



高职高专示范建设规划教材
高职院校测绘专业“课程思政”特色教材

GNSS定位测量技术

(第2版)

主 编 ● 李开伟



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

GNSS 定位测量技术 / 李开伟主编. —2 版. —成都:
西南交通大学出版社, 2021.1

高职高专示范建设规划教材 高职院校测绘专业“课程思政”特色教材

ISBN 978-7-5643-7825-7

I. ①G… II. ①李… III. ①卫星导航—全球定位系统—高等职业教育—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 224911 号

高职高专示范建设规划教材
高职院校测绘专业“课程思政”特色教材

GNSS Dingwei Celiang Jishu

GNSS 定位测量技术 (第 2 版)

主编 李开伟

责任编辑	陈 斌
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	13.25
字 数	329 千
版 次	2021 年 1 月第 2 版
印 次	2021 年 1 月第 6 次
书 号	ISBN 978-7-5643-7825-7
定 价	38.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第 2 版前言

本书是四川水利职业技术学院测绘工程系根据高职示范院校建设要求，以“项目导向、任务驱动、工学结合”的教学模式为出发点，以技能培养为主线，结合行业需求，以所制定的“GNSS 定位测量技术”课程标准为依据编制的“工程测量技术专业”示范教材。本书主要内容包括：GNSS 系统的介绍，GPS 卫星定位技术发展过程及 GPS 卫星测量的坐标系统和时间系统；GPS 卫星定位系统的组成；GPS 卫星测量定位原理与误差来源；GNSS 测量技术设计；GNSS 测量的外业实施；GNSS 测量数据处理；GNSS-RTK 测量技术；GNSS-RTK 工程放样及 CORS 系统的组成和应用。本书重在论述 GPS 的基本原理、基本方法，着重介绍 GPS 测量的实施技术和 GNSS-RTK 测量技术，省略了许多数学模型，图文并茂，力求做到概念清晰、通俗易懂，适应面广、应用性强，每个项目设计了项目总结，帮助学生学习和总结本项目的内容，以满足教学要求。

本书由四川水利职业技术学院测绘工程系李开伟担任主编，负责内容策划、审校和有关章节的编写、改写和统稿。全书共分 5 个项目，编写分工如下：项目一的子项目一由李开伟、贾家琳、靳祠编写，子项目二和子项目五由林先勇、成都勘察测绘研究院注册测绘师路晓峰编写，子项目三和子项目四由韩沙鸥、谭詹编写；项目二由贾家琳、李开伟编写；项目三的子项目一由靳祠、陈锐编写，子项目二由四川星地星工程勘察设计有限公司包绍龙工程师编写；项目四和项目五由包绍龙、靳祠、路晓峰编写。汪仁银教授主审了本书，并提出了宝贵的修改意见，在此表示诚挚的感谢。

本书注重理论与工程实际相结合，反映了当前 GNSS 测量技术的最新应用，可以作为高等职业院校测绘类专业工程测量课程配套教材，也可供相关工程技术人员参考。但由于 GNSS 系统发展的日新月异，同时也由于编者水平有限，书中难免有不足与疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2020 年 9 月 30 日

目 录

项目一 GNSS 定位测量基础知识	1
子项目一 全球导航卫星系统概述	1
任务一 卫星定位技术发展概况	1
任务二 美国的限制性政策	10
任务三 GPS 测量的特点	12
任务四 GPS 测量技术应用	15
本项目小结	19
习 题	20
子项目二 GPS 定位的坐标系统及时间系统	21
任务一 GPS 测量的坐标系统	21
任务二 GPS 测量的时间系统	40
本项目小结	43
习 题	43
子项目三 GPS 卫星信号及卫星运动	44
任务一 GPS 定位系统	44
任务二 GPS 卫星信号	49
任务三 GPS 卫星的运动	58
任务四 GPS 卫星星历	63
本项目小结	64
习 题	65
子项目四 GPS 卫星定位原理	66
任务一 GPS 卫星定位原理概况	66
任务二 伪距测量	67
任务三 载波相位测量	74
任务四 GPS 绝对定位	75

任务五 GPS 相对定位	80
本项目小结	90
习 题	90
子项目五 GPS 测量误差的来源及其对策	91
任务一 GPS 测量误差的来源及分类	91
任务二 与卫星有关的误差	92
任务三 与卫星信号传播有关的误差	96
任务四 与接收机有关的误差	99
任务五 其他误差	101
本项目小结	102
习 题	102
项目二 GNSS 测量技术设计	103
任务一 GNSS 测量的技术设计	103
任务二 GNSS 控制网的图形设计及设计原则	112
任务三 GNSS 控制网的优化设计	115
任务四 GNSS 测量前的准备工作及设计书的编写	121
本项目小结	135
习 题	135
项目三 各级 GNSS 控制测量的实施	137
子项目一 GNSS 测量的外业实施	137
任务一 GNSS 测量的作业模式	137
任务二 GNSS 控制点的选择	140
任务三 外业观测工作	143
任务四 成果验收和上交资料	148
本项目小结	149
习 题	149
子项目二 GNSS 测量数据处理	150
任务一 GNSS 定位测量中的数据格式	150
任务二 GNSS 基线解算	151
任务三 GNSS 网平差	153

