

$$\frac{L + P}{2} = \rho + c(dt_r - dt^s) + T + \frac{\lambda}{2}N + \varepsilon_{\text{GRAPHIC}} \quad (2.18)$$

## 2.3 定位误差分析

GNSS 中影响定位的误差源有很多,接收机端、卫星端以及传播路径上都存在量级较大的各种误差延迟,理解这些误差产生的原因并提出相应的解决方案,对定位的精度将产生极大的提升。GNSS 领域对常见的误差源已经有了一系列的理论和模型,本节将针对 PPP 中的各种误差进行讨论分析,特别是在对流层的相关领域进行了深入探讨。

### 2.3.1 钟差和硬件延迟

(1) . 卫星钟差

卫星钟差定义为卫星上原子钟的钟面时和标准时之间的差异,这种差异每 1ms 将产生 300km 的等效距离误差,所以在定位中必须进行考虑。处理的方法有两种。

一是使用广播星历提供的卫星钟差改正量,这个改正数一般是通过双频的无电离层组合来获得的,但是在 BDS 中,广播星历的钟差改正量是基于 B3 频点获得的,这将导致卫星硬件延迟的改正也有所差别。通常使用二阶多项式来计算卫星钟差,见式:

$$\Delta t = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \quad (2.19)$$

式 (2.19) 中  $a_0$  为钟偏,  $a_1$  为钟漂,  $a_2$  为频率漂移,  $t_{oc}$  为星钟的参考时刻。这几个参数都将包含在导航电文中一起发送给用户。

另一种卫星钟差获取方式为使用 IGS 等机构提供的后处理钟差产品，该产品精度较高，多用于精密定位中。各个机构一般发布多个类型的精密钟差产品，满足不同客户的定位需求，图 2.4 展示了 IGS 的精密星历和钟差产品<sup>[21]</sup>。

| 名称     | 时延        | 更新率  | 精度        |
|--------|-----------|------|-----------|
| 事后精密星历 | 约 11 天    | 每周   | <5cm      |
| 精密卫星钟差 | 约 11 天    | 每周   | 0.1~0.2ns |
| 快速精密星历 | 1d \ 17 h | 每天   | <5cm      |
| 快速卫星钟差 | 1d \ 17 h | 每天   | 0.2~0.3ns |
| 预报精密星历 | 实时        | 12 h | 约 25cm    |
| 预报卫星钟差 | 实时        | 12 h | 约 5ns     |

图 2.4 IGS 精密产品

## (2) . 卫星硬件延迟

信号在卫星内部的传输速度不等于光速，这将产生信号的延迟，GNSS 中把这种延迟引起的误差称为卫星硬件延迟。为了修正该类延迟，需要引入 TGD/DCB 改正<sup>[22]</sup>。

在导航电文中提供 TGD 改正值，IGS 提供 DCB 改正值，TGD/DCB 计算方法和卫星钟差的解算策略相关，以 GPS 为例，在导航电文中提供的卫星钟差是由双频无电离层组合得到的，而且卫星钟差与卫星硬件延迟混在一起，所以卫星钟差可以表示为：

$$dt_{IF}^s = \frac{f_1^2 dt_1^s - f_2^2 dt_2^s}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.20)$$

式 (2.20) 中  $dt_{IF}^s$  为无电离层组合的卫星钟差； $dt_1^s$  为频率  $L_1$  对应的卫星钟差， $dt_2^s$  为频率  $L_2$  对应的卫星钟差。如果把卫星硬件延迟提取出来，那么  $dt_1^s = dt^s + d_1^s$ ， $dt_2^s = dt^s + d_2^s$ ， $d_1^s$  和  $d_2^s$  为两个频点对应的卫星硬件延迟。所以式 (2.20) 可以写为：

$$dt_{IF}^s = dt^s + \frac{f_1^2 d_1^s - f_2^2 d_2^s}{f_1^2 - f_2^2} = dt^s + d_1^s + \frac{f_2^2 (d_1^s - d_2^s)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.21)$$

式 (2.21) 中的  $(d_1^s - d_2^s)$  称为  $DCB_{12}$ ， $f_2^2 DCB_{12} / (f_2^2 - f_1^2)$  称为 TGD。所以当 GPS 定位模式不是无电离层组合时，必须根据使用的频率施加相应的 TGD/DCB 改正。

对应 BDS 来说，其广播星历是由 B3 频点计算得到的，所以提供 B1、B2 频点到 B3 频点的 TGD 改正。对应 B1 频点来说，TGD 改正值为  $TGD_1 = d_1^s - d_3^s = -DCB_{13}$ ，对应 B2 频点来说，TGD 改正值为  $TGD_2 = DCB_{12} - DCB_{13}$ 。于是相应

的卫星钟差改正为<sup>[23, 24, 25]</sup>:

$$\begin{aligned}
 dt_1^s &= dt_3^s - TGD_1 \\
 dt_2^s &= dt_3^s - TGD_2 \\
 dt_{12}^s &= dt_3^s - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} TGD_1 + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} TGD_2 \\
 dt_{13}^s &= dt_3^s - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} TGD_1 \\
 dt_{23}^s &= dt_3^s - \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_3^2} TGD_2
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

### (3) . 接收机钟差和接收机硬件延迟

接收机上面搭载的钟精度较低, 导致接收机钟差稳定的稳定性较差。所以在定位中, 一般是把接收机钟差作为参数进行估计, 并将其模型化为白噪声, 这样两个历元直接的接收机钟差保持独立不相关。接收机的硬件延迟处理起来较为麻烦, 一般认为该项误差被吸收到接收机钟差、相位模糊度等参数中。

## 2.3.2 对流层误差

### (1) . 对流层延迟

对流层的高度一般在 60km 以下, 在对流层中大气具有较强的对流作用, 还包含水滴、尘埃、冰晶等物质。所以对对流层误差实际是由水汽、空气中的各种介质所引起的。在卫星信号传播路径方向上, 对流层的影响可以达到米级<sup>[26]</sup>, 在 PPP 中需要将对流层延迟进行分解以达到较好的拟合效果。就干延迟部分来说, 该部分的特性表现的较为稳定, 许多研究构建的模型足以得到较为精确的结果; 但湿部分的处理就显得复杂, 水汽在空间的活跃性导致了湿部分的变化没有规律性, 这将导致无法进行建模, 所以只能将其视为未知参数<sup>[27]</sup>, 见式。

$$T = m_d \times T_{ZHD} + m_w \times T_{ZHW} \tag{2.23}$$

式 (2.23) 中  $m_d$  为干延迟映射函数;  $T_{ZHD}$  为天顶方向对流层干延迟;  $m_w$  为湿延迟映射函数;  $T_{ZHW}$  为天顶方向对流层湿延迟。

常用的对流层模型包括有 EGNOS、UNB3、UNB3m、GPT、GPT2、GZTD、Saastamonien。映射函数包括 NMF、GMF、VMF1。一般干延迟部分可以占到总延迟的 80%, 通过以上的几种模型可以准确的修正干延迟误差; 但是湿延迟部分因水汽的影响是不确定的, 即使是最精确的模型, 其改正精度也只有 10%-20%<sup>[28]</sup>。所以在实际应用中, 把湿延迟作为参数估计, 其与水汽辐射计监测到的湿延迟变化差值在几个毫米<sup>[29]</sup>, 具有很高的精度, 可以满足高精度定位的需求。湿延迟估

计模型中的分段常数模型、分段线性模型和随机游走模型都可以显著提高垂向的重复性<sup>[30]</sup>。

### (2) . 对流层梯度的影响

水平梯度对 PPP 的影响在各个方向上是不均匀的，这将导致对流层湿延迟最小的方向并与实际的天顶方向相差一个微小的角度 $\delta_Z$ ，使得卫星视线到天顶方向的高度角 $Z$ 与卫星视线到湿延迟最小方向的高度角 $\tilde{Z}$ 不相等东西向和南北向引入两个梯度因子 $G_n$ 和 $G_e$ 后，角度 $\delta_Z$ 可按以下公式计算<sup>[31]</sup>：

$$\delta_Z = G_n \times \cos A + G_e \times \sin A \quad (2.24)$$

式 (2.24) 中 $A$ 为方位角，所以天顶湿延迟为：

$$\begin{aligned} m_w(\tilde{Z}) &= (m_w(Z) + G_n \times \cos A + G_e \times \sin A) \\ &= \left( m_w(Z) + \frac{\partial m_w(Z)}{\partial Z} \times G_n \times \cos A + \frac{\partial m_w(Z)}{\partial Z} \times G_e \times \sin A \right) \\ \frac{\partial m_w(Z)}{\partial Z} &= -m_w(Z) \times \frac{1}{\tan Z} \end{aligned} \quad (2.25)$$

有很多研究在对流层领域取得了不错的进展，但是在相关的梯度领域的内容还有待完善。本文基于分段常数模型，采用 17 个 GNSS 观测站站 6 年数据进行单天 PPP 解算，采用两种模式来研究梯度对定位的影响。相关设定如表 2.1。

表 2.1 模式设定

| 模式     | 分段常数模型         | 分段常数模型+梯度      |
|--------|----------------|----------------|
| 湿延迟间隔  | 2小时            | 2小时            |
| 梯度估计间隔 | 不估计            | 12小时           |
| 干延迟模型  | Saastamonien模型 | Saastamonien模型 |
| 湿延迟模型  | MOPS模型         | MOPS模型         |
| 投影函数   | NMF模型          | NMF模型          |

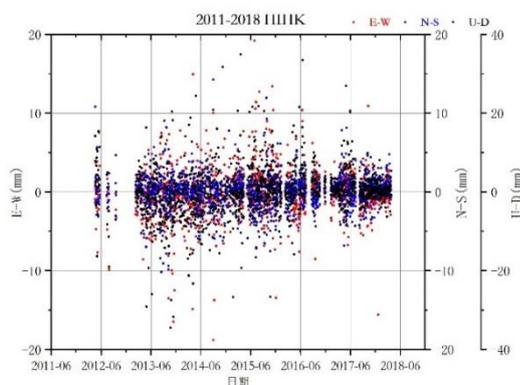


图 2.5 梯度参数引入后的差值

图 2.5 列出了其中一个监测站在 NEU 三个方向的坐标偏差在加入梯度参数后的变化情况，时间跨度为 6 年。

为了获得较为普遍性的结论，本文选取了中国的 17 个陆态网测站，解算了这些测站连续 6 年（2012-2018）静态单点定位的结果，统计了这些测站在 PPP 模式下每日解算坐标偏差的均值、标准差和均方根误差，其具体内容见图 2.6、图 2.7 和图 2.8。

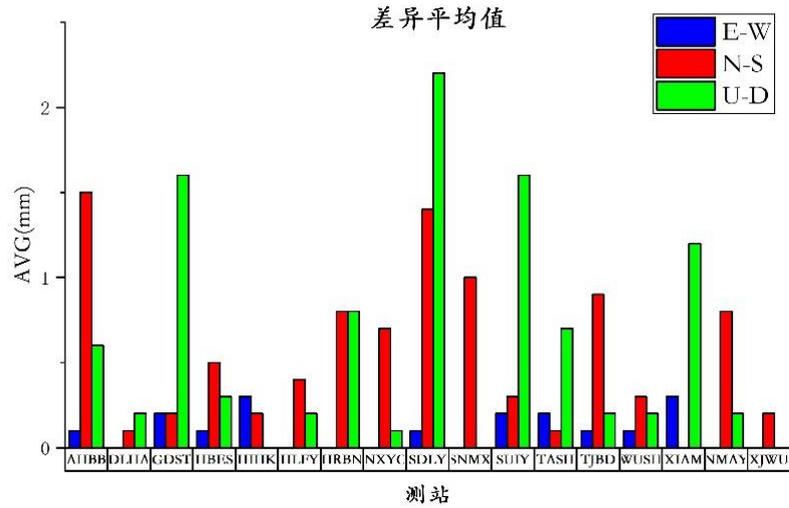


图 2.6 两种模式解算下坐标差值均值

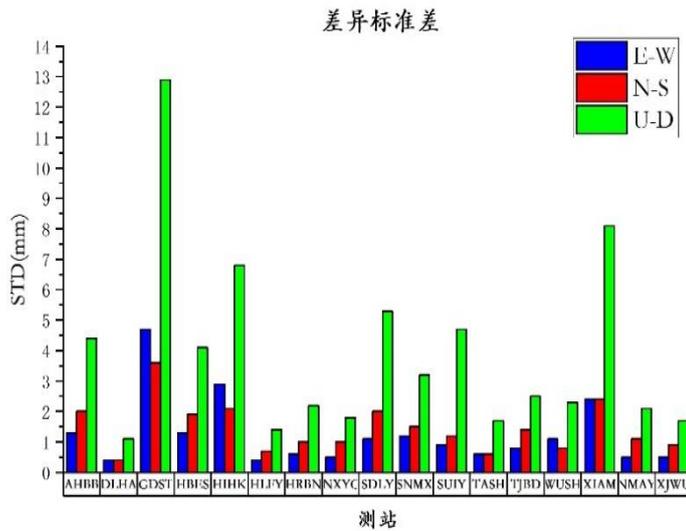


图 2.7 两种模式解算下坐标差值标准差

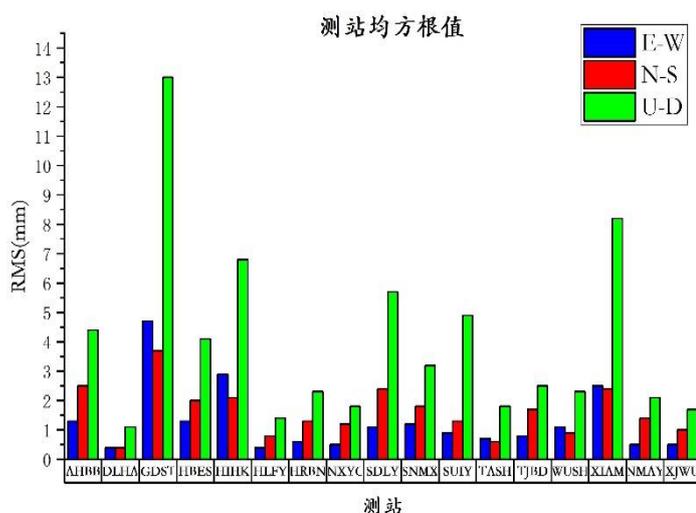


图 2.8 两种模式解算下坐标差值均方根值

分析可以得知,

- ① 对流层分段常数模型中梯度的差异对定位的影响保持在 mm 级别, 无论是从差异的均值, 还是从差异的 STD 和 RMS 来看, 这些统计量都在较低的水平, 说明这种变化具有一定程度的稳定性。
- ② 高程方向的差异表现的较为突出, 水平方向的差异不那么明显, 表明梯度参数对定位的影响集中在高程方向上。此外, 就影响的程度来说, U-D 分量最大偏差 RMS 超过 1cm, 同时 E-W 和 N-S 分量最大偏差不超过 5mm。

将这些测站的 RMS 信息统计进表 2.2, 并给出这些测站的地理位置, 如图 2.9。结果表明: GDST 站、HIHK 站、SDLK 站和 XIAM 站的在三个方向的差异都较大, 而且这几个站都集中在近海地区; 而 DLHA 站、HLFY 站、HRBN 站、NXYC 站和 TASH 站在三个方向的差异较小, 而且都处于内陆地区。所以梯度对定位的影响与测站地理分布相关, 其中靠近大海将使得梯度对定位的影响极具加深, 而远离大海, 梯度将难以对定位产生影响。

表 2.2 测站分布及 RMS

|      | 测站   | E-W | N-S | U-D |      | 测站   | E-W | N-S | U-D |
|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|
| 沿海测站 | GDST | 4.7 | 3.7 | 13  | 内陆测站 | DLHA | 0.4 | 0.4 | 1.1 |
|      | HIHK | 2.9 | 2.1 | 6.8 |      | HLFY | 0.4 | 0.8 | 1.4 |
|      | SDLK | 1.1 | 2.4 | 5.7 |      | HRBN | 0.6 | 1.3 | 2.3 |
|      | XIAM | 2.5 | 2.4 | 8.2 |      | NXYC | 0.5 | 1.2 | 1.8 |

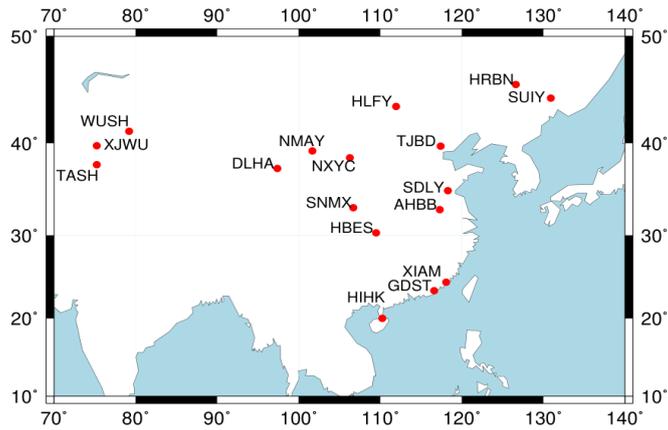


图 2.9 测站地理分布

### (3) . 对流层梯度的时间分辨率

由于的定位解算中，考虑到对流层的变化特性，对流层梯度是按照 12 小数进行一次分段<sup>[32]</sup>。但这是基于人们日常的认知来设定的，而实际的梯度时间分辨率的合理取整是否为 12 小时还有待研究。本文通过世界均匀分布的十个测站，统计了在不同梯度时间分辨率下的定位性能，测站分布见图 2.10。

