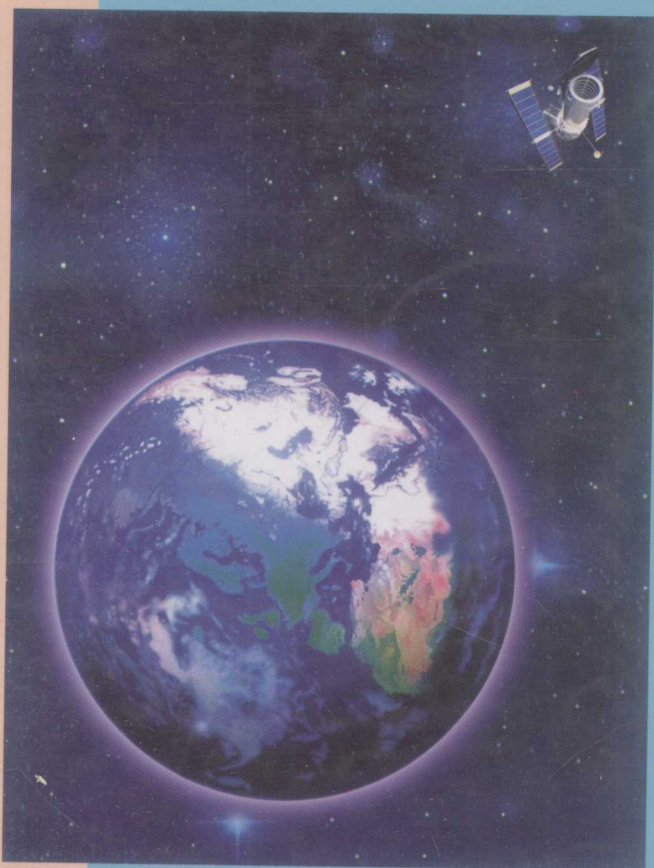


大连海事大学
出版基金赞助
学术丛书

全球定位系统(GPS) 原理与应用

袁安存 编著



大连海事大学出版社

大连海事大学出版社基金赞助学术丛书

全球定位系统(GPS)原理与应用

袁安存 编著

大连海事大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍全球定位系统(GPS)的原理与应用。全书共分九章:绪论, GPS 坐标系统和时间系统, 卫星运动基本知识, 全球定位系统工作原理, GPS 观测量, GPS 导航接收机, 差分 GPS, GLONASS 全球导航卫星系统, GPS 应用与未来。全书理论与技术并重, 对系统基本原理有较详细的阐述, 对 GPS 导航接收机的工作原理和 GPS 技术的发展及应用状况也作了简要介绍。

本书可供大专院校有关学科的教师、学生和研究生使用, 也可供在航海、航空、测绘、交通等领域中从事导航定位的研究与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

全球定位系统(GPS)原理与应用/袁安存编著. - 大连:大连海事大学出版社, 1999.5
ISBN 7-5632-1080-6

I. 全… II. 袁… III. 全球定位系统(GPS) IV. P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 07349 号

大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话:4727996)

大连海事大学印刷厂印刷 大连海事大学出版社发行

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.5

字数:337 千字 印数:0001~1000 册

责任编辑:郭有润 封面设计:王 艳

版式设计:纪 渝

定价:20.50 元

本书由
中共大连市委、大连市人民政府资助出版

**The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government**

大连市学术专著资助出版评审委员会

名誉主任 楼南泉 林纪方
主任 司玉琢
副主任 高春斌 吴厚福 何杰
委员 梁宗巨 王子臣 李寿山 王逢寿
汪榕培 夏德仁 罗均炎

工程技术专家评审组

组长 袁一(大连理工大学 博导、教授)
副组长 刘人杰(大连海事大学 博导、教授)
成员 王承遇(大连轻工学院 博导、教授)
吴迪镛(中科院大连化学物理研究所 博导、研究员)
陈朝贵(铁道部大连内燃机车研究所 高级工程师)
郭东明(大连理工大学 博导、教授)
戚正风(大连铁道学院 教授)
蒋志凯(大连水产学院 教授)

前 言

全球定位系统(Global Positioning System - GPS)是美国国防部为军事目的而建立的卫星导航系统,其主要目的是解决海上、陆地和空中运载工具的导航定位问题。该系统从70年代初开始设计研制,经历了20余年,于1995年,最终完成了24颗卫星星座部署,宣告系统已具备完全工作能力,投入正式运行。

GPS作为新一代卫星导航系统,不仅具有全球、全天候、连续、高精度导航与定位能力,而且有优良的抗干扰性和保密性。因此发展全球定位系统是美国导航技术现代化的一个重要标志,并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导航定位技术的高度自动化及其所达到的高精度和具有的巨大潜在性能,正越来越受到导航界的高度重视。特别是近10年来,GPS导航定位技术在应用基础研究,新应用领域的开拓,软件和硬件的开发研究方面,都取得了长足的进展。广泛的科学实验与应用实践活动为GPS技术在运载体导航应用方面展现了极为宽广的前景,并预示着传统的导航技术将面临着一场根本性的变革。

