

重庆交通大学测绘工程专业提升计划本科规划教材——测绘类

全球定位系统

(GPS) 测量原理及应用

邓明镜 刘国栋 / 主编
徐金鸿 倪 健



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

重庆交通大学测绘工程专业提升计划本科规划教材——测绘类

全球定位系统（GPS） 测量原理及应用

邓明镜 刘国栋 主编
徐金鸿 倪 健

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容提要

本书为重庆交通大学测绘工程专业“专业提升计划”项目组组织编写的测绘类本科生教材,旨在提升测绘类专业本科教学的专业教学质量。本书共分9章,较系统地论述了GPS的测量原理、基本理论、误差分析、测量技术设计与实施、数据处理数学模型及相关理论和应用现状。本书根据作者多年的GPS教学讲义和课件等相关教学资料汇编而成,因此本书的特点是注重对一些重要的基本概念、基本理论的理解和分析,然后在此基础上介绍GPS的测量应用技术方面的内容。书中概念清晰、公式推导通俗易懂、内容编排顺序符合学生的学习习惯,理论结合实际。本书既可作为高等院校测绘类本科生GPS课程教学的教材,也可作为测量工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

全球定位系统(GPS)测量原理及应用 / 邓明镜等主编. — 成都:西南交通大学出版社, 2014.1
重庆交通大学测绘工程专业提升计划本科规划教材.
测绘类
ISBN 978-7-5643-2837-5

I. ①全… II. ①邓… III. ①全球定位系统—测量—高等学校—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第016560号

重庆交通大学测绘工程专业提升计划本科规划教材——测绘类
全球定位系统(GPS)测量原理及应用



责任编辑	张正华
助理编辑	胡晗欣
特邀编辑	柳堰龙
封面设计	李易
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路146号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网址	http://press.swjtu.edu.cn
印刷	成都市书林印刷厂
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印张	17.75
字数	442千字
版次	2014年1月第1版
印次	2014年1月第1次
书号	ISBN 978-7-5643-2837-5
定价	36.00元

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

前 言

全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 自 20 世纪 90 年代初全面建成投入使用以来, 就以其得天独厚的优势迅猛发展, 不到 30 年的时间已经让它的用户遍布全球, 而且这些用户几乎囊括了各行各业的人。其应用领域也从最初的军事使用扩展到人们的日常生活中。在此背景下, 越来越多的高等院校开办了 GPS 的相关课程, 而测绘类专业更是把 GPS 课程作为主干课程进行教学。

重庆交通大学自 2002 年开办测绘工程专业以来, 便一直把《GPS 测量原理及应用》作为本专业的主干课程之一。作者自 2003 年从事教学工作至今, 就一直负责 GPS 课程的教学工作。通过近十年的教学工作, 作者逐渐总结了一些 GPS 的教学经验, 积累了大量的教学资料和教学素材。为了进一步提高教学质量, 提升本专业的竞争能力, 重庆交通大学测绘工程专业申请并获得了“专业提升计划”项目的资助, 以便从软、硬件方面增强办学条件。借此机会, 项目组组织编写了本教材, 主要目的是提高本专业 GPS 课程的教学质量, 提升学生的专业素养。

本教材重在介绍 GPS 的基本原理、基本理论, 着重介绍在测量领域 GPS 的应用, 书中省略了一些较抽象和深奥的数学公式的推演过程, 力求做到重点突出、概念准确、通俗易懂, 以满足 40 学时的教学要求。

本教材内容共分 9 章。其中第 1 章主要介绍 GPS 的发展、系统的组成及其他同类导航定位系统; 第 2 章主要介绍了 GPS 定位常用的坐标系统和时间系统; 第 3 章主要介绍了 GPS 卫星运动的相关知识和概念; 第 4 章主要介绍了 GPS 卫星信号的内容、调制、解调及 GPS 卫星信号接收设备的相关知识; 第 5 章主要介绍了 GPS 的定位原理、各种定位方法及测量定位的数学模型等内容; 第 6 章主要介绍了 GPS 定位的误差源及处理方法; 第 7 章主要介绍了 GPS 测量的设计与实施等内容; 第 8 章主要介绍了 GPS 数据处理的过程、数学模型及处理方法和步骤; 第 9 章则主要介绍了 GPS 在各行各业的应用情况。

本教材由邓明镜、刘国栋、徐金鸿、倪健主编, 全书由邓明镜组稿和统稿。在编写过程中, 作者借鉴和参考了一些 GPS 相关文献、著作、教材及网上的一些资料, 在此对撰写这些资料的同行表示衷心的感谢。此外, 重庆交通大学测绘系的各位同仁在编写期间提出了许多宝贵的意见和建议, 在此一并表示诚挚的感谢。

最后, 由于作者的水平有限, 书中难免有不足之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月 10 日于重庆

目 录

1 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 全球卫星定位技术的发展	2
1.3 GPS 系统的组成	10
1.4 GPS 定位系统的特点	13
1.5 卫星导航系统发展态势	14
思考题	15
2 GPS 坐标系统和时间系统	17
2.1 GPS 坐标系统	17
2.2 GPS 时间系统	30
思考题	37
3 GPS 卫星运动基础及星历	38
3.1 概 述	38
3.2 卫星的无摄运动	39
3.3 卫星的受摄运动	46
3.4 GPS 卫星星历	50
3.5 GPS 卫星位置计算	53
思考题	56
4 GPS 卫星信号与接收机	57
4.1 GPS 卫星的测距码信号	57
4.2 GPS 卫星的导航电文	61
4.3 GPS 卫星信号的调制与解调	66
4.4 美国对 GPS 卫星信号的限制性使用政策	68
4.5 GPS 卫星信号接收机	70
思考题	75
5 GPS 定位原理及定位方法	76
5.1 概 述	76
5.2 GPS 定位的观测量及观测方程	79
5.3 GPS 绝对定位	87

