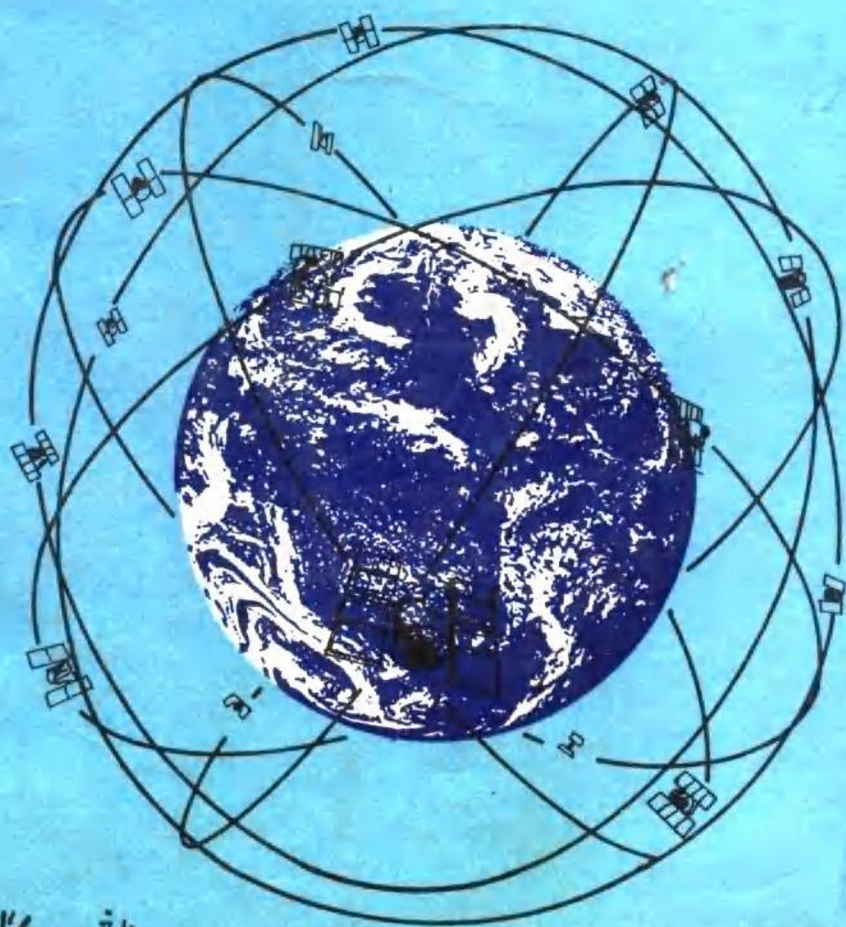


GPS 卫星测量原理 与应用

周忠谟 易杰军 编著



测绘出版社

GPS 卫星测量原理与应用

周忠谟 易杰军 编著

测绘出版社

(京)新登字 065 号

内 容 提 要

本书主要是为 GPS 卫星测量的用户了解其基本原理和应用而编写的。全书共分 11 章,内容包括: GPS 的概况,卫星运动及卫星信号方面的基础知识,常用的坐标系统与时间系统,利用 GPS 进行绝对定位和相对定位的基本原理, GPS 卫星测量的实施及应用等。其中较详细地介绍了有关高精度 GPS 定位的观测量及误差来源,观测方程与数据处理, GPS 测量成果与经典地面测量成果的联合平差等。本书较为深入浅出、通俗易懂、系统全面。

本书的读者对象主要是在石油、地质、矿产、农林、水利、交通、城建、测绘等部门从事测量生产的工程技术人员,同时可供地学学科的有关科研人员以及相关专业的大学院校师生参考。

GPS 卫星测量原理与应用

周忠谟 易杰军 编著

*

测绘出版社出版·发行
北京大兴星海印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所经销

*

开本 787×1092 1/16·印张 17·字数 378 千字
1992 年 12 月第一版·1992 年 12 月第一次印刷
印数 0 001—2 000 册·定价 15.00 元
ISBN 7-5030-0540-8/P·207

前 言

全球定位系统 (Global Positioning System—GPS) 是美国国防部主要为满足军事部门对海上、陆地和空中设施进行高精度导航和定位的要求而建立的。该系统从本世纪 70 年代初开始设计、研制, 历经约 20 年, 预计于 1993 年全部建成。

GPS 作为新一代卫星导航与定位系统, 不仅具有全球性、全天候、连续的精密三维导航与定位能力, 而且具有良好的抗干扰性和保密性。因此, 发展全球定位系统 (GPS) 已成为美国导航技术现代化的最重要标志, 并且被视为本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。

全球卫星定位系统的迅速发展, 引起了各国军事部门和广大民用部门的普遍关注。GPS 定位技术的高度自动化及其所达到的高精度和具有的潜力, 也引起了广大测量工作者的极大兴趣。特别是近十年来, GPS 定位技术在应用基础的研究、新应用领域的开拓、软件和硬件的开发等方面都取得了迅速发展。广泛的科学实验活动为这一新技术的应用展现了极为广阔的前景, 并预示着经典的大地测量技术面临着一场意义深远的变革, 从而将进入一个崭新的时代。

