

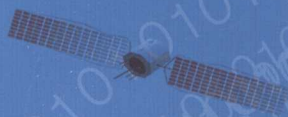


高等学校统编教材

GNSS原理 及其应用

Principles and Applications of
Global Navigation Satellite System

赵长胜 等 编著



测绘出版社

高等学校统编教材

内容简介

GNSS 原理及其应用

Principles and Applications of Global Navigation Satellite System

赵长胜 周立 王爱生 编著
吴继忠 赵好好 付培义

中国版本图书馆CIP
数据
I. ①G... II. ①赵...
ISBN 978-7-5030-3271-5
2015.3

责任编辑 李 伟 封面设计 李 伟 责任校对 李 伟 责任印制 李 伟

地址 北京市西城区德胜门内大街2号
邮编 100088
电话 010-88231608(门市部)
010-88231609(发行部)
010-88231607(编辑部)
网址 www.chinazj.com
经销 新华书店

测绘出版社

·北京·

中国版本图书馆CIP
数据
I. ①G... II. ①赵...
ISBN 978-7-5030-3271-5
2015.3
地址 北京市西城区德胜门内大街2号
邮编 100088
电话 010-88231608(门市部)
010-88231609(发行部)
010-88231607(编辑部)
网址 www.chinazj.com
经销 新华书店

© 赵长胜 周立 王爱生 吴继忠 赵好好 付培义 2015

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

本书介绍了全球导航卫星系统(GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS)的组成、发展历程、技术特点和应用领域;地球坐标系、天球坐标系及其转换方法;瞬时坐标系和协议坐标系的概念及其转换方法;各种时间系统及其转换方法;GNSS 卫星运动理论基础、卫星轨道坐标系、在轨位置计算;轨道坐标系转换为协议地球坐标系的理论与方法;GPS、GLONASS 和 BDS 卫星导航电文的结构、意义和卫星信号的特点;以 GPS 为例,介绍了 GNSS 静态定位原理和误差特点,包括单点定位、相对定位、伪距定位和载波相位定位;GNSS 的误差来源和处理方法;GNSS 实时动态(RTK)定位的原理和使用方法,包括单点动态定位、广域差分定位、局域差分定位和网络差分定位;GPS 在控制测量中的应用,包括 GPS 控制网设计、外业测量、内业数据处理等。

本书为本科生教材,也可作为研究生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 原理及其应用 / 赵长胜等编著. —北京:测绘出版社, 2015. 5

高等学校统编教材

ISBN 978-7-5030-3571-5

I. ①G… II. ①赵… III. ①卫星导航—全球定位系统—高等学校—教材 IV. ①P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 074528 号

责任编辑 余易举 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 责任印制 喻 迅

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	三河市世纪兴源印刷有限公司	经 销	新华书店
成品规格	184mm×260mm		
印 张	11.5	字 数	283 千字
版 次	2015 年 5 月第 1 版	印 次	2015 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001-2000	定 价	35.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3571-5/P·755

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

全球导航卫星系统(GNSS)包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 和中国的 BDS 等。GNSS 在国民经济建设、国防和日常生活中扮演着越来越重要的角色。在测量领域中,GNSS 定位技术以其高精度、高效率、全天候、低成本、测站间不需要通视、花费时间少和作业方法多样等优良特性取代了用常规测角、测距手段建立的大地控制网,并广泛应用于工程测量。在水利施工、输电线路施测、道路(如铁路、公路)测量、精密设备安装、水下地形测量、变形监测、海洋测量、航空摄影测量、地籍测量等现场,到处都在使用 GNSS 定位技术。为适应 GNSS 定位技术的发展需要编写了本书。本书体现测绘类专业的特点,同时注意内容的系统性、科学性、实用性,以高等学校测绘类或相关专业本科生为主要读者,力争使初学者学习、理解和掌握 GNSS 定位技术。同时,本书也可以供测量工程技术人员和科技工作者参考应用。

全书分 7 章:第 1 章概述卫星定位技术的发展历程、技术特点和应用领域;第 2 章主要介绍测量工作涉及的的坐标系统和时间系统;第 3 章介绍卫星运动基础和在轨位置技术方法;第 4 章介绍卫星导航电文和卫星信号;第 5 章介绍卫星静态定位原理和误差特点;第 6 章介绍卫星动态定位原理与实时动态定位技术;第 7 章介绍 GPS 在控制测量中的应用。

参加本书编写的有:江苏师范大学王爱生编写第 5 章和第 7 章;淮海工学院周立编写第 1 章;南京工业大学吴继忠编写第 2 章和第 3 章;南京信息工程大学赵好好编写第 4 章;太原理工大学付培义编写第 6 章。江苏师范大学赵长胜负责全书策划和统稿。中国矿业大学张华海教授审阅了全书,提出了宝贵的修改意见。

由于作者水平有限,书中不当之处敬请读者批评指正。

目 录

88	.....	姿态基准	章 2 第
88	.....	姿态基准	1.1
88	.....	姿态基准	2.2
89	.....	姿态基准	2.3
101	.....	姿态基准	1.1
111	.....	姿态基准	2.2
第 1 章 绪 论	.....		1
1.1	卫星定位技术的发展		1
1.2	全球导航卫星系统的组成		9
1.3	卫星定位技术的应用		15
	习题与思考题		24
第 2 章 坐标系统和时间系统	.....		25
2.1	天球坐标系		25
2.2	地球坐标系		29
2.3	坐标系统		32
2.4	坐标系统转换		36
2.5	时间系统		38
	习题与思考题		42
第 3 章 卫星运动基础与位置计算	.....		43
3.1	卫星的无摄运动		43
3.2	卫星的受摄运动		53
3.3	广播星历		55
3.4	精密星历		57
3.5	由广播星历计算卫星坐标		59
3.6	由精密星历计算卫星坐标		61
	习题与思考题		63
第 4 章 卫星导航电文和卫星信号	.....		64
4.1	GPS 导航电文		64
4.2	GPS 信号		66
4.3	GLONASS 导航电文		72
4.4	GLONASS 信号		76
4.5	BDS 导航电文		77
4.6	BDS 信号		82
	习题与思考题		85

