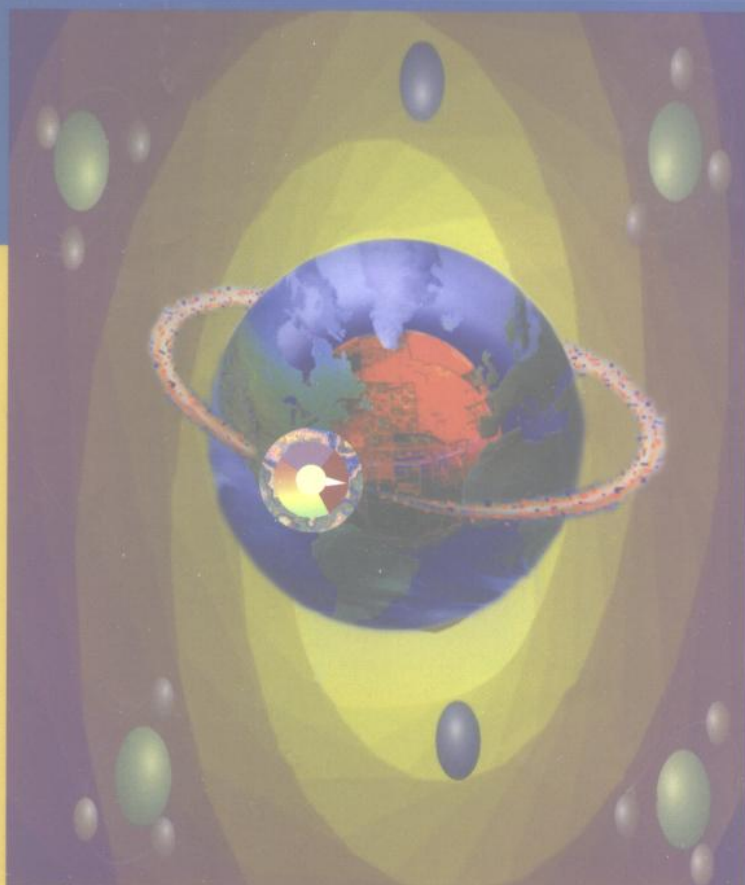


# GPS 应用程序设计

李洪涛 许国昌 薛鸿印 著  
赵 洪 陈 晶 王广运



科学出版社

# GPS 应用程序设计

李洪涛 许国昌 薛鸿印 著  
赵 洪 陈 晶 王广运

科 学 出 版 社

1999

## 内 容 简 介

本书是一本实用的全球定位系统 (GPS) 定位程序设计工具书。它包括了 GPS 应用和开发中全部常用的内容。

全书共分十章, 它们是: 绪论、数据采集和格式转换、卫星位置计算、绝对定位、相对定位、差分 GPS 定位、动态定位、辅助计算工具、GPS + GLONASS 组合以及菜单界面设计。本书总结了多年的工作实践和研究成果, 以 38 种不同功能的数学模型及完整的源程序奉献给读者。

本书可供从事航空、航海、港口、航道、公路、铁路、勘测、地质、石油、测绘、水利、公安、保险、银行、探险等专业的应用、开发、研究和教学人员参考。

为方便读者, 本书另备有软盘一套, 载有书中的源程序、头文件、执行程序、编译程序所需的配置文件以及部分数据, 如需要者请与汤俊武联系, 联系电话: 027-87874635。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

GPS 应用程序设计/李洪涛等著. -北京: 科学出版社, 1999.5

ISBN 7-03-007204-9

I . G … II . 李… III . 全球定位系统 (GPS) -程序设计 IV . P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 40616 号

**科学出版社 出版**

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

**丽源印刷厂 印刷**

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1999 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1999 年 5 月第一次印刷 印张: 21 3/4

印数: 1-3 000 字数: 499 000

**定价: 43.00 元**

〈如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉〉

# 前 言

自 1994 年美国全球定位系统 (GPS) 全部建成并投入运行以来, 短短的四年中, 这一技术发展极为迅速。各种档次和各种型号的接收机应运而生, 投放市场。GPS 的应用也进入与定位有关的领域, 获得了巨大的经济效益和社会效益。随着应用市场的扩大, 除 GPS 整机外, GPS OEM 芯片也大量供应, 成为设计成套系统的配件。

在推广应用 GPS 的过程中, 图书文献的出版起到了重大的推动和普及作用。在我国自 1988 年出版第一本 GPS 专著 (王广运等, 1988) 以来, 又陆续出版了专著 (王广运等, 1996; 周忠谟等, 1993, 1997)、教材 (刘基余等, 1993; 刘大杰等, 1966, 1967) 和研究论文集 (王广运等, 1993; 金国雄等, 1995; 李毓麟等, 1996)。无疑, 这一切对开拓、研究、推广和普及 GPS 技术起了重大的推动作用, 为形成目前我国 GPS 应用和开发这样波澜壮阔的局面做出了重大贡献。

为使 GPS 技术的应用更加普及和深入, 必须提高软件开发水平。为此, 作者将多年来研究开发 GPS 软件的工作, 进行系统总结和整理, 编写出版《GPS 应用程序设计》一书。其目的在于, 对从事 GPS 技术开发者来说, 可以方便快捷地根据需要选用有关程序来编写新软件; 对从事应用人员来说, 可以直接应用书中的有关软件, 省时省力; 对研究人员而言, 则可借鉴书中有关软件, 在更高的起点上进行研究, 事半功倍。总之, 本书遵循拿来主义, 注重实用。