目前, GPS 精密定位技术已经广泛地渗透到了经济建设和科学技术的许多领域, 尤其对经典大地测量学的各个方面产生了极其深刻的影响。它在大地测量学及其相关学科领域, 如地球动力学、海洋大地测量学、天文学、地球物理勘探、资源勘察、航空与卫星遥感、工程变形监测、运动目标的测速以及精密时间传递等方面的广泛应用, 充分地显示了这一卫星定位技术的高精度与高效益。

近年来, GPS 精密定位技术在我国也已得到蓬勃发展。在我国大地测量、精密工程测量、地壳运动监测、资源勘察和城市控制网的改善等方面的应用及其所取得的成功经验, 进一步展示了 GPS 精密定位技术的显著优越性和巨大潜力。

90 年代 GPS 导航与定位技术将获得进一步的发展, 应用将更为广泛, 从而将为各国经济建设、国防建设的发展和科学技术的进步作出新的贡献。

作者编写本书的目的, 主要在于适应 GPS 卫星测量发展的需要, 向我国广大 GPS 用户比较全面地介绍 GPS 卫星测量的原理以及有关的基础知识, 以利于这一新技术的应用和普及, 为我国导航与定位技术的现代化服务。

全书共分十一章, 其中第一章为导引, 简要地介绍了卫星导航与定位技术的发展和全球定位系统 (GPS) 的构成概况, 以便使读者对 GPS 有一个概括的了解。第二章介绍了 GPS 测量常用的一些坐标系统和时间系统。了解这些坐标系统和时间系统及不同系统的转换方法, 对于掌握 GPS 测量的基本原理来说是必要的。为了理解卫星运行的基本规律

和卫星的星历计算，第三章简要地介绍了卫星运动的基础知识和 GPS 卫星坐标的计算方法。第四章介绍了无线电信号传播的一般规律，分析了大气层折射对电磁波传播的影响，并介绍了有关 GPS 卫星信号的基本概念。第五章主要介绍了 GPS 测量的观测量，并对观测量的主要误差来源进行了分析。GPS 测量的观测量是利用 GPS 进行高精度定位的依据，所以详细地了解不同观测量的性质，观测量的模型，误差的影响规律，对 GPS 用户来说是重要的。第六章和第七章分别阐述了利用 GPS 进行绝对定位和相对定位的原理。较为详细地介绍了精密相对定位的观测方程及其线性化形式，观测数据的处理及精度评定等。这是本书的重点。第八章介绍了进行 GPS 测量的一些基本原则和经验，可作为生产实践的参考。考虑到加强和改造经典地面控制网是当前 GPS 测量应用的一个重要领域，所以第九章详细地介绍了有关 GPS 卫星网与经典地面网的联合平差问题，推荐了多种联合平差模型。另外还介绍了 GPS 高程及其应用问题。第十章概括地介绍了 GPS 测量的主要应用领域及其成果，以说明 GPS 定位技术的广阔应用前景。最后在第十一章简要地介绍了 GPS 接收机的基本概念和基本工作原理，以及当前一些主要大地型 GPS 接收机的概况，包括型号、性能和软件等以供读者参考。

GPS 卫星测量学是由多学科相互渗透而形成的一门新兴学科，其理论尚在不断完善，应用领域也在不断拓宽，发展迅速，日新月异。由于作者水平有限，书中错误与不当之处在所难免，诚恳欢迎读者批评指正。

本书主要由周忠谟编写，其中部分章节由易杰军起草。在本书的编写过程中，国家测绘科技情报研究所助理工程师周琪在资料的收集、翻译和整理等方面也作了很多工作，为本书的撰写付出了辛勤的劳动，在此表示诚挚感谢。

作 者

1991 年 12 月于北京

目 录

| | |
|----------------------------------|--------|
| 第一章 导 引 | (1) |
| §1.1 GPS的发展由来及其特点 | (1) |
| 1.1.1 GPS的发展由来 | (1) |
| 1.1.2 GPS的特点 | (2) |
| §1.2 利用GPS的限制与相应措施..... | (4) |
| 1.2.1 美国对利用GPS的限制政策..... | (4) |
| 1.2.2 用户摆脱SA政策限制的措施..... | (4) |
| §1.3 GPS的组成概况 | (5) |
| 1.3.1 空间星座部分..... | (6) |
| 1.3.2 地面监控部分..... | (9) |
| 1.3.3 用户设备部分..... | (10) |
| | |
| 第二章 GPS测量的坐标系统与时间系统 | (11) |
| §2.1 坐标系统的类型..... | (11) |
| §2.2 协议天球坐标系..... | (11) |
| 2.2.1 天球的基本概念..... | (11) |
| 2.2.2 天球坐标系..... | (12) |
| 2.2.3 岁差与章动的影响..... | (13) |
| 2.2.4 协议天球坐标系的定义和换算..... | (14) |
| §2.3 协议地球坐标系..... | (16) |
| 2.3.1 地球坐标系..... | (16) |
| 2.3.2 地极移动与协议地球坐标系..... | (18) |
| 2.3.3 协议地球坐标系与协议天球坐标系的转换..... | (20) |
| §2.4 地球坐标系的其它表达形式..... | (21) |
| 2.4.1 地球参心坐标系..... | (21) |
| 2.4.2 站心坐标系..... | (23) |
| §2.5 大地测量基准及其转换..... | (24) |
| 2.5.1 经典大地测量基准..... | (24) |
| 2.5.2 卫星大地测量基准..... | (27) |
| §2.6 时间系统..... | (28) |

