



高等学校“十一五”规划教材

全球卫星导航定位系统 原理与应用

Principles and Applications of Global Navigation Satellite Systems

徐爱功 韩晓东 崔希民 吉长东 李爱国 陈宪冬 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校“十一五”规划教材

全球卫星导航定位系统原理与应用

**Principles and Applications
of Global Navigation Satellite Systems**

徐爱功 韩晓东 崔希民 编著
吉长东 李爱国 陈宪冬

中国矿业大学出版社

前 言

本书系统地介绍了全球卫星导航定位系统的原理、基础知识、应用与发展,内容包括系统的构成、坐标和时间参考系统、卫星轨道、卫星信号、静态与动态定位原理、信号接收机及全球卫星导航定位系统的发展动态,包括俄罗斯的GLONASS、正在建设中的欧洲伽利略(GALILEO)系统以及我国的北斗(COMPASS)系统。书中重点介绍了GPS静态和动态定位的原理、GPS卫星定位中的有关误差及其处理措施、GPS测量中控制网的设计与实施作业、GPS定位的数据处理;较全面地概述了GPS定位测量技术的应用。

本书共分十章,其中第1、4、6、8、9章由辽宁工程技术大学徐爱功教授和吉长东副教授编写,第2章由山东科技大学的韩晓东教授编写,第3章由中国矿业大学(北京)的崔希民教授编写,第5章由李爱国老师编写,第7章由西安科技大学的陈宪冬老师编写,全书由徐爱功教授统稿。

本书可作为高等院校测绘类本科生或相关专业研究生教材,也可供从事测绘专业的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

由于卫星定位导航涉及学科专业广泛,相关理论也在不断发展完善中,其应用领域在不断拓宽,加上作者理论水平与实践经验有局限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2009年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 全球卫星定位系统的发展	1
1.2 GPS 及其应用特点	4
1.3 美国政府的 GPS 政策.....	6
1.4 现有卫星导航定位系统	8
第 2 章 卫星定位测量基础	12
2.1 坐标系统.....	12
2.2 时间系统.....	30
2.3 卫星运动及其位置计算.....	35
第 3 章 GPS 卫星信号及其测量原理	49
3.1 电磁波传播的基本概念.....	49
3.2 大气层对电磁波传播的影响.....	50
3.3 GPS 系统构成	55
3.4 随机码与伪随机码.....	59
3.5 GPS 卫星测距码信号与伪距测量原理	61
3.6 GPS 卫星的导航电文	64
3.7 GPS 卫星星历	68
3.8 GPS 卫星载波信号与相位测量原理	70
3.9 GPS 卫星信号接收机	73
第 4 章 GPS 静态定位原理	77
4.1 GPS 观测量与定位方法	77
4.2 静态绝对定位.....	78
4.3 静态相对定位.....	81
4.4 整周模糊度的确定与周跳分析.....	85
4.5 快速静态相对定位.....	91
第 5 章 GPS 动态定位原理	96
5.1 动态绝对定位.....	96

5.2	动态相对定位	99
5.3	动态定位的数据处理方法	101
5.4	差分 GPS 原理	104
第 6 章	GPS 定位误差	115
6.1	概述	115
6.2	时钟误差	117
6.3	星历误差	118
6.4	电离层折射	120
6.5	对流层折射	123
6.6	其他误差及其改正方法	127
6.7	观测卫星几何分布对定位精度的影响	131
第 7 章	GPS 控制网设计与外业测量	134
7.1	GPS 测量控制网的特点与布网原则	134
7.2	GPS 测量控制网的优化	138
7.3	GPS 测量的外业准备及技术设计书的编写	143
7.4	GPS 测量的外业工作	148
7.5	GPS 测量的作业模式	152
7.6	实时动态测量与应用	154
7.7	GPS 观测成果检验	155
7.8	技术总结与资料上交	159
第 8 章	GPS 数据处理	160
8.1	观测数据预处理	160
8.2	GPS 基线向量的解算	164
8.3	GPS 坐标系统的转换	172
8.4	GPS 基线向量网的平差	184
第 9 章	GPS 在测量与导航中的应用	195
9.1	GPS 在控制测量中的应用	195
9.2	GPS 在地球动力学研究中的应用	198
9.3	GPS 在海洋测绘中的应用	201
9.4	GPS 在精密工程测量中的应用	204
9.5	GPS 在航空中的应用	207
9.6	GPS 在航天中的应用	209
9.7	GPS 在航海导航定位中的应用	210
参考文献		212

第1章 绪 论

1.1 全球卫星定位系统的发展

1957年10月4日,世界上第一颗人造地球卫星发射成功,开创了空间技术造福人类的新时代。

随着更多的人造地球卫星入轨运行,利用人造地球卫星进行定位测量已成为现实。20世纪60年代卫星定位测量技术问世,并逐渐发展成为利用人造地球卫星解决大地测量问题的一项空间技术。追溯卫星定位测量技术的发展过程,大致可归结为三个阶段,即卫星三角测量,卫星多普勒定位测量和GPS卫星定位测量。