本书所有的程序是用 C 语言编写的。C 语言功能丰富, 表达能力强, 使用灵活方便, 应用面广, 目标程序效率高, 可移植性好。它既有高级语言的优点, 又具有低级语言的许多特点, 特别适合于程序的编写。

随着接收机软件的飞速发展, 操作软件不断更新。最近推出的 Windows 平台, 为编程人员提供了想象空间, 由此编写的软件层次分明、美观醒目、操作灵活和使用方便。为了使读者了解这一信息, 在本书的最后提供了一个 Windows 环境下 delphi 3.0 的界面设计程序。

本书的编写考虑到两种类型专业人员的应用。一种为专业编程人员, 他们具有熟练的计算机编程技巧, 具备语言、算法、数据结构和程序设计等方面的知识, 能够读懂和修改所载的源程序, 从而可以根据自己的需求参考本书中的程序编制出实用的软件。另一种为专业应用人员, 虽对计算机不太熟悉, 但具有其他专业知识, 可以直接利用书中所载的源程序进行编译获得执行程序或者利用备份软盘上提供的执行程序进行操作。

为了使读者了解, 这里对本书内容做简要介绍。

第一章为绪论, 简要叙述 GPS 的发展历史、系统构成、信号结构、导航电文以及美国对 GPS 的政策等内容。这是从事 GPS 开发和应用的人员所必须具备的基础知识。关于这方面的内容在已出版的文献中有详细论述, 本书不再赘述。

第二章叙述了 GPS 数据采集、RINEX 通用格式、各种型号接收机数据格式及其转换为 RINEX 格式、卫星导航电文的提取以及星历格式转换。这是 GPS 技术开发的最基础工作。

第三章叙述了卫星位置的计算、卫星天空显示、卫星星座的几何精度因子以及根据历书推算卫星观测时间的组合。

第四章叙述了单点定位程序设计, 其中包含伪距定位的基本程序、带有差分改正的定位程序以及带有卡尔曼滤波的动态定位程序。

第五章叙述了用于大地测量的相对定位程序, 着重叙述根据测站坐标、星历和单差观测值生成单差观测方程, 利用多项式拟合残差检验跳周和删除粗差, 由单差相位观测值和广播星历组成误差方程和法方程式以及利用快速分解法 (FARA) 求解相位模糊度等程序。

第六章叙述了差分 GPS 定位的内容。其中有伪距差分 and 相位平滑伪距差分、载波相位差分和准载波相位差分、以及通用的 RTCM SC-104 电文格式的解码。

第七章叙述了动态定位应用的程序。包含作业区测量断面的构成、作业测量控制, 它能自适应提取各种接收机提供的 NMEA -0183 GGA 电文、记录数据的回放以及动态定位中的坐标转换。这种坐标转换的方法还适用于接收我国无线电信标台 RBN/DGPS 改正数的接收机进行动态定位, 而无须知道基准站的地心坐标和北京 54 坐标。

第八章叙述了 GPS 应用中的辅助工具程序。其中包括测量精度评定、水深测量的潮汐改正、北京 54 坐标的变换、任意坐标系的转换、GPS 和测深仪的模拟信号输出。

第九章叙述了 GPS + GLONASS 的组合。内容包括 GPS 与 GLONASS 的比较、GLONASS 导航信号、GLONASS 导航电文、GLONASS 卫星位置计算、GLONASS 单点定位、GPS + GLONASS 组合以及 GG24 GPS + GLONASS 组合接收机。

第十章为菜单界面的设计程序。其中有 DOS 环境下的换页式菜单、DOS 环境下的下拉式菜单和 Windows 95 环境下的多层界面菜单的设计。

全书共包含 38 个子程序的源程序, 提供读者参考。本书还另备有软盘一套, 载有书中全部源程序、头文件和编译后的执行程序、为编译和运行程序所需要的配置文件, 以及演示用的部分 GPS 原始数据。

在本书的编写中, 王广运研究员负责全书大纲的设计、组织和审校以及前言和各章节文字的撰写。书中全部程序的编制、调试和运行是由几个青年学者完成的。他们是: 中国船舶工业总公司船舶系统工程部李洪涛、德国地学研究中心许国昌、中国船舶工业总公司船舶系统工程部薛鸿印、中国科学院测量与地球物理研究所赵洪以及海军装备论证研究中心陈晶。

在本书的编写和出版中, 得到了中国船舶工业总公司船舶系统工程部郭秉义先生、武汉华宇实用勘测技术有限公司宋如弑先生、中国科学院武汉物理研究所博士生李静年先生、清华大学土木工程系葛茂荣博士、法国达索·塞赛尔公司首席代表张子中先生、北京麦格通信设备技术有限公司总经理王文忠先生等的帮助; 科学出版社责任编辑彭斌先生为本书的出版付出了辛勤的劳动; 本书得到了中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量开放研究实验室的资助, 在此一并致谢。

本书在编写时力求系统化、条理化和层次化, 而没有过分追求程序设计的精练和优

化。读者在应用时，可充分运用计算机语言技巧，不拘一格，灵活运用，设计出更加实用的软件。由于时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

