

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

# GPS 导航原理与应用

*Principles and Applications of  
GPS Navigation*

王惠南 编著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

本书阐述了 GPS 导航及其应用的基本原理,全书共分为十章。前三章介绍了全球定位系统(GPS)的发展概况、系统的构成、导航定位的时空参照系以及 GPS 卫星的运动学参数;第四章简介了 GPS 卫星的广播信号;第五、六、七章比较详细地分析了 GPS 导航定位的观测方程和静、动态定位原理;第八章给出了 GPS 载体速度和姿态测量的方法;第九章着重阐述了利用卡尔曼滤波对 GPS 和 INS 进行组合的方法和几个典型方案,GPS/INS 组合导航系统是目前在国防领域实现导航定位的较理想的系统;第十章介绍了 GPS 技术在一些比较重要的领域的应用知识。

本书可作为高等院校导航定位、精确打击专业的教学用书,也可供从事 GPS 测量学和 GPS 导航学等领域的专业技术人员以及科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 导航原理与应用/王惠南编著. —北京:科学出版社,2003  
研究生教学用书/教育部研究生工作办公室推荐  
ISBN 7-03-011186-9

I .G… II .王… III .全球定位系统(GPS)-基本知识  
IV .P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009594 号

策划编辑:钟 谊 / 文案编辑:孙克玮 / 责任校对:柏连海  
责任印制:刘秀平 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2003年8月第一次印刷 印张:22

印数:1—3 500 字数:414 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 前 言

全球定位系统 GPS 是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System 的字头缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称。它的含义是利用导航卫星进行测时和测距, GPS 是当前最先进的精密卫星导航定位系统。

GPS 是美国国防部为满足军事部门对海上、空中和陆地运载工具的高精度导航和定位要求而建立的。该系统花费超过 100 亿美元的庞大研制经费, 经过 20 余年的不懈努力, 从方案论证、研究、试验到研制和组网, 最后于 1994 年 3 月 10 日, 24 颗工作卫星全部进入预定轨道, 系统全面投入正常运行。

GPS 是一种全新的空基无线电导航系统, 它不仅具有全球性、全天候和连续的精密三维定位能力, 而且能实时地对运载体的速度、姿态进行测定以及精确授时。GPS 是现代科学技术发展的结晶, 是美国继阿波罗登月计划和航天飞机后的第三个庞大的空间工程。因此, GPS 已成为美国导航技术现代化的最重要的标志。

据报道, 早在 1990 年的海湾战争中, 尽管 GPS 系统尚未全部建成, 但它从根本上解决了空中、陆地和海上运载体的定位和导航问题, 为美军及其盟军部队精确打击敌人, 正确引导部队迅速穿越沙漠, 占领预定目标以及效率极高地提供后勤救援发挥了前所未有的重要作用。目前, 大量 GPS 用户设备已应用于舰艇、战车、飞机的导航; 应用于战术、战略导弹的试验、测控与制导; 应用于各种卫星测控等几乎所有的军事领域。军事专家认为, 未来的战争, 将是高科技的“数字战争”, 先进的导航定位将是“数字战争”的必要条件。因此, GPS 技术的发展和军事应用, 引起了各国政府和国防部门的普遍关注。

除了在军事领域的应用之外, 近十余年来, GPS 精密定位技术, 已经广泛地渗透到经济建设和科学实验的各个领域。比如: 它已成功地应用于大地测量和城市控制网; 正在试验应用于民用飞机的航线导航和精密进场着陆; 应用于陆地车辆的智能、交通管理; 应用于地球资源勘察、大型工程项目设计测量与形变监测; 应用于航测与卫星遥感等。GPS 技术的高精度和自动化深刻地影响着地球动力学、大地测量学、天文学及其相关学科领域, 它在这些基础学科的应用研究与开拓工作方面都取得了迅速的发展和卓越的成就, 展示了 GPS 巨大的优势和潜力。

