

# GPS 测量原理及应用

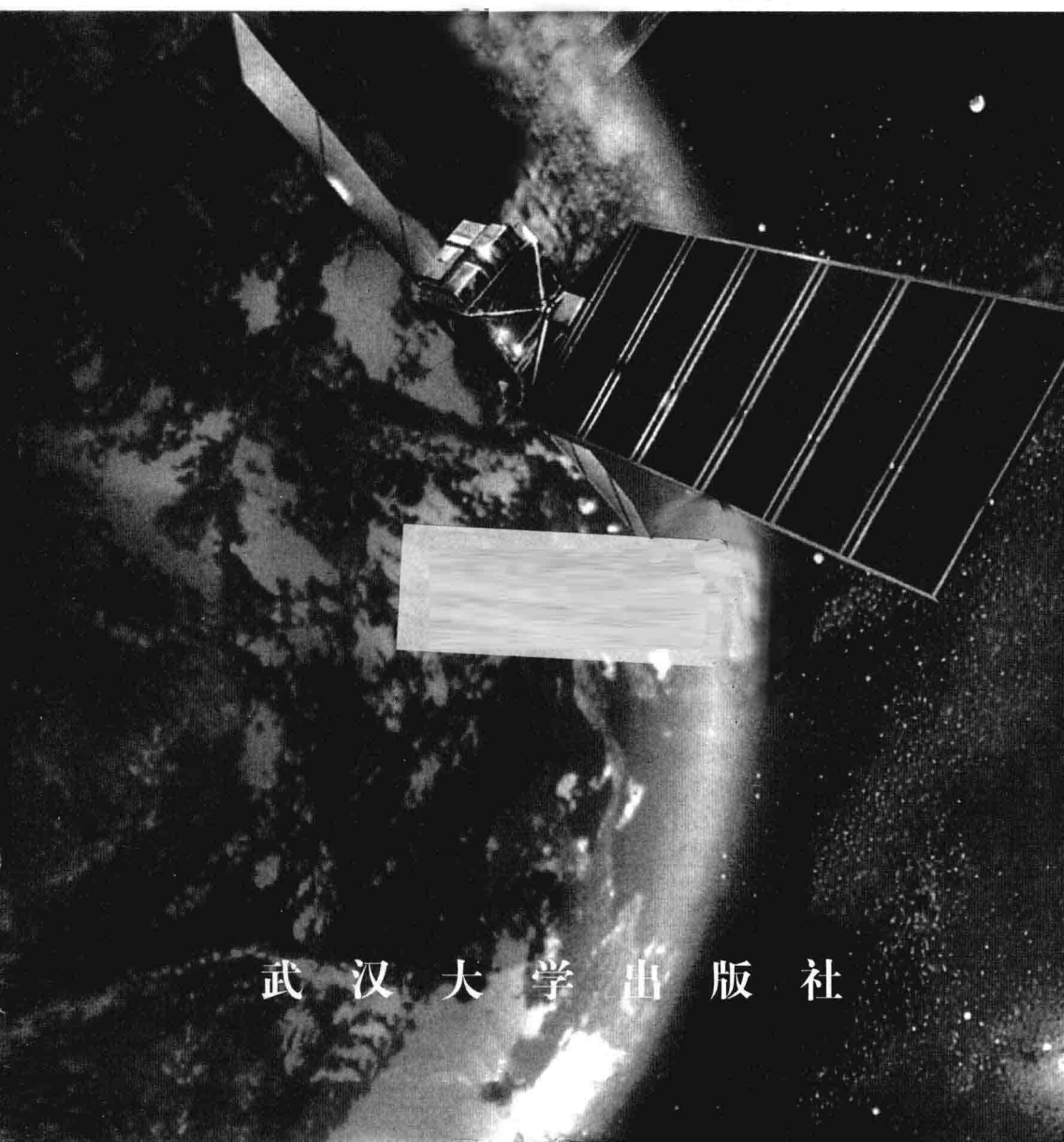
编著 徐绍铨 张华海  
杨志强 王泽民



武汉大学出版社

# GPS测量原理及应用

编著 徐绍铨 张华海  
杨志强 王泽民



武 汉 大 学 出 版 社

## 内容提要

本书为中国全球定位系统技术应用协会《教育与发展》专业委员会组织编写,旨在普及GPS知识,推广GPS应用技术。本书系统论述GPS的基本原理、测量方法、应用范围、测量技术设计与实施,数据处理与实用数学模型。本书特点概念清晰,通俗易懂,适应面宽,应用性强。可作GPS课程(40学时)的教材,可作测量工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