最后，愿本书能为 GPS 在中国的开发研究和推广应用起到铺路架桥的作用。

王 广 运

中国科学院测量与地球物理研究所，武昌

1998 年 7 月

# 目 录

## 前 言

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第一章 绪论                         | (1)  |
| § 1.1 GPS 发展历史                 | (1)  |
| § 1.2 GPS 的组成                  | (4)  |
| § 1.2.1 GPS 卫星                 | (4)  |
| § 1.2.2 地面支撑系统                 | (6)  |
| § 1.2.3 用户接收机                  | (7)  |
| § 1.3 GPS 信号结构                 | (8)  |
| § 1.3.1 C/A 码                  | (9)  |
| § 1.3.2 P 码                    | (10) |
| § 1.4 GPS 导航电文                 | (12) |
| § 1.4.1 导航电文格式                 | (12) |
| § 1.4.2 导航电文内容                 | (12) |
| § 1.5 美国的 SA 和 AS 政策           | (17) |
| 第二章 数据采集和格式转换                  | (19) |
| § 2.1 数据采集                     | (19) |
| 附 1 data_log.c —— 数据采集程序       | (21) |
| § 2.2 RINEX 数据格式               | (24) |
| § 2.2.1 观测数据文件                 | (25) |
| § 2.2.2 导航数据文件                 | (27) |
| § 2.2.3 气象数据文件                 | (29) |
| 附 2 rinex.c —— RINEX 数据格式形成子程序 | (29) |
| § 2.2.4 RINEX 文件实例             | (36) |
| § 2.3 几种 GPS 观测数据格式            | (38) |
| § 2.3.1 Ashtech                | (39) |
| § 2.3.2 Trimble                | (41) |
| § 2.3.3 NavSymm                | (42) |
| § 2.3.4 Motorola               | (44) |
| § 2.3.5 Dassault-Sercel        | (46) |
| § 2.3.6 NovAtel                | (48) |
| § 2.3.7 Garmin                 | (51) |
| § 2.3.8 Magellan               | (53) |

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| § 2.4 观测数据格式转换·····                          | (55)  |
| 附 3 to_rinex.c —— 数据格式转换程序 ·····             | (55)  |
| § 2.5 卫星电文的提取·····                           | (79)  |
| <b>第三章 卫星位置计算</b> ·····                      | (84)  |
| § 3.1 卫星位置计算·····                            | (84)  |
| 附 4 sav_pos.c —— 卫星位置计算程序 ·····              | (85)  |
| § 3.2 卫星天空视图计算·····                          | (88)  |
| 附 5 sky_view.c —— 天空卫星视图计算程序 ·····           | (89)  |
| § 3.3 GDOP 的计算·····                          | (92)  |
| 附 6 sav_dop.c —— 卫星星座 DOP 计算程序 ·····         | (93)  |
| § 3.4 利用历书预报卫星·····                          | (97)  |
| 附 7 sck_dule.c —— 观测卫星预报计算程序 ·····           | (98)  |
| <b>第四章 GPS 绝对定位</b> ·····                    | (102) |
| § 4.1 概述 ·····                               | (102) |
| § 4.2 绝对定位基本方程 ·····                         | (103) |
| § 4.2.1 同时观测 4 颗卫星 ·····                     | (103) |
| § 4.2.2 同时观测 4 颗以上卫星 ·····                   | (104) |
| § 4.2.3 带有差分改正数的定位方程 ·····                   | (105) |
| § 4.3 带有卡尔曼滤波的绝对定位 ·····                     | (105) |
| § 4.3.1 卡尔曼滤波器过程 ·····                       | (105) |
| § 4.3.2 UDU <sup>T</sup> 分解法在滤波器中的应用设计 ····· | (106) |
| 附 8 abs_pos.c —— 单点绝对定位程序 ·····              | (108) |
| <b>第五章 GPS 相对定位</b> ·····                    | (112) |
| § 5.1 概述 ·····                               | (112) |
| § 5.2 相对定位基本方程 ·····                         | (113) |
| § 5.2.1 单差观测方程 ·····                         | (113) |
| § 5.2.2 双差观测方程 ·····                         | (114) |
| § 5.2.3 三差观测方程 ·····                         | (114) |
| § 5.3 观测方程的求解 ·····                          | (115) |
| § 5.3.1 观测方程的线性化 ·····                       | (115) |
| § 5.3.2 法方程的组成和求解 ·····                      | (118) |
| § 5.3.3 精度评定 ·····                           | (119) |
| § 5.4 相位整周模糊度的快速求解 ·····                     | (120) |
| § 5.5 RTK 实时相位测量·····                        | (122) |
| 附 9 ret_pos.c —— 相对定位程序主程序 ·····             | (128) |
| 附 10 controlf.c —— 读取输入文件子程序·····            | (137) |
| 附 11 orbit.c —— 选择参考卫星子程序 ·····              | (143) |
| 附 12 broad.c —— 卫星广播星历计算子程序 ·····            | (145) |
| 附 13 igs.c —— 读 IGS 精密星历子程序 ·····            | (151) |