任务四 GNSS 高程	159
任务五 GNSS 精密基线解算	162
本项目小结	173
习 题	173
项目四 GNSS-RTK 测量	174
任务一 GNSS-RTK 测量原理	174
任务二 GNSS-RTK 测量操作	178
任务三 GNSS-RTK 测量数据处理	186
任务四 GNSS-RTK 地形测量示例	187
本项目小结	190
习 题	190
项目五 利用 GNSS-RTK 进行工程放样以及 CORS 系统的组成和应用	191
任务一 GNSS-RTK 工程放样	191
任务二 GNSS-RTK 工程放样示例	193
任务三 CORS 系统及其应用	196
本项目小结	203
习 题	203
参考文献	204

项目一 GNSS 定位测量基础知识

子项目一 全球导航卫星系统概述

全球导航卫星系统或全球卫星导航系统，其英文全称为 Global Navigation Satellite System, GNSS。GNSS 是随着现代科学技术的发展而建立起来的新一代卫星无线电导航定位系统，目前包括美国的全球定位系统（Global Positioning System, GPS）、俄罗斯的格罗纳斯系统（Global Navigation Satellite System, GLONASS）、中国的北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）以及欧盟的伽利略系统（GALILEO）。这些全球卫星定位系统在系统组成和定位原理方面都有许多相似之处，所以本书以 GPS 为例进行讲述。GPS 建成最早，拥有全球最多的用户，在诸多的领域都得到了应用，因此 GPS 几乎成了 GNSS 的代名词。本项目中我们主要从卫星定位技术起源开始，简单地阐述 GPS 技术的发展过程、特点、应用及其限制性政策等方面的内容。



课程思政教学
资源（一）

任务一 卫星定位技术发展概况

以 1957 年 10 月 4 日苏联成功发射的世界上第一颗人造地球卫星作为标志，人类的空间科学研究和应用跨入了一个崭新的时代，人类的活动范围延伸到了大气层以外，并且开始了利用卫星进行定位和导航的研究。近五十年来，随着卫星技术的发展，特别是美国的全球定位系统（GPS）技术的成功研发和应用，测绘行业迎来了一场深刻变革，在测量精度、使用条件、应用领域、生产效率及经济效益等方面都取得了巨大的进步。可以说，全球卫星导航系统与移动通信技术、互联网技术正一起影响着 21 世纪人类的生活。

卫星定位技术是指人类利用人造地球卫星确定测站点位置的技术。卫星大地测量就是利用人造地球卫星为大地测量服务的一门学科。它的主要内容是在地面上观测人造地球卫星，通过测定卫星位置的方法来解决大地测量任务，例如测定地面点的相对位置、测定地球的形状与大小等。卫星定位技术的发展可分为三个阶段：卫星三角测量技术，卫星多普勒定位测量技术，GPS 卫星定位技术。

1. 卫星三角测量技术

最初，人们仅仅将人造地球卫星作为一种空间观测目标，通过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;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。利用这两种观测方法,实现对于地面点的定位,也可对大陆同海岛实施联测定位,进而解决了常规大地测量难以实现的远距离联测定位问题。

20世纪60~70年代,美国国家大地测量局在英国和联邦德国测绘部门的协作下,用卫星三角测量方法测设了一个具有45个测站点的全球三角网,点位精度为 $\pm 5\text{ m}$ 。但是这种观测方法受天气和可见条件影响,费时费力,同时定位精度不太理想,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定位技术所取代,使卫星定位技术从把卫星作为空间的观测目标向作为动态已知点发展的高级阶段迈进。

2. 卫星多普勒定位测量技术

1958年12月,美国海军武器实验室委托约翰·霍普金斯(Johns Hopkins)大学物理实验室,给美国海军“北极星”核潜艇提供全球性导航技术,从而开始研制一种卫星导航系统,称为美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System),简称NNSS系统。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。系统于1964年1月建成并使用。系统的卫星高度为1100 km,轨道接近圆形,轨道倾角为 90° 左右,周期约为107 min,在地球表面上的任何一个测站上,平均每隔2 h便可观测到其中一颗卫星。

