

高等学校规划教材

“GPS”定位技术

张凤举 王宝山 编

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

“GPS”定位技术

张凤举 王宝山 编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书对全球定位系统(GPS)及其定位技术作了全面介绍。主要包括:GPS定位技术的由来和发展、GPS定位的坐标系统和时间系统、GPS系统的组成与GPS信号、GPS卫星定位原理、GPS卫星定位误差、GPS卫星定位网的布测、GPS卫星定位网的数据处理等。

本书是为适应高等院校测量工程专业的教学需用而编写的。除用作专业的教材之外,还可供测绘工作人员参考。

高等学校规划教材 “GPS”定位技术

张凤举 王宝山 编
责任编辑:陈贵仁

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092mm¹/₁₆ 印张 9 ¼

字数 216 千字 印数 1—3, 055

1997年8月第1版 1997年8月第1次印刷

ISBN 7—5020—1470—5/P128·15

书号 4239

定价 7.50 元

前 言

全球定位系统 (Global Positioning System—GPS) 作为新一代的卫星导航与定位系统, 以其全球性、全天候、高精度、高效益的显著特点, 已经引起了广大测量工作者的极大关注和兴趣。近 10 多年来, GPS 定位技术在它的基础研究、科学实验、硬件与软件开发、推广应用等方面获得了迅速发展, 取得了令人瞩目的成就。它标志着测量工程技术的重大突破和深刻变革, 对测量科学和技术的发展, 具有划时代的意义。

在这种形势下, 煤炭等系统各高校测量工程专业先后开设了有关 GPS 测量的课程, 收到了良好的效果。为了更好地适应教学需用, 我们编写了这本教材, 定名为《“GPS”定位技术》。

在编写工作中, 我们力求做到知识系统完整, 内容清晰易懂。以满足 40 学时左右的教学需用为基础, 同时使教材有一定的知识和信息的覆盖面, 朝着适用性、先进性、高水平、高质量四者相统一的目标努力。

本书由张凤举、王宝山等合作编写。其中张凤举执笔编写第一、三、四、五、六章; 王宝山执笔编写第二、七章。余世书编写过前三章部分初稿。最后由张凤举对书稿进行全面修改、定稿。

在本书编写过程中, 刘基余教授帮助审阅了部分书稿。编写时还参阅了许多书刊文献, 援引了包括《全球定位系统原理及其应用》(测绘出版社, 1993)、《GPS 卫星测量原理与应用》(测绘出版社, 1992) 在内的有关资料。在此谨向给予本书帮助的同志以及有关书刊作者表示衷心的感谢。

由于这是一门近几年新设置的课程, 教学经验积累尚少, 某些问题有待进一步学习和探索, 所以书中疏漏之处在所难免, 恳请读者批评指正。

编 者

一九九七年四月

目 录

前言

第一章 GPS 定位技术的由来和发展	1
第一节 卫星大地测量及其发展	1
第二节 导航定位卫星及其星座	4
第三节 美国的 GPS 政策与我国的 GPS 卫星跟踪网	8
第四节 GPS 定位在我国大地测量中的应用	10
第二章 GPS 定位的坐标系统和时间系统	14
第一节 参心坐标系	14
第二节 地心坐标系	17
第三节 天球坐标系	20
第四节 时间系统	22
第三章 GPS 系统的组成与 GPS 信号	26
第一节 GPS 定位系统的组成	26
第二节 卫星的运动及其轨道	29
第三节 卫星星历与卫星位置计算	33
第四节 GPS 卫星信号	37
第五节 GPS 信号的接收	44
第四章 GPS 卫星定位原理	50
第一节 GPS 定位的基本概念	50
第二节 伪距法定位	52
第三节 载波相位测量	56
第四节 GPS 动态定位原理	61
第五章 GPS 卫星定位误差	67
第一节 与卫星有关的误差	67
第二节 卫星信号传播误差	70
第三节 接收设备误差与图形强度	73
第四节 周跳分析与整周未知数的确定	75
第六章 GPS 卫星定位网的布测	80
第一节 建立 GPS 网的技术依据	80
第二节 GPS 定位网的布设	82
第三节 GPS 接收机的选择	86
第四节 GPS 定位网测设方案	92
第五节 外业观测	96
第六节 观测成果的外业检核及处理	100

第七章 GPS 卫星定位网数据处理	104
第一节 观测数据的预处理	104
第二节 基线向量的解算	108
第三节 GPS 基线网独立平差	115
第四节 坐标系统的转换	118
第五节 GPS 网与地面网的三维平差	125
第六节 GPS 网与地面网的二维平差	134
第七节 GPS 测高及其数据处理	139
参考文献	142

第一章 GPS 定位技术的由来和发展

近三十年来,由于卫星测量的发展,特别是 GPS 卫星全球定位系统的成功建立,使测绘行业经历了一场深刻的技术革命。无论是在定位精度、使用条件、应用范围,还是在经费节省、人力物力的减少等方面都产生了巨大的飞跃和进步,因此世界各国竞相研究并相继使用这种技术和方法。本章谨概略介绍卫星大地测量的发展和 GPS 定位的有关情况。

