

硕士学位论文

GPS/GLONASS 组合定位

姓名:	裴霄
学 号:	1020020411
所在院系:	测绘与地理信息学院
学科门类:	测绘科学与技术
学科专业:	大地测量学与测量工程
指导教师:	王解先 教授
副指导教则	币: 陈俊平 研究员

二O一三年二月



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

GPS/GLONASS Combined Positioning

Candidate: Xiao Pei Student Number: 1020020411 School/Department: College of Surveying and Geo-Informatics Discipline: Science and Technology of Surveying and Mapping Major: Geodesy and Surveying Engineering Supervisor: Prof. Jie-Xian Wang Prof. Jun-Ping Chen February, 2013

G P S / G L O N A S S 组合定位	
裴霄	
同济大学	

学位论文版权使用授权书

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

学位论文作者签名:

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名:

年 月 日

摘要

随着 GNSS 系统的完善与更新, 空中的可用卫星数量不断增加, 多模卫星导航定位技术得到了很大的发展, GNSS 系统向着双向、多频、多模的方向发展, GPS/GLONASS 双模伪距定位与精密单点定位的研究也将成为未来的一个重要研究方向。

本文介绍了 GPS 系统与 GLONASS 系统的组成、现状及其现代化进程,从 时间基准、空间基准、系统这三方面比较了两种定位系统的不同之处。介绍了传 统的 GPS/GLONASS 伪距定位以及精密单点定位的模型以及定位中各种误差的 减弱措施,并进行实例解算比较组合定位与单系统定位的差异,结果证明在伪距 定位时组合定位精度明显优于单系统定位;在精密单点定位时,组合定位收敛速 度优于单系统;在可用卫星数目不足的情况下,组合定位的优势体现得比较明显, 极大得提高了定位精度。

通过介绍 GPS/GLONASS 综合数据处理统一模型,介绍了系统时延偏差(包 括频间差)的产生原理,并用14个月78个测站的长期数据分析了系统时延偏差 的特性及其与测站接收机类型、天线类型的关系,最后提出了引入系统时延偏差 (包括频间差)的 GPS/GLONASS 组合定位模型,并通过实例解算分析了其在 GPS/GLONASS 组合定位中的应用。GPS 系统采用码分多址方式,而 GLONASS 系统采用频分多址方式,频率的不同会造成接收机硬件延迟的差异,从而形成系 统时延偏差,该值是 GPS/GLONASS 组合定位与单系统定位最大的不同之处。 传统的 GPS/GLONASS 组合伪距定位模型与精密单点定位模型中,没有考虑 GLONASS 卫星频间差的影响, 仅对同一测站上所有 GLONASS 卫星设置一个相 同的系统时延偏差参数。国内目前还没有论文对频间差的影响做详细深入的研究。 本文详细分析系统时延偏差(包括频间差)的性质,以及它对 GPS/GLONASS 组合伪距定位以及精密单点定位的作用,结果表明,①系统时延偏差、频间差与 接收机类型以及天线类型有关,其频间差与对应 GLONASS 卫星的频率号成线性 关系: ②引入系统时延偏差尤其是频间差进行 GPS/GLONASS 组合伪距定位可 以明显得提高定位精度,提高率达30%,尤其当可见卫星数目不足时,引入系统 时延偏差的作用更大;③由于频间差相对比较稳定,在接收机类型、天线类型相 对确定的情况下可以对其进行短期预报,利用预报值进行组合伪距定位,其精度 也明显优于传统的定位模型;④频间差的引入可以加快 GPS/GLONASS 组合精 密单点定位的收敛速度,但是对其坐标精度没有影响;⑤不考虑系统时延偏差包

同济大学 硕士学位论文 摘要

括频间差的 GPS/GLONASS 组合精密单点定位同样能够得到很到的坐标结果, 只是系统时延偏差会被接收机钟差以及模糊度所吸收。

关键词: GPS, GLONASS, 系统时延偏差, 频间差, PPP

ABSTRACT

As GNSS system develops and updates, the available satellites in space have increased, and multi-mode satellite navigation technology develops greatly. GNSS develops towards two-way, multi-frequency and multi-mode. So GPS/GLONASS dual-mode pseudorange positioning and PPP will become the one of the important research direction.

This paper introduces the GPS system and GLONASS system's composition, the present situation and their modernization processes, compares the differences of these twe system from the time reference, the space reference, and the system. The traditional GPS/GLONASS pseudorange positioning model and PPP model are introduced. Examples show ①combined positioning precision is better than single system; ②in PPP, the convergence speed of combined PPP is better than single system; ③when satellite number is insufficient, combined positioning has more apparent advantages, and greatly improves the positioning precision.

This paper also introduces GPS/GLONASS integrated data processing unified model, and analyses and discusses the characteristics of ISB(inter-system bias) and IFB(inter-frequency bias) parameter, which is based on the 14 months routine results of global GNSS network provided by the GNSS data analysis center at SHAO (SHA). GPS is based on code division multiple access(CDMA), while GLONASS system is based on frequency division multiple access (FDMA), different frequencies cause the difference of hardware delay, thus the ISB and IFB come up. In traditional GPS/GLONASS combined pseudorange positioning model and PPP model, IFB of GLONASS satellites is not included, there is only one ISB parameter for all satellites to the one station. There is barely no deep research on IFB in our country. This paper analyse the characteristics of ISB(including IFB), and its effect on GPS/GLONASS combined pseudorange positioning and PPP. Results show that: ①ISB、IFB is influenced by receiver type and antenna type; 2 Applying ISB(including IFB) into GPS/GLONASS PPP, precision will be improved by 30%, especially when the available satellites are not enough; ③as IFB is relatively stable, so we can apply its predicted value into combined positioning, and get better precision than traditional model; ④introducing ISB can accelerate the rate of convergence of GPS/GLONASS

combined PPP, but can not improve the coordinate precision; ⑤without consideration of ISB(including IFB), GPS/GLONASS combined PPP can also get the same coordinate result, ISB and IFB will be absorbed by receiver clock offset and ambiguity.

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

Key Words: GPS, GLONASS, ISB (inter-system bias), IFB (inter-frequency bias) ,PPP

目	录

摘要	I
第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本文的研究意义及主要内容	4
1.3.1 研究意义	4
1.3.2 研究内容	5
第2章 GPS与GLONASS系统概述	7
2.1 GPS系统简介	7
2.2 GLONASS系统简介	7
2.3 GPS与GLONASS系统的比较	9
2.3.1 坐标系统	10
2.3.2 时间系统	10
2.3.3 系统差异	11
第3章 GPS/GLOANSS组合定位模型	13
3.1 GPS/GLONASS组合伪距定位	13
3.1.1 GPS/GLONASS组合伪距定位模型	13
3.1.2 GPS/GLONASS组合伪距定位实例解算	16
3.2 GPS/GLONASS组合精密单点定位	20
3.2.1 GPS/GLONASS组合精密单点定位模型	21
3.2.2 GPS/GLONASS组合精密单点定位的误差源分析	22
3.2.3 GPS/GLONASS组合精密单点定位实例解算	30
第4章 GPS/GLONASS系统时差及频间差的特性	33
4.1 系统时差简介	33
4.2 GPS/GLONASS综合数据处理统一模型	34
4.3 GPS/GLONASS系统时延偏差v	37

同济大学 硕士学位论文 目录

4.4	·频间差特性分析	45
第5章	章 GPS/GLONASS 系统时差及频间差的应用	48
5.1	GPS/GLONASS 系统时差在伪距定位中的应用	48
5.2	GPS/GLONASS 系统时差在相位定位中的应用	54
5. 2. 1	定位模型及参数解算	54
5. 2. 2	系统时延偏差对GPS卫星参数的影响	59
5. 2. 3	系统时延偏差对GLONASS卫星参数的影响	61
第 6 章	章 总结与展望	64
6. 1	1 总结	64
6. 2	2 展望	65
致谢		67
参考文	文献	68
个人简	简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	73

第1章 绪论

1.1 概述

全球定位系统是一种全球性、连续、实时、高精度的无线电导航定位系统, 它能提供三维位置,速度和时间信息。随着导航系统的发展以及更新,多导航系 统的融合已经成为了发展的趋势。高精度多模观测数据的综合处理是实现多系统 融合的保证。

1993 年 GPS 系统工作卫星全部入轨工作,随着卫星导航系统在国民经济领域和军事领域应用的不断拓展,其重要性也越来越突出,各国都对卫星导航系统都给予了很高的重视。1996 年初 GLONASS 宣布系统建设完毕并正式投入使用,从此打破了 GPS 系统在卫星导航定位领域一统天下的局面,形成多系统兼容并用的新格局。由于经济、政治等种种原因,虽然 GLONASS 曾一度陷入困境,俄罗斯还是极力维持系统运行,最终迈开了突出困境的步伐,不断发射新的卫星从而完善其卫星星座,开始了 GLONASS 系统的现代化,其目的主要是在军事上避免受制于美国,在民用上和 GPS 竞争,赢得其应有的市场。

随着美国 GPS 的现代化,俄罗斯 GLONASS 系统的恢复,欧洲 GALILEO 系统的建设,以及中国 COMPASS 系统的后来居上,以及美国的 WAAS、欧洲 的 EGNOS、日本的 MSAS、印度的 GAGAN 等广域差分增强系统(SBAS)的建立,目前在轨导航卫星总数达 100 多颗。这样就提出了一个值得探讨的课题——如何 综合利用这些多系统的导航卫星资源。中国导航工作者在 2005 年起草国家中长 期科学和技术发展规划中曾提出建设多模集成卫星定位系统的概念,这是根据当时世界已经出现的多个卫星导航定位系统而提出来的一个如何利用多系统优势 的方案^[11]。多个频率多个卫星导航定位系统组合导航定位,不仅能够防止 GPS 系统对民用用户功能的限制,而且能够在一些观测环境比较恶劣的区域,为用户 提供稳定、可靠的定位结果,从而扩展用户的作业范围。CNSS 多频多系统组合 定位己成为国内外的一个热点研究方向,卫星导航定位面临着前所未有的机遇和 挑战。兼容 GPS, GLONASS, Galileo 以及北斗系统的双模、三模接收机已经成 为接收机研制开发、生产的趋势,这为多模导航定位和多模精密单点定位提供了 必要的硬件基础。

高精度多模观测数据的综合处理是实现多系统融合的保证。由于导航系统本 身时空基准的差异以及信号体制的不同,多系统综合数据处理需要全面考虑各种 系统偏差参数。就 GPS/GLONASS 综合数据处理而言,需要考虑 GPS/GLONASS 系统间时延偏差 ISB (Inter System Bias),包括:导航系统的系统时差、不同系 统信号在接收机里面伪距延迟的差异以及 GLONASS 卫星的频间差 IFB(Inter Frequency Bias)。其中,系统时差是系统时间的差异;伪距延迟的差异是接收机 对不同系统观测具有的不同硬件延迟;频间差是由于 GLONASS 系统采用频分多 址方式,造成不同频率的卫星信号在传播延迟存在一定的差异。

1.2 国内外研究现状

PPP 技术采用高精度的 GNSS 卫星轨道和卫星钟差,利用双频载波相位观测 值进行单站定位。精密单点定位这一概念最初是由 JPL 的 Zumberge 等人在 1997 年提出并在他们所开发的 GPS 数据处理软件 GIPSY 上将其实现的,GIPSY 单天 解的精度为:水平方向±1cm,高程方向为±2cm^{[2][3]}。Koub 使用传统的精密单 点定位模型定位得到了厘米级的定位精度^[4]。JPL 的 Muellerschoen 等人提出了全 球实时动态精密单点定位技术,其原理是利用非差双频载波相位观测值,通过进 行一段时间的初始化后再进行动态单历元精密单点定位^[5];加拿大卡尔加里大学 的高扬等人也对精密单点定位进行了深入研究,并提出了自己的精密单点定位模 型:P1-P2-CP 模型^{[6][7]}。后处理 PPP (Post-ProcessingPPP, PP-PPP)即就是采 用 IGS 的最终精密轨道和钟差进行单站数据处理,其静态单天解坐标的平面精度 可达 1cm,高程 2cm,动态定位时大部分解的精度优于 10cm。对于 PP-PPP 定 位,国内外进行了大量的研究,现已经比较成熟。

国外对多模卫星定位的研究开始较早,Stewart等对采用 GLONASS 广播星 历来计算卫星坐标的方法进行了详细研究^[8];Pratt 等对 GPS/GLONASS 组合定 位中单历元整周模糊度的解算方法进行了研究^[9](Pratt,1998);Han 等对短基线 GLONASS 解算模糊度的方法进行了研究^[10](Han,1999);瑞士伯尔尼大学 Habrich 在博士论文中对 GLONASS 单系统以及 GPS/GLONASS 组合定位的周跳 探测与修复方法进行了研究,并对伪距单点定位及不同长度的基线定位结果进行 了分析^[11](Habrich,1999);Wang等分析了 GPS/GLONASS 组合定位中的函数 模型和随机模型以及模糊度的求解方法^{[12][13]}(Wang,2000);德国慕尼黑联邦国 防军大学 Robach 在其博士论文中对 GLONASS 系统的信号结构、时间和坐标系 统以及 GLONASS 单系统定位的不同定位方式进行了十分详细的介绍^[14]

(Rossbach, 2000)。Bruyninx 则利用欧洲永久性跟踪网络(EUREF Permanent Network)数据比较了 GPS 单系统定位与 GPS/GLONASS 组合定位的精度情况,结果表明两种情况获得的坐标在平面位置上差 1-2mm,在高程方向上差

2-6mm^[15](Bruyninx, 2007); Oleynik 评价了 GLONASS 精密星历和精密卫星钟差的精度,并与 GPS 的精密星历和精密卫星钟差进行了对比^[16](Oleynik, 2006); Cai 估计了 GPS 与 GLONASS 在精密单点定位中的系统时间偏差,计算结果表明该时间差在一天之内保持稳定,由于硬件延迟的存在不同接收机的时间偏差不同,但都低于 2.5ms, Cai 还利用实测数据证明了在多模精密单点定位过程中, 当 GPS/GLONASS 卫星总数不足时,可以将之前一段时间算出的系统间时间偏 差当做已知值带入当前历元求解^[17](Cai, 2008)。LambertWanninger 利用欧洲 133 个装备了 GPS/GLONASS 双摸接收机的测站,比较计算了 9 家制造商的 13 种 仪 器 的 GLONASS 不同载 波 的 频 率 间 差 异,并给出其先验值^[18] (LambertWanninger, 2011)。

国内对组合定位的研究相对较少,大多数仍然停留在对组合伪距定位方面的研究,直到近两年来才在精密单点定位上有所进展。中国测绘科学研究院的高星 伟等推导了 GPS/GLONASS 组合伪距单点定位的数学模型,并对组合单点定位的精度进行了分析讨论^{[19][20]}(高星伟等,1999);装备指挥技术学院的李咏强等 研究了 GPS/GLONASS 组合伪距定位中的加权最小二乘(WLS)求解问题^[21](李 咏强,2000)。中国科学院遥感应用研究所胡国荣则提出了一种基于验后估计法 定权的 GPS/GLONASS 组合伪距定位方法,其计算结果表明该方法比根据经验 对 GPS/GLONASS 组合伪距定位方法,其计算结果表明该方法比根据经验 对 GPS/GLONASS 组合伪距定位方法,其计算结果表明该方法比根据经验 合单点定位的精度进行了分析^[24](任锴等,2010);目前对于 GPS/GLONASS 单 点定位的研究主要还是采用测码伪距观测值,因而定位精度在米级。要想达到厘 米级的定位精度,必须进行基于载波相位观测数据的精密单点定位。目前国内已 有一些对 GPS/GLONASS 组合精密单点定位的研究,都得到了很好的解算结果 ^{[25][26][27][28]}。这些研究的主要原理是在 GPS 单系统 PPP 的基础上加入一个系统时 差参数,并没有考虑系统时延偏差中的频间差。

由于 GPS 系统采用码分多址方式,而 GLONASS 系统采用频分多址方式,频率的不同会造成接收机硬件延迟的差异,从而形成系统时延偏差,该值是 GPS/GLONASS 组合定位与单系统定位最大的不同之处^{[29][30]}。国内还没有对频 间差的影响做详细深入的研究,因此本文重点将研究系统时延偏差包括频间差的 性质及其在 GPS/GLONASS 组合伪距定位以及精密单点定位中的应用。

3

1.3 本文的研究意义及主要内容

1.3.1 研究意义

随着各国和地区 GNSS 系统的发展, 空中的可用卫星数量不断增加, 多模卫 星导航定位技术也进入一个全新的境界。多模卫星导航接收机能提高卫星导航的 可靠性、完好性和连续性。特别是当一个新的卫星导航系统还处在研发阶段时, 新系统可接收的卫星数较少, 这时与成熟的 GPS 卫星定位系统双模共享, 可以使 新系统提前进入使用状态, 这对发展新的系统十分有利。随着 GNSS 系统向双向、 多频、多模、导航定位通信一体化的方向发展, GPS/GLONASS 多模精密单点定 位也将成为未来的一个重要研究方向。

高精度多模观测数据的综合处理是实现多系统融合的保证。由于导航系统本 身时空基准的差异以及信号体制的不同,多系统综合数据处理需要全面考虑各种 系统偏差参数。就 GPS/GLONASS 综合数据处理而言,需要考虑 GPS/GLONASS 系统间时延偏差(ISB),包括:导航系统的系统时差、不同系统信号在接收机里 面伪距延迟的差异以及 GLONASS 卫星的频间差(IFB)。其中,系统时差是系统 时间的差异;伪距延迟的差异是接收机对不同系统观测具有的不同硬件延迟;频 间差是由于 GLONASS 系统采用频分多址方式,造成不同频率的卫星信号在传播 延迟存在一定的差异。本文的研究可以给出系统时延偏差、频间差的特性。

当前的精密单点定位技术的实现主要是利用 GPS 单系统的观测数据,但是 GPS 作为一种基于卫星的定位技术,系统的可用性、定位结果的可靠性和精度在 很大程度上取决于观测到的卫星的数量。在有些场合,如城市峡谷、山谷和沟壑, 可见卫星的数量往往是不够的。增加系统的可用性和可靠性的一个可行的办法是 组合 GPS 和 GLONASS。目前,GLONASS 系统正在改变以前卫星数量严重不足 的局面,已经有 24 颗卫星在轨运行,这就为 GPS 和 GLONASS 两种系统的组合 提供了基础。在多模定位中用户可以根据实际需求采用不同的星座系统组合进行 兼容定位,从而避免采用单一星座系统定位时对该特定星座的过分依赖,星座的 增加必然会带来卫星个数的增加,参与定位的健康的卫星越多能使定位的精度越 高,因而具备更强的实用性、可靠性和定位精度也会达到更高水平。此外导航系 统的卫星星座相对于地球都存在周期性的回归,导航卫星-地球-太阳的相对关系 也存在周期不同的回归。这些相对关系的周期性回归,会把相应的周期性误差带 入到包括测站坐标、钟差在内的参数之中^[31](Flohrer C., 2008)。多系统数据的 融合能够减小测站坐标、钟差等参数受导航系统本身星座周期回归带来的影响, 从而提高与测站相关的参数(例如坐标、对流层)以及其他公共参数(例如 ERP)的 解算精度^[32](Rolf Dach,2010)。本文将给出给出组合定位的模型,并研究不同定 位策略对定位的影响。

目前,国外已经开发出多模精密单点定位的软、硬件产品,国内对 GPS/GLONASS组合定位,尤其是精密单点定位的相关研究工作才刚刚起步,尤 其对组合定位中系统时延偏差和频间差的研究几乎没有,因此有必要开展 GPS/GLONASS双模精密单点定位软件的开发工作。

GPS 系统与 GLONASS 系统已经相当成熟,因此可以作为研究多模系统融合的范例,GPS/GLONASS 组合定位中需要考虑的问题例如时间系统、坐标系统的统一以及系统时延偏差和频间差的处理,这在与其他卫星定位系统的融合中也会存在。近年来我国北斗系统得到了很大的发展,目前正在逐步发展成型,对GPS/GLONASS 组合定位的研究将为未来融合北斗数据的多模定位提供基础和参考。

