

多模GNSS融合精密单点定位 理论与方法

Theory and Method of Multi-GNSS Integrated
Precise Point Positioning

蔡昌盛 著



科学出版社

多模 GNSS 融合精密单点定位 理论与方法

Theory and Method of Multi-GNSS Integrated
Precise Point Positioning

蔡昌盛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对多模 GNSS 融合精密单点定位的理论与实现方法进行了系统全面的阐述,详细推导了 GPS/GLONASS 组合精密单点定位的观测模型和随机模型,在此基础上进一步讨论了 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模糊度固定解方法;发展并建立了单频 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型,提出了一种利用 GLONASS 观测数据自主识别 GLONASS 卫星频率信道号的方法;进一步将 GPS/GLONASS 双系统组合精密单点定位拓展到 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 四系统组合,并进行了软件实现与结果分析;最后将多系统组合精密单点定位技术应用到对流层水汽三维层析中,验证了多系统组合定位的优势。

本书将为促进多模 GNSS 融合精密单点定位技术的应用奠定理论基础,可供从事大地测量学、卫星导航等领域的相关研究人员、工程技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多模 GNSS 融合精密单点定位理论与方法 = Theory and Method of Multi-GNSS Integrated Precise Point Positioning/蔡昌盛著. —北京:科学出版社,2017

ISBN 978-7-03-051823-1

I. ①多… II. ①蔡… III. ①卫星导航-全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 032455 号

责任编辑:裴 育 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 3 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:241 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

全球导航卫星系统(GNSS)是空间信息领域发展的重要方向之一。由于其可以提供高精度、连续性、实时性的定位、导航和授时服务,已成为世界强国间新一轮的竞争焦点。精密单点定位技术是利用载波相位和伪距观测值以及精密卫星产品数据实现高精度绝对定位的一种方法,该技术自1997年首次提出以来已经过了近20年的发展。在此期间,精密单点定位技术由静态发展到动态、由事后发展到实时、由双频拓展到单频和多频、由GPS单系统发展到GNSS多系统、由模糊度浮点解发展到模糊度固定解,这些进展极大地拓展了精密单点定位技术的应用领域。随着我国北斗导航卫星系统(BDS)建设的提速,欧盟Galileo系统的稳步推进,全球导航卫星系统家族迎来了BDS和Galileo两位新成员。增强GPS、GLONASS、BDS、Galileo这四大全球导航卫星系统之间的兼容与互操作已经成为GNSS发展的一种趋势。在此背景下,作者将多年来在GNSS多系统组合定位方面的研究工作进行了系统总结与整理,撰写出版本书。其目的在于系统阐述多模GNSS融合精密单点定位的理论、方法和实现,使读者能够对精密单点定位技术有一个系统、全面的理解,对GPS、GLONASS、BDS、Galileo四大全球导航卫星系统的组合定位方法有一个清晰的认识,促进我国BDS与其他GNSS在高精度定位领域的组合应用。

为了保证技术体系的完整性,尽管作者在精密定轨、误差源及处理、粗差探测、钟跳处理、参数估计方法等方面开展的研究工作较少,但书中仍包含这些方面的内容。GPS、BDS、Galileo系统都已经开始播发多频观测数据,作者在多频精密单点定位方面的研究工作还在进行中,研究成果还不完善,因而关于多频精密单点定位方面的内容未包含在本书中。作者在GPS和GLONASS组合精密单点定位方面开展了较多的研究工作,因而此部分内容在本书中占有较大的篇幅。

为了方便读者了解,这里对本书内容进行简要介绍。

第1章阐述GNSS定位技术的发展过程,对GNSS精密单点定位技术的发展进行回顾,分析国内外研究现状,概括本书包含的主要技术内容。

第2章介绍GPS和GLONASS的现代化计划以及BDS和Galileo系统建设的进展情况;从系统设计参数与时空基准方面比较GPS、GLONASS、BDS和Galileo四大全球导航卫星系统。

第3章介绍卫星运动理论、卫星动力学模型和数值积分方法,对轨道摄动力模型进行阐述,分析GPS、GLONASS、BDS和Galileo精密定轨的研究现状。

第4章讨论卫星定位中通常需要考虑的误差源及其处理方法,以及精密单点

定位中需要特别对待的误差源及其改正方法。

第 5 章介绍几种常用的粗差探测方法;对非差载波相位观测值的周跳探测与修复方法进行讨论,提出一种基于宽巷组合的移动窗口滤波法,与电离层残差二次时间差法联合探测与修复周跳;对接收机存在钟跳的情况进行介绍。

