

中国地质大学“十五”规划教材
中国地质大学“211工程”专项资助教材

全球定位系统(GPS) 原理与应用

胡友健 罗昀 曾云 编



中国地质大学出版社

中国地质大学“十五”规划教材
中国地质大学“211 工程”专项资助教材

全球定位系统(GPS)原理与应用

胡友健 罗 昀 曾 云 编

中国地质大学出版社

内 容 提 要

该教材主要分两个部分编写。第一部分(第一章至第七章)主要论述GPS的定位原理,内容包括概述、GPS的坐标和时间系统、卫星运动规律、GPS卫星信号的构成与传播、GPS定位的观测方程与误差分析、GPS绝对定位和相对定位;第二部分(第八章、第九章)主要介绍GPS的数据采集、处理方法及其应用。

本书虽作为高等学校非测绘工程专业本科生的GPS教材,但也可供各部门从事测绘工作的技术人员及测绘工程专业的本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

全球定位系统(GPS)原理与应用/胡友健,罗昀,曾云编. —武汉:中国地质大学出版社, 2003. 7

ISBN 7-5625-1769-x

I. 全…

II. ①胡…②罗…③曾…

III. 全球定位系统-原理-应用

IV. P228

全球定位系统(GPS)原理与应用

胡友健 罗昀 曾云 编

责任编辑:赵颖弘

责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路31号)

邮编:430074

电话:(027) 87482760

传真:87481537

E-mail: cbo@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:300千字 印张11.5

版次:2003年7月第1版

印次:2003年7月第1次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—1 000册

ISBN 7-5625-1769-x/P·598

定价:30.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

全球定位系统(GPS)是美国国防部主要为满足军事需要而建立的新一代卫星导航与定位系统,它具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位的能力。全球定位系统已成为美国导航技术现代化的最重要标志,并被视为20世纪美国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。

近10余年来,随着全球定位系统的软件和硬件的不断发展和完善,该系统已广泛地应用于国民经济建设和科学技术的许多领域,并逐渐深入到人们的日常生活中。例如,GPS以其全天候、高精度、自动化和高效率等特点,已在地球动力学研究、海洋大地测量、工程测量与灾害监测、天文学、地球物理勘探、国土资源调查、航空与卫星遥感、天气预报、运动目标测速以及精密时间传递等方面得到了广泛应用。GPS在人们生活中的应用,也具有非常广阔的前景。手表式的GPS接收机,将成为旅游者的忠实导游。GPS就像移动电话、传真机和计算机互联网一样,影响人们的日常生活,使我们离不开它。因此,对于当代大学生(尤其是理、工科大学生),有必要掌握GPS定位的基本原理和方法。据了解,国内已有部分高等学校为其各专业或部分专业开设GPS课程,但目前尚缺乏适合于非测绘工程专业的本科生使用的GPS教材。

基于以上所述,我们编写了这本供非测绘工程专业本科生使用的GPS教材(30~40学时),以满足教学需要。该教材注重阐述GPS定位的基本原理、基本方法及其广泛的实际应用,适度简化数学模型的推导过程,适当介绍电磁波测距和GPS数据处理所需的测量平差的基本知识,力图做到思路清晰,概念清楚,详略得当,文字通俗易懂。

本书共分九章,由胡友健、罗昀、曾云合作编写,胡友健任主编。全书由胡友健统稿。在编写过程中,武汉大学测绘学院的蔡宏翔教授给予了大力支持和帮助,并提供了部分研究成果;李征航教授对前六章的初稿进行了认真审阅,提出了许多宝贵的修改意见。笔者在此对他们表示衷心的感谢!

由于笔者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

笔 者

2003年3月于喻家山

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 GPS 的由来、特点及作用	(1)
1.2 GPS 系统的构成	(3)
1.3 美国政府的限制政策与用户策略	(8)
1.4 其它导航系统.....	(13)
第二章 GPS 使用的坐标系统和时间系统	(14)
2.1 概述.....	(14)
2.2 GPS 使用的坐标系统	(15)
2.3 GPS 使用的时间系统	(29)
第三章 卫星运动规律及GPS 卫星在轨位置计算	(35)
3.1 概述.....	(35)
3.2 卫星的无摄运动.....	(36)
3.3 卫星的受摄运动.....	(43)
3.4 卫星坐标的计算.....	(50)
第四章 GPS 卫星信号的构成与传播	(51)
4.1 电磁波测距的原理.....	(51)
4.2 GPS 的测距码信号	(54)
4.3 GPS 信号传播误差	(58)
4.4 GPS 卫星的导航电文	(62)
4.5 GPS 卫星信号的构成	(65)
第五章 GPS 定位的观测方程与误差分析	(67)
5.1 GPS 定位方式、观测量和观测方程	(67)
5.2 GPS 观测方程的列立	(69)
5.3 GPS 观测方程的解算	(73)
5.4 精度估计.....	(77)
5.5 GPS 定位误差的来源及其影响	(78)
第六章 GPS 绝对定位	(81)
6.1 绝对定位概述.....	(81)
6.2 动态绝对定位.....	(82)
6.3 静态绝对定位.....	(85)
6.4 可视卫星个数及其空间分布对定位精度的影响.....	(89)
第七章 GPS 相对定位	(94)
7.1 概述	(94)
7.2 GPS 静态相对定位	(94)
7.3 GPS 动态相对定位	(98)