| | | |
|--|-----------------------|--------|
| 2.6.1 | 时间的有关概念 | (28) |
| 2.6.2 | 世界时系统 | (29) |
| 2.6.3 | 原子时 | (30) |
| 2.6.4 | 力学时 | (31) |
| 2.6.5 | 协调世界时 | (32) |
| 2.6.6 | GPS 时间系统 | (32) |
| 第三章 卫星运动的基础知识及 GPS 卫星的坐标计算 (34) | | |
| §3.1 | 概述 | (34) |
| 3.1.1 | 卫星轨道在 GPS 测量中的意义 | (34) |
| 3.1.2 | 影响卫星轨道的因素及其研究方法 | (34) |
| §3.2 | 卫星的无摄运动 | (35) |
| 3.2.1 | 卫星运动的开普勒定律 | (36) |
| 3.2.2 | 无摄卫星轨道的描述 | (38) |
| 3.2.3 | 真近点角 f_0 的计算 | (39) |
| 3.2.4 | 卫星的瞬时位置 | (41) |
| 3.2.5 | 卫星的运动速度 | (43) |
| §3.3 | 卫星的受摄运动 | (47) |
| 3.3.1 | 卫星运动的摄动力 | (47) |
| 3.3.2 | 地球引力场摄动力的影响 | (49) |
| 3.3.3 | 日月引力的影响 | (51) |
| 3.3.4 | 太阳光压的影响 | (51) |
| §3.4 | GPS 卫星的星历 | (52) |
| 3.4.1 | 预报星历 | (52) |
| 3.4.2 | 后处理星历 | (53) |
| §3.5 | GPS 卫星的坐标计算 | (53) |
| 3.5.1 | 升交点经度的计算 | (54) |
| 3.5.2 | 在协议地球坐标系中 GPS 卫星位置的计算 | (55) |
| 第四章 电磁波的传播及 GPS 卫星的信号 (57) | | |
| §4.1 | 电磁波传播的基本概念 | (57) |
| 4.1.1 | 电磁波及其参数 | (57) |
| 4.1.2 | 电磁波的传播速度与大气折射 | (58) |
| §4.2 | 大气层对电磁波传播的影响 | (60) |
| 4.2.1 | 大气的结构及性质 | (60) |
| 4.2.2 | 对流层的影响和改正 | (61) |
| 4.2.3 | 电离层的影响和改正 | (64) |

