

全国高职高专工程测量技术专业规划教材

GPS测量技术

王勇智 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

全国高职高专工程测量技术专业规划教材

GPS测量技术

王勇智 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本书是全国高职高专工程测量技术专业统编通用教材,是依据全国高职“工程测量技术”专业通用教材编写(武汉)会议制定的教学大纲,由具有多年高职GPS课程教学经验的教师,在理论教学和应用实践的基础上编写完成的。全书共9章,第1章至第3章主要介绍了GPS测量的基础知识;第4章和第5章介绍了GPS测量的基本原理和测量误差;第6章和第7章介绍了GPS测量的外业实施和GPS测量数据的处理;第8章介绍了常规RTK和GPS测量技术的发展趋向——网络RTK的应用;第9章介绍了GPS测量技术在其他领域中的应用。

本书主要供高职工程测量技术、地理信息系统、摄影测量、地籍测量与土地管理等测绘类专业的教学使用,也可以作为高职水利水电工程、工程监理、道路与桥梁、房屋建筑技术、市政工程技术、施工技术与管理、水文与水资源等专业的教材使用,也可供与GPS测量有关的工程技术人员作为自学教材或参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

GPS测量技术/王勇智主编. —北京:中国电力出版社,2007

全国高职高专工程测量技术专业规划教材

ISBN 978-7-5083-5468-2

I. G… II. 王… III. 全球定位系统(GPS)-测量-高等学校:技术学校-教材 IV. P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第055207号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策划编辑:王晓蕾 责任编辑:姚兰

责任印制:陈焊彬 责任校对:崔燕

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2007年8月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.25印张·300千字

定价:25.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

前 言

本教材是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》的文件精神，按照全国高职高专“工程测量技术”专业通用教材编写（武汉）会议规划，组织全国十三所高职院校编写的全国“工程测量技术”通用系列教材之一。

自 20 世纪 70 年代以来，以美国全球定位系统（GPS）为代表的全球卫星导航定位系统（GNPSS），以其全球性、全天候、高精度、高效益的特点，已成功地应用于气象、遥感、通信、导航、地球科学、地球动力学、天文学、大地测量、工程测量、资源勘查、灾情预报、紧急救援、环境监测以及军事科学诸多领域，广泛地影响着 21 世纪人类生活的各个方面。特别是网络 RTK 的发展，使得 GPS 的应用满足了高速度且高精度的要求。

由美国、俄罗斯、欧盟均不惜巨资建立自己的全球卫星导航定位系统可见，该系统对于一个国家在政治、经济以及军事方面的重要意义。我国也在建立自己的北斗号导航定位系统，目前已有 5 颗在轨实验卫星，并将逐步发展为全球性的卫星导航定位系统。

可以预言，随着科学技术的发展，全球卫星导航定位技术必将与移动通信技术、互联网技术一起成为影响 21 世纪人类生活的三大技术。

本教材具有较强的实用性和通用性，着力体现高职教育的特点，力求满足高职教育培养高级“岗位”型人才的要求，强调应用，加强实践。本教材突出“以能力为本体”、“必需够用”的指导思想，编写中力求做到基本概念准确、内容精炼、文字简练、通顺易懂，以利于学生学习，培养学生解决工程中实际问题的能力。

本教材主要是满足高职工程测量技术、地理信息系统、摄影测量、地籍测量与土地管理等测绘类专业的教学需要，也可以作为水利水电工程、工程监理、道路与桥梁、工业与民用建筑、市政工程技术、施工技术与管理、水文与水资源等专业的教材使用，也可供相关工程技术人员作为自学教材或参考书。

本教材由王勇智担任主编，郝海森、牛志宏、杜玉柱、左美蓉任副主编。编写人员及分工如下：王勇智编写第 1 章和附录；郝海森编写第 2 章；牛志宏编写第 6 章；杜玉柱编写第 3 章和第 8 章；左美蓉编写第 5 章和第 7 章；聂琳娟编写第 4 章；马玉晓编写第 9 章。全书由王勇智统稿。

解放军信息工程大学测绘学院翟翊教授审阅了本教材，提出了宝贵的修改意见，在此表示真挚的感谢。

限于编者的水平、经验及时间，书中难免会有欠妥之处，敬请专家、同行和读者斧正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星导航定位技术的发展	1
1.2 俄罗斯的全球导航卫星系统——GLONASS	6
1.3 欧盟的伽利略全球卫星导航系统——GNSS	7
1.4 我国的卫星导航定位系统——北斗号	8
1.5 美国的 GPS 政策和我国的 GPS 跟踪网	10
1.6 我国的 A, B 级 GPS 大地控制网	12
本章小结	13
思考与练习题	13
第 2 章 GPS 测量的坐标系统和时间系统	15
2.1 坐标系统的类型	15
2.2 天球坐标系	17
2.3 地球坐标系	20
2.4 国家大地坐标系与世界大地坐标系	25
2.5 时间系统	29
本章小结	31
思考与练习题	32
第 3 章 GPS 系统组成与 GPS 卫星信号	33
3.1 GPS 系统的组成	33
3.2 GPS 卫星运动	37
3.3 GPS 卫星星历及卫星位置计算	43
3.4 GPS 卫星信号	49
3.5 GPS 信号的接收	54
本章小结	61
思考与练习题	61
第 4 章 GPS 测量的基本原理	63
4.1 GPS 测量概述	63
4.2 GPS 静态定位原理	68
4.3 GPS 动态定位原理	78
本章小结	84
思考与练习题	84
第 5 章 GPS 测量误差的来源及其影响	86
5.1 GPS 测量误差的来源及分类	86
5.2 与卫星有关的误差	87