经历了20余年的发展与应用,GPS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,尤其在海上应用的各个方面产生了极其深刻的影响,除了导航定位以外,在其他相关应用领域,如交通管理、卫星定轨、精确定时、灾害监测、资源调查、工程建设、海洋开发、运载体姿态测定、全球验潮网等方面的应用,GPS技术也大显身手,并已形成为新兴高新技术产业。

近年来,我国GPS技术的应用与研究,发展也非常迅速。在船舶(飞机、车辆)导航定位、大地测量、精密工程定位、交通管制、资源勘探等方面,已广泛应用。对GPS技术的研究,设备的生产及系统集成方面所获得的进展与成功经验,更进一步展示了GPS导航定位技术的显著优越性和巨大潜力。

作者编写本书的目的,主要是适应GPS导航定位技术发展的需要,向我国广大读者介绍GPS导航定位原理以及有关的基础知识,以利于这一新技术的研究与推广应用,为我国导航定位技术的现代化服务。

全书共分九章,其中第一章为概论,简要地介绍卫星导航与定位技术的发展和GPS的组成概况,以便读者对GPS有一个概括的了解。第二章介绍GPS导航定位常用的坐标系统和时间系统。了解这些坐标系统和时间系统及其转换方法,对于掌握GPS的基本原理来说是必要的。为了理解卫星运行的基本规律,第三章简要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GPS工作原理,对GPS卫星信号的基本概念,卫星电文格式,卫星信号的接收与处理进行了系统阐述。第五章主要介绍GPS定位方法和观测量,并对系统主要误差进行了分析。GPS观测量是利用GPS进行导航定位的依据,所以较为详细地了解不同观测量的性质、观测模型和误差的影响规律,对GPS的应用与开发研究来说,都是十分重要的。关于定位方法,分别介绍了绝对定位和相对定位原理,比较详细地阐述高精度相对定位的关键技术问题及目前研究的进展情况。随着动态高精度相对定位的发展,测量与导航定位的界限正逐渐消失,应用动态高精度相对定位的研究成果,运载体高精度导航定位将成为现实,

这对于船舶导航定位有着深远的意义。第六章介绍差分 GPS, 主要侧重于伪码测距在导航中的具体应用。对位置差分, 伪距差分, 差分 GPS 数据链, 差分 GPS 电文格式, 电文内容和电文解码分别作了叙述。对近年发展起来的广域差分和广域增强系统也予以简单介绍。第七章介绍 GPS 接收机。对 GPS 导航接收机基本概念, 工作原理, 典型结构, 信号接收处理原理及定位数据解算方法, 进行了系统阐述。第八章介绍俄罗斯研制的全球导航卫星系统 GLONASS, 对其特点做简单说明。第九章概括介绍 GPS 的应用与未来发展, 以说明 GPS 定位技术的广阔应用前景。

作者利用多年从事教学与科研的方便条件, 广泛收集、参阅和引用了国内外有关书刊、文献资料, 结合实际应用与研究成果, 写成此书。GPS 导航定位技术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, 应用领域也正在继续开拓, 发展迅速, 日新月异。由于作者水平有限, 书中疏漏之处, 在所难免, 诚恳希望读者不吝指正。

编著者

1999 年 1 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 GPS 发展历史及其特点	1
1.2 系统组成概况	3
第二章 GPS 坐标系统和时间系统	12
2.1 卫星导航测量中的坐标系统	12
2.2 时间系统	23
第三章 卫星运动基础知识	28
3.1 概述	28
3.2 卫星无摄运动	28
3.3 卫星受摄运动及轨道参量	34
3.4 GPS 卫星星历	38
3.5 GPS 卫星坐标计算	40
第四章 全球定位系统工作原理	44
4.1 GPS 导航信号	44
4.2 GPS 导航电文	60
第五章 GPS 定位方法及观测量	66
5.1 GPS 定位方法与观测量	66
5.2 测码伪距观测方程	68
5.3 测相伪距观测方程	69
5.4 观测方程线性化	72
5.5 绝对定位法	74
5.6 相对定位法	82
5.7 主要误差因素	105
第六章 GPS 导航接收机	116
6.1 引言	116
6.2 GPS 接收机概述	116
6.3 时序 GPS 接收机	118
6.4 多通道 GPS 接收机	122
第七章 差分 GPS	148
7.1 概述	148
7.2 DGPS 定位原理	150
7.3 广域差分 GPS (WADGPS)	162
7.4 数据链	165
7.5 RTCM SC-104 标准格式	165

7.6	电文发送速率	173
7.7	RTCM 电文解码	174
第八章	GLONASS 全球导航卫星系统	181
8.1	概述	181
8.2	GLONASS 系统组成	181
8.3	导航信号	182
8.4	GLONASS 导航电文	184
8.5	参照系	188
8.6	导航电文解	189
第九章	GPS 的应用与未来	192
9.1	导航应用	192
9.2	姿态测定	193
9.3	船舶进出港应用	196
9.4	船舶机动性能测定	197
9.5	海洋石油勘探和平台定位	198
9.6	车辆定位和指挥调度	200
9.7	GPS 的未来	201
9.8	星座改进	202
9.9	硬件改进	203
9.10	软件改进	203
9.11	结论	204
参考文献	205