第 5 章 静态定位	86
5.1 基本观测量	86
5.2 定位误差	88
5.3 单点定位	98
5.4 静态相对定位	104
5.5 周跳探测和模糊度固定	111
习题与思考题	117
第 6 章 实时动态定位	119
6.1 概 述	119
6.2 单点动态定位	119
6.3 差分定位	120
6.4 网络 RTK 定位技术	127
6.5 RTK 测量作业流程	134
6.6 GPS 增强系统	144
习题与思考题	146
第 7 章 GPS 控制测量	147
7.1 GPS 控制网设计	147
7.2 GPS 测量外业准备和技术设计书编写	155
7.3 GPS 测量外业工作	161
7.4 GPS 测量数据处理	165
7.5 GPS 测量技术总结	174
习题与思考题	175
参考文献	177

第1章 绪论

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)是随着现代科学技术的迅速发展而建立起来的新一代精密卫星导航定位系统。其中,俄罗斯的 GLONASS 和美国的 GPS 扮演了卫星导航定位系统的重要角色。目前,其他一些国家或地区也在积极筹建全球导航卫星系统,其中,欧盟的伽利略(Galileo)计划和中国的北斗卫星导航系统(BDS)计划最具代表性。

本章主要介绍全球导航卫星系统的发展、特点、应用等方面的内容。

1.1 卫星定位技术的发展

1957年10月,世界上第一颗人造地球卫星 Sputnik 发射成功,人们就开始利用卫星进行定位和导航的研究,人类的空间科学技术研究和应用跨入了一个崭新的时代,世界各国争相利用人造地球卫星为军事、经济和科学文化服务。同时,卫星定位技术在大地测量学中的应用也取得了惊人的发展。卫星导航定位测量技术的发展分为三个阶段:卫星三角测量、卫星多普勒导航定位测量和全球导航卫星系统定位测量。

1.1.1 卫星三角测量

人类很早就开始利用自然天体开展天文大地测量。由于自然天体距地球较远,测量误差可达几十米。在卫星几何大地测量发展初期,人造地球卫星仅仅作为一种近地空间动态观测目标,由地面测站拍摄卫星的瞬时位置而测定地面点的坐标,称为卫星三角测量。

卫星三角测量方法以拍摄卫星和恒星背景的影像为依据。影像上记录了一系列自然星体路径上的动点和卫星路径上的动点,动点的坐标都可用摄影测量仪器精确测得。

通过解析摄影测量处理还能获得从观测站到卫星的空间方向。相邻测站同步拍摄同一颗卫星,并且用类似的方法处理数据,就产生了另一个空间方向。每一对相应的空间方向形成包含观测站和卫星的平面(观测站和卫星构成三角形)。至少两个这样的平面相交就形成了观测站之间的空间方向,这些经过定向的空间方向就组成了一个三角网。由地面上的观测站对卫星的瞬间位置进行摄影测量,测定测站点至卫星的方向,建立卫星三角网。同时也可利用激光技术测定观测站至卫星的距离,建立卫星测距三角网。通过这两种观测方法,均可以实现地面点的定位,也能进行大陆同海岛的连测定位,解决了常规大地测量难以实现的远距离连测定位问题。这是常规定位技术望尘莫及的。

不同于传统地面三角控制测量,卫星三角测量可在全球范围内建立一定精度的地面控制网。1966—1972年,美国国家大地测量局在英国和原联邦德国测绘部门的协作下,建立了一个全球卫星三角测量几何大地测量网,该网由45个分布全球的测站组成,平均站间距离约3000~

4 000 km,并获得了 ± 5 m的点位精度。世界各国在此期间都开展了类似的测量计划,然而,由于卫星三角测量受天气和可见条件影响,观测和成果换算需耗费大量的时间,同时定位精度不甚理想,并且不能得到点位的地心坐标。因此,卫星三角测量技术成为一种过时的观测技术,很快就被卫星多普勒导航定位技术所取代。

1.1.2 卫星多普勒导航定位测量

1958年12月,美国海军武器实验室和詹斯·霍普金斯(Johns Hopkins)大学物理实验室为了给美国海军“北极星”核潜艇提供全球性导航,开始研制一种卫星导航系统,称之为美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。在这一系统中,由于卫星轨道面通过地极,所以又被称为子午卫星导航系统(TRANSIT)。1959年9月美国发射了第一颗实验性卫星,到1961年11月,先后发射了9颗实验性导航卫星。经过几年实验研究,解决了卫星导航的许多技术问题。从1963年12月起,陆续发射了由6颗卫星组成的子午卫星星座,1964年该系统建成并投入使用。该系统轨道接近圆形,卫星高度为1 100 km,轨道倾角为 90° 左右,周期约为107分钟,在地球表面上的任何一个测站上,平均每隔约1.5小时便可观测到其中一颗卫星。

卫星多普勒导航定位系统即美国海军导航卫星系统,它由三部分组成:卫星星座、地面跟踪网和用户接收机。地面跟踪网由跟踪站、计算中心、注入站、海军天文台和控制中心五部分组成。它们的任务是测定各颗卫星的轨道参数,并定时将这些轨道参数和时间信号注入相应的各颗卫星内,以便卫星按时向地面播发。接收机是用来接收卫星发射的信号、测量多普勒频移、解译卫星的轨道参数,以测定接收机所在位置。由于接收机都是采用多普勒效应原理进行接收和定位的,所以也称为多普勒接收机。