第 6 章介绍几种参数估计方法,包括序贯最小二乘、卡尔曼滤波、自适应卡尔曼滤波和抗差估计方法;归纳总结 GPS 精密单点定位常用的四种定位模型,即传统模型、UofC 模型、非组合模型和消模糊度模型;阐述精密单点定位处理中的数据质量控制方法。

第 7 章推导融合 GPS/GLONASS 的传统精密单点定位模型和 UofC 精密单点定位模型,讨论两种模型的观测值随机模型和参数随机模型;发展单频 GPS/GLONASS 精密单点定位处理方法,提出一种 GLONASS 卫星频率信道号的自主识别方法,对双系统组合 PDOP 计算方法进行定义。

第 8 章回顾几种典型的 GPS 精密单点定位中固定模糊度的方法,在此基础上建立融合 GPS/GLONASS 的精密单点定位模糊度固定解方法;通过实例数据验证 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模糊度固定解方法的优越性。

第 9 章建立 GPS/GLONASS/BDS/Galileo 四系统组合精密单点定位的观测模型和随机模型,开发多模 GNSS 融合精密单点定位软件(MIPS-PPP),基于此软件利用实例数据从定位精度与收敛时间两个方面对其性能进行评估。

第 10 章展示多模精密单点定位技术在对流层水汽三维层析反演中的应用;阐述联合使用非迭代与迭代重构算法进行层析计算的思想。

本书在撰写与出版过程中,得到了加拿大卡尔加里大学高扬教授,香港理工大学刘志超教授,武汉大学张小红教授,中南大学朱建军教授、戴吾蛟教授、匡翠林博士、易重海博士、崔先强博士等的帮助;研究生潘林、何畅、董州楠、孙清峰、龚阳昭参与了本书的撰写与整理工作;科学出版社为本书的出版给予了大力支持;同时,本书得到了国家重点研发计划(2016YFB0501803)、国家自然科学基金(41004011、41674039)等项目的资助,在此一并致谢。

限于作者水平,书中疏漏或不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。最后,愿本书能为 GNSS 精密单点定位技术的推广应用尽绵薄之力。

蔡昌盛

中南大学

2016 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 精密单点定位技术的发展	3
1.3 主要技术内容	5
第 2 章 GNSS 系统简介	8
2.1 概述	8
2.2 GPS 现代化	10
2.3 GLONASS 现代化	12
2.4 BDS 现状	14
2.5 Galileo 建设进展	16
2.6 四大 GNSS 比较	17
2.6.1 时间系统	18
2.6.2 坐标系统	19
2.6.3 系统比较	20
2.7 本章小结	21
第 3 章 卫星运动理论与精密定轨	22
3.1 概述	22
3.2 卫星动力学模型	22
3.2.1 动力学模型的建立	22
3.2.2 数值积分	25
3.2.3 卫星精密定轨的参数估计	26
3.3 轨道摄动力模型	26
3.3.1 地球非球形引力	27
3.3.2 固体潮	28
3.3.3 多体引力	28
3.3.4 相对论效应	29
3.3.5 大气阻力	29
3.3.6 太阳光压	30
3.4 GNSS 卫星精密定轨	30

3.4.1	GPS 卫星精密定轨	31
3.4.2	GLONASS 卫星精密定轨	32
3.4.3	BDS 卫星精密定轨	33
3.4.4	Galileo 卫星精密定轨	34
3.5	本章小结	35
第 4 章	精密单点定位误差源及处理方法	36
4.1	概述	36
4.2	传统误差源	36
4.2.1	卫星轨道和钟误差	36
4.2.2	电离层延迟	40
4.2.3	对流层延迟	43
4.2.4	接收机钟差	45
4.2.5	多路径误差	46
4.2.6	观测值噪声	49
4.3	特别考虑的误差源	54
4.3.1	卫星和接收机天线相位中心	54
4.3.2	相对论效应	58
4.3.3	天线相位缠绕	59
4.3.4	固体潮	60
4.3.5	大洋负荷	60
4.3.6	大气负荷	61
4.3.7	萨奈克效应	62
4.3.8	极潮	62
4.3.9	码观测值兼容性	63
4.4	本章小结	63
第 5 章	数据预处理	65
5.1	概述	65
5.2	观测数据的粗差探测	65
5.2.1	Baarda 数据探测法	66
5.2.2	多维粗差同时定位定值法	66
5.2.3	粗差的拟准检定法	67
5.3	非差相位观测值的周跳探测与修复	69
5.3.1	TurboEdit 方法	69
5.3.2	基于宽巷组合的移动窗口滤波法	71
5.4	钟跳处理	78