1.1.1 卫星三角测量

卫星定位测量的初期,地球人造卫星仅仅作为一种空间的动态观测目标,由地面上的测站拍摄卫星的瞬时位置而测定地面点的坐标,称为卫星三角测量。设 A 、 B 是地面上两个已知点, C 是待定点(见图1-1), A 、 C 两个测站上用卫星摄影仪(记时照相机)同步拍摄卫星 S_1 的相片,由此得到的摄影底片既有卫星 S_1 在两张相片上的同步影像 S_A 和 S_C ,又有某些恒星的影像 S^* 。在天文年历中可查出恒星 S^* 的坐标,并以此为起算数据在相片上量算 S_A 和 S_C 的坐标,进而推算方向 AS_1 和 CS_1 ,获得同步平面 ACS_1 。用同样的方法观测另一颗卫星 S_2 ,可得另一同步平面 ACS_2 。两平面的交线即弦 AC 。

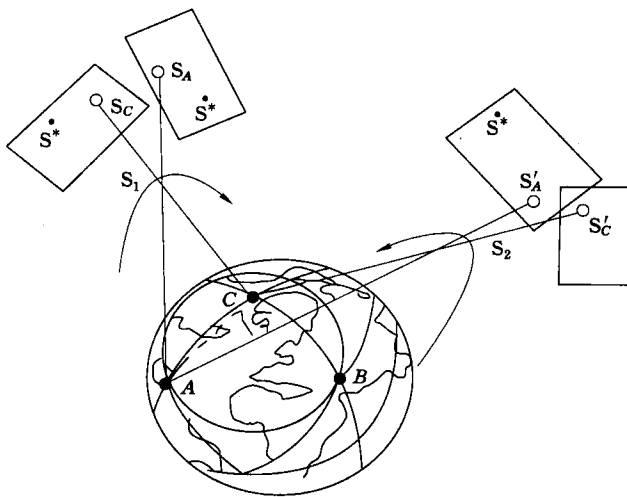


图 1-1 卫星三角测量原理

类似地,在 B 、 C 设站,同样观测卫星 S_1 和 S_2 ,则可得弦 BC 。

弦 AC 与 BC 的交点,即待定点 C 。如果 A 、 B 两测站位于大陆,而 C 点在远海岛屿上,则用上述卫星三角测量的方法可实现大陆与海岛间的联测定位,这是常规大地测量技术所不及的。

1966~1972 年间,美国国家大地测量局(NGS)在美国和联邦德国测绘部门的协作下,应用上述卫星三角测量的方法,测量了具有 45 个测站的全球三角网,并获得了 5 m 的点位精度。但是,卫星三角测量资料处理过程复杂,且定位精度不高,不能获得待定点三维地心坐标,因此,目前已成为一种过时的测量技术。卫星三角测量是卫星定位测量发展历史的初级阶段,随着科学技术的进一步发展,卫星定位测量也由初级阶段进入高级阶段。

1.1.2 卫星多普勒定位测量

苏联的 Sputnik—1 卫星入轨运行后不久,美国约翰斯霍普金斯(Johns Hopkins)大学应用物理实验室(APL)的韦芬巴赫(G. C. Weifenbach)和基尔(W. H. Guier)等学者,在地面已知坐标点位上,用自行研制的测量设备捕获和跟踪到了苏联卫星发送的无线电信号,并测得它的多普勒频移,进而用它解算出了苏联卫星的轨道参数。依据这项试验成果,该实验室的麦客雷(F. T. Meclure)等学者设想了一个“反向观测方案”:若已知在轨卫星的轨道参数,地面上的观测者又测得该颗卫星发送信号的多普勒频移,则可计算出观测者的点位坐标。这个设想,成了第一代卫星导航系统的基本工作原理,将导航卫星作为一种动态已知点,测量卫星信号的多普勒频移并通过计算实现海洋船舶等运动载体的导航定位。1958 年 12 月该实验室在美国海军的资助下,开始用上述原理研制一种卫星导航系统,称为美国海军卫星导航系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS),因为这些导航卫星是沿着地球子午圈的轨道运行——轨道绕过地球的南北两极上空,故又称为子午卫星(Transit)导航系统。1959 年 9 月,第一颗实验性子午卫星入轨运行,至 1961 年 11 月,美国先后发射 9 颗实验性子午卫星。经过几年的试验研究,解决了卫星导航的许多技术难题,于 1963 年 12 月发射了第一颗子午工作卫星。此后,陆续发射了数颗工作卫星,形成了由 6 颗工作卫星构成的子午卫星星座,成为世界上第一个卫星导航系统。在该星座信号的覆盖下,地球表面上任何一个观测者,至多间隔 2 h 便可观测到该星座中的一颗卫星。卫星轨道距离地面 1 070 km,轨道椭圆的偏心率很小,近于圆形,每一个轨道上运行一颗子午卫星。子午卫星沿轨道运行的周期约为 107 min。每一颗子午卫星均以 400 MHz 和 150 MHz 频率的微波信号作为载波,向用户发送导航电文。子午卫星星座运行初期,导航电文是保密的。1967 年 7 月 29 日,美国政府宣布,解密子午卫星所发送的导航电文部分内容供民间使用。此后,利用子午卫星所发送的导航信号和导航电文进行导航定位测量的技术,迅速地普及到世界上许多国家。