1.3.2 研究内容

本文主要介绍 GPS 系统与 GLONASS 系统的组成、现状及其现代化进程, 比较两种定位系统的不同之处;介绍了传统 GPS/GLONASS 伪距定位以及精密 单点定位的模型以及定位中各种误差的减弱措施,并进行实例解算比较组合定位 与单系统定位的差异;分析系统时延偏差以及频间差的性质,并将其应用到 GPS/GLONASS 组合伪距定位与精密单点定位中。本文的主要章节安排如下:

第1章,简单介绍本论文的背景以及研究意义,总结国内外目前对 GPS/GLONASS组合定位研究的主要内容以及研究的热点问题,并提出本论文的 主要研究内容。

第2章,介绍 GPS 系统与 GLONASS 系统的基本组成部分、星座概况以及 近些年来的现在化进程。并从坐标系统、时间系统、系统差异这三个方面比较 GPS 系统与 GLONASS 系统之间的差异。特别介绍由于卫星频率的不同而造成 的 GPS/GLONASS 系统时延偏差及 GLONASS 卫星频间差。

第3章,介绍传统的 GPS/GLOANSS 组合伪距定位模型以及精密单点定位 模型,总结定位中存在的各种误差及其减弱措施。利用传统模型进行实例解算, 比较在不同观测条件下 GPS/GLOANSS 组合定位与单系统定位的定位精度以及 收敛速度。

第4章,通过介绍上海天文台 GNSS 分析中心 SHA 综合数据处理统一模型 给出系统时延偏差的概念,对其产生的原因进行详细的数学推导。利用 SHA 提 供的14个月74个 GPS/GLONASS 双模接收机的系统时延偏差值进行统计归类, 同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

从而分析系统时延偏差的特性,并根据它与 GLONASS 卫星频率号之间的关系进行线性拟合。根据其序列图以及拟合出的系数值,分析频间差与测站接收机类型以及天线类型之间的关系。

第5章,综合第3章与第4章的研究成果,在第3章传统的GPS/GLONASS 组合伪距定位以及精密单点定位的基础上引入第4章中的系统时延偏差、 GLONASS卫星频间差,提出改进的组合定位模型。进行实例计算,在各种观测 条件下比较 GPS 单系统伪距定位、GLONASS 单系统伪距定位、传统的 GPS/GLONASS 组合伪距定位以及引入系统时延偏差的组合伪距定位的定位精 度;比较是否估计(引入)系统时延偏差、是否估计(引入)GLONASS 频间差 在 GPS/GLONASS 组合精密单带你定位中对坐标精度、收敛速度、接收机钟差、 模糊度的影响。

第6章,总结本文所做的工作,针对本文的不足之处以及当前研究的热点内 容提出一些后续工作的展望。

第2章 GPS与GLONASS系统概述

2.1 GPS系统简介

美国国防部在 1973 年底批准研制卫星导航系统 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System, 缩写为 NAVSTAR/GPS, 简称 GPS 系统。 该系统是利用接收卫星信号来进行导航定位,具有全能性、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和授时系统,能提供精确的三维位置坐标、速度和时间信息。

GPS 卫星星座由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成,卫星分布在 6 个 轨道平面上,这样的设计基本上保证了在地球上任何位置均能同时观测到 4 颗卫 星。卫星高度为 20200km,轨道倾角为 55°,绕地运行周期为 11 小时 58 分(恒 星时 12 小时),载波频率 L1、L2 为 1575.42MHz 和 1227.60MHz。各卫星之间的 识别方法采用码分多址(CDMA)。GPS 整个系统分为卫星星座、地面控制和监测 站、用户设备三个部分。

1998 年初由美国提出GPS现代化,整个GPS现代化实质是要加强GPS对美军现代 化战争中的支撑和保持GPS在全球民用导航领域中的霸主地位(维基百科)。GPS 现代化的主要内容有^[33]:

- (1) 增加 GPS卫星发射的信号强度,以增加抗电子干扰能力;
- (2) 在 GPS信号中新增具有更好的保密性和抗干扰能力的军用码(M码),并 与民用码分开;
- (3) 研制抗干扰能力和快速初始化功能更强的接受设备;
- (4) 创造阻止和干扰敌方使用 GPS 的新技术;
- (5) 停止 SA政策,提高民用定位精度;
- (6) 在L2 载波上调制 C/A码,增加L5 民用频率,改善民用定位精度和可靠性。

2.2 GLONASS系统简介

几乎与 GPS 同一时期,前苏联开始建立 Global Navy Navigation Satellite System (GLONASS 系统)。在 1995 年底俄罗斯完成了 24 颗工作卫星加 1 颗备 用卫星的布局,整个系统于 1996 年 1 月开始正常运行。GLONASS 系统由 24 颗 卫星组成,它们均匀分布在三个轨道平面上,每个轨道平面平均分布 8 颗卫星,

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

轨道面间的夹角为 120 度,轨道倾角为 64.8 度。卫星高度为 19100km,运行周期为 11 小时 15 分。

GLONASS 系统的组成和工作原理与 GPS 极为类似,也是由空间卫星星座, 地面控制和用户设备三大部分组成。GLONASS 卫星向空间发射两种载波信号。 频率为 1.602~1.616MHz 和 1.246~1.256MHz。各卫星之间的识别方法采用频分 多址(FDMA)。同一轨道面上相隔 180°(即在地球相反两侧)的两颗卫星使用同 一频道。于是,在仍保持频分多址的情况下,系统总频道数可减少一半,因而可 让出高端频率。

由于 GLONASS 卫星设计寿命仅为 3 年,而俄罗斯政府在 20 世纪 90 年代后 期由于财力不足,无法及时补充新的卫星,因此到 1998 年 2 月中旬,只有 12 颗 卫星能正常工作,到 2000 年 GLONASS 卫星数目达到最少,只有 6 颗卫星。这 些对 GLONASS 系统的使用造成了极大的困难。GLONASS 系统的这种状况引起 了政府高度重视,俄政府在本世纪初制定了"恢复 GLONASS 卫星星座"的计划, 从 2000 年开始付诸于实施。俄罗斯发射的 GLONASS-M 卫星是一种改进的卫星, 2003 年以后其所发射的 GLONASS-M 卫星使用寿命为 7 年,该型号卫星增加了 第二民用频率,2011 年俄罗斯发射了一颗 GLONASS-K 卫星,2012 年 2 月 GLONASS 系统完成了组网。随着 GLONASS 卫星的更新与完善,每颗 GLONASS 卫星所对应的频率号也会适时调整。表 2.1 是 GLONASS 星座在 2012 年 12 月 28 日的状态统计,在轨卫星共有 29 颗,其中 1 颗卫星处于维护状态,3 颗为备用 卫星,1 颗在测试阶段。表 2.2 是 GLONASS 星座所有卫星的情况,其中第三列 是各个卫星对应的频道 (frequency channel)。该值对本文分析频间差有着重要意 义^[35]。

Total satellites in constellation	29 SC
Operational	24 SC
In commissioning phase	-
In maintenance	1 SC
Spares	3 SC
In flight tests phase	1 SC

Table2.1 GLONASS constellation status, 28.12.2012

Table2.2GLONASS Constellation Status at 28.12.2012 based on both the almanac analysis and navigation messages received at 04:00 28.12.12 (UTC) in IAC PNT TsNIImash

Orth D			Onenetien	1:60 times	Satellit	e health status
Slot ch	nnl	# GC Launched	begins	Life-time (months)	In almanac	In ephemeris (UTC)

第2章 GPS 与 GLONASS 系统概述

1	01	730	14.12.09	30.01.10	36.5	+	+ 04:45 28.12.12
2	-4	728	25.12.08	20.01.09	48.1	+	+ 04:45 28.12.12
3	05	744	04.11.11	08.12.11	13.8	+	+ 04:45 28.12.12
4	06	742	02.10.11	25.10.11	14.9	+	+ 02:59 28.12.12
5	01	734	14.12.09	10.01.10	36.5	+	+ 02:59 28.12.12
6	-4	733	14.12.09	24.01.10	36.5	+	+ 02:59 28.12.12
7	05	745	04.11.11	18.12.11	13.8	+	+ 02:59 28.12.12
8	-6	743	04.11.11	20.09.12	13.8	+	+ 04:44 28.12.12
9	-2	736	02.09.10	04.10.10	27.9	+	+ 04:45 28.12.12
10	-7	717	25.12.06	03.04.07	72.2	+	+ 02:59 28.12.12
11	00	723	25.12.07	22.01.08	60.2	+	+ 02:59 28.12.12
12	-1	737	02.09.10	12.10.10	27.9	+	+ 02:59 28.12.12
13	-2	721	25.12.07	08.02.08	60.2	+	+ 02:59 28.12.12
14	-7	715	25.12.06	03.04.07	72.2	+	+ 03:30 28.12.12
15	00	716	25.12.06	12.10.07	72.2	+	+ 04:45 28.12.12
16	-1	738	02.09.10	11.10.10	27.9	+	+ 04:45 28.12.12
17	04	746	28.11.11	23.12.11	13.0	+	+ 04:45 28.12.12
18	-3	724	25.09.08	26.10.08	51.1	+	+ 04:45 28.12.12
19	03	720	26.10.07	25.11.07	62.1	+	+ 04:45 28.12.12
20	02	719	26.10.07	27.11.07	62.1	+	+ 02:59 28.12.12
21	04	725	25.09.08	05.11.08	51.1	+	+ 02:59 28.12.12
22	-3	731	02.03.10	28.03.10	33.9	+	+ 02:59 28.12.12
23	03	732	02.03.10	28.03.10	33.9	+	+ 02:45 28.12.12
24	02	735	02.03.10	28.03.10	33.9	+	+ 04:30 28.12.12

2.3 GPS与GLONASS系统的比较

GLONASS 系统虽然与 GPS 系统在很多方面极为相似,但它们毕竟是不同 国家独立建立于发展起来的,因此存在不少差异,对这两种系统进行比较有助于 加深对它们的认识,从而在组合应用中更好的处理它们之间的差异。

2.3.1 坐标系统

GPS 采用 WGS-84 坐标系, WGS-84 坐标系是由美国国防部制图局建立的一个更为精确的全球大地坐标系^[36](周忠谟, 1999),它的几何定义是:原点位于地球质心,Z轴指向 BIH 1984.0 定义的协议地球极(CTP)方向,X轴指向 BIH 1984.0 的零子午面和 CTP 赤道的交点,Y 轴与 Z,X 轴构成右手坐标系。对应于 WGS-84 大地坐标系的是 WGS-84 椭球, WGS-84 采用的椭球是国际大地测量与地球物理联合会第17 届大会大地测量常数推荐值。

1993 年之前 GLONASS 卫星导航系统采用前苏联 1985 年地心坐标系,简称 SGS-85。1993 年后改为采用 PZ-90 坐标系。PZ-90 是一种地心地固坐标系,其 坐标原点位于地球质心,Z 轴指向 IERS(International Earth Rotation Service)所推 荐的协议地极原点,X 轴指向地球赤道与 BIH 定义的零子午线交点,Y 轴满足 右手坐标系。

WGS-84 与 PZ-90 大地坐标系采用的基本大地参数如表 2.3 所示^[37]。

表 2.3 WGS-84 与 PZ-90 大地坐标系采用的基本大地参数

Tab 2.3 Basic Geodetic Parameters between WGS-84 and PZ-9) 0
-----------------------------------------------------------	----------------

基本参数	WGS-84	PZ-90
长半轴 a(m)	6378137	6378136
地心引力常数 $GM(km^3 \cdot s^{-2})$	398600.5	398600.44
地球自转角速度 ω ($rad \cdot s^{-1}$)	7292115×10 ⁻⁵	7.292115×10 ⁻⁵
变率α	1/298.257223563	1/298.257839303

从 2007 年 9 月开始, GLONASS 采用 PZ-90.02 坐标系, 它与 WGS-84 之间 不再有旋转, 仅存在平移关系, 该平移量为[-0.36 0.08 0.18]。

在 GPS/GLONASS 组合定位联合数据处理时,必须在同一个坐标参考框架 下进行,因此利用广播星历进行定位需进行坐标转换,坐标转换通常采用七参数 Bursa 模型^{[38][39]}。然而在精密单点定位中,引入的是精密星历产品,而非广播星 历,精密星历中所提供的 GPS 卫星轨道和 GLONASS 卫星轨道是在同一个坐标 参考框架下的,因而在联合数据处理过程中可以直接使用精密星历,不需要考虑 坐标转换问题。

2.3.2 时间系统

GPS 系统中的卫星钟和接收机钟均采用稳定而连续的用原子时 ATI 秒长作 为时间基准,但时间起算的原点定义启动后不跳秒,保持时间的连续。以后随着 时间的积累,GPS 时与 UTC 时的整秒差以及秒以下的差异通过时间服务部门定 期公布^[40](徐绍铨,2003)。GPS 时与 ATI 时在任一瞬间均有一常量偏差 19s。 GPS 系统时间由 GPS 主控站来维持。GPS 系统时间与 UTC(USNO)的时间差异 限制在 100ns 以内。通过导航电文 GPS 用户可以获得 GPS 时与 UTC(USNO)时 之间的差异^[41](Rossbach,2000)。

GLONASS 系统建立了专用的时间系统 GLONASS 时,它属于 UTC 时间系统,它的产生是基于 GLONASS 同步中心 CS(Central Synchronize)时间产生的。 为了维持卫星钟的精度,GLONASS 卫星钟定期与 CS 时间进行比对,并将每个 卫星钟与 UTC(SU)的钟差改正由系统控制部分上传至卫星。从而保证卫星钟与 CS 时间的钟差在任何时间不超过 10ns^[42](李建文,2001)。GLONASS 时与俄罗 斯维持的世界协调时 UTC(SU)间的差异保持在 1ms 以内,另外还存在 3 个小时 的整数差。导航电文里提供相关的数据使它们之间可以相互转换,精度在 1 微秒 以内^[43](ICD,2002)。

2.3.3 系统差异

在系统设计上, GPS 系统与 GLONASS 系统有着一些十分显著的差异,总结如表 2.4 所示:

		GLONASS	GPS
卫	卫星数目	24	24
星	轨道平面数目	3	6
轨	长半轴 (km)	25510	26580
道	轨道高(km)	19100	20200
	轨道周期	11 h 15.8 min	11 h 58 min
	轨道倾角	64.8°	55°
信	卫星区分机制	FDMA	CDMA
号	载波频率(MHz)	1602+k*0.5625	1575.42
特		1246+k*0.4375	1227.60
征	码率(MHz)	C/A 码: 0.511	C/A 码: 1.023
		P 码:5.11	P 码:10.23

表 2.4GPS 与 GLONASS 系统差异比较

值得注意的是卫星区分机制,GPS 的卫星信号采用码分多址体制,每颗卫星的信号频率和调制方式相同,不同卫星的信号靠不同的伪码区分;而 GLONASS

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

采用频分多址体制^[44],卫星靠频率不同来区分,每组频率的伪随机码相同。由于 不同的卫星其载波频率不同,GLONASS可以防止整个卫星导航系统同时被敌方 干扰,因而它具有更强的抗干扰能力,但是这也给用户定位带来了很多困扰。频 率的不同会导致信号穿过相同硬件时在传播过程中产生的硬件延迟不同,这一差 异为组合导航定位增加了新的参数,本文将主要围绕这一差异进行探讨和实验。

另外解决 GLONASS 信号与其它电子系统相互干扰的另外一种有效办法是 使 GLONASS 象 GPS 那样,使用码分多址的方式来区分不同卫星,即对所有卫 星均采用相同的频率,该频率可以很接近 GPS 的或者直接使用 GPS 的频率。这 样,两个系统的兼容问题就可以得到很大的改善,并使某些干扰问题降到最小。 据报道,美国洛克韦尔公司决定协助俄罗斯改进 GLONASS,其中的一项任务就 是将 GLONASS 的频率改为 GPS 的频率,便于世界民用。

第3章 GPS/GLOANSS组合定位模型

3.1 GPS/GLONASS组合伪距定位

GPS 伪距单点定位早已十分成熟,近年来随着俄罗斯对 GLONASS 系统的 不断完善和改进,GPS/GLONASS 双模接收机的开发和生产,GPS 与 GLONASS 组合定位的研究逐渐成为一个热点。伪距单点定位因其速度快、不存在整周模糊 度、接收机价格低等优势,被广泛用于各种车辆、舰船的导航和监控、野外勘测 等领域,具有十分广泛的应用前景。本节将介绍传统的 GPS/GLONASS 组合伪 距定位原理并进行实例解算。

3.1.1 GPS/GLONASS组合伪距定位模型

GPS 伪距定位技术目前已经十分成熟。测站*i*对 GPS 卫星 *j* 的伪距观测方程 如 (3-1) 所示:

$$P_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + \mathbf{c} \cdot dt_{i} - c \cdot dt^{j} - I_{i}^{j} + Trop_{i}^{j} + \zeta_{i}^{j}$$
(3-1)

该方程适用于每个频率上的观测值。在形成无电离层组合观测值时, *I*^{*j*}得到了消除。

式中Pi为测站卫星之间的伪距观测值;

ρ;为测站与卫星之间的几何距离;

为光速常量, λ为波长;

 dt_i 、 dt^j 分别为测站以及卫星的钟差改正数;

 I_i^j 为电离层延迟, T_i^j 为对流层延迟;

 ς^{j} 为其他误差项及残差(包括相对论效应、地球自转、多路径影响等)。

为了提高单点定位的精度,需要对诸多误差进行改正,具体方法如下:

(1) 电离层改正

电离层折射误差与对应频率的平方成反比,利用这一性质,可以将 L1 频率上的 P1 观测值与 L2 频率上的 P2 观测值进行 LC 组合,从而消去电离层的影响。

(2) 对流层改正

对流层为大气层中从地面向上 60km 部分。本文采用欧盟 EGNOS 的经验公 式来计算天顶方向对流层延迟,它基于接收机高度和气象参数,并与接收机的经 纬度和年积日有关,计算方法参考文献^{[51][53]}。映射函数采用 Niell 模型,其计算 方法参考文献^[53]。

(3) 由扁心率引起的相对论效应对伪距的改正

由于卫星和接收机所处位置的地球引力位不同,以及卫星和接收机在惯性空间中的运动速度不同,卫星钟频率将由此产生漂移,相应的改正公式参见文献^[39]。

(4) 地球自转改正。

WGS84 坐标系为非惯性坐标系,因此,信号发射和接收时刻对应的地固系 是不同的,参考文献^[39]中列出了计算地球自转引起的距离差的方法和公式。

鉴于 GPS 系统与 GLONASS 系统的诸多相似,GLONASS 伪距定位与 GPS 定位原理基本相同,只需要解决 2.3 中所提到的 GPS 系统与 GLONASS 系统之间三种不同点的影响。

对于坐标系,由于 GPS 采用了 WGS-84 坐标系,而 GLONASS 采用了 PZ-90 坐标系,这两种坐标系的基本参数在表 2-3-1 中已经介绍过。在进行组合解算时,必须将两个坐标系通过平移和旋转归算到同一个坐标系下,坐标转换一般用布尔 莎七参数模型^[38]。一般以 GPS 系统为基准,将 PZ-90 坐标归算到 WGS-84 坐标 系下,其转换公式^[20]为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} 1.0 & -1.9 \times 10^{-6} & 0.0 \\ -1.9 \times 10^{-6} & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{PZ-90} + \begin{bmatrix} 0.0 \\ 2.5 \\ 0.0 \end{bmatrix}$$
(3-2)

上式中单位为米。

对于时间基准, GPS 采用 GPS 时, 以 UTC-USNO 为基准, 而 GLONASS 系统采用 GLONASS 时间, 以 UTC-SU 为基准。GPST 与 UTC 相差一个整数跳 秒 (leap seconds), GLONASS 与 UTC 相差 3h, 从而将 GLONASS 时归算到 GPS 时的公式如 (3-3) 所示^[43]:

$$GPST = GLONASST - 1s \times n + 19s - 3h \tag{3-3}$$

GPS 与 GLONASS 的广播星历都采用了各自的时间基准,因此伪距定位如果 利用广播星历内插卫星坐标和卫星钟钟差,就必须利用公式(3-3)将 GLONASS 时间归算到 GPS 时基准之下,利用公式(3-2)将 GLONASS 卫星坐标归算到 GPS 的坐标系下。目前各个 IGS 数据处理中心所公布的精密产品包括精密星历 和精密卫星钟文件都是在 GPS 基准之下的,因此引用精密产品的话就省去了时 间和坐标转换的步骤。

