

硕士学位论文

广域差分系统的 卫星轨道及钟差改正研究

姓 名	: 李茂
学 号	: 1232498
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	: 胡丛玮 副教授
副指导教	币:陈俊平 研究员

二O一五年三月



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

Satellite Orbit and Clock Error Corrections Algorithm in Wide Area Differential System

Candidate: Mao Li Student Number: 1232498 School/Department: School of Surveying and Geo-Informatics Engineering Discipline: Science and Technology of Surveying Major: Surveying and Mapping Engineering Supervisor: Prof. Congwei Hu / Junping Chen

March, 2014



学位论文版权使用授权书

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

学位论文作者签名:

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名:

年 月 日

摘要

全球导航卫星系统(GNSS)以其高精度定位的特点,在地面交通、航海、航 空等领域都有广泛的应用。但目前利用广播星历实时单点定位的精度仍较低,利 用差分技术能够有效提高实时用户定位精度,进一步提升 GNSS 的应用前景。本 文在介绍差分技术的基础上,重点研究了 GPS 广域差分系统中卫星轨道及钟差 改正算法。论文的主要内容和重点概括如下:

 介绍差分技术相对于单点定位的优势,国内外广域差分技术的发展现状 及广域差分系统中卫星轨道及钟差改正的处理策略。

2. 阐述差分技术的主要原理及不同类型的 GPS 差分技术,论证单基准站或 局域差分技术中,随着基准站与用户站距离的增加对差分定位的影响。编制单基 准站伪距差分 GPS 定位程序,以具体算例评估单站差分技术在静态测站和动态 车载用户实测中定位精度的改进情况。在静态用户的单基准站差分实验中,差分 定位精度可达分米级。

 介绍广域差分系统中电离层延迟参数的求解方法及常用电离层模型。并 详细介绍卫星轨道及钟差改正数的求解过程,比较最小二乘估计与最小方差估计 (MV)两种方法求解卫星轨道误差的差别。

4. 本文基于16个陆态网基准站模拟构建了服务于中国区域的广域差分参考 网络,建立可用于双频 GPS 用户的广域差分系统,实现并完成广域差分系统中 卫星轨道及钟差改正算法。

5. 计算 8 个单天的广域差分改正数,并选择中国大陆 14 个用户站进行伪距 差分定位实验,水平方向的定位精度(RMS)可达 5dm;为评估在实时精密定位中 的精度提高情况,编制了广域差分动态 PPP 程序,水平方向定位精度(RMS)可达 2dm,高程方向定位精度(RMS)提高至亚米级。

关键词:广域差分系统 卫星轨道误差 星钟误差 动态精密定位

I

Abstract

GNSS (Global Navigation Satellite System) has a wide range of applications in ground transportation, marine, aviation and other fields, with its high precision positioning feature. Currently, the real-time single point positioning accuracy with broadcast ephemeris is still low. If differential GNSS technology can be used, the positioning accuracy can be improved and the prospects of GNSS applications can be expanded. Based on introducing the differential technology, this submission focuses on the satellite orbit and clock error correction algorithms in wide area differential GPS system (WADGPS). The main points are as follows.

1. The advantages of DGPS, compared to the conventional single point positioning and the domestic and abroad WADGPS development status are introduce, as well as the satellite orbit and clock error solution strategy in the wide area differential system.

2. The main principles of various differential techniques are described. With the increasing distance from the base station to users', and the influences on differential positioning in single or local area difference positioning are demonstrated. A single station pseudorange differential GPS program is achieved, with specific examples to assessment the improvement on the accuracy of the static and dynamic positioning test. The differential positioning accuracy is up to decimeter in the static case.

3. The ionosphere parameters solution in WADGPS, common ionospheric models, and details in the process of solving the satellite orbit and clock error corrections are introduced. In addition, the least squares estimation and minimum variance estimation (MV) in satellite orbit errors solution are compared.

4. Based on the 16 base stations in CMONOC, a simulation WADGPS system is constructed to serve the China continent. The satellite orbit and clock errors correction algorithms are implemented and completed.

5. 8-day wide area differential corrections are computed, and 14 users' dynamic pseudorange differential positioning experiments are implemented. The horizontal positioning accuracy (RMS) is up to 5dm. In order to assess the accuracy of real-time precision positioning improve the situation, the wide area differential dynamic PPP program is accomplished. The horizontal direction positioning accuracy is up to 2dm, and the elevation direction is up to sub-meter positioning accuracy.

Key Words: WADGPS, satellite orbit errors, satellite clock error, dynamic PPP

口水

摘要		I
Abstrac	t	II
第一章	引言	1
1.1	概述	1
1.2	国内外的研究现状	2
1.3	本文的主要研究内容	3
第二章	差分 GPS 技术	5
2.1	差分 GPS 原理	5
2.2	差分 GPS 分类	6
	2.2.1 单基准站差分 GPS	6
	2.2.2 局域差分 GPS	7
	2.2.3 广域差分 GPS	8
2.3	单基准站差分 GPS 算例	11
	2.3.1 静态用户差分定位实验	12
	2.3.2 动态用户差分定位实验	13
2.4	小结	16
第三章	广域差分改正数求解模型	17
3.1	电离层延迟参数求解	17
	3.1.1 电离层及常用模型	17
	3.1.2 广域差分系统电离层格网模型	18
3.2	卫星轨道及钟差改正数求解	20
	3.2.1 参考站数据预处理	20
	3.2.2 参考站接收机钟差解算	25
	3.2.3 卫星轨道误差及钟差的计算	27
3.3	小结	30
第四章	服务于中国区域的广域差分系统及应用分析	31
4.1	广域差分系统的构建	31
4.2	广域差分改正数在动态伪距定位(SPP)中的应用及分析	33
	4.2.1 基于广域差分改正的动态伪距定位应用算例	33
	4.2.2 在 ECEF 坐标系和 RTN 坐标系下求解卫星轨道误差的比较	40
	4.2.3 三种类型差分改正参数对差分定位的影响	43
4.3	广域差分改正在动态精密定位(PPP)中的应用	44
	4.3.1 广域差分动态 PPP 程序设计	44
	4.3.2 基于广域差分改正的精密定位应用算例	45

4.4 广域参考站密度对用户差分定位的影响	
4.5 小结	
第五章 结论与展望	
致谢	
参考文献	
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	61

第一章 引言

1.1 概述

GPS 是全球定位系统(Global Positioning System)的简称,该系统于 1973 年由 美国国防部提出,历经二十余年的实验和建设,于 1995 年 4 月达到具备完全的 工作能力。美国政府曾实施 SA(Selective Availability)和 AS(Anti-Spoofing)政策, 大大限制了伪距测量的精度。但由于 GPS 应用技术发展的需要以及其他卫星导 航系统竞争的影响,美国又出台了一系列新措施,包括取消 SA 政策,增发两个 新的民用码,增加星座来提高可用性等(李征航等,2005)。

GPS 系统由空间段、地面控制段和用户段三部分组成。空间段目前可保证在 95%的时间里,至少 24颗 GPS 卫星可用。卫星分布于 6 个轨道平面,轨道平均 高度为 20200 km。自第一颗 GPS 卫星于 1978 年发射以来,GPS 卫星不断更新 完善,至今发射的卫星型号包括 BLOCK I、BLOCK II、BLOCK IIA、BLOCK IIR、 BLOCK IIR(M)和 BLOCK IIF。截止 2015 年 3 月,BLOCK III 卫星已处于生产 阶段,将于近期发射(US-Air-Force, 2015)。地面段目前主要包括 1 个主控站、12 个指挥控制站和 16 个监测站组成,地面监测站系统可实现 GPS 卫星全弧段可见, 并且每颗卫星至少可被地面 3 个测站跟踪,有效改善定轨观测的几何构型,显著 提高定轨精度(Wikipedia, 2015;曹月玲, 2014)。

GPS 具有传统无线电所不具备的全球覆盖、全天侯、高精度等优势,并已广 泛应用于天文、导航、通讯等多个领域。但 GPS 系统的基本导航信息难以在精 确性(Accuracy),完好性(Integrity),连续性(Continuity),可用性(Availability)四个 方面满足诸多导航应用领域(比如飞机的进场和着陆、船舶进港及内河航行、地 面车辆的导航及调度管理等)的需求。从精确性方面看,GPS 单点定位的精度依 然较低;从完好性方面看,GPS 系统本身能进行一定的完好性检测,但告警时延 太长,通常需要几个小时;从连续性和可用性方面看,GPS 虽然能保证所有地区 至少有 4 颗可视卫星,但是几何构型可能较差,如果加上完好性要求,其可用性 会更差(周善石,2007)。

鉴于 GPS 基本导航信息不能全面满足较高的需求,各种增强技术相继被提出,其中应用比较广泛的包括网络实时动态定位(网络 RTK)技术、局域差分和广域差分等技术。

差分技术的理论基础在于不同测站的 GPS 观测误差存在一定的空间相关性。 具体做法是在某坐标已知点(基准站)上配备一台 GPS 接收机,另一台接收机 (用户站)可安置在运动的载体上,同时进行 GPS 观测并在观测值之间求差,可消除具有相关性的误差,以此来提高用户站的定位精度。相较于常规单点定位, 在一定距离范围内采用单基准站差分技术便可提高定位精度。

当 GPS 差分需要覆盖较大的范围时,需要建立多个基准站,由此构成了具 有多个基准站的局域差分 GPS(LADGPS)和广域差分 GPS(WADGPS)。若采 用常规单站差分,当基准站或信号发射系统出现故障,则系统中的所有用户便无 法工作。而多基站局域差分能够有效提高常规单站差分 GPS 的可靠性,个别基 准站出现故障,整个系统仍能维持运行。多基站局域差分与单基准站差分相比, 优势更为明显。而局域差分与广域差分的主要区别在于后者将各种误差源进行了 分离,大大提升了差分系统的作用距离,利用数量较少的基准站便可实现大范围 内的差分定位。

1.2 国内外的研究现状

本文主要研究广域差分系统中卫星轨道和钟差误差的改正信息。对于卫星轨 道误差的改正主要有两种方法:

一是基于 GPS 卫星跟踪网的观测资料进行精密定轨,然后进行外推,可得 到高精度的预报星历,并将其播发给用户。1992年, IGS 分析中心开始向世界 各地的不同用户提供 GPS 卫星轨道和钟差改正、地球自转参数等产品。 随着 IGS 的不断发展,提供的 GPS 轨道精度越来越高,时间延迟不断减小。2000 年, IGS 开始提供超快速精密轨道产品,实测轨道的精度优于 5cm,时间延迟 3 小时;而 预报超快速精密轨道产品可满足实时定位的需求,轨道精度在 10cm 左右(智遂强, 2012)。美国 JPL 分析中心研制出实时 GPS 卫星轨道和钟差解算软件 RTG,对 NASA 的全球 GPS 网络(GGN)近 50 个观测站的实时数据进行处理,可以提供 GPS 卫星准实时与实时轨道、钟差产品(Muellerschoen et al. 2001)。法国泰雷兹 公司开发了实时精密轨道和钟差确定系统 RTOD,利用中继星的单向多普勒与双 向测距数据进行定轨,将快速预报得到的轨道作为实时轨道,轨道精度为 20cm(Scott, 2005)。而在国内, 楼益栋等提出了滑动窗口短弧法方程组合的方法 进行导航卫星的实时精密定轨,并在原有 PANDA 软件的基础上扩展了实时定轨 功能,该软件目前实时轨道的精度在 5cm 左右,与国际处于同一水平(楼益栋等, 2008)。在准确获取实时(预报)精密轨道后,可以综合利用精密星历与 GPS 广 播星历,实现卫星轨道改正数的直接计算和预报,并应用于差分计算(黄丁发等, 2007)。采用动力学定轨的方法确定星历改正数和星钟改正数,需要观测量多, 计算复杂,必须通过长时间数据处理来保证精度。

二是利用广域差分多个参考站的观测数据,求解广播星历的误差改正数,进 一步计算星钟误差改正数。美国联邦航空管理局(FAA)建立了覆盖全美国的广 域增强型差分 GPS 系统(WAAS),播发的差分改正数和用户差分测距误差 (UDRE)可满足 I 类精密进近的精度需求。系统采用了最小方差估计的 snapshot 算法和基于动态轨道模型的滤波方法来获取卫星轨道误差改正数(Tsai, 1999; Walter et al, 1999)。利用地面参考站定位卫星轨道位置时,定位几何构型差使得 星历和钟差误差四维差分改正数难以精确求解。曹月玲利用北斗系统独有的星地 双向时间同步观测,能够将卫星轨道误差改正数和星钟误差改正数有效分离,保 证了卫星轨道误差改正数的精度和有效性(曹月玲, 2014)。李孝辉等采用了矢量 差分的方法来分离两类误差改正数,选取多个基准站中某个测站的伪距残差作为 共视卫星的星钟误差,再利用其余基准站求解卫星轨道误差改正数(李孝辉等, 2010; 蔡成林等, 2009)。

广域差分技术作为 GNSS 卫星导航系统提高定位精度的手段,目前很多国家和地区建立了针对 GPS、GLONASS 等卫星导航系统的广域差分增强系统,包括美国的广域差分增强系统(WAAS)、欧洲的 GPS 和 GLONASS 增强系统(EGNOS)、日本的多功能卫星星基增强系统(MSAS)和准天顶卫星导航系统(QZSS)、俄罗斯的 GLONASS 差分校正和监测系统(SDCM)、印度的 GPS 增强系统(GAGAN)等(Hein, 2000; Kannemans, 2006; GMV, 2011)。这些系统普遍采用第二种方法求解广播星历卫星轨道误差改正数,主要通过对伪距观测数据进行处理,实时向用户提供广播星历、钟差改正信息以及电离层格网改正信息,以提高用户的定位精度。

1.3 本文的主要研究内容

本文主要研究 GPS 广域差分系统中卫星轨道和钟差误差改正算法,针对这 两部分误差参数的求解方法进行研究和探索。本文模拟构建了服务于中国区域的 GPS 广域差分系统,并在我国大范围内进行长时间多用户差分定位实验。本文后 续章节的主要内容如下:

第二章,主要从理论角度分析不同差分技术的优劣,并讨论多种定位误差源 随差分距离增加,误差大小的变化情况。本文编制完成 GPS 单基准站伪距差分 定位程序,并以静态测站和动态车载用户进行差分定位实验。静态测站的单站差 分定位精度可达分米级,动态车载用户的差分定位结果更接近于真实行驶轨迹。

第三章,介绍了广域差分系统的电离层延迟参数的求解方法,并重点介绍卫 星轨道误差及星钟误差求解过程中,对于参考站数据的预处理、主站钟差的求解 以及共视时间传递算法,并对比最小二乘估计与最小方差估计(MV)两种方法求 解卫星轨道误差的差别。

第四章,主要介绍了服务于中国区域的模拟广域差分系统的构建流程,在长时间多用户差分定位实验中,利用广域差分卫星轨道及钟差改正数可使得双频用户的伪距单点定位精度提高 50%,动态精密定位精度提高 70%。此外,还比较了不同的广域参考站密度对用户差分定位的影响,进一步论证了广域差分可利用较少参考站实现大范围内用户定位精度显著提升的优势。

第二章 差分 GPS 技术

2.1 差分 GPS 原理

差分 GPS 技术提出的目的原是为了消除美国政府 SA 政策所造成的危害, 大幅提高实时单点定位精度的有效手段。SA 政策虽已取消,但差分 GPS 由于能 改善定位精度的优势仍是研究的热点。

