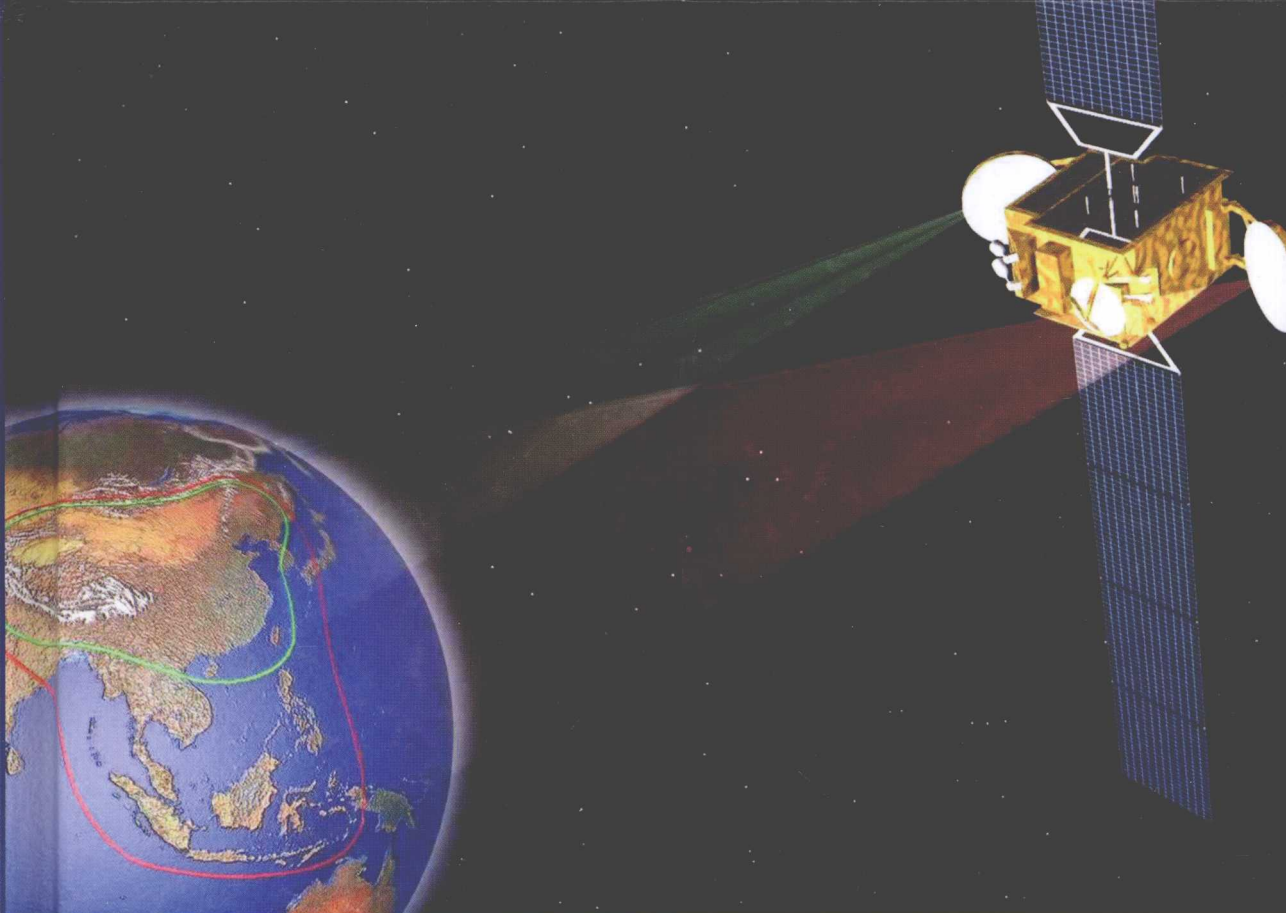




转发式卫星导航原理

施许立 孙希延 李志刚 著



科学出版社

www.sciencep.com

转发式卫星导航原理

施浒立 孙希延 李志刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在继承和吸收 GPS 类直播式卫星导航优势和特色的基础上,深入分析和总结了由我国科学家自主发明和实践的基于同步通信卫星的转发式卫星导航系统,包括定位、测速、测姿和授时的原理等,并对转发式卫星导航系统中存在的误差问题作了较深入的分析,对系统的工程实用化问题进行了探讨和论证。