近几年来, GPS 技术甚至进入到人们的日常生活中, 比如应用于车辆跟踪、汽车导航、旅游、探险、狩猎、公安、地理信息、农业等方面。

GPS 技术在各方面的应用正在蓬勃发展, 可以相信, 它在军用、民用各个领域

的渗透、应用必将朝着更宽广的范围和更深刻的层次迅速发展。

为了适应 GPS 应用技术发展的需要,本书向广大 GPS 用户和有兴趣的读者介绍了全球定位系统(GPS)的基本工作原理以及有关应用技术的理论知识,尤其对 GPS/INS 组合导航系统做了较深入的分析。由于 GPS/INS 组合导航系统可以充分发挥各自的优点,克服缺点,实现在高动态和强电子干扰的环境下实时、高精度地导航定位,因此,GPS/INS 组合导航系统具有广泛的应用前途,特别是在航空、航天导航和武器精确制导方面,具有非常重要的作用。

编写本书的目的在于促进 GPS 新技术的普及和应用,同时为我国导航定位技术的现代化服务。

本书共分为十章。第一章为绪论。为使读者对 GPS 有一个概括的了解,该章简要地介绍了卫星导航定位技术的发展历史以及全球定位系统(GPS)的构成概况。第二章简要地介绍了 GPS 测量所需要的坐标系统和时间系统,离开时、空参照系来讲测量是没有意义的,故了解这些系统的定义以及不同参照系统之间的转换方法,对于深入地掌握 GPS 测量原理是必不可少的。第三章根据开普勒定理,介绍了卫星运动的基础知识和卫星坐标的计算方法,这对于理解 GPS 卫星运动的基本规律和星历计算非常重要。第四章简要地介绍了 GPS 卫星播发的信号的基本概念,并对 C/A 码和 P 码的产生原理做了简述,最后简介了 GPS 卫星的导航电文。第五章对 GPS 导航定位的观测量进行了较深入的分析,并对观测量的主要误差来源进行了较详细的讨论,推导了伪距测量观测方程以及它们的线性化方程,这些是利用 GPS 进行高精度定位、导航的重要依据。第六章和第七章分别讨论了 GPS 静态、动态定位原理,比较详细地分析了有关定位的观测方程及其线性化形式,讨论了观测数据的处理和精度评定等重要概念。位置参数是导航参数中最重要参数,利用 GPS 技术来测定用户的位置坐标的内容则是本书的重点。第八章介绍了导航参数中不可缺少的载体速度的测量、载体姿态的测量以及 GPS 授时,为 GPS 导航提供了全部必要的参数。第九章详细地讨论了 GPS/INS 组合导航系统。由于惯性导航系统(INS)具有极好的自主导航能力,依靠惯性测量可以独立给出载体的位置、速度和姿态等导航参数,抗干扰能力强,但其误差会随时间积累,严重影响导航精度。而 GPS 导航定位系统显然具有全球、全天候、高精度实时定位等优点,但是其动态性能和抗干扰性能较差。因此,GPS/INS 组合可以实现两种系统的优势互补。本章首先简要地讨论了卡尔曼滤波技术,然后介绍了利用卡尔曼滤波进行组合的一些方法和特点,最后分析讨论了卡尔曼滤波器在 GPS/INS 组合导航系统应用中的几个方案。人们普遍认为,GPS/INS 组合导航系统是目前和今后进行空中、海上和陆地导航和定位的较理想的系统,故本章对研究、使用导航系统的读者来说是最重要的。第十章利用有限的篇幅,介绍了 GPS 技术在比较重要的领域的应用知识,由此也可以看出 GPS 定位技术广阔的应用前景。

GPS导航学是一门新兴的交叉学科,其理论还在不断发展完善中,其应用也在不断深化和拓宽之中。由于作者水平和实践经验的限制加之成书时间紧迫,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2003年2月

# 目 录

## 前言

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 GPS 定位技术的发展	(1)
§ 1.2 GPS 定位系统的组成	(3)
1.2.1 GPS 空间星座部分	(4)
1.2.2 GPS 地面监控部分	(6)
1.2.3 用户设备	(8)
§ 1.3 美国对 GPS 用户的限制性政策	(10)
1.3.1 两种服务	(10)
1.3.2 实施选择可用性(selective availability, SA)政策	(10)
1.3.3 精测距码(P 码)加密(A-S)措施	(11)
1.3.4 反限制性政策的措施	(11)
第二章 全球定位系统(GPS)的时空参考系统	(13)
§ 2.1 GPS 坐标系统简介	(13)
§ 2.2 天球坐标系	(13)
2.2.1 天球、天球坐标系	(13)
2.2.2 岁差和章动、协议天球坐标系	(16)
2.2.3 三种天球坐标系之间的坐标变换	(19)
§ 2.3 地球坐标系	(21)
2.3.1 地球坐标系	(21)
2.3.2 极移、协议地球坐标系	(23)
2.3.3 协议地球坐标系(CTS, T)与协议天球坐标系(I)的坐标转换	(25)
2.3.4 协议地球系(CTS)的实现	(26)
2.3.5 GPS 卫星的参考系——WGS-84	(27)
2.3.6 站心坐标系	(27)
§ 2.4 全球定位系统(GPS)的时间参考系统	(29)
2.4.1 恒星时(sidereal time, ST)、平太阳时(mean solar time, MT)、 世界时(universal time, UT)	(30)
2.4.2 原子时(atomic time, AT)	(33)
2.4.3 协调世界时(coordinate universal time, UTC)	(33)