5.4	GPS 相对定位	95
5.5	差分 GPS 定位原理	122
	思考题	140
6	GPS 定位误差分析	142
6.1	与卫星有关的误差	143
6.2	与卫星信号传播有关的误差	147
6.3	与接收设备有关的误差	161
6.4	其他有关的误差	163
	思考题	164
7	GPS 测量的设计与实施	165
7.1	GPS 测量的技术设计	165
7.2	GPS 测量的外业准备和实施及技术设计书的编写	174
7.3	GPS 相对定位作业模式	181
7.4	GPS 数据预处理及观测成果的质量检核	185
7.5	GPS 技术总结与上交资料	191
	思考题	192
8	GPS 测量数据处理	195
8.1	GPS 数据传输与预处理	195
8.2	GPS 基线向量解算	198
8.3	GPS 定位成果的坐标转换	206
8.4	GPS 基线向量网平差	210
8.5	GPS 高程	220
	思考题	230
9	GPS 测量技术的应用	231
9.1	GPS 在大地控制测量中的应用	231
9.2	GPS 在精密工程测量及变形监测中的应用	234
9.3	GPS 在摄影测量与遥感技术中的应用	240
9.4	GPS 在工程测量中的应用	243
9.5	GPS 在其他领域中的应用	251
9.6	GPS 新的应用领域简介	271
	思考题	275
	参考文献	276

1 绪 论

1.1 概 述

GPS 是全球定位系统 (Global Positioning System) 的英文缩写。GPS 于 1973 年由美国政府组织研究, 耗费巨资, 历经约 20 年, 于 1993 年全部建成。该系统是伴随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和定位系统, 不仅具有全球性、全天候、连续的三维测速、导航、定位与授时能力, 而且具有良好的抗干扰性和保密性。该系统的研制成功已成为美国导航技术现代化的重要标志, 被视为 20 世纪继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的又一重大科技成就。

GPS 的研制最初主要用于军事目的。如为陆海空三军提供实时、全天候和全球性的导航服务, 并用于情报收集、核爆监测、应急通讯和爆破定位等方面, 其作用已在 1991 年海湾战争中得到了证实。以美国为首的多国部队所持有的 17 000 台 GPS 接收机被认为是作战武器的效率倍增器, 是赢得海湾战争胜利的重要技术条件之一。随着 GPS 系统步入试验和实用阶段, 其定位技术的高度自动化及所达到的高精度和巨大的潜力, 引起了各国政府的普遍关注, 同时引起了广大测量工作者的极大兴趣。特别是近几年来, GPS 定位技术在应用基础的研究、新应用领域的开拓、软硬件的开发等方面都取得了迅速发展。目前, GPS 精密定位技术已经广泛地渗透到了经济建设和科学技术的许多领域, 尤其是在大地测量学及其相关学科领域, 如地球动力学、海洋大地测量学、天文学、地球物理和资源勘探、航空与卫星遥感精密工程测量; 变形监测、城市控制测量等方面的广泛应用, 充分显示了这一卫星定位技术的高精度和高效益。这预示测绘界将面临着一场意义深远的变革, 从而使测绘领域步入一个崭新的时代。

早在 20 世纪 80 年代初, 我国一些院校和科研单位就已开始研究 GPS 技术。近 30 年来, 我国的测绘工作者在 GPS 定位基础理论研究和应用开发方面做了大量工作。80 年代中期, 我国引进 GPS 接收机, 并应用于各个领域, 同时着手研究建立我国自己的卫星导航系统。据有关人士估计, 目前我国的 GPS 接收机拥有量在 20 万台左右, 而且以每年以大约 2 万台的速度增加。这足以说明 GPS 技术在我国各行业中应用的广泛性。

在大地测量方面, 主要利用 GPS 技术开展国际联测, 建立全球性大地控制网, 提供高精度的地心坐标, 测定和精化大地水准面。我国曾组织各部门 (十多个单位, 三十多台 GPS 双频接收机) 参加 1992 年全国 GPS 定位大会战。经过数据处理, GPS 网点地心坐标精度优于 0.2 m, 点间位置精度优于 10^{-8} 。在我国建成了平均边长约 100 km 的 GPS A 级网, 提供了亚米级精度的地心坐标基准。此后, 在 A 级网的基础上, 我国又布设了边长为 30 ~ 100 km 的 B 级网, 全国约 818 个点。A、B 级 GPS 网点都联测了几何水准。这样, 就为我国各部门的

测绘工作、建立各级测量控制网, 提供了高精度的平面和高程三维基准。我国已完成西沙、南沙群岛各岛屿与大陆的 GPS 联测, 使海岛与全国大地网联成一整体。

值得指出的是, 从 GPS 整个应用而言, 我国所有的 GPS 芯片和 OEM 接收板几乎都是靠进口, 国内也没有开发出高水平的整机和系统。在 GPS 车辆跟踪方面, 所使用的 GPS 核心定位产品主要来源为美国、日本、韩国和中国台湾等地, 而大陆商家鲜有人开发核心定位产品, 基本都是在这些核心产品上进行二次开发, 生产车载终端、自导航和手持定位仪等产品。

