



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Time-varying Information Model and
Quality Control in Precise Satellite
Navigation and Positioning

郑作亚 著

高精度GNSS时变观测模型与 数据处理质量控制



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

高精度 GNSS 时变观测模型与 数据处理质量控制

Time-varying Information Model and Quality Control in
Precise Satellite Navigation and Positioning

郑作亚 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 郑作亚 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书以高精度卫星导航定位时变观测模型和数据处理质量控制为核心,以精密单点定位技术和卫星导航定位基准站系统为主线,开展非差相位定位观测模型与误差改正、系统误差与随机误差处理、卫星钟差内插与预报、参数估计收敛速度及影响因素、卫星导航定位基准站网静态时变信息分析、动态定位与质量控制、卫星导航定位基准站网反演电离层模型等研究。

本书的技术内容属于卫星导航定位技术领域的应用技术研究,可作为大学本科高年级学生进一步学习卫星导航定位相关技术及其工程应用的参考书,也可以作为研究生深入科研以及企业软硬件研发人员、生产一线的大地测量学工作者的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高精度 GNSS 时变观测模型与数据处理质量控制 / 郑作亚
著. —北京:测绘出版社, 2017.3
ISBN 978-7-5030-4031-3

I. ①高… II. ①郑… III. ①卫星导航—全球定位系
统一时变—观测—模型—研究 ②卫星导航—全球定位系
统一数据处理—质量控制—研究 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 323364 号

责任编辑 雷秀丽 封面设计 李 伟 责任校对 石书贤 责任印制 陈 超

出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543956(发行部)
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)
电子邮箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司	经 销	新华书店
成品规格	169mm×239mm		
印 张	14.25	字 数	287 千字
版 次	2017 年 3 月第 1 版	印 次	2017 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001-1000	定 价	56.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-4031-3

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

自 1978 年美国国防部为军事应用建立授时与测距导航系统 NAVSTAR(又称全球定位系统,即 GPS)以来,GPS、北斗(BDS)、格洛纳斯(GLONASS)和伽利略(Galileo)等全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)都在加快建设和完善进程。此外,其他国家如日本、印度也在努力建设自己的区域卫星导航系统。至此,卫星导航定位正呈现百花齐放的局面,卫星导航定位技术的发展呈现出卫星导航系统越来越多、系统频率越来越丰富、数据及产品的实时性越来越高等趋势。

近年来,卫星导航定位技术已经在导航、大地测量、天文学、工程测量、大气科学、地球物理学、地球动力学、空间科学、海洋科学等诸多学科领域得到了广泛应用,并促进了多学科的交叉融合与发展,引起了卫星导航、大地测量等学科的革命性发展;卫星导航定位技术的出现,更是推动了卫星导航与位置服务产业的发展壮大。与此同时,卫星导航定位技术还有很大的研究空间和发展前景,如实时精密单点定位(precise point positioning, PPP)、全球级连续运行基准站及其系统(continuously operating reference station or system, CORS)建立与应用服务、多系统多技术集成定位导航技术、室内导航定位新理论新技术新方法、现代大地测量框架建立与维护、基于 GNSS-R 的海洋微波遥感及参数反演应用、海底大地测量等方面。

随着全球 IGS(international GNSS service)站的完善和地区、国家级 CORS 网的逐步构建以及高精度数据处理方法的深入研究,精密单位定位技术和卫星导航定位基准站系统研究已成为卫星导航定位技术中重要的两个研究方向和应用领域。

本书基于笔者主持的国家自然科学基金项目(40904001)、中国博士后科学基金特别资助(201003146)和一等资助(20080440049)、国家“863”计划重点项目子课题(2009AA121401)等项目的研究工作,结合笔者在香港理工大学做访问学者期间以及博士后期间的阶段性研究成果,以高精度卫星导航定位中的时变信息模型和质量控制为核心,以精密单点定位技术和卫星导航定位基准站系统为主线,开展非差相位定位观测模型与误差改正、系统误差与随机误差处理、卫星钟差内插与预报、参数估计收敛速度及影响因素、卫星导航定位基准站网静态时变信息分析、动态定位与质量控制、卫星导航定位基准站网反演电离层模型等研究。笔者长期从事卫星精密定位、定轨与导航以及时变信息模型和质量控制方面的研究,于 2008 年出版了专著《星载 GPS 低轨卫星数据质量控制及其精密轨道确定理论与方法》,