第一章 绪论

全球定位系统(GPS)是随着现代科学技术迅速发展而建立的新一代精密卫星导航与定位系统。GPS是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging / Global Positioning System 字头缩写词 NAVSTAR / GPS 的简称,其涵义是:导航卫星测时与测距 / 全球定位系统。

1.1 GPS 发展历史及其特点

1957年10月,世界上第一颗人造地球卫星发射成功,这是人类致力发展现代科学技术的结晶。它标志着空间科学技术的发展跨入了一个崭新的时代。

30多年来,人造地球卫星技术在军事、通信、导航、气象、资源勘察、遥感、大地测量、地球动力学以及天文学等众多科学领域得到了极其广泛的应用,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。1959年,美国海军武器实验室委托美国霍普金斯大学应用物理实验室研究海军卫星导航系统(Navy Navigation Satellite System—NNSS)。该系统卫星轨道均通过地球的极地上空,因而又称为子午仪(Transit)卫星导航系统。1964年1月,该系统研制成功,首先用于北极星核潜艇的导航和定位,并逐步用于各种军舰的导航和定位。1967年7月,经美国政府批准,对其广播星历表解密,交付民用,为船舶导航定位服务。因为该系统不受气象条件的影响,自动化程度高,且具有良好的定位精度,所以,其应用范围越来越广。海上石油勘探、钻井定位、海底电缆敷设、海洋调查与测绘以及大地测量等方面,均相继采用,成为全球导航和定位的一种新手段。

子午仪导航系统曾获得广泛应用,并显示出优越的性能。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1000 km),地面用户观测到卫星的时间间隔较长(平均约1.5 h),因而无法提供连续、实时的三维导航。此外,为获得一次导航解所需的时间较长,所以难以满足高动态目标(如高速船舶、飞机、导弹)导航定位的要求。

为了满足军事部门和民用部门对连续、实时三维导航的迫切需求,美国于60年代末着手研制新的卫星导航系统。海军提出了名为“Timation”的计划,拟采用12~18颗卫星组成全球定位网,卫星高度约1000 km,轨道呈圆形,运行周期为8 h,并于1967年5月31日和1969年9月30日发射了Timation-1和Timation-2两颗试验卫星。与此同时,空军提出了名为“621-B”的计划,拟用3~4个卫星群覆盖全球,每个星群由4~5颗卫星组成,中间一颗卫星采用同步定点轨道,其余几颗用倾斜24 h轨道。这两个计划的工作内容不同,各有优缺点。考虑到各方的特点及不堪负担两套系统的庞大开支,1973年,美国代理国防部长批准成立一个联合计划局(JPO),负责研究一种新的卫星导航系统,以适应绝大多数国防、民用导航和定位的需要。

在由10个单位组成的联合计划局(JPO)的领导下,由陆海空三军和国防测绘局的工程技术人员以及其他9个北约成员国派出的代表共同努力,制定了全球定位系统(GPS)方案。这

个方案吸收了 Timation 和 621-B 两个方案的优点。按最初设计,实用系统由 24 颗卫星组成卫星网。这些卫星分布在三个轨道平面上,轨道倾角为 63° ,每个轨道上设置 8 颗卫星。这样,对于地球上任何一点,能同时观测到 6~9 颗卫星,用户可从中选择 4 颗最佳卫星进行定位。预期粗测码定位精度为 100 m 左右,精测码定位精度为 10 m 左右。1978 年,由于压缩国防预算,减少了对 GPS 拨款,于是将实用系统的卫星数目由 24 颗减少到 18 颗(图 1.1),对卫星网的配置也作了相应的调整。18 颗卫星分布在相隔 60° 的 6 个轨道面上,轨道倾角为 55° 。每个轨道面上布设 3 颗卫星,彼此相隔 120° ,从一个轨道面的卫星到下一个轨道面的卫星间错动 40° 。这样的卫星配置基本上保证了地球上任何地点均能同时观测到 4 颗卫星。经过一段时间的实验后发现,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 0.996 9。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。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 26 560 km 提高到 26 609 km。这样,由每年调整一次卫星位置改为每 7 年调整一次。