7.4	整周跳变（周跳）及其修复	(103)
7.5	整周未知数的确定	(105)
第八章	GPS 数据采集与数据处理	(111)
8.1	概述	(111)
8.2	GPS 数据采集工作的实施	(111)
8.3	GPS 观测数据的测后处理概述	(123)
第九章	GPS 技术的应用	(148)
9.1	GPS 在大地（控制）测量方面的应用	(148)
9.2	GPS 在工程测量方面的应用	(149)
9.3	GPS 在现代板块运动及地震预报中的应用	(152)
9.4	GPS 在海洋资源勘探与开采中的应用	(156)
9.5	GPS 在航空摄影测量中的应用	(156)
9.6	GPS 在其它领域的应用简介	(159)
参考文献	(163)
附录	术语及缩写词.....	(166)

第一章 绪论

出于生产和生活的需要,很久以前人们就曾试图通过某种方式来描述地形、地物乃至整个地球的位置和形状。无数科学家和研究人员为此付出了毕生的精力,但受制于生产力水平的发展,在人类历史上的大多数时间里这种描述通常难以达到相当的精度且存在诸多限制和不足。20世纪50年代以来,人造卫星技术特别是全球定位系统(GPS)的建立和发展为解决这类问题开辟了广阔的前景。本章主要介绍全球定位系统的由来、特点、基本结构以及美国政府的有关政策等内容。

1.1 GPS的由来、特点及作用

1.1.1 GPS定位系统的由来

1957年10月4日,前苏联发射了有史以来第一颗人造地球卫星——斯普特尼克(Sputnik-1)。这是航天航空技术发展的一个里程碑,是人类想像力和创造力的体现。在它之后空间信息科学及其分支领域迅速发展并逐步影响到人们日常的生产生活。可以毫不夸张地说,人造卫星技术的发展大大改善了人类认识和适应自然的能力,使科学技术水平跨入了一个崭新的时代。人造地球卫星技术经过近半个世纪的发展已经被成功应用于通讯、气象、导航、资源勘探、环境保护、城市规划、工业建设、灾害预报、天文学、地球动力学、地球物理等许多学科领域。其广泛应用推动了科学技术水平和人们生产生活水平的提高,甚至影响到国际政治、经济和军事格局。

1958年12月,美国海军武器实验室(NWL—Naval Weapon Laboratory)委托美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室(The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory)研制为军用船舶提供导航服务的卫星系统,即海军导航卫星系统(NNSS—Navy Navigation Satellite System)。由于该系统中卫星轨道都经过地极,故也称子午卫星系统(Transit)。研究此系统主要是为军用的运载工具(如战斗机、军舰、导弹等)和各作战单位提供全天候的导航服务。

1964年NNSS建成并投入使用。1967年7月美国政府宣布解密子午卫星的部分导航电文,遂使高精度卫星导航技术得以应用于民用。由于子午卫星导航技术主要是利用多普勒频移(Doppler Shift)原理实现,所以又叫卫星多普勒定位技术。我国于20世纪70年代中期开始引进卫星多普勒接收机,80年代曾进行多次大规模联测,利用此技术在西沙群岛、西北地区甚至南极乔治岛等地区施测,取得良好的定位效果。虽然海军导航卫星系统在空间信息技术史上“具有革命性突破”,但由于卫星数量少(5~6颗)、轨道高度较低(约1000km)、卫星间隔时间较长(平均约1.5hr)、难以提供高程数据等原因(详见表1-1),无法连续进行三维坐标定位,而且精度也较低(单点定位精度约3~5m、相对精度约1m、长时间联测精度约0.5m)。显然,无论是军事领域还是民用领域,该技术的应用都有相当的局限性。该系统于1996年停止工作。

1973年美国国防部(Department of Defense)协同有关军方机构共同研究开发新一代的

卫星导航系统。这就是“授时与测距导航系统/全球定位系统 (NAVSTAR/GPS—Navigation System Timing and Ranging/Global Positioning System)，简称全球定位系统 (GPS)。

1994 年 GPS 系统基本建成，成为全球共享的空间信息资源，是空间信息系统的一个重要组成部分。从 1973 年至今，美国政府还在不断地研究和更新 GPS 的软硬件设备，累计耗资超过 200 亿美元。

表 1-1 NNSS 卫星与 GPS 卫星比较

系统特征	NNSS	GPS
载波频率 (GHz)	0.15 和 0.40	1.23 和 1.58
卫星平均高度 (km)	约 1 000	约 20 200
卫星数量 (颗)	5~6	24
卫星运行周期 (min)	107	718
卫星钟精确度 (ns)	10^{-11}	10^{-12}

1.1.2 GPS 的基本特点和作用

与其它的导航和定位技术相比，GPS 定位技术主要有以下特点：

(1)全球范围内连续覆盖。由于 GPS 卫星的数目较多，其空间分布和运行周期经精心设计，可使地球上（包括水面和空中）任何地点在任何时候都能观测到至少 4 颗卫星（这是 GPS 定位系统获得解的必要条件）。从而可以保证全球范围的全天候连续三维定位。

(2)实现实时定位。GPS 定位系统可以实时确定运动载体的三维坐标和速度矢量。从而可以实时地监视和修正载体的运动方向，避开各种不利环境，选择最佳航线。这是许多导航定位技术难以企及的。

(3)定位精度高。利用 GPS 系统可以获得动态目标的高精度的坐标、速度和时间信息，在较大空间尺度上对静态目标可以获得 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 的相对定位精度。随着技术水平的提高，定位精度还将进一步提高。

(4)静态定位观测效率高。根据精度要求不同，GPS 静态观测时间从数分钟到数十天不等，从数据采集到数据处理基本上都是自动完成。而使用传统的测绘技术达到相同的精度则比较困难，且往往需要几倍乃至十几倍的观测时间并耗费大量人力物力。

(5)应用广泛。GPS 以其全天候、高精度、自动化、高效益等显著特点成功地应用于测绘领域、资源勘探、环境保护、农林牧渔、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、地球动力学等多门学科。以下试举两例：