在此基础上结合笔者在该领域的最新研究成果整理出版此书,力争为我国从事卫星导航定位技术应用推广、系统开发与生产实践的科研工作者和技术人员提供一定的借鉴与参考。

全书共分 10 章。第 1 章主要概述了卫星导航定位技术的发展、当前的主要发展趋势与发展方向、精密单点定位技术、连续运行参考站网技术及质量控制方法的研究现状与发展趋势。第 2 章在总结非差观测的观测模型和平差方法的基础上,重点对非差精密单点定位过程中的误差来源及其改正模型进行综述和归纳。最后对目前已经认识到的误差来源、影响量级及改正措施进行总结。第 3 章主要针对 GPS 数据处理中系统误差和随机误差,提出基于符号约束稳健最小二乘估计的系统误差分离方法研究。第 4 章首先对 IGS 超快速星历中相邻钟差资料的相关性进行分析,针对铯钟和铷钟两种卫星钟类型,对目前常用的内插方法进行内插精度分析与比较,重点阐述卫星钟差的预报方法,对附有指数的灰色模型、附有周期项的二次多项式模型及基于递推遗忘因子的最小二乘方法等预报模型进行深入研究。第 5 章在分析不同采样间隔的 GPS 观测资料与卫星钟差对参数收敛的影响的基础上,进行收敛影响因素的分析并提出提高收敛效率的措施讨论。第 6 章阐述了精密单点定位顾及系统误差抗差模型,讨论了新息和残差的随机性分析指标。第 7 章基于近年来利用多 GPS 基准站连续观测技术的地壳运动监测研究的进展,以及地震、山体滑坡、泥石流等自然灾害频繁发生,提出利用卫星导航定位基准站网的点位、基线变化来反映地壳的运动情况。第 8 章介绍基于卫星导航定位基准站网的高精度动态定位方法、海上 GPS 动态定位技术和卫星导航定位基准站网质量控制理论。第 9 章分析基于球谐函数模型的电离层预报和夜间平场随纬度、季节和太阳活动的变化规律。第 10 章总结本书内容,并给出今后卫星精密定位领域的一些研究方向、设想和展望。

在本书编写期间,有幸得到了陈俊勇、宁津生、许厚泽、杨元喜、李建成等各位院士的指点,得到了黄城研究员、陈永奇教授、张继贤研究员、程鹏飞研究员、燕琴研究员、党亚民研究员、卢秀山教授等的关心与指导,得到了秘金钟研究员、王潜心博士、谷守周博士等的支持与帮助,张晓强、李冉、李建彬等硕士在资料收集整理方面做了很多有成效的工作,在此一并表示诚挚感谢。同时,在本书编写过程中笔者参阅了大量文献,引用了相关书刊中的资料,在此向有关作者表示衷心的感谢。

