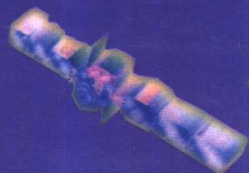


GPS

测量

● 高成发 编著

● 黄鹤年 主审



人民交通出版社

GPS 测 量

高成发 编著

黄鹤年 主审

人民交通出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

GPS 测量/高成发编著. —北京: 人民交通出版社, 1999. 9

ISBN 7-114-03413-X

I. G… II. 高… III. 全球定位系统 (GPS) IV. P228
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 31743 号

GPS 测 量

GPS celiang

高成发 编著

黄鹤年 主审

版式设计: 周 圆 责任校对: 杨 杰 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.5 字数: 168 千

1999 年 10 月 第 1 版

2000 年 3 月 第 1 版 第 2 次印刷

印数: 3101 — 6100 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-114-03413-X

U · 02450

内 容 摘 要

全球定位系统 (GPS) 的出现, 给古老的测绘领域带来了革命性的变革, GPS 在交通工程测量中也有着广泛的应用。本书共分七章, 主要内容有: GPS 信号结构及定位基础, GPS 伪距定位的原理及精度分析, GPS 载波相位测量定位原理, GPS 测量控制网的建立, 差分 GPS 定位原理, 差分 GPS 在测量工程中的应用等。

前 言

航天技术是 20 世纪人类认识自然和改造自然进程中最活跃、最有影响的科学领域，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、空三军研制的新一代卫星导航定位系统，是美国继阿波罗登月和航天飞机之后的第三空间工程。系统于 1993 年正式建成。GPS 可广泛用于导航、定位和授时。GPS 的出现也给古老的测绘领域带来了革命性的变革，利用 GPS 静态相对定位可建立各种用途的平面控制网；利用伪距动态差分技术 (RTD) 可进行水深测量时的平面定位；利用相位动态差分技术 (RTK) 可进行公路中线的施工放样。因此，GPS 在交通工程测量领域有着广泛的应用。

编写本书的目的就是为了满足 GPS 测量应用的需要，特别是在交通工程测量应用的需要，较全面、系统地介绍 GPS 测量的静态和动态两种模式的定位理论和应用方法，以促进 GPS 测量的广泛应用。

全书共分七章，除 § 7-4 由长江航道局上海航道处葛志民工程师编写外，其余均由南京交通高等专科学校港航系高成发老师编写。全书由河海大学土木工程学院黄鹤年副教授审查，黄慧萍老师承担全书插图的描绘。另外，在编写过程中得到了南京交通高等专科学校港航系周福田主任、教材科许华科长、哈尔滨工程高等专科学校郭应启老师的热情帮助，在此一并表示感谢！

本书力求做到理论与工程实际相结合，反映当前的最新技术。然而由于 GPS 卫星测量是一门新兴的学科，发展日新月异，同时也由于编者水平和实际经验有限，书中不妥乃至错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 GPS 定位系统的来由及系统组成	(1)
1.2 GPS 定位系统的特点及用途	(11)
1.3 美国的 SA 政策	(14)
2 GPS 信号结构及定位基础	(16)
2.1 GPS 信号结构	(16)
2.2 GPS 卫星的导航电文	(29)
2.3 GPS 卫星位置的计算	(37)
3 GPS 伪距定位的原理及精度分析	(49)
3.1 伪距定位的基本原理	(50)
3.2 GPS 测量的误差来源和影响	(59)
4 GPS 载波相位测量定位原理	(73)
4.1 载波相位测量原理	(73)
4.2 载波相位测量定位原理	(76)
4.3 载波相位测量相对定位	(86)
4.4 整周跳变的探测与修复	(94)
4.5 整周模糊度的确定	(99)
5 GPS 测量控制网的建立	(109)
5.1 GPS 控制网的技术设计	(110)
5.2 GPS 控制网的外业工作	(116)
5.3 归心元素的测定和归心计算	(128)
5.4 GPS 控制网的平差计算	(132)
5.5 GPS 在工程测量中的应用	(147)
5.6 哈尔滨市 GPS 城市二等控制网简介	(151)

6 差分 GPS 定位原理	(155)
6.1 位置差分原理	(156)
6.2 伪距差分原理	(157)
6.3 相位平滑伪距差分原理	(161)
6.4 载波相位差分原理	(163)
6.5 数据链	(168)
7 差分 GPS 在测量工程中的应用	(173)
7.1 差分 GPS 的系统检验	(173)
7.2 基准站地心坐标的求定	(174)
7.3 转换参数的实用求解	(177)
7.4 差分 GPS 在水深测量中的应用	(179)
7.5 差分 GPS 在船舶进出港口中的应用	(191)
7.6 差分 GPS 在车辆定位和指挥调度中的应用	(193)
7.7 差分 GPS 在船舶机动性能测定中的应用	(195)
主要参考文献	(200)

