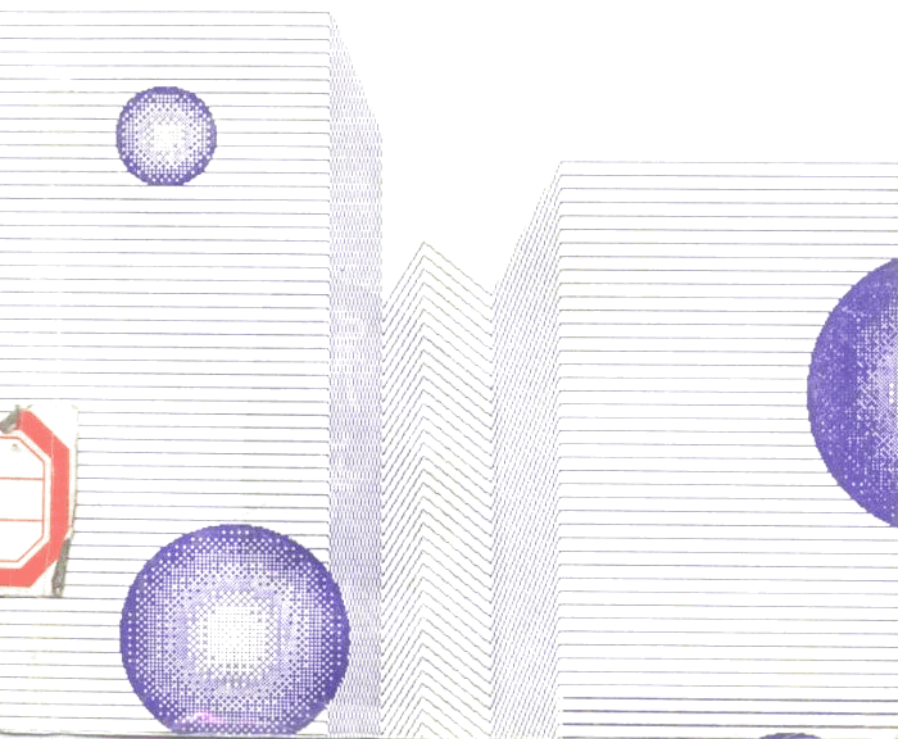


高技术系列教材

GPS 卫星测量定位 理论与应用

张守信 编著



内 容 简 介

GPS(Global Positioning System)是美国国防部研制的全球、全天候、连续的实时导航定位系统。该系统于1993年正式建成,投入使用。GPS系统具有广泛的应用价值和发展潜力,引起各国军事部门和民用部门的广泛关注。

本书是根据GPS应用的实际需要,特别是军事应用的需要而编写的,较系统、全面地介绍了GPS定位理论、方法和应用技术。全书共分八章,主要内容包括:GPS的组成,信号的结构和伪随机码测距原理;伪距测量定位和载波相位测量定位的模型、方法和技术,GPS动态定位方法,GPS测定工作和数据处理;坐标系统、时间系统和各坐标系间的转换,卫星的运动和轨道确定的基本知识。

本书可供航天测控、导弹(火箭)飞行试验、导航、测绘和卫星应用等专业技术人员及相应的高等院校师生参考。

前 言

航天技术是 20 世纪人类认识和改造自然进程中最活跃、最有影响的科学技术领域,它对人类社会的进步和现代科学技术的发展,有着重要的促进作用。

全球定位系统(Global Positioning System—GPS)是美国国防部为陆、海、空三军研制的卫星导航定位系统,是美国继阿波罗登月和航天飞机之后的第三大空间工程。系统于 1993 年正式建成,投入运转。

GPS 具有全球、全天候、连续实时的精密三维导航与定位能力,有着广泛的应用价值和发展潜力。特别是近十年来,GPS 定位技术得到迅速发展,应用领域日益广泛。GPS 不仅可用于导航定位,而且可以应用于高精度定位,高精度时间传递,外弹道与卫星轨道测量,武器的制导等方面。在海湾战争中,GPS 发挥了至关重要的作用,因而引起各国军事部门和民用部门的广泛关注。