本书内容是笔者近年来研究成果的阶段总结,还有待进一步深入研究,笔者虽做了最大努力,但书中难免有疏漏和不妥之处,真诚恳望同行专家及广大读者批评指正。

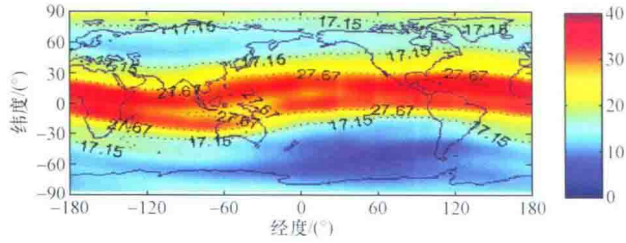


图 9.7 峰年 2001—2003 年夜间春季平场全球分布平均值序列

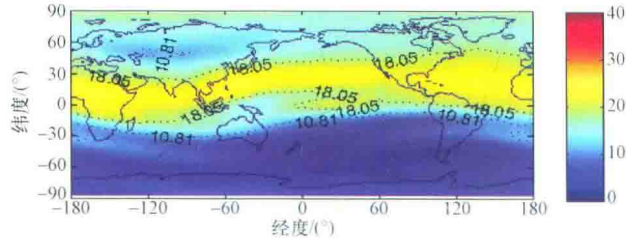


图 9.8 峰年 2001—2003 年夜间夏季平场全球分布平均值序列

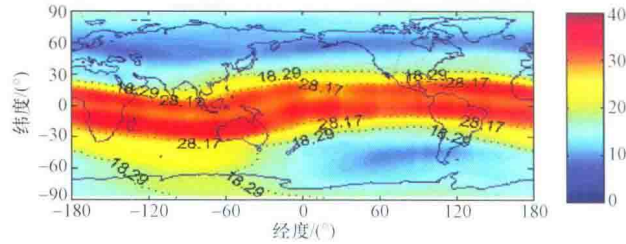


图 9.9 峰年 2001—2003 年夜间秋季平场全球分布平均值序列

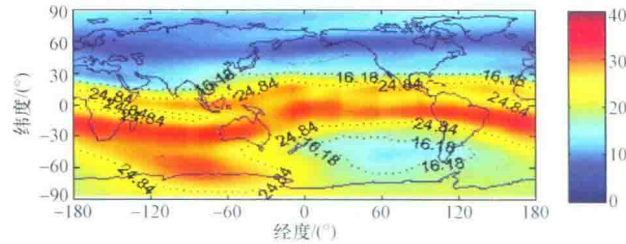


图 9.10 峰年 2001—2003 年夜间冬季平场全球分布平均值序列

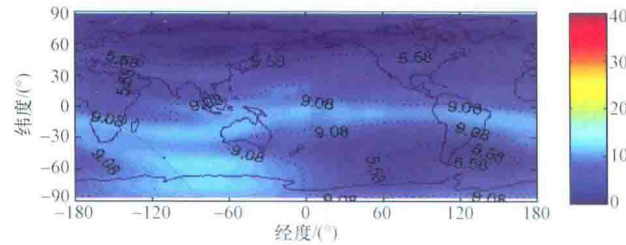


图 9.11 谷年 2005—2008 年夜间冬季平场全球分布平均值序列

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 主要发展现状与趋势	2
1.3 研究意义与内容安排	8
第 2 章 观测模型与误差改正	10
2.1 非差观测模型.....	10
2.2 平差模型.....	13
2.3 主要误差源及其改正模型.....	15
第 3 章 系统误差与随机误差处理	31
3.1 概 述.....	31
3.2 GPS 观测量系统误差分离方法研究	32
3.3 GPS 差分处理中的随机模型	39
3.4 降低观测量噪声的组合模型分析.....	42
3.5 基于 CORS 网的随机模型	43
第 4 章 非差相位定位卫星钟差内插与预报	49
4.1 概 述.....	49
4.2 IGS 超快速星历中钟差资料相关性.....	50
4.3 卫星钟差内插方法.....	52
4.4 卫星钟差内插精度分析.....	55
4.5 卫星钟差预报常用方法.....	67
4.6 附有指数的灰色模型.....	76
4.7 附有周期项的二次多项式模型.....	91
4.8 基于递推遗忘因子最小二乘法的钟差预报.....	98
第 5 章 非差相位定位参数估计收敛速度及影响因素	107
5.1 概 述	107
5.2 观测资料和卫星钟差采样间隔对参数收敛的影响	107

5.3	收敛的影响因素及分析	113
5.4	提高收敛效率的措施讨论	116
第 6 章	非差相位定位的质量控制	120
6.1	概 述	120
6.2	定位模型	120
6.3	顾及系统误差的抗差模型	125
6.4	滤波模型异常探测和识别	132
6.5	分析与讨论	137
第 7 章	CORS 网静态时变信息分析	140
7.1	概 述	140
7.2	数据来源及处理方法	141
7.3	点位时间序列分析	145
7.4	基线变化时间序列分析	150
7.5	分析与讨论	157
第 8 章	CORS 网动态定位与质量控制	158
8.1	概述	158
8.2	基于 CORS 的高精度动态定位方法	158
8.3	海上 GPS 浮标网络定位技术	166
8.4	GNSS 导航定位性能及预警研究	172
8.5	QDCORS 网质量评定	177
8.6	QDCORS 系统的完备性分析	182
8.7	QDCORS 完备性实验分析	188
第 9 章	CORS 网反演电离层模型	196
9.1	概 述	196
9.2	基于球谐函数模型的电离层预报	196
9.3	夜间平场随纬度、季节和太阳活动的变化	200
第 10 章	结论与展望	205
10.1	主要结论	205
10.2	研究展望	206
参考文献	209

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview	1
1.2 Main Development Status and Trend	2
1.3 Research Significance and Content Arrangement	8
Chapter 2 Observation Model and Error Correction	10
2.1 Non-difference Observation Model	10
2.2 Adjustment Model	13
2.3 Main Error Sources and Their Correction Models	15
Chapter 3 System Error and Stochastic Model	31
3.1 Overview	31
3.2 Research on Separation Method of GPS Observation System Error	32
3.3 Stochastic Model in GPS Differential Processing	39
3.4 Combined Model Analysis for Reducing Observed Noise	42
3.5 The Stochastic Model of CORS Network	43
Chapter 4 Interpolation and Prediction of Satellite Clock Error for Non-difference Phase Location	49
4.1 Overview	49
4.2 Relativity of IGS Superfast Ephemeris Data	50
4.3 Interpolation Method of Satellite Clock Error	52
4.4 Interpolation Accuracy Analysis of Satellite Clock Error	55
4.5 Common Methods of Satellite Clock Error Prediction	67
4.6 An Indexed Gray Model	76
4.7 A Quadratic Polynomial Model with Periodic Term	91
4.8 Prediction of Clock Error Based on Recursive Forgetting Factor Least Squares	98
Chapter 5 Estimation of Convergence Rate and Influencing Factors of Non-difference Phase Location Parameters	107
5.1 Overview	107
5.2 The Observation Data and Satellite Clock Differential Sampling	