1.2 全球卫星定位技术的发展

1.2.1 第一代卫星导航系统的产生与发展

1967 年 7 月 29 日, 美国政府宣布海军导航卫星系统 (NNSS), 亦称子午卫星 (TRANSIT) 系统的部分导航电文解密, 供民间使用。这种由测站上接收机直接对空间卫星进行多普勒测量的定位技术遂迅速兴起, 应用于导航和大地定位。实践证明, 卫星多普勒定位技术, 不受天气的限制, 只要能接收到子午卫星信号, 便可借助已知的卫星轨道信号, 进行单点定位或双点联测定位, 进而确定测站的三维地心坐标或两点的坐标差。因此, 这项新技术迅速地从美国传播到北美、欧亚诸国, 得到了广泛的应用。20 世纪 80 年代初, 我国也引进了一些多普勒接收机, 将其应用于导航和大地测量中。子午卫星导航系统的星座由 6 颗独立轨道的极轨卫星组成, 轨道倾角 $i = 90^\circ$; 卫星运行周期为 $T = 107 \text{ min}$; 卫星高度约为 $H = 1\,075 \text{ km}$; 按理论上的设计, 6 颗卫星应当均匀分布在相互间隔为 30° 的轨道平面上, 如图 1.1 所示。地面系统设有 4 个卫星跟踪站, 1 个计算中心, 1 个控制中心, 2 个注入站, 1 个天文台 (海军天文台)。

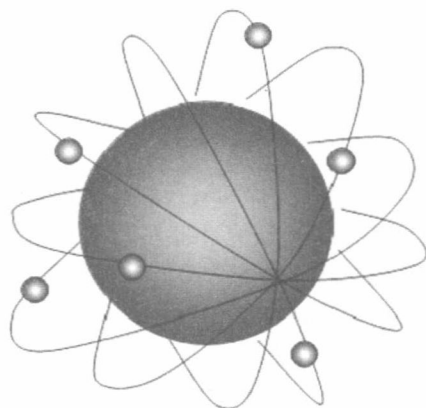


图 1.1 子午卫星星座

子午卫星导航系统虽对导航和定位技术起了一定的革新作用, 但仍然存在着如下一些明显的缺陷:

(1) 卫星数少。

每隔 1~2 h 才有一次卫星通过而进行跟踪观测, 在低纬度地区最不利时要等待 10 h 才

能观测到卫星, 这样该系统就很难满足用户连续导航的需要, 不能进行实时连续定位。

(2) 轨道低, 难以精密定轨。

卫星轨道低, 受到地球不规则重力场的引力摄动和大气阻力摄动的影响很大, 低轨卫星精确定轨的测算难度很大且精度不高。由于卫星引力摄动和阻力摄动计算不准导致的定位误差可达 1~2 m。

(3) 频率低, 难以补偿电离层效应的影响。

因为电离层是电磁波的弥散介质, 对不同频率的信号传播速度影响很大。频率越低导致的误差就越大。

1.2.2 第二、三代卫星导航系统

美国国防部于 1973 年批准建立新一代卫星导航系统——导航卫星定时测距全球定位系统 (Navigation Timing and Ranging Global Positioning System), 简称全球定位系统。它是一种可以定时和测距的空间交汇定点的导航系统, 可向全球用户提供连续、实时、高精度的三维位置、三维速度和时间信息, 为陆、海、空三军提供精密导航, 也可用于情报收集、核爆监测、应急通信和卫星定位等一些军事目的。

GPS 计划实施共分三个阶段:

第一阶段为方案论证和初步设计阶段。从 1973 年到 1979 年, 共发射了 4 颗试验卫星, 研制了地面接收机及建立地面跟踪网, 从硬件和软件上进行了试验。试验结果令人满意。

第二阶段为全面研制和试验阶段。从 1979 年到 1984 年, 又陆续发射了 7 颗试验卫星。这一阶段称之为 Block I。与此同时, 研制了各种用途的接收机, 主要是导航型接收机, 同时测地型接收机也相继问世。试验表明, GPS 的定位精度远远超过设计标准。利用粗码的定位精度几乎提高了一个数量级, 达到 14 m。由此证明, GPS 计划是成功的。

第三阶段为实用组网阶段。1989 年 2 月 4 日第一颗 GPS 工作卫星发射成功, 宣告了 GPS 系统进入工程建设阶段。这种工作卫星称为 Block II 和 Block II A 卫星。这两组卫星的差别是: Block II 卫星只能存储供 14 d 用的导航电文 (每天更新 3 次); 而 Block II A 卫星增强了军事应用功能, 扩大了数据存储容量, 能存储供 180 d 用的导航电文, 确保在特殊情况下使用 GPS 卫星。实用的 GPS 网即 (21+3) GPS 星座已经建成, 今后将根据计划更换失效的卫星。