编写本书的目的,是为满足 GPS 应用的需要,特别是军事应用的需用,向我国国防科技战线和有关部门的 GPS 用户,较全面、系统地介绍 GPS 测量定位的理论、方法和应用技术,以期推广这一新技术。

全书共分八章。第一章简要地介绍了卫星导航定位技术的发展和 GPS 的构成和特点,重点介绍了美国的 GPS 政策及其限制性措施,目前克服美国限制性措施的主要技术,以使读者对 GPS 有一个全面性的了解。第二章论述了 GPS 卫星信号的基本结构,伪随机码的构成、特性和测距原理,GPS 卫星的星历计算。第三章和第四章详细地讨论了伪距测量定位和载波相位测量定位的原

理,绝对定位和相对定位的观测方程及其线性化形式,分析了测量的主要误差及其改正数的计算,载波相位测量精密相对定位中整周模糊度的确定方法,最后介绍了四种主要类型的 GPS 接收机。该两章是本书的重点。第五章是 GPS 动态测量定位,主要论述了动态定位的特点和方法,GPS 测定速度和时间,GPS 外弹道测量系统的构成和功能,GPS 组合导航定位系统。该章重点强高了载波相位测量用于精密动态定位的方法和技术。这是当前 GPS 应用的一个重点和发展。第六章简要地介绍了 GPS 定位的技术设计和测量工作,GPS 观测数据的处理和精度评定。这对 GPS 的实际应用来说是重要的。第七章介绍了 GPS 测量常用的坐标系统和时间系统及不同系统间的转换。这对掌握 GPS 测量理论和实际应用都是必要的。第八章简要地介绍了卫星运动的基本理论,讲述了卫星受摄运动方程的基本解法。这对深入开发应用 GPS 是有用的。

本书力求做到理论与实践相结合,反映当前新技术。然而,GPS 卫星测量是一门新兴的学科,发展迅速;也由于作用水平和实践经验有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书是在国防科工委训练部的热情关怀和支持下出版的。在撰写过程中,得到国防科工委苏惠琴同志、指挥技术学院朱风丽同志和三系、无线电测量教研室领导、同志们的大力支持和帮助;总参测绘研究所李军、段五杏、魏自清同志提供了宝贵的参考资料;安贵莲和徐冬梅同志在资料的收集、整理方面也做了很多工作;在此,一并表示衷心感谢。

目 录

第一章 卫星导航定位系统与 GPS

1.1 卫星导航定位系统概述	(1)
1.2 GPS 的组成	(5)
1.3 GPS 的特点与用途	(14)
1.4 美国的 GPS 政策和控制措施	(17)
1.5 其它卫星导航定位系统	(20)

第二章 GPS 信号与伪随机码测距原理

2.1 GPS 信号的基本结构	(26)
2.2 伪随机噪声码及其主要特性	(29)
2.3 GPS 的伪随机码及其特性	(39)
2.4 GPS 卫星的导航电文	(46)
2.5 GPS 卫星位置和速度的计算	(55)
2.6 伪随机码测距原理	(62)
2.7 GPS 导航接收机工作原理	(67)

第三章 GPS 伪距测量定位与精度

3.1 GPS 定位的基本概念	(76)
3.2 伪距测量绝对定位	(79)
3.3 观测卫星的几何精度衰减因子	(88)
3.4 GPS 定位的主要误差	(92)
3.5 伪距测量相对定位	(104)

第四章 GPS 载波相位测量定位

4.1 载波相位测量原理	(116)
--------------------	-------

4.2	载波相位测量定位原理	(120)
4.3	载波相位测量相对定位	(131)
4.4	载波相位测量的误差改正数计算	(139)
4.5	整周跳变的探测与修复	(146)
4.6	整周模糊度的确定	(152)
4.7	两个载波观测值的线性组合与应用	(161)
4.8	GPS 相位测量接收机	(168)