5.4.1 接收机钟跳概述	78
5.4.2 接收机钟跳影响	78
5.4.3 接收机钟跳探测	79
5.5 本章小结	80
第 6 章 GPS 精密单点定位方法	82
6.1 概述	82
6.2 参数估计方法	82
6.2.1 序贯最小二乘	82
6.2.2 卡尔曼滤波	83
6.2.3 自适应卡尔曼滤波	85
6.2.4 抗差估计	87
6.3 定位模型	88
6.3.1 传统模型	88
6.3.2 UofC 模型	93
6.3.3 非组合模型	96
6.3.4 消模糊度模型	97
6.4 质量控制	99
6.5 本章小结	99
第 7 章 GPS/GLONASS 组合精密单点定位	101
7.1 概述	101
7.2 双频精密单点定位	101
7.2.1 观测模型	101
7.2.2 随机模型	108
7.2.3 处理结果与分析	111
7.3 单频精密单点定位	116
7.4 GLONASS 卫星频率信道号的自主识别方法	119
7.5 双系统组合 PDOP 计算方法	122
7.6 本章小结	124
第 8 章 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模糊度固定解	126
8.1 概述	126
8.2 PPP 模糊度固定解方法	126
8.2.1 几种观测值的线性组合	127
8.2.2 几种典型的 GPS 模糊度固定解方法	129
8.3 GPS/GLONASS 组合 PPP 模糊度固定解方法	134
8.3.1 CNES 卫星轨道与钟差产品	134

8.3.2	整周模糊度固定方法	135
8.3.3	数据处理与结果分析	139
8.4	本章小结	147
第9章	四系统组合精密单点定位及软件实现	148
9.1	概述	148
9.2	四系统组合 PPP 模型	148
9.3	多模 PPP 软件设计与实现	151
9.3.1	算法流程	151
9.3.2	MIPS-PPP 软件功能	153
9.3.3	MIPS-PPP 软件界面	153
9.4	数据处理与结果分析	155
9.4.1	数据获取	155
9.4.2	静态结果与分析	156
9.4.3	动态结果与分析	159
9.4.4	定位精度与收敛时间评估	163
9.4.5	系统时间差估值分析	165
9.5	本章小结	166
第10章	基于多模精密单点定位技术的水汽三维层析	167
10.1	概述	167
10.2	水汽三维层析原理	168
10.3	试验与分析	171
10.4	本章小结	175
参考文献		176
附录 中英文及缩写对照		189

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是一种全球、全天候、全天时、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。当前的全球导航卫星系统包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的北斗导航卫星系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)和欧盟的 Galileo 系统。其中, GPS 是历史最悠久、系统最完善、应用最广泛的一种全球导航卫星系统。第一颗 GPS 卫星于 1978 年发射, 1993 年达到了 24 颗卫星, 1995 年美国国防部宣布 GPS 具备完全工作能力。早年的 GPS 卫星信号包括民用 C/A 码、军用 P 码、两种载波 L1 和 L2 以及数据码。P 码是一种军用码,民用用户一般只能利用 C/A 码和载波相位观测值进行定位。整个系统的初始设计目标是提供两种单点定位服务,一种是为民用用户提供的利用 C/A 码进行的标准定位服务(standard positioning service, SPS),另一种是为美国军方以及授权用户提供的利用 P 码进行的精密定位服务(precise positioning service, PPS)。这两种服务模式均是采用一台 GPS 接收机,因而将受到所有 GPS 误差源的影响。选择可用性(selective availability, SA)政策取消以前,标准定位的标称精度为 100m, 2000 年 5 月 1 日 SA 政策取消后,标准定位服务提供的定位精度回到了 30m 左右的水平,相比 SA 政策取消前精度有显著提高(蔡昌盛等, 2002)。然而,这样的精度仍然满足不了精密导航和测量用户的需要。