1967年7月29日,美国政府宣布解密子午卫星的部分导航电文而提供民用,由于卫星多普勒导航定位技术具有经济、快速、精度较高、不受天气和时间限制等优点,只要能见到子午卫星,便可在地球表面的任何地方进行单点和联测定位,从而获得测站的三维地心坐标。因此,卫星多普勒导航定位技术迅速从美国传播到欧亚及美洲的许多国家。20世纪70年代中期,我国开始引进卫星多普勒接收机。西沙群岛的大地测量基准联测是我国应用卫星多普勒导航定位技术的先例。自20世纪80年代初期以来,我国开展了几次较大规模的卫星多普勒导航定位技术实践:由原国家测绘局和原总参测绘局联合测设的全国卫星多普勒大地网;由原武汉测绘科技大学与青海石油管理局、新疆石油管理局、原石油工业部地球物理勘探局合作测设的西北地区卫星多普勒定位网;即使在远离我国一万七千余千米的南极乔治岛上,也可用卫星多普勒导航定位技术精确测得我国长城站的地理位置为南纬 $62^\circ 12' 59.811'' \pm 0.015''$,西经 $50^\circ 57' 52.665'' \pm 0.119''$,高程为 $43.58 \text{ m} \pm 0.67 \text{ m}$,长城站至北京的距离为17 501 949.5 m。

在美国子午卫星系统建立的同时,原苏联于1965年开始也建立了一个卫星导航定位系统,叫做CICADA。它与NNSS系统相似,也是第一代卫星导航定位系统。该系统由12颗卫星组成CICADA星座,轨道高度为1 000 km,卫星的运行周期为105分钟。

虽然子午卫星系统将导航和定位技术推向了一个崭新的发展阶段,但仍然存在着一些明显的缺陷。由于该系统卫星数目较少(6颗工作卫星),运行高度较低(平均约为1 000 km),从

地面站观测到卫星的时间间隔也较长(平均约 1.5 小时),无法进行全球性的实时连续导航定位服务。从大地测量学来看,由于它的定位速度慢(测站平均观测 1~2 天),精度较低(单点定位精度 3~5 m,相对定位精度约为 1 m),因此,该系统在大地测量学和地球动力学研究方面受到了极大的限制。为了满足军事及民用部门对连续实时三维导航和定位的需求,第二代卫星导航定位系统 GPS 便应运而生。子午卫星系统也于 1996 年 12 月 31 日停止发射导航及时间信息。

1.1.3 全球导航卫星系统定位测量

GNSS 为全球或空间用户提供定位、导航和授时信息。目前,在轨运行和建设的 GNSS 主要有 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS。

1. GPS

1973 年 12 月,美国国防部批准美国海陆空三军联合研制新一代卫星导航定位系统,即为目前的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)。

GPS 系统自 1974 年以来,系统的建立经历了方案论证、系统研制和生产实验三个阶段,是继阿波罗计划、航天飞机计划之后的又一个庞大的空间计划。1978 年 2 月 22 日,第一颗 GPS 实验卫星发射成功。1989 年 2 月 14 日,第一颗 GPS 工作卫星发射成功,宣告 GPS 系统进入了营运阶段。1994 年 3 月 28 日完成第 24 颗工作卫星的发射工作。GPS 共发射了 24 颗卫星(其中,21 颗为工作卫星,3 颗为备用卫星,目前的卫星数已经超过 32 颗),如图 1-1 所示,卫星均匀地分布在 6 个相对于赤道倾角为 55° 的近似圆形轨道上,卫星距离地球表面的平均高度为 20 200 km,运行速度为 3 800 m/s,运行周期 11 小时 58 分钟。每颗卫星可覆盖全球约 38% 的面积。卫星的分布可以保证在地球上任何地点、任何时刻,能同时观测到 4 颗以上的卫星。

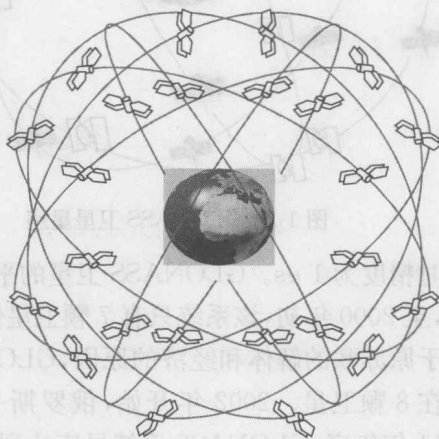


图 1-1 GPS 卫星星座

在 GPS 设计之初,美国国防部的主要目的是使 GPS 系统能够为海陆空三军提供实时、全天候和全球性的导航服务,并用于情报收集、核暴监测和应急通信等一些军事活动。GPS 卫星运行性能表明,GPS 系统不仅能够达到上述目的,而且能够进行厘米甚至毫米级精度的静态定位,实现米级甚至亚米级精度的动态定位。随着 GPS 系统的开发应用,被广泛地应用于飞机、船舶和各种载运工具的导航、高精度的大地测量、精密工程测量、地壳形变测量、地球物理测量、航天发射和卫星回收等技术领域。

GPS 是目前部署最完善、卫星技术最先进、定位精度最高、普及最广的卫星导航系统。为了保持、增强美国在全球卫星导航领域的领先优势与主导地位,美国实施了 GPS 系统现代化计划,发展最新的 GPS-III 卫星,构建现代化的 GPS 运控段(OCX),全面提升 GPS 系统军事与民用服务的性能,增强 GPS 系统民用导航服务的竞争能力,增强对抗条件下 GPS 系统的军用导航服务能力。GPS 系统空间段星座卫星数量、导航信号、卫星功能等将出现重大变化,主

