



“十二五”国家重点图书规划项目
国防特色学术专著·控制科学与工程

National Defense Monograph



卫星导航原理及应用

赵琳 丁继成 马雪飞 编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



“十二五”国家重点图书规划项目
国防特色学术专著·控制科学与工程

卫星导航原理及应用

赵 琳 丁继成 马雪飞 编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书紧密结合卫星导航的发展和部分新技术、新应用的研究现状,系统、全面地介绍了 GPS, GLONASS, Galileo, 北斗以及卫星导航增强系统的发展建设情况;深入细致地阐述了卫星导航基础知识、信号处理技术和应用技术。其内容包括坐标系统、时间系统、通信调制技术、卫星导航定位原理、完好性监测技术、GPS 接收机工作原理、卫星导航与惯性导航系统组合定位技术、卫星导航与微惯性测量单元组合姿态测量技术以及 AGPS 定位技术等。

本书内容介绍全面,理论分析深入,工程实用性强,既可作为高等院校师生进行理论知识学习和相关研究工作的参考教材,也可作为工程技术人员的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航原理及应用/赵琳,丁继成,马雪飞编著. —西安:西北工业大学出版社,2011.6
(国防特色学术专著·控制科学与工程)

ISBN 978-7-5612-2952-1

I. ①卫… II. ①赵… ②丁… ③马… III. ①卫星导航 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 230527 号

卫星导航原理及应用

赵琳 丁继成 马雪飞 编著
责任编辑 李阿盟 雷军

*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpup.com> E-mail: fxb@nwpup.com

陕西向阳印务有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:22.375 字数:546 千字

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5612-2952-1 定价:58.00 元

前言

全球卫星导航系统(GNSS)能够全天候、全天时地为用户提供实时精确的位置、速度和时间信息,在国防建设、资源勘察、能源开发、测绘工程、安全监测、交通运输等领域有着十分广泛的应用,经过短短三十余年的发展,就已迅速成为继通信、互联网之后的又一高新技术产业。随着美国 GPS 现代化、俄罗斯 GLONASS 复苏、欧洲 Galileo 卫星导航系统的启动和我国北斗卫星导航系统的建设,以及遍布全球的各种卫星导航增强系统、区域卫星导航系统的投入使用,卫星导航在传统应用领域的地位得到进一步巩固和加强,并开始与通信和互联网结合,逐步向基于位置的服务(LBS)等新的应用领域拓展,为人们的日常生产、生活提供各种增值信息,形成了全球市场化的发展趋势。

本书是笔者在总结部分研究成果和查阅相关资料的基础上完成的。全书共分 14 章,系统地介绍了卫星导航技术原理和发展应用。第 1,2 章介绍卫星导航系统发展的历史、现状以及与卫星导航有关的基础知识;第 3,4 章介绍 GPS 系统信号、现代化建设以及 GPS 接收机工作原理;第 5,6,7 章分别介绍以卫星观测信息为基础的单点定位、定位误差来源和抑制方法以及差分定位技术;第 8,9,10 章分别介绍 GLONASS, Galileo 和我国北斗卫星导航系统的构成、信号以及发展建设等情况;第 11 章以航空导航需求为基础,介绍全球各类卫星导航增强系统的基本原理及其建设情况,并对接收机自主完好性监测算法进行详细阐述;第 12,13,14 章介绍卫星导航系统在与船用惯性导航系统组合定位、载体姿态测量以及基于位置的服务中的应用技术。

全书内容既涉及卫星导航基础、导航定位原理和信号处理技术,又包含了卫星导航系统最新的发展建设情况,以及部分新技术、新应用的研究现状,以期高等院校师生和工程技术人员提供参考。

参加本书编写的有:赵琳(第 1 章、第 2 章 2.1~2.4 节、第 5 章、第 8 章和第 12 章)、丁继成(第 4 章、第 7 章、第 9 章、第 11 章、第 13 章和第 14 章)、马雪飞(第 2 章 2.5~2.6 节、第 3 章、第 6 章和第 10 章)。全书由赵琳主持规划,丁继成统稿。本书在编写过程中得到了董冀、李亮、孙明、黄晨等的热心帮助,在此一并表示感谢。

卫星导航作为一门新兴学科,技术更新和应用发展日新月异,本书力求适应卫星导航新的发展趋势。但由于笔者研究水平和资料查阅范围有限,书中错漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2010 年 10 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星导航的发展历史和现状	1
1.2 卫星导航的作用和特点	8
1.3 卫星导航的应用.....	10
第 2 章 卫星导航基础	13
2.1 卫星导航系统常用坐标系.....	13
2.2 卫星轨道及卫星在轨运动.....	18
2.3 卫星导航时间基础.....	24
2.4 伪随机噪声码.....	29
2.5 通信调制技术.....	39
2.6 通信中的编码和译码.....	45
第 3 章 GPS 卫星导航系统	49
3.1 系统构成.....	49
3.2 卫星信号.....	55
3.3 导航电文.....	62
3.4 GPS 现代化	74
第 4 章 GPS 接收机工作原理	78
4.1 接收机体系结构.....	78
4.2 射频前端.....	80
4.3 基带输入信号质量.....	81
4.4 信号捕获.....	82
4.5 GPS 信号跟踪	87
4.6 GPS 跟踪环抗干扰性能	97
4.7 导航电文输出	108
第 5 章 卫星定位基本方法	111
5.1 卫星定位方法的分类	111
5.2 卫星定位基本观测量	112
5.3 伪距法定位	118
5.4 精密单点定位	126
5.5 多普勒法定位	128