GPS测量原理及应用/徐绍铨等编著. —武汉:武汉大学出版社,2001.7  
3S丛书  
ISBN 7-307-03219-8

I. G… II. 徐… III. ①全球定位系统(GPS) ②测量 IV. P228

责任编辑:徐方

封面设计:曾兵

---

出版:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

发行:新华书店湖北发行所

印刷:武汉市科普教育印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:274千字

版次:2001年7月第1版 2001年7月第1次印刷

ISBN 7-307-03219-8/P·14 定价:24.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

## 前 言

全球定位系统(Global Positioning System - GPS)是美国从本世纪70年代开始研制,历时20年,耗资200亿美元,于1994年全面建成,具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。经近10年我国测绘等部门的使用表明,GPS以全天候、高精度、自动化、高效益等显著特点,赢得广大测绘工作者的信赖,并成功地应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多种学科,从而给测绘领域带来一场深刻的技术革命。

随着全球定位系统的不断改进,硬、软件的不完善,应用领域正在不断地开拓,目前已遍及国民经济各种部门,并开始逐步深入人们的日常生活。

为了普及GPS技术和知识,中国全球定位系统技术应用协会《教育与发展》专业委员会,组织武汉测绘科技大学、中国矿业大学、西安工程学院、内蒙古林学院、南方冶金学院、长春科技大学等院校,长期从事GPS教学和研究的专业委员会成员,共同编写了《GPS测量原理及应用》教材,以适应普通工科院校开设GPS课程教学的需要。

本书重在论述GPS的基本原理、基本方法,着重介绍应用,省略了各种数学模型的推演过程,力求做到概念清晰、通俗易懂,适应面广、应用性强,以满足30~40学时的教学要求。

本书由徐绍铨组稿,共分十章。其中第一章由张华海、杨志强执笔,第二章、第三章由张华海执笔,第四章由王泽民执笔,第五章由张华海、常同元执笔,第六章由王泽民执笔,第七章由杨志强、刘小生执笔,第八章由杨志强执笔,第九章由张华海、徐绍铨执笔,第十章由徐绍铨,张华海、杨志强、王泽民、常同元、杨国东、刘小生、陈小明、刘志赵等执笔。全书由张华海、杨志强协调统

稿,最后由徐绍铨执笔修改定稿。全书插图由王翠华完成。

王广运教授审阅了本教材,提出了宝贵修改意见,在此表示诚挚地感谢。

由于作者水平有限,不足之处恳请读者批评指正。

中国全球定位系统技术应用协会

《教育与发展》专业委员会

1998年8月

# 目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 GPS 卫星定位技术的发展	(1)
§ 1.2 GPS 系统组成	(7)
§ 1.3 GPS 在国民经济建设中的应用	(10)
第二章 坐标系统和时间系统	(14)
§ 2.1 天球坐标系与地球坐标系	(14)
§ 2.2 WGS - 84 坐标系和我国大地坐标系	(21)
§ 2.3 坐标系统之间的转换	(25)
§ 2.4 时间系统	(27)
第三章 卫星运动基础及 GPS 卫星星历	(30)
§ 3.1 概述	(30)
§ 3.2 卫星的无摄运动	(31)
§ 3.3 卫星的受摄运动	(35)
§ 3.4 GPS 卫星星历	(39)
第四章 GPS 卫星的导航电文和卫星信号	(43)
§ 4.1 GPS 卫星的导航电文	(43)
§ 4.2 GPS 卫星信号	(46)
§ 4.3 GPS 卫星位置的计算	(51)
§ 4.4 GPS 接收机基本工作原理	(53)
第五章 GPS 卫星定位基本原理	(59)
§ 5.1 概述	(59)
§ 5.2 伪距测量	(60)
§ 5.3 载波相位测量	(63)
§ 5.4 GPS 绝对定位与相对定位	(68)
§ 5.5 SA 和 AS 政策及其对策	(77)
§ 5.6 差分 GPS 定位原理	(79)
第六章 GPS 卫星导航	(86)
§ 6.1 概述	(86)
§ 6.2 GPS 卫星导航原理	(87)
§ 6.3 GPS 用于测速、测时、测姿态	(91)
§ 6.4 GPS 卫星导航方法	(96)
第七章 GPS 测量的误差来源及其影响	(102)