随着 GPS 定位技术的发展, GPS 已经超越了初始的设计目标。一个最主要的突破是提出了差分定位技术,差分定位技术分为局域差分 and 广域差分。局域差分 GPS 实时定位技术由基准站、数据通信链路和用户站组成。基准站和用户站间隔在一定范围内(一般不超过 150km)并同步观测相同的 GPS 卫星。对于同一卫星同一历元的观测值,由于误差的空间相关性,基准站和用户站包含近似相同的误差。因此,在基准站计算出每一颗 GPS 卫星的误差改正信息后,通过数据通信链路传输至用户站,用户站对观测值进行改正,即可提高定位精度。一般用户站定位精度为 1~5m。由于基准站和用户站的误差相关性随它们之间距离的增加而降低,所以用户站定位精度的改善在很大程度上受基准站和用户站之间距离的限制。广域差分 GPS 技术的基本思想是对 GPS 的卫星轨道误差、卫星钟差及电离层延

迟等主要误差源加以区分,并单独对每一个误差源分别加以“模型化”,计算其误差修正值,然后将计算出的每一误差源的数值通过数据通信链路传输给用户,以对用户 GPS 接收机的观测值误差加以改正,达到削弱这些误差源、改善用户定位精度的目的(刘经南等,1999)。因而,在广域差分 GPS 系统中,只要数据链路有足够能力,基准站和用户站之间的距离原则上是没有限制的。在一般情况下,广域差分 GPS 的定位精度在 1000~1500km 的范围内为 1~5m。局域差分和广域差分 GPS 定位技术显然还无法满足高精度测量的要求。

长期以来,人们在利用载波相位观测值进行定位方面做了大量的卓有成效的研究工作,其中载波相位相对定位技术得到了广泛的应用。类似于伪距码差分定位技术,载波相位相对定位采用两台及以上接收机进行同步观测。静态相对定位技术一般可以达到厘米级或毫米级的定位精度。在利用载波相位观测值进行动态定位方面,人们又提出了实时动态差分(real-time kinematic,RTK)技术,它是一种实时处理两个测站载波相位观测量的差分方法。载波相位差分可分为两类:一类是修正法,另一类是差分法。所谓修正法,即将基准站的载波相位修正值发送给用户,以改正用户接收到的载波相位,再求解坐标。所谓差分法,即将基准站采集的载波相位发送给用户,进行求差解算坐标(徐绍铨等,2003)。对于单基准站动态定位,一般要求基准站和用户站之间的距离为 10~15km,定位的精度为厘米级。为了不受距离的限制,人们又提出了多基准站 RTK、虚拟参考站(virtual reference stations,VRS)等技术,利用这些技术在 50~70km 内可实现厘米级实时动态定位。

载波相位相对定位虽然可以达到很高的精度,但通常要受到测站之间距离的限制。对于有些应用如海洋测绘、航空测量、海岛礁测绘、西部无人区测图等由于缺少基准站或者与基准站相距甚远,原有的定位手段无法满足需求,需要寻求新的定位方式或技术。在这种情况下,精密单点定位(precise point positioning,PPP)技术应运而生。精密单点定位概念首先由美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)的 Zumberge 等于 1997 年提出(Zumberge et al,1997),并在他们开发的数据处理软件“GIPSY”上给予了实现。精密单点定位是一种利用精密卫星轨道和精密卫星钟差数据,以及测码伪距和载波相位观测值进行的一种高精度绝对定位的方法。其静态单天解的精度约为:水平方向 $\pm 1\text{cm}$,高程方向 $\pm 2\text{cm}$ 。非差单点定位模式和差分相对定位模式相比具有很多优点,例如,保留了所有观测信息、能直接得到全球精度均匀的测站坐标、测站之间没有距离限制、数据处理容易、数据采集简单等。精密单点定位所能获得的精度在很大程度上依赖于精密卫星轨道和钟差数据的质量。国际 GNSS 服务(International GNSS Service,IGS)所提供的优于 5cm 的 GPS 卫星精密轨道和优于 0.1ns 的精密卫星钟差数据为精密单点定位技术的出现奠定了基础。

自精密单点定位技术诞生后约十年的时间里,精密单点定位技术的实现都是

基于 GPS 观测数据。但作为一种基于卫星的定位技术,它的可用性、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、露天矿区和山区,可见卫星的数量往往是不够的。增加系统可用性和可靠性的一个可行的办法是联合多 GNSS 进行组合定位。随着俄罗斯 GLONASS 的复苏、我国 BDS 的迅速崛起和欧盟 Galileo 系统建设步伐的稳步推进, GPS 一统天下的局面已经被打破,多 GNSS 的共存与融合将是 GNSS 发展的必然趋势。作者在 GNSS 多系统组合定位方面开展了一系列的研究工作(Cai et al, 2007; Cai et al, 2008; Cai et al, 2009; Cai et al, 2013a; Cai et al, 2013c; Cai et al, 2014b; Cai et al, 2014c; Cai et al, 2014d; Cai et al, 2015a; Cai et al, 2015b),本书在总结已有研究工作的基础上,系统阐述 GNSS 多系统融合精密单点定位的理论、方法与结果。