5.3	卫星信号的传播误差	92
5.4	与接收机有关的误差	98
5.5	卫星分布的几何图形强度及其他误差	99
	本章小结	101
	思考与练习题	101
第 6 章	GPS 测量的设计与实施	102
6.1	GPS 测量的技术设计	102
6.2	GPS 控制网的图形设计及原则	107
6.3	GPS 控制网的优化设计	110
6.4	GPS 测前准备及技术设计书的编写	115
6.5	GPS 测量外业实施	117
6.6	技术总结与上缴资料	124
	本章小结	125
	思考与练习题	125
第 7 章	GPS 测量数据处理	126
7.1	概述	126
7.2	基线向量的解算	131
7.3	基线向量网平差	137
7.4	GPS 高程	143
7.5	测后处理软件“基线解算 4.4”介绍	147
	本章小结	157
	思考与练习题	157
第 8 章	实时动态 (RTK) 测量系统及应用	158
8.1	RTK 测量方法概述	158
8.2	常规 RTK 测量系统	160
8.3	网络 RTK 测量系统	164
8.4	RTK 测量技术的应用	166
	本章小结	170
	思考与练习题	170
第 9 章	GPS 测量技术在其他领域中的应用	171
9.1	GPS 在地球动力学及地震监测中的应用	171
9.2	GPS 在城市规划中的应用	173
9.3	GPS 在气象信息测量中的应用	175
9.4	GPS 在公安、交通系统中的应用	177
9.5	GPS 在航海、航空导航中的应用	179
9.6	GPS 在海洋测绘中的应用	182
9.7	GPS 在其他领域中的应用	185
	本章小结	186
	思考与练习题	186
参考文献		187

第1章 绪论

以世界上第一颗人造地球卫星于1957年10月4日成功发射为标志,人类已进入空间科学技术的崭新时代。近50年来,随着卫星测量技术的发展,特别是美国全球定位系统(GPS)的成功建立和应用,使得测绘行业经历了一场深刻的变革。无论是测量精度、适用条件、应用范围,还是在生产效率和经济效益等方面,都发生了巨大飞跃和进步。因此全球导航定位卫星系统(GNPSS),在全球范围内的众多行业中,尤其是在测绘行业有着越来越广泛的应用。可以预言,全球卫星导航定位技术必将与移动通信技术、互联网技术一起成为影响21世纪人类生活的三大技术。本章主要介绍卫星大地测量的发展和各国的已经建成或在建的全球卫星导航定位系统的情况,目的是使学生对此有一个清晰的概念和整体的了解。

1.1 卫星导航定位技术的发展

1.1.1 大地测量的发展概况

大地测量的发展可以追溯到两千多年以前,从人们确认地球是个圆球并实测它的大小开始,大体可分为:古代大地测量、经典(或传统)大地测量和现代大地测量三个阶段。其中,经典大地测量阶段可以从十八世纪中期牛顿、克莱劳确立地球为扁球的理论并从几何和物理两方面来测定地球的大小时算起,到二十世纪中期莫洛琴斯基发展斯托克司理论,形成现代地球形状理论基础为止,差不多整整200年(1750~1950)时间。

经典大地测量阶段的主要任务是为大规模测绘地图服务。为了提高点位测量的精度和速度,许多科学家在测量仪器、测量方法、椭球计算和数据处理方面作了大量研究工作,并取得了丰硕的成果。这些成果至今仍被广泛应用。

1. 三角测量法

17世纪初,光学望远镜开始应用于天象观测,是测绘科学发展史上一次较大的突破。随后光学望远镜普遍应用于各种测量仪器,测量目标可以距测站更远,观测精度可以更高。从1617年三角测量方法开始应用,到1668年放大倍率为40倍的光学望远镜出现,测量成果的精度被成倍地提高了。

2. 最小二乘法

德国数学家、天文学家、物理学家高斯(Carl Friedrich Gauss, 1777~1855)于1794年提出了最小二乘法理论。

3. 重力测量

重力测量就是根据不同的目的和要求使用重力仪测定地面点重力加速度的技术和方法,可分为相对重力测量和绝对重力测量,或按用途分为大地重力测量和物理重力测量。

这个时期由于全球各大陆广泛布设了天文大地三角网,并发展了重力测量,算出了许多著名的双轴参考椭球几何参数,如后来被推荐为1924年国际椭球的海福特(Hayford)椭

球。还有许多正常重力公式，如卡西尼（Kassini）计算的公式被推荐为 1930 年国际正常重力公式。此外大地测量技术的应用效果也很显著，如法国为了统一长度标准建立国际“米”制，而应用了子午弧长测量的结果等。

2003 年 12 月 3 日我国国家测绘局宣布停止使用 1985 重力基本网成果，同时启用 2000 国家重力基本网成果。2000 国家重力基本网由 21 个基准点、126 个基本点和 112 个基本点引点共计 259 个重力控制点组成，覆盖范围涵盖我国大陆、香港特别行政区和澳门特别行政区及部分海域，全网实际精度为 $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，其中基准点精度为 $\pm 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

在新中国成立初期，为了满足经济建设和国防建设的需要，我国的大地测量从 1951 年开始野外工作，到 1971 年在全国范围内布测了近 8 万千米包括 120 多个锁环的一等三角锁。在锁环中间填设二等全面三角网，在青藏高原大部分地区布设了电磁波测距导线。国家天文大地网的布设原则是：①分级布设，逐级控制；②应有足够的精度；③应有足够的密度；④应有统一的规格。国家天文大地网至今仍在发挥着作用。