5.6	干涉法定位	130
5.7	接收机速度测量	131
第 6 章	卫星导航系统误差分析	134
6.1	卫星导航的误差来源	134
6.2	卫星导航系统误差的抑制	142
6.3	卫星导航系统定位精度描述方法	149
第 7 章	差分定位方法	152
7.1	测码伪距差分定位	152
7.2	载波相位平滑伪距	154
7.3	载波相位差分定位	157
7.4	整周模糊度求解	165
7.5	区域差分定位系统	177
7.6	差分数据通信与电文格式	182
第 8 章	GLONASS 卫星导航系统	187
8.1	系统构成	187
8.2	卫星信号	191
8.3	导航电文	193
8.4	GLONASS 现状与发展	199
第 9 章	Galileo 卫星导航系统	203
9.1	系统构成	203
9.2	系统服务	208
9.3	卫星信号	212
9.4	导航电文	223
9.5	Galileo 坐标系统与时间系统	227
9.6	Galileo 系统的特点	229
9.7	Galileo 系统未来应用分析	229
第 10 章	北斗卫星导航系统	231
10.1	Beidou I 系统构成	231
10.2	Beidou I 卫星信号	233
10.3	Beidou I 工作原理	234
10.4	COMPASS 卫星导航系统	238
10.5	卫星导航系统的兼容性与互操作性	243
第 11 章	卫星导航增强系统	247
11.1	航空导航需求	247

11.2	星基增强系统(SBAS)	253
11.3	陆基增强系统(GBAS)	267
11.4	机载增强系统(ABAS)	273
11.5	GNSS 完好性监测技术	273
第 12 章	船用惯性导航系统与 GPS 的组合	281
12.1	概述	281
12.2	船用惯性导航系统	283
12.3	卡尔曼(Kalman)滤波器	286
12.4	GPS/INS 组合系统	291
12.5	双差分 GPS/INS 组合导航系统的设计	294
12.6	推算船位与 GPS 的组合	297
第 13 章	GPS / MIMU 在姿态测量中的应用	302
13.1	微惯性航姿系统定姿的方法	302
13.2	捷联惯性导航系统的工作原理	303
13.3	GPS/MIMU 组合方案	308
13.4	卡尔曼滤波器设计	308
13.5	姿态测量性能评估	314
第 14 章	AGPS 定位技术	318
14.1	位置服务中的导航定位	318
14.2	室内 GPS 信号的特点	320
14.3	AGPS 定位基本原理	323
14.4	AGPS 信号捕获	325
14.5	AGPS 定位技术的特点	334
附录		336
A.1	常用坐标系转换	336
A.2	空间直角坐标系转换	336
A.3	空间直角坐标系与大地坐标系	337
A.4	高斯投影坐标	338
参考文献		340

第1章 绪 论

1.1 卫星导航的发展历史和现状

1957年10月4日,苏联将第一颗人造地球卫星 *Спутник* 送入了轨道。它的发射成功,是人类致力于现代科学技术发展的结晶。它使得空间科学技术的发展迅速跨入了一个崭新的时代,也揭开了导航定位系统的新纪元。

人造地球卫星的升空,引起了世界各国的普遍关注和兴趣。美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的 George Weiffenbach 和 William Guier 博士在观测卫星发射的无线电信号时发现,多普勒频移与卫星运动轨迹之间存在着十分密切的关系,于是产生了在已知地面站通过测量卫星信号多普勒频移确定卫星位置的想法。试验证明该方法有效可行,并取得了巨大的成功。同在该实验室工作的两位科学家(Frank McClure 和 Richard Kershner 博士)根据这个试验结果提出设想,如果将上述步骤颠倒过来也应当成立,即如果已知卫星在轨道上的瞬时精确位置,那么通过测量卫星信号中的多普勒频移,便可以测出地面观测点所在的地理位置。卫星导航定位的概念就这样被提出来了。

1.1.1 卫星多普勒导航系统

美国海军了解到利用卫星进行导航的可能性,并考虑到“北极星”核潜艇正需要一种准确的导航信息用以校准和重调其惯导系统(INS),决定与约翰·霍普金斯大学应用物理实验室签订研究和发​​展卫星导航系统的合同,称为“子午仪计划”。于是便诞生了第一代卫星导航系统——美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS),又称子午仪系统(TRANSIT),如图 1.1.1 所示。它的诞生预示着经典的导航定位技术面临着一场重大的变革,它在导航技术的发展史上具有划时代的意义。