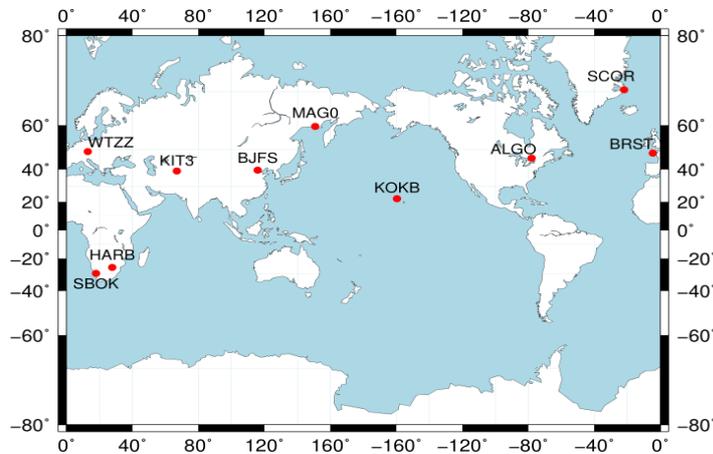


图 2.10 全球测站地理分布

时间分辨率设置为 2 小时、4 小时、8 小时、12 小时。以 WTZZ 站为例，其不同分辨率下的定位坐标差异见图 2.11。依次是 2 小时与 12 小时的差异、4 小时与 12 小时的差异、8 小时与 12 小时的差异。

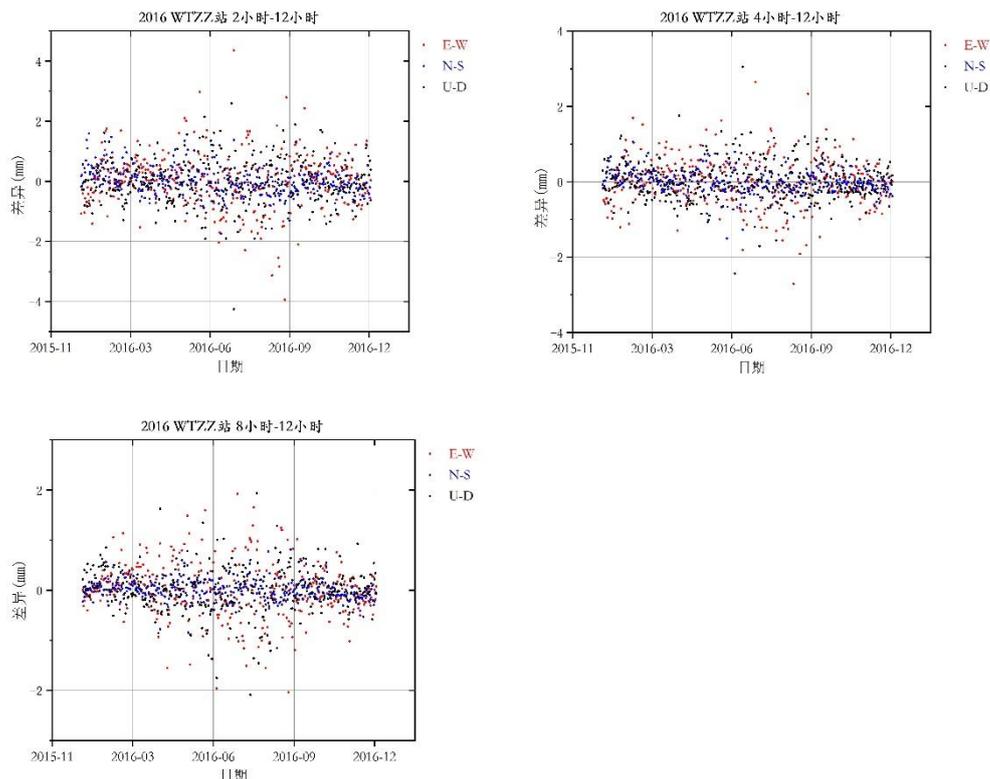


图 2.11 不同分辨率下定位坐标的差异

以 12 小时分辨率下的定位结果作为基准值，统计了各分辨率下的定位结果与基准值差异的 RMS 值，见图 2.12、图 2.13、图 2.14。

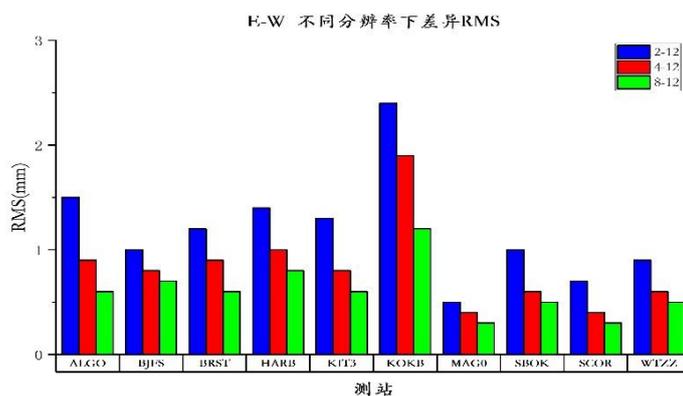


图 2.12 E-W 方向不同分辨率下定位差异 RMS

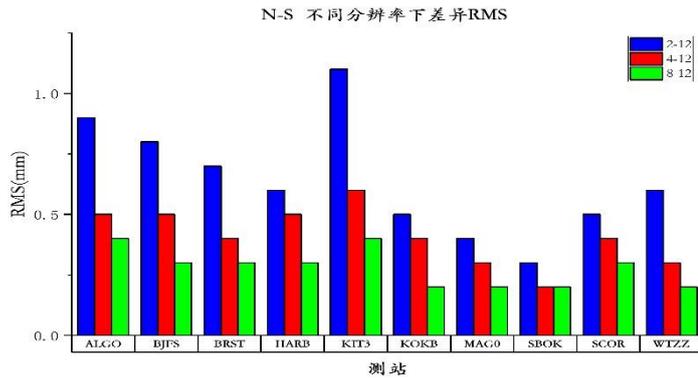


图 2.13 N-S 方向不同分辨率下定位差异 RMS

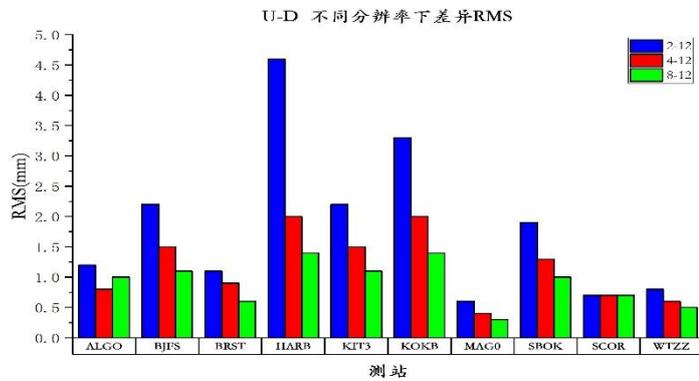


图 2.14 U-D 方向不同分辨率下定位差异 RMS

通过以上实验可以说明，梯度的时间分辨率对定位的影响较小，说明依靠细化梯度的分辨率不足以优化定位结果。在考虑估计误差方程解算模型强度的基础上，梯度分辨率设置为 12 小时比较合理，这样可以得到较为准确的定位结果。

### 2.3.3 电离层误差

电离层一般是指 60km—1000km 高度的大气空间。在电离层中分布着大量的电子和离子，形成了一个等离子区域，信号在该区域传播时会发生各种物理现象，并且影响会随着信号频率的增加而减少。伪距和相位的电离层延迟量可以表示为：

$$\begin{aligned}
 I_L &= -\frac{40.3}{f^2}TEC \\
 I_P &= \frac{40.3}{f^2}TEC
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

式 (2.26) 中  $TEC$  为总电子含量，是沿卫星信号路径对电子密度的积分。在 PPP 中，电离层主要通过双频无电离层组合、电离层模型进行消除或者改

正。而在非差非组合定位中，电离层一般通过参数估计的方式来处理，这将在第四章对此内容进行详细描述。本节介绍传统 PPP 中电离层的处理策略。

### (1) . 双频改正法

在双频定位中，两个频点伪距的电离层具有以下特性：

$$\frac{f_1^2 I_1 - f_2^2 I_2}{f_1^2 - f_2^2} = \frac{f_1^2 \frac{40.3TEC}{f_1^2} - f_2^2 \frac{40.3TEC}{f_2^2}}{f_1^2 - f_2^2} = 0 \quad (2.27)$$

相位的电离层也具有该特性。双频无电离层组合很好的消去了一阶电离层误差，但同时也放大了观测方程的噪声，这在分区定位中也有很好的体现。

### (2) . 电离层模型

电离层模型包括有多种类型，主要分为以下几种。

Bent 模型对 1000km 以下的电离层计算有效，通过构建电子密度图，该模型的有效精度为 60%。

IRI 模型是一种统计预报模型，通过发布的参数，用户可以获得平静电离层的平均状态。由于该模型考虑的是平均水平，所以对于区域来说，获得的电离层延迟精度不高。

Klobuchar 模型是单层电离层模型，假设所有的电子都集中到一个面上。通过传播路径在电子面上的穿刺点的位置和地方时，可以获得 50%—60%的改正精度。该模型所需要的参数可通过导航电文播发给用户，由于模型结构简单，计算方便，所以在单频定位和双频定位中都有应用。

电离层格网模型根据区域的特性来建立区域性的电离层信息，通过穿刺点周围最近的格网点的电子含量内插出穿刺点的电子含量。BDS 的广域差分系统也播发电离层格网信息，其精度为 0.5m，可用性为 95%<sup>[33]</sup>。

GIM 模型是 IGS 发布的全球性电离层模型，每 2h 提供一组新参数。通过经度每 5°、纬度每 2.5° 的电离层电子参数，可以计算出每一个位置的垂直电子信息。用户根据经纬度和时间内插出特定地点的 VTEC 值，即可求出电离层延迟。GIM 模型在不同纬度的地区精度有所区别，一般来说，低纬度地区的精度较高，但总体的平均精度有 90%以上，是一种较为准确的电离层模型<sup>[34]</sup>。

## 2.3.4 天线偏差

GNSS 观测值是卫星端的天线相位中心到接收机端的天线参考点的距离，但在计算过程，卫星端和接收机端都存在参考点的偏移问题。

就卫星端来说，当用户使用的星历为广播星历时，解算出来的卫星坐标是以天线相位为中心，此时不需要改正卫星端的天线偏差；但是当用户使用的星历为

精密星历时,给出的卫星坐标是卫星质心的坐标,与观测数据的参考中心不一致,这个差异就是天线偏差。同理,接收机端在接收卫星数据后得到的接收机坐标是基于接收机的瞬时相位中心,而用户实际需要的是天线参考点的坐标 (Antenna Reference Point, ARP),所有这两个接收机端中心点的差异也必须给予考虑<sup>[35,36]</sup>。

天线相位中心受到卫星高度角和卫星方位角的影响,而卫星的位置又是实时的在变动,这使得瞬时相位中心的位置也是在不断的变化的。所以为了更好的确定坐标,定义了平均相位中心,即瞬时相位中心的均值。在实际的定位中,通常定义了两个改正量来方便用户进行天线修正,其中天线相位中心偏差 (Phase Center Offset, PCO) 定义为卫星质心或者接收机 ARP 与平均相位中心之间的差异;天线相位中心变化 (Phase Center Variation, PCV) 定义为瞬时相位中心和平均相位中心的差异,其区别见图 2.15。

从 2006 年 11 月以前,IGS 一致采用相对天线相位中心改正模型用于修正接收机的天线偏差,该模型以标准型天线的 PCO 作为参考,同时假设 PCV 为 0。由于改正的误差并不准确,2006 年 11 后统一使用绝对天线相位中心改正模型,该模型考虑 PCO 和 PCV 两类误差。对于卫星端的天线偏差,IGS 发布 PCV,不考虑 PCO。

就 BDS 系统来说,其卫星的 PCO 改正值使用默认常数 (0.6, 0.0, 1.1) m。

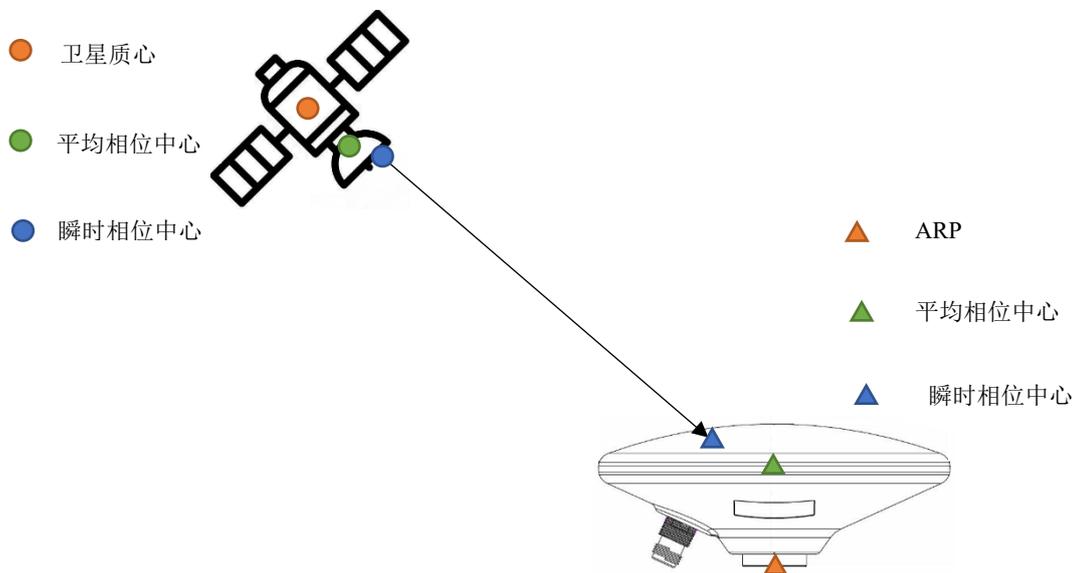


图 2.15 天线相位示意图

### 2.3.5 相对论误差

GNSS 卫星围绕地球进行旋转,狭义相对论将会影响卫星和接收机的时钟读

数,同时根据广义相对论,卫星的地球重力位和海平面的地球重力位差异将使得卫星钟受到影响<sup>[37]</sup>。

综合来说,相对论效应会影响到卫星轨道、卫星信号传播、卫星钟和接收机钟。对于卫星轨道的影响主要在卫星定轨时考虑,定位用户端无需考虑。卫星信号在传播过程中与海平面有重力位差,由于重力位差在信号从上到下传播时逐渐减小,将导致信号发生时空弯曲,这样影响一般叫做引力延迟。对于卫星钟来说,钟频率与时间成反比,相对论效应使得时间尺度发生变化,钟频率也会有所变化,狭义相对论和广义相对论都会对频率产生干扰。接收机钟位于地表,地球的周期自转将使得接收机种存在狭义相对论,当然接收机端的相对论效应要远远小于卫星端。

可以看出,相对论效应主要在卫星钟中影响明显,为了修正相对论效应,一般对卫星钟进行两步处理:

出厂时调整卫星钟频率。

调整卫星钟读数。

① 第一步一般是在卫星钟制造时实现,第二步是由定位的用户通过算法实现。

有两种改正方法,对于广播星历,改正公式为:

$$\Delta t_{rela} = -\frac{2e\sqrt{a\mu}}{c^2} \sin E \quad (2.28)$$

式(2.28)中 $e$ 为卫星椭圆轨道的偏心率; $a$ 为卫星椭圆轨道的长半轴; $\mu$ 为地心引力常数; $c$ 为光速; $E$ 为卫星偏近点角。对于精密星历,改正公式为:

$$\Delta t_{rela} = \frac{2}{c^2} X \dot{X} \quad (2.29)$$

式(2.29)中 $X$ 为卫星的位置矢量; $\dot{X}$ 为卫星的速度矢量。

### 2.3.6 潮汐误差

受到太阳月球引力的影响,地球表面将产生周期性的涨落,这将会对测站位置产生移动,造成的误差称为固体潮误差。固体潮的构成较为复杂,包括长期的影响和周期影响。通过球谐函数可以表示这一变化。根据 IERS 的规定,当测站坐标精度要求为 5mm 时,考虑二级项和高度改正项来构造球谐函数<sup>[38]</sup>。

海洋潮汐也会对地球产生周期性的影响,可分为日周期和半日周期。海潮对测站的造成的误差一般仅当测站距离海洋 1000km 时考虑;当观测时段远小于 24 小时,静态精密定位也要考虑。海潮可分为 11 个潮汐波,可用不同的潮汐分量表示,这些分量将对测站坐标分量产生合成的影响。

极潮是由地球的自转轴的偏移造成的,它与极移密切相关,但是极潮的变化

周期是一个漫长的过程，表现为季节性周期和钱德勒周期。极移的变化最大可以达到 0.8 秒，导致极潮在高程上最大可达到 2.5cm，水平上最大可达到 0.7cm。大部分情况下，极潮可以不予考虑，但是当计算数据连续且时间跨度较大时，需要加入极潮改正。