1.1.3 GPS 卫星定位测量

20 世纪 60 年代末美国着手研制新的卫星导航系统,以满足海陆空三军和民用部门对导航越来越高的要求。美国海军提出了名为“Timation”的计划,该计划采用 12~18 颗卫星组成全球定位网,并于 1967 年 5 月 31 日和 1969 年 9 月 30 日分别发射了 Timation—1 和 Timation—2 两颗试验卫星。与此同时,美国空军提出了名为“621—B”的计划,采用 3~4 个星群覆盖全球,每个星群由 4~5 颗卫星组成。考虑到这两个计划的优缺点以及军费负担等原因,1973 年 12 月 17 日美国代理国防部长批准了建立新的卫星导航

定位系统计划,为此成立了联合计划局,并在洛杉矶空军航空处内设立了由美国陆军、海军、海军陆战队、国防制图局、交通部、北大西洋公约组织和澳大利亚的代表组成的办事机构,开始进行系统的研究和论证工作。1978年第一颗试验卫星发射成功,1994年顺利完成了24颗卫星的布设。

该系统全称为“卫星授时与测距导航系统”(Navigation by Satellite Timing and Ranging Global Positioning System, NAVSTAR GPS),简称全球定位系统(GPS)。拟议中的GPS不仅集成了以前所有的单用途卫星系统功能,并且致力于更广泛的用途。据前GPS联合项目组主任Pakison称,最初的设计有两个目标:①在GPS定位的帮助下,五发炮弹可以穿过同一洞口。②建立廉价的导航设备(低于1万美元)。该系统具有三大优越性:①全能性:能在空中、海洋、陆地等全球范围内进行导航、授时和定位及测速。②全球性:在全球的任何地点都可进行定位。③全天候:白天黑夜都可以定位。

GPS是美国继阿波罗登月计划和航天飞机之后的第三大空间工程。GPS计划实施共分三个阶段:

第一阶段为方案论证和初步设计阶段。从1973年到1979年,共发射了4颗试验卫星,研制了地面接收机及建立了地面跟踪网,从硬件和软件上进行了试验。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,又陆续发射了7颗试验卫星。这一阶段称之为Block I。与此同时,研制了各种用途的接收机,主要是导航型接收机,同时测地型接收机也相继问世。试验表明,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14 m。由此证明,GPS计划是成功的。

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。这种工作卫星称为Block II和Block II A卫星。这两组卫星的差别是:Block II A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 d用的导航电文(每天更新三次);而Block II A卫星能存储供180 d用的导航电文,确保在特殊情况下使用GPS卫星。实用的GPS网即(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的提出到1993年建成,经历了20年,实践证实GPS对人类活动影响极大,应用价值极高,所以得到美国政府和军队的高度重视,不惜投资300亿美元来建设这一工程,成为继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的第三项庞大空间计划。它从根本上解决了人类在地球上的导航和定位问题,可以满足各种不同用户的需要。对舰船而言,它能在海上协同作战,在海洋交通管制、海洋测量、石油勘探、海洋捕鱼、浮标建立、管道和电缆铺设、海岛暗礁定位、海轮进出港引航等方面作出了巨大贡献;对飞机而言,它可以在飞机进场着陆、航线导航、空中加油、武器准确投掷及空中交通管制等方面进行服务;在陆地上,可用于各种车辆、坦克、陆军部队、炮兵、空降兵和步兵等的定位;可用于大地测量、摄影测量、野外考察和勘探的定位,甚至进入到人们的日常生活中,如汽车、旅游、探险、狩猎等方面的定位;特别是用于精密定位的测地型接收机的出现,给大地测量带来了革命性的变化,成为GPS应用的重要分支,在空间技术方面,可以用于弹道导弹的引导和定位、空间飞行器的精密定轨等。总之,GPS定位系统的建立,给导航和定位技术带来了巨大的变化。

1.2 GPS 及其应用特点

1.2.1 GPS 概论

GPS 是全球性的卫星定位和导航系统,能提供连续的、实时的位置、速度和时间信息。整个系统包括空间卫星、地面监控站和用户接收机三部分。空间部分有 24(21+3)颗卫星,均匀分布在 6 个倾角为 55° 的近似圆形的轨道上,每个轨道有 4 颗卫星。轨道距地面平均高度约为 20 200 km。卫星绕地球一周需要 11 h 58 min。这样,地球上任何地方,任何时刻都能收到至少 4 颗卫星发射的信号。

每颗 GPS 卫星可连续地发送两个 L 频带的无线电载波: L_1 为 1 575.42 MHz, L_2 为 1 227.60 MHz。载波上调制了多种信号,用于计算卫星位置、辨别卫星和测量站星距离等。

GPS 测量有两种基本的观测量:“伪距”和载波相位。接收机利用相关分析原理测定调制码由卫星传播至接收机的时间,再乘以电磁波传播的速度便到距离,由于所测距离受大气延迟和接收机时钟与卫星时钟不同步的影响,它不是几何距离,故称之为“伪距”。载波相位测量是把接收到的卫星信号和接收机本身的信号混频,从而得到拍频信号,再进行相位差测量,相位测量装置只能测量载波波长的少数部分,因此所测的相位可看成是波长整数未知(也称整周模糊度)的“伪距”。由于载波的波长短(L_1 为 19.03 cm, L_2 为 24.42 cm),所以测量的精度比“伪距”高。

