



测绘地理信息科技出版资金资助
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Theory and Key Technology on Accuracy Calibration of
GNSS High Kinematic Positioning

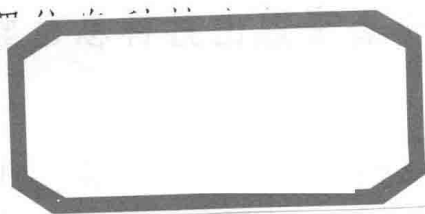
GNSS高动态定位 性能检定理论及 关键技术研究

丛佃伟 著



测绘出版社

测绘地理信息科学出版社 助



GNSS 高动态定位性能检定理论 及关键技术研究

Theory and Key Technology on Accuracy
Calibration of GNSS High Kinematic Positioning

丛佃伟 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 丛佃伟 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

卫星导航系统定位性能的测试与评估贯穿于卫星导航系统的设计、研发、部署、运行和扩展等各个阶段。本书紧紧围绕卫星导航系统高动态定位性能检定理论及关键技术展开研究工作,沿着动态定位性能检定系统建立及精度验证这条主线,从动态定位检定载体、动态定位检定技术、动态定位检定系统指标评价及指标确定角度出发,围绕提出的多节点摄影/惯导组合测量方法精度影响因素展开研究,对涉及的多项关键技术展开了系统的分析与论证,为推进 GNSS 高动态定位性能检定系统建设进行了有益的探索。

本书可作为高等学校卫星导航专业的本科和研究生教材及任职培训教材,也可作为相关科研工作者和工程技术人员的学术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 高动态定位性能检定理论及关键技术研究/丛佃伟著. —北京:测绘出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5030-3996-6

I. ①G… II. ①丛… 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(2016)第 302041 号

责任编辑	贾晓林	执行编辑	王佳嘉	封面设计	李 伟
责任校对	程铁柱	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	9.75	字 数	184 千字		
版 次	2017 年 1 月第 1 版	印 次	2017 年 1 月第 1 次印刷		
印 数	001—800	定 价	45.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3996-6

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

序

定位性能是卫星导航系统性能的基础和核心,国内外同行围绕卫星导航系统定位性能测试评估方法开展了大量理论与实践工作。卫星导航系统动态定位模式具有定位精度高、瞬时性、动态范围大、数据更新率高等特点,这些特点给动态定位性能评估及检定带来了巨大的挑战,目前国际上尚未建立独立于卫星测量手段的卫星导航系统动态定位性能检定标准。

作者对利用非卫星测量手段进行卫星导航系统动态定位性能检定工作进行了探索,在系统分析现有卫星导航系统动态定位性能测试评估方法基础上,设计了基于多节点摄影/惯导组合测量技术的 GNSS 动态定位性能测试评估系统建立方案。从提高组合系统测量性能角度出发,提出并应用了区别于组合导航滤波算法的摄影/惯导组合测量方法。通过数值计算方法建立动态条件下的捷联惯导误差传播模型,将多个节点的摄影交会测量信息应用到捷联惯导误差传播模型,用最小二乘最优估计法统一解算惯导误差参数,使经修正的捷联惯导数据在节点间内能保持均匀的高定位精度和高数据更新率。该方法可以解决高动态条件下高定位精度和高数据更新率的一致性问题,并能够同时实现高动态条件下的高精度测速功能。书中从理论分析和实践验证两方面对提出的多节点摄影/惯导组合测量方法进行了详细的研究与分析,并对其性能验证方案进行了设计,所做工作具有较强的创新性和工程应用价值。

该书作者是我的学术秘书和博士生,平日专注于卫星导航领域的教学和科研工作,在研究团队中发挥了重要的作用。相信该书的出版能为从事卫星导航系统动态定位性能测试评估领域研究的同行提供宝贵的借鉴,我期待该书能够早日出版。