GPS 接收机通过获取接收机天线到多颗 GPS 卫星的伪距观测值,来求解接 收机的三维位置和接收机钟差。伪距中包含多种误差的影响,主要分为三个部分: 一是与卫星有关的误差,如卫星星历误差、卫星钟的钟误差、相对论效应等;二 是与信号传播有关的误差,如电离层延迟、对流层延迟、多路径误差等;三是与 接收机有关的误差,如接收机钟的钟误差、测量噪声等。利用 GPS 差分技术, 在基准站和流动站距离较近时,可以消除卫星星历误差、卫星钟的钟误差、电离 层延迟、对流层延迟等。因此,在基准站周围一定范围内的 GPS 用户,通过接 受差分改正量用以改正自己的误差,可以提高定位精度。

从基准站m 到 GPS 卫星j 的观测方程为:

$$\rho_m^j = \hat{D}_m^j + d\rho_m^j + b_m - \hat{B}^j + \hat{I}_m^j + \hat{T}_m^j$$
(2.1)

式中, ρ_m^j 为已知伪距观测值; \hat{D}_m^j 为基准站*m* 到 GPS 卫星*j*的几何距离,可通过广播星历和基准站已知坐标求得; $d\rho_m^j$ 为卫星星历误差引起的距离偏差; b_m 为接收机时钟偏差; \hat{B}^j 为卫星时钟偏差; \hat{I}_m^j 为电离层延迟误差; \hat{T}_m^j 为对流层延迟误差。由上式可求得基准站的伪距改正值为:

$$\Delta \rho_m^j = \hat{D}_m^j - \rho_m^j = -d\rho_m^j - b_m + \hat{B}^j - \hat{I}_m^j - \hat{T}_m^j$$
(2.2)

用户接收机也对卫星 / 进行了观测, 对应的观测方程为:

$$\rho_{u}^{j} = \hat{D}_{u}^{j} + d\rho_{u}^{j} + b_{u} - \hat{B}^{j} + \hat{I}_{u}^{j} + \hat{T}_{u}^{j}$$
(2.3)

基准站将改正数Δρ^{*j*} 播发给用户,并改正用户接收机所测得的伪距观测值, 将上述两式求和,可得到:

$$\rho_u^j + \Delta \rho_m^j = \hat{D}_u^j + (d\rho_u^j - d\rho_m^j) + (b_u - b_m) + (\hat{B}^j - \hat{B}^j) + (\hat{I}_u^j - \hat{I}_m^j) + (\hat{T}_u^j - \hat{T}_m^j) \quad (2.4)$$

当用户与基准站之间的距离小于 150km 时, 有 $d\rho_u^j \approx d\rho_m^j$, $\hat{I}_u^j \approx \hat{I}_m^j$, $\hat{T}_u^j \approx \hat{T}_m^j$, 上式可改写为:

$$\rho_{u}^{j} + \Delta \rho_{m}^{j} = \hat{D}_{u}^{j} + (b_{u} - b_{m})$$
(2.5)

经过 GPS 差分改正后,用户站的待求参数仍为 4 个,用户站接收机钟差参数变为用户站与基准站接收机钟差之差。如果基准站和用户站观测了不少于 4 颗的相同的卫星,在一定的距离范围内,由于消除或者显著削弱公共误差信息,所以差分 GPS 能有效提高定位的精度。

2.2 差分 GPS 分类

差分 GPS 按用户进行数据处理的时间的不同可分为实时差分和事后差分。 按照观测值的类型可分为伪距差分和相位差分。由于分类时依据的标准不同,目 前不同的参考资料所使用的名称还较为混乱,本文并未依照基准站的数量或系统 的覆盖面积来进行分类,而是主要从差分 GPS 工作原理及数学模型来分为三类: 单基准站差分 GPS(SRDGPS),具有多个基准站的局部区域差分 GPS(LADGPS) 和广域差分 GPS (WADGPS)。

2.2.1 单基准站差分 GPS

仅仅根据一个基准站所提供的差分改正信息进行改正的差分 GPS 技术,称 为单基准站差分 GPS 技术。单站差分 GPS 系统是由基准站、数据通信链及用户 等部分组成。

单站差分 GPS 可采用距离差分和位置差分模式。用户可在用户接收机的伪距观测值基础上加上距离改正数,进行单点定位解算(距离差分)。或者在常规单点定位的结果上加上坐标改正数,得到改正后的定位坐标(位置差分)。由于差分改正数的计算和改正数通讯链路的播发会造成一定的时间延迟。假定差分改正数 $D(t_i)$ 经过时间延迟 Δt 传送到用户手中。所以在精度要求较高时,需要依据差分改正数变化率v来计算 $t_i + \Delta t$ 时刻的差分改正数 $D(t_i + \Delta t)$:

$$D(\mathbf{t}_i + \Delta t) = D(\mathbf{t}_i) + v \cdot \Delta t \tag{2.6}$$

其中,

$$v = (D(t_i) - D(t_{i-1})) / (t_i - t_{i-1})$$
(2.7)

一般情况下,可不考虑上述时间延迟对差分改正数的影响。

单站差分 GPS 算法简单,技术上已较为成熟,同时经济成本低,特别适合于小范围的差分定位工作,因此国内不少城市和地区已组建了长期性的公用差分 GPS 系统。

单站差分 GPS 的技术实现建立在用户的位置误差或者距离误差与基准站的 相应误差完全相同这一理论基础上。随着用户接收机与基准站的距离不断增加时, 误差相关性将不断减弱,从而使得定位精度不断下降。同时,由于只采用了一个 基准站,单站差分 GPS 系统的可靠性和用户的定位精度难以保证,为解决这些 问题,需要加入多个基准站以保证差分系统的可靠性。

2.2.2 局域差分 GPS

局域差分 GPS(LADGPS),是在某一局部区域中布设若干个基准站,各基 准站按照统一规定的内容、结构、格式以及各站的标识符,向外播发改正信息, 用户根据这些来自多个基准站的改正信息经平差计算后得到用户站的改正数。各 基准站应具有足够大的覆盖区域,以保证用户能够同时接收到多个基准站的改正 信息。

类似于单站差分 GPS,局域差分播发给用户的改正信息通常为两类:位置改 正数和距离改正数。针对接收到的多个基准站差分改正数,用户可采用的算法主 要有(李征航等,2005):①加权平均法。用户对各基准站的差分改正数进行加权 平均得到用户站的改正数,定权的大小依据用户离基准站的距离来确定。②最小 方差法。类似于加权平均法,但定权方式通过使用户站改正数的方差最小求解得 到。③偏导数法。采用这种方法主要依据多个基准站的位置坐标(经纬度),分 别求得差分改正数在经度和纬度方向的变化率,再通过变化率和用户的经纬度坐 标得到改正数值。

为了尽量减少通信带宽,在基准站播发给用户改正量时,通常不采用各基准 站各自播发改正量信息,再由用户平差计算得到改正量。而是根据各基准站的分 布,预先在局域网中构成以用户站与基准站相对位置为函数的改正量的平差模型, 并将其统一播发给用户,这样就能避免使用多个高速的差分 GPS 数据流,不需 增加通信带宽。

由于具有多个基准站,同时顾及了基准站位置对差分改正数的影响,相比较 单基准站差分 GPS,局域差分 GPS 可用于较大范围的导航定位,系统的作用距 离可达 600km,适用于船舶的导航定位。此外,当系统中的个别基准站出现故障 时,整个系统仍能维持运行,因此系统的可靠性、作用距离和用户的定位精度都 有了较大的提高。

局域差分 GPS 能提高定位精度的原理是建立在基准站和用户站对 GPS 卫星 的同步同轨迹的基础上的,用户站所观测到的卫星能被一个或多个基准站同时观 测到。通常,当间隔距离在一定范围内的基准站和用户站同步观测同一颗卫星时, 这两个站上的观测值相应于同一卫星的同一轨道弧段,它们之间存在强相关性 (包含相同的误差)。

但是,随着用户与基准站之间距离的增大,星历误差与大气传播误差的影响

7

将显著增大。尤其是当差分 GPS 需要覆盖很大的区域(比如我国大陆)时,若 采用局域差分 GPS 将需要建立大量的基准站,增加大规模的经济投入。例如, 当用户至基准站的最大距离规定为 200km 时,覆盖我国大陆及领海的局域差分 GPS 系统中就需要建立约 500 个基准站。因此,需要建立一种基准站数量较少、 但覆盖范围广的差分系统。

2.2.3 广域差分 GPS

如前文所述,无论是单基准站差分 GPS 还是局域差分 GPS,都是将各种误差源所造成的影响合并在一起加以考虑。而实际上,不同的误差源对于差分定位的影响方式是不同的。表 2.1 (李征航等,2005)主要列举了卫星星历误差、卫星钟误差以及大气延迟误差随着基准站与用户距离的变化对差分定位的误差估值。

		DGPS				
误差类型	GPS	间距 (km)				
		0	100	300	500	
卫星钟误差	3.0	0	0	0	0	
卫星星历误差	2.4	0	0.04	0.13	0.22	
电离层延迟误差	4.0	0	0.73	1.25	1.60	
对流层延迟误差	0.4	0	0.40	0.40	0.40	

表 2.1 单点定位和差分定位时的误差估值(单位: 米)

从表 2.1 可以看出,随着用户站与基准站距离的增加,卫星钟钟差对于差分 定位结果无影响,而广播星历误差则使得定位结果精度下降。现依据图 2.1 说明 差分定位误差与广播星历误差的关系(焦海松等,2009)。图中基准站 B 与用户站 R 的距离为 P,卫星的真实轨道位置为 S,含有误差的卫星轨道位置为 S1,广播 星历的误差 ε_s (归化为距离), d^s_B为卫星到测站的距离, φ为基准站到用户站和 基准站到实际卫星位置之间的夹角。α为基准站到实际卫星位置 S 和估计卫星位 置 S1 两个方向的夹角。需要明确的是,卫星位置 S、S1 与接收机站 B、R 通常 不在同一平面内。



图 2.1 伪距改正量与卫星轨道误差的关系示意图

依据余弦定理,图 2.1 中存在如下几何关系:

$$\begin{cases} (d_R^{S1})^2 = (d_B^{S1})^2 + P^2 - 2Pd_B^{S1}\cos(\phi - \alpha') \\ (d_R^{S})^2 = (d_B^{S})^2 + P^2 - 2Pd_B^{S}\cos\phi \end{cases}$$
(2.8)

其中 $\alpha' = \phi - \phi'$ 。 $\alpha' \le \alpha$,当且仅当两个三角形在同一平面时,两个值相等。分别求解 $d_B^{S1} - d_R^{S1}$ 和 $d_R^S - d_B^S$,并忽略各方程式二阶展开的高阶项,可得到:

$$\begin{cases} d_B^{S1} - d_R^{S1} \approx -\frac{1}{2} (\frac{P^2}{d_B^{S1}}) + P \cos \phi + \alpha' P \sin \phi - \frac{1}{2} {\alpha'}^2 P \cos \phi \\ d_R^S - d_B^S \approx \frac{1}{2} (\frac{P^2}{d_B^S}) - P \cos \phi \end{cases}$$
(2.9)

若采用伪距差分,严格说来,基站播发给用户站的改正量应为真实改正量 $d_R^{s_1}-d_R^s$,而实际播发的则为 $d_B^{s_1}-d_B^s$,则伪距改正量的误差为:

$$(d_B^{S1} - d_B^S) - (d_R^{S1} - d_R^S) = (d_B^{S1} - d_R^{S1}) - (d_R^S - d_B^S)$$

$$\approx \alpha' P \sin \phi - \frac{1}{2} \alpha'^2 P \cos \phi$$

$$\leq \alpha P \sin \phi - \frac{1}{2} \alpha'^2 P \cos \phi$$
(2.10)

如果估计的卫星位置和用户位置、基准站、真实卫星位置在同一平面内,上 式等号成立。现假定 \$\mu\$>10°,卫星真实位置与估计位置的连线平行于基准站与用 户站的连线,则上式可简化为:

$$\left| (d_B^{S1} - d_B^S) - (d_R^{S1} - d_R^S) \right| \le \alpha P \sin \phi \approx \left(\frac{\varepsilon_S \sin \phi}{d_B^S} \right) P \sin \phi$$

$$= \left(\frac{\varepsilon_S}{d_B^S} \right) P \sin^2 \phi$$
(2.11)

由上式可知, 伪距改正量的误差随着基准站与用户站之间的间隔距离 P 的增加而增加。若假定用户站距离参考站为 300km, 卫星的估计位置误差为 10m, 卫星高度角大于 10°,则由间隔距离引起的校正误差约为 0.15m(焦海松等, 2009)。

从表 2.1 中可以看出,大气延迟误差,尤其是电离层延迟使差分定位结果精度随着用户与基准站距离的增加而下降。由于两地大气层的电子密度和水汽密度不同,造成对 GPS 信号的延迟不同,这时采用基准站处的大气延迟量来代替用户的大气延迟必然引起误差。对于电离层延迟,具体来说,主要是因为用户站和基准站上空的电离层的电子浓度之间存在梯度差异,残余的电离层延迟仍然影响到 GPS 差分定位的精度。如果电离层电子浓度的空间梯度很大时(如在赤道异常区域),差分定位精度会迅速下降,甚至降至 30 米。由于本文主要讨论广域差分系统中的星历误差和钟差误差,在此不针对大气延迟部分对于差分定位的影响做更深入的理论介绍。

前文介绍了卫星星历误差、钟差误差以及大气延迟误差对差分定位的不同影响,因此为改善最终的定位精度,需要将上述各种误差源分离开来,而非统一对各种误差源综合处理,这是广域差分 GPS(Wide Area Differential GPS, WADGPS)区别于其他差分方法的关键。

广域差分技术需要对 GPS 观测量误差源加以区分,并对每个误差源分别加 以"模型化",然后将计算出来的每个误差源的误差改正值,通过数据通信链路 广播给用户,对用户观测误差进行改正,达到削弱这些误差源影响,改善用户定 位精度的目的。广域差分的误差源主要包括以下几个方面:卫星轨道误差,星钟 误差,电离层对信号传播的延迟误差。改正这些误差影响后,即使单频接收机用 户也能获得较好的定位精度。广域差分技术是一种矢量化误差改正技术,一般是 在方圆几千公里区域内布设 30~40 个参考站,主要利用伪距观测量(辅以载波观 测量)进行可视卫星轨道、钟差以及空间电离层延迟误差测定,用户在利用导航 卫星观测伪距和导航电文,以及所接收的改正参数进行差分定位处理。广域差分 改正信息一般通过 GEO 卫星广播给用户,同时 GEO 卫星也发射测距信号,改 善用户几何构形,形成广域差分增强系统。经广域差分改正后,空间信号 URE 一般能优于米级,因此用户定位精度可达3米左右。由于对各种误差进行了分离 和估计,使用户能利用较准确的卫星星历误差、卫星钟差误差、电离层延迟进行 关。由于广域差分 GPS 测量覆盖范围广,需要设置的参考站数目与局域差分 GPS 相比大为减少,经济效益十分显著。因此,广域差分技术打破了局域差分技术中基准站与用户站之间时空相关的局限,提高了较远距离时用户的定位精度及可靠性。