要包括三个方面:其一,星座卫星数量增加至 30 颗以上,以改善星座几何分布,提升服务性能;其二,增加军用 M 码信号、3 个民用信号(L1C、L2C、L5),其中军用 M 码信号是美国增强 GPS 系统导航战能力的重要基础,包括星上信号功率增强、点波束等均需通过先进的 M 码军用信号实现;其三,增加星上功率可调、高速星间与星地链路、点波束、搜索与救援和被动激光测距能力等,这是增强 GPS 系统自主导航与导航战能力的关键措施。

2. GLONASS

GPS 系统的广泛应用引起了世界各国的关注。原苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星

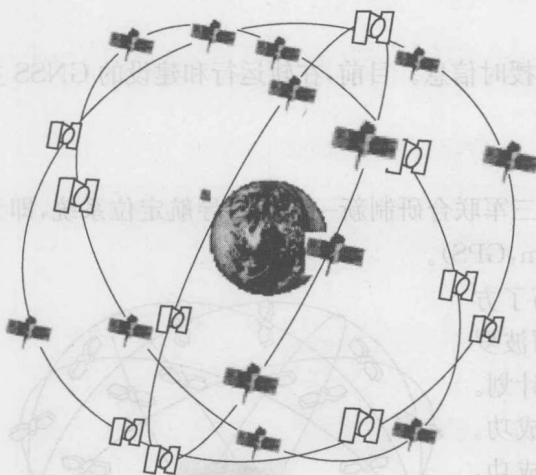


图 1-2 GLONASS 卫星星座

导航定位系统优劣的基础上,认真吸收了美国 GPS 系统的成功经验,自 1982 年 10 月,开始研制发射第二代导航卫星——GLONASS 卫星,至 1996 年,共发射 24+1 颗卫星,经数据加载,调整和检验,于 1996 年 1 月 18 日系统正式运行,主要为军用。GLONASS 卫星均匀地分布在 3 个轨道平面内,轨道倾角为 64.8° ,每个轨道上等间隔地分布 8 颗卫星。卫星距离地面高度为 19 100 km,卫星的运行周期为 11 小时 15 分钟,GLONASS 卫星星座如图 1-2 所示。民用无任何限制,不收费。民用的标准精度为:水平精度为 50~70 m,垂直精度为 75 m,测速精度为 15 cm/s,

授时精度为 $1 \mu\text{s}$ 。GLONASS 卫星的平均工作寿命超过 4.5 年。1999 年底补网发射了 3 颗卫星,至 2000 年初,该系统只有 7 颗卫星保持连续工作。2000 年 10 月补网又发射了 3 颗卫星。由于原苏联的解体和经济的原因,GLONASS 在其后的几年里无法得到更新和补充,一般保持在 8 颗卫星。2002 年开始,俄罗斯一直致力于 GLONASS 系统空间段的恢复工作。至 2011 年年底,GLONASS 系统星座达到 24 颗卫星的满星座状态,使系统全面恢复工作。为了在未来与美国 GPS 系统以及其他国家的卫星导航系统的竞争中立于不败之地,俄罗斯开展了一系列现代化改进计划。俄罗斯 2012 年出台的《GLONASS 系统 2012—2020 年维护、发展及应用计划》包括研制和部署新的 GLONASS-K、地面段现代化、发展星基增强系统等。GLONASS 系统未来的定位精度将可以与美国 GPS 系统抗衡,预计在 2020 年将赶超 GPS,定位精度将达 0.6 m。

3. Galileo

GPS 和 GLONASS 分别受到美国和俄罗斯两国军方的严密控制,其信号的可靠性无法得到保证,长期以来欧洲只能在美、俄的授权下从事接收机制造、导航服务等从属性的工作。为了能在卫星导航领域占有一席之地,欧洲认识到建立拥有自主知识产权的卫星导航系统的重要性。同时在欧洲一体化进程中,建立欧洲自主的卫星导航系统将会全面加强欧盟诸成员国之间的联系和合作。在这种背景下,欧盟启动了一个军民两用,并与现有的卫星导航系统相兼容的全球卫星导航计划——伽利略(Galileo)计划。

欧盟在 1992 年 2 月首次提出伽利略计划。计划分成四个阶段,即论证阶段、系统研制阶段、卫星部署阶段和系统投入使用阶段。2005 年 12 月 28 日,第一颗伽利略实验卫星

GIOVE-A 发射升空,标志着伽利略卫星导航系统正式进入实施论证阶段。从 2008 年开始,伽利略计划投资预算约为 32.5 亿欧元,服务范围覆盖全球,可以提供导航、定位、授时、通信等服务。

Galileo 系统的基本结构包括星座与地面设施、服务中心、用户接收机等。卫星星座将由 30 颗卫星(27 颗工作卫星和 3 颗备用卫星)组成,卫星采用中等地球轨道,均匀分布在高度约为 23 616 km 的 3 个中高度圆轨道面上,倾角 56° 。地面控制设施包括卫星控制中心和提供各项服务所必需的地面设施,用于管理卫星星座及测定和传播集成信号。Galileo 卫星星座如图 1-3 所示。卫星的设计寿命为 20 年,卫星信号将采用 4 种位于 L 波段的多载频来发射,其频率分别为:①E5a:1 176.45 MHz;②E5b:1 207.14 MHz;③Eb:1 278.75 MHz;④E2-L1-E1:1 575.42 MHz。

