



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

GNSS 单频接收机高精度定位研究

姓名：余伟

学号：1130791

所在院系：测绘与地理信息学院

学科门类：工学

学科专业：大地测量学与测量工程

指导教师：楼立志 副教授

副指导教师：陈俊平 研究员

二〇一四年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

High Precision Positioning Research for GNSS Single Frequency Receiver

Candidate: Yu Wei

Student Number: 1130791

School/Department: College of Surveying and
Geo-informatics

Discipline: Engineering

Major: Geodesy and Surveying Engineering

Supervisor: Associate Prof. Li-Zhi LOU

Associate Supervisor: Researcher Jun-Ping CHEN

March, 2014

GNSS 单频接收机高精度定位研究

余 伟

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：所提交的学位论文，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

随着 GNSS 卫星导航系统的不断发展，其全球性、全天候、高精度、保密性强等特性，在卫星导航、形变监测、大地测量、大气探测等领域被广泛应用。同时在国民生产领域，随着精密轨道和钟差等产品的精度不断提升，非差精密单点定位技术（PPP）因其作业效率高、成本低、定位精度高等优点，应用水平也随之不断提高。特别地，研究为单频接收机用户提供高精度的位置服务，也就是单频精密单点定位技术成为了时下的热门研究领域之一。本文也是在这样的背景下展开了对单频精密单点定位技术的研究。

在实现单频信号精密定位过程中，影响最大的是电离层延迟，本文围绕如何消除单频信号中电离层延迟的影响来实现单频精密定位研究了若干种方法，介绍了它们的实现过程并分析了优劣之处。本文按照有无参考站辅助定位的方式将这些实现方法划分为两类，研究取得了以下几点成果：

1) 研究分析了单频精密单点定位的一般原理，包括观测方程的建立、随机模型的建立、参数估计方法以及各类误差源改正的过程，给出了单频精密单点定位技术一般实现过程。

2) 研究了电离层延迟模型的建立过程。本文分析了时下常用的电离层延迟模型建模思路并且采用详实的实验数据分析了它们在单频精密单点定位中的表现。得出的结论是电离层延迟模型对修正电离层延迟有一定的作用但还不能实现厘米级的高精度定位。

3) 针对单站单频接收机的定位模式，介绍了几种实现方案。主要包括电离层参数估计法、码/相位半和法以及电离层参数约化法。这些方法都是基于用户站本身的数据提出的，它们处理电离层延迟的方式不尽相同，但都能很好顾及到电离层延迟本身的物理特性最终实现厘米级的定位精度，但在定位效率上与双频组合精密定位方法还有差距。

4) 研究了在区域参考站辅助下的单频接收机精密单点定位的方法，主要包括单/多基准站辅助法、基于 SEID 模型的单频精密单点定位方法以及基于 URTK 模型的单频精密单点定位方法。这些方法研究的基础都是针对以电离层延迟为主的区域误差模型的建立过程展开的，它们各自的建模方法各不相同但都实现了厘米级定位精度。基于 URTK 模型还实现了单频信号模糊度的快速固定，进一步提升了定位效率。

关键字：GNSS；单频接收机；精密单点定位；电离层模型；URTK；SEID；参考站

ABSTRACT

With the development of Global Satellite System(GNSS),it has been widely used in many fields ,like satellite navigation, deformation monitoring, surveying and mapping, atmospheric detection and so on, with its special qualities of global coverage, all-weather, high precision, efficiency and strong security. By the way, with improving of satellite orbit and clock products' precision in the field of national production, the precise point positioning technology has been widely accepted with its characteristics of high precision, efficiency and low price. Especially, the area of research for improving high precision location service for single frequency receiver, as the single frequency precise point positioning technology is one of the most popular hot spot recently. And this article began its way of researching single frequency precise point positioning technology based on this background.

The biggest influence to realizing single frequency precise point positioning technology is ionospheric delay, This article has researched many new methods, including the theory and their advantages and disadvantages. All these methods embraced how to remove the ionospheric delay from single frequency and realizing the single frequency PPP technology in the end. These methods were divided into two parts based on with the help of base stations or not. After a deep and comprehensive research, several efforts have been achieved:

1) The base theory of single frequency PPP technology has been analyzed, including the building process of observation equation, chastic models, the method of parameter estimation and the correction model of various errors on the single frequency signal. This article has provided a brief process for realizing this technology.

2) The process of building the ionospheric delay model is one of the key research contents in this article. Several popular models have been analyzed and their performance in single frequency PPP method has been tested by amount of data. And the concluding is these models are helpful to eliminate parts of ionospheric delay in single frequency signal but useless in its cm-level high precision positioning area.

3) According to model of single station positioning by single frequency receiver, several methods have been introduced, including the method of ionospheric delay parameter estimation, pseudorange/carrier phase combination method and ionospheric delay parameter elimination method. The raising of these methods all based on the

data which come from the rover station only. The ways of these methods to deal with ionospheric delay were various, but a cm-level positioning precision has been achieved by the characteristics of ionospheric delay has been taken into account. By the way, the efficiency is low when compared with double frequency signals precision positioning mode.

4)Several precision positioning methods using single frequency receiver with the help of base stations has been researched, including method based on single base station/several base stations, method based on SEID model and method based on URTK model. The spreading of these methods was based on researching how to building the area error model whose main part is Ionospheric delay. The ways to build area error model of these methods were different but all helpful to achieve a cm-level positioning precision by using single frequency signal. The method based on URTK model even realized the rapid ambiguity fixing in single frequency signal and improved the efficiency.

Key Words: GNSS; Single Frequency Receiver; PPP; Ionospheric delay model; URTK; SEID; Base Station

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究背景及研究意义	1
1.2.1 研究背景	1
1.2.2 研究意义	3
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 单站单频 PPP 技术的发展	3
1.3.2 RTK 技术的发展	4
1.4 本文主要的研究目标及内容	6
第 2 章 GNSS 单频精密单点定位基础	9
2.1 单频 PPP 的基本原理及关键技术	9
2.1.1 单频 PPP 的函数模型	9
2.1.2 单频 PPP 的随机模型	10
2.1.3 单频 PPP 的参数估计方案	10
2.1.4 单频 PPP 的解算流程	11
2.2 单频精密单点定位的关键技术	12
2.3 单频数据的预处理	13
2.3.1 基于星间差的高次差法	13
2.3.2 改进的多项式拟合法	14
2.3.3 伪距/载波相位组合探测法	15
2.4 单频 PPP 的主要误差来源及其修正方法	16
2.4.1 与接收机有关的误差	16
2.4.2 与信号传播有关的误差	19
2.4.3 与卫星有关的误差	22
2.5 本章小结	25
第 3 章 单站单频 PPP 技术与电离层延迟处理研究	27
3.1 电离层延迟模型改正法	27
3.1.1 广播星历预报电离层延迟模型 (Klobuchar 模型)	27
3.1.2 广域差分实时电离层延迟模型	28
3.1.3 后处理电离层延迟模型	28
3.1.4 模型改正法的数据测试实验	30
3.2 电离层参数估计法单频 PPP 方法	35
3.2.1 电离层映射函数的研究	35
3.2.2 电离层延迟的函数表达式	36
3.2.3 电离层延迟参数估计法的数学原理	37
3.2.4 电离层延迟参数估计法的实验分析	37
3.3 伪距/相位半和法单频 PPP	42
3.3.1 伪距/相位半和法的数学原理	42

3.3.2 伪距/相位半和法的关键技术.....	42
3.3.3 伪距/相位半和法的实验分析.....	43
3.4 电离层参数约化法单频 PPP.....	47
3.4.1 电离层参数约化法的数学原理.....	47
3.4.2 电离层参数约化法的实验分析.....	48
3.5 本章小结.....	53
第 4 章 参考站辅助单频 PPP 技术与区域误差模型研究	55
4.1 基于基准站改正单频 PPP 方法.....	55
4.1.1 基于基准站改正的单频 PPP 的数学原理.....	55
4.1.2 基于基准站改正的单频 PPP 的关键技术.....	57
4.1.3 基于基准站改正的单频 PPP 的实验分析.....	57
4.2 基于 SEID 模型的单频 PPP.....	62
4.2.1 基于 SEID 模型的单频 PPP 的数学原理.....	63
4.2.2 基于 SEID 模型的单频 PPP 的关键技术.....	65
4.2.3 基于 SEID 模型的单频 PPP 的数据实验.....	66
4.3 基于 URTK 模型单频 PPP.....	71
4.3.1 基于 URTK 模型单频 PPP 方法的数学原理.....	71
4.3.2 基于 URTK 模型单频 PPP 方法的关键技术.....	75
4.3.3 基于 URTK 模型单频 PPP 方法的实验分析.....	77
4.4 本章小结.....	82
第 5 章 总结和展望	83
5.1 论文研究工作总结.....	83
5.2 后续研究工作展望.....	84
致谢.....	87
参考文献.....	89

第 1 章 绪论

1.1 引言

全球卫星导航系统 (GNSS, Global Navigation Satellite System), 又称天基 PNT 系统。其研制目的是为了给潜在用户提供时间和空间基准以及所有与位置相关的实时动态信息。作为国家重大的空间和信息化基础设施, 自上世纪 70 年代以来, GNSS 技术日益成为各国争相研制的热门领域, 成为现代化大国地位和国家综合国力的重要标志。

GNSS 是所有在轨工作卫星导航定位系统的总称, 包括全球星座, 区域星座以及相关的星基增强系统。由于 GNSS 在现代化国防安全以及经济与社会发展中的不可或缺的地位, 世界各主要大国都竞相发展独立自主的卫星导航系统。世界第一个成熟的卫星导航系统由美国率先研制成功, 即全球定位系统 (GPS, Global Positioning System), 上世纪 70 年代由美国陆、海、空三军联合研制。GPS 系统目前 30 多颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内, 轨道倾角为 55 度, 各个轨道平面之间相距 60 度, 能够在全全球范围内为用户提供全天候、不间断、高精度的定位与授时服务。前苏联也于上世纪 60 年代提出建立本国的全球卫星导航系统 (GLONASS, Global Navigation Satellite System), 然而由于政治、经济等原因, 该计划受到很大影响。近年来, 随着俄罗斯经济的复苏, GLONASS 系统得到迅速完善。为了打破世界美、俄全球定位系统在这一领域的垄断, 欧洲决定启动伽利略计划, 建立自主的民用全球定位系统 (GALILEO), 计划在 2010 年基本实现全球覆盖。为了提高亚太地区的定位精度和我国军事、国防安全, 我国正在建立自主的全球导航卫星系统, 即北斗二代 (COMPASS)。估计到 2020 年, GNSS 领域将主要由以上四大全球导航系统主导, 未来卫星导航领域可使用的卫星数目将多达 80 颗以上, 通过进一步的研究, 将构成新一代的整合式导航及定位定向系统。

GNSS 系统自研制成功以来, 由于其具有全球性、全天候、高精度, 高效率、保密性强等一系列特点, 已被成功的用于大地测量、地壳运动监测、地球动力学等多种学科, 给测绘领域带来一场深刻的技术革命。同时在卫星导航、测量定位、变形监测、大气探测等领域也取得了较为广泛的应用。

1.2 研究背景及研究意义

1.2.1 研究背景

GNSS 信号主要由 C/A 码、P 码、载波相位和导航电文等多种信息组成，这些信息通过相位调制技术加载在载波上由在轨卫星发射。在地面段用户通过 GNSS 接收机接收调制信号并加以利用。根据接收机接收信号能力的不同，可以分为单频接收机和双频接收机。单频接收机的成本较低，一般只能获取在轨卫星发射的 C/A 码、L1 载波相位和导航电文；双频接收机的成本较高，在兼容单频接收机的能力之上，还能获取 P2 码和 L2 载波相位信息。

GNSS 信号在发射后，经过电离层、对流层等传播介质由用户接收机天线接收。因此在精密定位应用中必须顾及信号传播路径上所受到的各类误差的影响，按照目前的 GNSS 精密数据处理方法，对流层延迟、相对论效应、地球自转、天线相位中心改正等误差均可以采用现有模型或者算法进行较为精确的消除。而对于电离层延迟，由于电离层电子密度受到太阳活动性、季节、一日内的时间和地磁纬度等多种因素的影响，且太阳扰动和磁暴也会使电离层发生不规则变化，难以用一个精确的模型去描述。因此电离层延迟误差是影响 GNSS 精密数据处理的主要因素。为了有效消除电离层延迟对定位精度的影响，通常可以采用以下三种解决方法：

1) 采用双频组合定位，电离层介质与信号频率有关，可以采用复频无电离层组合观测值来尝试消除电离层延迟。其中双频组合可改正一阶项，三频组合可改正至二阶项。这也是目前应用最广泛，也最为有效的消除电离层延迟影响的方法。但其局限性在于必须采用双频及以上接收机，作业成本较为昂贵。

2) 相对定位模式定位，卫星信号在区域内测站间所受电离层延迟具有高度相关性，可以用站间差分来消除这些共性误差的影响。但这种方法受距离限制，对于范围较大的控制网，由于电离层变化的不确定性，站间电离层延迟相关性降低，将无法通过站间差分的方式消除。

3) 构建区域电离层模型，不同于单层或者 Klobuchar 等经验模型，该方法的原理是通过区域内多基准站组成的参考网联合解算来构建区域电离层模型。因此能更好的模型化局部电离层扰动，达到消除区域内流动站电离层延迟的效果。

目前，在高精度的导航和定位领域，采用双频接收机来消除电离层延迟的方案最为常用，但建设方案不可避免的面临高成本。随着 GNSS 技术的进一步发展，在利用 GNSS 技术开展大规模区域变形监测，大气探测等研究中，由于需要采集更加精准的高时空分辨率信息，将不得不布设大量的 GNSS 接收机(Braun et al, 1999; Han, 1998; Scialpi et al, 2008; Wang et al, 2009; Bender et al, 2009)。因此，在综合考量建站效率和建设成本的情况下，如何消除单频电离层误差，利用相对廉价的单频接收机实现大范围、高精度定位是目前国内外卫星大地测量研究的热点和难点问题之一。

1.2.2 研究意义

本论文所开展的研究将围绕如何消除单频信号中电离层延迟的角度出发,综合考量单频精密单点定位技术在发展历程中的出现的各种实用方法,分析其实现方案的构建过程及优缺点。同时参考 CORS 网络技术,研究以电离层延迟为主的区域误差模型的构建方案,建立起区域单频精密定位的完整解决方案。本文的研究内容从科学研究与社会需求以及 GNSS 技术应用推广上,都具有重要的理论和现实意义。

本文系统性的介绍和重现了目前常见的几种单频 PPP 方法。全面阐述和剖析了单频精密点定位的发展历程和研究现状,比较了这些方法的优劣性,探索解决 GNSS 单频用户在区域内获得精密位置服务的最佳适用方案,同时进一步研究和探讨单频 PPP 方案在未来的适用性和延展性。

本论文在以上探讨的研究的进程中,以成熟的 GPS 系统为主要研究对象,采用 FORTRAN 语言开发了双频无电离层组合的 PPP 程序代码,获得了良好实验测试结果。在此基础上,针对各种单频 PPP 方法,自行开发了对应的数据处理软件,取得了良好的实验结果。希望通过本文的研究,继续推动更加丰富和适用性更强的单频高精度定位方法的出现,为 GNSS 技术的推广做出更多贡献。

1.3 国内外研究现状

GNSS 单频接收机具有成本低,便于广泛推广应用等特点,同时考虑到其只提供 C/A 码伪距和载波相位,C/A 码伪距精度较低,不能满足高精度定位的需要。载波相位虽然观测精度达到毫米级,但其中包含有整周模糊度,电离层延迟也无法通过双频组合观测值的方法消除。因此如何消除电离层误差的影响,利用相对廉价的单频接收机实现大范围、高精度定位是目前国内外研究的热点和难点问题之一。随着单频 PPP 技术研究的深度和广度的展开,各种研究成果也层出不穷,按照是否存在参考站辅助的角度来看,目前精密定位主要的理论研究方向可以分为单站单频精密单点定位技术和网络 RTK 技术。

1.3.1 单站单频 PPP 技术的发展

伴随着双频 PPP 技术的不断完善,国内外学者对单频 PPP 的研究也乐此不疲。在国外研究探索进程中,加拿大卡尔加里大学的 Gao Yang 教授采用快速固定整周模糊度的方式,利用码和载波的无电离层组合,实现了米级精度的实时单频 PPP 结果 (Gao, et al, 2001); Tomas Beran 等学者在讨论和研究了伪距和载波相位联合模型的状态方程和观测方程的基础上,分析其滤波模型和接收机钟差模型,给出了对应的状态向量和参数矩阵,利用非线性卡尔曼滤波方法取得了米

级精度的单频 PPP 结果 (T.beran, 2003); Anh Quan Le 教授详细叙述了单频精密单点定位的原理, 利用载波相位在相邻历元间做差并联合伪距观测值组成观测方程, 忽略天线相位中心 Z 方向的偏差以及对流程延迟、固体潮延迟和天线相位缠绕效应的影响, 采用逐次滤波的方法, 使得单频 PPP 结果达到了动态平面 0.3 米, 高程方向 0.5 米的精度(A.Q.Le, 2006)。另外, Anh Quan Le 还介绍了单频精密单点定位中硬件延迟偏差 (DCBs) 的处理方法, 讨论了单频 PPP 的最优滤波方法, 并通过实验详细分析了静态、动态两种情况下单频精 PPP 的表现情况 (A.Q.Le, 2007); Choy 等学者分析对比了多种电离层模型在单频 PPP 中的使用情况, 最终实现了半天以上数据的单频 PPP 取得 1 分米的定位精度(Choy, 2008)。

在国内, 王双喜等学者利用码和载波消电离层组合的历元间差分方法, 采用非线性滤波模型, 实现动态单频 PPP 米级精度 (王双喜等, 2006); 武汉大学的张小红教授等人提出了一套完整的单频 PPP 的实现方法, 详细讨论了如何利用单频观测量进行精密单点定位的技术方案, 也即利用伪距/相位半和法消除电离层延迟, 建立对应的单频精密单点定位的数学模型, 综合考虑了各种误差的改正模型, 利用多种实测数据进行了静态、静态模拟动态、车载动态及机载动态定位试验。结果表明: 单天解的静态定位结果中平面与高程定位精度均达到厘米级, 略低于当前双频无电离层组合的精密单点定位精度; 动态定位结果中平面位置精度达到了 0.2~0.3m, 高程方向为 0.5m, 能够满足分米级的实时动态定位要求(张晓红等, 2008); 许承权等学者基于可能系估计, 对单频 PPP 建立了极大可能性估计模型, 讨论了载波相位辅助伪距的逐次滤波法 (许承权等, 2008)。

河海大学的何秀凤教授以及武汉大学的王新洲教授则从硬件方法的方向考虑, 采用一机多天线技术, 利用一部接收机互不干扰的接收多个天线的卫星信号, 将计算机实时控制技术、无线电通讯技术和导航定位算法有机结合起来, 采用相对定位方法实现高精度效果, 大幅度降低了系统建设成本。但该方法受限于硬件和软件等各方面的限制, 无法大规模推广应用(何秀凤等, 2002; 王新洲, 2007)。

1.3.2 RTK 技术的发展

与此同时, 在单频接收机的精密单点定位研究的进程上, RTK 技术的发展也为单频接收机实现更加快速的高精度定位提供了新的思路。

常规 RTK 方法是利用卫星信号在测站间所受电离层延迟的相关性进行站间差分来消除这部份误差影响。在相对定位理论模型中, 相位整周模糊度得到固定后, 相当于获得了包含毫米级精度观测噪声的相位观测值, 定位精度将会获得明显提高 (Teunissen, 1996)。在这之后定位精度将与观测时间的延长无明显关系, 定位精度将维持在一定水平 (周忠谟, 1992)。因此, 快速可靠地固定整周模糊

度是体现常规 RTK 技术效率的关键环节。

1985 年 Remondi 开发出了一种快速差分定位的新技术。该技术利用固定一台 GPS 接收机作为参考站, 收集连续观测数据。与此同时其它 GPS 接收机则其周围的观测点上同时静止地接收观测数据, 几分钟连续观测后即可快速固定差分的整周模糊度, 完成定点的高精度测量结果, 继而可移动非参考站接收机到其它位置继续完成类似操作(Remondi, 1985)。这种方式称之为准动态差分定位, 也即走走停停(Stop and Go, S&G)方式。这种方法实现了载波相位观测量差分定位的更高的利用率, 大大缩短了观测时间, 使其定位精度达到了静态载波相位差分定位的水平。但这种方法缺点也很明显, 首先需要静态观测固定整周模糊度, 其次必须保持接收机在移动过程中对观测卫星的连续跟踪, 防止卫星失锁导致整周模糊度固定失败, 需要重新初始化, 限制了动态定位的应用效果。

1994 年, Edwards 等学者在研究相对定位理论的基础上, 研究并开发出了实时动态定位技术(Real-Time Kinematic, RTK, Edwards, 1999)。该技术同样基于一个本地参考站的设置, 动态接收机用户通过常规 RTK 方法定位时, 参考站通过完整可靠的数据通信链路将本站观测到的载波相位观测数据和参考站真实坐标实时播发给用户流动站。用户根据当前接受到的数据和本站同步观测到的数据以及广播星历进行实时相对定位解算。根据精确已知的本地参考站坐标, 可以计算出精确的用户瞬时位置坐标。常规使用的 RTK 技术是建立在相对定位中流动站与参考站之间误差高度相关的假设基础之上。也即通过同步观测参考站和流动站数据, 二者信号中的误差延迟影响在时空中具有高度的相似性, 通过差分可降低大部分误差包括电离层延迟、对流层延迟, 卫星钟差、星历误差等对差分相位观测值的影响。进而通过快速固定模糊度达到高精度定位的效果。因此, 该方法只在一定区域范围内有效(如 10km 以内)。同时受限于通讯技术以及复杂环境的影响, 常规 RTK 技术的不足之处也很明显(Wanninger, 1995; Gao, 1997; Han, 1997; Chen, 2001)。

为了解决常规 RTK 技术在用户流动站与参考站间使用距离有限以及长距离基线定位初始化时间长等问题, 在联合研究常规 RTK 技术、计算机中枢控制技术以及通讯网络等技术的基础上, 利用连续运行参考站系统(CORS, Continuously Operating Reference Stations), 快速发展起了一种新式的网络 RTK 技术, 也称多参考站 RTK 技术。该方法理论基础是利用多个(至少三个)参考站的双频相位观测数据来构建包括电离层延迟、对流层延迟、卫星轨道和钟差等影响的区域误差改正模型, 结合区域内的用户站数据, 实现快速高精度定位。网络 RTK 技术的出现很好地解决了大范围区域内厘米级精度实时定位的问题, 并且在现代社会的发展建设进程中发挥着越来越重要的作用。网络 RTK 技术弥补了

常规 RTK (Standard RTK, SRTK) 的不足, 克服了单站差分的局限性和诸多困难, 使实时动态高精度定位的应用变得更加广泛, 同时也拓展了单站差分的应用领域。网络 RTK 技术通过建立更为精确的误差模型以及采用更加完善的数据处理技术, 提高了整周模糊度的解算能力和可靠性, 最大限度地扩展了观测基线长度。

国内外多位专家学者对网络 RTK 技术理论的研究取得了相当丰硕的成果, 同时通过研制实用软件也形成了各自的标准使用体系 (Wanninger, 1995; Gao; 1997; Han, 1997; Christian Rochen, 2000; Chen, 2001; Herbert Landau, 2001; 高星伟, 2002; 唐卫明, 2006)。目前关于网络 RTK 技术的各种成果一般都基于区域 CORS 网络提出, 根据其误差改正模型的融合方法, 通讯方式以及差分信息生成方式的不同又可分为如下几类:

- (1) 虚拟参考站法(VRS, Virtual Reference Station)
- (2) 综合误差内插法(CBI)
- (3) 区域改正参数法(FKP)
- (4) 主辅站误差改正法(MAX)

通过利用网络 RTK 技术从而建立 CORS 网络系统是当前区域性科学研究、社会公益性服务和商界应用的热点研究方向之一, 也是当前国内和世界各国 GPS 的最新发展技术和发展趋势, 随着 CORS 系统建设的日趋完善, 网络 RTK 技术研究也必将迎来更加广阔的空间。

1.4 本文主要的研究目标及内容

本文主要的研究目的是实现单频 GNSS 接收机的高精度定位, 研究的重心是如何削弱单频信号中无法消除的延迟影响, 如电离层延迟等, 实现高精度定位成果。最终目标是突破现有条件的限制, 实现利用相对廉价的单频接收机在国民生产和经济发展中进行更大范围、更高精度的应用。深入研究目前常用的单频 PPP 方法, 解决其关键技术难题, 并且研制出实用的单频 PPP 定位软件。

目前基于 GNSS 的成熟的 PPP 软件都是基于双频无电离层组合的方式研制的, 单频 GNSS 接收机的精密定位仍旧存在一系列的理论和技術难点, 主要包括: 单频数据的预处理, 对流层模型构建, 电离层延迟等误差的消除, 参数估计理论方法以及非差模糊度固定技术等。

围绕以上内容, 本文的主要研究框架如下:

第一章, 本文绪论部分, 主要阐述了本文的研究背景和现状, 研究意义和研究内容以及国内外技术发展状况。

第二章, 主要介绍单频精密单点定位理论基础原理。包括单频 PPP 定位基

基础理论知识；单频数据预处理方法，主要介绍本文采用的组合单频信号周跳探测方法；单频信号误差源及其模型改正方案。重点介绍了相位缠绕改正对精密定位的影响及其改正的有效性。

第三章，阐述了几种常见的单站式单频 PPP 实现方案，研究电离层延迟在单频 PPP 中的重要影响，集中讨论在单站式单频 PPP 中如何实现消除其影响并实现高精度定位，主要研究方法包括电离层模型改正方法、电离层参数估计法、伪距/相位半和法、以及消电离层参数法等。完成了以上各种方法的程序设计工作，最后通过详实的数据给出了最终实验结果并给出了相应的评价。

第四章，在单站式单频 PPP 的基础上，研究了基于基准站辅助的单频 PPP 实现方案，研究如何进一步提高单频 PPP 的定位效率。主要方法包括基于单/多基准站辅助法、基于 SEID 模型单频 PPP 方法以及基于 URTK 模型单频 PPP 方法。重点研究了基于 URTK 模型的方法，讨论了其区域内单频模糊度的快速固定方案。同时完成了相应程序的编辑并给出了详实的数据论证。

第五章，结论与展望

本文的总体研究内容如图 1.1 所示：

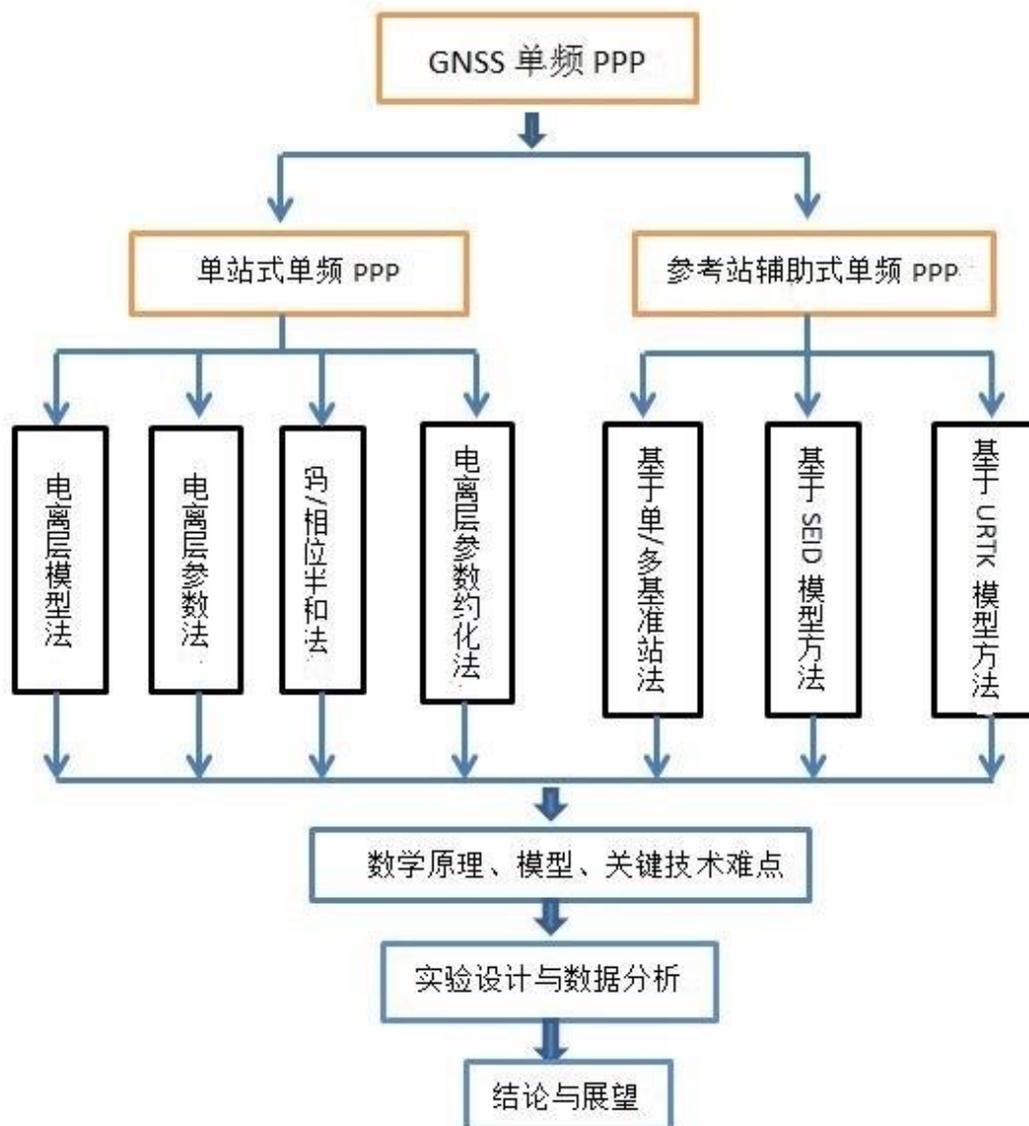


图 1.1 本文研究内容流程图

第2章 GNSS 单频精密单点定位基础

本章将从函数模型、随机模型和参数估计方法三个方面讨论单频 PPP 技术的定位原理；同时研究了单频数据预处理方法，特别针对单频数据周跳的处理给出了合理的方案；最后分析了与单频精密单点定位有关的误差源，并给出各项误差的正确改正措施。