第一节 卫星大地测量及其发展

一、大地测量发展概况

纵观大地测量的发展史,大体上可分为古代大地测量、经典大地测量和现代大地测量三个阶段。古代大地测量要追溯到两千多年前,从人们确认地球是个圆球并测量它的大小算起,到 18 世纪中叶以前为止。在这一阶段中,许多科学家为证明地球是个圆球并测定其大小作出了艰辛的努力,他们不但要寻求科学的方法去研究地球,而且还要与当时的宗教等顽固势力作斗争,有的甚至为此付出了生命。

从 18 世纪中叶牛顿、克莱劳建立地球为扁球的理论并用几何和物理的方法测定其形状和大小,到 20 世纪中叶莫洛琴斯基在斯托克斯理论的基础上建立现代地球形状理论基础为止的这 200 年时间为经典大地测量阶段。

在经典大地测量阶段,大地测量的主要任务是为测绘地形图服务。为了提高点位测定的精度和速度,人们在测量方法、测量仪器、椭球计算和数据处理等方面作了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果。这些成果,现在仍被广泛应用,如三角测量、重力测量、最小二乘法等。

现代大地测量阶段从 20 世纪中期开始,是在电子技术和空间技术迅猛发展的推动下形成的。其中,电磁波测距改变了经典测量中全靠测角的低精度状况,一跃而将测量成果精度提高到 10^{-6} 量级;电子计算机缩短了作业周期,且使过去无法实现的严密理论计算得以实行;特别是人造卫星和空间技术的发展,突破了经典大地测量在点位、时间、应用、精度等方面的局限性,使测量产生了划时代的飞跃。

现代大地测量的主要任务是研究和解决地面点的几何定位、地球重力场的测定、点位和重力场的变化等问题,具体包括:

- (1) 建立与维护国家、地区及全球的大地网,并研究其变化;
- (2) 测量并研究地极移动、地壳运动、潮汐等地球动力现象;
- (3) 测定地球重力场及其变化。

随着人造地球卫星的发射成功,人们在现代大地测量的基础上步入了大地测量新的时期——卫星大地测量。自 1958 年人造地球卫星上天以来,迅速发展的卫星大地测量在空间技术和地球科学等方面发挥了极其重要的作用。特别是在海湾战争中,除了显示现代武器和现代其他科学技术的巨大优越性以外,同时还显示了现代导航和定位技术在军事上所发挥的巨大作用。

二、卫星大地测量的兴起

卫星大地测量就是利用卫星信息实现大地测量的目的，其作用分为如下几方面：

(1) 精确测定地面点在地心（质心）坐标系内的坐标，从而能够将全球大地网连成整体，建成统一的大地测量坐标系统。正因为如此，卫星大地测量极大地优于常规大地测量，能在对常规大地测量来讲极困难的地区布设控制网，进行海岛联测、海上定位等，并能加强国家天文大地网，以提高其精度。

(2) 精确测定地球的大小和形状、地球外部引力场、地极运动、大陆板块间的相对运动以及大地水准面的形状，为大地测量和其他科学技术服务。

(3) 广泛地用于空中和海上导航，矿产勘探及军事等方面。

卫星大地测量初期，争相使用光学摄影法，如在1962年~1965年期间，美国斯密森天体物理天文台(SAO)。曾用光学摄影法进行了全球性的卫星测量，对北美NAD、欧洲EUA、澳大利亚AND、日本JAD、阿根廷ARG、夏威夷HAW等大地系统进行了联测，利用39个站的观测资料计算并发布了“标准地球Ⅱ”。1966~1971年间又用更多的观测站进行了观测，当时的方向观测精度为 $\pm 0.3'' \sim 1.5''$ ，点位中误差为 $\pm 6.7\text{m}$ ，地心坐标中误差为 $\pm 17 \sim 32\text{m}$ 。可见其精度是有限的，且观测条件受限制，底片处理也很复杂，所以以后就较少应用。

与此同时，激光测距法伴随出现，即在地面测站上用激光测距仪对卫星进行测距，以达到定轨定位的目的，测距精度可达到厘米级，但用这种方法定位要有四个站组成较好的图形，实行同步观测，这对大面积布网来说是很困难的，因此未能普及开。

由于前述两种方法的精度和使用条件受到限制，人们便采用无线电技术，即利用卫星发射的无线电波进行距离测量，这种方法具有全天候等优点，因而发展很快，卫星多普勒定位就是在这—时期发展起来并成功而广泛地用于导航和定位中，如美国海军导航系统(NNSS)，即“子午卫星”导航系统就是成功的一例。

子午卫星(NNSS)系统是美国第一代卫星导航系统，它的投入使用，充分显示了利用人造地球卫星进行导航定位的优越性。该系统由三部分（即空间部分、地面监控部分和用户部分）组成。其空间部分由六颗高约1000km的卫星组成，这些卫星分布在6个轨道平面内，每个轨道平面相对于地球赤道的倾角约为 90° ，即卫星在子午面内运行，所以称为子午卫星，轨道近于圆形，运行周期约120min（分钟）。卫星发播400MHz和150MHz两种频率的载波供用户和监测站接收。其中，在400MHz载波中用导航电文向用户提供卫星星位和时间等信息，便于用户解算位置。地面监控部分由卫星跟踪站、计算中心和注入站组成，其作用是将跟踪观测卫星的结果输入计算中心，计算卫星在相应时刻的轨道参数，再由注入站以导航电文的形式将这些参数和其它有关内容注入卫星存储器，供卫星按时提供给用户。用户部分即用户接收机接收卫星信号、测量多普勒频移，结合导航电文计算卫星与接收机间的距离，据此解算出接收机（用户）的位置。