下面分析一下前面简单提到过的由于卫星频率不同引起的硬件延迟偏差。卫星信号从卫星发射出去以及进入接收机之后会经过一段通道,并在通道内传播会

产生延迟,即硬件延迟 *DCB*^{*j*},该延迟的大小与卫星频率以及卫星和接收机的硬件有关,它有可以被分为卫星部分 *DCB*^{*j*,set}和接收机部分 *DCB*^{*j*,rec}。因此,式(3-1)应该严格得表示为(3-4):

$$P_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot dt_{i} + DCB_{i}^{j,rec} - DCB_{i}^{j,sat} - c \cdot dt^{j} - I_{i}^{j} + Trop_{i}^{j} + \zeta_{i}^{j}$$
(3-4)

(3-4)中的卫星上的硬件延迟 *DCB*^{*i*,set} 与测站无关,可以写作 *DCB*^{*i*}。实际 上我们利用无电离层组合进行伪距定位内插计算卫星钟时用到的无论是广播星 历还是精密星历,其中的卫星钟差部分已经包含了 *DCB*^{*i*},后面 3.2 中将对其作 出详细解释,因此在解算时可以不考虑。对于 GPS 单系统来说,所有卫星信号 L1、L2 的频率都相等,因此测站部分的 *DCB*^{*j*,rec} 只与测站的硬件有关,对所有 GPS 卫星来说都是 *DCB*^{*G*},与测站 i 上的钟差 c·*dt*^{*i*} 合在一起无法分离,直接解算 会因为秩亏而无解,只能将 *DCB*^{*G*} 与 c·*dt*^{*i*} 当成一个整体进行求解,于是(3-4) 又可以改写为:

$$P_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot \overline{dt_{i}} - c \cdot \overline{dt^{j}} - I_{i}^{j} + Trop_{i}^{j} + \zeta_{i}^{j}$$

$$c \cdot \overline{dt_{i}} = c \cdot dt_{i} + DCB_{i}^{G}$$

$$c \cdot \overline{dt^{j}} = c \cdot dt^{j} + DCB^{j}$$
(3-5)

因此我们通常所见的 GPS 单系统伪距定位所解得的测站钟差 $c \cdot dt_i$ 其实不是 真实的测站钟差 $c \cdot dt_i$,还包含了测站上的硬件延迟 DCB_i^G 。

目前市面上有很多多模接收机能够通过多通道同时接收和记录卫星信号。卫 星信号通过不同的通道到达接收机时存在一定的时间延迟。对GPS 来说,由于 所有卫星采用载波频率是相同的,所以各个通道之间的延迟偏差很小,约为亚毫 米级,可以忽略不计,统一设为 *DCB^G*。但是GLONASS卫星的载波信号频率各 不相同,通过不同通道的延迟也互不相同,存在一定偏差。所以在进行GLONASS 单系统或GPS/GLONASS 组合定位时,必须考虑GLONASS内部通道延迟偏差。 GLONASS内部通道延迟偏差不仅与载波信号的频率和通道有关,并且随温度的 变化而变化。

倘若对每一颗GLONASS卫星都增加一个硬件延迟偏差参数,单历元求解必 然会秩亏,增加了解算的难度,降低了解算效率。目前,在GLONASS伪距定位 与GPS/GLONASS组合定位中很少会考虑GLONASS卫星之间的硬件延迟偏差。 然而GLONASS不同频率的卫星在通道传播过程中所产生的硬件延迟之间的差异 最大可达10米。GPS卫星和GLONASS卫星系统差异所造成的硬件延迟偏差在观 测值上最多可达上百米,这在解算过程中是无法忽略的,通常的解决方法是在每 个历元对所有GLONASS卫星增加一个硬件延迟偏差参数(对所有卫星都相等), 或者在伪距定位时分别为GPS和GLONASS卫星设置一个测站钟差参数。以往国内大部分关于GPS/GLONASS组合伪距定位的论文中都没有解释清楚将GLONSS时与算到GPS时基准下之后为何还要采用两个接收机偏差参数,只是简单地解释为"系统间时差"。因此,GPS/GLONASS组合导航定位模型为:

$$P_{i}^{G} = \rho_{i}^{G} + c \cdot \overline{dt_{i}^{G}} - c \cdot \overline{dt^{G}} - I_{i}^{G} + Trop_{i}^{G} + \varsigma_{i}^{G}$$

$$P_{i}^{R} = \rho_{i}^{R} + c \cdot \overline{dt_{i}^{R}} - c \cdot \overline{dt^{R}} - I_{i}^{R} + Trop_{i}^{R} + \varsigma_{i}^{R}$$

$$c \cdot \overline{dt_{i}^{G}} = c \cdot dt_{i} + DCB_{i}^{G}$$

$$c \cdot \overline{dt_{i}^{R}} = c \cdot dt_{i} + DCB_{i}^{R}$$
(3-6)

(3-6)中卫星钟差可以直接用 IGS 分析中心给出的产品内插,或者直接采用 30s 间隔的精密卫星钟产品,电离层误差可以通过无电离层组合消掉,对流层 误差可以用 Saastamoinen 模型以及 Niell 映射函数改正,并对湿延迟部分进行参数估计;地球自转改正、相对论改正等都可以参照相关模型进行改正,具体公式见 3.2.2。采用最小二乘平差方法进行单历元 GPS/GLONASS 伪距定位解算时,每个历元只需要解算 6 个参数,分别为测站的三维坐标、对流层参数、GPS 对应的测站钟差以及 GLONASS 对应的测站钟差,硬件延迟部分被包含在了测站钟差中。

3.1.2 GPS/GLONASS组合伪距定位实例解算

伪距单点定位技术因其速度快、不存在整周模糊度、接收机价格低等优势, 被广泛用于各种车辆、舰船的导航和监控、野外勘测等领域,具有十分广泛的应 用前景。这一节中将利用 3.1.1 中所介绍的 GPS/GLONASS 组合伪距定位模型以 及误差改正方法进行 GPS/GLONASS 组合伪距动态单点定位实例解算,比较 GPS 单系统、GLONASS 单系统以及 GPS/GLONASS 组合伪距定位的结果。

计算实例数据来自于 2012 年 9 月 27 日(年积日 271)两个配备有 GPS/GLONASS 双模接收机的 IGS 观测站 wtzr 与 brmu 时间间隔为 30s 间隔观测 文件,精密星历与精密卫星钟采用 SHA 所提供的产品:sha17074.sp3、sha17074.clk, 其中精密卫星钟时间间隔为 30s,以 igs12P17074.snx 文件中。提供的坐标真值为 基准,经过动态伪距单点定位处理后得到坐标与真值之差序列。计算分三种策略 进行: GPS 单系统伪距定位、GLONASS 单系统伪距定位以及 GPS/GLONASS 组合伪距定位,wtzr 站的计算结果如图 3.1.1、3.1.2、3.1.3 所示:



图 3.1.1wtzr 站 GPS 伪距动态单点定位坐标序列



图 3.1.2wtzr 站 GLONASS 伪距动态单点定位坐标序列



图 3.1.3wtzr 站 GPS/GLONASS 伪距动态单点定位坐标序列

从上面三张图中可以直观得看出无论是单系统伪距动态单点定位还是组合 伪距动态单点定位,其坐标误差均在10米之内,GPS/GLONASS组合定位精度 要优于单系统,GPS定位结果优于GLONASS系统。对上述所有坐标序列求标 准差,从而得到了定位精度,如表 3.1 所示,更加清晰明了得比较了三种定位方式的精度:

Station:wtzr DOY:2012271						
定位方式	X (m)	Y (m)	Z (m)			
GPS	1.49	0.96	1.30			
GLONASS	2.08	1.57	2.76			
GPS/GLONASS	1.20	0.68	1.60			

表 3.1 wtzr 站伪距动态定位坐标精度

其中在进行 GPS/GLONASS 组合定位时,根据公式(3-6)可知计算了两个接 收机钟差:GPS系统的接收机钟差 $c \cdot dt_i^G$ 以及GLONASS系统的接收机钟差 $c \cdot dt_i^R$, 这两个钟差都包含了真实钟差 $c \cdot dt_i$ 和自身系统信号在接收机中的硬件延迟 $DCB_i^G 与 DCB_i^R$ 。在求解过程中, $DCB_i^G 与 DCB_i^R$ 无法和 $c \cdot dt_i$ 分开来,因此,其 差异将表现在 $c \cdot dt_i^G$ 与 $c \cdot dt_i^R$ 上。对 $c \cdot dt_i^G$ 与 $c \cdot dt_i^R$ 序列作图得到图 3.1.4:



图 3.1.4wtzr 站 GPS/GLONASS 伪距动态单点定位坐标序列

从上图可以看出, $c \cdot dt_i^G$ 与 $c \cdot dt_i^R$ 都十分稳定, 两者之差几乎是一个常量, 大概为 1.6×10-7s, 这个值就是 GPS 与 GLONASS 信号对测站 wtzr 的接收机的 硬件延迟之差, 即 DCB_i^G 与 DCB_i^R 之差。这个值乘以光速后将达到 48 米, 倘若不 考虑的话将产生 48 米的观测误差, 因此系统间的硬件延迟差异是无法忽略的。

为了证明上述分析的普遍性计算了一个实例:2012 年 9 月 27 日一天 24 小时测站 brmu 的观测数据,定位坐标结果与真值之差的序列图如图 3.1.5、3.1.6、3.1.7 所示:



图 3.1.7brmu 站 GPS/GLONASS 伪距动态单点定位坐标序列

与 wtzr 站类似,比较不同方式下 brmu 站伪距动态定位结果的精度,其统计

结果如表 3.2 所示:

Station:brmu DOY:2012271							
定位方式	X (m)	Y (m)	Z (m)				
GPS	1.35	1.74	1.26				
GLONASS	1.88	2.96	2.63				
GPS/GLONASS	1.23	1.55	1.19				

表 3.2 brmu 站伪距动态定位坐标精度

同上述 wtzr 站类似,对 brmu 站的 GPS 接收机钟差以及 GLONASS 接收机 钟差进行统计得到图 3.1.8。



图 3.1.8brmu 站 GPS/GLONASS 伪距动态单点定位坐标序列

从图 3.1.8 中可以看出, GPS 接收机钟差与 GLONASS 接收机钟差都相对比 较稳定,二者之间有一个比较恒定的误差,大约为 1.5×10⁻⁷s,换算成距离是 45 米,与 wtzr 站类似,但又有细微的差别,这是有接收机硬件的不同引起的,具 体差异将在后续章节中介绍。

综合 wtzr 与 brmu 两个测站的定位结果,可以得出以下结论:

无论是 GPS、GLONASS 还是 GPS/GLONASS 组合伪距动态单点定位,其 坐标序列统计结果的精度均在3米之内,相比之下,GPS 单系统的定位精度优于 GLONASS,而组合定位得到的精度是最高的。由此可见 GPS/GLONSS 组合伪距 定位不仅可以缓解城市峡谷、山区可见卫星数目不足的情况,还能够提高定位的 精度,因此研究 GPS/GLONASS 组合定位是很有意义的。

3.2 GPS/GLONASS组合精密单点定位

精密单点定位(precise pointpositioning, PPP) 最早由 Zumberge 提出,是利用已知的精密卫星轨道与精密卫星钟差,综合考虑各项误差的精确模型改正,利

用非差载波相位观测值实现单机精密绝对定位的方法^[3](Zumberge, 1997)。目前 PPP 主要用于 GPS 单系统定位,对于 GPS/GLONASS 组合精密单点定位,国内外学者已经进行了一些研究,达到了厘米级精度。目前可以提供 GLONASS 精密产品的数据处理中心有 IAC、ESA、GFZ、CODE、SHA,由于处理方法不同,各中心产品的基准和精度也不相同。另外由于 GPS 系统采用码分多址方式,而 GLONASS 系统采用频分多址方式,不同频率的卫星信号在卫星和接收机中的硬件延迟会有一定的差异,并反映到接收机钟差上。传统的方法一般不考虑硬件延迟偏差,只是简单得为 GPS 与 GLONASS 各设置一个测站钟差参数,这样得到的精密单点定位精度可达厘米级,本节先介绍这一传统算法,关于引入系统偏差的计算将在下一章进行介绍.

3.2.1 GPS/GLONASS组合精密单点定位模型

目前关于 GPS 单系统精密单点定位的研究已经比较完善和成熟,测站*i*对 GPS 卫星 *j* 的伪距、相位观测方程分别写为:

$$P_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot (dt_{i} - dt^{j}) - I_{i}^{j} + T_{i}^{j} + \varsigma_{i}^{j}$$

$$L_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot (dt_{i} - dt^{j}) + \lambda \cdot N_{i}^{j} - I_{i}^{j} + T_{i}^{j} + \varepsilon_{i}^{j}$$
(3-7)

式(3-7)中的Pi,Li分别为测站卫星之间的伪距、相位观测值;

ρ,为测站卫星之间的几何距离;

c为光速常量, λ 为波长;

 dt_i 、 dt^j 分别为测站以及卫星的钟差改正数;

 N_i^j 为整周模糊度;

 I_i^j 为电离层延迟,实际应用中, I_i^j 可以通过无电离层组合观测值进行消除; T_i^j 为对流层延迟;

 ζ_i^j 、 ε_i^j 为其他误差改正(包括相对论效应、潮汐、PCO、PCV,相位缠绕等) 及残差。

在上述传统的 GPS 精密单点定位中一般都不会考虑信号的伪距硬件延迟和 相位硬件延迟,(3-7)应该严密得写作:

$$P_i^{j} = \rho_i^{j} + c \cdot (dt_i - dt^{j}) + DCB_i^{j} - I_i^{j} + T_i^{j} + \zeta_i^{j}$$

$$L_i^{j} = \rho_i^{j} + c \cdot (dt_i - dt^{j}) + DPB_i^{j} + \lambda \cdot N_i^{j} - I_i^{j} + T_i^{j} + \varepsilon_i^{j}$$
(3-8)

(3-8)式中*DCBⁱ*、*DPBⁱ*为相应频率的伪距、相位偏差(包含了测站和卫星), 其他参数与(3-7)相同。目前常见的 GPS 后处理精密单点定位一般都将硬件延迟 与测站钟差合并在一起进行解算,下面将(3-7)式扩展到传统的 GPS/GLONASS 双模精密单点定位:

$$L_{i}^{jG} = \rho_{i}^{jG} + c \cdot \overline{dt_{i}^{G}} - c \cdot \overline{dt^{G}} + \lambda \cdot N_{i}^{jG} - I_{i}^{jG} + T_{i}^{jG} + \varepsilon_{i}^{jG}$$

$$L_{i}^{jR} = \rho_{i}^{jR} + c \cdot \overline{dt_{i}^{R}} - c \cdot \overline{dt^{R}} + \lambda \cdot N_{i}^{jR} - I_{i}^{jR} + T_{i}^{jR} + \varepsilon_{i}^{jR}$$
(3-9)

(3-11)式中的上标^{*R*}代表 GLONASS,上标^{*G*}代表 GPS;其他参数的定义与 (3-7)、(3-8)式相同。 dt_i^G 为 GPS 系统的测站钟差, dt_i^R 为 GLONASS 的测站钟差, 之所以在 GLONASS 时间归算到 GPS 时基准之后已经还要设置两个钟差是因为 GPS 与 GLONASS 卫星频率不同而引起的硬件延迟偏差太大,无法将其忽略。 在早期的一些 GPS/GLONASS 组合精密定位中, $c \cdot dt_i^G$ 与 $c \cdot dt_i^R$ 之差异被简单得 解释为 GPS 与 GLONASS 的系统时差,这是不够严谨的,但是这种处理方法可 以得到厘米级的定位精度,大部分情况下可以满足用户的需求。

3.2.2 GPS/GLONASS组合精密单点定位的误差源分析

在精密单点定位中一个关键的问题就是减弱各种误差源的影响。精密单点定 位采用无电离层组合的非差模型,由卫星部分、传播路径、接收机部分所引起的 误差均需要进行改正,通过建模、组合观测值和参数估计等多种手段来减弱其误 差的影响。一般情况下除对流层误差,接收机钟差,电离层延迟误差,其他的精 密单点定位误差在一定程度上都能够通过模型来消除。接收机钟差以及对流层延 迟可以通过参数估计的方法消除,电离层延迟可以建立无电离层组合的方法消除。 本节将详细讨论 GPS/GLONASS 精密单点定位中相关误差的减弱措施,下面对 精密单点定位中需要考虑的误差源及其减弱措施进行深入讨论。

1. 卫星轨道与卫星钟

卫星轨道误差是指卫星星历所表示的卫星轨道和真正的卫星轨道之间的偏差 值。轨道误差主要受到跟踪网的规模、跟踪方法、跟踪站的分布、以及轨道计算 的数学模型等因素影响^[45](魏子卿,1998)。

目前 GPS 广播星历整体精度优于 2m, GLONASS 优于 5m^{[46][47]}, 广播星历的 精度决定了它很难应用于精密单点定位中。为了满足精密定位和科学研究的需要, 一些机构开始发布精密星历产品。精密星历是一种后处理星历, 是根据全球跟踪 网的观测数据解算出来的卫星轨道。从 1994 年开始, IGS(International GNSS Service)利用全球 78 个观测站的跟踪站的跟踪测轨数据, 计算并向外发布 GPS 精密星历。

自从 1998 年 IGEX-98(International GLONASS Experiment)以及之后的 IGLOS-PP(International GLONASS-Pilot Project)以来,获得 GLONASS 卫星的精 密星历和精密卫星钟差成为了可能。IGLOS-PP 利用遍布于全球的 50 个双频 GLONASS 接收机不间断的采集 GLONASS 观测数据并进行处理,以 RINEX 格

式存储于 IGS 全球数据中心^[48] (Weber,2005)。目前可以提供 GLONASS 精密产品的数据处理中心有 IAC、ESA、GFZ、CODE、SHA(上海天文台 GNSS 分析中心), SHA 所发布的 GPS 轨道精度为 1.5cm, GLONASS 轨道精度为 3.2cm^[49]。

IGS 综合各个中心提供的精密产品,通过一定的拟合方式得到最终的 IGS 精密产品,IGS 所提供的产品包括超快速,快速和最终产品。随着时延的增加,产品的精度也在逐渐提高。表 3.3 介绍了 IGS 所提供的各种 GPS 星历:

表 3.3 IGS 提供的 GPS 卫星星历

星历	精度	滞后时间	更新率	数据采样间隔
广播星历	160cm	实时		1天
超快速星历 (预测部分)	10cm	实时	4次/天	15 分钟
超快速星历 (观测部分)	<5cm	3小时	4次/天	15 分钟
快速星历	<5cm	17 小时	1次/天	15 分钟
最终星历	<2cm	约13天	1次/星期	15 分钟

Table3.3 GPS Ephemerides From IGS

卫星钟的钟差包括由钟差、频偏和频漂等产生的误差,以及卫星钟的随机误差。在 GPS 测量中,无论是码相位观测或载波相位观测,均要求卫星钟和接收机钟保持严格同步。尽管 GPS 卫星上都装有高精度的原子钟(铷钟、铯钟、氢钟),但与 GPS 系统时间之间还是存在着微小的偏差和漂移。这些偏差大概在 1ms 以内,乘以光速后由此引起的等效距离误差将达到 300km,因此卫星钟差不容忽视。

通过广播星历提供的卫星钟钟差的改正精度在 7ns 左右 (IGS, 2008),等效 距离误差为 2.1m,这样的精度显然不能满足精密单点定位的要求。目前,IGS 能提供精度优于 0.1ns 的 30 秒、15 分钟和 5 分钟间隔的 GPS 卫星钟钟差产品。 与精密星历相似,可以提供事后 GLONASS 精密产品的数据处理中心有 IAC、 ESA、GFZ、CODE、SHA,其中 ESA 和 SHA 可以提供时间间隔为 30 秒的产品, 采用高频的精密钟差产品对定位精度会有很大提高。由于采用不同的时间尺度和 GLONASS 码观测值里包含的不同偏差值的影响,对其进行直接比较很难。间接 的评估表明它们的符合精度 RMS 约为 1.5ns^[50] (Oleynik,2006)。

IGS 所提供的 GPS 卫星钟产品如表 3.4 所示:

表 3.4 IGS 提供的 GPS 卫星钟和跟踪站接收机钟的钟差

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

钟差	精度	滞后时间	更新率	数据采样间 隔
广播钟差	7ns (卫星钟差)	实时		1天
超快速钟差 (预测部分)	5ns (卫星钟差)	实时	4次/天	15 分钟
超快速钟差 (观测部分)	0.2ns (卫星钟差)	3 小时	4次/天	15 分钟
快速钟差	0.1ns (卫星和跟踪站钟差)	17 小时	1次/天	5分钟
最终钟差	<0.1ns (卫星和跟踪站钟差)	约13天	1次/星期	5分钟

Table 3.4 GPS Satellite and Station Receiver Clock Bias From IGS

2. 对流层延迟

对流层是大气的最底层,下接地面,其顶部在高纬度地区为地表以上 8~ 9km,中纬度地区为 10~12km,低纬度地区 17~18km。这一层集中了整个大气 75%的质量和含量占全部大气 90%以上的水汽,有非常强烈的垂直运动和水平运 动。对流层造成 GPS/GLONASS 信号延迟的原因有两方面:一是信号发生弯曲; 二是与电磁波在真空中传播速度相比,GPS 或 GLONASS 卫星信号通过对流层 时传播速度减慢。

目前已经有很多成熟的对流层改正模型。对流层延迟通常表示为天顶方向的对流层总延迟 ZTD (Zenith Total Delay)与同高度角有关的投影函数*M*(*E*)的乘积。并且对流层总延迟的 90%是由大气中干燥气体引起的,称为干延迟 ZHD (Zenith Hydrostatic Delay),其余 10%是由水汽引起的,称为湿延迟 ZWD(Zenith Wet Delay)。因此,对流层延迟可用天顶方向的干、湿延迟及其相应的投影函数 来表示:

$$\Delta D_{trop} = ZTD \cdot M(E) = ZHD \cdot M_{ZHD}(E) + ZWD \cdot M_{ZWD}(E)$$
(3-10)

式中: ΔD_{trop} 为对流层总延迟; ZHD 为天顶方向对流层干分量延迟; M_{ZHD}(E)为相应的对流层干分量投影函数; ZWD 为天顶方向对流层湿分量延迟; M_{ZWD} 为相应的对流层湿分量投影函数;
常见的对流层延迟模型有 Hopfield 模型, Saastamoinen 模型等^{[51][52]}, 而投影 函数有 Marini(1972), chao(1972), lanyi (1983), Davis (1985)及 Niell (1993) 等模型。

GMF、VMF、VMF1和IMF等模型的公式形式完全继承了Niell模型形式。 Niell模型除了考虑纬度因素外,还考虑了对流层的季节性变化和高程不同的影响,另外,它不会受气象元素观测误差的影响,就算缺少实测的气象数据数据也可以使用。对流层影响利用模型改正后,由于干燥气体在时间和空间上较为稳定, 模型的干分量改正精度可以达到1%~2%,天顶方向的改正误差为2~4cm。但是由 于对流层水汽运动比较难以预测,湿延迟部分的残余影响还比较大。因此,在精 密单点定位中,通常先利用模型进行改正,然后将残余的湿延迟误差当作一个未 知参数进行估计。一般比较好的方法有线性分段函数法、随机游走法^[53]。

3. 电离层延迟

电离层是指地球上空距地面高度在 60~2000km 之间的大气层,其影响主要 集中在 60~1000km,特别是 350km 附近的区域,电离层中的气体分子由于受到 太阳等天体各种射线辐射产生强烈的电离开,因此形成大量的自由电子和正离子。 当 GPS 以及 GLONASS 卫星信号穿过电离层时,信号的传播路径会发生弯曲, 传播速度则发生变化,从而产生了电离层延迟。

对于双频接收机而言可通过双频形成无电离层组合来消除电离层延迟的影响,L1 和 L2 载波相位测量值Φ₁和Φ₂可以表示为:

$$\begin{cases} \Phi_{1} = \Phi_{10} - \frac{C_{1}}{f_{1}} \\ \Phi_{2} = \Phi_{20} - \frac{C_{1}}{f_{2}} \end{cases}$$
(3-11)

式中 Φ_{10} , Φ_{20} 表示 L1 和 L2 载波的真实相位, $f_1 \ f_2$ 分别为 L1 和 L2 的频率。(3-11)式可形成如下线性组合:

$$\Phi = a_1 \Phi_1 + a_2 \Phi_2 = a_1 \Phi_{10} + a_2 \Phi_{20} - \left(\frac{a_1}{f} + \frac{a_2}{f}\right) \cdot C_1 \tag{3-12}$$

为消除一阶电离层影响,选择 a_1 和 a_2 ,使得 $\frac{a_1}{f_1} + \frac{a_2}{f_2} = 0$,于是 $a_2 = -\frac{f_2}{f_1}a_1$

, 令 $a_1 = 1$, 则 $a_2 = -\frac{f_2}{f_1}$, 由此对于载波相位测量, 可得到消除一阶电离层影响的组合形式

$$\Phi = \Phi_1 - \frac{f_1}{f_2} \phi_2 \tag{3-13}$$

消除一阶项的影响后后,剩余的高阶项影响约 2~4cm。

4. 接收机天线相位中心偏差

接收机天线相位中心偏差是指天线的相位中心和几何中心之间的偏移。但是 天线的相位中心并非是固定不变,它随着接收信号的高度角、方位角和信号强度 的变化而变化,也就是天线相位中心变化(PCV——Phase Center Variation)。天 线相位中心和其几何中心之间的偏差对定位结果产生的影响可达数毫米甚至厘 米^{[54][55]}(Mader,1999;Mader,2001),这种偏差的大小取决于接收机天线性能的好坏。 目前已经有几种校对方法诸如相对野外校对,绝对室内校对和绝对野外校对可以 确定天线的相位中心偏差^{[54][55][56][57]}(Mader,1999; Mader,2001; Schmitz,2002; Schupler,2001)。天线相位中心的变化对精密单点定位结果的影响所产生的结果, 能够采用模型改正的方法进行消除。目前,比较常用的天线相位中心改正模型由 是 IGS 所发布的文件 igs.atx,该文件中给出了多种类型接收机天线高度角从 90° 到 0°以及方位角从 0°到 360°的由于相位中心变化所引起的 L1 和 L2 载波信号观 测值改正(间隔为 5°),用户可以采用线性内插的方法获得所需高度角上的相位 中心偏差值。

5. 卫星天线相位中心偏差

卫星质量中心与卫星发射天线的相位中心一般是不重合的,两者之差称为天 线相位中心偏差。IGS 卫星定轨所采用的力学模型是对应于卫星天线质心的,因 此所获得的精密星历也是对应于卫星质心的,但是接收到的观测值来自于卫星的 天线相位中心。因此在 GPS/GLONASS 精密单点定位中使用精密星历产品就必 须考虑卫星天线相位中心偏差的影响。

为了使得各分析中心给出的卫星钟差可以相互比较和取加权平均值, IGS 从 1998 年 11 月起采用统一的天线相位中心偏差值。误差改正可以通过式(3-23)进 行计算^[58] (Leick,2004):

$$X_{phase} = X_{mass} + [e_x \ e_y \ e_z]^{-1} X_{offset}$$
(3-14)

式中, $e_x e_y e_z$ 分别为星固坐标系轴在惯性坐标系中的单位矢量。 X_{phase} , X_{mass} 分别为惯性坐标系中以相位为中心的卫星坐标和以质量为中心的卫星坐标。 X_{affest} 为卫星天线相位中心在星固系中的偏差。

也可以直接改正观测距离,公式为:

$$\Delta \rho_{sant} = \frac{\left(\vec{r}_{s} - \vec{r}_{R}\right)}{\left|\vec{r}_{s} - \vec{r}_{R}\right|} \Delta \vec{R}_{sant}$$
(3-15)

r, r, 分别为卫星和接收机天线位置的地心矢量。

6. 地球自转改正

GPS 数据处理一般都地固系中进行,即地面测站和卫星均在地固坐标系中表示,卫星的空间的位置如果是根据信号的发射时刻 t_1 来计算的,那么求得的是卫星在 t_1 时刻的地固系中的位置 $(x'_1 y'_1 z'_1)^T$ 。当信号与 t_2 时刻到达接收机时,地固系将围绕地球自转轴(z轴)旋转一个角度 Δa :

$$\Delta a = \omega (t_2 - t_1) \tag{3-16}$$

式中, ω为地球自转角速度,此时卫星坐标的变化为:

 $\begin{bmatrix} \partial X_s \\ \partial Y_s \\ \partial Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \Delta a & 0 \\ -\sin \Delta a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^s \\ y_1^s \\ z_1^s \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & \Delta a & 0 \\ -\Delta a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^s \\ y_1^s \\ z_1^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(t_2 - t_1)y_1' \\ -\omega(t_2 - t_1)x_1' \\ 0 \end{bmatrix} (3-17)$ $\text{ 将 L述改正加到} (x_1' \quad y_1' \quad z_1')^T \text{ L E or x } \text{ PLE t} t_2 \text{ Plothermal Boundary } t_1 \text{ Plothermal Boundary } t_2 \text{ Plothe$

球自转改正。

卫星位置变化了 $(\delta x_1^s \quad \delta y_1^s \quad \delta x_1^s)$ 后,会使卫星到接收机的距产生相应的变化 $\delta \rho$:

$$\delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial x_1^s} \cdot \delta x_1^s + \frac{\partial\rho}{\partial y_1^s} \cdot \delta y_1^s = \frac{x_1^s - X}{\rho} \omega(t_2 - t_1) y_1^s - \frac{y_1^s - Y}{\rho} \omega(t_2 - t_1) x_1^s$$

$$= \frac{\omega(t_2 - t_1)}{\rho} [(x_1^s - X) y_1^s - (y_1^s - Y) x_1^s] = \frac{\omega}{c} [(x_1^s - X) y_1^s - (y_1^s - Y) x_1^s]$$
(3-18)

上式直接给出了地球自转对卫星距^{*ρ*}的影响。

7. 相对论效应

相对论效应是由于卫星钟和接收机钟所处的运动速度和重力位不同而导致 卫星钟和接收机钟之间产生相对钟误差的现象。GPS的卫星钟比地面钟走地快, 每秒约差0.45毫秒。消除这种影响的方法是将GPS卫星钟的标准频率减小约 0.045MHz。但由于地球的运动和卫星轨道高度的变化,以及地球重力场的变化, 相对论的影响并非常数,经过上述改正后仍有残差,这部分影响可用如下公式改 正(Heroux. 2001):

$$\Delta P_{rel} = -\frac{2}{C} X_s \cdot \dot{X}_s \tag{3-19}$$

式中X、和X、分别代表卫星的位置向量和速度向量。

由于GLONASS与GPS卫星轨道高度,卫星运动速度和频率都比较接近,对 于GLONASS的相对论效应影响,可按照上述公式进行改正。

8. 多路径效应

GPS 以及 GLONASS 信号被测站附近的反射物所反射,反射信号如果进入 接收机天线(反射波),将和直接来自卫星的信号(直接波)产生干涉,从而使 观测值偏离了真值,产生多路径误差。这种由多路径的信号传播而引起的干涉时 延效应就被称作多路径效应。理论上,对测码伪距而言多路径误差最大为近似码 长的一半;对载波相位,多路径误差不超过波长的四分之一,也就是对 GPS 的 L1 载波相位多路径误差最大为 4.8cm,对 L2 最大为 6.1cm^[59] (Shen,2002)。

为了削减多路径效应的影响,出现了各种减弱多路径效应影响的技术。在硬件上,采用多路径延迟锁相环路 MEDLL(Multipath Eliminating Delay Lock Loop) 技术能够使接收机减少 90%的多路径误差。在计算时候可以过滤掉低高度角卫 星的观测数据,另外还可以通过半参数方法、小波分析方法等降低多路径效应的 影响。

多路径效应在相位平滑伪距中有帮助,因此本文中不加考虑。

9. 固体潮改正

由于地球并非是一个刚体,因而在摄动天体(月球、太阳)的万有引力作用下,弹性地球表面会产生周期性的涨落,我们将这种现象称为地球固体潮。地球固体潮可使地面点在垂直方向上的位移达 80cm。计算固体潮引起的位移改正的具体公式参见 IERS convention 2003。其简要步骤分为两步。

步骤 1: 首先计算时间域上的改正量:

(1) 相位部分,分别计算2阶相位以及3阶相位部分的位移贡献量。

(2) 纬度部分,分别计算周日潮波的位移贡献和半周日潮波的位移贡献量。

(3) 非相位部分,分别计算周日潮波和半周日潮波的位移贡献量。

步骤 2: 计算频率域上的改正量:

(1) 计算周日波的贡献量。

(2) 计算长波的贡献量。

最后将步骤1和步骤2的部分取和就得到总的改正数,其计算结果为测站坐标系中的形变量,若要将其转换到地固系中去,还需乘上转换矩阵*R*:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\lambda & \cos\theta\sin\lambda & -\sin\theta\\ -\sin\lambda & \cos\theta & 0\\ \sin\theta\cos\lambda & \sin\theta\sin\lambda & \cos\theta \end{bmatrix}$$
(3-20)

式中: θ , λ 为 θ , λ 测站的经纬度。

此外,形变的产生与作用力相比在将时间上滞后 ψ ,因此在计算形变时还需乘以一个滞后矩阵L:

$$L = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0\\ -\sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3-21)

一般取 $\psi = 2.5^\circ$ 。

那么,地固系中的固体潮改正为: $u_{th} = R \cdot L \cdot u$ 。

如不对测站坐标进行改正,而直接对距离观测值^{*P*}进行改正,可采用下列公式:

$$\delta \rho = \rho^{\circ} \cdot u_{\pm} = \frac{r_s - R}{|r_s - R|} \cdot u_{\pm}$$
(3-22)

式中: ρ° 为测站至卫星距离方向上的单位矢量; r_{s} 和 R 分别为卫星和地面测站在地固系中的位置矢量。

在计算地球固体潮改正时,一个关键环节是计算太阳和月亮在地固系中的坐标,目前一些国际组织可以提供这样的天文星历。IERS 推荐的星历为美国航空航天局的喷气动力实验室(JPL)提供的 DE405 太阳和行星星历,可以在网站下载相关数据和软件^[60]。DE405 星历中计算太阳和月亮的坐标在国际天球参考系(ICRS)下,因此还需要将天球坐标系中的坐标转换到国际地球坐标系(ITRS)中去。

10. 海潮改正

海潮也是由日周期和半日周期项组成,但它的产生是由潮汐的周期性涨落引起的。海潮改正比固体潮要小一个量级。海潮对单历元解的影响可达 5cm,在精密单点定位单天解中,其影响大概为 mm 级。当测站离海岸线大于 1000km 时,其影响可以忽略不计。对于厘米级的动态精密单点定位或者沿海岸进行明显小于 24h 观测时间的精密单点定位,则需要顾及海潮的影响^[61](Kouba, 2000)。如果 在海岸线 1000km 内需要应用对流层或钟参数,即使观测时间达到 24h,也必须考虑海潮改正,否则海潮的误差将会转移到对流层参数或钟参数里(Dragert,2000)。海潮的改正公式比较复杂,可参考文献 IERS 2003。

11. 相位缠绕误差

GPS 和 GLONASS 卫星信号采用右极化方式,这种极化方式的信号使得观测到的载波相位与卫星和接收机天线指向有关。接收机和卫星天线任何一方围绕它的垂直轴旋转都将使载波相位产生最大达一周的变化(一个波长),这种效应叫天线相对旋转相位增加效应^[62](Wu,1993),对该效应进行改正称为天线相位缠

绕改正。对于接收机天线,除非在动态定位中它在运动,通常是指向一个固定方向(北方向),但它会随着太阳能板对太阳的朝向变化产生一个很缓慢的旋转,这就造成卫星和接收机间的几何距离发生变化。除此之外,在日蚀期间,卫星为了能重定向太阳能面板朝向太阳,将快速旋转,即所谓的"中午旋转"和"子夜旋转",在半个小时之内,旋转将达一周,在此期间接收的相位数据需要进行改正或者将其删除^[63]。

相位缠绕改正在大多数精密差分定位软件中都不考虑,因为对于几百公里的 基线或网络差分定位来说它太的影响比较微弱,然而当基线长达 4000km 时它引 起的误差有 4cm(Wu,1993)。对于非差定位而言,当固定了 IGS 卫星钟差后它的影 响会变得非常明显,达半个波长。因此,1994 年后,IGS 分析中心开始提供相位 缠绕相位改正。忽略相位缠绕的影响并固定 IGS 精密轨道和钟差将会导致定位结 果误差达分米级。相位缠绕的改正如下:

$$\Delta \varphi = sign(\xi) \cos^{-1}(D' \cdot D / |D'||D|)$$

$$\xi = \hat{k} \cdot (\overline{D}' \times \overline{D})$$

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

$$\overline{D} = \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) + \hat{k} \times \hat{y}$$

(3-23)

式中, \hat{k} 是卫星到接收机的单位向量;

 \bar{D}' 是星固坐标系下的单位向量($\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}'$)计算得到的卫星有效的偶极向量; \bar{D} 是由测站坐标系下的单位向量($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$)中计算得到的接收机有效偶极向量。

3.2.3 GPS/GLONASS组合精密单点定位实例解算

为了验证 GPS/GLONASS 组合精密单点定位的精度,选取 BJCO 站 2011 年 3 月 18 日至 2011 年 3 月 24 日一周的观测数据分别进行了 GPS 单系统 PPP 计算 与 GPS/GLONASS 组合 PPP 计算,并将计算所得的坐标做差比较,得到了以下 结果:



图 3.2.1 BJCO 站单系统 PPP 与组合 PPP 坐标比较

由图 3.2.1 可知, GPS 单系统精密单点定位与 GPS/GLONASS 组合精密单点 定位所得坐标结果十分吻合,其坐标差在 1cm 以内。

但是在某些场合,如城市峡谷、露天矿区、山涧、峡谷、沟壑等地区,可见 卫星的数量很少,若采用 GPS 单系统定位很难保证每个历元有足够的观测卫星 数,在这种情况下加入 GLONASS 卫星将改善观测条件,提高定位精度。为了验 证这一假设,本文模拟缺少卫星的观测环境,人为得选择每个历元采用 6 颗 GPS 卫星+2 颗 GLONASS 卫星。以 COCO 站 2011 年 8 月 21 日的数据为例,利用 Berneser 软件进行动态 PPP 解算,结果如图 2 所示:



图 3.2.1 COCO 站 PPP 结果 GPS(6)+GLONASS(2)

通过图 2 的比较可以看出,当每个历元仅有 6 颗 GPS 卫星时,在某些历元 严重影响了定位结果,这一偏差是由于 GDOP 太大造成的,在这种情况下引入 GLONASS 卫星进行组合精密单点定位可以提高定位的精度。但是 Bernese 软件 同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

进行 PPP 动态定位的计算结果整体上不是很好,对于 GPS/GLONASS 组合定位 而言,利用 Bernese 软件解算得到的坐标与真值之差最大可达 0.5 米,这对很多 应用来说是无法满足其精度要求的。

LTW_BS 软件由上海天文台和同济大学联合开发^[69],具备实时、后处理 PPP 以及网解功能,可以弥补 Bernese 软件动态 PPP 的不足,根据 3.2.1 中介绍的传统 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型,利用 LTW_BS 软件进行了实例解算。 解算时采用三种策略进行动态 PPP 求解:

(1) GPS 单系统 PPP;

(2) GLONASS 单系统 PPP;

(3) GPS/GLNONASS 组合精密单点定位;

选取年积日 2012318,时间间隔为 60s 的观测数据进行定位解算,采用四种 策略进行 PPP 动态求解,其定位结果如图 3.2.2 所示:



图 3.2.2 三种方式 PPP 定位结果比较

三种策略进行 PPP 均得到了很好的最终定位结果,并且组合定位收敛速度 要比单系统定位更快一些。

第4章 GPS/GLONASS系统时差及频间差的特性

4.1 系统时差简介

随着 GPS、GLONASS 导航系统的不断完善和更新,以及伽利略、北斗等系统的逐步建立,GNSS 应用步入了多 GNSS 系统组合的新时代。能够兼容多个导航系统的接收机必然成为接收机硬件发展的趋势。为了实现多系统的兼容与互操作的保障,各个导航系统之间的时差监测与预报成为了各导航定位系统控制部分的一项重要业务。