本书可供从事和关心卫星导航的大学生、研究生、科技工作者在开展导航系统学习、研究、开发和应用时参阅。

图书在版编目(CIP)数据

转发式卫星导航原理/施浒立,孙希延,李志刚著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-025570-9

I. 转… II. ①施…②孙…③李… III. 转发器(通信卫星)—卫星导航 IV. TN832

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 163435 号

责任编辑:赵彦超/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

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>

天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 10 月第 一 版 开本:B5 (720 × 1000)

2009 年 10 月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—2 500 字数:284 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

时间和空间的探索和研究是当代最重大的科学前沿和战略应用之一。众所周知,爱因斯坦研究了时间和空间,取得了重大突破,并提出了相对论。近年来,时间和空间的应用几乎涉及经济社会发展的各个领域,高准确度、高稳定度的时频基准已成为重要的战略基础,其中一个最典型的战略应用就是以 GPS 为代表的全球卫星定位系统的战略发展和应用。

在海湾战争和科索沃战争,尤其是在伊拉克战争中,美国全球卫星定位系统(GPS)充分显示了作为军事力量倍增器的巨大作用。GPS 已成为现代战争中不可或缺的,集导航、定位和授时等功能于一体的,能够覆盖所有作战领域的一个中枢神经系统。它向各类武器和各军兵种实时提供准确连续的位置、速度和时间等信息。20 世纪 90 年代初,GPS 这项战略性技术开始投入民用,如今粗码已对全世界开放,甚至外国军队都可以使用。但是,它的控制“钥匙”始终掌握在五角大楼手里。在海湾战争、阿富汗战争和伊拉克战争期间,欧洲使用该系统曾受到限制,定位精度也有所下降。为此,欧洲意识到应建自己的卫星导航定位系统——Galileo 卫星导航系统。正如法国前总统希拉克所言,没有 Galileo 计划,欧洲“将不可避免地成为(美国的)附庸,首先是科学和技术,其次是工业和经济”,所以欧盟顶着阻力也要上自己的导航系统。同时,印度军方也担心加入 Galileo 计划以后,印度主要军事部署和敏感设施将彻底暴露在卫星的监视之下。如果这种系统的定位精度真能准确到 1 米的话,那么所有运行车辆和移动电话用户都将被“准确定位”,印度担心国家的安全将受到威胁。

除了军事应用外,卫星导航定位系统正迅速渗透、应用和服务于其他领域,不仅从根本上解决了海上、空中和陆地交通工具的导航和定位问题,还成功地应用于大地测量、资源勘查等相关科学和通信、测绘、海洋、宇航、交通等多个领域,显示出巨大的应用潜力。

同时,卫星导航正在改变人们的生活方式,特别是汽车导航仪和手机定位终端的广泛应用,卫星导航已走入千家万户,它将像移动电话、传真机、计算机、因特网一样影响人们的生活,我们的日常生活将离不开它。

总之,导航技术伴随着人类探索活动的深入而不断地获得发展,使人们能够认识更为广阔和精彩的未知世界。可以说,导航技术的发展推动着人类文明的进程。卫星导航已成为全球范围内的一种重要的信息源和高技术争夺领域,相关产品和

服务市场正在迅速扩大,已发展成为一个重要产业,被公认为当今国际八大无线电产业之一,给各国带来了不可低估的社会效益和经济效益。

对我国来说,国家安全方面的应用不能依附于 GPS 等国外系统,为了在 21 世纪中叶实现第三战略的伟大目标,我国正在积极启动新一代卫星导航定位系统研制计划。只有尽快建立高水平的新一代自主卫星导航定位系统,国家的安全和祖国的统一才有保障,这是国家重大的战略需求,是强国的制高点。同时,卫星导航系统的研发会带动和促进许多领域高技术的发展,将会促进导航产业和相关产业的发展。因此,中国的经济、国家安全和科学技术的发展离不开自主的卫星导航定位系统。

在短期内建立军民两用、性价比高的导航定位系统,是我国发展的战略急需。我国不宜走美国 GPS 发展的老路,而必须以创新的精神,提出新的思路,采取跨越式甚至超越式的发展方法和道路。

那么,制约我国卫星导航研制和发展的关键问题是什么呢?是空间导航卫星、星载原子钟的研制和频点选择。单独研制导航卫星投资巨大,美国为建立卫星导航系统,前后 30 余年耗资 200 多亿美元,近年来正在陆续投入 150 亿美元,希望将系统抗干扰能力提高 100~150 倍,使导航定位精度达到 0.5~1.0 米。此外,由于系统复杂,关键器件研制难度大,系统研制周期长,目前我国在星载原子钟技术上尚存在着差距。那么是否可以不发射专用的导航卫星,而利用位于赤道上空现有的同步通信卫星进行导航呢?是否可以回避研制星载原子钟的技术瓶颈,而直接利用地面原子钟作为时频基准呢?