由 6 颗工作卫星构成的子午仪系统于 1964 年 1 月建成,首先为美国军方启用。它先期发射的 7 颗实验卫星测量了地球形状与地球重力场分布,探测了电离层对无线电信号传播的影响和高层大气阻力对卫星运动的影响,试验了卫星星体设备和地面站接收设备以及跟踪与预报卫星位置的方法等,为子午仪系统方案的建立提供了大量可靠的资料。子午仪系统的导航卫星连续发射无线电信号,传递三种导航信息,即卫星星历、偶数分钟的时间信号以及供多普勒频移测量用的 399.968 MHz 和 149.988 MHz 的载波频率。它的轨道平均高度为 1 000 km,属低轨道卫星;卫星运转周期为 106 min;轨道倾斜角约为 90° ,属极轨道型,各导航卫星的轨道基本上相交于地球的两极,这也是将其称为子午仪系统的原因。美国政府于 1967 年批准将子午仪系统解密并提供民用。该系统在 1968 年测定的精度为 ± 70 m,1976 年提高到 ± 30 m。由于子午仪系统不受气候条件的影响,具有良好的定位精度,并经过多年不断地

改进,具有很高的实用价值,因而得到了广泛的应用。除了军用舰船使用以外,远洋渔船、海上石油开发以及大型游艇也都安装了子午仪接收机,甚至大地测量部门也用它来测定精确位置。

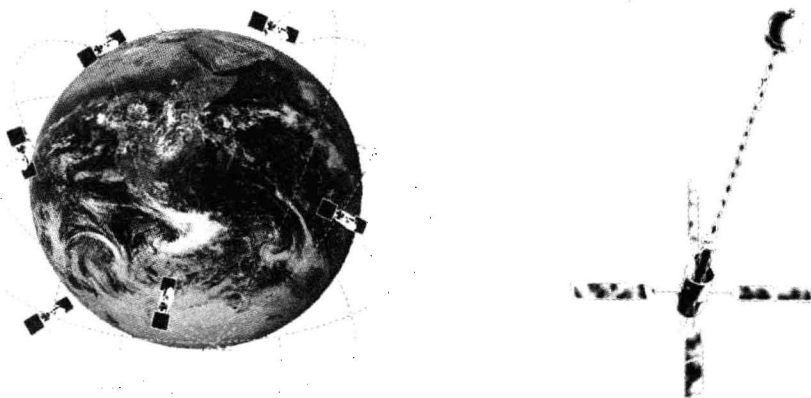


图 1.1.1 子午仪系统星座及卫星

与此同时,在子午仪卫星导航系统的启发下,苏联海军于 1965 年也开始建立了一个称为 CICADA(英文也写做 Tsikada)的卫星导航系统,它与子午仪系统相似,也是第一代卫星导航系统。该系统的星座由 12 颗所谓的宇宙卫星构成,高度为 1 000 km,卫星运行周期为 105 min,分别发送 150 MHz 和 400 MHz 的导航信号。

基于测量多普勒频移的 TRANSIT 和 CICADA 通常被称为卫星多普勒导航系统,它们将导航和定位技术推向了一个崭新的发展阶段,特别是前者得到了广泛的应用,显示出巨大的优越性。但是,它们仍然存在着明显的缺陷:由于这些系统卫星数目少、运行高度低、从地面站观测到卫星的时间间隔长,系统无法提供连续实时的三维导航,加之获得一次导航解所需的时间较长,所以难以充分满足军事方面,尤其是高动态目标导航的要求,在大地测量学和地球动力学研究方面的应用也受到了很大的限制。子午仪系统已于 1996 年 12 月 31 日停止发射导航和时间信息。为了满足军事和民用部门对连续、实时、三维导航和定位的需求,第二代卫星导航系统便应运而生了。

1.1.2 全球卫星导航系统

1. GPS

鉴于子午仪导航系统存在的不足,美国于 20 世纪 60 年代末期着手研制新型卫星导航系统,以满足海陆空三军和民用部门对导航定位精度越来越高的要求。海军首先提出了通过测量传播时间实现测距的“Timation”计划,拟采用 12~18 颗卫星组成全球定位网,卫星高度约为 10 000 km,轨道呈圆形。与此同时,空军提出了名为“621B”的计划,拟采用 3~4 个星群覆盖全球,每个星群由 4~5 颗卫星组成,中间一颗采用同步定点轨道,其余几颗用倾斜 24 h(运行周期)轨道。考虑到这两个计划各有优、缺点以及美国政府无力负担两套系统研制的庞大经

费开支,1973年美国国防部批准由10个单位组成联合计划局,负责研制一种新系统,以适应绝大多数国防和民用领域的需要。在这种情况下,导航卫星测时、测距/全球定位系统(Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System, NAVSTAR/GPS)的方案诞生了。NAVSTAR/GPS简称GPS,它吸收了“Timation”和“621B”两个方案的优点,由GPS联合计划局、海陆空三军和国防测绘局的工程技术人员以及其他9个北约成员国派出的代表共同制订。