由于子午卫星的轨道平面与地球赤道的倾角约为 90° ，所以子午卫星几乎是在地球子午面内运行，经度与接收机高程相关，只有高程已知时才能解出经度和纬度。可见NNSS系统只能提供二维导航解，且是单星多普勒法，须卫星运行一个时间段后才能获得一次导航解，精度也只优于40m。又由于卫星较低，覆盖面积小，星数又少，须相隔1.5h（小时）左右才能进行一次定位。可见子午卫星导航系统虽显示了导航的优越性，但又存在着精度低，不能实时导航和只提供二维导航解等缺陷。这些缺陷是由子午卫星导航系统的“单星、低

轨、测速”体制决定的。对于要求高精度、高动态、三维解的用户来讲，显然无法使用。于是美国决定研制第二代卫星导航系统——GPS 系统。

三、GPS 定位的基本概念

测量工作的直接目的是要确定地面点在空间的位置。早期解决这一问题都是采用天文测量的方法，即通过测定太阳或其它天体的高度角和方位角以及观测时间，进而确定地面点在该时间的经纬度位置和某一方向的方位角。这种方法不仅定位精度低，而且受到了天候条件的制约。

20 世纪 60 年代以后，随着空间技术的发展和人造卫星的相继升空，GPS 定位应运而生。

可以想象，如果在绕地球运行的人造卫星上装置有无线电信号发射机，并且在卫星钟的控制下按预定方式发射测距信号。此时若在地面待定点上再安置上信号接收机，则在接收机钟的控制下，可以测定信号到达接收机的时间 Δt ，进而求出卫星和接收机之间的距离：

$$S = c \cdot \Delta t + \sum \delta_i \quad (1-1)$$

式中 c ——信号传播的速度；

δ_i ——各项改正数。

事实上，卫星钟和接收机钟不会严格同步，假如卫星的钟差为 v_t ，接收机的钟差为 v_T ，则由于卫星钟和接收机不同步对距离的影响为：

$$\Delta S = c (v_t - v_T) \quad (1-2)$$

现在欲确定待定点 P 的位置，可以在该处安置 GPS 接收机。如果在某一时刻 t_i 同时测得了 4 颗 GPS 卫星 (A, B, C, D) 的距离 $S_{AP}, S_{BP}, S_{CP}, S_{DP}$ ，则可列出 4 个观测方程为：

$$\left. \begin{aligned} S_{AP} &= [(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_A)^2]^{\frac{1}{2}} + c (v_{iA} - v_T) \\ S_{BP} &= [(x_P - x_B)^2 + (y_P - y_B)^2 + (z_P - z_B)^2]^{\frac{1}{2}} + c (v_{iB} - v_T) \\ S_{CP} &= [(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2]^{\frac{1}{2}} + c (v_{iC} - v_T) \\ S_{DP} &= [(x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2 + (z_P - z_D)^2]^{\frac{1}{2}} + c (v_{iD} - v_T) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 $(x_A, y_A, z_A), (x_B, y_B, z_B), (x_C, y_C, z_C), (x_D, y_D, z_D)$ 分别为卫星 (A, B, C, D) 在 t_i 时刻的空间直角坐标； $v_{iA}, v_{iB}, v_{iC}, v_{iD}$ 分别为 t_i 时刻 4 颗卫星的钟差，它们均可以由卫星所广播的卫星星历来提供。

求解上列方程，即得待定点的空间直角坐标 x_P, y_P, z_P 。

由此可见，GPS 定位的实质就是根据高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据，采用空间距离后方交会的方法，确定待定点的空间位置。

GPS 系统的空间部分由 21 颗工作卫星及 3 颗备用卫星组成，它们均匀分布在 6 个相对于赤道的倾角为 55° 的近似圆形轨道上，每个轨道上有 4 颗卫星运行，它们距地面的平均高度为 20200km，运行周期为 12 恒星时。GPS 卫星星座均匀覆盖着地球，可以保证地球上所有地点在任何时刻都能看到至少四颗 GPS 卫星。

GPS 定位技术自从应用于测量工程，就以其特有的自动化、全天候、高精度的显著优势令经典大地测量刮目相看，具体表现为：

(1) 选点灵活，无需通视：在经典大地测量中，既要求点位之间有良好的通视条件，又要求点位形成良好的图形结构，这是长期困扰选点工作的难题。而 GPS 定位既不要求点位

之间通视，又对点位图形结构没有过苛要求，使点位选择极为灵活，大大便利了点位的应用。

(2) 精度提高，耗费降低：实践已经表明，在 1000km 的距离上，相对定位精度可以达到 10^{-8} ；在 100~500km 的距离上，相对定位精度可以达到 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ ；在小于 50km 的距离上，相对定位精度可以达到 10^{-6} 。而另一方面，造价昂贵、又极易遭受破坏的测量觇标又无需建造。它们的优越性是经典大地测量工作无法攀比的。

(3) 操作简便，效益增加：GPS 定位的自动化程度很高，作业人员只限于安置仪器、开关仪器、量取仪器高和监视工作状态，其它如卫星捕获、跟踪观测、数据采集等均由仪器自动完成，加之仪器本身重量轻、体积小，携带又较方便，大大降低了作业难度，提高了工效。其次，GPS 定位的结果，可以直接提供点的三维坐标，不仅可以精确确定点的平面位置，也为研究大地水准面的形状和确定地面点高程开辟了新途径。