| | | |
|------------|-----------------------------|---------|
| §4.3 | GPS 卫星的码信号 | (68) |
| 4.3.1 | GPS 卫星信号及其作用 | (68) |
| 4.3.2 | 码与码的产生 | (70) |
| 4.3.3 | GPS 的测距码 | (73) |
| §4.4 | GPS 卫星的导航电文 (数据码) | (75) |
| 4.4.1 | 导航电文及其格式 | (75) |
| 4.4.2 | 导航电文的内容 | (75) |
| §4.5 | GPS 卫星信号的构成 | (76) |
| 4.5.1 | 卫星的载波信号与调制 | (76) |
| 4.5.2 | 卫星信号的解调 | (78) |
| | | |
| 第五章 | GPS 定位的观测量、观测方程及误差分析 | (79) |
| §5.1 | GPS 定位的方法与观测量 | (79) |
| 5.1.1 | 定位方法的分类 | (79) |
| 5.1.2 | 观测量的基本概念 | (79) |
| §5.2 | 测码伪距观测方程 | (81) |
| §5.3 | 测相伪距观测方程 | (82) |
| 5.3.1 | 卫星载波信号的相位与传播时间 | (82) |
| 5.3.2 | 测相伪距观测方程 | (84) |
| §5.4 | 观测方程的线性化 | (86) |
| 5.4.1 | 测码伪距观测方程的线性化 | (86) |
| 5.4.2 | 测相伪距观测方程的线性化 | (87) |
| §5.5 | 观测量的误差来源及其影响 | (88) |
| 5.5.1 | 误差的分类 | (88) |
| 5.5.2 | 与卫星有关的误差 | (89) |
| 5.5.3 | 卫星信号的传播误差 | (90) |
| 5.5.4 | 与接收设备有关的误差 | (93) |
| 5.5.5 | 其它误差来源 | (94) |
| | | |
| 第六章 | GPS 绝对定位原理 | (97) |
| §6.1 | 绝对定位方法概述 | (97) |
| §6.2 | 伪距法定位的原理 | (98) |
| 6.2.1 | 测码伪距绝对定位法 | (98) |
| 6.2.2 | 测相伪距绝对定位法 | (101) |
| §6.3 | 观测卫星的几何分布及其对绝对定位精度的影响 | (104) |
| 6.3.1 | 绝对定位精度的评价 | (104) |
| 6.3.2 | 卫星分布的几何图形对精度因子的影响 | (106) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 第七章 GPS 相对定位原理 | (109) |
| §7.1 相对定位方法概述..... | (109) |
| 7.1.1 静态相对定位法..... | (109) |
| 7.1.2 动态相对定位法..... | (111) |
| §7.2 静态相对定位的观测方程..... | (112) |
| 7.2.1 基本观测量及其线性组合..... | (112) |
| 7.2.2 单差观测方程..... | (113) |
| 7.2.3 双差观测方程..... | (115) |
| 7.2.4 三差观测方程..... | (116) |
| 7.2.5 准动态相对定位的观测方程..... | (117) |
| §7.3 动态相对定位的观测方程..... | (118) |
| §7.4 相对定位的单基线平差模型..... | (120) |
| 7.4.1 观测方程的线性化及平差模型..... | (120) |
| 7.4.2 观测量线性组合的相关性..... | (126) |
| §7.5 整周待定值的确定方法与周跳分析..... | (128) |
| 7.5.1 整周待定值及其确定方法概述..... | (128) |
| 7.5.2 确定整周待定值的经典静态相对定位法..... | (129) |
| 7.5.3 确定整周待定值的交换接收天线法..... | (130) |
| 7.5.4 确定整周待定值的P码双频技术..... | (131) |
| 7.5.5 确定整周待定值的马吉尔配适滤波法..... | (137) |
| 7.5.6 周跳分析..... | (138) |
| §7.6 GPS 卫星网的整体平差原理..... | (140) |
| 7.6.1 整体平差方法概述..... | (140) |
| 7.6.2 基线向量网的平差模型..... | (141) |
| 7.6.3 平差结果的精度评定..... | (145) |
| | |
| 第八章 GPS 测量的实施 | (148) |
| §8.1 概述..... | (148) |
| §8.2 GPS 网的技术设计..... | (148) |
| 8.2.1 测量的精度标准..... | (149) |
| 8.2.2 网的图形设计..... | (150) |
| 8.2.3 网的基准设计..... | (151) |
| §8.3 选点与建立标志..... | (152) |
| 8.3.1 选点工作..... | (152) |
| 8.3.2 点位标志的建立..... | (153) |
| §8.4 GPS 测量的观测工作..... | (153) |
| 8.4.1 观测计划的拟定..... | (154) |

| | | |
|------------|--------------------------------------|--------------|
| 8.4.2 | 仪器的选择与检验 | (156) |
| 8.4.3 | 观测工作 | (157) |
| §8.5 | GPS 相对定位的作业模式 | (159) |
| 8.5.1 | 静态相对定位模式 | (160) |
| 8.5.2 | 快速静态相对定位模式 | (160) |
| 8.5.3 | 准动态相对定位模式 | (161) |
| 8.5.4 | 动态相对定位模式 | (161) |
| §8.6 | 观测成果的外业检核 | (162) |
| 8.6.1 | 外业观测数据的评价标准 | (162) |
| 8.6.2 | 外业观测成果的检核内容 | (163) |
| §8.7 | 观测数据的测后处理过程 | (164) |
| 8.7.1 | 观测数据的预处理 | (164) |
| 8.7.2 | 平差计算 | (165) |
| 8.7.3 | 技术总结与上交资料 | (166) |
| 第九章 | GPS 卫星网与经典地面网的联合平差及 GPS 高程的应用 | (167) |
| §9.1 | GPS 卫星网与地面网联合平差的意义 | (167) |
| §9.2 | GPS 网与地面网的三维联合平差 | (168) |
| 9.2.1 | 在三维坐标系统中两网的转换模型 | (168) |
| 9.2.2 | 网的方差与协方差模型及网的基准 | (170) |
| 9.2.3 | 三维联合平差模型 | (174) |
| §9.3 | GPS 网与地面网的两维联合平差 | (177) |
| 9.3.1 | 在两维坐标系统中两网的转换模型 | (177) |
| 9.3.2 | 两维联合平差模型 | (181) |
| §9.4 | GPS 在高程测量方面的应用 | (184) |
| 9.4.1 | 高程系统概述 | (184) |
| 9.4.2 | 研究大地水准面高程的传统方法 | (186) |
| 9.4.3 | GPS 大地高程的应用 | (190) |
| 第十章 | GPS 测量的应用 | (193) |
| §10.1 | 在基本控制测量方面的应用 | (193) |
| §10.2 | 在地球动力学研究方面的应用 | (196) |
| 10.2.1 | 地球动力学概述 | (196) |
| 10.2.2 | GPS 对研究板块运动的意义 | (197) |
| §10.3 | 在工程变形监测方面的应用 | (199) |
| §10.4 | 在精密工程测量方面的应用 | (200) |
| §10.5 | 在海洋测绘方面的应用 | (202) |