现代大地测量阶段从 20 世纪中期开始，是在电子技术和空间技术迅猛发展的推动下形成的。电磁波测距、全站仪、电子水准仪、计算机改变了经典测量中的低精度、低效率状况。测量成果精度提高到 10^{-6} 量级以上，并缩短了作业周期，而且使过去无法实现的严密理论计算得以实行。特别是以人造地球卫星为代表的空间科学技术的发展，使测量方式产生了革命性的改变，彻底打破了经典大地测量在点位、精度、时间、应用方面的局限性，不必再受地面条件的种种限制；使建立全球地心大地测量坐标系有了可能；使研究重力场特别是外部重力场几何图形能够迅速实现。空间技术的发展使大地测量的功能更为扩大，大地测量的精度和效率已能配合其他学科用于空间、海洋、以及测定地球的各种动力学变化。概括地说，经典大地测量是以刚体地球为研究对象，是静态的、局部的、相对的测量；而现代大地测量则是以可变地球为对象，是动态的、全球的、绝对的测量。

现代大地测量的主要任务是研究和解决地面点的几何定位、地球重力场的测定、点位和重力场的变化等问题，具体有：

- (1) 建立与维护国家的，以及全球的地面三维大地网，并研究其变化情况。
- (2) 测量并研究地极移动、地壳运动、潮汐等地球动力现象。
- (3) 测定地球重力场及其随时间的变化。

人造地球卫星技术快速发展，使其在空间科学、气象、遥感、通信、导航、地球科学、地球动力学、天文学、大地测量、资源勘查、灾情预报、环境监测、以及军事科学诸领域中得到了广泛的应用。特别是在波黑战争、海湾战争中，现代武器的精确打击得以实现，卫星导航定位技术在其中扮演了无可替代的重要角色。目前世界上几个大国花费巨资，争相研究并建立自己的卫星导航定位系统的决定也就不难理解了。

1.1.1.2 卫星大地测量的发展

卫星大地测量是现代大地测量一个新的重要分支，是以测定近地人造卫星的空间位置和运动异常来解决大地测量问题的一种方法。卫星大地测量的任务是：

- (1) 精确测量地球的大小和形状、地球外部引力场、地极运动、大陆板块间的相对运动以及大地水准面的形状，为大地测量和其他科学提供技术服务。
- (2) 精确测定地面点的地心（地球质心）坐标系内的坐标，从而能够将全球大地网联成一个整体，建立全球统一的大地测量坐标系。

(3) 广泛地应用于空中、海上以及陆地运动载体的导航、监控与调度指挥。

1.1.2.1 卫星大地测量的由来

卫星(或天体)大地测量的基本原理实际上在人造地球卫星出现之前就已形成。当时是以地球的天然卫星——月球为观测对象。最早提出可以用月球观测值研究地球形状的是欧勒(I. A. Euler, 1734—1800)和拉普拉斯(P. S. M. Laplace, 1749—1827)。1768年欧勒是从几何学原理计算出地球子午圈的扁率;1767年拉普拉斯从动力学的角度分析月球绕地运动轨道的异常,详细分析计算了地球的扁率。由于已知量精度不够,月面边缘不齐难以测准,月球太远形成的视差角太小,并且因其远而对地球引力场异常的敏感度不高,难以获得高精度的结果。但这种利用空间天体的测量方法是很先进的。所以20世纪前50年中又有许多人从观测方法、观测仪器方面进行了很多改进,为后来的卫星大地测量奠定了理论和实践基础。

人造卫星用于大地测量,同样也是从几何学原理和动力学原理两方面加以研究,它比月球更加方便有利:人造卫星的视角可以扩大到几十度;卫星离地球近且质量小,它的运动几乎完全决定于地球引力场,月球绕地一周近一个月,而这段时间卫星可以绕地近400圈,可以迅速收集到大量的有关地球的情况资料。

由引力定律可知,人造卫星离地球越近对地球引力场的变化就越敏感,反映到卫星轨道运动上出现的异常就越明显。因此,人造卫星既可以从几何上看作是一个空中的运动目标,又可以是一个反映地球各种变化的信息传感器,包括几何点位及重力场变化信息、生态、自然环境及资源变化等信息。

1.1.2.2 卫星大地测量的发展

早期的卫星大地测量仅仅把卫星作为一种空间观测目标,由地面观测站对其进行摄影观测,测定测站点至卫星的方向,建立卫星三角网;也可以使用激光测距技术测定测站至卫星的距离,建立卫星测距网。上述两种观测方法,均可以实现陆地与海岛的联测定位,解决了常规大地测量难以实现的远距离联测定位问题。

1962~1965年,美国斯密森天体物理天文台(SAO)曾用光学摄影法进行了全球的卫星测量,对北美NDA、欧洲EUA、澳大利亚AND、日本JAD、阿根廷ARG、夏威夷HAW等大地系统进行了联测,利用39个测站的观测资料计算并发布了“标准地球II”。1966~1971年间又利用更多的测站进行了观测,当时的方向观测精度为 $\pm(0.3''\sim 1.5'')$,点位中误差为 $\pm 6.7\text{m}$,地心坐标中误差为 $\pm(17\sim 32)\text{m}$ 。可见其精度是有限的,且观测条件受限制,底片处理也很复杂,所以以后就较少使用。

与此同时,出现了激光测距法,即在地面上用激光测距仪对卫星进行测距,以达到定轨定位的目的,精度可达厘米级。但用这种方法定位需要有4个测站组成较好的图形,实施同步观测,这对大面积布网来说是很困难的,因此激光测距法也未能普及。

上述两种观测和成果换算方法需耗费大量的时间,定位精度较低。因此,这种卫星测量方法很快就被卫星多普勒定位技术所取代,即从仅仅把卫星作为空间观测目标的初级阶段,发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