2.1 单频 PPP 的基本原理及关键技术

单频 PPP 技术是利用 IGS 提供的精密轨道和精密钟差文件以及单频非差观测值，采用严密的绝对定位模型进行单点精密定位的技术。

2.1.1 单频 PPP 的函数模型

函数模型的建立是基于观测量与未知数之间存在的物理或者几何关系，根据卫星定位理论的一般过程，本文对单频信号的研究均是以 L1 信号为例，同时适用于其他单频信号。如此单频 PPP 的观测方程可表示为 (Kongzhe Chen, 2005)：

$$C_1 = \rho_r^s + c * (dt_r - dt^s) + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion} + d_{trop} + d_{rel} + \varepsilon(C_1)$$

$$\lambda_1 * \varphi_1 = \rho_r^s + c * (dt_r - dt^s) + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion} + d_{trop} + d_{rel} + \lambda_1 * N_1 + \varepsilon(C_1)$$
(2.1)

其中：

C_1 为 C/A 码的伪距观测值；

φ_1 为载波单频相位观测值；

ρ_r^s 为卫星至测站间的几何距离；

c 为真空中的光速；

dt_r 为接收机钟差；

dt^s 为卫星钟差；

T_{DCB} 为硬件延迟；

d_{orb} 为卫星轨道误差；

d_{ion} 为电离层延迟；

d_{rel} 为相对论效应；

λ_1 为载波波长；

N_1 为整周模糊度；

$\varepsilon(C_1)$ 与 $\varepsilon(\varphi_1)$ 为观测噪声。

在实际处理中，公式中的卫星端的轨道误差 d_{orb} 和钟差 dt^s 可以采用 IGS 提

供的精密星历和精密钟差产品予以计算得出。通常，卫星位置可采用 8-10 阶拉格朗日多项式插值法给出，卫星钟差则采用低阶多项式插值法给出；相位中心改正、相对论效应，电离层延迟、地球自转改正以及对流层延迟改正等可事先采用模型改正。对流层的残余部分可加入参数估计；单频 PPP 的硬件延迟可采用外部提供的 DCB 信息进行改正。参数估计部分包括接收机钟差、三维坐标参数、载波相位整周模糊度以及天顶方向对流层延迟残余部分。

2.1.2 单频 PPP 的随机模型

单频 PPP 的随机模型主要包括两个部分：观测值的随机模型和待估参数的随机模型。通过研究观测量的方差-协方差矩阵给出的统计特性，观测值中的伪距和载波相位观测值的初试方差之比定为 100:1，并且在具体平差过程中考虑到卫星信号噪声的影响，对每颗卫星的观测量根据其卫星高度角的大小予以定权 (Wang J, et al, 1999)，一般定权方法是：

$$P = \begin{cases} 1 & (\theta \geq 30^\circ) \\ 4 * \sin^2 \theta & (\theta < 30^\circ) \end{cases} \quad (2.2)$$

其中， θ 为卫星高度角，同时在实际操作中还要设置截止高度角，针对信号质量差的低高度角卫星观测数据予以剔除。

对于待估参数的随机模型，单频 PPP 中待估参数主要有四类，包括接收机钟差参数、三维坐标参数、整周模糊度参数以及天顶方向的对流层延迟参数。天顶方向对流层延迟参数的随机模型可采用随机游走过程 (Zumberge, et al, 1998; Konba & Heroux, 2001)；接收机钟差参数和三维坐标参数的随机过程通常可采用随机游走或者一阶高斯-马尔科夫过程 (Axelrad & Brown, 1996)；对于整周模糊度参数，在没发生周跳的情况下，当做常数处理。在周跳发生后，模糊度参数需要重新初始化 (张小红等, 2009)。

2.1.3 单频 PPP 的参数估计方案

单频 PPP 的处理过程是基于观测值的非差定位后处理方式，其特点是观测值量大，待估参数多，计算量大，所以要实现快速准确的估计出参数需要选择合适的参数估计方法。当前常用的参数估计方法主要有序贯最小二乘和动态卡尔曼滤波两种方法 (李洪涛等, 1999; 杨元喜, 2006)。它们基于相似的原理但各自具有不同的特点。本文采用序贯最小二乘方法，其一般流程如下：

对于连续观测的 GNSS 单频接收机数据 L ，假设其历元间相关性为零，对于前后两个历元的观测值数据分别记为 L_k 和 L_{k-1} ，相应的权阵为 P_k 和 P_{k-1} ，那么其

误差方程可以表示为:

$$V_k = B_k * \hat{X}_k - L_k \quad (2.3)$$

$$V_{k-1} = B_{k-1} * \hat{X}_{k-1} - L_k \quad (2.4)$$

序贯平差的估计准则为:

$$\Omega = V_k^T * P_k * V_k + (\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1})^T * P_{k-1} * (\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1}) - 2 * \Lambda * (B_k * \hat{X}_k - L_k - V_k) = \min \quad (2.5)$$

其中: Λ 为拉格朗日 (Lagrange) 乘数向量。可以推导出序贯平差的计算公式为:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k-1} + J * l_k \quad (2.6)$$

$$Q_{\hat{X}_k} = (I - J * B_k) * Q_{\hat{X}_{k-1}} \quad (2.7)$$

其中, J 为序贯平差的增益矩阵:

$$J = Q_{\hat{X}_{k-1}} * B_k^T * (P_k^{-1} + B_k * Q_{\hat{X}_{k-1}} * B_k^T)^{-1} \quad (2.8)$$

其中, \hat{X}_{k-1} 和 $Q_{\hat{X}_{k-1}}$ 是利用第一组观测数据计算出的未知参数的估计值和协方差矩阵。序贯解 \hat{X}_k 为其先验值 \hat{X}_{k-1} 与观测向量 L_k 的加权平均值。

以上就是序贯最小二乘平差的一般递推过程。从以上公式可以看出, 序贯最小二乘方法具有不需要考虑参数的状态方程和状态参数的先验信息等特点, 但不可避免的存在复杂的观测方程且要消耗大量的计算资源, 一般可以考虑采用参数预先消除的方法来减少法方程的维数且不损失历元信息来提高计算效率 (Brochmann, 1996)。

2.1.4 单频 PPP 的解算流程

单频 PPP 的解算流程等同于一般双频无电离层 PPP 的解算流程, 按照从上到下顺序, 解算过程总体上可以分为:

1) 原始数据输入部分。包括: 单频观测数据文件、硬件延迟 DCB 文件、精密星历和钟差文件;

2) 数据预处理部分。包括周跳探测、粗差剔除以及原始单频数据的筛选;

3) 解算部分。包括模型误差改正、参数消除、流程控制以及参数估计。

4) 结果输出。格式化输出解算结果。

其一般流程如下图所示:

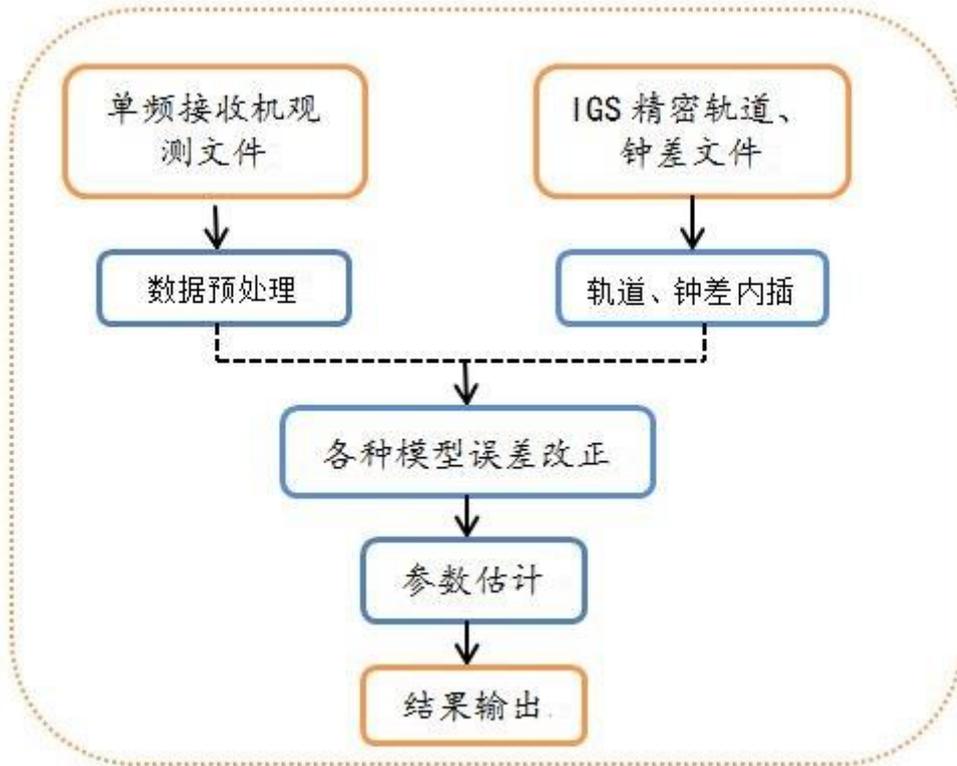


图 2.1 单频 PPP 解算流程图

2.2 单频精密单点定位的关键技术

单频 PPP 技术的解算过程存在一定的复杂性，除考虑实现过程本身的流程控制的精确操作之外，在各种原始数据的筛选和处理过程中也要做到精益求精。总体上来说，要实现高效率的单频 PPP 方案，需要顾及到以下几个方面：

1) 除去原始的单频观测数据以外，需要顾及精密星历和精密钟差数据的选取。IGS 等分析中心的精密星历文件提供的精密轨道数据精度可达 3cm，通过高阶内插后完全满足单频 PPP 的使用；另外，精密钟差文件也可从 IGS 分析中心以及其他分析中心获取，一般采样间隔为 15 分钟或 5 分钟，JPL、ESA、CODE、SHA 等分析中心还提供内插后的 30 秒采样间隔的钟差文件。具体应用时可以采用低阶内插方法获取对应时刻的钟差。值得注意的是，各分析中心给出钟差文件是基于实时无电离层组合计算得出，在应用到单频 PPP 上时，要注意保持数据使用的一致性。

2) 单频数据的预处理，主要是单频数据的周跳探测。双频无电离层组合 PPP 的周跳探测时，常采用 L1 载波和 L2 载波的 MW 宽巷组合加消电离层的窄巷组合来探测周跳。而单频数据受限于相位观测值的单一性，无法采用类似的方法来完成周跳探测。同时在单频信号上，由于电离层延迟的影响巨大且无法独自消除，

给单频周跳探测带来挑战。因此,研究单频数据的特质,获取稳健的周跳探测方案对单频 PPP 的实现的成败至关重要。

3) 单频信号误差源的处理。单频信号中大部分误差都可以采用直接或间接的方法预先消除其对精密定位的影响,但其中最难以处理的是电离层延迟的影响,由于电离层时空变化的灵活性和不确定性,难以预先采用准确的模型来描述它,同时单频信号也无法通过双频相位组合的方式来消除它,如何有效的处理电离层延迟将是单频 PPP 成功的关键点之一。

4) 流程控制。由于 PPP 的过程具有相当的复杂程度,软件实现的过程要考虑到整个解算流程的方方面面,设计出简单高效的控制流程不但能降低软件编制的难度,也能为后续功能的补充提供良好的平台,使得软件整体上具有更好的操作性和可读性。

2.3 单频数据的预处理

对原始观测数据进行预处理是实现单频 PPP 的第一步,这里面主要包括周跳的探测与修复,粗差探测与剔除以及相位平滑伪距几个过程,最终得到“干净”的非差单频观测值进入下一流程。

首先,对原始观测数据进行粗差剔除,并且对精密钟差文件进行质量检测,剔除发生故障的卫星和时段。同时可利用相位数据对伪距观测值进行平滑处理,提高定位效率。最后数据预处理中重点要完成的工作就是提出周跳探测的稳健方法。在综合考虑当前几种常用的周跳探测方法的基础上,本文将采用以下几种探测方法的组合来实现单频数据的探测工作。

2.3.1 基于星间差的高次差法

基于卫星信号的观测误差特性可以知道,在没有周跳发生的情况下,载波相位的变化主要跟接收机的状态相关,大体上是一个平缓而且有规律的过程。同时大部分观测误差在时空中的变化也是一个平缓渐变的过程。但考虑到单频载波的波长较短,对其周跳探测影响较大的主要有接收机钟差的变化以及电离层延迟的影响。接收机钟相较于卫星钟质量较差,噪声较大,同时在历元间常有跳变的情况发生。综合这两方面的考虑,可以首先采用星间差的方式消除接收机钟差对单频信号的影响,然后在历元间求取高次差来消除平缓变化的误差的误差源对信号的干扰。一般来说,当星间差的相位观测值在求取 4 次以上的高阶差后,距离变化对整周模糊度的影响趋于零,此时差值主要包含接收机的随机误差(张勤, 2005)。

取得星间差的高次差后,此时如果有周跳发生,数据的随机特性即被破坏。

同时高次差还有误差放大的效果，周跳发生时历元间的差值会出现倍数特性，利用这一结论可以准确探测出周跳发生的位置。高次差倍数特性如下：

表 2.1 高次差法计算过程

观测值	一次差	二次差	三次差	四次差	五次差
0					
0	0				
0	0	0			
0	0	0	0		
0	0	0	0	0	
1 (周跳发生)	1	1	1	1	1
1	0	-1	-2	-3	-4
1	0	0	1	3	6
1	0	0	0	-1	-4
1	0	0	0	0	1

如上表可知，在周跳发生的情况下，通过历元间做差周跳存在明显的倍数关系。四次差后，倍数关系为 1: -3: 3: -1，通过这种规律可准确锁定周跳发生的位置。

但此种探测方法亦有不足之处，由于是原始观测值进行过星间做差操作，因此无法判断出具体是两颗卫星中的哪颗发生了周跳。同时如果两颗卫星发生相同周跳也无法探测出来。另外，随着观测采样间隔的增大，相邻历元间误差变化幅度增加，高次差法的效率也会随之降低。因此，还需要进一步组合其他方法来克服这些障碍。

2.3.2 改进的多项式拟合法

利用多项式拟合法探测周跳，其一般表达式为（李征航，2005）：

$$\varphi_i = a_0 + a_1 * (t_i - t_0)^1 + a_2 * (t_i - t_0)^2 + \dots + a_n * (t_i - t_0)^n$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; m > n+1) \quad (2.9)$$

其中，n 为多项式的拟合阶数， t_0 是起始拟合时间基准， t_i 是时间变化量， a_i 为多项式系数， φ_i 是 t_i 时刻对应的载波相位观测量。从式 (2.9) 中可以看出，利用以上形式来探测周跳时无法顾及误差在时空上累积的变化量。随着时间序列拉长， $(t_i - t_0)^1$ 与 $(t_i - t_0)^n$ 之差会越来越大，拟合值与实际观测值将会严重不符，影响探测效果。改进形式的多项式拟合法从消除误差累积影响的角度出发，采用历元

间求差后的观测值代替原始观测值，其表达形式如下：

假设 t_i 时刻前后两个单频观测量分别为 φ_i 和 φ_{i-1} ，令其做差有 $L_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ ，那么有：

$$L_i = \varphi_i - \varphi_{i-1} = a_1 * (t_i - t_{i-1})^1 + a_2 * (t_i - t_{i-1})^2 + \dots + a_n * (t_i - t_{i-1})^n$$

$$(i = k + 1, k + 2 \dots k + m - 1; m > n + 1) \quad (2.10)$$

式中， k 为循环次数， a_i 为多项式系数，探测流程是：

首先，从初始历元开始选取 m 个历元数据求取历元间差值分别代入上式 (2.10) 中，采用最小二乘方法求取拟合系数 a_i ；然后计算观测值改正数 v_i 的中误差

$$\delta_k = \sqrt{\frac{[v_i * v_i]}{(m-1) - n}} \quad (2.11)$$

根据是否 $|v_i| \geq 3 * \delta_k$ 的条件，依次判断参与拟合的各个载波相位观测值中是否存在周跳，若发生周跳则标记下来或者利用外推数据修复；接下来用求出的多项式系数外推下一历元的载波相位观测值并与实际观测值比较，用同样的原则探测周跳。若没有周跳发生，去掉最开始的一个观测值，加入当前历元数据继续滑动拟合多项式数据，重复以上周跳探测过程。如果由周跳发生，此时应标记处周跳位置或者修复，同时剔除新加入数据，代入利用系数外推出的数据，继续进入滑动探测流程直到数据结束。

利用历元间差值进行多项式周跳探测可抑制非差观测中的累积误差的影响，提高探测效率。同时补充星间做差高次差法的不足，探测单一卫星数据。但此方法也有不足之处，即随着数据采样间隔的增加无法准确预测真实观测数据的情况。为避免漏探，需再组合一钟探测方法维持周跳探测的稳健性。

2.3.3 伪距/载波相位组合探测法

在充分分析各种卫星信号误差源的基础上可以得知，除去观测噪声，多路径效应以及电离层延迟外，其他误差源在伪距和载波相位观测值上的影响是相同的。基于这一原则，可以采用载波相位观测值和伪距的组合方法来探测周跳。

单频载波相位和伪距观测值可表达为（刘基余，2005）：

$$C = \rho + dI_c + dm_c + \varepsilon_c \quad (2.12)$$

$$\lambda * \varphi = \rho + \lambda * N + dI_\varphi + dm_\varphi + \varepsilon_\varphi \quad (2.13)$$

其中：C—伪距观测值；

Φ —载波相位观测值；

N —相位整周模糊度；

dI_c, dI_φ —分别为伪距和相位观测值的电离层延迟；

dm_c, dm_φ —分别为伪距和相位观测值的多路径延迟；

$\varepsilon_c, \varepsilon_\varphi$ —分别为伪距和载波相位的观测噪声；

将上面两式 (2.12, 2.13) 相减可以获得整周模糊度：

$$N = \frac{|\lambda * \varphi - C - (dI_\varphi - dI_c) - (dm_\varphi - dm_c) - (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_c)|}{\lambda} \quad (2.14)$$

同时将上式 (2.14) 在历元间求差，可以得出周跳的估值：

$$\Delta N = N(t_2) - N(t_1) = \varphi(t_2) - \varphi(t_1) - \frac{C(t_2 - t_1)}{\lambda} \quad (2.15)$$

在没有周跳发生的情况下，由于相邻历元间多路径延迟和电离层延迟变化小， ΔN 的理论值为零，发生周跳则不为零，由此可以进行周跳探测。

此种方法根据其使用范围可以探测出相当部分的周跳，可以作为单频 PPP 周跳探测方案的补充方案，增强了整体周跳探测方案的稳健性。通过以上三种单频数据周跳探测方法的组合和补充，可以相当程度上确保正确探测出单频数据中的周跳。在实际操作中周跳探测存在一定的不确定性，因此在本文的软件处理流程中针对周跳保持只探测不修复。一旦有周跳发生，采用模糊度重新初始化的方法来处理（刘基余，2005）。

2.4 单频 PPP 的主要误差来源及其修正方法

2.4.1 与接收机有关的误差

2.4.1.1 接收机钟差

接收机钟差是指由接收机中时标晶体振荡器的频率漂移引起的接收机钟面时间与 GNSS 标准时之间存在的差异。GNSS 接收机一般采用高精度的石英钟，其稳定度约为 10^{-9} 。如果接收机与卫星钟间的同步差为 1 微秒，那么由此引起的等效距离误差约为 300m（徐绍铨等，2008）。

在 GNSS 定位应用中，常采用星间差分的方式消除其影响。但在精密单点定位的应用中，采用非差观测值作为基本观测量，不进行星间差操作，因此必须考虑接收机钟差的处理方法。接收机钟差对精密定位的影响主要体现在两个方面：

第一是在计算卫星坐标时，通常处理方法是利用伪距单点定位方法计算出一个接收机钟差的概率值，此概率值的改正精度优于 1 微秒，满足卫星坐标的计算精度，可将其加入卫星坐标的解算过程；第二是对测站与卫星间的真实距离的影响。处理方法是把卫星钟差作为一个待估参数加入平差解算过程。解算过程中可采用随机游走的方法或者当成白噪声来处理接收机钟差。

2.4.1.2 地球固体潮改正

地球不是一个完整的刚体，在太阳和月亮的作用下，地球的陆地部分会发生弹性形变（李济生，1995）。这种摄动天体对地球的引力作用使得地球表面产生周期性涨落的现象叫地球固体潮。该作用中包含于地球纬度有关的永久性潮汐和半周日、周日潮汐的周期部分（李征航等，2005）。在进行精密 PPP 的静态单日解时可以消除大部分周期项的影响，但不能消除长期项的影响，残余误差在水平方向可达 5cm，在垂直方向可达 12cm。对于距离较短（<100km）的基线解算，可以认为固体潮对两站的影响是一致的，可通过差分方式消除。但对于单站非差的单频 PPP 解算，必须采用精确的模型改正来消除其影响。改正公式如下（IERS，2010）：

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j * r_E^4}{GM_E * |X_j|^3} \left\{ 3 * l_2 * \frac{X_p * X_j^2}{|X_p| * |X_j|^2} + \left[3 * \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) * \left(\frac{X_p * X_j}{|X_p| * |X_j|} \right)^2 - \frac{h_2}{2} \right] * \frac{X_p}{|X_p|} \right\} + \left[-0.025 * \sin \phi * \cos \phi * \sin \theta_g + \lambda \right] * \frac{X_p}{|X_p|} \quad (2.16)$$

其中： r_E —地球赤道半径；

X_p —接收机在地心参考框架中的坐标；

X_j —摄动天体在地心坐标系中的坐标；

GM_j —摄动天体（ $j=2$ 为月球， $j=3$ 为太阳）的引力常数；

GM_E —地球引力常数；

h_2, l_2 —Love 和 Shida 常数；

ϕ, λ —接收机的地理纬度和地理经度；

θ_g —格林尼治恒星时

2.4.1.3 海潮改正

在月亮和太阳的影响下,海洋也会发生周期性涨落现象,这种现象称为海潮。主要由日周期和半日周期项组成。对于单历元定位,其误差最高可达 5cm(Heroux, 2001)。对于单天解的精密 PPP 定位,其误差影响在毫米级。海潮主要由海洋潮汐引起,若测站距离海岸超过 1000km 以上,那么海潮的影响可以忽略不计。海潮的改正公式为:

$$\Delta X_c = \sum_{j=1}^{11} f_i * A_{cj} * \cos \omega_j + \chi_j + \mu_j - \phi_{cj} \quad (2.17)$$

式中: ΔX_c —海潮对测站坐标的影响 ($c=1,2,3$);

t —时间参数;

A_{cj} —潮汐 j 分量对坐标 c 分量影响的幅度 ($j=1, \dots, 11$);

ϕ_{cj} —潮汐 j 分量对坐标 c 分量影响的相位角;

μ_j — j 分量的相位角偏差;

χ_j — j 分量的天文参数;

ω_j — j 分量的角速度;

f_i — j 分量的比例因子

目前,IGS 等分析中心基本上采用 FES2004 海潮模型,具体的海潮改正文件可以从瑞典的昂萨斯天文台 OSO 相关网站下载。

2.4.1.4 接收机天线相位中心改正

GNSS 测量中,观测值一般是以接收机天线相位中心为基准,天线相位中心会根据卫星输入信号的方向、强度的不同而发生变化,与其几何中心的瞬时变化之差可达数厘米。并且针对不同类型的接收机天线,绝对变化并不一致。IGS 分析中心针对这一误差采用测量机器人的手段对各类常用的天线事先进行检测,将相关的相位中心变化参数编制成 ATX 文件提供给用户用以消除该误差。

定义相位中心偏差为:

$$\Delta \bar{r}_{ant} = \bar{r}_{ant} - \bar{r}_E \quad (2.18)$$

其中, \bar{r}_{ant} 和 \bar{r}_E 分别为地固系中接收机天线相位中心和标石中心的位置向量。

接受及天线相位中心偏差在实际应用中采用局部坐标系表示,即表示为天线相位中心相对于标石中心在垂线方向偏差 ΔH 、北方向上偏差 ΔN 和东方向上偏差 ΔE ,如下图 2.2 所示:

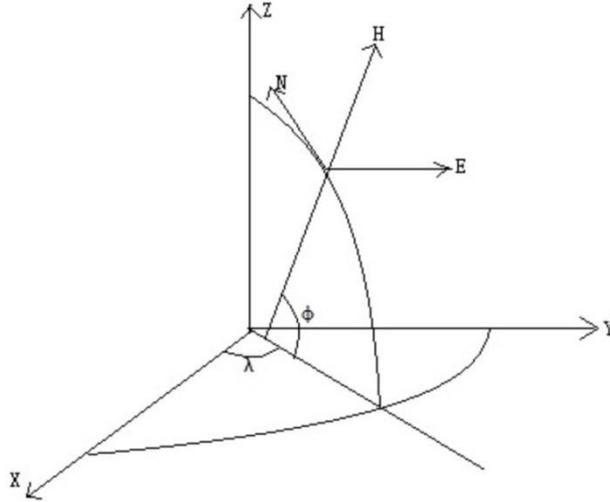


图 2.2 天线相位中心改正示意图

此偏心量分别绕 X 轴和 Z 轴旋转过后,即可转换至站心直角坐标系,坐标轴平行于以参考椭球中心为原点的地固直角坐标系。最终可将局部坐标系中的偏心量转换至地固系,转换方程为:

$$\Delta \vec{r}_{ant} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\cos \lambda \sin \phi & \cos \lambda \cos \phi \\ \cos \lambda & -\sin \lambda \sin \phi & \sin \lambda \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.4.2 与信号传播有关的误差

2.4.2.1 电离层延迟改正

位于地球上空 50km—1000km 之间的大气层称为电离层。在电离层中,由于太阳作用使得中性的大气分子发生了电离效应产生自由电子,导致电磁波在穿越该层时产生了延迟(李征航等, 2005)。电离层延迟一阶项对 GNSS 同一信号上伪距和载波相位的影响大小相同,方向相反,其大小为(叶世榕, 2002):

$$\delta \rho = \frac{40.28}{f^2} \int_0^s N_e * ds \quad (2.10)$$

由上式(2.20)可知,电离层一阶项与电磁波频率的平方成反比。因此,对

于双频伪距和载波相位观测量，可以采用组合方式消除电离层一阶项的影响，即无电离层组合：

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 * P_1 - f_2^2 * P_2) \quad (2.21)$$

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 * L_1 - f_2^2 * L_2) \quad (2.22)$$

但对于单频 PPP 的应用来说，由于其只有单一信号，无法采用类似的组合。因此，在单频 PPP 中，如何消除电离层延迟的影响将是一个关键性的技术难点。针对单频 PPP 的电离层延迟改正措施将在后面详细论述。

2.4.2.2 对流层延迟改正

对流层延迟一般是指距离地面约 50km 以下的中性大气所产生的信号延迟。这是一种针对电磁波的非色散延迟，对载波相位和伪距的影响巨大（李征航等，2005）。对流层延迟与电磁波频率大小无关，只受大气折射率和电磁波传播方向有关。在天顶方向，对流层延迟约为 2-3m，但高度角低至 10 度时，对流层延迟能够达到 20m。

对流层延迟中大约 90% 的部分是由大气中干燥气体产生，主要受大气温度和大气压的影响，称为干分量，也成为静力学延迟。剩下的 10% 由水汽产生，主要受信号传播方向上的大气湿度和高度影响，称为湿分量。通常，对流层延迟可以表示为天顶方向的对流层折射和高度角有关的投影函数的乘积：

$$d_{trop} = d_{dry} * f_d(z) + d_{wet} * f_w(z) \quad (2.23)$$

式中： d_{trop} —电离层延迟；

d_{dry} —天顶方向的干分量延迟；

$f_d(z)$ —干分量投影函数；

d_{wet} —天顶方向湿分量延迟；

$f_w(z)$ —湿分量的投影函数；

在 GNSS 定位应用中，常见的对流层延迟模型有 Hopfield 模型，Saastamoinen 模型等等，常用的投影函数有 Marini、Chao、Davis、Neill、VMFI 以及 GMF 等。其中 Neil 在高精度 GNSS 定位中被广泛采用。

经过模型修正后的电离层延迟中干分量部分影响可低至厘米级，但湿分量残余仍然有相当程度的影响，因此，在高精度 GNSS 定位中，需要将湿分量残余部分作为待估参数参与平差解算。一般可用随机游走法或者线性分段函数法来处理（叶世榕，2002）。

2.4.2.3 地球自转改正

卫星信号从 2 万公里外的高空传播到地面需要约 0.07 秒的时间。考虑到地固系是非惯性坐标系统，信号在发射时刻和接收时刻分别对应着不同的地固系，此时需要考虑地球自转改正。假设卫星坐标为 (X_s, Y_s, Z_s) ，测站坐标为 (X_r, Y_r, Z_r) ，其对信号传播方向上的距离影响可表示为：

$$d_{earth} = \frac{\omega}{c} [Y_s (X_r - X_s)] - X_s (Y_r - Y_s) \quad (2.24)$$

式中： d_{earth} 为地球自转引起的距离改正， ω 为地球自转角速度， c 为真空中的光速。

其对卫星坐标的改正公式为：

$$\begin{bmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

上式中： $\alpha = \omega * \tau$

(X'_s, Y'_s, Z'_s) 表示改正后的卫星坐标， τ 表示卫星信号从卫星到接收机的传播时间。

2.4.2.4 多路径效应

在高精度定位中，多路径效应是不易排除的一项干扰。GNSS 接收机信号正常情况下一部分是沿着最短路径直接到达接收机天线，另一部分是通过天线附近物体反射到达，这两部分信号会产生干涉从而使观测量附加了一个延迟量，这就是多路径延迟，严重时会使卫星信号失锁。

多路径效应的大小取决于反射信号相对于正常信号的强度，最大可达到四分之一周（张勤等，2005）。实际应用中通常首先会考虑天线安置的外部环境，将天线安置在远离反射体的地方来减小多路径延迟；也可以采用扼流圈天线，相控

阵天线等硬件技术来抑制其影响。软件改正方法有小波分析法、半参数法等（叶世榕，2002）。

2.4.3 与卫星有关的误差

2.4.3.1 卫星轨道误差和卫星钟差改正

卫星轨道误差是指卫星星历中表示的卫星轨道与真实轨道之间的差值。其来源主要跟跟踪网的规模、分布、跟踪方法以及轨道计算的数学模型和软件等因素有关。GPS 广播星历中的卫星轨道由系统监控站的伪距数据计算的拟合轨道外推获得，精度在 2m 以内。精密星历中的轨道数据由 IGS 等组织提供，精度优于 3cm。卫星轨道误差会引起星地距的变化。因此，为保证高精度的 GNSS 定位效果，一般采用精密星历来减小轨道误差的影响，通常可用高阶（8-10 阶）多项式内插法来计算信号发射时刻的卫星位置。