2.3 单基准站差分 GPS 算例

为检验单基准站差分 GPS 定位结果,本文编写了 GPS 单频(L1)伪距差分 定位算法,在用户站为静态和动态两种情况下分别进行导航定位实验。图 2.2 为 定位程序设计流程图。程序设计时,提供了单频单点定位模式选择,单点定位模 式下,电离层误差改正采用 Klobuchar 模型,对流层误差改正采用 Saastamoinen 模型(Hofman-Wellenhof et al, 2008)。伪距差分定位模式下,差分基准站提供基准 站的精确坐标及相应历元的伪距观测值或直接播发伪距改正数(也即距离差分)。 当用户伪距观测值无法搜索到相应的基站伪距观测值或改正数时,则该观测值不 参与最小二乘解算。



图 2.2 单站伪距差分 GPS 定位程序设计流程图

2.3.1 静态用户差分定位实验

选取云南区域两个测站 KMBC 和 TWT3 的 GPS 观测数据, TWT3 为基准站, 坐标精确已知。KMBC 为用户站, 处于静止状态, 用户站距离基准站 250m。GPS 观测数据采样间隔 30s, 得到 Local Time 12: 00-21: 00 时间段差分改正前后的定位结果如图 2.3 所示。



图 2.3 用户站为静态时单站差分定位与伪距单点定位误差图

解算时,用户站 KMBC 采用单频 L1 伪距观测值,进行伪距差分定位时,直接利用伪距差分改正数修正观测值,不考虑电离层、对流层模型,进行差分定位解算。用户站伪距差分前后 E(东-西),N(南-北),U(高程)方向定位误差的 RMS 比较如表 2.2 所示。

用户站	RMS(m)			
KMBC	E	Ν	U	
单点	1.29	4.53	2.77	
差分	0.27	0.28	0.73	

表 2.2 单站差分定位与伪距单点定位误差的 RMS 比较(单位:米)

从图 2.3 和表 2.2 中可以看出,在用户站与基准站的距离较近时(250m),单 基准站差分定位能显著提高定位精度。由于单点定位无法消除卫星星历误差、卫 星钟差误差、电离层模型和对流层模型的误差,所以定位结果精度较低。而利用 基准站差分之后,定位结果精度可达到分米级,水平方向均方根误差(RMS)减少 80%以上,高程方向误差减少 70%,定位精度明显提高。

2.3.2 动态用户差分定位实验

为检验单基准站差分技术对动态用户定位精度的提升,在上海市区进行了车载导航定位试验。用户接收机采用泰斗开发板,采样间隔为 1s。基准站可依据用户接收机的请求,播发相应类型的伪距差分数据(直接播发差分改正数或基站的伪距观测值)。测试时间为 2013-04-15,测试区域距离基准站约 50km。为验证差分技术对定位结果的改进情况,将各历元解算出的位置坐标展绘到 Google Earth 中,进行单点定位和差分定位结果的比较。



图 2.4 单站差分 GPS 测试行驶轨迹图

图 2.4 中白色线条为单基准站差分测试时的车辆行驶轨迹。现将单点定位(黄色轨迹)和差分定位(红色轨迹)结果的绘制到 Google Earth 中,放到至局部以比较两者定位结果的差别。



图 2.5(a) 单点定位与差分定位结果局部轨迹



图 2.5(b) 单点定位与差分定位结果局部轨迹



图 2.5(c) 单点定位与差分定位结果局部轨迹 3



图 2.5(d) 单点定位与差分定位结果局部轨迹 4

从图 2.5(a)-图 2.5(d)可以看出,差分定位结果更接近车辆的真实行驶轨迹, 通常能通过差分将导航定位结果修正到车道内。由于差分技术只能修正星历误差、 卫星钟误差以及大气延迟,无法修正多路径误差的影响。因此,从图 2.5(d)中可 以看出车辆在通过高架桥下方时,定位结果严重偏离了原车道,利用差分技术也 无法修正这一偏离状况。总的说来,车载差分定位实验的精度改进情况不及静态 测站差分定位(图 2.3),这主要是由于车载实验的测试环境更为复杂,相较于静 态测站,道路附近有大量障碍物(高楼、树木)对信号的遮挡以及难以修正的多 径效应影响。 此外,试验中部分历元的差分定位精度反而严重下降,经查验发现这一问题 是由于基准站提供了错误的差分改正数。因此除了需要用户接收机在处理差分数 据时进行改正数粗差探测和剔除外,更重要的是,需要播发差分改正数的基准站 能对差分数据进行有效监测,在播发改正数的同时,及时向用户发出警告,以提 高差分定位的可靠性。若提供差分数据的基准站故障,此时单站差分将不能提供 给用户准确的定位结果,可靠性差。因此,实际应用中,更多采用局域差分技术 以尽可能避免出现单站差分中稳定性差的情况。

2.4 小结

本章通过单站伪距差分的静态和动态用户的算例,从实际应用上论证了差分 技术对用户定位精度的提高。对于单基准站差分、局域差分或广域差分而言,本 质上都是利用一个或多个基准站与用户站之间的公共误差关系,并通过差分来削 弱这些公共误差。和单站差分相比,局域差分的优势在于差分系统的稳定性和可 靠性有所提高;而广域差分系统和单站、局域差分相比的优势在于将公共误差中 的各部分进行分离,打破了基准站和用户站之间的时空局限性,利用较少的基站 便可有效提高用户定位精度。

第三章 广域差分改正数求解模型

广域差分系统由多个在一定区域均匀分布的参考站组成,以构成差分 GPS 网络。各参考站使用双频接收机连续不断地进行观测,并以这些观测值为基础, 实时解算卫星轨道误差、星钟误差以及电离层延迟参数。对于这三部分误差改正数的处理,通常是将卫星轨道、钟差误差改正数的求解与电离层延迟参数的求解 分为两个独立的处理过程。

3.1 电离层延迟参数求解

3.1.1 电离层及常用模型

电离层分布于地表上 60-1000km 间,当卫星发射的信号穿过电离层时,传播速度会发生变化,传播路径会发生弯曲,快速随机变化引起的电离层闪烁会产生测距和测速误差。电离层延迟引起的误差天顶方向最大可达 50m,水平方向最大可达 150m,因此这一误差不能被忽视。多种电离层模型可用来估计电离层误差,主要包括经典电离层模型和反演电离层模型(周善石,2007)。

经典电离层模型中,最著名的是由大量长期的电离层观测资料统计而得的经验模型:国际参考电离层(IRI)和 Bent模型。IRI模型给出了1000km以下电离层的电子密度、离子密度、电子温度等参数时空分布的数学表达式及计算程序。据此可求算总电子含量(TEC)和电离层延迟(章红平,2006)。Bent模型对电离层顶部采用指数函数与抛物函数、底部采用双抛物面函数来描述1000km以下的电子密度高程剖面图。Bent模型计算的电子含量可准确到70%-90%。

反演电离层模型是利用 GPS 对电离层进行监测,并在一定高度(通常为 350km - 450km)的假定电离层单层上,集中反应垂直电子总含量(VTEC)。这 一单层称为中心电离层。常见的 GPS 反演电离层模型包括 Klobuchar 模型,多项 式模型、球谐函数模型等(Hofman-Wellenhof, 2008)。Klobuchar 模型为单频 GPS 用户广泛使用,但由于是全球范围内的预报模型,其改正效果一般在 60%左右。电离层单层多项式展开模型是一个广泛应用于模拟区域电离层总电子含量时空 变化的模型。在这一模型中,VTEC 是纬度差和太阳时角差的函数。通过较长时 间的观测,利用高斯最小二乘,可以解算出该时段内的多项式电离层模型参数。 球谐函数模型则是利用球函数模拟全球或区域性电离层延迟的时空分布和变化, VTEC 是地磁纬度和经过穿刺点(卫星信号传播路径与中心电离层的交点)的经

线与地心-太阳连线的经线之间的夹角的函数。

3.1.2 广域差分系统电离层格网模型

广域差分系统的电离层延迟改正常采用电离层格网模型,模型的构建流程如下:

(1) 求解穿刺点(IPP) 的垂直电离层延迟

各参考站利用双频接收机获取高采样率(1s)的伪距和相位观测值,对应的 观测方程为:

$$\begin{cases} \rho_{m,L_{1}}^{j} = (D_{m}^{j} + b_{m} - B^{j}) + I_{m,L_{1}}^{j} + T_{m}^{j} + v_{m,\rho}^{j} \\ \phi_{m,L_{1}}^{j} = (D_{m}^{j} + b_{m} - B^{j}) - I_{m,L_{1}}^{j} + T_{m}^{j} + N_{m,L_{1}}^{j} \lambda_{L_{1}} + v_{m,\phi}^{j} \\ \rho_{m,L_{2}}^{j} = (D_{m}^{j} + b_{m} - B^{j}) + I_{m,L_{2}}^{j} + T_{m}^{j} + v_{m,\rho}^{j} \\ \phi_{m,L_{2}}^{j} = (D_{m}^{j} + b_{m} - B^{j}) - I_{m,L_{2}}^{j} + T_{m}^{j} + N_{m,L_{2}}^{j} \lambda_{L_{2}} + v_{m,\phi}^{j} \end{cases}$$
(3.1)

式中, ρ_{m,L_1}^{j} , ϕ_{m,L_1}^{j} 为伪距和相位观测值, D_m^{j} 为第 j 颗卫星到第 m 个参考站 之间的距离, b_m 为参考站 m 的接收机钟差, B^{j} 为第 j 颗卫星的钟差, T_m^{j} 为对流 层延迟, I_{m,L_1}^{j} 为电离层延迟, N_{m,L_1}^{j} 为 L_1 频率上的整周模糊度, $v_{m,\rho}^{j}$ 为伪距噪声。 从第 m 个参考站到第 j 颗卫星的双频伪距和相位观测值中,其中 D_m^{j} , b_m , B^{j} , T_m^{j} 相等,令

$$\bar{\rho}_{m}^{j} = D_{m}^{j} + b_{m} - B^{j} + T_{m}^{j} \tag{3.2}$$

若不存在周跳,进行历元间作差,可消去相位整周模糊度 N_{m,L_1}^j ,方程(3.2) 只包含两部分参数:平滑伪距 $\bar{\rho}_m^j$ 和电离层延迟 I_{m,L_1}^j 。此时方程可改写为:

$$\begin{cases} \rho_{m,L_{1}}^{j} = \overline{\rho}_{m}^{j} + I_{m,L_{1}}^{j} + v_{m,\rho}^{j} \\ \delta \phi_{m,L_{1}}^{j} = \delta \overline{\rho}_{m}^{j} - \delta I_{m,L_{1}}^{j} + v_{m,\delta\phi}^{j} \\ \rho_{m,L_{2}}^{j} = \overline{\rho}_{m}^{j} + I_{m,L_{2}}^{j} + v_{m,\rho}^{j} \\ \delta \phi_{m,L_{2}}^{j} = \delta \overline{\rho}_{m}^{j} - \delta I_{m,L_{2}}^{j} + v_{m,\delta\phi}^{j} \end{cases}$$

$$(3.3)$$

其中, $\delta \phi_{m,L_i}^{j}$ 为历元间的相位差值, $\delta \overline{\rho}_{m}^{j}$ 为平滑伪距的变化率, $\delta I_{m,L_i}^{j}$ 为电离 层延迟的变化率。电离层延迟量与频率的关系为:

$$I_m^{\,j} = \frac{40.3TEC}{cf^{\,2}} \tag{3.4}$$

其中, TEC 为测站到观测的卫星方向的电子含量总量, c 为光速, f 为观测 信号的载波频率。将上式带入式 (3.3), 则有:

$$\begin{bmatrix} \rho_{m,L1}^{j} \\ \delta \phi_{m,L1}^{j} \\ \rho_{m,L2}^{j} \\ \delta \phi_{m,L2}^{j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{40.3}{cf_{L1}^{2}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{40.3}{cf_{L1}^{2}} \\ 1 & 0 & \frac{40.3}{cf_{L2}^{2}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{40.3}{cf_{L2}^{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\rho}_{m}^{j} \\ \delta \bar{\rho}_{m}^{j} \\ TEC \\ \delta TEC \end{bmatrix} + v_{m}^{j}$$
(3.5)

在平滑滤波的过程中,可实时求得各历元的电子含量总量*TEC*,并利用电 离层倾角函数将斜路径上的电离层延迟转化为 IPP 上的垂直电离层延迟(Enge et al, 1996; Chao, 1997)。

此外,双频 GNSS 接收机采用无电离层组合来削弱电离层的实质就是基于式 (3.4),利用双频观测值的线性组合来估计电离层延迟量,以消除电离层误差对 GPS 定位精度的影响。双频伪距/相位观测值无电离层组合的观测模型如下(王解 先,1997):

$$\rho_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \rho_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \rho_{L2}$$
(3.6)

$$\phi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \phi_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \phi_{L2}$$
(3.7)

其中, ρ_{IF} 为两个频率伪距 ρ_{L1} 和 ρ_{L2} 的无电离层伪距组合观测值; ϕ_{IF} 为两个频率 ϕ_{L1} 和 ϕ_{L2} 无电离层相位组合观测值(距离)。

(2) 求解格网点的垂直电离层延迟

在通过各参考站求出广域差分覆盖区域内多个穿刺点的垂直电离层延迟后, 需要求解穿刺点附近格网点的垂直电离层延迟。各个格网点的垂直电离层延迟由 各穿刺点的电离层延迟加权得到。权值大小取决于格网点与穿刺点之间的距离, 以及穿刺点电离层延迟量的方差(与卫星高度角有关),并由此建立电离层格网 模型(RTCA, 1999)。

(3) 用户站的电离层延迟计算

广域差分中心实时向用户播发广域差分电离层格网模型参数,用户再通过格 网模型内插得到穿刺点(用户到观测的卫星方向上)的垂直电离层延迟,内插算 法主要依据穿刺点附近的四个格网点垂直延迟量得到。至此,用户从广域差分系 统中获得了观测到的各颗卫星的垂直电离层延迟和用户垂直电离层误差(UIVE), 并用于用户接收机实时单频导航定位解算。

本文主要研究广域差分中的卫星轨道误差改正和卫星钟差改正项,电离层误差部分不做更深入的介绍。

3.2 卫星轨道及钟差改正数求解

卫星轨道及钟差改正数求解模型与电离层延迟参数的求解模型相互独立。广 域差分系统中轨道与钟差算法主要由参考站数据预处理、参考站接收机钟差解算 及误差参数求解三部分组成。

3.2.1 参考站数据预处理

(1) 双频观测值周跳探测与相位平滑伪距

伪距观测值能够保证实时定位的可靠性,但精度难以达到较高的要求。但若 采用相位观测值,需要进行模糊度解算。因此采用相位平滑伪距能够在保证可靠 性的同时,提高观测值的精度。在计算相位平滑伪距时,只有在卫星不发生周跳 的前提下,才能对所有观测历元进行相位平滑。如果发生了周跳,就只能对周跳 发生之前和之后的观测历元进行相位平滑。因此,周跳探测对于相位平滑伪距的 计算是必要的。

宽巷组合和电离层残差组合可用于周跳探测(Blewitt, 1990)。由于不同频率 上的电离层延迟有如下关系:

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{f_2^2}{f_1^2} = \frac{f_2^2}{f_1^2} \cdot \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \frac{f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)}$$
(3.8)

现取 $I_{L1} = I_c \cdot f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2)$,则有 $I_{L2} = I_c \cdot f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)$,其中 I_c 为双频电 离层组合参数。观测方程可写为:

$$\begin{cases} \rho_{1} = \overline{\rho} + I_{c} \cdot f_{2}^{2} / (f_{1}^{2} - f_{2}^{2}) \\ \rho_{2} = \overline{\rho} + I_{c} \cdot f_{1}^{2} / (f_{1}^{2} - f_{2}^{2}) \\ \phi_{1} = \overline{\rho} - I_{c} \cdot f_{2}^{2} / (f_{1}^{2} - f_{2}^{2}) + \lambda_{1} N_{1} \\ \phi_{2} = \overline{\rho} - I_{c} \cdot f_{1}^{2} / (f_{1}^{2} - f_{2}^{2}) + \lambda_{2} N_{2} \end{cases}$$
(3.9)