|            |                                          |              |
|------------|------------------------------------------|--------------|
| 附 14       | singlep.c —— 概略坐标计算子程序 .....             | (154)        |
| 附 15       | rinex.c —— 读 Rinex 数据、探测跳周、组成单差子程序 ..... | (160)        |
| 附 16       | eqdd.s.c —— 组成双差方程子程序 .....              | (182)        |
| 附 17       | normdd.s.c —— 组成法方差子程序 .....             | (191)        |
| 附 18       | ad_core.c —— 平差子程序 .....                 | (192)        |
| 附 19       | ambifix.c —— 模糊度固定子程序 .....              | (195)        |
| 附 20       | tranf.c —— 坐标变换子程序 .....                 | (199)        |
| <b>第六章</b> | <b>差分 GPS 基准站 .....</b>                  | <b>(202)</b> |
| § 6.1      | 概述 .....                                 | (202)        |
| § 6.2      | 伪距差分 and 相位平滑伪距差分 .....                  | (204)        |
| § 6.2.1    | 伪距差分 .....                               | (204)        |
| § 6.2.2    | 相位平滑伪距差分 .....                           | (205)        |
| 附 21       | dgps_cor.c —— 相位平滑伪距差分改正数计算程序 .....      | (207)        |
| § 6.3      | 载波相位差分 .....                             | (210)        |
| § 6.3.1    | 概述 .....                                 | (210)        |
| § 6.3.2    | 准载波相位差分 .....                            | (211)        |
| 附 22       | pphs_cor.c —— 准载波相位改正数及其变化率计算程序 .....    | (212)        |
| § 6.3.3    | 载波相位差分 .....                             | (214)        |
| § 6.3.4    | 载波和准载波相位差分电文 .....                       | (214)        |
| § 6.4      | RTCM SC_104 电文编码与译码 .....                | (217)        |
| § 6.4.1    | RTCM 电文编码 .....                          | (217)        |
| 附 23       | rtcmencd.c —— RTCM 电文编码程序 .....          | (218)        |
| § 6.4.2    | RTCM 电文解码 .....                          | (223)        |
| 附 24       | rtcmdecdec.c —— RTCM 电文译码程序 .....        | (226)        |
| <b>第七章</b> | <b>动态 GPS 定位 .....</b>                   | <b>(231)</b> |
| § 7.1      | 断面格网的设计 .....                            | (231)        |
| 附 25       | net_dgn.c —— 测量格网设计程序 .....              | (232)        |
| § 7.2      | 作业控制 .....                               | (236)        |
| 附 26       | sur_ctr.c —— 动态测量控制程序 .....              | (237)        |
| § 7.3      | 记录数据的回放 .....                            | (243)        |
| 附 27       | replay.c —— 动态测量数据回放程序 .....             | (244)        |
| § 7.4      | 动态定位的坐标转换 .....                          | (247)        |
| 附 28       | kin_tran.c —— 动态定位中坐标转换的程序 .....         | (249)        |
| <b>第八章</b> | <b>辅助计算工具 .....</b>                      | <b>(256)</b> |
| § 8.1      | 定位精度估计 .....                             | (256)        |
| 附 29       | rms.c —— 定位精度估算程序 .....                  | (259)        |
| § 8.2      | 潮位改正 .....                               | (262)        |
| 附 30       | tide.c —— 潮位改正程序 .....                   | (265)        |
| § 8.3      | 高斯坐标变换 .....                             | (268)        |

|                     |                                           |              |
|---------------------|-------------------------------------------|--------------|
| 附 31                | xybl_54.c —— 北京 54 坐标变换程序 .....           | (271)        |
| § 8.4               | 任意坐标系转换 .....                             | (275)        |
| 附 32                | xyxy_loc.c —— 任意坐标系转换程序 .....             | (275)        |
| § 8.5               | 信息模拟器 .....                               | (279)        |
| § 8.5.1             | NMEA 0183 信息 .....                        | (279)        |
| 附 33                | nmea.c —— GGA 和 GSV 数据模拟程序 .....          | (279)        |
| § 8.5.2             | 测深仪模拟数据信息 .....                           | (281)        |
| 附 34                | depth.c —— 水深数据模拟程序 .....                 | (282)        |
| <b>第九章</b>          | <b>GPS + GLONASS 组合系统 .....</b>           | <b>(284)</b> |
| § 9.1               | 概述 .....                                  | (284)        |
| § 9.2               | GLONASS 与 GPS 的比较 .....                   | (285)        |
| § 9.2.1             | 时间系统差异 .....                              | (287)        |
| § 9.2.2             | 坐标系差异 .....                               | (288)        |
| § 9.3               | GLONASS 导航信号 .....                        | (289)        |
| § 9.3.1             | 概述 .....                                  | (289)        |
| § 9.3.2             | 测距码结构 .....                               | (289)        |
| § 9.3.3             | 数据序列结构 .....                              | (290)        |
| § 9.4               | GLONASS 导航电文 .....                        | (292)        |
| § 9.4.1             | 电文结构 .....                                | (292)        |
| § 9.4.2             | 电文内容和格式 .....                             | (293)        |
| § 9.4.3             | 电文解码、校验和纠错 .....                          | (295)        |
| § 9.5               | GLONASS 卫星位置计算 .....                      | (296)        |
| § 9.6               | GLONASS 单点定位计算 .....                      | (297)        |
| § 9.7               | GPS + GLONASS 的组合 .....                   | (297)        |
| § 9.7.1             | 初级组合方式 .....                              | (297)        |
| § 9.7.2             | 混合组合方式 .....                              | (298)        |
| § 9.8               | GPS + GLONASS 接收机 .....                   | (300)        |
| 附 35                | gg_pos.c —— GPS + GLONASS 定位程序 .....      | (304)        |
| <b>第十章</b>          | <b>GPS 程序界面设计 .....</b>                   | <b>(308)</b> |
| § 10.1              | 换页式菜单界面设计 .....                           | (308)        |
| 附 36                | menu1.c —— 换页式菜单的界面程序 .....               | (310)        |
| § 10.2              | DOS 环境下的下拉菜单设计 .....                      | (317)        |
| 附 37                | menu2.c —— DOS 环境下拉式菜单程序 .....            | (317)        |
| § 10.3              | Windows 环境下菜单设计 .....                     | (329)        |
| 附 38                | menu3.c —— Windows 95 环境下拉式多层界面菜单设计 ..... | (333)        |
| <b>主要参考文献</b> ..... |                                           | <b>(337)</b> |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 GPS 发展历史

