

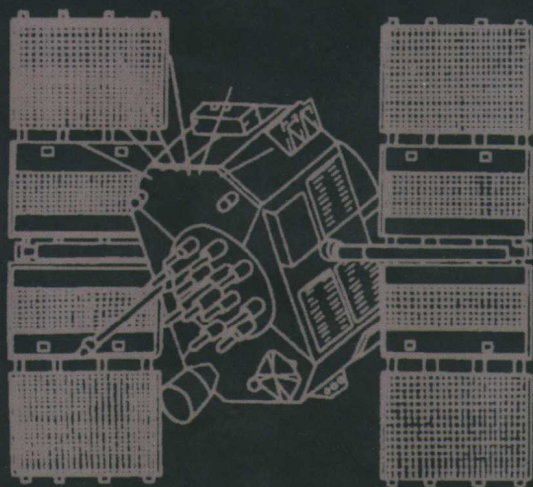
高等学校测绘类系列教材

GPS测量原理及应用

徐绍铨 张华海 杨志强 王泽民 编著

武汉大学出版社

(修订版)



1374

GPS 测量原理及应用

(修订版)

编著 徐绍铨 张华海
杨志强 王泽民

武汉大学出版社

内 容 提 要

本书为中国全球定位系统技术应用协会“教育与发展”专业委员会组织编写,旨在普及 GPS 知识,推广 GPS 应用技术。本书系统论述 GPS 的基本原理、测量方法、应用范围、测量技术与实施,数据处理与实用数学模型。本书特点是尽可能规避 GPS 系统的繁琐理论,注重 GPS 测量应用技术,因而概念清晰,通俗易懂,适应面宽,可操作性强。可作 GPS 课程(40 学时)的教材,可作测量工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量原理及应用/徐绍铨,张华海,杨志强,王泽民编著.一修订版.一武汉:武汉大学出版社,2003.1

高等学校测绘类系列教材

ISBN 7-307-03768-8

I. G… I. ①徐… ②张… ③杨… ④王… II. 全球定位系统(GPS)—测量
N. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 090514 号

责任编辑:徐 方 责任校对:王 建 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:武汉市汉桥印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:298 千字

版次:1998 年 10 月第 1 版 2003 年 1 月修订

2003 年 1 月修订版第 1 次印刷

ISBN 7-307-03768-8/P·52 定价:18.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

再版前言

为普及 GPS 技术和知识,中国全球定位系统技术应用协会“教育与发展”专业委员会,于 1996 年组织有关院校的教授,共同编写了《GPS 测量原理及应用》一书。该书就 GPS 而言,因注重测量原理和应用,避免了 GPS 系统理论,因而通俗易懂,适用面广,深受广大测绘工作者欢迎,自 1998 年初版后,已先后重印了 6 次。

这些年来,GPS 技术又进一步完善,GPS 应用的方法不断创新,应用领域有新的突破或拓宽。故本书再版时,在尽量维持原有章节结构的前提下,做了以下修改:

第一章中,进一步完善 GLONASS 全球定位系统的介绍,并增补了伽利略(Galileo)全球定位系统和我国北斗双星定位系统的介绍和论述。第五章中,重写了载波相位测量观测方程一节;并增补了整周跳变的修复一节;在第六节中,增加了 GPS 现代化计划及美国的 GPS 政策;在该章第七节中,增加了多基准站 RTK 技术等内容。第八章的内容,按 2001 年国家质量技术监督局发布的《全球定位系统(GPS)测量规范》中的新内容、新标准、新要求,进行了改写。第九章中,重写了 GPS 定位成果转换一节,使它更符合目前 GPS 生产的实践。第十章中,增加我国 GPS 2000 网介绍;GPS 在滑坡外观变形监测中的应用;GPS 在交通智能(ITS)中的应用;中国地壳运动 GPS 监测网络;南极菲尔德斯海峡形变 GPS 监测网等内容。

除上述各章增补内容外,另对第二章、第三章、第四章、第六章及第七章中不恰当和过时的内容也都做了删改和完善。

我们认为,修订后再版的《GPS 测量原理及应用》在保持原有内容要点和风格的基础上,不仅注入了较多的新技术、新知识,同时又对保留内容进行了完善和修改,因而修订版更能客观地反映 2002 年以来 GPS 理论和应用的现况。

由于我们水平有限,书中不足之处恳请读者批评指正。

编著者

2002 年 10 月于武汉

前 言

全球定位系统(Global Positioning System-GPS)是美国从 20 世纪 70 年代开始研制,历时 20 年,耗资 200 亿美元,于 1994 年全面建成,具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。经近 10 年我国测绘等部门的使用表明,GPS 以全天候、高精度、自动化、高效益等显著特点,赢得广大测绘工作者的信赖,并成功地应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多种学科,从而给测绘领域带来一场深刻的技术革命。

随着全球定位系统的不断改进,硬、软件的不完善,应用领域正在不断地开拓,目前已遍及国民经济各部门,并开始逐步深入人们的日常生活。

为了普及 GPS 技术和知识,中国全球定位系统技术应用协会“教育与发展”专业委员会,组织武汉测绘科技大学、中国矿业大学、西安工程学院、内蒙古林学院、南方冶金学院、长春科技大学等院校,长期从事 GPS 教学和研究的专业委员会成员,共同编写了《GPS 测量原理及应用》教材,以适应普通工科院校开设 GPS 课程教学的需要。