为此,2002 年 11 月,中国科学院国家天文台和国家授时中心等单位另辟蹊径,利用在天文学研究中长期积累的信号被动接收和微弱信号检测、卫星动力学研究和卫星测轨定轨、时间保持、传递和同步等方面的优势,组织相关科研人员成立科研项目组进行研究,解决了卫星导航定位中存在的关键技术难点,提出了一整套适合我国国情的有全球导航定位发展能力的区域卫星导航系统的原理性方案。该系统取名为中国区域定位系统,简称 CAPS(China area positioning system)。CAPS 方案采用现役在轨的通信卫星上的转发器作中继,将地面生成的测距码和导航电文数据码转发给用户,实现导航和定位。

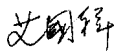
由于圆满地解决了上述一系列问题,在 2005 年成功地建成了具有初步运行能力的 CAPS 系统,并通过了中华人民共和国科学技术部、中国人民解放军总装备部和中国科学院的验收。从对建成的初步应用系统最近的测试得到的实验数据来看,定位精度已达 10 米以内,达到了预期的设计目标。

这一方案是在研究世界导航定位技术发展趋势的基础上,吸取国内外的经验教训,并借鉴国内外已有卫星导航定位系统及其技术的优点和长处,提出来的一种

省钱、研制周期短、性能好、功能强、适合国情的创新型卫星导航定位系统。

在 GPS 类导航系统占据卫星导航市场的今天,所有的误差修正方法、性能表征方法和广域差分方法等理论和方法都适用于 GPS 类系统。对于基于同步通信卫星的转发式卫星导航系统,这些理论和方法并不完全适用,因此这一理论研究的空白亟须被填补。只有通过理论探索、仿真及实验,特别是“地-星-地”实验,研究其机理与用途,建立一整套基于同步通信卫星的转发式卫星导航系统的理论和方法,才能为卫星导航事业的发展奠定坚实的理论基础,才能更好地发展具有自主知识产权的卫星导航系统,像我国古代发明指南针那样,为世界卫星导航事业的发展作出重大贡献。

为了更好地促进卫星导航技术的发展,我们希望能把转发式卫星导航研发过程中积累的经验及心得体会与大家交流,所以我们将分阶段出版专著、发表论文,以飨读者。这是科技工作者的职责和使命,也是我们的追求和期望。本书就是上述计划中的一部分,也是反映 CAPS 项目开展情况的第一本专著,衷心希望读者批评和指正。



2008 年 6 月 6 日

前言

天文和导航的姻缘关系源远流长,早在远古时代,人类就开始目视日月星辰来辨认方向。到西汉初年,《淮南子·齐俗训》记载:“夫乘舟而惑者,不知东西,见斗极则寐矣。”说明天文目视导航到了汉代已用于航海。明代发展成“牵星术”,应用于郑和七下西洋的伟大创举,表明明代已从目视观星斗辨航向阶段进入仪器测天体定船位阶段,使我国古代航海天文跨入鼎盛时期。到了18世纪,西方发明六分仪观测天体,并用计时仪器记录观测时刻,从而开创了近代天文导航技术的时代。到了现代,虽然天文导航开始被冷落,无线电导航迅速发展,但天文技术对导航的贡献仍然举足轻重,就以当代导航的里程碑——美国全球卫星定位系统而论,美国海军天文台的天文学家就曾作出了杰出的贡献。