GPS 定位时,把卫星看成是“飞行”的已知控制点,利用测量的距离进行空间后方交会,便得到接收机的位置。卫星的瞬时坐标可以利用卫星的轨道参数计算。

GPS 定位包括单点定位和相对定位两种方式。单点定位确定点在地心坐标系中的绝对位置。相对定位则利用两台以上的接收机同时观测同一组卫星,然后计算接收机之间的相对位置。定位测量时,许多误差对同时观测的测站有相同的影响。因此在计算时,大部分误差相互抵消,从而大大地提高了相对定位的精度。

影响 GPS 定位精度的因素有两个:一个是观测误差,另一个是定位时卫星位置的几何图形,后者称为定位几何因素,用 DOP 表示。设 δ 为定位误差, δ_0 为测量误差,则有:

$$\delta = \text{DOP} \cdot \delta_0。$$

DOP 取何种形式,取决于 δ 所代表的精度的含义,这在后面的内容里将详细讨论。目前, GPS 单点定位的精度为几十米,而相对定位精度可达(1~0.01) ppm。

1.2.2 GPS 的特点

(1) GPS 相对于其他导航系统的特点

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

① 全球地面(范围内)连续覆盖。由于 GPS 卫星的数目较多,其空间分布合理和运行周期经精心设计,可使地球上(包括水面和空中)任何地点在任何时候都能观测到至少 4 颗卫星(这是 GPS 定位系统获得解的必要条件),从而可以保证全球范围的全天候连续三维定位。

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。目前,利用不同测距码实时定位、测速与测时的精度如表 1-1 所列。

表 1-1 GPS 实时定位、测速与测时精度

采用的测距码	P 码	C/A 码
单点定位/m	5~10	20~40
差分定位/m	1	3~5
测速/(m/s)	0.1	0.3
测时/ns	100	500

随着 GPS 定位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。利用全球定位系统导航,可以实时地确定运动目标的三维位置和速度矢量,由此既可保障运动载体沿预定航线运行,也可实时地监视和修正航行路线,避开各种不利环境,以及选择最佳的航线,这是许多导航定位技术难以比拟的。利用全球定位系统一次定位和测速工作在一秒至数秒内便可完成(NNSS 需 8~10 min),这对高动态用户来说尤为重要。

④ 静态定位观测效率高。根据精度要求不同,GPS 静态观测时间从数分钟到数十天不等,从数据采集到数据处理基本上都是自动完成。而使用传统的测绘技术达到相同的精度则比较困难,且往往需要几倍乃至十几倍的观测时间并耗费大量人力和物力。

⑤ 抗干扰性能好,保密性强。由于 GPS 采用了伪随机噪声码技术,既节省电能,又使 GPS 卫星所发送的信号具有良好的抗干扰性和保密性。

⑥ 应用广泛。随着 GPS 定位技术的发展,其应用的领域不断拓宽。目前,在导航方面,它不仅已广泛地用于海上、空中和陆地运动目标的导航,而且在运动目标的监控与管理以及运动目标的报警与救援等方面,也已获得了成功应用;在测量工作方面,这一定位技术在大地测量、工程测量、工程与地壳变形监测、地籍测量、航空摄影测量和海洋测绘等各个领域的应用也极为普遍。如美国得克萨斯州的科学家通过配备在奶牛脖子上的 GPS 定位装置,跟踪它们的路线,观察奶牛饮水、吃草的区域和行进的路线,来研究水源、牧草分布等畜牧问题。牛脖子下的一个不到一磅重的 GPS 定位装置,采集并存储包括定位数据在内的几类数据,牛几乎不会注意到它的存在。再如联合制导攻击武器(Joint Direct Attack Munition, JDAM)是美国一种将常规炸弹经过改造使其具备精确打击能力的战术武器,主要是在常规炸弹上安装一个 GPS 收发装置,使其根据 GPS 系统提供的信息进行精确定位。美国军方称该技术具有极高的系统可靠性。自 1991 年海湾战争以后,JDAM 逐渐取代了昂贵的激光制导炸弹,成为美国空军的主要打击武器之一。

考虑到 GPS 主要是为满足军事部门高精度导航的需要而建立的,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 定位技术相对于经典测量技术的特点

GPS 定位技术的高度自动化和所达到的定位精度及其潜力(见表 1-1),使广大测量工作者对其产生了极大的兴趣。尤其是从 1982 年第一代测量型无码 GPS 接收机 Macro Meter 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 精密定位技术在测量工作中的应用展现

了广阔的前景。

1.3 美国政府的 GPS 政策

1.3.1 美国政府的限制性政策

为了保障其自身的利益与安全,美国政府采取了一系列限制措施,以防止非经美国政府特许的用户获得高精度定位信息。限制政策主要包括:

- ① 对不同的 GPS 用户,分别提供两种不同精度的定位服务。
- ② 实施选择可用性政策,即 SA 政策(已于 2000 年 5 月 1 日取消)。
- ③ 实施反电子欺骗防护措施,即 A—S 措施。

(1) 精密定位服务与标准定位服务

利用测距码(Ranging Code)信号确定站星之间的距离是 GPS 定位的关键技术之一。而在 GPS 卫星发送的电磁波信号中,调制了两种精度不同的测距码,即所谓 C/A 码(Coarse/Acquisition Code)和 P 码(Precise Code)。前者测距精度低,又称粗码;后者测距精度高,又叫精码。对应这两种不同的测距码,GPS 提供两种定位服务,即标准定位服务(Standard Positioning Service, SPS)和精密定位服务(Precise Positioning Service, PPS)。

PPS 主要提供 L_1 载波和 L_2 载波上的 P 码和 C/A 码以及导航电文。它所服务的对象是美国政府特许用户(Authorized Users)。所谓特许用户,除了美军及其盟军以外,还包括某些政府部门和经政府授权的民用用户。P 码具有良好的测距精度,加之双频观测(L_1 载波和 L_2 载波)可以有效削弱电离层弥散效应引起的误差,利用 PPS 单点实时定位的水平精度可达 5~10 m。然而可解调 P 码的接收机设备需特许用户才能获得,所以很难加以利用。

SPS 主要提供 L_1 载波上的 C/A 码以及导航电文,它服务的对象是非特许用户。由于 C/A 码的测距精度相对较低,又不能利用双频观测抑制电离层的影响,因此,用户所能获得单点实时定位的水平精度只有 15~20 m(在取消 SA 政策以后)。不过,美国政府承诺未来将在 L_2 载波上加载民用信号(2001 年 1 月曾进行过加载试验),这样非特许用户也可以利用双频观测削弱电离层引起的误差。SPS 单点实时定位的精度可望进一步提高。

(2) 可用性的选择

为了降低 SPS 的定位精度,自 1991 年 7 月美国开始对所有在轨的工作卫星实施选择可用性(Selective availability, SA)技术。该技术主要是利用人为加入的噪声干扰 GPS 基准信号和卫星星历,从而降低 C/A 码单点实时定位的精度。特许用户可以利用密匙自动消除 SA 的影响,而非特许用户在 SA 技术影响下,标准定位服务单点实时定位的水平精度降到约 100 m,且还可以根据需要加大干扰力度,进一步降低精度。

由于种种原因,美国政府于 2000 年 5 月 1 日已经停止了施加 SA 技术。

(3) 反电子欺骗

当 P 码已被破解,或者有人掌握了特许用户接收机接收的卫星信号的频率和 P 码相位,便可以发射“适当”频率的干扰信号,诱使特许用户产生错误的定位信息。为防止这种电子欺骗,美国政府采用反电子欺骗(Anti-Spoofing, A—S)技术。具体地说就是使用严格保密的 W 码,通过 P 码和 W 码模二相加,将 P 码转换成 Y 码。这时,非特许用户将无法继续应用 P 码进行精密定位或电子欺骗。

1.3.2 限制性政策下非特许用户的应对策略

美国政府的限制性政策无疑是出于对自身安全和利益的考虑,但这对包括美国本土在内的世界各国的广大非特许用户造成了不利影响。为了摆脱这种束缚,广大用户开展了许多研究和试验工作,并取得了一系列成果。目前采取的措施主要包括:

(1) 独立 GPS 测轨系统的建立

GPS 卫星定轨精度直接关系到定位精度,而卫星定轨主要是靠 GPS 卫星发送的“官方”广播星历。为了提高定轨精度,降低对广播星历的依赖性,一些非官方的民间机构和组织利用 GPS 卫星建立独立的跟踪系统,为广大的非特许用户提供精密卫星星历。显然,独立的定轨系统对摆脱美国政府的限制、促进对 GPS 的研究和广泛应用具有重要意义。

自美国政府宣布 GPS 将为民用提供服务后不久,美国、加拿大、澳大利亚以及一些欧洲国家的科研教育机构和组织纷纷开始筹建区域性或全球的精密测轨系统。进入 20 世纪 90 年代以后,其跟踪站已广泛分布在全球五大洲的几乎各个角落,形成一个跟踪网络,其定轨精度最高可达到分米级水平。所谓跟踪站(Satellite Tracking Station),相当于民用测轨系统的监测站。其设备和作用与 GPS 系统的官方监测站非常类似。从理论上讲,数量更多、分布更广的跟踪网所能获得的定轨精度将高于监测站。

1993 年,国际大地测量协会(the International Association of Geodesy, IAG)宣布成立国际地球动力学 GPS 服务组织 IGS(the International GPS Service for Geodynamics)。IGS 的任务主要是为大地测量、地球动力学和地球物理等学科领域提供服务,其次也为政府部门和某些商业组织的 GPS 应用提供数据支持。截至 2003 年 1 月 8 日,该组织所属的跟踪站就已达 348 个之多,其中也包括中国境内的跟踪站。IGS 跟踪网确定的 GPS 卫星星历的精度可达到厘米级,而且经过大量的研究和试验取得了许多的科研成果。这些研究对发展和普及 GPS 系统具有重要意义。