其中, ϕ 为表征距离的相位观测值, 单位为 m; $\bar{\rho}$ 为电离层误差之外的其 余伪距, 对于双频伪距和相位, $\bar{\rho}$ 值相同。

a. 宽巷组合:

$$\begin{cases} L_{w} = \frac{f_{1}\phi_{1} - f_{2}\phi_{2}}{f_{1} - f_{2}} = \overline{\rho} + I_{c} \frac{f_{1}f_{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} + \lambda_{w}N_{w} \\ P_{w} = \frac{f_{1}\rho_{1} + f_{2}\rho_{2}}{f_{1} + f_{2}} = \overline{\rho} + I_{c} \frac{f_{1}f_{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \end{cases}$$
(3.10)

其中 $\lambda_w = c/(f_1 - f_2)$, $N_w = N_1 - N_2$, 可求得宽巷组合模糊度为:

$$N_w = \left(L_w - P_w\right) / \lambda_w \tag{3.11}$$

整理得:

$$N_{w} = \phi_{1} - \phi_{2} - \frac{f_{1} - f_{2}}{f_{1} + f_{2}} \left(\frac{\rho_{1}}{\lambda_{1}} + \frac{\rho_{2}}{\lambda_{2}}\right)$$
(3.12)

每个历元都可以独立计算宽巷模糊度 N_w,计算过程中采用递归算法不断更 新这一宽巷模糊度值,并比较前后历元的 N_w之差以判断周跳是否存在。

b. 电离层残差组合:

$$\begin{cases} L_{I} = \phi_{1} - \phi_{2} = I_{c} + \lambda_{1}N_{1} - \lambda_{2}N_{2} \\ = I_{c} + \lambda_{1}(N_{1} - N_{2}) + (\lambda_{1} - \lambda_{2})N_{2} \\ = I_{c} + \lambda_{1}N_{w} - \lambda_{I}N_{2} \\ P_{I} = \rho_{2} - \rho_{1} = I_{c} \end{cases}$$
(3.13)

其中, $\lambda_{I} = \lambda_{2} - \lambda_{1}$ 已知。当某一历元时刻 L1 与 L2 上的周跳相等时,宽巷组 合无法进行探测。此时,可以用电离层残差组合进行检查。对多个历元的 P_{I} 进行 多项式拟合生成Q,比较前后历元的 $L_{I} - Q$ 以判断周跳是否存在(王维等,2010)。

在无周跳的情况下,可利用相位平滑伪距对观测值进行数据预处理,平滑伪 距常采用 Hatch 滤波。当观测值采用双频消电离层组合时,可有效消除电离层误 差的影响。此时,采用 Hatch 滤波方法的双频无电离层组合相位平滑伪距的逐历 元递推计算公式为(杨永平,2005):

$$\begin{cases} \bar{\rho}_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i}) = \frac{1}{i} \rho_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i}) + (1 - \frac{1}{i}) \left(\bar{\rho}_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i-1}) + \phi_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i}) - \phi_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i-1}) \right) \\ \bar{\rho}_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{1}) = \rho_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{1}) \end{cases}$$
(3.14)

式中, $\rho_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i})$ 、 $\phi_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i})$ 分别为历元 \mathbf{t}_{i} 的消电离层组合的伪距观测值和相位观测值; $\bar{\rho}_{LC}^{j}(\mathbf{t}_{i-1})$ 为前一历元 \mathbf{t}_{i-1} 的伪距平滑值,初始历元的相位平滑伪距由伪距表示;当周跳发生时,相位平滑伪距需要进行重新初始化。

无论是采用宽巷组合还是电离层残差组合进行周跳探测,都需要设定相应的 阈值。如果周跳探测阈值设置过小,多路径误差的影响会造成周跳的误探;如果 周跳探测阈值过大,则实际存在的周跳会被漏探,会造成相位平滑伪距观测值的 较大偏差,最终影响差分改正数的结果。因此,需要根据实际的数据质量来设定 周跳阈值(吴继忠等,2011)。

(2) 参考站对流层延迟的求解

广域差分系统中,为准确确定对流层延迟,需要在参考站附近建立气象站准确测量参考站附近的温度、气压、相对湿度等信息,并采用标准对流层模型(如 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型等)和投影函数,以求出观测路径上的对流层延迟(Tsai, 1999)。

由于难以获得实时的气象数据,本文采用了精度较高的 SBAS 对流层模型, 该模型天顶延迟误差 RMS 小于 5cm,定位误差水平方向 3cm 左右(Penna et al, 2001; COLLINS, 1999)。SBAS 模型根据接收机的高程、纬度和年积日,并通过 年气象参数均值和季节性变化参数内插求得气象参数的估计值(Subirana et al, 2011)。表 3.1 和表 3.2 分别给出了这两组参数,依据以下内插公式可得到各用户 站的相关气象参数:

$$\xi(\phi, t) = \xi_{avg}(\phi_i) + [\xi_{avg}(\phi_{i+1}) - \xi_{avg}(\phi_i)] \cdot m - [\xi_{amp}(\phi_i) + (\xi_{amp}(\phi_{i+1}) - \xi_{amp}(\phi_i)) \cdot m] \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{365.25}\right)$$
(3.15)

式中 $m = (\phi - \phi_i)/(\phi_{i+1} - \phi_i)$, $\phi_{i+1} \pi \phi_i$ 为当地纬度对应的在表格中最接近的纬度。 $\xi_{avg}(\phi_i) \pi \xi_{amp}(\phi_i)$ 分别对应于表 3.1 和表 3.2 的参数值。t为年积日, $t_0 = 28$ 为参考时刻的年积日。南北半球的参数内插方法有一定差异。在南半球时,年积日t需加上 182.625。

	气压 P_0 (hPa)	温度 $T_0(\mathbf{K})$	水汽压	温度变化率	水汽变化率
纬度 ¢(°)			e_0 (hPa)	$\beta_0(\mathrm{K/m})$	k_0
≤ 15	1013.25	299.65	26.31	0.0063	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	0.00605	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	0.00558	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	0.00539	1.81
≥ 75	1013.00	263.65	4.11	0.00453	1.55
表 3.2 气象资料的季节性变化参数					
			水汽压	温度变化率	水汽变化率
纬度 (°)	气压 P_0 (hPa)	温度T ₀ (K)	e_0 (hPa)	$\beta_0(\mathrm{K/m})$	k_0
≤ 15	0.00	0.00	0.00	0.00000	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.00025	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.00032	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.00081	0.74
≥ 75	-0.50	14.50	3.39	0.00062	0.30

表 3.1 气象参数平均值

内插得到测站所在位置的压强、温度、水汽压等气象数据后,可分别计算出 天顶方向的干延迟和湿延迟(RTCA, 1999):

$$d_{zh} = \frac{10^{-6} k_1 R_d P}{g_m} \left(1 - \frac{\beta H}{T} \right)^{\frac{\delta}{R_d \beta}}$$
(3.16)

(1,1)

$$d_{zw} = \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m (\lambda + 1) - \beta R_d} \frac{e}{T} \left(1 - \frac{\beta H}{T} \right)^{\frac{(\lambda + 1)g}{R_d \beta} - 1}$$
(3.17)

式中, 压强 P, 水汽压 e, 温度 T, 温度变化率 β , 水汽压变化率 λ 等由公式 (3.15)内插得到; $d_{_{th}}$ 为天顶干延迟分量, $d_{_{zw}}$ 为天顶湿延迟分量, H为测站 高程; 其余常数值为 $k_1 = 77.604K/mbar$, $k_2 = 382000K^2/mbar$, $g = 9.80665m/s^2$, $R_d = 287.054J/kg/K$, $g_m = 9.784m/s^2$ 。

在得到天顶对流层延迟改正之后,需要将改正量转到倾斜方向。SBAS模型 中给出了相应的映射函数以求解倾斜对流层总延迟:

$$T_d = (d_{zh} + d_{zw}) \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2 \alpha}}$$
(3.18)

而Leeuwen等研究指出采用NMF(Neill Mapping Function)替代上述映射函数 能够提高倾斜延迟的精度(van Leeuwen et al, 2004)。Neill利用26个全球分布的无 线电探空气象站,建立了一个全球的大气延迟投影函数。该函数对干分量投影函 数和湿分量投影函数分别求解,函数对应的参数需要通过内插得到(Niell, 1996)。

(3) 求解星地几何距离及卫星钟差

广域差分系统的卫星轨道及钟差改正数是基于广播星历求解得到的预报轨 道和钟差,提供相应的改正信息。以下介绍利用广播星历计算卫星星历和卫星钟 差的方法(Hernandez-Pajares et al, 2008)。

a. 利用广播星历计算卫星位置

①利用广播星历开普勒轨道参数长半轴的平方根 \sqrt{A} ,计算参考时刻的平均角速度:

$$n_0 = \frac{GM}{\left(\sqrt{A}\right)^3} \tag{3.19}$$

其中, GM 为万有引力常数与地球总质量之积,为定常数。 计算观测时刻卫星的平均角加速度:

$$n = n_0 + \Delta n \tag{3.20}$$

②计算观测瞬间卫星的平近点角M:

$$M = M_0 + n\left(t - t_{oe}\right) \tag{3.21}$$

式中, M_0 为参考时刻 t_{oe} 的平近点角参数。当 $t-t_{oe} > 302400s$ 时,应减去 604800s;当 $t-t_{oe} < -302400s$ 时,应加上604800s。

③计算观测瞬间的偏近点角*E_k*:

$$E_k = M + e\sin E_k \tag{3.22}$$

上述方程需要利用迭代求解。实际计算过程中,只需两次迭代便可收敛。 ④计算真近点角 *f_k*:

$$\tan\left(\frac{f_k}{2}\right) = \left(\frac{1+e}{1-e}\right)^{\frac{1}{2}} \tan\frac{E_k}{2}$$
(3.23)

⑤计算升交点角距:

$$\Phi_k = f_k + w \tag{3.24}$$

其中, w为近地点角距,参数由广播星历提供。 ⑥计算摄动改正的卫星升交距角*u_k*,卫星向径*r_k*,轨道倾角*i_k*:

$$\delta u = C_{uc} \cos(2\Phi_k) + C_{us} \sin(2\Phi_k) \delta r = C_{rc} \cos(2\Phi_k) + C_{rs} \sin(2\Phi_k) \delta i = C_{ic} \cos(2\Phi_k) + C_{is} \sin(2\Phi_k)$$
(3.25)

式中, C_{uc} 等为广播星历中6个摄动参数; δu , δr , δi 为摄动该正项;

$$u_{k} = \Phi_{k} + \delta u$$

$$r_{k} = a \left(1 - e \cos E_{k} \right) + \delta r$$

$$i_{k} = i_{0} + \delta i + \frac{di}{dt} \left(t - t_{oe} \right)$$
(3.26)

其中, a为卫星轨道长半径; i₀为参考时刻轨道倾角, 由广播星历给出; di dt 为 i的变化率, 由广播星历中的摄动参数给出。

⑦计算卫星在轨道平面坐标系中的坐标为:

$$\begin{array}{c} x_k = r_k \cos u_k \\ y_k = r_k \sin u_k \end{array}$$

$$(3.27)$$

⑧计算观测时刻升交点经度 Ω_k :

$$\Omega_{k} = \Omega - GAST = \Omega_{oe} + \dot{\Omega} (t - t_{oe}) - GAST$$

= $\Omega_{oe} + \dot{\Omega} (t - t_{oe}) - GAST_{W} - \omega_{\varepsilon} t$ (3.28)

其中, Ω_{oe} 为参考时刻的升交点赤经; $\dot{\Omega}$ 为升交点赤经的变化率; $GAST_w$ 为一个星期开始时刻的格林尼治视恒星时; ω_s 为地球自转角速度;以上各参数均由广播星历提供。

⑨计算卫星在WGS84坐标系中的位置:
$$\begin{cases} x = x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ y = x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i_k \cos \Omega_k \\ z = y_k \sin i_k \end{cases}$$
(3.29)

b. 计算卫星钟差 \hat{B}

$$\hat{B} = a_0 + a_1(t - t_{oe}) + a_2(t - t_{oe})^2$$
(3.30)

其中, a₀、a₁、a₂为卫星导航电文所给出的钟差参数。

由于各参考站坐标精确已知,通过式(3.29)及式(3.30)可以获取卫星信号发射时刻的卫星轨道位置坐标和卫星钟差 \hat{B}^{j} ,由此得到观测到的各卫星与对应地面参考站的几何距离 \hat{D}_{m}^{j} 。

(4) 计算相位平滑伪距残差

相位平滑伪距 $\hat{\rho}_{m}^{j}$ 的观测方程为:

$$\hat{\rho}_{m}^{j} = \hat{D}_{m}^{j} + l_{m}^{j} \cdot \Delta R^{j} + \hat{I}_{m}^{j} + \hat{T}_{m}^{j} - \hat{B}^{j} - \Delta B^{j} + b_{m} + v_{m}^{j}$$
(3.31)

式中, \hat{D}_m^j 为几何距离,可通过卫星及地面参考站位置坐标得到; \hat{I}_m^j 为电离 层延迟改正,双频无电离层组合可消去绝大部分(一阶)电离层延迟误差; \hat{T}_m^j 为 对流层延迟改正,通过SBAS模型削弱误差; \hat{B}^j 为卫星钟差估值,为已知量; ΔR^j 为卫星轨道误差改正数, ΔB^j 为星钟误差,均为待求参数; b_m 为接收机钟差, v_m^j 为噪声项。对上述公式中所有已知量综合处理,可得到相位平滑伪距的残差:

$$\Delta \rho_m^j = \hat{\rho}_m^j - \hat{D}_m^j - \hat{I}_m^j - \hat{T}_m^j + \hat{B}^j$$
(3.32)

残差对应的方差计算公式为:

$$\sigma_{\rho_{m}^{j}}^{2} = \sigma_{\hat{\rho}_{m}^{j}}^{2} + \sigma_{\hat{l}_{m}^{j}}^{2} + \sigma_{\hat{l}_{m}^{j}}^{2}$$
(3.33)

即相位平滑伪距的方差、电离层模型方差、对流层延迟估计的方差的和。在 求出平滑伪距残差Δρ^{*j*}_m后,可得到误差方程:

$$\Delta \rho_m^j = l_m^j \cdot \Delta R^j + b_m - \Delta B^j + v_m^j \tag{3.34}$$

3.2.2 参考站接收机钟差解算

公式(3.34)中出去卫星轨道误差、钟差误差参数外,还有接收机钟差参数 *b_m*需要消去。对于广域差分系统中的多个参考站接收机钟差,需要在多个参考 站中确定"主站",一般将参考站网几何中心附近的参考站作为主站。求解出主 站钟差后,以此作为钟差基准,通过其余参考站与主站钟差的关系,解算出所有 参考站接收机钟差。

(1) 主站钟差求解

求解主站钟差时,不考虑所观测到N颗卫星对应的轨道和钟差误差,对相位 平滑伪距残差加权平均得到主钟钟差估值:

$$\hat{b}_{M} = \left(\sum_{j=1}^{j=N} \frac{\Delta \rho_{M}^{j}}{\sigma_{\Delta \rho_{M}^{j}}^{2} + (URA^{j})^{2}}\right) \cdot \hat{P}_{\hat{b}_{M}}$$
(3.35)

$$\hat{P}_{\hat{b}_{M}} = \left(\sum_{j=1}^{j=N} \frac{1}{\sigma_{\Delta \rho_{M}^{j}}^{2} + (URA^{j})^{2}}\right)^{-1}$$
(3.36)