(4) 全天候作业，变被动为主动：GPS 定位不受天气条件制约，可以在任何时间、任何地点从事作业，加之观测时间缩短、速度加快，便利了人们对测量工程的统筹安排，使工程计划具有较大的可行性，为准确快速提供测绘成果提供了可能性。

总之，GPS 定位技术的应用是传统测量工作的一场重大变革。

第二节 导航定位卫星及其星座

由于子午仪卫星导航系统在导航和定位的速度、位置和精度等方面都很大的局限性，而且只有二维导航解，所以美国决定研制第二代卫星导航系统，即全球定位系统 (GPS)。与此同时，前苏联也研制了另一种类似的系统，即 GLONASS (全球导航卫星系统)。此外，还有欧洲空间局研制的 NAVSAT (导航卫星系统)，以及美国和德国主要着眼于民用的卫星导航定位系统，如 Geostar 等。

一、GPS 卫星及其星座

1973 年，为了满足全球战略的需要，美国国防部批准其陆海空三军十多个单位共同组成联合计划局，开始执行 GPS 计划。在联合计划办公室的领导下，吸取其空军提出的“621-B”，计划和海军提出的“TIMATION”计划的优点，研制了 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System (缩写成 NAVSTAR/GPS)，即导航卫星测时和测距/全球定位系统，简称 GPS 定位系统，或直接简称为 GPS。

5 年后，即 1978 年 2 月 22 日，第一颗 GPS 实验卫星发射成功。11 年后，即 1989 年 2 月 14 日发射第一个工作卫星。到 1994 年 4 月为止，共发射 35 个 GPS 卫星。目前，在轨道上仍正常工作的只有 25 个卫星，其中 1 个是实验卫星，其余 24 个是工作卫星。1994 年 4 月 24 日美国国防部宣布：“GPS 系统已具备初步运作能力。”整个 GPS 系统经过一年的调试和检验后，美国国防部于 1995 年 4 月 27 日又宣布：“GPS 系统已具备全部运作能力”。意即在全世界任何地方、任何时候均实现了全天候导航、定位和定时。1994 年底，美国国防部宣布，“从 1995 年 1 月起，将在 GPS 卫星导航电文的空域补充新信息，使 GPS 的实时定位精度达到 1m”。这在理论和技术上是一重大突破。

历时 23 年、耗资 130 多亿美元的“GPS 计划”终于完成，真正成为名符其实的“全球定位系统”。这是卫星大地测量史上的里程碑，也是测绘历史中的一次深远的技术革命。

GPS 工作卫星的外部形态如图 1-1 所示。卫星发射进入轨道后，星体两侧各伸展出由

4 叶拼成的太阳能电池翼板,总面积为 7.2m^2 。两侧翼板受对日定向系统控制,可以旋转使电池翼面始终对准太阳,给 3 组 15A 的镉镍蓄电池不断充电,保证了卫星在地影区也能正常工作。GPS 工作卫星的主体呈圆柱形,整体的在轨重量为 843.68kg ,比实验卫星增重了 45% ,它的设计寿命为 7.5 年,事实上均能超过该设计寿命而正常工作。GPS 卫星采用的是螺旋形天线阵列和圆极化式发送射电信号,12 根螺旋形天线组成了天线阵列,其发射波束的张角大约为 30° ,可以覆盖卫星的可见地面。除了上述部分以外,卫星还包括入轨动力系统、反作用控制系统、姿态和速度控制系统、遥测和指令系统以及导航信号发送系统等。卫星姿态是采用三轴稳定方式,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。

GPS 系统主要是为美国海陆空三军服务的,它具有广泛的军事用途,例如,为地面部队迅速行动指明方位,为核潜艇导航,为弹道导弹制导,监测全球核爆炸,摄取全球性的军事情报,反潜艇,反导弹等等。因此,GPS 卫星的内部设备复杂而繁多,例如,为了战略部队的应急通讯,美国空军在 GPS 卫星上安装战略通讯机,其重量达 16.03kg ,体积为 0.0124m^3 ,采用 $240\sim 272\text{MHz}$ 、 $318\sim 400\text{MHz}$ 和 $7900\sim 8000\text{MHz}$ 的微波信号,辐射功率为 20W 。

GPS 定位是一种被动定位,必须建立高稳定的频率标准。因此每颗卫星上都必须安装高精度的时钟。当有 $1\times 10^{-9}\text{s}$ 的时间误差时,将引起 30cm 的距离误差。实验表明,一般原子钟能够提供高稳定度的频率。氢原子频率标准的稳定性最好,在 100s 至 1d 的时间内,氢原子频率标准的稳定度优于 1×10^{-14} ,比石英晶体频率标准要高出两个数量级以上。所以在每一个 GPS 工作卫星中,一般都要设置两台铷原子钟和两台铯原子钟,并计划将来采用氢原子钟。虽然 GPS 卫星发送几种不同频率的信号,但都来自同一个基准频率 10.23MHz 。所以只需启用一台原子钟,其余的作为备用,以备更替出现故障的时钟。

在 $1988\sim 1994$ 年间所建成的全球定位系统,包括 21 个工作卫星和 3 个在轨备用卫星,它们所组成的 GPS 卫星星座如图 1-2 所示。24 个卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,每