为了克服摄影观测和激光测距方法的缺陷,人们想到了利用卫星发射的无线电波进行距离测量。设想方案是:若已知在轨卫星的轨道参数,地面观测者又测得该颗卫星发射信号的多普勒频移,则可计算出测站坐标。该设想即成为第一代卫星导航定位系统的基本工作原理。

1958 年美国海军和詹姆斯·霍普金斯大学物理实验室为了给北极核潜艇提供全球导航，开始研制一种利用多普勒卫星定位技术进行测速、定位的卫星导航系统，称之为美国海军导航卫星系统，简称 NNSS (Navy Navigation Satellite System)。由于该系统的卫星通过地极，因此又被称为“子午卫星导航系统”。1959 年 9 月美国发射了第一颗试验卫星，1964 年由 6 颗卫星组成的该系统建成并投入使用。1967 年 7 月，美国政府宣布 NNSS 部分解密，提供民用。由于该系统不受气象条件限制，自动化程度较高，且具有一定的定位精度，立即引起了大地测量学者的极大关注，随后进行了大量的研究和实践，取得了令人瞩目的成就。如在美洲大陆及其附近测设了约 500 个多普勒点；西欧各国分别在 1976 年 5 月和 1977 年 4 月进行了两次多普勒会战 (EDOC-1, 2)，在 16 个国家测设了 30 多个多普勒点，而后参加了三角网的重新平差；法国地理院不仅在本国建立了多普勒网，而且还为阿尔及利亚、利比亚、圭亚那和加蓬等国家测设了 116 个多普勒点；素称“千岛之国”的印度尼西亚，测设了 200 多个多普勒点，从而使常规大地测量无法统一的国家大地控制网建成了统一的坐标系统。20 世纪 70 年代中期，我国有关测绘和勘察单位开始引进多普勒接收机，不仅测设了全国卫星多普勒大地网，而且还实现了大陆和西沙群岛的大地测量基准联测，石油和地质勘探部门也在我国西北地区测量了卫星多普勒定位网。1984 年 12 月至 1985 年 2 月在我国南极长城站上，用 MX1502 型卫星多普勒接收机进行了多普勒定位测量，共观测了 210 次子午卫星通过，精确测定了设在南极乔治岛上的长城站的地理位置为：南纬 $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$ ，西经 $58^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$ ，高程为 $43.58\text{m} \pm 0.67\text{m}$ ；长城站距北京的距离为 $17\,501\,949.51\text{m}$ 。

与此同时，原苏联也建成了一个由 12 颗卫星组成的导航系统，简称为 CICADA。虽然子午卫星导航系统具有划时代的意义，但因其卫星数目少，轨道高度较低（平均 1000km），观测时间间隔较长（平均约 1.5h），因而不能进行三维连续导航。加之求出一次导航解所需的时间较长，不能满足军事导航的需求。从大地测量的要求来看，由于它的定位速度慢（平均观测 1~2d），精度较低（单点定位精度 3~5m，相对定位精度约为 1m），因此，该系统在大地测量学和地球动力学研究方面的应用受到了极大的限制。

1.1.2.3 美国全球定位系统 (GPS) 的建立

为了克服上述缺陷，满足军事部门和民用部门对连续实时三维导航定位的迫切要求，1973 年美国国防部开始组织陆海空三军，共同研究建立新一代卫星导航系统的计划。这就是目前所称的“授时与测距导航系统/全球定位系统” (Navigation System Timing and Ranging/Globol Positioning-NAVSTAR/GPS)，而通常简称为“全球定位系统 (GPS)”。

为使 GPS 具有高精度的连续实时三维导航能力和良好的抗干扰性能，在其设计上，采取了若干重大的改善措施。GPS 与 NNSS 的主要特征比较如下表 1-1 所列。

从 1978 年发射第一颗 GPS 试验卫星以来，利用该系统进行定位的研究、开发和试验工作，发展异常迅速。理论与实践表明，GPS 与之前的导航系统相比，其主要特点如下：

(1) 全球地面连续覆盖。由于 GPS 卫星数目较多，且分布合理，所以地球上任何地点，均可连续地同步观测到至少 4 颗卫星，从而保障了全球、全天候连续实时地三维定位。

(2) 功能多、精度高。GPS 可为各类用户连续地提供动态目标的三维位置、三维速度和时间信息。目前，利用不同测距码实时定位、测速与测时的精度，大体如表 1-2 所示。随着 GPS 定位技术和数据处理技术的发展，其定位、测速和测时的精度将进一步提高。

表 1-1 GPS 与 NNSS 的主要特征

系统特征	NNSS	GPS
载波频率/GHz	0.15, 0.40	1.23, 1.58
卫星平均高度/km	约 1 000	约 20 200
卫星数目/颗	5~6	24(3 颗备用)
卫星运行周期/min	107	718
卫星重稳度	10^{-11}	10^{-12}

表 1-2 GPS 实时定位、测速与测时精度

采用的测距码	P 码	C/A 码
单点定位/m	5~10	20~40
差分定位/m	1	3~5
测速/(m/s)	0.1	0.3
测时/ns	100	500

(3) 实时定位。利用全球定位系统导航,可以实时地确定运动目标的三维位置和速度,由此即可保障运动载体沿预定航线的运行,也可实时地监视和修正航行路线,以及选择最佳的航线。

(4) 应用广泛。随着 GPS 定位技术的发展,其应用的领域在不断拓宽。目前在导航方面,它不仅广泛应用于海上、空中和陆地运动目标的导航,而且,在运动目标的监控和管理,以及运动目标报警和救援等方面,也获得了成功的应用;在测绘工作方面,这一定位技术在大地测量、工程测量、工程与地壳变形监测、地籍测量、航空摄影测量和海洋测绘等各个领域的应用,已甚为普遍。