卫星钟差是指由于卫星钟频率漂移而引起的与 GNSS 标准时之间的差异。GNSS 导航定位系统通过地面监控站对卫星进行监测，并采用二阶多项式拟合卫星钟的变化情况，但只能保证 5-10ns 内的精度。在相对定位模式下，卫星钟差可通过站间差分消除。但对于非差精密定位，要求卫星钟差的改正精度要达到亚纳秒级。IGS 分析中心提供的精密钟差产品能够满足此要求，一般是以 5 分钟或者 30 秒的采样间隔给出。在实际应用中，可采用低阶多项式来内插求解所需时刻的卫星钟差值。

2.4.3.2 卫星天线相位中心误差改正

GNSS 接收机获取的观测值是卫星天线相位中心到接收机天线相位中心的距离。卫星的相位中心与其质量中心并不重合。而 IGS 分析中心提供的精密星历给出的卫星位置实质上是卫星质量中心在空间的位置，二者之间的偏差称为天线相位中心误差。卫星相位中心在观测过程中会随着卫星位置和朝向的变化而变化，因此要对其加以修正（许承权，2008）。不同时期发射的卫星其天线相位中心误差并不一致。假设某一时刻星固坐标系的三个坐标轴分量在惯性系中的单位矢量为 (e_x, e_y, e_z) ， X_{sat} 为由精密星历计算得出的 GNSS 卫星质量中心的坐标向量， X_{sun} 为此时由恒星历计算得出的相同坐标框架下太阳位置的坐标向量，那么三个单位矢量的计算方法是：

$$e_z = \frac{-X_{sun}}{|X_{sun}|} \quad (2.26)$$

$$e_y = \frac{X_{sat} \times (X_{sat} - X_{sun})}{|X_{sat} \times (X_{sat} - X_{sun})|} \quad (2.27)$$

$$e_x = \frac{e_y \times e_z}{|e_y \times e_z|} \quad (2.28)$$

如此，在协议地球坐标系内，天线相位中心偏差改正公式可表示为：

$$X'_{sat} = X_{sat} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}^{-1} \cdot B \quad (2.29)$$

其中， B 为事先检测的 GPS 卫星天线相位中心的偏差值。

2.4.3.3 相对论效应

一般来说，GNSS 接收机钟和卫星钟在惯性坐标系中的重力位及运动速度等状态并不相同，由此引起卫星的钟频率发生了视漂移现象，导致频率或者时间产生了偏差，这就是相对论效应。卫星钟一般比地面钟走得快约 0.45ns，为了保持地面接受到的信号频率与 GNSS 导航系统设计的信号频率保持一致，在卫星发射前人为将卫星钟标准频率减少约 0.00475Hz。但 GNSS 卫星轨道并非圆轨道，并且卫星所受重力场的影响也在变化，因此相对论效应也是一个变化的量，经过上述改正后仍然存在偏差。这部分偏差可以用以下公式修改（Heroux, 2001；叶世榕, 2002）：

$$\Delta D_{rel} = -\frac{2}{C} X_s \cdot \dot{X}_s \quad (2.30)$$

其中： X_s 与 \dot{X}_s 分别表示卫星的位置和速度向量， C 为真空中的光速。

2.4.3.4 硬件延迟改正

GNSS 接收机和 GNSS 卫星的硬件通道对 GNSS 信标 L1、L2 信号的硬件时延无法做到完全一致而引起的硬件偏差叫做 GNSS 硬件延迟偏差。不同频率的载波和不同类型的测距码引起的硬件延迟并不相同。假设 C1、P2、P2 对应的硬件延迟分别为 $Bc1$ 、 $Bp1$ 、 $Bp2$ ，那么码间硬件延迟偏差 $Bp1 - Bc1$ 、 $Bp1 - Bp2$ 最大可达到十几个纳秒，在精密定位无法忽视其影响（Hugentobler U, 2005）。IGS

分析中心给出的精密钟差产品是利用无电离层组合观测值计算得出的,对于单频用户,由于所使用的观测值与其并不一致,这就要考虑加入硬件延迟偏差改正。为了能够协调使用精密钟差产品,要在内插出的精密钟差上加上一个改正数:

$$\Delta t = m * B_{p1-p2} + n * B_{p1-c1} \quad (2.31)$$

通常,硬件延迟改正文件以月为周期发布,包含卫星改正基数 B_{p1-p2} 、 BB_{p1-c1} ,用户可通过这些基数自行计算出不同类型观测值上的硬件延迟改正。

2.4.3.5 相位缠绕改正

通常 GNSS 卫星发射的是右旋极化 (RCP) 的电磁波信号,GNSS 接收机接收到的相位观测值与接收机天线和卫星间的方位关系有关。卫星天线和接收机天线绕极化轴向的旋转会导致相位观测值的改变,最大变化量可达一周,这个现象就叫做相位缠绕效应 (Wu J. T, et al, 1993)。地面静止观测的接收机天线不会发生旋转,但卫星天线不同,为了保持卫星太阳能电池板指向太阳,卫星天线会发生缓慢的旋转,导致星地间几何关系也在变化。另外,当卫星进出地影区域时,卫星为了找准太阳方位会快速旋转,半小时内可旋转一周,此时载波相位观测数据需要进行相位缠绕改正。

在相对定位模式中,对于几百公里以内的基线,双差观测值的相位缠绕效应可忽略不计。有研究表明在 4000km 的基线上,相扰缠绕可产生 4cm 的误差。但在精密非差 PPP 模式下,该误差无法被消除,造成的误差可达半周。目前,大部分 GNSS 数据分析中心的精密卫星轨道和钟差产品都考虑了相位缠绕改正,忽略其影响会使精密 PPP 定位结果维持在分米级精度,因此在高精度定位中必须考虑改正相位缠绕误差。

相位缠绕的改正公式为 (Wu J. T, et al, 1993):

$$\Delta\Phi = \text{sign}(\delta) * \arcsin\left(\frac{\vec{D}' \cdot \vec{D}}{|\vec{D}'| * |\vec{D}|}\right) \quad (2.32)$$

$$\delta = \hat{k} \cdot (\vec{D}' \cdot \vec{D}) \quad (2.33)$$

其中: \hat{k} 为卫星到接收机的单位向量;

\vec{D}' , \vec{D} 分别是天线的有效偶极矢量,分别是根据卫星坐标系下的坐标单位矢

量和接收机地方坐标系单位矢量计算得出，如下：

$$\vec{D}' = \hat{x}' - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}' \quad (2.34)$$

$$\vec{D} = \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) - \hat{k} \times \hat{y} \quad (2.35)$$

2.5 本章小结

本章首先介绍了单频 PPP 模型的基本原理，主要包括其随机模型和函数模型。介绍了单频 PPP 所采用的参数估计方案以及成功实现单频 PPP 所要顾及到的关键技术难点和单频 PPP 的总体处理流程。同时详细介绍了单频数据的预处理方法，给出了稳健的单频数据周跳探测方案。最后详细介绍了实现单频 PPP 技术所要顾及的各类误差来源及其变化特点，并给出了相应的处理方案。

本文单频 PPP 的实现过程中使用到的精密轨道及钟差产品皆来自于 IGS 分析中心。为了保持不同类型原始数据良好的兼容性，在处理中需保持所使用到的模型、协议及观测值的处理方案等与 IGS 数据处理分析中心保持一致，如 IGS 分析中心所采用的对流层延迟投影函数为 Neill 模型，那么在单频 PPP 中也应照此处理。

第 3 章 单站单频 PPP 技术与电离层延迟处理研究

目前,双频精密单点定位技术已经日趋成熟,通过双频无电离层组合的方式,成功抑制了电离层一阶项对定位结果的影响。但在单频精密定位技术中,特别是单站式的单频精密定位技术,由于观测数据先天的限制,无法采用类似的方法来进行组合。在单频 PPP 中,常见的做法是对电离层延迟进行建模,将其相应的改正加入到观测方程中,通过长时间的数据观测来进行定位解算。常见的电离层延迟模型总体上可以分为三类:广播星历预报模型、广域差分实时模型以及后处理模型(章红平,2006)。这些模型将在本章给出详细的介绍。

电离层所受到的影响因素很多,同时这些因素各自的变化又具有很强的随机性和不确定性,常规模型在构建时兼顾到这些因素方方面面归纳出电离层在时空变化的真实情况。因此,利用这些模型来完成单频 PPP 的解算效率将会很有限,无法实现高精度定位的效果(吴江飞,2008;阮仁桂,2009)。本章节针对单站式单频 PPP 技术,介绍几种实现方案,在处理电离层延迟上各有侧重点,都实现了高精度单频 PPP 定位。本章将会详细研究它们的基本原理及优劣之处,提供详实数据测试方案。

3.1 电离层延迟模型改正法

3.1.1 广播星历预报电离层延迟模型(Klobuchar 模型)

GPS 系统的广播星历中采用的电离层延迟预报模型为 Klobuchar 模型,通过广播星历发布电离层延迟的修正参数,用于单频接收机的电离层延迟改正。Klobuchar 模型的方法是首先计算出卫星信号传播方向与电离层交点处垂直方向的电离层延迟值,该值在当地时间午夜前后时间段为一固定值,在下午 14 时左右为一余弦曲线的极点。然后将该值乘以一个与卫星高度角相关的倾斜因子获得卫星传播方向上的电离层延迟量。用公式表示为(魏子卿等,1998):

$$T_g = 5 * 10^{-9} + A * \cos \left[\frac{2\pi}{P} (t - 50400) \right] \quad (3.1)$$

$$A = \sum_{i=0}^3 a_i (\varphi_m) \quad (3.2)$$

$$P = \sum_{i=0}^3 \beta_i(\varphi_m) \quad (3.3)$$

$$\varphi_m = \varphi_p + 11.6 * \cos(\lambda_p - 291) \quad (3.4)$$

其中： $a_i, \beta_i (i=0 \cdots 3)$ 为导航电文提供的 8 个参数； t 为观测时间； φ_p, λ_p 为穿刺点的大地经度和纬度； T_g 为调制在 L1 载波上的测距码的天顶方向的电离层时间延迟。要获得信号传播方向上的电离层延迟量 T'_g ，需乘以倾斜因子(魏子卿, 1998; 邵贺, 2007):

$$T'_g = T_g * \sec(Z) \quad (3.5)$$

$$\sec(Z) = 1 + 2 \left(\frac{96 - Ele}{90} \right)^3 \quad (3.6)$$

其中， Ele 为卫星在测站处的卫星高度角，单位为度。

Klobuchar 模型描述的电离层周日变化的情况比较简洁直观，参数设置考虑了电离层周日变化规律的周期和振幅的变化情况，基本上反映了电离层变化的特性。但该模型精度较低，一般修正效果在 40%-60% 左右，维持了大尺度的可靠性。

3.1.2 广域差分实时电离层延迟模型

在广域差分技术中使用的电离层延迟实时模型可以分为两类：格网电离层模型和函数模型。当前，格网电离层实时模型应用较为广泛，在北斗系统、WAAS 系统和 EGNOS 系统中均采用此种模型。它的原理是把整个电离层归纳成为距离地球上空 350km 处的一层薄壳结构，在这个薄壳层上建立起有规律的格网，实时解算格网点上的电离层延迟量。这种模型在广域差分增强区域内能获得较高的修正精度，但代价昂贵。

函数模型一般是针对区域性的电离层进行实时建模，在太阳方向固定的地理或地磁坐标系中利用数学的方法进行实时建模。常见的数学方法有三角级数模型、曲面拟合模型以及低阶球谐函数模型等(袁运斌, 2002; 章红平, 2006)。

3.1.3 后处理电离层延迟模型

后处理电离层延迟模型不同于实时模型的区域性构造特点，主要将研究目标

放在电离层全球性尺度变化和长时间周期尺度变化。使用球谐函数或者经验正交(EOF)等数学方法来分析电离层在时空上大尺度、长周期的具体变化情况,可以准确确定电离层延迟的重要参数(章红平, 2006)。

1) 球谐函数模型

CODE 分析中心提供的电离层延迟参数文件由球谐函数模型构造,其文件格式为 nnnXXXXD.ion, 其中 nnn 为发布组织简称, XXXX 为 GPS 周, D 为周内日,该文件可提供下载使用。球谐函数的数学表达式为(Stefan Schaer, 1999; Rolf Dach, et, al, 2007; 许承权, 2008):

$$VETC(\beta, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (\tilde{C}_{nm} \cos(ms) + \tilde{S}_{nm} \sin(ms)) \quad (3.7)$$

其中: β, λ —穿刺点的地磁纬度和经度;

S —太阳-地磁坐标参考框架中穿刺点的地方时;

\tilde{P}_{nm} — n 阶 m 级正交化勒让德函数;

n_{max} —球谐函数展开式的最大阶数;

$\tilde{C}_{nm}, \tilde{S}_{nm}$ —球谐函数的系数

球谐函数模型是一种事后处理模型,在数据充足的情况下,可以计算任意测站、任意时刻的电离层延迟改正,改正效率在 55% 以上且改正稳定度较好(袁运斌, 2002; 邵贺, 2007)。

2) 格网电离层模型

IGS 分析中心提供的电离层延迟修正参数文件由格网电离层模型构建。其文件格式为 nnnnXXXX.0DI, 其中 nnnn 为发布组织简称, XXXX 为 GPS 周, D 为周内天,提供网络下载使用。该文件提供的修正参数以 2 小时时间间隔, 5° 乘 5° 经纬度空间间隔覆盖全球,提供天顶方向上的电离层延迟时间序列。在实际应用中,具体测站上的电子含量一般采用四个格网点内插得到,为了准确获得观测时刻测站上信号传播方向上的电子含量,第一步需要进行时间和空间上的内插获取观测时刻测站天顶方向上的电子含量。时间内插方法主要有三种(Stefan Schaer, 1999; 邵贺, 2007):

(1) 最近相邻时刻选取法

该方法用离观测时刻最近的电离层发布时刻 T_i 的格网点上的电子含量来替

代测站上空周围格网点的电子含量:

$$E(\beta, \lambda, t) = E_i(\beta, \lambda) \quad (3.8)$$

其中, $|T_i - t| = \min$ 。

(2) 时间线性拟合法

为了提高精度, 比最近相邻时刻选取法更进一步, 考虑获取真实观测时刻的电子含量, 采用线性内插的方法求出所需时刻的电子含量:

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda) \quad (T_i < t < T_{i+1}) \quad (3.9)$$

(3) 时间旋转拟合法

考虑到在 $t - T_i$ 时段内, 太阳位置发生变化, 格网点的经度由 λ 变为 λ' , 根据改正后的经度来计算格网点的电子含。

$$\lambda' = \lambda + (t - T_i) \quad (3.10)$$

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda') + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda') \quad (T_i < t < T_{i+1}) \quad (3.11)$$

经过以上任何一种时间内插方法获取观测时刻信号穿刺点的周围四个格网点上的电子含量后, 通过空间内插可获得测站上空信号穿刺点天顶方向的电子含量 (邵贺, 2007; 许承权, 2008):

$$E(\beta_0 + p * \Delta\beta, \lambda_0 + q * \Delta\lambda, t) = (1-p)(1-q)E_{0,0} + p(1-q)E_{1,0} + q(1-p)E_{0,1} + pqE_{1,1} \quad (3.12)$$

式中: $0 < p < 1$, $0 < q < 1$; $\Delta\lambda$, $\Delta\beta$ 分别为格网的经度和纬度间隔。内插出精确的观测时刻测站信号穿刺点天顶方向的电离层延迟后, 选择合适的投影函数可求出此时卫星信号传播方向上的电子含量代入定位解算。格网电离层的修正效率在 60% 以上且稳定性好 (许承权, 2008)。

3.1.4 模型改正法的数据测试实验

以上几种电离层模型是目前在 GNSS 导航定位领域使用最广泛的几种模型, 为了分析电离层模型改正在单频 PPP 中的效果, 设计了以下实验:

1) 数据准备

实验数据选用了 IGS 全球跟踪网络在欧洲地区的十个站 (KOSG、PTBB、POTS、BOR1、WROC、GOPE、WTZA、OBE2、ZIMM、BRUS)，位置分布如图 (3.1)：采集了这十个站在 2012 年年积日第 33 天至第 62 天共计 30 天，采样率为 30 秒的连续观测数据用于本次实验，数据采集质量良好。同时为了分析实验结论，利用 IGS 分析中心公布的连续跟踪观测的坐标值作为测站真实坐标。



图 3.1 实验测站分布图

2) 实验设计与分析

本次实验为了研究电离层模型改正在单频 PPP 的具体表现，设计三组对比试验方案，测试模式为静态定位模式。试验的程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的电离层模型改正法部分。软件在编制设计中采用的数据预处理方法，误差改正模型以及参数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。实验中精密轨道和钟差文件来自于 IGS 分析中心。

方案一： 不加任何电离层模型改正的单频 PPP 解算；

方案二： 加入常用的 Klobuchar 模型改正的单频 PPP 解算；

方案三： 加入精度较高的后处理格网电离层模型改正的单频 PPP 解算。

通过以上三种方案的实验，得出各测站单天解的位置坐标作为最终解算坐标参与实验分析，其中在年积日第 33 天，测站 WTZA 的静态定位收敛过程与真实

坐标的差值在站心坐标系 (N、E、U) 三个方向上的表现如下：

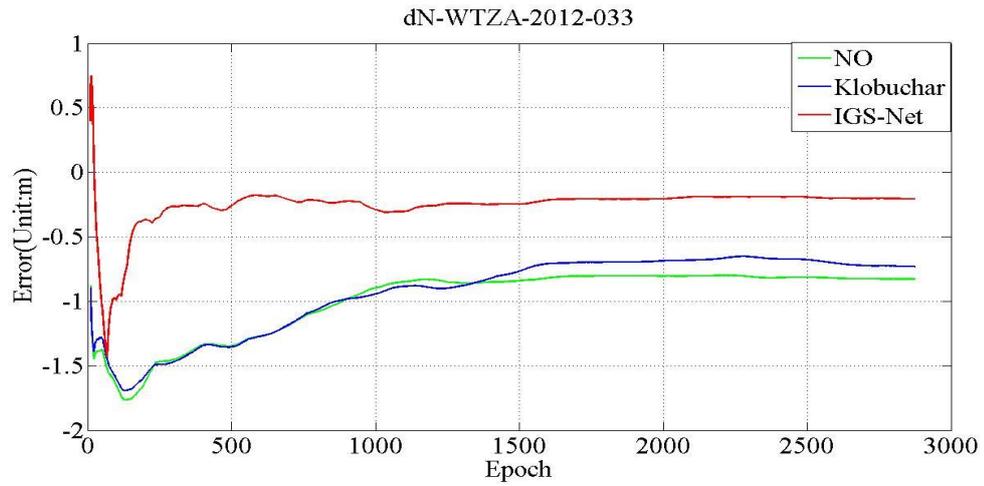


图 3.2 测站 WTZA 三种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

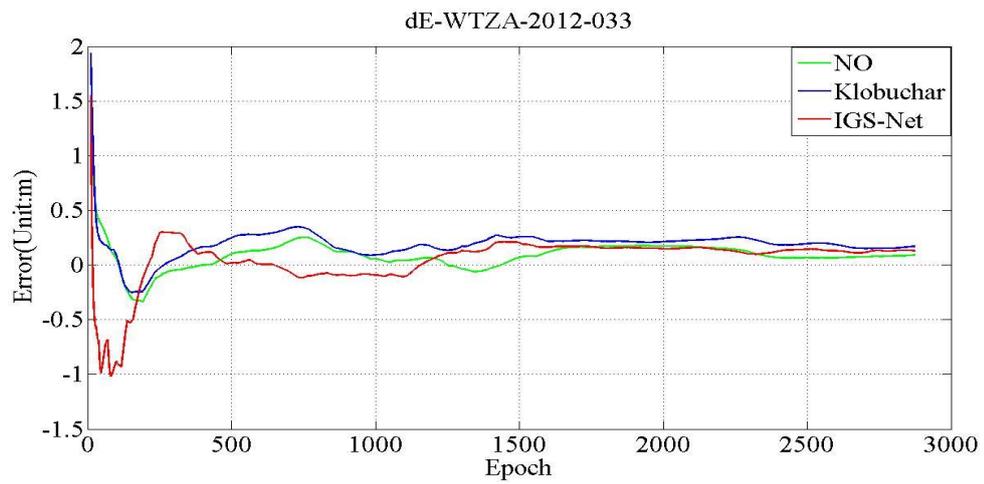


图 3.3 测站 WTZA 三种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

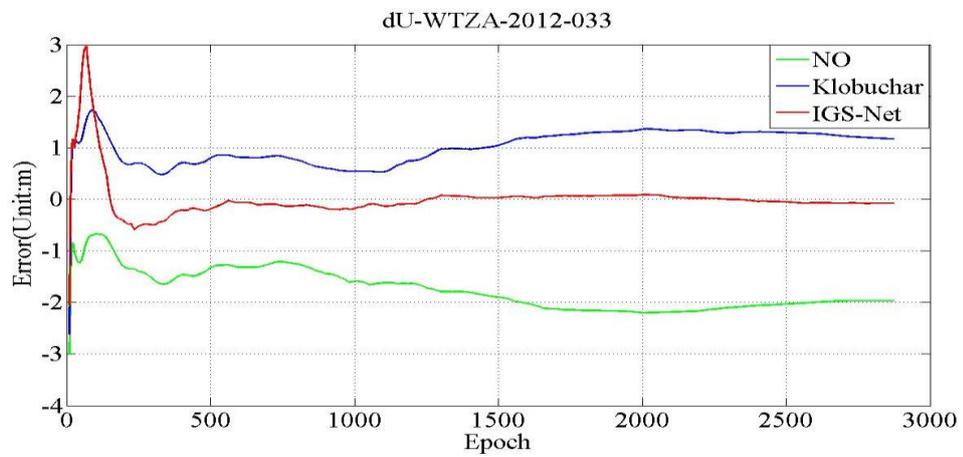


图 3.4 测站 WTZA 三种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

测站 ZIMM 的静态定位收敛过程与真实坐标的差值在站心坐标系 (N、E、U) 三个方向上的表现如下:

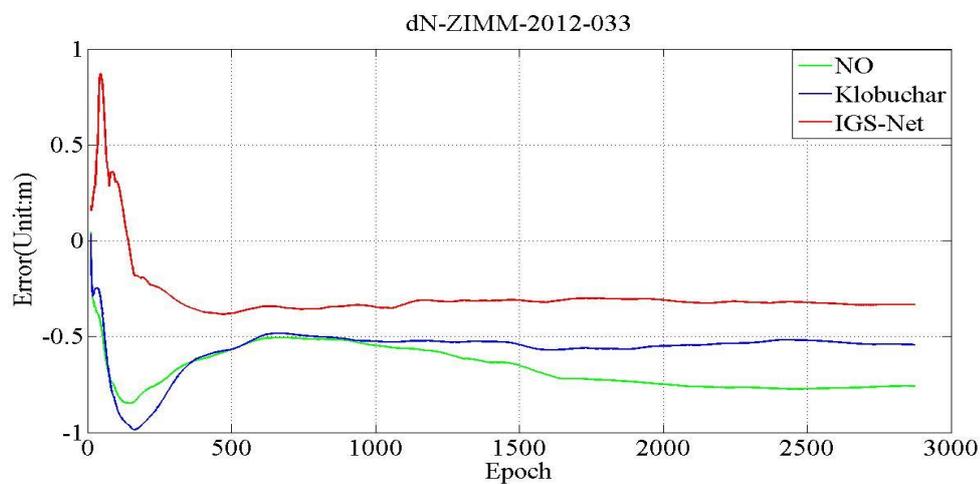


图 3.5 测站 ZIMM 三种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

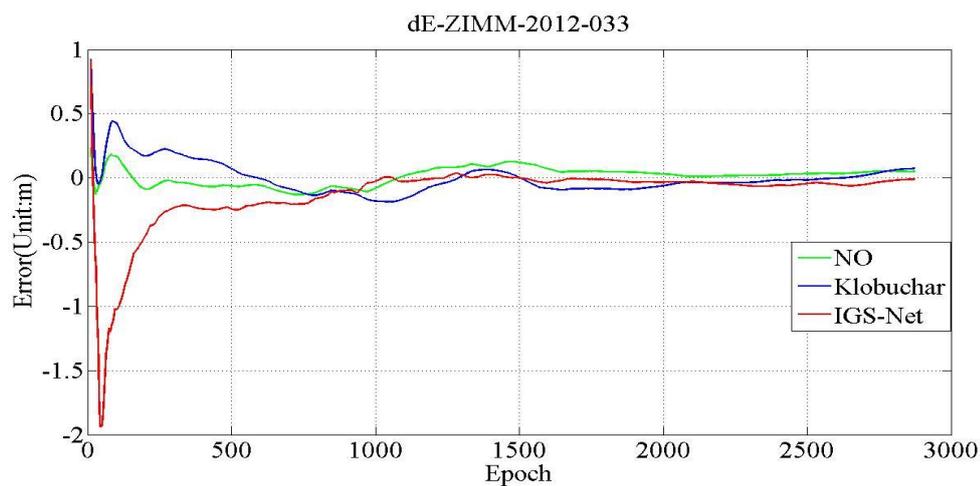


图 3.6 测站 ZIMM 三种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

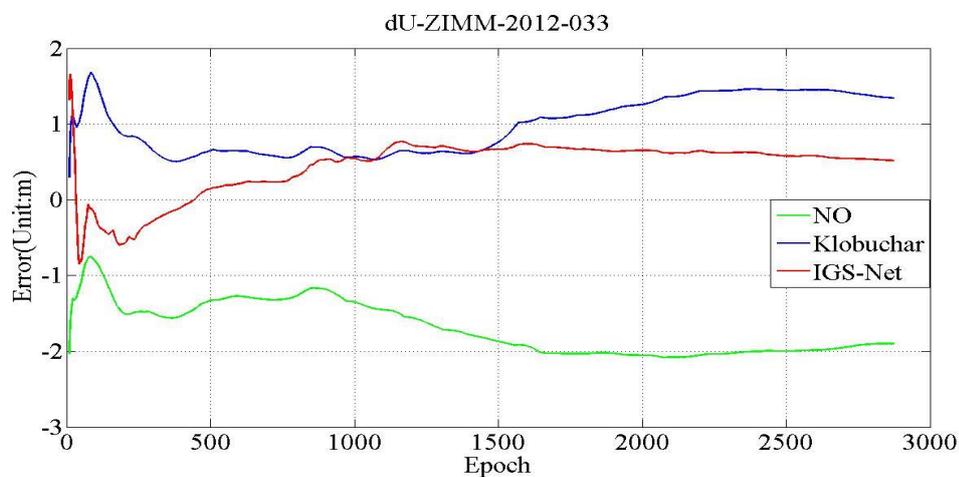


图 3.7 测站 ZIMM 三种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

整理所有测站 30 天的实验数据结果，统计并记录各测站 30 日内解算坐标与真实坐标差值的三维点位误差的平均值（Mean）与中误差(RMS)结果如下：

表 3.1 测试站 30 天单天解的平均值（Mean）和中误差（RMS）统计

站名 (IGS)	方案一(单位: 米)		方案二(单位: 米)		方案三(单位: 米)	
	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS
BRUS	1.390	1.412	0.821	0.823	0.343	0.362
KOSG	1.823	1.833	1.043	1.051	0.482	0.482
PTBB	1.630	1.632	0.725	0.728	0.393	0.394
POTS	2.206	2.212	1.138	1.147	0.447	0.453
BOR1	1.930	1.934	0.979	0.983	0.489	0.492
WROC	1.597	1.599	0.782	0.788	0.361	0.368
GOPE	1.866	1.867	0.844	0.853	0.430	0.434
WTZA	2.137	2.145	0.989	0.992	0.556	0.571
OBE2	1.791	1.806	0.673	0.684	0.375	0.376
ZIMM	2.047	2.154	1.047	1.051	0.613	0.675
平均值	1.8417	1.8594	0.9041	0.91	0.4489	0.4607

从图 3.2 至图 3.7 以及表 3.1 的综合实验结果分析，可以得到以下结论：

1) 从测站 WTZA 和 ZIMM 的单天解的收敛情况来看，在静态 PPP 解算中，无论是否添加电离层改正，单天解的情况最终都会趋于稳定，这表明模糊度参数已经收敛。只是最终解与真实坐标的偏离情况以及收敛过程中的起伏情况有所不同，加入电离层改正的两种方案在定位精度与收敛过程的平静程度上都要优于不加电离层改正的方案，这表明电离层延迟在单频精密定位中影响很大。

2) 从两个测站的收敛情况的具体表现上来看，首先三种方案的收敛时间十分接近，说明三种方案固定模糊度所花费的时间相当。在 N 方向上方案一与方案二的趋势比较接近，方案二的精度稍优于方案一，但二者收敛精度相比方案三都有所不如；在 E 方向上，三种方案的变化趋势和收敛精度基本保持相当；而在 U 方向上，三种方案呈现阶梯式的精度分布，方案三优于方案二，方案二优

于方案一。

3) 从表 3.1 中的综合数据统计可知, 方案一的精度维持在米级以上; 方案二的精度优于米级; 方案三的精度总体维持在分米级。注意到方案二经过 Klobuchar 模型改正电离层延迟后比方案一不加电离层改正时的统计精度由 1.8417m 升为 0.9041m, 修正效率超过 50%, 说明电离层广播星历预报模型的构建方法是有效的; 方案三的格网模型修正精度则上升为 0.4489m, 修正效率接近 75%, 这说明后处理的格网模型精度要优于预报模型, 对电离层延迟的描述更加合理。

4) 从以上信息和实验结果可以看出, 尽管电离层模型改正方法在一定程度上削弱了电离层延迟的影响并且取得了相当的定位精度, 但定位精度最高只能达到分米级, 无法实现厘米级以上的高精度定位。

3.2 电离层参数估计法单频 PPP 方法

通过上一节讨论可知, 电离层延迟的模型改正法在实现单频精密定位中效果并不理想。本节的方法在参考这个结论的基础上, 提出了一种实现思路。

3.2.1 电离层映射函数的研究

通常, 在研究电离层延迟时会首先考虑测站天顶方向上的电子含量分布情况, 然后通过选择合适的映射函数将天顶方向的电子含量投影到卫星信号传播的方向上, 如此选择合适有效的投影函数对真实电离层延迟的描述相当重要。目前常用的映射函数主要有以下几种:

1) 三角函数 SLM 映射函数

在单层电离层模型应用中, 最常用的就是三角函数 SLM 映射函数 $F(Z)$ (魏子卿, 1998):

$$\sin Z' = \frac{R}{R+H} \sin Z \quad (3.13)$$

$$F(Z) = \frac{1}{\cos Z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(Z')}} \quad (3.14)$$