2.4.4	GPS时间系统(GPST) .....	(34)
2.4.5	地球动力学时(terrestrial dynamic time, TDT) .....	(34)
<b>第三章</b>	<b>卫星的基本运行规律与 GPS 卫星位置计算</b> .....	<b>(36)</b>
§ 3.1	GPS 卫星的无摄运动 .....	(36)
3.1.1	卫星运动微分方程的面积积分 .....	(37)
3.1.2	卫星轨道积分与轨道方程 .....	(40)
3.1.3	卫星运动平均角速度 $n$ .....	(43)
§ 3.2	GPS 卫星无摄运动轨道描述与真近点角 $f$ 的计算 .....	(43)
3.2.1	卫星轨道参数(轨道根数) .....	(43)
3.2.2	计算真近点角 $f$ .....	(45)
§ 3.3	GPS 卫星的瞬时位置和速度 .....	(48)
3.3.1	GPS 卫星瞬时位置 .....	(48)
3.3.2	GPS 卫星运行速度 .....	(51)
§ 3.4	GPS 卫星的受摄运动 .....	(54)
3.4.1	地球摄动力影响 .....	(55)
3.4.2	日、月引力的影响 .....	(56)
3.4.3	太阳光压的影响 .....	(57)
§ 3.5	GPS 卫星的星历 .....	(58)
3.5.1	预报星历 .....	(58)
3.5.2	后处理星历 .....	(60)
§ 3.6	由卫星预报星历计算 GPS 卫星坐标 .....	(61)
3.6.1	计算 GPS 卫星运行的平均角速度 $n$ .....	(61)
3.6.2	计算归化时间 $\Delta t$ .....	(61)
3.6.3	计算观测历元 $t$ 的平近点角 $M$ .....	(62)
3.6.4	计算偏近点角 $E$ .....	(62)
3.6.5	计算卫星的地心矢径 $r_0$ .....	(62)
3.6.6	计算真近点角 $f$ .....	(62)
3.6.7	计算升交点角距 $\varphi_0$ .....	(62)
3.6.8	计算摄动改正项: $\delta_u, \delta_r, \delta_i$ .....	(62)
3.6.9	计算经过摄动改正的升交点角距 $\varphi$ , 卫星矢径 $\vec{r}$ 和轨道面倾角 $i$ .....	(63)
3.6.10	计算观测历元 $t$ 的升交点经度 $\lambda$ .....	(63)
3.6.11	计算卫星在轨道直角坐标系中的坐标 .....	(64)
3.6.12	计算卫星在协议地球坐标系的直角坐标 .....	(65)
<b>第四章</b>	<b>GPS 卫星的广播信号</b> .....	<b>(67)</b>
§ 4.1	GPS 卫星播发的信号 .....	(67)