第五章 GPS 动态测量定位

5.1	概述	(181)
5.2	伪距测量动态定位	(186)
5.3	载波相位测量动态定位	(191)
5.4	GPS 测定速度	(194)
5.5	GPS 测定时间	(200)
5.6	GPS 外弹道测量系统	(203)
5.7	卡尔曼滤波与平滑	(214)
5.8	GPS 组合导航定位系统	(219)

第六章 GPS 测量工作与数据处理

6.1	概述	(224)
6.2	GPS 卫星定位网的技术设计	(225)
6.3	GPS 网的测量工作	(233)
6.4	GPS 工程测量	(243)
6.5	GPS 精密动态测量	(247)
6.6	GPS 测后数据处理	(250)

第七章 坐标系统与时间系统

7.1	天文坐标与高程系统	(256)
7.2	地球椭球与地球坐标系	(260)
7.3	我国当前采用的主要坐标系	(273)

7.4	不同大地坐标系间的坐标转换	(278)
7.5	天球坐标系及其转换	(284)
7.6	站心坐标系及其转换	(295)
7.7	高斯-克吕格投影平面直角坐标系	(300)
7.8	时间系统	(305)

第八章 卫星的运动与轨道

8.1	卫星的无摄运动及其解	(312)
8.2	二体问题的卫星星历计算	(323)
8.3	二体问题的轨道计算	(327)
8.4	卫星的受摄运动方程	(331)
8.5	地球非球形摄动的分析解	(336)
8.6	卫星受摄运动方程的数值解法	(348)
8.7	卫星所受作用力的计算	(353)
8.8	轨道改进的原理	(359)

参考文献	(366)
------------	-------

第一章 卫星导航定位系统与 GPS

1.1 卫星导航定位系统概述

自 1957 年 10 月第一颗人造地球卫星(以下简称卫星)发射成功,40 年来,航天技术在通信、资源勘察、气象、导航、遥感、测绘、地球动力、天文和生物等各个学科领域得到极其广泛地应用,对政治、经济、军事以至人类社会生活都产生了广泛而深远的影响,促进了现代科学技术的进步。

航天技术特别引起各国军事部门的高度重视和应用,已成为现代高技术战争的重要手段,对战争的胜负,乃至进程,起着重要的作用。在 1991 年的海湾战争中,美国在海湾地区上空部署了十几颗卫星,构成一个不同高度的卫星群,用于侦察、通信、指挥和气象观测;“亚特兰蒂斯”号航天飞机三次机动飞临海湾上空摄影,为作战指挥提供及时、准确的情报资料。同时,还紧急发射了三颗全球定位系统(GPS)卫星,与原有 GPS 卫星,构成了 16 颗 GPS 导航星座,使海湾地区基本实现全天 24 小时覆盖。GPS 实时、准确地为地面、空中和海上部队,为导弹发射、制导,提供导航定位数据,在战争中发挥了重要作用。美国前国防部长迪克·切尼在海湾战争后递交国会的报告中,高度评价了 GPS 的作用,“对所有的作战的胜利,GPS 发挥了至关重要的作用”。

卫星导航定位系统是在已知卫星在每一时刻的位置和速度的基础上,以卫星为空间基准点,通过测站接收设备,测定至卫星的距离或多普勒频移等观测量来确定测站的位置、速度。卫星导航定位系统主要由三大部分组成:空间卫星、地面监测网和用户设备。空间由若干个卫星组成导航星座。卫星沿一定的轨道运行,星上除电源、天线外,还有专用导航系统,其中包括导航电文存储器、高稳定频标、双频发射机等。地面监测网连续跟踪观测卫星,计算编制卫星星历和卫星钟钟差等参数,并将其注入到卫星的存储器中。卫星连续发射双频无线电信号和导航电文(包括卫星星历等参数)。用户设备接收卫星信号和电文,由无线电信号测定用户至卫星的距离,或多普勒频移等观测量;根据导航电文,计算所观测时刻的卫星的位置和速度。根据观测量和卫星位置、速度,解算出用户的位置和速度。例如,在观测时刻 t ,测定用户至三颗卫星 $S_j(j=1, 2, 3)$ 的距离。则可根据三颗卫星的位置 $(X_{j,j}, Y_{j,j}, Z_{j,j})$,解算出用户的位置 (X, Y, Z) 。