上式中, $\sigma_{\Delta\rho_{M}^{j}}^{2}$ 为相位平滑伪距残差的方差, URA^{j} 为第j颗卫星广播星历的用户测距精度,N为主站可观测到的卫星的数目, \hat{b}_{M} 为主站钟差估值, $\hat{P}_{\hat{b}_{M}}$ 为钟差估值的方差。

按照最小二乘估计可求得各历元主站接收机钟差,由于噪声的存在,主钟钟差的时间序列波动明显。由于主钟接收机外接原子钟,具有高稳定性。为了较为准确地估计主钟钟差,需采用卡尔曼滤波对进行钟差的最小二乘估值进行平滑处理(刘大杰等,1988; J. Sanz Subirana et al, 2011),经过滤波处理后的钟差曲线如图3.2所示。



图 3.1 滤波前后的主钟钟差结果

主钟钟差虽进行了滤波处理,所得到的结果仍难以反映主钟的真实钟差,但 对于其余参考站将以主站钟差为基础进行计算,同一历元时刻各个参考站的钟差 误差相同。最终将改正数播发给用户时,这一钟差误差能被用户接收机钟差吸收 (Enge et al, 1996)。

(2) 共视时间传递

通过各参考站与主站的共视卫星,可建立起主站与其余参考站接收机钟差的

关系,这种方法叫做共视时间传递(Common View Time Transfer, CVTT)(Tsai, 1999)。该方法利用主站与其余参考站的共视卫星,进行主站与非主站之间的站间单差。基于式(3.34),对共同观测到的第 j 颗卫星有:

$$\Delta_{m,M}^{j} = \Delta \rho_{m}^{j} - \Delta \rho_{M}^{j} = (l_{m}^{j} - l_{M}^{j}) \cdot \Delta R^{j} + \Delta b_{m,M}$$
(3.37)

上式中,由于星地距离远大于参考站之间的距离, (*l^j_m*-*l^j_M*)·Δ*R^j*很小,可忽略不计(Tsai, 1999)。据此利用加权最小二乘,可得到接收机钟差之差的估值:

$$\Delta \hat{b}_{m,M} = \frac{1}{K_{m,M}} \sum_{j=1}^{K_{m,M}} \Delta^{j}_{m,M}$$
(3.38)

其中, $K_{m,M}$ 为参考站m和主钟参考站M的共视卫星数目。

基于(3.35)和(3.38)式,可消去(3.34)式中的各参考站的钟差参数 b_m 。 于是时间同步后的平滑伪距残差为:

$$\Delta \tilde{\rho}_m^j = \Delta \rho_m^j - \Delta \hat{b}_{m,M} - \hat{b}_M$$

$$= l_m^j \cdot \Delta R^j - \Delta B^j + u_m^j$$
(3.39)

相应方差为:

$$\sigma_{\tilde{\rho}_{m}^{j}}^{2} = \sigma_{\Delta\rho_{m}^{j}}^{2} + \sigma_{\hat{b}_{m,M}}^{2} + \sigma_{\hat{b}_{M}}^{2}$$
(3.40)

3.2.3 卫星轨道误差及钟差的计算

消去接收机钟差参数后,公式(3.39)中即为待求的卫星轨道误差参数 ΔR^{i} 和 星钟误差参数 ΔB^{i} 。

(1) 求解卫星轨道误差

针对同一颗卫星,采用站间单差,消去 ΔB^{i} ,则有:

$$\Delta \tilde{\rho}_m^k - \Delta \tilde{\rho}_p^k = (l_m^k - l_p^k) \cdot \Delta R^k + \varepsilon_m^k$$
(3.41)

其中, $\Delta \tilde{\rho}_{p}^{k}$ 为方差最小参考站p的同步后平滑伪距残差。

上式可简写为:

$$z = H \cdot \Delta R^k + v \tag{3.42}$$

求解上式可采用常规的最小二乘估计(王穗辉, 2009):

$$\Delta R^{k} = (H^{T}W^{-1}H)^{-1}H^{T}W^{-1}z$$
(3.43)

其中, $H = (l_m^k - l_p^k)$ 为系数矩阵, $z = \Delta \tilde{\rho}_m^k - \Delta \tilde{\rho}_p^k$ 为观测值, W 为观测值的方

差。

在WAAS系统中并未采用上述最小二乘估计法来计算卫星轨道误差,而是采用最小方差估计(Minimum Variance Estimate, MVE)来求解(Tsai, 1999)。最小方差估计的参数估值计算公式为(Luenberger, 1968; 郭静波, 1993):

$$\hat{x}_{MV} = \Lambda H^T (H \Lambda H^T + W)^{-1} z \qquad (3.44)$$

对应的方差为:

$$\hat{P}_{MV} = \Lambda - \Lambda H^T (H \Lambda H^T + W)^{-1} H \Lambda$$
(3.45)

式中, Λ 为待求参数的先验方差, H 为系数阵, W 为观测值的方差阵, z 为观测值(残差), \hat{x}_{MV} 和 \hat{P}_{MV} 为最小方差估计法求得的参数解及参数方差。

(2) 最小二乘与最小方差估计求解卫星轨道误差参数的比较

在利用地面测站观测值逆向定位求解卫星位置误差时,由于几何构型很差,利用最小二乘估计求得的求得的卫星轨道误差改正数为数百米至数万米。图3.3 为最小二乘求得2013年某单天PRN01卫星的卫星轨道误差改正数。



图 3.2 某单天 PRN01 卫星轨道误差改正数最小二乘解

实际上,经过多年的发展,现阶段的 GPS 广播星历的轨道精度已经达到 2m, 钟差精度达到 10ns 左右(郭斐等, 2009; 刘伟平等, 2010)。很显然,最小二乘法 不能准确求得 GPS 卫星轨道误差改正数。

当采用最小方差估计去求解卫星轨道误差时,由于引入了先验信息(卫星轨道误差的先验均值通常取为0,先验方差为4),可一定程度上约束改正数的大小。





图 3.3 某单天 PRN12 卫星轨道误差改正数最小方差解

从上图可以看出,最小方差估计采用先验约束的方法使得所求的卫星轨道误差在数值大小上接近于真实值,但由于对先验信息的强依赖特性,得到的卫星轨 道误差改正数在0均值附近离散分布,不具有真实卫星轨道误差的随时间波动变 化的特性(李茂等,2014),因此与最小二乘估计相比,优势并不明显。

事实上,无论采用最小二乘或是最小方差估计,均不能准确计算出卫星的真 实轨道误差改正数,这是相位平滑伪距观测值的精度较低以及地面测站逆向定位 卫星坐标时几何构型很差所决定的。但是,利用这两种计算方法进一步得到星钟 误差改正数后,同时将卫星轨道和钟差误差改正数播发给用户时,两种方法都能 改进用户的定位精度,并且用户差分定位结果相同。

(3) 计算卫星钟差误差

利用式(3.46)或(3.47)求出卫星轨道误差改正数后,公式(3.48)中的待求参数 仅有星钟误差参数 ΔB^{j} ,利用加权最小二乘估计可直接求得星钟误差参数。

利用站间单差消去钟差误差参数,以实现卫星轨道误差与钟差误差参数的分步求解的方法目前在实时广域计算中广泛采用。而实际上,利用站间单差消去未知参数的方法只能在一定程度上简化运算量,其实质与不差(卫星轨道误差与星钟误差4个参数统一解算)是等效的(李孝辉等,2010; Xu et al, 2007)。从理论上和实际应用中来说,利用站间单差以实现卫星轨道及星钟误差分离的方法并不能

进一步提高用户的差分定位精度。

3.3 小结

本章介绍了广域差分系统中电离层延迟参数的求解方法,因本文重点在于卫 星轨道及钟差改正数算法研究,电离层误差直接通过双频无电离层组合消去。求 解过程中,主要利用相位平滑后的伪距作为观测值,因此需要保证周跳探测算法 的准确性,否则不能提供准确的平滑伪距值。在对流层误差改正部分,采用了具 有 cm 级精度的 SBAS 对流层模型。在求解参考站接收机钟差时,采用了共视时 间传递(CVTT)的方法建立各站钟差与基准钟差的关系。最后,最小二乘和最 小方差估计虽都不能得到卫星的真实轨道误差改正数,但各自与后续求得的星钟 误差参数一同播发给用户进行差分定位时,都能在整体上提高用户定位的精度。

第四章 服务于中国区域的广域差分系统及应用分析

4.1 广域差分系统的构建

中国大陆构造环境监测网络(CMONOC,简称陆态网络)是以 GNSS 观测 技术为主,辅以甚长基线干涉(VLBI)及人卫激光测距(SLR)等空间技术,结合 精密水准测量和重力测量构成的大范围、高精度、高时空分辨率的观测网。 CMONOC 自 1999 年建立至今,观测测站数已达 250 多个。上海天文台作为陆 态网络的数据处理中心,积累了大量的观测数据,并基于这些数据进行了高精度 的分析处理(陈俊平等, 2012)。

本文利用 CMONOC 中多个连续观测的 GNSS 参考站,尝试并建立服务于中国区域的广域差分系统。该系统由 16 个均匀分布的陆态网参考站构成,各参考站分布如图 4.1 所示。



图 4.1 服务于中国区域的广域差分参考站(红色三角形)分布图

图中 16 个参考站坐标均精确已知,相邻参考站的站间距离约为 500km~1000km。本文利用 2013 年年积日 090-097 八个单天各参考站的原始观测 文件,分别对各天对应的卫星星历误差、星钟误差改正数进行求解,并进行系统



的程序实现,该系统的改正参数求解流程图如图 4.2 所示。

图 4.2 服务于中国区域的广域差分系统的卫星轨道及星钟误差求解流程图

在广域差分系统的程序实现过程中,采用 IGS 提供的 brdc 广播星历计算卫 星的概略坐标和概略钟差,并计算 brdc 对应的卫星坐标和星钟误差,在用户定 位应用中,也需采用同一星历进行差分定位。对于 16 个陆态网络参考站数据进 行逐历元的周跳探测和相位平滑伪距,采用 SBAS 模型削弱电离层影响,无电离 层组合消除电离层误差,并利用共视时间传递等算法逐步消去参考站接收机钟差 参数,实现卫星轨道及星钟误差的求解。

4.2 广域差分改正数在动态伪距定位(SPP)中的应用及分析

4.2.1 基于广域差分改正的动态伪距定位应用算例

为评定计算得到的差分改正数在用户定位中的精度提高效果,分别计算 2013 年年积日 090-097 八个单天的 GXNN、GZGY、JXJA、NMAG、QHBM 等 14 个分布在中国大陆地区的用户站,利用广域差分改正数进行动态伪距差分定 位实验。由于求解的广域差分改正数只包括卫星轨道误差和钟差误差两部分,不 涉及电离层误差改正,所以只用于双频 GNSS 接收机进行广域差分定位实验,用 户定位中直接采用无电离层组合可消去电离层误差(公式 3.6)。图 4.3-图 4.7 为 5 个用户站 d090 单天的动态伪距定位的误差散点图。



图 4.3 GXNN 站伪距单点定位差分改正前后结果



图 4.4 GZGY 站伪距单点定位差分改正前后结果



图 4.5 JXJA 站伪距单点定位差分改正前后结果



图 4.6 NMAG 站伪距单点定位差分改正前后结果



图 4.7 QHBM 站伪距单点定位差分改正前后结果

上述 5 个用户站的差分前后的定位误差结果图中, 红色点为未加入差分改正的误差结果, 蓝色点为加入差分改正的误差结果。图中的统计值 RMS(均方根误差)均依据各用户站的准确已知坐标求得, 现将上述 5 个测站的差分改正前后 RMS 值列表如表 4.1 所示。

用户站	单点 E	差分 E	单点 N	差分 N	单点 U	差分 U
GXNN	1.45	0.58	1.16	0.59	2.93	1.55
GZGY	1.49	0.59	1.23	0.65	3.06	1.56
JXJA	1.47	0.60	1.18	0.64	3.29	1.62
NMAG	1.29	0.48	1.31	0.63	2.50	1.17
QHBM	1.50	0.62	1.41	0.75	2.84	1.48

表 4.1 d090 差分改正前后各用户站定位误差的 RMS 统计结果(单位: m)

将统计结果绘制为直方图,如图 4.8 所示:



图 4.8 差分前后伪距定位误差的 RMS 统计直方图

从表 4.1 和图 4.8 中可以看出,利用 16 个参考站得到的卫星轨道及钟差改正数,可使得伪距单点定位误差在水平方向达到小于 1m 的精度,高程方向在差分改正后精度提高超过 1m。为充分说明差分改正数对于定位精度的改进情况,表 4.2(a)-表 4.2(b)中列出了 GXNN 等 14 个用户站,在年积日 d091-d097 的定位误差的 RMS 统计结果。

DOY	E/N/U	GXNN	GZGY	JXJA	NMAG	QHBM	FJWY	HAQS
	单点 E	1.21	1.22	1.27	1.18	1.24	1.26	1.21
	差分 E	0.55	0.59	0.58	0.49	0.61	0.54	0.52
1001	单点 N	1.24	1.40	1.38	1.36	1.56	1.16	1.28
d091	差分 N	0.58	0.66	0.66	0.64	0.72	0.61	0.62
	单点 U	3.09	3.13	3.56	2.30	2.99	2.92	2.75
	差分 U	1.55	1.58	1.66	1.17	1.54	1.49	1.36

表 4.2(a) d091-d097 加入改正数前后的 14 个用户站定位误差的 RMS(单位: m)

	单点 E	1.03	1.03	1.07	0.93	1.08	1.02	0.95
	差分 E	0.58	0.58	0.58	0.50	0.61	0.53	0.51
1002	单点 N	1.14	1.29	1.33	1.26	1.57	1.26	1.38
u092	差分 N	0.58	0.63	0.65	0.67	0.74	0.60	0.62
	单点 U	2.78	2.81	2.92	2.30	3.26	2.49	2.47
	差分 U	1.59	1.62	1.75	1.26	1.64	1.56	1.37
	单点 E	1.29	1.29	1.20	0.88	1.28	1.07	1.01
	差分 E	0.57	0.58	0.59	0.49	0.61	0.55	0.51
4003	单点 N	1.11	1.23	1.21	1.25	1.38	1.14	1.28
u093	差分 N	0.62	0.67	0.67	0.64	0.73	0.62	0.63
	单点 U	2.76	2.94	2.95	2.59	2.93	2.88	2.64
	差分 U	1.51	1.52	1.63	1.17	1.52	1.57	1.32
	单点 E	1.35	1.38	1.36	1.12	1.29	1.26	1.25
	差分 E	0.56	0.59	0.58	0.46	0.59	0.53	0.51
4094	单点 N	1.07	1.15	1.15	0.97	1.36	1.05	1.11
u074	差分 N	0.57	0.64	0.65	0.63	0.69	0.59	0.61
	单点 U	2.80	3.01	2.95	2.10	3.09	2.66	2.44
	差分 U	1.45	1.52	1.64	1.18	1.48	1.47	1.34
	单点 E	1.11	1.11	1.04	0.84	1.09	0.98	0.95
	差分 E	0.61	0.59	0.60	0.46	0.60	0.55	0.50
4095	单点 N	1.00	1.15	1.22	1.23	1.31	1.12	1.20
u095	差分 N	0.58	0.64	0.68	0.63	0.68	0.60	0.60
	单点 U	2.61	2.55	2.84	1.84	2.77	2.37	2.19
	差分 U	1.53	1.52	1.69	1.14	1.48	1.49	1.32
	单点 E	1.14	1.17	1.11	0.94	1.16	1.01	0.99
	差分 E	0.59	0.59	0.60	0.48	0.60	0.55	0.53
d096	单点 N	1.01	1.07	1.17	1.06	1.23	1.02	1.08
uoso	差分 N	0.58	0.63	0.66	0.61	0.72	0.62	0.60
	单点 U	2.76	2.97	3.06	2.34	2.90	2.90	2.58
	差分 U	1.47	1.52	1.54	1.17	1.53	1.47	1.32
	单点 E	1.21	1.22	1.19	1.05	1.28	1.11	1.10
	差分 E	0.57	0.61	0.60	0.49	0.63	0.53	0.51
4097	单点 N	1.03	1.15	1.13	1.18	1.39	1.03	1.18
u077	差分 N	0.59	0.63	0.68	0.63	0.75	0.63	0.61
	单点 U	2.48	2.53	2.61	2.07	2.67	2.49	2.22
	差分 U	1.47	1.58	1.59	1.17	1.55	1.45	1.32