---

4.1.1 概述 .....	(67)
4.1.2 伪随机码 .....	(68)
§ 4.2 伪随机码扩频与相关接收 .....	(74)
4.2.1 伪码扩频 .....	(74)
4.2.2 伪码测距 .....	(76)
4.2.3 码分多址 .....	(79)
§ 4.3 C/A 码与 P 码 .....	(79)
4.3.1 C/A 码 .....	(79)
4.3.2 P 码 .....	(81)
§ 4.4 GPS 卫星信号的构成 .....	(83)
4.4.1 卫星的载波信号与调制 .....	(83)
4.4.2 卫星信号的解调 .....	(85)
§ 4.5 GPS 卫星的导航电文 .....	(86)
4.5.1 导航电文及其格式 .....	(86)
4.5.2 导航电文内容 .....	(87)
<b>第五章 GPS 导航定位的观测量、观测方程以及误差分析 .....</b>	<b>(91)</b>
§ 5.1 GPS 导航定位的基本观测量 .....	(91)
5.1.1 GPS 基本观测量 .....	(91)
5.1.2 测码伪距观测量 .....	(92)
5.1.3 测相伪距观测量 .....	(93)
5.1.4 多普勒积分计数伪距差 .....	(94)
§ 5.2 测码伪距观测方程 .....	(95)
5.2.1 有关时间的基本概念 .....	(95)
5.2.2 测码伪距观测方程 .....	(96)
§ 5.3 测相伪距观测方程 .....	(97)
5.3.1 载波相位观测量 .....	(97)
5.3.2 载波信号的传播时间 .....	(98)
5.3.3 测相伪距观测方程 .....	(101)
§ 5.4 观测方程的线性化 .....	(102)
5.4.1 测码伪距观测方程的线性化 .....	(103)
5.4.2 测相伪距观测方程的线性化 .....	(105)
§ 5.5 关于 GPS 观测量的误差分析 .....	(106)
5.5.1 误差概述 .....	(106)
5.5.2 与 GPS 卫星有关的误差 .....	(107)
5.5.3 与信号传播有关的误差 .....	(109)



5.5.4	与接收设备有关的误差及改正	(116)
5.5.5	其他误差	(118)
<b>第六章</b>	<b>GPS 静态定位</b>	<b>(122)</b>
§ 6.1	基本概念	(122)
6.1.1	静态定位和动态定位	(122)
6.1.2	单点定位和相对(多点)定位	(123)
6.1.3	差分定位	(123)
6.1.4	卫星导航定位概述	(124)
§ 6.2	静态单点定位	(126)
6.2.1	测码伪距静态单点定位	(126)
6.2.2	测相伪距静态单点定位	(130)
§ 6.3	观测卫星的几何分布及其对单点定位精度的影响	(134)
6.3.1	单点定位精度的几何评价	(134)
6.3.2	卫星分布的几何图形对精度因子的影响	(136)
§ 6.4	静态相对定位	(139)
6.4.1	基本观测量及其线性组合	(141)
6.4.2	单差观测方程	(142)
6.4.3	双差观测方程	(145)
6.4.4	三次差观测方程	(149)
6.4.5	准动态相对定位观测方程	(151)
§ 6.5	静态相对定位的线性化观测方程	(152)
6.5.1	载波相位观测方程的线性化及平差模型	(152)
6.5.2	观测量线性组合的相关性	(159)
6.5.3	参考点坐标的偏差对基线测量的影响	(162)
§ 6.6	整周模糊度的确定方法	(165)
6.6.1	概述	(165)
6.6.2	确定整周模糊度的经典待定系数法	(165)
6.6.3	确定整周模糊度的交换天线法	(167)
6.6.4	确定整周模糊度的马吉尔适配滤波法	(168)
6.6.5	确定整周模糊度的快速解算法(FARA)	(170)
6.6.6	确定整周模糊度的动态法	(173)
6.6.7	周跳的探测及修正	(174)
<b>第七章</b>	<b>GPS 动态定位原理</b>	<b>(177)</b>
§ 7.1	测码伪距动态绝对定位	(177)
§ 7.2	测相伪距动态绝对定位	(180)