今天,中国天文学家和天文工作者同样满怀激情,希望能为我国和世界的导航事业作出新贡献。

2002年11月初,那是一段永远值得怀念的日子,在中国科学院北郊奥运村科技园区国家天文台不足30平方米的台长办公室里,台长艾国祥院士找我和颜毅华研究员讨论天文导航和卫星导航的有关问题,讨论持续了好几天,话题一个接着一个,在活跃而激烈的思想碰撞下,在艾国祥院士敏锐的洞察力和创新思维能力的带动下,在近年来开展天文导航研究的基础上,集天文界在天体轨道测量和预报、时频基准的高准确度溯源、高稳定度保持和原子钟研制、天体微弱信号空间传播特性研究和精确测量,以及天文海量数据快速处理方面积累的优势,提出了一个重大的创新构想——研发转发式卫星导航系统。

2002年11月16~19日,应艾国祥院士邀请,中国科学院国家授时中心李志刚、边玉敬、胡永辉、吴海涛和高玉平等到北京国家天文台310会议室与我、颜毅华研究员和薛随健处长举行了两天的技术座谈;2002年12月13日,艾国祥院士、金铎局长(时任中国科学院基础局局长)和我与国家授时中心的有关领导、专家一起彻夜开会讨论研究,拉开了国家天文台与国家授时中心合作开展转发式卫星导航系统研究和工程研制的序幕。项目得到了中华人民共和国科学技术部、中国人民解放军总装备部、中国科学院和国家自然科学基金委员会领导的充分肯定和大力支持,并很快启动。之后,随着研制工作的开展,合作队伍不断扩大,参与合作研发的单位有中国科学院上海微系统与信息技术所,上海微小卫星工程中心,中国科学院微电子研究所,中国科学院自动化研究所,上海天文台,紫金山天文台,云南天文

台,长春人造卫星观测站,乌鲁木齐天文站,中国科学院软件研究所,杭州电子科技大学,西安电子科技大学,中电公司十所、十四所、二十所、三十六所、三十九所及高德公司等。时后一年多,在江绵恒副院长和中国科学院高技术局的直接领导下,由艾国祥院士领衔的项目组和合作单位的研发人员心系国家战略需求,在原始科技创新的基础上,不断地开展关键技术突破,稳妥地开展系统集成。整个研制队伍团结一心、精诚合作、频繁切磋、精心施工。美国研制 GPS 花了二十多年的时间,而我们仅用了一年多的时间就研制成功了具有自主知识产权的基于同步通信卫星的转发式卫星导航验证系统,所用资金也不足美国研制 GPS 时所花资金的千分之一,这是开拓创新和辛勤劳动的结晶。

在努力创新和勤奋工作的基础上,我们把这些创造性劳动的成果提炼整理成书出版,希望能开展更广泛的交流与合作,共同推动转发式卫星导航技术的发展,推动我国和世界卫星导航事业的繁荣。

本书第 1 章为卫星导航概论,主要通过世界卫星导航系统发展历程和现状的分析回顾,指出卫星导航系统发展的两类趋势,同时讨论发展我国自主卫星导航系统会面临的关键技术,通过这些分析,力图在前人成果的基础上,创造出更好更适合我国国情的卫星导航系统。第 2 章介绍我们提出的转发式卫星导航定位原理,包括设计的出发点与理念、工作原理(虚拟原子钟、虚拟星座、复合模型、地球约束模型和双曲面交会模型),以及距离测量、载波相位测量等测量原理。第 3 章探讨转发式卫星导航中观测方程的求解方法以及提高解精度的各种措施。第 4 章阐述转发式卫星导航测速的设计理念和原理,考虑到转发器混频信号稳定度不高,会产生频漂,影响多普勒频移测速,构造了频差多普勒测速技术和单频改正的多普勒测速技术,实现了转发式卫星导航系统的高精度测速。第 5 章研讨转发式卫星导航测姿的原理及方法,并介绍测姿的应用。第 6 章简要叙述转发式卫星导航的授时原理,包括时间传递、定时方法、时间同步、共视定时和授时等。第 7 章是系统误差分析,主要指误差源的分析、误差的测量和修正方法。第 8 章介绍转发式卫星导航系统中几个主要的关键技术,包括如何实现星座优化布局;如何保证接收机天线接收端口的功率;如何提高系统的抗干扰能力;如何发挥通信导航一体化优势。除了上述这些关键技术外,如何实现虚拟原子钟计时,如何解决下行频率的漂移,如何实现星座的高精度测定轨,如何实现时延的精密测量和时间同步等课题已在前几章中阐述了。这些关键技术有一定的特殊性,大多数是由于转发器转发而引起的。解决了这些关键技术也就解决了转发式卫星导航所面临的问题。第 9 章展望了转发式卫星导航的未来。