§ 7.1	GPS 测量主要误差分类	(102)
§ 7.2	与信号传播有关的误差	(102)
§ 7.3	与卫星有关的误差	(110)
§ 7.4	与接收机有关的误差	(114)
§ 7.5	其它误差	(116)
<b>第八章</b>	<b>GPS 测量的设计与实施</b>	<b>(118)</b>
§ 8.1	GPS 测量的技术设计	(118)
§ 8.2	GPS 测量的外业准备及技术设计书编写	(126)
§ 8.3	GPS 测量的外业实施	(131)
§ 8.4	GPS 测量的作业模式	(136)
§ 8.5	数据预处理及观测成果的质量检核	(140)
§ 8.6	技术总结与上交资料	(145)
<b>第九章</b>	<b>GPS 测量数据处理</b>	<b>(146)</b>
§ 9.1	概述	(146)
§ 9.2	GPS 基线向量的解算	(149)
§ 9.3	GPS 定位成果的坐标转换	(154)
§ 9.4	基线向量网平差	(161)
§ 9.5	GPS 高程	(168)
<b>第十章</b>	<b>GPS 应用</b>	<b>(182)</b>
§ 10.1	GPS 在大地控制测量中的应用	(182)
§ 10.2	GPS 在精密工程测量及变形监测中的应用	(184)
§ 10.3	GPS 在航空摄影测量中的应用	(188)
§ 10.4	GPS 在线路勘测及隧道贯通测量中的应用	(196)
§ 10.5	GPS 在地形、地籍及房地产测量中的应用	(200)
§ 10.6	GPS 在海洋测绘中的应用	(201)
§ 10.7	GPS 在公安、交通系统中的应用	(205)
§ 10.8	GPS 在地球动力学及地震研究中的应用	(208)
§ 10.9	GPS 在气象信息测量中的应用	(210)
§ 10.10	GPS 在航海航空导航中的应用	(214)
§ 10.11	GPS 在其他领域中的应用	(219)
<b>附录 1:</b>	<b>Trimble 4800 GPS 全站仪</b>	<b>(222)</b>
<b>附录 2:</b>	<b>ASHTECH GPS 接收机</b>	<b>(226)</b>
<b>附录 3:</b>	<b>DSNP SCORPIO 6000 系列接收机</b>	<b>(229)</b>
<b>附录 4:</b>	<b>徕卡测量系统有限公司及其 GPS 产品介绍</b>	<b>(232)</b>
	<b>主要参考文献</b>	<b>(235)</b>

# 第一章 绪 论

## § 1.1 GPS 卫星定位技术的发展

### 1.1.1 早期的卫星定位技术

卫星定位技术是利用人造地球卫星进行点位测量的技术。当初,人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标,由地面观测站对它进行摄影观测,测定测站至卫星的方向,建立卫星三角网。也可以用激光技术对卫星进行距离观测,测定测站至卫星的距离,建立卫星测距网。这种对卫星的几何观测能够解决用常规大地测量技术难以实现的远距离陆地海岛联测定位的问题。20世纪60~70年代,美国国家大地测量局在英国和德国测绘部门的协助下,用卫星三角测量的方法花了几年时间测设了有45个测站的全球三角网,点位精度5m。但是这种观测方法受卫星可见条件及天气的影响,费时费力,不仅定位精度低,而且不能测得点位的地心坐标。因此,卫星三角测量很快就被卫星多普勒定位所取代,使卫星定位技术从仅仅把卫星作为空间观测目标的低级阶段,发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

### 1.1.2 子午卫星导航系统的应用及其缺陷

20世纪50年代末期,美国开始研制用多普勒卫星定位技术进行测速、定位的卫星导航系统,叫做子午卫星导航系统(NNSS)。子午卫星导航系统的问世,开创了海空导航的新时代,揭开了卫星大地测量学的新篇章。70年代,部分导航电文解密交付民用。自此,卫星多普勒定位技术迅速兴起。多普勒定位具有经济快速、精度均匀、不受天气和时间的限制等优点。只要在测点上能收到从子午卫星上发来的无线电信号,便可在地球表面的任何地方进行单点定位或联测定位,获得测站点的三维地心坐标。70年代中期,我国开始引进多普勒接收机,进行了西沙群岛的大地测量基准联测。国家测绘局和总参测绘局联合测设了全国卫星多普勒大地网,石油和地质勘探部门也在西北地区测设了卫星多普勒定位网。