Interval on the Influence of the Parameters Convergence	107
5.3 The Influencing Factors and Analysis of Convergence	113
5.4 Discussion on Measures to Improve Convergence Efficiency	116
Chapter 6 Quality Control of Non-difference Phase Location	120
6.1 Overview	120
6.2 Positioning Model	120
6.3 Tolerance Model Considering System Error	125
6.4 Anomaly Detection and Identification of Filtering Model	132
6.5 Analysis and Discussion	137
Chapter 7 Static Time-varying Information Analysis of CORS Network	140
7.1 Overview	140
7.2 Data Sources and Processing Methods	141
7.3 Point Time Series Analysis	145
7.4 Baseline Time Series Analysis	150
7.5 Analysis and Discussion	157
Chapter 8 Dynamic Positioning and Quality Control of CORS Network	158
8.1 Overview	158
8.2 High Precision Dynamic Positioning Method Based on CORS	158
8.3 Marine GPS Buoy Network Positioning Technology	166
8.4 GNSS Navigation and Early Warning Research Performance	172
8.5 QDCORS Network Quality Evaluation	177
8.6 Completeness Analysis of QDCORS System	182
8.7 QDCORS Completeness Experimental Analysis	188
Chapter 9 Inversion of Ionospheric Model by CORS Network	196
9.1 Overview	196
9.2 Ionospheric Prediction Based on Spherical Harmonic Function Model	196
9.3 The Changes of Nighttime Flat Field with Latitude, Season and Solar Activity	200
Chapter 10 Conclusion and Outlook	205
10.1 Main Conclusion	205
10.2 Research Prospects	206
References	209

第1章 绪论

1.1 概述

20世纪中期以来,随着通信科学、计算机科学、空间科学、地球科学等现代科学技术的飞速发展,卫星技术出现并得到了飞速发展,特别是星载原子钟的成功研制,使得卫星测距导航成为可能。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)就是在这样的背景下产生的,现有的全球导航卫星系统主要包括美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、中国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、俄罗斯的格洛纳斯导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)以及欧盟的伽利略卫星导航系统(Galileo satellite Navigation System, Galileo)四个卫星导航系统。GNSS的出现不仅为定位、导航、守时与授时带来巨大的技术革命,也给测绘地理信息行业,尤其是现代大地测量带来了前所未有的技术革新,它的出现推动了地球空间信息科学的发展。在经过早期的子午仪卫星导航系统(Transit Navigation Satellite System, TSNS)的试验论证以后,20世纪70年代中期以来逐渐发展完善GPS,该系统于1994年全面建成,1996年1月18日实现24颗卫星的全面运行能力,具有在海陆空全方位实时三维导航与定位能力(徐绍铨,2001;陈金平,2001),能满足各种不同精度要求。

GNSS静态定位的应用已经相对成熟,国际上比较著名的数据处理软件有美国麻省理工学院和加利福尼亚大学共同研发的GAMIT软件、瑞士伯尔尼大学天文研究所研制的Bernese软件、美国喷气推进实验室研发的GIPSY软件和德国波茨坦地学中心开发的EPOS软件。此外,还有美国得克萨斯大学的TEXGAP软件、英国的GAS软件、挪威的GEOSAT软件及我国武汉大学研制的PANDA软件等。当前多数软件均能同时处理多模GNSS数据,GNSS静态定位精度已经达到了 10^{-9} 量级。相比较而言,GNSS动态定位的应用范围更为广泛,相对定位的作用距离从数米到上千千米,定位技术也从数十米的导航定位发展到厘米级实时动态差分(real-time kinematic, RTK)技术,以及近年迅速发展起来的网络RTK技术,即虚拟参考技术(virtual reference station, VRS)。这些技术为航空动态测量的位置和姿态测定提供了一种有效的解决途径,提高了航空动态测量技术(包括航空重力测量、航空摄影测量、航空LiDAR和机载SAR等)在地图、数据库快速更新以及地理国情普查与监测中的作业效率。