虽然利用 IGS 提供的精密星历可以获得很高的定位精度,但由于种种原因,这种全球独立测轨系统多数是应用在科研教育等领域,目前还难以对日常的生产生活产生影响。

(2) 差分定位系统的研究和开发

差分 GPS(Differential GPS, DGPS)定位的基本方式之一就是对观测值之间进行线性组合,通常是指 GPS 用户应用测距码进行实时相对定位的技术。例如,在一个测站对两颗卫星的观测量、两个测站对一颗卫星的观测量或一个测站对一颗卫星的两次观测量之间求差。由于在相邻两观测站上,SA 对同一 GPS 卫星观测值的影响具有很强的相关性,因此,在一定范围内,采用这一定位技术可以明显地减弱 SA,消除或削弱某些误差项(比如电离层和对流层引起的误差)的影响,显著提高定位的精度,是目前 GPS 用户为消除或减弱各种系统误差影响的有效措施之一,因而受到广泛的重视,应用极其普遍。

根据差分信号作用范围的不同,差分 GPS 定位可分为两类,即局域差分 GPS(Local Area Differential GPS, LADGPS)和广域差分 GPS(Wide Area Differential GPS, WADGPS)。前者作用范围较小(如 150 km),主要提供综合的差分 GPS 改正信息;后者作用范围较大(一般超过 1 000 km 甚至全球范围),主要是针对具体的误差源提供改正信息。

20 世纪 90 年代中后期,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)开始建立广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)。该系统有较大的覆盖范围,主要为民用航空器的飞行和起降提供导航。其工作原理是:首先由地面的参考站

(Wide-Area Reference Station)采集 GPS 信号并传送给主控站(Wide-Area Master Station),主控站获取数据后经计算求得差分改正信息,再将改正信息传送至地球站(Ground Earth Station),由地球站将改正信息上传给在轨的地球同步卫星(Geostationary Earth Orbit Satellite),最后由地球同步卫星向广大用户播发 WAAS 差分信号。该系统于 2000 年 8 月开始投入使用,其动态定位水平精度可达到 3~5 m,垂直精度可达到 3~7 m。

静态差分定位可以达到毫米级精度,广泛应用于精密工程测量、工程与地壳变形监测、灾害预报以及地球动力学等领域。

应当指出,为了克服美国采取限制政策的影响,进一步改善 GPS 接收机对卫星信号的跟踪技术,一些学者正在致力于开发新的数据处理方法和软件,如应用 P-L₁L₂w 技术、L₁和 L₂ 交叉相关技术,使 L₂ 载波相位观测值得以恢复,其精度与使用 P 码相同;还有窄相关技术,使得 C/A 码的多路径效应大大降低,使得用 L₁ 波段的伪距测量精度接近 P 码技术。这一工作对于发展和普及 GPS 定位技术、提高定位精度均具有重要的现实意义。

(3) 独立导航定位系统的建立

GPS 虽是军民两用的卫星导航系统,实则完全由美国政府握柄。它能随时施加具有可伸缩性的限制政策,其他国家难免受制其中。于是,俄罗斯、欧共体、中国等一些国家和地区开始发展自己的卫星导航系统。

(4) GPS 与 GLONASS 兼容接收机, GPS、GLONASS 与 Galileo 相兼容接收机的开发

由于 GPS 与 GLONASS 在系统的构成、工作卫星的数目、工作频段及定位的原理等方面都是类似的,所以,研究与开发能同时跟踪、观测两系统卫星信号的兼容接收机,受到世界各国的重视。

1996 年,Ashtech 公司开发生产出 GG24 和 GGRTK 接收机,能同时接收 GPS 和 GLONASS 两个系统的卫星信号进行定位。GPS/GLONASS 一体化接收机的开发,不仅增加了可视卫星数目,改善了观测卫星的几何分布,更为重要的是 GLONASS 无 SA 技术限制,可以有效地减弱美国限制性政策的影响,提高了导航定位的安全性、可靠性和精确性,也保证了在有障碍物影响情况下同步观测卫星的个数和定位精度。

1.4 现有卫星导航定位系统

1.4.1 GLONASS

全球轨道导航卫星系统(Global Orbiting Navigation Satellite System, GLONASS)是前苏联研制建立的,1978 年开始研制,1982 年 10 月开始发射导航卫星。自 1982 年至 1987 年,共发射了 27 颗 GLONASS 试验卫星。该系统与 GPS 系统极为相似(见表 1-2)。它由 24 颗卫星组成卫星星座(21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星),均匀地分布在 3 个轨道平面内。卫星高度为 19 100 km,轨道倾角为 64.8°,卫星的运行周期为 11 h 15 min。GLONASS 卫星的这种空间配置,保证地球上任何地点、任何时刻均至少可以同时观测到 5 颗卫星。

GLONASS 是前苏联为满足授时、海陆空定位与导航、大地测量与制图、生态监测研究等需要而建立的。GLONASS 提供两种导航信号:标准精密导航信号(SP)和高精密导航信号(HP)。SP 定位与授时服务适用所有 GLONASS 的国内用户,其水平定位精度为 57~70

m(99.7%置信);垂直定位精度为 70 m(99.7%置信),速度矢量测量精度 15 cm/s(99.7%置信),时间测量精度在 1 mks(99.7%置信)。