上式中: R 为地球半径, H 为单层高度, Z 为测站卫星天顶角, Z' 为穿刺点处的卫星高度角。

2) 广播星历映射函数

Klobuchar 模型使用了一种用于 GPS 广播电离层模型的投影函数（魏子卿，1998）：

$$F(Z) = 1.0 + 16.0 * (0.53 - E)^3 \quad (3.15)$$

$$F(h) = 1.0 + 0.516 * (1.6745 - h)^3 \quad (3.16)$$

其中， E 为卫星高度角（单位为 π ）； h 为卫星高度角（单位为弧度）。

3) MSLM 映射函数

为了减弱以上两种映射函数引起的 TEC 投影差异，可对 SLM 模型做一些改进形成新的 MSLM 模型（阮仁桂，2009）：

$$\sin Z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha Z) \quad (3.17)$$

$$F(Z) = \frac{1}{\cos Z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(Z')}} \quad (3.18)$$

其中： $\alpha=0.9782$ ； $R=6371\text{km}$ ； $H=506.7\text{km}$ 。

4) slab 映射函数

JPL 分析中心采用了一种 slab 映射函数（霍星亮，2008）：

$$F(z, r) = \frac{Y_{slab}(z, r) + Y_{upper}(z, r)Y_{lower}(z, r)}{Y_{slab}(0, \infty) + Y_{upper}(0, \infty)Y_{lower}(0, \infty)} \quad (3.19)$$

其中， $Y_{slab}(z, r)$ 、 Y_{upper} 、 $Y_{lower}(z, r)$ 分别反映了 slab 层及上下两层结构对整个电离层的贡献情况， r 为站星距， z 为卫星天顶距。

以上是当前较为常用的电离层映射模型，前三种模型较为简洁，缺点是在实际使用中很难确定单层高度；后一种模型投影效果较好，但实际应用中模型建立较为复杂。

3.2.2 电离层延迟的函数表达式

电离层延迟参数估计法的思路是要将电离层延迟作为待遇参数参与解算，首先建立合理的电离层延迟 I 的数学表达公式，通过上一节对映射函数的介绍，可以得出以下几种思路：

当采用一个参数估计电离层延迟时有：

$$I = F * d_{ion}^{zenth} \quad (3.20)$$

其中, F 为映射函数, d_{ion}^{zenth} 为引进参数。这种表达方式只将电离层延迟映射到天顶方向。

当采用两个参数估计电离层延迟时有:

$$I = F * A * d_{ion}^A + F * E * d_{ion}^E \quad (3.21)$$

其中, A 为测站卫星方位角; F 为电离层映射函数; E 为测站卫星高度角; d_{ion}^A 、 d_{ion}^E 为引进的参数。这种表达方法将电离层延迟分别映射到了卫星高度角和方位角两个方向上。

当采用三个参数估计电离层延迟时有 (Lao-Sheng LIN, Cohen, 2001):

$$I = (1 + \sin \varphi^*) J_1 + \cos \varphi^* \cos \lambda^* C_{11} + \cos \varphi^* \sin \lambda^* S_{11} \quad (3.22)$$

其中, φ^* 、 λ^* 分别为太阳共轭坐标系中足下点的经度和纬度; J_1 、 C_{11} 、 S_{11} 为引进的参数。这种表达方式将电离层延迟映射到了足下点的三维直角方向。

3.2.3 电离层延迟参数估计法的数学原理

电离层延迟参数估计法的思路是将电离层延迟作为待估参数加入整体解算, 引进的参数个数与电离层延迟的具体表达形式有关。在实际操作中, 引入电离层延迟参数后, 单频 PPP 的观测方程调整如下 (涂锐等, 2009):

$$C_1 = \rho_r^s + cdt_r + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} + d_{rel} + I + \varepsilon(C_1) \quad (3.23)$$

$$\varphi_1 = \rho_r^s + cdt_r + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} + d_{rel} + \lambda_1 N_1 - I + \varepsilon(\varphi_1) \quad (3.24)$$

上式中, I 为带有参数的电离层延迟函数, 其参数的具体个数根据表达式的不同而变化。其他符号的意义与上文中保持一致。

3.2.4 电离层延迟参数估计法的实验分析

为了观察电离层延迟参数估计法的具体定位效率以及参数个数对定位结果的影响, 设计了以下实验:

1) 数据准备

数据同样是采用上一节中 IGS 跟踪网络欧洲地区十个测站在 2012 年年积日

第 33 天至第 62 天共计 30 天，采样率为 30 秒的观测数据，真实坐标采用 IGS 连续跟踪解算坐标值。

2) 实验设计与分析

本次实验为了研究电离层延迟参数估计法具体表现，设计四组对比试验方案，测试模式为静态定位模式。前三个方案的测试程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的电离层延迟参数估计法部分，方案四的测试程序来自于自行编制的双频 PPP 静态定位程序。软件在编制设计中采用的数据预处理方法，误差改正模型以及参数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。

方案一：电离层延迟采用一个参数估计，采用式 (3.20) 中的表达式，映射函数采用式 (3.18) 中 MSLM 函数；

方案二：电离层延迟采用二个参数估计，采用式 (3.21) 中的表达式，映射函数采用式 (3.18) 中 MSLM 函数；

方案三：电离层延迟采用三个参数估计，采用式 (3.22) 中的表达式，映射函数采用式 (3.22) 中的映射函数；

方案四：采用双频无电离层组合 PPP 计算。

通过以上四种方案的测试，计算测站收敛后单天解坐标并与真值进行比较，其中，测站 WTZA 在年积日第 33 天的定位误差表现如下：

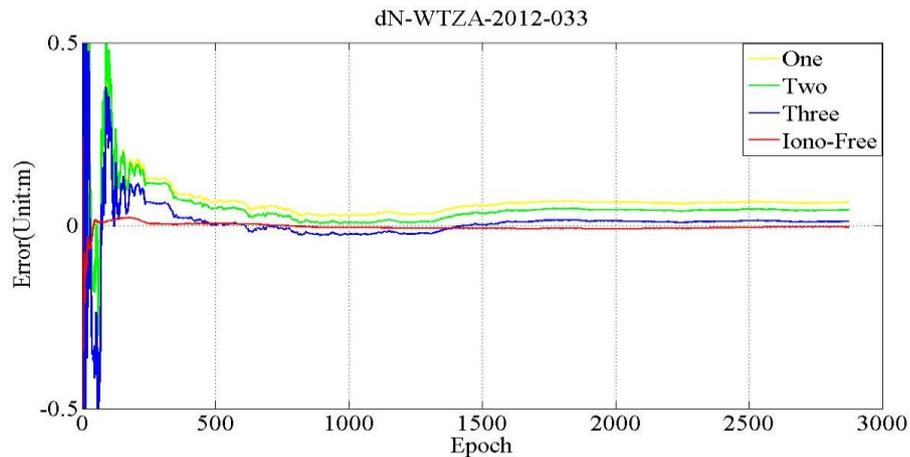


图 3.8 测站 WTZA 四种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

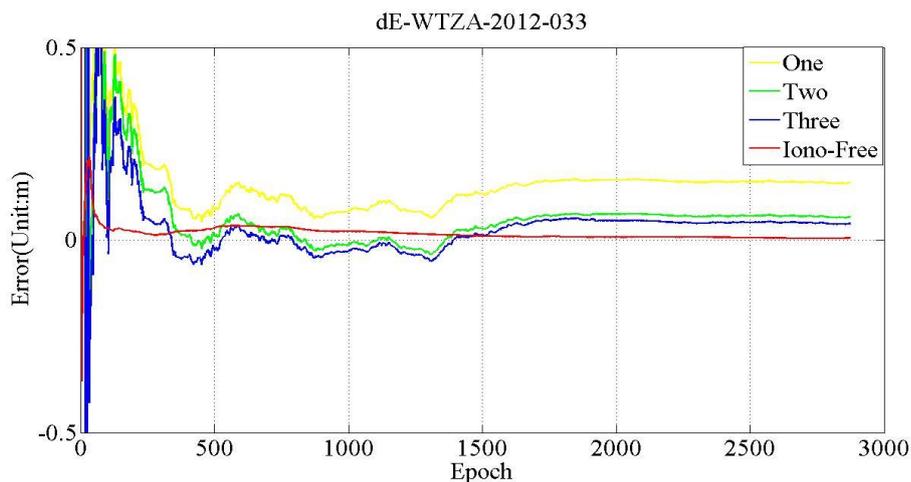


图 3.9 测站 WTZA 四种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

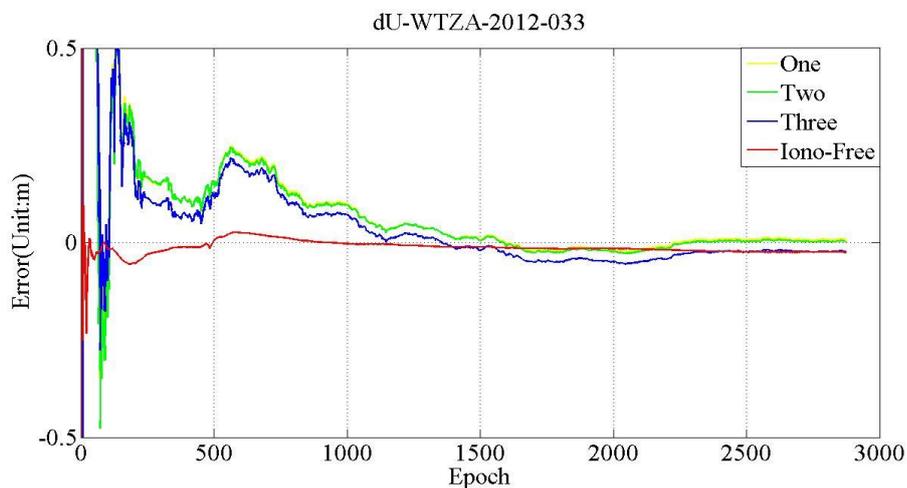


图 3.10 测站 WTZA 四种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

测站 ZIMM 在年积日第 33 天的定位误差表现如下:

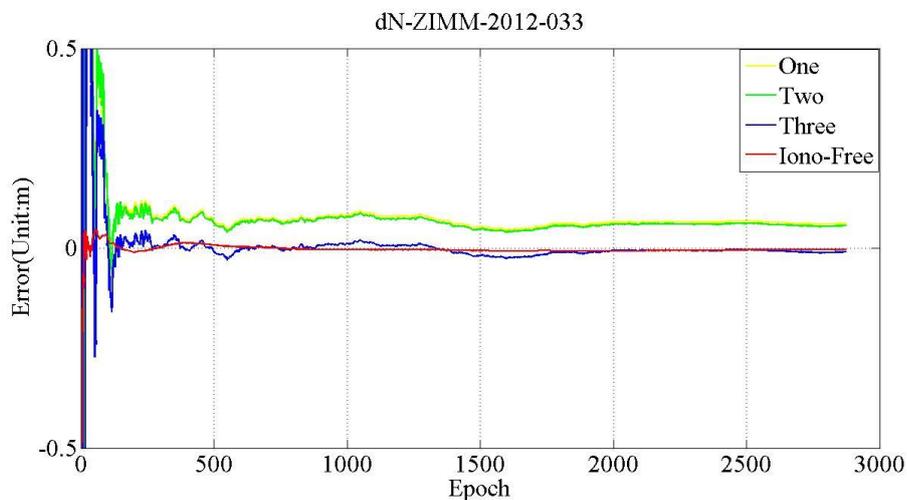


图 3.11 测站 ZIMM 四种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

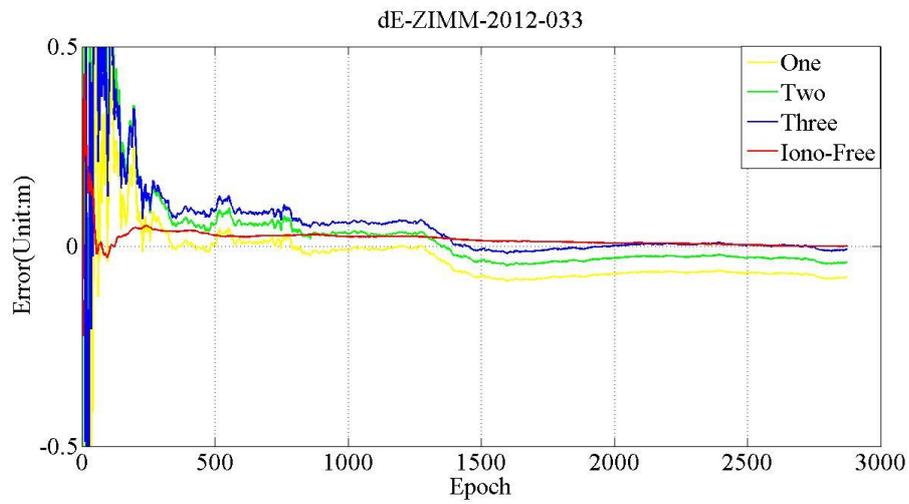


图 3.12 测站 ZIMM 四种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

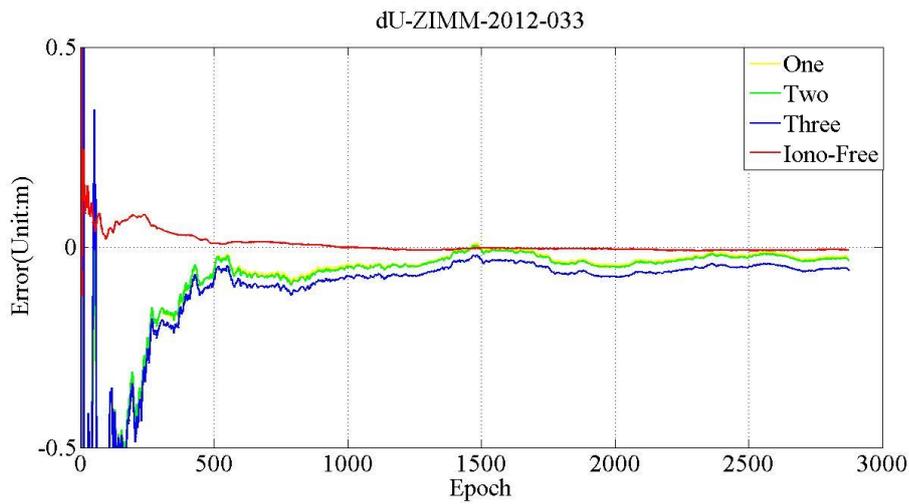


图 3.13 测站 ZIMM 四种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

整理所有测站 30 天的实验数据结果, 统计并记录各测站 30 日内单天解解算坐标与真实坐标差值的三维点位误差的平均值(Mean)与中误差(RMS)结果如下:

表 3.2 测试站 30 天单天解的平均值 (Mean) 和中误差 (RMS) 统计

站名 (IGS)	方案一		方案二		方案三		方案四	
	(单位: 米)		(单位: 米)		(单位: 米)		(单位: 米)	
	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS
BRUS	0.114	0.117	0.074	0.118	0.038	0.039	0.024	0.025
KOSG	0.093	0.095	0.087	0.089	0.024	0.026	0.018	0.018
PTBB	0.135	0.141	0.117	0.119	0.042	0.046	0.036	0.039
POTS	0.127	0.132	0.114	0.118	0.036	0.039	0.031	0.032
BOR1	0.108	0.113	0.092	0.096	0.033	0.036	0.029	0.031
WROC	0.084	0.089	0.081	0.085	0.028	0.030	0.013	0.013
GOPE	0.102	0.108	0.091	0.095	0.037	0.040	0.031	0.034
WTZA	0.123	0.129	0.115	0.119	0.042	0.045	0.023	0.028
OBE2	0.108	0.113	0.095	0.098	0.030	0.034	0.031	0.032
ZIMM	0.093	0.096	0.082	0.085	0.032	0.033	0.024	0.025
平均值	0.1087	0.1133	0.0948	0.1022	0.0342	0.0368	0.0261	0.0277

从图 3.8 至图 3.13 以及表 3.2 的综合实验结果分析, 可以得到以下结论:

(1) 分析测站 **WTZA** 和 **ZIMM** 的单天解的收敛情况, 在静态 PPP 解算中, 四种方案单天解最终都会趋于稳定, 这表明模糊度参数已经收敛。但从收敛的总体态势来看, 电离层参数估计的三种方案在收敛过程的平静程度上都要弱于方案四的双频组合, 表明电离层延迟参数估计法还没全面反映电离层的物理特性, 对精密定位有一定影响。

(2) 从两个测站的收敛情况的具体表现上来看, 前三种方案的收敛时间十分接近, 大概在 400 个历元左右, 收敛时间是方案四在 2 倍以上。这说明前三种方案由于待估参数增多, 电离层描述精细程度等原因, 模糊度收敛相当耗时。前三种方案在 N、E、U 三个方向上的大体收敛趋势相同, 对比方案四精度表现出各自的差异性。总体来看, 前三种方案中方案三精度最高, 方案二与方案一在三个方向上互有优劣。

(3) 从表 3.2 中的综合数据统计可知, 方案一的精度维在 1 分米左右; 方

案二的精度优于分米级但相差不大,说明用一个参数和两个参数来描述电离层效果相当,都有所欠缺;方案三的精度十分接近方案四,在 3cm 左右,要远优于方案一和方案二,与双频组合相当,这说明参数估计模型在一定程度上能够很好描述电离层变化情况;其中利用三参数将电离层映射到足下点的三维直角方向的表达更加合理。

(4) 以上信息和实验结果表明电离层参数估计的思路是合理的,其中参数的个数以及电离层的函数表达方式对定位结果有一定影响。

3.3 伪距/相位半和法单频 PPP

这也是一种实现单频 PPP 的新方法,参考了双频无电离层组合 PPP 的思路,即通过观测方程组合的方式消除其中的电离层延迟。但又不同于双频组合,它是通过伪距与载波之间的组合来消除电离层延迟。

3.3.1 伪距/相位半和法的数学原理

在单频卫星信号的观测方程中伪距观测值 C_1 和载波相位观测值 L_1 上受到的电离层延迟的影响大小相等、符号相反。因此,可以将 C_1 与 L_1 的初试观测方程相加再取一半就得到了一个新的观测方程。为了确保新的组合能够正确求解出待估参数,还需联立原始的伪距观测方程来保证解算中法方程不秩亏。对照单频 PPP 的初始观测方程(式 2.1)可以得出伪距/相位半和法的观测方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_1 * \varphi_1 + C_1}{2} &= \rho_r^s + c * (dt_r - dt^s) + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} \\ &+ d_{rel} + \frac{\lambda_1 * N_1}{2} + \frac{\varepsilon(\varphi_1) + \varepsilon(C_1)}{2} \\ C_1 &= \rho_r^s + c * (dt_r - dt^s) + T_{DCB} + d_{orb} + d_{ion} + d_{trop} + d_{rel} + \varepsilon(C_1) \end{aligned} \quad (3.25)$$

上式中所有符号的表示意义与式(2.1)保持一致。经过以上的组合后,实现了在单频观测值中消除了电离层延迟的影响,同时将伪距观测值的噪声降低了一半。

3.3.2 伪距/相位半和法的关键技术

组合出伪距/相位半和法的观测方程后,针对此种方法,在解算过程中还需

注意以下几点:

1) 半和法的数据预处理流程以及主要误差源的改正策略与本文提到的方法保持一致。其中针对电离层延迟, 相位观测方程是采用半和法公式组合来消除, 对联立的伪距观测方程可采用格网电离层改正模型来修正。

2) 定权。经过上述组合, 两类观测方程不再独立, 在建立观测方程的随机模型时, 应予以考虑。同时由于相位观测方程引入伪距噪声, 两类观测方程的观测噪声发生了改变, 在给观测值定权时也需注意。为了抑制伪距观测值对定位的影响可适当放低伪距观测方程的权重。

3) 半和法的参数估计方法同样采用序贯最小二乘估计, 主要待估参数有: 三维位置参数、接收机钟差参数、对流层延迟参数以及模糊度参数。

3.3.3 伪距/相位半和法的实验分析

为了测试半和法的定位效率, 设计了以下实验:

1) 数据准备

数据仍然采用 IGS 欧洲地区十个测站十个站在 2012 年年积日第 33 天至第 62 天共计 30 天, 采样率为 30 秒的观测数据, 真实坐标采用 IGS 连续跟踪解算坐标。

2) 实验与分析

本次实验为了研究半和法具体表现, 设计两组对比试验方案, 测试模式为静态定位模式。方案一的测试程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的半和法部分, 方案二的测试程序来自于自行编制的双频 PPP 静态定位程序。软件在编制设计中采用的数据预处理方法, 误差改正模型以及参数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。

方案一: 采用半和法进行单频 PPP 解算;

方案二: 采用双频无电离层组合进行 PPP 解算。

通过以上两种方案的测试, 计算测站收敛后单天解坐标并与真值进行比较, 其中, 测站 WTZA 在年积日第 33 天的定位误差表现如下:

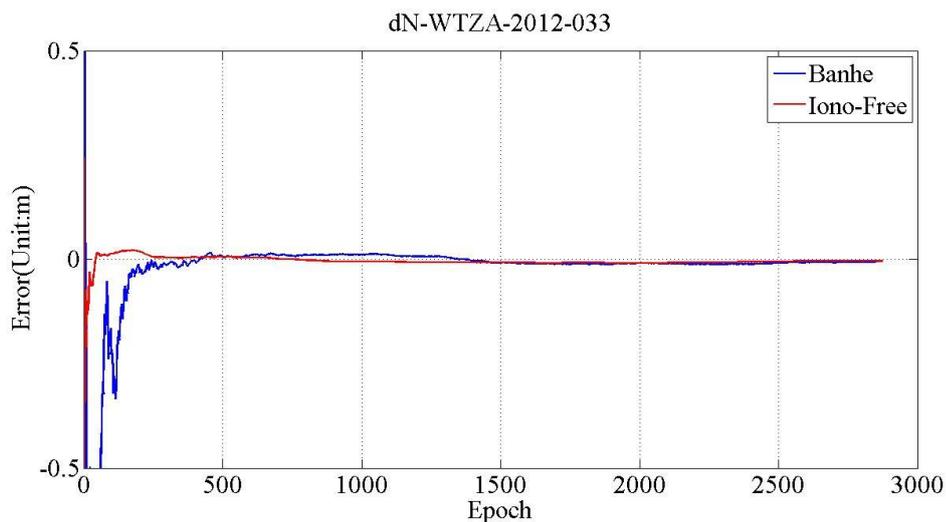


图 3.14 测站 WTZA 两种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

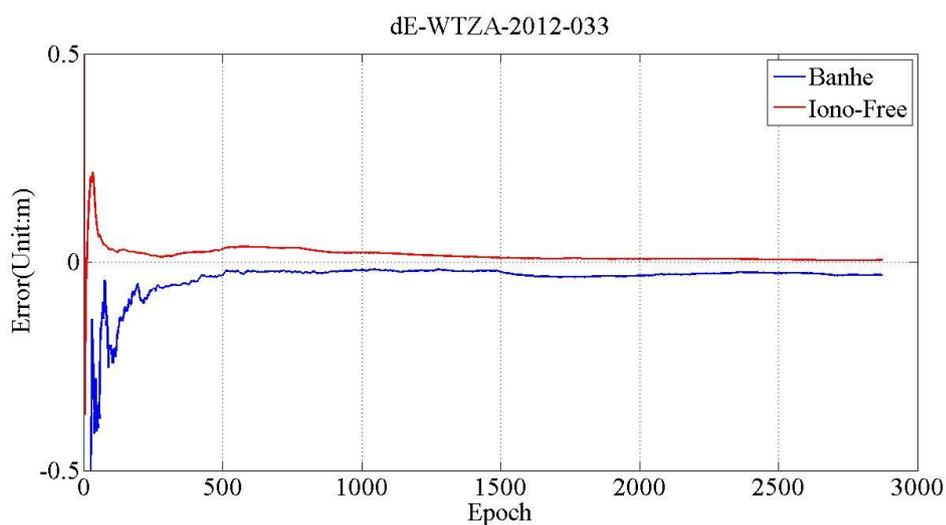


图 3.15 测站 WTZA 两种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

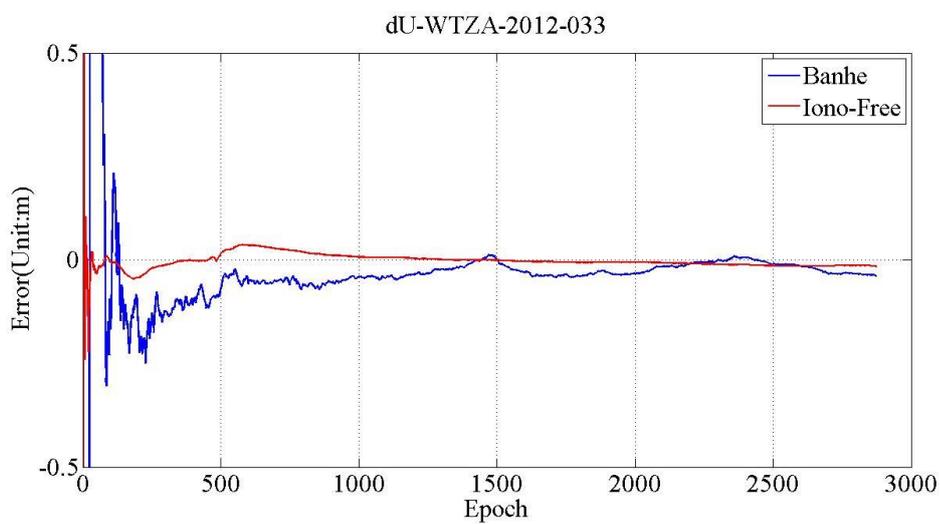


图 3.16 测站 WTZA 两种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

测站 ZIMM 在年积日第 33 天的定位误差表现如下：

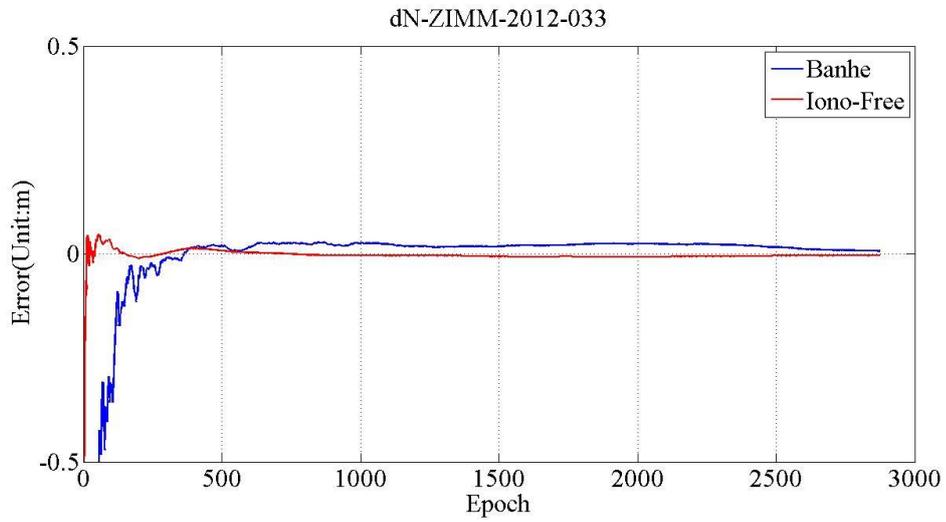


图 3.17 测站 ZIMM 两种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

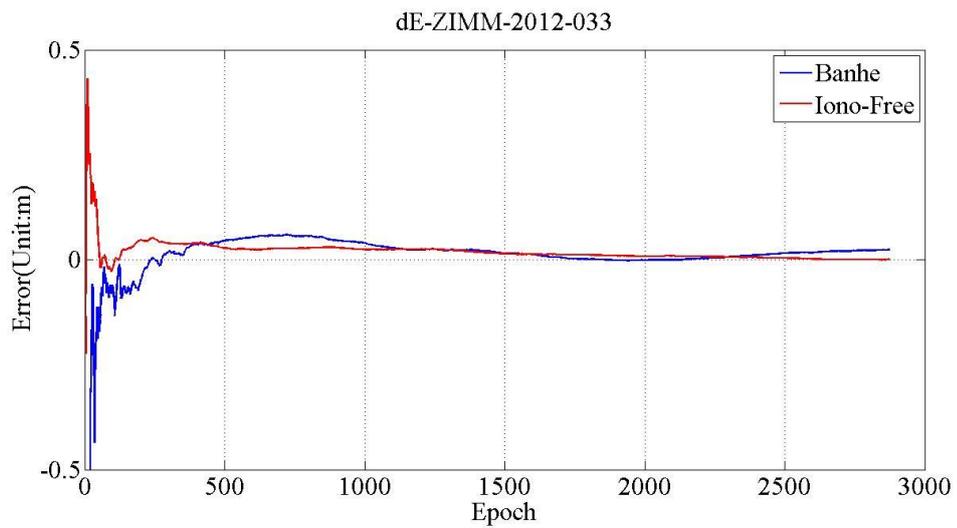


图 3.18 测站 ZIMM 两种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

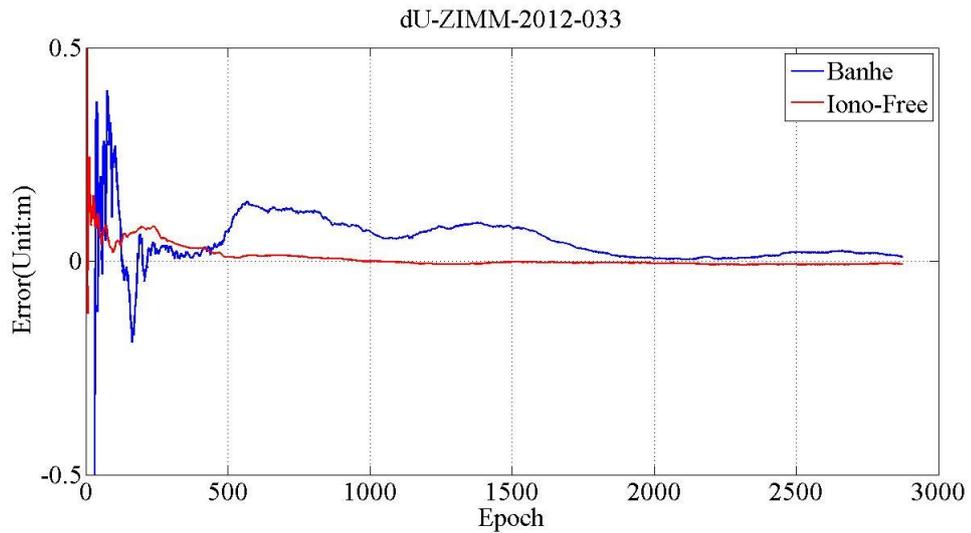


图 3.19 测站 ZIMM 两种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

整理所有测站 30 天的实验数据结果，统计并记录各测站 30 日内单天解解算坐标与真实坐标差值的三维点位误差的平均值 (Mean) 与中误差 (RMS) 结果如下：