例 1-1 美国德州的科学家通过配备在奶牛脖子上的 GPS 定位装置（如图 1-1），跟踪它们的路线，观察奶牛饮水、吃草的区域和行进的路线，来研究水源、牧草分布等畜牧问题。图 1-1 中牛脖子下的金属装置即是一个 GPS 定位装置。这个“项圈”不到一磅重，采集并存储包括定位数据在内的几个种类数据，牛几乎不会注意到它的存在。

例 1-2 联合制导攻击武器 (JDAM—Joint Direct Attack Munition) 是美国一种将常规炸弹经过改造使其具备精确打击能力的战术武器，主要是在常规炸弹上安装一个 GPS 收发装置，使其根据 GPS 系统提供的信息进行精确定位。美

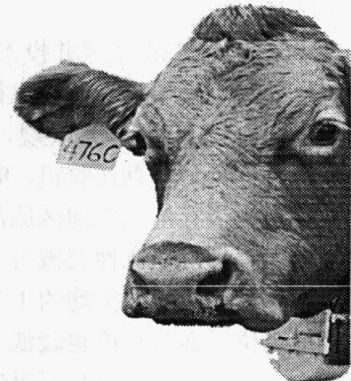


图 1-1 “GPS 奶牛”

国军方称该技术具有极高的系统可靠性。自 1991 年海湾战争以后，JDAM 逐渐取代了昂贵的激光制导炸弹，成为美国空军的主要打击武器之一（如图 1-2）。



图 1-2 联合制导攻击武器（JDAM）

JDAM 炸弹能从远离攻击目标 24km 的高度投下，经 GPS 的矫正后让炸弹精确落到打击目标上，令人防不胜防。据报道，“9.11”恐怖袭击事件后，美军在对阿富汗前塔利班政权的军事打击中曾使用了该种武器。

有关的 GPS 应用将在第八章中详细介绍。

综上所述，GPS 技术的产生和发展，是空间信息技术的一次重大突破。不但使传统测量理论和方法发生巨大的变革，而且对其它相关信息技术领域产生深远影响。

1.2 GPS 系统的构成

一般说来，GPS 系统主要由 3 个部分组成：空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分（如图 1-3）。这 3 个部分对 GPS 系统的正常工作所起的作用各不相同，缺一不可。

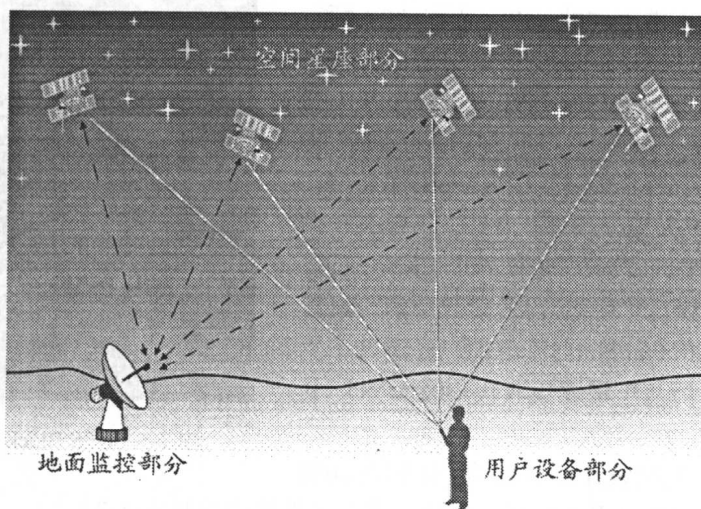


图 1-3 GPS 系统构成

1.2.1 空间星座部分 (Space Segment)

一、卫星星座 (GPS Constellation) 及其几何分布

如图 1-4 所示。GPS 系统的星座部分主要由 24 颗 (21+3) 卫星构成, 其中 21 颗为工作卫星, 另外 3 颗为备用卫星。这 24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内, 每个轨道面包含 4 颗卫星。轨道面相对赤道面倾角为 55° , 轨道的升交点赤经各相差 60° 。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差 90° , 一个轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星升交角距超前 30° 。卫星轨道为椭圆形, 平均高度约 20 200km, 运行周期大约 11hr58min。在两万多公里高空中的 GPS 卫星, 当地球自转一周时, 它们绕地球运行二周。这样, 对于地面观测者来说, 每天将提前约 4 分钟见到同一颗 GPS 卫星, 且每天见到的卫星几何分布相同。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而有所不同, 最少可见到 4 颗, 最多时可见到 11 颗。在用 GPS 信号导航定位时, 为了解算点位的经度 (Longitude)、纬度 (Latitude) 和高程 (Altitude), 必须观测至少 4 颗 GPS 卫星。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。在某地某时由于地理位置和环境因素的影响或者图形结构较差时, 可能难以测得精确的点位坐标, 这种时间段叫做“间隙段”。但这种间隙段是很短暂的, 并不影响全球绝大多数地方的全天候、高精度、连续实时定位。