2016 年 6 月

前 言

卫星导航系统能够同时提供定位、导航、授时功能,是现代国防和国民经济建设的重要基础设施。随着技术的不断成熟以及国际卫星导航市场竞争关系的加剧,卫星导航系统建设与升级进入了快速推进阶段。2020 年将出现 GPS、GLONASS、BDS、Galileo 四大全球卫星导航系统并存的局面,卫星导航系统全面性能的优劣将直接决定着各个系统在国际上的应用范围。定位性能是卫星导航系统性能的基础和核心之一,是衡量卫星导航系统技术水平的重要标志,卫星导航系统定位性能的测试与评估贯穿于卫星导航系统的设计、研发、部署、运行和扩展等各个阶段,卫星导航系统定位性能测试评估方法研究一直是卫星导航领域内的研究热点之一,国内外近年来均开展了大量的理论与实践工作。

用户空间位置随时间不断发生变化,卫星导航接收机动态定位结果具有瞬时性和不可重复性,使卫星导航系统动态定位性能与静态定位性能在测试、检定方法和实现途径上有较大的差异;再加上卫星导航系统的高定位精度,使得建立独立于卫星导航系统的 GNSS 动态定位检定系统及其精度验证体系变得异常困难,国内外现有技术和手段很难同时满足高动态条件下的高定位精度、高数据更新率以及完整的精度验证体系三个条件。国际上尚未建立独立于卫星测量手段的卫星导航系统动态定位(三维)性能检定技术,这也是本书开展研究工作的意义和出发点。

本书紧紧围绕卫星导航系统高动态定位性能检定理论及关键技术展开研究工作,设计了基于多节点摄影/惯导组合测量技术的动态定位性能检定系统。首次提出的多节点摄影/惯导组合测量方法将多个节点的位置信息代入捷联惯导误差方程,采用最小二乘算法对事后数据统一解算惯导误差参数,使动态检定节点间经修正的捷联惯导数据能保持均匀的高定位精度和高数据更新率,大大提高了摄影/惯导组合测量方法的定位精度,解决了高动态条件下高定位精度和高更新率的一致性问题的同时,能够实现高动态条件下的高精度测速功能。

本书第 1 章主要阐述了卫星导航系统动态定位性能检定工作的研究意义和国内外研究现状。第 2 章主要介绍了与卫星导航系统动态定位性能检定有关的基础理论知识。第 3 章探讨了 GNSS 动态定位性能检定系统设计方案,以北斗卫星导航系统动态定位性能检定为例,确定了动态定位检定系统的指标评价方法及性能指标,归纳总结了选用摄影/惯导组合测量技术作为动态检定技术的原因,设计了多设备高动态条件下的位置归心、时间同步关键问题的解决方案。第 4 章探讨了面向动态定位检定的摄影测量关键技术,摄影测量交会定位精度对多节点摄影/惯

导组合测量方法定位精度起决定作用,本章对影响摄影测量交会定位精度的因素进行了全面的研究。第5章开展了实际的摄影测量交会定位性能验证试验。第6章对提出的多节点摄影/惯导组合测量技术进行研究,对摄影测量交会定位精度、载体运动速度、不同精度惯性器件等影响多节点摄影/惯导组合测量方法实现精度的因素进行了较深入的分析。第7章探讨了GNSS动态定位检定系统性能验证方案。

本书主要研究工作是在博士生导师许其凤院士的悉心指导下完成的,书稿完成之际,首先向导师表达最诚挚的感谢和敬意!作为学生和秘书,经过十年的耳濡目染,我深为院士严谨的治学态度和科学研究精神折服,许院士溯源求真、验证求实的科学情怀是我前行路上的灯塔,避短扬长的科研思路和数十年的执着钻研激励着我继续向前!感谢课题组郝金明教授、杨力教授、吕志伟教授、贾学东副教授、董明博士为本书研究提供的帮助,其中也凝结了他们的大量心血!感谢信息工程大学导航与空天目标工程学院为我提供的良好科研工作环境!感谢国家自然科学基金(41604032)和地理信息工程国家重点实验室开放研究基金(SKLGIE2015-M-2-5)的支持。

希望本书内容能够引起卫星导航领域对于建立GNSS高动态定位性能检定系统的思考,推动我国建立国际上首个独立于卫星导航系统的GNSS高动态定位性能检定系统。由于作者水平有限,加之GNSS动态定位性能检定体系是一项全新的系统工程,书中论点难免有偏颇之处,恳请各位读者不吝赐教,电子邮件可发送至 cong dianwei@sina.com 与我直接联系。