对多个卫星导航系统的观测,可以增加了可见卫星的个数,从而增加了观测 个数,这对用户定位来讲,无疑可以提高定位的精度,避免在恶劣观测条件下无 法获得必要观测数的限制。然而,不同的卫星导航系统之间存在一些偏差,在组 合定位中需要去考虑该偏差的影响。如果把该偏差作为参数进行解算,就会降低 解算结果的精度(尤其是在可见卫星不多的情况下),因此如果能用别的手段对 该偏差进行测定或者模拟和预测,无疑将提高定位结果的精度。GPS系统时间与 GLONASS系统时间之间的差异即为GPS/GLONASS系统时差。对于导航定位用 户来讲,倘若能获取到不同系统之间的系统偏差,就能够简化多模导航定位的算 法与数据处理,从而提高服务精度与水平。实际应用中,系统时差与接收机以及 卫星上的各种硬件延迟紧密相关。相同的硬件延迟会被接收机钟差所吸收,因此 会影响授时的精度,但对导航定位的结果不会产生影响。

目前采用的导航系统时差监测方法主要有以下两种^{[64][65][66]}:

- (1) 双向卫星时间和频率传递(TWSTFT)、卫星共视
- (2) 地面接收空间信号、伪距相位解算

其中,第一种方法需要在各个导航系统的主控站或监测站上进行。首先利用 TWSTFT 方法获得每个导航系统主控站/监测站上的时差(UTC)。在此基础上, 考虑主控站/监测站本身与该导航系统时间的时差。综合这两种计算的结果,就 能够得到系统时差*TO*1:

 $TO = [UTC(k) - UTC(i)] - \{[UTC(k) - GPST] - [UTC(i) - GLONASST]\}$ (4-1)

式中, k 表示 GPS 系统的主控站/监测站, i 表示 GLONASS 系统的主控站/ 监测站, UTC(k)表示 GPS 系统的主控站/监测站上的世界时, UTC(i)表示 GLONASS 系统的主控站/监测站上的世界时间。 同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

对于接收 GPS 时频信息,进行远距离时间同步的基本原理和方法在宇航计 测领域已经十分城市,国内首次 GPS 共视法时间同步实验的结果和搬运钟验证 的结果取得了上千公里两地钟 GPS 共视同步误差优于 13ns、单站单星连续测 量 15 分钟不确定度小于 15ns、搬运钟验证符合程度优于 80ns 的好成绩^[67]。

第二种方法是基于地面多模接收机进行解算的方法。实际计算中也有两种策略:

1)、在 GPS 主控站或监测站上安装 GLONASS 接收机,或者在 GLONASS 主控站或监测站上安装 GPS 接收机

每个导航系统的主控站/监测站上都安装有高精度、高稳定度的原子钟,能够监测测站本身 UTC 与系统时间的差值,如果在此站上安装另外一个导航系统的接收机,则能够同时也获得基于该导航系统观测的时差。将两种系统获得的测站时差进行比对就能得到系统时差*TO2*,例如在美国海军天文台(USNO)上安装GLONASS 接收机,则 GPS/GLONASS 时差可以表示为:

TO = [UTC(USNO) - GLONASST] + [GPST - UTC(USNO)](4-2)

2)、利用多站、多模观测网络以及广播星历卫星钟差

处理多模观测数据需要先固定一个时间基准,然后求得其它所有钟相对于该基准的相对钟差,在计算的同时,解算出每个多模观测站对不同系统/卫星的硬件延迟之差。通过这样的数据处理方式就可以将所有 GLONASS 卫星钟差的基准 归算到 GPS 的时间基准之下。将这一方式所得的 GLONASS 卫星钟差与其自身系统下所得的钟差作比较就可以得到系统时差*TO*3:

$$TO = Median \left\{ [CLK^{R} - GPST] - [CLK^{R}(BRD) - GLONASST] \right\}$$
(4-3)

4.2 GPS/GLONASS综合数据处理统一模型

在详细介绍 GPS/GLONASS 系统时差以及频间差之前,首先要了解这些值的具体含义和获得途径,因此需要对 GPS/GLONASS 综合数据处理做一个总体介绍。

IAC于 1993 年成立了 IGS 组织,与 1994 年正式运作,它主要由全球跟踪网站、数据中心、分析中心和协作分析中心、协调分析中心、中心局以及发布中心等几部分组成,其中全球跟踪网由全球 24 小时全天候连续观测的跟踪站组成, 其核心站约有 200 多个。其基本任务是接收和 GPS 跟踪站数据,估计 GPS 卫星轨道、GPS 卫星精密星历、地球自传参数、全球电离层信息等。随着俄罗斯对 GLONASS 系统的不断完善和改进,很多 IGS 跟踪站开始配备 GPS/GLONASS 双模接收机,同时接收 GPS 与 GLONASS 的观测数据,不少数据分析中心开始 提供同时包含 GPS 与 GLONASS 的精密轨道与精密卫星钟差,目前可以提供 GLONASS 精密产品的数据处理中心有 IAC、ESA、GFZ、CODE、SHA(上海天 文台 GNSS 分析中心),SHA 所发布的 GPS 轨道精度为 1.5cm,GLONASS 轨道 精度为 3.2cm[]。其中 SHA 还对 GPS/GLONASS 双模接收机计算了每天每个测站 对每颗 GLONASS 卫星的硬件延迟偏差,下面介绍 SHA 对 GPS/GLONASS 数据 进行综合数据处理的统一模型^[49]:

测站i对 GPS 卫星j的伪距、相位观测方程分别写为:

$$P_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot (dt_{i} - dt^{j}) + DCB_{i}^{j} - I_{i}^{j} + T_{i}^{j} + \zeta_{i}^{j}$$

$$L_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot (dt_{i} - dt^{j}) + DPB_{i}^{j} + \lambda \cdot N_{i}^{j} - I_{i}^{j} + T_{i}^{j} + \varepsilon_{i}^{j}$$
(4-4)

(1)式中的P_i,Lⁱ分别为测站卫星之间的伪距、相位观测值;

 ρ' 为测站卫星之间的几何距离;

c为光速常量;

λ为波长;

dt_i, dtⁱ分别为测站以及卫星的钟差改正数;

 DCB_{i}^{j} 、 DPB_{i}^{j} 为相应频率的伪距、相位硬件延迟偏差(包含了测站和卫星); N_{i}^{j} 为整周模糊度;

I. 为电离层延迟;

 T_i^j 为对流层延迟;

从(4-4)式可以看出卫星钟差和接收机钟差有很强的相关性,直接求解所有钟 差参数将秩亏,因此需要先固定一个钟差,可以利用(4-4)式中的伪距观测值为钟 差参数提供一个基准,再解算其他的卫星钟差和接收机钟差。在计算时伪距偏差 *DCB*^{*i*}_{*i*} (例如 P1-P2, P1-C1 等)无法直接解出,会直接被钟差 c·(*dt*_{*i*} – *dt*^{*i*})所吸 收。目前 GPS 数据处理中(包括 IGS 高精度数据处理)都没有考虑相位偏差 *DPB*^{*i*}_{*i*}, 它将与其他参数(主要为模糊度)组合在一起。因此(4-4)式可以重新写作:

$$P_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j}) - I_{i}^{j} + T_{i}^{j} + \zeta_{i}^{j}$$

$$L_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} + c \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j}) + \lambda \cdot \overline{N}_{i}^{j} - I_{i}^{j} + T_{i}^{j} + \varepsilon_{i}^{j}$$
(4-5)

其中,

$$c \cdot (\overline{d}t_i - \overline{d}t^j) = c \cdot (dt_i - dt^j) + DCB_i^j$$

$$\lambda \cdot \overline{N}_i^j = \lambda \cdot N_i^j + DPB_i^j - DCB_i^j$$
(4-6)

目前,IGS 钟差产品的基准是基于 P1/P2 的无电离层观测组合。在此基准下, (4-6)式中的 P1/P2 无电离层组合的 *DCBⁱ*将被钟差参数吸收。而非 P1, P2 观测 值都需要采用 IGS 提供的参数进行 *DCBⁱ* 的改正。

将(4-5)式扩展到 GPS/GLONASS 双模观测数据处理,测站 *i* 对 GPS、GLONASS 卫星 *j* 的相位观测方程为:

$$L_{i}^{j^{G}} = \rho_{i}^{j^{G}} + c \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{G} - I_{i}^{j^{G}} + T_{i}^{j^{G}} + \lambda^{G} \cdot \overline{N}_{i}^{j^{G}} + \varsigma_{i}^{j}$$

$$L_{i}^{j^{R}} = \rho_{i}^{j^{R}} + c \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{G} + ISB_{i}^{j^{R}} + \lambda^{R} \cdot \overline{N}_{i}^{j^{R}} - I_{i}^{j^{R}} + T_{i}^{j^{R}} + \varepsilon_{i}^{j}$$
(4-7)

其中,

$$ISB_{i}^{j^{R}} = \mathbf{c} \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{R} - \mathbf{c} \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{G} + IFB_{i}^{j^{R}}$$

$$= TO + \Delta DCB_{i}^{j} + IFB_{i}^{j^{R}}$$
(4-8)

(4-7)式中的上标^R代表 GLONASS 卫星;

上标^G代表 GPS 卫星;

 $ISB_{i}^{j^{R}}$ 为测站 i 上不同频率 GLONASS 卫星相对于 GPS 的时延偏差(包括导航系统的系统时差 TO、不同系统信号在卫星、测站伪距延迟的差异 ΔDCB_{i}^{j} 以及 GLONSS 卫星的频率间偏差 $IFB_{i}^{j^{R}}$);

其他参数的定义与(4-4), (4-5)式相同。(4-8)式中的*TO*对所有站定义为单天 常数, ΔDCB_i^j 在每个测站定义为单天常数, $IFB_i^{J^R}$ 对不同测站、不同频率各不相 同。伪距偏差 ΔDCB_i^j 部分包含在钟差参数 c·($\bar{d}t_i - \bar{d}t^j$)中。(4-7)式的求解参数包 括 $ISB_i^{J^R}$ 以及坐标、钟差、轨道、对流层、地球自转参数等。

(4-7)式为多卫星系统综合数据处理的统一观测方程,也适用于 GPS 与其它 卫星系统的组合观测。通过定义系统间时延偏差 *ISB_i^{jR}*,估计 c·(*āt_i* – *ātⁱ*)^G 将不 同系统的钟差统一到 GPS 时间系统,从而实现了多系统时间基准的统一。ρⁱ包 含了卫星轨道、测站坐标,将测站坐标约束至 ITRF 框架之下,则解得的测站坐 标、所有卫星轨道统一于 ITRF 框架之下,从而实现了多卫星系统空间基准的统 一。对于用户来说,采用这些统一于相同时空基准下的轨道、钟差参数以及各种 偏差参数能够把不同系统卫星的观测值统一到相同的卫星系统,从而简化了用户 的应用,提高了定位的精度。

(4-7)式的解算存在大量的参数相关性。其中卫星钟差参数*dt*_i与接收机钟差 参数*dt^j*一起解算是秩亏的,通常的处理方式为固定一个参考钟(一般为外接高 精度原子钟的测站,固定由 GPS 伪距计算的钟差)。*ISB_i^R*中包含了系统的系统 时差*TO*、不同系统信号在卫星、测站伪距延迟的差异Δ*DCB_i^j*以及 GLONSS 卫 星的频率偏差 $IFB_i^{j^R}$,其中 $IFB_i^{j^R}$ 会吸收 $\lambda^R \cdot \overline{N_i}^{j^R}$ 中包含的相位延迟 $DPB_i^{j^R}$ 部分,而 $TO \land \Delta DCB_i^{j}$ 则与钟差参数存在相关性。针对以上相关性,目前常用的解决方法有两种:第一种是对 $ISB_i^{j^R}$ 参数进行加权处理,以减低相关性的影响;第二种是对同一测站上所有 $ISB_i^{j^R}$ 增加"和为零"的基准 (IGS AC Mail 643)。不同的处理方式也造成了目前 IGS 各个分析中心提供的 GLONASS 钟差存在基准不一致的问题^[68]。

4.3 GPS/GLONASS系统时延偏差

基于以上多系统统一数据处理模型,为实现导航系统的时差监测,给用户提供统一的轨道以及钟差产品,上海天文台于近年发展了高精度测地分析系统 iGPOS (integrated Geodetic Platform Of SHAO),建立了 GNSS 全球数据分析中心 (SHA),实现了 GNSS 数据自动处理的功能^{[69][70]}。上海天文台采用了全球 IGS 网络大约 110 个观测站的观测数据,其中 70 个左右的测站上配备有 GPS/GLONASS 双模接收机。基于以上观测网络和数据处理平台,整体处理 GPS/GLONASS 观测数据,图 4.3.1 给出了所采用的 IGS 全球网络的示意图,表 4.1 按照接收机类型以及天线类型对测站进行归类排序,整理出了 SHA 进行多系 统数据统一处理时所用到的所有 GPS/GLONASS 双模观测站的测站信息,包括 测站名称、接收机类型以及天线类型(个别测站上有更换过接收机类型以及天线 类型)。图 4.3.2 分别比较了 IGS 几个分析中心提供的轨道产品与 IGS 最终轨道 比较的统计情况(从 2011 年 7 月到 2012 年 8 月共 14 个月)的结果,图中 SHA 代表上海天文台全球 GNSS 分析中心提供的产品。可以看到,SHA 的 GPS 轨道 精度为 1.5cm,GLONASS 轨道精度为 3.2cm,与 IGS 各个分析中心产品精度相 当。



图 4.3.1 SHA 所采用的 IGS 测站网络示意图

测站	接收机类型		
drao	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	NONE
harb	ASHTECH UZ-12	TRM29659.00	NONE
gold	ASHTECH Z-XII3	AOAD/M_T	NONE
ulab	JAVAD TRE_G3TH DELTA	AOAD/M_T	NONE
zeck	JAVAD TRE_G3TH DELTA	ASH700936D_M	SNOW
dgav	JAVAD TRE_G3TH DELTA	ASH701945E_M	NONE
nurk	JAVAD TRE_G3TH DELTA	JAV_RINGANT_G3T	NONE
wind	JAVAD TRE_G3TH DELTA	JAV_RINGANT_G3T	NONE
pots	JAVAD TRE_G3TH DELTA	JAV_RINGANT_G3T	NONE
onsa	JPS E_GGD	AOAD/M_B	OSOD
ohi2	JPS E_GGD	AOAD/M_T	DOME
kokv	JPS EGGDT	ASH701945G_M	NONE
sutv	JPS EGGDT	ASH701945G_M	NONE
tixi	JPS EGGDT	TPSCR3_GGD	NONE
thu2	JPS LEGACY	ASH701073.1	SCIS
faa1	JPS LEGACY	ASH701945B_M	NONE
mas1	JPS LEGACY	ASH701945E_M	NONE
kour	JPS LEGACY	ASH701946.3	NONE
irkj	JPS LEGACY	JPSREGANT_SD_E	NONE
adis	JPS LEGACY	TRM29659.00	NONE

表 4.1 SHA 统一数据处理所用测站信息汇总

测站 接收机类型 天线类型 LEICA GRX1200GGPR0 AOAD/M_B DUTD kosg cas1 LEICA GRX1200GGPR0 AOAD/M_T AUST LEICA GRX1200GGPR0 AOAD/M T AUST maw1 LEICA GRX1200+GNSS mac1 AOAD/M_T AUST tow2 LEICA GRX1200GGPR0 AOAD/M T AUST LEICA GRX1200GGPR0 hob2 AOAD/M_T NONE alic LEICA GRX1200GGPR0 AOAD/M T NONE wes2 LEICA GRX1200GGPR0 AOAD/M_TA_NGS NONE LEICA GRX1200GGPR0 ASH700936D M NONE darw LEICA GRX1200GGPR0 SNOW bdos ASH700936E_C xmis LEICA GRX1200GGPR0 ASH701945C_M NONE LEICA GRX1200GGPR0 LEIAR25. R3 dav1 LEIT LEICA GRX1200+GNSS LEIAR25. R3 LEIT graz LEICA GRX1200+GNSS wtzr LEIAR25. R3 LEIT LEICA GRX1200GGPR0 LEIAT504GG LEIS nano LEICA GRX1200+GNSS LEIAT504GG LEIS lama LEICA GRX1200GGPR0 LEIAT504GG LEIS rcmn nico LEICA GRX1200GGPR0 LEIAT504GG LEIS

第4章 GPS/GLONASS 系统时延偏差及频间差的特性

NONE

NONE

NONE

NONE

NONE

CONE

UNAV

UNAV

NONE

SNOW

SNOW

NONE

CONE

NONE

LEIAT504GG

LEIAT504GG

LEIAT504GG

LEIAT504GG

LEIAT504GG

TPSCR3 GGD

TRM29659.00

TRM29659.00

ASH701073.1

ASH701941. B

TPSCR3 GGD

AOAD/M T

JPSREGANT SD E

NOV702GG

LEICA GRX1200GGPR0

LEICA GRX1200GGPR0

LEICA GRX1200GGPR0

LEICA GRX1200GGPR0

LEICA GRX1200GGPR0

LEICA GRX1200+GNSS

LEICA GRX1200GGPR0

LEICA GRX1200PRO

NOV OEMV3

TPS E_GGD

TPS E_GGD

TPS E GGD

TPS E GGD

TPS NETG3

pde1

ntus

hyde

flrs

mate

conz

brmu

guat

glsv

reyk

lhaz

khaj

hofn

dubo

测站	接收机类型	天线类型	
mdvj	TPS NETG3	JPSREGANT_DD_E	NONE
flin	TPS NETG3	NOV750. R4	NONE
bake	TPS NETG3	TPSCR. G3	NONE
urum	TPS NETG3	TPSCR3_GGD	NONE
whit	TPS NET-G3A	AOAD/M_T	NONE
chur	TPS NET-G3A	ASH701945E_M	NONE
sch2	TPS NET-G3A	ASH701945E_M	NONE
novm	TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE
gras	TRIMBLE NETR5	ASH701945E_M	NONE
recf	TRIMBLE NETR5	TRM29659.00	NONE
ufpr	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE
Salu	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE
aspa	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE
cnmr	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE
nrmd	TRIMBLE NETR5	TRM57971.00	TZGD
cedu	TRIMBLE NETR8	AOAD/M_T	AUST
COCO	TRIMBLE NETR8	AOAD/M_T	NONE
thti	TRIMBLE NETR8	ASH701945E_M	NONE
wuhn	TRIMBLE NETR8	TRM59800.00	ENCL
bjfs	TRIMBLE NETR8	TRM59800.00	SCIS
auck	TRIMBLE NETR9	TRM55971.00	NONE
reun	TRIMBLE NETR9	TRM55971.00	NONE
nklg	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位



图 4.3.2 各 IGS 分析中心轨道产品精度比较

SHA 在 ISB 的处理策略上采用了国际上 EMR 以及 GFZ 所采用的策略:每个测站对每个 GLONASS 频率设定为一天一个常数,基于(4-7)式能够监测、解算

得到 GPS/GLONASS 的系统时差和相对硬件延迟。

图 4.3.3 绘出了 SHA 所估计的 GPS/GLONASS 系统时差以及从广播星历中 得到的系统时差(未扣除 UTC(UNSO), UTC(SU)之间的差值),从图中可以看出 两种方法所得的结果基本一致,存在很好的一致性。



图 4.3.3 GPS/GLONASS 时差

图 4.3.4 列出了测站 BRMU(BERMUDA, UK)从 2011 年 181 天到 2012 年 240 天共 14 个月 GPS/GLONASS 系统间时延偏差。图中不同颜色的曲线代表不 同频率 GLONASS 卫星相对 GPS 的时延偏差,该站在这段时间内的系统间时延 偏差在 50~70m 之间,ISB 在相邻天的变化一般小于 3ns。而不同 GLONASS 频 率间的偏差范围为 5 米左右(频率识别号最小为-7,最大为 6),IFB 明显低于 ISB 的数量级。此外,BRMU 在 2011 年年积日 271 天将天线由 TRM29659.00 更换为 JAVRINGANT_DM,这个变化从 ISB 也得到了反映:由-60m~-55m 变为-53~-48m。可以看出天线类型的变化对于系统间时延偏差 ISB 将产生影响。



图 4.3.4 BRMU 站 GPS/GLONASS 系统时延偏差(2011.06.30-2012.8.30)