### 2.3.7 地球自转改正

用户需要计算的坐标是卫星信号发生时刻的坐标，但是由于地球在自转，导致卫星该时刻的坐标在信号接收时刻与发射时刻是不一致的，所以需要加入地球自转改正。

为了理解地球自转，图 2.16 中  $S_1$  表示信号从卫星发射时卫星的位置， $R_1$  表示信号从卫星发射时接收机的位置， $S_2$  表示信号到达接收机时卫星的位置， $R_2$  表示到达接收机时接收机的位置，假设接收机位置保持不变，那么  $R_1$  和  $R_2$  相同。由于观测文件中记录的距离是  $S_2R_2$ ，所以伪距是  $S_2R_2$  这一段的距离，为了计算信息发射的时间，一般用接收机接收信息时刻  $t_r$  减去卫地距的时间，而计算卫地距所使用星历得到的卫星坐标是  $S_1$  位置，所以相减得到的时间实际为  $S_1$  位置的时刻，与观测文件中记录伪距对应的卫星位置  $S_2$  的时刻不一致，所以需要进行地球自转改正，以消除伪距和卫地距之间的差异。

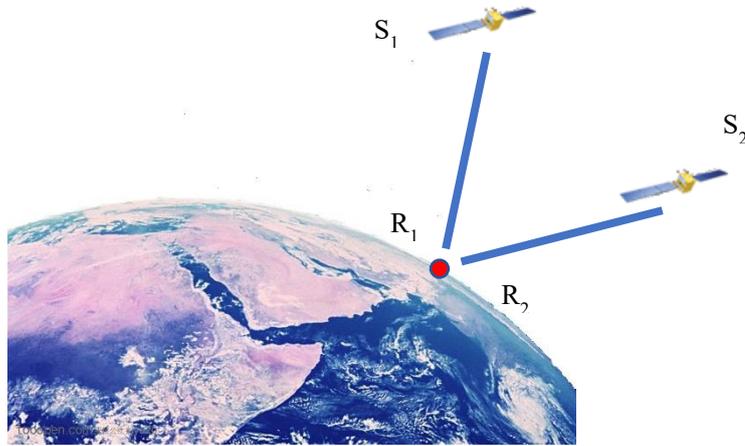


图 2.16 地球自转改正示意图

### 2.3.8 相位缠绕

GNSS 卫星信号是一种右旋圆极化无线电波，相位观测值受到卫星和接收机方位的影响，这种影响最大可以造成相位产生一周的变化，这就是天线相位缠绕。

相位缠绕的改正公式为：

$$\begin{aligned}
 d &= x - k(k \cdot x) - k \times y \\
 \bar{d} &= \bar{x} - k(k \cdot \bar{x}) + k \times \bar{y} \\
 \delta\varphi &= \text{sign}(k \cdot (\bar{d} \times d)) \cos^{-1}(d \cdot \bar{d}/|d||\bar{d}|) \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

式(2.30)中,  $k$ 为卫星到接收机天线的单位矢量;  $(x, y, z)$ 为卫星单位矢量;  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 为接收机单位矢量;  $\delta\varphi$ 为相位缠绕改正;  $\text{sign}$ 为求符号函数;  $d$ 和 $\bar{d}$ 为卫星单位矢量与接收单位矢量计算的偶极矢量。

## 2.4 本章小结

本章主要介绍了精密单点定位中的理论基础,包括时空系统、观测模型和误差分析等。通过本节的内容梳理,为后续章节深入的介绍分区综合改正数以及非差非组合定位提供了参考。

## 第3章 北斗分区综合改正数

BDS 广域增强系统作为 BDS 的补充，用于提高现有系统的定位精度。前期的广域差分系统播发等效钟差、轨道改正<sup>[39]</sup>、电离层格网的增强信息，研究表明使用北斗广播星历和广域差分信息可以使得用户在双频定位中获得 50%的精度提升，单频用户获得 30%的精度提升，并且总体精度还是没有满足分米级定位的需求<sup>[40, 41]</sup>。现运行的北斗星基增强系统在原有系统的基础上增加了分区综合改正数，并使得用户的定位精度提升到分米级。本章将介绍已有的分区综合改正数相关理论，并实现用户的定位程序，用于验证分区综合改正数的效果。

### 3.1 分区改正数原理

#### 3.1.1 分区改正数计算原理

分区综合改正数是基于残差相等的原则建立的。假设在一定距离范围内的两个测站，利用广播星历和增强信息在这两个测站利用无电离层组合计算残差，可以发现两个测站的残差呈现完全的线性关系。对于伪距观测方程来说，伪距残差包含改正后轨道、钟差和对流层模型残差；对于相位观测方程来说，相位残差除了包含以上残差外，还包含模糊度偏差，该偏差为常量。所以可以将一个测站计算得到的相位残差和伪距残差加入到用户测站的观测方程中，残差中的轨道、钟差和对流层部分将改善用户测站观察值误差，而相位残差中包含的模糊度将被用户测站的模糊度吸收，不影响用户测站的定位。

根据式 (2.7)，对于已知坐标的参考站 a 来说，在无电离层组合中使用广播星历和增强信息得到的观测方程如下：

$$\begin{aligned} P_{IF,a}^S &= \rho_{IF,a}^S + c \times (dt_a - dt^S) + T_a^S + c \times (d_a - d^S) + pcor + orbit + \varepsilon_{IF,P} + D_{P,a} \\ L_{IF,a}^S &= \rho_{IF,a}^S + c \times (dt_a - dt^S) + T_a^S + \lambda_{IF} N_a + pcor + orbit + \varepsilon_{IF,L} + D_{L,a} \end{aligned} \quad (3.1)$$

式(3.1)中， $pcor$ 为增强信息中的等效钟差； $orbit$ 为增强信息中的轨道改正； $\rho_{IF,a}^S$ 为由广播星历计算的卫星坐标到参考站坐标的几何距离； $dt_a$ 为参考站接收机钟差的近似值； $dt^S$ 为由广播星历计算的卫星钟差； $T_a^S$ 为通过模型或者实测的参考站对流层延迟； $N_a$ 为模糊度近似值。增强信息用于修正卫星轨道和卫星钟差，所以观测方程经过等效钟差和轨道改正数修正后，残余的误差将集中到 $D_P$ 和 $D_L$ 中，于是可以得到：

$$\begin{aligned} D_{P,a} &= \delta_{\rho_{IF,a}^s} + c \times (\delta_{dt_a} - \delta_{dt^s}) + \delta_{T_a^s} \\ D_{L,a} &= \delta_{\rho_{IF,a}^s} + c \times (\delta_{dt_a} - \delta_{dt^s}) + \delta_{T_a^s} + \lambda_{IF} \delta_{N_a} \end{aligned} \quad (3.2)$$

式 (3.2) 中,  $D_{P,a}$  为参考站伪距残差;  $D_{L,a}$  为参考站相位残差;  $\delta_{\rho_{IF,a}^s}$  为增强信息修正后的卫地距残差;  $\delta_{dt^s}$  为增强信息修正后的卫星钟差残差;  $\delta_{T_a^s}$  为对流层残差;  $\delta_{N_a}$  为模糊度近似值与真值的偏差。

那么对于离参考站距离不远的用户站  $b$  来说, 该站的观测方程可以写为:

$$\begin{aligned} P_{IF,b}^s &= \rho_{IF,b}^s + c \times (dt_b - dt^s) + T_b^s + c \times (d_b - d^s) + pcor + orbit + \varepsilon_{IF,P} \\ L_{IF,b}^s &= \rho_{IF,b}^s + c \times (dt_b - dt^s) + T_b^s + \lambda_{IF} N_b + pcor + orbit + \varepsilon_{IF,L} \end{aligned} \quad (3.3)$$

考虑用户站到经过等效钟差、轨道改正后的广播星历得到的观测方程中, 依旧存在伪距残差和相位残差, 又由于参考站和用户站的残差呈现完全的线性关系, 所以可以把参考站的残差加入用户站的观测方程中用于修正共同的残差项, 即式 (3.3) 可以写为:

$$\begin{aligned} P_{IF,b}^s &= \rho_{IF,b}^s + c \times (dt_b - dt^s) + T_b^s + c \times (d_b - d^s) + pcor + orbit + \varepsilon_{IF,P} - D_{P,a} \\ L_{IF,b}^s &= \rho_{IF,b}^s + c \times (dt_b - dt^s) + T_b^s + \lambda_{IF} N_b + pcor + orbit + \varepsilon_{IF,L} - D_{L,a} \end{aligned} \quad (3.4)$$

于是参考站卫地距残差将修正用户站卫地距, 参考站卫星钟差残差将修正用户站卫星钟差; 参考站接收机钟差残差将被用户站接收机钟差吸收; 参考站相位模糊度偏差将被用户在模糊度参数吸收。所以  $D_{P,a}$  称为伪距分区综合改正数,  $D_{L,a}$  为相位分区综合改正数。

### 3.1.2 分区设计

从上一小节的内容可知, 分区改正数适用于距离参考站距离不远的测站。经过研究表明, 分区综合改正数的有效范围为用户站距离参考站 500km 范围以内。

在北斗广域差分系统中, 将中国地区划分为 18 个分区, 每个分区建立相应的参考站体系, 用于解算该分区的伪距分区综合改正数和相位分区综合改正数。

## 3.2 分区改正数传统定位模型

### 3.2.1 单频模型

如果使用单频模型, 那么只有一个频点能够参与计算, 将无法像无电离层组合那样消去电离层信息, 其单频观测模型可以写为式 (3.5):

$$\begin{aligned}
P_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + I_{r,i}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} - d_i^s) + \\
&\quad pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{P,i} \\
L_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) - I_{r,i}^s + T_r^s + \lambda_i (N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s)) \\
&\quad + pcor_i + orbit + zone_L + \varepsilon_{L,i}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

式(3.5)中*i*为频点；*pcor<sub>i</sub>*为频点对应的等效钟差改正数；*orbit*为轨道改正数；*zone<sub>p</sub>*为伪距分区综合改正数；*zone<sub>L</sub>*为相位分区综合改正数；其余符号的定义与式(2.7)和(2.8)一致。需要注意的是，分区综合改正数中包含的残差项不含与频率相关的内容，所以即使分区改正数是基于双频无电离层组合解算的，但是在单频定位中依旧可以使用。

在以上单频观测模型中，电离层称为了影响定位精度的重要因素。为了减小电离层的影响，可以考虑在权重大的观测方程中消去电离层。由于伪距观测值相对相位观测值的精度较低，所以伪距观测方程的先验方差要大于相位观测方程，于是可以考虑在相位观测方程中消去电离层。传统的分区单频定位中使用半合法(GRAPHIC)组合。那么根据半合法及分区的相关公式，其观测方程可以写为：

$$\begin{aligned}
P_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + I_{r,i}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} - d_i^s) + \\
&\quad pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{P,i} \\
\frac{L_{r,i}^s + P_{r,i}^s}{2} &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_i \frac{(N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s))}{2} + \\
&\quad pcor_i + orbit + zone_L + \varepsilon_{L,i}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

由于电离层在伪距和相位中相反，使得半合法组合可以提升相位观测方程的精度。

### 3.2.2 双频模型

双频定位可以通过观测值组合在伪距和相位观测方程中都消去电离层的影响，所以双频定位的观测方程可以写为式(3.7)：

$$\begin{aligned}
P_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + T_r^s + c \times (d_{r,IF} - d_{IF}^s) + \\
&\quad pcor_{IF} + orbit + zone_p + \varepsilon_{P,IF} \\
L_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF} (N_{0,IF}^s + f_{IF}(b_{r,IF} - b_{IF}^s)) + \\
&\quad pcor_{IF} + orbit + zone_L + \varepsilon_{L,IF}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

上式中各个符号的定义与式(3.4)保持一致。

### 3.3 效果分析

### 3.3.1 单频定位性能

上一小节讨论了分区单频定位模型，为了验证分区改正数的性能，本文选取了4个中国地区测站2月的数据进行动态实验，并配备相应的广域差分改正数文件。

以 AHBB 站为例，其2月1日单频动态定位的效果见图3.1。

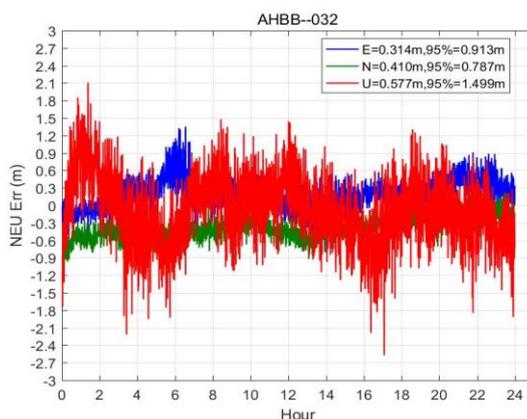


图 3.1 AHBB 站单频分区结果

4个测站1个月单频动态实验的统计结果见表3.1。

表 3.1 一个月单频动态实验结果

| 测站   | RMS(m) |        |        |        | STD(m) |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | E-W    | N-S    | U-D    | 3D     | E-W    | N-S    | U-D    | 3D     |
| AHBB |        |        |        |        |        |        |        |        |
| DLHA | 0.3452 | 0.2878 | 0.4877 | 0.6632 | 0.2363 | 0.2604 | 0.4858 | 0.2470 |
| GSTS | 0.3242 | 0.2573 | 0.5639 | 0.6995 | 0.2392 | 0.2573 | 0.5122 | 0.2587 |
| GSPL | 0.3842 | 0.2601 | 0.5178 | 0.6953 | 0.2120 | 0.2509 | 0.4957 | 0.2495 |
| AVG  | 0.3889 | 0.2708 | 0.5165 | 0.7010 | 0.2154 | 0.2597 | 0.5010 | 0.2517 |

表3.1的数据是典型的B1频点的单频分区动态定位结果，从结果来看，通过增加分区综合改正数等广域差分信息，使得用户端基于广播星历的动态定位结果提升至分米级，其中平面两个方向的偏差稳定在0.5m以下，高程的偏差稳定在0.5m左右，三维的总偏差小于1m。所以可以看出，分区定位的策略是可以满足单频用户的实时高精度动态定位需求。

### 3.3.2 双频定位性能

为了验证双频分区定位的性能，同样选取了4个中国地区测站2月的数据进行动态实验，并配备相应的广域差分改正数文件。

以 AHBB 站2月1日的实验为例，双频分区动态定位结果见图3.2。

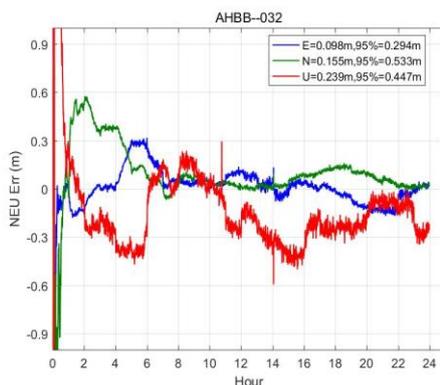


图 3.2 AHBB 站单频分区结果

4 个测 1 个月双频动态实验的统计结果见表 3.2。

表 3.2 一个月双频动态实验结果

| 测站   | RMS(m) |        |        |        | STD(m) |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | E-W    | N-S    | U-D    | 3D     | E-W    | N-S    | U-D    | 3D     |
| AHBB | 0.2076 | 0.1208 | 0.2171 | 0.3238 | 0.2014 | 0.1152 | 0.2169 | 0.1600 |
| DLHA | 0.1988 | 0.1453 | 0.2233 | 0.3324 | 0.1958 | 0.1429 | 0.2035 | 0.1908 |
| GSTS | 0.1540 | 0.1050 | 0.2432 | 0.3064 | 0.1437 | 0.1045 | 0.1844 | 0.1511 |
| GSPL | 0.1590 | 0.1039 | 0.2290 | 0.2975 | 0.1498 | 0.1039 | 0.1853 | 0.1559 |
| AVG  | 0.1808 | 0.1194 | 0.2285 | 0.3149 | 0.1792 | 0.1194 | 0.2079 | 0.1650 |

本实验数据是基于 B1B2 频点的无电离层组合，可以看出，双频分区定位效果要远好于单频分区定位，这是由于双频定位中电离层信息可以不予考虑。从结果得知双频在三个方向的偏差都是保持在 0.5m 以内的，特别是水平方向的偏差稳定在 0.2m 左右，三维总偏差也是小于 0.5m。以上实验说明了双频分区动态定位精度可以满足实时高精度定位的需求。

此外，对于双频定位，还要考虑收敛性的问题，收敛时间以三维总误差收敛进入 1m 作为指标，并稳定保持三维总误差在 1m 以内 10 个历元。表 3.3 统计了四个测站 1 个月的收敛性。表的第 2 列统计了测站一个月的平均收敛时间；表的第 3 列统计了参与计算的天数；表的第 4 列统计了收敛时间超过 1 小时的天数，表明这些天的定位收敛是不成功的。从表中可以看出，平均的收敛时间保持在 20 分钟左右，某些测站在某些天会出现收敛超时的情况，但是比例较小。总体来说，双频分区定位的收敛效果较为稳定。