转发式卫星导航是从其他卫星导航特别是 GPS 的基础上发展而来的。基本理论、方法和内容在不少地方与 GPS 比较相似。鉴于国内外介绍 GPS 的文献已

经很多,本书主要介绍转发式卫星导航不同于 GPS 的地方。但考虑到体系的完整性和尊重资料来源,不少地方还是直接引用了 GPS 相关的一些内容。另外需要说明的是,本书介绍转发式卫星导航系统时,频点、星座、扩频带宽、码频等参数大多引用 CAPSI 期所用的参数,以后实施发展中会有所变化,将重新设计。有些仿真,如星座分布中星座的位置,仅是仿真时的设想,并非真正的设计。

在 2004 年初稿撰写完成以后,本书曾作为研究生讨论班教材,研究生们不但兴致勃勃地进行研讨,而且提出了许多宝贵的意见和建议,发展了初稿的内容,并帮助再一次整理书稿和撰写有关章节,其中耿建平、李圣明、胡超整理了第 2,6 章;孙希延撰写了第 4 章,并与赵彦一起整理了第 3,4,7 章;梁坤整理了第 5 章;尚俊娜、杨朋翠和张新锋整理了第 8 章;国家授时中心李志刚研究员撰写测定轨章节内容,并审阅全书,校核定稿。艾国祥院士为本书作序。

本书引用了国内外有关卫星导航的文献,特别是引用了为研制转发式卫星导航系统作出贡献的领导和同事的资料,他们是:国家天文台艾国祥院士,国家授时中心郭际、吴海涛、边玉敬、胡永辉、李孝辉、卢晓春、杨旭海、华宇等研究员,中国科学院微电子研究所阎跃鹏研究员,上海微小卫星中心沈学民研究员、梁旭文研究员和李国通研究员,中国科学院自动化研究所王东琳研究员和葛健博士。这些领导和专家是转发式卫星导航系统研制第一线的创造者和实践者,亦是本书的共同著作者。

最后感谢国家授时中心宋金安研究员;中国卫星通信集团公司陈吉斌研究员;杭州电子科技大学孔宪正教授;中国航天科技集团一院十二所林金研究员;国家遥感中心景贵飞研究员和北京航空航天大学张军教授等,他们提出过许多宝贵的意见和建议。

本书得到中国科学院国家天文台、国家重点基础研究发展计划(基于通信卫星的卫星导航系统基础研究和理论探索,课题编号:2007C815500)、国家高技术研究发展计划(课题编号:2004AA105030)、中国科学院知识创新工程重大项目(课题编号:KGCX1-21)、国家高技术研究发展计划(导航与卫星通信融合关键技术及应用,课题编号:2007AA12Z343;高灵敏度双模卫星导航接收机及芯片技术,课题编号:2006AA12Z301)、上海市科学技术委员会课题(卫星导航接收机关键技术研究,课题编号:06DZ05901)和国家自然科学基金课题(基于双极化天线的 GPS 多径效应与多径误差抑制算法研究,课题编号:60802018)的资助。

由于成书仓促,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

施浒立

2008 年 10 月 15 日

目 录

序

前言

第 1 章 卫星导航概论	1
1.1 国内外卫星导航定位系统的现状	1
1.2 卫星导航定位技术的发展趋势	2
1.3 发展我国自主卫星导航系统面临的关键技术	2
参考文献	5
第 2 章 转发式卫星导航定位原理	6
2.1 转发式卫星导航设计理念	7
2.2 转发式卫星导航系统组成	8
2.3 高空位置测量基准和卫星精密测定轨原理	9
2.3.1 高空卫星位置测量基准	9
2.3.2 卫星精密测轨定轨原理	10
2.3.3 卫星测轨方法	12
2.3.4 卫星轨道的预报	15
2.4 伪随机码测距原理和伪距概念	16
2.4.1 伪随机码测距原理	16
2.4.2 伪距概念	18
2.4.3 信号体制	20
2.5 转发式卫星导航的定位原理	21
2.5.1 坐标系	23
2.5.2 伪距空间交会定位原理	23
2.5.3 载波相位测量定位原理	26
2.5.4 多普勒定位工作原理	30
2.6 转发式卫星导航定位数学模型	31
2.6.1 虚拟原子钟概念及模型	33
2.6.2 虚拟星座概念及模型	37
2.6.3 导航测轨一体化及复合模型	39
2.6.4 地球椭球面约束模型	40
2.6.5 相对伪距差概念及双曲面交会模型	41
2.6.6 小结	42