于美国子午卫星导航系统建立的同时,前苏联也于1965年开始建立了一个卫星导航系统,叫作CICADA。该系统有12颗所谓宇宙卫星。



NNSS 和 CICADA 卫星导航系统虽然将导航和定位推向了一个新的发展阶段,但是它们仍然存在着一些明显的缺陷。比如卫星少、不能实时定位。<sup>4</sup>子午卫星导航系统采用 6 颗卫星,并都通过地球的南北极运行。地面上一点上空子午卫星通过的间隔时间较长,而且低纬度地区每天的卫星通过次数远低于高纬度地区。而对于同一地点两次子午卫星通过的间隔时间为 0.8~1.6 小时,对于同一子午卫星,每天通过次数最多为 13 次,间隔时间更长。由于一台多普勒接收机一般需观测 15 次合格的卫星通过,才能使单点定位精度达 10m 左右,而各个测站观测了公共的 17 次合格的卫星通过时,联测定位的精度才能达到 0.5m 左右。间隔时间和观测时间长,不能为用户提供实时定位和导航服务,而精度较低限制了它的应用领域。子午卫星轨道低(平均高度 1070km),难以精密定轨,以及子午卫星射电频率低(400MHz 和 150MHz),难以补偿电离层效应的影响,致使卫星多普勒定位精度局限在米级水平(精度极限 0.5~1m)。

总之,用子午卫星信号进行多普勒定位时,不仅观测时间长(需要一两天的观测时间),而且既不能进行连续、实时定位,又不能达到厘米级的定位精度,因此其应用受到了较大的限制。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航与定位,第二代的卫星导航系统——GPS 卫星全球定位系统便应运而生。卫星定位技术发展到了一个辉煌的历史阶段。

### 1.1.3 GPS 全球定位系统的建立

1973 年 12 月,美国国防部批准它的陆海空三军联合研制新的卫星导航系统: NAVSTAR/GPS。它是英文“Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System”的缩写词。其意为“卫星测时测距导航/全球定位系统”。简称 GPS 系统。该系统是以卫星为基础的无线电导航定位系统,具有全能性(陆地、海洋、航空和航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和定时的功能。能为各类用户提供精密的三维坐标、速度和时间。

自 1974 年以来,GPS 计划已经历了方案论证(1974~1978 年),系统论证(1979~1987 年)、生产实验(1988~1993)三个阶段。总投资超过 200 亿美元。整个系统分为卫星星座、地面控制和监测站、用户设备三大部分。论证阶段共发射了 11 颗叫做 BLOCK I 的试验卫星,生产实验阶段发射 BLOCK II R 型第三代 GPS 卫星,GPS 系统由此为基础改建而成。

GPS 卫星星座见图 1-1。其基本参数是:卫星颗数为 21 + 3,卫星轨道面个数为 6,卫星高度为 20200km,轨道倾角为 55 度,卫星运行周期为 11 小时 58 分(恒星时 12 小时),载波频率为 1575.42MHz 和 1227.60MHz。卫星通过天顶时,卫星可见时间为 5 小时,在地球表面上任何地点任何时刻,在高度角

15 度以上,平均可同时观测到 6 颗卫星,最多可达 9 颗卫星。

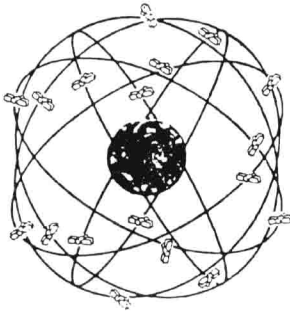


图 1-1 GPS 卫星星座

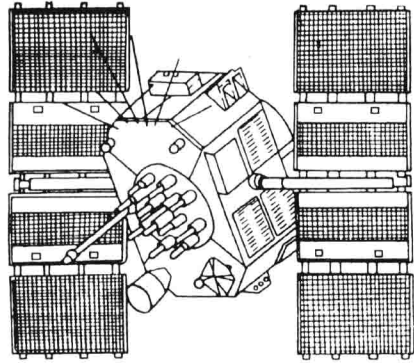


图 1-2 GPS 工作卫星

图 1-2 是 GPS 工作卫星的外部形态。GPS 工作卫星的在轨重量是 843.68 公斤,其设计寿命为七年半。当卫星入轨后,屋内机件靠太阳能电池和镉镍蓄电池供电。每个卫星有一个推力系统,以便使卫星轨道保持在适当位置。GPS 卫星通过 12 根螺旋型天线组成的阵列天线发射张角大约为 30 度的电磁波束,覆盖卫星的可见地面。卫星姿态调整采用三轴稳定方式,由四个斜装惯性轮和喷气控制装置构成三轴稳定系统,致使螺旋天线阵列所辐射的波束对准卫星的可见地面。