按最初设计,GPS系统由24颗卫星组网,分布在3个轨道平面上,每个轨道平面设置8颗卫星。这样,对于地球上任何一点,都能同时拥有6~9颗卫星可供观测,预期精密定位精度可达10 m。1978年,由于压缩国防预算,减少对GPS计划的拨款,并考虑将卫星数由24颗减少到18颗,后来由于试验卫星的成功发射和基于对GPS系统光明前景及其巨大利益的考虑,美国政府将卫星数目追加至24+3颗,其中3颗是备用卫星。这些卫星分布在6个轨道平面上,每个轨道平面内分布有4颗卫星,在地球上任何一点都可以观测到4~11颗卫星。卫星轨道长半轴为26 560 km,最大偏心率是0.01,亦即卫星轨道基本上是圆形,轨道倾角为 55° ,高度为20 200 km,每12恒星时沿近圆形轨道运行一周。

从1978年2月22日第一颗Block I型试验卫星入轨运行开始,到1994年3月10日第24颗Block II-A型工作卫星升空为止,投资300亿美元的GPS系统历时16年的论证、设计、试验和反复测试,终于建成并于1995年4月27日宣布进入完整运行能力(Full Operation Capability)阶段。GPS系统由卫星星座(空间段)、地面监控系统(地面段)和用户接收机(用户段)三大部分组成。地面监控系统包括1个主控站、4个注入站和6个监测站,负责监测GPS信号,编算导航电文和调控卫星。每颗卫星上都携带了4台原子钟,用以确保提供高度稳定的频率标准。卫星采用码分多址(CDMA)技术在第一导航信号L1(1 575.42 MHz)和第二导航信号L2(1 227.60 MHz)上播发测距码和导航数据。根据授权不同,GPS分别提供民用的标准定位服务(SPS)或为特许用户提供精密定位服务(PPS)。

进入21世纪后,全球定位系统开始全面实施现代化:分离军民用户测距码频带,增强军用信号的发射功率;新型卫星实现在轨自主更新星历,提高系统抗毁能力;增设第三导航信号L5(1 176.45 MHz),并在第二导航信号增加C码和军用M码;全面实施地面监控系统的现代化。这些措施将进一步改善GPS性能,提升GPS在导航定位领域的地位和作用,大大强化GPS在全球各领域的影响力。

GPS对人类活动影响极大,应用价值极高,因此得到了美国政府和海陆空三军的高度重视,被列为美国重点空间计划之一,成为继阿波罗登月计划、航天飞机计划之后第三项庞大的空间计划。GPS定位系统的建成,对导航和定位技术产生了巨大而深远的影响。它能够进行全球、全天候、全天时、多维连续定位,且精度不随时间变化,具有全球地面连续覆盖、精度高、功能多、实时定位速度快、抗干扰性和保密性强的特点,GPS不仅在导航领域表现卓越,而且在大地测量、授时等领域也得到广泛应用。

2. GLONASS

在GPS的影响下,苏联独立研制了类似的卫星导航系统GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System,俄文为 ГЛОНАСС)。自1982年苏联发射第一颗GLONASS卫星,经过13年的不断努力,至1995年12月俄罗斯发射了一箭三星后,完成了24颗工作卫星+1颗

备用卫星的布局,卫星分布在3个轨道面上,轨道倾角为 64.8° ,长半轴为25 510 km,卫星运行周期为11h15min44s,总体布局与GPS星座相当。21世纪初俄罗斯一度没有及时为失效的卫星发射替代卫星,使系统的在轨卫星数量急剧下降,严重影响了其使用效能。近年来,随着经济状况的好转和卫星导航定位市场的蓬勃发展,俄罗斯已经开始重建GLONASS系统。到2009年5月1日GLONASS共有19颗正常工作的卫星,2010年俄罗斯使卫星数量达到“满员”状态。GLONASS除采用频分多址(FDMA)技术与GPS略有不同外,在系统配置、定位机理、工作频段、信号和星历数据结构等方面与GPS系统基本相同,都以发射扩频测距码测量伪距来完成导航定位。GLONASS的建成和公开化,打破了美国对卫星导航独家经营的局面,既可为民用用户提供独立的导航服务,又可与GPS组合提供更好的导航性能,同时它也大大缓解了美国政府利用GPS施以主权威慑给用户带来的后顾之忧。GLONASS与GPS为全球卫星导航系统在世界范围内得到广泛应用开辟了美好的前景。

3. Galileo

2005年12月28日,欧洲伽利略卫星导航系统(Galileo)的首颗实验卫星“GIOVE-A”顺利进入太空,这是欧洲为打破美国在卫星导航系统上的垄断局面所迈出的重要一步,标志着伽利略全球卫星导航系统进入了正式的轨道验证阶段。

伽利略系统由欧洲空间局和欧盟发起并提供主要资金支持,实现完全非军方控制与管理,旨在建立一个由国际组织控制的、经济高效的民用导航与定位服务系统。早在1982年,欧洲空间局就提出建议,希望通过国际合作建立一套民用的全球卫星导航系统,1998年欧盟正式提出建立自己的伽利略全球卫星导航系统,2001年该计划正式获得批准。伽利略系统虽然被称为是欧洲的全球卫星导航系统,但是却允许其他非欧盟国家的参与,中国作为第一个参与伽利略计划的非欧盟国家,早在2004年就正式签署了中欧技术合作协议,承诺提供2.3亿欧元资金投入。