丛佃伟

2016年6月

目 录

第 1 章 GNSS 动态定位测试评估方法研究现状	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	6
1.3 本书主要研究内容	13
第 2 章 GNSS 动态定位检定理论基础	16
2.1 坐标系统	16
2.2 时间系统	19
2.3 卫星导航定位观测方程	21
2.4 摄影测量基本数学模型	23
2.5 捷联惯性导航系统基本原理	28
第 3 章 GNSS 动态定位检定系统设计	33
3.1 GNSS 动态定位检定系统指标评价及指标确定	33
3.2 GNSS 动态定位检定系统应具备的功能	37
3.3 GNSS 动态定位检定载体及检定技术选择	38
3.4 GNSS 动态定位检定系统总体框架及功能	41
3.5 高动态条件下多系统位置归心技术研究	44
3.6 高动态条件下多系统时间同步技术研究	47
第 4 章 面向动态定位检定的摄影测量关键技术研究	53
4.1 摄影测量设备性能选择	54
4.2 高分辨率相机高精度标校方法	58
4.3 标志图像中心像点坐标高精度量测方法	67
4.4 相机投影中心位置精确测定方法研究与实现	79
4.5 地面标志数量及构型设计	84
第 5 章 摄影测量交会性能验证试验	85
5.1 机载高动态摄影测量工作流程设计	85
5.2 两步法摄影物点、像点自动匹配方法研究	86

5.3	参数自适应的标志图像量测软件设计与实现·····	91
5.4	机载试验缩小比例测试场设计与测量·····	92
5.5	静态摄影测量后方交会性能验证试验·····	95
第6章	多节点摄影/惯导组合测量技术研究·····	99
6.1	捷联惯性导航系统误差方程及误差传播模型·····	100
6.2	多节点摄影/惯导组合测量方法基本原理·····	106
6.3	控制节点的数量及分布方案设计·····	110
6.4	多节点摄影/惯导组合测量方法定位性能影响因素·····	116
6.5	多节点摄影/惯导组合测量方法半物理仿真试验·····	122
6.6	多节点摄影/惯导组合测量方法车载试验·····	124
第7章	GNSS 动态定位检定系统性能验证方案设计·····	130
7.1	计量学基础·····	130
7.2	GNSS 动态定位性能检定系统性能验证方案设计·····	131
7.3	GNSS 动态定位性能检定系统性能拓展性分析·····	135
参考文献 ·····		138
附录 缩略语 ·····		145

Contents

Chapter 1	Research status of the evaluation methods in GNSS kinematic positioning	1
1.1	Background and significance of the research	1
1.2	Research status at home and abroad	6
1.3	Main contents of this book	13
Chapter 2	Theoretical basis of GNSS kinematic positioning calibration system	16
2.1	Coordinate systems	16
2.2	Time systems	19
2.3	Observation equation of GNSS positioning	21
2.4	Basic mathematical model of photogrammetry	23
2.5	Basic principle of SINS	28
Chapter 3	Designs of GNSS kinematic positioning calibration system	33
3.1	Evaluation and indicators	33
3.2	Functions of the calibration system	37
3.3	Carrier and calibration technology	38
3.4	Overall frameworks	41
3.5	Position centring of multi-system in high kinematic environment	44
3.6	Time synchronization of multisystem in high kinematic environment	47
Chapter 4	Key techniques of photogrammetry in GNSS kinematic positioning calibration system	53
4.1	Selection of photography equipments	54
4.2	High precision calibration methods of high-resolution camera	58
4.3	High precision measurement methods of the image center	67