子午卫星导航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的设备。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。

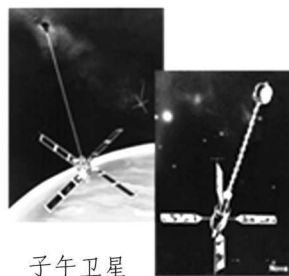
1967年7月29日,美国政府宣布解密子午卫星的部分导航电文以供民用,由于卫星多普勒定位具有经济、快速、精度较高、不受天气和时间限制等优点,只要能见到子午卫星,便可在地球表面的任何地方进行单点和联测定位,从而获得测站的三维地心坐标。因此,卫星多普勒定位迅速从美国传播到欧洲、亚洲及美洲的许多国家。20世纪70年代中期,我国开始引进卫星多普勒接收机。西沙群岛的大地测量基准联测,是我国应用卫星多普勒定位技术的先例。自80年代初期以来,我国开展了几次较大规模的卫星多普勒定位实践:国家测绘局和总参测绘局联合测设的全国卫星多普勒大地网;由原武汉测绘科技大学与青海石油管理局、新疆石油管理局、原石油部地球物理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170 000余千米的南极乔治岛上,也用卫星多普勒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17 501 949.51 m。

在美国子午卫星系统建立的同时,苏联也于1965年开始建立卫星导航定位系统,叫作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 min。

虽然 NNSS 和 CICADA 卫星导航系统将导航和定位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：

(1) 卫星颗数少，不能实现连续实时导航定位。NNSS 卫星导航系统卫星数目较少（仅有 6 颗工作卫星），而且运行轨道都通过地球南极和北极，如图 1.1.1 所示。因而地面点观测到卫星的时间间隔较长（平均 1.5 h）。同一颗子午卫星，每天通过测站上空的次数最多为 13 次，而一台多普勒接收机一般需要成功观测 15 次卫星通过，才能达到 ± 10 m 的单点定位精度。当所有测站观测了 17 次卫星通过时，联测定位的精度才能达到 ± 0.5 m。由于子午卫星通过测站上空的时间太短，而需要观测的时间又过长（测站平均观测 1~2 d），定位速度慢，所以无法提供连续实时的三维导航定位服务。



子午卫星



子午卫星星座

图 1.1.1 子午卫星运行图

(2) 卫星运行轨道高度较低，难以实现精密定轨。子午卫星的轨道平均高度为 1 070 km，属于低轨道卫星。这样，地球引力场模型误差，大气密度、卫星质面比、大气阻力系数等摄动因子误差，大气阻力模型误差等都将阻碍子午卫星定轨精度的提高。子午卫星星历参数的精度较低，导致卫星多普勒定位精度局限在米级水平（单点定位精度 3~5 m，相对定位精度约为 1 m）

(3) 信号频率低，难以补偿电离层折射效应的影响。子午卫星射电信号的频率为 400 MHz 和 150 MHz，用这两种频率的信号进行双频多普勒定位时，只能削弱电离层折射效应的低阶项的影响，而难以削弱高阶项的影响。而电离层折射效应的高阶项的影响，在地球赤道附近将导致测站高程产生 ± 1 m 以上的偏差。

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，精度较低也限制了它的应用领域。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航与定位，第二代卫星导航系统——GPS 便应运而生。子午卫星导航系统也于 1996 年 12 月 31 日停止发射导航及时间信息。

3. GPS 卫星定位系统

美国国防部于 1973 年 12 月批准美国海陆空三军联合研制新一代卫星导航系统——NAVSTAR/GPS, 即为目前的“卫星测时测距导航/全球定位系统”(Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System), 通常称为全球卫星定位系统, 简称为 GPS 系统。

GPS 系统的全部投资为 300 亿美元, 前后历时 20 年, 自 1974 年以来, 系统的建立经历了方案论证、系统研制和生产试验等三个阶段, 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 试验卫星发射成功。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), 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 h 58 min (恒星时 12 h), 载波频率为 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz。卫星通过天顶时, 卫星可见时间为 5 h, 每颗卫星可覆盖地球表面约 38% 的面积。卫星的分布可保证在地球上任何地点、任何时刻, 同时能观测到 4 颗卫星, 在高度角 15° 以上的地区, 平均能同时观测到 6 颗卫星, 最多可达 9 颗, 如图 1.1.2 所示。

