

3 1 4 2 9 4 0 4

P228
02

普通高等教育测绘类规划教材

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

测 绘 出 版 社

(京) 新登字 065 号

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了 GPS 卫星全球定位系统的构成及其作用, 论述了用 GPS 卫星所发送的导航定位信号进行静态定位和动态定位的原理, 介绍了数据采集、数据处理、GPS 卫星定位误差及其削弱方法, 以及卫星轨道的测定。全书有理论, 有实例, 资料新颖, 内容丰富, 适应于研究生、本科生和有关工程技术人员的需要。

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

*

测绘出版社出版

北京大兴星海印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

*

开本 787×1092 1/16·印张 18.25·字数 411 千字

1993 年 10 月第一版·1993 年 10 月第一次印刷

印数: 0 001—3 300 册·定价: 8.40 元

ISBN 7-5030-0603-X/P·233

前 言

当第一颗 GPS 试验卫星于 1978 年 2 月 22 日入轨运行时,正值甚长基线射电干涉测量 (VLBI) 技术迅速发展之际。测地学家们很快就认识到, GPS 卫星离地高度比 VLBI 所用的类星体要近得多,前者的信号强度为 $1.7\text{E}-21\sim 2.8\text{E}-21\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{Hz}$, 这比类星体的射电信号强度大 10 万倍左右,用 GPS 卫星射电源测量地球要比 VLBI 简单得多。1978 年秋,美国加州理工学院喷气推进实验室 (JPL) 的 P.F.MacDoran 博士,提出了卫星射电干涉测地系统 (SERIES) 的概念,并于 1980 年研制成功了 SERIES-X 型 GPS 信号接收机。与此同时,美国麻省理工学院的 C.C.Counselman 教授等学者,在 MITES 小型射电干涉测地系统的基础上,于 1981 年 4 月研制成功了体积为 $55\times 55\times 50\text{cm}^3$ 的 Macrometer 干涉测量仪。在 1km 基线上的试验表明,采集 2 小时的 GPS 定位数据,能够达到 $\pm 5\text{mm}$ 的三维位置精度,这给研制者和使用者以极大的鼓舞,1982 年 12 月市场上就出现了第一批 Macrometer V-1000 干涉测量仪。

上述 GPS 卫星射电干涉测地系统(即现称的无码接收机),不是利用 GPS 卫星所发送的伪噪声码和导航电文,而是按 VLBI 工作原理进行测量的,需要第三者为用户提供 GPS 卫星星历,这给用户造成了许多不便。为了实现用户的自主、快速和精确的三维位置测量,美国 Texas 仪器公司的 P.Ward 博士,在该公司导航型 GPS 信号接收机的基础上,于 1982 年研制成功了用于精密测地的 TI-4100 GPS 信号接收机。它由天线单元(前端)和接收单元两大部分组成,天线前端置于测站上,接收单元安设在测站附近的一个适当地方,两者用一根长约 30m 的同轴电缆联成整体;TI-4100 采用一个相关型波道,用多路复用技术实现对 4 颗 GPS 卫星的 C/A 码、P 码和两个载波相位的测量;整机重达 25.2 kg。TI-4100 码接收机,是现代测地型接收机的发展基础,是用 GPS 信号精确测量地球的真正先驱。

自 1980 年第一台商品 GPS 信号接收机问世以来,随着 GPS 试验卫星和工作卫星的不断入轨运行, GPS 信号日渐广泛地应用于陆海空领域的导航和定位测量。纵观 GPS 技术在测绘中的应用,主要有:

1. 测量全球性的地球动态参数(GPS 全球大地测量);
2. 测设全国性和区域性的大地测量控制网;
3. 建立陆地海洋大地测量基准和海底大地测量控制网;
4. 监测现代地球板块运动状态和地壳形变;
5. 测定航空航天摄影瞬间的相机位置;
6. 用于工程建筑的设计、施工、验收和监测。