表 3.3 测试站 30 天单天解的平均值 (Mean) 和中误差 (RMS) 统计

测站 (IGS)	方案一 (单位: 米)		方案二 (单位: 米)	
	Mean	RMS	Mean	RMS
BRUS	0.028	0.030	0.024	0.025
KOSG	0.031	0.034	0.018	0.018
PTBB	0.035	0.041	0.036	0.039
POTS	0.036	0.039	0.031	0.032
BOR1	0.033	0.037	0.029	0.031
WROC	0.031	0.034	0.013	0.013
GOPE	0.022	0.031	0.031	0.034
WTZA	0.030	0.032	0.023	0.028
OBE2	0.028	0.035	0.031	0.032
ZIMM	0.017	0.027	0.024	0.025
平均值	0.0291	0.0340	0.0261	0.0277

从图 3.14 至图 3.19 以及表 3.3 的综合实验结果分析，可以得到以下结论：

(1) 分析测站 WTZA 和 ZIMM 的单天解的收敛情况，在静态 PPP 解算中，两种方案单天解都会趋于稳定。但从收敛的总体态势来看，方案一半和法在收敛

过程的平静程度上要弱于方案二的双频组合。表明由于半和法观测值相位观测值中引入伪距噪声，影响了收敛过程，对精密定位有一定影响。

(2) 从两个测站的收敛情况的具体表现上来看，方案一在收敛中精度达到 1 分米以内时大概需要 200 个历元左右，但比方案二双频组合收敛时间长，这说明方案一由于观测值噪声较大，对模糊度收敛造成了一定影响。两种方案在 N、E 方向上的大体收敛趋势相同，十分平稳；在 U 方向上，方案一有相当起伏且精度要弱如方案二的精度。

(3) 从表 3.3 中的综合数据统计可知，单天解方案一统计后的点位误差为 0.0291m；与方案二统计的点位误差 0.0261m 在量级上相当，数值上差异不大。说明用码和载波组合消电离层的做法能够消除电离层对单频精密定位的影响。

(4) 从以上信息和实验结果可以得出，半和法在定位精度上能够接近双频组合 PPP 的精度，效率有所欠缺。其中伪距噪声的引入对定位过程产生了一定影响。

3.4 电离层参数约化法单频 PPP

这种方法借鉴了电离层延迟参数估计法的思路。它本身也是一种基于参数域的解决方案，不同的是在针对电离层参数的处理上提出了一种新的思路。

3.4.1 电离层参数约化法的数学原理

参数约化技术在大规模的大地网解算和动态数据处理应用中非常常见。在大规模的解算中会涉及许多类型和数量的参数，但其中有某些参数是我们不感兴趣的，可以采用参数约化的方法来事先消除，减小矩阵求解的维度，降低计算量。被约化的参数也可以通过保存相关系数矩阵在法方程完成解算后回代求出。它的具体过程是：

假设观测方程 L1 中有需要求解的和不需要求解的两类参数：x 和 y，它们对应的系数阵为 A 和 B，权阵为 P，那么由观测方程组成法方程有：

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P & B^T P B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A^T P L \\ B^T P L \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

简化表示后有：

$$\begin{bmatrix} N_{aa} & N_{ab} \\ N_{ab}^T & N_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} W_a \\ W_b \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

为了消去不需要的参数 y ，首先从法方程 (3.27) 第二行中求出：

$$y = -N_{bb}^{-1}(N_{ba}x + W_b) \quad (3.28)$$

并代入第一行可求取需要的待估参数 x ，同时约化了参数 y ：

$$x = -[N_{aa} - N_{ab}N_{bb}^{-1}N_{ba}]^{-1}[W_a - N_{ab}N_{bb}^{-1}W_b] \quad (3.29)$$

以上就是参数约化的一般过程，继承这种思想就形成了电离层参数约化法的基本思路。首先我们将电离层延迟 I 也作为待估参数加入整体解算，那么单一信号上的观测方程变为：

$$C_1 = \rho_r^s + cdt_r + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} + d_{rel} + I + \varepsilon(C_1) \quad (3.30)$$

$$\varphi_1 = \rho_r^s + cdt_r + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} + d_{rel} + \lambda_1 N_1 - I + \varepsilon(\varphi_1) \quad (3.31)$$

观测方程 (3.31, 3.32) 中，主要的参数有 ρ_r^s 中的三维坐标参数，接收机钟差改正 dt_r ， d_{trop} 中的对流层延迟参数以及新加入的电离层参数 I 。由于电离层参数 I 对于不同的卫星在不同的历元其值都是不同的，因此参数过多此时法方程是秩亏的。可以采用参数约化法在每个历元解算前，事先将电离层参数消掉，这样法方程不再秩亏，可以进行正常平差解算。

解算的过程参数估计方法同样采用序贯平差的方法，各误差源的改正方法也采用第二章提到的方法。在程序设计流程中加入参数约化的过程。

3.4.2 电离层参数约化法的实验分析

参数约化法是一种新思路，考虑了电离层的物理特性，从技术层面对解算过程做了重新规划，为了研究电离层参数约化法的定位效率，设计了以下实验：

1) 数据准备

数据采用上一节中 IGS 欧洲地区十个测站十个站在 2012 年年积日第 33 天至第 62 天共计 30 天，采样率为 30 秒的观测数据，真实坐标采用 IGS 连续跟踪解算坐标。

2) 实验与分析

本次实验为了研究电离层参数约化法具体表现，设计两组对比试验方案，测试模式为静态定位模式。方案一的测试程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的电离层参数约化法部分，方案二的测试程序来自于自行编制的双频 PPP 静态定位程序。软件在编制设计中采用的数据预处理方法，误差改正模型以及参

数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。

方案一：采用电离层约化法进行单频 PPP 解算；

方案二：采用双频无电离层组合进行 PPP 解算。

通过以上两种方案的测试，计算测站收敛后单天解坐标并与真值进行比较，其中，测站 WTZA 在年积日第 33 天的定位误差表现如下：

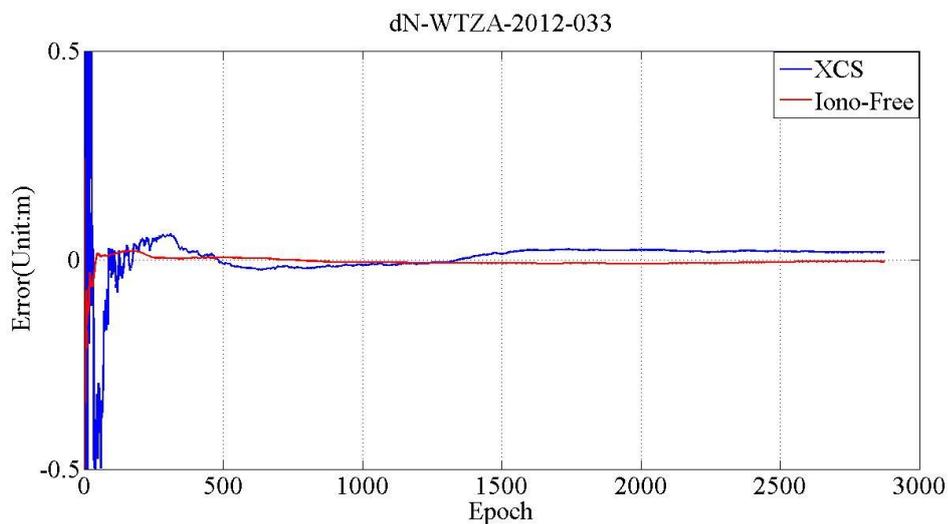


图 3.20 测站 WTZA 两种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

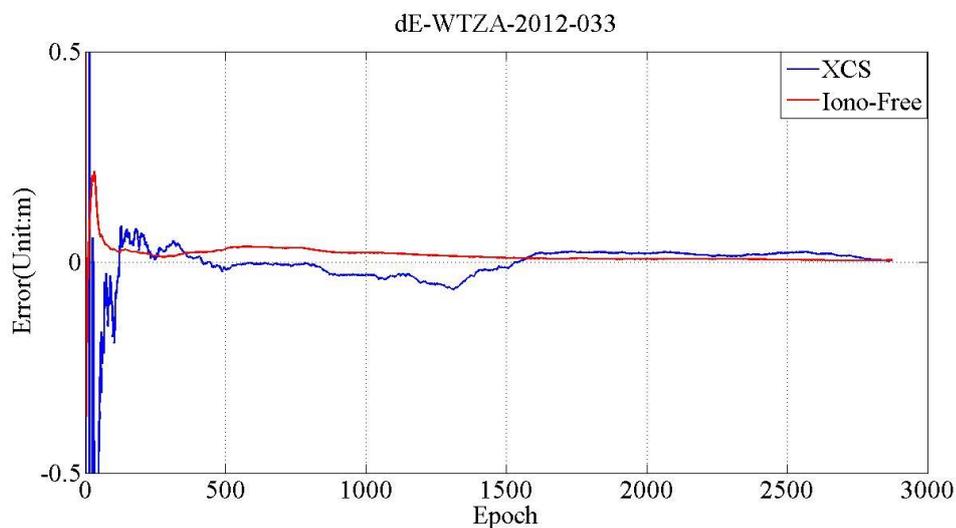


图 3.21 测站 WTZA 两种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

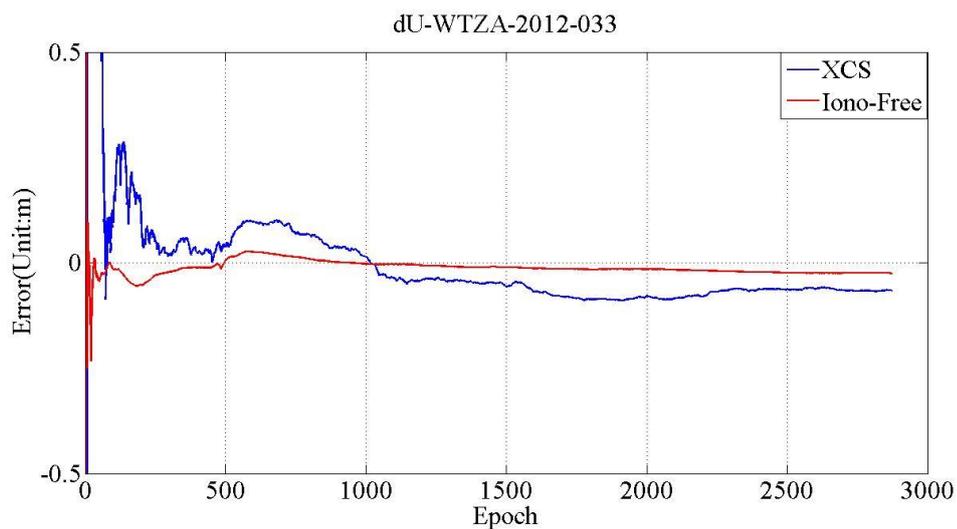


图 3.22 测站 WTZA 两种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

测站 ZIMM 在年积日第 33 天的定位误差表现如下

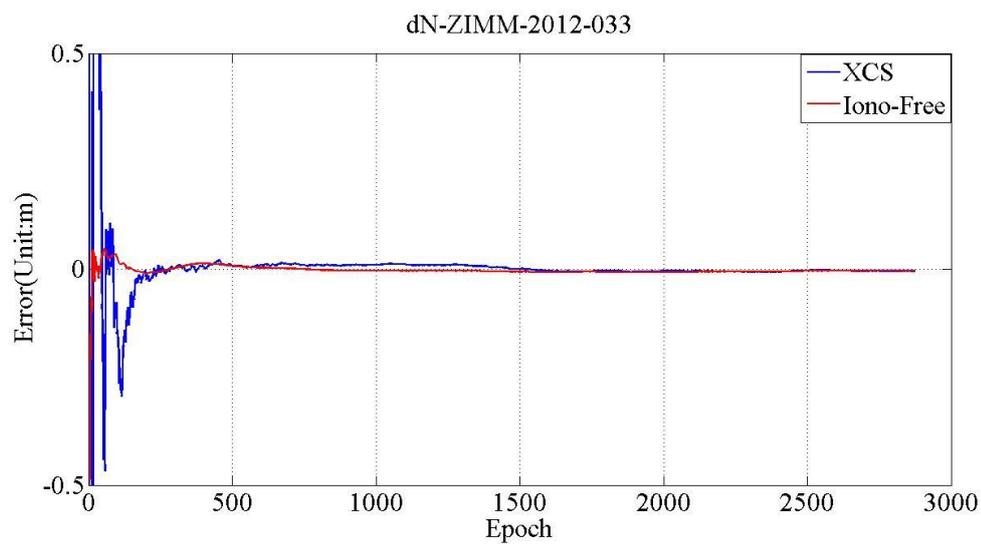


图 3.23 测站 ZIMM 两种方案在年积日第 33 天 N 方向上的误差

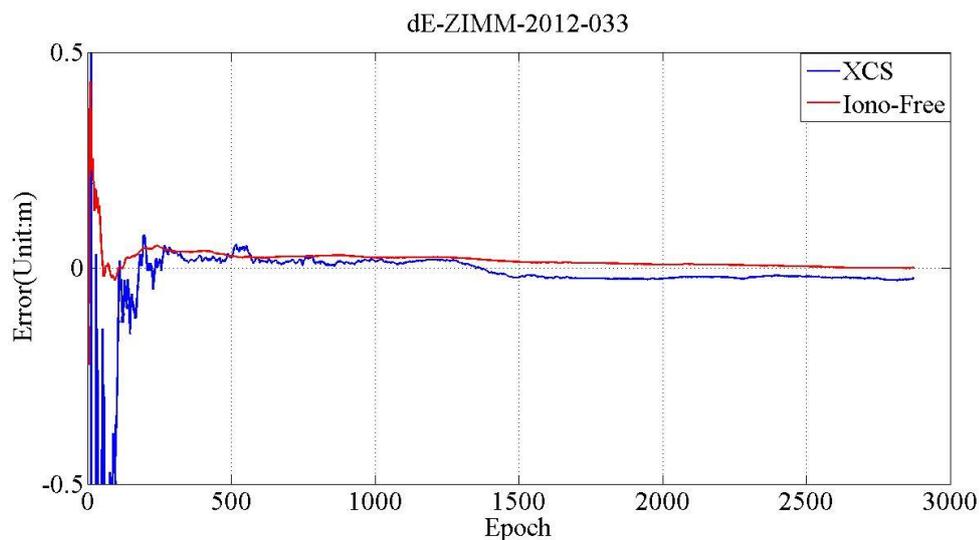


图 3.24 测站 ZIMM 两种方案在年积日第 33 天 E 方向上的误差

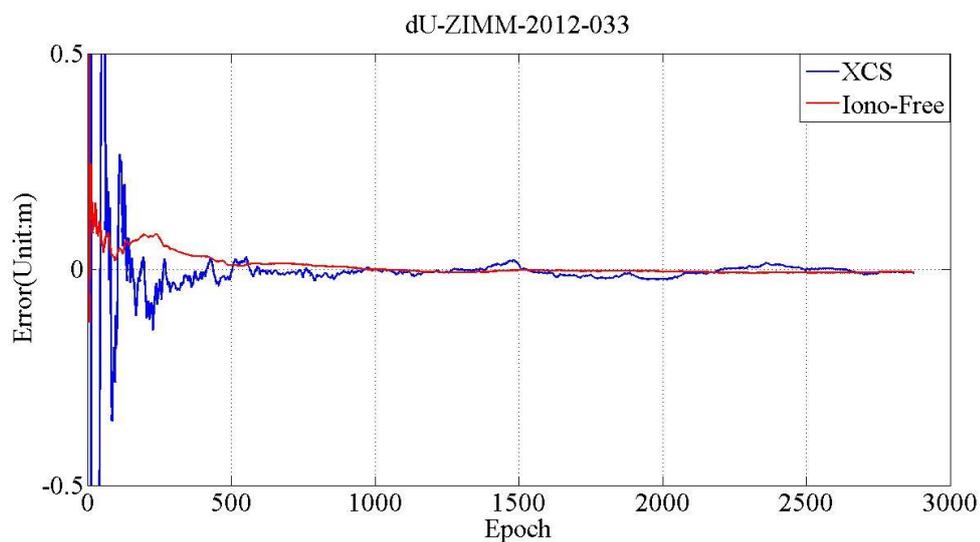


图 3.25 测站 ZIMM 两种方案在年积日第 33 天 U 方向上的误差

整理所有测站 30 天的实验数据结果,统计并记录各测站 30 日内单天解解算坐标与真实坐标差值的三维点位误差的平均值(Mean)与中误差(RMS)结果如下:

表 3.4 测试站 30 天单天解的平均值 (Mean) 和中误差 (RMS) 统计

测站 (IGS)	方案一 (单位: 米)		方案二 (单位: 米)	
	Mean	RMS	Mean	RMS
BRUS	0.025	0.026	0.024	0.025
KOSG	0.021	0.023	0.018	0.018
PTBB	0.028	0.034	0.036	0.039
POTS	0.033	0.037	0.031	0.032
BOR1	0.024	0.026	0.029	0.031
WROC	0.015	0.018	0.023	0.023
GOPE	0.024	0.027	0.031	0.034
WTZA	0.029	0.031	0.023	0.028
OBE2	0.034	0.035	0.031	0.032
ZIMM	0.023	0.026	0.014	0.015
平均值	0.0256	0.0283	0.0261	0.0277

从图 3.20 至图 3.25 以及表 3.4 的综合实验结果分析, 可以得到以下结论:

(1) 分析测站 **WTZA** 和 **ZIMM** 的单天解的收敛情况, 在静态 PPP 解算中, 两种方案单天解都会趋于稳定。但从收敛的总体态势来看, 方案一参数约化法在收敛过程中的平静程度上要弱于方案二的双频组合法, 表明由于增加了电离层参数, 影响了收敛过程, 对精密定位有一定影响。

(2) 从两个测站的收敛情况的具体表现上来看, 方案一在收敛中精度达到 1 分米以内时大概需要 150 个历元左右, 比方案二双频组合收敛时间长, 但优于前面提到的几种方法。这说明参数约化法对加入的电离层变化参数的处理给收敛过程带来了一定改善。在测站 **WTZA** 上的 N、E、U 三个方向上的方案一收敛趋势有相当起伏, 方案二比较平静, E 方向上精度二者相当, 其他两个方向方案一精度稍显不如; 在测站 **ZIMM** 上方案一与方案二收敛趋势一致, E 方向上精度稍差。

(3) 从表 3.4 中的综合数据统计可知, 两种方案单天解 30 天点位误差平均

值各有优劣,同时方案一统计后的点位误差为 0.0256m;与方案二统计的点位误差 0.0261m 在量级上相当,数值上差异不大。说明用电离层参数约化的做法能够消除电离层对单频精密定位的影响。

(4) 从以上信息和实验结果可以得出,电离层参数约化法在定位精度上能够与双频组合 PPP 的精度相当,但其中电离层参数引入对收敛过程产生了一定影响。

3.5 本章小结

本章从实现单站式单频 PPP 的思路出发,详细介绍了几种有效的定位方法。重点讨论了这些方法在实现过程中如何成功的完成对单频精密定位影响最大的电离层延迟的处理工作,提供了一些思路和想法,归纳起来主要有以下几种:

1) 从常用的电离层模型构建的角度出发,详细分析了目前主流的电离层延迟模型的构建方案及其改正效果,发现由于电离层实时变化的复杂性,各种模型的建立能够产生一定的效果,但很难完整的描述电离层的变化,对单频精密定位中电离层延迟的修正效果有限。

2) 从实现单站式单频精密定位的角度出发,介绍了电离层参数模型。在待估参数中加入电离层延迟参数进行解算,同时根据参数个数与电离层映射方式的不同影响着定位结果。发现利用三参数将电离层映射到足下点的直角坐标方向的做法最优,能够实现接近双频组合 PPP 的精度。

3) 介绍了伪距/相位半和法的方法。这是一种利用伪距与相位组合消电离层延迟的方法,最终也能够在单站上实现单频精密定位,但码噪声引入载波相位观测方程影响了收敛过程。

4) 介绍了电离层参数约化法的方法。根据测站上各个卫星方向上的电离层延迟变化的不同加入电离层参数,最后利用参数约化的方法消掉这些参数使得法方程不再秩亏,最终实现单频精密定位。这种方法的定位效率不如双频 PPP 方法,但在以上提到的几种方法中是最优的。

第4章 参考站辅助单频 PPP 技术与区域误差模型研究

第三章重点讨论了单站式单频 PPP 技术的发展与革新，其中涌现了不少优秀的思路和想法。但同时发现，在单站式服务状态下，单频 PPP 的性能提升遇到了瓶颈。对比双频组合 PPP 技术，单站式单频 PPP 技术在定位精度以及收敛速度上都有所欠缺，如何进一步提升单频 PPP 的性能和效率，这是技术能否走向成熟的关键。本章有鉴于此，研究了区域基准站辅助下的单频 PPP 技术，研究了目前前沿的几类研究成果，为单频 PPP 技术的深入研究提供一些借鉴。

4.1 基于基准站改正单频 PPP 方法

基于基准站改正的单频 PPP 方法是在充分考虑区域内电离层的真实变化的基础上发展起来的。通常，区域内相隔不远的两个测站上的包括电离层变化在内的若干种误差在时空中有很强的相似性。相对定位模式正是基于这一特性通过站间做差消除了区域共性误差。本节方法借鉴了这种思路。

4.1.1 基于基准站改正的单频 PPP 的数学原理

以单基准站研究为例，假设在一区域相隔不远的位置上有着两个测站：基准站 2 和用户流动站 1，其中基准站的位置坐标 X_2 精确已知。那么两个测站上的单频载波相位观测方程线性化后可以写成如下形式（涂锐等，2010）：

$$L_{1\text{流}} = A_1 X_1 + B_1 dt_1 + C_1 N_1 + D_1 I_1 + d_{trop1} + \varphi_{others1} + \varepsilon_1 \quad (4.1)$$

$$L_{1\text{基}} = A_2 X_2 + B_2 dt_2 + C_2 N_2 + D_2 I_2 + d_{trop2} + \varphi_{other2} + \varepsilon_2 \quad (4.2)$$

式中： X_1, X_2 为分别用户站和流动站的测站坐标；

dt_1, dt_2 分别用户站和流动站的接收机钟差参数；

N_1, N_2 分别用户站和流动站的 L1 载波相位模糊度；

I_1, I_2 分别用户站和流动站的电离层延迟函数；

d_{trop1}, d_{trop2} 分别用户站和流动站的对流层延迟；

$\varphi_{others1}, \varphi_{others2}$ 分别用户站和流动站上包含相对论改正、固体潮、天线相位中心、多路径效应、海潮、地球自转等能通过模型改正的观测误差的总和；

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别用户站和流动站的观测噪声。

根据事先确定的基准站的真实坐标，如果忽略的观测噪声的影响，那么可以获取星地距离与实际距离的差值 δV （涂锐等，2010）：

$$\delta V = L_{1\text{基}} - A_2 X_2 = B_2 dt_2 + C_2 N_2 + D_2 I_2 + d_{trop2} + \varphi_{other2} \quad (4.3)$$

其中 δV 中主要包含了基准站上的模糊度、电离层残差、接收机钟差、对流层残差及其他一些观测误差，这些误差在时空中的分布有很强的相似性。那么将 δV 改正到用户站上可以获得方程：

$$L_{1\text{流}} - \delta V = A_1 X_1 + B_1 dt_1 + C_1 N_1 + D_1 I_1 + d_{trop1} + \varphi_{others1} + \varepsilon_1 - (B_2 dt_2 + C_2 N_2 + D_2 I_2 + d_{trop2} + \varphi_{other2}) \quad (4.4)$$

当两站在区域中相距不远时，可以认为 $B_1 = B_2$ ， $C_1 = C_2$ ， $D_1 = D_2$ ，那么上式可以变为：

$$L_{1\text{流}} - \delta V = A_1 X_1 + B_1 (dt_1 - dt_2) + C_1 (N_1 - N_2) + D_1 (I_1 - I_2) + (d_{trop1} - d_{trop2}) + (\varphi_{others1} - \varphi_{others2}) + \varepsilon_1 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} L_{1(\text{new})} &= L_{1\text{流}} - \delta V \\ &= A_1 X_1 + B_1 * \Delta dt + C_1 * \Delta N + D_1 * \Delta I + \Delta d_{trop} + \Delta \varphi_{other} + \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

从加入基准站改正信息后的观测方程（4.6）可以看出：其与原始的流动站观测方程（4.1）在形式上一致，系数矩阵也没有发生改变；同时二者的钟差参数具有相同的随机特性；并且整周模糊度也保持着整数特性。但不同的是在新的观测方程中流动站与基准站的包含轨道误差和卫星钟差在内的大部分共性误差都被大大削弱。在二者非常接近时，还可以忽略 Δd_{trop} 、 $\Delta \varphi_{other}$ 的影响，将方程再次简化。将以上新的观测方程与流动站上的伪距观测方程联立后即可进行单频 PPP 解算。

当流动站和基准站距离较远时，测站间的观测误差相似程度就会下降，此时若要保持单频 PPP 的效率，需要在提取基准站信息时事先将测站上的能够模型化消除的误差 φ_{model} 消除掉，同时在流动站也照此操作，可以保证最大程度的消除 δV 中的非共性误差：

$$\delta V = L_{1\text{基}} - A_2 X_2 - \varphi_{\text{model}} = B_2 dt_2 + C_2 N_2 + D_2 I_2 + d_{trop2} + \varphi'_{other2} \quad (4.7)$$

此外,这种方法也可以发展到多基准站的模式,通过覆盖流动站的基准站网络来构建区域共性误差分布情况,可以提高流动站上的定位效果。

4.1.2 基于基准站改正的单频 PPP 的关键技术

基于基准站改正的单频 PPP 方法实质上是参考相对定位站间做差的思路,二者在一定程度上是等价的。在操作过程中该方法将直接站间做差的思路转换成间接的基于基准站共性误差的削弱方法。归纳起来,在实现基于单基准站的单频 PPP 方法时,需要顾及到以下几点:

1) 这种方法采用序贯平差模式,数据预处理,随机模型与前面的保持一致,整周模糊度取实数解,定权按照观测量的先验精度以及卫星高度角决定。

2) 在站间距离较远时,电离层共性减弱,联立伪距观测方程时,可以采用电离层延迟三参数法来估计电离层延迟残余部分。

3) 在使用基准站网络来构建共性误差时,构建方法根据站群的个数有多种选择,常见的有距离加权法,线性内插,二次内插等等。

4.1.3 基于基准站改正的单频 PPP 的实验分析

基于基准站改正的单频 PPP 方法是结合区域误差相关性原理以及站间单差的思想来实现 PPP 模式精密定位的,为了验证这种方式的有效性,设计了以下实验:

1) 实验数据准备

本文的实验数据选用了上海市 CORS 监测网络中 5 个双频监测站(测站编号为 S1, S2, S3, S4, S5)的 GPS 观测数据,站点分布情况如图 4.1。数据采样间隔为 30s,选取了 2010 年 7 月 14 号至 20 号共计一周的数据,数据采集条件良好。图中编号为 S 开头的是 CORS 网络基准站,用 Bernese 软件联合 BJFS, WUHN, SHAO 等 IGS 基准站解算出 CORS 网内各基站 WGS84 坐标系下的位置坐标作为真值坐标参与实验分析。本次实验中将把 S1 站作为流动站,把 S2, S3, S4, S5 作为基准参考站参与设计实验方案。

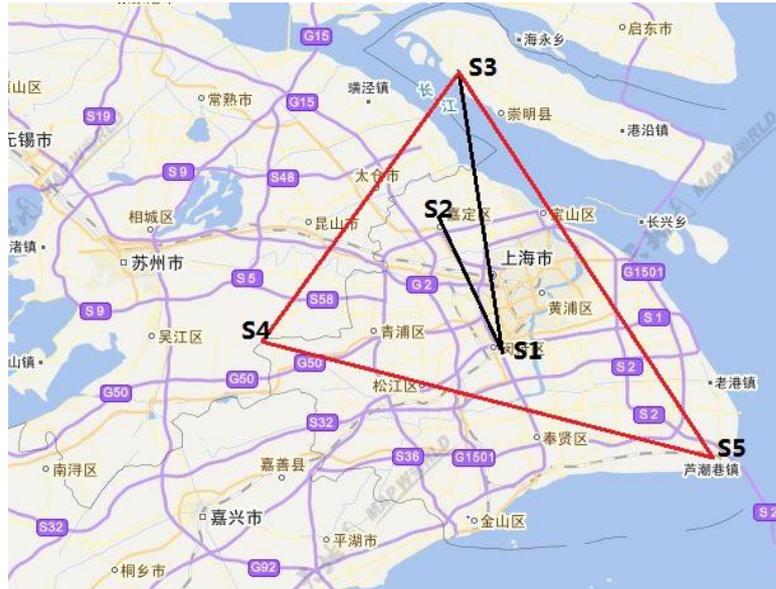


图 4.1 测试站位置分布与方案设计

2) 实验设计与分析

本次实验为了研究基于基准站改正的单频 PPP 方法的具体表现，设计四组对比试验方案。测试模式为静态定位模式。前三种方案的测试程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的基于基准站改正单频 PPP 法部分，方案四的测试程序来自于自行编制的双频 PPP 静态定位程序。软件在编制设计中采用的数据预处理方法，误差改正模型以及参数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。

方案一：采用由单一基准站 S2 辅助改正流动站 S1 实现 PPP 解算，站间距离 32km

方案二：采用由单一基准站 S3 辅助改正流动站 S1 实现 PPP 解算，站间距离 64km；

方案三：采用由基准站（S3，S4，S5）组成参考网辅助改正流动站 S1 实现 PPP 解算，各参考站距离测站平均距离 71km.