本书重在论述 GPS 的基本原理、基本方法,着重介绍应用,省略了各种数学模型的推演过程,力求做到概念清晰、通俗易懂,适应面广、应用性强,以满足 30~40 学时的教学要求。

本书由徐绍铨组稿,共分十章。其中第一章由张华海、杨志强执笔,第二章、第三章由张华海执笔,第四章由王泽民执笔,第五章由张华海、常同元执笔,第六章由王泽民执笔,第七章由杨志强、刘小生执笔,第八章由杨志强执笔,第九章由张华海、徐绍铨执笔,第十章由徐绍铨,张华海、杨志强、王泽民、常同元、杨国东、刘小生、陈小明、刘志赵等执笔。全书由张华海、杨志强协调统稿,最后由徐绍铨执笔修改定稿。全书插图由王翠华完成。

王广运教授审阅了本教材,提出了宝贵修改意见,在此表示诚挚地感谢。

由于作者水平有限,不足之处恳请读者批评指正。

中国全球定位系统技术应用协会
“教育与发展”专业委员会
1998 年 8 月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 GPS 卫星定位技术的发展	(1)
§ 1.2 GPS 系统组成	(5)
§ 1.3 GPS 在国民经济建设中的应用	(7)
第二章 坐标系统和时间系统	(11)
§ 2.1 天球坐标系与地球坐标系	(11)
§ 2.2 WGS-84 坐标系和我国大地坐标系	(16)
§ 2.3 坐标系统之间的转换	(19)
§ 2.4 时间系统	(21)
第三章 卫星运动基础及 GPS 卫星星历	(24)
§ 3.1 概述	(24)
§ 3.2 卫星的无摄运动	(24)
§ 3.3 卫星的受摄运动	(28)
§ 3.4 GPS 卫星星历	(31)
第四章 GPS 卫星的导航电文和卫星信号	(34)
§ 4.1 GPS 卫星的导航电文	(34)
§ 4.2 GPS 卫星信号	(36)
§ 4.3 GPS 卫星位置的计算	(40)
§ 4.4 GPS 接收机基本工作原理	(43)
第五章 GPS 卫星定位基本原理	(48)
§ 5.1 概述	(48)
§ 5.2 伪距测量	(49)
§ 5.3 载波相位测量	(51)
§ 5.4 整周跳变的修复	(54)
§ 5.5 GPS 绝对定位与相对定位	(57)
§ 5.6 美国的 GPS 政策	(64)
§ 5.7 差分 GPS 定位原理	(66)
第六章 GPS 卫星导航	(73)

§ 6.1	概述	(73)
§ 6.2	GPS 卫星导航原理	(74)
§ 6.3	GPS 用于测速、测时、测姿态	(77)
§ 6.4	GPS 卫星导航方法	(81)
第七章	GPS 测量的误差来源及其影响	(87)
§ 7.1	GPS 测量主要误差分类	(87)
§ 7.2	与信号传播有关的误差	(87)
§ 7.3	与卫星有关的误差	(94)
§ 7.4	与接收机有关的误差	(97)
§ 7.5	其他误差	(98)
第八章	GPS 测量的设计与实施	(100)
§ 8.1	GPS 测量的技术设计	(100)
§ 8.2	GPS 测量的外业准备及技术设计书编写	(107)
§ 8.3	GPS 测量的外业实施	(112)
§ 8.4	GPS 测量的作业模式	(117)
§ 8.5	数据预处理及观测成果的质量检核	(120)
§ 8.6	技术总结与上交资料	(124)
第九章	GPS 测量数据处理	(125)
§ 9.1	概述	(125)
§ 9.2	GPS 基线向量的解算	(127)
§ 9.3	GPS 定位成果的坐标转换	(132)
§ 9.4	基线向量网平差	(136)
§ 9.5	GPS 高程	(143)
第十章	GPS 应用	(154)
§ 10.1	GPS 在大地控制测量中的应用	(154)
§ 10.2	GPS 在精密工程测量及变形监测中的应用	(156)
§ 10.3	GPS 在航空摄影测量中的应用	(162)
§ 10.4	GPS 在线路勘测及隧道贯通测量中的应用	(169)
§ 10.5	GPS 在地形、地籍及房地产测量中的应用	(172)
§ 10.6	GPS 在海洋测绘中的应用	(173)
§ 10.7	GPS 在智能交通系统中的应用	(176)
§ 10.8	GPS 在地球动力学及地震研究中的应用	(179)
§ 10.9	GPS 在气象信息测量中的应用	(181)
§ 10.10	GPS 在航海航空导航中的应用	(184)
§ 10.11	GPS 在其他领域中的应用	(188)
主要参考文献		(191)

第一章 绪 论

§ 1.1 GPS 卫星定位技术的发展

1.1.1 早期的卫星定位技术

卫星定位技术是利用人造地球卫星进行点位测量的技术。当初,人造地球卫星仅仅作作为一种空间的观测目标,由地面观测站对它进行摄影观测,测定测站至卫星的方向,建立卫星三角网;也可以用激光技术对卫星进行距离观测,测定测站至卫星的距离,建立卫星测距网。这种对卫星的几何观测能够解决用常规大地测量技术难以实现的远距离陆地海岛联测定位的问题。20世纪60~70年代,美国国家大地测量局在英国和德国测绘部门的协助下,用卫星三角测量的方法花了几年时间测设了有45个测站的全球三角网,点位精度5m。但是这种观测方法受卫星可见条件及天气的影响,费时费力,不仅定位精度低,而且不能测得点位的地心坐标。因此,卫星三角测量很快就被卫星多普勒定位所取代,使卫星定位技术从仅仅把卫星作为空间观测目标的低级阶段,发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