1.1.1 海军导航卫星系统 NNSS

在1958年底,美国海军武器实验室就开始实施建立为美国军用舰艇导航服务的卫星导航系统,即“海军导航卫星系统”(Navy Navigation Satellite System——NNSS)。该系统的卫星轨道通过地极,故又称为“子午(Transit)卫星系统”。1964年NNSS建成,美国军方启用,1967年美国批准该系统解密,提供民用。由于该系统具有全天候、自动定位,全球覆盖性、定位精度较高、定位速度快和经济效益好等一系列优点,因此,迅速被世界各国所采用。卫星导航定位技术迅速兴起,它不仅用于导航,还广泛用于石油、地质勘探和测绘等部门。我国于70年代中期,开始引进NNSS定位技术,用于舰、船导航,进行了西沙群岛的大地测量基准联测,布测了全国卫星多普勒大地网和西北地区石油地球物理勘探的卫星多普勒定位网。南极乔治岛上我国长城站的地理位置,也是用NNSS定位技术测定的。

NNSS 系统是 6 颗卫星组成。卫星轨道接近圆形,轨道倾角为 90° 左右,轨道高度为 1100km,周期约为 107min,每天卫星运行 13~15 周。在每一个运行周期内,地球相对卫星约转 27° 。每颗卫星覆盖半径约为 3000~3500km。对一个测站来说,一颗卫星每次通过其上空时,仅有 18min

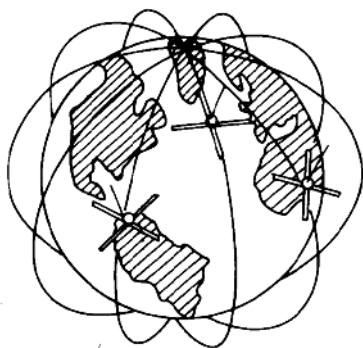


图 1.1 NNSS 导航卫星示意图

的跟踪观测弧段。卫星连续发播 400MHz 和 150MHz 两种载波信号,供用户对卫星进行观测。在 400MHz 的载波上调制有导航电文,它向用户提供卫星位置和时间信息,用于用户的位置解算。图 1.1 给出 NNSS 卫星轨道示意图。

NNSS 系统导航定位的原理是:用户接收机接收卫星发播的信号,并根据多普勒(Doppler)效应原理,测定因卫星相对用户接收机不断运动而产生的多普勒频移。由于多普勒频移反映了卫星与接收机相对运动速度,包含了卫星与接收机相对位置的信息,故根据已知的卫星位置,就可以解算出用户接收机的位置。故该定位系统又称为卫星多普勒定位。

海军卫星导航系统开创了卫星导航的新时代,在导航技术发展具有重要的意义。它实现了全球、全天候导航,显示了卫星导航技术的优越性。但是,由于该系统的“单星、低轨、低频测速”体制的限制,不能满足高动态用户实时导航定位的要求,也不能满足现代军事和民用部门的高精度要求。具体存在以下两个问题。

1)单星观测,不能实时定位和连续导航定位。用户每次定位观测只能跟踪观测一颗卫星,需观测 8~10min 才能进行一次定位。而观测一颗卫星后,要等 0.8~1.5h,才能观测另一颗卫星,因此,不能连续导航定位,只能对惯性导航和其他无线电导航系统进行断续的较精确的校正。