4.4	Measurement methods about the projective center of the camera	79
4.5	Layout scheme of the ground marks	84
Chapter 5	Verification tests of the photogrammetric precision	85
5.1	Working flow of the photogrammetric system	85
5.2	Two-step method on automatic matching in photogrammetry	86
5.3	Design of the image measurement software	91
5.4	Design and measurement of the test field	92
5.5	Verification tests of the static photogrammetric precision	95
Chapter 6	Research on multi-node photography/SINS combined measurement technology	99
6.1	Error propagation model of SINS	100
6.2	Basic principle of the combined measurement technology	106
6.3	Design of the distribution schemes with nodes	110
6.4	Influencing factors of the positioning performance	116
6.5	Semi-physical emulation tests	122
6.6	Vehicle tests	124
Chapter 7	Verification schemes of the combined measurement technology ...	130
7.1	Basic knowledge of metrology	130
7.2	Design of the verification schemes	131
7.3	The further analysis of the GNSS kinematic positioning calibration system	135
References		138
Appendix	Abbreviations	145

第 1 章 GNSS 动态定位测试评估方法研究现状

1.1 研究背景及意义

卫星导航系统能够同时提供定位、导航、授时 (positioning, navigation and timing, PNT) 功能,是现代国防和国民经济建设的重要基础设施,是建立统一时空基准的有效方式,是一个国家或地区的重要战略资源。目前已有和正在建设的全球导航卫星系统(GNSS)包括美国的全球定位系统(GPS)、俄罗斯的格洛纳斯系统(GLONASS)、中国的北斗卫星导航系统(BDS)与欧盟的伽利略卫星导航系统(Galileo)。随着技术的不断成熟以及国际卫星导航市场竞争关系的加剧,卫星导航系统建设与升级进入了快速推进阶段。美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 正在紧锣密鼓地进行现代化升级改造;我国北斗卫星导航(区域)系统于 2012 年 12 月建成并正式开通运营,2015 年 3 月 30 日我国首颗新一代北斗导航卫星发射升空,标志着中国北斗卫星导航系统全球组网工作的开始,预计 2020 年我国全面建成北斗卫星导航(全球)系统;欧盟的 Galileo 已能够实现初步定位服务,计划 2020 年能够提供全面应用服务。届时各卫星导航系统的全面性能均较现在有较大提升。

对卫星导航系统功能、性能的测试与评估贯穿于 GNSS 设计、研发、部署、运行和扩展等各个阶段。系统建成后,需要对系统的各分项技术指标和实际实现的服务性能进行测试评估并进行指标发布,同时为下一步的系统改进提供技术支撑。卫星导航系统性能测试评估方法研究一直是卫星导航领域内的研究热点之一,近年来国内外均开展了大量的理论研究与实践工作,由于服务性能的测试评估涉及的内容较多,目前对服务性能各类目的评估理论与技术途径尚缺乏统一的标准。

衡量卫星导航系统服务性能的指标主要有精度、可用性、完好性、连续性等,K. Kovach 给出了描述四大性能指标之间关系的模型。卫星导航系统的精度指标是卫星导航系统性能的基础和核心,也是衡量导航系统技术水平的重要标志之一。依据用户的运动状态,卫星导航系统定位性能可以分为静态定位性能和动态定位性能。静态定位时载体相对地球是静止的,其位置在时间域上不发生改变,测量的结果容易追溯,因此静态定位性能测试及检定技术较为成熟。根据载体运动速度,如表 1.1 所示载体可简单分为低动态、中动态、高动态和超高动态,同一载体也具备不同的动态性能。动态定位时用户处于运动状态(有一定的速度和加速度),卫

星导航接收机的空间位置随时间不断发生变化,卫星导航接收机动态定位结果具有瞬时性和不可重复性,这为动态定位性能测试及检定带来难题,使卫星导航系统动态定位性能与静态定位性能在测试及检定方法和实现途径上有较大的差异。动态定位结果的瞬时性要求采用快速时域定位参数来描述与刻画定位载体的运动状态和运动过程,并要求能高速、准确地显示与记录动态定位结果(郝晓剑,2013)。

表 1.1 载体动态范围概略分类

动态分类	动态范围/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	载体
低动态	≤ 50	行人、非机动车等
中动态	≤ 300	汽车、火车、舰船等
高动态	$\leq 1\,224$	民航飞机等
超高动态	$> 1\,224$	卫星、导弹等