如图 1.1.3 所示, GPS 工作卫星的在轨质量为 843.68 kg, 设计寿命为七年半。卫星入轨之后, 星内机件靠太阳能和镉镍蓄电池供电。

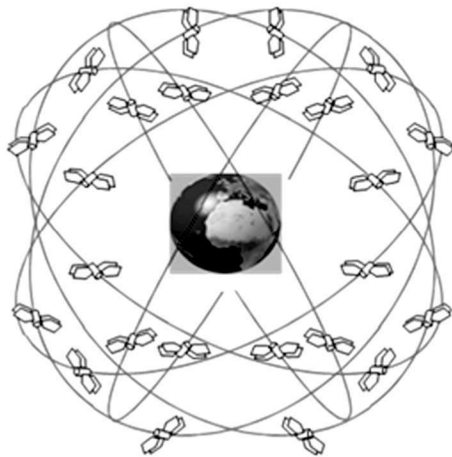


图 1.1.2 GPS 卫星星座

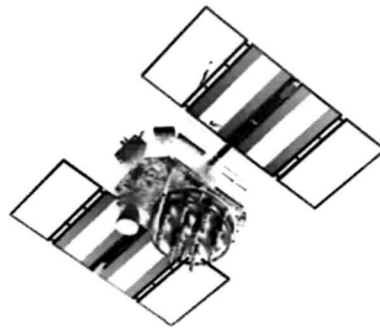


图 1.1.3 GPS 工作卫星

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、核爆监测和应急通信等一些军事目的。但随着 GPS 系统的开发应用, 已被广泛地应用于飞机和船舶及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。该系统是以卫星为基础的无线电定位系统, 具有全能型(陆地、海洋、航空和航天)、全天候、连续性及实时性的导航、定位和授时功能, 能为客户提供精密的三维坐标、时间和速度。

为了使 GPS 具有高精度的连续实时三维导航性能及良好的抗干扰性能, 在卫星的设计上采取了若干重大改进措施。GPS 与 NNSS 的主要特征比较见表 1.1.1。

表 1.1.1 GPS 与 NNSS 主要特征对比

系统特征	GPS	NNSS
载波频率/GHz	L ₁ 为 1.58, L ₂ 为 1.23	0.15, 0.40
卫星平均高度/km	约 20 200	约 1 070
卫星数目/颗	24 (3 颗备用)	5~6
卫星运行周期/h	11 h 58 min	1.5 h
卫星钟稳定度	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹

4. GLONASS 卫星定位系统

苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星导航系统优劣的基础上, 认真吸取美国 GPS 系统的成功经验, 自 1982 年 10 月开始研发, 至 1996 年 1 月 18 日系统正式运行, 前后历时 13 年时间, 研制发射了第二代导航卫星——GLONASS 卫星。该系统在系统的组成和工作原理上与 GPS 类似, 共发射 24 + 1 颗卫星, 主要为军用。

GLONASS 卫星均匀地分布在 3 个等间隔圆轨道上, 轨道倾角为 $64.8^{\circ} \pm 0.3^{\circ}$, 轨道间的夹角为 120° , 偏心率为 ± 0.01 , 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 h 15 min 44 s, 轨道的同步周期为 17 圈。由于 GLONASS 卫星轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角, 所以在高纬度 (50° 以上) 地区的可视性较好。GLONASS 卫星星座如图 1.1.4 所示。GLONASS 系统可进行卫星测距。民用无任何限制, 没有选择可用性政策 (SA)。民用的标准精度如下: 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 μ s。GLONASS 卫星的平均工作寿命超过 4.5 年。

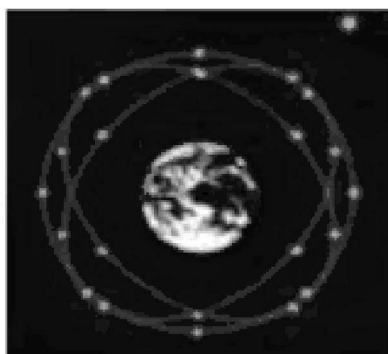


图 1.1.4 GLONASS 卫星星座

GLONASS 系统的发展阶段如下:

(1) 初期开发阶段。

一般 GLONASS 卫星都是采用一箭三星发射, 第一颗 GLONASS 卫星和两颗试验卫星于 1982 年 10 月 12 日发射升空, 但这三颗卫星都没能正常运行, 直到 1984 年 1 月试验用的四颗卫星才完成部署。1983—1985 年是试验的第一阶段, 主要进行前期试验验证和系统概念的改进; 1986—1993 年是试验的第二阶段, 卫星增加到 12 颗, 完成在轨飞行试验并启动初步系统运行。