#### 1.1.4 GLONASS 全球导航卫星系统

GLONASS 的起步晚于 GPS 九年。从前苏联于 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始,到 1996 年,十三年时间内历经周折,虽然遭遇了苏联的解体,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,1995 年进行了三次成功发射,将 9 颗卫星送入轨道,完成了 24 颗工作卫星加 1 颗备用卫星的布局。经过数据加载,调整和检验,已于 1996 年 1 月 18 日,整个系统正常运行。

GLONASS 系统在系统组成和工作原理上与 GPS 类似,也是由空间卫星星座,地面控制和用户设备三大部分组成。

##### 1. 卫星星座

GLONASS 卫星星座的轨道为三个等间隔椭圆轨道,轨道面间的夹角为 120 度,轨道倾角 64.8 度,轨道的偏心率为 0.01,每个轨道上等间隔地分布 8 颗卫星。卫星离地面高度 19100km,绕地运行周期约 11 小时 15 分,地迹重复周期 8 天,轨道同步周期 17 圈。GLONASS 和 GPS 的对比参见表 1。由于 GLONASS 卫星的轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角,所以在高纬度(50 度

以上)地区的可见性较好。

每颗 GLONASS 卫星上装有铯原子钟以产生卫星上高稳定时标,并向所有星载设备的处理提供同步信号。星载计算机将从地面控制站接收到的专用信息进行处理,生成导航电文向用户广播。导航电文包括:(1)星历参数;(2)星钟相对于 GLONASS UTC 时(SU)的偏移值;(3)时间标记;(4)GLONASS 历书。

GLONASS 卫星向空间发射两种载波信号。 $L_1$  频率为 1.602 ~ 1.616 GHz, $L_2$  频率为 1.246 ~ 1.256GHz, $L_1$  为民用, $L_1$  和  $L_2$  供军用。信号格式为伪随机噪声扩频信号,测距码用最长序列码,511 码元素。同步码重复周期 2 秒,30 位,并有 100 周方波振荡的二进制码信息调制。各卫星之间的识别方法采用频分复用制(FDMA), $L_1$  频道间隔 0.5625MHz, $L_2$  频道间隔 0.4375MHz。FDMA 占用频段较宽,24 个卫星的  $L_1$  频道占用约 14MHz。

## 2. 地面控制系统

地面控制站组(GCS)包括一个系统控制中心(在莫斯科区的 Golitsyno-2),一个指令跟踪站(CTS),网络分布于俄罗斯境内。CTS 跟踪着 GLONASS 可见卫星,它遥测所有卫星,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 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。

## 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。接收机中的计算机对所有输入数据处理并算出位置坐标的三个分量、速度矢量的三个分量和时间。

GLONASS 系统进展较快,运行正常,但生产用户设备的厂家较少,生产的接收机多为专用型。美国的 3S 公司研制 GLONASS 接收机以及 GPS/GLONASS 联合接收机。GPS 与 GLONASS 联合型接收机有很多优点:用户同时可接收的卫星数目增加约一倍,可以明显改善观测卫星的几何分布,提高定位精度(单点定位精度可达 16m);由于可见卫星数目增加,在一些遮挡物较多的城市、森林等地区进行测量定位和建立运动目标的监控管理比较容易开展;利用两个独立的卫星定位系统进行导航和定位测量,可有效地削弱美俄两国对各自定位系统的可能控制,提高定位的可靠性和安全性。

## 4. 俄罗斯联邦政府对 GLONASS 系统的使用政策

早在 1991 年俄罗斯首先宣称:GLONASS 系统可供国防民间使用,不带任何限制,也不计划对用户收费,该系统将在完全布满星座后遵照已公布的性能运行至少 15 年。民用的标准精度通道(CSA)精度数据为:水平精度 50 ~ 70m,垂直精度 75m,并声明不引入选择可用性(SA)。测速精度 15cm/s。

授时精度为  $1\mu\text{s}$ 。俄罗斯空间部队的合作科学信息中心已作为 GLONASS 状态信息的用户接口,正式向用户公布 GLONASS 咨询通告。

1995 年 3 月 7 日俄罗斯联邦政府签署了一项法令“有关 GLONASS 面向民用的行动指导”。此法令确认了 GLONASS 系统由民间用户使用的早期启用的可能性。