1 绪 论

1.1 GPS定位系统的来由及系统组成

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，以构成全球定位系统。

GPS是在子午卫星系统基础上发展起来的新一代导航定位系统，因此在具体介绍 GPS 系统组成之前，有必要介绍一下子午卫星导航定位系统。

1.1.1 子午卫星导航定位系统 (NNSS) 简介

1957年10月，世界上第一颗人造卫星发射成功后，人们就开始了利用卫星进行定位和导航的研究。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 (Navy Navigation Satellite System—NNSS)。在这一系统中，由于卫星轨道面都通过地极，所以又称为子午卫星导航系统。1964年 NNSS 建成，它由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。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、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，它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。70年代中期，我国开始引进 NNSS 定位技术，主要用于舰、船导航和大地定位。西沙群岛的大地测量基准联测，是我国应用 NNSS 的先例，80年代布测的全国卫星多普勒大地网、西北地区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，也都是用 NNSS 定位技术测定的。

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，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系统。

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大，对相对定位的影响力大。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。

1.1.2 GPS 的系统组成

鉴于 NNSS 系统的局限性，为了实现全天候、全球高精度的连续导航定位，满足军事部门和民事部门对连续实时、高动态、高精度导航定位的迫切要求，早在批准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卫星全球定位系统。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)”。

整个 GPS 定位系统由三部分组成，即由 GPS 卫星组成的空间部分、由若干地面站组成的地面监控系统和以接收机为主体的用户设备。三者有各自独立的功能和作用，但又是有机地配合而缺一不可的整体系统。

图 1-1 显示了 GPS 定位系统的三个组成部分及其相互关系。下面分别介绍这三个部分。

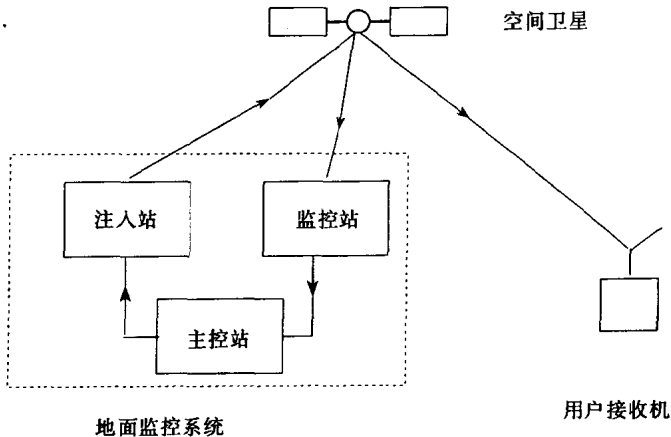


图 1-1

一、空间部分

空间部分由 GPS 卫星组成。覆盖全球上空的 GPS 卫星星

座，必须保证在各处能时时观测到高度角 15° 以上的 4 颗卫星。

目前，GPS 工作卫星星座 (BLOCK II) 共有 24 (21 + 3) 颗卫星，均匀分布在倾角为 55° 的 6 个轨道上，即各轨道升交点 (与赤道交点) 之间的角距为 60° ，每轨道均匀分布 4 颗卫星，相邻轨道之间的卫星还要彼此叉开 40° ，以保证全球均匀覆盖的要求，分布情况如图 1-2 所示。至 1995 年，仍有几颗试验卫星在正常工作。3 颗在轨的备用工作卫星随时可替代发生故障的其他卫星。

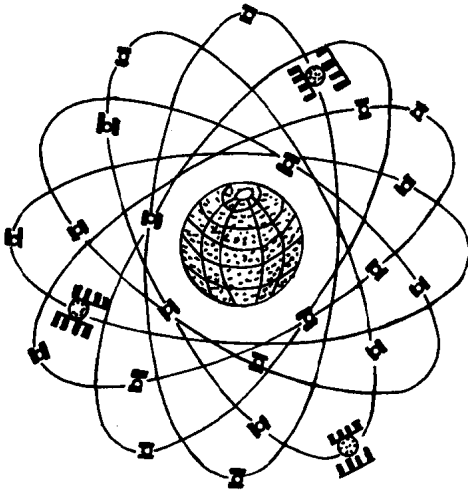


图 1-2 GPS 卫星星座

GPS 工作卫星重达 1500kg，设计寿命 7.5 年，星上装备了无线收发两用机，铯原子钟 (稳定度为 $10^{-13} \sim 10^{-14}$)、计算机、两块 7m^2 的太阳能翼板以及其他装备。每颗卫星以两个 L 波段频率发射载波无线电信号：