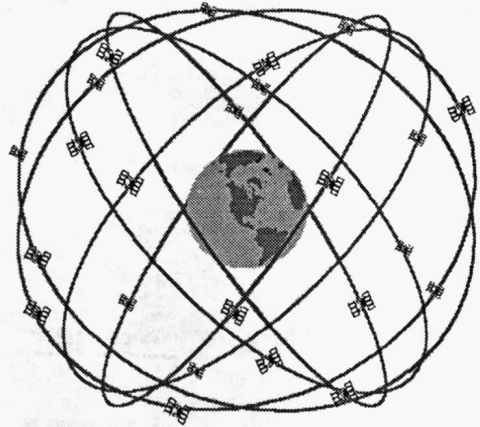


图 1-4 GPS 卫星星座空间分布

空间星座中 3 颗备用卫星可在必要时根据指令替代发生故障的卫星。这对 GPS 系统高效而可靠地工作是非常重要的。

二、GPS 卫星的种类

从 1978 年发射第一颗 GPS 试验卫星截至 2003 年 2 月, 仍然可以正常工作的 GPS 卫星有 28 颗。早期发射升空的 11 颗 GPS Block I 型卫星已全部停止工作 (最后一颗 GPS Block I 型卫星于 1994 年 2 月停止使用)。目前这 28 颗卫星中的 21 颗属于 GPS Block II 或 II A 型, 另外 7 颗属于 GPS Block II R 型。GPS Block II R 共发射了 8 颗, 1997 年曾有一颗 GPS Block II R 卫星因发射失败未能进入预定轨道, 最近的一颗是 2003 年 1 月 29 日发射升空的。最新型的 GPS Block II F (如图 1-5) 目前已经进入了生产车间, 预计在今后几年将逐步取代 GPS Block II 和 II A 型卫星。

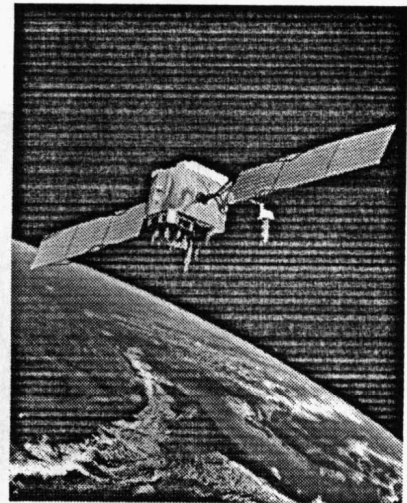


图 1-5 GPS Block II F 卫星

GPS Block II F 卫星设计寿命 15 年, 计划到 2008 年部署 18 颗。GPS Block II F 具有一些新的特点 (性能参数见表 1-2)。

现行 GPS 信号主要包括两种频率不同的载波, L_1 载波和 L_2 载波。而新型 GPS Block

II F 卫星拟加入的第二民用频率 L₅ 载波可提高民用用户 GPS 信号精度。

目前有关机构正在研究未来 GPS 卫星导航的需求，讨论制定 GPS Block III 型卫星系统结构、系统安全性、可靠程度和各种可能的风险，计划在未来的几年中发射 GPS Block III 的第一颗实验卫星。

三、GPS 卫星的主要功能

从图 1-5 可以看到，GPS 卫星的主体部分近似呈圆柱体，两侧配有双叶太阳能电池板。太阳能电池板能自动对日定向，保证卫星的日常作用电。新型的 GPS Block II F 卫星其太阳能电池板比 II、II A 和 II R 更大。另外在每颗卫星内都配备 4 台原子钟，

包括两台铷钟 (RB—Rubidium) 和两台铯钟 (CS—Cesium)，这是卫星的关键设备之一。它可发射标准频率信号，为 GPS 提供高精度的时间标准。

GPS 卫星的主要功能是：

- (1) 接收并存储发自地面监控站的导航信息。
- (2) 利用星载高精度原子钟提供精密时间标准。
- (3) 通过卫星上的微处理机进行某些必要的数据处理。
- (4) 向用户播发定位数据信息。
- (5) 在地面监控站的指令下调整飞行姿态或启用备用卫星。

除了上述功能，部分 GPS 卫星还装配有某些附加设备，例如星载激光反射器和用于监测核爆炸的传感器。前者可用于激光测卫 (SLR—Satellite Laser Ranging)，后者主要用来监视美国以外的核国家在地面或大气层中进行核试验的情况。

1.2.2 地面监控部分 (Control Segment)

GPS 的地面监控部分主要由分布全球的 6 个地面站构成，其中包括卫星监测站、主控站、备用主控站和信息注入站，分别位于科罗拉多 (Colorado)、盖茨堡 (Gaithersburg)、夏威夷 (Hawaii)、南大西洋的阿松森群岛 (Ascencion)、印度洋的迭哥伽西亚 (Diego Garcia) 和南太平洋的卡瓦加兰 (Kwajalein)，如图 1-6 所示。



图 1-6 地面监控系统分布图

表 1-2 GPS Block II F 卫星有关参数

尺寸 (m)	1.8×1.6×1.4
质量 (kg)	2 136
自主运行时间 (d)	60
功率 (W)	1 510
上行中继数据率 (kbps)	1~2
下行中继数据率 (kbps)	32
卫星钟精确度 (ns)	20
设计寿命 (yr)	15

一、监测站 (Monitor Station)

所有地面站都有监测站的功能，它们是主控站控制下的数据自动采集中心。其主要作用就是对 GPS 卫星数据和当地的环境数据进行采集、存储并传送给主控站。站内配备有 GPS 双频接收机、高精度原子钟、计算机和若干环境参数传感器。接收机用来采集 GPS 卫星数据、监测卫星工作状态。原子钟提供时间标准。环境参数传感器则收集当地有关的气象数据。所有数据经计算机初步处理后存储并传送给主控站，再由主控站做进一步的数据处理（参见图 1-7）。