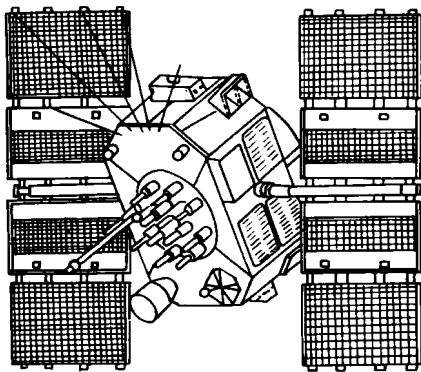


图 1-1 GPS 工作卫星

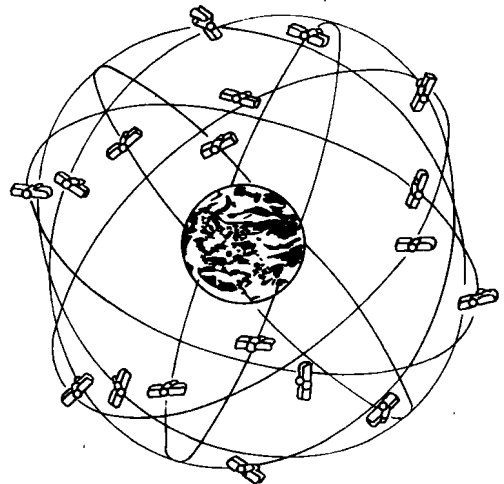


图 1-2 GPS 卫星星座

个轨道面内有 4 个卫星运行,距地面的平均高度为 20200km。6 个轨道面相对于地球赤道面的倾角为 55° ,各轨道面之间的交角为 60° 。当地球自转 360° 时,卫星绕地球运行两圈,几乎每 12h 环绕地球运行一圈。地面的观测者每天提前 4min 见到同一个卫星,可见时间约为 5h。这样,观测者至少也能观测到 4 个卫星,最多还可观测到 11 个卫星。

GPS 全球定位系统的成功建立和投入使用,可满足各种不同用户的需要,从根本上解决了人类可在地球的任何位置进行导航和定位的问题。在海上,可用于海上协同作战、海洋交通管理、石油勘探、海洋捕鱼、浮标建立、管道铺设、暗礁定位、海港领航等方面;在空中,可用于飞机导航、飞机会合、空中加油、武器投掷和空中交通管理等;在陆地上,可用于各种部队的定位、各种军事设施和其它设施的定位等;在空间技术方面,可用于导弹引航和定位、飞船的导航和定位等;在人们的生活中,如汽车、旅行、探险、狩猎等都可方便地使用。

二、前苏联 GLONASS 全球卫星导航系统

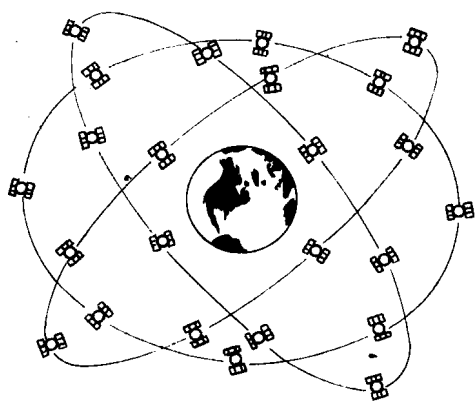


图 1-3 GLONASS 卫星星座

在广泛应用 GPS 的同时,前苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星导航系统优缺点的基础上,吸取美国 GPS 系统的成功经验,从 1982 年 10 月开始,逐步建立了第二代卫星导航系统——GLONASS 全球卫星导航系统。该系统计划在 1995 年前建成由 $(21+3)$ 颗卫星组成的 GLONASS 工作卫星星座,其中 21 颗卫星为工作卫星,3 颗为在轨备用卫星,它们均匀地分布在如图 1-3 所示的三个轨道平面内,平均高度为 19100km,轨道倾角为 64.8° ,运行周期为 11h15min,并以 $1.6 \times 10^3\text{MHz}$ 和 $1.2 \times 10^3\text{MHz}$ 的射电频率发射信号和传播电文。可见,GLONASS 系统与美国的 GPS 系统极为相似。

由于前苏联的 GLONASS 系统是悄悄建立的,所以其卫星信号的发送频率未予公开,但英国学者 S. A. Dale 和 P. Daly 根据其实际观测结果透露了 $1.6 \times 10^3\text{MHz}$ 和 $1.2 \times 10^3\text{MHz}$ 这一数据,而且仅 $1.6 \times 10^3\text{MHz}$ 的射电信号传送电文, $1.2 \times 10^3\text{MHz}$ 射电信号仅起削弱电离层影响的作用,甚至有的 GLONASS 卫星还不发送 $1.2 \times 10^3\text{MHz}$ 射电信号。

GLONASS 系统和美国的 GPS 一样,本来都是用于军事目的的,都属于单通道,即其信号都是由卫星发射传送到接收机。这样,当一个用户不能用自身的发射信号来传送其所在位置,并在未和主控站联系的情况下,就无法获得救助。这也就是它的缺点。

三、欧洲空间局的 NAVSAT 卫星导航系统

(一) NAVSAT 系统

NAVSAT 卫星导航系统是由欧洲空间局筹建的一种多用途定位系统,这个系统是一种民用系统,它和主要用于军事目的的 GPS 系统和 GLONASS 系统不同,正因为如此,它的卫星结构和接收机的操作均较为简单。这个系统也包括三大部分,即空间部分(卫星)、地面控制部分(地面控制设备)和用户(接收机)部分。