表 1-2 GPS 与 GLONASS 参数的比较

参 数	GPS	GLONASS
轨道数	6,间隔 60°	3,间隔 120°
卫星分布/轨道	4,不均匀分布	8,均匀分布
轨道倾角	55°	64.8°
轨道半径	26 560 km	25 510 km
轨道周期	1/2 恒星日(11 h 58 min)	8/17 恒星日(11 h 15 min)
地面重复跟踪	每个恒星日	每 8 个恒星日
载波信号	1 575.42 MHz 1 227.60 MHz	(1602+K×9/16) MHz (1246+K×7/16) MHz, K 为通道数
编 码	每颗卫星不同,码分制	所有卫星相同,频分制
调制码	C/A,P	C/A,P
码率(P)	10.23 MHz	5.11 MHz
码率(C/A)	1.023 MHz	511 kHz
星历数据表示方式	开普勒轨道公式	大地直角坐标系
坐标系	WGS-84	SGS-85
信 号	SS/BPSK	SS/BPSK
时钟数据	时钟偏差、频率偏移、频率速率	时钟和频率偏移
轨道数据	每小时修正开普勒轨道参数	卫星位置,速度和加速度,每隔半小时一次

1.4.2 建设中的伽利略(Galileo)卫星导航定位系统

Galileo 系统的卫星星座,是由 30 颗(27 颗工作卫星+3 颗在轨备用卫星)Galileo 卫星组成。这 30 颗卫星均匀分布在 3 个轨道上,Galileo 卫星的轨道高度 23 616 km,轨道倾角为 56°。它与 GPS 卫星星座相比较的主要参数如表 1-3 所示。

表 1-3 Galileo/GPS 卫星星座的主要参数

参 数	星座名称	
	Galileo	GPS
卫星数/颗	27	24
轨道数/个	3	6
卫星轨道高度/km	23 616	20 200
卫星轨道倾角/(°)	56	55
卫星升交点进动率/[°/d]	-0.04	-0.04

Galileo 系统的主要特点是多载波、多服务和多用户。它除具有与 GPS 系统相同的全球导航定位功能外,还具有全球搜寻救援(Search and Rescue, SAR)功能。为此,每颗

Galileo卫星还装备一种援救收发器,接收来自遇险用户的求援信号,并将它转发给地面援救协调中心,后者对遇险用户进行援救。与此同时,Galileo系统还向遇险用户发送救援安排通报,以便遇险用户等待救援。

1.4.3 北斗导航系统

北斗导航系统(COMPASS)是全天候、全天时提供卫星导航信息的区域导航系统,此系统由定位于赤道上空的两颗地球同步卫星、地面中心站、用户终端三部分组成的,卫星编号分别为“北斗一号”、“北斗二号”。3颗“北斗一号”卫星分别于2000年10月31日凌晨0时02分、2000年12月21日0时20分和2003年5月25日在西昌卫星发射中心用长征—3A运载火箭成功地将其发射升空,并准确进入预定轨道。这标志着中国拥有自主研发的第一代卫星导航定位系统。

北斗导航系统在国际电信联盟登记的频段为卫星无线电定位业务频段,上行为L频段(频率1 610~1 626.5 MHz),下行为S频段(频率2 483.5~2 500 MHz);登记的卫星位置为赤道面东经80°、140°和110.5°(最后一个为备份星星位)。

双星定位原理由陈芳允院士提出。双星定位系统实际上综合了卫星导航和卫星通信两种技术,因而兼容了两者的功能。它由三部分组成:两颗相隔一定距离的静止轨道卫星、用户终端和地面控制中心。有两副天线分别对准两颗静止卫星,工作时,地面控制中心天线1定时经卫星1向用户询问是否服务。用户终端平时处于只收不发信息的状态,一旦需要服务,用户终端的回答信号将经过卫星1和卫星2传回地面控制中心。根据所测得的信号往返时间,可以算出地面控制中心分别到两颗卫星再到用户终端的距离。由于卫星的位置是已知的,所以可以利用这两个距离测量数据进一步推算确定用户位置的经纬度。最后,地面控制中心就可将该定位信号经卫星1传给用户终端。由于定位过程是连续的,因此用户还能得到自己运动的速度和方向。

目前,该系统可提供四大功能:快速定位、实时导航、简短通信、精密授时。

(1) 快速定位

地面中心站发出的测距信号(具体为格式化的帧结构及其伪码)含有时间信息,经过卫星—用户终端站—卫星,再回到中心站,由出入站信号的时间差可计算出距离。

优先级最高的用户从用户终端站发射应答信号到用户终端站到定位结果,可在1 s之内完成。定位精度高,一般为几十米,可提高到10 m以内。

(2) 实时导航

对运动用户提供前进距离和方位的业务称为导航。由于本系统的全部数据处理集中于地面中心站,中心站有庞大的数字化地图数据库和各种丰富的数字化信息资源,地面中心站根据用户终端站的定位信息,参考地图数据库可迅速地计算出用户前进目标的距离和方位,可对用户终端站发出防碰撞的紧急报警,可通知有关部门对出事地点进行紧急营救等。