§ 7.3 测码伪距动态相对定位 .....	(182)
7.3.1 位置差分原理及误差分析 .....	(182)
7.3.2 测码伪距差分原理 .....	(187)
§ 7.4 测相伪距动态相对定位 .....	(188)
7.4.1 测相伪距修正法 .....	(188)
7.4.2 载波相位求差法 .....	(191)
<b>第八章 GPS 的载体速度测量、姿态测量以及时间测量 .....</b>	<b>(194)</b>
§ 8.1 GPS 接收机的载体速度测量 .....	(194)
§ 8.2 利用 GPS 载波相位信号确定载体姿态 .....	(196)
8.2.1 姿态测量的基本思想 .....	(197)
8.2.2 整周单差及基线向量的确定 .....	(199)
8.2.3 载体姿态的确定 .....	(201)
§ 8.3 GPS 测时 .....	(203)
8.3.1 单站测时法 .....	(203)
8.3.2 共视测时法 .....	(204)
<b>第九章 GPS/INS 组合导航系统 .....</b>	<b>(206)</b>
§ 9.1 简述 .....	(206)
§ 9.2 卡尔曼滤波技术 .....	(207)
9.2.1 卡尔曼滤波 .....	(207)
9.2.2 离散系统卡尔曼滤波方程 .....	(209)
9.2.3 转移矩阵 $\Phi_{k,k-1}$ 和系统噪声方差阵 $Q_k$ 的计算 .....	(214)
9.2.4 关于有色噪声条件下的卡尔曼滤波 .....	(216)
§ 9.3 采用卡尔曼滤波器的组合方法 .....	(217)
9.3.1 滤波器状态的选取 .....	(218)
9.3.2 GPS/INS 硬件一体化组合 .....	(218)
9.3.3 GPS/INS 软件组合 .....	(220)
§ 9.4 采用位置、速度组合的 GPS/INS 导航系统 .....	(224)
9.4.1 GPS/INS 组合系统的状态方程 .....	(224)
9.4.2 GPS/INS 组合系统的量测方程 .....	(234)
9.4.3 状态方程和量测方程的离散化 .....	(236)
9.4.4 GPS/INS 组合卡尔曼滤波器 .....	(237)
9.4.5 关于 GPS/INS 组合卡尔曼滤波几点说明 .....	(241)
§ 9.5 采用伪距、伪距率组合的 GPS/INS 导航系统 .....	(244)
9.5.1 GPS/INS 组合系统的状态方程 .....	(244)
9.5.2 组合系统的量测方程 .....	(244)

9.5.3 关于 GPS/INS 组合导航系统仿真 .....	(248)
§ 9.6 INS 速度辅助 GPS 接收机环路 .....	(256)
9.6.1 跟踪环基本工作原理 .....	(256)
9.6.2 INS 速度辅助的接收机环路 .....	(258)
<b>第十章 GPS 应用技术 .....</b>	<b>(267)</b>
§ 10.1 GPS 在飞机精密进场着陆中的应用 .....	(268)
10.1.1 C/A 码 DGPS 着陆系统 .....	(270)
10.1.2 载波相位 DGPS 着陆系统 .....	(272)
10.1.3 采用广域增强系统(WAAS) .....	(277)
§ 10.2 GPS 在空中交通管制(ATC)中的应用 .....	(278)
10.2.1 GPS 辅助 ATC 系统概述 .....	(278)
10.2.2 GPS 辅助 ATC 的性能与类型 .....	(279)
10.2.3 GPS/ATC 的导航、监视和数据通信 .....	(281)
10.2.4 GPS/ATC 的机载系统 .....	(283)
10.2.5 ATC 的地面系统 .....	(284)
§ 10.3 GPS 在无人驾驶飞机中的应用 .....	(285)
10.3.1 人工干预导航系统 .....	(286)
10.3.2 自主式导航 .....	(286)
§ 10.4 GPS 在弹道轨迹测量中的应用 .....	(292)
10.4.1 引言 .....	(292)
10.4.2 GPS 应用于弹道轨迹测量中的组成方案 .....	(292)
10.4.3 采用弹载转发器的测量原理 .....	(296)
§ 10.5 GPS 在航空摄影测绘中的应用 .....	(302)
§ 10.6 GPS 在自动车辆定位导航系统中的应用 .....	(304)
10.6.1 概述 .....	(304)
10.6.2 自动车辆定位导航(AVLN)系统的组成 .....	(305)
10.6.3 自动车辆定位导航(AVLN)系统的功能和实现 .....	(306)
10.6.4 GPS/MAP 组合系统在 AVLN 系统中的应用 .....	(310)
§ 10.7 GPS 在低轨人造卫星中的应用 .....	(312)
§ 10.8 GPS 在航天飞机上的应用 .....	(316)
§ 10.9 GPS 在航海导航定位中的应用 .....	(318)
§ 10.10 GPS 在建立地区性或全国性大地测量控制网中的应用 .....	(320)
§ 10.11 GPS 技术在海洋测量中的应用 .....	(322)
§ 10.12 GPS 在地球动力学方面的应用 .....	(323)
§ 10.13 GPS 在精密工程测量和工程形变监测中的应用 .....	(327)