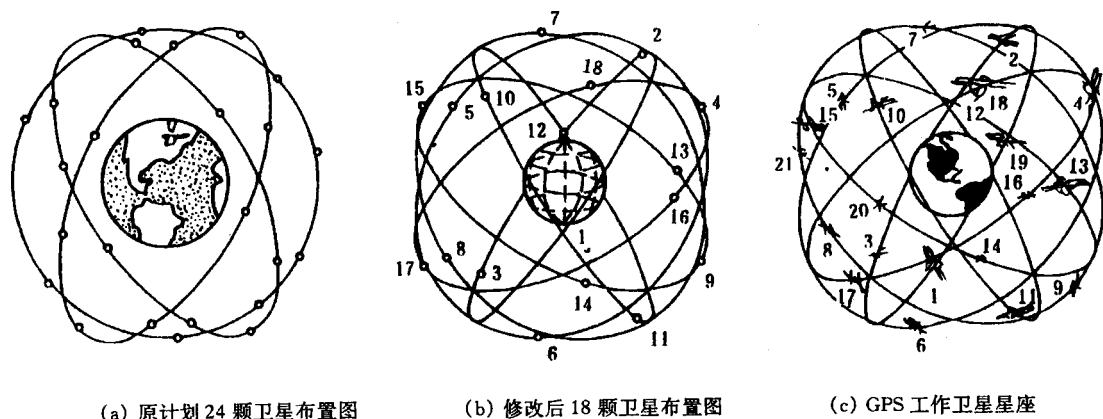


图 1.1 GPS 卫星配置图

GPS 实施计划分为三个阶段,第一阶段为方案论证和初步设计阶段,从 1973 年到 1979 年。在这一阶段中,共发射了 4 颗实验卫星,研制了地面接收设备和建立地面跟踪网,对硬件和软件进行了试验。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。在这一阶段,试验卫星增加到 6 颗,这种试验卫星称为 Block I 卫星,分布在三个轨道上。在此阶段还研制了各种用途的用户设备,主要是导航型接收机。与此同时,用于地学研究和精密测地的系统也相继研究成功,开创了 GPS 用于高精度定位服务的新领域。各种试验和应用都证实了 GPS 在导航和定位工作中的能力,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,达到了 14 m。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。这一阶段发射的工作卫星称为 Block II 和 Block IIA 卫星。这两组卫星的差别是 Block IIA 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 3 次);而 Block IIA 卫星能存储供 180 天用的导航电文,确保在特殊情况下可继续使用 GPS 卫星。1993 年美国国防部正式宣布 24 颗卫星布设完毕,GPS 具有初步运行能力(IOC),即(21+3)

GPS 星座已经建成,今后将根据计划更换失效的卫星。

从 GPS 方案提出到 1993 年建成,经历了 20 年。实践证明,GPS 对人类活动将产生巨大影响,有很高的应用价值,因而受到美国政府和三军的高度重视,被列为美国重点空间计划之一,成为继阿波罗登月计划、航天飞机计划之后的第三项空间计划。它可以从根本上解决人类在地球上的导航与定位问题,可以满足各种不同用户的需要。对船舶来讲,可以供海上导航定位、船舶交通管制、海洋测量、石油勘探、海洋捕捞、浮标布设、管道敷设、港口导航等方面广泛应用。对飞机而言,它可以在进场、着陆、航路导航、飞机会合和空中加油、武器投掷及空中交通管制等方面进行服务。在陆地上,它可以用于各种车辆、陆军部队、炮兵、空降兵和步兵的定位,还可用于大地测量、摄影测量、野外调查和勘探的定位,甚至还可深入到人们的生活中去。例如用于汽车、旅行、探险、狩猎等方面。在空间技术方面,可用于导弹的引航和定位、空间飞行器的导航和定位等。总之,GPS 的建立,使导航和定位技术发生了巨大的变化。

1.2 系统组成概况

GPS 包括三个组成部分(见图 1.2),即空间星座部分,地面监控部分和用户设备部分。

1.2.1 空间星座部分

1 GPS 卫星星座和现状 GPS 空间卫星星座由 24 颗卫星组成,其中包括了 3 颗备用卫星。工作卫星分布在 6 个轨道上,每个轨道上分布有 4 颗卫星。卫星轨道面相对于地球赤道面的倾角为 55° ,相邻轨道的升交点赤经相差 60° ,轨道平均高度为 20 200 km,卫星运行周期为 11 h 58 min。因此,同一用户上空每天出现的卫星分布图相同,只是每天提前约 4 min。每颗卫星每天约有 5 h 在地平线以上,同时位于地平线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。系统全部建成后,其工作卫星在空间的分布情况如图 1.3 所示。

GPS 卫星在空间的上述配置,保证了地球上任何地点、任何时刻至少可以同时观测到 4 颗卫星,此外,卫星信号的传播和接收不受天气影响,因此,GPS 是一种全球性、全天候、连续实时导航定位系统。但必须指出的是,GPS 卫星的上述布置,在地球上个别地区,仍可能在某一短时期内(如数分钟)只能观测到 4 颗几何分布图形较差的卫星,即出现所谓性能下降区,使定位精度无法达到必要的精度。空间部分的 3 颗备用卫星,将在必要时根据指令替代发生故障的卫星,这对于保障 GPS 空间部分正常而高效地运作是极为重要的。

2 卫星 实际上,GPS 卫星为无线电收 / 发信机、原子钟、计算机及系统工作的各种辅助设备提供了一个平台。24 颗卫星的电子设备支持用户测量到该卫星的伪距离,而每颗卫星播发的信号则可使用户测定该卫星于任何时刻在空间的位置,据此,用户便能确定他们在空间的位置。每颗卫星的辅助设备包括两块 7 m^2 太阳能电源帆板和用于轨道调整与稳定性控制的推进系统。

卫星识别可以用不同的标识方法,如发射序号,伪码编号 PRN,轨道位置号和国际命名等。为避免混乱,并保持与卫星导航电文中采用的名称相一致,主要使用伪码编号 PRN 这种识别形式。

GPS 卫星有 5 种类型,它们是:Block I、Block II、Block IIA、Block IIR 和 Block IIF 型。1978 年至 1985 年期间,由联合计划局发射了 11 颗 Block I 卫星。第一代卫星用于全球定位系