1.1.2 子午卫星导航系统的应用及其缺陷

20世纪50年代末期,美国开始研制用多普勒卫星定位技术进行测速、定位的卫星导航系统,叫做子午卫星导航系统(NNSS)。子午卫星导航系统的问世,开创了海空导航的新时代,揭开了卫星大地测量学的新篇章。70年代,部分导航电文解密交付民用。自此,卫星多普勒定位技术迅速兴起。多普勒定位具有经济快速、精度均匀、不受天气和时间的限制等优点。只要在测点上能收到从子午卫星上发来的无线电信号,便可在地球表面的任何地方进行单点定位或联测定位,获得测站点的三维地心坐标。70年代中期,我国开始引进多普勒接收机,进行了西沙群岛的大地测量基准联测。国家测绘局和总参测绘局联合测设了全国卫星多普勒大地网,石油和地质勘探部门也在西北地区测设了卫星多普勒定位网。

在美国子午卫星导航系统建立的同时,前苏联也于1965年开始建立了一个卫星导航系统,叫做CICADA。该系统有12颗所谓宇宙卫星。

NNSS和CICADA卫星导航系统虽然将导航和定位推向了一个新的发展阶段,但是它们仍然存在着一些明显的缺陷,比如卫星少、不能实时定位。子午卫星导航系统采用6颗卫星,并都通过地球的南北极运行。地面上点上空子午卫星通过的间隔时间较长,而且低纬度地区每天的卫星通过次数远低于高纬度地区。而对于同一地点两次子午卫星通过的间隔时间为0.8~1.6小时,对于同一子午卫星,每天通过次数最多为13次,间隔时间更长。由于一台多普勒接收机一般需观测15次合格的卫星通过,才能使单点定位精度达10m左右,而各个测站观测了公共的17次合格的卫星通过时,联测定位的精度才能达到0.5m左右。间隔时间和观

测时间长,不能为用户提供实时定位和导航服务,而精度较低限制了它的应用领域。子午卫星轨道低(平均高度 1 070km),难以精密定轨,以及子午卫星射电频率低(400MHz 和 150MHz),难以补偿电离层效应的影响,致使卫星多普勒定位精度局限在米级水平(精度极限 0.5~1m)。

总之,用子午卫星信号进行多普勒定位时,不仅观测时间长(需要一两天的观测时间),而且既不能进行连续、实时定位,又不能达到厘米级的定位精度,因此其应用受到了较大的限制。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航与定位,第二代的卫星导航系统——GPS 卫星全球定位系统便应运而生。卫星定位技术发展到了一个辉煌的历史阶段。

1.1.3 GPS 全球定位系统的建立

1973 年 12 月,美国国防部批准它的陆海空三军联合研制新的卫星导航系统:NAVSTAR/GPS。它是英文“Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System”的缩写词。其意为“卫星测时测距导航/全球定位系统”,简称 GPS 系统。该系统是以卫星为基础的无线电导航定位系统,具有全能性(陆地、海洋、航空和航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和定时的功能。能为各类用户提供精密的三维坐标、速度和时间。

自 1974 年以来,GPS 计划已经历了方案论证(1974~1978 年),系统论证(1979~1987 年)、生产实验(1988~1993 年)三个阶段。总投资超过 200 亿美元。整个系统分为卫星星座、地面控制和监测站、用户设备三大部分。论证阶段共发射了 11 颗叫做 BLOCK I 的试验卫星,生产实验阶段发射 BLOCK II R 型第三代 GPS 卫星,GPS 系统由此为基础改建而成。

GPS 卫星星座见图 1-1。其基本参数是:卫星颗数为 21+3,卫星轨道面个数为 6,卫星高度为 20 200km,轨道倾角为 55 度,卫星运行周期为 11 小时 58 分(恒星时 12 小时),载波频率为 1 575.42MHz 和 1 227.60MHz。卫星通过天顶时,卫星可见时间为 5 小时,在地球表面上任何地点任何时刻,在高度角 15 度以上,平均可同时观测到 6 颗卫星,最多可达 9 颗卫星。

图 1-2 是 GPS 工作卫星的外部形态。GPS 工作卫星的在轨重量是 843.68 公斤,其设计寿命为七年半。当卫星入轨后,星内机件靠太阳能电池和镉镍蓄电池供电。每个卫星有一个推力系统,以便使卫星轨道保持在适当位置。GPS 卫星通过 12 根螺旋型天线组成的阵列天线发射张角大约为 30 度的电磁波束,覆盖卫星的可见地面。卫星姿态调整采用三轴稳定方式,由四个斜装惯性轮和喷气控制装置构成三轴稳定系统,致使螺旋天线阵列所辐射的波束对准卫星的可见地面。