近年来,GNSS技术已经在导航、大地测量、天文学、工程测量、大气科学、地球物理

学、地球动力学、空间科学、海洋科学等诸多学科领域得到了广泛应用,并促进了多学科的交叉融合与发展,引起了卫星导航、大地测量等学科的革命性发展。不仅如此,GNSS 技术的出现,同时也推动了卫星导航与位置服务产业的发展和壮大,随着 2013 年国务院办公厅《国家卫星导航产业中长期发展规划》(国办发[2013]97 号)的印发实施,卫星导航与位置服务产业将在更深、更广的层次上影响着人们的日常生活。

1.2 主要发展现状与趋势

1.2.1 GNSS 技术主要发展趋势

目前,GNSS 技术的发展主要表现在三个方面:一是卫星导航系统越来越多,二是系统频率越来越丰富,三是数据及产品的实时性越来越高。

在多卫星导航系统数据的联合处理方面,国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)于 2011 年 8 月开始启动多卫星导航系统测试项目 MGEX (Multi-GNSS Experiment),2012 年 7 月在波兰奥尔什丁(Olsztyn)市召开了第一次 MGEX 项目总结大会。会议对多卫星导航系统融合处理结果进行了全面分析,对不同卫星导航系统的频间偏差(卫星和接收机)进行了总结。通过实施 MGEX 一期项目,IGS 有效地探索了多卫星导航系统数据采集与联合处理的经验。计划在二期项目中,逐步实现提供多卫星导航系统数据产品服务。目前用户可通过互联网来获取 MGEX 站的观测数据和部分 IGS 分析中心(GFZ、TUM、WHU)发布的多卫星导航系统产品。

目前,多频技术研究主要集中在利用多频观测数据提高整周模糊度的解算成功率、消除高阶电离层影响、增强数据的抗干扰性等方面。国内外的主要研究团队有:澳大利亚科廷大学(Curtin University)Teunissen 教授带领的研究团队,主要对 GNSS 多频技术在 CORS 方面的应用进行了深入研究;德国地球研究中心葛茂荣教授的研究团队,主要对 GNSS 多频技术在精密单点定位方面的应用进行了研究,取得了突破性的研究成果;国内总参测绘研究所杨元喜院士的研究团队,主要针对 GNSS 多频技术在误差分析和数据质量控制方面开展了系统研究。

在实时数据处理与产品生成方面,IGS 早在 2002 年便成立了专题工作组(real-time working group, RTWG),负责研究 GNSS 实时产品生成技术。2007 年 6 月 IGS 又将 GNSS 实时数据与产品作为 2008—2012 年的战略计划,同时确定在 2007—2010 年开展实时试验计划(International GNSS Service Real-time Pilot Project, IGS-RTPP),主要参加单位有加拿大自然资源部(Natural Resources Canada, NRCan)、亥姆霍兹波茨坦中心-德国地学中心(Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Centre for Geosciences, GFZ)、美国喷气推进实验室(Jet Pro-

pulsion Laboratory, JPL)、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、德国联邦制图和测地局(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG)等(Kintner et al, 2005)。2013年起, IGS 开始正式提供实时数据与产品服务。

1.2.2 GNSS 技术主要发展方向

GNSS 技术可分为差分和非差(单点)两种方式。其中, GPS 差分定位主要有局域差分 GPS(local area differential GPS, LADGPS)和广域差分 GPS(wide area differential GPS, WADGPS)。局域差分 GPS 作用半径小, 通常伪距差分的作用半径不超过 150 km, 此时用户站的实时定位精度一般可以提高到 3~5 m; 广域差分 GPS 不仅削弱了局域差分 GPS 技术中主控站和用户站之间定位误差对时空的相关性, 而且保持了局域差分 GPS 的定位精度, 但系统复杂、成本高, 而且对数据传输技术要求较高。20 世纪 90 年代末, 陈俊勇院士和刘经南院士等提出了分布式广域差分 GPS 的思想, 改善了广域差分 GPS 技术中的数据通信问题。

为满足米级或更高精度的实时定位、信号安全和可靠性要求, 美国航空联邦局(Federal Aviation Administration, FAA)于 2003 年提出了广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS), 其定位原理与广域差分 GPS 基本相同, 仅仅通过在某地区增加同步卫星来提高系统的可靠性和完备性。目前, 增强系统有美国的 WAAS、欧洲的 EGNOS、俄罗斯的 SDCM、日本的 QZSS 和 MSAS、印度的 IRNSS 和 GAGAN、尼日利亚的 NiComSat-1。