---

10.13.1	GPS在隧道贯通控制测量中的应用 .....	(327)
10.13.2	GPS在工程形变监测中的应用 .....	(328)
§ 10.14	GPS/GIS 合成系统 .....	(329)
10.14.1	简述 .....	(329)
10.14.2	GPS/GIS 合成系统的基本要求 .....	(330)
10.14.3	GPS/GIS 合成系统的软件开发 .....	(331)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(334)</b>

# 第一章 绪 论

## § 1.1 GPS 定位技术的发展

1973年,美国国防部组织海陆空三军,共同研究建立新一代卫星导航系统:“Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System”,即“授时与测距导航系统”,通常简称为“全球定位系统”(GPS)。它是新一代精密卫星定位系统,是现代科学技术迅速发展的结晶。

1957年10月,前苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星,从此,人类跨入了空间科学技术迅速发展的崭新时代,利用卫星进行定位和导航的研究引起了各国军事部门的高度重视。1958年底,美国海军武器实验室着手研制为美国军用舰艇导航服务的卫星导航系统“navy navigation satellite system”,即“海军卫星导航系统”(NNSS)。在该系统中,所有卫星轨道都通过地球的南北两极,卫星的地迹与地球的子午圈重合,故又称为“子午仪(transit)卫星导航系统”。1964年1月该系统研制成功,它用于北极星核潜艇的导航定位,并逐步应用于其他各种舰艇的导航定位。1967年7月29日,美国政府宣布“子午仪卫星导航系统”的部分导航电文解密,供民间商业应用,为远洋船舶导航和海上定位服务,随着对子午仪卫星导航系统技术的进一步改善,提高了卫星轨道测定的精度,改进了用户接收机性能。这种由用户接收机直接对空间卫星进行多普勒测量的定位技术,其定位精度不断提高。同时,卫星多普勒定位技术不受气象条件的影响,自动化程度较高,使其应用范围越来越广。在海上石油勘探、钻井定位、海岸调查与测绘海底电缆铺设、海岛联测以及大地测量控制网等诸多领域都相继使用了该系统。世界各国进行了大量的应用研究和实践,取得了显著的成绩,我国也于20世纪80年代初,引进了子午仪卫星导航系统接收机,将其十分有效地应用于导航和大地测量之中。

虽然子午仪卫星导航系统在导航和定位技术发展中具有划时代的意义,但是仍然存在着明显的缺陷。该系统由6颗卫星组成导航网,卫星的轨道较低,为离地面约1080km的圆形极轨,每条轨道上只有1颗卫星,运行周期为107min。由于卫星数少,而且轨道较低,故每隔1~2h才有一次卫星通过地面观测站而被跟踪观测;另外,由于采用多普勒定位原理,一台接收机需要观测15次合格的卫星通过,才能获得精度为 $\pm 10\text{m}$ 的单点定位参数。由于观测解算导航参数的时间长,因此它不能满足连续实时三维导航的要求,尤其不能满足高动态目标(比如飞机,导弹

等)的高精度导航要求。

从大地测量学方面来看,由于它定位速度慢(一个测站一般平均观测 1~2d),精度也较低(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很大的限制。

20 世纪 60 年代中期,鉴于子午仪卫星导航系统的成功及其存在的缺陷,促使美国海军和空军研究更先进的卫星导航系统,以提高导航性能。海军提出的计划称为“Timation”(时间导航),空军的计划名为 621B。这两个方案差别很大,各有优缺点。“Timation”方案采用 12~18 颗卫星组成全球定位网,卫星高度约 10 000km,轨道呈圆形,周期为 8h,并于 1967 年 5 月和 1969 年 11 月分别发射了两颗试验卫星。“Timation”计划基本上是一个二维系统,它不能满足空军的飞机或导弹在高动态环境中连续给出实时位置参数的要求。空军的“621B”计划能在高动态环境下工作,为了提供全球覆盖,621B 计划拟采用 3~4 个星座,每个星座由 4~5 颗卫星组成,中间一颗采用同步定点轨道,其余几颗用周期为 24h 的倾斜轨,每一个星座需要一个独立的地面控制站为它服务。该系统的主要问题有两个:一是极区覆盖问题,二是国外设站问题,使得系统难以独立自主安全可靠地运行。

1973 年美国国防部在此两个方案的基础上,决定发展各军种共同使用的全球定位系统。美国国防部指定这项计划由空军牵头负责研制。在空军系统司令部空间部成立了一个联合计划办公室,具体负责 GPS 的研制、试验、采购和部署。参加的单位有空军、陆军、海军、海军陆战队、海岸警卫队、运输部、国防地图测绘局及国防预研计划局。1978 年一些北大西洋公约组织和澳大利亚通过双边协议也参加了 GPS 计划。