参考文献	43
第3章 定位测量方程解的探讨	46
3.1 定位测量方程球面交会解的求解方法	46
3.1.1 线性化迭代求解法	47
3.1.2 最小二乘法	53
3.1.3 二分均衡迭代解法	53
3.1.4 高阶消元解法	55
3.2 高程约束的卫星定位测量方程的求解	56
3.2.1 椭球约束方程全微分处理解法	56
3.2.2 高程约束微分处理解法	57
3.2.3 地球椭球方程在方程组外作为约束条件的解法	59
3.2.4 地球高程作为约束条件时的二分均衡迭代解法	58
3.2.5 小结	61
3.3 定位测量方程的双曲面交会解的求解方法	60
3.4 解性能探讨	62
3.4.1 方程组性态分析	62
3.4.2 系数矩阵的奇异特性	63
3.4.3 右端项准确化	65
3.4.4 解的迭代格式	66
3.4.5 误差量未知数化	67
3.4.6 约束解	68
3.4.7 多导航信息融合解	70
3.4.8 冗余解	69
3.4.9 小结	70
参考文献	70
第4章 转发式卫星导航的测速原理	72
4.1 转发式卫星导航测速设计理念	73
4.2 多普勒测速原理	73
4.3 频率偏移分解	76
4.3.1 转发式卫星导航下行载频生成原理	76
4.3.2 转发式卫星导航下行载波频漂分析	78
4.4 频率改正的多普勒测速原理	80
4.4.1 上行频率实时调整方法	80
4.4.2 广播用户频率修正模型	82
4.5 差频多普勒测速原理	90
4.5.1 双频测速方式	91

4.5.2 双频测速对系统中相关频率源的要求	91
4.5.3 双频频差测试	92
4.6 卡尔曼滤波实现转发式卫星的动态定位及测速	97
参考文献	100
第5章 转发式卫星导航测姿原理	103
5.1 姿态确定的数学背景	103
5.1.1 方向余弦	104
5.1.2 四元数	104
5.1.3 欧拉角	106
5.2 坐标转换确定姿态原理	106
5.3 矢量最小二乘法确定姿态原理	107
5.4 利用转发式卫星导航确定姿态的状态估计法	112
5.4.1 双差干涉观测	113
5.4.2 运动模型和姿态动力学	114
5.5 转发式卫星测姿精度的分析	120
参考文献	124
第6章 转发式卫星导航授时原理	125
6.1 时间概念	125
6.2 转发式卫星授时基础	126
6.2.1 CAPST	126
6.2.2 时间传递	129
6.3 CAPS 定时	130
6.3.1 用户相对于 CAPS 时间的钟差	130
6.3.2 CAPS 定时原理	132
6.3.3 CAPS 定时误差分析	133
6.3.4 CAPS 定时方法	135
6.4 CAPS 校频	139
6.4.1 时差法校频	139
6.4.2 数字综合法校频	140
6.5 其他高精度时间传递方法	140
6.5.1 卫星双向时间比对技术	140
6.5.2 载波相位法	142
参考文献	142
第7章 系统误差分析	144
7.1 误差定义	144
7.2 误差方程讨论	145

7.2.1 经典卫星定位的误差方程	145
7.2.2 经典卫星导航的几何精度因子	146
7.2.3 测速精度分析	148
7.3 误差源分析	149
7.3.1 卫星的主要误差	149
7.3.2 信号传播中的主要误差	154
7.3.3 与接收设备有关的误差	157
7.4 误差改正模型	158
7.4.1 误差逼近修正模型	158
7.4.2 求差法	160
7.4.3 标校解	164
7.4.4 差分解	169
7.4.5 测量反馈修正法	171
7.4.6 冗余法和数据平滑	171
参考文献	172
第8章 转发式卫星导航工程化论证	175
8.1 功率保证	175
8.1.1 传输方程	175
8.1.2 传输损耗和噪声	176
8.1.3 卫星链路分析	176
8.2 星座布局优化	182
8.2.1 转发式卫星导航全球系统星座仿真	183
8.2.2 亚洲局域系统星座仿真	190
8.2.3 中国局域系统星座仿真	193
8.3 抗干扰问题和生存能力	196
8.3.1 转发式卫星导航系统干扰特性	197
8.3.2 转发式卫星导航系统干扰门限	197
8.3.3 转发式卫星导航系统干扰的影响	198
8.3.4 抗干扰问题	199
8.4 通信导航一体化	202
8.4.1 概述	202
8.4.2 转发式卫星导航系统中的通信系统	202
参考文献	207
第9章 转发式卫星导航展望	210
9.1 转发式卫星导航系统的创新点	210
9.2 转发式卫星导航原理精度极高	213