(2) 运行能力。

1993年9月24日，俄罗斯正式宣布 GLONASS 系统开始运行，但实际在 1996 年这 24 颗卫星才第一次组网成功。一般我们认为这个时刻才是 GLONASS 系统的完全运行状态。后期由于资金缺乏问题，可用的卫星数目逐渐减少，到 2001 年能够工作的卫星数减少到 6~8 颗。GLONASS 计划总共 24 颗卫星，包括 21 颗标准卫星和 3 颗备用卫星。2008 年初共有 14 颗卫星在轨运行，但是部分单个卫星只有相对较短的 3~4 年寿命，从而影响了系统的完整性。完全部署 GLONASS 需要 24 颗工作卫星，俄罗斯用质子号定期将 3 颗 GLONASS-M 卫星发射入轨，M 系列卫星的寿命为 7~8 年；2009 年后发射的，寿命可达到 10~12 年；在 2009 或 2010 年全部在轨运行。

GLONASS 采用了“军民两用”政策，它一共有六个国家级的用户：俄罗斯联邦空间局、国防部、俄罗斯控制系统局、交通部、工业科学和技术部、俄罗斯大地测量与制图局，其中俄罗斯联邦空间局是一个民用研究机构。

2002 年正式成立 GLONASS 协调委员会，是为了实现 GLONASS 的协调发展和制定战略活动。2006 年，俄罗斯发布了 GLONASS 更新计划：第一，到 2007 年年底实现 18 颗卫星的最小运行能力；第二，到 2009 年年底实现 GLONASS 系统的完全运行状态；第三，到 2010 年确保 GLONASS 系统达到与 GPS 和 GALILEO 系统相当性能。

GLONASS 的地球参考系统为 PE-90 系统，时间系统是通过一组氢原子钟构成的 GLONASS 中央同步器来维持的。GLONASS 系统由卫星星座、地面监测控制站、用户设备 3 部分组成。所有 GLONASS 卫星均使用精密铯钟作为其频率基准。GLONASS 系统单点定位精度水平方向为 16 m，垂直方向为 25 m。其应用普及情况远不及 GPS。

GLONASS 导航系统的主要应用领域包括交通事故应急响应、国际体育赛事导航支持，例如在索契冬奥会物流与交流中心导航支持。

5. 伽利略 (GALILEO) 全球卫星导航系统

伽利略卫星导航系统简称 GALILEO，是由欧盟和欧洲空间局合作开发的全球卫星导航定位系统，该计划于 1999 年 2 月提出，见图 1.1.5。欧盟建立这个导航系统不仅能使人们的生活更加方便，同时也能带来可观的经济效益。更重要的是，欧盟将从此拥有自己的全球卫星导航系统，有助于打破美国 GPS 导航系统的垄断地位。

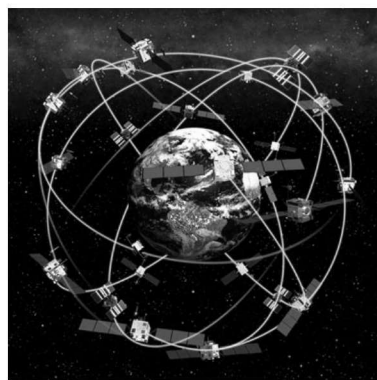


图 1.1.5 伽利略卫星分布

作为欧盟主导项目，伽利略全球卫星导航系统的研制并没有排斥外国的参与，中国、韩国、日本、阿根廷、澳大利亚、俄罗斯等国也在参与了该计划，并向其提供资金和技术支持。虽然欧洲在 2013 年主动邀请我国参加，但是在 2005 年欧洲政治格局发生变化后，欧洲航天局希望与美国合作，因此开始排挤中国，让中国投入巨额资金却得不到相应的对待。我国在此情况下致力于发展我国自己的“北斗”系统，在 2006 年我国对外宣布，将在今后几年内发射导航卫星，开发自己的全球卫星导航和定位系统，并于 2007 年得到重大突破，有了覆盖全球的“北斗”二号系统计划。在导航系统中频道是稀有资源，按照“谁先使用谁先得”的国际法原则，中国和欧盟成了同一频率（即仅次于 GPS 和 GLONASS 的频率）的竞争者。中国以成功发射三颗卫星的优势取得了频率的所有权。“北斗”二号在技术上比“伽利略”更先进，定位精度甚至达到 0.5 m 级。

2011 年 10 月 21 日，伽利略导航系统的首批两颗卫星升空，2012 年 10 月 12 日，随着欧洲伽利略全球卫星导航系统第二批两颗卫星成功发射升空，该系统建设已取得阶段性重要成果。太空中已有 4 颗正式的伽利略系统卫星，可以组成网络，初步发挥地面精确定位的功能。2013 年春季，已组网的这 4 颗卫星首次提供导航服务。伽利略导航系统预计由 30 颗卫星组成，其中 27 颗工作星，3 颗备份星。卫星轨道高度约为 2.4 万千米，位于 3 个倾角为 56° 的轨道平面内。但是伽利略卫星导航系统计划发展缓慢，加之欧洲又面临经济危机，欧盟中的各个国家因此对“伽利略卫星导航计划”产生了很多分歧。