作为欧洲独立自主的全球卫星导航定位系统,伽利略系统不仅能够为用户提供高精度、高可靠性的定位服务,而且能够与GPS和GLONASS实现多系统的相互兼容。预计伽利略系统可以为动态用户提供米级的定位精度,对于运行的火车、特种汽车、飞机着陆等对安全性有特殊要求的应用,伽利略系统在设计上具有独特的优势,能够保证在许多特殊情况下为用户提供必要的服务。

伽利略卫星导航系统计划由30颗卫星组成,其中包括27颗工作卫星和3颗备用卫星,它们运行在3个中等高度地球轨道(MEO)上,每个轨道均匀分布10颗卫星,其中一颗为当前轨道的备用卫星。

伽利略系统可向用户提供免费和收费两种服务,虽然服务信息仍然以位置、速度和时间的形式提供,但服务种类却比只具有PPS和SPS两种服务的GPS系统丰富得多。伽利略卫星单独提供的服务包括:

- 1) 开放服务(Open Service, OS)。
- 2) 商业服务(Commercial Service, CS)。
- 3) 生命安全服务(Safety of Life, SoL)。
- 4) 公共特许服务(Public Regulated Service, PRS)。
- 5) 搜索救援服务(Search And Rescue Service, SAR)。

伽利略系统是在充分借鉴 GPS 和 GLONASS 的发展建设经验,并充分考虑当前和未来用户需求的基础上筹建的。在系统结构、频段划分、信号体制和安全保障等方面的努力,使得它与美国的 GPS 相比具有更高的效率和可靠性,在整个系统全部投入运行后,将为各类用户提供更广阔的应用空间。应当指出,伽利略计划从提出到实施自始至终都在试图挑战美国 GPS 独霸天下的地位,重建欧洲在政治、军事、技术方面的雄风,被认为是新欧洲的基石。也许正是这个原因,欧盟在处理信号体制、利益分配及融资等问题上一直在对抗美国和压制中国之间摇摆不定,再加上研发经费紧张,其第二颗试验卫星于 2008 年 4 月才发射升空,比最初的计划推迟了整整 5 年。根据目前的计划,伽利略系统将于 2013 年部署完毕。

4. COMPASS

COMPASS 系统是我国独立研制的北斗二代卫星导航系统,其中文音译名称为“Beidou II”,英文名称为“COMPASS Navigation Satellite System”。与前述卫星导航系统一样,COMPASS 具有全球覆盖的导航能力。

2004 年 8 月 31 日,我国拥有完全自主知识产权的北斗二代卫星导航系统立项,2007 年 4 月和 2009 年 4 月先后成功发射两颗 COMPASS 卫星进入预定轨道,标志着系统卫星组网工作正式启动,预计在 2012 年前建成一个覆盖中国及周边地区的区域导航定位系统,并在 2020 年左右形成覆盖全球的卫星导航系统。COMPASS 卫星导航系统空间段计划由 5 颗地球静止轨道卫星(GEO,简称静地卫星)和 30 颗非地球静止轨道卫星组成。其中,5 颗地球静止轨道卫星高度为 36 000 km,在赤道上空分布于 58.75°E,80°E,110.5°E,140°E 和 160°E;30 颗非地球静止轨道卫星由 27 颗中地球轨道(MEO)卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星组成;27 颗中轨道卫星分布在倾角为 55°的 3 个轨道平面上,轨道高度为 21 500 km。COMPASS 卫星导航系统将提供两种服务:开放服务和授权服务。前者在信号覆盖区免费提供定位、测速和授时服务,而后者将为授权用户提供更加安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息,满足全球范围内用户对导航的需求。

美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 Galileo 和中国 COMPASS 系统并称为全球四大卫星导航系统。目前,联合国已将这四个系统一起确认为全球卫星导航系统核心供应商。

1.1.3 区域卫星导航系统

尽管 GPS 的高精度、多用途等优点受到人们的广泛关注,而且应用日趋深入,然而我们也不能不清醒地认识到,GPS 和 GLONASS 系统均为冷战时期的产物,源于军事目的建立。特别是 GPS 工作卫星于 1991 年 7 月 1 日全部实施选择可用性(Selective Availability, SA)技术,人为地引入干扰信号,故意降低非特许用户的测量精度,使这些用户的水平定位精度降低至 100 m(2DRMS,95%),高程精度降低至 150 m,测速精度降低至 0.3 m/s,时间同步精度降低至 500 ns。虽然迫于各种压力和出于自身经济利益的考虑,美国政府于 2000 年 5 月 2 日开始取消 SA 限制,但是,并不排除美国在必要的时候关闭 GPS 或重启 SA 的可能性。将自己的导航定位手段特别是军事领域的应用置于他国控制之下,关键时刻必然会受制于人,拥有自己独立的卫星导航系统,不仅能够促进本国军事技术的发展,有利于掌握现代战争主动权,而且还会带来巨大的经济效益。出于开发成本和技术上的考虑,一些国家开始发展独立的区域性

卫星导航系统,它既可以作为后续全球系统开发的前期探索,又可以满足本国及周边国家的导航需求。如中国的北斗一代卫星导航系统(Beidou I)、印度的区域卫星导航系统就是在这种情况下诞生的。