为了编写本书,我们不仅阅读了散见于中外文期刊和会议论文集上的大量文献资料,采集最新信息,选取重要成果,而且精化了自己多年来的 GPS 讲稿、试用教材和科研成果

果。考虑到本书作为几个专业的通用教材，在选材和写作时，对一些个性问题只作了原理性的论述，但对一些共性问题，不仅注重采用最新成果和较成熟的见解，而且给出了算例，为习题课奠定了基础。综观全书，主要论述了利用 GPS 卫星发送的 L 波段的导航定位信号（简称为 GPS 信号）进行静态定位和动态测量的基本原理及数据采集、数据处理、测量误差和卫星轨道测定；考虑到测绘专业读者的知识基础，本书对所涉及的常规测量技术不予重复，而侧重论述 GPS 技术的内在规律和有关学科的基础理论。

本书是按照测绘专业本科课程的教学大纲编著的。刘基余教授编写第一章“概论”、第二章“GPS 系统及其信号”、第四章“GPS 动态测量原理”和第六章“GPS 数据采集”；李征航副教授编写第三章“GPS 静态定位基础”和第五章“GPS 卫星定位误差”；王跃虎副教授编写第八章“GPS 卫星定轨基础”；桑吉章博士生编写第七章“GPS 数据处理”；李静年和陈小明两位同志提供了部分算例。本书可作为大地测量、工程测量、航空摄影测量与遥感、海洋测绘等专业的本科生的通用教材，也可作为有关工程技术人员的自学讲义。

本书由全国测绘教材委员会审定。编写过程中得到了大地测量专业组的热情关怀和大力支持，并组织有关专家进行了认真的评审，作者表示衷心的感谢！

因我们水平有限，加之时间仓促，疏漏谬误之处在所难免，望读者不吝指正！

编 者

1992 年 12 月

目 录

最优控制
载波滤波器

前 言	(I)
第一章 概 论	(1)
§1.1 子午卫星导航系统的局限性	(1)
§1.2 <u>GPS 系统的作用和影响</u>	(3)
§1.3 其它卫星导航系统	(8)
§1.4 GPS 全球大地测量	(15)
第二章 GPS 系统及其信号	(19)
§2.1 GPS 工作卫星及其星座	(19)
§2.2 地面监控系统的作用	(23)
§2.3 导航电文	(26)
§2.4 GPS 卫星在轨位置的计算	(32)
§2.5 GPS 信号	(35)
§2.6 GPS 工作卫星的 SA 技术	(42)
§2.7 GPS 信号接收机	(45)
第三章 GPS 静态定位基础	(53)
§3.1 基本概念	(53)
§3.2 伪距法定位 ..?	(55)
§3.3 载波相位测量 ..?	(62)
§3.4 整周跳变的探测及修复	(67)
§3.5 整周未知数 N_0 的确定	(71)
§3.6 载波相位测量值的线性组合	(77)
§3.7 卫星射电干涉测量	(88)
第四章 GPS 动态测量原理	(92)
§4.1 基本特点	(92)
§4.2 实时定位方法	(98)
§4.3 GPS 测速	(109)
§4.4 GPS 定时	(116)
§4.5 GPS/GLONASS 集成接收机及其对动态测量的影响	(121)
第五章 GPS 卫星定位误差	(127)
§5.1 概 述	(127)
§5.2 相对论效应	(130)
§5.3 时钟误差	(133)