图 1-3 为 GLONASS 卫星星座。



图 1-3 GLONASS 卫星星座

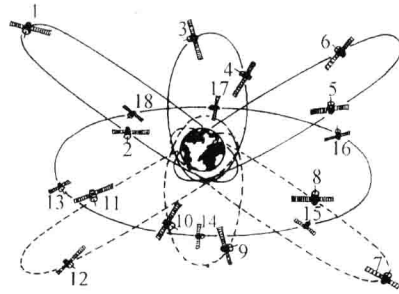


图 1-4 NAVSAT 卫星星座

### 1.1.5 NAVSAT 导航卫星系统

GPS 和 GLONASS 系统主要是为军事应用建立的卫星导航系统。西欧欧洲空间局(ESA)正在筹建的 NAVSAT 导航卫星系统,则是一种民用卫星导航系统。NAVSAT 系统采用 6 颗地球同步卫星(GEO)和 12 颗高椭圆轨道卫星(HEO)组成混合卫星星座。12 颗 HEO 卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,6 颗 GEO 卫星同处于一个轨道平面内。地面上任何一点任何时间至少可以见到 4 颗 NAVSAT 卫星,达到全天候、实时导航和定位。

图 1-4 为 NAVSAT 卫星星座。

GLONASS、GPS 和 NAVSAT 三种卫星系统比较见表 1:

表 1 三种卫星系统比较

卫星系统	GLONASS	GPS	NAVSAT
卫星数(颗)	21 + 3	21 + 3	12 + 6
轨道面数(个)	3	6	7
轨道倾角(度)	64.8	55	63.45
平均高度(km)	19100	20200	20178
周期(hm)	11h 15m	11h 58m	11h 58m
卫星射电频率 $L_1$	1602—1616 MHz	1575.42	1561—1569 MHz
卫星射电频率 $L_2$	1246—1256 MHz	1227.6	1224—1232 MHz
C/A 码频率	511 kHz	1.023 MHz	3.937 MHz
C/A 码码长	511 bit	1023 bit	3937 bit

### 1.1.6 INMARSAT 系统

INMARSAT 系统由国际移动卫星组织(原名国际海事卫星组织,简称 INMARSAT)筹建。最初,该系统仅具有卫星通信能力,在其 4 颗 INMARSAT-2 型卫星于 1992 年全部投入全球覆盖、进行通信运营之后,公司便着手改进 4 颗 INMARSAT-3 型卫星的设计,即在其上加装卫星导航舱。这 4 颗新星入轨运行之后,1996 年初,在向全球提供通信服务的同时,已具备了导航定位能力。

国际移动卫星组织成立于 1979 年,总部设在伦敦,目前有 79 个成员国,是提供全球卫星移动通信的政府间国际合作团体。成员国政府指定一企业实体作为该国的签字者,代表本国政府参与 INMARSAT 的商业活动。中国是 INMARSAT 的创始成员国之一,代表中国政府签字的实体是交通部北京船舶通信导航公司(MCN)。从体制上说,INMARSAT 是一个国际民间航运社团能够放心使用的卫星导航系统。

### 1.1.7 GNSS 系统

1992 年 5 月,国际民航组织(ICAO)在未来的航行系统(FANS)会议上审议通过了计划方案“GNSS 系统”。该系统是一个全球性的位置和时间的测定系统,包括一个或几个卫星星座、机载接收机和系统完好性监视系统设备。

GNSS 系统在 2000 年之前,将建立与完善由 GPS + GLONASS + INMARSAT + GAIT + RAIM 组成的混合系统。其中,GAIT 为地面增强和完好性监视系统,RAIM 为机载独立完善监控系统。该混合系统建立后,ICAO 将允许在某些特定空域内,将 GNSS 作为单一导航手段运行。

2000 年之后,将建设纯民间 GNSS 系统。建成后,GNSS 将拥有 30 颗中高圆轨道卫星(ICO) + 6 ~ 8 颗双用静止卫星。具体方案为:工作卫星星座由分布在 8 个高度为 11.5 万公里的圆形轨道平面上的 30 颗中高度卫星和分布在一个椭圆轨道平面上 6 ~ 8 颗静止卫星组成。该系统建成后,不仅能提供与 GPS 和 GLONASS 系统类似的导航定位功能,还能同时具有全球卫星移动通信的能力。

国际民航组织为了打破一两个国家独霸卫星全球导航系统的被动局面,组建一个类似于 INMARSAT 公司的国际性卫星导航工程公司,让民间用户摆脱受制于人的不安心理,将 GNSS 系统的所有权、控制权和运营权实行国际化,贯彻“集资共建,资源共享”的方针。