1. Beidou I

作为 COMPASS 全球卫星导航系统的先驱,Beidou I 又称为北斗一代区域性主动定位系统。20 世纪 70 年代后期,我国开展了适合国情的卫星导航定位系统体制的研究。1983 年,“两弹一星”功勋奖章获得者陈芳允院士提出了研制双星快速导航系统的设想,1994 年国家正式批准了该项目,并命名为北斗卫星导航系统,其工程代号为“Beidou I”。2000 年 10 月和 12 月先后发射了两颗北斗一代地球静止轨道卫星,两颗卫星的升交点赤经相隔 60° ,分别定点在 80°E 和 140°E 赤道上空。2003 年 1 月 1 日该系统正式投入使用。北斗一代卫星导航系统采用主动式定位原理,用户设备既接收来自卫星的信号,又要向卫星转发该信号,进而由地面中心站解算出各个用户的位置坐标,并用通信方式告知用户。目前整个系统由四颗卫星(两颗工作卫星,两颗备份卫星)、中心控制系统、标校系统和用户机四大部分组成,卫星信号覆盖范围为 $70^\circ\text{E}\sim 145^\circ\text{E}$, $5^\circ\text{N}\sim 55^\circ\text{N}$,我国大陆和周边地区均在其服务区域内。目前该系统在测绘、电信、水利、交通运输、渔业、勘探、森林防火和国家安全等诸多领域逐步发挥着重要作用。北斗一代卫星导航系统是一种全天候的区域性系统,可实现快速导航定位、双向简短报文通信和定时授时三大功能,其中后两项功能是 GPS 和 GLONASS 所不能提供的。北斗一代卫星导航系统具有卫星数量少、投资小、用户设备处理简单等优点,缺点是只能二维主动式定位,用户三维定位时需要高程信息辅助,定位精度有限,不能满足高动态和保密的军事用户要求,系统容量具有一定的限制。

2. IRNSS

2006 年 7 月 4 日,由印度政府批准,印度空间局开始筹建印度区域卫星导航系统 (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS)。IRNSS 由 7 颗卫星构成独立的导航星座,其中 3 颗为地球静止轨道卫星,4 颗为倾斜地球同步轨道卫星,卫星信号覆盖范围为 $40^\circ\text{E}\sim 140^\circ\text{E}$ 和 $40^\circ\text{S}\sim 40^\circ\text{N}$ 。IRNSS 空间卫星实时为用户广播卫星钟差改正、电离层误差改正和完好性信息,为用户提供标准定位服务、精密定位服务和政府特许服务。其中,标准定位服务和精密定位服务信息调制在 S 频段($2\,491.005\text{ MHz}$)和 L 频段($1\,191.795\text{ MHz}$)上,政府特许服务信息调制在 L5 频段。印度计划于 2010 年之前发射 4 颗卫星,初步完成最小空间星座配置,到 2012 年完成 7 颗星座的系统配置。与 Beidou I 利用两颗卫星实现主动定位的方式不同,IRNSS 由于具有更多的可观测卫星,所以三维被动式定位时可不需要高程辅助。

1.1.4 差分增强系统

由于卫星信号来自遥远的太空,卫星时钟误差、星历误差、接收机钟差、信号传播过程中的大气延时均会对定位结果产生一定的影响,卫星导航接收机单机定位精度小于 30 m ,通常在 10 m 左右,这并不能满足所有用户在导航和定位方面的要求。例如在大地测量、形变监测等领域,通常要求定位精度为米级甚至厘米级。差分定位技术利用两台或多台接收机同时观测

卫星,可消除或削弱公共误差,大大提高定位精度。根据定位误差的相关特性,差分定位在具体实施时可建立一个或多个差分基准站,通过数据链传送相应的误差信息或原始观测信息,使用户接收机能够通过不同的数据处理方式消除或削弱大部分误差,形成局域差分或广域差分系统。

除定位精度外,一些对生命安全要求较高的用户,如航空、航海、铁路等领域,还要求系统在无法定位时能够及时向用户发出告警,满足一定的完好性、连续性和可用性指标,这是目前GPS和GLONASS所不具备的。各类增强系统就是这样一种可以满足不同用户需求的全球卫星导航辅助系统,目前主要针对GPS/GLONASS实现。从定位精度的改善上看,部分增强系统本质上仍然采用差分的方式实现,如星基增强系统、陆基增强系统、全球差分GPS、海事差分GPS/国家差分GPS等;部分增强系统通过对导航卫星的联测使用户建立精确的定位模型,再利用差分技术获得高精度的定位结果,如连续运行参考站、国际GNSS服务网等;部分增强系统采用卫星导航与其他系统组合的方式实现,如罗兰—C、惯性导航系统与卫星导航的组合系统。

星基增强系统(SBAS):SBAS主要由GNSS卫星、GEO卫星、SBAS用户和地面设备组成。GEO卫星不仅可以发射导航信号,而且能够为用户提供差分改正信息和完好性信息,以增强GPS/GLONASS系统的性能。如美国的广域增强系统(WAAS)、欧洲的静地卫星导航重叠服务系统(EGNOS)、日本的多功能卫星增强系统(MSAS)、印度的GPS辅助静地卫星增强系统(GAGAN)等。这些SBAS使用国际民航组织的性能标准,不仅能够为飞行器提供导航,而且已经被广泛地应用到其他领域。