与 brmu 类似,相同时间段内 pots 站的 GPS/GLONASS 系统时延偏差统计图 4.3.5 中也有一个明显的跳跃,但这次不是接收机天线的变化引起的,而是由与 pots 站的接收机类型发生了变化。pots 站在 2011 年年积日 307 这天接收机由 JAVAD TRE_G3TH DELTA205 3.1.7 升级到了 JAVAD TRE_G3TH DELTA 205 3.2.7,虽然仅仅是一次接收机的升级,接收机型号只有微小变化,仍然对 GPS/GLONASS 系统时延偏差造成了非常大的影响,另外在 2011 年年积日 354 这天 pots 站的接收机又升级为 JAVAD TRE_G3TH DELTA 205 3.3.5,这次升级的影响十分微小。



图 4.3.5POTS 站 GPS/GLONASS 系统时延偏差(2011.06.30-2012.8.30)

根据以上两个测站的分析可以初步推断,GPS/GLONASS系统时延偏差与卫星频率、测站接收机类型、接收机天线类型有关。

对卫星频率而言,我们发现频率号互为正负的两组频率基本上以 0 频率位轴 呈对称状态,而且频率号绝对值越大,则该频率对应曲线离开 0 频率曲线的距离 越远。但是该规律不是十分准确和明显。图 4.3.6 所示是同一时段 sch2 测站上的 GPS/GLONASS 系统时延偏差统计图,图中一条绿色曲线明显存在跳跃,这是因 为 GLONASS 星座一直在不断得更新和完善,卫星频率也会随之作出调整。这条 绿色曲线代表 4 号卫星,它在 2011 年年积日 275 这天频率号从-5 调整为 6,因 此出现了明显跳跃。



图 4.3.6 sch2 站 GPS/GLONASS 系统时延偏差(2011.06.30-2012.8.30)

对接收机类型而言,装有相同类型接收机的测站所得到的 GPS/GLONASS 系统时延偏差值比较接近,例如图 4.3.7 与图 4.3.8 所示,wtzr 与 dav1 接收机型 号均为 LEICA GRX1200GGPRO,而两者的 GPS/GLONASS 系统时延偏差基本都 在-60m 至-40m 之间。



图 4.3.7 wtzr 站 GPS/GLONASS 系统间时延偏差(2011.06.30-2012.8.30)



图 4.3.8 dav1 站 GPS/GLONASS 系统间时延偏差(2011.06.30-2012.8.30)

对于接收机天线类型,按照表 4.3.1 所进行的归类,选取相同接收机类型的 所有测站,比较其 GPS/GLONASS 零频率系统时延偏差与接收机天线类型的关 系。图 4.3.9 列出了 22 个采用 LEICA 接收机的测站 ISB 的变化情况,相同天线 类型的接收机用同一种颜色的曲线表示。从图中可以看出,LEICA(包括 LEIAT504GG、LEIAR25.R3)、Topcon(TPSCR3_GGD)、Allen Osborne(包括 AOAD/M_T、AOAD/M_B)以及 Javad(JAVRINGANT_DM)等天线类型的测站 ISB 仅存在小于 5m 的差异。而 Ashtech、AOAD/M_TA_NGS(该类型天线采用了 Ashtech 的低噪放大技术^[71])以及 Trimble(TRM29659.00)天线则与上面几种天线 在数值上存在比较明显的差异。



图 4.3.9 LEICA 接收机测站的系统间时延偏差序列(2011.06.30-2012.8.30)

4.4 频间差特性分析

GLONASS 卫星拥有不同的频率,从而产生的硬件延迟也不相同,所以严格 得讲 3.2 中所介绍的传统的 GPS/GLONASS 组合精密单点定位不够严密,还需要 考虑 GLONASS 不同频率卫星之间的频间差。考虑频间差的 GPS/GLONASS 精 密单点定位模型为:

$$L_{i}^{jG} = \rho_{i}^{jG} + c \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{G} - I_{i}^{jG} + T_{i}^{jG} + \lambda^{G} \cdot \overline{N}_{i}^{jG} + \zeta_{i}^{j}$$

$$L_{i}^{jR} = \rho_{i}^{jR} + c \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{G} + ISB_{i}^{jR} + \lambda^{R} \cdot \overline{N}_{i}^{jR} - I_{i}^{jR} + T_{i}^{jR} + \varepsilon_{i}^{j}$$
(4-9)

其中,

$$ISB_{i}^{j^{R}} = \mathbf{c} \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{R} - \mathbf{c} \cdot (\overline{d}t_{i} - \overline{d}t^{j})^{G} + IFB_{i}^{j^{R}}$$

$$= TO + \Delta DCB_{i}^{j} + IFB_{i}^{j^{R}}$$
(4-10)

(4-9)式中的上标^{*R*}代表 GLONASS, 上标^{*G*}代表 GPS;

dt, 为测站钟差, 需要设为参数进行求解;

 \bar{dt}^{j} 为卫星钟差,由 SHA 提供的 30s 间隔的精密产品获得;

I为电离层误差,可以通过无电离层组合消去;

T 为对流层延迟,可以通过模型改正干延迟部分,湿延迟部分需要设置一个参数;

N 为模糊度;

ς与ε代表其他误差改正(包括相对论效应、潮汐、PCO、PCV,相位缠绕等) 及残差。

上述误差改正方法在 3.2.2 中已经介绍过。

在 3.2 的传统 GPS/GLONASS 组合精密单点定位中,对 GPS 系统与 GLONASS 系统分别设置一个接收机钟差参数,也就是相当于认为 GLOANSS 卫 星无论频率是否相等,其相对于 GPS 的系统时延偏差是相等的,因为 GLONASS 系统的卫星与 GPS 系统的卫星之间频率差异大,无法将其忽略,GLONASS 卫 星之间频率差异较小,且容易被模糊度吸收不影响定位结果。而这里为了得到更 加精确的定位结果以及其他参数值,并仔细研究 GLONASS 卫星之间的频间差, 需要将不同频率的卫星设置为不同的参数,即每天每个测站对每个频率的 GLONASS 卫星设置一个参数 *ISB*^{iR}。如(4-10)式所示,*ISB*^{iR}为测站上不同 GLONASS 卫星相对于 GPS 的时延偏差(包括导航系统的系统时差*TO*、不同系 统信号在卫星、测站伪距延迟的差异 Δ*DCB*ⁱ 以及 GLONSS 卫星的频率偏差 *IFB*^{iR})。

从图 4.3.9 可以看出,装有相同类型接收机的测站其 GPS/GLONASS 系统时

延偏差值长期变化趋势一致,这主要反映的是系统时差的长期变化。取一个频率的时延偏差值为参考频率(如零频率),其他频率与之相减可以消除测站伪距延迟差异以及系统时差。(4-10)式中不同系统信号在卫星、测站伪距延迟的差异 ΔDCBⁱ 可以拆分为测站部分ΔDCB_i 与卫星部分ΔDCBⁱ,其他频率 j 与基准频率 k 相减可以写作:

 $ISB_{i}^{j} - ISB_{i}^{k}$ $= (TO + \Delta DCB_{i}^{j} + IFB_{i}^{j}) - (TO + \Delta DCB_{i}^{k} + IFB_{i}^{k})$ $= (TO + \Delta DCB_{i} + \Delta DCB^{j} + IFB_{i}^{j}) - (TO + \Delta DCB_{i} + \Delta DCB^{k} + IFB_{i}^{k})^{(4-11)}$ $= \Delta DCB^{j,k} + IFB_{i}^{j,k}$

上式中,通过频率间相减系统时差TO 与测站伪距延迟 ΔDCB_i 已经被消除, 仅剩下卫星上的硬件延迟 ΔDCB^{ik} 和频间差 IFB^{ik}。不同频率的 IFB 与其频率号 存在一定的联系, Lambert Wanninger 认为频间差与 GLONASS 卫星的频率号成 线性关系,并利用欧洲 133 个装备了 GPS/GLONASS 双摸接收机的测站,比较 计算了 9 家制造商的 13 种仪器的 GLONASS 不同载波的频间差系数,并给出其 先验值(Lambert Wanninger, 2011)。这里则可以利用 SHA 所给出的所有 GLONASS 卫星系统间时延偏差进行频间差的线性拟合得到系数项,从而运用到 往后的计算中,拟合公式如下:

$$ISB_{i}^{j} - ISB_{i}^{k}$$

$$= \Delta DCB^{j,k} + IFB_{i}^{j,k} \qquad (4-12)$$

$$= \Delta DCB^{j,k} + (f^{j} - f^{k})\Delta h_{i} = b0 + b1 \cdot (f^{j} - f^{k})$$

上式中 f^{i} 、 f^{k} 为卫星的频率识别号;

 $\Delta DCB_{i}^{j,k}$ 表示卫星 j,k 之间伪距延迟;

 $IFB_{i}^{j,k}$ 表示卫星 j,k 之间的频间差;

b0为拟合的常数项;

b1为拟合的一次项系数。

利用上述 SHA 提供的 14 个月全球共 74 个配备了 GPS/GLONASS 双模接收 机的测站的系统时延偏差值,取零频率为参考基准,根据(4-12)式进行最小二 乘线性拟合,计算出每一个测站所对应的 b0、b1 值。这些测站由 7 种接收机制造 商所生产,每个接收机制造商又包括几种接收机类型,每种接收机类型配备的接 收机天线类型也不相同,按照表 4.3.1 的归类排序将线性拟合所得的 b0、b1 值作 图得到图 4.4.1,图中黄色虚线用来作为不同接收机生产商的分割线,从图中可 以看出,同种类型接收机的 b0、b1 值比较接近,存在一定的一致性,而不同类型 接收机的 b0、b1 值差别比较明显。此外,接收机天线类型对 b0、b1 的影响也很明 显,图 4.4.1 中用红线圈出来的 11 个测站配备了 Ashtech 天线,该类型天线采用 了 Ashtech 的低噪放大技术^[71],这些测站的 *b*0、*b*1 与同类型接收机存在明显的差 异。按照接收机生产商进行归类,并对相同生产商生产的接收机的 *b*0、*b*1 值取平 均值(去除 Ashtech 天线类型的测站),可以得到一个粗略的统计,如表 4.2 所示:



图 4.4.1 频间差线性拟合系数值

Receiver	IFDB0(m)	IFDB1(m)	
JPS	-0.49	-0.05	
LEICA	0.05	-0.08	
TPS	0.13	-0.24	
TRIMBLE	0.90	-0.12	

表 4.2 相同接收机生产商的 b0、 b1 平均值

第5章 GPS/GLONASS 系统时差及频间差的应用

5.1 GPS/GLONASS 系统时差在伪距定位中的应用

在3.1.1中已经介绍了传统的伪距定位模型,公式(3-6)中为GPS系统与GLONASS系统分别设置一个接收机钟差参数,这只因为GPS系统与GLONASS系统之间的频率差异太大,因此无法忽略其系统时延偏差ISB,而GLONASS卫星之间的频率差异相对比较小可以忽略其频间差IFB,因此对一个测站上所有的GLONASS卫星只设置了一个相同的ISB参数。那么频间差到底对GPS/GLONASS组合伪距定位的影响有多大,这在之前的研究中是没有出现过的,下面将对其进行实例解算,在公式(3-6)的基础上在每颗GLONASS卫星观测方程中加入一个ISB值:

$$P_{i}^{G} = \rho_{i}^{G} + c \cdot \overline{dt_{i}^{G}} - c \cdot \overline{dt^{G}} - I_{i}^{G} + Trop_{i}^{G} + \varsigma_{i}^{G}$$

$$P_{i}^{R} = \rho_{i}^{R} + c \cdot \overline{dt_{i}^{G}} + ISB_{i}^{R} - c \cdot \overline{dt^{R}} - I_{i}^{R} + Trop_{i}^{R} + \varsigma_{i}^{R}$$

$$c \cdot \overline{dt_{i}^{G}} = c \cdot dt_{i} + DCB_{i}^{G}$$

$$ISB_{i}^{R} = DCB_{i}^{R} - DCB_{i}^{G}$$
(5-1)

其中GPS硬件延迟 *DCB^G*_i 对同一测站所有GPS卫星都是相等的,而GLONASS 的硬件延迟 *DCB^R*_i 仅对同一测站相同频率的GLONASS卫星是相等的,因此 *ISB^R*_i 对同一测站相同频率的GLONASS卫星是相等的,若将其当做一个未知参数进行 解算势必会在每个历元增加很多个未知数,增加了计算的复杂性,甚至会导致法 方程系数阵秩亏,因此在此实例中不对 *ISB^R*_i 进行解算,而是直接带入SHA所提 供的 *ISB^R*_i 值。

利用2011年8月21日POTS站的伪距观测数据,分四种策略进行伪距单点定位 计算,并统计每种计算方法定位所得到的坐标精度,对其进行比较,这四种策略 分别是:

(1) 单独GPS系统

- (2) 单独GLONASS系统
- (3) GPS/CLONASS组合导航

(4) 在GPS/CLONASS组合导航定位的基础上引入已知的系统时延偏差ISB 其计算结果如图5.1.1所示:



图 5.1.1 不同策略伪距单点定位坐标精度比较

图5.1.1的结果表明,不论采取哪种系统哪种方式伪距单点定位精度均在2m 之内,其中GLONASS单系统伪距定位坐标精度最差,GPS单系统定位精度略优 于GLONASS,而GPS/GLONASS组合单点定位精度明显优于单系统,在组合单 点定位中再加入由上海天文台GNSS数据分析中心提供的系统时延偏差后定位精 度最佳。

GPS/GLONASS系统时延偏差尤其是频间差的引入无疑提高了伪距定位的 精度,但是从图5.1.1看来这一提高并不是很显著,不考虑GLONASS频间差的定 位方式已经可以满足定位的需求。在以上分析的基础上,引入ISB(包括频间差) 最显著的优势就是减少了位置参数的个数,因此只有在一些可见卫星数目较少的 恶劣观测环境下其优势才能体现出来,比如城市峡谷、山区、沟壑等。鉴于此本 文模拟了类似于3.2.3中的观测条件,在可见卫星数目比较少的情况下分别比较直 接进行GPS/GLONASS组合定位与引入GPS/GLONASS系统时延偏差当做已知值 进行定位这两种方式的定位结果。观测数据同样选取2011年8月21日POTS站伪距 观测值。

两次模拟的观测条件分别为:

(1) 4颗GPS卫星+1颗GLONASS卫星

(2) 3颗GPS卫星+1颗GLONASS卫星

计算结果如表5.1所示.:

49

选用	采用方法	RMS	RMS	RMS	无解
卫星		X/m	Y/m	Z/m	历元数
R1+G4	引入系统时延偏差	6.38	3.48	7.67	0
	不引入系统时延偏差	16.08	7.68	16.68	27
R2+G3	引入系统时延偏差	4.99	2.96	5.55	0
	不引入系统时延偏差	10.52	10.56	25.66	32

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

表 5.1 可见卫星数目不足情况下伪距定位精度

在GPS/GLONASS组合导航定位时,如果不引入GPS/GLONASS系统时延偏差,那么每个历元将有5个未知参数(3个坐标,1个测站钟差,1个硬件延迟偏差),因此如表1所示,无论是R1+G4还是R2+G3的搭配,总卫星数只有5颗时,直接进行解算的定位结果很差,RMS在Z方向都达7米左右,由于卫星的GDOP太大,导致在一天2880个历元中分别有27和32个历元无解。而引入硬件延迟偏差后情况有了很大改善,每个历元的未知数降为4个(3个坐标,1个测站钟差),无解历元数都降为0,X、Y、Z方向的RMS值也明显低于直接进行组合导航定位的结果,并且精度提高的效果十分显著。由此可见,当可用卫星数目较少观测条件比较差时,引入GPS/GLONASS系统时延偏差可以增加每个历元的多余观测数,从而提高定位精度。

综合以上实例解算的结论以及上一章对系统时延偏差和频间差的分析,可以 推测在没有更换接收机类型以及接收机天线类型的前提下系统时差以及频间差 相对比较稳定,因此可以利用前期得到了ISB值(包括IFB)对其进行短期的预报, 并应用在后期的定位计算中。按照这个思路以上述伪距定位模型为基础,进行里 多组实例解算,来证明系统时延偏差(包括频间差)对伪距定位的作用。实例选 取4个IGS观测站(pots、casl、chur、aspa)2011年年积日为233,时间间隔为30s 的伪距观测数据进行导航定位解算,这4个观测站分别安装着不同制造商所生产 的接收机,所选测站的接收机和天线信息如表5.2所示:

测站	接收机型号	天线型号
pots	JAVAD TRE_G3TH DELTA	JAV_RINGANT_G3T NONE
cas1	LEICA GRX1200GGPRO	AOAD/M_T AUST
chur	TPS NET-G3A	ASH701945E_M NONE
aspa	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 NONE

表 5.2 实例测站信息汇总

LEICA、TRIMBLE、JAVAD、TPS是全球IGS站最常用接收机的几家生产商, 倘若在实例解算中加入相应型号接收机的GPS/GLONASS系统时延偏差预报值 后,导航定位精度有所提高,那么这些预报值同样可以应用于其他所有的同厂家的接收机上。实例计算具体分两类进行,一是GLONASS导航定位,二是GPS/GLONASS组合导航定位。每种导航定位又分三种策略进行:

- (1) 不考虑GLONSS卫星频间差的影响;
- (2) 引入SHA所提供的对应测站的GPS/GLONASS系统时延偏差;
- (3) 引入对应接收机类型的GPS/GLONASS系统时延偏差预报值;

近年来俄罗斯增加了对GLONASS系统的科研资金投入,GLONASS系统正 在改变以前卫星数量严重不足的局面,目前已经有24颗卫星在轨正常使用,随着 GLONASS卫星星座不断完善,可用卫星数量不断增加,GLONASS导航定位的 研究就有了重要意义。由于导航定位采用的是伪距观测值,本身观测精度就很低, 对定位精度要求也不高,因此传统的方法都不考虑GLONASS卫星频间差的影响, 认为所有GLONASS卫星的硬件延迟是相同的,在解算中被接收机钟差所吸收。 为了研究这一微小的差异对导航定位精度的影响,选取了上述4个测站的数据分 别利用上述三种策略进行解算,所得定位结果的在X、Y、Z方向的精度如图5.1.2 所示,三维精度及其提高率如表5.1.3所示。



图 5.1.2 GLONASS 伪距定位 X、Y、Z 方向精度

测站 无频间差 预报值 SHA 频间差 RMS RMS 提高率 RMS 提高率 chur 7.60 5.84 23.19% 3.40 55.28% 4.29 3.60 16.09% 3.30 22.99% aspa cas1 2.99 1.90 36.29% 1.77 40.87% 2.39 2.29 1.89 20.79% 4.11% pots

表 5.3GLONASS 导航定位三维精度及提高率

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

从图5.1.2和表5.3的统计结果可以看出,对于四种不同类型的接收机采用三种策略进行GLONASS导航定位其结果基本一致:不考虑GLONASS频间差的方式定位精度最低,直接引入SHA所提供的GPS/GLONASS系统时延偏差(包括频间差)精度最高,而利用ISB(包括IFB)预报值进行解算的精度介于两者之间。pots、cas1两个站的导航定位精度基本在3米以内,明显优于chur与aspa这两个测站,这是由不同的GDOP所造成的,aspa站的观测条件很差,不少历元因为可用GLONASS卫星数目不足而无解。

另外比较对pots站采用三种方式解算的结果发现其精度提高的程度与其他 三个测站相比不是很明显,另外三个测站在引入GLONASS频间差后精度得到了 明显的提高,有的方向达3米,这是由不同的接收机类型所致,每个测站的接收 机类型参见表5.2,表5.4根据4.4中线性拟合的结果统计出该4个测站的b0、b1值, 从b0、b1值的大小也可以看出,频间差越小则加入频间差最定位结果的影响也越 小:

测站	b0 (m)	b1 (m)
chur	1.93	2.06
aspa	-0.77	0.63
cas1	1.11	1.37
pots	-0.36	0.42

表 5.4 测站线性拟合系数值

目前导航定位多采用GPS系统,GPS导航定位技术已经比较成熟和完善。但 是在某些场合,如城市峡谷、露天矿区、山涧、峡谷、沟壑等地区,可见卫星的 数量很少,若采用GPS单系统导航定位很难保证每个历元有足够的观测卫星数, 在这种情况下加入GLONASS卫星将改善观测条件,提高定位精度。由于更多的 卫星资源能被使用以及由此改善的系统可用性,可靠性和定位精度,组合的 GPS/GLONASS导航定位将具有更广阔的应用前景。GPS与GLONASS卫星所占 用的频率是不同的,这一差异远远大于GLONASS系统内各个卫星之间的频率差 异,因此传统的组合导航定位可以忽略GLONASS系统内的频间差,但是无法忽 略GPS与GLONASS系统之间的硬件延迟偏差,这一偏差一般与接收机钟差合在 一起参与解算,所以在解算时要给定两个接收机钟差参数:GPS接收机钟差与 GLONASS接收机钟差。为了分析GLONASS频间差对组合导航定位精度的影响, 同样选用上述中4个测站同一天的观测数据,用前面介绍的三种策略进行了实例 解算,所得结果X、Y、Z方向精度如图5.1.3所示,三维精度及其提高率如表5.5 所示:



图 5.1.3GPS/GLONASS 组合伪距定位 X、Y、Z 方向精度

测站	无频间差	预报值		SHA 频间差	
	RMS	RMS	提高率	RMS	提高率
chur	2.99	2.42	19.17%	1.89	36.75%
aspa	2.62	2.41	8.18%	2.31	11.85%
cas1	2.34	1.75	25.12%	1.65	29.56%
pots	1.74	1.71	1.43%	1.58	9.08%

表 5.5GPS/GLONASS 导航定位三维精度及提高率

比较图5.1.3和图5.1.2中相同测站的定位结果可以看出,组合导航定位比单独 GLONASS导航定位在精度上有了明显的提高,这归功于良好的观测条件,aspa 站也不会因为可用卫星数目不足GDOP太大而造成部分历元无解。与GLONASS 单系统导航定位相同的是不考虑GLONASS频间差的策略定位精度最低,直接引 入SHA提供的GPS/GLONASS系统时延偏差定位精度最高,利用ISB预报值进行 解算的精度介于两者之间,pots站采用三种策略解算的定位精度差异依旧不如其 他三个测站明显,可见接收机对GLONASS频间差越敏感,则传统的不考虑 GLONASS频间差的导航定位方式精度就越差,引入GLONASS频间差的作用也 就越大。

5.2 GPS/GLONASS 系统时差在相位定位中的应用

5.2.1 定位模型及参数解算

选取测站CHUR在2012年年积日318,时间间隔为30s的观测数据进行定位解 算,采用四种策略进行PPP动态求解:

- (1) GPS单系统PPP;
- (2) GLONASS单系统PPP;
- (3) 传统的不考虑频间差的GPS/GLNONASS组合定位(仅估计GPS系统与 GLONASS系统之间总的时延偏差),基于公式(3-9);
- (4) 引入SHA提供的GPS/GLONASS系统时延偏差(考虑GLONASS卫星的不同频率,包含了GLONASS卫星频间差)直接改正GLONASS卫星观测值再进行GPS/GLONASS组合定位,基于公式(4-9);

采用四种策略进行PPP均得到了很好的最终定位结果,并且定位结果很一致, 差别仅存在在开始的半个小时中。图5.2.1具体分析了前50个历元在X、Y、Z方向 的定位误差(与snx文件中提供的真值相比),图5.2.2为前50个历元各种方法定 位的点位总误差。从两幅图中可以看出四种计算方式其坐标收敛速度都很快。



图 5.2.1 chur 站动态精密单点定位 X、Y、Z 方向收敛情况



图 5.2.2chur 站动态精密单点定位收敛情况

GPS/GLONASS系统时延偏差及频间差的引入仅仅在前2~3个历元有微小的 作用,后面历元解算中第(3)、(4)两种组合定位的策略所得定位结果(红线和绿线) 基本都重合在一起无法区分开来,这是因为(3)中的频间差可以被模糊度所吸收, 为此特别比较了4种组合精密单点定位的结果,这4种方式为:

(1) g+r(isb): 传统的GPS/GLOANSS组合精密单点定位,对GPS系统与GLONASS系统设置一个接收机钟差,由于精密单点定位采用的精密卫星钟和精密轨道数据是在GPS时间基准下的,因此钟差其实应该相等都为dt^G_i,GLONASSS所有卫星对相对GPS系统的时延偏差设置为同一个值*ISB_i*,ISB_i只与测站有关。实际上系统时延偏差*ISB^{kR}*还应该包括GLONASS卫星频间差部分*IFB^{kR}*,频间差将被模糊度所吸收,其定位公式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{i}^{jG} &= \boldsymbol{\rho}_{i}^{jG} + \mathbf{c} \cdot dt_{i}^{G} - \mathbf{c} \cdot dt^{jG} + \lambda \cdot N_{i}^{jG} - I_{i}^{jG} + T_{i}^{jG} + \varepsilon_{i}^{jG} \\ \mathbf{L}_{i}^{kR} &= \boldsymbol{\rho}_{i}^{kR} + \mathbf{c} \cdot dt_{i}^{G} - \mathbf{c} \cdot dt^{kR} + ISB_{i} + \lambda \cdot \overline{N_{i}^{kR}} - I_{i}^{kR} + T_{i}^{kR} + \varepsilon_{i}^{kR} \end{aligned}$$
(5-2)
$$ISB_{i}^{kR} = ISB_{i} + IFB_{i}^{kR} \\ \lambda \cdot \overline{N_{i}^{kR}} = \lambda \cdot N_{i}^{kR} + IFB_{i}^{kR} \end{aligned}$$

(2) g+r+isb(isb): 在(1)的基础上,用SHA提供的GPS/GLONASS系统时延 偏差 *ISB^{kR}*(*SHA*)直接改正GLONASS观测值,同时依然估计系统时延偏 差值。由于在观测值中已经将ISB改掉,因此估计出的ISB值将很小,它 只是对SHA所提供的ISB值的改正,因此将其表示为Δ*ISB^{kR}*,其定位模 型如(5-3)式所示:

$$L_{i}^{jG} = \rho_{i}^{jG} + c \cdot dt_{i}^{G} - c \cdot dt^{jG} + \lambda \cdot N_{i}^{jG} - I_{i}^{jG} + T_{i}^{jG} + \varepsilon_{i}^{jG}$$

$$L_{i}^{kR} = \rho_{i}^{kR} + c \cdot dt_{i}^{G} - c \cdot dt^{kR} + \Delta ISB_{i}^{kR} + ISB_{i}^{kR}(SHA) + \lambda \cdot N_{i}^{kR} - I_{i}^{kR} + T_{i}^{kR} + \varepsilon_{i}^{kR}$$
(5-3)

 (3) g+r+isb(no isb):用SHA提供的GPS/GLONASS系统时延偏差 ISB^{kR}(SHA) 直接改正GLONASS观测值,并认为该值十分准确,因此不再估计ISB参 数,其定位模型如(5-4)式所示:

$$L_{i}^{jG} = \rho_{i}^{jG} + \mathbf{c} \cdot dt_{i}^{G} - \mathbf{c} \cdot dt^{jG} + \lambda \cdot N_{i}^{jG} - I_{i}^{jG} + T_{i}^{jG} + \varepsilon_{i}^{jG}$$

$$L_{i}^{kR} = \rho_{i}^{kR} + \mathbf{c} \cdot dt_{i}^{G} - \mathbf{c} \cdot dt^{kR} + ISB_{i}^{kR}(SHA) + \lambda \cdot N_{i}^{kR} - I_{i}^{kR} + T_{i}^{kR} + \varepsilon_{i}^{kR}$$
(5-4)

(4) g+r(no isb): 既不引入SHA提供的 *ISB*^{kR}(*SHA*),也不估计ISB参数,进设 置同一个接收机钟差参数 c·*dt*^G,这样的话GPS/GLOASS系统时延偏差 一部分将被测站钟差所吸收,另一部分将被模糊度所吸收,其定位模型 为:

$$\begin{split} \mathbf{L}_{i}^{jG} &= \rho_{i}^{jG} + \mathbf{c} \cdot \overline{dt_{i}^{G}} - \mathbf{c} \cdot dt^{jG} + \lambda \cdot \overline{N_{i}^{jG}} - I_{i}^{jG} + T_{i}^{jG} + \varepsilon_{i}^{jG} \\ \mathbf{L}_{i}^{kR} &= \rho_{i}^{kR} + \mathbf{c} \cdot \overline{dt_{i}^{G}} - \mathbf{c} \cdot dt^{kR} + \lambda \cdot \overline{N_{i}^{kR}} - I_{i}^{kR} + T_{i}^{kR} + \varepsilon_{i}^{kR} \\ ISB_{i}^{kR} &= ISB_{i,clk}^{kR} + ISB_{i,amb}^{kR} \\ \mathbf{c} \cdot \overline{dt_{i}^{G}} &= \mathbf{c} \cdot dt_{i}^{G} + ISB_{i,clk}^{kR} \\ \lambda \cdot \overline{N_{i}^{kR}} &= \lambda \cdot N_{i}^{kR} + ISB_{i,clk}^{kR} \\ \lambda \cdot \overline{N_{i}^{jG}} &= \lambda \cdot N_{i}^{jG} - ISB_{i,clk}^{kR} \end{split}$$
(5-5)

以上四种定位模式将在以下分析中进行进一步解释与论证。

图5.2.3展示了这四种组合定位在三个方向的精度,四种方法几乎得到了一模 一样的定位结果:

第5章 GPS/GLONASS 系统时延偏差及频间差的应用



图 5.2.3 四种组合精密单点定位坐标精度(chur)

为了分析四种解算方法的区别,我们特别比较了前50个历元的收敛情况,图 5.2.4为前50个历元四种定位方法的点位总误差示意图,其中,前三种方法的定位 总误差几乎合并为一条绿线,最后一种方法也仅仅是在前三个历元不同于另外三 种,后面就几乎一致了,由此可见,是否引入GPS/GLONASS系统时延偏差参数 对组合精密单单点定位坐标结果几乎是没有影响的。该偏差将被测站钟差、模糊 度等参数所吸收。



图 5.2.4 四种组合精密单点定位点位总误差(chur)

为了找出系统时延偏差的去向,对坐标参数之外的其它参数进行比较。图 5.2.5 是对四种方法接收机钟差参数比较,图 5.2.6 为四种方法对流层天顶总延迟 参数比较。



图 5.2.5 接收机钟差结果(chur)图 5.2.6 对流层湿延迟参数结果(chur)

由图 5.2.6 可以看出,四种定位方式所得的对流层延迟参数完全相等。由于 在定位模型中,对流层延迟参数前的系数是不断变化的,与其他参数相关性很小, 因此系统时延偏差不会被其所吸收。

然而图 5.2.5 中接收机钟差则有十分明显的区别,其中前三种方法都合并为同一条蓝线,只有第四种方法与其他不同。该站接收机钟差相当平稳,蓝线与枚 红线之差也特别平稳,对 GPS 与 GLONASS 分别挑选 4 颗卫星,作图 5.2.7 和图 5.2.8 展示其模糊度计算结果,



图 5.2.7 GPS 卫星模糊度示例(chur), 单位 m



图 5.2.8 GLONASS 卫星模糊度示例(chur),单位 m

5.2.2 系统时延偏差对GPS卫星参数的影响

与图 5.2.7 中 4 颗 GPS 卫星模糊度解算结果的特性相同:所有 GPS 卫星前 三种方法所解算的模糊度都相同,合并为一条蓝线,第四种方法为红线,两条线 之间几乎保持一个恒定不变的值。从定位模型上分析,式(5-2)、(5-3)、(5-4) 中 GPS 观测值的观测方程相同,将其与(5-5)中第一式 GPS 的观测方程相减可 得:

$$(\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}) + (\lambda N_i^{jG} - \lambda \overline{N_i^{jG}}) = 0$$
(5-6)

结合式(5-5)与(5-6)可知,在第四种方法中,由于完全没有考虑 GLONASS 系统时延偏差 *ISB*^{kR}_i的存在,因此其中一部分 *ISB*^{kR}_{i,clk} 会被接收机钟差所吸收,相应地影响 GPS 模糊度。为了证实(5-6)的成立,特别比较了前三种方法与最后一种方法的接收机钟差之差与 GPS 卫星模糊度之差。



图 5.2.10 $(\lambda N_i^{jG} - \lambda \overline{N_i^{jG}})$ 序列 (chur)

很明显,图 5.2.9 与图 5.2.10 中的曲线是互补的,如式(5-6)所示,每个历 元对 GPS 卫星($\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}$)与($\lambda N_i^{jG} - \lambda \overline{N_i^{jG}}$)之和为零。因此在每个历元对每 颗 GPS 卫星求($\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}$)+($\lambda N_i^{jG} - \lambda \overline{N_i^{jG}}$)之和,对每颗 GPS 卫星求所有 历元的平均值与其标准差得到表 5.6。

分析表 5.6 可知,大部分 GPS 卫星都十分符合式(5-6),*ISB*^{*kR*}_{*i*}确实有一部 分被 *ISB*^{*kR*}_{*i,clk*}所吸收。由于前几个历元坐标没有收敛,接收机钟差与模糊度解算也 相应得不是很准,这从图 5.2.9 与图 5.2.10 中也可以看出。因此在前几个历元就 被观测到的 GPS 卫星(G3、G6、G9、G14、G15、G18、G19、G21、G22、G24、 G26、G28),其($c \cdot dt_i^G - c \cdot \overline{dt_i^G}$)+($\lambda N_i^{jG} - \lambda \overline{N_i^{jG}}$)之和的平均值与标准差都稍微 偏大,但是平均值依然在 1mm 之内,标准差在 10mm 之内,其他卫星则无论平 均值绝对值还是标准差都在 0.5mm 之内。
Туре	Average (mm)	STD (mm)	Туре	Average (mm)	STD (mm)
G1	-0.01	0.03	G17	-0.01	0.02
G2	-0.01	0.02	G18	0.11	0.99
G3	0.42	4.02	G19	0.16	1.22
G4	-0.01	0.02	G20	-0.01	0.01
G5	-0.01	0.01	G21	0.20	1.62
G6	0.50	5.03	G22	0.49	4.55
G7	0.00	0.01	G24	-0.25	2.86
G8	0.00	0.01	G25	-0.01	0.01
G9	-0.25	2.90	G26	-0.58	6.79
G10	-0.01	0.01	G27	-0.01	0.01
G11	0.00	0.03	G28	-0.61	6.23
G12	-0.01	0.01	G29	-0.01	0.01
G13	-0.01	0.01	G30	-0.01	0.01
G14	0.66	6.35	G31	0.00	0.03
G15	-0.46	5.01	G32	0.00	0.01
G16	0.00	0.00			

表 5.6 GPS 卫星 (c · $dt_i^G - c \cdot \overline{dt_i^G}$) + ($\lambda N_i^{jG} - \lambda \overline{N_i^{jG}}$) 均值及标准差

5.2.3 系统时延偏差对GLONASS卫星参数的影响

与图 5.2.7 中的 GPS 卫星不同,图 5.2.8 中 GLONASS 卫星的模糊度分为三条曲线,其中方法一为红线,方法二与方法三合并为同一条蓝线,方法四为玫红色线。

方法二与方法三都先利用上海天文台提供的系统时延偏差值 *ISB*^{kR} (*SHA*) 改 正了 GLONASS 卫星的观测值,即消去了 GPS 系统与 GLONASS 系统之间的差 异也消去了 GLONASS 不同频率卫星之间的差异,区别是方法二在改正了观测值 后依然对 GPS 系统与 GLONASS 系统之间的偏差剩余量 Δ*ISB*^{kR} 进行估计。由于 SHA 所提供的 *ISB*^{kR} (*SHA*) 精度很高,因此是否估计 Δ*ISB*^{kR} 影响不大,因此其模 糊度合并为一条曲线。利用方法三中 GLONASS 的观测方程第二式与方法四种的 第二式相减,可得:

$$\left(\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}\right) + ISB_i^{kR} + \left(\lambda \cdot N_i^{kR} - \lambda \cdot \overline{N_i^{kR}(4)}\right) = 0$$
(5-7)

上式中的(4)代表方法四。式(5-7)中第三种方法中的 $\lambda \cdot \overline{N_i^{kR}}$ 分成了两部分,一部分 $ISB_{i,clk}^{kR}$ 如以上 5.2.2中所分析的被接收机钟差所吸收,另一个部分 $ISB_{i,amb}^{kR}$ 则被模糊度所吸收。

接着比较方法一与方法四的区别。方法一式(5-2)中认为所有 GLONASS 卫星对 GPS 卫星的系统时延偏差都相等,设置为一个参数 *ISB_i*,因此每颗卫星 的频间差部分 *IFB_i^{kR}* 将被模糊度所吸收。将式(5-2)与式(5-4)相减得:

$$\left(\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}\right) + ISB_i + \left(\lambda \cdot \overline{N_i^{kR}(1)} - \lambda \cdot \overline{N_i^{kR}(4)}\right) = 0$$
(5-8)

式 (5-7) 与 (5-8) 相减可得

$$(ISB_{i}^{kR} - ISB_{i}) + (\lambda \cdot N_{i}^{kR} - \lambda \cdot N_{i}^{kR}(1)) = 0$$

$$IFB_{i}^{kR} = ISB_{i}^{kR} - ISB_{i}$$

(5-9)

由(5-9)式可知,方法一与方法二(三)所得 GLONASS 卫星模糊度之差, 也就是图 5.2.8 中红线与蓝线之差就是 GLONASS 卫星的频间差,该值与卫星频 率有关。

为验证式(5-7)与式(5-8)的成立,设

$$\Sigma_{glonass1} = \left(\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}\right) + ISB_i^{kR} + \left(\lambda \cdot N_i^{kR} - \lambda \cdot \overline{N_i^{kR}(4)}\right)$$

$$\Sigma_{glonass2} = \left(\mathbf{c} \cdot dt_i^G - \mathbf{c} \cdot \overline{dt_i^G}\right) + ISB_i + \left(\lambda \cdot \overline{N_i^{kR}(1)} - \lambda \cdot \overline{N_i^{kR}(4)}\right)$$
(5-10)

倘若对所有卫星 $\Sigma_{glonass1}$ 与 $\Sigma_{glonass2}$ 都为零,则表明第四种方法中没有进行估计的系统时延偏差和频间差被接收机钟差和模糊度参数所吸收。在每个历元,对 每颗 GLONASS 卫星求 $\Sigma_{glonass1}$ 与 $\Sigma_{glonass2}$,并对每颗卫星所有历元的 $\Sigma_{glonass1}$ 与 $\Sigma_{glonass2}$ 求平均值与标准差,其统计结果如表 5.7 所示:

卫星	$\Sigma_{glonassl}$ (mm)		$\Sigma_{glonass2}$ (mm)		
	平均值	标准差	平均值	标准差	
R1	0.08	0.05	0.08	0.07	
R2	0.09	0.05	0.04	0.02	
R3	0.08	0.05	0.03	0.01	
R4	0.07	0.05	0.02	0.00	
R5	0.05	0.04	0.02	0.00	
R6	0.02	0.04	-0.21	3.82	
R7	0.03	0.04	0.27	1.81	
R9	0.04	0.04	0.08	0.21	
R10	0.07	0.05	0.08	0.10	
R11	0.08	0.05	0.05	0.05	

表 5.7 GLONASS 卫星 $\Sigma_{glonass1}$ 与 $\Sigma_{glonass2}$ 的均值及标准差

	×1	5年015人		元可運動生の	(沙州时/土山)
R12	0.09	0.05	0.03	0.02	
R13	0.08	0.05	0.03	0.01	
R14	0.06	0.05	0.03	0.00	
R15	0.03	0.04	-0.28	4.48	
R16	0.03	0.04	-0.23	4.13	
R17	0.06	0.03	0.04	0.03	
R18	0.06	0.04	0.03	0.01	
R19	0.06	0.05	0.02	0.00	
R20	0.05	0.05	0.02	0.00	
R21	0.05	0.06	0.02	0.01	
R22	0.04	0.06	0.59	5.18	
R23	0.04	0.05	0.35	1.89	
R24	0.05	0.04	0.09	0.09	

第5章 GPS/GLONASS 系统时延偏差及频间差的应用

根据上述比较可知,倘若不考虑系统时差与GLONASS卫星频间差,依然可以得到精确坐标值, ISB 与 IFB 会被接收机钟差与模糊度所吸收。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文主要研究了 GPS/GLONASS 组合伪距定位以及 GPS/GLONASS 组合精 密单点定位的基本原理,并在传统定位模型的基础上引入对系统时延偏差的分析, 并对其在定位中的应用进行了探讨。本文的主要工作及总结如下:

(1)介绍了 GPS 系统与 GLONASS 系统的基本组成部分、星座概况以及近些年来的现在化进程。并从坐标系统、时间系统、系统差异这三个方面比较了 GPS 系统与 GLONASS 系统之间的差异。并特别指出,由于 GPS 信号采用码分 多址的方式,而 GLONASS 采用频分多址的方式来区分不同的卫星,因此而造成 了卫星信号在卫星以及接收机中传播时硬件延迟的不同,从而形成了 GPS/GLONASS 系统时延偏差。

(2)介绍了传统的 GPS/GLOANSS 组合伪距定位模型。为 GPS 系统与 GLONASS 系统分别设置一个接收机钟差参数,即认为 GPS 系统与所有 GLONASS 系统之间存在一个仅与接收机有关的系统时延偏差,而忽略 GLOANSS 卫星之间的频间差。如此进行组合伪距定位,定位结果表明,无论哪 种伪距定位方式,均可达到 3 米的定位精度,相比之下 GPS 单系统定位精度优 于 GLONASS 单系统伪距定位,而组合定位的坐标精度最高,在 2 米之内。此外 比较解算得的 GPS 系统与 GLONASS 系统的接收机钟差,得到不考虑 GLONASS 频间差的系统时延偏差,该值多达几十米,在伪距定位中无法忽略。

(3)介绍了传统的 GPS/GLOANSS 组合精密单点定位模型以及定位中的各种误差及其减弱措施。与传统的 GPS/GLONASS 伪距定位模型类似,传统的 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型也仅仅考虑了 GPS 系统与 GLONASS 系统之间的系统时延偏差而忽略了 GLONASS 卫星之间的频间差。通过实例计算证 明,GPS/GLOANSS 组合精密单点定位所得坐标结果与 GPS 单系统定位结果十分近似,其差异在 1cm 以内。组合精密单点定位的优先在于一是收敛速度比较快,二是在一些恶劣的观测条件下可见卫星数目不足时,组合精密单点定位精度 明显优于单系统定位。

(4)通过介绍 SHA 综合数据处理统一模型给出系统时延偏差的概念,对其 产生的原因进行了详细的推导。利用 SHA 提供的 14 个月 74 个 GPS/GLONASS 双模接收机的系统时延偏差值分析了系统时延偏差的特性,并根据它与 GLONASS 卫星频率号之间的关系进行了线性拟合。通过大量数据的统计分析证 明:①系统时延偏差随时间的变化在各个测站上一致,这表明引起系统偏差的长期变化主要是系统时差;②相同类型接收机的系统时延偏差基本一致,不同类型接收机系统偏差存在明显偏差;③同类型接收机采用不同天线也会造成系统偏差的不同;④GLONASS卫星频间差可以根据相应GLONASS卫星的频率号进行线性拟合,从而减少未知数个数,并对相同类型接收机和天线的测站进行系统时延偏差的预报。

(5)通过实例计算,介绍 GPS/GLONASS 系统时延偏差在 GPS/GLONASS 组合伪距定位中的应用。通过比较 GPS 单系统伪距定位、GLONASS 单系统伪 距定位、传统的 GPS/GLONASS 组合伪距定位以及引入系统时延偏差的组合伪 距定位,计算结果表明,组合定位结果优于单系统定位,GPS 系统优于 GLONASS 系统,引入系统时延偏差的组合定位精度优于传统的组合定位。为了体现系统时 延偏差的优势,特别模拟了两种可见卫星数目较少的观测环境,比较这种条件下 传统组合伪距定位与引入系统时延偏差定位的精度,结果表明当可用卫星数目较 少观测条件比较差时,引入 GPS/GLONASS 系统时延偏差可以增加每个历元的 多余观测数,从而提高定位精度。倘若测站不更换接收机和天线,则每个测站对 每颗卫星的频间差在短期内比较稳定,因此可以对其进行预报,并利用预报值进 行实例解算。计算结果表明在导航定位中考虑 GLONASS 频间差能有效得提高定 位精度,对于不同类型的接收机提高程度也不同。GLONASS 频间差预报值可以 广泛应用于相同类型的接收机上,从而提高导航定位精度。

(6)本文最后实例计算了 GPS/GLONASS 系统时延偏差在 GPS/GLONASS 精密单点定位中的应用。实例计算了 GPS 单系统 PPP, GLONASS 单系统 PPP, 传统的 GPS/GLONASS 组合 PPP 以及考虑 GLONASS 卫星频间差的组合 PPP。 计算结果表明,四种方式进行动态 PPP 均一致获得很精确的坐标结果,组合 PPP 收敛速度略快于单系统 PPP,但是两种组合定位的坐标序列几乎重合。经推断,这是由于系统时延偏差被模糊度、接收机钟差等参数所吸收,为证明这一结论,特别比较了几种方法所得的出坐标参数外的其他参数,通过比较证明了这一猜测,并得出了倘若仅需要得到精确坐标值,那么 GPS/GLONASS 组合 PPP 完全可以不考虑系统时延偏差,仅设置一个接收机钟差的结论。

6.2 展望

本文主要研究了 GPS/GLONASS 组合伪距定位与精密单点定位的原理和模型,重点针对 GPS/GLONASS 系统时延偏差(包括 GLONASS 频间差)的性质 以及其在 GPS/GLOANSS 组合定位中的应用进行了分析,结果表明对伪距定位

65

同济大学 硕士学位论文 GPS/GLONASS 组合定位

作用很大,但是对 PPP 的影响很小,因此本文仍然存在一系列相关问题需要进一步研究与提高,具体的内容包括:

(1) 从数学模型上分析 GPS/GLONASS 组合精密单点定位不引入系统时延 偏差 ISB 或者 GLONASS 卫星频间差 IFB 时, ISB 与 IFB 的值在接收机钟差以及 模糊度上的分配。

(2)本文仅仅利用 SHA 所提供的系统时延偏差值进行对于频间差相对于 GLONASS 卫星频率号的线性拟合,这样做其实不是很严格。这一线性关系可以 体现在当初求解系统时延偏差的数学模型中。因此,可以考虑建立一个基于 GLONASS 卫星频间差线性关系的 GPS/GLONASS 组合定位模型,这样就不需要 为每个 GLONASS 卫星频率设置一个频间差参数,大大降低了求解系统时延偏差 的难度。

(3)随着我国北斗系统的建设和完善,后续可以考虑联合 GPS、GLONASS 以及北斗的多模伪距定位与精密单点定位,并分析北斗与 GPS 系统之间的系统 时延偏差。

致谢

逾尺的札记和研究纪录凝聚成这么薄薄的一本,高兴和欣慰之余,不禁感慨 系之。从大一懵懂得踏入同济校门到如今硕士接近尾声,不知不觉中已在同济度 过了将近七个年头,感谢学校、土木学院尤其是测绘学院所提供的各种平台和资 源,是同济见证了我的成长,当初的白纸一张被塑造成型。

值论文完成之际,首先诚挚地向导师王解先教授致以深深的感谢!王老师治 学之严谨,思维之敏捷,知识之渊博,思想之高尚在潜移默化中感染着我,无论 做人还是做事都从导师身上受益匪浅。

需要特别感谢的是副导师上海天文台陈俊平研究员。在学习和撰写本论文期间,陈老师给予了很大的帮助和指导,在学术的道路上得到了陈老师的悉心指导和谆谆教诲。陈老师所负责的上海天文台 GNSS 分析中心为本文研究的开展提供了非常重要的平台和数据。

同时要感谢各位专业课代课教师沈云中、伍吉仓、陈义、胡丛玮、楼立志、 鲍峰、王穗辉、程效军、潘国荣、关泽群、叶勤、邵永社、王卫安等在学业上给 予的教导和帮助,感谢当了我们7年班主任的刘春老师,感谢励增和、陈道奇、 何君、徐争农老师给予的帮助。

感谢我的闺蜜李楠、徐妍菲、张丽皎、赵旻玥以及挚友宋信林、牟玉江、黄 增鑫等的陪伴,他们让我7年在外的求学生活丰富多彩。

感谢各位同门李浩军、王维、何丽娜、王成、贾蓉、杜瑞、赵新秀、连丽珍、 巩秀强、陈威、张朋、邢志成、张益泽、王龙浩、丁建洋以及教研室同伴陈超、 刘伟洲、陈杰、余伟、谢益炳等的帮助,他们让我的硕士学习生活多姿多彩,充 满了喜悦。

特别感谢本论文所列出的参考文献的所有作者提供无偿帮助服务和研究成 果,它们是本文的研究得以顺利完成的不可或缺的因素,在此向他们致以崇高的 敬意!

最后,特别感谢老公的支持和鼓励,感谢培育我成长的父母,感谢他们一如 既往得对我学业和生活上的支持,对于他们默默的无私关怀,难以用言语来表达 我内心深处的感激之情。

2013年2月

67

参考文献

- [1] 施浒立, 崔君霞. 卫星导航技术房展向何处去[J]. 中国科学, 2011, 41(5):539-546
- [2] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and RobustAnalysis of GPS Data from Large Networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102(B3): 5005-5017
- [3] Zumberge J F. Automated GPS data analysis service[J]. GPS Solutions, 1999, 2 (3) :76-78
- [4] Kouba J, P Heroux. Precise Point PositioningUsing IGS Orbit and Clock Products. GPS Solutions, 2000, 5(2):12-28
- [5] Muellerschoen, R.J., Y.E.Bar-Sever, W.I.Bertiger, D.A.Stowers. NASA's Global DGPS for High Precision Users[J]. GPS World, 2001, 12(1):14-20
- [6] Gao Y., Shen X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-Based Precise Point Positioning[C]. ION GPS-2001,Salt Lake City,Utah,USA,September 11-14,2001.
- [7] Gao Y, Shen X. A New Method for Carrier Phase Based Precise Point Positioning[J]. Journal of the Institute of Navigation, 2002, 49(2): 109-116
- [8] Stewart M, Tsakiri M. GLONASS Broadcast Orbit Computation. GPS Solution, 1998, Vol.2:16-27.
- [9] Pratt M, Burke B, Misra P. Single-epoch integer ambiguity resolution with GPS-GLONASS L1-L2 data. ION GPS, 1998.
- [10] Han S, Dai L, Rizos C. A new data processing strategy for combined GPS/GLONASS carrier phase-based positioning. 12th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Nashville, Tennessee, 1999, 1619-1627
- [11] Habrich H. Geodetic applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS combinations. [Ph.D. dissertation]. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 1999.
- [12] Wang J. An approach to GLONASS ambiguity resolution. Journal of Geodesy, 2000, Vol.74:421-430
- [13] Wang J, Rizos C, Stewart M P, et al. GPS and GLONASS Integration: Modeling and Ambiguity Resolution Issues. GPS Solution, 2001, Vol.5:55-64
- [14] Rossbach U. GLONASS Double Difference Ambiguity Resolution in Real-Time. ION GPS 2000.
- [15] Bruyninx,C. Comparing GPS-only with GPS+GLONASS Positioning in a Regional Permanent GNSS Network[J]. GPS Solution, 2007,11:97-106
- [16] Oleynik, E.G, V.V.Mitrikas, S.G.Revnivykh, A.I.Serdukov, E.N.Dutov, V.F.Shiriaev. High-Accurate GLONASS Orbit and Clock Determination for the Assessment of System Performance[C]. Proceedings of ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, September, 26-29
- [17] Cai Changsheng, Gao Yang. Precise Point Postioning Using Combined GPS and GLONASS Observations[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2007(6):13-22
- [18] LambertWanninger. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. J Geod, Journal of Geodesy, 2012, 86(2):139-148, DOI: 10.1007/s00190-011-0502-y
- [19] 高星伟.GPS/GLONASS 数据处理方法研究及软件编制[D].北京:中国测绘科学研究

院,1999

- [20] 高星伟,葛茂荣.GPS/GLONASS 单点定位的数据处理[J].测绘通报,1999(4):8-9
- [21] 李咏强,李智,唐跃平.GPS/GLONASS 组合定位的算法研究[J].指挥技术学院学报,2000,11(6):55-59
- [22] 胡国荣,崔伟宏.组合 GPS/GLONASS 精密定位的观测值随机模型[J].遥感学报,2001(2):95-99
- [23] 胡国荣,崔伟宏.组合 GPS/GLONASS 加权单点定位方法[J].测绘通报,2002,23(1):59-63
- [24] 任锴,杨力,黄建.GLONASS 单点定位及精度分析[J].测绘通报,2008,(11):4-6
- [25] 于兴旺,张小红,邰贺,陈远. GPS/GLONASS 组合单点定位在导航中的应用 [J].测绘信息 与工程,2007,32(6):1-3.
- [26] 于兴旺,张小红,郭菲等. 基于精密星历的 GPS/GLONASS 组合单点定位研究[J].测绘信 息与工程,2009,34(2):3-4
- [27] 张小红,郭斐,李星星等. GPS/GLONASS 组合精密单点定位研究[J].武汉大学学报(信息 科学版),2010,35(1):9-12
- [28] 孟祥广,郭际明. GPS/GLONASS 及其组合精密单点定位研究,2010,35(12):1409-1413
- [29] Xiao Pei, Junping Chen. Application of Inter-system Hardware Delay Bias in GPS/GLONASS PPP. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 160(2): 381-387, DOI: 10.1007/978-3-642-29175-3_34
- [30] 田力,陈俊平,裴霄. GNSS 时差及其在多系统组合定位中的应用. 测绘通报
- [31] Flohrer C. (2008) : Mutual validation of satellite-geodetic techniques and its impact on GNSS orbit modeling, Geodaetisch-geophysikalischeArbeiten in der Schweiz, Vol. 75
- [32] Rolf Dach, StefanSchaer, SimonLutz, MichaelMeindl, GerhardBeutler. Combining the Observations from Different GNSS. EUREF 2010 Symposium, June 02–05, 2010, Gävle, Sweden
- [33] 维基百科
- [34] http://zh.wikipedia.org/wiki/GLONASS
- [35] Information-analytical centre, Korolyov, Russia, http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/
- [36] 周忠谟,易杰军,周琪.GPS 卫星测量原理及应用[M].北京:测绘出版社,1999
- [37] 维基百科
- [38] 王解先,徐志京. 三种坐标间转换的雅可比矩阵数值导数计算方法[J]. 大地测量与地球 动力学, 2004, 24(4):19-23
- [39] 王解先. GPS 精密定轨定位[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997
- [40] 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
- [41] Rossbach U. GLONASS Double Difference Ambiguity Resolution in Real-Time. ION GPS 2000.
- [42] 李建文. GLONASS 卫星导航系统及 GPS/GLONASS 组合应用研究[D]. 郑州:中国人民解放 军信息工程大学, 2001, 4
- [43] McCarthy D D.IERS Convertions 2003.Observatorie de Paris, July. 2003
- [44] GLONASS Interface Control Document (version 5.0) [z]. Moscow,2002.
- [45] 魏子卿, 葛茂荣.GPS 相对定位数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998
- [46] 余文坤, 戴吾蛟, 蔡昌盛, 匡翠林. GPS/GLONASS广播星历精度分析[J]. 工程勘察, 2012, 8
- [47] 郭际明, 孟祥广, 李宗华, 聂兆生. GLONASS卫星广播星历精度分析[J]. 大地测量与地球 动力学, 2011, 01

- [48] Weber, R., J.A.Slater, E.Fragner, V.Glotov, H.Habrich, I.Romero, S.Schaer. Precise GLONASS Orbit Determination within the IGS/IGLOS-Pilot Project[J]. Advances in Space Research, 2005(36):369-375
- [49] Junping Chen, Bin Wu. SHA: The GNSS Analysis Centerat SHAO. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 160(2): 213-221, DOI: 10.1007/978-3-642-29175-3 19
- [50] Oleynik, E.G., V.V.Mitrikas, S.G.Revnivykh, A.I.Serdukov, E.N.Dutov, V.F.Shiriaev. High-Accurate GLONASS Orbit and Clock Determination for the Assessment of SystemPerformance[C]. ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, September 26-29, 2006
- [51] 曲伟菁,朱文耀. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. 天文学报, 2008,49(1):113-121
- [52] 杨玲,李博峰,楼立志.不同对流层模型对 GPS 定位结果的影响[J]. 测绘通报 2009, 4:9-12.
- [53] 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D].上海,中国科学 院上海天文台,2004
- [54] Mader,G.L.GPS Antenna Calibration at The National Geodetic Survey[J].GPS Solutions, 1999, 3(1):50-58
- [55] Mader,G.L. A Comparison of Absolute and Relative GPS Antenna Calibrations[J]. GPS Solutions,2011,4(4): 37-40
- [56] Schmitz M., G.Wubbena, G.Boettcher. Test of Phase Center Variations of Various GPS Antennas and Some Results[J]. GPS Solutions, 2002, 6(1-2):18-27
- [57] Schupler, B.R., T.A.Clark. Characterizing the Behavior of Geodetic GPS Antennas[J]. GPS World, 2001,12(2):48-52
- [58] Leick, A. GPS Satellite Surveying[M]. 3rd Edition.Wiley,2004,ISBN:0471059307.
- [59] Shen, X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning[D]. Calgary, University of Calgary, 2002.
- [60] <u>ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs_01.pcv</u>
- [61] Kouba, J, P.Héroux. Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products[J]. GPS Solutions, 2000,5(2):12-28
- [62] Wu, J.T., S.C.Wu, G.A.Hajj, W.I.Bertiger, S.M.Lichten. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase. Manuscripta Geodaetica, 1993, 18(2): 91-98
- [63] Kouba J and Heroux P. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. GPS Solutions, 5(2): 12-28
- [64] J. Hahn and E. Powers.Implementation of the GPS to Galileo Time Offset (GGTO).Proceedings of the 2005 Joint IEEE International Frequency Control Symposium and Precise Timeand Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. 29-31 August 2005, Vancouver, Canada (IEEE 05CH37664C), pp. 33-212.
- [65] J. Hahn, E. Powers. A Report on GPS and GelileoTime Offset Coordination Efforts. Proceedings of theTimeNav 07 Meeting, May 2007, Geneva, Switzerland
- [66] C. Hegarty, E. Powers and B. Fonville. Accountingfor Timing Biases between GPS, Modernized GPS, andGalileo Signals. Proceedings of the 36th AnnualPrecise Time and

Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 7-9 December 2004, Washington, D.C.

- [67] 李宗扬. 国内首次GPS共视法时间同步试验[J]. 宇航计测技术. 1988(01)
- [68] Dach R., SchaerS., Meindl M.(2012), Comparison of GPS/GLONASS Clock Solutions, IGS–Workshop on GNSS–Biases, Bern, Switzerland, 18.-19. January 2012
- [69] 王解先,陈俊平. GPS 精密定位软件研制与应用[J]. 同济大学学报(自然科学
- 版),2011,39(5):764-767.

[70] Shanghai ObservatoryGNSSAnalysisCenter: www.shao.ac.cn/shao_gnss_ac. 上海天文台 GNSS数据分析中心.

[71] http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/Antennas.jsp?manu=Allen+Osborne

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

裴霄,女,1988年4月生。 2010年7月毕业于同济大学土木学院测量与国土信息工程系,获学士学位。 2010年9月起于同济大学测绘与地理信息学院攻读硕士学位

已发表论文:

[1] 裴霄, 王解先. GPS 伪距单点定位的精度分析及改进. 海洋测绘

- [2] Xiao Pei, Junping Chen. Application of Inter-system Hardware Delay Bias in GPS/GLONASS PPP. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 160(2): 381-387, DOI: 10.1007/978-3-642-29175-3_34
- [3] 田力,陈俊平,裴霄. GNSS 时差及其在多系统组合定位中的应用. 测绘通报

待发表论文:

- Junping Chen, Xiao Pei. GPS/GLONASS System Bias Estimation and Application in GPS/GLONASS Combined Positioning. Lecture Notes in Electrical Engineering (已 收录)
- [2] 裴霄,陈俊平,王解先.GLONASS 卫星频间差对导航定位的影响.大地测量与地球动力学 (已收录)

资助项目:

中科院百人计划资助; 国家高技术研究发展计划(863计划,2013AA122402); 国家自然基金(40974018,11273046); 上海市科学技术委员会资助(12DZ2273300)