方案四：采用双频无电离层组合 PPP 进行解算。

在完成以上实验前，首先研究了区域电离层的相关性表现。利用测站 S1 和 S2 数据，固定其真值坐标，反算出各自伪距观测值 C1 上经过改正模型化误差后的观测残差值。其中在 7 月 14 号 PRN29 号卫星的伪距观测量残差比较如下：

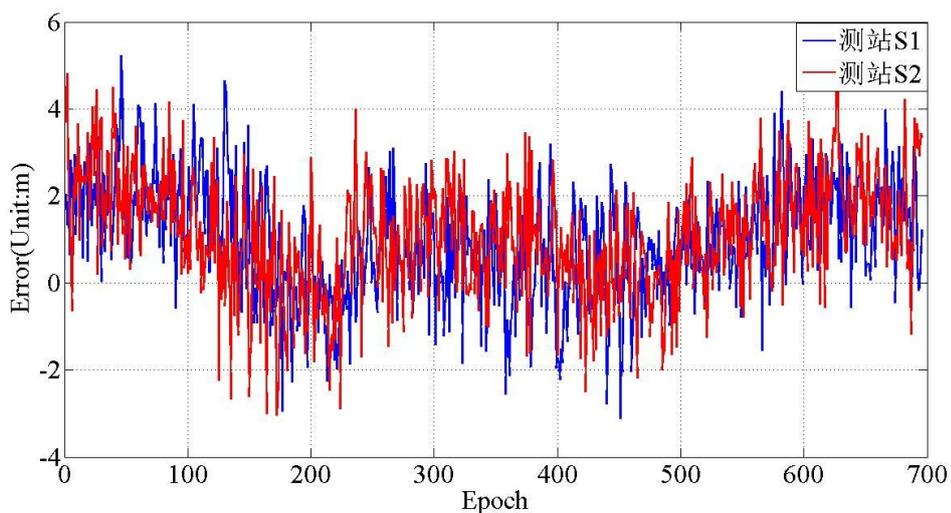


图 4.2 测站 S1 与 S2 上 PRN29 号卫星的伪距残差比较

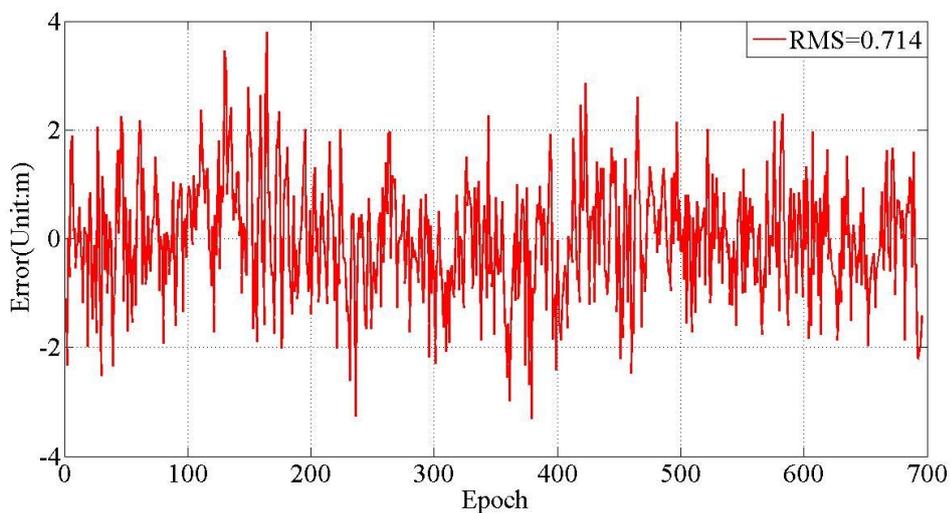


图 4.3 测站 S1 与 S2 上 PRN29 号卫星的伪距残差差异图

通过图 4.2 与图 4.3 的比较可以发现，测站 S1 与 S2 上的残差变化在时空中变现出了很强的相关性，这说明利用基准站误差改正流动站误差的思路是可行的。全部实验结果如下：

其中，在 7 月 14 号这天，测站 S1 上的四种方案的静态解算的测试结果如下：

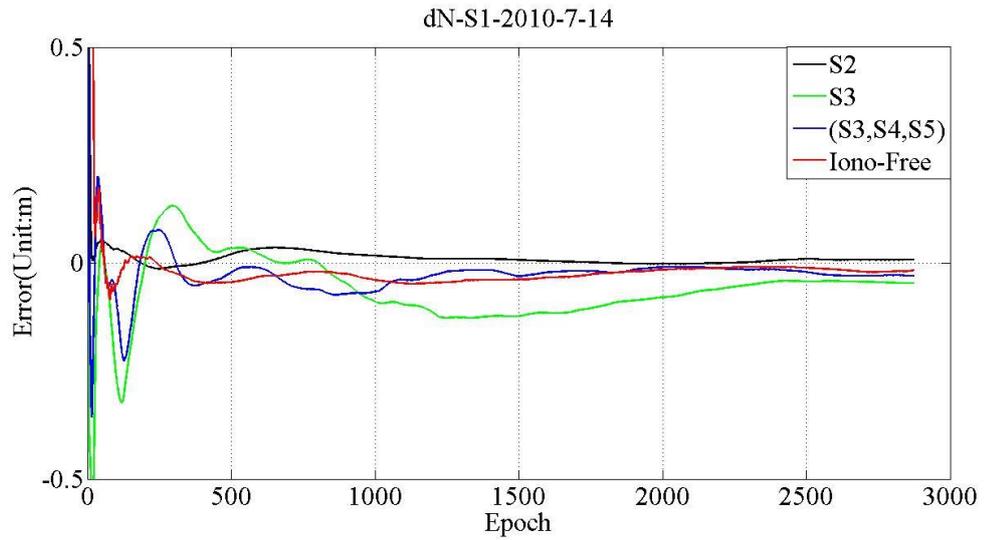


图 4.4 测站 S1 四种方案在 7 月 14 号 N 方向上的误差

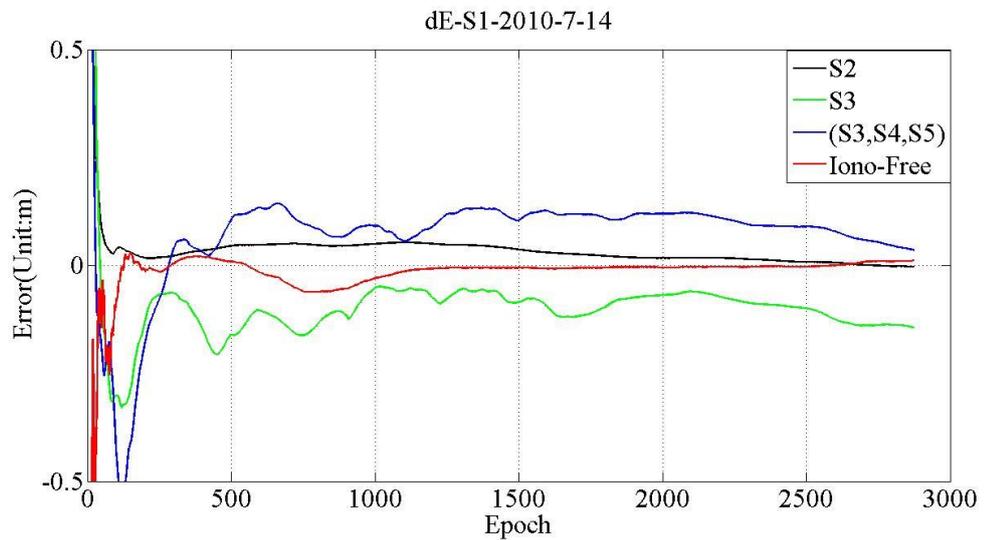


图 4.5 测站 S1 四种方案在 7 月 14 号 E 方向上的误差

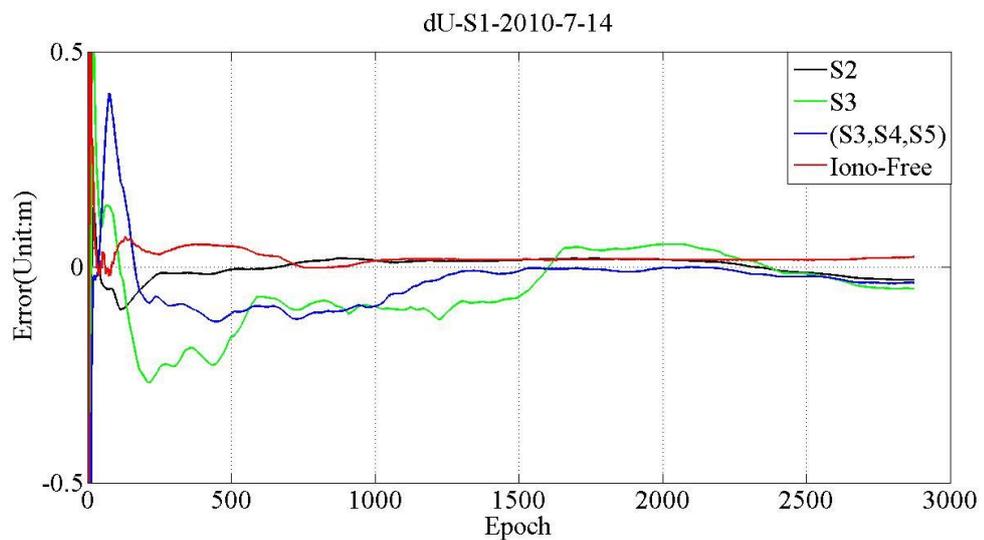


图 4.6 测站 S1 四种方案在 7 月 14 号 U 方向上的误差

下表 (表 4.1) 给出的是测站 S1 在 7 月 14 号至 7 月 20 号为期 7 天静态解算与真值比较的点位误差的统计结果:

表 4.1 测站 S1 上四种方案 7 日内单天解点位误差统计

日期	方案一 (单位:米)	方案二 (单位:米)	方案三 (单位:米)	方案四 (单位:米)
7/14	0.026	0.058	0.043	0.036
7/15	0.035	0.045	0.052	0.024
7/16	0.023	0.053	0.041	0.021
7/17	0.034	0.064	0.053	0.033
7/18	0.019	0.045	0.041	0.017
7/19	0.031	0.078	0.064	0.032
7/20	0.018	0.057	0.046	0.014
平均值	0.0265	0.0571	0.0485	0.0252
RMS	0.0273	0.0581	0.0492	0.0265

点位误差分布图如下:

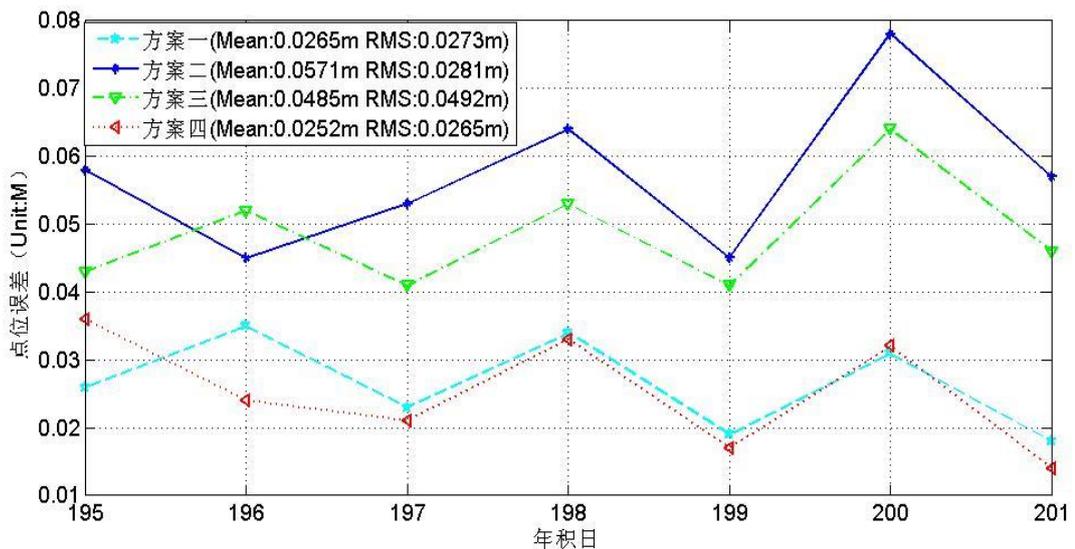


图 4.7 测站 S1 上四种方案 7 日内单天解点位误差统计

分析图 4.2 至图 4.7 以及表 4.1 可以得出以下结论:

(1) 从测站 S1 的四种方案收敛情况来看, 四种方案在经过一段时间后都收敛于 1 分米以下, 达到高精度定位要求。说明基于基准站误差改正的方法是可行的。

(2) 通过表 4.1 查看前三种方案的精度, 在三种方案中方案一的精度是最高的, 与方案四的双频组合 PPP 相当; 同时观察图 4.4 至图 4.6, 可以看出方案一的收敛速度要快于方案四双频 PPP 组合且在解算模糊度过程中波动较小, 这说明在区域共性误差消除后, 单频观测值的噪声显著下降。

(3) 分析表 4.1 数据比较方案一与方案二, 二者都是基于单基准站改正模式, 只是方案一的站间距离小于方案二, 方案一的平均点位误差为 0.0265m 要优于方案二的平均点位误差 0.0571m, 同时从图 4.4 至图 4.6 可以看出方案一的收敛稳定性和收敛速度要优于方案二, 说明站间共性误差的相关性与站间距离有直接关系。

(4) 分析表 4.1 数据比较方案二与方案三, 方案三的点精度 0.0485m 要略高于方案二 0.0571m, 同时从图 4.4 至图 4.6 可以看出方案三的收敛稳定性和收敛速度要优于方案二。由建站方案可知, 方案二的站间距离要略小于方案三的站间距离, 但方案三是按多基准站方式布设的, 区域误差模型的建立由三个基准站提供数据, 这说明这种方法的定位精度还跟其覆盖区域内的建站方案有关。

(5) 分析前三种方案可知, 随着区域误差相关性的降低, 基于基准站改正单频 PPP 方法的定位效率也在下降。在一定应用范围内这种方法将是实现单频高精度定位的一种有效方法。

4.2 基于 SEID 模型的单频 PPP

SEID (Satellite-specific Epoch-differenced Ionospheric Delay Model) 模型全称历元差分电离层模型。它应用的基础也是在类似 CORS 网络存在的基准站群覆盖的区域中。借助真实坐标已知基准站的原始数据对区域内每颗共视卫星在每个历元建立起区域电离层变化模型, 最后通过基准站上双频载波间建立的关系以及预先建立的与电离层变化相关的区域模型在单频用户流动站上重建 L2 载波, 最终在流动站上实现标准双频无电离层组合 PPP 定位。这个方法不再是单纯的以基准站与流动站间共性误差的关系来取得修正效果, 而是从用户站单频数据本身

的缺陷出发，考虑恢复双频观测值。

4.2.1 基于 SEID 模型的单频 PPP 的数学原理

SEID 模型是一种基于历元间差分的模型，主要目的在于提取出历元间电离层延迟的变化量用于建立区域电离层变化模型并最终实现流动站上的单频 PPP 定位（郝明，2007）。这种模型的是建立区域基准站网络的基础上的，并且要求辅助的基准站网络使用的都是 GNSS 双频接收机，确保 L1 载波和 L2 载波的完整性。因此在建有 CORS 网络系统的区域环境中能够得到很好的使用，它的基本思路如下：

首先，在 GNSS 双频基准站上，仔细研究双频观测量的基本观测方程，对于任意历元 j 的双频载波相位观测值 L 以及伪距观测值 P 可以简化表示为：

$$L_i(j) = \rho(j) - D_i(j) + \lambda_i N_i \quad (4.8)$$

$$P_i(j) = \rho(j) - D_i(j) \quad (4.9)$$

其中： $\rho(j)$ 为包含对流层延迟，卫星钟差，接收机钟差，相位中心偏差以及几何延迟在内的卫星到接收机的几何距离；

$D_i(j)$ 为电离层延迟；

λ_i 为载波波长；

N_i 为载波相位整周模糊度；

i 为载波编号。

确立以上的基本观测方程后，接下来的目标是实现提取出一个历元间只与电离层变化相关的量。这需要两步工作：一是消除包含大部分误差在内的卫地距 $D_i(j)$ 的存在；另一个则是主要针对载波，需要在载波相位观测方程中消除整周模糊度 $\lambda_i N_i$ 的影响。可以采用无几何影响组合（L4）来完成第一步工作。相应的观测方程为：

$$L_4(j) = L_1(j) - L_2(j) = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - (D_1(j) - D_2(j)) \quad (4.10)$$

$$P_4(j) = P_1(j) - P_2(j) = D_1(j) - D_2(j) \quad (4.11)$$

对于第二步工作，考虑到载波相位整周模糊度在一个连续的干净的弧段内保持不变，可以采用历元间做差来消除其影响。差分后的载波相位观测方程为：

$$\delta L_4(j, j-1) = \delta D_1(j, j-1) - \delta D_2(j, j-1) \quad (4.12)$$

在这里观测方程的随机噪声和多路径误差没有加以考虑，因为在做了以上处

理后相比较电离层误差它们的影响可以忽略不计。同时由于双频载波的相位中心差异,在组合 L4 之前要将 L1 和 L2 归算到相同相位中心,保证各自方程中的 $\rho(j)$ 相等。另外在差分时还要保证连续弧度中的周跳和粗差被标记出来,模糊度重新初始化处理。

经过以上处理后,在伪距上得到的是一个 P4 组合观测值上的电离层延迟量,而在载波相位上得到的是一个 L4 组合观测值上的电离层延迟在历元间的变化量。通常在考虑电离层延迟时,一般会将电离层抽象简化到单层模型上。本方法同样采用单层模型来研究电离层延迟,同时将提取出的电离层延迟量等效到地面测站与卫星连线方向穿过这层薄壳的地方,也就是穿刺点(IPP)上(魏子卿等,1998)。当地面上布设了一系列类似 CORS 的基准站后,注意到这些基准站到相同的共视卫星的高度角相差不大,它们的穿刺点也比较集中,可以认为在这些比较靠近的穿刺点形成的区域内的电离层延迟的空域变化是一个较平缓的过程,可以用一个与穿刺点位置坐标相关的平面线性函数来描述这种关系(Han S, 1996):

$$\delta L_4(j, j-1) = a_0 + a_1\theta + a_2\varphi \quad (4.13)$$

$$P_4(j) = b_0 + b_1\theta + b_2\varphi \quad (4.14)$$

其中: φ 和 θ 为穿刺点的经纬度坐标;

a_i 和 b_i 为平面线形模型的系数。

原则上,当区域内流动站附近有 3 个包围它的基准站后就可以解算出一组唯一值。当有 3 个以上的站时,也可以采用最小二乘估计方式解算出这些参数。需要注意的是这里的建模工作是在每个历元中分别对每颗所有基准站都能看到的共视星建模的过程,这样能保证每颗共视星在传播方向的小块区域内电子含量变化的现势性,实现实时建模。

在完成以上建模工作后,接下来的目标就是结合利用流动站上的实时单频观测数据来反演双频观测数据。对于 L4 组合伪距观测值而言,由于伪距本身精度不高,不需要进行历元差分的精化过程。对任意历元 j ,在实时估计出流动站上的 $\tilde{P}_4(j)$ 量后,可以从流动站上的 $P_1(j)$ 观测值中反演出 $P_2(j)$ 观测值的估计量 $\tilde{P}_2(j)$:

$$\tilde{P}_2(j) = P_1(j) - \tilde{P}_4(j) \quad (4.15)$$

对于 L4 组合的相位观测值来说,区域内任意流动站上对任意共视星的历元间电离层变化量 $\tilde{L}_4(j, j-1)$ 也可以通过各个相应穿刺点在参考网络中的位置以

及模型参数计算出来。由于这些量表达的都是相邻历元间的变化情况，因此在一段没有周跳和粗差发生的干净弧段内，可选取一个参考历元 j_0 ，那么之后的第 k 个历元相对于参考历元 j_0 累积电离层变化量为：

$$\tilde{L}_4(j_0, k) = \sum_{j_1}^k \delta \tilde{L}_4(j, j-1) \quad (4.16)$$

相应的从流动站上的单频载波观测值 $L_1(k)$ 中反演出的 $L_2(k)$ 的估计量 $\tilde{L}_2(k)$ 为 (Xu G.C, 2003)：

$$\tilde{L}_2(k) = L_1(k) - \tilde{L}_4(j_0, k) \quad (4.17)$$

至此，在地面区域内双频基站的辅助下，可以利用 SEID 模型帮助区域内单频流动站逐历元恢复出双频观测数据。利用现有的成熟的双频软件即可为用户提供高精度的位置服务。

4.2.2 基于 SEID 模型的单频 PPP 的关键技术

在基准站的辅助下，SEID 模型实现单频 PPP 的过程稍显复杂，其具体的技术流程如下：

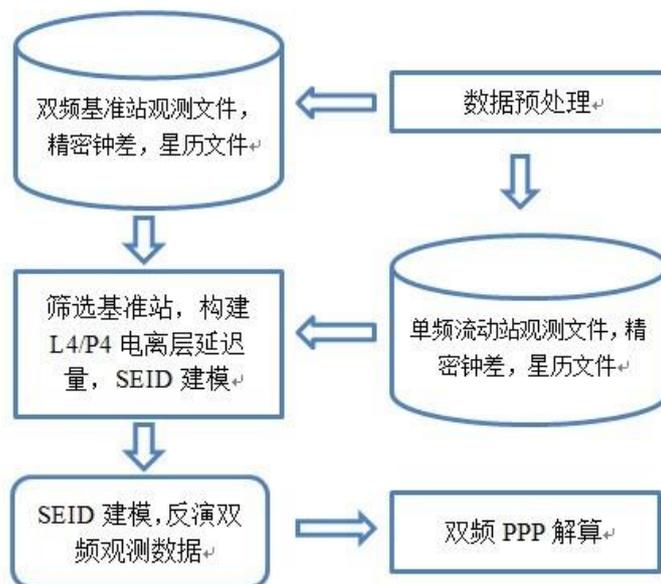


图 4.8 基于 SEID 模型单频 PPP 方法技术流程

同时在实现的过程中，还要注意以下几点：

1) 对于基准站的选择。在区域内基准站较多的情况下，筛选的原则是基准站的数量要保证在三个及以上，保证电离层模型的系数的求解。同时基准站组成

区域要能够覆盖用户站，确保区域内电离层变化的相关程度高。可以在事先通过单点定位的方法获取流动站的概略坐标来确定流动站的位置。

2) 区域电离层变化模型是建立在单层模型上的，针对不同历元不同共视星都要建立对应的实时电离层变化模型，确保模型的现实性和高效性。同时获取流动站上空同一历元同一共视星上穿刺点处的实时电离层变化量要考虑稳健的数学方法，本文采用的是与穿刺点地理经纬度坐标相关的简单高效的双线性内插法。在选取的基准站足够多的情况下，也可以采用二次多项式等更为复杂的内插方法。

3) 在载波上建立电离层频间变化量时，要注意探测各个观测量的周跳的发生，确保完整弧段的干净从而将整周模糊度的影响剔除出去。

4) 由于同一颗卫星不同载波的相位中心并不一致，在数据处理时要提前将相位中心误差消除。

4.2.3 基于 SEID 模型的单频 PPP 的数据实验

1) 实验数据准备

本文的实验数据采用的是上海市 CORS 监测网络一共 7 个双频监测站的 GPS 观测数据，数据采样间隔为 30s，选取了 2010 年 7 月 14 号至 20 号总共一周的数据，数据采集条件良好，站点分布情况如图 4.9:

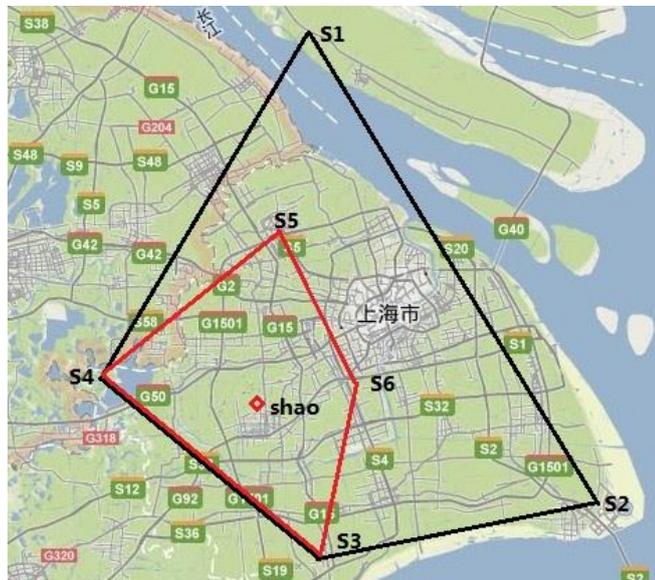


图 4.9 基于 SEID 模型单频 PPP 方法测试方案布设

图中编号为 S 开头的是双频基准站，同时将 IGS 网络中的 SHAO 站作为流动站，同时用 Bernese 软件联合 BJFS, WUHN, SHAO 等 IGS 基准站解算出 CORS

网内各基站的 WGS84 坐标系下的位置坐标作为真值坐标参与实验分析。考虑到区域内电离层变化迅速，因此布设基准站的方案，特别是双频基准站间的距离大小将直接影响区域内电离层变化模型的精度。针对这一性质准备了两套实验数据，如图 4.6：假设 SHAO 站为用户流动站，第一套数据采用了包围 SHAO 站的 4 个站点（S3, S4, S5, S6）作为基准站，平均边长为 37km。第二套数据采用了的 4 个站点（S1, S2, S3, S4）作为基准站，平均边长为 74km。

2) 实验设计与分析

本次实验为了研究基于 SEID 模型单频 PPP 法的具体表现，设计三组对比试验方案，测试模式为静态定位模式。方案一与方案二的测试程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的基于 SEID 模型单频 PPP 法部分，方案三的测试程序来自于自行编制的双频 PPP 静态定位程序。软件在编制设计中采用的数据预处理方法，误差改正模型以及参数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。PPP 解算中的精密钟差和轨道文件来源于 IGS 发布的数据产品。

方案一：在 SHAO 站上采用以站点（S3, S4, S5, S6）作为基准站的小网上利用 SEID 模型反演得到的双频观测数据进行双频无电离层组合 PPP 解算；

方案二：在 SHAO 站上采用以站点（S1, S2, S3, S4）作为基准站的大网上利用 SEID 模型反演得到的双频观测数据进行双频无电离层组合 PPP 解算；

方案三：在 SHAO 站上直接采用观测到的原始双频观测数据，进行双频无电离层组合 PPP 解算；

实验结果如下：

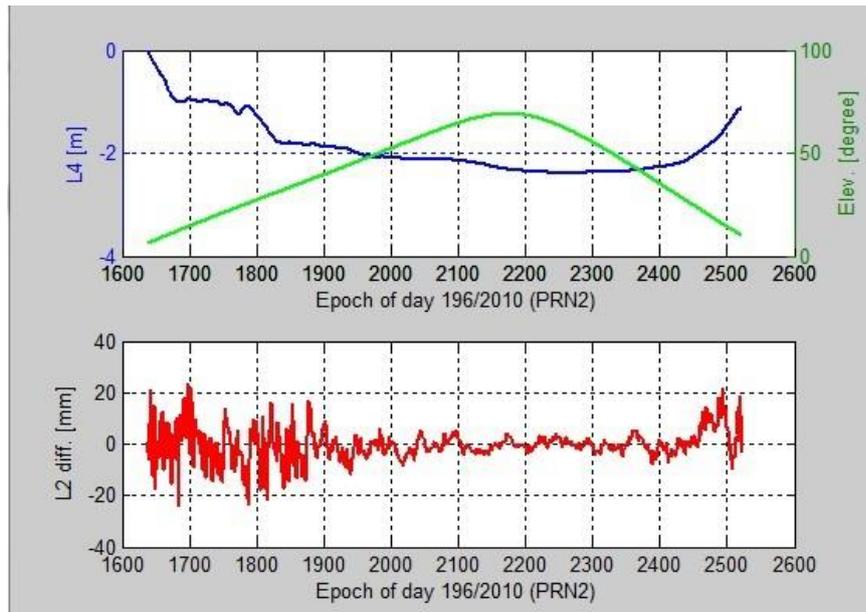


图 4.10 上图：频间电离层变化量与卫星高度角的关系 下图：重建 L2 观测量与原始 L2 观测量间差异

图 4.10 反映的是本文实例中采用方案一的方法反演的 7 月 15 号 PRN 编号为 2 的 GPS 卫星从出现到消失一个弧段内的 L2 载波与观测站上真实 L2 载波的比较。从图 4.10 中可以看到，通过 SEID 模型反演后 L2 观测值十分接近于原始的 L2 观测值，由于电离层的变化中的一部分是与高度角相关的，所以在高度角低的地方两者之间的差异值会增大，高度角越高，吻合程度越好，这说明 SEID 模型对区域电离层变化的模拟有效。