计划中的 GALILEO 服务：

(1) 开放服务 (OS)。

开放服务是针对大众市场，即为定位和授时提供免费信号。由于在 2004 年 6 月 26 日，美国和欧盟签署了一项协议，旨在确保 GALILEO 和 GPS 这两个系统的无缝协作和兼容性。所以 GALILEO 和 GPS 对某些应用发射了相同的频率，接收机可以结合使用这两种信号，即使在不利情况下也能改善信号。

(2) 商业服务 (CS)。

商业服务在使用收费的基础上为客户提供各种带来效益的服务。商业服务是依靠包含在导航电文中的数据，这些数据信息被加密后以高达 500 bit/s 的数据传输率播发。这些应用的例子有：精确授时服务、提高位置精度的修正等。

(3) 人身安全服务 (SOL)。

人身安全服务主要用于交通方面，导航信号中的完备性信息将标示系统的任何故障，并给全球范围的用户提供及时警告。人身安全服务被设计为适应航空、航海和铁路领域的不同标准，使用户团体的受益最大化。

(4) 公共管制服务 (PRS)。

伽利略导航系统虽然是民用系统，但也能由政府提供稳定的访问服务。公共管制服务可供警察、消防和边境巡逻队之类的客户使用。如果信息一旦被滥用，就会危及公共安全，因此此类服务的访问要对民事部门进行限制和控制。同时也要保证伽利略系统信号不受人为干扰、阻塞、欺骗或虚拟干扰。

(5) 搜索与救援 (SAR)。

搜索和救援服务将用于人道主义搜索和救援工作。伽利略系统的此项服务是欧洲对国际

COSPAS-SARSAT 系统的贡献，符合国际海事组织与国际民航组织的需求与规定。这项系统是由俄罗斯、美国、法国和加拿大定义与建造，为全球范围内的人道主义 SAR 服务提供一个途径，即应急发射机和卫星能定位飞行、陆上和海洋紧急事件中的个人、船只和车辆。

伽利略系统采用地心直角坐标框架，时间系统是一个连续的原子时系统，它与国际原子时有一个标称常数误差。伽利略系统与 GLONASS 相似，除了用户段以外伽利略系统定义了三个基本组成部分：全球部分、区域部分和局域部分。全球部分是伽利略系统的核心单元，分为空间段与地面段。空间段的卫星星座预计包括 27 颗工作卫星和 3 颗备用卫星，分布在三个近圆的中轨上，三个轨道面相对于赤道的倾角为 56° 。区域部分是由一个完备性监控站网络和一个完备性控制中心组成。局域部分能够提供伽利略局域辅助服务，以增强局域的导航性能，满足特殊应用需求。

6. 我国的“北斗”导航卫星导航系统

北斗卫星导航系统是我国正在实施的自主研发的、独立运行的全球卫星导航系统与通信系统。“北斗”是指“七星大熊星座”或“北斗七星”。若干世纪以来，该星座一直用来标示星极轴，也就是北半天球的北方向。我国于 1983 年提出建设自己的导航系统，首先完成试验阶段，即用少量卫星利用地球同步静止轨道来完成试验任务；其次到 2012 年，计划发射 10 多颗卫星，建成覆盖亚太区域的“北斗”卫星导航定位系统；最后到 2020 年，建成由 5 颗地球静止轨道和 30 颗地球非静止轨道卫星组网而成的全球卫星导航系统，见图 1.1.6。

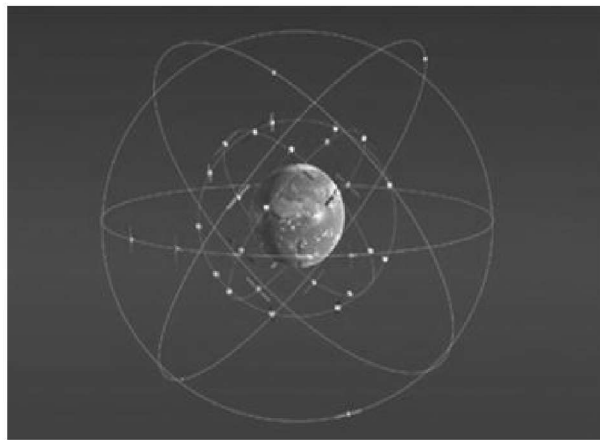


图 1.1.6 北斗建成后的卫星分布情况

北斗卫星导航系统由空间端、地面端和用户端三部分组成。空间端包括 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星。地面端包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站。用户端由北斗用户终端以及与美国 GPS、俄罗斯“格洛纳斯”(GLONASS)、欧盟“伽利略”(GALILEO)等其他卫星导航系统兼容的终端组成。