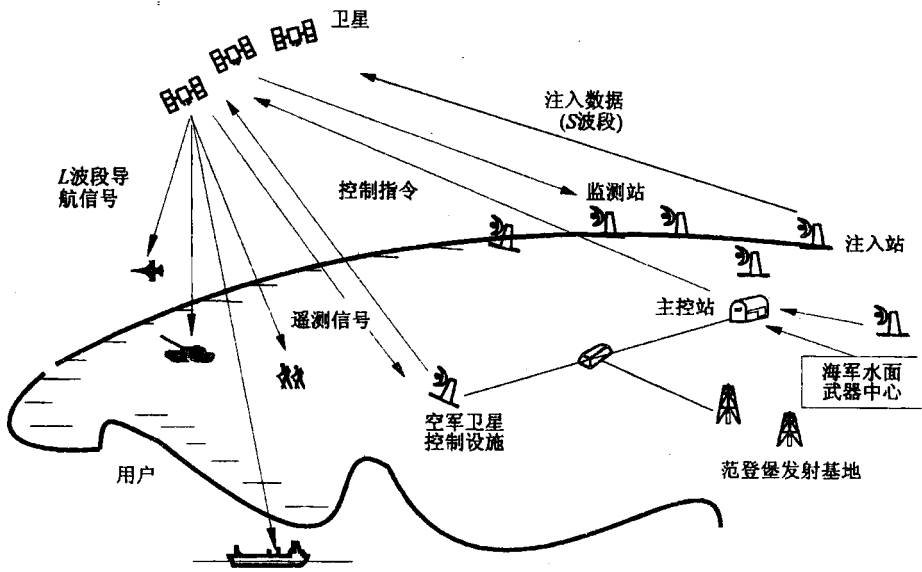


图 1.2 全球定位系统(GPS)组成示意图

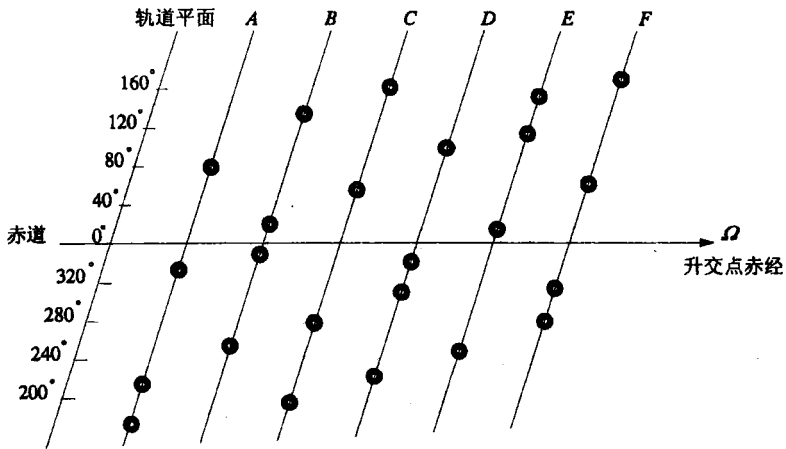


图 1.3 GPS 卫星星座及分布图

统的实验,通常称为 GPS 实验卫星,Block I 卫星的设计寿命只有 4.5 年,但其中 1984 年和 1985 年发射的两颗 Block I 卫星至 1994 年 4 月,仍在继续工作,分布在两个轨道面内,轨道倾角为 63° 。剩下的 Block I 卫星已全部被 1994 年 3 月发射的卫星所替代。

第二代卫星(Block II)用于组成如图 1.3 所示的 GPS 工作卫星星座,通常称为 GPS 工作卫星。第二代卫星共研制了 24 颗,包括 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星,卫星的设计寿命为 7.5 年。第三代卫星(Block IIA,“A”表示先进)具有卫星间通信能力,于 1990 年 11 月开始发射。现将截至 1994 年初的 GPS 卫星状况列于表 1.1,以供参考。

取代 Block II 卫星的将是第四代 Block IIR 卫星,“R”表示补充或取代。这一代卫星正在研制之中,设计寿命为 10 年,计划在 1996 年发射第一颗。卫星上将装备氢原子钟,频率精度

比 Block II 卫星上的铯钟高一个数量级。这些卫星将有更强的通信能力, 并因卫星间的跟踪能力而使在轨能力得以进一步改善。第五代 Block IIF 卫星计划于 2001 至 2010 年期间发射, “F”意为下一代, 这些卫星将具有更强的轨道保持能力。