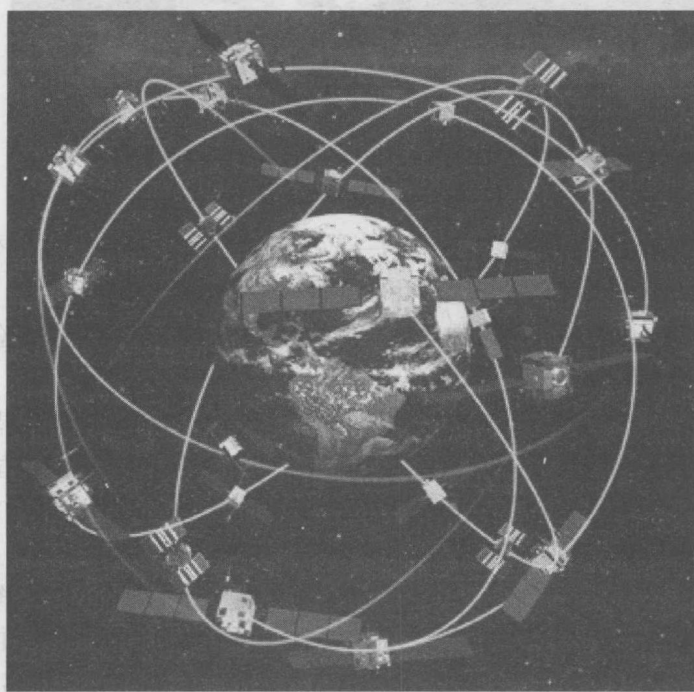


图 1-3 Galileo 卫星星座

Galileo 系统的主要特点是,向用户提供公开服务、商业服务、政府服务等不同模式的多服务。它除具有与 GPS 系统相同的全球导航定位功能以外,还具有全球搜寻援救功能。为此,每颗 Galileo 卫星还装备一种援救收发器,接收来自遇险用户的求援信号,并将它转发给地面援救协调中心,后者组织对遇险用户的援救。与此同时,Galileo 系统还向遇险用户发送援救安排通报,以便遇险用户等待援救。Galileo 接收机不仅可以接收本系统信号,而且可以接收 GPS 和 GLONASS 的信号,并且实现导航功能和移动电话功能的结合。

按 2012 年 11 月召开的第 7 届全球导航卫星系统国际委员会(ICG)大会上欧洲提交的新的 Galileo 系统发展报告,当时,欧洲伽利略卫星导航系统有 6 颗在轨卫星运行,其中 4 颗为在轨验证卫星,2 颗为完全运行能力(FOC)卫星。

4. BDS

按照“自主、开放、兼容、渐进”的发展原则,遵循先区域、后全球的总体思路,我国北斗卫星

导航系统(BDS)按三步走发展规划稳步有序推进:第一步,1994年启动北斗卫星导航试验系统建设,并于2000年形成区域有源服务能力;第二步,2004年启动北斗卫星导航系统建设,2012年形成区域无源服务能力;第三步,2020年北斗卫星导航系统形成全球无源服务能力。BDS卫星星座如图1-4所示。

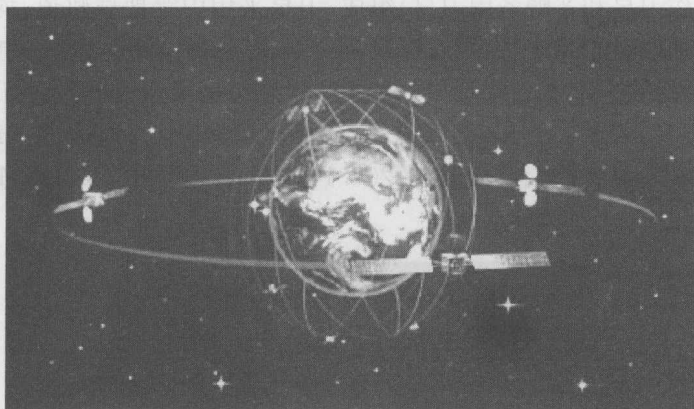


图 1-4 BDS 卫星星座

我国自行研制的第一颗导航定位卫星——北斗导航试验卫星,于2000年11月1日凌晨0时02分在西昌卫星发射中心发射升空,并准确进入预定轨道。2000年12月22日凌晨0时20分,第二颗北斗导航试验卫星在西昌卫星发射中心发射成功。这两颗试验卫星构成了我国北斗双星导航定位系统。

2003年5月25日又发射了导航定位系统的备份卫星,它与前两颗卫星组成了完整的卫星导航定位系统,确保全天候、全天时提供卫星导航信息。北斗双星导航定位系统的服务区域为东经 $70^{\circ} \sim 145^{\circ}$ 、北纬 $5^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 范围,定位精度为平面 $\pm 20\text{ m}$ 、高程 $\pm 10\text{ m}$ 。北斗双星导航定位系统具有快速定位、短报文通信、精密授时三大功能。

北斗双星导航定位系统定位的基本原理为空间球面交会测量原理,如图1-5所示。地面控制中心站通过两颗卫星向用户询问,用户应答后测量并计算出用户到两颗卫星的距离;然后根据地面控制中心站的数字地图,由地面控制中心站算出用户到地心的距离,再根据两颗卫星和地面控制中心站的已知地心坐标计算出用户的三维位置,由卫星发给用户。

我国的北斗双星导航定位系统综合了天文导航定位和地面无线电导航定位的优点,相当于一个设置在太空的无线电导航台。可以在任何时间、在定位服务区域内的任何地点为用户确定其所在的地理经纬度和海拔高度。北斗双星导航定位系统是国际上首次实现的区域导航定位系统,填补了我国卫星导航领域的空白,使中国成为世界上继美、俄之后自主建立卫星导航系统的国家。