美国的第二代 GPS 卫星是实用的工作卫星, 它包括 GPS-II、GPS-II A、GPS-II R 和 GPS-II F 这 4 种不断改进的型号。从 1989 年首次发射 GPS-II 卫星以来, 共发射了约 40 颗卫星, 其中成功入轨的 GPS-II 卫星为 9 颗, GPS-II A 为 20 颗, GPS-II R 为 7 颗。GPS-II F 计划定购 12 颗 (见图 1.2), 已于 2010 年 5 月成功发射了第一颗卫星 GPS II F-1。GPS II F-1 卫星将提供更加精确、有力的信号, 拥有更长的设计寿命, 届时世界范围内大约 10 亿民事和军事用户将从中获益。GPS II F-1 卫星是一颗太阳能卫星, 使用年限为 12 年, 远远超过它的前辈们。GPS II F-1 卫星先进性还体现在: 军事方面, 它拥有更强的阻断式反干扰信号, 定位精确度是以前 GPS 卫星的两倍; 商业方面, 将大大提升航空安全, 增强航空搜救能力以及巨大提升新型卫星之间协作信号的精度。

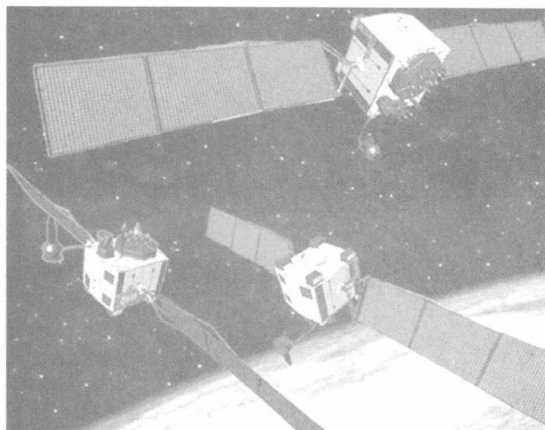


图 1.2 GPS II F 卫星

从 GPS 的提出到 1993 年建成, 经历了 20 年, 实践证明, GPS 对人类活动影响极大, 应用价值极高, 所以得到美国政府和军队的高度重视, 使其不惜投资 300 亿美元来建立这一工程。这项工程也成为继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的第三项庞大空间计划。

GPS 从根本上解决了人类在地球上的导航和定位问题, 可以满足各种不同用户的需要。对舰船而言, 它能在海上协同作战, 在海洋交通管制、海洋测量、石油勘探、海洋捕鱼、浮标建立、管道和电缆铺设、海岛暗礁定位、海轮进出港引航等方面作出贡献。对飞机而言, 它可以在飞机进场着陆、航线导航、空中加油、武器准确投掷及空中交通管制等方面进行服务。在陆地上, 可用于各种车辆、坦克、陆军部队、炮兵、空降兵和步兵等的定位; 可用于大地测量、摄影测量、野外考察和勘探的定位; 甚至进入到人们的日常生活中, 例如, 汽车、旅游、探险、狩猎等方面的定位。特别是用于精密定位的测地型接收机的出现, 给大地测量带来了革命性的变化, 成为 GPS 应用的重要分支。在空间技术方面, 可以用于弹道导弹的引导和定位、空间飞行器的精密定轨等。总之, GPS 定位系统的建立, 给导航和定位技术带来了巨大的变化。

从覆盖范围、信号可靠性、数据内容、准确度以及多用性这五项指标来看, GPS 定位系统都远比先前的子午卫星导航系统优越, 它不仅能满足精密导航等一系列军事目的, 还能对卫星信号进行载波相位测量, 达到精密相对定位。因此, GPS 定位系统为民用导航、测速、时间比对和大地测量、工程勘测、地壳监测等众多领域, 展现了极其广阔的应用前景。它的问世已导致测绘行业的一场深刻的技术革命。

1.2.3 GLONASS 全球卫星导航系统

GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) 是全球轨道导航卫星系统, 是苏联为满足授时、海陆空定位与导航、大地测量与制图、生态监测研究等建立的, 1978 年开始研制该系统, 1982 年 10 月开始发射导航卫星。自 1982—1987 年, 共发射了 27 颗 GLONASS 试验卫星。期间因苏联解体, 几经波折, 最后由俄罗斯于 1996 年建成投入运行使用。该系统与美国的全球定位系统同属于第二代卫星定位系统。

与美国的 GPS 相似, 该系统也开设民用窗口。GLONASS 技术, 可为全球海陆空以及近地空间的各种军、民用户全天候、连续地提供高精度的三维位置、三维速度和时间信息。GLONASS 在定位、测速及定时精度上则优于施加选择可用性 (SA) 之后的 GPS, 由于俄罗斯向国际民航和海事组织承诺将向全球用户提供民用导航服务, 并于 1990 年 5 月和 1991 年 4 月两次公布 GLONASS 的 ICD, 为 GLONASS 的广泛应用提供了方便。GLONASS 的公开化, 打破了美国对卫星导航独家经营的局面, 既可为民间用户提供独立的导航服务, 又可与 GPS 结合, 提供更好的精度几何因子 (GDOP), 同时也降低了美国政府利用 GPS 施以主权威慑给用户带来的后顾之忧, 因此, 它引起了国际社会的广泛关注。