## § 1.2 GPS 系统组成

GPS 系统包括三大部分:空间部分——GPS 卫星星座;地面控制部分——地面监控系统;用户设备部分——GPS 信号接收机。

### 1.2.1 GPS 工作卫星及其星座

由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成 GPS 卫星星座,记作(21 + 3)GPS 星座。如图 1,24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道倾角为 55 度,各个轨道平面之间相距 60 度,即轨道的升交点赤经各相差 60 度。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差 90 度,一轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30 度。

在两万公里高空的 GPS 卫星,当地球对恒星来说自转一周时,它们绕地球运行二周,即绕地球一周的时间为 12 恒星时。这样,对于地面观测者来说,每天将提前 4 分钟见到同一颗 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。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,称为定位星座。这 4 颗卫星在观测过程中的几何位置分布对定位精度有一定的影响。对于某地某时,甚至不能测得精确的点位坐标,这种时间段叫做“间隙段”。但这种时间间隙段是很短暂的,并不影响全球绝大多数地方的全天候、高精度、连续实时的导航定位测量。

GPS 工作卫星的编号和试验卫星基本相同。其编号方法有:按发射先后次序编号;按 PRN(卫星所采用的伪随机噪声码)的不同编号;NASA 编号(美航空航天局对 GPS 卫星的编号);国际编号(第一部分为该星发射年代,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);按轨道位置顺序编号等。在导航定位测量中,一般采用 PRN 编号。

在 GPS 系统中,GPS 卫星的作用如下:

1. 用 L 波段的两个无线载波(19cm 和 24cm 波)向广大用户连续不断地发送导航定位信号。每个载波用导航信息  $D(t)$  和伪随机码(PRN)测距信号进行双相调制。用于捕获信号及粗略定位的伪随机码叫 C/A 码(又叫 S 码),精密测距码(用于精密定位)叫 P 码。由导航电文可以知道该卫星当前的位置和卫星的工作情况。

2. 在卫星飞越注入站上空时,接收由地面注入站用 S 波段(10cm 波段)发送到卫星的导航电文和其它有关信息,并通过 GPS 信号电路,适时地发送给广大用户。

3. 接收地面主控站通过注入站发送到卫星的调度命令,适时地改正运

行偏差或启用备用时钟等。

GPS 卫星的核心部件是高精度的时钟、导航电文存储器、双频发射和接收机以及微处理机。而对于 GPS 定位成功的关键在于高稳定度的频率标准。这种高稳定度的频率标准由高度精确的时钟提供。因为  $10^{-9}$  秒的时间误差将会引起 30cm 的站星距离误差。为此,每颗 GPS 工作卫星一般安设两台铷原子钟和两台铯原子钟,并计划未来采用更稳定的氢原子钟(其频率稳定度优于  $10^{-14}$ )。GPS 卫星虽然发送几种不同频率的信号,但是它们均源于一个基准信号(其频率为 10.23GHz),所以只需启用一台原子钟,其余作为备用。卫星钟由地面站检验,其钟差、钟速连同其它信息由地面站注入卫星后,再转发给用户设备。

### 1.2.2 地面监控系统

对于导航定位来说, GPS 卫星是一动态已知点。星的位置是依据卫星发射的星历——描述卫星运动及其轨道的参数算得的。每颗 GPS 卫星所播发的星历,是由地面监控系统提供的。卫星上的各种设备是否正常工作,以及卫星是否一直沿着预定轨道运行,都要由地面设备进行监测和控制。地面监控系统另一重要作用是保持各颗卫星处于同一时间标准——GPS 时间系统。这就需要地面站监测各颗卫星的时间,求出钟差,然后由地面注入站发给卫星,卫星再由导航电文发给用户设备。

GPS 工作卫星的地面监控系统包括一个主控站、三个注入站和五个监测站。

主控站设在美国本土科罗拉多。主控站的任务是收集、处理本站和监测站收到的全部资料,编算出每颗卫星的星历和 GPS 时间系统,将预测的卫星星历、钟差、状态数据以及大气传播改正编制成导航电文传送到注入站。主控站还负责纠正卫星的轨道偏离,必要时调度卫星,让备用卫星取代失效的工作卫星。另外还负责监测整个地面监测系统的工作,检验注入给卫星的导航电文,监测卫星是否将导航电文发送给了用户。

三个注入站分别设在大西洋的阿森松岛、印度洋的迪戈加西亚岛和太平洋的卡瓦加兰。任务是将主控站发来的导航电文注入到相应卫星的存贮器。每天注入三次,每次注入 14 天的星历。此外,注入站能自动向主控站发射信号,每分钟报告一次自己的工作状态。