2007年4月14日,我国成功发射了北斗二代系统首颗试验卫星 Compass-M1,拉开了北斗卫星导航系统布网建设的序幕。系统设计由5颗地球静止轨道(GEO)卫星和30颗非静止轨道卫星组成。经过5年发射组网,成功覆盖中国及其周边地区,使中国成为世界上第三个拥有卫星导航定位系统的国家。2012年12月,北斗卫星导航系统完成区域阶段部署,并正式开通实现区域服务能力,各卫星发射情况如表1-1所示。目前,系统在亚太区域可为用户提供 10 m 的三维位置服务精度, 50 ns 的授时精度和 0.2 m/s 的测速精度。

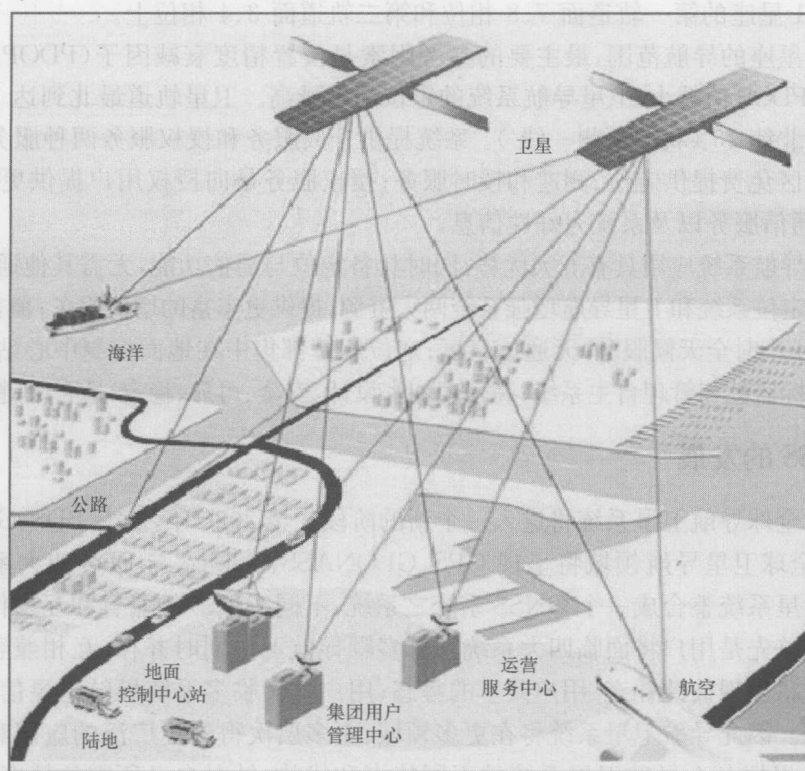


图 1-5 北斗双星导航定位原理

表 1-1 北斗卫星导航系统区域服务组网时的卫星发射情况

卫星编号	发射时间	卫星编号	发射时间
Compass-M1	2007.04	IGSO-3	2011.04
GEO-2	2009.04	IGSO-4	2011.07
GEO-1	2010.01	IGSO-5	2011.12
GEO-3	2010.06	GEO-5	2012.02
IGSO-1	2010.08	MEO-3、MEO-4	2012.04
GEO-4	2010.11	MEO-5、MEO-6	2012.09
IGSO-2	2010.12	GEO-6	2012.10

北斗卫星导航系统区域服务组网时的空间部分由 5 颗地球静止轨道(GEO)、5 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)、4 颗中圆地球轨道(MEO)卫星构成。其中,5 颗相隔 60° 的 GEO 卫星分别定点于东经 58.75° 、 80° 、 110.5° 、 140° 、 160° 。5 颗 IGSO 卫星分布于三个轨道面上,其中, I1、I2 和 I3 星下点轨迹重合,交点地理经度处于东经 118° , I4、I5 分别和 I1、I2 处于同一轨道面,与 I1、I2 各相位相差 23° ,交点地理经度处于东经 95° ; IGSO 卫星具有与 GEO 卫星有相同的轨道高度,因此具有与地球自转周期相同的轨道周期,但由于轨道倾角大于 0° ,其星下点轨迹在地面就不是一个点,而是以赤道(东经 120° 左右)为对称轴的“8”字形,轨道倾角越大,“8”字形的区域也越大。4 颗 MEO 卫星轨道高度为 21 528 km,回归周期为 7 天 13 圈,分别位于

Walker 24/3/1 星座的第一轨道面 7、8 相位和第二轨道面 3、4 相位上。

确定一个星座的导航范围,最主要的参考因素是位置精度衰减因子(PDOP)和卫星定轨的可实施性。PDOP 值越小,卫星导航系统的定位精度越高。卫星轨道最北到达 55° , PDOP <3 的区域仅到达北纬 26° (我国福州一线)。系统提供开放服务和授权服务两种服务方式。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务;授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

北斗卫星导航系统应用具有五大优势:同时具备定位与通信功能,无需其他通信系统支持;融合北斗导航定位系统和卫星导航增强系统两大资源,提供更丰富的增值服务;覆盖中国及周边国家和地区,24 小时全天候服务,无通信盲区;定位解算都集中在地面控制中心站,特别适合于大范围移动目标监控与管理自主系统;高强度加密设计,安全、可靠、稳定,适合关键部门应用。