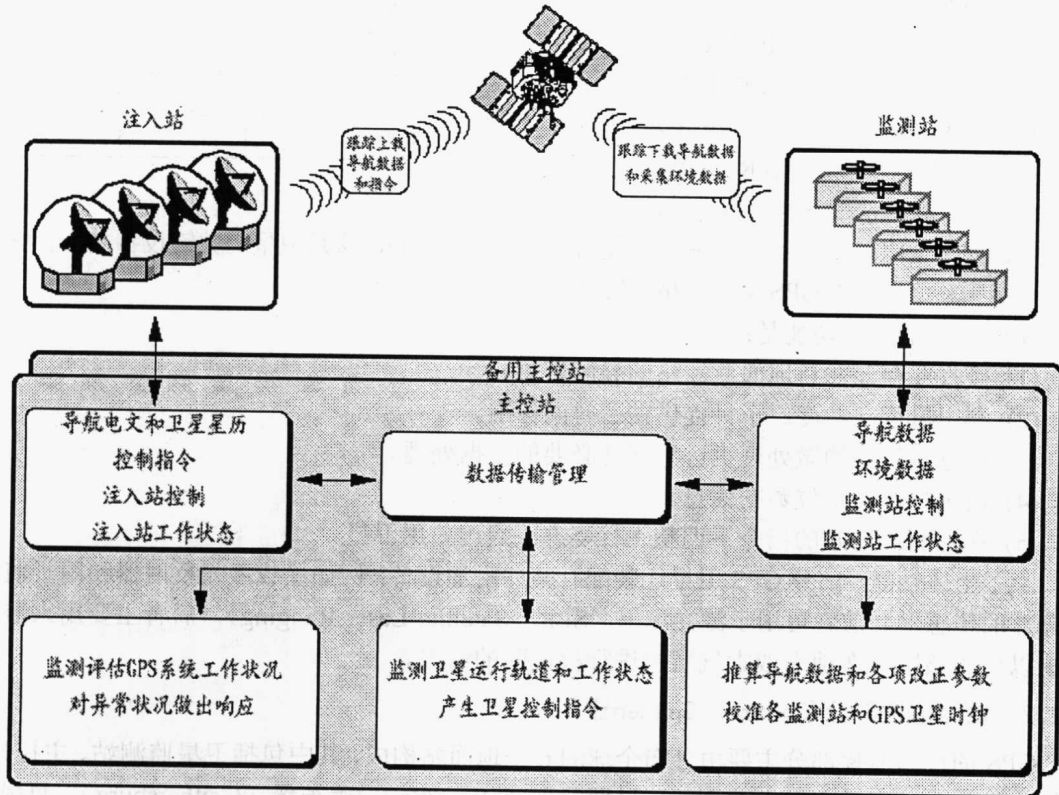


图 1-7 地面监控系统的运作

二、主控站 (Master Control Station)

主控站只有一个，设在美国科罗拉多 (Colorado) 的施瑞福空军基地 (Schriever Air Force Base)。它是整个 GPS 系统的“中枢神经”（参见图 1-7）。其主要作用包括：

(1) 根据本站和其它监测站的所有观测数据，推算各卫星的星历、卫星钟差、大气改正等参数，并把这些数据传送到注入站。

(2) 提供全球定位系统的时间基准。校准各监测站和 GPS 卫星的原子钟，所得误差编入导航电文再送到注入站。

(3) 甄别偏离轨道的 GPS 卫星，发出指令使其沿预定轨道运行。

(4) 判断卫星工作状态，启用备用卫星代替失效的卫星。

三、备用主控站 (Backup Master Control Station)

备用主控站也只有一个，位于美国马里兰州的盖茨堡 (Gaithersburg Maryland)。不言而喻它的作用和主控站完全一样，当某些特殊情况发生时启用。一旦需要，主控站的工作人员

能在 24hr 以内集结于备用主控站并展开工作。为了确保万无一失，备用主控站每年都要进行实际操作演练。

四、注入站 (Ground Antenna)

注入站目前有 4 个，位于科罗拉多、阿松森群岛等地。注入站的主要设备包括一个大型天线、一台 C 波段发射机和计算机。它的主要作用就是将主控站推算的卫星星历、导航电文、钟差和其它控制指令，以一定的格式注入到相应卫星的存储系统，并监测注入信息的准确性 (参见图 1-7)。

GPS 系统地面监控部分的大部分工作都是在原子钟和计算机的控制下自动完成的，其中监测站和注入站均可做到 24hr 无人值守。各站点间数据通信都是利用了专用网络实现，具有较高的效率和自动化程度。

1.2.3 用户设备部分 (User Segment)

作为被动式的定位技术，GPS 用户必须通过专用信号接收设备才能达到定位目的。

用户设备部分的主要设备是 GPS 接收机，它是一种特制的无线电接收机。其主要作用是接收导航卫星发出的信号，对卫星信号进行处理后依据所得数据确定接收机所在的地理位置。根据不同性质的用户和所需的功能，需要配置不同种类的 GPS 接收机。其性能结构、形状尺寸和价格也大相径庭。例如：航海和航空用的导航型接收机，要具有与存储卡或其它媒介相互通讯的功能，因为其中存有电子导航图等资料；测地用的接收机 (如图 1-8a) 就要求具有很高的精度，并能快速采集和存储数据；军用的接收机，要附加解码模块，如果用于地面部队则要求较高的机动性 (如图 1-8b 为便携式军用 GPS 接收机)。