北斗卫星导航系统的发展历程：

(1) 北斗一代。

其工程代号取名为“北斗一号”。一共成功发射四颗卫星，发射前三颗工作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。这标志着我国成为继美国和

俄罗斯的后，世界上第三个建立了完善的卫星导航系统的国家。第四颗卫星发射成功，不仅作为早期三颗卫星的备份，同时还进行卫星导航定位系统的相关试验。

因为是初级阶段，所以其覆盖范围小，对我国周边地区的定位能力差；定位精度低，定位精度最高 20 m，不适于军用，同样也无法在高速移动平台上使用。但“北斗一号”研制成功标志着我国打破了美、俄在此领域的垄断地位，解决了中国自主卫星导航系统的有无问题。

(2) 北斗二代。

我国从 2007 年开始正式建设“北斗”卫星导航定位系统（“北斗二号”）。“北斗”卫星导航定位系统需要发射 35 颗卫星，比 GPS 多出 11 颗，由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，其定位精度可以精确到厘米之内。“北斗”卫星导航定位系统提供开放服务和授权服务。开放服务在服务区免费提供定位、测速和授时服务，定位精度为 10 m，授时精度为 50 ns，测速精度为 0.2 m/s。授权服务则是军事用途的马甲，将向授权用户提供更安全、更高精度的定位、测速、授时服务，外加继承自北斗试验系统的通信服务功能。我国自主研制的“北斗二号”系列卫星已经进入组网期，预计到 2015 年形成覆盖全球的卫星导航系统，可实现不需要通过地面中心站联系和传输信号的无源定位，见图 1.1.7。



图 1.1.7 北斗卫星发射升空

“北斗”卫星导航系统应用领域广泛和 GPS 一样分为军用和民用，民用包括交通运输、海洋渔业、水文监测、气象监测、森林防火、通信系统、电力调度、救灾减灾等方面的应用。

在未来的几年里，我国将致力于完成建成我国独立自主的全球卫星导航系统，同时也在着力研究开发下一代卫星导航定位系统（CNSS）。

发展中有机遇也有挑战，其均来自其余的三大导航系统：GPS 在这方面遥遥领先，GLONASS 正在恢复建设中，GALILEO 遭遇资金困境。四大导航系统虽然有竞争但也有合作，我国正在开展与 GPS、GLONASS 和 GALILEO 等其他卫星导航系统的频率协调，参与国际电信联盟（ITU）工作组、研究组和世界无线电通信大会（WRC）的各项活动。

任务二 美国的限制性政策

GPS 针对不同的用户提供两种不同类型的服务:一种是标准定位服务(Standard Positioning Service, SPS);另一种是精密定位服务 (Precision Positioning Service, PPS)。SPS 主要面向全世界的民用用户, PPS 主要是面向美国和盟国的军事部门以及民用的特许用户。

因为 GPS 技术和美国的国防现代化发展密切相关,所以,为了保障美国的利益与安全,限制非经美国特许的用户利用 GPS 的精度,该系统除了在设计方面采取许多保密措施外,在系统运行中还采取或可能采取其他一些措施,以限制用户获取 GPS 观测量的精度。这些措施主要包括:

- (1) 对不同的 GPS 用户,提供不同的服务方式;
- (2) 实施选择可用性政策;
- (3) 精测距码 (P 码) 的加密措施。

1. 对不同的 GPS 用户提供不同的服务方式

GPS 卫星发射的无线电信号,含有两种精度不同的测距码,即 P 码(精码)和 C/A 码(粗码)。相应两种测距码, GPS 提供两种定位服务方式,即精密定位服务和标准定位服务。

精密定位服务 (PPS) 可提供 L_1 和 L_2 载波上的 P 码、 L_1 载波上的 C/A 码、导航电文和消除 SA 的密钥。PPS 的主要对象是美国军事部门和其他经美国特许的用户。PPS 利用双频技术消除电离层折射的影响。利用 PPS 单点定位的精度可以达到 5 ~ 10 m。但是, P 码是不公开的保密码,非经美国特许的用户难以利用。

标准定位服务仅提供 L_1 载波上的 C/A 码和导航电文,其主要对象是非经美国政府特许的广大用户。这类用户只能利用 C/A 码获取精度较低的观测量,且只能采用调制在一个载波上的 C/A 码来测量距离,无法利用双频技术来消除电离层折射的影响。其单点实时定位的精度为 15 ~ 30 m。