1.1.4 GNSS 的发展

未来几年全球导航卫星系统将进入一个新的阶段。至 2020 年,随着 BDS、Galileo 等系统的部署完成,全球卫星导航领域将呈现 GPS、GLONASS、Galileo 与 BDS 四大系统并存的局面。把所有卫星系统整合成一个 GNSS 系统之系统、不同 GNSS 的兼容和互操作将是关键问题。它的特点首先是用户将面临四大系统一百多颗导航卫星同时并存、互相兼容的局面。它们的民用部分将呈现彼此补充、用户共享的势态;用户将面临多系统导航卫星信号的组合、选用和优化问题。因此导航卫星系统将在更多领域、更多层次得到更广泛的应用和多方面的服务。用户可以根据各个导航卫星系统的不同特点和优势,针对自己所需的精度、可靠性和费用,有选择地主动采用最佳方案,综合利用多系统导航卫星信息。

研究证明更多卫星和信号会使全球卫星导航系统的连续性、精度、效率、可用性和可靠性等整体性能提高。在连续性方面,作为整体的 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 组合系统同时发生问题的概率远小于独立的 GNSS 系统。GNSS 信号容易受到干扰或阻塞,因此,如果有足够的卫星和不同频率、调制码特征的信号,那么定位导航授时(PNT)能力将得到更好保证,综合提高了 GNSS 系统连续性。在精度和可靠性方面,观测更多的卫星意味着在定位算法中使用更多的观测量,减小卫星几何因素等影响,可以抑制多路径、周跳和干扰的影响。未来新信号 L2C 或者 L5 的测量值噪声更小,有利于提高定位精度。同时,数据冗余也提高了可靠性。在定位效率方面,在基于载波相位定位的情况下,增加卫星和信号将大大减少求解模糊度需要的时间,可以提高效率。在可用性方面,增加卫星和信号可以提高特定位置的信号可用性,这对于不满足开放天空条件区域内想要定位导航授时解的用户是很重要的。高效率的卫星定位的理想条件通常是:①最少 5 颗可见卫星;②较好的卫星几何精度衰减因子;③低的多路径干扰。为提高系统的可用性,需要跟踪数量足够且未被遮挡的卫星多频信号。

未来的战争将会是以导航、侦察、通信等信息手段为主导的信息化战争,这不但包括上述信息获取手段的“知己、知彼”,更包括通过电子干扰、电子欺骗等信息对抗手段,阻断、破坏敌军的信息获取。定位导航授时信息的获取是信息化战争的重要保障,同时也不可避免地将受到敌军干扰与破坏的威胁。以美国为代表的卫星导航大国,近些年一直重视对抗条件下的定位导航授时技术发展,如美国 GPS 系统增加播发的 M 码信号和未来 GPS-III 卫星加装的点波束天线等。可以预见,强对抗条件下的军事定位导航授时技术将成为未来信息化战争中时空信息对抗的关键技术。

1.2 全球导航卫星系统的组成

GNSS 由全球设施、区域设施和用户设施等部分构成。本节重点介绍全球设施部分。

1.2.1 全球设施

GNSS 是服务全球的位置和时间测定系统。全球设施部分是其核心基础组件,是提供自主导航定位服务所必需的组成部分,由空间段、空间信号段和地面控制段构成。

1. 空间段

由一个或多个卫星导航定位系统构成的一系列在轨运行的工作卫星称为 GNSS 卫星。它提供系统自主导航定位服务所必需的无线电导航定位信号,它是空间段的核心部件。卫星内的原子钟(采用铷钟、铯钟或氢钟)为系统提供高精度的时间标准和高稳定度的信号频率基准。

由于高轨卫星对地球重力异常的反应灵敏度较低,作为高空观测目标的 GNSS 卫星一般采用高轨卫星,通过测定用户接收机与卫星之间的距离或距离差完成导航定位任务。

GNSS 卫星的主要功能包括:

(1)在卫星飞越地面监控站上空时,接收由地面站发送到卫星的导航电文和卫星工作状态有关信息,并实时发送给地面用户接收机。

(2)通过星载的原子钟为系统提供精确的时间基准和频率基准。产生并向地面用户接收机连续不断地发送载波和测距码信号。

(3)发送非导航定位服务信号(如 BDS 卫星提供短报文通信服务信号, Galileo 卫星将提供搜寻营救服务信号)。

例如, GPS 空间部分是由 24 颗 GPS 卫星所组成, 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星共同组成了 GPS 卫星星座。如图 1-1 所示, 这 24 颗卫星分布在 6 个倾角为 55° 的轨道平面上绕地球运行, 各个轨道平面之间相距 60° , 轨道平均高度 20 200 km。卫星的运行周期, 即绕地球 1 周的时间约为 12 恒星时(11 小时 58 分)。这样, 对于地面观测者来说, 每天将提前 4 分钟见到同 1 颗 GPS 卫星。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而不同, 最少可见到 4 颗, 最多可以见到 11 颗。满足了在用 GPS 信号导航定位时, 为了解算测站的三维坐标, 必须观测 4 颗 GPS 卫星的基本要求。每颗 GPS 工作卫星都发出用于导航定位的信号。GPS 用户正是利用这些信号来进行导航定位工作的。

GPS 卫星的编号方式主要有: ①按发射先后次序编号(01~24); ②按卫星信号所采用的伪随机噪声码(PRN)的不同编号; ③国际编号(第一部分表示该星发射年代, 第二部分表示该年中发射卫星的序号, 字母 A 表示发射的有效负荷); ④按轨道位置顺序编号。在导航定位测量中, 一般采用 PRN 编号。

GPS 卫星已设计了三代: Block I、Block II 和 Block III。GPS 卫星的主体呈圆柱形, 两侧设有两块双叶太阳能板, 能自动对日定向, 以保证卫星正常供电。每颗卫星配置 4 台高精度原子钟(2 台铷钟和 2 台铯钟), 这是卫星的核心设备。它将发射基准频率信号, 为 GPS 定位提供高精度的时间基准。