动态定位性能检定是动态定位性能评估的高级阶段,需要按照计量规范要求对测试评估方法进行严谨的性能验证(溯源)工作,检定结果较常规的测试评估(比较)结论更具可信度、更能反映系统的实际性能。本书主要研究高动态条件下的动态定位检定理论与方法,限于载体的运动特性及性能验证的难度,目前国内外对动态定位性能测试评估开展的工作较多,但对动态定位性能检定开展的研究较少,经检索尚未发现成熟的卫星导航系统动态定位性能检定方法(丛佃伟 等,2014)。本书选取 GNSS 卫星导航系统动态定位性能检定理论与方法作为研究内容,主要考虑到以下几方面的需要。

1.1.1 卫星导航系统自身建设的需要

对卫星导航系统功能、性能的测试评估贯穿于卫星导航系统的设计、研发、部署、运行和扩展等各个阶段。卫星导航系统是一个复杂系统,如图 1.1 所示。影响导航定位精度的因素很多,如卫星导航信号质量、所测卫星几何分布、卫星钟的稳定性、卫星发播的轨道和卫星钟差精度以及各修正值(参数)残差水平、信号传播环境、接收机伪距测量精度、定位解算数学模型、载体运动速度(加速度)及姿态等诸多因素均会影响卫星导航定位性能。卫星导航系统动态定位性能是诸多因素共同作用的结果,众多误差源的综合影响决定了动态定位性能,这些误差源往往分属不同的分系统,它们也是由一系列相关误差源综合作用的结果。为了保障系统达到预定的导航定位精度,在系统设计(包括各分系统设计)时就按照总体要求,逐级制定一系列技术指标,并在各分项实施后对分项技术指标进行检测评估。理论上这些检测后的不确定度的叠加可以确定系统的导航定位不确定度。然而,这些误差源的误差特性(分布)往往与理论特性相差较大。这就导致按照一定方法叠加的定位不确定度和实际(用户所能取得的)定位不确定度有一定的差异,不能真实反映系统的性能。

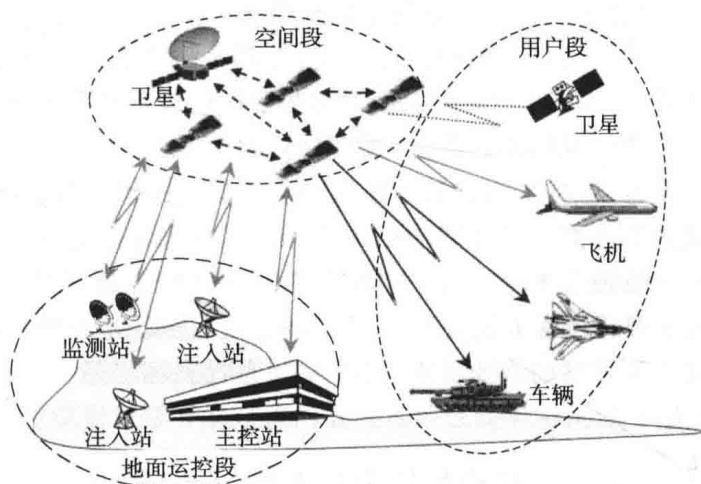


图 1.1 卫星导航系统主要组成

卫星导航系统的定位性能是卫星导航系统的重要技术指标,动态定位性能检定工作可以给出准确可靠的性能指标,对于系统自身建设具有重要的意义,是建设和使用卫星导航系统的重要环节。首先,卫星导航系统设计阶段对动态定位性能有预期指标,实际的动态定位性能检定可以验证建成的系统是否满足设计指标要求,同时为下一步系统性能改善和增强提供参考依据。其次,卫星导航系统建成后,为增进用户对卫星导航系统性能的了解和提高用户使用的信心,需要发布卫星导航系统服务标准,动态定位性能的检定结果较其他测试评估手段更具备说服力,为卫星导航系统定位性能指标的发布提供参考依据。