其中，流动站 SHAO 站在 7 月 14 号中三种实验方案的单天解静态定位结果与真实坐标比较在站心坐标系 (N, E, U) 三个方向上的残差如下：

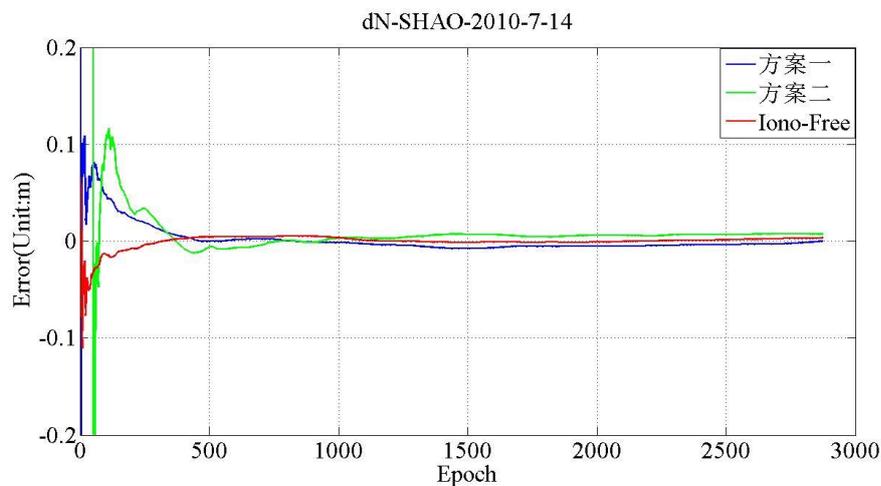


图 4.11 测站 SHAO 三种方案在 7 月 14 号 N 方向上的误差

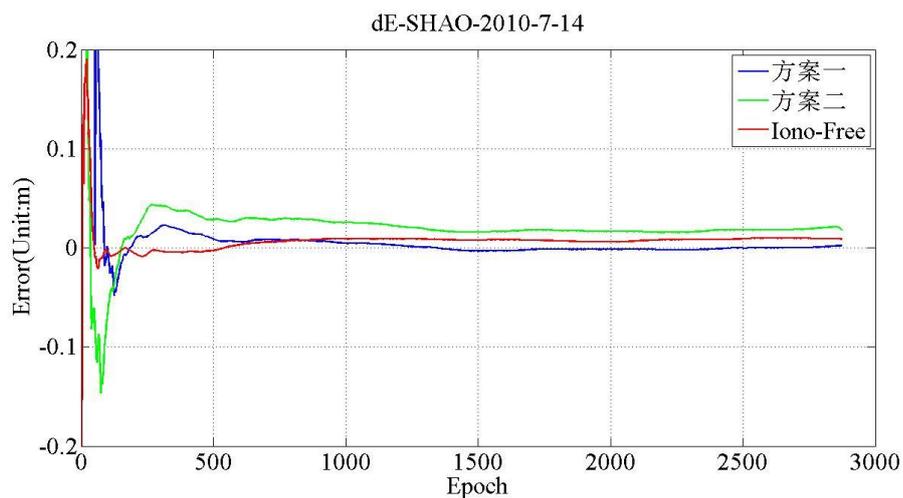


图 4.12 测站 SHAO 三种方案在 7 月 14 号 E 方向上的误差

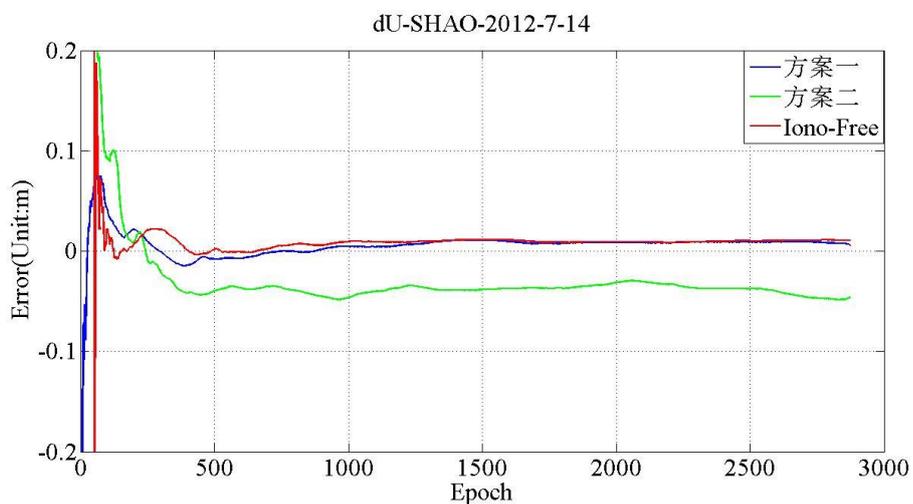


图 4.13 测站 SHAO 三种方案在 7 月 14 号 U 方向上的误差

SAHO 上三种方案在 7 日内的单天解与真实坐标比较的点位误差统计结果如下表（表 4.2）：

表 4.2 测站 SHAO 上三种方案 7 日内单天解点位误差统计

日期	方案一 (单位:米)	方案二 (单位:米)	方案三 (单位:米)
7/14	0.0275	0.0574	0.0243
7/15	0.0322	0.0486	0.0297
7/16	0.0247	0.0479	0.0282
7/17	0.0184	0.0362	0.0118
7/18	0.0203	0.0582	0.0274
7/19	0.0255	0.0453	0.0214
7/20	0.0216	0.0694	0.0175
平均值	0.0243	0.0518	0.0229
RMS	0.0247	0.0528	0.0237

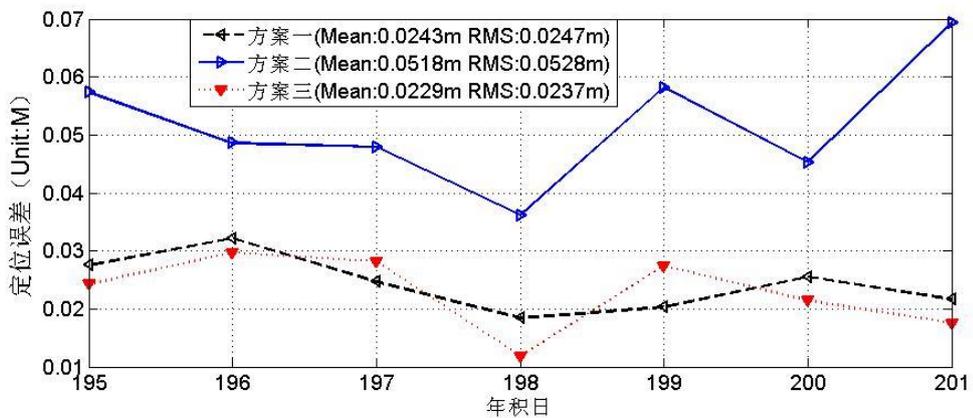


图 4.14 测站 SHAO 上三种方案 7 日内单天解点位误差统计

分析图 4.10 至图 4.14 以及表 4.2 可以得出以下结论:

(1) 从测站 S1 的三种方案收敛情况来看, 三种方案在经过一段时间后都收敛于 1 分米以下, 达到高精度定位要求。说明基于 SEID 模型的单频 PPP 方法是可行的。

(2) 通过表 4.2 数据查看前两种方案的精度, 在这两种方案中方案一的精度优于方案二, 与方案三的双频组合 PPP 在量级上相当, 数值上相差不大; 同

时观察图 4.11 至图 4.13, 可以看出方案一的收敛速度和收敛时间都与方案三相当, 这说明流动站上重建 L2 观测值在一定程度上与原始双频数据相当。

(3) 分析表 4.2 数据比较方案一与方案二, 二者都是基于解算模式相同, 只是方案一的在布站时站间距离小于方案二。方案一的平均点位误差为 0.0243m 要优于方案二的平均点位误差 0.0518m, 同时从图 4.11 至图 4.13 可以看出方案一的收敛稳定性和收敛速度要优于方案二, 说明 SEID 模型的精度与站间距离有直接关系。

(4) 分析这几种方案可知, 在区域内建立 SEID 模型可以实现单频信号精密定位。但随着站间距离的增加, 基于 SEID 单频 PPP 方法的定位效率也在下降。在实际应用中这种模型对建立电离层变化模型值得参考。

4.3 基于 URTK 模型单频 PPP

URTK 技术是指非差 RTK 技术, 这是一种刚刚兴起的网络 RTK 技术。基于 URTK 模型的单频 PPP 方法是一种建立在 URTK 技术基础上的单频 PPP 技术。技术模型更为复杂但同时更加具有实用性, 因为这种技术不再是单纯考虑区域电离层模型的构建来提升单频 PPP 的技术, 开始将目标放在更加精确的误差模型的处理, 如硬件延迟误差, 实现单频载波观测值整周模糊度的快速固定, 来达到进一步提升单频用户获取精密定位的能力。

4.3.1 基于 URTK 模型单频 PPP 方法的数学原理

传统 PPP 技术一般是基于相关参数域信息的精密定位方式。利用大范围覆盖的少量测站即可确定的 GNSS 卫星的各类参数域误差改正信息, 如轨道误差、卫星钟差等, 并不需要密度很高的参考网, 经过半个小时以上的收敛后即可达到厘米级的定位精度。但是由于观测值中卫星和接收机硬件延迟的存在, 模糊度不在保持整周特性, 因此收敛时间略长。但也可以对卫星和接收机的硬件延迟加以修正, 从而达到进一步提升非差或星间单差观测值模糊度的收敛时间实现快速精密定位 (Laurichesse, et al, 2007; Ge et al, 2008; Collins, 2008)。有专家学者在跟踪分析 IGS 全球观测站数据时发现, 解算中双差模糊度有 97%左右的固定成功率, 考虑到双差模糊度是由两个站上的星间单差模糊度组成的, 那么可以得出的结论是, 对于不同的测站, 其星间单差模糊度具有相似的小数部分, 即星间

单差硬件延迟（邹璇，2010）。因此，可以考虑估计出这些星间单差的小数部分并将其通过修正卫星钟差的方式播发给用户可实现用户端的单差模糊度有效固定。但这种方法由于需要向用户独立发送数据，其适用范围有限。以上两类 PPP 技术都是基于参数域的改正信息来实现精密定位服务，其不足之处在于一是需要长时间的观测数据实现对伪距观测值的平滑来固定相位的整周模糊度，二是难以对电离层、对流层延迟误差等进行精确的建模，因此 GNSS 单频用户无法采用类似的改正来实现精密定位（邹璇，2010；Ge et al, 2008;）。

与 PPP 技术不同，网络 RTK 方法不再是在参数域内对各类误差进行描述，而是根据参考站与用户站之间的误差的相关性，在观测值域内用参考站数据对误差进行代替以保持用户模糊度的整数特性实现网内不同类型观测值快速精密定位。RTK 技术直接描述的是参考站覆盖区域内的误差分布情况，对于网外的情况则无法正确表达。因此网络 RTK 技术一般仅适用于区域网建模，并且需要很高的数据更新率。目前常规的网络 RTK 技术一般都是基于 CORS 网提出，处理流程是首先利用双差观测值残差构建区域误差模型，然后修正到用户端。最后用户端采用相对定位的模式实现精密定位。这些方法的数学本质都是一致的，双差观测值残差反映的是观测信号在不同卫星传播方向上所受误差的差异，在建模时难以估计信号本身的物理特性，并且用户需按照指定参考卫星获取改正信息，过程较为繁琐。同时还需要用户站与邻近或虚拟参考站进行联测，在跨网运动状态下需要重新初始化模糊度，使用限制程度高（邹璇，2010；姜卫平等，2012）。

URTK 方法可以很好解决传统网络 RTK 技术的缺陷，它也是一种基于观测值域内修正误差的方法。其做法是利用参考站处的非差观测值残差对每颗卫星方向分别建模，在 PPP 解算模式下通过固定星间单差模糊度实现快速精密定位，不再依赖于主参考站的选择限制，同时适用于单频用户站的精密定位。其具体数学方法如下：

通过载波相位的观测方程可以得出非差观测值的残差表达式如下（Xuan Zou 等 2012；姜卫平，2012）：

$$omc_k^i = \lambda L_k^i + \lambda N_k^i - \rho_k^i + h_k - h^i - ct_k + ct^i + M_k^i \quad (4.18)$$

其中：L 为伪距观测值；h 为硬件延迟；c 为真空中光速；t 为钟差；N 为整周模糊度； λ 为载波波长； ρ 为站星间几何距离；M 为为包含相对论延迟、天线

相位中心偏差、对流层延迟等可模型化改正的误差。非差 omc 中主要包含的是诸如电离层延迟、对流层延迟残余部分等不可模型化改正的误差。

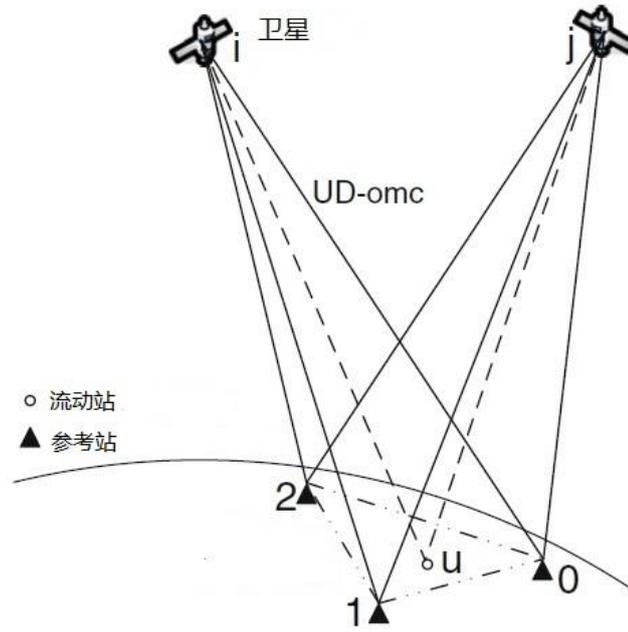


图 4.15 URtk 方法示意图

假设流动站 U 周围均与分布着三个参考站 (0, 1, 2), 如上图 (图 4.10) 所示, 针对相同的共视卫星 i , 流动站上的非差观测值残差 omc_u^i 可以用三个参考站上的非差观测值残差间的组合关系来表达 (Xuan Zou 等 2012; 姜卫平, 2012):

$$omc_u^i = d(omc_1^i - omc_0^i) + e(omc_2^i - omc_0^i) + omc_0^i \quad (4.19)$$

其中: d 和 e 是内插系数, 它们与测站的平面位置关系有关, 假设三个基准站 (0, 1, 2) 的平面坐标为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ; 流动站的坐标是 (x, y) , 那么有 (Xuan Zou 等 2012; 姜卫平, 2012):

$$d = \frac{x_2 * y - x * y_2}{x_2 * y_1 - x_1 * y_2} \quad (4.20)$$

$$e = \frac{x * y_1 - x_1 * y}{x_2 * y_1 - x_1 * y_2} \quad (4.21)$$

参考公式 (4.18) 和 (4.19), 可以得到:

$$\begin{aligned} omc_u^i &= \lambda L_u^i + \lambda N_u^i - \rho_u^i + h_u - h^i - ct_u + ct^i + M_u^i \\ &= d(\lambda L_{10}^i + \lambda N_{10}^i - \rho_{10}^i + h_{10} - ct_{10} + M_{10}^i) \\ &\quad + e(\lambda L_{20}^i + \lambda N_{20}^i - \rho_{20}^i + h_{20} - ct_{20} + M_{20}^i) \end{aligned}$$

$$+ \lambda L_0^i + \lambda N_0^i - \rho_0^i + h_0 - h^i - ct_0 + ct^i + M_0^i \quad (4.22)$$

进一步合并，可以得到：

$$\begin{aligned} \lambda N_u^i = & d(\lambda L_{10}^i + \lambda N_{10}^i - \rho_{10}^i + h_{10} - ct_{10} + M_{10}^i) \\ & + e(\lambda L_{20}^i + \lambda N_{20}^i - \rho_{20}^i + h_{20} - ct_{20} + M_{20}^i) \\ & - \lambda L_{u0}^i + \rho_{u0}^i - h_{u0} + ct_{u0} - M_{u0}^i + \lambda N_0^i \end{aligned} \quad (4.23)$$

同样的对卫星 j 进行非常观测值残差的建模同样可以得到类似结果：

$$\begin{aligned} \lambda N_u^j = & d(\lambda L_{10}^j + \lambda N_{10}^j - \rho_{10}^j + h_{10} - ct_{10} + M_{10}^j) \\ & + e(\lambda L_{20}^j + \lambda N_{20}^j - \rho_{20}^j + h_{20} - ct_{20} + M_{20}^j) \\ & - \lambda L_{u0}^j + \rho_{u0}^j - h_{u0} + ct_{u0} - M_{u0}^j + \lambda N_0^j \end{aligned} \quad (4.24)$$

将上两公式(4.23), (4.24)相减在流动站上做星间单差有(Xuan Zou 等 2012; 姜卫平, 2012):

$$\begin{aligned} \lambda N_u^{ij} = & d(\lambda L_{10}^{ij} + \lambda N_{10}^{ij} - \rho_{10}^{ij} + M_{10}^{ij}) + e(\lambda L_{20}^{ij} + \lambda N_{20}^{ij} - \rho_{20}^{ij} + M_{20}^{ij}) - \\ & \lambda L_{u0}^{ij} + \lambda N_0^{ij} + \rho_{u0}^{ij} - M_{u0}^{ij} \end{aligned} \quad (4.25)$$

以上公式中的整周模糊度都保持了整周特性，如果假设参考站上卫星 i 方向上的非差模糊度解算不正确并带有偏差，即： $N_0^i + \Delta N_0^i$, $N_1^i + \Delta N_1^i$, $N_2^i + \Delta N_2^i$ ，那么流动站上的星间单差也将带有偏差 (Xuan Zou 等 2012; 姜卫平, 2012):

$$\begin{aligned} \lambda \tilde{N}_u^{ij} = & d(\lambda L_{10}^{ij} + \lambda N_{10}^{ij} - \rho_{10}^{ij} + M_{10}^{ij} + \lambda \Delta N_{10}^{ij}) + e(\lambda L_{20}^{ij} + \lambda N_{20}^{ij} - \rho_{20}^{ij} + \\ & M_{20}^{ij} + \lambda \Delta N_{20}^{ij}) - \lambda L_{u0}^{ij} + \lambda N_0^{ij} + \rho_{u0}^{ij} - M_{u0}^{ij} + \lambda \Delta N_0^{ij} \end{aligned} \quad (4.26)$$

联立公式 (4.25), (4.26) 有：

$$\tilde{N}_u^{ij} = N_u^{ij} + d \Delta N_{10}^{ij} + e \Delta N_{20}^{ij} + \Delta N_0^{ij} \quad (4.27)$$

由于双差模糊度的解算成功率高能够快速被固定住，所以 ΔN_{10}^{ij} , ΔN_{20}^{ij} 可以认为是零，那么有：

$$\tilde{N}_u^{ij} = N_u^{ij} + \Delta N_0^{ij} \quad (4.28)$$

从式 (4.28) 可以看出，星间单差模糊度能否保持整数特性要看偏差 ΔN_0^{ij} 是

否为整数。只要保持参考站上的非差观测值的整周模糊度 N_0^i ， N_0^j 为整数，就可以固定流动站上的星间单差模糊度。

按照上面的思路，通过适当添加具有整数特性的非差模糊度作为基准，可以将双差观测值残差映射为各参考站与共视星间的非差观测值残差并保持流动站上星间单差模糊度的整数特性，映射过程如下(Xuan Zou 等 2012; 姜卫平, 2012):

$$N_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} G \\ (n-m) \times n \\ D \\ (m \times n) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b \\ (n-m) \times 1 \\ B \\ (m \times 1) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

其中： N 为映射后的非差模糊度， B 为事先基线解算出来的双差模糊度， b 为假设为任意整数的基底， G 和 D 为对应的映射矩阵。

通过以上处理求出参考站上的非常模糊度 N 以后，可以利用公式 (4.19) 计算非差观测值的残差 omc ，然后通过公式 (4.19) 内插出流动站上的非差观测值上的残差 omc_u 来修正单频载波相位观测值 $L1$ ，最后通过在流动站上对 $L1$ 观测值做星间单差的 PPP 解算，同时可调用 lambda 法在解算过程中固定星间单差模糊度，最终实现快速精密单频 PPP 定位。

4.3.2 基于 URTK 模型单频 PPP 方法的关键技术

基于 URTK 模型的单频 PPP 技术是利用周边参考站上的非差观测值的残差来对每个可视卫星方向的一小块区域分别进行模型构建。由于参考站上每颗可视卫星传播路径上的各类误差都被包含在对应的非差观测值残差中，且模型在构建时保留了模糊度的整数特性，所以单频用户在采用其改正后能够做到固定星间单差模糊度达到了快速精密定位的效果。这一建模思想能够有效模型化局部范围内的电离层和对流层扰动。实现基于 URTK 模型的单频 PPP 技术的流程如下：

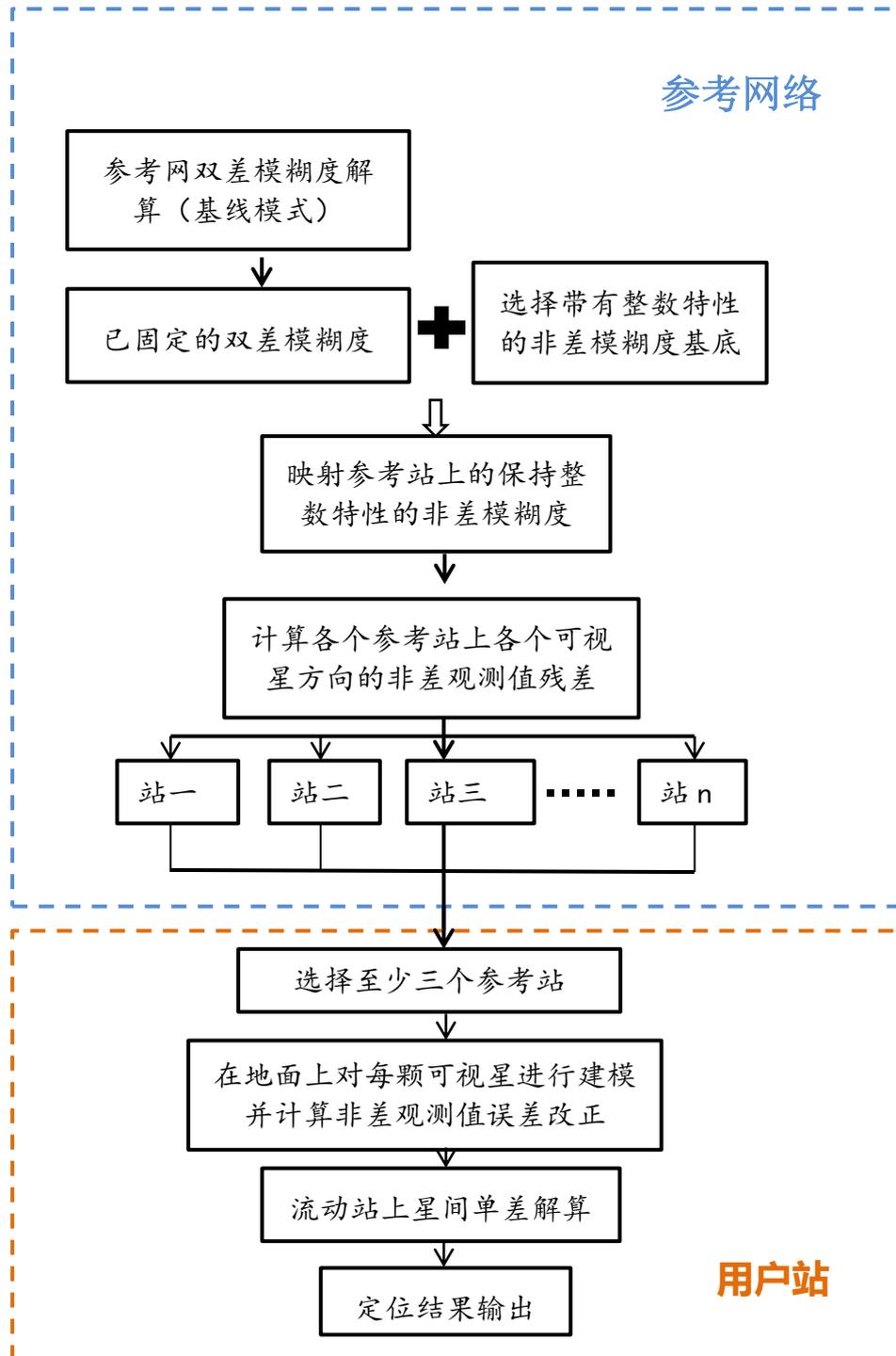


图 4.16 基于 URTK 方法计算流程

同时，在实现基于 URTK 模型的单频 PPP 过程中还需要注意到以下几点：

1) 此种技术理论上也是基于参考站辅助定位的，因此首先要考虑到参考站的选择。这种方法提出的思路是首先按照 Delauly 三角网唯一划分的原则将区域参考网均匀的划分成一个个三角形区域，流动站根据其自身的概率坐标值大小确

定落在哪个三角形区域并选择三角形三个点上的参考站作为辅助参考站，数据中心将会将这三个站上的相关信息发送给用户。流动站上的非差参考站残差根据其位置坐标与参考站位置之间的关系来确定。

2) 由于此种单频 PPP 技术是建立在非差 RTK 技术的基础之上的，因此，在利用区域参考网时，首先要对其进行双差解算，固定参考网双差模糊度。双差解算的方法有很多，本文采用的是基线解算模式，利用 lambda 法固定双差模糊度。

3) 在解算出全部基线双差模糊度以后，根据选定的三个基准参考站，要将参考站上双差观测值残差映射到非差观测值残差上。首先要选择若干数量的具有整周特性的非差模糊度，选取的原则是保证所选参考站的非差模糊度的星间单差具有整数特性；然后指定非差模糊度基底的大小，可为任意整数，不影响残差的映射。

4) 在内插出流动站上的非差单频观测值 L1 的残差 omc 以后，将其改正到流动站 L1 载波观测值上，利用 PPP 模式进行精密定位。由于需要尝试固定单频模糊度，在流动站上经过残差修正的单频数据需要进一步通过星间单差来消除接收机硬件延迟。在解算过程中利用 lambda 法尝试固定星间单差模糊度，一旦模糊度固定住，可采用动态定位方式逐历元求解流动站位置。

5) 本文的模糊度固定方法均采用成熟的 lambda 软件，在程序编制中加入 lambda 组件时，需要主要参数输入输出的接口，数据的流动要保持一致性。

4.3.3 基于 URTK 模型单频 PPP 方法的实验分析

为了测试 URTK 方法的可行性和定位效率，我们设计了以下实验：

1) 实验数据准备

本文的实验数据采用的是上海市 CORS 监测网络一共 4 个双频监测站(S1, S2, S3, S4) 的 GPS 数据采样间隔为 1s 的高频数据，选取了 2010 年 7 月 14 日至 7 月 20 号总共一周的数据，数据采集条件良好。数据真实坐标采用由 Bernese 软件联合 WUHN, BJFS 以及 SHAO 的 IGS 跟踪站点与四个站数据解算出来的坐标。站点分布情况如图 4.17：



图 4.17 测试方案布设

2) 实验设计与分析

基于 URTK 的单频 PPP 方法采用的是一种快速定位模式，一旦星间单差模糊度固定下来即可采用动态定位方式逐历元解算流动站位置坐标。

本次实验为了研究基于 URTK 模型单频 PPP 法的具体表现，设计两组对比试验方案，测试模式为静态定位模式。方案一与方案二的测试程序来自于自行编制的单频 PPP 定位软件包中的基于 URTK 模型单频 PPP 法部分，方案三的测试程序来自于自行编制的双频 PPP 静态定位程序。软件在编制设计中采用的数据预处理方法，误差改正模型以及参数估计方法等部分均来自于第二章提到的方法和模型。PPP 解算中的精密钟差和轨道文件来源于 IGS 发布的数据产品。

方案一： 选用上海市 CORS 网络服务系统中的 S4 站模拟流动站，选用 S1，S2，S3 三个参考站作为本次实验的基准参考站参与实验解算；

方案二： 直接在 S4 上进行双频 PPP 解算。

实验过程中为了证明流动站的星间单差在 URTK 基础上改正非差残差后能够实现模糊度的固定，首先拿出 7 月 14 号 S4 站的第一个小时的高频数据，固定其站坐标。同时计算出经过各类误差模型改正以后的非差观测值残差，然后考虑是否在该残差上加入由基准站计算出的非差残差修正值 O_{mc} ，最后做星间单差，其中流动站上卫星（PRN12，PRN22，PRN27）的星间单差后的残差如下：

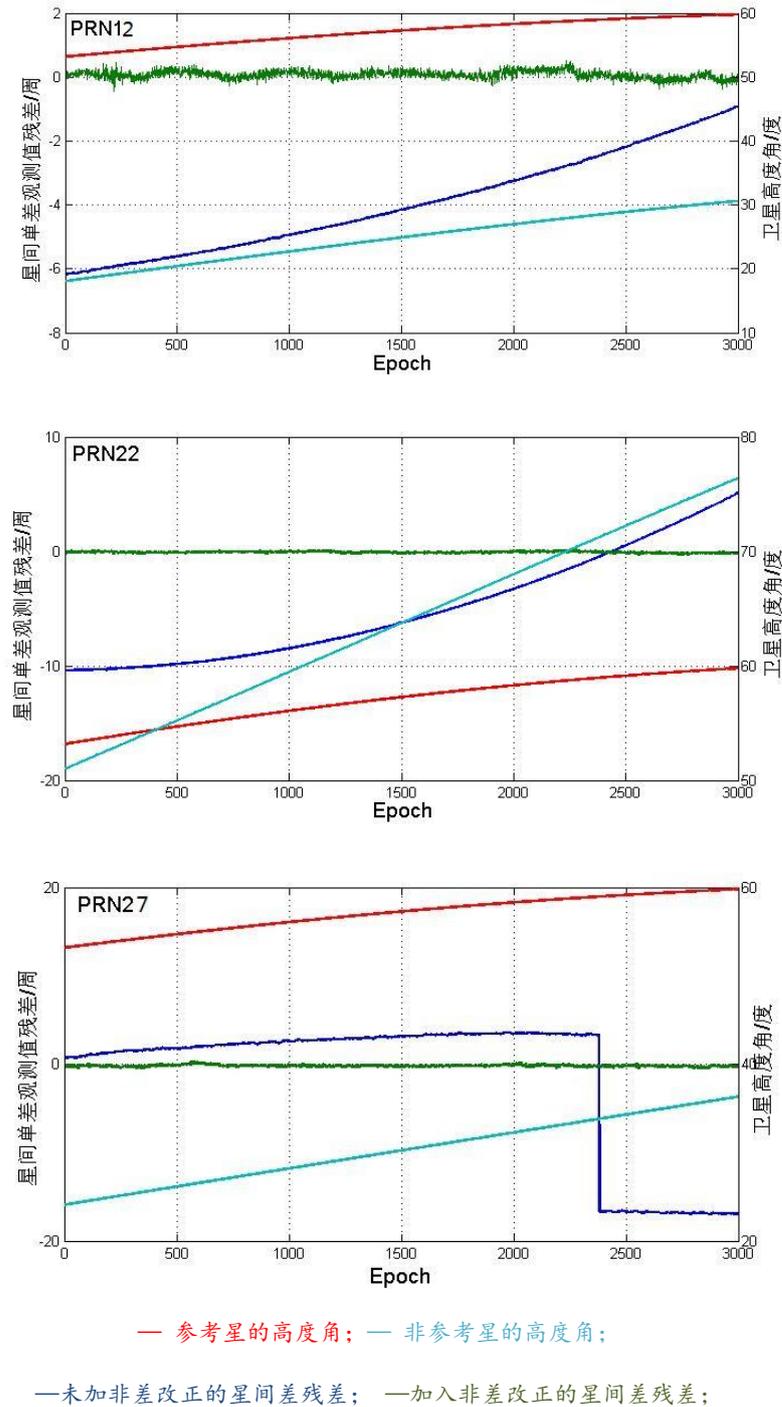


图 4.18 卫星 PRN12、PRN22、PRN27 星间单差残差在加入非差改正前后表现

分析上图的中数据可以发现，未加非差改正时星间单差的残差呈现一种缓慢变化的态势，其幅度有大有小。这其中包含了电离层延迟和对流层残余延迟等误差量的星间差异值，在加入了非差改正后，变化的幅度迅速减小到半周以内，这为星间单差模糊度固定提供了很好条件。