GPS 的建立,主要是为了满足美国军事部门高精度导航的需要。所以上述优点,对于军事上动态目标的导航,具有十分重要的意义。因此,美国政府把发展 GPS 作为导航技术现代化的重要标志。近几十年来,卫星导航定位技术已经渗透到了民用经济建设和人类生活的各个方面。可以预言,卫星导航定位技术必将与移动通信技术、计算机互联网技术一起成为影响 21 世纪人类生活的三大技术。各国政府都已注意到了卫星导航定位技术在确立国家形象和国际地位中的重要意义,不惜巨资,争相建立自己的卫星导航定位系统。后几节中将详细介绍各国已建成或在建的卫星导航定位系统。

1.1.3 卫星导航定位技术相对于常规测量技术的特点

新一代卫星导航定位技术的高度自动化和所达到的定位精度及其潜力,使广大测量工作者产生了极大兴趣。尤其从 1982 年第一代测量型无码 GPS 接收机 Macrometer V-1000 投入市场以来,在应用基础研究、应用领域开拓、硬件和软件的开发各个方面,都得到了蓬勃的发展。我国的测绘科技工作者在这些研究和应用方面,均取得了骄人的成绩。广泛的实验活动,为 GPS 精密定位技术在测量中的应用,展现了广阔的前景。

相对于常规的测量手段来说,这一新技术的主要特点如下:

1. 测站间无需通视

既要保持良好的通视条件,又要保障测量控制网具有良好的图形结构,这一直是经典测

量技术在实际方面必须面对的难题之一。GPS 测量不要求测站之间相互通视，因而不再需要建造觇标。这一优点既可大大减少测量工作的时间和经费（一般造标费用约占总经费的 30%~50%），同时又使点位的选择更为灵活。

尚应指出，GPS 测量虽不要求测站之间相互通视，但必须保持测站上空有足够开阔的净空，以使卫星信号的接收不受干扰。

2. 定位精度高

已有的大量实践表明，目前在小于 50km 的基线上，其相对定位精度可达 $(1\sim 2)\times 10^{-6}$ ，而在 100~500km 的基线上可达 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 。随着观测技术与数据处理技术的改善，有望在大于 1000km 的距离上，相对定位精度达到或优于 10^{-8} 。

3. 观测时间短

目前，利用经典的相对静态定位方法，完成一条基线的相对定位所需要的观测时间，根据精度的不同，约为 1~3h。为了进一步缩短观测时间，提高作业速度，近年来发展的短基线（不超过 20km）快速相对定位法，其观测时间仅需几分钟。

4. 提供三维坐标

GPS 测量中，在精确测定测站平面位置的同时，还可以精确测定测站的大地高程。GPS 测量的这一特点，不仅为研究大地水准面的形状和测定地面点的高程开辟了新的途径，同时也为其在航空物探、航空摄影测量及精密导航中的应用，提供了重要的高程数据。

5. 操作简便

GPS 的自动化程度很高，观测中测量员的主要任务只是安置并开关仪器、量取仪器高、监视仪器的工作状态、采集观测环境的气象数据，而其他观测工作，如卫星的捕获、跟踪观测、数据记录等均由仪器自动完成。

6. 全天候作业

GPS 测量工作，可以在任何时间、任何地点连续地进行，一般不受天气状况的影响。因此，GPS 定位技术的发展是对经典测量技术的一次重大突破。一方面，它使经典的测量理论与方法产生了深刻的变革；另一方面，也进一步加强了测量学科与其他学科之间的相互渗透，从而促进了测绘科学技术的现代化发展。

1.2 俄罗斯的全球导航卫星系统——GLONASS

GLONASS 全球导航卫星系统的起步比 GPS 晚 9 年。前苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星导航系统的优缺点的基础上，汲取美国 GPS 系统的成功经验，从 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始，到 1996 年全部建成，13 年间历经周折，期间遭遇了苏联的解体，由俄罗斯接替部署，但始终没有终止或中断 GLONASS 卫星的发射。1995 年初只有 16 颗 GLONASS 卫星在轨工作，当年又进行了三次成功发射，将 9 颗卫星送入轨道，完成了 24 颗工作加 1 颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整试验，已于 1996 年 1 月 18 日，使整个系统正常运行。该系统采用了 PZ-90 坐标系，而 GPS 系统采用的是 WGS-84 坐标系。

GLONASS 全球导航卫星系统的组成及工作原理与 GPS 类似，也是由空间卫星星座、地面监控以及用户设备三部分组成。

1.2.1 GLONASS 卫星星座

GLONASS 卫星星座的轨道为 3 个等间隔椭圆轨道面（如图 1-1），3 个轨道平面的相互

夹角按升交点经度计算为 120° ，编号按地球自西向东的旋转方向递增，分别为 NO.1、NO.2、NO.3。24 颗卫星均布于 3 个轨道。1~8 号卫星在 NO.1 轨道，其余类推。各轨道的卫星编号均按卫星运动的反方向递增。轨道倾角 $64.8^\circ \pm 0.3^\circ$ ，轨道偏心率为 ± 0.01 ，卫星距地面高度为 19 100km，运行周期为 11h15m45s。由于 GLONASS 卫星轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角，故在高纬度 (50° 以上) 地区的可视性较好。地面用户每天提前 4.07min 见到同一颗卫星，在中国境内可见到 24 颗中高度角 5° 以上的 11 颗卫星，比能够见到的 GPS 卫星要多 3~4 颗。每颗 GLONASS 卫星上都装有铯原子钟，以产生高稳定的时间标准，并向所有星载设备提供同步信号。星载计算机将从地面控制站接收到的信息进行处理，生成导航电文向地面用户播发。