表 3.3 双频动态实验收敛性结果

| 测站   | 平均收敛时间<br>(min) | 解算天数 | 超时天数 | 超时比例   |
|------|-----------------|------|------|--------|
| AHBB | 19.75           | 28   | 2    | 7.140% |
| DLHA | 17.29           | 28   | 0    | 0.000% |
| GSTS | 16.38           | 28   | 0    | 0.000% |
| GSPL | 13.79           | 28   | 0    | 0.000% |
| AVG  | 16.75           | 112  | 2    | 1.786% |

### 3.4 本章小结

本章介绍了分区定位的相关理论，并基于实验分别对单频分区定位合双频分区定位的效果进行了评估。通过一个月的数据表明，单频分区动态定位的精度可以在水平的两个方向上保持 0.5m 以内，在高程方向可以保持 0.5m 左右，总体是满足分米级定位需求。双频分区动态定位结果的精度更好，水平两个方向可以保持 0.2m 左右，高程方向可以保持 0.5m 以内，总体偏差可以保持在 0.5m 左右；同时双频分区动态定位的收敛性也较为稳定。所以现有的北斗广域差分系统是可以满足分米级高精度定位的需求。

## 第4章 基于分区综合改正数的非差分组合定位

第三章介绍了现有的分区综合改正数相关原理和使用方法（为了便于区分，本章称为传统分区定位），并通过一系列实验证明了分区综合改正数满足 BDS 广域差分系统的分米级定位要求。但是注意到对于传统的分区定位来说，无论是单频中使用的 GRAPHIC 组合，还是双频中使用的无电离层组合，其本质都是通过对原始观察值的线性组合来消除或者减弱电离层的影响，这必然会带来噪声放大、电离层信息损失等缺点，所以基于现有的非差分组合理论，本节将把分区定位和非差分组合进行融合，建立基于分区综合改正数的非差分组合理论和方法体系，并通过实验来探讨其可行性。

### 4.1 基于分区综合改正数的非差分组合定位理论

#### 4.1.1 单频定位模型

(1) . 观测模型及其线性化

由式 (3.5) 可知，对于某个频点  $i$  来说，其伪距和相位的观测方程为：

$$\begin{aligned}
 P_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} - d_i^s) \\
 &\quad + pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{p,i} \\
 L_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) - \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + \lambda_i \left( N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s) \right) \\
 &\quad + pcor_i + orbit + zone_L + \varepsilon_{L,i}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

式 (4.1) 各个符号的定义与式 (3.5) 中的定义保持一致，且与频率相关的项都用  $i$  加以注释。 $\gamma_i$  为电离层延迟相对于固定频率的放大因子，可表示为  $\gamma_i = f_1^2/f_i^2$ 。

对于 BDS 来说，其广播星历是基于 B3 频点的，所以卫星钟差实际上包含了 B3 频点的卫星伪距硬件延迟，即  $dt^s = dt_3^s + d_3^s$ ，为了将卫星钟差中包含的 B3 频点的硬件延迟转换到用户使用频点的硬件延迟，可以得到伪距和相位的变形表达式：

$$\begin{aligned}
 P_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} - d_i^s) \\
 &\quad + c \times d_3^s + pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{p,i} \\
 &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} - (d_i^s - d_3^s)) \\
 &\quad + pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{p,i}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} + DCB_{p_i p_3}^s) \\
 &\quad + pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{p,i} \\
 l_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) - \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + \lambda_i (N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s)) + c \times d_3^s \\
 &\quad + pcor_i + orbit + zone_L + \varepsilon_{L,i}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

线性化后可以得到:

$$\begin{aligned}
 p_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cdt_r + cd_{r,i} + \gamma_i I_{r,1}^s + \varepsilon_{p,i} \\
 l_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cdt_r - \gamma_i I_{r,1}^s + \lambda_i (N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s)) + c \times d_3^s + \varepsilon_{L,i}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

式(4.3)中 $p_{r,i}^s$ 和 $l_{r,i}^s$ 表示伪距和相位的观测值与计算值的差值,  $u_r^s$ 表示坐标系数,  $x$ 为坐标坐标增量。对于单频定位来说, 接收机的硬件延迟被接收机钟差完全吸收, 所以构造表达式:

$$\begin{aligned}
 cd\bar{t}_r &= cdt_r + cd_{r,i} \\
 \bar{N}_i^s &= \lambda_i (N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s)) + c \times (d_3^s - d_{r,i})
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

所以(4.3)式可以重新构造为:

$$\begin{aligned}
 p_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cd\bar{t}_r + \gamma_i I_{r,1}^s + \varepsilon_{p,i} \\
 l_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cd\bar{t}_r - \gamma_i I_{r,1}^s + \lambda_i \bar{N}_i^s + \varepsilon_{L,i}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

可以看到, 在单频模型中, 电离层参数只包含纯净的电离层信息, 没有吸收其余参数的信息。

## (2). 定位函数模型

基于以上的理论, 构建非差非组合单频分区定位模型, 假设 $n$ 颗卫星的信号被测站获取, 同时测站接收机可以记录的数据属于频率 $i$ , 那么可以得到:

$$\begin{bmatrix} l_{r,i}^1 \\ p_{r,i}^1 \\ \vdots \\ l_{r,i}^n \\ p_{r,i}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & +1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots & 1 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & +1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ cd\bar{t}_r \\ l_{r,i}^1 \\ \vdots \\ l_{r,i}^n \\ \bar{N}_i^1 \\ \vdots \\ \bar{N}_i^n \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

式(4.6)中 $l_{r,i}^j$ 和 $p_{r,i}^j$  ( $j = 1 \cdots n$ )分别表示相位和伪距的观测值与计算值的差值;  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$ 分别表示地固系下接收机三个方向坐标参数的系数; 对于不同的卫星来说, 接收机钟差参数 $cd\bar{t}_r$ 的系数都为1; 电离层参数 $I_{r,i}^j$ 在相位中的系数为-1, 在伪距中的系数为+1; 模糊度参数 $\bar{N}_i^j$ 包含相位硬件延迟、伪距硬件延迟。通过观测该表达式, 如果把接收机钟差的系数、电离层系数、模糊度系数提取出来, 可以看出 $cd\bar{t}_r$ 、 $I_{r,i}^j$ 、 $\bar{N}_i^j$ 是相关的, 并使得模型的系数矩阵秩亏, 而且秩亏数

为 1。为了解决这个问题，有两种思路：一是在第一个历元强约束接收机钟差参数，二是附加外部电离层约束，增加额外的虚拟观测方程。本文采用第二种方法来解决这个问题。

通过引入外部电离层数据，使得定位函数模型重构为式 (4.7)。

$$\begin{bmatrix} l_{r,i}^1 \\ p_{r,i}^1 \\ \vdots \\ l_{r,i}^n \\ p_{r,i}^n \\ I_{r,i,t}^1 \\ \vdots \\ I_{r,i,t}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & +1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots & 1 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & +1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ & & & & \vdots & \ddots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ cd\bar{t}_r \\ I_{r,i}^1 \\ \vdots \\ I_{r,i}^n \\ \bar{N}_t^1 \\ \vdots \\ \bar{N}_t^n \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

式 (4.7) 中  $I_{r,i,t}^j$  ( $j = 1 \cdots n$ ) 表示外部电离层信息解算出来的电离层斜路径延迟，每个卫星构造一个额外的虚拟观测方程，用于约束给定的电离层。

#### 4.1.2 双频定位模型

##### (1) 观测模型及其线性化

由式 (3.5) 可知，对于某个频点  $i$  ( $i = 1, 2$ )，其分区定位的伪距和相位的观测方程为：

$$\begin{aligned} P_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) + \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + c \times (d_{r,i} - d_i^s) \\ &\quad + pcor_i + orbit + zone_p + \varepsilon_{p,i} \\ L_{r,i}^s &= \rho_r^s + c \times (dt_r - dt^s) - \gamma_i I_{r,1}^s + T_r^s + \lambda_i (N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s)) \\ &\quad + pcor_i + orbit + zone_L + \varepsilon_{L,i} \end{aligned} \quad (4.8)$$

式中各个符号的定义与式 (3.5) 定义保持一致。

现定义以下表达式：

$$\begin{aligned} \alpha_{mn} &= \frac{f_m^2}{f_m^2 - f_n^2} & \beta_{mn} &= -\frac{f_n^2}{f_m^2 - f_n^2} \\ DCB_{p_n p_m} &= d_{r,n} - d_{r,m} \\ DCB_{p_n p_m}^s &= d_n^s - d_m^s \end{aligned} \quad (4.9)$$

式 (4.9) 中  $f_i$  ( $i = 1, 2$ ) 为频率， $\alpha_{mn}$  和  $\beta_{mn}$  表示频率的放大因子， $DCB_{p_n p_m}$  和  $DCB_{p_n p_m}^s$  表示与接收机和卫星相关的差分码偏差，可以通过导航文件中的 TGD 转换或者由 DCB 文件改正。

同时考虑到 BDS 广播星历是基于 B3 频点，可以得到伪距和相位的变形表达式，并将其线性化，得到：

$$\begin{aligned}
 p_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cdt_r + cd_{r,i} + \gamma_i I_{r,1}^s + \varepsilon_{P,i} \\
 l_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cdt_r - \gamma_i I_{r,1}^s + \lambda_i \left( N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s) \right) + \\
 &\quad c \times d_3^s + \varepsilon_{L,i}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

考虑到 $cd_{r,i}$ 可以被接收机钟差 $dt_r$ 和电离层部分吸收, 假设两者吸收的分别为 $a$ 、 $b$ , 那么根据两个频点的关系, 可以得到下列式 (4.11):

$$\begin{cases} cd_{r,1} = a + \gamma_1 b \\ cd_{r,2} = a + \gamma_2 b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \alpha_{12} cd_{r,1} + \beta_{12} cd_{r,2} \\ b = \frac{1}{1-\gamma_2} c(d_{r,1} - d_{r,2}) = \beta_{12} cDCB_{p_1 p_2} \end{cases} \tag{4.11}$$

所以令:

$$\begin{aligned}
 dt_r &= dt_r + \alpha_{12} cd_{r,1} + \beta_{12} cd_{r,2} \\
 \bar{I}_{r,1}^s &= I_{r,1}^s + \beta_{12} cDCB_{p_1 p_2} \\
 \bar{N}_i^s &= \lambda_i \left( N_{0,i}^s + f_i(b_{r,i} - b_i^s) \right) + c \left( d_3^s - (\alpha_{12} d_{r,1} + \beta_{12} d_{r,2}) \right) + \gamma_i \beta_{12} cDCB_{p_1 p_2}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

式 (4.10) 可以重写为

$$\begin{aligned}
 p_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cd\bar{t}_r + \gamma_i \bar{I}_{r,1}^s + \varepsilon_{P,i} \\
 l_{r,i}^s &= u_r^s \cdot x + cd\bar{t}_r - \gamma_i \bar{I}_{r,1}^s + \bar{N}_i^s + \varepsilon_{L,i}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

可以看出, 新构造的观测方程中电离层由两部分组成, 除了纯净的电离层外, 还包括接收机的差分码偏差。

## (2). 定位函数模型

非差非组合双频分区定位中, 由于具有两个频点的数据, 使得电离层参数的系数项存在频率放大因子, 所以构造的定位函数模型是满秩, 不会出现秩亏, 有两种方法处理非差非组合双频分区定位函数模型, 第一种为直接解法, 不添加任何约束; 第二种为附加外部电离层约束, 添加额外的电离层虚拟观测方程。

直接解法模型: 为了构建非差非组合双频分区定位函数模型, 现假设观测卫星数为 $n$ , 观测的两个频点为频点 1 和频点 2。所以可以得到:

$$\begin{bmatrix} l_{r,1}^1 \\ p_{r,1}^1 \\ l_{r,2}^1 \\ p_{r,2}^1 \\ \vdots \\ l_{r,1}^n \\ p_{r,1}^n \\ l_{r,2}^n \\ p_{r,2}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & +1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & -\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & +\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & +1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & -\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & +\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ cd\bar{t}_r \\ I_{r,1}^1 \\ \vdots \\ I_{r,1}^n \\ \frac{1}{N_1^1} \\ \frac{1}{N_2^1} \\ \vdots \\ \frac{1}{N_1^n} \\ \frac{1}{N_2^n} \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

式(4.14)中各个符号的定义与式(4.7)相同,其中 $\lambda_i$ 表示频点 $i$ 对应的波长,对于相同的卫星来说,两个频点 1、2 的电离层延迟误差可通过系数 $\lambda_2^2/\lambda_1^2$ 进行转换得到,所以待估参数中只考虑频点 1 传播斜路径的电离层延迟。需要注意的是,该定位函数模型中的电离层延迟不是纯净的电离层延迟,而是包含了一系列硬件延迟的混合电离层延迟。

附加外部电离层约束模型:由于引进了外部电离层延迟信息,所以电离层参数只能包含纯净的电离层,不能包含硬件延迟等信息,基于这个原则,需要从电离层参数中分离出 $cDCB_{p_1p_2}$ ,所以在定位函数方程中再添加一个 $cDCB_{p_1p_2}$ 参数,那么对于各个频点来说,伪距和相位观测方程中新参数 $cDCB_{p_1p_2}$ 的系数不同:

对于频点 1 来说,其相位方程中 $cDCB_{p_1p_2}$ 的系数为:

$$-\beta_{12} + \gamma_1\beta_{12} = 0 \quad (4.15)$$

由于没有模糊度项,所以频点 1 的伪距方程中 $cDCB_{p_1p_2}$ 的系数为 $\beta_{12}$ 。

对于频点 2 来说,其相位方程中 $cDCB_{p_1p_2}$ 的系数为:

$$-\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2}\beta_{12} + \gamma_2\beta_{12} = 0 \quad (4.16)$$

由于没有模糊度项,所以频点 2 的伪距方程中 $cDCB_{p_1p_2}$ 的系数为:

$$\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2}\beta_{12} = -\alpha_{12} \quad (4.17)$$

式(4.17)  $\alpha_{12}$ 的定义满足式(4.9)。综合来说,如果在非差非组合双频分区定位使用外部电离层作为约束,那么新的定位函数模型可以写为:

$$\begin{bmatrix} l_{r,1}^1 \\ p_{r,1}^1 \\ l_{r,2}^1 \\ p_{r,2}^1 \\ \vdots \\ l_{r,1}^n \\ p_{r,1}^n \\ l_{r,2}^n \\ p_{r,2}^n \\ I_{r,1,t}^1 \\ \vdots \\ I_{r,1,t}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & +1 & \cdots & 0 & \beta_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & -\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & 1 & +\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & \cdots & 0 & -\alpha_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & +1 & \beta_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & -\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ a_n & b_n & c_n & 1 & 0 & \cdots & +\frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} & -\alpha_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ cd\bar{t}_r \\ I_{r,1}^1 \\ \vdots \\ I_{r,1}^n \\ cDCB_{p_1p_2} \\ \frac{1}{N_1} \\ \frac{1}{N_2} \\ \vdots \\ \frac{1}{N_1^n} \\ \frac{1}{N_2^n} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

式 (4.18) 为满秩矩阵, 可以参与矩阵运算。

由于非差非组合双频分区定位有两种模型, 后文将分别根据这两种模型实现相应的程序, 并用实验来探索它们的性能。

### 4.1.3 电离层估计过程

在加入电离层参数后, 在解算参数时需要选择估计策略, 就电离层而言, 考虑到电离层受到时间、地点的变化而受到影响, 所以一般有两种随机方法可适用于电离层: 第一种是把估计过程当成白噪声处理, 第二种是当作随机游走处理。

白噪声过程是指: 在随机过程  $\{x_t, t \in T\}$  中, 满足式 (4.19)。

$$\begin{aligned} E(x_t) &= 0 \\ \text{Var}(x_t) &= \sigma^2 \\ \text{Cov}(x_t, x_{t-s}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

其中  $t \in T$  同时  $t - s \in T$ , 那么  $\{x_t\}$  为白噪声过程。可以看出, 白噪声过程均值为 0, 方差为常数, 随机变量之间不相关, 是一种平稳的随机过程。如果要在非差非组合分区定位中将电离层的估计过程选为白噪声, 那么在两个相邻历元之间, 每个建立误差方程时都必须重新独立的计算电离层, 保证两个历元建立的电离层参数不相关。

随机游走过程是指, 时间序列中下个时期的值等于本期值加上一个独立或不相关的误差项, 最简单的表达式为:

$$x_t = x_{t-s} + u_t \quad (4.20)$$

$u_t$  为平稳的随机过程, 即白噪声过程;  $x_t$  为随机游走过程。在实验中, 可以把  $u_t$  选为历元间时差的函数。

本文选取了中国陆态网的 4 个监测站, 通过 1 周的实验数据来检验电离层白噪声的定位性能。由于在非差非组合单频分区定位中, 电离层参数只包含纯净的电离层信息。没有吸收 DCB, 所以为了得到正确的电离层, 选择单频模型来进行实验。图 4.1 展示了这些测站 2019 年 2 月 1 号一天的 B1 频点的数据解算结果, 左边的为非差非组合单频分区动态定位中使用白噪声过程估计解算的电离层延迟与 GIM 产品拟合的电离层延迟差值的趋势图和 rms; 右边的为非差非组合单频分区动态定位中使用随机游走过程估计解算的电离层延迟与 GIM 产品拟合的电离层延迟差值的趋势图和 RMS;