同时，测试了该时段内不加非差改正的双频 LC 组合 SPP 单点定位与加非差

改正的 P1 单频 SPP 定位的结果如下：

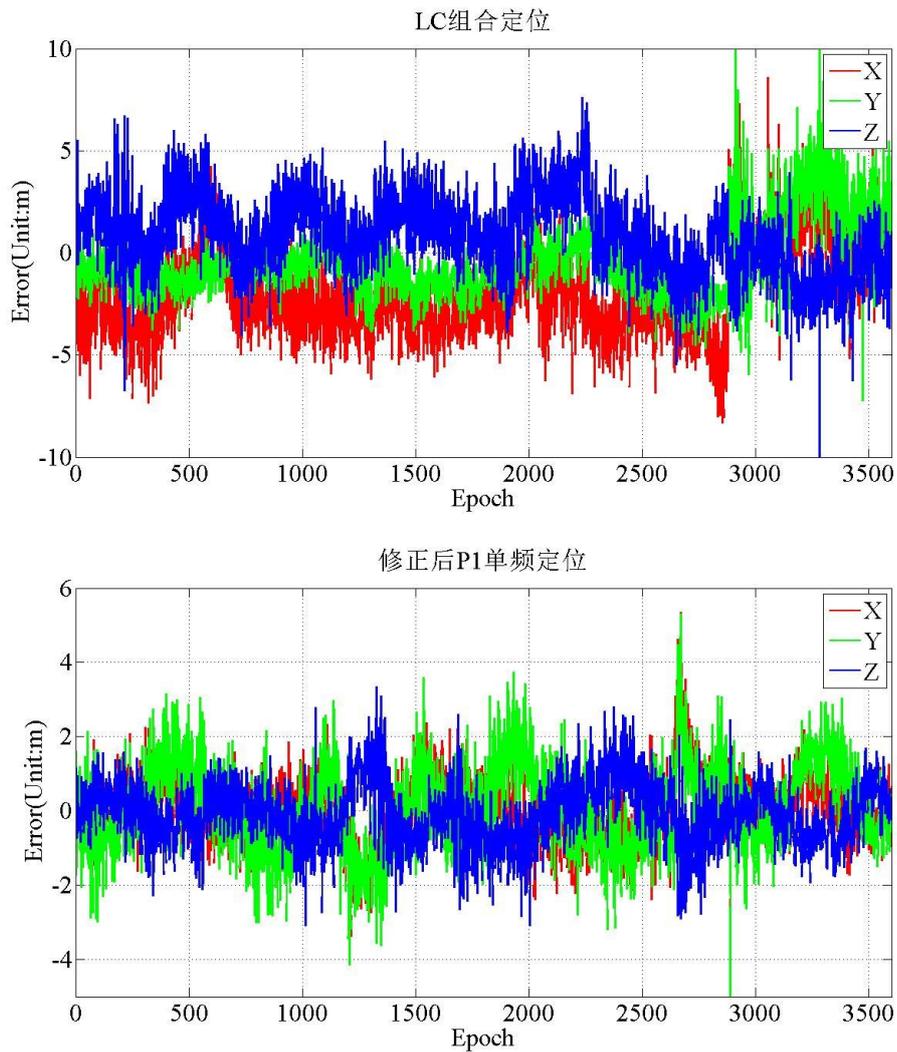


图 4.19 测站 S4 上 LC 组合与修正后 P1 信号在 SPP 模式下定位表现

从上图 4.19 可以看出，加入非差改正以后的 P1 单频 SPP 单点定位的精度比不加改正 LC 组合 SPP 单点定位在三个方向上都提升了一半左右，这在导航领域可以获得更广泛的应用。

整理所有的实验结果，其中 7 月 14 号 S4 站的第一个小时的定位结果如下：

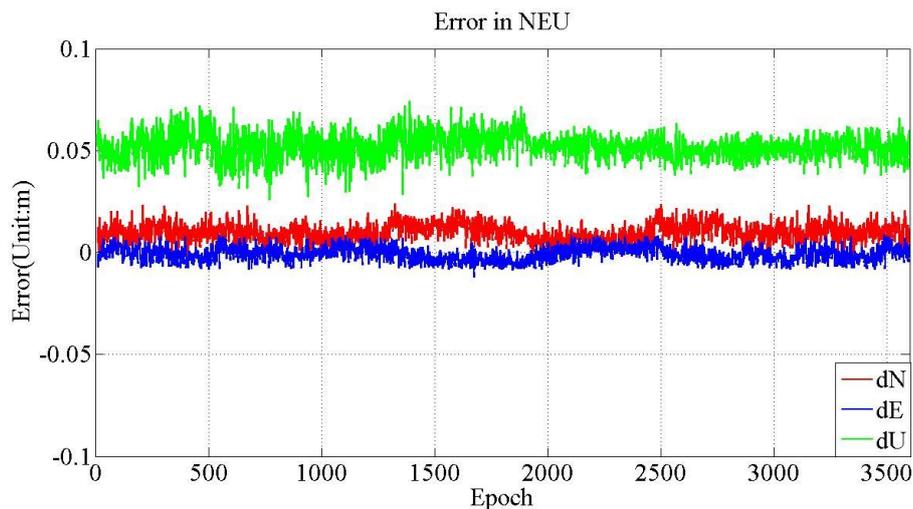


图 4.20 基于 URTK 模型单频 PPP 定位表现

同时给出了 7 日内以一个小时为解算弧段的点位误差日均值分布以及与该站双频 PPP 解算的单天解的点位误差比较:

表 4.3 测站 S4 上两种方案 7 日内单天解点位误差统计

方案	7/14	7/15	7/16	7/17	7/18	7/19	7/20	Mean	RMS
一	5.06	4.38	5.23	3.80	5.17	6.14	5.56	5.05	5.10
二	2.43	2.97	2.82	1.18	2.74	2.14	1.75	2.29	2.37

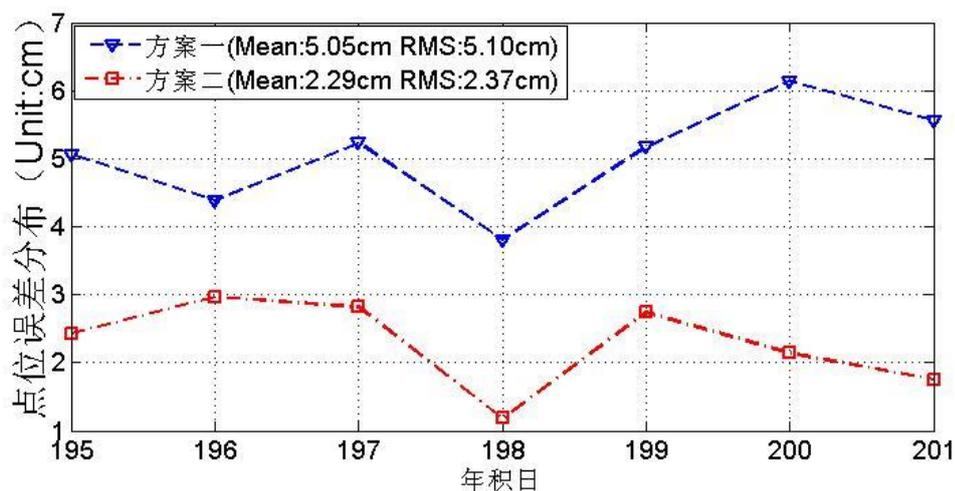


图 4.21 测站 S4 上两种方案 7 日内单天解点位误差统计

分析上面的的实验数据, 可以得出以下结论:

(1) 观察图 4.18, 可以看到在加入非差改正后, 流动站星间单差的残差下降到半周以内, 为模糊度的固定创造了条件。

(2) 观察图 4.19 中测站 S4 的定位情况可以看出, 测站在经过几个历元的数据简单积累后使用 Lambda 法便可迅速固定住模糊度, 进入动态精密定位解算状态, 速度远快于传统双频 PPP 技术。这说明非差改正在削弱流动站观测残差上起到了决定性作用

(3) 观察图 4.20 还可以看出, 在模糊度固定进入动态逐历元解算后, 点位误差在三个方向上的变化非常有规律, 基本上维持在一定范围之内。其中在 N、E 方向上定位精度相当, 噪声水平也相当, 而 U 方向精度稍差, 可能存在系统误差且噪声水平也略大。

(4) 观察表 4.3 中长期统计数据可以看出, 基于 URTK 模型的单频 PPP 方法在精度上要低于双频组合 PPP 技术。但二者在长期重复观测中变化趋势相似, 这说明该方法相较双频组合可能存在某种系统性偏差。

(5) 经过以上讨论, 可以得出基于 URTK 模型的单频 PPP 方法完全能够实现单频精密单位, 甚至在效率上领先于以上所有方法, 能够快速实现模糊度的固定为单频用户提供高精度定位。

4.4 本章小结

本章围绕参考站辅助单频 PPP 定位的思路, 介绍了几种单频 PPP 定位新技术。重点研究了在区域参考站网络的辅助下, 区域误差改正模型建立的方式和方法。不同的参考站辅助单频 PPP 技术采用的区域误差改正模型不尽相似, 但都有别于单站式单频 PPP 模式只在参数域内考量误差信息的方式, 转移到观测值域内建立更加精准的区域误差改正模型。降低了用户站高精度定位要求, 提升参考网络区域内单频观测量定位效率。

本章主要介绍了三种基于参考站辅助的单频 PPP 技术方法及其实验分析内容, 主要有基于单/多基准站辅助的单频技术、基于 SEID 模型的单频 PPP 技术以及基于 URTK 模型的单频 PPP 方法。这几种方法都是在观测值域内对各类误差信息进行考量并建立合理完善的区域误差修正方案, 这些区域误差模型的建立都是依赖数据本身的精确程度而非是对各类误差本身特性的深层探讨, 因此它们要求需要很好的数据实时更新率来维持模型精度, 同时只能保证在参考网络覆盖的区域内提供高精度的位置服务保障, 在区域外则无法保证效果。

第5章 总结和展望

5.1 论文研究工作总结

本文从研究单频精密定位的思路出发,研究了各类不同实现的方法的基本原理,数学模型和解决方案,分析了各类方法的技术流程和难点,并且给出了详实的数据论证过程分析其中的优劣之处,为进一步的研究工作提供了一些新的思路和想法。总结起来,本文主要的研究成果如下:

1) 对照双频组合 PPP 技术的实施方案,详细介绍了单频 PPP 技术的一般原理和方法,包括观测模型的建立、观测方程和待估参数随机模型的建立、定权方法以及单频 PPP 软件设计流程。重点介绍了 GNSS 单频信号中各类误差源的特性及其修正方案,同时介绍了实现单频 PPP 技术的技术难点及相应的应对措施。

2) 从实现单频 PPP 的角度,论证了以电离层延迟为代表的误差源在单频卫星信号中所扮演的重要角色及其对实现精密定位的重要影响,特别是在单站式单频 PPP 中不可忽略的地位。详细介绍了在 GNSS 位置服务应用中电离层延迟模型不同形式的构建方案,包括广播星历预报模型、格网实时电离层模型以及后处理模型,研究了它们的建模方法,特点以及模型构建效率,发现由于电离层本身的高时空变化率,对电离层进行建模处理效率有限,在精密定位领域还不能得到有效体现。

3) 研究了单站式单频 PPP 技术中几种实施方案,重点介绍了各类方案对电离层延迟的成功处理过程。介绍了电离层延迟映射函数的构建情况,研究了基于电离层参数估计的单频 PPP 技术方案;分析了伪距/载波半和法 PPP 方法;同样基于电离层延迟参数化的考量,研究了基于参数约化的单频 PPP 方法。以上方法的提出都是基于观测方程参数域信息的考量,在 PPP 模式下,通过足够的收敛时间收敛模糊度实现精密定位。

4) 研究了在基准参考站辅助下单频 PPP 技术,介绍了以电离层延迟为代表的空间信号误差源在区域环境中的建模及其应用情况。研究了基于单/多参考站的单频 PPP 方法,基于区域空间误差源的高相关性,参考相对定位站间差模式,在 PPP 模式下实现精密定位;研究了基于 SEID 模型的单频 PPP 方法,针对电离

层延迟在双频基准站上的双频观测值间的关系,建立基于电离层单层模型上的码间及频间电离层变化模型,基于单频流动站上的单频 L1 信号重建 L2 观测值,实现单频流动站上的双频 PPP 定位。

5) 研究了基于 URTK 技术的单频 PPP 方法,通过借助区域 URTK 技术,对区域各类信号上观测误差的进行精确实时建模改正,实现固定流动站单频信号整周模糊度,更进一步提升定位效率,实现了快速精密定位。

6) 设计并研制了各类方法的实用软件,采用了详实的研究数据对各类方案进行了研究比较。

5.2 后续研究工作展望

目前,单频 PPP 技术在实践应用中还不够成熟,精密技术总体也需要做进一步的探索和融合,基于本文的研究成果,还可以在以下几个方面做进一步的探索研究:

1) 基于实时网络数据传输的精密定位技术

目前,在 GNSS 精密定位的运用中,使用的精密轨道和钟差文件来自于 IGS 分析中心的后处理解算研制,其准实时精密轨道和钟差数据精度也有待提高,同时来源于数据传输平台的限制,精密数据的实时传输能力有限,可以考虑采用更加先进的网络技术手段,实现对全球跟踪观测网络的实时结算和数据传输,实现随时随地的精密位置服务

2) 广域快速精密定位技术

由基准参考网配合的 PPP 的技术能实现区域快速精密定位,但目前只能在类似 CORS 网络覆盖的环境中实现。因此,实现加快建设 CORS 网络,同时研究实现 PPP 技术,在无参考站,单参考站以至多参考站辅助下的自由切换模式,在更加广阔的区域内实现为用户提高快速,稳定高精度的位置服务。

3) 多信号融合精密定位技术

随着北斗卫星导航系统, GLONASS 系统以及伽利略系统等陆续完善并使用,将会为定位服务提供更加丰富的卫星信号源,研究多频数据联合定位技术将是大势所趋,利用多重信号建立更加合理的误差改正模型,同时多系统融合模型将会为精密定位服务提供更好的平台。

4) 区域误差模型精化

在 CORS 网络辅助下, 进一步研究精化区域误差改正模型, 加快模糊度解算, 减少系统初始化时间, 提高精密定位服务质量。

致谢

光阴似箭，岁月如梭！

漫漫人生路中，两年半的硕士学习生涯即将结束。暮然回首时，仿佛还记得刚刚踏入同济校门时的挂在脸上的那一缕彷徨。那时的情怀是复杂的，人生仿佛飘零的秋叶，在陌生的城市、陌生的人群里辗转沉浮。如今，所有的踌躇和不安都已化作春天的土壤，在同济的校园里孕育着我笃定、自信的人生。雄关漫道真如铁，而今迈步从头越。临别之际，我谨致以我最深沉的敬意感谢你，同济大学！

本文是在我的导师楼立志副教授与上海天文台陈俊平研究员的悉心指导和鼓励鞭策下完成的。楼立志老师为人风趣幽默，平易近人；工作上一丝不苟，细致周到，在学习和生活上给了我很多指导和帮助。在这里，我要向您致以深深的谢意。陈俊平老师同样是一位仁厚的前辈，他学术造诣深厚，科研态度严谨，知识渊博，胸襟开阔。在陈老师悉心指导下的这三年使我受益匪浅，在这里我同样要由衷的说一句：您辛苦了！。在同济大学的学习时光里，两位老师给予了深沉的关怀和鼓励，教导我既要学习做事也要学习做人，是我人生最美好的时光之一。最后，再次向两位师长致以衷心的感谢和崇高的敬意！

在同济大学的学习生涯中，得到了同济大学各位优秀老师和前辈的谆谆教导和殷切关怀，在此特向他们表示诚挚的谢意。

本篇论文的完成，得到了同窗好友张益泽与谢益炳的大力协助与支持。特别怀念我们同舟共济，相互扶持的实习生涯。同时感谢好友马绪瀛、吴国超、陈秋杰、鲍文月、何丽玲，与你们共同学习生活的时光是我人生中最值得纪念的时刻。感谢上海天文台唐成盼、赵群河、杨赛男、章洁君给予我的关怀和帮助。你们的友谊和关怀我会铭记于心。

在校期间，与 2011 级同学们相处融洽，感谢你们带给我的帮助和快乐。同窗之情都将是 我一生中的珍贵财富。

感谢同济所有熟悉的朋友，这些年的时光已然消逝，但我们相遇相知在同济的际遇会永存我心。同时祝愿所有人，在未来的天各一方的日子里，都能心想事成，奋斗不息。

特别感谢我的父母和兄长，它们无私的支持和默默的奉献使我得以顺利完成学业。母亲在电话那头经常叮嘱我要吃饱穿暖，要注意安全；父亲告诫我做人要踏踏实实、勤勤恳恳；兄长总是提醒我要劳逸结合，注意休息。千言万语，难表我心，在这里送上我对他们最真挚的祝福和感恩！

余伟
2014年3月9日凌晨
于同济大学

参考文献

- [1] Bisnath S, Langley R. High Precision Platform independent Positioning with a single GPS receiver[J]. Journal of Navigation, 2001, 29(3): 161-169.
- [2] Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000km[J]. J Geophys Res, 1989, 94(B8): 10 187-10 203.
- [3] Anh Quan Le, Christian Tiberius. Single-frequency Precise Point Positioning with Optimal filterin [J]. GPS Solutions, 2006
- [4] Bertiger W, Desaisd, et al. Single Receiver Phase Ambiguity Resolution with GPS Data[J]. Journal of Geodesy 2010, 84(5): 327-337.
- [5] Bock H. Efficient methods for determining Precise orbits of low earth orbiters using the global Positioning system [D]. Astronomical Institute University of Nerne, Schwitzerland, 2003.
- [6] Jo ão Reis, Jo ão Reis, et al. Baseline Influence on Single-Frequency GPS Precise Heading Estimation [J]. Wireless Pers Commun (2012) 64:185–196
- [7] Braun J, et al. The dffect of antenna covers on GPS baseline solutions [R]. UNAVCO report, University NAVSTAR Consortium, Bouider, 1997.
- [8] Brockman, E. Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System. University of Bem, 1996.
- [9] Chen W, Hu C, et al. Kinematic GPS Precise Point Positioning for sea level monitoring with GPS buoy [J]. Journal of global Positioning systems, 2004, 3:302-307.
- [10] Choy S, Zhang K, et al. An evaluation of various ionospheric error mitigation methods used in single frequency PPP [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2008, 7(1):62-71.
- [11] Ernest Pagarán Macalalad, Lung-Chih Tsai, et al. Application of the TaiWan Ionospheric Model to single-frequency ionospheric delay corrections for GPS positioning [J]. GPS Solutions , 2012
- [12] Anh Quan Le, Christian Tiberius. Single-frequency precise point positioning with optimal filtering [J]. GPS Solutions, 2007 11: 61–69
- [13] Damien.J.Allain, Cathryn.N.Mitchell. Comparison of 4D tomographic mapping versus thin-shell approximation for ionospheric delay corrections for single-frequency GPS receivers over North America [J]. GPS Solutions, 2010 14:279–291
- [14] Collins P. Decoupled Clock Model with Ambiguity Datum Fixing [P]. US Patent, 2010, No.:US2010/0188285A1.
- [15] Deng Z., M. Bender, et al, Retrieving Tropospheric Delays from GPS Networks Dendified with Single Frequency Receivers, Geophys. Res. Lett., doi: 10.1029/2009GL040018, in Press. Jun. 2002
- [16] Zhiguo Deng, M.Bender, et al. Retrieving tropospheric delays from GPS networks densified with single frequencyreceivers. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L19802, doi:10. 1029/2009GL040018, 2009
- [17] Xuan Zou, Maorong Ge, et al. URTK: undifferenced network RTK positiong [J]. 2012, GPS Solutions, 29 June 2012
- [18] Gao Y, Shen X. Improving ambiguity convergence in carrier Phase-based Precise Point Positioning [A]. ION GPS 2001[C]. Salt Lake City, USA, 2001.1532-1539.
- [19] GE M, GENDT G ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning(PPP) with Daily Observations [J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(7): 389-399.
- [20] Peter.F.de Bakker, Hans van der, et al. Geometry-free undifferenced, single and double differenced analysis of single frequency GPS, EGNOS and GIOVE-A/B measurements [J]. GPS Solutions, 2009 13:305-314
- [21] Torben Schuler, Herman Diessongo, et al. Precise ionosphere-free single-frequency GNSS Positioning[J]. GPS Solutions,14 June 2010
- [22] Han S, Rizos C, GPS Network Design and Error Mitigation for Real-time Continuous Array Monitoring Systems, Proceedings of ION GPS.2, 1827-1836, 1996.
- [23] Hugentobler U. Dach R, Fridez P. Document of Bemese of Software Version 5.0[R]. University of Bern. 2005
- [24] IERS. IERS Conventions. 2010.

- [25] IGSCB(2007). <http://igseb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- [26] Kongzhe Chen, Yang Gao. Real-Time Precise Point Positioning Using Single Frequency Data[A]. ION GNSS International technical Meeting of the satellite Division, 2005.
- [27] Lao-Sheng LIN. Remote Sensing of Ionosphere Using GPS Measurements[A]. The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, 5-9 November 2001.
- [28] Laurichesse D, Mercier F, 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.
- [29] Rocken, C., M. Johnson, et al, Improving GPS surveying with modeled ionospheric corrections[J], 2000, Geophys. Res. Lett, 27, 3821-3824.
- [30] Xuan Zou, Zhiguo Deng, et al. GPS data processing of networks with mixed single- and dual-frequency receivers for deformation monitoring [J]. Advances in Space Research 46 (2010) 130-135
- [31] Damien.J.Allain, Cathryn.N.Mitchell. Ionospheric delay corrections for single frequency GPS receivers over europe using tomographic mapping [J]. GPS Solutions, 2009 13:141-151
- [32] Yang GAO. Performance Analysis of Precise Point Positioning Using Real-Time Orbit and Clock Products[J]. Journal of Global Positioning System, 2004, 3(1): 95-100.
- [33] YangYuan-xi, Song Li-jie, et al. Robust Estimator for Correlated Observations Based on Bifactor Equivalent Weights [J]. Journal of Geodesy 2002, 76(6-7), 353-358
- [34] Sunil Bisnath. Precise orbit determination of low earth orbiters with a single GPS receiver-based, etric strategy [D]. University of New Brunswick, 004.
- [35] T.beran, D. Kim, R.B.Langley: High-Precision Single-Frequency GPS Point Positioning, Proc. 16th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (IONGPS/GNSS2003) PP. 1192-1200, Portland, OR, Sep, 2003.
- [36] Roel.J.P.van Bree, Christan.C.J.M.Tiberius. Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment [J]. GPS Solutions, 2012 16:259-266
- [37] E.M.de Souza, J.F.G.Monico. The wavelet method as an alternative for reducing ionospheric effects from single-frequency GPS receivers [J]. Journal of Geodesy (2007) 81:799-804
- [38] M.R.Mosavi. Wavelet Neural Network for Corrections Prediction in Single-Frequency GPS Users [J]. Neural Process Lett (2011) 33:137-150
- [39] Wu Xiaoli, Zhou Shanshi, et al, Pseudo range fluctuation analysis of regional navigation system, The Second China Satellite Navigation Conference Papers, 18 - 20 May 2011, Shanghai
- [40] Teunissen P J G, Kleusberg A. GPS for Geodesy [J]. Lecture Notes in Earth Sciences, 1996, 60:175-217.
- [41] Tu Rui, Zhang Qin, et al. On ionosphere-delay Processing methods for single-frequency Precise-Point Positioning [J]. Geodesy and Geodynamics, 2011, 2(1).
- [42] 何秀凤, 华锡生, 丁晓利, 陈永奇, 孙永荣. GPS 一机多天线变形监测系统[J]. 水电自动化与大坝监测, 2002, 26(3):34-36
- [43] 蔡昌盛, 李征航, 赵晓峰. 利用 GPS 组合观测值建立区域电离层模型研究[J]. 测绘工程, 2003, 12(1):13-16
- [44] 陈宪东. 基于大地型时频传递接收机的精密时间传递算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(3):245-248
- [45] 何海波, 杨元喜. GPS 动态测量连续周跳检验[J].测绘学报,1999,28(3):199-204.
- [46] 黄城, 胡小工, 程宗颐. 利用非差资料的精密点定位方案解算区域 GPS 网[J],天文学报,2001,42(3):248-258.
- [47] 涂锐, 张勤, 黄观文. 单频精密单点定位电离层延迟处理方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(2).
- [48] 花向红, 王新洲, 陈建锋, 吴继忠. 地面塌陷对建筑物安全状况影响分析[J]. 工程勘察, 2007(6):58-60
- [49] 王刚, 魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果[J].测绘通报,2000,(9): 1-2.
- [50] 王双喜. 基于非线性滤波的单频 GPS 精密单点动态定位[J].测绘通报,2006,(3): 4-7.
- [51] 邹璇. GNSS 单频接收机精密点定位统一性方法研究.武汉大学博士论文,2010 年
- [52] 黄观文, 涂锐, 李跃华, 蔺玉亭. 一种基于多基准站综合改正信息的非差精密单点定位算法 [C]. 测绘科学与技术新进展, 2010 年全国测绘科学与技术博士生学术论坛, 中国, 徐州, P33-P42.

- [53] 黄观文, 涂锐, 张勤, 王利, 李跃华, 蔺玉亭. 基于基准站改正信息的实时动态精密单点定位算法[J], 大地测量与地球动力学, 2010, 36(6).
- [54] 霍星亮. 基于 GNSS 的电离层形态监测与延迟模型研究[D]. 中国科学院研究生院, 2008.
- [55] 贾沛璋, 吴连大. 单频 GPS 周跳检测与估计算[M]. 天文学报, 2001, 42(2): 192-197
- [56] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 解放军出版社, 1995.
- [57] 李明, 高星伟, 徐爱功. 一种改进的周跳多项式拟合方法[J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 82-83
- [58] 李征航, 陈楷, 刘万科等. 顾及厂项的电离层延迟模型. 武汉大学学报(信息科学版), 2007 年 2 月, 第 32 卷, 第 2 期
- [59] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [60] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [61] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999
- [62] 陈义. 利用精密星历进行单点定位的数学模型和初步分析[J]. 测绘学报, 2002, 31(增刊): 31-33.
- [63] 韩保民, 欧吉坤. 基于 GPS 非差观测值进行精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(4): 409-412.
- [64] 郝明. 加速 GPS 精密单点定位收敛的方法研究[D]. 武汉: 中科院测量与地球物理研究所, 2007.
- [65] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 234-239.
- [66] 罗峰, 姚宜斌, 宋伟伟. 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳[J]. 全球定位系统, 2007(5): 9-13.
- [67] 阮仁桂, 郝金明, 刘勇. 正反向 Kalman 滤波用于动态单点定位参数估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(3): 279-282.
- [68] 阮仁桂, 郝金明, 张勇. 基于 UofC 模型的精密单点定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(6): 104-108.
- [69] 宋伟伟, 姚宜斌, 罗峰. 精密单点定位中周跳探测与修复方法研究[J]. 测绘信息与工程, 2007, 32(3): 34-35.
- [70] 邵贺, 张小红等. GPS 单频精密单点定位方法与实践[J]. 测绘信息与工程, 2008, (3): 1-3.
- [71] 邵贺. 单频 GPS 精密单点定位方法与实践[D]. 武汉: 武汉大学, 2007
- [72] 姜卫平, 邹璇, 唐卫明. 基于 CORS 网络的单频 GPS 实时精密单点定位新方法[J]. 地球物理学报, 2012 年 5 月
- [73] 涂锐, 黄观文, 张勤, 王利. GPS 单频机电离层延迟改正新算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版 2012 年 6 月第 37 卷第 6 期
- [74] 邓志国, Michael Bender, Galina Dick, 葛茂荣, Jens Wicker. GPS 单频机在水汽层析中的应用, 第二届导航年会会议论文, 2011 年 5 月, 上海
- [75] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998
- [76] 徐绍铨, 张华海, 杨志强, 王泽民. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [77] 许承权. 单频 GPS 精密单点定位算法研究与程序实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2008
- [78] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京, 测绘出版社, 2006.
- [79] 叶世榕, 张双成, 刘经南. 精密单点定位方法估计对流层延迟精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 788-791.
- [80] 许承权, 吴文英, 吴绍祖. 单频 GPS 精密单点定位的逐次滤波法模型及其精度分析 [J]. 测绘科学, 2010.
- [81] 邹璇, 姜卫平, 汪顺喜, 李陶. 单频接收机高精度近实时 GNSS 气象研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, Vol. 37, No. 1, Jan 2012
- [82] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [83] 袁运斌, 欧吉坤. 利用 IGS 的 GPS 资料确定全球电离层 TEC 的初步结果与分析[J]. 自然科学进展, 2003, 13(8): 885-888.
- [84] 张小红, 刘经南, Rene Forsberg. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 1(31): 19-22.
- [85] 张小红, 李星星. 非差模糊度固定解 PPP 新方法及实验[J]. 武汉大学学报, 2010, 35(6):

657-660

- [86] 张小红, 李征航, 蔡昌盛. 利用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001,(4): 140-143.
- [87] 张小红, 刘经南, ReneForsberg. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 1(31): 19-22
- [88] 章红平, 平劲松, 朱文耀等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 16-24
- [89] 章红平, 施闯, 唐卫明. 地基 GPS 区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(8): 805-809.
- [90] 汪平. GPS 单频精密单点定位理论与算法实现[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010
- [91] 途锐, 黄观文, 凌晴. GPS 单频精密单点定位的研究实现[J]. 测绘科学, Vol. 36, No. 3, May 2011
- [92] 邹璇, 唐卫明, 葛茂荣, 刘经南. 基于非差观测的网络实时动态定位方法及其在连续运行基准站跨网服务中的应用[J]. 测绘学报, 2011 年 第 40 卷 增刊
- [93] 张小红, 李星星, 郭斐, 张明. GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, Vol. 33, No. 8, Aug 2008
- [94] 途锐. GPS 单频精密单点定位与区域电离层模型研究[D]. 西安:长安大学, 2011
- [95] 李敏. 北斗卫星导航系统精密单点定位[J]. 第三届导航年会会议论文, 2012 年 6 月, 广州
- [96] 张勇,张斌,马能武. 单频 GPS 接收机的电离层延迟改正模型研究[J]. 大地测量与地球动力学, Vol. 32, No. 2, Apr 2012
- [97] 宋伟伟, 施闯, 姚宜宾, 叶世榕. 单频精密单点定位电离层改正方法和定位精度研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, Vol. 34 NO. 7, July 2009.
- [98] 张绍成. 基于 GPS/GLONASS 集成的 CORS 网络大气建模与 RTK 算法实现[D]. 武汉:武汉大学, 2010

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

余伟, 男, 1989年5月生, 安徽桐城人。

2011年6月毕业于中南大学 测绘工程专业 获学士学位。

2011年9月入同济大学读硕士研究生, 2014年3月获硕士学位。

已发表论文:

[1] 余伟, 陈俊平, 楼立志. GNSS 单频接收机单站高精度定位研究. 第四届导航年会会议论文, 2013年5月, 武汉.