表 1.1 具有初步运行能力 (IOC) 的 GPS 卫星发射运行概况

星座分组	卫星发射序号	PRN 号	发射日期	轨道平面位置	原子钟	投入运行日期	废止日期
Block I							
	01	04	78-02-22			78-03-29	85-07-17
	02	07	78-05-13			78-07-14	81-07-16
	03	06	78-10-06			78-11-13	92-05-18
	04	08	78-12-10			79-01-08	89-10-14
	05	05	80-02-09			80-02-27	83-11-28
	06	09	80-04-26			80-05-16	91-03-06
	07		81-12-28	发射失败			
	08	11	83-07-14			83-08-10	93-05-04
	09	13	84-06-13	C-1	Cs	84-07-19	
	10	12	84-09-08	A-1	Rb	84-10-03	
	11	03	85-10-09	C-4	Rb	85-10-30	
Block II							
II-1	14	14	89-02-14	E-1	Cs	89-04-15	
II-2	13	02	89-06-10	B-3	Cs	89-08-10	
II-3	16	16	89-08-18	E-3	Cs	89-10-14	
II-4	19	19	89-10-21	A-4	Cs	89-11-23	
II-5	17	17	89-12-21	D-3	Cs	90-01-06	
II-6	18	18	90-01-24	F-3	Cs	90-02-14	
II-7	20	20	90-03-26	B-2	Cs	90-04-18	
II-8	21	21	90-08-02	E-2	Cs	90-08-22	
II-9	15	15	90-10-01	D-2	Cs	90-10-15	
Block IIA							
II-10	23	23	90-11-26	E-4	Cs	90-12-10	
II-11	24	24	91-07-04	D-1	Cs	91-08-30	
II-12	25	25	92-02-23	A-2	Rb	92-03-24	
II-13	28	28	92-04-10	C-2	Cs	92-04-25	
II-14	26	26	92-07-07	F-2	Cs	92-07-23	
II-15	27	27	92-09-09	A-3	Cs	92-09-30	
II-16	32	01	92-11-22	F-1	Cs	92-12-11	
II-17	29	29	92-12-18	F-4	Cs	93-01-05	
II-18	22	22	93-02-03	B-1	Cs	93-04-04	
II-19	31	31	93-03-30	C-3	Cs	93-04-13	
II-20	37	07	93-05-13	C-4	Cs	93-06-12	
II-21	39	09	93-06-26	A-1	Cs	93-07-20	
II-22	33	05	93-08-30	B-4		93-09-28	
II-23	34	04	93-10-26	D-4		93-11-29	
II-24	35	06	94-03-03	C-1		94-03-28	

3 GPS 卫星及其功能 GPS 卫星的主体呈圆柱形, 直径为 1.5 m, 重约 1 500 kg, 两侧设有两块双叶对日定向太阳能电池帆板, 全长 5.33 m。图 1.4 是 GPS 工作卫星 (Block II) 的外形结构。卫星能源由太阳能电池提供, 太阳帆板总面积为 5 m²。初期功率为 580 W。另外,

卫星上还附有 15 Ah 的镉镍蓄电池。卫星上的对日定向控制系统能使帆板始终对向太阳,在星体底部装有多波束定向天线。这是一种由 12 个单元构成的成形波束螺旋天线阵,能发射 L_1 和 L_2 波段的信号,其波束宽度约 30° ,能覆盖半个地球,天线辐射圆极化电波。在星体两个端面上装有全向遥测遥控天线,用于与地面监控网通信。此外,卫星上还装有姿态控制系统和轨道控制系统。卫星的电子系统中包括导航电文存储器、高稳定度原子钟和 L 波段双频发射机等。早期的两颗试验卫星采用了约翰·霍普金斯大学应用物理实验室设计的石英晶体振荡器,其相对频率稳定度为 1×10^{-12} (平均时间为 10^4 s 量级) 或 $(1 \sim 3) \times 10^{-11}/d$ 。这种石英振荡器具有功耗低、重量轻和可靠性高的优点。1974 年 7 月 14 日发射的导航技术卫星-1,采用了铷钟,体积为 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$,重 1.3 kg,耗电 13 W,频率稳定度为 $5 \times 10^{-13}/d$ 。1977 年 6 月 23 日发射的导航技术卫星-2 采用了铯原子钟,其外形尺寸为 $12.8 \times 12.9 \times 38.1 \text{ cm}^3$,重 11.3 kg,频率稳定度达到 $(1 \sim 2) \times 10^{-13}/d$ 。在此基础上,研制了新一代抗辐射频标铯钟,成为后来导航技术卫星的频标。为保证定位精度,铯钟的长期稳定度是不够的,必须不断地定期校正。为减小卫星频标对地面监控站的依赖性,使在一段时间内,即使在没有地面支持的情况下,仍然能获得足够的定位精度,1981 年 10 月发射的导航技术卫星-3 上装了氢原子钟,其频率稳定度达到了 $1 \times 10^{-14}/d$ 。由改进的铯钟和氢钟作为 GPS 卫星的频标,能使所有卫星在一个月或更长的时间内,完全独立工作,即不需要地面监控网修正,也不会明显地降低定位精度。GPS 工作卫星只需启用一台原子钟,其余作为备用。