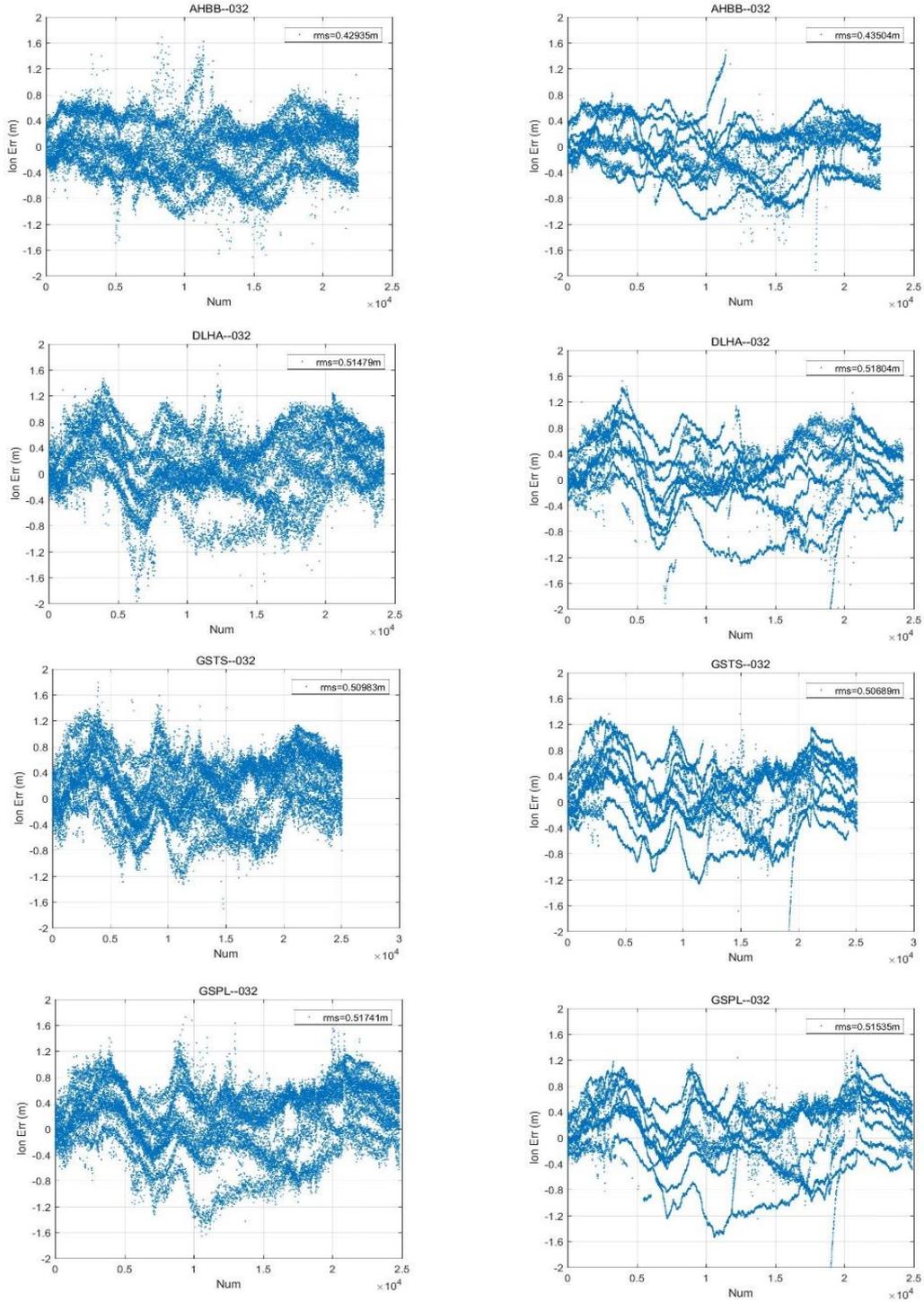


图 4.1 不同随机过程中电离层参数解算结果

表 4.1 展示白噪声过程和随机游走过程的 RMS 值。

表 4.1 不同估计过程结果的 RMS(m)

| 测站    | White  | Random | White  | Random | White  | Random | White  | Random |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AHBB  | 2月1日   |        | 2月2日   |        | 2月3日   |        | 2月4日   |        |
|       | 0.4294 | 0.4350 | 0.4099 | 0.4113 | 0.4979 | 0.4716 | 0.4920 | 0.4975 |
|       | 2月5日   |        | 2月6日   |        | 2月7日   |        |        |        |
|       | 0.4613 | 0.4573 | 0.5056 | 0.5063 | 0.5091 | 0.5042 |        |        |
| DHLLA | 2月1日   |        | 2月2日   |        | 2月3日   |        | 2月4日   |        |
|       | 0.5147 | 0.5180 | 0.4799 | 0.4751 | 0.5397 | 0.5282 | 0.4607 | 0.4654 |
|       | 2月5日   |        | 2月6日   |        | 2月7日   |        |        |        |
|       | 0.4737 | 0.4706 | 0.4634 | 0.4866 | 0.4873 | 0.5014 |        |        |
| GSTS  | 2月1日   |        | 2月2日   |        | 2月3日   |        | 2月4日   |        |
|       | 0.5098 | 0.5069 | 0.4641 | 0.4653 | 0.5140 | 0.5019 | 0.5913 | 0.6205 |
|       | 2月5日   |        | 2月6日   |        | 2月7日   |        |        |        |
|       | 0.4673 | 0.4688 | 0.4676 | 0.4544 | 0.4852 | 0.4913 |        |        |
| GSPL  | 2月1日   |        | 2月2日   |        | 2月3日   |        | 2月4日   |        |
|       | 0.5174 | 0.5153 | 0.4803 | 0.4848 | 0.5258 | 0.5137 | 0.4900 | 0.4888 |
|       | 2月5日   |        | 2月6日   |        | 2月7日   |        |        |        |
|       | 0.4641 | 0.4550 | 0.4779 | 0.4786 | 0.5016 | 0.4973 |        |        |

通过表 4.1 及图 4.1 分析可以看出在非差非组合分区定位中，在引入相同外部电离层约束的情况下，白噪声过程和随机游走过程对电离层的约束力基本保持一致，其约束后的最大差异在厘米级别，可以认为两者的约束效果相同。

同时需要注意的是，如果把估计过程当作白噪声，那么估计的电离层参数的噪声将大于随机游走过程，如图 4.1 所示，这也体现了随机游走过程在分区定位中的平稳性。所以基于以上实验结果，在后续的实验，将固定电离层的估计过程为随机游走过程。

#### 4.1.4 虚拟观测方程先验方差

在非差非组合单频分区定位和附加外部电离层约束的双频分区定位中，需要添加虚拟观测方程用于约束电离层。在定位中需要考虑虚拟观测方程的先验方差，一般有两种类型的约束方法，一种是在定位过程中保持先验方差固定，不会随着历元的变化而变化；另一种是考虑随着历元的不断变化，逐渐改变电离层的先验信息，其中较为常见的类型是在定位开始认为外部电离层信息精度相对于其余参数来说精度较高，所以给予虚拟观测方程较大的权重，但随着历元的推进，当结果收敛后，认为外部电离层的信息精度相对下降，需要逐步降低外部电离层的权。

本文选取了常数约束和逐步松弛约束来进行对比。

对于常数约束来说，虚拟观测方程的先验方差可以表示为：

$$\sigma_{ion}^2(i) = \sigma_{ion,0}^2 \quad (4.21)$$

式 (4.21) 中  $i$  为历元数;  $\sigma_{ion,0}^2$  为初始方差,  $\sigma_{ion,0}^2$  取 0.09。

对于逐步松弛约束来说, 虚拟观测方程的先验方差可以表示为:

$$\sigma_{ion}^2(i) = \sigma_{ion,0}^2 + \sigma_{ion,\Delta}^2(i-1) \quad (4.22)$$

式 (4.22) 中  $\sigma_{ion,\Delta}^2$  表示方差变化率, 随着  $i$  的不断增大而不断增大。在非差非组合分区定位中,  $\sigma_{ion,0}^2$  与单频中保持一致,  $\sigma_{ion,\Delta}^2$  取  $\sigma_{ion,0}^2$  的十分之一效果最好。

本文分别在单频和双频动态实验了两种约束方式, 实验数据为 4 个中国陆态网站连续 1 周的观测数据, 数据采样间隔为 30s。

### (1) . 单频动态实验效果

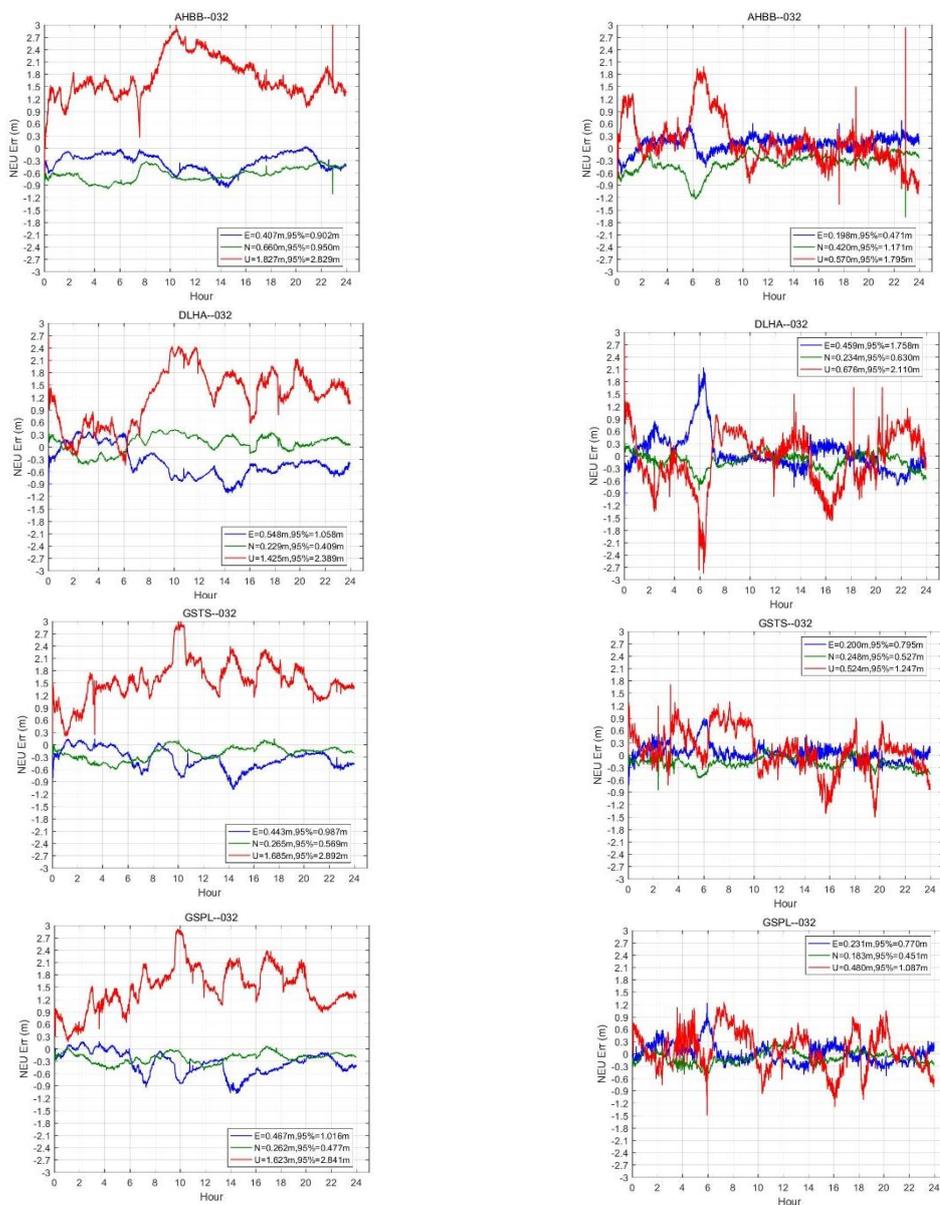


图 4.2 单频实验中虚拟观测方程采用不同的先验方差的结果

单频动态实验中，选择 B1 频点后，四个测站 2019 年 2 月 1 号的非差非组合分区单频动态定位的解算结果见图 4.2。其中左边的结果采用了虚拟观测方程的常数约束；右边的结果采用了虚拟观测方程的逐步松弛约束。

图 4.3 统计了四个测站 1 周的实验结果。每天的数据包括常数约束的坐标三维 RMS 和逐步松弛约束的坐标三维 RMS，每幅图中上柱状图为逐步松弛约束，下柱状图为常数约束。

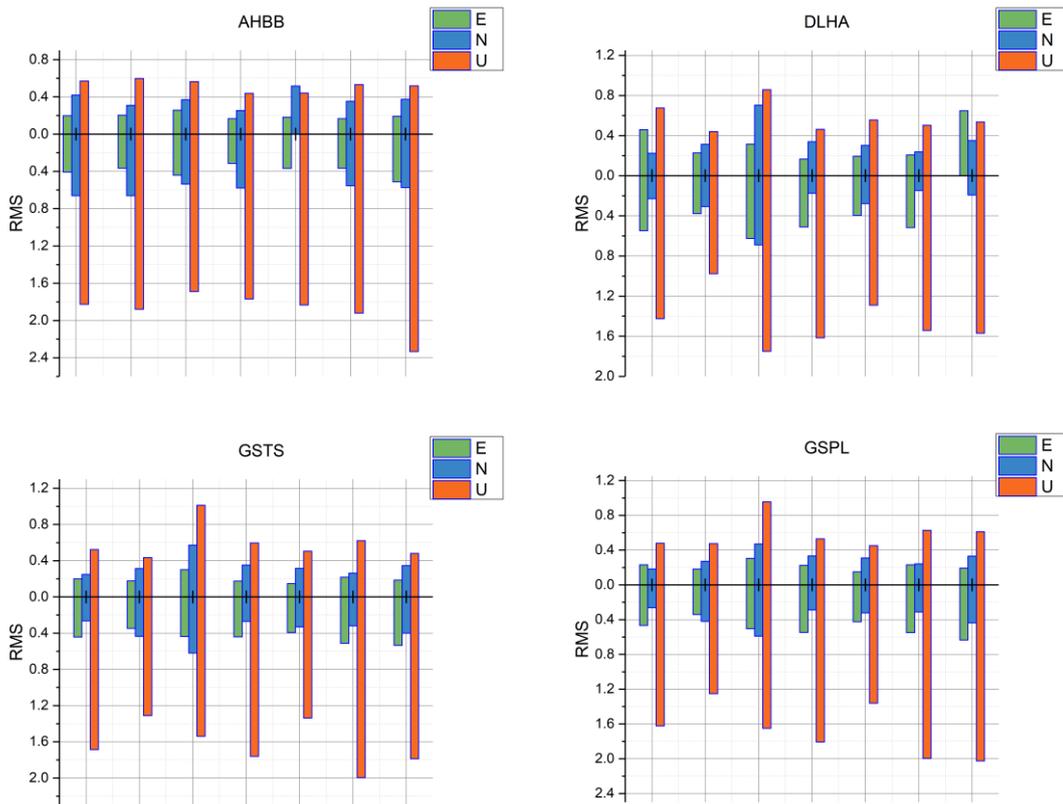


图 4.3 单频两种约束在三个方向的 RMS 比较

从图 4.2 可以看出，常数约束在解算开始的历元还能保持稳定，但是一旦历元增多，U 方向的偏差将呈现扩大的趋势，而且一旦出现偏差后，很难利用外部电离层的信息将 U 方向的偏差修正回正常水平；而逐步松弛约束中，U 方向的偏差基本保持在稳定的状态，即使偏差在某些时刻会出现放大的现象（如 DLHA 站 6 点左右），后续的历元也可以逐渐收敛到正常水平。此外，就 E 和 N 方向来说，两种约束方式产生的坐标偏差的差距不是那么明显。

同时通过图 4.3 可以更为直观的看出，在单频中使用逐步松弛约束的方法，可以使得 U 方向的 RMS 相较于常数约束大幅度减小；对于 E 和 N 方向来说，在某些天数中，逐步松弛的明显好于常数约束，或者常数约束优于逐步松弛，但

是两种得到的 RMS 总体来说是比较接近的。

综合来说，单频定位中虚拟观测方程的约束方法主要对分区定位的 U 方向有明显的影 响，对水平的两个方向影响较小。逐步松弛约束较常数约束在单频动态定位中效果更好，所以本文后续的单频动态实验都将采用逐步松弛约束的方法。

## (2) . 双频实验效果

非差非组合双频模型有两种，直接解法不需要构建虚拟观测方程，本节将不予讨论；而附加外部电离层约束解法则需要虚拟观测方程，所以要探讨相关性质。选取 4 个中国陆态网测站 1 周的 B1、B2 频点数据进行双频动态实验。测站 2 月 1 日的结果如图 4.4，其中左边采用了常数约束，右边采用了逐步松弛约束。