GPS 是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System 的字母缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称。它的含义是, 利用卫星的测时和测距进行导航, 以构成全球卫星定位系统。现在国际上已经公认: 将这一全球定位系统简称为 GPS。

自古以来, 人类就致力于定位和导航的研究工作。1957 年 10 月世界上第一颗卫星发射成功后, 利用卫星进行定位和导航的研究工作提到了议事日程。1958 年底, 美国海军武器实验室委托霍布金斯大学应用物理实验室研究美国军用舰艇导航服务的卫星系统, 即海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System —— NNSS)。在这一系统中, 卫星的轨道通过地极, 所以又称为子午仪卫星导航系统 (Transit)。1964 年 1 月用于北极星核潜艇的导航定位研制成功, 并逐步用于各种军舰的导航定位。1967 年 7 月, 经美国政府批准, 对其广播星历解密, 并提供民用, 为远洋船舶导航和海上定位服务。由此显示出了卫星定位的巨大潜力。接着对子午仪卫星定位技术进行了一系列的研究, 提高了卫星轨道测定的精度, 改进了用户接收机的性能, 使定位精度不断提高, 自动化程度不断完善, 应用范围越来越广, 如海上石油勘探、钻井定位、海底电缆铺设、海洋调查与测绘、海岛联测以及大地控制网的建立等, 成为全球定位和导航的一种新手段。

尽管子午仪卫星导航系统已得到广泛的应用, 并显示出巨大的优越性。但是, 这一系统在实际应用方面却存在着十分严重的缺陷。该系统是由 5~6 个卫星组成的导航网, 卫星运行高度较低 (平均约 1000 km), 运行周期为 107 分钟, 对同一个卫星每天通过次数最多为 13 次。由于采用多普勒定位原理, 一台接收机一般需要观测 15 次合格的卫星通过, 才能达到  $\pm 10$  m 的单点定位精度。在全球范围内, 它给出的定位信息只能是全天候的连续二维坐标——经度和纬度, 不能给出高程。这种系统, 一方面由于所需的观测时间较长, 不能给用户, 尤其是高动态用户 (如飞机、车辆等) 提供实时定位和导航服务; 另一方面, 由于卫星轨道较低, 受大气影响严重, 定位精度的提高受到限制, 因而限制了高动态用户和高精度用户的使用。对舰船而言, 利用这一系统只能对惯性导航系统和其他无线电导航系统进行连续的精确修正, 它的作用远不能满足全球实时定位的要求。

鉴于子午仪卫星导航系统对潜艇和水面船舶导航的可靠服务以及该系统存在的缺陷, 美国于 60 年代末着手研制新的卫星导航系统, 以满足海陆空三军和民用部门对导航越来越高的要求。为此, 美国海军提出了名为 “Timation” 的计划, 该计划采用 12~18 颗卫星组成全球定位网, 卫星高度约 10000 km, 轨道呈圆形, 周期为 8 小时, 并于 1967 年 5 月 31 日和 1969 年 9 月 30 日分别发射了 Timation-1 和 Timation-2 两颗试验卫星。与此同时, 美国空军提出了名为 “621-B” 计划, 它采用 3~4 个星群覆盖全球, 每

个星群由 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 24 小时倾斜轨道。这两个计划的目标一致，即建立全球定位系统。但两个计划的实施方案和内容不同，各有优缺点。考虑到两个计划的各自优缺点以及美国难于同时负担研制两套系统的庞大经费开支，1973 年美国代理国防部长批准成立一个联合计划局，并在洛杉矶空军航天处内设立办事机构。该办事机构的组成人员包括美国陆军、海军、海军陆战队、国防制图局、交通部、北大西洋公约组织和澳大利亚的代表。自此正式开始了 GPS 的研究和论证工作。

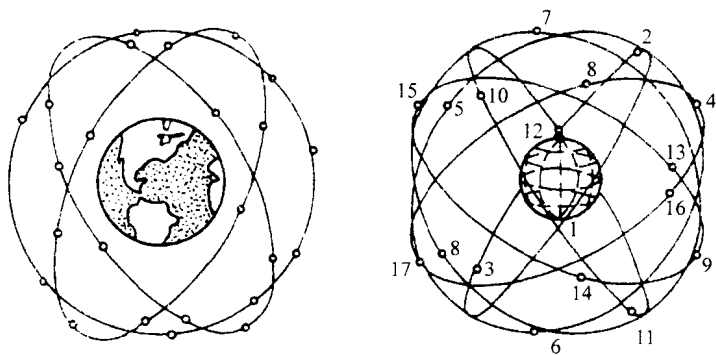
在联合计划局的领导下，诞生了 GPS 方案。这个方案是由 24 颗卫星组成的实用系统。这些卫星分布在互成  $120^\circ$  的 3 个轨道平面上，每个轨道平面平均分布 8 颗卫星。这样，对于地球任何位置，均能同时观测到 6~9 颗卫星。预计粗码定位精度为 100 m 左右，精码定位精度为 10 m 左右。1978 年，由于压缩国防预算，减少了对 GPS 计划的拨款，于是将实用系统的卫星数由 24 颗减为 18 颗，并调整了卫星配置。18 颗卫星分布在互成  $60^\circ$  的 6 个轨道面上，轨道倾角为  $55^\circ$ 。每个轨道面上布设 3 颗卫星，彼此相距  $120^\circ$ ，从一个轨道面的卫星到下一个轨道面的卫星之间错动  $40^\circ$ 。这样的卫星配置基本上保证了地球任何位置均能同时观测到 4 颗卫星。经过一段实验后发现，这样的卫星配置即使全部卫星正常工作，其平均可靠度仅为 0.9969。如果卫星发生故障，将使可靠性大大降低。因此 1990 年初又对卫星配置进行了第三次修改。最终的 GPS 方案是由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成（图 1.1.1）。卫星的轨道参数基本上与第二方案相同。只是为了减小卫星漂移，降低对所需轨道位置保持的要求，将卫星的高度提高了 49 km，即长半轴由 26550 km 提高到 26609 km。这样，由每年调整一次卫星位置改为每 7 年调整一次。