五个监测站除了位于主控站和三个注入站之处的四个站以外,还在夏威夷设立了一个监测站。监测站的主要任务是为主控站提供卫星的观测数据。每个监测站均用 GPS 信号接收机对每颗可见卫星每 6 分钟进行一次伪距测量和积分多普勒观测,采集气象要素等数据。在主控站的遥控下自动采集定轨数据并进行各项改正,每 15 分钟平滑一次观测数据,依此推算出

每 2 分钟间隔的观测值,然后将数据发送给主控站。

### 1.2.3 GPS 信号接收机

GPS 信号接收机的任务是:能够捕获到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号,并跟踪这些卫星的运行,对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理,以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间,解译出 GPS 卫星所发送的导航电文,实时地计算出测站的三维位置,甚至三维速度和时间。

静态定位中,GPS 接收机在捕获和跟踪 GPS 卫星的过程中固定不变,接收机高精度地测量 GPS 信号的传播时间,利用 GPS 卫星在轨的已知位置,解算出接收机天线所在位置的三维坐标。而动态定位则是用 GPS 接收机测定一个运动物体的运行轨迹。GPS 信号接收机所位于的运动物体叫做载体(如航行中的船舰,空中的飞机,行走的车辆等)。载体上的 GPS 接收机天线在跟踪 GPS 卫星的过程中相对地球而运动,接收机用 GPS 信号实时地测得运动载体的状态参数(瞬间三维位置和三维速度)。

接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包,构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收单元两大部分。对于测地型接收机来说,两个单元一般分成两个独立的部件,观测时将天线单元安置在测站上,接收单元置于测站附近的适当地方,用电缆线将两者连接成一个整机。也有的将天线单元和接收单元制作成一个整体,观测时将其安置在测站点上。

GPS 接收机一般用蓄电池作电源。同时采用机内机外两种直流电源。设置机内电池的目的在于更换外电池时不中断连续观测。在用机外电池的过程中,机内电池自动充电。关机后,机内电池为 RAM 存储器供电,以防止丢失数据。

近几年,国内引进了许多种类型的 GPS 测地型接收机。各种类型的 GPS 测地型接收机用于精密相对定位时,其双频接收机精度可达  $5\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$ ,单频接收机在一定距离内精度可达  $10\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$ 。用于差分定位其精度可达亚米级至厘米级。

目前,各种类型的 GPS 接收机体积越来越小,重量越来越轻,便于野外观测。GPS 和 GLONASS 兼容的全球导航定位系统接收机已经问世。



## § 1.3 GPS 在国民经济建设中的应用

### 1.3.1 GPS 系统的特点

GPS 导航定位以其高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等特点著称。

#### 1. 定位精度高

应用实践已经证明, GPS 相对定位精度在 50km 以内可达  $10^{-6}$ , 100 ~ 500km 可达  $10^{-7}$ , 1000km 以上可达  $10^{-9}$ 。在 300 ~ 1500m 工程精密定位中, 1 小时以上观测的解其平面位置误差小于 1mm, 与 ME - 5000 电磁波测距仪测定的边长比较, 其边长较差最大为 0.5mm, 较差中误差为 0.3mm。

#### 2. 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善, 软件的不断更新, 目前, 20km 以内相对静态定位, 仅需 15 ~ 20 分钟; 快速静态相对定位测量时, 当每个流动站与基准站相距在 15km 以内时, 流动站观测时间只需 1 ~ 2 分钟; 动态相对定位测量时, 流动站出发时观测 1 ~ 2 分钟, 然后可随时定位, 每站观测仅需几秒钟。

#### 3. 测站间无需通视

GPS 测量不要求测站之间互相通视, 只需测站上空开阔即可, 因此可节省大量的造标费用。由于无需点间通视, 点位位置可根据需要, 可稀可密, 使选点工作甚为灵活, 也可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

#### 4. 可提供三维坐标

经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测。GPS 可同时精确测定测站点的三维坐标。目前 GPS 水准可满足四等水准测量的精度。

#### 5. 操作简便

随着 GPS 接收机不断改进, 自动化程度越来越高, 有的已达“傻瓜化”的程度; 接收机的体积越来越小, 重量越来越轻, 极大地减轻测量工作者的工作紧张程度和劳动强度。使野外工作变得轻松愉快。

#### 6. 全天候作业

目前 GPS 观测可在一天 24 小时内的任何时间进行, 不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。

#### 7. 功能多, 应用广

GPS 系统不仅可用于测量、导航, 还可用于测速、测时。测速的精度可达 0.1m/s, 测时的精度可达几十毫微秒。其应用领域不断扩大。