§5.4	卫星星历误差	(134)
§5.5	电离层折射	(137)
§5.6	对流层折射	(144)
§5.7	地球潮汐的影响	(152)
§5.8	多路径误差	(154)
第六章	GPS 数据采集	(158)
§6.1	选用适宜的 GPS 信号接收机	(158)
§6.2	GPS 静态定位的基本要求	(165)
§6.3	静态定位的数据采集	(173)
§6.4	动态定位的数据采集	(183)
§6.5	停行动态测量	(188)
第七章	GPS 数据处理	(193)
§7.1	数据处理基础	(193)
§7.2	基线向量的解算	(202)
§7.3	WGS-84 大地坐标系及其坐标变换	(211)
§7.4	GPS 基线向量网的平差	(219)
§7.5	动态定位数据的处理	(231)
第八章	GPS 卫星定轨基础	(235)
§8.1	GPS 卫星的运行特点	(236)
§8.2	摄动力和受摄运动	(239)
§8.3	月亮与太阳摄动	(253)
§8.4	太阳辐射压摄动	(258)
§8.5	GPS 卫星短弧定轨	(261)
附录 A	转换函数的偏导数	(268)
附录 B	摄动方法的雅可比矩阵	(269)
附录 C	GSS1 GPS 接收机及其测量结果	(273)
参考文献	(278)

第一章 概 论

根据北美防空司令部 (NAADC) 的报告, 截至 1990 年 9 月 30 日为止, 环绕地球运行的航天器已达到 6681 个。在这些在轨航天器中, 包括用于导航定位测量的导航卫星。50 年代末期, 美国开始研制卫星导航系统, 并于 1963 年 12 月发射了第一颗导航卫星。子午卫星导航系统的问世, 不仅开创了海空导航的新时代, 而且揭开了卫星大地测量学的新篇章。第二代卫星导航系统——GPS 卫星全球定位系统的全面建成和发展, 将导致导航和测绘行业一场深刻的技术革命。本章主要论述 GPS 卫星定位技术的产生和发展, 简要介绍前苏联的 GLONASS 和欧洲空间局的 NAVSAT 第二代卫星导航系统。

§ 1.1 子午卫星导航系统的局限性

1967 年 7 月 29 日, 美国政府宣布解密子午卫星 (TRANSIT) 的部分导航电文而供民间应用。自此以后, 卫星多普勒定位技术迅速兴起。实践证明, 卫星多普勒定位具有经济、快速、精度均匀、不受天气和时间限制等优点, 只要能见到子午卫星, 便可在地球表面的任何地方进行单点定位或联测定位, 从而获得测站的三维地心坐标。因此, 卫星多普勒定位技术迅速从美国传播到欧亚及美洲的许多国家。70 年代中期, 我国开始引进卫星多普勒接收机, 西沙群岛的大地测量基准联测, 是我国应用卫星多普勒定位技术的先例。陆地、西沙的联测定位表明, 用卫星多普勒定位求得西沙群岛上四个点位的中误差为 $\pm 2.7\text{m}$ 左右。自 80 年代初期以来, 我国开展了几次较大规模的卫星多普勒定位实践。例如, 国家测绘局和总参测绘局联合测设的全国卫星多普勒大地网, 武汉测绘科技大学与青海石油管理局、新疆石油管理局、石油部地球物理勘探局合作测设的西北地区卫星多普勒定位网, 以及正在测设的全国陆地海洋卫星定位网。即使在远离我国一万七千余公里的南极乔治岛上, 也用卫星多普勒定位技术精确测得我国长城站的地理位置为 南纬 $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$, 西经 $50^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$, 高程为 $43.58 \pm 0.67\text{m}$, 南极长城站至北京的距离为 17501949.51m 。在狂风雪雾下的南极乔治岛上, 能如此精确地测得点位, 这是卫星定位技术所显示出来的无比优越性。

在美国子午卫星导航系统的诱迪下, 前苏联海军于 1965 年开始也建立了一个卫星导航系统, 称之为 CICADA。它与 NNSS 系统相似, 也是第一代卫星导航系统。目前该系统有 12 颗所谓宇宙卫星, 从而构成 CICADA 卫星星座。它的高度为 1000km , 卫星的运行周期为 105 分钟, 初期的宇宙卫星重达 680kg , 近期的宇宙卫星重约 700kg 。每颗宇宙卫星发送频率为 150MHz 和 400MHz 的导航信号, 但只有频率为 150MHz 的信号作载波来传送导航电文, 频率为 400MHz 的信号仅用于削弱电离层效应的影响。宇宙卫星每一分钟发送 3000bit 的导航电文, 每 50bit 构成一个导航字码。尽管前苏联没有公开这些导