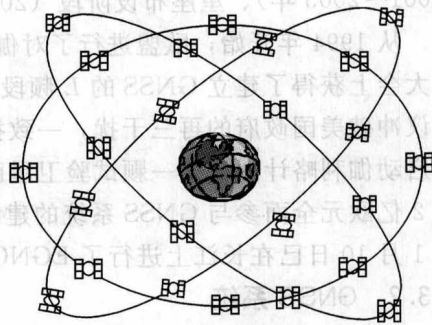


图 1-1 GLONASS 卫星星座

1.2.2 地面控制系统

地面控制系统包括一个系统控制中心（设在莫斯科的 Golisyno-2），一个指令跟踪站 (CTS)，网络分布在俄罗斯境内。CTS 跟踪着 GLONASS 可视卫星，遥测所有卫星，进行测距数据的采集和处理，并向各卫星发送控制指令和导航信息。在地面控制站 (GCS) 内有激光测距设备对测距数据作周期修正，为此所有 GLONASS 卫星上都装有激光反射镜。

1.2.3 用户设备

GLONASS 接收机接收 GLONASS 卫星信号并测量其伪距和速度，同时从卫星信号中选出并处理导航电文，计算出接收机位置坐标的 3 个分量、速度的 3 个分量和时间。GLONASS 全球导航卫星系统进展较快，但生产接收机的厂家较少，且多为专用型。值得注意，GPS 和 GLONASS 双系统信号接收机有很多优点：同时可接受的卫星数目约增加一倍，可以明显改善被测卫星的几何分布，在一些遮挡物较多的城市或森林地区，可提高定位精度；还可以有效地消除美、俄两国对各自系统的可能控制，提高定位的安全性和可靠性。

1.3 欧盟的伽利略全球卫星导航系统——GNSS

我们知道，目前世界上已有两大全球导航定位卫星系统在运行：一是美国的 GPS，二是俄罗斯的 GLONASS。这两个系统分别受到了美、俄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，其他国家只能在美、俄的授权下从事接收机制造、导航服务等从属性工作。科索沃战争时，欧洲完全依赖美国的全球定位系统，当这个系统出于军事目的停止运作时，其他国家一些企业的许多事物被迫中断。为了能在卫星导航领域占有一席之地，欧盟认识到建立拥有自主知识产权的卫星导航系统的重要性和战略意义，同时在欧洲一体化进程中，还会全面加强诸成员国间的联系与合作。在这种背景下，欧盟决定启动伽利略 (Galilue) 计划：建设一个军民两用、与现有系统相兼容的、高精度、全开放的全球卫星导航系统——GNSS。

1.3.1 伽利略计划

伽利略计划分四个阶段：论证阶段 (1994~2001 年)、系统研制和在轨确认阶段

(2001~2005 年)、星座布设阶段 (2006~2007 年)、运营阶段 (2008 年~)。

从 1994 年开始, 欧盟进行了对伽利略计划——GNSS 的方案论证。2000 年在世界无线电大会上获得了建立 GNSS 的 L 频段的频率资源。2002 年 3 月 24 日, 欧盟 15 国交通部长会议冲破美国政府的再三干扰, 一致批准了伽利略 GNSS 实施计划。准备投资 36 亿欧元正式启动伽利略计划。第一颗试验卫星已于 2005 年 12 月 28 日成功发射。中国政府已决定投入 2 亿欧元全面参与 GNSS 系统的建设, 开展了约 14 个有关项目的研发、测试合作。2004 年 1 月 10 日已在长江上进行了 EGNOS 欧洲静地卫星导航重叠系统的动态应用测试。

1.3.2 GNSS 系统

GNSS 由 30 颗卫星 (27 颗工作+3 颗备用) 组成。30 颗卫星分布在 3 个中高度圆轨道面上, 轨道高度 23 616km, 轨道倾角 56° , 星座对地面覆盖良好。每颗卫星除了搭载导航设备外, 还增加了一台救援收发器, 可以接收来自遇险用户的求救信号, 并将该信号转发给地面救援协调中心, 后者组织和调度对遇险用户的救援行动。同时卫星还向待援用户通报救援安排, 以便遇险用户等待并配合救援。

地面控制设施包括卫星控制 (用于卫星轨道改正的遥感和遥测) 中心和提供各项服务所必需的地面设施。

种类齐全的 GNSS 接收机不仅可以接收本系统信号, 还可以接收 GPS、GLONASS 两大系统信号, 并且实现导航功能、移动通信功能相结合, 与其他飞行导航系统结合。亦即任何人只要装备了 GNSS 接收机就能接收到 GPS、GLONASS、GNSS 全球卫星导航系统的信号, 享受到三个系统的服务。其服务方式有: 公开服务、商业服务和官方服务三个方面。公开服务将与商业和生命安全服务共享两个开放的导航信号, 公开服务主要用于道路交通中的个人导航、道路信息和提供路线建议的系统、移动通信的应用领域。商业服务将主要涉及专业用户, 如测绘、海关、船舶和车辆管理以及关税征收等领域, 商业服务将提供在独立频率上的第三种导航信号的接收服务, 并使用户能利用三载波相位模糊分辨力技术 (TCAR) 来改善精度。官方服务的对象是那些对于精度、信号质量和信号传输的可靠性要求极高的用户: 即生命安全服务、搜救服务和政府管理服务领域的用户。