GPS 实施计划共分三个阶段：

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。

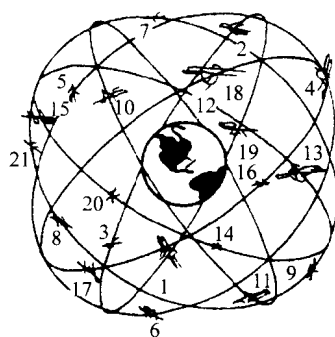
第二阶段为全面研制和试验阶段。从 1979 年到 1984 年，又陆续发射了 7 颗试验卫星。这一阶段称之为 Block I。与此同时，研制了各种用途的接收机，主要是导航型接收机，同时测地型接收机也相继问世。试验表明，GPS 的定位精度远远超过设计标准。利用粗码的定位精度几乎提高了一个数量级，达到 14 m。由此证明，GPS 计划是成功的。

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 A 卫星增强了军事应用功能，扩大了数据存储容量；Block II 卫星只能存储供 14 天用的导航电文（每天更新三次）；Block II A 卫星能存储供 180 天用的导航电文，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。表 1.1.1 示出 GPS 卫星发射状况。图 1.1.2 示出 GPS 星座的卫星分布。



(a) 原计划24颗卫星布置图

(b) 修改后18颗卫星布置图



(c) GPS 工作卫星星座  
(于1993 年建成)

图 1.1.1 GPS 卫星的配置

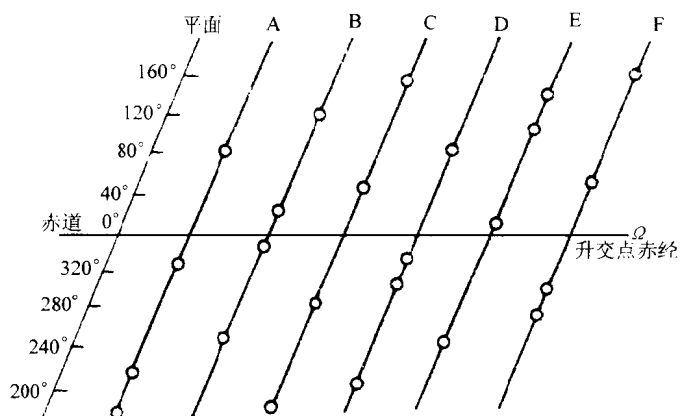


图 1.1.2 GPS 星座的卫星分布

表 1.1.1 GPS 卫星发射情况

| 阶段         | 卫星编号 (PRN) | 发射日期       | 启用日期       | 所在轨道面 |
|------------|------------|------------|------------|-------|
| Block I    | 12         | 1984.9.8   | 1984.10.3  | A1    |
| Block II   | 14         | 1989.2.14  | 1989.4.15  | E1    |
|            | 2          | 1989.6.10  | 1989.8.14  | B3    |
|            | 16         | 1989.8.18  | 1989.10.14 | E3    |
|            | 19         | 1989.10.21 | 1989.11.23 | A4    |
|            | 17         | 1989.12.11 | 1990.1.6   | D3    |
|            | 18         | 1990.1.24  | 1990.2.14  | F3    |
|            | 20         | 1990.3.26  | 1990.4.18  | B2    |
|            | 21         | 1990.8.2   | 1990.8.22  | E2    |
|            | 15         | 1990.10.1  | 1990.10.15 | D2    |
|            | 23         | 1990.11.26 | 1990.12.10 | E4    |
| Block II-A | 24         | 1991.7.3   | 1991.8.30  | D1    |
|            | 25         | 1992.2.23  | 1992.3.24  | A2    |
|            | 28         | 1992.4.9   | 1992.4.25  | C2    |
|            | 26         | 1992.7.7   | 1992.7.23  | F2    |
|            | 27         | 1992.9.9   | 1992.9.30  | A3    |
|            | 1          | 1992.11.22 | 1992.12.11 | F1    |
|            | 29         | 1992.12.18 | 1993.1.5   | F4    |
|            | 22         | 1993.2.3   | 1993.4.4   | B1    |
|            | 31         | 1993.3.30  | 1993.6.12  | C3    |
|            | 7          | 1993.5.13  | 1993.7.20  | C4    |

## § 1.2 GPS 的组成

GPS 包括下列三大部分：GPS 卫星（空间部分）、地面支撑系统（地面监控部分）、GPS 接收机（用户部分）。

### § 1.2.1 GPS 卫星

自 1978 年 2 月 22 日发射第一颗 GPS 试验卫星以后，到 1985 年 10 月 9 日发射最后一颗 GPS 试验卫星，共有 11 颗试验卫星在轨道上运行。这些试验卫星称为 block I 卫星。现在只有 4 颗卫星仍在工作。试验卫星是在加利福尼亚的范登堡空军基地采用 Atlas F 火箭发射入轨的。运行轨道呈近似圆形，长半轴为 26560 km，倾角为  $64^\circ$ ，轨道高度约 20000 km。这些卫星只分布在 A、C 两个轨道平面内，其目的是为了保证亚利桑那州的 Yuma 试验基地能够获得最长的连续观测时间。每颗卫星按下列方式编号：