1.1.2 卫星导航系统动态定位性能评估方法发展的需要

目前国内外主要采用将卫星导航定位结果与其他定位方法(甚至采用其他卫星导航系统)获得的测量结果进行比较评估的方法,国内卫星导航定位总站、信息工程大学、武汉大学等单位均进行了大量的研究和实践工作,取得了丰富的成果。比对评估方法主要利用 GPS 实时动态差分(real-time kinematic, RTK)或精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术展开,两种方法本质上均是基于无线电测距(伪随机码测距和载波相位测距)的空间后方交会方法,与卫星导航定位的本质相同,在观测量、解算方法等方面存在较强的相关性,难以消除可能存在的系统性误差对定位结果的影响。另外,两种技术在运动载体加速度或者加加速度较大时容易失锁,无法完成全状态下的卫星导航系统动态定位性能测试。此外,还有其他能够对载体动态定位性能进行测试的装备和评估方法(如高速摄像、光电经纬仪等)。

对于同一动态定位载体,利用不同类型的传感器和定位测试手段可能出现不

同的评估结果,甚至相同类型的传感器不同批次测出的结果差别也很大,由于目前尚未完成测试比对方法定位性能的验证工作,也就无法实现卫星导航系统的动态定位性能检定工作。由于缺乏统一认可的动态定位性能检定基准体系,难以形成统一的动态定位性能评判结果。因此,国内外均迫切需要制定卫星导航系统的动态定位溯源性计量基准(标准),这其中最大的难点便是寻找动态定位精度较高、数据更新率满足要求而又能完成性能验证工作的技术及方法。寻求这样的技术,进行理论研究、试验验证及性能验证方案是本书研究的主要工作和难点。建立 GNSS 卫星导航动态定位性能检定系统(简称:动态定位检定系统)是动态定位性能测试评估方法向前发展的必要需求,可补充和完善我国卫星导航系统服务性能测试评估体系(秦智,2010)。

1.1.3 卫星导航系统终端计量检定的需要

测试计量技术作为衡量一个国家国防科技工业基础和工业能力的重要标志,贯穿于军工产品生产的全生命周期中(微凉等,2008)。卫星导航系统对于国民经济和国防领域关系重大,卫星导航定位终端作为关系国计民生的基础产品,生产企业众多,出厂前或重要用户装备采购前需要对产品进行计量检定。根据相关文献,2013 年我国卫星导航终端产品市场总值已经超过 1 500 亿,2015 年总值达到 2 000 亿,2020 年总值将达到 4 000 亿。根据我国《国防计量监督管理条例》和《计量法》要求计量器具在使用前需要进行检定的规定,2013 年 1 500 亿的国内导航终端产品市场也将能衍生 100 多亿的终端产品检测市场。导航型接收机的实际动态定位精度不仅反映了卫星导航系统的性能,还反映了接收机的性能和外部条件(如气象、大气)的影响。随着我国卫星导航系统的逐步建成,大量的导航型用户机将应用在国防和民用领域,高动态导航用户除了关注对卫星导航系统本身的性能外,更关注其在区域内实际能够获得的导航定位性能区间,这关系到导航用户的使用安全性及信息评估。目前我国限于动态定位检定系统的缺失,尚未建立强制的卫星导航终端动态定位性能检定规范。

国际法制计量组织(OIML)建议技术安全和公众健康领域中的特殊计量器具需进行强制计量管理(检定)。《计量法》规定用于贸易结算、安全防护、环境监测方面的仪器,需要纳入《强制检定的工作计量器具目录》。随着卫星导航接收机在民航、无人机、智能汽车等领域的广泛应用,卫星导航接收机动态定位性能将事关公共事务和公民人身安全,届时也就应该将卫星导航接收机纳入强制检定范畴,其中很重要的一项就是动态定位性能的检定。因此,建立卫星导航系统动态定位性能检定体系,能够满足在重要国防建设和国民经济领域对卫星导航系统接收机动态定位性能检定的需求,尤其是满足对北斗卫星导航系统接收机动态定位性能的检定需求。

1.1.4 卫星导航系统推广应用、满足特殊用户需求的需要

随着卫星导航系统的建设与推进,卫星导航应用领域内竞争因素增强,系统服务性能的优劣是成败的关键,特殊行业对卫星导航系统需求的不断提升也对系统服务性能提出了更高的要求。