1.2 精密单点定位技术的发展

精密单点定位概念最初由美国 JPL 的 Zumberge 等于 1997 年提出,并在他们开发的数据处理软件“GIPSY”上实现(Zumberge et al, 1997)。在此期间约 20 年的时间里,精密单点定位技术得到了迅速的发展,并取得了许多实质性的成果。Kouba 和 Héroux(2000)采用 GPS 传统精密单点定位模型获得了厘米级精度的定位结果。传统模型是分别在码和码之间、相位和相位之间形成消电离层组合。加拿大卡尔加里大学的 Gao 等对精密单点定位进行了深入研究(Gao et al, 1997; Gao et al, 2002),并提出了 GPS 精密单点定位的 UofC 模型,该模型不像传统模型那样在两个频率的码和码观测值之间形成消电离层组合,而是分别在两个频率的相位和码观测值之间形成消电离层组合。试验结果证明,该模型比传统模型具有更好的性能(Shen, 2002)。美国 JPL 的 Muellerschoen 等(2001)提出了全球实时动态精密单点定位技术,该技术利用非差双频载波相位观测值,在经过一段时间初始化后进行单历元实时动态精密单点定位。试验结果表明平面位置的定位精度为 $\pm(10\sim 20)\text{cm}$ 。经过近些年的发展,精密单点定位技术已由原来的双频精密单点定位扩展到单频精密单点定位(Le et al, 2007)和三频精密单点定位(Geng et al, 2013),由 GPS 单系统定位拓展到多系统联合定位(Cai et al, 2007),由事后静态处理发展到实时动态处理(Chen et al, 2008),这些发展极大地拓展了精密单点定位技术的应用领域。近年来,一些学者在精密单点定位模糊度固定解方面进行了研究(Ge et al, 2007; Collins, 2008; Geng et al, 2009; Zhang et al, 2013a; Li et al, 2016),利用模糊度参数的整数特性,模糊度固定解技术能在一定程度上减少位置滤波的收敛时间,但模糊度固定需要分离卫星和接收机端的初始相位偏差,而分离该偏差项需要借助跟踪站网的数据以获取相位小数偏差改正值,这同时也增加了精密单点定位技术实现的难度和复杂度。为了加快精密单点定位模糊度收敛速

度,近几年区域地基增强 PPP-RTK 方法应运而生(Li et al, 2011; Geng et al, 2011; Odijk et al, 2014; Teunissen et al, 2015),它是一种固定整周模糊度的实时点定位方法。利用该方法可以有效实现 PPP 与网络 RTK 数据处理模式的统一和无缝衔接(邹璇等, 2014)。

国内学者也对精密单点定位技术进行了深入研究。武汉大学的叶世榕在博士论文中利用其自行研制的精密单点定位处理软件进行了试算,结果表明,单天解的精度纬度方向优于 1cm,经度方向优于 2cm,高程方向优于 3cm。动态定位时初始化时间约为 15min,初始化后单历元解在纬度、经度和高程方向的精度均优于 20cm,大部分解的精度优于 10cm(叶世榕, 2002)。刘经南等(2002)利用 GPS 的精密预报星历和实时卫星钟差数据计算得到的实时动态定位的精度为 40cm。武汉大学的张小红对精密单点定位进行了深入研究,独立研发了后处理精密单点定位软件“TriP”,并成功地将其应用于航空测量,试验结果表明,采用精密单点定位技术可以获得几厘米的动态定位精度(张小红等, 2005; 张小红等, 2006)。香港理工大学的胡丛玮等比较了非差、卫星间单差、历元间单差、历元卫星间差四种不同单点定位差分模型的定位精度和其他指标(Hu et al, 2005)。在整周模糊度固定解研究方面,国内学者也取得了丰硕的成果(张小红等, 2010a; 张宝成等, 2012; 郑艳丽, 2013)。除此之外,也有多位学者对区域地基增强的 PPP-RTK 方法进行了研究,并取得了一系列研究成果(姜卫平等, 2012; 张小红等, 2013b; 张宝成等, 2015)。随着我国北斗系统的快速崛起,北斗精密单点定位技术也逐渐引起学者的重视和关注(Li et al, 2014b; Guo et al, 2016)。