GLONASS 系统使用 24 颗卫星实现全球定位服务, 可提供高精度的三维空间和速度信息, 也提供授时服务。GLONASS 星座由分布在三个独立椭圆轨道的 24 颗卫星组成, 其中 21 颗工作卫星, 3 颗备用卫星, 平均每个轨道上分布 8 颗卫星, 卫星轨道倾角 $i = 64.8^\circ$; 卫星运行周期 $T = 11 \text{ h } 15 \text{ min}$ (恒星时 11.28 h); 卫星高度 $H = 19\,100 \text{ km}$ 。1996 年 1 月 18 日整个系统正式运转, 其星座如图 1.3 所示。和 GPS 系统不同, GLONASS 系统使用频分多址 (FDMA) 的方式, 每颗 GLONASS 卫星广播两种信号: L_1 和 L_2 信号。GLONASS 地面控制站组 (GCS) 设有 1 个系统控制中心 (在莫斯科区的 Golitsyno-2), 1 个指令跟踪站 (CTS), 整个跟踪网络分布于俄罗斯境内; GLONASS 系统定位精度为在 95% 的概率条件下, 水平精度: $\pm 50 \sim 70 \text{ m}$; 垂直精度: $\pm 75 \text{ m}$; 测速精度: $\pm 15 \text{ cm/s}$; 授时精度: $\pm 1 \mu\text{s}$ 。

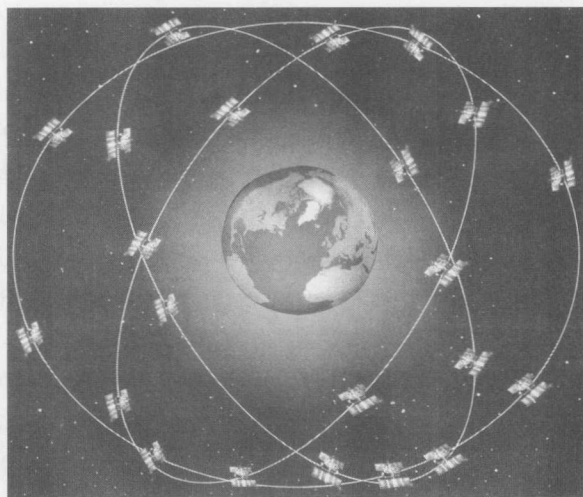


图 1.3 GLONASS 卫星星座

由于航天拨款不足, 该系统部分卫星一度老化, 最严重时只剩 6 颗卫星运行。2003 年 12 月, 由俄罗斯应用力学科研生产联合公司研制的新一代卫星交付联邦航天局和国防部试用, 为 2008 年全面更新 GLONASS 系统做准备。在技术方面, GLONASS 系统的抗干扰能力比 GPS 要好, 但其单点定位精度不及 GPS 系统。2004 年, 印度和俄罗斯签署了《关于和平利用俄全球导航卫星系统的长期合作协议》, 正式加入了 GLONASS 系统, 计划联合发射 18 颗

导航卫星。2006年12月25日,俄罗斯用质子-K运载火箭发射了3颗GLONASS M卫星,使GLONASS系统的卫星数量达到17颗。2011年2月26日发射了一颗GLONASS K卫星。

在技术方面,GLONASS与GPS相比,有以下几点不同之处:

(1) 卫星发射频率不同。

GPS的卫星信号采用码分多址体制,每颗卫星的信号频率和调制方式相同,不同卫星的信号靠不同的伪码区分。而GLONASS采用频分多址体制,卫星靠频率不同来区分,每组频率的伪随机码相同。基于这个原因,GLONASS可以防止整个卫星导航系统同时被敌方干扰,因而,具有更强的抗干扰能力。

(2) 坐标系不同。

GPS使用世界大地坐标系(WGS-84),而GLONASS使用苏联地心坐标系(PZ-90)。

(3) 时间标准不同。

GPS系统时与世界协调时相关联,而GLONASS则与莫斯科标准时相关联。

此外,由于GLONASS没有施加SA干扰(Selective Availability),所以它的民用精度优于施加SA干扰的GPS系统(注:2000年5月1日起,GPS的SA的干扰已被解除)。但是,GLONASS的应用普及度还远不及GPS,这主要是由于俄罗斯长期以来不够重视开发民用市场。不过,目前已有包括苹果iPhone 4S、iPhone5、索尼Xperia S在内的数款智能手机搭载了GLONASS和GPS双定位系统,诺基亚也曾表示将在其即将推出的手机中使用GLONASS。2012年7月23日三星推出了支持美国GPS与俄罗斯GLONASS系统,共拥有48颗卫星定位的GALAXY-Ace-2手机。

1.2.4 伽利略(GALILEO)全球卫星导航系统

伽利略定位系统(Galileo Positioning System),是欧盟一个正在建造中的卫星定位系统,有“欧洲版GPS”之称,也是继美国的GPS及俄罗斯的GLONASS系统之后,第三个可供民用的定位系统。伽利略系统的基本服务有导航、定位、授时;特殊服务有搜索与救援;扩展应用服务系统有在飞机导航和着陆系统中的应用、铁路安全运行调度、海上运输系统、陆地车队运输调度、精准农业。2010年1月7日,欧盟委员会称,欧盟的伽利略定位系统将从2014年起投入运营并在2019年完工。