航电文的内容，但是已经被人们破译。CICADA 卫星导航系统虽已投入使用 20 余年，但对我国用户而言，它的许多技术资料和用户设备至今鲜为人知。

子午卫星和 CICADA 卫星导航系统，虽将导航和定位技术推向了一个新的发展阶段，但它们仍然存在一些明显的缺陷，其主要表现如下：

1. 卫星少，不能实时定位

子午卫星导航系统一般采用 6 颗工作卫星，并都通过地球的南北极而运行，以致地面上任一点位所测到子午卫星通过的间隔时间较长，而且随着纬度的不同而变更。例如，按 5 颗子午卫星估算，在低纬度地区，每天共通过 15 次左右（仅对仰角在 15° 以上者而言），而在高纬度地区，每天共有 30 次左右的卫星通过，两次子午卫星通过的间隔时间为 0.8~1.6 小时。对于同一颗子午卫星，每天通过次数最多为 13 次，间隔时间便更长一些。由于采用多普勒定位原理，一台卫星多普勒接收机一般需要观测 15 次合格的卫星通过，才能达到 $\pm 10\text{m}$ 的单点定位精度。当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 $\pm 0.5\text{m}$ 左右。子午卫星导航系统不仅因精度较低而限制了它的应用范围，而且因间隔时间和观测时间都较长，而不能为用户提供实时定位和导航服务。

2. 轨道低，难以精密定轨

当进行卫星多普勒定位测量时，子午卫星是作为一种已知点，只不过它按一定规律而

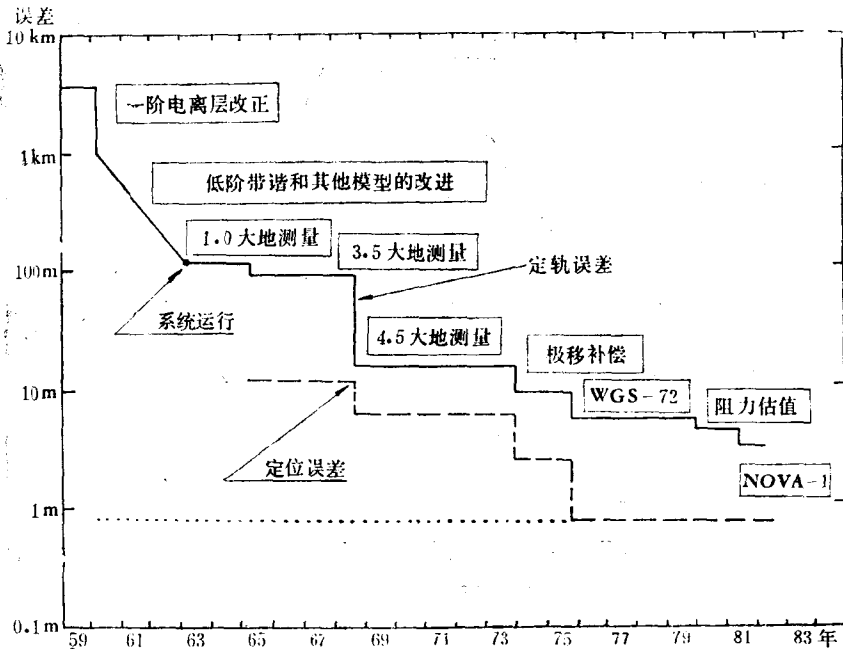


图 1-1 卫星多普勒定位精度与定轨误差的关系

图中：方框内的 1.0 大地测量是地球位展开式球谐函数系数确定到 J_4^1 ；3.5 大地测量为球谐函数系数确定到 J_5^2 ，并顾及了 13 和 14 阶的共振项；4.5 大地测量是球谐函数系数确定到 J_5^3 ；WGS-72 为球谐函数系数确定到 J_5^3 ，并顾及了高阶共振项。