一种有效的提高精密单点定位性能的方法是进行多星座 GNSS 组合。在 GNSS 双系统组合精密单点定位研究方面,作者于 2007 年首次发表了组合 GPS/GLONASS 精密单点定位的初步结果(Cai et al, 2007),随后一些学者在该领域进行了积极的探索(Hesselbarth et al, 2008; Li et al, 2009; Piriz et al, 2009; Melgard et al, 2009; Tolman et al, 2010; Cai et al, 2013a)。Hesselbarth 等(2008)利用 30s 间隔的钟差数据进行 GPS/GLONASS 组合精密单点定位计算后发现,增加 GLONASS 观测值能显著提高位置滤波的收敛速度。Melgard 等(2009)利用实时卫星轨道和钟差产品进行了 GPS/GLONASS 组合精密单点定位处理,结果表明,双系统组合定位相比 GPS 单系统能有效地改善位置滤波的收敛时间。特别是当 GPS 卫星数量不足时,即使增加少量的几颗 GLONASS 卫星数据,精密单点定位的性能也能得到明显改善(Li et al, 2009)。通常情况下, GPS/GLONASS 双系统 PPP 的收敛时间需 20~30min。随着 BDS 的迅速发展和 Galileo 系统建设的稳步推进,一些学者开始研究 GPS/BDS 组合精密单点定位(Li et al, 2014b; Li et al, 2013a; Qu et al, 2013)及 GPS/Galileo 组合精密单点定位(Shen et al, 2006; Cao et al, 2010)技术。在多 GNSS 融合精密单点定位方面, Kjørsvik 等(2007)利用模拟

的观测数据实现了 GPS/GLONASS/Galileo 三系统组合精密单点定位,但由于卫星定位受到众多误差的影响,模拟数据很难反映真实的情况。BDS 和 Galileo 播发真实信号后,Tegedor 等(2014)采用传统精密单点定位模型首次利用实测数据实现了 GPS/GLONASS/BDS/Galileo 四系统组合精密单点定位,他们在单天解结果中阐述了四系统动态 PPP 相比于双系统能明显地改善定位精度,但在静态 PPP 中改善不明显。另外,由于文献中未对收敛时间进行评估,所以收敛时间的改善情况不得而知。

国内学者在多系统组合精密单点定位方面也开展了卓有成效的研究工作。张小红等(2010b)在原有基于 GPS 的精密单点定位软件 TriP 1.0 基础上扩展了 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模块,试算结果表明,当 GPS 卫星数较少时,引入 GLONASS 卫星进行 GPS/GLONASS 组合精密单点定位能有效改善收敛速度及定位精度。孟祥广和郭际明(2010)利用自编的软件对 GPS/GLONASS 双系统数据进行了处理,结果表明,双系统相比单系统能有效地提高收敛速度和改善定位精度。Li 及 Zhang(2014a,2014b)采用卫星之间单差模型分析了 GPS/GLO-NASS/BDS 精密单点定位的精度和收敛时间,结果表明,GPS 单系统收敛时间为 45.1min,GPS/BDS 为 39.6min,GPS/GLONASS 为 20.7min,GPS/GLONASS/BDS 为 19.3min。作者采用静态和动态试验数据分析了 GPS/GLONASS/BDS/Galileo 四系统组合精密单点定位在短时段的定位精度和收敛时间改善情况,验证了多系统组合定位的优势(Cai et al,2015a)。

在软件研制方面,加拿大卡尔加里大学研制了精密单点定位处理软件(P³)。由欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)研制的著名 GPS 数据处理软件 Bernese 在其 4.2 版本中增加了用非差载波相位观测值进行精密单点定位处理的功能。国际上从事非差 GPS 数据处理研究的机构还有美国喷气推进实验室(JPL)、德国地学研究中心(Deutsches Geo Forschungs Zentrum Potsdam, GFZ)、加拿大自然资源部(Natural Resources Canada, NRCan)等。美国 JPL 研制了基于平方根滤波方法,采用非差观测值的定轨、定位软件 GIPSY。德国的 GFZ 研制了基于最小二乘估计的非差相位定轨和定位软件 EPOS。加拿大的 NRCan 开发了 CSRS-PPP 在线精密单点定位处理软件。除此之外,武汉大学卫星导航定位技术研究中心开发了 PANDA 软件,武汉大学的张小红教授开发了 TriP 软件。这些软件的开发成功在很大程度上促进了精密单点定位技术的应用,在多个领域发挥了重要作用。这些软件目前也正在改版升级,以适应 GNSS 多系统的联合处理。