因为 NAVSAT 系统的设计原理类似于 Geostar,所以它的空间部分不象 GPS 那样复

杂，而将大部分复杂内容设置在地面上。各卫星只从多至六个控制站的控制网中接收简单的重复播送的信号，每个控制站以 C 带频率连续播送信号给该站的可见卫星。由于卫星的运行，当它离开该控制站的控制范围时，就通知下一个相邻控制站接替该站继续对这个卫星发送信号。发送的信号为包括一个强联系波 (CW) 的载波和带有大约 5MHz 的数据块速率的伪偶然噪声 (PRN) 码以及一个包含星历和其他数据的低比特速率电文流。然后卫星就原样重复播送这些导航用的 1.596MHz 和作为卫星控制的用于 C 带频率的信号。所有卫星都传送同样的频率和同样的 PRN 码，并用时间划分成多路接近格式来解决卫星间相互干扰的问题。每个卫星在停止了 133ms 后，都要按顺序播送大约两秒钟的信号。该系统的卫星上没有原子钟，而是在控制站上使用了同步原子标准钟以获得信号的频率稳定性。

自第一次建议建立 NAVSAT 系统以来，卫星星座的布局已被修改过，现在设计的星座 (如图 1-4 所示) 由地球同步轨道卫星 (GEO) 和高椭圆轨道卫星 (HEO) 组成混合卫星星座，在地球同步轨道上有六颗同步卫星，这六颗卫星应全部覆盖北半球；在高椭圆轨道上的 12 颗卫星则扩大对全球的覆盖。同步卫星上带有 NAVSAT 发射机应答器，因此可用于通讯。

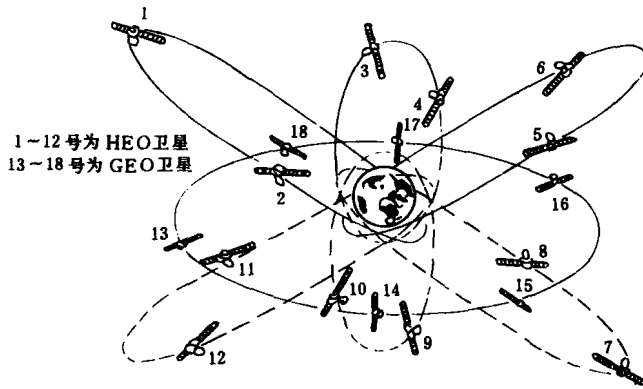


图 1-4 NAVSAT 星座

该系统可分别用于三种不同的用户：对那些中等精度 (约 100m 精度) 定位和导航精度要求的用户，只须通过 CW 载波用简单的多普勒模式的接收机就可以满足要求；对那些要求达到 5~10m 的高精度用户，可通过带有多普勒辅助伪噪声码 (PRN) 信号的伪距接收机

表 1-1 不同卫星定位系统的主要特征

卫星定位系统	星座卫星数目 (颗)	卫星平均高度 (km)	卫星运行周期 (min)	载波频率 (MHz)	
				L_1	L_2
GPS (美国)	24	20200	718	1565—1586	1217—1238
GLONASS (前苏联)	24	19100	675	1597—1617	1240—1260
NAVSAT (欧洲空间局)	18	20178*	720	1561—1569	1224—1232

* 高椭圆轨道卫星的平均高度。

接收；对那些按大地测量精度要求的用户，可用与 GPS 中相类似的形式记录超过延长时间内间隔的载波相位而获得成果。

上述几种不同卫星定位系统的主要特征列入表 1-1。

(二) GEOSTAR 系统

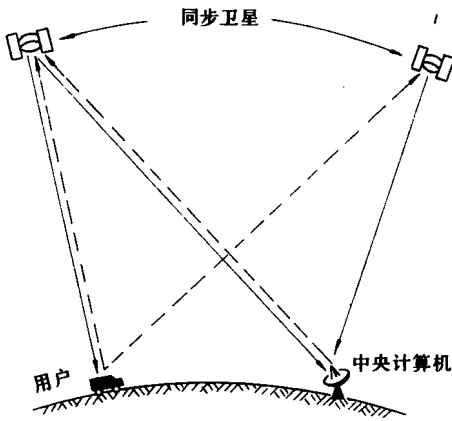


图 1-5 GEOSTAR 系统

GEOSTAR 系统是以几个卫星为基础的定位系统，是为商业服务的。该系统于 1983 年第一次提出来，目前设计成有中心计算能力的，即 GESOTAR 中心和用户终端间的信号播送，由双通道的两个地球同步卫星来完成。如图 1-5 所示，计算中心将信号发送给其中一个卫星，该卫星又将这信号传送给用户终端。为了保密和菜单的需要，加入唯一的数字识别码，按时间分段选入方案使用户终端相同的编码信号通过第二颗卫星传送到中心计算处。信号从发射经过卫星双通道到接收的时间由用户终端确定，从而求定陆地或海洋上用户所在的二维坐标。其解算二维坐标 x 、 y 所用的高程是由数字地形图提供的。从离开