$$L_1 = 1575.42\text{MHz} \quad (\text{波长约 } 19\text{cm})$$

$$L_2 = 1227.60\text{MHz} \quad (\text{波长约 } 24\text{cm})$$

在 L_1 载波上测距用 P 码 (精码，码长约 30m) 和 C/A 码 (粗搜索码，码长约 300m)。C/A 码供民用的标准定位服务 (SPS)，P

码只供美国军方和授权用户使用。此外，在载波上还调制了每秒 50 (bit) 的数据导航电文，内容包括：卫星星历、电离层模型系数、状态信息、时间信息和星钟偏差以及漂移信息等。

GPS 卫星采取多种编号识别系统，通常采用的编号是 PRN 数（伪随机噪声数），由各卫星的导航电文获知。GPS 工作卫星离地高度 20200km，运行周期为 12 个恒星时，因此，完整的工作卫星星座保证在全球各处可以随时观测到 4~8 颗高度角在 15° 以上的卫星，若要求高度角仅在 10° 和 5° 以上时，则分别可观测到 4~10 和 4~12 颗卫星。

目前，美国采取两种限制性政策：SA（选择可用性）政策，有意使频率漂移和降低轨道精度，使 C/A 码原有的定位精度从 20~40m 降低到 100m；AS（反欺骗）政策，为防止 P 码被窃取，将 P 码改为 Y 码，使非授权用户无法使用 P 码。

表 1-1 给出了截止 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。

GPS 卫星一览表

表 1-1

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		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
BLOCK II A	11	23	1990		24	4	1994
	12	24	1991		25	6	1994
	13	25	1992				

PRN 编号：根据 GPS 卫星所采用的伪随机噪声码 (PRN

码)之不同而编号。

BLOCK II 和 BLOCK II A 都是第二代 GPS 卫星, 但 BLOCK II 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 II 只能存储供 45 天用的导航电文, 而 BLOCK II 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 II R。该星能对自己进行自主导航, 并能产生 50Hz 导航数据。BLOCK II 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。

二、地面监控系统

若从传统测量的角度看, 空间卫星是动态已知点, 每颗卫星在地心坐标系中的瞬时坐标可以通过描述其围绕地球运行的轨道参数来求定, 而这些轨道参数是由地面监控系统编算的卫星星历通过卫星传递给用户接收机的。

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, 即大西洋的阿松森 (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 1-3 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 1-3 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 卫星的星历、时钟改正、状态数据和信号的电离层延迟改正等参数；并按一定格式编制成导航电文，传送到注入站。

(4) 诊断状态。主控站还肩负监测整个地面监控系统是否正常工作，检验注入给卫星的导航电文是否正确，监测卫星是否将导航电文发送给用户等任务。

(5) 注入导航电文。注入站在主控站的控制下，将卫星星历、卫星时钟钟差等参数和其它控制指令注入给各 GPS 卫星。

(6) 调度卫星。主控站能够对 GPS 卫星轨道进行改变和修

正，还能进行卫星调度，让备用卫星去取代失效的卫星。

图 1-4 为地面监控系统的方框图。

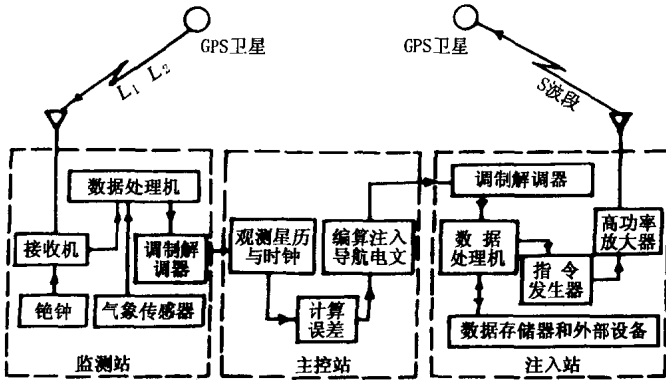


图 1-4 地面监控系统的方框图

3. 广播星历与精密星历

广播星历：主控站编算并经注入站注入给卫星的星历。主控站编算星历的步骤是：第一步编算参考星历，根据 5 个监测站一个星期左右所观测的数据，估算卫星轨道参数的初始值，形成参考星历，其误差约为 100m；第二步编算广播星历，根据每个监测站对每颗可见卫星每 6s 所作的伪距和积分多普勒观测值，用联机卡尔曼滤波器计算参考星历的线性摄动，并以此改正参考星历，依改正后的参考星历，外推 26h 的轨道参数，即为广播星历。据估算，广播星历的精度：径向误差约为 1m，切向误差约为 7m，法向误差约为 3m。