9.3 转发式卫星导航的其他优势	214
9.4 市场呼唤转发式卫星导航系统	216
参考文献	218
附录	220
附录 A 坐标系说明	220
附录 B 坐标系之间的转换	222
附录 C 四元数与欧拉角之间的关系	225
参考文献	226

第 1 章 卫星导航概论

1.1 国内外卫星导航定位系统的现状

世界上现有的卫星导航系统可分为两类。一类是独立完整的卫星导航定位系统,正在运行的有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 和中国的北斗试验系统;正在研发的有欧盟的 Galileo 导航系统、中国的北斗卫星导航系统和中国区域定位系统 CAPS 等。国外的系统为全球定位系统,我国的系统首先是区域定位系统。当前运行的系统中最成功的是 GPS 系统,它是星基直播式卫星导航定位系统,具有被动接收观测、用户无限、精度高、功能全、性能好等优点,已得到广泛应用。另一类是增强系统,它通过在广域或局域内对 GPS 信号进行监测,得到差分改正信息及具有连续性、可用性、完好性等的信息,再通过卫星或其他途径广播给用户,达到高精度和高可靠性的目的,从而被不少国家和地区关注和采用。有些现已建成,有些正在开发中。广域增强系统有美国的 WAAS、欧盟的 EGNOS、日本的 MSAS 和 QZSS,印度及巴西的增强系统也在研发之中。局域增强系统有美国的 LAAS、澳大利亚的 GBAS 等。

我国对卫星导航极其重视,自北斗试验系统建成以后,接着就启动了北斗二代卫星导航系统。现在,北斗二代卫星导航系统的研制建设已进入攻坚阶段,2009 年将有多颗卫星发射升空,2011 年完成系统组网。此外,北斗全球系统建设已展开立项论证工作,并被列为国家科技发展规划重大专项,预计到 2020 年完成建设。2002 年 11 月,中国科学院艾国祥院士等提出了“基于同步通信卫星的转发式卫星导航系统”理念^[3],在中国科学院和科技部等国家有关部委的支持下,通过不懈的努力,已于 2005 年 6 月完成实验系统建设,取得了良好的实验结果。同时,我国还参与了欧盟的 Galileo 计划, Galileo 系统采用 GPS 类系统技术,宣称可提供更可靠、更高的定位精度和更完善的导航信息服务。

我国对差分系统的研究起步较早,但仅是分散地开展了局域差分系统的研发和应用,对广域差分和增强系统的研究起步则较慢。近年来有关单位开始了利用通信卫星建立广域增强系统的研究,在新一代民航航管系统中也已开始立项研究局域增强系统。

1.2 卫星导航定位技术的发展趋势

卫星导航技术的下一步发展趋势如下:

(1)用一种经济实用的方式使 GPS 类(中轨卫星星座)卫星导航具有更可靠、更稳定、更完好的高性能;

(2)找到一种可以替代 GPS 类卫星导航系统的经济实用而且可靠的精密卫星导航定位系统。

第一种做法正随着 GPSⅢ的投入、GLONASS 的恢复、Galileo 和北斗卫星导航系统的研发而深入,系统间可以实现组合,组成双系统或多系统融合的卫星导航系统。同时可发展差分和增强系统,以及通过增加频点、研发新码、增加功率、改变调制方式、提高接收机的灵敏度及研发自适应调零天线等措施提高系统的抗干扰能力,提高系统的定位精确性、可用性和完好性。

第二种做法新卫星导航系统已由中国科学院艾国祥院士等^[1~4,19]提出,在中国科学院国家天文台、国家授时中心、上海微小卫星工程中心、中国科学院微电子研究所、中国科学院自动化研究所等单位通力合作下,已研发成功中国区域定位系统(CAPS)。这种新型的卫星导航定位系统从原理上可以称为转发式卫星导航系统。