续表 4.2(a) d091-d097 加入改正数前后的 14 个用户站定位误差的 RMS(单位: m)

DOY	E/N/U	NMAL	SCJU	SNMX	SNYA	XJHT	XJKC	ZJJD
	单点 E	1.26	1.25	1.19	1.33	1.04	0.97	1.30
	差分 E	0.60	0.58	0.52	0.61	0.61	0.49	0.58
1001	单点 N	1.47	1.37	1.39	1.50	1.61	1.54	1.19
a091	差分 N	0.77	0.62	0.61	0.69	0.77	0.63	0.66
	单点 U	2.57	3.32	3.01	3.17	2.95	2.78	2.73
	差分 U	1.49	1.48	1.32	1.59	1.62	1.32	1.49
	单点 E	0.99	1.07	0.97	1.26	0.98	0.85	1.04
	差分 E	0.60	0.57	0.51	0.61	0.60	0.49	0.57
2002	单点 N	1.46	1.35	1.39	1.52	1.51	1.42	1.28
u092	差分 N	0.90	0.64	0.62	0.71	0.76	0.63	0.65
	单点 U	2.80	3.11	2.67	3.35	2.74	2.55	2.48
	差分 U	1.70	1.60	1.39	1.72	1.61	1.26	1.48
	单点 E	0.98	1.35	1.14	1.18	1.07	0.99	1.06
	差分 E	0.57	0.55	0.52	0.59	0.61	0.50	0.56
1003	单点 N	1.38	1.27	1.27	1.42	1.45	1.37	1.16
u095	差分 N	0.84	0.65	0.62	0.72	0.75	0.63	0.67
	单点 U	2.66	3.04	2.74	3.11	2.86	2.71	2.74
	差分 U	1.47	1.50	1.31	1.60	1.54	1.25	1.49
	单点 E	1.21	1.41	1.29	1.49	1.04	0.97	1.27
	差分 E	0.56	0.55	0.51	0.59	0.61	0.49	0.56
4004	单点 N	1.08	1.18	1.19	1.33	1.41	1.37	1.05
u094	差分 N	0.77	0.58	0.59	0.70	0.78	0.65	0.65
	单点 U	2.27	3.10	2.82	3.37	3.10	2.90	2.49
	差分 U	1.44	1.46	1.28	1.58	1.67	1.32	1.46
	单点 E	0.92	1.15	1.02	1.17	1.01	0.90	1.00
	差分 E	0.57	0.55	0.53	0.61	0.60	0.47	0.58
d095	单点 N	1.36	1.16	1.21	1.34	1.23	1.13	1.15
u095	差分 N	0.79	0.59	0.59	0.70	0.75	0.62	0.65
	单点 U	2.12	2.69	2.40	2.89	2.71	2.43	2.35
	差分 U	1.44	1.42	1.24	1.56	1.59	1.26	1.54
	单点 E	1.04	1.22	1.06	1.15	1.02	0.95	1.02
	差分 E	0.60	0.58	0.52	0.60	0.61	0.49	0.56
4096	单点 N	1.21	1.12	1.14	1.23	1.29	1.21	1.06
uv70	差分 N	0.81	0.60	0.60	0.70	0.77	0.62	0.65
	单点 U	2.52	3.04	2.83	3.22	2.43	2.21	2.66
	差分 U	1.49	1.45	1.28	1.57	1.59	1.29	1.40

表 4.2(b) d091-d097 加入改正数前后的 14 个用户站定位误差的 RMS(单位: m)

5/17				H H J I I /				
	单点 E	1.14	1.23	1.16	1.32	1.11	1.02	1.13
	差分 E	0.58	0.55	0.53	0.58	0.63	0.48	0.56
1007	单点 N	1.31	1.17	1.27	1.36	1.38	1.29	1.07
av97	差分 N	0.80	0.61	0.59	0.72	0.76	0.62	0.66
	单点 U	2.26	2.59	2.43	2.86	2.78	2.83	2.34
	差分 U	1.48	1.45	1.28	1.58	1.60	1.29	1.39

续表 4.2(b) d091-d097 加入改正数前后的 14 个用户站定位误差的 RMS(单位: m)

为更加直观反映差分改正对定位结果精度提升情况,现以公式:

$$ratio = \frac{RMS_{undiff} - RMS_{diff}}{RMS_{undiff}} \cdot 100\%$$
(4.1)

表示经差分改正后的定位误差精度提高的比例。表 4.3(a)-表 4.3(b)列出了年积日 d091-d097,14 个测站各方向上差分改正精度提高的百分比。

DOY	E/N/U	GXNN	GZGY	JXJA	NMAG	QHBM	FJWY	HAQS
	E	55%	52%	54%	58%	51%	57%	57%
d091	Ν	53%	53%	52%	53%	54%	47%	52%
	U	50%	50%	53%	49%	48%	49%	51%
	Ε	44%	44%	46%	46%	44%	48%	46%
d092	Ν	49%	51%	51%	47%	53%	52%	55%
	U	43%	42%	40%	45%	50%	37%	45%
	Ε	56%	55%	51%	44%	52%	49%	50%
d093	Ν	44%	46%	45%	49%	47%	46%	51%
	U	45%	48%	45%	55%	48%	45%	50%
	Е	59%	57%	57%	59%	54%	58%	59%
d094	Ν	47%	44%	43%	35%	49%	44%	45%
	U	48%	50%	44%	44%	52%	45%	45%
	Ε	45%	47%	42%	45%	45%	44%	47%
d095	Ν	42%	44%	44%	49%	48%	46%	50%
	U	41%	40%	40%	38%	47%	37%	40%
	Е	48%	50%	46%	49%	48%	46%	46%
d096	Ν	43%	41%	44%	42%	41%	39%	44%
	U	47%	49%	50%	50%	47%	49%	49%
	E	53%	50%	50%	53%	51%	52%	54%
d097	Ν	43%	45%	40%	47%	46%	39%	48%
	U	41%	38%	39%	43%	42%	42%	41%

表 4.3(a) 年积日 d091-d097 各测站差分改正定位精度提高比例

DOY	E/N/U	NMAL	SCJU	SNMX	SNYA	XJHT	XJKC	ZJJD
	Е	52%	54%	56%	54%	41%	49%	55%
d091	Ν	48%	55%	56%	54%	52%	59%	45%
	U	42%	55%	56%	50%	45%	53%	45%
	Е	39%	47%	47%	52%	39%	42%	45%
d092	Ν	38%	53%	55%	53%	50%	56%	49%
	U	39%	49%	48%	49%	41%	51%	40%
	Ε	42%	59%	54%	50%	43%	49%	47%
d093	Ν	39%	49%	51%	49%	48%	54%	42%
	U	45%	51%	52%	49%	46%	54%	46%
	Е	54%	61%	60%	60%	41%	49%	56%
d094	Ν	29%	51%	50%	47%	45%	53%	38%
	U	37%	53%	55%	53%	46%	54%	41%
	Ε	38%	52%	48%	48%	41%	48%	42%
d095	Ν	42%	49%	51%	48%	39%	45%	43%
	U	32%	47%	48%	46%	41%	48%	34%
	Ε	42%	52%	51%	48%	40%	48%	45%
d096	Ν	33%	46%	47%	43%	40%	49%	39%
	U	41%	52%	55%	51%	35%	42%	47%
	E	49%	55%	54%	56%	43%	53%	50%
d097	Ν	39%	48%	54%	47%	45%	52%	38%
	U	35%	44%	47%	45%	42%	54%	41%

表 4.3(b) 年积日 d091-d097 各测站差分改正定位精度提高比例

由表 4.3(a)-4.3(b)可知,上述 16个广泛分布于中国大陆的用户站,进行各用户站 8 天的实时定位计算,经过广域差分改正后,E/N/U方向定位精度能提升达 40%-50%,水平方向和高程方向的定位精度都有明显改进。差分改正后水平方向误差 RMS 约为 0.4-0.7m,可满足水平方向亚米级伪距动态定位的需求,显著提高常规单点定位(SPP)的精度。

4.2.2 在 ECEF 坐标系和 RTN 坐标系下求解卫星轨道误差的比较

通常情况下,由广播星历求得的卫星位置为地心地固系(ECEF)下的坐标, 这是由于地面用户坐标需要在 ECEF 坐标系下表达所决定。而 RTN 地心轨道平 面坐标系能够更加直观地描述在某颗卫星的运行轨道平面内径向、切向及法向的 误差大小。RTN 坐标系的坐标原点为卫星质心,R 轴为径向,与地心到卫星质心 的向径方向一致。T 轴为切向,在卫星轨道面内与 R 轴垂直,指向卫星运动方向。 N 轴为轨道面正法向,与 R 轴、T 轴组成右手系(雷辉, 2007)。

图 4.9 为利用 IGS 精密星历为卫星轨道位置真值, 求得某单天 PRN30 卫星

在 RTN 坐标系下的误差曲线。从图中可以看出在 RTN 方向上,广播星历误差表现为明显的周期波动特性(张守建等,2007)。若将轨道误差的待求参数从 ECEF 坐标系下旋转到 RTN 方向上求解,能否得到更准确的改正数使得用户差分定位 精度进一步提高?本节进行了相应的探索研究。



图 4.9 某单天 PRN30 卫星在 RTN 方向的卫星轨道真误差(与精密星历比较)

要将地心地固坐标系转换到 RTN 坐标系下,首先需要将 ECEF 坐标系转换 到地心天球坐标系(惯性系)下,其转换关系如图 4.10 所示(党亚民等,2007)。



图 4.10 地心地固系到天球坐标系之间的转换关系

对应的地心地固系到天球坐标系的转换公式如下:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = U^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ECEF}$$
(4.2)

设地心天球坐标系下的坐标为 $(x, y, z)^{T}$,则 RTN 坐标系下的坐标 $(r, t, n)^{T}$,可由下式求得:

$$\begin{pmatrix} r \\ t \\ n \end{pmatrix} = G^T \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$
(4.3)

其中,

$$G = \begin{pmatrix} \hat{\vec{R}} & \hat{\vec{T}} & \hat{\vec{N}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\vec{R}}_x & \hat{\vec{T}}_x & \hat{\vec{N}}_x \\ \hat{\vec{R}}_y & \hat{\vec{T}}_y & \hat{\vec{N}}_y \\ \hat{\vec{R}}_z & \hat{\vec{T}}_z & \hat{\vec{N}}_z \end{pmatrix}$$
(4.4)

且有 $G^T = G^{-1}$ 。矩阵G中对应的各元素求解如下:

$$\hat{\overline{R}} = \frac{\overline{R}}{R} = \left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}, \frac{z}{R}\right)^T$$
(4.5)

$$R = \sqrt{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)}$$
(4.6)

$$\hat{\vec{N}} = \frac{\vec{R} \times \vec{R}}{\left|\vec{R} \times \dot{\vec{R}}\right|} \tag{4.7}$$

$$\vec{R} \times \dot{\vec{R}} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x & y & z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}$$
(4.8)

$$\hat{\vec{T}} = \hat{\vec{N}} \times \hat{\vec{R}} \tag{4.9}$$

在利用公式 3.29 求解卫星轨道误差参数(ECEF 坐标系)时,

$$\Delta \tilde{\rho}_{m}^{k} - \Delta \tilde{\rho}_{p}^{k} = (l_{m}^{k} - l_{p}^{k}) \cdot \Delta R^{k}$$

$$= (l_{m}^{k} - l_{p}^{k}) \cdot U \cdot G \cdot \begin{pmatrix} dr \\ dt \\ dn \end{pmatrix}_{RTN}$$

$$(4.10)$$

由此可求得在 RTN 坐标系下的卫星轨道误差参数,在进行差分定位时,再将 RTN 坐标系下的卫星轨道参数转换到 ECEF 坐标系下。

为比较两种参数求解方法对用户定位精度的提高情况,本文基于两种不同求 解方法得到的卫星轨道误差改正数,利用QHGE用户站进行伪距差分定位实验, 以用户实际差分定位精度来评估两者的差异。表 4.4 列出QHGE用户站在ECEF 坐标系和RTN坐标系下求解卫星轨道误差参数时,对用户差分定位误差的RMS 统计值。

坐标系	E	Ν	U
ECEF	0.51	0.58	1.29
RTN	0.51	0.57	1.29

表 4.4 两种坐标系下轨道误差改正数对差分定位误差的 RMS 统计(单位: m)

从表 4.4 可以看出,两种计算方法的差分定位精度没有明显差异。即便采用 了地心地固系到 RTN 坐标系转换的方法求解卫星轨道误差改正数,从用户差分 定位的实际应用来看,两种计算方法的结果几乎完全相同,对差分定位不造成显 著影响。

4.2.3 三种类型差分改正参数对差分定位的影响

广域差分系统中,卫星部分包括4个参数(3个卫星轨道误差参数和1个星 钟误差参数)。由于两类误差参数值均很小,若将其中一类参数值设为0,只求 解另一类参数,则此时参数的个数有两种情况:3个"等效"卫星轨道误差参数 或1个"等效"星钟误差参数(所谓"等效",是将设为0而实际非0的误差项 划归到"等效"参数中求解)。本文基于三种不同类型的差分改正参数(4参数、 3 个等效轨道误差参数和1 个等效钟差参数),进行用户差分定位实验。表4.5 列出了用户站 GZGY 差分改正后伪距定位的误差的 RMS 统计结果。

参数类型	E	Ν	U
4 参数	0.57	0.58	1.51
3 参数	0.58	0.57	1.52
1 参数	0.58	0.57	1.52

表 4.5 三种不同参数下 GZGY 站差分定位误差的 RMS(单位: m)

从表 4.5 中,可以看出无论采用何种参数个数进行广域差分改正数求解,用 户差分定位的精度均相同。3 参数和 1 参数条件下的差分定位结果同于 4 参数定 位结果,是由于在 3 参数或 1 参数求解差分改正数时,虽并非理论意义上真实的 轨道误差或钟差改正数,另外一项误差已包含在"等效"参数中。因此,将 3 参数或 1 参数的差分改正数播发给用户时,能整体上提高用户的定位精度,用户 差分定位的结果与 4 参数求解时相同。