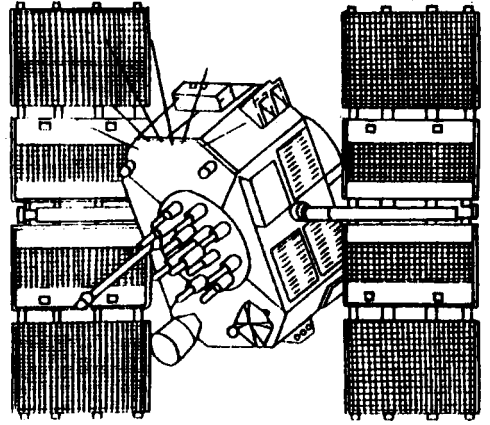


图 1.4 GPS 卫星结构示意图

卫星上工作频率为 2 200~2 300 MHz 的遥测发射机,将卫星的各种遥测数据发送至地面监控网,卫星上的监控接收机接收地面注入站向卫星发送的频率为 1 750~1 850 MHz 的导航信息,它包括时钟、大气校正参量,卫星星历及全部 24 颗卫星的历书等。卫星上的存储器贮存这些信息,存储器可贮存长达 26 h 的信息。卫星接收机也接收来自地面监控网的控制指令。卫星上装设高稳定度的精密原子钟,各卫星的原子钟相互同步,并与地面站原子钟同步,建立起 GPS 精密时间系统,称为 GPS 时。向地面发送的星历就是以 GPS 时为基准而顺序发送的。精密时间系统也是精密测距的基础,卫星导航发射机以 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz 两种频率发射导航信号。发射双频是为了校正电离层产生的附加延时。

4 卫星信号 GPS 卫星播发的信号是扩频信号。因此,具有强大的抗人为干扰能力。GPS 的精度主要受控于原子钟。Block II 卫星装备有 4 个星上原子钟,两个铷钟和两个铯钟。这些钟的日稳定度可达 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级。而 Block IIR 上携带的氢钟,其稳定度可以达到 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 量级。这些高精度的频标是 GPS 产生 L 波段基频 10.23 MHz 的心脏,并由它分别作 154 和 120 次倍频,导出卫星发射的两个信号载频 L_1 和 L_2 ,

$$L_1 = 10.23 \text{ MHz} \times 154 = 1 575.42 \text{ MHz}$$

$$L_2 = 10.23 \text{ MHz} \times 120 = 1 227.60 \text{ MHz}$$

这种双频信号用来消除主要误差源,即电离层折射误差。使用调制在两个载波频率上的两种伪码来测量卫星信号到达接收机的传播时间,进而导出伪距。

第一种伪码是 C/A 码 (Coarse / Acquisition — 粗测 / 捕获码), 供给民用。C/A 码的波长为 300 m, 仅调制在 L_1 载频上, 目的是省出 L_2 频率, 使 JPO 能够控制卫星广播信息, 以限制非军用用户的系统精度, 这种业务也称做标准定位服务 (Standard Positioning Service — SPS)。第二种伪码是 P 码 (Precision — 精密码), 专用于美国军方和特许用户, P 码的波长为 30 m, 调制在 L_1 和 L_2 载频上。这种业务也称做精密定位服务 (Precision Positioning Service — PPS)。载波上除了调制有上述两种伪码之外, 还调制有数据电文, 包括卫星星历、电离层模型参数、状态信息、系统时间和卫星钟偏移校正系数等。

5 运行能力 GPS 有两种运行能力: 初始运行能力 (Initial Operation Capability — IOC) 和完全运行能力 (Full Operation Capability — FOC)。GPS 在 1993 年 7 月达到初始运行能力, 星座中已布满 24 颗 GPS 卫星 (Block II / IIA) 供导航使用。美国国防部于 1993 年 12 月正式宣布 GPS 具有 IOC 能力。当 24 颗工作卫星在指定轨道正常运行而且对实用的军事性能经过证实后, 于 1995 年又宣布系统具有 FOC 能力。

在完成了 1994 年 3 月的发射以后, 所有后续发射都将是故障卫星的替补发射。这一事实表明, 未来的发射计划将根据实际需要进行。

6 精度限制 限制民用用户获取 GPS 全精度的方法目前有两种。第一种称做选择可用性 (Selective Availability — SA); 第二种称为反电子欺骗 (Anti — Spoofing — A — S)。

● 选择可用性 (SA) 最初预计的 C/A 码定位精度为 400 m, 然而外场测试表明, 导航定位精度可达到 15~40 m, 测速精度可以达到零点几米每秒的惊人的结果。SA 就是适应军方要求降低导航精度而提出来的一项措施。它是通过抖动星钟 (δ - 过程) 和扰动星历表数据 (ϵ - 过程) 来达到这个目的。只有 Block II 卫星具有 SA 能力, 并于 1990 年 3 月进行了实施 SA 的试验。实测表明, SA 能在各种不同的水平上降低系统的 SPS 精度。

美国国防部规定民用精度可以达到 100 m (2 drms, 水平位置) 和 156 m (高度), 同时规定测速精度为 0.3 m / s, 定时精度为 340 ns, 这些精度数据都是对 95% 的概率水平而言的, 对于 99.99% 的概率水平来说, 预计的精度将降低到 300 m (水平位置) 和 500 m (高度)。