用户终端 200km 以内的一个固定的参考站上，用组合数据来改善它的精度。该系统也有电文功能，电文可以从中央计算室传送到用户或相反。对于在飞行中的飞机而言，可由飞行员或通过自动编码高度计来提供高度信息。这个系统内的两个卫星可以覆盖整个美国大陆和边沿地区，四个附加的卫星实际上可以提供全球的覆盖（高纬度地区除外）。估计这个系统有足够的能为 5 亿个用户终端服务。

由于是在中央计算处执行所有的定位计算，所以用户终端设施可以设计得非常简单，即由一个传送无线电信号的无线电收发两用机、数据处理机及电文存储积分线路组成。电文和信号信息显示在一个液晶板上，而输出的电文则存储在一个计算器似的存储盒内，终端手动板本由钢笔型小手电筒电池供电，重量大约 0.5kg。

第三节 美国的 GPS 政策与我国的 GPS 卫星跟踪网

一、美国政府的 GPS 政策

美国国防部在研制 GPS 总体方案时，就已经制定了“主要为军用，同时也兼顾民用的双用途策略”。此后，陆续出台了一系列的“双用途”政策，例如：

1. 1975 年规定，GPS 卫星发射的无线电信号，含有两种不同的测距码：C/A 码（也称粗码）和 P 码（也称精码）。相应于两种测距码，GPS 将提供两种定位服务，即供民用的标准定位服务和专供军用的精密定位服务。前者定位精度为几十米，后者定位精度优于 10m。

2. 经过人们的努力，既便利用 C/A 码，其定位精度已经达到 15m，远远高于预料精度。于是美国国防部决定实行限制政策，从 1990 年 3 月 17 日起实施 SA 技术，其主要内容是：(1) 在广播星历中有意地加入误差，人为地降低星历的精度，使定位中的已知点（卫星）的位置精度大为降低；(2) 有意地在卫星钟的钟频信号中加入误差，使钟频产生快慢变化，导

致测距精度大为降低。实施 SA 技术后，C/A 码实时定位精度，平面位置降低至 100m，高程位置降低至 150m，严重影响了实时导航定位。

3. P 码是不公开的保密码，广大民间用户难以应用。近年来，P 码的结构逐渐被人们解译，所以美国政府又采用新的保密码—Y 码，它是由 P 码和保密的 W 码相加而形成的，用以代替 P 码，其结构更为严格保密，称之为 AS 技术。一般用户无法解译 Y 码来实现高精度的导航和定位。

二、摆脱 GPS 限制政策的途径

美国政府的 GPS 限制政策严重损害了一般用户的实时定位精度，限制了 GPS 系统在许多高精度领域中应用的可能性。如何摆脱这种限制，是广大用户所关心的问题。

1. 建立独立的卫星导航与定位系统

一些国家和地区致力于发展自己的卫星导航与定位系统。如前苏联建立的全球导航卫星系统 (GLONASS)，欧洲空间局所发展的以民用为主的卫星定位系统 (NAVSAT) 等。

建立自己独立的卫星导航与定位系统，无疑可以完全摆脱对美国 GPS 的依赖。但是这项工程耗资巨大、技术复杂，对大多数国家来说，还是一项难以实施的工程。

2. 建立自己的 GPS 卫星跟踪网，独立确定 GPS 卫星精确轨道

利用 GPS 卫星，建立独立的跟踪系统，以便精密测定卫星轨道，为精密工程测量、地壳变形监测和地球动力学研究提供精密星历和精密定位服务。它是消除 SA 和 AS 不利影响的有效途径，具有十分重要的科学意义和实用价值。

正因为如此，在加拿大、澳大利亚和欧洲一些国家都在实施建立区域性或全球性精密测轨系统的计划。我国在“八五”期间所建立的 GPS 卫星跟踪站也已基本构网，建成了武汉、上海、北京、拉萨和乌鲁木齐 GPS 卫星跟踪站。

3. 改进 GPS 精密定位方法及软件，削弱 SA 和 AS 技术的影响

例如，在美国政府实施 SA 技术和 AS 技术的情况下，采用差分 GPS 定位方法可以把一般用户的实时定位精度提高到 2~5m，是削弱美国限制政策影响的有效手段，目前已被广泛采用。再如在使用载波相位观测值的情况下，若用户在离基准站的距离在 20km 以内，还可以获得厘米级的实时定位精度，目前也在迅速发展之中。

差分 GPS 的基本原理是：鉴于卫星的运行高度在 2 万 km 以上，对于地面相距不太远的两个点来说，卫星信号传播的路径基本相同，所以很多误差的影响也基本相同。如果我们在一个已知精确位置的点上安置 GPS 接收机，并和用户的接收机一起进行 GPS 观测，然后将用户的 GPS 定位结果和已知点精确坐标进行比较，就可以求得多种误差对点位影响所产生的偏差。进一步还能将这些偏差值通过无线电通讯播发给附近的其它用户，那么这些用户的定位精度势必大为改善。

三、我国 GPS 卫星跟踪网的建立

已如前述，GPS 定位的基本原理是将高空运行的卫星的瞬间位置（坐标）作为已知的起算数据，利用空间距离后方交会的方法，确定待定点的空间位置。而卫星的瞬间位置是由卫星所广播的卫星星历来提供的。美国政府执行的 GPS 政策使广播星历的精度大幅度下降，实际上就是损害了 GPS 定位中已知点坐标的精度，也就是增大了 GPS 定位中起算数据的误差。