2)低轨、低频定位精度低。由于卫星轨道高度只有 1000km,因此受地球引力场模型和大气阻力模型误差的影响大,定轨精度低,即卫星星历误差大。卫星轨道低造成星历误差,对于相对定位的影响大。又因其载波频率为 150MHz 和 400MHz,频率较低,电离层延迟误差大,从而多普勒定位精度较低。即使连续观测 2 天,其定位精度也只能达到 $\pm 10\text{m}$ 左右。

目前,NNSS 系统还在工作,美国军方决定该系统工作至 1996 年 12 月。

在美国子午卫星系统的诱迫下,前苏联海军于 1965 年开始也建立一个卫星导航系统,称之为 CICADA。它与 NNSS 系统相似,由 12 颗宇宙卫星组成卫星星座,轨道高度为 1000km,运行周期为 105min。每颗卫星也发送 150MHz 和 400MHz 载波信号,导航电文是调制在 150MHz 的载波上。

1.1.2 全球定位系统 GPS

鉴于 NNSS 系统的局限性,为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航定位,满足军事部门和民用部门对连续实时、高动态、高精度导航定位的迫切要求,早在第一代卫星导航系统 NNSS 投入使用不久,美国于 1967 年就着手研制新一代卫星导航系统。经过试验研究,于 1973 年 12 月,美国国防部正式批准陆海空三军共同研制导航星全球定位系统。全称为“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),简称为“全球定位系统(GPS)”。

1.2 GPS 的组成

自 1973 年以来,经过三个研制阶段,耗时 20 年,投资 300 亿美元,于 1993 年 6 月基本建成。这是继阿波罗登月、航天飞机之后的第三大空间工程。第一阶段(1973~1978 年):进行方案论证,进行理论研究和总体设计。第二阶段(1978~1988 年):进行工程研制。主要是发射 GPS 试验性卫星,检验 GPS 系统的基本性能。1978 年 2 月 22 日,第一颗 GPS 试验卫星发射成功。在此阶段共发射了 11 颗试验卫星,称为 BLOCK I。第三阶段(1989~1993 年):进行实用组网。发射第二代 GPS 工作卫星,称为 BLOCK II 和 BLOCK II A,构成 24 颗 GPS 卫星星座。预计在 90 年代末,还要发射 GPS 第三代工作卫星 BLOCK II R,表(1.1)给出了这三代 GPS 卫星发射时间和性能。

表 1.1 GPS 卫星及性能

项 目	第一代	第二代		第三代
	BLOCK I	BLOCK II	BLOCK II A	BLOCK II R
序 号	1~11	12~21	22~40	41~66
卫星数	11	10	18	26
发射时间	1978~1985	1989~1990	1990~1994	90 年代末
用 途	试验性	正式工作	正式工作	改进 GPS 系统
性能				
寿命(年)	5	7.5	7.5	10
重量(kg)	774	845	845	1075
时 标	各不相同	二台铯钟	二台铷钟	
SA 能力	无	有	有	有
AS 能力	无	有	有	有
独立操作(天)	14	45	180	180
卫星通讯能力	无	无	有	有
卫卫通讯能力	无	无	无	有
每天注入次数	3	1	<1	<1

GPS是在NNSS的基础上发展起来的。它采纳了NNSS成功的经验,克服了NNSS的缺点,采用“多星、高轨、高频、测时—测距”体制,实现了全球覆盖、全天候、高精度、实时导航定位。GPS主要由三大部分组成:空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。