| | | |
|------------------------|----------------------------|--------------|
| 10.5.1 | 在海洋资源勘探方面的应用 | (202) |
| 10.5.2 | 在海洋大地测量方面的应用 | (203) |
| §10.6 | GPS用于接收机载体航速的测定 | (204) |
| §10.7 | GPS用于时间测定 | (207) |
| 第十一章 | GPS接收机 | (210) |
| §11.1 | GPS接收机及其分类 | (210) |
| 11.1.1 | GPS接收机的基本概念 | (210) |
| 11.1.2 | GPS接收机的类型 | (211) |
| §11.2 | GPS接收机通道的概念 | (212) |
| 11.2.1 | 序贯通道 | (213) |
| 11.2.2 | 多路复用通道 | (214) |
| 11.2.3 | 多通道 | (214) |
| §11.3 | GPS接收机的基本工作原理 | (214) |
| 11.3.1 | 码相关型通道 | (215) |
| 11.3.2 | 平方型通道 | (216) |
| 11.3.3 | 码相位型通道 | (217) |
| §11.4 | GPS接收机的天线 | (217) |
| 11.4.1 | 对天线的要求 | (217) |
| 11.4.2 | 天线的类型 | (218) |
| §11.5 | Mini-Mac 2816型GPS接收机 | (219) |
| §11.6 | Wild 200型GPS测量系统 | (221) |
| §11.7 | Trimble 4000 SE/SSE型GPS接收机 | (223) |
| §11.8 | Ashtech-Ⅶ型GPS接收机 | (226) |
| 符号目录 | | (229) |
| 附录一：国际制量级的词冠和代号 | | (243) |
| 附录二：矩阵的特殊量 | | (244) |
| 附录三：关于广义逆矩阵 | | (247) |
| 附录四：年积日计算表 | | (252) |
| 参考文献 | | (253) |

第一章 导 引

全球定位系统 (GPS), 是随着现代科学技术的迅速发展而建立起来的新一代精密卫星导航与定位系统。这里我们将主要介绍一下该系统的发展由来及其在导航和定位方面的特点, 系统的组成概况, 以及美国政府对利用 GPS 的限制政策和用户目前采取的技术措施。

§ 1.1 GPS 的发展由来及其特点

1.1.1 GPS 的发展由来

1957 年 10 月世界上第一颗人造地球卫星的发射成功, 是人类致力于现代科学技术发展的结晶, 它使空间科学技术的发展迅速跨入了一个崭新的时代。

三十多年来, 人造地球卫星技术在军事、通讯、气象、资源勘察、导航、遥感、大地测量、地球动力以及天文等众多学科领域得到极其广泛的应用, 从而推动了科学技术的迅猛发展, 也丰富了人类的科学文化生活。

大家知道, 人造地球卫星的出现, 首先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就着手实施建立为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)。该系统中卫星的轨道都通过地极, 故也称“子午 (Transit) 卫星系统”。1964 年该系统建成, 并开始在美国军方启用; 1967 年美国批准该系统解密, 并提供民用。由于该系统不受气候条件的影响, 自动化程度较高, 且具有良好的定位精度, 所以它的出现也立即引起了大地测量学者的极大关注。尤其是在该系统提供民用之后, 在大地测量方面进行了大量的应用研究和实践, 并取得了许多令人瞩目的成就。这就预示着经典的大地测量技术面临着一场重大的变革。

虽然美国“海军卫星导航系统”在导航技术的发展中具有划时代的意义, 但是由于该系统卫星数目较少(5~6颗)、运行高度较低(平均约 1000km)、从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均约 1.5 小时), 因而它无法提供连续地实时三维导航。加之获得一次导航解所需的时间较长, 所以难以充分满足军事方面, 尤其是高动态目标(如飞机、导弹)导航的要求。而从大地测量学方面来看, 由于它定位速度较慢(一个测站一般平均观测 1~2 天), 精度也较低(单点定位精度 3~5m, 相对定位精度约为 1m), 所以该系统在大地测量学和地球动力学研究方面的应用, 也受到了很大的限制。

为了满足军事部门和民用部门对连续实时和三维导航的迫切要求, 1973 年美国国防部正式开始组织海陆空三军, 共同研究建立新一代卫星导航系统的计划。这就是许多文献中所称的“授时与测距导航系统/全球定位系统”(Navigation System Timing and Ranging/Global Positioning System—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，所以在其设计上采取了若干重大的改善措施。GPS 与 NNSS 的主要特征比较如表 1-1 所列。

GPS 与 NNSS 的比较

表 1-1

| 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1000 | 约20200 |
| 卫星数目(颗) | 5-6 | 24(3颗备用) |
| 卫星运行周期(min) | 107 | 718 |
| 卫星钟稳定度 | 10^{-11} | 10^{-12} |

1.1.2 GPS 的特点

1. GPS 相对于其它导航与定位系统的特点

从 1978 年发射第一颗 GPS 试验卫星以来，利用该系统导航与定位的研究、开发和实验工作发展异常迅速。理论与实践表明，GPS 同其它导航与定位系统相比，其主要特点如下：