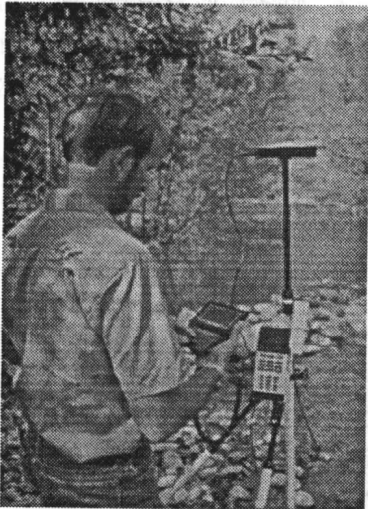


图 1-8a 测地型接收机

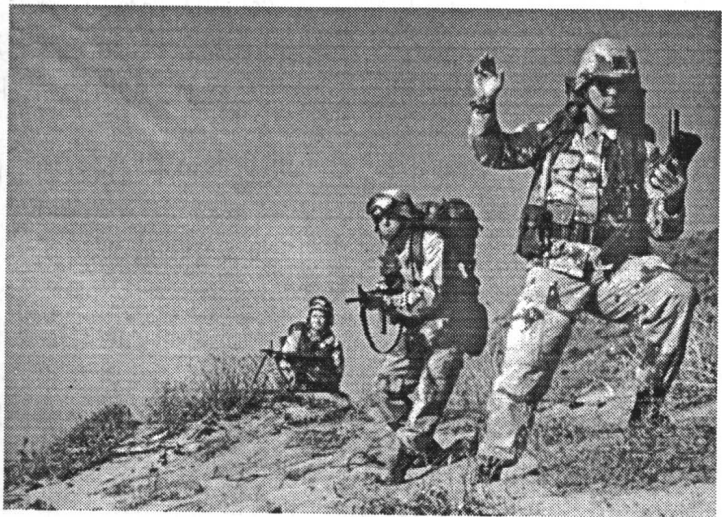


图 1-8b 军用 GPS 接收机

GPS 接收机的种类虽然很多，但它的硬件结构基本一致，分为天线单元和接收单元两部分。图 1-9 中为一个简化的接收机结构示意图。

天线单元由接收天线和前置放大器组成，其主要作用是接收卫星信号。接收单元包括有信号通道、存储、计算与显示控制及电源等部件。其主要功能是接收来自天线的信号，经过

变频、放大、滤波等一系列处理，实现对 GPS 信号的跟踪、锁定、解调，分离出导航信息。根据收到的卫星星历、伪距观测数据以及载波观测量，计算出三维坐标和时间。接收单元的显示控制等部件可以完成人机对话、输入各种指令、控制屏幕显示等操作。

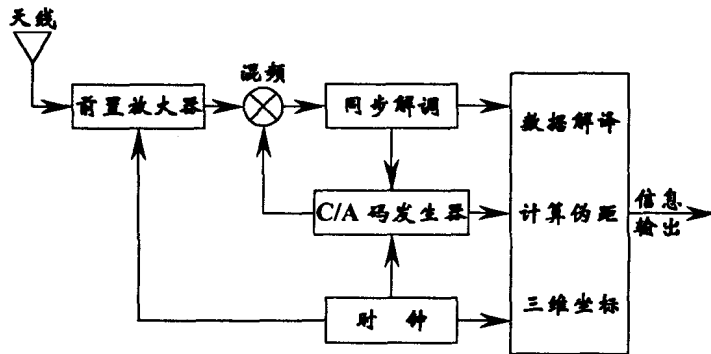


图 1-9 接收机基本结构示意图

1.3 美国政府的限制政策与用户策略

1.3.1 美国政府的限制性政策

1983 年，大韩民航 007 航班在前苏联领空被苏军战机击落。之后不久，当时的美国总统里根宣布将开放部分 GPS 导航信号以供民用导航使用。此言一出，许多厂商纷纷开始研发用于民用的 GPS 接收机，其中既有导航用的接收机，也包括测地型的接收机。为了保障其自身的利益与安全，美国政府随即又采取了一系列限制措施，以防止非经美国政府特许的用户获得高精度定位信息。限制政策主要包括：

- (1) 对不同的 GPS 用户，分别提供两种不同精度的定位服务。
- (2) 实施选择可用性政策，即 SA 政策（已被取消）。
- (3) 实施反电子欺骗防护措施，即 A-S 措施。

一、精密定位服务与标准定位服务

利用测距码（Ranging Code）信号确定站星之间的距离是 GPS 定位的关键技术之一。而在 GPS 卫星发送的电磁波信号中，调制了两种精度不同的测距码，即所谓 C/A 码（Coarse/Acquisition Code）和 P 码（Precise Code）。前者测距精度低，又称粗码；后者测距精度高，又叫精码。对应这两种不同的测距码，GPS 提供两种定位服务，即标准定位服务（SPS—Standard Positioning Service）和精密定位服务（PPS—Precise Positioning Service）。

精密定位服务（PPS），主要提供 L_1 载波和 L_2 载波上的 P 码和 C/A 码以及导航电文。它所服务的对象是美国政府特许用户（Authorized Users）。所谓特许用户，除了美军及其盟军以外，还包括某些政府部门和经政府授权的民用用户。P 码具有良好的测距精度，加之双频观测（ L_1 载波和 L_2 载波）可以有效削弱电离层弥散效应引起的误差，因此利用 PPS 单点实时定位的水平精度可达 5~10m。然而可解调 P 码的接收机设备非特许用户不易获得，所以很难加以利用。

标准定位服务（SPS），主要提供 L_1 载波上的 C/A 码以及导航电文。它服务的对象都是

非特许用户。由于 C/A 码测距精度相对较低，又不能利用双频观测抑制电离层的影响，因此，用户所能获得的单点实时定位的水平精度只有 15~20m 左右（在取消 SA 政策以后）。不过，美国政府承诺未来将在 L₂ 载波上加载民用信号（2001 年 1 月曾进行过加载试验），由此非特许用户也可以利用双频观测削弱电离层引起的误差。SPS 单点实时定位的精度可望进一步提高。

二、选择可用性 (SA—Selective Availability)