2. 实施选择可用性政策

为了进一步降低标准定位服务的精度,以保障美国政府的利益和安全,对 GPS 工作卫星已播的信号实行 SA 政策,以进行人为的干扰。这种干扰,目前是通过 ϵ 和 δ 两种技术实现的。

ϵ 技术是干扰卫星星历数据,它通过降低 GPS 卫星播发轨道参数的精度,来降低利用 C/A 码进行实时单点定位的精度; δ 技术是对 GPS 的基准信号人为地引入一个高频抖动信号,以降低 C/A 码伪距观测的精度。

目前,在 SA 政策的影响下,对 SPS 用户,实时单点定位的精度,在水平和垂直方向上分别降为约 100 m 和 150 m。而且,这种影响是可变的,在必要时美国政府可以进一步降低 SPS 的定位精度。

SA 是针对非经美国政府特许的广大 GPS 用户采取的降低实时定位精度的措施,而对能够使用精密定位服务的用户,则可采用密钥自动地消除 SA 的影响。

3. 精测距码的加密措施

AS (Anti-Spoofing) 技术是 P 码的加密措施, 也叫反电子欺骗技术。当 P 码被解密或在战时, 对方如果知道特许用户接收机所接收的卫星信号的频率和相位, 便可以发射适当频率的干扰信号, 诱使特许用户的接收机错锁信号, 产生错误的导航信息。为了防止这种电子欺骗, 进一步加密 P 码, 美国将在必要时引入机密码 W 码, 并通过 P 码和 W 码的模二相加, 将 P 码转换为 Y 码。由于 W 码是严格保密的, 所以非特许用户将无法继续应用 P 码进行精密定位并进行上述电子欺骗。这项技术只在特殊的情况下使用。

4. 针对 SA 和 AS 政策的对策

针对美国政府的 SA 和 AS 技术政策, 应采取以下几项措施:

(1) 改进 GPS 精密定位方法和软件, 削弱 SA 和 AS 技术的影响。

在美国政府实施 SA 和 AS 技术时, 采用差分 GPS 定位方法可以把一般用户的实时定位精度提高到 2~5 m, 是削弱美国限制性政策影响的有效手段, 目前已被广泛使用。比如: 采用载波相位观测时, 在基线长度不大于 20 km 的情况下, 可以获得厘米级的实时定位精度, 目前也在迅速发展中。

还可以应用 P-W 技术和 L_1 、 L_2 交叉相关技术, 在 L_2 载波相位观测值得到恢复, 其精度与使用 P 码相同。还有窄相关技术, 可以使 C/A 码的多路径效应大大降低, 使用 L_1 波段的伪距测量精度接近 P 码精度的技术。

(2) 建立独立的 GPS 卫星测轨系统。

利用独立的 GPS 卫星, 建立独立的跟踪系统, 以精密的测定卫星的轨道, 为用户提供精密星历服务, 是一项经济有效的措施。它为精密工程测量、地壳变形监测、地球动力学研究提供精密的后处理星历, 以获得精密的定位结果。这项措施在开发 GPS 的广泛应用方面具有重大的意义。为此, 除美国一些民用部门外, 加拿大、澳大利亚和欧洲一些国家都在建立自己的区域性或全球性精密测轨系统。而我国也紧跟潮流, 在“八五”期间建立的 GPS 跟踪站已经构网, 建立了北京、武汉、上海、长春、昆明、拉萨和乌鲁木齐的 GPS 卫星跟踪站, 其对我国利用和普及 GPS 定位技术, 推进测绘科学技术的现代化, 都具有重要的现实意义。

(3) 使用能同时接受 GPS 和 GLONASS 信号的接收机。

俄罗斯和美国的两个系统, 最大的区别在于: GLONASS 无 SA 技术, 无须顾虑精度的降低和信号的加密。同时接受两个系统的卫星信号, 就意味着把两者构成了一个拥有 48 颗卫星的组合系统, 弥补了 GPS 的局限性, 整体上改善了系统的有效性、完整性和定位精度, 从而保证了在有障碍的环境中观测时同步的卫星个数和定位精度。

(4) 发展 DGPS 和 WADGPS 差分系统。

目前已在不少国家和地区建立发展了 DGPS 和 WADGPS 差分系统, 实时差分定位精度可达厘米级。实时差分 GPS 系统的发展, 为 GPS 应用开辟了新的领域, 在陆地、海洋、天空、民用、军用等各个领域中将得到进一步的推广。

(5) 建立独立的卫星导航与定位系统。

只有建立了属于自己的卫星导航定位系统, 才能摆脱美国 GPS 政策的束缚。目前, 一些国家和地区正在发展自己的卫星导航与定位系统。尤其是俄罗斯的全球导航定位系