1999年2月10日,欧盟执行机构欧洲委员会(EC)公布了欧洲导航卫星系统“伽利略”计划,该系统是与美国全球定位系统(GPS)和俄罗斯的GLONASS系统兼容的民用全球定位卫星系统。欧盟之所以进行“伽利略”计划,主要是为了摆脱对美国GPS系统的依赖,打破美国对全球卫星导航定位产业的垄断,在使欧洲获得工业和商业效益的同时,赢得建立欧洲共同安全防务体系的条件。其实,欧空局(ESA)早在1990年就决定研制“全球导航卫星系统(GNSS)”,GNSS分为两个阶段:第一阶段是建立一个与美国GPS系统、俄罗斯GLONASS系统以及三种区域增强系统均能相容的第一代全球导航卫星系统(GNSS-1),第二阶段是建立一个完全独立于GPS系统和GLONASS系统之外的第二代全球导航卫星系统(GNSS-2)。由于GNSS-1主要是利用GPS等已经建成的系统,因此其主要工作是在欧洲建立30座地面站和4个主控制中心,系统在2002年部署完毕,2004年完成运营试验。

欧洲的长远目标是拥有自己的独立的全球导航卫星系统,即 GNSS-2,也就是现在的“伽利略”系统。

2003年5月26日,欧盟及欧洲航天局通过了伽利略计划的第一部分,包括于1999年从法国、德国、意大利及英国四国各自提出的不同概念中,经四国的工程师将之整合而成的共同概念设计。该系统主要是供民用,与设计作军事用途的GPS系统不同,因美国保留可限制GPS的信号强度、准确度以及把整组系统关闭的权力,因此当美国介入某场重大战争,民间有可能无法使用GPS。还有,美国政府是于2000年才开始放宽民间使用GPS系统的限制。理论上,欧洲的伽利略系统是会把系统资源全部抽作军事用途,并会提供比GPS更准确的结果,到系统完工开放时,将会开放予全球的军民共同使用。

欧洲委员会在为系统的下一部分作安全注资时遇上了麻烦,当时一些欧洲国家出现经济衰退,在注资时也格外小心。在“9·11”事件发生之后,美国政府大力反对欧盟的伽利略计划,扬言当美国采取军事行动时,欧盟的伽利略系统只会“令GPS系统的开关形同虚设”。2002年1月17日,伽利略计划一名发言人表示,在美国的压力下,伽利略计划“接近死亡”。

几个月后,事件出现戏剧性转变,美国政府对“伽利略计划”态度开始软化,而欧盟成员国认为它们也应拥有自己的定位及计时系统,至2002年年底,计划获得不少成员国的认同及支持,也因此出现了过度注资。这使得欧洲航天局面临一个新难题——如何去减低成员国的注资。

2003年3月20日,美国联同另外三个国家开始进攻伊拉克,使得欧盟加速去研发一组不受美国控制的定位系统。

欧盟及欧洲航天局于2002年3月接受了计划的注资,并在2003年5月26日作总结报告,至2005年年底,其资金为11亿欧元。该系统将使用30颗人造卫星,会于2006年至2010年间陆续发射升空,并将于2010年供民间使用。系统的总耗资将达30亿欧元,包括在地球上的控制中心等内部架构,它们将会于2006年至2007年间建造。所需资金当中,将有近2/3是来自私营公司及投资者,其余1/3将由欧盟及欧洲航天局拨出。在系统开放使用时,支持伽利略的接收装置将可使用,另外系统将提供收费的增值服务,包括免费服务没有的加密数据、准确度及更高的带宽。

2004年6月,欧盟通过系统使用频率的标准,将采用美国的“二进制偏置载频1.1”标准,使欧美双方军力均可互相拦截对方系统的信号,从而无需把整组系统关掉。

2005年12月28日,格林尼治时间清晨5点19分,“伽利略”系统的首颗实验卫星“GIOVE-A”由俄罗斯“联盟-FG”火箭从哈萨克斯坦的拜科努尔航天中心发射升空。直到2008年4月27日,“伽利略”系统的第二颗实验卫星才升空,此时距上次发射已经有差不多四年时间,这样的进度,比最初的计划推迟了整整五年。

2010年1月7日,欧盟委员会称,欧盟的伽利略卫星导航系统将从2014年起投入运营。由于各成员国存在分歧,计划已几经推迟。

2011年10月,欧洲伽利略定位系统的其中2枚卫星(Soyuz Rocket)在法属圭亚那太空中心由俄罗斯联盟号运载火箭搭载升空。

中国早在2003年9月18日,就和欧盟草签了中国参与“伽利略”计划的协议。2004年10月9日,双方又签署了此项目的技术合作协议,计划投资2.3亿欧元;第一笔7000万欧元的款项很快就打到欧方账户上,因而引发美国媒体发出美国可能击毁“伽利略”卫星的报

道。可见, 此项目不但具有极高经济价值, 也深具政治和军事战略意义。参与“伽利略”计划是迄今为止中国与欧洲最大的合作计划。

伽利略定位导航系统的卫星星座计划由 3 个独立的圆形轨道, 30 颗 GNSS 卫星组成 (27 颗工作卫星、3 颗备用卫星)。卫星分布在 3 个轨道上, 每个轨道上部署 9 颗工作卫星和 1 颗备用卫星, 如图 1.4 所示。若某颗工作星失效, 备用卫星将迅速进入工作位置, 替代其工作, 而失效星将被转移到高于正常轨道 300 km 的轨道上。卫星的轨道倾角 $i = 56^\circ$; 卫星的公转周期 $T = 14 \text{ h } 23 \text{ min } 14 \text{ s}$ 恒星时; 轨道高度 $H = 23\,616 \text{ km}$ 。地面控制部分, 系统拟在欧洲建立 2 个控制中心; 在全球构建监控网。系统导航定位精度据估计比目前任何定位系统都高 (约比 GPS 高 10 倍)。