1.4 我国的卫星导航定位系统——北斗号

卫星导航定位系统涉及政治、经济、军事众多领域, 对维护国家利益有重大战略意义。到 2007 年 2 月 3 日, 我国已经有 5 颗在轨北斗导航试验卫星, 组成了具有完全自主知识产权的第一代北斗导航定位卫星试验系统——北斗号, 并将逐步发展为全球性导航定位系统。该系统是全天候、全天时提供卫星导航信息的区域导航系统。该系统建成后, 主要为公路交通、铁路运输、海上作业等领域提供导航定位服务, 将对我国国民经济和国防建设起到有力的推动作用。

1.4.1 卫星导航定位原理

北斗导航定位系统的定位基本原理是空间球面角会测量原理, 就是以两颗卫星的已知坐标为圆心, 各以测定的本星至用户机的距离为半径, 形成两个球面, 用户机必然位于这两个球面的交线的圆弧上。中心站电子高程地图库提供的是一个以地心为球心, 以球心至地球表面高度为半径的非均匀球面。求解圆弧线与地球表面的交点, 并已知目标在北半球, 即可获得用户的二维位置, 如图 1-2 所示。定位过程采用了主动式定位方法, 地面中心站通过两颗

卫星向用户广播询问信号, 根据用户的应答信号, 测量并计算出用户到两颗卫星的距离; 然后根据地面中心的数字地图, 由中心站计算出用户到地心的距离, 根据卫星 1、卫星 2 和地面中心站的已知坐标, 以及已知用户目标在赤道平面的北侧, 中心站便可计算出用户的三维位置。用户的高程则由数字地面高程求出, 用户的三维位置由卫星加密后播发给用户。

1.4.2 北斗号卫星导航定位系统

第一代北斗号卫星导航定位系统由 3 颗地球静止轨道卫星组成, 其中 2 颗工作, 1 颗在轨备用。登记的卫星位置为赤道面东经 80° 、 140° 、 110.5° (备用)。登记的频段是: 上行为 L 频段 ($1\ 610\sim 1\ 626.5\text{MHz}$), 下行为 S 频段 ($2\ 483.5\sim 2\ 500\text{MHz}$)。

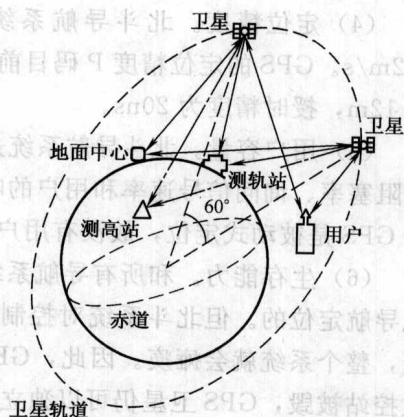


图 1-2 卫星定位原理示意图

为了满足我国国民经济和国防建设的发展要求, 我国计划在 2007 年初再发射两颗北斗静止轨道导航卫星, 2008 年左右满足中国及周边地区用户的卫星导航的需求, 并进行组网试验。初步建设成由 5 颗静止轨道卫星、30 颗非静止轨道卫星组成的卫星导航定位系统, 并逐步扩展为全球导航定位卫星系统。该系统提供两种方式的服务, 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 10m , 授时精度为 50ns , 测速精度为 0.2m/s 。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务信息。北斗导航定位系统有三大功能:

- (1) 快速定位。北斗导航系统可为服务区域内用户提供全天候、高精度、快速实施定位服务。根据不同的精度要求, 利用授时终端, 完成与北斗导航系统之间的时间和频率同步, 可提供数十纳秒级的时间同步精度。
- (2) 简短通信。北斗导航系统用户终端具有双向短报文通信能力, 可以一次传送超过 100 个汉字的信息。
- (3) 精密授时。北斗导航系统具有单向和双向两种授时功能。

为了提高北斗卫星导航系统与其他全球卫星导航系统的兼容性, 促进卫星定位、导航、授时服务功能的应用, 中国愿意与其他国家合作, 共同发展卫星导航事业。

1.4.3 北斗导航定位系统与 GPS 系统的比较

(1) 覆盖范围。北斗导航定位系统目前是覆盖我国本土的区域性系统, 覆盖范围是东经 $70^\circ\sim 145^\circ$, 北纬 $5^\circ\sim 55^\circ$ 之间的地区, 上大下小, 最宽处在北纬 35° 左右, 其定位精度 $\pm 10\text{m}$ 。而 GPS 系统是覆盖全球、全天候的导航定位系统。

(2) 卫星数量与轨道特性。北斗导航系统的两颗卫星为地球同步卫星, 分别定点在东经 80° 和 140° 的赤道平面上空, 赤道角距约 60° 。GPS 卫星为 24 颗, 分布在 6 个轨道平面上, 轨道倾角 55° , 赤道面角距 60° , 且为准同步轨道, 绕地一周 $11\text{h}58\text{min}$ 。

(3) 定位原理。北斗导航系统是主动式双向报文通信二维导航, 即由地面控制中心系统解算后播发给用户。这种工作原理带来两方面问题: 一是用户定位的同时失去了无线电隐蔽性, 这在军事上相当不利; 二是由于用户设备必须包含发射机, 导致在体积、价格、功耗、质量方面处于不利地位。GPS 属于被动式单向通信伪码测距三维导航, 用户只需接收卫星

信号便可独立解算自己的位置，保密性强。

(4) 定位精度。北斗导航系统的定位精度为 10m，授时精度为 50ns，测速精度为 0.2m/s。GPS 的定位精度 P 码目前已由 16m 提高到 6m，C/A 码目前已由 25~100m 提高到 12m，授时精度为 20ns。

(5) 用户容量。北斗导航系统是双向通信的询问—应答系统，用户容量取决于允许的信道阻塞率、询问信号速率和用户的响应频率，系统能容纳用户数约为每小时 540 000 户。因为 GPS 是被动式定位，故没有用户限制，或者说可容纳无限用户。