为了降低 SPS 的定位精度，自 1991 年 7 月美国开始对所有在轨的工作卫星实施 SA 技术。该技术主要是利用人为加入的噪声干扰 GPS 基准信号和卫星星历，从而降低 C/A 码单点实时定位的精度。特许用户可以利用密钥自动消除 SA 的影响，而非特许用户在 SA 技术影响下，标准定位服务单点实时定位的水平精度降到约 100m。且还可以根据需要加大干扰力度，进一步降低精度。

由于种种原因，美国公司于 2000 年 5 月 1 日已经停止了施加 SA 技术。

三、反电子欺骗 (A-S—Anti-Spoofing)

当 P 码已被破解，或者有人掌握了特许用户接收机接收的卫星信号的频率和 P 码相位，便可以发射“适当”频率的干扰信号，诱使特许用户产生错误的定位信息。为了防止这种电子欺骗，美国政府采用反电子欺骗 (A-S) 技术。具体地说就是使用严格保密的 W 码，通过 P 码和 W 码模二相加，将 P 码转换成 Y 码。这时，非特许用户将无法继续应用 P 码进行精密定位或电子欺骗。

1.3.2 限制性政策下非特许用户的应对策略

美国政府的限制性政策无疑是出于对自身安全和利益的考虑，但这对包括美国本土在内的世界各国的广大非特许用户造成了影响。为了摆脱这种桎梏，广大用户展开许多研究和试验工作，并取得了一系列成果。目前采取的措施主要包括：

一、建立独立的 GPS 测轨系统

GPS 卫星定轨精度直接关系到定位精度，而卫星定轨主要是靠 GPS 卫星发送的“官方”广播星历。为了提高定轨精度，降低对广播星历的依赖性，一些非官方的民间机构和组织利用 GPS 卫星建立独立的跟踪系统，为广大的非特许用户提供精密卫星星历。显然，独立的定轨系统对摆脱美国政府的限制，促进对 GPS 的研究和广泛应用具有重要意义。

自美国政府宣布 GPS 将为民用提供服务后不久，美国、加拿大、澳大利亚以及一些欧洲国家的科研教育机构和组织纷纷开始筹建区域性或全球的精密测轨系统。进入 20 世纪 90 年代以后，其跟踪站已广泛分布全球五大洲的几乎各个角落，形成一个跟踪网络，其定轨精度最高可达到分米级水平。所谓跟踪站 (Satellite Tracking Station)，就相当于民用测轨系统的监测站。其设备和作用与 GPS 系统的官方监测站 (详见 1.2.2) 非常类似。从理论上讲，数量更多、分布更广的跟踪网所能获得的定轨精度将高于监测站。

1993 年，国际大地测量协会 (IAG—the International Association of Geodesy) 宣布成立国际地球动力学 GPS 服务组织 (IGS—the International GPS Service for Geodynamics)。IGS 的任务主要是为大地测量、地球动力学和地球物理等学科领域提供服务，其次也为政府部门和某些商业组织的 GPS 应用提供数据支持。截至 2003 年 1 月 8 日，该组织所属的跟踪站已达 348 个之多 (见图 1-10)，其中也包括中国境内的跟踪站。IGS 跟踪网确定的 GPS 卫星星历的精度可达到厘米级，而且经过大量的研究和试验取得了许多的科研成果。这些研究对发展和普及 GPS 系统具有重要意义。

1550951

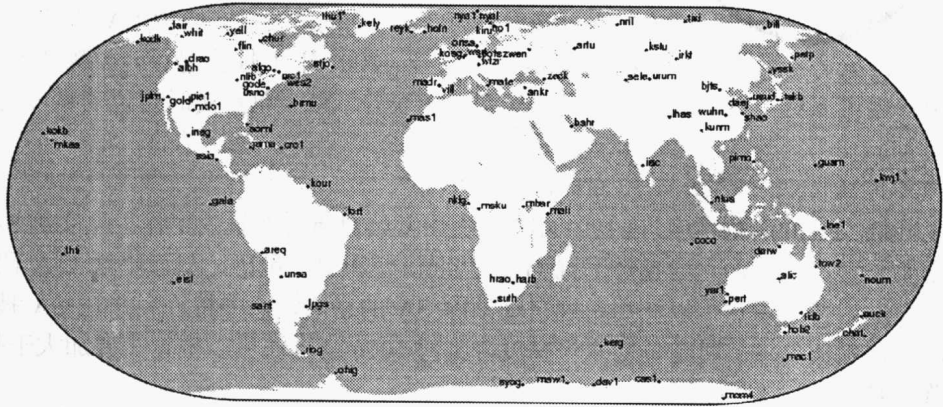


图 1-10 IGS 跟踪站分布图

虽然利用 IGS 提供的精密星历可以获得很高的定位精度，但由于种种障隔，这种全球独立测轨系统多数是应用在科研教育等领域，目前还难以对日常的生产生活产生影响。

二、研究、开发差分 GPS (DGPS—Differential GPS) 定位系统

差分 GPS 定位的基本方式之一就是对观测值之间进行线性组合。例如在一个测站对两颗卫星的观测量、两个测站对一颗卫星的观测量或一个测站对一颗卫星的两次观测量之间求差。这样做的目的意在消除或削弱某些误差项（比如电离层和对流层引起的误差），提高定位精度。差分的方式在以前的无线电导航系统中曾被广泛应用。

根据差分信号作用范围的不同，差分 GPS 定位可分为两类，即局域差分 GPS (LADGPS—Local Area Differential GPS) 和广域差分 GPS (WADGPS—Wide Area Differential GPS)。前者作用范围较小（例如 150km），主要提供综合的差分 GPS 改正信息。后者作用范围较大（一般超过 1 000km 甚至全球范围），主要是针对具体的误差源提供改正信息。