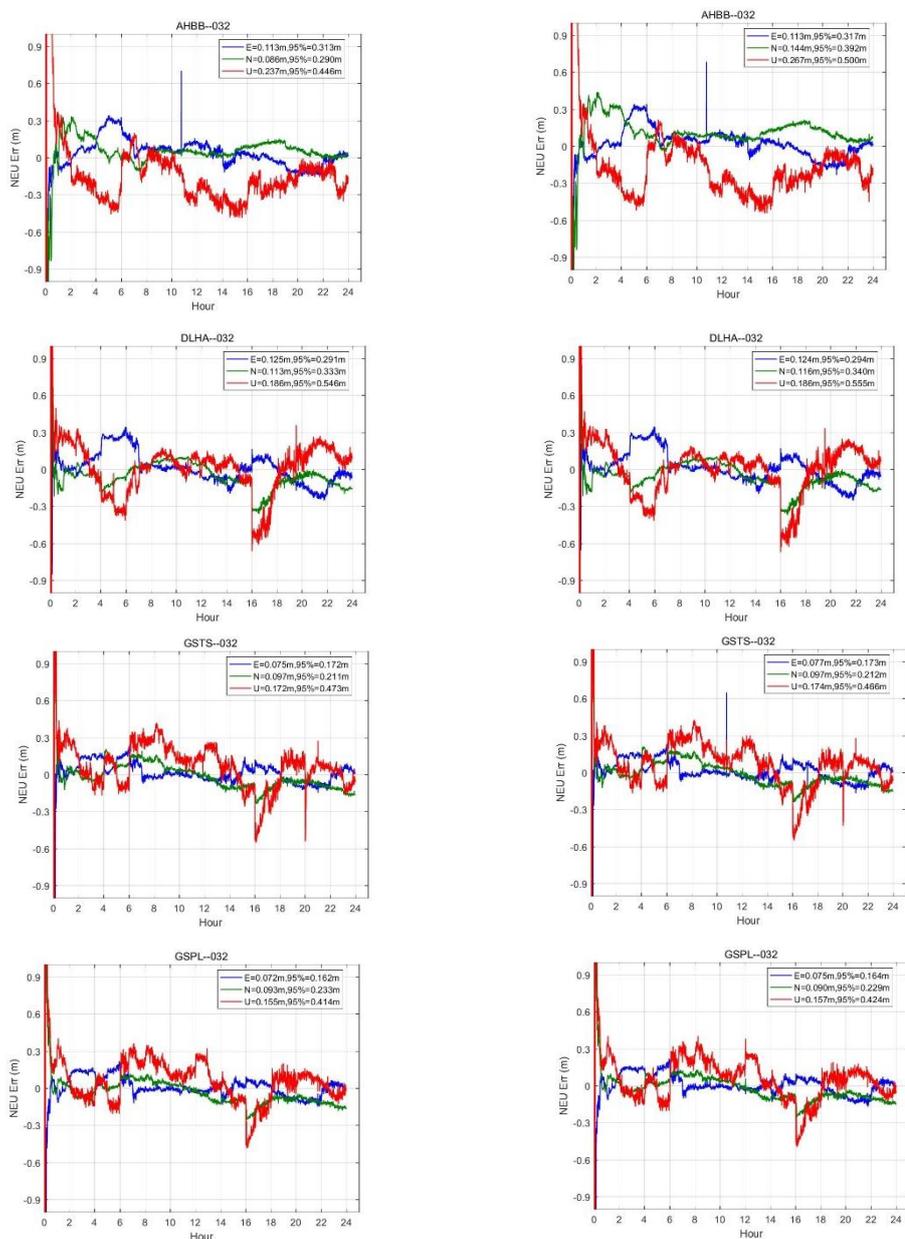


图 4.4 双频实验中虚拟观测方程采用不同的先验方差的结果

统计了 4 个测站 1 周的实验结果，首先是两种约束方法收敛所需的历元数，见图 4.5，其收敛时间以坐标三维总误差收敛进入 1m 作为指标，并稳定保持坐标三维总误差在 1m 以内 10 个历元。

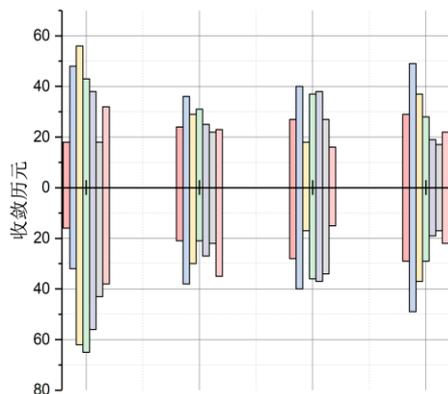


图 4.5 不同约束方法收敛所需历元数目

图 4.6 统计了 4 个测站 7 天的坐标三维 RMS 值

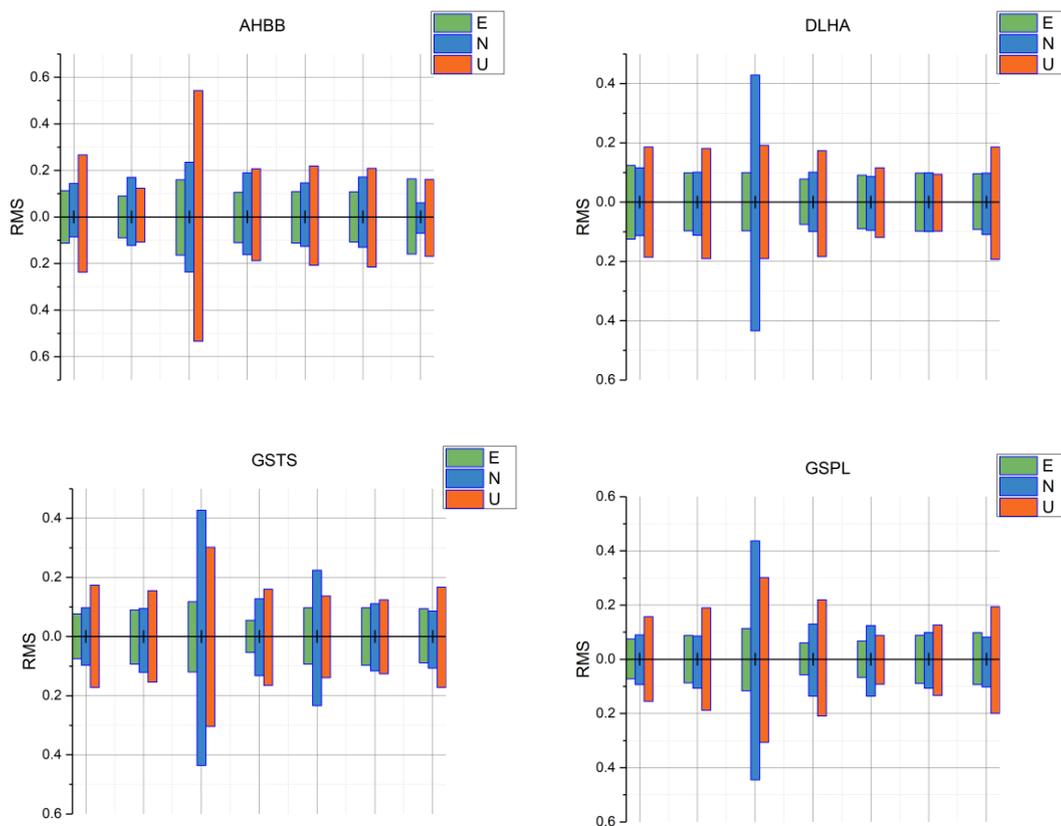


图 4.6 双频两种约束在三个方向的 RMS 比较

从图 4.5 可以看出,两种约束的在非差非组合双频分区动态定位中的收敛时间基本保持一致,由于解算的开始阶段两种约束的权基本相同,而且两者在短时间内的权也保持在同一量级,所以在收敛时间内,两种约束具有同样的收敛效果。

此外,由图 4.6 可以看出双频定位中,常数约束和逐步松弛约束在三个方向的 RMS 基本保持一致,说明这两种约束方式的不同在双频定位中并不影响定位的精度。

### (3) . 本节总结

本小节主要介绍了虚拟观测方程先验方程的相关理论,并通过实验探讨了非差非组合单、双频分区动态定位中,两种约束的实际使用效果。结果表明,在单频定位中,逐步松弛约束定位精度更为优秀,所以应该选择该约束作为单频分区定位的先验方差;在双频定位中,常数约束和逐步松弛约束的效果具有很强的相似性,不论是收敛时间,还是三维定位精度,两种大体可以保持一致,所以在双频定位中,约束方式对定位效果影响有限。

为了方便,后续的非差非组合分区单、双频定位中,统一使用逐步松弛约束作为虚拟观测方差的先验方差。

## 4.2 程序设计

在完成了对非差非组合单、双频分区定位理论的一系列研究后,可以设计相关的解算程序。结合第三章的传统分区定位,本文基于 RTKLIB 进行了二次开发,在此基础上完善了 BDS 传统单频分区定位、BDS 传统双频分区定位并新增了 BDS 非差非组合单频分区定位、BDS 非差非组合双频分区定位。

RTKLIB 是一款专业的 GNSS 定位开源程序,用于 GNSS 的标准和精确定位。由一个便携式程序库和几个利用该库的 AP(应用程序)组成。

RTKLIB 由 C 语言编写,主体部分为 RTKPOST,该部分按照定位的不同大体上可以分为用于单点定位的程序和用于 RTK 定位的程序,RTKPOST 中提供了大量的参数和配置设定,可以解算包括 GPS、GLONASS、GALILEO、BDS、QZSS 等在内的大部分卫星导航系统。除了数据后处理能力外,RTKLIB 还提供画图模块 RTKPLOT,数据下载模块 RTKGET,实时数据流 RTKSVR,数据转换模块 RTKCONV 等等。现有版本可以满足大部分场景下定位的需求,参考已有的接口,用户也可以自行定制需要的功能。

RTKLIB 还拥有大量的基础库,可以大致分为以下几部分。数据转换库,支持 RTCM 数据和 Google 数据;数据下载库,涵盖常用的机构及数据类型;卫星轨道和卫星钟解算模块;大地水准模型模块;电离层模型及解算模块;模糊度解

算模块；基本参数结构体模块；标准单点定位模块；精密单点定位模块；精密星历处理模块；rinex 数据结构体模块；RTCM 模块；RTK 解算模块；数据流模块；文件预处理模块；主程序设置模块。基于以上的基本库，RTKLIB 通过多线程提供并行处理数据的能力。

包括以下 GUI 和 CUI APs:

表 4.2 RTKLIB 主要功能

| Function                            | GUI AP      | CUI AP   |
|-------------------------------------|-------------|----------|
| AP Launcher                         | RTKLAUNCH   |          |
| Real-Time Positioning               | RTKNAVI     | RTKRCV   |
| Communication Server                | STRSVR      | STR2STR  |
| Post-Processing Analysis            | TRKPOST     | RNX2RTKP |
| RINEX Converter                     | RTKCONV     | CONVBIN  |
| Plot Solutions and Observation Date | RTKPLOT     |          |
| Downloader of GNSS Date             | RTKGET      |          |
| NTRIP Brower                        | SRCTBLBROWS |          |

本文使用的是 RTKLIB2.4.2 版本，设计内容见图 4.7。

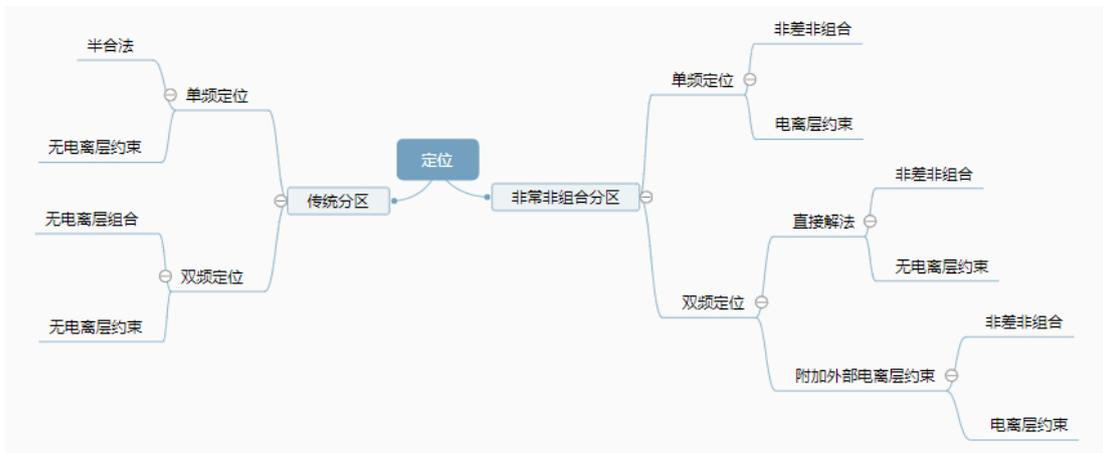


图 4.7 本文程序设计主要内容

## 4.3 实验结果及分析

### 4.3.1 单频动态定位实验结果及分析

在完成了本章前面所探讨的问题后，本节将对非差非组合单频分区定位进行性能的评估，同时为了更为直观的体现非差非组合在分区定位中的优势，本节把

传统分区定位的结果与非差非组合分区定位的结果进行比较。两种方法的区别如下：

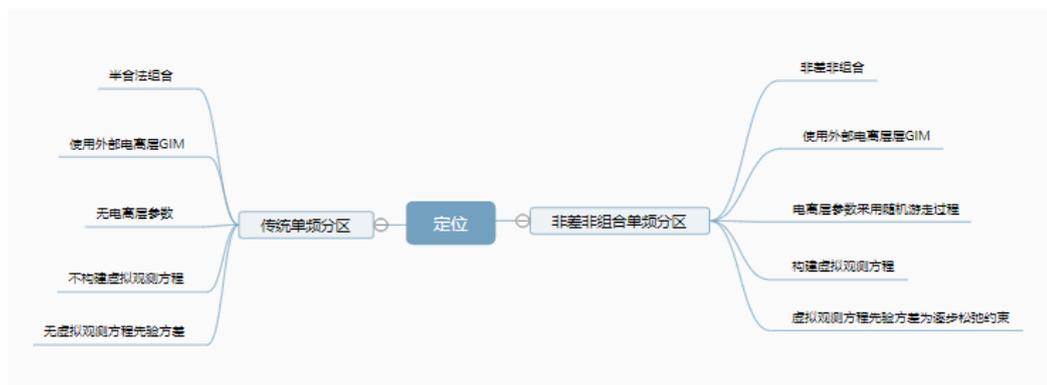


图 4.8 传统单频分区与非差非组合单频分区设定对比

本文选取了一个 22 个中国陆态网站，采集了这些测站 2019 年 2 月一整月的数据，对所有数据进行单日动态解算，分别使用传统分区和非差非组合分区两种单频模式，频点选择 B1 频点。

以 GZSC 测站为例，该测站用 2 月 2 日的的数据解算结果见图 4.9。

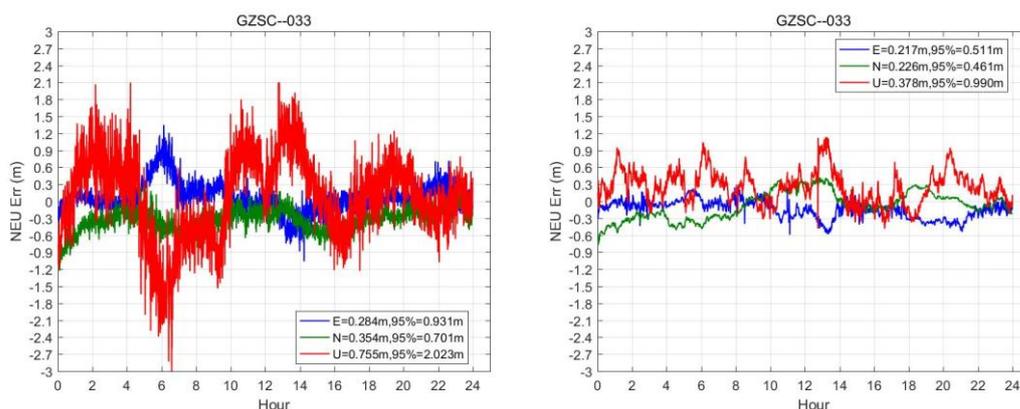


图 4.9 GZSC 测站传统单频分区与非差非组合单频分区单天解算结果对比

图 4.9 中左边的结果为传统单频分区定位坐标偏差 RMS，右边的结果为非差非组合单频分区定位坐标偏差 RMS，两种方法都没有对原始观测数据进行滤波处理，可以看到非差非组合的噪声相对于半合法大幅度降低，并使得测站在三个方向偏差 RMS 有也明显的优化。

表 4.3 记录了 22 个测站一个月解算结果在三个方向和总的坐标偏差 RMS 的均值，并利用这些均值再计算出两种单频分区定位 N、E、U 和总坐标偏差的平均 RMS。