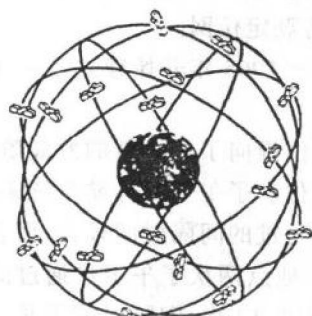


图 1-1 GPS 卫星星座

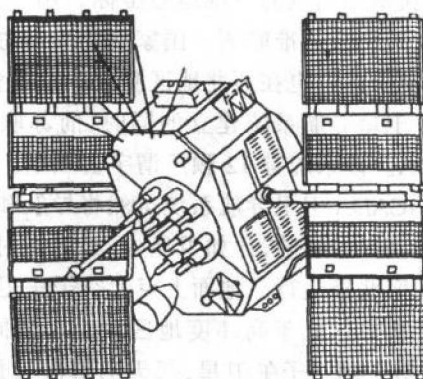


图 1-2 GPS 工作卫星

2000年5月,美国政府取消了限制民用精度的“SA”政策,仅在局部或个别卫星上实施SA技术。

为了与正在筹建中的欧盟伽利略(Galileo)系统争夺市场,美国推出了GPS现代化的计划,即实施广域增强系统和局域增强系统;进一步提高民用精度,计划2003年在 L_2 载波上提供第二个民用信号,2006年前增加第三个民用频率 $L_5 = 1\ 176.45\text{MHz}$,并提高其码频率和发射功率。总的目标是进一步改善GPS的可用性、安全性和完善性。

1.1.4 GLONASS 全球导航卫星系统

GLONASS的起步晚于GPS 9年。从前苏联于1982年10月12日发射第一颗GLONASS卫星开始,到1996年,13年时间内历经周折,虽然遭遇了苏联的解体,由俄罗斯接替部署,但始终没有终止或中断GLONASS卫星的发射。1995年初只有16颗GLONASS卫星在轨工作,1995年进行了三次成功发射,将9颗卫星送入轨道,完成了24颗工作卫星加1颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整和检验,已于1996年1月18日,整个系统正常运行。

GLONASS系统在系统组成和工作原理上与GPS类似,也是由空间卫星星座,地面控制和用户设备三大部分组成。

1. 卫星星座

GLONASS卫星星座的轨道为三个等间隔椭圆轨道,轨道面间的夹角为120度,轨道倾角64.8度,轨道的偏心率为0.01,每个轨道上等间隔地分布8颗卫星。卫星离地面高度19100km,绕地运行周期约11小时15分,地迹重复周期8天,轨道同步周期17圈。GLONASS和GPS的对比参见表1。由于GLONASS卫星的轨道倾角大于GPS卫星的轨道倾角,所以在高纬度(50度以上)地区的可视性较好。

每颗GLONASS卫星上装有铯原子钟以产生卫星上高稳定时标,并向所有星载设备的处理提供同步信号。星载计算机将从地面控制站接收到的专用信息进行处理,生成导航电文向用户广播。导航电文包括:①星历参数;②星钟相对于GLONASS UTC时(SU)的偏移值;③时间标记;④GLONASS历书。

GLONASS卫星向空间发射两种载波信号。 L_1 频率为1.602~1.616MHz, L_2 频率为1.246~1.256MHz, L_1 为民用, L_1 和 L_2 供军用。信号格式为伪随机噪声扩频信号,测距码用最长序列码,511码元素。同步码重复周期2秒,30位,并有100周方波振荡的二进制码信息调制。各卫星之间的识别方法采用频分复用制(FDMA), L_1 频道间隔0.5625MHz, L_2 频道间隔0.4375MHz。FDMA占用频段较宽,24个卫星的 L_1 频段占用约14MHz。

2. 地面控制系统

地面控制站组(GCS)包括一个系统控制中心(在莫斯科区的Golitsyno-2),一个指令跟踪站(CTS),网络分布于俄罗斯境内。CTS跟踪着GLONASS可视卫星,它遥测所有卫星,进行测距数据的采集和处理,并向各卫星发送控制指令和导航信息。

在GCS内有激光测距设备对测距数据作周期修正,为此所有GLONASS卫星上都装有激光反射镜。

3. 用户设备

GLONASS接收机接收GLONASS卫星信号并测量其伪距和速度,同时从卫星信号中选出并处理导航电文。接收机中的计算机对所有输入数据处理并算出位置坐标的三个分量、速度矢量的三个分量和时间。

GLONASS 系统进展较快,运行正常,但生产用户设备的厂家较少,生产的接收机多为专用型。美国的 3S 公司研制 GLONASS 接收机以及 GPS/GLONASS 联合接收机。GPS 与 GLONASS 联合型接收机有很多优点:用户同时可接收的卫星数目增加约一倍,可以明显改善观测卫星的几何分布,提高定位精度(单点定位精度可达 16m);由于可见卫星数目增加,在一些遮挡物较多的城市、森林等地区进行测量定位和建立运动目标的监控管理比较容易开展;利用两个独立的卫星定位系统进行导航和定位测量,可有效地削弱美俄两国对各自定位系统的可能控制,提高定位的可靠性和安全性。

4. 俄罗斯联邦政府对 GLONASS 系统的使用政策

早在 1991 年俄罗斯首先宣称:GLONASS 系统可供国防民间使用,不带任何限制,也不计划对用户收费,该系统将在完全布满星座后遵照已公布的性能运行至少 15 年。民用的标准精度通道(CSA)精度数据为:水平精度 50~70m,垂直精度 75m,并声明不引入选择可用性(SA)。测速精度 15cm/s。授时精度为 $1\mu\text{s}$ 。俄罗斯空间部队的合作科学信息中心已作为 GLONASS 状态信息的用户接口,正式向用户公布 GLONASS 咨询通告。