1.2.1 空间卫星星座

1. GPS卫星星座的构成与轨道 GPS卫星星座由24颗卫星组成,其中包括3颗备用卫星。工作卫星分布在6个等间隔的轨道面内,每个轨道面分布4颗卫星。卫星轨道倾角为 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° 。轨道为近圆形,最大偏心率是0.01,半长轴为26560km,轨道平均高度为20200km,卫星运行周期为11h58min(12恒星时)。这样的布局,同一观测站上每天出现的卫星分布图相同,只是每天提前约4min;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最少为4颗,最多可达11颗,这随地点和时间而异。因此,保障了在地球上和近地空间任一点、任何时刻均可至少同时观测4颗GPS卫星,便于进行实时定位。但应指出,在个别地区可能有某一短时间内,所观测到的4颗卫星几何图形结构较差,不能达到定位精度要求。这段时间称做“间隙段”。

图1.2为GPS卫星星座工作星座图。其中有

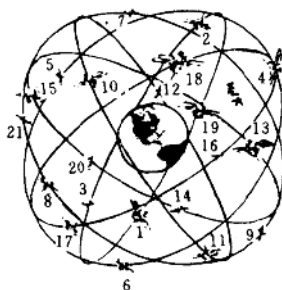


图 1.2 GPS 卫星星座

3 颗备用卫星,在必要时,根据指令代替发生故障的卫星。这对保障 GPS 卫星星座正常而有效地工作是很重要的。

表 1.2 给出截止 1995 年 3 月 GPS 卫星的组成情况。由表可看出:现在空间有 25 颗 GPS 卫星,其中有一颗 BLOCK I (PRN12)尚在工作,其余均为 BLOCK II 和 BLOCK II A 工作卫星。

表 1.2 GPS 卫星一览表

类 型	序号	编号(PRN)	发射时间	类 型	序号	编号(PRN)	发射时间
BLOCK I	1	12	1984	BLOCK II A	14	28	1992
BLOCK II	2	14	1989	BLOCK II A	15	26	1992
	3	2	1989		16	27	1992
	4	16	1989		17	29	1993
	5	19	1989		18	31	1993
	6	17	1990		19	22	1993
	7	18	1990		20	01	1993
	8	20	1990		21	07	1993
	9	21	1990		22	9	1993
	10	15	1990		23	5	1993
	11	23	1990		24	4	1994
BLOCK II A	12	24	1991		25	6	1994
	13	25	1992				

PRN 编号:是根据 GPS 卫星所采用的伪随机噪声码(PRN 码)之不同而编号。

2. GPS 卫星及其功能

GPS 卫星的主体呈圆柱形,直径约为 1.5m。图 1.3 是 GPS 工作卫星(BLOCK II)的外形结构。当卫星入轨后,星体两侧各伸出一块由 4 叶拼成的太阳能电池翼板,其面积为 7.2m²;对日定向系统,控制两块翼板旋转,使翼板始终对准太阳,为卫星不断提供电源,并给三组 15A 的镉镍蓄电池充电,以保证卫

星在地影区内能正常工作。
卫星在轨重量为 843.68kg。
GPS 卫星的设计寿命为七年半。

卫星设有导航分系统,包括导航电文存储器、高稳定度的原子频标、伪噪声码发生器和 S 波段接收机、L 波段双频发射机。由前述可知,GPS 定位是“测时—测距”体制,因此,GPS 卫星必

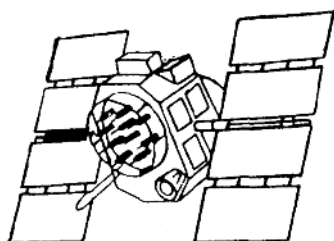


图 1.3 GPS 工作卫星的外形结构

须具有高度精确的时钟(频标)。GPS 工作卫星一般安装两台铷原子钟和两台铯原子钟,其稳定度为 10^{-12} 和 10^{-13} ,如表 1.3 所示。计划在未来采用更稳定的氢原子钟。它产生一个标准频率(10.23MHz)作为基准信号,其它信号均由此产生。GPS 工作卫星只需启用一台原子钟,其余作为备用。