卫星导航系统终端的用户主要是动态导航定位用户,民用导航用户如客机、直升机、高速列车、汽车等,军用导航用户如战车、战机、军舰、精密制导弹药等。动态定位具有定位实时性、数据短时性、用户多类型、速度跨度大等特点,动态定位性能的指标涉及可以满足哪些主要用户群对导航定位的需求、用户的应用范围和模式。例如,国际民航组织对卫星导航系统所能实现的性能有苛刻的测试指标,动态定位性能的评价指标确认便是其中的难点之一。各类军用作战飞行器 and 高速制导武器等的速度、加速度均较大,而常规 GNSS RTK 或者 PPP 的方式难以保证连续定位,且其自身的定位精度难以进行有效的性能验证。

系统建成后,按照或接近用户实际使用的条件进行导航定位动态性能检定工作是必要的,为用户提供可靠、可信、规范的动态定位性能指标,这样的检定指标是用户在使用中实际能获得的技术指标,也是敏感用户最关心的指标之一。例如,国际民航组织(ICAO)在2004年的SARPS(Standards and Recommended Practices)文档中定义了不同航空飞行阶段对GNSS的精密导航技术(RNP)指标(Feng et al,2006;李作虎,2012)。动态定位性能检定结果能为动态定位用户提供国际通用的卫星导航系统动态定位性能指标,提升重要应用部门在各类高动态场景中使用卫星导航系统终端的信心,对推广卫星导航系统在更多领域中广泛应用和进入国际市场有重要的作用。

1.1.5 满足卫星导航系统抗干扰和抗欺骗等技术研究的需要

“导航战(NAVWAR)”是一种新的军事作战模式,“导航战”攻防技术是诸多国家和行业的研究热点,对卫星导航系统和导航终端进行了大量的技术改进和改造(李跃等,2008;丛佃伟等,2011)。同时,由于卫星导航系统的“脆弱性”,部分民用设施也会对卫星导航系统产生干扰。动态定位检定系统主要由摄影测量系统和惯性导航系统组合而成,这两种方法工作自主性强,不受电磁环境的影响。GNSS 动态定位检定系统的建立可以评估各种干扰模式对卫星导航系统动态定位性能的影响,为卫星导航系统改进、装备改进和制定卫星导航系统应用法规提供依据。

1.2 国内外研究现状

20 世纪 90 年代,为满足卫星导航设备的应用需求,国内外均建立了一些接收机检定场。我国第一个 GPS 检定场于 1990 年在北京沙河机场建立,后来国家测绘地理信息局在北京房山也建设了 GPS 检定场,随后又有中国地震局建立了徐水 GPS 接收机检定场及各省市建立的部分检定场等。检定场主要检测接收机系统内部噪声、天线相位中心偏差、接收机频标的稳定性和接收机高低温性能等,主要对设备硬件性能进行检测,并未列入定位性能的检测,以硬件合格的方式证明设备定位精度能够达到卫星导航系统性能指标(宋超,2012)。

国外也建立了一些接收机检定场,如(美国)联邦大地控制测量委员会(FGCC)在华盛顿特区建立的 GPS 接收机检定场,国外多个品牌的接收机在里面进行性能检定,以获得 FGCC 的认证作为其产品质量的标志,但是其不具备对接收机动态定位性能检定的能力。

在静止状态下,卫星导航系统静态定位性能与时域无关,静态定位性能的检定方法比较成熟,可以通过在任意地方的高精度大地控制点,在完成坐标系转换和位置归心后便可进行导航型接收机的静态定位性能检定。

卫星导航系统高动态定位模式具有定位精度高、定位结果瞬时性、动态范围大、数据更新率高等特点,这些特点对动态定位检定系统的建设带来巨大的挑战(如 3.2 节所述 GNSS 动态定位检定系统应具备的功能)。国内外对于动态检定的理论与实践工作开展较少,主要集中在理论推算、模拟仿真和测试评估(比较)方法上,下面就对这些评估方法进行总结。