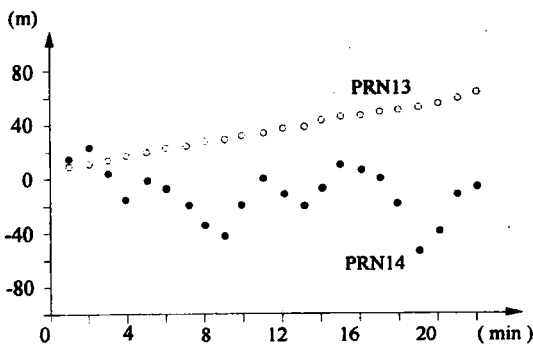


图 1.5 卫星 PRN13(无 SA)和 PRN14(有 SA) 在 1992 年第 177 天的星钟性能

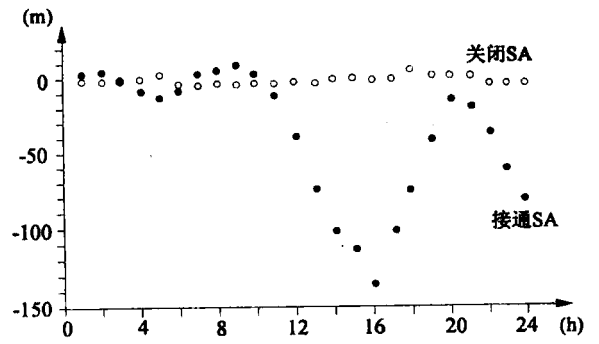


图 1.6 卫星 PRN21 在 1992 年第 177 天中接通 SA 和 在第 184 天关闭 SA 时的径向轨道误差

δ -过程是人为地在星钟基频上引入一个变化的偏差,而卫星钟的偏差对伪距测量有直接的影响。由于基频的抖动,使得采用码相位和载波相位进行的伪距测量同样受到影响。图 1.5 给出有 SA 和没有 SA 两种情况下星钟的性能。有 SA 时引起的伪距偏差幅度约为 50 m,周期为几分钟。当两部接收机导出的伪距相减(差分)时,这种抖动的影响在很大程度上可以消除。

ϵ -过程是对发射的导航电文中的星历数据进行扰动,导致卫星位置坐标计算产生误差。这种卫星位置误差会直接传递而影响用户接收机的位置误差。图 1.6 给出有 SA 和无 SA 的径向轨道误差。在有 SA 时,轨道径向偏差幅度在 50 m 和 100 m 之间。

● 反电子欺骗(A-S) GPS 的设计包括从根本“切断”P 码的能力或采用保密码(Y 码),以便使一般民用用户无法取得 P 码精度,但获准的民用用户除外。这样做是对抗敌方的干扰,敌方有时会发射一个虚假的 P 码信号,进行电子欺骗,使一方用户产生错误的定位。

A-S 是通过将 P 码和一个密码 W 进行模 2 和来实现的。并将其结果记作 Y 码。这样,当启动 A-S 时,载波 L_1 和 L_2 上的 P 码便被未知的 Y 码替代。需要注意的是,A-S 可以接通也可以关闭。为了测试目的,曾在 1992 年 8 月首次接通了 A-S,后于 1994 年 1 月,将 A-S 永久接通,这将对高精度测量应用产生影响。

1.2.2 地面监控部分

地面监控部分负责监控全球定位系统的工作,包括 1 个主控站,5 个监测站和 3 个注入站(参见图 1.7 和 1.8),它们的作用分述如下:

1 主控站 主控站早先设在加利福尼亚的范登堡空军基地,后移至科罗拉多州斯普林斯的发尔康空军基地。主控站除协调和管理所有地面监控系统的工作外,其主要任务是:根据本站和其他监测站的所有观测资料推算编制各颗卫星的星历、卫星钟差和大气层的校正参数,并把这些数据传送到注入站;提供 GPS 的时间基准。各监测站和 GPS 卫星的原子钟均应与主控站的原子钟同步或测出其间的钟差,并将这些钟差信息编入导航电文送到注入站;调整偏离轨道的卫星,使其沿预定轨道运行;启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

2 监测站 有五个监测站,分别设在太平洋的夏威夷,科罗拉多的斯普林斯,南大西洋的阿松森岛,印度洋的迭戈加西亚岛和马绍尔群岛的夸贾林岛。监测站是在主控站直接控制下的数据自动采集中心。站内设有双频接收机、高精度原子钟和计算机各一台以及若干台环境数据传感器。接收机对 GPS 卫星进行连续的 P 码伪距观测,并将每隔 1.5 s 的观测结果,利用电离层和气象观测数据,采用平滑方法,获得每 15 min 的结果数据,传送到主控站。

上述跟踪网的主要任务确定广播星历和星钟校正模型,由政府管理。对精密星历,要用另 5 个地点的数据。另外有民间监测网,这类网只用来确定卫星星历而不参与管理系统。

3 注入站 注入站现有 3 个,分别与阿松森岛、迭戈加西亚岛和夸贾林岛的监测站设在一起。注入站的主要设备包括一台直径为 3.6 m 的天线,一台 S 波段发射机和一台计算机。其主要任务是在主控站的控制下,当卫星通过其视界时,以 S 波段载频将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文和其他指令等注入到相应的卫星的存储系统,并监测注入信息的正确性。原先,每颗卫星的导航数据,每隔 8 h 被注入一次,现在已改为每天注入一次或两次。即使注入站因故障无法注入新的数据,存储器具有长达 14 d 的预报能力,此时,定位精度将从 10 m 逐渐下降至 200 m。