- (1) 顺序编号：按照 GPS 试验卫星发射时间的先后次序对卫星进行编号。
- (2) PRN 编号：根据 GPS 卫星所采用的伪随机噪声码（PRN 码）对卫星进行编号。在导航定位中，均采用 PRN 编号，这一规则一直沿用至今。
- (3) IRON 编号：IRON 为 Inter Range Operation Number 的缩写，意思是内部距离

操作码。IRON 编号是美国和加拿大组成的北美空军指挥部给定的一种随机号，以此识别所选择的目标。

(4) NASA 编号：这是美国航天局在其文件中给 GPS 试验卫星的编号。

(5) 国际识别号：它的第一部分表示该卫星的发射年代，第二部分表示该发射卫星的序列号，字母 A 表示发射的有效负荷。

按原订计划，1986 年采用火箭和航天飞机两种运载工具发射 GPS 工作卫星。但由于“挑战者号”航天飞机的失事，使这一计划大大推迟，到 1989 年初才着手 Block II 卫星的发射。GPS 卫星采用 Delta 火箭在佛罗里达州肯尼迪空间中心的卡纳维拉尔角基地发射。卫星轨道做了某些调整，长半轴为 26609 km，偏心率为 0.01，倾角为  $55^\circ$ ，卫星高度为 20200 km，卫星运行周期为 12 小时。这样轨道参数的卫星能覆盖地面面积 38%。卫星运行到轨道的任何位置上，它对地面的距离和波束覆盖面积基本上不变。同时波束覆盖区域内，用户接收到的信号强度近似相等。这就是说，用于定位的卫星信号信噪比近似相等，对提高定位精度有好处。

GPS 卫星是由洛克韦尔国际公司空间部研制的。卫星重 774 kg，采用铝蜂窝结构，主体呈柱形，直径为 1.5 m。GPS 卫星构造示意图示于图 1.2.1。星体两侧装有两块双叶对日定向太阳能电池帆板，全长 5.33 m，接受日光面积为  $7.2 \text{ m}^2$ 。对日定向系统控制两翼电池帆板旋转，使板面始终对准太阳，为卫星不断提供电力，并给三组 15AH 的镉镍蓄电池充电，以保证卫星在地球阴影区能正常工作。在星体底部装有多波束定向天线，这是一种由 12 个单元构成的螺旋天线阵，能发射  $L_1$  和  $L_2$  波段的信号，其波束方向图能覆盖约半个地球。在星体两端面上装有全向遥测遥控天线，用于与地面监控网通讯。此外，卫星上还装有姿态控制系统和轨道控制系统。工作卫星的设计寿命为 7 年。从试验卫星的工作情况看，一般都能超过或大大超过设计寿命，例如，PRN 06 卫星从 1978 年工作到 1994 年。

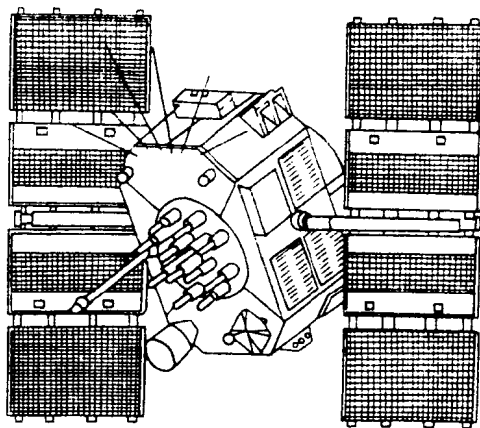


图 1.2.1 GPS 卫星构造示意图

由于 GPS 定位采用被动定位原理，要求卫星装载的频率标准精度足够高。早期的试验卫星采用了霍布金斯大学应用物理实验室研制的石英晶体振荡器，其相对频率稳定度为  $(10^{-10} \sim 10^{-11}) / \text{d}$ 。这样的频率稳定度给卫星位置带来的误差为 14.5 m。1974 年采用了文富拉德姆公司研制的铷钟，频率稳定度为  $(5 \sim 10) \times 10^{-13} / \text{d}$ 。此钟安装在 PRN03, PRN06, PRN09 卫星上，经过多次试验，所造成的卫星位置误差为 8.0 m。1977 年，采用了马斯频率和时间系统公司研制的铯原子钟，其频率稳定度为  $(1 \sim 2) \times 10^{-13} / \text{d}$ 。它给卫星位置带来的误差仅为 2.9 m。1981 年，采用了休斯公司研制的氢钟作为频率标准，频率稳定度达到  $10^{-15} / \text{d}$ 。它能使测定卫星的轨道精度优于 1 m，从而大大保证了 GPS 的精密定位的关键条件。

## § 1.2.2 地面支撑系统

在导航定位中,采用的是卫星后方交会原理。因此必须首先知道卫星的位置,而位置是由卫星星历计算出来的。地面支撑系统的功能就是观测卫星并计算其星历,编辑成电文注入卫星,然后由卫星以广播星历的方式实时地传送给用户。

地面支撑系统包括 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站(图 1.2.2 和图 1.2.3)。主控站位于科罗拉多州斯平士的联合空间执行中心,3 个注入站分别设在大西洋的阿松森岛、印度洋的狄哥伽西亚和太平洋的卡瓦加兰,5 个监测站设在主控站、3 个注入站和夏威夷岛。