陆基增强系统(GBAS):从广义上讲,只要陆地安置的信号源能够产生增强GNSS定位性能的信号,均可称之为陆基增强系统。由于通常所说的GBAS是指基于国际民航组织的性能标准建立的增强系统,因而典型的GBAS主要是指局域增强系统(LAAS),它通过在机场设置若干个伪卫星和地面参考站实现安全的飞行器导航。

全球差分GPS(GDGPS):它是由美国喷气推进实验室(JPL)开发的高精度GPS增强系统,用于满足美国宇航局(NASA)科学任务所要求的实时定位、定时和定轨需求。

海事差分GPS/国家差分GPS(MDGPS/NDGPS):MDGPS由美国海岸警卫队(USCG)于20世纪80年代末开发,它利用无线电指向标(信标)和DGPS技术结合的方式实现服务区内优于10 m(95%)的定位精度,并能够提供一定的完好性,满足美国海岸和内陆水域的导航需求。1997年,MDGPS的信标数量由原来的54个计划扩展至136个以覆盖全美国,这项计划被称为NDGPS。NDGPS差分信息传送的频率(285~325 kHz)和格式(RTCM SC-104)支持国际标准,目前世界上已有50多个国家建立了类似的系统。

连续运行参考站(CORS):它是指对一些特殊的测站采取较长时间的连续跟踪观测,通过这些站点组成的网络获取覆盖该地区和该时间段的精密星历及其他改正参数,用于测区内用户的精密解算。CORS测站能够连续不断地运行,用户只需一台接收机即可进行米级甚至厘米级的实时快速定位或测量数据的事后处理。我国已在北京、武汉等地建立了大约30个这样的观测站。

国际GNSS服务网(IGS):它是由来自全球约80个国家的200个组织提供的350多个GPS监测站所组成的网络,能够为用户提供GPS精密星历、地球极移参数、IGS站坐标及运动速率、GPS卫星钟差和各测站的站钟差,其中星历误差优于10 cm,卫星时钟误差优于5 ns。

全球约 100 个 IGS 监测站可在采集后 1 h 之内播发跟踪数据,为高精度用户提供服务。

1.2 卫星导航的作用和特点

随着卫星导航应用领域的不断扩大和深入,这一年轻而日趋成熟的技术已逐渐被全世界各行各业普遍接受。

如果说 20 世纪 80 年代 GPS 技术还蒙着一层神秘的面纱,还只是主要在军事领域内异军突起、崭露头角的话,那么,到了 90 年代,特别是在海湾战争之后,GPS 便以其特有的延伸力和穿透力迅速渗入到人类经济发展的各个领域。GPS 近 30 年的应用实践已经证明,用户利用卫星传送的信号能够在全世界范围内实现连续、高精度的导航、定位和定时。卫星导航已经发展成为多领域(如陆地、海洋、航空、航天)、多模式(静态、动态、单点、差分)、多用途(如精确导航、精密定位、卫星定轨、灾害监测、海洋开发、城镇规划、资源调查、交通管制等)、多机型(如船载型、机载型、弹载型、测地型、授时型、全站型、手持型等)的国际性高新技术产业,目前仍然处于高速发展时期。

1.2.1 卫星导航的作用

归纳起来,卫星导航的作用大致体现在以下几个方面:

1. 导航定位

包括军事及民用目的在内的海、陆、空载体和人员,为了各种各样的目的要求安全、准确、经济地沿着一定的航路抵达目的地,因而需要导航和定位。与其他一些导航手段相比,卫星导航具有接收设备体积小、质量轻、功能多、精度高、使用方便且基本不受环境条件限制的特点。

2. 大地测量

对卫星导航技术的研究和对卫星导航信息资源的开发也给地学研究 and 应用提供了一种崭新的技术手段。卫星导航系统具有高精度和全天候的特点,能够进行大地测量和布设大地网,建立全球统一的地心坐标系,甚至可以与甚长基线干涉测量(VLBI)技术配合研究地壳和板块运动。

3. 时间同步

定时有着广泛的应用领域,从日常生活到航海、航天都对时间有着不同的精度要求。采用卫星信号进行时间传递,不仅可以获得较高的定时精度,而且还可以避免以往时间传递的巨大耗资,只需一台能够接收和处理卫星信号的接收机即可。

导航卫星上都安装有多台原子钟(铯原子钟、铷原子钟,甚至精度更高的氢原子钟),它们是导航卫星工作的核心设备。工作时仅启动一台原子钟作为时间标准和频率标准,其余备用,原子钟的时间受到地面站监控,能够达到优于 5 ns 的精度,使导航系统时间和协调世界时(UTC)之差保持在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 以内,可用于导出 UTC 时。当利用卫星信号进行时间传递时,通常