①全球地面连续覆盖。由于 GPS 卫星的数目较多且分布合理，所以地球上任何地点均可连续同步地观测到至少 4 颗卫星。从而保障了全球、全天候连续地实时导航与定位。

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。一般来说，目前其单点实时定位精度可达 5~10m，静态相对定位精度可达 1~0.1ppm，测速精度为 0.1m/s，而测时精度约为数十纳秒。随着 GPS 测量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。

③实时定位速度快。利用全球定位系统一次定位和测速工作在一秒至数秒钟内便可完成(NNSS 约需 8~10 分钟)，这对高动态用户来说尤为重要。

④抗干扰性能好，保密性强。由于 GPS 采用了数字通讯的特殊编码技术，即伪随机噪声码技术，因而 GPS 卫星所发送的信号，具有良好的抗干扰性和保密性。

考虑到 GPS 主要是为满足军事部门高精度导航与定位的需要而建立的，所以上述优点对军事上动态目标的导航具有十分重要的意义。正因为如此，美国政府把发展 GPS 技术作为导航技术现代化的重要标志，并把这一技术视为 20 世纪最重大的科技成就之一。

2. GPS 应用于测量的特点

GPS 定位技术的高度自动化和所达到的定位精度及其潜力(见图 1-1)使广大测量工作者产生了极大的兴趣。尤其从 1982 年第一代大地型无码 GPS 接收机 Macrometer V-1000 投入市场以来，在应用基础的研究、应用领域的开拓、硬件和软件的开发等方面都得到蓬勃发展。广泛的实验活动为 GPS 精密定位技术的应用展现了广阔的前景。

相对于经典的测量学来说，这一新技术的主要特点如下：

①观测站之间无需通视。既要保持良好的通视条件，又要保障三角网的良好结构，这一直是经典大地测量在实践方面的困难问题之一。GPS 测量不要求观测站之间相互通视，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经费和时间（一般造标费用约占总经费的 30~50%），同时也使点位的选择变得甚为灵活。

不过也应指出，GPS 测量虽不要求观测站之间相互通视，但必须保持观测站的上空开阔（净空），以使接收 GPS 卫星的信号不受干扰。

②定位精度高。现已完成的大量实验表明，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方法的改善，可望在大于 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，完成一条基线的精密相对定位所需要的观测时间，根据要求的精度不同一般约为 1~3 小时。为了进一步缩短观测时间，提高作业速度，对于快速定位方法的研究正受到广泛的重视。近年来发展的短基线（例如不超过 20km）快速相对定位法，其观测时间仅需数分钟。

④提供三维坐标。GPS 测量在精确测定观测站平面位置的同时，可以精确测定观测站的大地高程。GPS 测量的这一特点，不仅为研究大地水准面的形状和确定地面点的高程开辟了新途径，同时也为其在航空物探、航空摄影以及导航中的应用提供了重要的高程数据。

⑤操作简便。GPS 测量的自动化程度很高，在观测中测量员的主要任务只是安装并开关仪器、量取仪器高和监视仪器的工作状态，而其它观测工作如卫星的捕获、跟踪观测等均由仪器自动完成。另外，GPS 用户接收机一般重量较轻、体积较小，例如 Ashtech M-Ⅱ型 GPS 接收机，包括电池在内的重量约为 3.9kg，体积为 $10 \times 20 \times 22 \text{cm}^3$ ，而 Wild 200 型 GPS 测量系统，其控制器和传感器两部分共重约 3.3kg，因此携带和搬运都很方便。

⑥全天候作业。GPS 观测工作可以在任何地点，任何时间连续地进行，一般也不受天气状况的影响。

所以，GPS 的发展对于传统的测量技术是一次巨大的冲击。一方面它将使经典的测量方法面临一场重大的变革，另一方面也将进一步加强大地测量学与其它学科之间的相互渗

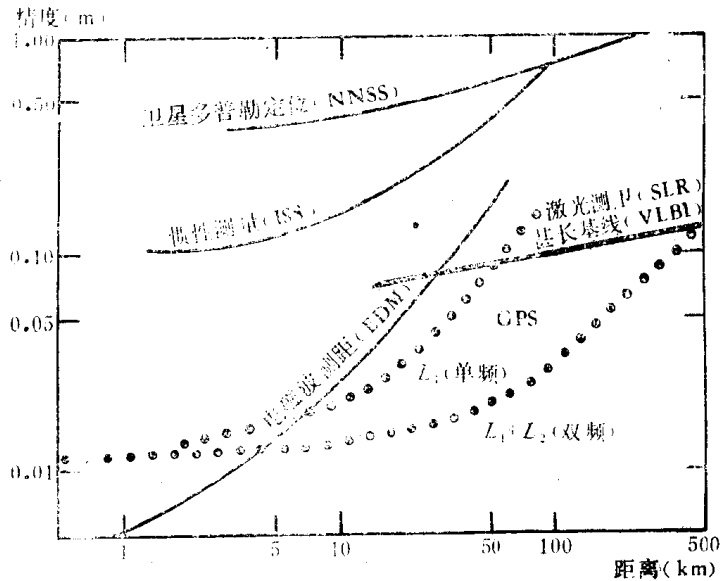


图 1-1 各种定位方法的精度比较^[234]