精密星历：广播星历精度较低，不能满足高精度、事后数据处理的要求。为此，美国国防部制图局 (DMA)、国家大地测量局 (NGS) 和美国航天局 (NASA) 联合测量和计算“精密星历”。该星历是根据分布在全球的定轨跟踪站的观测数据，经事后精密处理计算出来的，其精度在 1ppm 以内。但此精密星历保密，仅供特许用户使用。

为了打破美国对“精密星历”的垄断，一些国家和国际组织

建了精密定轨网，测量和计算精密星历，如“CIGNET 国际定轨网”和“全球 GPS 多用网”等。我国也正在积极组建 GPS 精密定轨网。

三、用户接收机

上述两大部分是由专门机构投资建立、维护和运行的，一旦工作，它将昼夜不停地发送导航定位信息。这是一种可供无数用户共享的信息资源。

由于 GPS 应用广泛，经济效益好，因而各国均在研制和生产各种类型的接收机。特别是在海湾战争中 GPS 发挥了重要作用，显示出巨大的应用潜力。美国军方认为“GPS 的投入是战争效益的倍增器”，于是 GPS 再次引起世界各国的关注，激起一股开发、应用 GPS 的热潮。许多发达国家都投入巨资，在 GPS 应用领域展开激烈的竞争。据《GPS World》统计报导，世界上目前已有五十多家企业生产三百多种型号的 GPS 接收机。我国南方测绘仪器公司生产的测地型 GPS 接收机，以其价廉物美，正逐步占领国内 GPS 接收机市场。

GPS 接收机类型很多，按其用途来分，有导航型、测地型和授时型；按工作模式来分有码相关型、平方型和混合型。但其基本结构是一致的，这里我们重点介绍测地型接收机的基本构造及几种主要接收机的技术参数。

GPS 接收机的基本结构如图 1-5 所示。

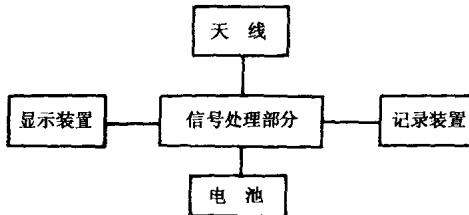


图 1-5 GPS 接收机基本结构

1. 天线 要求灵敏度高和抗干扰性强，前置放大器，一般

与天线结合在一起。

2. 信号处理 是 GPS 接收机的核心部件, 那里要进行中频放大、滤波和信号处理, 由跟踪环路重建载波; 解码得广播电文, 并获得伪距定位结果。

3. 控制显示 控制作业, 有各种显示屏供观测与检查用。

4. 记录装置 主要有接收机的内存硬盘或记录磁卡。

5. 电源 外接或内接电池 (12V), 机内还有一个锂电池。

大地型接收机 主要有 (2) + (3) 组合式 (如 Ashtech M12 接收机) 和 (1) + (2) 组合式 (如 WILD200 接收机)。

接收机接收到的卫星信号是在载波上调制有 C/A 和 P 两种伪随机码和 50bit/s 的导航电文, 解码原理主要有以下两种:

1. 调制码相关 已知 C/A 码和 P 码, 可由码跟踪环路获得伪距的广播电文, 又由载波跟踪环路获得载波相位测量值。

2. 平方型通道 不必知道 C/A 码和 P 码的结构, 可利用信号自乘获得载波相位测量值, 但无法获得伪距和导航电文, 只能从其他途径获得, 这种原理的接收机称为无码接收机。

几种主要 GPS 大地型接收机的技术参数 表 1-2

型 号	观测值	利用的载波和调制码	精 度	质 量	备 注
TI-4100	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码, P 码	15m (实时) 1ppm (测 3h)	接收机 16kg 天线 2kg	
Mini-Mac 2816	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码	1mm + 1ppm	接收机 20kg	8 通道
Trimble- 4000SL	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码			
Ashtech M12	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码	5mm + 1ppm		最新抗 AS, z 跟踪 12 通道
WILD200	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码	5mm + 1ppm	接收机 2.2kg	配快速 定位软件
GSSIA	伪距 载波相位	L_1 C/A 码	5mm + 2ppm	接收机 1.9kg 电池 0.5kg	8 通道
NGS-200	伪距 载波相位	L_1 C/A 码	5mm + 2ppm		8 通道