转发式卫星导航系统可以利用位于赤道同步轨道的现有在轨通信卫星上的转发器,把时间信号、轨道参数等导航电文及测距码从地面发射上行,经转发器转发,再广播下行。这样用户接收机接收到转发的导航信号,就可以实现导航、定位、测速和授时。转发式卫星导航系统除了利用赤道同步轨道通信卫星转发器外,还利用倾斜同步轨道卫星或小倾角同步轨道卫星(可以由寿命末期的同步卫星实现)改善卫星星座组成的几何精度衰减因子(DOP),提高导航定位精度。转发式卫星导航系统把原子钟装置在地面上,地面原子钟工作环境好、精度高、容易操作与调整。星载原子钟难以操作和调整,受相对论效应影响,稳定度不如地面原子钟高,寿命也难以保证。转发器的双向时间比对又容易实现卫星轨道的高精度测量^[4]。虚拟星载原子钟时的设置,使系统具有广域差分修正能力,所以其原理精度高于 GPS 类卫星导航定位系统,而投入成本大大低于 GPS 类卫星导航定位系统,且研制周期极短,系统调试方便,信号易于变化,所以是卫星导航定位系统实用化、民用化、商业化的必然的发展趋势之一,是一种灵活机动、功能齐全的区域导航定位系统。

1.3 发展我国自主卫星导航系统面临的关键技术

1)高稳定度的时频基准(原子钟)

在卫星导航中,除了授时精度和测速精度等需要有高稳定度的时频基准外,因卫星与用户之间的距离测量是通过测量信号离开卫星上的发射天线相位中心至信号到达用户接收天线相位中心的时延得到的,时延的测量精度同样依靠系统中时频基准的准确度和稳定度,所以高性能的时频基准是 GPS 类卫星导航系统的关键技术之一。星载高精度原子钟研制难度大,价格昂贵,目前只有少数国家掌握这一技术,这一技术及设备对部分国家实行禁运,所以星载原子钟成为目前一些国家开发研制自主卫星导航系统的一大技术瓶颈,也是保证导航星座有一定的使用寿命的技术瓶颈。

2) 高精度测定轨系统和技术

卫星位置是空基导航系统的位置测量基准,所以能实时精确广播卫星星历变得十分重要。在中国区域定位系统 CAPS 研制中,中国科学院国家授时中心李志刚研究员^[4,19]等发明了通过伪码扩频相关测时延、多站交会测轨的方法^[4],最后通过动力学定轨等方法,获得了近 2m 级的实时测定轨精度,已与目前 GPS 测定轨精度相近。

因此,可以通过增加测轨设备、扩建测轨站,实现实时测轨和短弧外推定轨,深入研究和消除影响测轨精度的各种误差源,如卫星星历误差、转发器时延抖动、电离层折射误差、对流层折射误差、多径误差、接收机观测误差和接收机噪声等,力争使测定轨精度优于米级。

3) 抗干扰技术

GPS 的一个致命弱点是极易遭受干扰。在伊拉克战争中,仅用小功率干扰机就能使 GPS 失效,造成导弹偏离飞行轨道。为此发展抗干扰技术尤为重要。美国在 GPSⅢ 计划中将花 150 亿美元提高系统的抗干扰能力。GPS 主要通过增设频点、研发新码、提高功率、研制自适应调零天线等技术改善 GPS 的抗干扰能力,但效果并不明显。由于干扰水平也在不断升级,所以卫星导航系统抗干扰的难度也在与日俱增,而 CAPS 则采取另辟蹊径,开创了采用换频、换码、信号寄生等方法改善系统抗干扰能力的新途径。

抗干扰能力对改善导航定位性能的可靠性和完好性十分重要,对扩大卫星导航的可用范围也影响很大,尤其是对军事应用更具有重要价值。

4) 高集成度芯片技术

近十年来,卫星导航接收机的集成电路发展以惊人的指数速度向前推进。基本的 GPS 接收机现在已可以整合在两三片芯片之中。最为典型的是一片专用的射频(RF)前端、一片专用数字信号处理器(DSP)及一片微处理器。有的接收机将微处理器嵌入到 DSP 中,便成了两片机。接收机技术的发展方向是单芯片式卫星导航接收机,它将 RF、DSP、CPU 等容纳在一个芯片中,并且在形成接收机 OEM