(6) 生存能力。和所有导航系统一样，北斗导航系统也是基于地面控制中心和卫星来实现导航定位的。但北斗系统对控制中心的依赖性，要比其他系统大得多，一旦控制中心受损，整个系统就会瘫痪。因此，GPS 系统正在发展卫星间的横向数据链技术，目的是如果主控站被毁，GPS 卫星仍可以独立运行。

(7) 实时性。北斗号用户的定位申请要送回系统控制中心，中心解算出用户的三维位置后再发回用户，时间延迟较长。因此，对于高速运动物体，就加大了定位的误差。此外，北斗导航系统所具有的短信通信功能又是 GPS 系统所不具备的。

1.4.4 北斗用户终端机

按照用户的应用环境和功能，北斗用户终端机可分为以下几种类型。

(1) 基本型。适用于一般车辆、船舶及便携等用户的导航定位应用，可接收和发送定位及通信信息，与中心站及其他用户终端机双向通信。

(2) 通信型。适用于野外作业、水文预报、环境监测等各类数据采集和数据传输用户，可接收和发送短信息、报文，与中心站及其他用户终端机双向或单向通信。

(3) 授时型。适用于授时、校时、时间同步等用户，可提供数十纳秒级的时间同步精度。

(4) 指挥型。适用于小型指挥中心的调度指挥、监控管理等用户，具有鉴别、指挥其下属其他北斗用户终端机的功能。可与下属用户机及中心站进行通信，接收下属用户报文，并向下属用户发送指令。

(5) 多模型用户机。适用于对位置信息要求比较高的用户，既能利用北斗系统导航定位或通信信息，又可以利用 GPS 系统或 GPS 增强系统的卫星信号导航定位。

1.5 美国的 GPS 政策和我国的 GPS 跟踪网

1.5.1 美国政府的 GPS 政策

美国国防部在制定 GPS 总体方案时，就已经制定了“主要为军用，同时也兼顾民用的双用途”政策。此后，陆续出台了一系列的“双用途”政策措施，但更多的是对民用精度的限制。比如：

(1) 1975 年规定，GPS 卫星发射的无线电信号，含有两种测距码：C/A 码（粗码）和 P 码（精码）。相应于两种测距码，GPS 将提供两种不同精度的定位服务：即 C/A 码是供民用的标准精度定位服务（SPS）测距码；而 P 码是专供美国军方使用的精密定位服务（PPS）测距码。前者单点实时定位精度为 20~30m，后者精度可优于 10m。

(2) 美国国防部从 1990 年 3 月 17 日起，实施了选择可用性 SA（Selective Availability）技术，主要内容是：①在广播星历中对 GPS 卫星基准频率采用 δ （其变化为无规律的随机变

化)技术,降低了星历精度,使定位中的已知点(卫星)的位置精度大为降低;②有意地在卫星钟的钟频信号中采用 ϵ (高频抖动)技术,使钟频产生快慢变化,导致测距精度大为降低。实施SA技术后,C/A码实时定位精度,平面位置降低为100m,高程精度降为150m,严重影响了导航定位。2005年5月美国政府取消了限制民用精度的SA政策,仅在局部或个别卫星上实施SA技术。

(3) P码是保密码,一般用户难以应用。近年来,P码的结构已逐渐被人们解译,所以美国政府又实施了新的反电子欺骗AS(Anti-Spoofing)技术,它是由P码和W码相加而形成的Y码,用来代替P码,其结构更为严格保密,一般用户无法解译。该技术仅在特殊情况下使用。

(4) 判断是否实施SA技术的方法。用户可从导航电文中的URA(测距精度)值加以判断。如Trimble 4000测地型GPS接收机,当URA值为20以内时,说明未实施SA技术;当URA值为30~64时,说明实施了SA技术。

1.5.2 对付GPS限制政策的措施

美国政府的GPS限制政策严重损害了一般用户的实时定位精度,限制了GPS系统在许多高精度领域中应用的可能性。如何摆脱这种限制,是其他国家广大用户必须面对的问题。

1. 改进GPS精密定位方法及软件,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2~5m,是削弱美国限制政策影响的有效手段,目前已被广泛应用。比如:采用载波相位观测值时,在基线长度不大于20km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。差分GPS定位原理将在第4章详细介绍。

还可以应用P-W技术和 L_1 、 L_2 交叉相关技术,使 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

鉴于卫星星历在定位中的重要作用,建立自主独立的GPS卫星跟踪测轨系统,精密地测定GPS卫星的实际运行轨道,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。这是消除SA和AS影响的有效途径,具有十分重要的科学意义和实用价值。为此,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。我国在“八五”期间所建立的GPS跟踪站已经构网,建成了北京、武汉、上海、长春、昆明、拉萨和乌鲁木齐的GPS卫星跟踪站。

3. 使用能同时接收GPS和GLONASS信号的接收机

俄罗斯的GLONASS无SA技术,无需顾虑精度的降低和信号的加密。同时接收两个系统的卫星信号,意味着把GPS和GLONASS构成了拥有48颗卫星的组合系统,弥补了GPS的局限性,在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环境中观测时,同步观测的卫星个数和定位精度。

4. 建立独立的卫星导航定位系统

建立自己的卫星导航定位系统,才能彻底摆脱对美国GPS的依赖。尽管这是一项技术复杂、耗资巨大的工程,但对于一个国家的政治、经济、军事各方面都有着非同寻常的意义。目前一些国家和地区(如欧盟和中国)正在发展自己的卫星导航定位系统。正是因为欧