实时动态差分(RTK)技术于 1994 年首次提出, 包括单基准站传统 RTK 和多基准站网络 RTK。传统 RTK 只利用一个基准站, 没有多余的观测值加以约束, 而且长距离会降低基准站与用户站之间的时空相关性, 基准站与用户站的距离不得超过 15 km。20 世纪 90 年代末, Raquet 等研究了多基准站网络 RTK, 网络 RTK 具有以下几个特点:

(1) 提高了基准站服务的可行性和可靠性。

(2) 可以对区域的距离相关或时空相关的误差进行模型化, 从而有利于模糊度的解算和固定。

(3) 作用范围由传统 RTK 的 10~20 km 扩展到 100 km。

(4) 有利于建立虚拟基准站(VRS)。网络 RTK 在实际导航定位应用中具有更加广阔的应用空间。

随着计算机、物联网、云计算、通信和新一代网络等技术的快速发展以及 GNSS 研究的深入和应用的拓宽, GNSS 技术正在向更高层次和更广范围发展, 在 GNSS 的定位模式、定位精度以及定位距离等方面取得了重要进展。目前, GNSS 精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术和连续运行基准站及其系统(continuously operating reference station or system, CORS)是 GNSS 技术的两个重要发展方向和应用领

域,下面分别简单介绍 PPP 技术和 CORS 技术的现状与发展趋势。

1. 精密单点定位技术

精密单点定位技术是 20 世纪 70 年代针对多普勒精密单点定位提出的概念,20 世纪 90 年代中期,IGS 开始向全球提供精密星历和精密卫星钟差产品,之后,还提供精度等级不同的事后、超快、快速和预报 4 类精密星历和相应的 15 min、5 min 采样间隔精密卫星钟差产品。目前 IGS 及其分析中心所提供的 GPS 精密星历精度已优于 5 cm,卫星钟精度已达到 0.1~0.2 ns。随着接收机性能的不断改善,大气延迟改正模型和改正方法研究的不断深入,为精密单点定位提供了新的解决思路。喷气推进实验室(JPL)的 Zumberge 等(1999)提出了利用高精度的 GPS 精密卫星星历和卫星钟差,以及单台双频 GPS 接收机采集的载波相位观测值,采用非差绝对模型进行精密单点定位,并在 GIPSY 软件上给予实现;在单站定位方程式中,只估计测站对流层参数、接收机钟差和测站坐标,其单天解的定位精度水平方向可达到 ± 1 cm,高程方向可达到 ± 2 cm。俄亥俄州立大学(OSU)的 Han 等(2001)也提出了类似的绝对定位的概念,在固定 GPS 精密轨道的基础上,利用 IGS 站的观测资料先估计出 GPS 卫星的钟差,然后再求解测站的绝对位置。加拿大自然资源部(NRCan)的 Heroux 等(2001)也研究了非差精密单点定位方法,处理长时间静态定位的结果精度也达到厘米级。卡尔加里(Calgary)大学的 Gao 等(2002)也在此方面进行了深入研究,并编写了相应的精密单点定位软件 P3。此外,目前 Bernese 软件也增加了用非差载波相位观测值进行精密单点定位的功能。

在动态精密单点定位研究方面,JPL 的 Muellerschoen 等(2000)提出了全球实时动态精密单点定位技术。实验结果表明,在全球范围内可实现水平方向定位精度为 10~20 cm 的实时动态精密单点定位。美国 Navcom 公司的 Hatch(2001)提出了利用 JPL 实时定轨软件 RTG 实现全球 RTK(Global RTK)计划,通过互联网和地球静止通信卫星向全球用户发送精密星历和精密卫星钟差修正数据,利用这些修正数据,实现 2~4 dm 的全球实时动态定位精度,事后静态定位精度可达 2~4 cm。荷兰的 Le 等(2007)利用单频接收机取得了水平 0.5 m 和高程 1 m 的定位结果。2007 年,国外已有多家公司推出了精密单点定位的数据处理软件,主要包括:GrafNav7.8 增加了精密单点定位的解算模块;加拿大 APPLANiX 公司推出的 POSPac AIR 软件也具有精密单点定位的能力;挪威 Terra Tec 公司推出的 TerraPOS 软件也是基于精密单点定位模式开发的动态定位软件;瑞士 Leica 公司也推出了自己的精密动态单点定位软件 IPAS PPP。

国内学者也对精密单点定位技术进行了深入研究,且目前的研究水平与国际水平相当。上海天文台黄城等(2002)研究了采用 GIPSY 软件的精密单点定位方法解算区域基准网问题。武汉大学叶世榕(2002)利用提出的改进模型及自主研发的 PANDA 软件进行了试算,结果表明:利用事后精密星历与精密卫星钟差进行