采用下列两种方法,即一站单机定时法和共视比对法。前者在已知坐标的观测站上利用一台接收机对卫星进行观测;后者是在两个观测站上各安设一台接收机,在相同的时间内观测同一颗卫星,从而测定用户时钟的偏差,在洲际距离上实际测量的精度仍然高达纳秒级。例如,我国于1987年采用GPS接收机进行全国共视法时间同步试验,测得的时间精度为15 ns。

4. 载体速度和载体姿态测量

对于动态用户来说,除了需要确定载体的实时位置以外,往往还需要测定载体的实时航行速度和姿态,这是卫星导航定位技术的另一个重要应用。在动态应用中,实时定位和测速可同时进行,计算简单。

载体姿态的精确测量在军事、民用和商用等领域的作用也日趋显著。与传统的由陀螺和加速度计组成的机电式姿态测量系统相比,卫星导航接收机具有精度高、体积小、成本低的优点。如Ashtech公司早期生产的3DF型GPS接收机就具有瞬时姿态测量的功能,它具有24个信号通道,4个独立天线分别与6个信号通道组合,通过实时计算4个天线安装点之间的距离、倾斜和俯仰等参数的变化,在米级基线上的姿态测量精度能够达到1mrad(RMS)。

5. 作为其他导航系统测试、重调的基准

卫星导航系统具有定位精度不随时间变化的特点,可以作为其他导航系统性能测试的标准,检验其出厂使用性能。针对一些具有短期高精度的系统在长时间使用时定位结果发散的缺点,如惯性导航系统,可在一定的时间内利用卫星导航定位结果对惯性导航系统进行重调,使其始终保持高精度工作状态。

1.2.2 卫星导航的特点

自卫星导航技术特别是GPS诞生以来,由于其具备解决多种学科重大问题的巨大潜力,因而从全球范围内的科学研究和全球战略目标出发,世界上许多国家均投入很大的力量开展卫星导航应用实验、处理技术和接收机研制等方面的研究。理论研究与应用实践均表明,卫星导航同其他导航定位手段相比具有如下特点:

1. 全球地面连续覆盖

由于卫星数目较多且分布合理,所以地球上任何地点均可连续跟踪和观测到4颗以上的卫星,从而保证了系统全球、全天时、实时连续的导航与定位能力。

2. 精度高,功能多

卫星导航系统可为各类用户连续提供三维位置、三维速度和时间信息,经特殊配置后还可提供姿态信息。一般来说,使用GPS的单点实时定位精度小于30 m,静态相对定位精度可达0.01 m,测速精度优于0.1 m/s,测时精度约为数十纳秒级。随着卫星定位测量技术和数据处理技术的发展,其定位、测速和测时的精度可望进一步提高。

3. 实时定位速度快

利用卫星导航接收机定位,首次卫星跟踪和解算一般不超过 30 s,一次定位和测速通常在 1 s 至数秒内即可完成。这与其他定位手段(包括子午仪系统,一般需要 8~10 min)形成鲜明对比,这一点对高动态用户来说尤为重要。

4. 操作简便,易于安装

卫星导航定位的自动化程度很高,卫星观测和信号处理由接收机自动完成。不仅如此,由于用户接收机一般质量较轻、体积较小,不需要特殊的工作环境和特种电源,因而携带、搬运和安装都很方便。

5. 全天候工作

利用卫星导航系统进行的测量工作可以在任何地点、任何时间连续地进行,一般不受外界环境的影响,也不受天气状况的影响。

6. 可组合成多种形式的观测手段

为提高导航定位精度,卫星导航接收机可方便地与其他定位系统如惯性导航系统、推算航位系统等组合使用,也可与雷达和电子海图、电子地图等直接叠加,甚至两台或多台接收机还可组成不同形式的差分定位系统。

7. 抗干扰性能好,保密性强

卫星导航系统能够实现用户的被动式定位,接收机无须向外界发射信号即可导航定位,而且卫星通信采用了扩频调制和编码技术,因而卫星发送的信号具有良好的抗干扰性和保密性。

1.3 卫星导航的应用

自第一颗 GPS 试验卫星发射以来,利用卫星进行导航与定位可以满足各种不同用户的需要,关于卫星导航应用系统的研究、开发和实验工作发展异常迅速。对于舰船而言,卫星导航系统能在海上协同作战、海洋交通管制、海洋测量、浮标建立、管道敷设、港口领航等方面作出贡献;对于飞机而言,卫星导航系统可以在飞机进场着陆、中途导航、武器对准及空中交通管制等方面进行服务;在陆地上,卫星导航系统可用于各种车辆、车载武器的定位,还可用于大地测量、摄影测量和野外勘探的定位;在空间技术方面,卫星导航系统可用于弹道导弹的传递对准以及空间飞行器的导航和定位;卫星导航与遥感技术、地理信息系统配合,可以监测土壤性质分布和农作物的产量分布,引导飞机或其他农业机械合理施肥、播种和喷洒农药,降低农业生产成本、提高经济效益。由此可见,上至航空、航天器,下至渔船、导游和农业生产,卫星导航系统的应用已经渗透到了人们生产、生活的各个领域,Parkinson 在其著作中形容 GPS 的应用范围“只受人们想象力的限制”^[1]。