GPS 是一种可以定时和测距的空间交会定点导航系统,它可以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,满足军事部门和民用部门的需要。

GPS 整个发展计划分为 3 个阶段实施。

第一阶段为原理方案可行性验证阶段,从 1978 年到 1979 年,共发射了 4 颗试验卫星,建立了地面跟踪网,研制了地面 GPS 接收机,对系统的硬件和软件进行了试验,试验结果令人满意。

第二阶段为系统的研制与试验阶段,从 1979 年到 1984 年,又陆续发射了 7 颗试验卫星。第一阶段和第二阶段共发射 11 颗试验卫星,这些试验卫星称为第一代卫星:Block I,参见表 1.1。与此同时,研制了各种导航型接收机和测地型接收机,试验表明,GPS 的定位精度大大超过设计标准,其中粗码(C/A 码)的定位精度远远超过设计指标,高达 20m。由此证明,GPS 计划是成功的。

表 1.1 GPS 卫星发射情况

名称 代别	卫星类型	卫星数/颗	发射时间	用途
第一代	Block I	11	1978~1984 年	试验性
第二代	Block II, Block II A	28	1989~1994 年	正式工作
第三代	Block III, II R	20	20 世纪 90 年代末	改进 GPS 系统

第三阶段为最后的工程发展与完成阶段。1989 年的 2 月 4 日,发射了 GPS 第一颗工作卫星,到 1994 年 3 月 10 日共研制发射了 28 颗工作卫星。这些工作卫星称为 Block II 和 Block II A 卫星,与此同时,不仅研制了高精度导航型接收机,还研制了能对卫星载波信号进行相位测量的定位精度极高的接收机和采用相位差分的 GPS 载体姿态测量接收机,满足了精密导航与制导等一系列军事目的之要求。

美国所设计和试验的新的第三代工作卫星改进系统(Block II R),在 20 世纪末发射完毕,包括 20 颗 Block II R 卫星,新系统的定位精度可达 1mm。

从 GPS 计划的提出到该系统的建成使用,历经 20 余年,耗资数百亿美元。这一工程项目是美国政府继阿波罗登月计划和航天计划之后的第三项庞大空间项目。GPS 从根本上解决了人类在地球及其周围空间的导航及定位问题,它不仅可以在广泛地应用于海上、陆地和空中运动目标的导航、制导和定位,而且可为空间飞行器进行精密定轨,满足军事部门的需要。同时,它在各种民用部门也获得了成功的应用,在大地测量、工程勘探、地形普查测量、地壳监测等众多领域展现了极其广阔的应用前景。有人说,将来只有我们想像力的限制才会限制 GPS 的潜在应用。GPS 将对人类活动产生极大的影响。

卫星导航的应用前景得到世界各国的普遍承认和关注,各国不仅在 GPS 的应用研究与 GPS 信息资源开发中倾注了巨大的人力和物力,而且不少国家和地区亦在积极研制自己的卫星导航系统。前苏联自 1978 年 10 月开始,发射了自己的全球导航卫星系统(GLONASS)试验卫星,由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成,均匀分布在 3 个轨道平面上。欧洲空间局(ESA)亦在筹建民用导航卫星系统,它包括在赤道平面上的 6 颗同步卫星(GEO)和 12 颗高椭圆轨道(HEO)卫星的混合卫星星座。我国也正在独立自主地研制双星定位系统,它由 2 颗同步卫星实现平面位置的定位和导航。

## § 1.2 GPS 定位系统的组成

全球定位系统(GPS)由 3 部分组成,即空间卫星星座部分、地面监控部分和用户设备部分(GPS 接收机)。

### 1.2.1 GPS 空间星座部分

GPS 空间卫星星座,必须保证在地球各处能同时观测到高度角  $15^\circ$  以上的至少 4 颗卫星。

GPS 全球定位系统的空间星座由 24 颗工作卫星构成(Block II,其中 3 颗为备用卫星)。24 颗工作卫星部署在 6 个轨道平面中,每个轨道平面升交点的赤经相隔  $60^\circ$ ,轨道平面相对地球赤道面的倾角为  $55^\circ$ ,每根轨道上均匀分布 4 颗卫星,相邻轨道之间的卫星要彼此叉开  $30^\circ$ ,以保证全球均匀覆盖的要求(图 1-1)。GPS 卫星轨道平均高度约为 20 200km,运行周期为 11h 58min。因此,地球上同一地点的 GPS 接收机的上空,每天出现的 GPS 卫星分布图形相同,只是每天提前约 4min。同时,位于地平线以上的卫星数目,随时间和地点的不同而相异,最少亦有 4 颗,最多时可达 11 颗。