1.3 主要技术内容

精密单点定位技术是最近 20 年发展起来的一门新的定位技术,它在卫星的精

密定轨、高精度的坐标框架维持、全球或区域性的科学考察、航空动态测量、海洋测绘等方面都有不可估量的应用前景。长期以来,精密单点定位技术主要基于 GPS 单系统,随着 GLONASS 的复苏,BDS 和 Galileo 系统的兴起,GNSS 多系统组合精密单点定位已经变成了可能。多系统组合将能改善系统的可靠性、可用性和精确性,这无疑开拓了精密单点定位更加广阔的应用前景。本书系统阐述多模 GNSS 融合精密单点定位的理论和方法,涉及误差模型、误差处理方法、数据预处理、理论建模、性能评估等诸多方面。通过实测的多模 GNSS 观测数据和精密卫星轨道和钟差数据对多模 GNSS 融合精密单点定位方法进行评价。本书包含的主要内容概括如下:

1) GNSS 系统设计与基准对比

GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 四大 GNSS 在系统构成、星座设计、卫星信号、观测值类型、定位原理等诸多方面具有非常好的相似性。但同时,这四大 GNSS 系统由不同的国家或组织建立,它们在一些实现细节上存在明显差异,如时空基准、信号频率、卫星轨道设计等。本书首先对四大系统建设的最新进展情况进行介绍,然后对四系统进行全面的比较分析,为不同系统间的兼容使用与互操作奠定基础。

2) GNSS 精密单点定位中的误差改正模型与策略

在相对定位中,许多误差在观测值双差的过程中得以消除或削弱,因而可以不用对它们进行特别处理。而在精密单点定位中,无法利用误差的空间相关性进行消除或削弱,因而需对其进行精确改正。涉及的误差源包括卫星轨道和钟误差、电离层延迟、对流层延迟、接收机钟差、多路径效应、观测值噪声、接收机天线相位中心偏差、卫星天线相位中心偏差、相对论效应、天线相位缠绕、地球固体潮改正、大洋负荷、大气负荷、萨奈克效应、极潮和码观测值兼容性。本书对上述误差改正模型或策略进行阐述,针对 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 这几种不同的卫星系统,讨论这些误差源处理方式的差异。观测值噪声是建立观测值随机模型过程中需要重点考虑的一个因素,本书通过开展四系统零基线试验,利用零基线试验数据分析比较四系统在观测值噪声方面存在的差异。

3) GNSS 非差相位观测值的周跳探测与修复

数据质量是保证精密单点定位技术精确性和可靠性的前提,对观测数据进行预处理是进行精密单点定位处理的重要步骤。本书对常用的粗差探测方法包括 Baarda 数据探测法、多维粗差同时定位定值法、粗差的拟准检定法进行阐述,对非差载波相位观测值的周跳探测与修复方法进行讨论,通过分析常用的 TurboEdit 周跳探测与修复方法存在的不足,提出一种基于宽巷组合的移动窗口滤波与电离层残差联合探测方法,通过选择电离层活跃程度不同的数据对该方法周跳探测与修复的效果进行验证。对接收机存在钟跳的情况进行分类,阐述其对周跳探测的影响。

4) GPS/GLONASS 双系统组合精密单点定位模型与方法

虽然 GLONASS 是一种非常类似于 GPS 的导航定位系统,但由于 GLONASS

采用了不同的时间和坐标参考,以及频分多址体制引起的不同 GLONASS 卫星信号频率各异,为了能兼容处理 GPS 和 GLONASS 观测数据,需要对 GPS/GLONASS 双系统组合精密单点定位模型进行研究。本书在原有 GPS 精密单点定位模型的基础上通过公式推导建立 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型,通过在参数估计中引入系统时间差参数解决不同系统时间参考差异引起的兼容性问题。在双频精密单点定位模型的基础上,进一步拓展建立单频 GPS/GLONASS 精密单点定位模型和方法。提出一种利用 GLONASS 自身观测值计算 GLONASS 卫星频率信道号的方法,从而可以自主识别 GLONASS 卫星频率,为组合定位算法的实现提供便利。对 GPS/GLONASS 双系统组合定位中的 DOP 值计算方法重新定义,使其能更准确地反映卫星几何分布情况。