透,从而促进测绘科学技术的现代化发展。

§ 1.2 利用 GPS 的限制与相应措施

1.2.1 美国对利用 GPS 的限制政策

因为 GPS 与美国的国防现代化发展密切相关,所以该系统除在设计方面采取了许多保密性措施外,在其全部投入运行后还将实行所谓选择可用性 (Selective Availability-SA) 政策,即人为地将卫星星历和 GPS 卫星钟的精度降低,以限制广大民间用户利用 GPS 定位的精度。

GPS 卫星发射的无线电信号,含有两种精度不同的测距码,即所谓 P 码(也称精码)和 C/A 码(也称粗码)。相应两种测距码, GPS 将提供两种定位服务方式,即精密定位服务(Precise Positioning Service-PPS)和标准定位服务(Standard Positioning Service-SPS)。

精密定位服务的主要对象是美国军事部门和其它特许的部门。这类用户可利用 P 码获得精度较高的观测量,且能通过卫星发射的两种频率信号量测距离,以消除电离层折射的影响。利用 PPS 也不会受到上述精度限制(SA)政策的影响,单点实时定位的精度可优于 10m。

P 码是不公开的保密码,广大民间用户难以利用。不过,由于近年 P 码的结构已被解译,所以美国将采用新的保密码即 Y 码来代替 P 码。 Y 码的结构将更为严格保密,这样非美国军方特许的一般用户,将无法解译 Y 码以进行高精度的导航和定位。

标准定位服务的主要对象是广大的民间用户。利用 SPS 所得到的观测量精度较低,且只能采用调制在一种频率上的 C/A 码测量距离,无法利用双频技术消除电离层折射的影响。其单点实时定位的精度约为 20m~30m。但是在 SA 政策的限制下,利用 SPS 的定位精度将进一步降低至约 100m。

1.2.2 用户摆脱 SA 限制政策的措施

美国政府对 GPS 用户的限制政策,是民用部门和其它国家的用户极为关心的问题。为了摆脱这种限制,当前采用的措施主要是:

1. 建立独立的 GPS 卫星测轨系统

利用 GPS 卫星,建立独立的跟踪系统,以精密地测定卫星的轨道为用户提供服务,是一项经济有效的措施。它对开发 GPS 的广泛应用具有重大意义。

所以,除美国一些民用部门外,加拿大、澳大利亚和欧洲的一些国家都在实施建立区域性或全球性精密测轨系统的计划。其中值得注意的是,以美国为首从 1986 年开始建立的国际合作 GPS 卫星跟踪网(CIGNET—Cooperative International GPS Satellite Tracking Network),其跟踪站的分布已扩展至南半球,预计该跟踪网的测轨精度可达分米级。建立区域性测轨系统的措施对我国利用和普及 GPS 定位技术,推进测绘科学技术的现代化,也具有重要的现实意义。

2. 建立独立的卫星导航与定位系统

目前,一些国家和地区正在发展自己的卫星导航与定位系统。尤其是前苏联正在建立的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System—GLONASS)引起了世界各国的普遍兴趣。GLONASS计划包括24颗卫星(包含3颗备用卫星),均匀分布在三个轨道面上(图1-2),轨道面的倾角为 64.8° ,运行周期为11小时15分;卫星信号采用了两种载波,其频率分别为1.6GHz和1.2GHz。目前,该系统已有13颗卫星进入运行轨道,原计划在1995年前GLONASS星座的卫星数目将达到24颗。目前其导航的精度,平面位置约为100m,速度为15cm/s,时间为1ms。

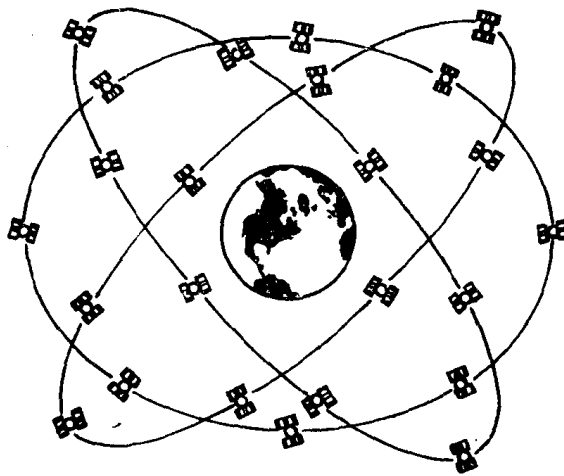


图 1-2 GLONASS 卫星星座

另外,欧洲空间局(European Space Agency—ESA)也正在发展一种以民用为主的卫星定位系统(简称NAVSAT)。该系统包括6颗地球同步卫星和12颗高椭圆轨道卫星。

上述几种不同卫星定位系统的主要特征如表1-2所列。建立自己的卫星导航与定位系统,尽管可以完全摆脱对美国GPS的依赖,但这是一项技术复杂且耗资巨大的工程,对于经济和技术尚在发展中的国家来说将是困难的。