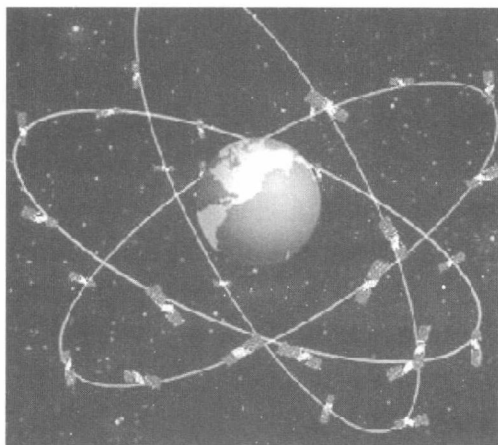


图 1.4 伽利略卫星星座

1.2.5 北斗卫星导航系统

北斗卫星导航系统 (BeiDou (COMPASS) Navigation Satellite System) 包括北斗一号和北斗二号两代系统, 是中国研发的卫星导航系统。北斗一号是一个已投入使用的区域性卫星导航系统, 北斗二号则是一个正在建设中的全球卫星导航系统。北斗卫星导航系统 (北斗二号) 和美国全球定位系统、俄罗斯格洛纳斯系统、欧盟伽利略定位系统被联合国确认为全球 4 个卫星导航系统核心供应商。

较早投入使用的北斗一号由 3 颗定位卫星 (2 颗工作卫星、1 颗备用卫星)、地面控制中心为主的地面部分以及用户终端 3 部分组成。3 颗地球同步静止卫星的轨道倾角 $i = 0^\circ$; 公转周期 $T = 24 \text{ h}$ 恒星时; 轨道高度 $H = 36\,000 \text{ km}$ 。地面控制中心负责系统测控、定位信号的发射与接收、用户坐标的解算与发布、双向授时等。服务区域为东经 $70^\circ \sim 145^\circ$, 北纬 $5^\circ \sim 55^\circ$, 北斗一号卫星导航定位系统可向用户提供全天候的即时定位服务。其平面定位精度为 20 m, 高程精度为 10 m。

北斗一号 (双星导航定位系统) 的定位原理如图 1.5 所示, 地面中心站通过 2 颗同步静止定位卫星传送测距询问信号, 如果用户需要定位则马上回复应答信号。地面中心站可根据用户的应答信号的时差计算出用户星距离, 这样以两颗定位卫星为中心、以两个用户星距离为半

径可作出两个定位球。而两个定位球又和地面交出两个定位圆，用户必定位于两个定位圆相交的两个点上（这两个交点一定是以赤道为对称轴南北对称的）。地面中心站求出用户坐标后，再根据坐标在地面数字高程模型读出用户高程，进而让卫星转告用户。

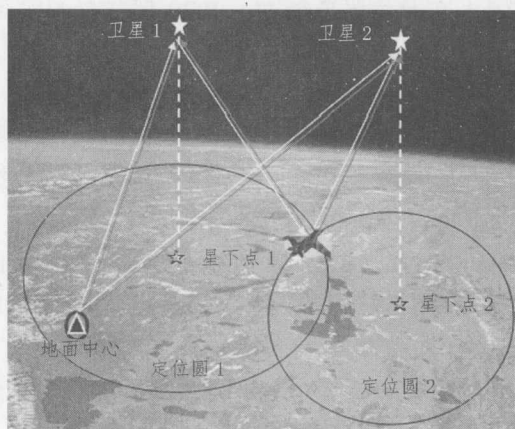


图 1.5 北斗一号定位原理

双星导航定位系统的最大优点是系统简单，投资少，而最大缺点是只能实施局域定位，接收发射机功率大且笨重，还会暴露用户目标，在战时这是兵家最忌讳的事情。

北斗二号是中国开发的独立的全球卫星地位系统，不是北斗一号的简单延伸，更类似于 GPS 全球定位系统和伽利略导航系统。

正在建设的北斗二号卫星导航系统空间段将由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，其卫星星座如图 1.6 所示。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 GLONASS、欧洲 GALILEO 等其他卫星导航系统兼容的终端组成。系统提供即开放服务和授权服务。开放服务是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 10 ms，测速精度为 0.2 m/s。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。

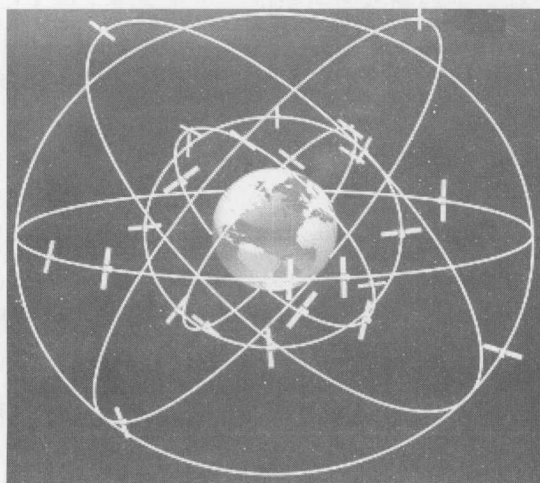


图 1.6 北斗导航系统星座

2012年10月25日,我国在西昌卫星发射中心用“长征三号丙”运载火箭,成功将第16颗北斗导航卫星发射升空并送入预定转移轨道。将与先期发射的15颗北斗导航卫星组网运行,形成区域服务能力。按照建设规划,2012年年底,北斗卫星导航系统将首先提供覆盖亚太地区的导航、授时和短报文通信服务能力。2020年左右,覆盖全球的北斗卫星导航系统将建成。