1995 年 3 月 7 日俄罗斯联邦政府签署了一项法令“有关 GLONASS 面向民用的行动指导”。此法令确认了 GLONASS 系统由民间用户使用的早期启用的可能性。

GLONASS 卫星的平均工作寿命超过 4.5 年。1999 年底补网发射了三颗卫星,至 2000 年初,该系统只有七颗健全卫星保持连续工作。2000 年 10 月补网又发射了三颗卫星。到 2001 年 3 月,GLONASS 中有 13 颗健全的卫星。2001 年补网发射 6 颗卫星,使在轨卫星增加到 17 颗,计划 2004 年再发射 15 颗卫星补充 GLONASS 系统的完整性。到那时,GLONASS 将有可能进入自运营以来状态最好、发射卫星最多的时期。

图 1-3 为 GLONASS 卫星星座。

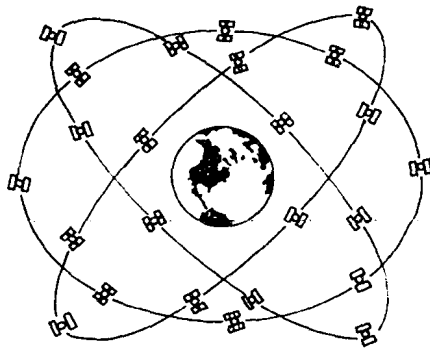


图 1-3 GLONASS 卫星星座

1.1.5 伽俐略(Galileo)GNSS 系统

从 1994 年开始,欧盟进行了对伽俐略(Galileo)GNSS 系统的方案论证。2000 年欧盟在世界无线电大会上获得了建立 GNSS 系统的 L 频段的频率资源。2002 年 3 月,欧盟 15 国交通部长一致同意伽俐略 GNSS 系统的建设。

伽俐略系统由 30 颗卫星(27 颗工作卫星和 3 颗备用卫星)组成。30 颗卫星部署在 3 个中高度圆轨道面上,轨道高度 23 616km,倾角 56 度,星座对地面覆盖良好。在欧洲建立两个控

制中心。计划 2003 年发射两颗试验卫星,2008 年完成全系统部署并投入使用。

GNSS 系统最主要的设计思想是:与 GPS/GLONASS 不同,完全从民用出发,建立一个最高精度的全开放型的新一代 GNSS 系统;与 GPS/GLONASS 有机地兼容,增强系统使用的安全性和完善性;建设资金(36 亿欧元)由欧洲各国政府和私营企业共同投资。

1.1.6 双星导航定位系统(北斗一号)

2000 年底,我国发射了两颗“北斗导航试验卫星”,加上地面中心站和用户一起构成了双星导航定位系统(北斗一号)。双星导航定位系统空间部分由三颗地球静止轨道卫星(其中一颗在轨备用)组成;地面中心站包括地面应用系统和测控系统,具有位置报告、双向报文通信及双向授时功能;用户部分即车辆、船舶、飞机以及各军兵种低动态及静态导航定位的用户。服务区域在东经 70~145 度,北纬 5~55 度范围。定位精度为:平面 $\pm 20\text{m}$,高程 $\pm 10\text{m}$ 。

双星导航定位系统定位的基本原理为空间球面交会测量原理。如图 1-4,地面中心站通过两颗卫星向用户广播询问信号,根据用户响应的应答信号,测量并计算出用户到两颗卫星的距离;然后根据地面中心站的数字地图,由中心站算出用户到地心的距离,根据卫星 1、卫星 2 和地面中心站的已知地心坐标以及已知用户目标在赤道平面北侧,地面中心站计算出用户的三维位置,用户的高程则由数字地面高程求出。用户的三维位置由地面中心站计算出后经卫星广播信号发给用户。

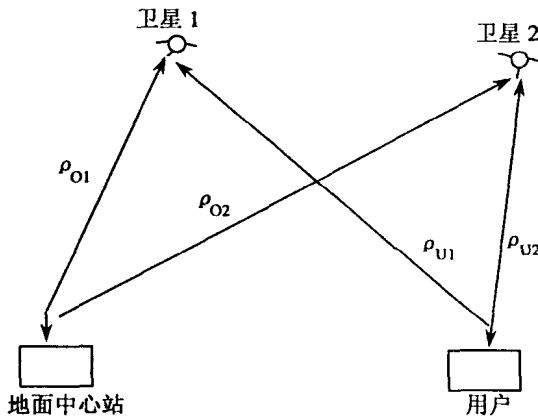


图 1-4 双星导航定位系统工作原理

§ 1.2 GPS 系统组成

GPS 系统包括三大部分:空间部分——GPS 卫星星座;地面控制部分——地面监控系统;用户设备部分——GPS 信号接收机。

1.2.1 GPS 工作卫星及其星座

由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成 GPS 卫星星座,记作(21+3)GPS 星座。如图 1-1,24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道倾角为 55 度,各个轨道平面之间相距 60 度,即轨道的升交点赤经各相差 60 度。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差 90 度,一

轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30 度。

在两万公里高空的 GPS 卫星,当地球对恒星来说自转一周时,它们绕地球运行二周,即绕地球一周的时间为 12 恒星时。这样,对于地面观测者来说,每天将提前 4 分钟见到同一颗 GPS 卫星。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而不同,最少可见到 4 颗,最多可以见到 11 颗。在用 GPS 信号导航定位时,为了解算测站的三维坐标,必须观测 4 颗 GPS 卫星,称为定位星座。这 4 颗卫星在观测过程中的几何位置分布对定位精度有一定的影响。对于某地某时,甚至不能测得精确的点位坐标,这种时间段叫做“间隙段”。但这种时间间隙段是很短暂的,并不影响全球绝大多数地方的全天候、高精度、连续实时的导航定位测量。