鉴于卫星星历在 GPS 定位中的重要作用，而广播星历的精度又很低这一实际情况，我

国建立了自己的 GPS 卫星跟踪网，开展独立定轨工作，以获取精确的 GPS 卫星星历。

我国的 GPS 卫星跟踪网是由 4~5 个跟踪站组成的。目前投入运行的跟踪站如表 1-2 所列。

表 1-2 我国的 GPS 卫星跟踪站

站名	建设单位	管理单位	站的性质
拉萨	国家测绘局	西藏测绘局	永久站
乌鲁木齐	国家测绘局 总参测绘局	新疆测绘局 兰州军区测绘大队	永久站 (试运行)
北京	国家测绘局	中国测绘科学研究院	永久站
武汉	国家测绘局	武汉测绘科技大学	永久站
上海	上海天文台	佘山 VLBI 站	永久站
长春	总参测绘局	长春人卫站	试运行
昆明	总参测绘局	云南天文台	试运行

在确定具体建站位置时，考虑到了对环境的要求，需要电磁波干扰小，地基稳固，避免大气、水文、潮汐的影响等。由于工作站是连续工作的，所以跟踪站必须保证稳定可靠的电力供应，建立完善的电力系统和通信系统。

跟踪站设备要长期不停地运行，所以绝大多数跟踪站都进行了自动管理，具备如下基本功能：

- (1) 按标准管理系统正常地运行，自动采集和记录数据、自动传输数据、监控并记录各部件的运行状态；
- (2) 有自我检测和完善的功 能，使其在发生任何干扰、故障时能予排除，重新恢复正常工作状态；
- (3) 有自我监测和保护的功能；
- (4) 有自动的系统管理和报警的功能。

我国在已经建成的 GPS 卫星跟踪站的基础上，必将进一步发展我国 GPS 的综合性服务体系。这个体系是一种集 GPS 卫星追踪、GPS 数据采集、数据通讯、数据处理、提供 GPS 信息服务于一体的网络体系，是一种集成式的系统工程。

第四节 GPS 定位在我国大地测量中的应用

由于 GPS 定位技术与常规大地测量技术相比较，具有高精度、全天候、灵活方便、高效低耗等一系列优点，所以 GPS 定位技术一经出现，就立即引起了世界众多应用部门的广泛重视和极大兴趣。我国在短短几年里，GPS 定位技术异军突起，得到了广泛应用，取得了瞩目的成绩。

一、综述

从世界整体情况来看,我国在 GPS 定位技术的理论研究和开发应用等方面起步较早,具有较高的水平。如果 80 年代 GPS 定位技术崭露头脚,那么在 90 年代,则已经走向成熟,人们可喜地看到, GPS 定位已经在导航定位、大地测量、工程测量、摄影测量与遥感、地球物理和地球动力学等方面得到了广泛应用,并将逐步深入人们的日常生活,进入千家万户。

最近几年中,我国引进了 500 多台测地型 GPS 接收机和数千台导航型 GPS 接收机,已经广泛在航海、航空、铁路、交通、石油、煤炭、地质、地震、公安、银行等许多部门应用。在测绘界,从全国高精度的测量控制网到地区、部门的局部控制网,从工程测量到地形、地籍测量, GPS 定位技术应用已经占据了重要地位,产生了明显的经济效益和社会效益。

武汉测绘科技大学、中国测绘科学研究院等单位在 GPS 定位技术的理论研究和推广应用方面做了许多开创性的工作。80 年代末期,他们首先成功地将 GPS 定位技术应用于城市控制测量、工程测量和变形监测。其后,诸如《全球定位系统原理及其应用》(刘基余、李征航、王跃虎、桑吉章编著)、《GPS 卫星测量原理与应用》(周忠谟、易杰军编著)、《高精度静态 GPS 定位技术研究论文集》(李毓麟等著)等相继出版,为传授和推广 GPS 定位技术起到了积极的作用。

“八五”期间,在国家科委和国家测绘局的大力支持下,我国测绘科技工作者在研究和解决 SA 和 AS 技术条件下如何保持 GPS 定位的优势、进一步提高定位精度的技术和方法、国家高精度 GPS 网的建立、区域性精密定轨和精密定位、差分 GPS 的技术和应用等多方面,取得了重大的进展,为推动今后 GPS 定位技术在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 量级或更高精度要求的定位领域中的应用,奠定了基础。

二、GPS 测量的规范化

为总结我国几年来 GPS 定位技术在大地测量中应用的经验,将 GPS 定位技术纳入科学化、规范化、合理化,统一全国 GPS 定位作业规格,国家测绘局于 1992 年发布并实施了《全球定位系统(GPS)测量规范》,规定了利用 GPS 按静态相对定位原理建立控制网的原则、精度、作业方法。

按照《规范》规定,我国 GPS 测量按其精度依次划分为 A、B、C、D、E 五级,不同级别的相邻点间弦长的标准差(mm)按下式计算:

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (bd)^2} \quad (1-4)$$

式中 a ——固定误差, mm;

b ——比例误差系统, ppm;

d ——相邻点间距离, km。

表 1-3 A 级网和 B 级网的主要技术指标

级 别	精 度		相 邻 点 间 距 (km)		
	a (mm)	b (ppm)	最 小	最 大	平 均
A	≤ 5	≤ 0.1	100	2000	300
B	≤ 8	≤ 1	15	250	70