表 1.3 卫星时钟的稳定性

钟 型	时钟频率(Hz)	每日稳定度($\Delta f/f$)	钟差 1s 所需时间
石英钟	5000000	10^{-3}	30 年
铷 钟	6834682613	10^{-12}	30000 年
铯 钟	9192631770	10^{-13}	300000 年
氢 钟	1420405751	10^{-15}	30000000 年

GPS 卫星的主要功能为:

- 1)接收和储存由地面监控站发来的导航信息;接收并执行监控站的控制指令。
- 2)卫星上设有微处理机,进行必要的数据处理。
- 3)通过星载高精度原子钟产生基准信号和提供精确的时间标准。

4)向用户连续不断地发送导航定位信号。其中包括:两种载波信号 L_1 和 L_2 , L_1 频率为 1575.42MHz、 L_2 频率为 1227.60MHz;调制在载波 L_1 上的伪噪声码 C/A 码(Coarse Acquisition Code 粗捕获码),频率为 1.023MHz;调制在 L_1 和 L_2 上的伪噪声码 P 码(Precise Code 精码),频率为 10.23MHz;调制在 L_1 和 L_2 上的导航电文,称为 D 码。

5)接收地面主控站通过注入站发送给卫星的调度命令。如调整卫星的姿态、启用备用时钟或启用备用卫星等。

BLOCK I 和 BLOCK I A 都是第二代 GPS 卫星,但 BLOCK I A 的功能大大增强。它不仅增强了军事功能,而且大大扩展了数据存储容量。BLOCK I 只能存储供 45 天用的导航电文,而 BLOCK I A 型能够存储供 180 天用的导航电文,以确保在特殊情况下使用 GPS 卫星。

为确保 GPS 在全球范围内连续可用,美国又研制了第三代 GPS 卫星 BLOCK I R。该星能对自己进行自主导航,并能产生 50Hz 导航数据。BLOCK I R 具有卫星交联测距和在轨导航数据处理能力。每颗卫星将定期测量到其它卫星的距离,然后将测量修正值通过交联通信系统传送到其它卫星。而且,每颗卫星将使用星载处理器,计算导航参数的修正值,从而改善导航精度,增强自主能力和生存能力。据报道,该卫星在没有与地面联系的情况下可以工作 6 个月,而其精度可与有地面控制时的精度相当。

1.2.2 地面监控系统

地面监控系统的主要作用是:跟踪观测 GPS 卫星,计算编制卫星星历;监测和控制卫星的“健康”状况;保持精确的 GPS 时间系统;向卫星注入导航电文和控制指令。

1. 系统的组成

地面监控系统由一个主控站、三个注入站和五个监测站组成。主控站位于美国科罗拉多·斯平士(Colorado Spings)的联合空间

执行中心 CSCO (Consolidated Space Operation Center); 3 个注入站分别设在大西洋、印度洋和太平洋的 3 个美军基地上, 即大西洋的阿森松 (Ascension) 岛、印度洋的狄哥·伽西亚 (Diego Garcia) 和太平洋的卡瓦加兰 (Kwajalein); 5 个监测站, 除了位于主控站和 3 个注入站之处的四个站外, 还在夏威夷设立一个监测站。地面监控系统的主控站拥有以大型电子计算机为主体的数据收集、计算、传输、诊断等设备。监测站配有 GPS 接收机、环境数据测量仪、原子频标和处理机等。图 1.4 为地面监控系统各站的分布图。五个监测站均为无人值守的数据采集中心。



图 1.4 GPS 卫星的地面监控站分布

2. 系统的主要功能

(1) 跟踪观测 GPS 卫星。各监测站 GPS 接收机对 GPS 卫星进行连续观测, 同时收集当地的气象数据。

(2) 收集数据。主控站收集各监测站所测得的伪距和积分多普勒等观测值, 气象要素, 卫星时钟和工作状态的数据, 监测站自身的状态数据, 以及海军水面兵器中心发来的参考星历。

(3) 编算导航电文。根据所收集的数据, 计算每颗 GPS 卫星的