4.3 广域差分改正在动态精密定位(PPP)中的应用

4.3.1 广域差分动态 PPP 程序设计

精密单点定位(PPP)利用相位和伪距观测值,并需要高精度的卫星轨道和 卫星钟差参数,同时需要考虑更精确的其他误差改正模型,以达到分米级以上的 定位精度(刘经南等,2002; 王解先等,2011)。

通过广域差分在伪距单点定位中的应用,利用卫星轨道误差、钟差误差差分 改正数能够改正广播星历误差,有效提升常规 SPP 定位精度。基于此,探讨了 利用广域差分改正数,并基于广播星历进行动态精密单点定位(PPP)的计算。 本文在开源软件 RTKLIB(Takasu, 2013)的基础上,编制了广域差分动态 PPP 程序, 程序设计流程图如图 4.11 所示。



图 4.11 广域差分动态 PPP 程序设计流程图

图 4.11 中,程序的相关模型实现方法如下:

①由于为实时动态差分定位,程序采用广播星历实时模式(使用当前历元之前最近邻星历)计算卫星的位置坐标和钟差,并进行广域差分卫星轨道及钟差误 差改正;

②电离层改正采用无电离层组合(公式 3.6, 3.7) 消去;

③对流层改正,利用 SBAS 对流层模型计算天顶总延迟初始值,利用

Saastmoinen 求解天顶方向干延迟,随机游走的方式参数求解天顶湿延迟。映射 函数采用 NMF(Niell, 1996);

④接收机钟差和位置坐标各历元独立解算4个参数,且各历元均先进行伪距 单点定位解算,以提供给4个参数初始估计值,滤波过程采用白噪声处理参数;

⑤在未出现周跳时,将模糊度参数作为常数,利用卡尔曼滤波进行连续静态 求解该常数;发生周跳时,模糊度作为新的常数,该历元的滤波过程采用白噪声 处理模糊度参数;

⑥相对论效应改正采用 IERS 规范进行计算;

⑦天线相位中心改正、固体潮改正、海洋负荷改正等不予考虑。

4.3.2 基于广域差分改正的精密定位应用算例

广域差分动态 PPP 程序编制完成后,同样选取中国大陆地区 GXNN 等 14 个用户站进行差分定位实验。图 4.12-图 4.16 依次为其中 5 个测站动态精密单点 定位(kinematic-PPP)差分改正前后的定位误差结果。



图 4.12 GXNN 站精密单点定位差分改正前后结果



图 4.13 GZGY 站精密单点定位差分改正前后结果



图 4.14 JXJA 站精密单点定位差分改正前后结果



图 4.15 NMAG 站精密单点定位差分改正前后结果



图 4.16 QHBM 站精密单点定位差分改正前后结果

上述5个测站的精密单点定位(PPP)差分改正前后定位误差的RMS统计如表 4.6 所示。

用户站	单点 E	差分 E	单点 N	差分 N	单点 U	差分 U
GXNN	1.19	0.26	0.88	0.30	2.26	0.74
GZGY	1.27	0.26	0.97	0.34	2.48	0.89
JXJA	1.27	0.26	0.93	0.33	2.70	0.87
NMAG	1.14	0.19	1.03	0.24	1.85	0.48
QHBM	1.27	0.28	1.03	0.37	2.32	0.72

表 4.6 d090 差分前后各用户站 PPP 定位误差的 RMS 统计结果(单位: m)

将统计结果绘制为直方图:



图 4.17 差分前后动态 PPP 误差的 RMS 直方图

从表 4.6 和图 4.17 中可以看出,利用上述 16 个参考站得到的卫星轨道及钟 差改正数,可使得动态精密单点定位的误差,水平方向达到 0.2 - 0.4m 的精度, 高程方向在差分改正后精度更是达到亚米级。同样,为充分说明这一定位结果的 普遍性,进行多天多用户站差分定位解算,表 4.7(a)-表 4.7(b)中列出了年积日 d091-d097 各天 14 个测站的差分改正前后动态 PPP 误差的 RMS 统计结果。

DOY	E/N/U	GXNN	GZGY	JXJA	NMAG	QHBM	FJWY	HAQS
	单点 E	0.95	1.02	1.05	0.99	1.00	1.05	1.01
	差分 E	0.24	0.26	0.27	0.19	0.28	0.25	0.24
1001	单点 N	0.93	1.01	0.97	0.99	1.22	0.95	0.96
a091	差分 N	0.25	0.32	0.32	0.26	0.38	0.33	0.31
	单点 U	2.42	2.47	2.69	1.69	2.43	2.43	2.18
	差分 U	0.81	0.84	0.89	0.49	0.74	0.89	0.76

表 4.7(a) d091-d097 加入改正数前后 14 个用户站动态 PPP 误差的 RMS 统计结果(单位:m)

续表 4	.7(a) d091-	d097 加入词	改正数前后	14 个用户	站动态 PP	P 误差的 F	MS 统计结	告果(m)
	单点 E	0.74	0.77	0.79	0.72	0.79	0.78	0.70
	差分 E	0.24	0.25	0.26	0.20	0.27	0.24	0.21
1002	单点 N	0.81	0.94	0.92	0.81	1.13	0.90	0.92
a 092	差分 N	0.26	0.32	0.34	0.27	0.37	0.32	0.28
	单点 U	2.27	2.14	2.12	1.46	2.43	1.83	1.69
	差分 U	0.82	0.88	0.95	0.51	0.76	0.91	0.67
	单点 E	1.08	1.06	0.95	0.73	1.04	0.89	0.86
	差分 E	0.27	0.27	0.27	0.20	0.27	0.27	0.21
2002	单点 N	0.84	0.95	0.93	0.95	1.07	0.90	0.99
d093	差分 N	0.34	0.37	0.36	0.27	0.37	0.35	0.29
	单点 U	2.35	2.30	2.37	1.82	2.21	2.34	2.02
	差分 U	0.73	0.84	0.90	0.54	0.69	0.98	0.70
	单点 E	1.08	1.10	1.07	0.91	1.12	1.02	1.02
	差分 E	0.23	0.26	0.26	0.19	0.26	0.25	0.22
1004	单点 N	0.72	0.84	0.81	0.66	1.04	0.76	0.78
u094	差分 N	0.25	0.30	0.31	0.26	0.36	0.33	0.28
	单点 U	2.29	2.36	2.28	1.46	2.30	2.13	1.91
	差分 U	0.67	0.79	0.84	0.49	0.69	0.86	0.73
	单点 E	0.88	0.90	0.85	0.65	0.90	0.80	0.75
	差分 E	0.31	0.27	0.28	0.18	0.27	0.26	0.21
4005	单点 N	0.84	0.91	0.93	0.91	1.06	0.92	0.91
u095	差分 N	0.31	0.32	0.36	0.26	0.36	0.34	0.30
	单点 U	2.19	2.06	2.26	1.33	2.13	2.01	1.80
	差分 U	0.85	0.83	0.89	0.48	0.71	0.91	0.69
	单点 E	0.88	0.93	0.86	0.76	0.94	0.82	0.81
	差分 E	0.27	0.27	0.28	0.19	0.28	0.26	0.23
4096	单点 N	0.78	0.79	0.91	0.84	1.01	0.85	0.89
u 070	差分 N	0.29	0.31	0.34	0.26	0.38	0.34	0.29
	单点 U	2.39	2.40	2.61	1.56	2.28	2.49	2.10
	差分 U	0.78	0.81	0.77	0.53	0.76	0.86	0.72
	单点 E	0.99	1.03	0.95	0.90	1.07	0.93	0.93
	差分 E	0.26	0.28	0.27	0.20	0.30	0.27	0.22
4007	单点 N	0.77	0.86	0.82	0.88	1.08	0.78	0.88
u077	差分 N	0.30	0.32	0.36	0.27	0.40	0.35	0.30
	单点 U	1.98	1.91	2.10	1.47	2.04	2.03	1.77
	差分 U	0.80	0.89	0.85	0.52	0.79	0.90	0.73

DOY	E/N/U	NMAL	SCJU	SNMX	SNYA	XJHT	XJKC	ZJJD
	单点 E	1.00	1.06	0.95	1.01	0.88	0.83	1.05
	差分 E	0.24	0.27	0.24	0.26	0.24	0.20	0.26
3001	单点 N	1.06	1.09	1.08	1.11	1.13	1.11	0.97
u091	差分 N	0.32	0.33	0.30	0.31	0.34	0.26	0.36
	单点 U	1.79	2.75	2.45	2.33	2.14	1.83	2.29
	差分 U	0.62	0.86	0.65	0.74	0.71	0.67	0.85
	单点 E	0.74	0.79	0.72	0.86	0.90	0.83	0.77
	差分 E	0.25	0.25	0.22	0.25	0.26	0.22	0.25
2002	单点 N	0.89	1.08	0.98	1.05	1.09	1.04	0.88
0092	差分 N	0.37	0.33	0.28	0.31	0.33	0.26	0.33
	单点 U	1.64	2.49	1.96	2.32	2.09	1.91	1.78
	差分 U	0.74	0.90	0.65	0.81	0.72	0.63	0.72
	单点 E	0.76	1.35	0.94	0.93	0.96	0.87	0.88
	差分 E	0.23	0.55	0.23	0.25	0.26	0.24	0.25
2002	单点 N	1.02	1.27	1.00	1.12	1.06	0.97	0.89
0095	差分 N	0.35	0.65	0.30	0.32	0.34	0.27	0.36
	单点 U	1.82	3.04	2.05	2.16	2.16	1.93	2.27
	差分 U	0.64	1.05	0.59	0.72	0.68	0.64	0.78
	单点 E	0.94	1.17	1.09	1.21	0.90	0.84	1.04
	差分 E	0.23	0.24	0.23	0.25	0.27	0.21	0.24
1004	单点 N	0.70	0.94	0.87	0.98	0.96	0.94	0.76
u094	差分 N	0.32	0.29	0.28	0.31	0.36	0.29	0.34
	单点 U	1.56	2.49	2.21	2.39	2.23	2.09	2.03
	差分 U	0.60	0.79	0.61	0.73	0.80	0.62	0.74
	单点 E	0.67	0.94	0.84	0.87	0.88	0.81	0.78
	差分 E	0.23	0.26	0.25	0.26	0.26	0.21	0.26
4005	单点 N	0.97	0.93	0.96	1.00	0.91	0.84	0.90
u095	差分 N	0.34	0.32	0.31	0.33	0.34	0.28	0.35
	单点 U	1.47	2.21	1.87	2.04	1.85	1.68	1.97
	差分 U	0.63	0.74	0.59	0.75	0.70	0.65	0.82
	单点 E	0.79	0.98	0.87	0.88	0.85	0.77	0.83
	差分 E	0.25	0.27	0.25	0.26	0.28	0.24	0.26
9006	单点 N	0.90	0.90	0.93	0.99	0.82	0.79	0.86
u070	差分 N	0.34	0.32	0.31	0.32	0.35	0.27	0.35
	单点 U	1.66	2.51	2.31	2.37	1.69	1.51	2.32
	差分 U	0.64	0.81	0.66	0.78	0.76	0.65	0.71

表 4.7(b) d091-d097 加入改正数前后 14 个用户站动态 PPP 误差的 RMS 统计结果(单位: m)

	单点 E	0.93	1.06	1.00	1.08	1.00	0.95	0.94
	差分 E	0.24	0.26	0.25	0.26	0.29	0.24	0.25
1007	单点 N	0.95	0.94	1.00	1.05	1.00	0.94	0.77
au97	差分 N	0.34	0.32	0.32	0.33	0.36	0.29	0.36
	单点 U	1.57	2.07	1.92	2.09	2.04	1.83	1.90
	差分 U	0.63	0.78	0.63	0.76	0.73	0.67	0.76

续表 4.7(b) d091-d097 加入改正数前后 14 个用户站动态 PPP 误差的 RMS 统计结果(m)

同 4.2 节动态伪距差分定位,利用公式(4.1)计算差分改正后动态 PPP 定 位精度提高的比例,并列表如表 4.8(a)-4.8(b)所示。

DOY	E/N/U	GXNN	GZGY	JXJA	NMAG	QHBM	FJWY	HAQS
	Ε	75%	75%	74%	81%	72%	76%	76%
d091	Ν	73%	68%	67%	74%	69%	65%	68%
	U	67%	66%	67%	71%	70%	63%	65%
	Ε	68%	68%	67%	72%	66%	69%	70%
d092	Ν	68%	66%	63%	67%	67%	64%	70%
	U	64%	59%	55%	65%	69%	50%	60%
	Ε	75%	75%	72%	73%	74%	70%	76%
d093	Ν	60%	61%	61%	72%	65%	61%	71%
	U	69%	63%	62%	70%	69%	58%	65%
	Е	79%	76%	76%	79%	77%	75%	78%
d094	Ν	65%	64%	62%	61%	65%	57%	64%
	U	71%	67%	63%	66%	70%	60%	62%
	Е	65%	70%	67%	72%	70%	68%	72%
d095	Ν	63%	65%	61%	71%	66%	63%	67%
	U	61%	60%	61%	64%	67%	55%	62%
	Е	69%	71%	67%	75%	70%	68%	72%
d096	Ν	63%	61%	63%	69%	62%	60%	67%
	U	67%	66%	70%	66%	67%	65%	66%
	E	74%	73%	72%	78%	72%	71%	76%
d097	Ν	61%	63%	56%	69%	63%	55%	66%
	U	60%	53%	60%	65%	61%	56%	59%

表 4.8(a) 年积日 d091-d097 各测站差分改正后动态 PPP 定位精度提高比例

表 4.8(b) 年积日 d091-d097 各测站差分改正后动态 PPP 定位精度提高比例

DOY	E/N/U	NMAL	SCJU	SNMX	SNYA	XJHT	XJKC	ZJJD
	Ε	76%	75%	75%	74%	73%	76%	75%
d091	Ν	70%	70%	72%	72%	70%	77%	63%
	U	65%	69%	73%	68%	67%	63%	63%

	Ε	66%	68%	69%	71%	71%	73%	68%
d092	Ν	58%	69%	71%	70%	70%	75%	63%
	U	55%	64%	67%	65%	66%	67%	60%
	Ε	70%	59%	76%	73%	73%	72%	72%
d093	Ν	66%	49%	70%	71%	68%	72%	60%
	U	65%	65%	71%	67%	69%	67%	66%
	Ε	76%	79%	79%	79%	70%	75%	77%
d094	Ν	54%	69%	68%	68%	63%	69%	55%
	U	62%	68%	72%	69%	64%	70%	64%
	Ε	66%	72%	70%	70%	70%	74%	67%
d095	Ν	65%	66%	68%	67%	63%	67%	61%
_	U	57%	67%	68%	63%	62%	61%	58%
	Ε	68%	72%	71%	70%	67%	69%	69%
d096	Ν	62%	64%	67%	68%	57%	66%	59%
	U	61%	68%	71%	67%	55%	57%	69%
	Ε	74%	75%	75%	76%	71%	75%	73%
d097	Ν	64%	66%	68%	69%	64%	69%	53%
	U	60%	62%	67%	64%	64%	63%	60%

续表 4.8(b) 年积日 d091-d097 各测站差分改正后动态 PPP 定位精度提高比例

由表 4.8 可知,动态精密单点定位经过差分改正后, E/N/U 方向定位精度平均提高了 70%左右。同时,14 个用户站多天计算结果表明,差分改正后水平方向定位误差均小于 0.4m,高程方向误差均小于 1m。显然,较之伪距单点定位,动态精密定位利用卫星轨道及钟差改正数能更大程度上提高定位精度,主要是由于精密定位采用了更高精度相位观测值。更为重要的是,卫星轨道及钟差改正数能有效提高利用实时广播星历获得的卫星位置坐标和钟差的准确性。也即,在不需要实时精密星历的前提下,只需利用实时广域差分改正数,便能实现分米级的动态精密定位。