表 4.3 22 个测站传统单频分区与非差分组合单频分区坐标偏差 RMS (m)

| 测站   | 传统分区偏差 RMS |        |        |        | 非差分组合分区偏差 RMS |        |        |        |
|------|------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|      | E-W        | N-S    | U-D    | 3D     | E-W           | N-S    | U-D    | 3D     |
| AHBB | 0.3493     | 0.2887 | 0.4885 | 0.6663 | 0.3348        | 0.2035 | 0.4693 | 0.6113 |
| DLHA | 0.3453     | 0.2567 | 0.5621 | 0.7079 | 0.3610        | 0.2453 | 0.4530 | 0.6290 |
| FJXP | 0.4328     | 0.2785 | 0.5140 | 0.7274 | 0.2948        | 0.2433 | 0.4849 | 0.6175 |
| GDZH | 0.4613     | 0.3346 | 0.5432 | 0.7873 | 0.3174        | 0.3001 | 0.5026 | 0.6659 |
| GSPL | 0.3907     | 0.2601 | 0.5192 | 0.6998 | 0.3176        | 0.2047 | 0.4845 | 0.6144 |
| GSTS | 0.4009     | 0.2704 | 0.5163 | 0.7074 | 0.3414        | 0.1965 | 0.4731 | 0.6156 |
| GXGL | 0.3957     | 0.2567 | 0.5465 | 0.7220 | 0.3036        | 0.2526 | 0.4956 | 0.6337 |
| GZFG | 0.3805     | 0.2003 | 0.4933 | 0.6544 | 0.3035        | 0.2520 | 0.4985 | 0.6357 |
| GZGY | 0.3659     | 0.2119 | 0.5296 | 0.6777 | 0.2858        | 0.2561 | 0.4669 | 0.6044 |
| GZSC | 0.3466     | 0.2156 | 0.5351 | 0.6730 | 0.3062        | 0.2471 | 0.4595 | 0.6049 |
| HAJY | 0.3858     | 0.2679 | 0.5146 | 0.6967 | 0.3472        | 0.2287 | 0.5272 | 0.6714 |
| HBXF | 0.3750     | 0.2381 | 0.4902 | 0.6615 | 0.2782        | 0.2110 | 0.4422 | 0.5634 |
| HBZG | 0.3816     | 0.2410 | 0.5087 | 0.6800 | 0.3556        | 0.2105 | 0.4930 | 0.6433 |
| HELQ | 0.3722     | 0.2842 | 0.5055 | 0.6891 | 0.3481        | 0.2294 | 0.5155 | 0.6630 |
| HIHK | 0.4447     | 0.2679 | 0.5259 | 0.7390 | 0.2913        | 0.2977 | 0.4767 | 0.6330 |
| JSYC | 0.3543     | 0.2714 | 0.5020 | 0.6717 | 0.3138        | 0.2154 | 0.4985 | 0.6272 |
| JXJA | 0.3366     | 0.2315 | 0.5023 | 0.6474 | 0.3029        | 0.2362 | 0.4971 | 0.6282 |
| QHGC | 0.3158     | 0.2514 | 0.5229 | 0.6606 | 0.3452        | 0.2008 | 0.4447 | 0.5977 |
| SDRC | 0.3572     | 0.3126 | 0.5018 | 0.6907 | 0.3362        | 0.2339 | 0.4887 | 0.6376 |
| SNMX | 0.3724     | 0.2205 | 0.5218 | 0.6779 | 0.3073        | 0.2188 | 0.4366 | 0.5770 |
| SXKL | 0.4247     | 0.2848 | 0.4963 | 0.7126 | 0.3985        | 0.2087 | 0.4836 | 0.6605 |
| YNMJ | 0.3422     | 0.2390 | 0.6108 | 0.7398 | 0.2549        | 0.2619 | 0.4994 | 0.6188 |
| AVG  | 0.3791     | 0.2596 | 0.5185 | 0.6928 | 0.3216        | 0.2354 | 0.4812 | 0.6248 |

通过表 4.3 可以得知，在单频分区动态定位中，使用非差分组合的方式较传统的半合法精度有了明显的提升，综合 22 个测站的数据来说，E-W 方向的精度提升了 15.16%，N-S 方向的精度提升了 9.32%，U-D 方向的精度提升了 7.19%，三维总精度提升了 9.81%。

为了更直观的体现两种定位方式，本文统计了这 22 个测站 2019 年 2 月共 28 天的解算结果中，E-W、N-S、U-D 方向任意一个方向的偏差超过 1m 的数据量在总数据量中占到比例。统计如图 4.10。

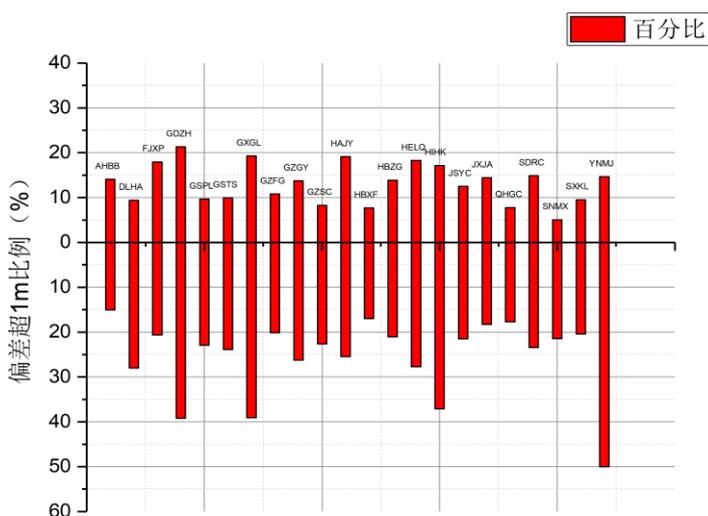


图 4.10 任意方向偏差超过 1m 的结果比例

可以从图 4.10 中看出，非差非组合方法在整个定位过程中保持坐标三维偏差在分米级的效果也是优于半合法，对参与实验的 22 个测站都有不同程度的提升，综合的坐标偏差分米级保持比例较半合法提高了 12.25%。

### 4.3.2 双频定位实验结果及分析

本小节将探讨双频定位的效果，与单频不同的是，双频有直接解法合附加外部电离层约束两种非差非组合模式。所以需要综合比较这两种非差非组合双频分区定位与传统双频分区定位的差异。图 4.11 展示了这几种定位的关系。

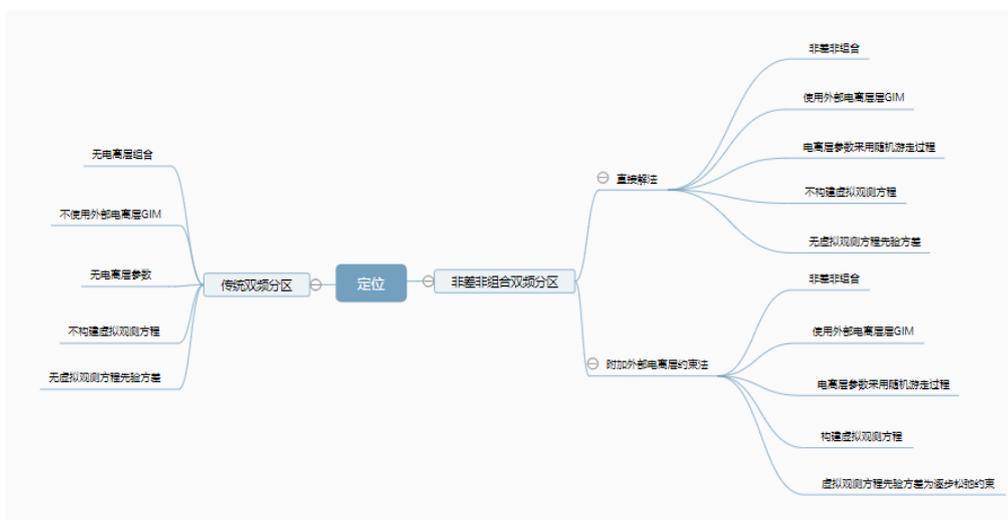


图 4.11 传统双频分区与非差非组合双频分区设定对比

依旧选取了中国区域内的 22 个观测站，使用 2019 年 2 月的数据，对所有数据进行单日动态解算，模式分别为传统双频动态分区、直接解法非差分组合双频动态分区、附加外部电离层约束非差分组合双频动态分区，频点选择为 B1B2 频点。

以 GZSC 测站为例，该测站用 2 月 2 日的的数据解算结果见图。图中左边的结果采用传统双频动态分区；中间的结果采用直接解法非差分组合双频动态分区、右边的结果附加外部电离层约束非差分组合双频动态分区。

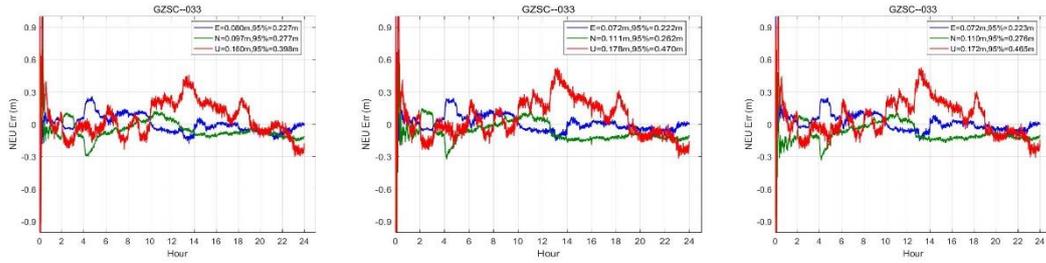


图 4.12 GZSC 测站的三种双频分区定位结果比较

表 4.4 统计了三种方法的 22 个测站 2019 年 2 月每个测站的共 28 天坐标偏差 RMS 的均值。

表 4.4 22 个测站 2 月三种双频分区定位坐标结果偏差 RMS (m)

| 类型            | 测站 | AHBB   | DLHA   | FJXP   | GDZH   | GSPL   | GSTS   | GXGL   | GZFG   |
|---------------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               |    | GZGY   | GZSC   | HAJY   | HBXF   | HBZG   | HELQ   | HIHK   | JSYC   |
|               |    | JXJA   | QHGC   | SDRC   | SNMX   | SXKL   | YNMJ   |        |        |
| 传统双频分区<br>RMS | E  | 0.2060 | 0.1366 | 0.1746 | 0.1387 | 0.1320 | 0.1322 | 0.1414 | 0.1378 |
|               |    | 0.1509 | 0.1512 | 0.1476 | 0.1496 | 0.1533 | 0.2037 | 0.1594 | 0.1874 |
|               |    | 0.1395 | 0.1264 | 0.1922 | 0.1284 | 0.1585 | 0.1760 |        |        |
|               | N  | 0.1177 | 0.1207 | 0.1139 | 0.1007 | 0.0929 | 0.0928 | 0.0867 | 0.1010 |
|               |    | 0.0946 | 0.1087 | 0.1054 | 0.1101 | 0.1178 | 0.1126 | 0.1097 | 0.1046 |
|               |    | 0.0990 | 0.1052 | 0.1176 | 0.0929 | 0.0997 | 0.1023 |        |        |
|               | U  | 0.2123 | 0.1997 | 0.2763 | 0.2938 | 0.2329 | 0.2100 | 0.2767 | 0.2484 |
|               |    | 0.3213 | 0.2935 | 0.2256 | 0.2601 | 0.2793 | 0.2557 | 0.3452 | 0.2257 |
|               |    | 0.2297 | 0.2256 | 0.2506 | 0.2063 | 0.1988 | 0.2255 |        |        |
|               | 3D | 0.3183 | 0.2704 | 0.3461 | 0.3401 | 0.2834 | 0.2649 | 0.3226 | 0.3015 |
|               |    | 0.3674 | 0.3476 | 0.2895 | 0.3196 | 0.3397 | 0.3458 | 0.3957 | 0.3115 |
|               |    | 0.2864 | 0.2792 | 0.3370 | 0.2601 | 0.2731 | 0.3038 |        |        |
| 直接解法          | E  | 0.2118 | 0.1345 | 0.1820 | 0.1353 | 0.1342 | 0.1318 | 0.1389 | 0.1405 |
|               |    | 0.1566 | 0.1503 | 0.1494 | 0.1461 | 0.1413 | 0.2005 | 0.1635 | 0.1888 |
|               |    | 0.1375 | 0.1262 | 0.2029 | 0.1230 | 0.1603 | 0.1771 |        |        |
|               | N  | 0.1153 | 0.1127 | 0.1127 | 0.1019 | 0.0917 | 0.0931 | 0.0938 | 0.0977 |
|               |    | 0.1015 | 0.1136 | 0.1095 | 0.1090 | 0.1120 | 0.1145 | 0.1122 | 0.1036 |

|  |    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 非差<br>非组<br>合双<br>频分<br>区<br>RMS                               |    | 0.0935 | 0.1058 | 0.1216 | 0.0921 | 0.1039 | 0.0995 |        |        |
|  | U  | 0.2239 | 0.2021 | 0.2845 | 0.3198 | 0.2425 | 0.2191 | 0.3039 | 0.2521 |
|  |    | 0.3495 | 0.3276 | 0.2469 | 0.2898 | 0.3100 | 0.2588 | 0.3831 | 0.2258 |
|  |    | 0.2497 | 0.2364 | 0.2638 | 0.2215 | 0.2088 | 0.2326 |        |        |
|  | 3D | 0.3291 | 0.2676 | 0.3561 | 0.3619 | 0.2920 | 0.2722 | 0.3470 | 0.3047 |
|  |    | 0.3962 | 0.3779 | 0.3087 | 0.3423 | 0.3586 | 0.3468 | 0.4314 | 0.3121 |
| 0.3000   |    | 0.2881 | 0.3543 | 0.2696 | 0.2830 | 0.3088 |        |        |        |
| 附加<br>外部<br>电离<br>层约<br>束的<br>非差<br>非组<br>合双<br>频分<br>区<br>RMS | E  | 0.1802 | 0.1209 | 0.1774 | 0.1388 | 0.1346 | 0.1336 | 0.1358 | 0.1376 |
|  |    | 0.1611 | 0.1579 | 0.1533 | 0.1412 | 0.1386 | 0.1945 | 0.1714 | 0.1848 |
|  |    | 0.1317 | 0.1141 | 0.1812 | 0.1167 | 0.1541 | 0.1741 |        |        |
|  | N  | 0.1150 | 0.1123 | 0.1121 | 0.1016 | 0.0908 | 0.0940 | 0.0932 | 0.1017 |
|  |    | 0.1014 | 0.1175 | 0.1054 | 0.1173 | 0.1151 | 0.1161 | 0.1133 | 0.1044 |
|  |    | 0.1006 | 0.1061 | 0.1270 | 0.0917 | 0.1005 | 0.0996 |        |        |
|  | U  | 0.2179 | 0.1955 | 0.2860 | 0.3176 | 0.2424 | 0.2201 | 0.3045 | 0.2592 |
|  |    | 0.3462 | 0.3372 | 0.2387 | 0.2941 | 0.3174 | 0.2673 | 0.3836 | 0.2379 |
|  |    | 0.2541 | 0.2356 | 0.2480 | 0.2192 | 0.2062 | 0.2323 |        |        |
|  | 3D | 0.3052 | 0.2558 | 0.3548 | 0.3612 | 0.2917 | 0.2740 | 0.3462 | 0.3106 |
|  |    | 0.3951 | 0.3904 | 0.3026 | 0.3467 | 0.3650 | 0.3503 | 0.4352 | 0.3188 |
|  |    | 0.3034 | 0.2824 | 0.3324 | 0.2648 | 0.2764 | 0.3069 |        |        |

为了获取每种定位模型的平均性能，每种模式对 22 个测站在 N、E、U 方向和总坐标偏差月均 RMS 值求取平均值，结果见图 4.13。

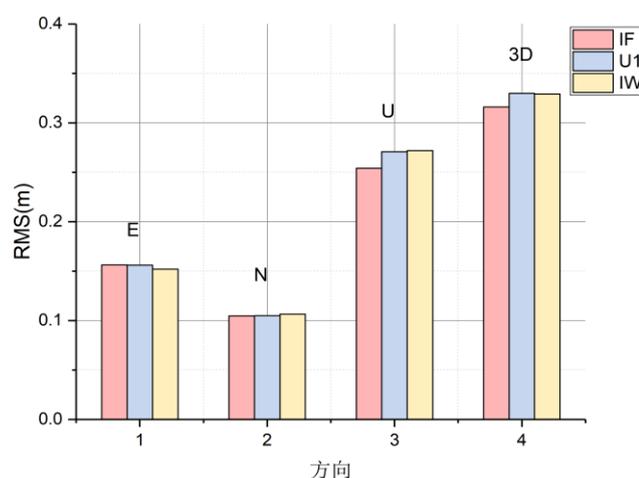


图 4.13 双频三种模式定位偏差的平均 RMS

图 4.13 图例中 IF 指传统双频分区，U1 指直接解法非差非组合双频分区，IW 指附加外部电离层约束非差非组合双频分区。通过表 4.4 和图 4.13 可知，三种双频分区在定位精度相差较小，其 E 方向的平均 RMS 分别为 0.1562、0.1561 和 0.1519；N 方向平均 RMS 分别为 0.1047、0.1050 和 0.1065；U 方向平均 RMS

分别为 0.2541、0.2707 和 0.2720；总偏差平均 RMS 分别为 0.3161、0.3297 和 0.3292。其中 IF 模式的结果较其它两种都有轻微的优势，偏差保持在 1cm 左右，这样的差距对于分米级定位来说影响较小，U1 和 IW 偏差基本相同。