GPS 工作卫星的编号和试验卫星基本相同。其编号方法有:按发射先后次序编号;按 PRN(卫星所采用的伪随机噪声码)的不同编号;NASA 编号(美航空航天局对 GPS 卫星的编号);国际编号(第一部分为该星发射年代,第二部分表示该年中发射卫星的序号,字母 A 表示发射的有效负荷);按轨道位置顺序编号等。在导航定位测量中,一般采用 PRN 编号。

在 GPS 系统中,GPS 卫星的作用如下:

①用 L 波段的两个无线载波(19cm 和 24cm 波)向广大用户连续不断地发送导航定位信号。每个载波用导航信息 $D(t)$ 和伪随机码(PRN)测距信号进行双相调制。用于捕获信号及粗略定位的伪随机码叫 C/A 码(又叫 S 码),精密测距码(用于精密定位)叫 P 码。由导航电文可以知道该卫星当前的位置和卫星的工作情况。

②在卫星飞越注入站上空时,接收由地面注入站用 S 波段(10cm 波段)发送到卫星的导航电文和其他有关信息,并通过 GPS 信号电路,适时地发送给广大用户。

③接收地面主控站通过注入站发送到卫星的调度命令,适时地改正运行偏差或启用备用时钟等。

GPS 卫星的核心部件是高精度的时钟、导航电文存储器、双频发射和接收机以及微处理机。而对于 GPS 定位成功的关键在于高稳定度的频率标准。这种高稳定度的频率标准由高度精确的时钟提供。因为 10^{-9} 秒的时间误差将会引起 30cm 的站星距离误差。为此,每颗 GPS 工作卫星一般安设两台铷原子钟和两台铯原子钟,并计划未来采用更稳定的氢原子钟(其频率稳定度优于 10^{-14})。GPS 卫星虽然发送几种不同频率的信号,但是它们均源于一个基准信号(其频率为 10.23GHz),所以只需启用一台原子钟,其余作为备用。卫星钟由地面站检验,其钟差、钟速连同其他信息由地面站注入卫星后,再转发给用户设备。

1.2.2 地面监控系统

对于导航定位来说,GPS 卫星是一动态已知点。星的位置是依据卫星发射的星历——描述卫星运动及其轨道的参数算得的。每颗 GPS 卫星所播发的星历,是由地面监控系统提供的。卫星上的各种设备是否正常工作,以及卫星是否一直沿着预定轨道运行,都要由地面设备进行监测和控制。地面监控系统另一重要作用是保持各颗卫星处于同一时间标准——GPS 时间系统。这就需要地面站监测各颗卫星的时间,求出钟差,然后由地面注入站发给卫星,卫星再由导航电文发给用户设备。

GPS 工作卫星的地面监控系统包括一个主控站、三个注入站和五个监测站。

主控站设在美国本土科罗拉多。主控站的任务是收集、处理本站和监测站收到的全部资料,编算出每颗卫星的星历和 GPS 时间系统,将预测的卫星星历、钟差、状态数据以及大气传播改正编制成导航电文传送到注入站。主控站还负责纠正卫星的轨道偏离,必要时调度卫星,

让备用卫星取代失效的工作卫星。另外还负责监测整个地面监测系统的工作,检验注入给卫星的导航电文,监测卫星是否将导航电文发送给了用户。

三个注入站分别设在大西洋的阿森松岛、印度洋的迪戈加西亚岛和太平洋的卡瓦加兰。任务是将主控站发来的导航电文注入到相应卫星的存储器。每天注入三次,每次注入 14 天的星历。此外,注入站能自动向主控站发射信号,每分钟报告一次自己的工作状态。

五个监测站除了位于主控站和三个注入站之处的四个站以外,还在夏威夷设立了一个监测站。监测站的主要任务是为主控站提供卫星的观测数据。每个监测站均用 GPS 信号接收机对每颗可见卫星每 6 分钟进行一次伪距测量和积分多普勒观测,采集气象要素等数据。在主控站的遥控下自动采集定轨数据并进行各项改正,每 15 分钟平滑一次观测数据,依此推算出每 2 分钟间隔的观测值,然后将数据发送给主控站。

1.2.3 GPS 信号接收机

GPS 信号接收机的任务是:能够捕获到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号,并跟踪这些卫星的运行,对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理,以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间,解译出 GPS 卫星所发送的导航电文,实时地计算出测站的三维位置,甚至三维速度和时间。

静态定位中, GPS 接收机在捕获和跟踪 GPS 卫星的过程中固定不变,接收机高精度地测量 GPS 信号的传播时间,利用 GPS 卫星在轨的已知位置,解算出接收机天线所在位置的三维坐标。而动态定位则是用 GPS 接收机测定一个运动物体的运行轨迹。GPS 信号接收机所位于的运动物体叫做载体(如航行中的船舰,空中的飞机,行走的车辆等)。载体上的 GPS 接收机天线在跟踪 GPS 卫星的过程中相对地球而运动,接收机用 GPS 信号实时地测得运动载体的状态参数(瞬间三维位置和三维速度)。