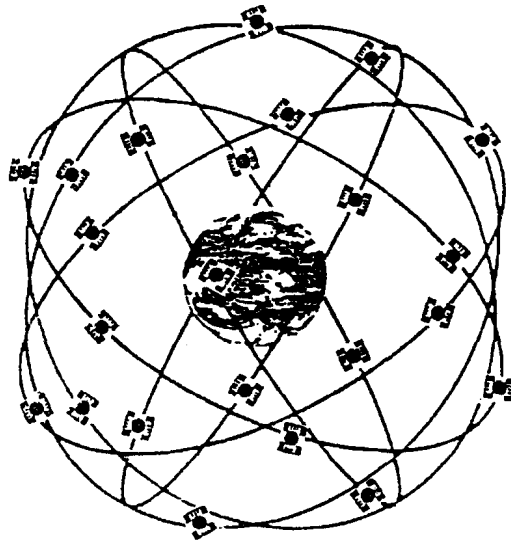


图 1-1 GPS 卫星星座

3 颗在轨的备用工作卫星相间布置在 3 个轨道平面中,随时可以根据指令代替发生故障的其他卫星,以保证整个 GPS 空间星座正常而高效地工作。

GPS 空间卫星的设计和发射分为 3 个阶段。第一阶段(Block I)从 1978 年到 1984 年共研制和发射了 11 颗卫星,卫星的设计寿命为 5 年,用于全球定位系统的实验,通常称为 GPS 实验卫星。第二阶段(Block II, II A)从 1989 年 2 月 14 日发射成功到 1994 年 3 月 10 日共研制和发射了 24(21+3)颗卫星,卫星的设计寿命为 7.5 年,宣告了 GPS 系统进入了工程实用阶段,通常称为 GPS 工作卫星。与 Block II 相比较,Block II A 增强了军事应用功能,扩大了数据存储容量,Block II 只



能存储供 14d 用的导航电文,而 Block II A 能存储供 180d 用的导航电文,确保在特殊情况下使用 GPS 卫星。表 1.2 表示了 GPS 卫星发射情况。

表 1.2 可观测的 GPS 卫星情况(1994,10)

阶 段	卫星编号(PRN)	发射日期	启用日期	所在轨道面
Block I	12	1984-09-08	1984-10-03	A1
Block II	14	1989-02-14	1989-04-15	E1
	2	1989-06-10	1989-08-10	B3
	16	1989-08-18	1989-10-14	E3
	19	1989-10-21	1989-11-23	A4
	17	1989-12-11	1990-01-06	D3
	18	1990-01-24	1990-02-14	F3
	20	1990-03-26	1990-04-18	B2
	21	1990-08-02	1990-08-22	E2
Block II A	15	1990-10-01	1990-10-15	D2
	23	1990-11-26	1990-12-10	E4
	24	1991-07-03	1991-08-30	D1
	25	1992-02-23	1992-03-24	A2
	28	1992-04-09	1992-04-25	C2
	26	1992-07-07	1992-07-23	F2
	27	1992-09-09	1992-09-30	A3
	1	1992-11-22	1992-12-11	F1
	29	1992-12-18	1993-01-05	F4
	22	1993-02-03	1993-04-04	B1
	31	1993-03-30	1993-04-13	C3
	7	1993-05-13	1993-06-12	C4
	9	1993-06-26	1993-07-20	A1
	5	1993-08-30	1993-09-28	B4
	4	1993-10-26	1993-11-22	D4
6	1994-03-10	1994-03-28	C1	

第三阶段为更新工作卫星(Block III, II R),更新卫星于 20 世纪末 21 世纪初发射完毕,以逐步取代第二代卫星,进一步改善全球定位系统。

GPS 卫星的主体呈柱形,采用铝蜂巢结构,柱形直径约 1.5m。卫星重约