此外统计了这 22 个测站 28 天的解算结果中，不合格结果（NEU 方向任意一个方向的偏差超过 1m）的数据量在总数据量中占到比例。统计如图 4.14。

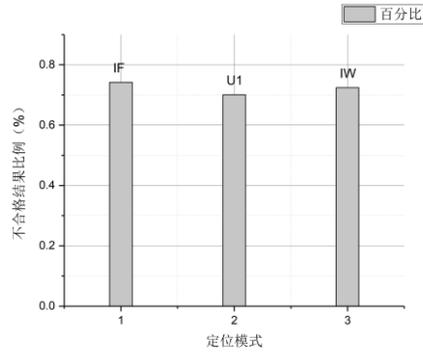


图 4.14 不合格结果比例

从图中可以得知，U1 模式的不合格数据量较 IF 和 IW 要少一点，IF 和 IW 不合格结果比例基本相同。总体来说，三种模型在数据解算结果的稳定性上基本保持在同一水平。

还统计了双频分区动态定位的收敛性。表 4.5 记录了每个测站在三种定位模式下共 28 天定位结果平均收敛时间、超时比例。收敛时间以坐标三维总误差收敛进入 1m 作为指标，并稳定保持坐标三维总误差在 1m 以内 10 个历元；超时以坐标三维总误差超过一个小时没有收敛进 1m 作为判断条件。

表 4.5 三种双频分区定位解算一个月收敛性统计

| 测站   | 传统分区       |       | 直接解法       |       | 附加电离层约束    |       |
|------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|      | 收敛时间 (min) | 超时比例  | 收敛时间 (min) | 超时比例  | 收敛时间 (min) | 超时比例  |
| AHBB | 20.13      | 0.00% | 22.75      | 0.00% | 16.20      | 7.14% |
| DLHA | 14.20      | 7.14% | 18.41      | 3.57% | 13.52      | 0.00% |
| FJXP | 29.20      | 0.00% | 29.31      | 0.00% | 24.64      | 7.14% |
| GDZH | 18.64      | 0.00% | 20.57      | 0.00% | 18.02      | 0.00% |
| GSPL | 17.52      | 7.14% | 18.90      | 7.14% | 14.43      | 0.00% |
| GSTS | 14.48      | 7.14% | 21.23      | 7.14% | 12.95      | 0.00% |
| GXGL | 20.23      | 0.00% | 22.52      | 0.00% | 14.03      | 0.00% |
| GZFG | 17.42      | 0.00% | 21.56      | 0.00% | 15.27      | 0.00% |
| GZGY | 19.21      | 0.00% | 20.54      | 0.00% | 13.08      | 0.00% |
| GZSC | 19.18      | 0.00% | 23.96      | 0.00% | 14.13      | 0.00% |
| HAJY | 28.79      | 7.14% | 31.21      | 7.14% | 26.68      | 0.00% |

|      |       |        |       |        |       |        |
|------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| HBXF | 13.00 | 0.00%  | 16.52 | 0.00%  | 11.63 | 0.00%  |
| HBZG | 14.30 | 7.14%  | 17.71 | 0.00%  | 12.69 | 0.00%  |
| HELQ | 27.88 | 0.00%  | 36.31 | 0.00%  | 24.67 | 3.57%  |
| HIHK | 21.67 | 0.00%  | 25.02 | 0.00%  | 16.38 | 3.57%  |
| JSYC | 24.66 | 0.00%  | 30.64 | 0.00%  | 22.11 | 3.57%  |
| JXJA | 20.94 | 0.00%  | 20.19 | 0.00%  | 16.80 | 0.00%  |
| QHGC | 12.52 | 3.57%  | 16.61 | 3.57%  | 11.15 | 0.00%  |
| SDRC | 28.56 | 0.00%  | 29.13 | 0.00%  | 18.94 | 3.57%  |
| SNMX | 13.40 | 7.14%  | 16.57 | 7.14%  | 13.55 | 0.00%  |
| SXKL | 25.32 | 3.70%  | 21.76 | 7.41%  | 12.61 | 0.00%  |
| YNMJ | 17.98 | 3.57%  | 20.69 | 3.57%  | 17.35 | 0.00%  |
| AVG  | 19.73 | 2.435% | 22.34 | 2.110% | 16.19 | 2.110% |

从表 4.5 可知，三种定位模式中附加电离层约束非差分组合双频分区的收敛性要明显好于传统双频分区和直接解法非差分组合分区双频，其收敛时间较传统分区提升了近 3.5min，较直接解法非差分组合分区双频提升了 7min；而且从收敛超时比例来看，非差分组合双频分区模式的结果也是明显好于传统双频分区模式。直接解法非差分组合双频分区收敛时间慢于传统双频分区，但是超时比例低于传统分区，可以认为直接解法非差分组合双频分区收敛性没有其余两种模式稳定。

#### 4.4 本章小节

本章主要介绍了基于分区综合改正数的非差分组合定位，深入探讨了分区定位中的各种定位模式在非差分组合下的关键内容和定位性能。

就单频分区定位来说，电离层对其的影响是较为明显的，相对于传统的单频分区定位，基于非差分组合的定位模式既要考虑电离层的估计过程，也要考虑虚拟观测方程的先验信息。通过比较白噪声过程和随机游走过程，可以发现两种方法对定位的结果影响差异较小，但是白噪声过程相对于随机游走过程使得电离层参数的噪声显得较为明显。此外虚拟观测方程的先验信息将对单频定位参数重要影响，通过研究发现，常数约束在定位中后期无法保持结果的稳定性，特别是 U 方向的偏差会出现放大的趋势，而逐步松弛约束在整个单频分区定位过程中保持稳定。本文还就相关内容与传统单频分区定位进行比较，发现非差分组合较半合法更能提高定位精度，总体精度提升保持在 10% 左右。

双频分区定位除了传统模式外，在非差分组合中有直接解法和附加外部电离层约束两种模式。直接解法和附加外部电离层约束的区别主要在于虚拟观测方程。三种模式的定位精度基本在同一水平，差距保持在 1cm 左右，在分米级定位中

可忽略；但是收敛性上有明显的差距，其中附加外部电离层约束双频分区定位依靠精确的电离层信息作为约束，使得定位的收敛性有明显的提升，不论是收敛时间还是超时数据比例，较其余两者都有优势，而直接解法非差分组合双频分区收敛性不如其余两者稳定。

## 第5章 总结与展望

### 5.1 工作总结

本文主要探讨了分区定位的相关内容，并将 PPP 中较新的非差非组合定位模式引入分区定位中，完成的主要工作如下：

- ① 研究了对流层延迟的相关特性，主要深入的论证了对流层分段常数模型中梯对定位结果的影响，得到了梯度的差异对定位的影响保持在 mm 级别，其中高程方向的差异表现的较为突出。此外，梯度对定位的影响与测站地理分布相关，其中靠近大海将使得梯度对定位的影响极具加深，而远离大海，梯度将难以对定位产生影响。梯度时间分辨率影响较小，在定位时可以不予考虑。
- ② 推导了将非差非组合引入分区定位中的单频观测模型、双频观测模型、单频位函数模型、双频定位函数模型。通过实验探索了非差非组合分区定位中新加入的电离层参数的相关特性。其中电离层的估计过程以随机游走过程较好。单频定位中虚拟观测方程的先验方差应为逐步松弛约束；而附加外部电离层约束的双频分区定位中，虚拟观测方程的先验方差既可为常数约束，也可为逐步松弛约束，两种约束方法对非差非组合双频分区定位的影响差异较小。
- ③ 通过实验证明了非差非组合单频分区定位的优越性，与传统单频分区定位相比，非差非组合单频分区定位 E-W 方向的精度提升了 15.16%，N-S 方向的精度提升了 9.32%，U-D 方向的精度提升了 7.19%，三维总精度提升了 9.81%。而且高精度数据的保持率也较传统单频分区提高了 12.25%。以上实验结果证明，非差非组合单频分区定位可以用于现行的 BDS 广域差分系统中。
- ④ 通过实验了解非差非组合双频分区定位的相关特性，与传统双频分区定位相比，两者非差非组合双频分区定位的精度级别保持在同一水平。但是从收敛性来看，附加外部电离层约束非差非组合双频分区定位要优于传统双频分区定位，这说明通过在定位初始阶段添加准确的外部电离层信息，可以加快定位的收敛速度，但是如果外部电离层信息不是通过虚拟观测方程的形式来进行约束，而是如直接解法非差非组合双频分区那样做为电离层参数的初值添加到伪距、相位观测方程中，那么收敛性反而没有传统双频

分区的无电离层组合收敛性好。

## 5.2 展望

本文虽然将非差分组合引入分区定位中并探讨了一部分理论,但受限于个人知识水平和研究的时间,还有很多方面值得探索。

- ① 本文所有的理论和实验都是基于 BDS 的广域差分系统,在多系统领域的研究还不足,对 GPS、GLONASS 和 GALILEO 等相关系统的星基增强系统的研究,以及非差分组合在这些系统的表现还有待研究。
- ② 本文中电离层使用的是 GIM,用来保证外部电离层的精确性,但是考虑到 GIM 的时效性较差,所以为了得到高精度的电离层数据,需要建立区域电离层格网和相关模型,这一步工作量较大,难点也多。

## 致谢

两年多的研究生学习生涯即将结束，临到别时，总是有很多想法。

我与同济相遇是很偶然的，与同济测绘学院相遇更是偶然，然而就是在这个充满偶然的的地方，我度过了自己最宝贵的6年时间，从本科到硕士，变的是知识，不变的是同济。磕磕绊绊中，我也无数次吐槽学校哪里不好，哪里需要改进等等，也梦想着早日脱离这个熟悉了不能再熟悉的地方，但直到要分别的时候，我才发现那一切都不重要了，自己依旧深爱着同济，就如同2013年成为同济人的那一刻。

两年多的研究生学校和生活中，我得到了许多人的帮助，在此我需要真诚的报以感激。

首先是我的导师伍吉仓老师和陈俊平老师。两位老师对学生都具有无限包容。不论是实验错误、算法不对、模型不准还是程序出现无数bug，两位导师都能给予我他们力所能及的帮助，并与我积极探讨其中的内容。读研期间自己对很多领域起了非常大的兴趣，两位导师也很支持我去接触更多新的知识，不是把自己局限于所学的那一点内容，我从中受益良多。两位导师以一种典范的方式做到了对学生的学术引导和帮助，我无以回报，在此深切的对两位导师表达感激和敬佩。

感谢伍老师门下各位同门：吴伟伟师兄、胡凤鸣师兄、宋瑞庆师兄、王恒师兄、王岩师兄、丁阳师兄、宋鑫友师弟，还有张丽娜师姐、赵婧文师姐、卢娟娟师姐、张丽师姐、李乃一师姐、廖敏言、王月师妹、李玉婷师妹和卞畏畏师妹。

感谢在410一起学习和工作的王明华师兄、张益泽师兄、朱聪师兄、严宇师兄、王阿昊师兄、侯阳飞师兄、孟令东师兄、鲍金师兄、肖金鑫师兄、任营营、崔浩猛、魏懂、杨乾峰师弟、何一辛师弟和刘东林师弟，还有廖汐琳师姐和叶珍师妹。

感谢天文台的各位同门：王斌师兄、柳培钊师兄、白天阳师兄、于超、伍冠滨、马壮、丁君生师弟和宋子远师弟，还有陈倩师姐、董志华师姐、刘姣师姐和王茹圆师妹。

当然还要感激在本科期间及研究生期间一起经常吃烤鱼的张绍华、潘伟、郭浩等同学。

最后还要感谢我的父母25年来对我的生养之恩，他们是我整个学业生涯的引路人和陪伴者，在我整个学生时期，他们为我付出了巨大的心血和努力。我因为他们而感到自豪与骄傲。

总之，离开不是结束，而是一个新的开始，我将报以无限的热情和期望投入新的起点。

2020年2月

## 参考文献

- [1] BDS ICD, 2016
- [2] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 01:1-6.
- [3] Zhou S., Hu X., Rui G, et al. Positioning Accuracy Assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO Constellation of COMPASS. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(12):2290-2299.
- [4] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [5] 朱永兴, 冯来平, 贾小林, 等. 北斗区域导航系统的 PPP 精度分析[J]. 测绘学报, 2015, 04:377-383.
- [6] Cao Yueling, Hu Xiaogong, Zhou Jianhua, et al. Kinematic Wide Area Differential Corrections for Beidou Regional System Basing on Two-way Time Synchronization[C]
- [7] Sun J, Jiao W, WU H, et al. *Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC)*. Berlin: Springer, 2014: 277-288.
- [8] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45(7), 079508.
- [9] 陈俊平, 杨赛男, 周建华, 等. 综合伪距相位观测值的北斗导航系统广域差分模型[J]. 测绘学报, 2017, 46(5), 537-546.
- [10] 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新模型[J]. 测绘学报.
- [11] 李玮, 程鹏飞, 秘金钟. 利用非组合精密单点定位提取区域电离层延迟及其精度评定[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*(10):1200-1203.
- [12] 辜声峰. 多频 GNSS 非差非组合精密数据处理理论及其应用[D]. 武汉大学, 2013.
- [13] 非组合与组合 PPP 模型比较及定位性能分析[J]. 张小红, 左翔, 李盼. *武汉大学学报 (信息科学版)*. 2013(05)
- [14] 张宝成. GNSS 非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究 [J]. 测绘学报, 2014, 43(10):1099.
- [15] 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. 李博峰, 葛海波, 沈云中. 测绘学报. 2015(07)
- [16] 汪晓龙, 王振杰, 姬生月, et al. BDS 非组合方法的周跳探测与修复[J]. *导航定位学报*, 2015(03):29-31.
- [17] Guo F, Xiaohong Zhang, Modeling and assessment of triple-frequency BDS precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11):1223-1235.
- [18] Liu T, Yuan Y, Zhang B, et al. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3):253-268.
- [19] 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.
- [20] Jones A V. Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning. *Environmental Effects on Spacecraft Positioning and Trajectories*. American Geophysical Union, 2013:1-16.

- [21] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 2015a, 19(2):321-333.
- [22] Montenbruck O, Steigenberger P. The BeiDou Navigation Message. *Journal of Global Positioning Systems*, 2013, 12(1): 1-12.
- [23] An enhanced algorithm to estimate BDS satellite's differential code biases[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(2):161-177.
- [24] Fan L, Li M, Wang C, et al. BeiDou satellite's differential code biases estimation based on uncombined precise point positioning with triple-frequency observable[J]. *Advances in Space Research*, 2016:S0273117716303738.
- [25] Banville S, Santerre R, Cocard M, et al. Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Ambiguity Resolution[C]// ION NTM 2008. 2008.
- [26] 许承权, 吴绍祖. 对流层梯度改正模型及其对 GPS 精密单点定位的精度影响分析[J]. *闽江学院学报*, 2009, 30(02):95-98.
- [27] Shi J, Xu C, Guo J, et al. Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(6):3452-3459.
- [28] Bock O, Doerflinger E. Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy*, 2001, 26(6):373-383.
- [29] 王勇, 柳林涛, 刘根友. 基于水汽辐射计与 GPS 湿延迟的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005(04):110-113.
- [30] 许华冠, 程宗颐. GPS 精密定位中对流层折射参数估计方法的比较分析[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 1997(00):95-102.
- [31] MEINDL M, SCHAER S, HUGENTOBLE U, et al. Tropospheric Gradient Estimation at CODE: results from Global Solutions [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 2004, 82(1B):331-338.
- [32] 葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究[J]. *测绘学报*, 1996(04):46-52.
- [33] Wu X, Zhou J, Tang B, et al. Evaluation of COMPASS ionospheric grid. *GPS Solutions*, 2014, 18(4):639-649.
- [34] Hernández-Pajares, M., Juan, J.M., Sanz, J. et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J Geod* 83, 263-275 (2009).
- [35] Schmid R, Rothacher M. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(7):440-446.
- [36] IGS PCV PCV Montenbruck [102] Schmid R, Dach R, Collilieux X, et al. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx:status and potential improvements. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(4):343-364.
- [37] Subirana J. Sanz, Juan Zornoza J.M. and Hernández-Pajares M. GNSS Data Processing:Volumn I: Fundamentals and Algorithms. ESA communications,

- Netherlands, 2013
- [38]Tétreault P, Kouba J, Héroux P, et al. CSRS-PPP: An internet service for GPS user access to the Canadian Spatial Reference frame. *Geomatica*, 2005, 59(1):17-28.
- [39]陈俊平, 杨赛男, 周建华, 曹月玲, 张益泽, 巩秀强, 王君刚. 综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型[J]. *测绘学报*, 2017, 46(05):537-546.
- [40]张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究[D]. 同济大学, 2017
- [41]张益泽, 陈俊平, 杨赛男, 陈倩. 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.

## 附录

RTKLIB 程序: GITHUB

观测数据网站: <ftp://lox.ucsd.edu/pub/rinex/2007/067>

产品网站: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub>

海潮: <http://froste.oso.chalmers.se/loading/> <http://geodac.fc.up.p/loading/>

陆态网络数据: //www.igs.org.cn:8080/

Igs: <http://acc.igs.org/>

RINEX3: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/campaign/mgex/daily/>

CODE DCB:

<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2012/>

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

周杨, 男, 1994 年 11 月生。

2013 年进入同济测绘与地理信息学院进行本科教育

2017 年 6 月本科毕业于同济大学, 并被授予工学学士学位

2017 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]周杨. 梯度估计对基于对流层分段常数模型的 PPP 的影响[C]. 2019:78-82.