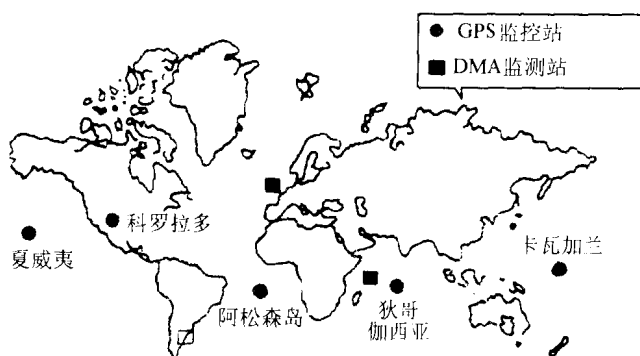


图 1.2.2 GPS 卫星地面支撑系统分布图

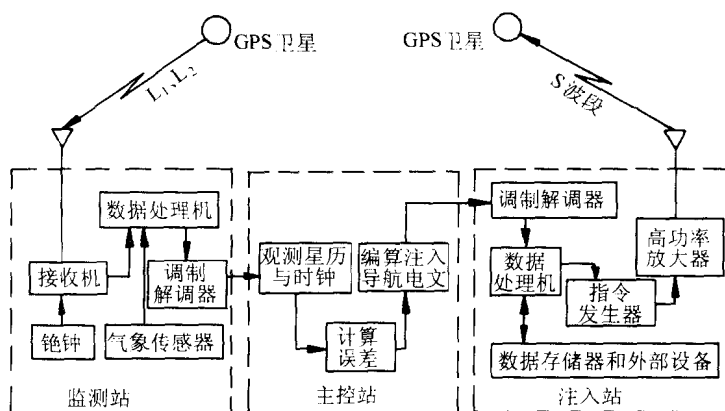


图 1.2.3 地面监控系统方框图

监测站的主要任务是对每颗卫星进行观测,并向主控站提供观测数据。每个监测站配有 GPS 接收机,对每颗卫星进行常年连续不断地观测,每 6s 进行一次伪距测量和多普勒观测、采集气象要素等数据。监测站是一个无人值守的数据采集中心,受主控站的控制,定时将观测数据传送到主控站。5 个监测站均匀分布在全球范围,保证了 GPS 精密定轨的精度要求。

主控站能完成下列功能:

(1) 采集数据：它采集各个监测站传送来的数据，包括卫星的伪距、积分多普勒、时钟、工作状态、监测站自身的状态、气象要素以及海军水面兵器中心的参考星历。

(2) 编辑导航电文：根据采集的数据计算每一颗卫星的星历、时钟改正数、状态参数、大气改正数等，并按一定格式编辑为导航电文，传送到注入站。

(3) 诊断功能：对地面支撑系统的协调工作和卫星的健康状况进行诊断，并进行编码和编入导航电文发送给用户。

(4) 调整卫星：根据需要对卫星进行调整。或者调整卫星轨道到正常位置，或者用备份卫星取代失效的工作卫星，或者对卫星是否施加 SA 和 AS 措施。

主控站将编辑的导航电文传送到 3 个注入站，然后由注入站定时将这些信息注入各个卫星。这样，地面支撑系统完成了全部任务。

### § 1.2.3 用户接收机

自从 GPS 全部建成以后，它将昼夜不停地发送导航定位信息，在地球的任何地方和任何时间实现实时定位。这其中最重要的关键设备就是用户接收机。近十几年来，世界各国的企业公司和科研单位都相继研制各种类型的接收机。据 1998 年 1 月出版的《GPS WORLD》统计，已有 60 多家企业生产出 400 多种型号的 GPS 接收机。

GPS 接收机可以按照不同要求进行分类，如按编码信息分类、按接收的数据类型分类、按接收机通道分类、按动态性能分类、按用途分类、按工作模式分类等。但总的来说，可分为两大类：导航型和测地型。

导航型接收机结构简单、体积小、耗电省、精度低、价钱便宜。一般采用单频 C/A 码伪距接收技术，定位精度为 100 m，用于航空、航海和陆地的实时导航中。现在发展的差分 GPS 技术，能使定位精度提高到 1~3 m，大大拓宽了应用范围。有极少数接收机采用 P 码接收技术，使单点定位精度达到 10 m，这种接收机专为军用。

测地型接收机结构复杂、精度高，当然价钱也很贵。它采用双频伪距和载波相位接收技术，测量基线的精度一般达到  $10^{-7}$ ，最高可达到  $10^{-9}$ 。可用于大地测量、地壳形变监测以及精密测距中。

GPS 接收机的种类虽然很多，但它的结构基本一致，分为天线单元和接收单元两大部分（图 1.2.4）。

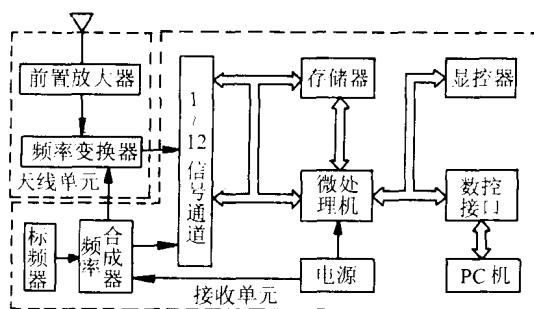


图 1.2.4 GPS 接收机的基本构造