接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包,构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收单元两大部分。对于测地型接收机来说,两个单元一般分成两个独立的部件,观测时将天线单元安置在测站上,接收单元置于测站附近的适当地方,用电缆线将两者连接成一个整机。也有的将天线单元和接收单元制作成一个整体,观测时将其安置在测站点上。

GPS 接收机一般用蓄电池作电源。同时采用机内机外两种直流电源。设置机内电池的目的在于更换外电池时不中断连续观测。在用机外电池的过程中,机内电池自动充电。关机后,机内电池为 RAM 存储器供电,以防止丢失数据。

近几年,国内引进了许多种类型的 GPS 测地型接收机。各种类型的 GPS 测地型接收机用于精密相对定位时,其双频接收机精度可达 $5\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$,单频接收机在一定距离内精度可达 $10\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$ 。用于差分定位其精度可达亚米级至厘米级。

目前,各种类型的 GPS 接收机体积越来越小,重量越来越轻,便于野外观测。GPS 和 GLONASS 兼容的全球导航定位系统接收机已经问世。

§ 1.3 GPS 在国民经济建设中的应用

1.3.1 GPS 系统的特点

GPS 导航定位以其高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等特点著称。

1. 定位精度高

应用实践已经证明, GPS 相对定位精度在 50km 以内可达 10^{-6} , 100~500km 可达 10^{-7} , 1000km 以上可达 10^{-9} 。在 300~1500m 工程精密定位中, 1 小时以上观测的解其平面位置误差小于 1mm, 与 ME-5000 电磁波测距仪测定的边长比较, 其边长较差最大为 0.5mm, 较差中误差为 0.3mm。

2. 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善, 软件的不断更新, 目前, 20km 以内相对静态定位, 仅需 15~20 分钟; 快速静态相对定位测量时, 当每个流动站与基准站相距在 15km 以内时, 流动站观测时间只需 1~2 分钟; 动态相对定位测量时, 流动站出发时观测 1~2 分钟, 然后可随时定位, 每站观测仅需几秒钟。

3. 测站间无需通视

GPS 测量不要求测站之间互相通视, 只需测站上空开阔即可, 因此可节省大量的造标费用。由于无需点间通视, 点位位置可根据需要, 可稀可密, 使选点工作甚为灵活, 也可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

4. 可提供三维坐标

经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测。GPS 可同时精确测定测站点的三维坐标。目前 GPS 水准可满足四等水准测量的精度。

5. 操作简便

随着 GPS 接收机不断改进, 自动化程度越来越高, 有的已达“傻瓜化”的程度; 接收机的体积越来越小, 重量越来越轻, 极大地减轻测量工作者的工作紧张程度和劳动强度。使野外工作变得轻松愉快。

6. 全天候作业

目前 GPS 观测可在一天 24 小时内的任何时间进行, 不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。

7. 功能多, 应用广

GPS 系统不仅可用于测量、导航, 还可用于测速、测时。测速的精度可达 0.1m/s, 测时的精度可达几十毫微秒。其应用领域不断扩大。

1.3.2 GPS 系统的应用前景

当初, 设计 GPS 系统的主要目的是用于导航、收集情报等军事目的。但是, 后来的应用开发表明, GPS 系统不仅能够达到上述目的, 而且用 GPS 卫星发来的导航定位信号能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态相对定位, 米级至亚米级精度的动态定位, 亚米级至厘米级精度的速度测量和毫微秒级精度的时间测量。因此, GPS 系统展现了极其广阔的应用前景。

1. GPS 系统用途广泛

用 GPS 信号可以进行海、空和陆地的导航, 导弹的制导, 大地测量和工程测量的精密定位, 时间的传递和速度的测量等。对于测绘领域, GPS 卫星定位技术已经用于建立高精度的全国性的大地测量控制网, 测定全球性的地球动态参数; 用于建立陆地海洋大地测量基准, 进行高精度的海岛陆地联测以及海洋测绘; 用于监测地球板块运动状态和地壳形变; 用于工程测量, 成为建立城市与工程控制网的主要手段; 用于测定航空航天摄影瞬间的相机位置, 实现仅有少量地面控制或无地面控制的航测快速成图, 导致地理信息系统、全球环境遥感监测的技术

革命。

2. 多元化空间资源环境的出现

目前, GPS, GLONASS, INMARSAT 等系统都具备了导航定位功能, 形成了多元化的空间资源环境。这一多元化的空间资源环境, 促使国际民间形成了一个共同的策略, 即一方面对现有系统充分利用, 一方面积极筹建民间 GNSS 系统, 待到 2010 年前后, GNSS 纯民间系统建成, 全球将形成 GPS/GLONASS/GNSS 三足鼎立之势, 才能从根本上摆脱对单一系统的依赖, 形成国际共有、国际共享的安全资源环境。世界才可进入将卫星导航作为单一导航手段的最高应用境界。国际民间的这一策略, 反过来又影响和迫使美国对其 GPS 使用政策作出更开放的调整。