北斗二号卫星导航系统的主要特点如下:

(1) 北斗导航轨道是个特殊的混合轨道,可提供更多的可见卫星的数目。卫星越多,导航定位的精度越高,能支持更长的连续观测时间和更高精度导航数据。北斗卫星导航系统开放服务可以向全球免费提供定位、测速和授时服务。

(2) 北斗卫星导航系统和美国的GPS、俄罗斯的GLONASS相比,增加了通讯功能,一次可传送多达120个汉字的信息,即通过卫星导航终端设备可及时报告用户所处位置。这个功能在远洋航行、救灾等方面都有重要的应用价值。

(3) 用户与用户之间可实现数据交换。比如物流公司监控,把车上所有货物的信息通过传感器发到信息中心,就可以用北斗链路完成信息收集后进行发射。只要到了信息中心,可以自动算出发射时间和位置,信息量比GPS强得多。

(4) 北斗卫星导航系统功能具备与GPS、GALILEO广泛的互操作性。北斗用户机可接收北斗、GPS、GALILEO卫星信号,并且实现多种原理的位置报告,稳定性更高。

1.3 GPS系统的组成

GPS定位技术是利用高空中的GPS卫星,向地面发射L波段的载频无线电测距信号,由地面上用户接收机实时地连续接收,并计算出接收机天线所在的位置。因此,GPS定位系统由以下三个部分组成:

- (1) GPS卫星星座(空间部分);
- (2) 地面监控系统(地面控制部分);
- (3) GPS信号接收机(用户设备部分)。

这三部分有各自独立的功能和作用,对于整个全球定位系统来说,它们都是不可缺少的。

1.3.1 GPS卫星星座

1. GPS卫星星座

全球定位系统的空间星座部分,最初由24颗卫星组成,其中包括3颗可随时启用的备用卫星,如图1.7所示。工作卫星分布在6个近圆形轨道面内,每个轨道面上有4颗卫星。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角为 55° ,各轨道平面升交点的赤经相差 60° ,同一轨道上两卫星之间的升交角距相差 90° ,轨道平均高度为20 200 km,卫星运行周期为11 h 58 min。同时,在地平线以上的卫星数目随时间和地点而异,最少为4颗,最多时达11颗。

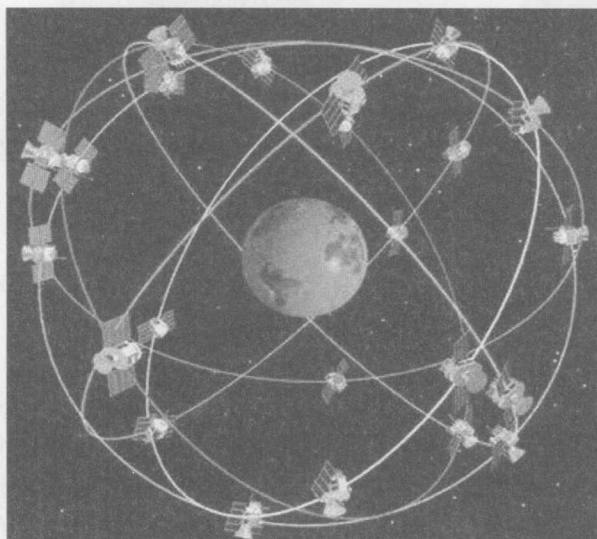


图 1.7 GPS 卫星星座

上述 GPS 卫星的空间分布, 保障了在地球上任何地点、任何时刻均至少可同时观测到 4 颗卫星, 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。

2. GPS 卫星及功能

GPS 卫星的主体呈圆柱形, 设计寿命为 7.5 年。主体两侧配有能自动对日定向的双叶太阳能集电板, 为保证卫星正常工作提供电源; 通过一个驱动系统保持卫星运转并稳定轨道位置。GPS 卫星的核心部件有高精度时钟、导航电文存储器、信号发射和接收机及微处理机。每颗卫星装有 4 台高精度原子钟 (铷钟和铯钟各两台), 以保证发射出标准频率 (稳定度为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$), 为 GPS 测量提供高精度的时间信息。

在全球定位系统中, GPS 卫星的主要功能是: 接收、储存和处理地面监控系统发射来的导航电文及其他有关信息; 向用户连续不断地发送导航与定位信息, 并提供时间标准、卫星本身的空间实时位置及其他在轨卫星的概略位置; 接收并执行地面监控系统发送的控制指令, 如调整卫星姿态和启用备用时钟、备用卫星等。

1.3.2 GPS 地面监控部分

GPS 地面监控系统主要由分布在全球的五个地面站组成, 按其功能分为主控站 (Master Control Station, MCS)、注入站 (又称地面天线站, Ground Antenna, GA) 和监测站 (Monitor Station, MS) 三种, 其具体点位如图 1.8 所示。