定位的初始化时间约为 15 min,其事后静态序列历元的定位精度在 B、L、H 方向均优于 20 cm,大部分优于 10 cm;单测站的精密单点定位单天解结果在 B 方向优于 1 cm,L 方向优于 2 cm,H 方向优于 3 cm;利用 GPS 的预报精密星历和实时估计的卫星钟差进行实时精密单点定位,在 B、L、H 方向精度均约为 40 cm。李征航等(2009)也对 GPS 精密单点定位理论与方法进行了深入的研究,开发出了精密单点定位数据处理软件 TriP。香港理工大学的陈永奇和陈武等也对精密单点定位进行了深入的研究,并利用 GPS 浮标监测海面变化。

随着我国北斗卫星导航系统的逐步完善,将为 PPP 技术提供更多的可用卫星,几何图形强度将大大提高,这将显著提高精密单点定位的可靠性和精度。另外,在多系统组合定位中,数据处理比双差模型简单,不需要在观测值间求差,模型中保留了所有信息,将有利于大气科学、地球动力学、海洋科学和空间科学等相关领域的研究。

2. 连续运行参考站网技术

20 世纪 80 年代,加拿大提出 CORS“主动控制系统”理论,并于 1995 年建成第一个 CORS 站网。早期 CORS 的应用由于受到当时通信、解算的限制,未能在实时定位方面提供服务,主要应用于大地控制网测量和地球板块运动监测。其缺陷主要表现在:①参考站数量少,服务功能单一;②参考站设备落后,数据存储量少;③参考站之间只能构成数学理论网络,无法实现数据交换和融合;④应用范围小。

20 世纪 90 年代开始,随着差分 GPS 技术的发展,出现了一些依靠无线电波进行差分改正信息发布的永久性参考站,即 RTK 单参考站,能够在近距离范围内为用户提供 RTD 伪距相位差分服务和 RTK 载波相位差分服务,就是现代 CORS 的雏形。其特点是为用户提供单向通信的实时差分数据服务,参考站间相互独立存在,无数据交换。

进入 21 世纪以来,由于计算机技术和网络通信技术的飞速发展,CORS 得到了快速发展,很多发达国家纷纷建立了不同层级的 CORS 网。1999 年,我国深圳率先建成了城市 CORS,随后全国大部分省、市建成了省、市级 CORS 系统,目前各省市 CORS 系统已经在各行业得到广泛应用。国家级 CORS 网的建立及其服务系统的构建是我国测绘地理信息事业发展的一个重要工程。

国外 CORS 技术研究主要集中在基础设施建设、系统自动化管理、数据采集与分发、基于网络的 GNSS 定位技术开发等方面。其中,具有代表性的国家和地区 CORS 系统包括 IGS 跟踪站网络、美国 NGS-CORS、欧洲 EPN 永久性连续网等。在美国 CORS 网的东部区域,大部分站点实现了实时的数据传输。在 EPN 网络中,德国、挪威等国家已率先利用网络 RTK 技术提供实时高精度定位服务。目前,美国、加拿大、德国等国家的 CORS 系统已经得到广泛应用。

国内 CORS 系统的研究相对略晚,但是目前技术水平与国际基本持平。陈俊

勇院士等提出了我国 CORS 建设的方法、设计方案等。国务院于 2007 年发布的《国务院关于加强测绘工作的意见》(国发[2007]30 号)中指出:“十一五”期间,开展卫星定位连续运行参考站(CORS)网建设,改建或扩建大地控制网、高程控制网和重力基本网,加快形成覆盖全国国土、陆海统一的高精度现代测绘基准体系。国家级 CORS 系统的建立是高精度现代测绘基准体系建设的重要组成部分。国家测绘地理信息局组织开展的国家现代测绘基准基础设施一期工程建设,其中包括国家现代大地基准建设,即利用全国范围内 360 个 GNSS 连续运行基准站,其中新建 150 个,利用、改造 60 个,直接利用 150 个;建设由 4500 点组成的卫星大地控制网,其中新建 2500 点,利用 2000 点,基本形成国家现代大地基准框架,满足国家地心坐标系的建设与维持需求(国家测绘局,2010)。

1.2.3 质量控制方法研究现状

质量控制包括可靠性和精密度两部分。可靠性指系统可探测粗差的最小值(内部可靠性)和不可探测粗差对结果的影响(外部可靠性)两部分。随着可靠性理论不断发展,广义可靠性除了包括内部可靠性和外部可靠性外,还包括粗差探测和识别。