不同卫星定位系统的主要特征

表 1-2

| 卫星定位系统 | 星座卫星数目(颗) | 卫星平均高度(km) | 卫星运行周期(min) | 载波频率(MHz) | |
|---------------|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|
| | | | | L_1 | L_2 |
| GPS(美国) | 24 | 20200 | 718 | 1565—1586 | 1217—1238 |
| GLONASS(前苏联) | 24 | 19100 | 675 | 1597—1617 | 1240—1260 |
| NAVSAT(欧洲空间局) | 18 | 20178* | 720 | 1561—1569 | 1224—1232 |

* 高椭圆轨道卫星的平均高度

应当指出,为了克服美国采取精度限制政策(SA)的影响,一些学者正在致力于开发新的数据处理方法和软件,这一工作对于GPS的应用具有深远意义。

§ 1.3 GPS 的组成概况

全球定位系统(GPS)主要有三大组成部分,即空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分(见图1-3)。

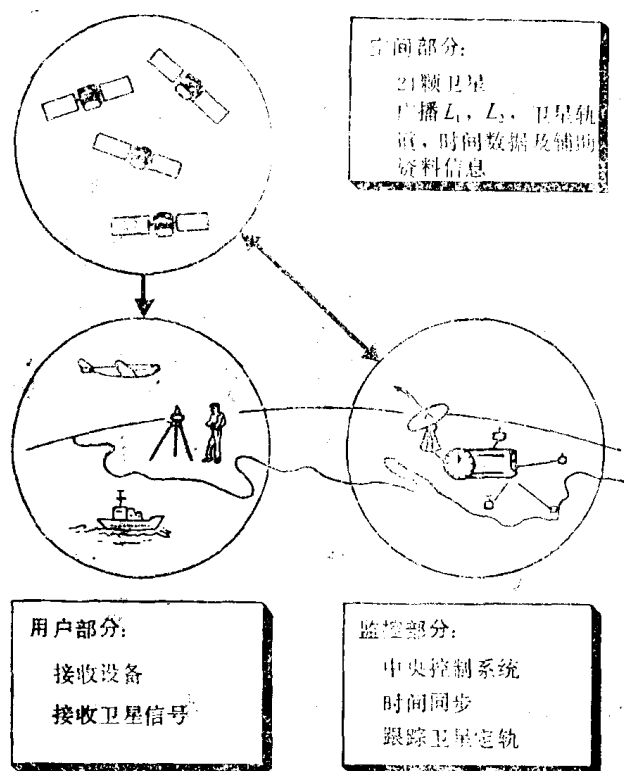


图 1-3 全球定位系统 (GPS) 构成示意图^[234]

星在空间的分布情况将如图 1-4 所示。

GPS 卫星在空间的上述配置, 保障了在地球上任何地点、任何时刻均至少可以同时观测到 4 颗卫星, 加之卫星信号的传播和接收不受天气的影响, 因此 GPS 是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。不过也应指出, GPS 卫星的上述分布, 在个别地区仍可能在某一短时间内 (例如数分钟) 只能观测到 4 颗图形结构较差的卫星, 而无法达到必要的定位精度。

空间部分的 3 颗备用卫星, 将在必要时根据指令代替发生故障的卫星, 这对于保障 GPS 空间部分正常而高效地工作是极其重要的。

迄今, GPS 卫星已设计了三代, 分别为 Block I、Block II 和 Block III (见表 1-3)。第一代 (Block I) 卫星用于全球定位系统的实验, 通常称为 GPS 实验卫星。这一代卫星共研制了 11 颗, 卫星的设计寿命为 5 年, 现已发射完毕。目前尚有 5 颗卫星在工作, 分布在两个轨道面内, 轨道倾角约为 63° 。第二代 (Block II) 卫星用于组成如图 1-4 所示

1.3.1 空间星座部分

1. GPS 卫星星座的构成与现状
全球定位系统的空间卫星星座部分, 将由 24 颗卫星组成, 其中包括 3 颗备用卫星。工作卫星分布在 6 个轨道面内, 每个轨道面上分布有 4 颗卫星。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角为 55° , 各轨道平面升交点的赤经相差 60° , 在相邻轨道上, 卫星的升交距角相差 30° 。轨道平均高度约为 20200km, 卫星运行周期为 11 小时 58 分。因此, 同一观测站上每天出现的卫星分布图形相同, 只是每天提前约 4 分钟。每颗卫星每天约有 5 个小时在地平线以上, 同时位于地平线以上的卫星数目随时间和地点而异, 最少为 4 颗, 最多可达 11 颗。

全球定位系统建成后, 其工作卫

三代 GPS 卫星的概况^[66]

表 1-3

| GPS 卫星 | 区分 | 数量(颗) | 发射时间 | 用途 |
|--------|-----------|-------|-----------|-------|
| 第一代 | Block I | 11 | 1978—1985 | 系统实验 |
| 第二代 | Block II | 28 | 1988—1994 | 正式工作 |
| 第三代 | Block III | | 90年代末 | 改善GPS |