GPS 卫星星座的分布保障了在地球上任何地点、任何时刻至少有 4 颗卫星被同时观测,

加之卫星信号的传播和接收不受天气的影响,因此, GPS 是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。

与 GPS 相应的其他全球导航卫星系统空间段特征如表 1-2 所示。

表 1-2 GNSS 卫星特征

特征项	GPS	GLONASS	Galileo	BDS
首次发射	1970-02-22	1982-10-12	2005-12-28	2007-04-13
完全运行状态	1995-07-17	1996-01-18	—	2012-12-27
设计卫星数	24(31)	24	27	14(27)
轨道平面数	6	3	3	3
轨道倾角/(°)	55	64.8	56	55
长半轴/km	26 560	25 508	29 601	27 840
轨道面间隔/(°)	60	120	120	120
运行周期	11 小时 58 分	11 小时 16 分	14 小时 05 分	12 小时 50 分
地面轨迹重复周期	约 1 恒星日	约 8 恒星日	约 10 恒星日	GEO 和 IGSO 约 1 恒星日、 MEO 约 7 恒星日
星历数据	开普勒参数、 改正系数	位置、速度、 加速度向量	开普勒参数、 改正系数	开普勒参数、 改正系数
大地参考系	WGS-84	PE-90	GTRF	CGCS2000
时间系统	GPS 时间, UTC(USNO)	GLONASS 时间, UTC(SU)	Galileo 时间	BDS 时间, UTC
频率数	3	每两个径对卫星 一个频率	3(4)	3
频率/MHz	L1:1 575.420 L2:1 227.600 L5:1 176.450	G1:1 602.000 G2:1 246.000 G3:1 204.704	E1:1 575.420 E5a:1 176.450 E5b:1 207.140 E6:1 278.750	B1:1 575.420 B2:1 191.796 B3:1 268.520
通信	无	无	单向 (搜寻营救 服务信号)	双向(短报文)
发送完备性信息	GPSⅢ有	无	有	有
服务年限/年	15~20	7	—	—

2. 空间信号段

空间信号是指在轨 GNSS 卫星发射的无线电信号。根据国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的规定,卫星导航系统的空间信号段应该在无线电导航卫星服务波段内。在 2000 年的世界无线电通信大会上公布的 GPS、GLONASS 以及 Galileo 空间信号频率配置如图 1-6 所示。

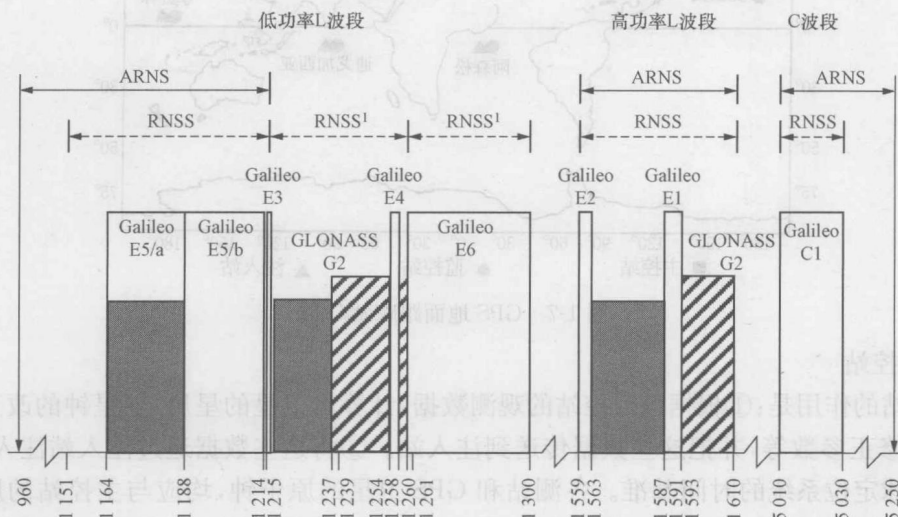


图 1-6 GNSS 卫星空间信号频率配置

注:单位为 MHz;

ARNS 为航空无线电导航服务(aeronautical radio navigation service);

RNSS 为无线电导航卫星服务(radio navigation satellite service);

RNSS¹ 为与其他服务共享的 RNSS 波段。

GNSS 卫星发送的导航定位信号包括载波、测距码和数据码三类信号。①载波是搭载测距码和数据码的电磁波。各类 GNSS 卫星分别有不同频率数和波长的 L 和 C 波段电磁波。②测距码是测定卫星到地面观测站之间距离的一种主要信号,以 GPS 信号为例,Block II R 卫星分别播发民用码 C/A 码和军用码 P/Y。在 Galileo 信号中可使用更多类型的测距码,包括 10 种民用导航信号和 1 种搜救(search and rescue, SAR)信号,其中, SAR 信号将占用为紧急服务保留的 L 波段(1 544~1 545 MHz)。③数据码被调制在载波上,其信号频率为 50 Hz,包含卫星的轨道参数、卫星钟改正数和其他一些系统参数。用户一般需要利用此导航信息来计算某一时刻 GNSS 卫星在地球轨道上的位置。导航信息也被称为广播星历。

3. 地面控制段

地面控制段由一系列全球分布的地面站组成,这些地面站可分为卫星监测站、主控站和信息注入站。地面监控段的主要功能是卫星控制和任务控制。卫星控制指使用跟踪遥测遥控链路上传监控指令对卫星星座进行管理;任务控制指对轨道测定和时钟同步等导航任务进行全面控制和管理。

GNSS 地面监控段由分布在全球的若干个跟踪站所组成的监控系统所构成。下面对 GPS 地面监控段进行简要介绍。根据其作用的不同,这些跟踪站又被分为主控站、监控站和注入站。图 1-7 是 GPS 地面跟踪站分布图。