总之, 由于多元化空间资源环境的确立, 给 GPS 的发展应用创造了一个前所未有的良好的国际环境。

3. 发展 GPS 产业

今后 GPS 将像目前汽车、无线电通信等一样形成产业化。美国已将广域增强系统 WAAS (即将广域差分系统中的发送修正数据链转为地球同步卫星发送, 使地球同步卫星也具有 C/A 码功能, 形成广域 GPS 增强系统) 计划发展成国际标准。美国已成立 GPS 产业协会 (US-GIS), 1994 年美国车载 GPS 系统销量为 1.8 亿美元, 1995 年为 3.1 亿美元, 到 2000 年为 30 亿美元。日本在 1994 年的车载导航也有 12 万套, 1995 年为 47 万套, 1996 年为 70 万套。我国目前也有一些单位生产车载 GPS 系统。为发展我国的 GPS 产业, 武汉已经成立中国 GPS 工程技术研究中心。

4. GPS 的应用将进入人们的日常生活

GPS 信号接收机在人们生活中的应用, 是一个难以用数字预测的广阔天地, 手表式的 GPS 接收机, 将成为旅游者的忠实导游。尽管目前大多数人还不知道什么是 GPS, 但有人预言, GPS 将改变我们的生活方式。今后, 所有运载器, 都将依赖于 GPS。GPS 就像移动电话、传真机、计算机互联网对我们生活的影响一样, 人们日常生活将离不开它。

1.3.3 我国的 GPS 定位技术应用和发展情况

新中国成立后, 我国的航天科技事业在自立更生、艰苦创业的征途上, 逐步建立和发展, 跻身于世界先进水平的行列, 成为世界空间强国之一。从 1970 年 4 月把第一颗人造卫星送入轨道以来, 我国已成功地发射了三十多颗不同类型的人造卫星, 为空间大地测量工作的开展创造了有利条件。

20 世纪 70 年代后期, 有关单位在从事多年理论研究的同时, 引进并试制成功了各种人造卫星观测仪器。其中有人卫摄影仪、卫星激光测距仪和多普勒接收机。根据多年的观测实践, 完成了全国天文大地网的整体平差, 建立了 1980 年国家大地坐标系, 进行了南海群岛的联测。

80 年代初, 我国一些院校和科研单位已开始研究 GPS 技术。十多年来, 我国的测绘工作者在 GPS 定位基础理论研究和应用开发方面作了大量工作。

80 年代中期, 我国引进 GPS 接收机, 并应用于各个领域。同时着手研究建立我国自己的卫星导航系统。至今十多年来, 据有关人士估计, 目前我国的 GPS 接收机拥有量约在 4 万台左右, 其中测量类约 500~700 台, 航空类约几百台, 航海类约 3 万多台, 车载类数千台。而且以每年 2 万台的速度增加。足以说明 GPS 技术在我国各行业中应用的广泛性。

在大地测量方面, 利用 GPS 技术开展国际联测, 建立全球性大地控制网, 提供高精度的地

心坐标,测定和精化大地水准面。组织各部门(10多个单位,30多台GPS双频接收机)参加1992年全国GPS定位大会战。经过数据处理,GPS网点地心坐标精度优于0.2m,点间位置精度优于 10^{-8} 。在我国建成了平均边长约100km的GPS A级网,提供了亚米级精度地心坐标基准。此后,在A级网的基础上,我国又布设了边长为30~100km的B级网,全国约2500个点。A、B级GPS网点都联测了几何水准。这样,就为我国各部门的测绘工作,建立各级测量控制网,提供了高精度的平面和高程三维基准。我国已完成西沙、南沙群岛各岛屿与大陆的GPS联测,使海岛与全国大地网联结成一整体。

在工程测量方面,应用GPS静态相对定位技术,布设精密工程控制网,用于城市和矿区油田地面沉降监测、大坝变形监测、高层建筑变形监测、隧道贯通测量等精密工程。加密测图控制点,应用GPS实时动态定位技术(简称RTK)测绘各种比例尺地形图和用于工程建设中的施工放样。

在航空摄影测量方面,我国测绘工作者也应用GPS技术进行航测外业控制测量、航摄飞行导航、机载GPS航测等航测成图的各个阶段。

在地球动力学方面,GPS技术用于全球板块运动监测和区域板块运动监测。我国已开始用GPS技术监测南极洲板块运动、青藏高原地壳运动、四川鲜水河地壳断裂运动,建立了中国地壳形变观测网、三峡库区形变观测网、首都圈GPS形变监测网等。

GPS技术已经用于海洋测量、水下地形测绘。

此外,在军事国防、智能交通、邮电通信,地矿、煤矿、石油、建筑以及农业、气象、土地管理、环境监测、金融、公安等部门和行业,在航空航天、测时授时、物理探矿、姿态测定等领域,也都开展了GPS技术的研究和应用。

在静态定位和动态定位应用技术及定位误差方面作了深入的研究,研制开发了GPS静态定位和高动态高精度定位软件以及精密定轨软件。在理论研究与应用开发的同时,培养和造就了一大批技术人才和产业队伍。

近几年,我国已建成了北京、武汉、上海、西安、拉萨、乌鲁木齐等永久性的GPS跟踪站,进行对GPS卫星的精密定轨,为高精度的GPS定位测量提供观测数据和精密星历服务,致力于我国自主的广域差分GPS(WADGPS)方案的建立,参与全球导航卫星系统(GNSS)和GPS增强系统(WAAS)的筹建。同时,我国已着手建立自己的卫星导航系统(双星定位系统),能够生产导航型和测地型GPS接收机。GPS技术的应用正向更深层次发展。

为了适应GPS技术的应用与发展,1995年成立了中国GPS协会,协会下设七个专业委员会,希望通过广泛的交流与合作,发展我国的GPS应用技术。