(3) 简短通信

实现无线电通信的基本条件是:线路要是双向的,每一端既能发射又能接收;双方各有特定识别码,既不会送错又不会被第三者所接收;通信电文预先约定,能够互相译出。本系统的地面中心站和用户终端站收发机具备这几个条件,因为系统是双向闭合环路,每个终端站收发机都有专用识别码。终端站收发机随机地响应某一时刻的询问信号(又叫测距信号),响应信号和询问信号的帧格式结构中都有通信信息段。终端站向领导机关请求指示或

与某终端站联系时,用收发机的信息键盘键入对方地址码(专用识别码)和通信电文,随响应信号送入地面中心站。地面中心站收到这个终端站的响应信号后,译出要联系的终端站地址和通信电文。中心站把通信电文放入要联系的终端站能够解出通信码的信息中,随询问信号发射出去,对应终端站或领导机关便可得到通信信息。非对应地址码的终端站解不出通信段内容,只出现干扰噪声,需要回答的终端站,只需重复上述过程。伪码相关接收保证了通信只在特定终端站之间进行。通信信息段的容量决定了通信的速度和可参加通信的终端站数量。实际上,定位终端站的位置数据也是作为通信信息发给终端站的。注册用户用连续传送方式可以传送多达 120 个汉字的信息。

(4) 精密授时

授时与通信、定位是在同一信道中完成的。地面中心站的铯钟产生标准时间和标准频率,通过询问信号将时标的时间码送给终端站。授时终端站与普通定位和通信终端站的不同之处在于有一个解码器和一个计数器。解码器解出询问信号的时间码,计数器记录时间码的时标与终端站钟的钟差。由于信号空间传播的时间延迟,计数器记录的钟差是伪钟差。通过终端站的响应信号,地面中心站计算出时延,连同 UTC(世界协调时)与 UT1(授时终端站当地时)的改正数一起送给终端站,终端站便可将伪钟差减时延而得到终端站钟的 UTC 标准时间,或再加改正数得到 UT1 标准时间。

本系统的伪码频率为 8 MHz,即码元宽度为 125 ns,以 1/25 的量化精度测量,则最小时间测量可到 5 ns,因而测量值可小于 10 s,是高精度的时间信息。根据不同的精度要求,利用授时终端,完成与北斗导航系统之间的时间和频率同步,提供 100 ns(单向授时)和 20 ns(双向授时)的时间同步精度。

第2章 卫星定位测量基础

坐标系统与时间系统是描述卫星运动、处理观测数据和表达观测站位置的数学与物理基础。所以,了解 GPS 卫星定位中常用的坐标系统和时间系统,熟悉它们各自之间的转换关系,对 GPS 用户来说,是极为重要的。本章将主要介绍天球坐标系与地球坐标系,不同坐标系统之间的转换模型、时间系统的概念以及 GPS 卫星运动规律及其位置计算的有关内容。

2.1 坐标系统

2.1.1 概述

在 GPS 定位中,卫星定位最根本的任务是通过安置在地球表面的 GPS 接收机同时接收 4 颗以上的 GPS 卫星发出的信号,测定接收机在空间相对于参考坐标系的位置。观测站固定在地球表面,其空间位置随同地球的自转而运动,而 GPS 卫星却总是围绕地球质心旋转且与地球自转无关。这样,在 GPS 卫星定位中,需要研究如何建立卫星在其轨道上运动的坐标系,并寻求卫星运动的坐标系与地面点所在的坐标系之间的关系,实现坐标系之间的转换。

在 GPS 定位中,通常采用两类坐标系统。一类是在空间固定的坐标系统,称之为空固系,这类坐标系统与地球自转无关,对于描述卫星的运行位置和状态极其方便。严格说来,卫星的运动理论是根据牛顿引力定律,在惯性坐标系统中建立起来的,而惯性坐标系统在空间的位置和方向应保持不变,或仅作匀速直线运动。但是,实际上严格满足这一条件是很困难的。在天体测量中,惯性参考系一般都是通过基本星表坐标系统来近似实现的。随着建立惯性参考系理论的日趋完善,以及卫星激光测距(Satellite Laser Range, SLR)、甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)等空间测量技术的不断发展,使得这一参考系得到不断改善。

另一类是与地球体相固联的坐标系统,称之为地固系,这类坐标系统由于与地球自转一致,对于表达地面观测站的位置和处理 GPS 观测成果尤为方便。它在经典大地测量学中,具有多种表达形式和极为广泛的应用。

应该指出,坐标系统的定义包括原点位置、坐标轴的指向和尺度三个要素。在 GPS 定位中,坐标系的原点一般取地球的质心,而坐标轴的指向具有一定的选择性。但是为了使用上的方便,国际上都通过协议来确定某些全球性坐标系统的坐标轴指向,这种共同确认的坐标系,通常称为协议坐标系。

2.1.2 天球坐标系

2.1.2.1 天球与天球坐标系

(1) 天球的基本概念

所谓天球,是指以地球质心 M 为中心,半径 r 为任意长度的一个假想的球体。在天文