1. 粗差探测研究现状

假设观测值的先验方差已知时,观测值不相关的粗差探测和识别方法最早由 Barrda 教授提出,即数据探测法。先验方差未知时,Pope 提出了 τ 检验法。王金岭分析了数学期望平移模型估计的粗差值与残差的区别。针对观测值的相关性,许多学者提出了各种方法,如 QUAD 法、相关系数、判断矩阵法等。考虑到平差模型的病态性,许多学者研究并改进了岭估计的粗差探测方法。近年来,其他方法辅助的粗差探测方法也得到快速发展,如 Bayes 法、主成分分析法、粗差探测与抗差结合。另外,徐天河根据粗差探测和识别方法发展了移动开窗粗差探测法。

2. 可靠性研究现状

最小二乘作为可靠性研究的典型,很早就应用于大地测量平差系统中。从一维备选假设出发,研究观测值不相关情况下的最小二乘平差系统的可靠性理论,定义基于多余观测分量的内部可靠性和外部可靠性概念,上述可靠性都是在一维备选假设下。针对多维备选假设的情况,李德仁根据粗差传播原理推导出多维备选假设下的内外可靠性。由于最小二乘对粗差的抗差性较差,很多学者又对抗差 M 估计进行了研究。

卡尔曼滤波的可靠性基础是卡尔曼滤波的预计残差,Teunissen 教授在理论分析的基础上,给出了衡量内部可靠性的最小可测偏差(minimal detectable biases, MDB)概念及相应的计算公式。虽然最小二乘的粗差探测和可靠性理论较

成熟,但卡尔曼滤波的相关研究较少。已有的研究主要利用预计残差分析卡尔曼滤波观测模型的粗差问题。当观测值精度相同时,预计残差可满足各种需要;当观测值精度不同时,预测残差不能同时反映各种观测值的随机性。多粗差探测一般基于迭代算法,判断去除最大检验量后的其余检验量是否超过阈值。卡尔曼滤波的粗差探测、识别方法和粗差的可分性没有系统研究,尤其是其动力学模型。类似地,卡尔曼滤波的可靠性理论也只针对观测模型进行研究,卡尔曼滤波动力学模型的相关理论没有得到系统的研究。

3. 完备性研究现状

完备性可以用三个指标定量评价:完备性风险概率(integrity risk, IR)、示警阈值(alarm limit, AL)和示警耗时。完备性风险概率指系统误差超过限值而不能及时提供警示的概率,可将其投影到观测值域进行粗差探测,常用的方法为接收机自主完备性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)。示警阈值指系统不可接受的最大误差,可通过与坐标域的保护水平(protection level, PL)比较确定系统是否可用。

基于观测值域的RAIM只包括故障探测,不包括故障排除。传统RAIM共包括四种方法。Lee首先提出接收机自主完备性监测的距离比较法。1988年, Parkinson和Sturza分别提出最小二乘残差法和奇偶向量法。由于接收机完备性监测与卫星几何结构有关,Sturza引入最大精度因子变化值反映卫星几何结构的影响。Brown证明了在等报警概率情况下上述三种方法具有等价性,并在归一化的基础上提出近似径向误差保护方法,实际上两者可以相互转换。这些方法在等精度伪距观测值时均适用。当观测值具有异方差性时,Walter提出加权RAIM。Hewitson利用模型故障识别方法研究GNSS接收机自主完备性监测的效果。上述方法主要针对单故障,针对多故障问题,Martini、Rippl等提出了距离一致法等新的多故障探测方法。

基于坐标域的保护水平包括水平方向的保护水平和垂直方向的保护水平。2005年,Blanch提出基于观测值残差的保护水平计算方法。Angus提出适用于多故障的保护水平。至于多系统集成的保护水平,Oliveira研究了SBAS系统的保护水平和可靠性水平,Kneissland研究了GPS-Galileo组合系统的保护水平,Schuster根据航空地面移动实践研究其完备性监测方法。

国内方面,陈家斌研究了GPS-INS组合和GPS-气压高度表组合的完备性。陈金平和牛飞在GPS系统完备性的基础上,深入研究各种增强GPS系统的完备性。秘金钟对GPS各种定位模式的完备性监测方法进行深入的应用研究。虽然GPS的观测值域和坐标域的完备性监测方法得到深入研究,但是精密单点定位的相关理论还不成熟,与其他导航定位方法相比,精密单点定位在稳定之前存在一个收敛过程。针对精密单点定位的特殊性,必须研究其相应的完备性监测和预警方法。