4.4 广域参考站密度对用户差分定位的影响

前文通过中国大陆的 16 个陆态网络 GNSS 观测站模拟构建了服务于中国区 域的广域差分参考网络。对于常规差分技术而言,差分定位的精度会在一定程度 上随着参考站数目的增加而有所提高。针对广域差分参考站密度对用户差分定位 的影响,本节进行了讨论。

在已有的 16 个参考站(如图 4.1)的基础上,另外选取 22 个、30 个均匀分 布的陆态网络观测站建立新的广域参考网,并进行比较。不同密度的参考站分布 分别如图 4.18 和图 4.19。

52



为比较不同广域参考站密度对用户差分定位的影响,表 4.9 和表 4.10 中分别 列出了 5 个用户站伪距定位(SPP)和动态精密定位(PPP)差分改正后定位误

差的	RMS	统计	量。	5
----	-----	----	----	---

表 4.9 广域差分改正后的 SPP 误差的 RMS 统计量(单位: m)

_							
	用户站	GXNN	GZGY	JXJA	NMAG	QHBM	
	E_16	0.58	0.59	0.60	0.48	0.62	
	E_22	0.58	0.59	0.60	0.48	0.62	
	E_30	0.58	0.59	0.60	0.48	0.62	
	N_16	0.59	0.65	0.64	0.63	0.75	
	N_22	0.59	0.65	0.64	0.62	0.75	
	N_30	0.58	0.65	0.64	0.62	0.75	
	U_16	1.55	1.56	1.62	1.17	1.48	
	U_22	1.55	1.55	1.62	1.16	1.47	
	U_30	1.55	1.55	1.62	1.16	1.47	

表 4.10 广域差分改正后的 PPP 误差的 RMS 统计量(单位: m)

用户站	GXNN	GZGY	JXJA	NMAG	QHBM
E_16	0.26	0.26	0.26	0.19	0.28
E_22	0.27	0.26	0.27	0.19	0.28
E_30	0.26	0.26	0.26	0.19	0.28
N_16	0.30	0.34	0.33	0.24	0.37
N_22	0.30	0.34	0.33	0.23	0.37
N_30	0.29	0.34	0.32	0.23	0.37
U_16	0.74	0.89	0.87	0.48	0.72
U_22	0.75	0.88	0.87	0.47	0.71
U_30	0.76	0.88	0.87	0.47	0.71

比较表 4.9 和表 4.10 中选用不同参考站密度的广域差分系统差分改正后 E/ N/U 方向上的 RMS 大小可知,不同参考站密度下的用户差分定位误差 RMS 值 基本保持不变,也即用户差分定位结果精度并未随着广域差分参考站数目的增加 而提高。这说明在广域差分系统中,只要参考站在覆盖范围内均匀分布且数目足 够的前提下,参考站密度与差分定位结果的精度不具有相关性。

4.5 小结

本章为本文的核心章节,包括模拟构建服务于中国区域的广域差分系统,介 绍该系统中卫星轨道误差及星钟误差的解算流程。同时将该广域差分系统改正数 用于动态伪距定位中,经过长期多个用户观测数据差分定位比较,水平方向的定 位精度保持在亚米级,高程方向差分后的定位精度提高达 50%。在动态伪距定位 应用的基础上,本文比较了在求解卫星轨道参数时采用 ECEF 坐标系和 RTN 坐 标系,伪距差分定位结果的异同。同时讨论了两种不同"等效"参数求解方法与 传统4参数(3个轨道误差参数和1个钟差误差参数)法,用户伪距差分定位结果的一致性。

本章介绍了广域差分动态 PPP 程序中相关模型的处理办法,并进行多天动态精密定位应用计算,结果表明,利用广域差分卫星轨道误差及星钟误差改正数,动态差分精密定位水平方向精度达到 0.2 - 0.4m,高程方向在差分改正后精度达到亚米级。

在动态伪距差分定位及精密定位应用的基础上,进一步比较不同广域参考站 密度对用户差分定位的影响,论证广域差分系统在利用较少参考站前提下,可在 较广地域范围内提升用户定位精度的优势。

第五章 结论与展望

在中国区域内提供高精度的 GNSS 差分服务是目前研究的热点,尤其是随着 北斗卫星导航系统在我国应用范围的拓展,需要建立起基于北斗的广域差分系统, 以满足广大用户高精度导航定位的应用需求。本文模拟构建了服务于中国区域的 GPS 广域差分系统,并重点研究卫星轨道及钟差误差改正数求解,对于进一步实 现服务于中国区域的广域差分北斗系统具有一定的参考价值。现将本文所做的主 要工作总结如下:

(1)介绍差分GPS技术的分类:单基准站差分、局域差分和广域差分。以实际算例说明单站差分技术可提高用户的定位精度,但遇到基准站故障时,可靠性差。相比较而言,局域差分具有更强的稳定性和可靠性,而广域差分则通过将误差进行分离,可实现较少基准站条件下、较广地域范围内的高精度差分定位。

(2) 重点介绍广域差分系统的卫星轨道及钟差改正数算法,以及求解过程中 的高精度 SBAS 对流层模型,处理参考站接收机钟差时的共视时间传递方法。并 通过卫星轨道误差参数的计算结果,比较了最小二乘与最小方差估计的异同。

(3) 以陆态网络 16 个基准站为基础,模拟构建了服务于中国区域的广域差 分系统,并用于多天多用户的差分定位实验。实测结果表明,利用广域差分改正 数进行动态伪距差分定位,水平方向定位精度稳定在亚米级,RMS 可达 0.5m, 水平方向及高程方向差分前后精度提高达 50%。并基于编制的差分动态 PPP 程 序进行实际应用分析,结果表明,利用广域差分卫星轨道误差及星钟误差改正数, 水平方向及高程方向差分改正后精度均达到亚米级,水平方向精度达到 2-4 dm。

(4) 基于用户差分定位实验,本文比较并分析了求解卫星轨道参数时采用 ECEF坐标系和 RTN 坐标系的一致性。同时讨论了两种不同"等效"参数("等 效"轨道误差、"等效"钟差)求解方法与传统 4 参数(3 个轨道误差参数和 1 个钟差误差参数)法在差分定位应用中的一致性。在动态伪距差分及精密差分定 位应用的基础上,讨论了不同广域参考站密度对用户差分定位的影响,论证广域 差分系统在利用较少参考站前提下,可在较广地域范围内提升用户定位精度。

本文通过求解广域差分系统的卫星轨道及钟差改正数,并将改正数应用于动态伪距及精密定位中,能显著提高用户定位精度。本文仍存在可进一步优化的地方:

(1)采用最小二乘估计或最小方差估计都不能准确求解卫星轨道误差参数,本质上由于地面测站逆向定位卫星时几何构型很差所决定的。因此,需要在解算过程中加入其他限制条件(比如动力学定轨模型等),才可能保证卫星轨道误差

56

参数的准确求解,而只有在获得准确的轨道误差参数的前提下,才能有效利用 RTN 坐标系下误差周期变化特性进行滤波平滑,进而实现真正意义上的轨道和 星钟误差的分离。

(2) 广域差分系统中除了差分改正数之外,还包括系统完好性参数等重要内容,本文虽未做涉及,但对于广域差分信号的性能评估具有重要意义,有必要做进一步研究。

致谢

随着论文的写作进入尾声,两年半时间的学习经历已成往昔。本文是在胡丛 玮和陈俊平两位老师的共同指导下完成的,在论文的选题、研究和撰写都倾注了 大量心血。感谢胡老师,初来同济时让我研究 RTKLIB,两年多的学习获益颇丰。 学习期间懈怠困惑时,胡老师都非常耐心地与我沟通,为我解惑,让我紧张的学 习生活宽慰许多。恩师低调踏实的工作作风,严谨求实的学术态度让我终生受益。 感谢上海天文台陈俊平研究员,在我论文撰写过程中,给予我大量宝贵的意见。 陈老师不仅在学术科研中为我答疑解惑,也以亲身经历教会我面对困难和压力所 需具备的勇气和责任。"迎难而上"背后是认真的态度和努力的脚步。

同时感谢学院的各位老师,特别是伍吉仓老师和王解先老师,在学习和生活 中给我以莫大帮助;感谢 LBS 课题组的刘春老师和姚连璧老师,有幸在参与项 目过程中得到两位老师的指点。感谢本科导师夏林元老师,一直以来给予我关心 和鼓励。

感谢 410 教研室的段兵兵、尹潇、张益泽、王成、吕志鹏、王明华师兄,韩 玲、连丽珍师姐,感谢同届的毕元、郑二龙、郭林英、宫能宝、赵婧文以及陈猛、 王君刚、胡一帆师弟,因为你们,学习生活中充满快乐。

感谢上海天文台的杨赛男、章洁君、陈倩等同学,在天文台的学习生活中, 你们给予我许多支持和帮助。

感谢我的父母,多年来你们为我倾注全部。感谢我的女友,虽千里之遥,初 心不改。

最后,感谢所有曾给予我帮助的人。

2015年3月

参考文献

- [1] 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.
- [2] Us-Air-Force. Current and Future Satellite Generations[EB/OL]. http://www.gps.gov/sys -tems/ gps/space/#III
- [3] 周善石. 简化广域差分GPS系统在中国区域的建立与试算[D]: 同济大学, 2007.
- [4] 智遂强. 导航卫星实时定轨相关技术研究[D]: 解放军信息工程大学, 2012.
- [5] Muellerschoen R J, Reichert A, Kuang D, et al. Orbit determination with NASA' s high accuracy real-time Global Differential GPS System[C], 2001.
- [6] Scott. Real Time Precise Orbit&Clock Determination[J]. Thales research and Technology Ltd., 2005.
- [7] 楼益栋,施闯,葛茂荣等.GPS卫星实时精密定轨及初步结果分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,(08):815-817.
- [8] 黄丁发,李成钢,吴耀强等.GPS/VRS实时网络改正数生成算法研究[J]. 测绘学报,2007, (03): 256-261.
- [9] Tsai Y. Wide area differntial operation of the global positioning system: ephemeris and clock algorithms[D]: Stanford University, 1999.
- [10] Walter T, Hansen A, Enge P. Validation of the WAAS MOPS integrity equation[C], 1999.
- [11] 曹月玲. BeiDou区域导航系统广域差分及完好性监测研究[D]. 上海:中国科学院上海天 文台, 2014.
- [12] 李孝辉, 蔡成林, 吴海涛等. 广域差分系统星钟和星历误差修正新方法研究[C]. 中国北京, 2010.
- [13] 蔡成林,李孝辉,吴海涛. 广域差分新方法的定位性能与差分网优化布局[J]. 宇航学报, 2009, (04): 1404-1409.
- [14] 焦海松,王红芳,姚飞娟.卫星星历误差对GPS定位精度的影响与分析[EB/OL]. [01].
- [15] Hofman-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more[M]. Austria: SpringerWienNewYork, 2008.
- [16] 章红平. 基于地基GPS的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]: 中国科学院研究生院 (上海天文台), 2006.
- [17]Enge P, Walter T, Pullen S, et al. Wide area augmentation of the global positioning system[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(8): 1063-1088.
- [18] Chao Y. Real time implementation of the wide area augmentation system for the global positioning system with an emphasis on Ionospheric modeling[M], 1997.
- [19] 王解先. GPS精密定轨与定位[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [20] Rtca. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment[M]: RTCA, 1999.
- [21] Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202.
- [22] 王维, 王解先, 高俊强. GPS周跳探测的方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, (06): 687-690.
- [23] 杨永平. GPS相位平滑伪距差分定位技术的研究及应用[D]: 河海大学, 2005.

- [24] 吴继忠,施闯,方荣新. TurboEdit单站GPS数据周跳探测方法的改进[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2011, (01): 29-33.
- [25] Penna N, Dodson A, Chen W. Assessment of EGNOS tropospheric correction model[J]. The Journal of Navigation, 2001, 54(01): 37-55.
- [26] Collins J P. Assessment and Development of a Tropospheric Delay Model for Aircraft Users of the Global Positioning System[R]. Fredericton, N. B., 1999.
- [27] Subirana J S, Zornoza J M J, Hern ández-Pajares M. Tropospheric Delay[EB/OL]. http://www.navipedia.net/index.php/Tropospheric_Delay#cite_note-3
- [28] van Leeuwen S S, van der Marel H, Tossaint M, et al. Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area[J], 2004.
- [29] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978--2012), 1996, 101(B1): 3227-3246.
- [30] Hernandez-Pajares M, Juan-Zornoza J M, Subirana J S. GPS Data processing: code and phase Algorithms, Techniques and Recipes, 2008.
- [31] 刘大杰,于正林. 动态测量系统与卡尔曼滤波[J]. 测绘学报, 1988, (04): 254-262.
- [32] J. Sanz Subirana J M, Zornoza J, Hernández-Pajares M. Kalman Filter[EB/OL]. http://www.navipedia.net/index.php/Kalman_Filter
- [33] Enge P, Van Dierendonck A J. Design of the signal and data format for wide area augmentation of the Global Positioning System[C], 1996.
- [34] 王穗辉. 误差理论与测量平差[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [35] Luenberger D G. Optimization by vector space methods[M]: John Wiley \& Sons, 1968.
- [36] 郭静波. 线性最小方差估计的递推算法研究[EB/OL]. [04].
- [37] 郭斐,张小红,李星星等. GPS系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,(05):589-592.
- [38] 刘伟平,郝金明,李作虎.由广播星历解算卫星位置、速度及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010, (02): 144-147.
- [39] 李茂,陈俊平,胡丛玮等. 基于广播星历的卫星轨道及钟差改正模型研究[C]. 中国江苏 南京, 2014.
- [40] Xu G, Yang Y X, Sun H P, et al. Equivalence principle of GPS algorithms and an independent parametrization method[C], 2007.
- [41] 陈俊平, 吴斌, 胡小工等. 上海天文台陆态网络数据分析中心[C]. 中国广东广州, 2012.
- [42] 雷辉. 单颗导航卫星定轨研究[D]: 中国科学院研究生院(上海天文台), 2007.
- [43] 张守建,李建成,邢乐林等.两种IGS精密星历插值方法的比较分析[J]. 大地测量与地 球动力学,2007,(02):80-83.
- [44] 党亚民, 秘金钟, 成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [45] 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, (03): 234-240.
- [46] 王解先,陈俊平.GPS精密定位软件研制与应用[EB/OL].[05].
- [47] Takasu T. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning[EB/OL]. http://www.rtklib.com/
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

李茂, 男, 1989年2月生。

2012年7月毕业于中山大学地理信息系统专业获学士学位。

2012年9月入同济大学测绘与地理信息学院读硕士研究生。

已发表论文:

[1] 李茂,陈俊平,胡丛玮等. 基于广播星历的卫星轨道及钟差改正模型研究[C]. 第五届中国卫星导航学术年会论文集,2014.

[1] 尹潇,李茂,胡丛玮,伍吉仓. 格网对流层模型在 GPS 动态 PPP 解算中的应用分析[C]. 第四届中国卫星导航学术年会论文集,2013.

已投稿论文:

[1] 李茂, 胡丛玮, 陈俊平等. 基于 GNSS 伪距观测值和单点定位结果的卡尔曼滤波比较[J]. 大地测量与地球动力学.(在审)