20 世纪 90 年代中后期，美国联邦航空局 (FAA—Federal Aviation Administration) 开始建立广域增强系统 (WAAS—Wide Area Augmentation System)。该系统有较大覆盖范围（参见图 1-11），主要为民用航空器的飞行和起降提供导航。其工作原理是：首先由地面的参考站 (Wide-area Reference Station) 采集 GPS 信号并传递给主控站 (Wide-area Master Station)，

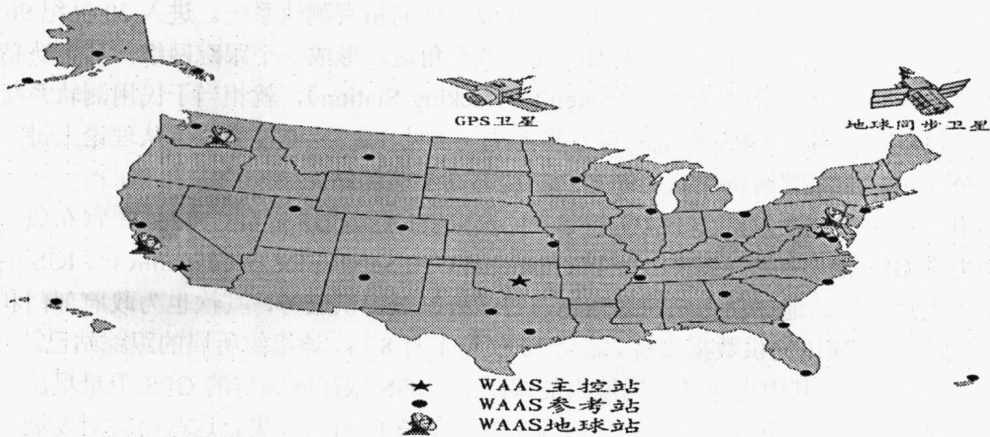


图 1-11 WAAS 系统分布图

主控站获取数据后经计算求得差分改正信息，再将改正信息传送至地球站（Ground Earth Station），由地球站将改正信息上传给在轨的地球同步卫星（Geostationary Earth Orbit Satellite），最后由地球同步卫星向广大用户播发 WAAS 差分信号。该系统于 2000 年 8 月开始投入使用，其动态定位水平精度可达到 3~5m，垂直精度可达到 3~7m。

静态差分定位可以达到毫米级精度，广泛应用于精密工程测量、工程与地壳变形监测、灾害预报以及地球动力学等领域。

三、建立独立的导航定位系统

GPS 虽系军民两用的卫星导航系统，实则完全由美国政府握柄。它能随时施加具有可伸缩性的限制政策，其它各国难免格于成例，受制其中。于是，俄罗斯、欧共体、中国等一些国家和地区开始发展自己的卫星导航系统。

1. 全球导航卫星系统

20 世纪 60 年代，前苏联建立了帕瑞斯（Parus）卫星导航系统，有的文献也称之为 Tsikada-M。该系统主要用于军事用途，几乎从未被官方提及，因而外界知之甚少。到了 70 年代，前苏联又启动了契卡达（Tsikada-C）导航系统，这个导航系统曾用于前苏联的海船导航，被认为是一个民用卫星导航系统并一直沿用到 90 年代。

1978 年前苏联开始研发类似于 GPS 系统的全球导航卫星系统（GLONASS—Global Navigation Satellite System）。该系统也包含 24 颗卫星（其中包括 3 颗备用卫星），均匀分布于 3 个轨道面。轨道倾角约 64.8° ，轨道高度约 19 130~20 180km。卫星绕地球一圈的周期约为 11hr15min。卫星识别采用频分多址，即不同的卫星发射频率不同。由于卫星轨道倾角大于 GPS 倾角，所以在高纬度（ 50° 以上）地区的卫星可视性要比 GPS 好。该种导航卫星的设计寿命为 3~5yr（参见图 1-12）。

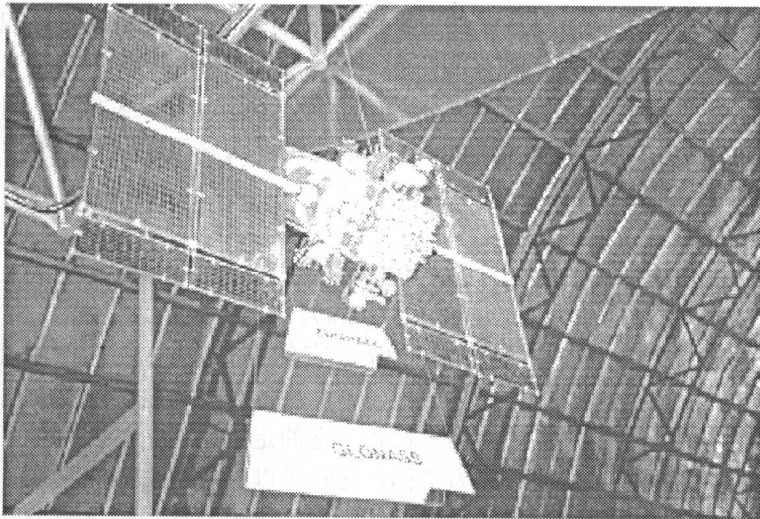


图 1-12 GLONASS 卫星

GLONASS 的地面监控系统有 5 个跟踪站、9 个监测站和 1 个主控站，它们均设于前苏联本土。用户可以通过接收调制在两个载频上的民用测距码和高精度测距码以及卫星星历等导航信息实现定位，其算法与 GPS 定位算法类似。

自 1982 年 10 月 12 日前苏联发射第一颗 GLONASS 卫星截至 2001 年 12 月 31 日，一共