1.2.1 动态定位性能理论推算

在卫星导航系统中,影响用户导航定位授时精度的因素包括导航系统所提供的空间信号(signal-in-space, SIS)的精度性能、接收机及测量环境相关的精度性能以及用户使用服务时的时空要素相关因素决定的精度性能等三部分。其中,前两个内容以用户等效距离误差(user equivalent range error, UERE)表示,后面内容用精度衰减因子(dilution of precision, DOP)衡量。用户等效距离误差由用户测距误差(user range error, URE)和用户设备误差(user equipment error, UEE)两部分组成。从卫星导航系统的组成来看,用户测距误差综合反映了控制段、空间段对于精度的影响,基本反映了卫星导航系统的系统设计性能;而用户设备误差则反映了用户段对于精度的影响,当然还包括环境段产生的影响,主要指物理空间环境对信号传播的影响。精度衰减因子能反映接收机与可见卫星几何结构对用户测距误差的放大效应,是评估用户位置精度的重要内容。

GPS 定义的位置、速度和授时精度评估方程 (Parkinson et al, 2010; U. S. Department of Transportation, 2008) 为

$$\left. \begin{aligned} \text{UHNE} &= \text{UERE} \times \text{HDOP} \\ \text{UVNE} &= \text{UERE} \times \text{VDOP} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中, UHNE 为用户水平导航误差, UVNE 为用户垂直导航误差。

定位精度指标是基于单点最坏情况, 同时有两颗卫星运行时时效精度衰减因子最大时的前提下统计出的, 精度衰减因子取 95% 值。在忽略环境段和用户段等卫星导航系统无法控制的影响因素情况下, 认为用户等效距离误差近似等于空间信号用户测距误差。GPS 标准定位服务 (SPS) 性能规范中通过均匀分布在卫星覆盖区域内的空间点来估计用户测距误差瞬时值, 计算公式为

$$\text{URE}_{\text{GPS}} = \sqrt{(0.98R - cT)^2 + \frac{1}{49}(A^2 + C^2)} \quad (1.2)$$

式中, T 为授时误差, c 为光速, R 、 A 、 C 分别为轨道径向、切向、法向误差。

GPS 依托 GPS OC (GPS Operations Center)、美国联邦航空管理局和海岸警卫队中心等机构开展了服务性能监测工作, 并将结果对外公布。GPS OC 是美国空军指控中心的一部分, 该中心位于科罗拉多州施里弗空军基地, 一周 7 天、一天 24 小时提供 GPS 异常报告和其他信息给国防部和军事用户, 已向用户提供的产品超过 75 000 种。其官方网站上提供了用户告警通知和监测服务性能, 包括精度因子分布图和预测的定位精度分布图。

美国国防部已经从 1993 年开始先后发布了 5 个版本的 GPS 标准定位服务性能标准文档, 用于向全球展示并承诺 GPS 的服务性能 (U. S. Department of Defense, 1995, 2001, 2004; U. S. Department of Transportation, 2008, 2012)。GPS 标准定位服务性能的发布主导了卫星导航系统性能标准及其评估指标体系, 事实上已经成为目前 GNSS 的性能评估标准。

GLONASS 依托俄罗斯信息分析中心 (IAC) 和俄罗斯太空设备工程研究所等机构开展性能监测工作。俄罗斯信息分析中心是地面飞行控制中心的一部分, 负责监测 GLONASS 的服务性能, 发布系统性能报告。月报分为三类型: GLONASS 性能评估报告、激光测距评估星历精度报告和地球自转参数修正结果报告。周报主要是评估卫星导航系统的特征间隔, 涉及双频用户测距误差的评估、星历准确性 (评价标准 EVI)、导航精度、定位精度和各分析中心星历误差估计等。日报评估的内容有卫星健康状态、GPS 位置精度衰减因子 (PDOP)、GLONASS PDOP、GPS 质量评价等。

俄罗斯太空设备工程研究所是俄罗斯航天局国有企业, 承担了俄罗斯的差分校正和监测系统 (SDCM) 项目, 该中心的主要任务是从监测站收集数据, 进行在线、事后监测, 维护存有监测结果的数据库和服务用户。俄罗斯太空设备工程研究