5) GPS/GLONASS 双系统组合精密单点定位模糊度固定解方法

在 GPS 精密单点定位模糊度浮点解模型的基础上,实现 GPS 精密单点定位模糊度固定解方法,在此基础上进一步引入 GLONASS 观测值,建立 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模糊度固定解方法。提出一种改进的最小星座方法(minimum constellation method, MCM)来减少进行模糊度固定的窄巷模糊度组合的数量,以提高 GPS/GLONASS 精密单点定位模糊度固定解的计算效率。通过实例数据验证 GPS/GLONASS 组合精密单点定位模糊度固定解相比 GPS 单系统模糊度固定解的优势。

6) 多系统组合精密单点定位及软件实现

随着 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 四大全球导航卫星系统共存格局的形成,利用 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 多系统数据开展联合定位将是 GNSS 发展的必然趋势。本书在 GPS/GLONASS 双系统组合精密单点定位研究的基础上,将其拓展到 GPS/BDS/GLONASS/Galileo 四系统组合精密单点定位,建立四系统组合精密单点定位的观测模型和随机模型。开发多模 GNSS 融合精密单点定位软件(MIPS-PPP),对软件的功能进行介绍。基于该软件,利用 IGS 站观测数据从定位精度与收敛时间两方面对四系统组合精密单点定位性能进行评估。

7) 基于多模精密单点定位技术的水汽三维层析

GNSS 卫星信号穿过大气层中的对流层时,每一次卫星信号的穿越都是对流层水汽的一次直接测量,多卫星系统联合处理可以明显增加可见卫星数和改善卫星的空间几何分布,从而提高层析方法探测水汽的能力。本书从多模精密单点定位技术应用的角度,对水汽三维层析进行研究。利用多模精密单点定位技术反演大气水汽,通过层析方法进行建模。联合使用迭代重构和非迭代重构算法,通过利用香港卫星定位参考站网数据获得香港地区水汽的三维空间分布,通过探空数据检验多模精密单点定位技术进行水汽反演的优越性。

第 2 章 GNSS 系统简介

2.1 概 述

美国国防部在 1973 年 12 月批准海陆空联合研制新的卫星导航系统: Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System, 缩写为 NAVSTAR/GPS, 中文名称为卫星测时测距导航/全球定位系统, 通常简称为 GPS。该系统靠接收卫星信号来进行导航定位, 具有全能性(陆、海、空、天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和授时功能; 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, 每个轨道平面上布设 4 颗卫星。这样的设计基本上保证了在地球任何位置均能同时观测到 4 颗卫星(李洪涛等, 1999)。卫星通过天顶时, 可见时间为 5h, 在高度角 15° 以上, 平均可同时观测到 6 颗卫星, 最多可观测卫星数达 9 颗。卫星设计高度为 20200km, 轨道倾角为 55° , 卫星运行周期为 11h 58min(恒星时 12h), 载波频率为 1575.42MHz 和 1227.60MHz。GPS 整个系统分为卫星星座、地面控制、用户设备三个部分。GPS 计划经历了方案论证(1974~1978 年)、系统论证(1979~1987 年)和生产试验(1988~1993 年)三个阶段。总投资超过 200 亿美元(徐绍铨等, 2003)。

由于 GPS 定位技术关系到美国的国家安全, 美国实施了 SA 政策, 该政策是针对未经美国政府特许的广大 GPS 用户, 采取人为降低实时定位精度的措施, 而对能够利用精密定位服务的用户, 则可以利用密码消除 SA 政策的影响。在 SA 政策的影响下, 利用标准定位服务的用户, 水平定位精度将降为 100m, 高程方向定位精度约为 150m(周忠谟等, 1999)。2000 年 5 月 1 日午夜, 美国政府取消了限制民用精度的 SA 政策, 仅在局部或个别卫星上实施 SA 技术。除了 SA 政策, 美国还在必要时实施针对精测距码的加密措施, 又称“反电子欺骗”(anti-spoofing, AS)措施。该措施使得非特许用户无法应用精测距码(P 码)进行精密定位或进行电子欺骗。

GLONASS 是苏联紧跟美国 GPS 计划而发展起来的, GLONASS 的起步比 GPS 晚 9 年。1982 年 10 月 12 日, 苏联由空间部队在拜哈努尔发射了第一颗 GLONASS 卫星。在 1995 年底完成了 24 颗工作卫星的星座组网工作, 整个系统