快速地运动着，称之为动态已知点。图 1-1 表示卫星多普勒定位精度随着子午卫星定轨误差的显著减小，而从十几米提高到零点几米(至少观测 50 次卫星通过)。子午卫星的飞行高度平均仅达到 1070km，它属于低轨道卫星。在此情况下，地球引力场模型的误差，大气密度、卫星质面比和大气阻力系数等摄动因子的误差，大气阻力模型自身的误差，都将限制子午卫星定轨精度的提高。换言之，难以得到一种高精度的动态已知点，致使卫星多普勒定位精度局限在米级水平。

3. 频率低，难以补偿电离层效应的影响

子午卫星的射电频率分别为 400MHz 和 150MHz，用这两种频率信号进行双频多普勒定位时，只能削弱电离层效应的低阶项影响，难以削弱电离层效应的高阶项影响。计算表明，在地磁赤道附近，电离层效应的高阶项将导致测站高程±1m 以上的偏差。因此，采用较高的卫星射电频率，能较好地削弱电离层效应的影响，提高卫星定位精度。

卫星定位技术，是利用人造地球卫星进行点位测量的。在它问世之初，人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标，由地面测站对它进行摄影观测，称之为卫星三角测量。它虽能解决用常规大地测量技术难以实现的陆地海岛联测定位问题，但仍旧费时费力，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。后者虽较卫星三角测量有了长足的进步，致使卫星定位技术从卫星仅仅作为空间观测目标的低级阶段，发展到了卫星作为动态已知点的高级阶段，但是，当用子午卫星信号进行多普勒定位时，不仅间隔时间过长，而且需要 1~2 天的观测时间，既不能进行连续定位，又不能达到厘米级的定位精度，因此，子午卫星导航系统的应用受到了较大的限制。为了突破子午卫星导航系统的应用局限性，实现全天候、全球性和高精度的连续导航与定位，第二代卫星导航系统——GPS 卫星全球定位系统便应运而生。卫星定位技术也随之兴起而发展到了一个辉煌的历史阶段，展现了极其广泛的应用前景。

§ 1.2 GPS 系统的作用和影响

1973 年 12 月，美国国防部批准它的陆海空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统——NAVSTAR GPS，我们称之为 GPS 卫星全球定位系统，简称为 GPS 系统*。美国国防部还专门设立一个负责实施 GPS 计划的联合办公室，它设在洛杉矶的空军航天处司令部内。该办公室的组成人员包括美国陆军、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。GPS 系统的全部投资为 300 亿美元，计划分配在方案论证、工程研制和生产作业等三个研制阶段。工程研制阶段，主要发射 GPS 试验性卫星，检验 GPS 系统的基本性能，为生产作业阶段发射 GPS 工作卫星作好全面的技术准备。1978 年 2 月 22 日，第一颗 GPS 试验卫星的发射成功，标志着工程研制阶段的

* 它的英文全称为“Navigation by Satellite Timing And Ranging (NAVSTAR) Global Positioning System(GPS)”。由此可见，NAVSTAR 是五个英文单词的缩写，直译为“用卫星定时和测距进行导航”，而不宜如某些中文书刊那样译作“导航星”。为了简便，我们采用的全称为“GPS 卫星全球定位系统”。

GPS 卫星的发射概况

表 1-1

代 别	名 称	卫 星 类 型	卫星数量 (颗)	发射时间	用 途
第一代		BLOCK I	11	1978~1985	试验性
第二代		BLOCK II, BLOCK II A	28	1989~1994	正式工作
第三代		BLOCK II R	20	90年代末	改进 GPS系统

GPS 卫星星座和子午卫星星座的基本参数

表 1-2

内 容	名 称	TRANSIT	GPS
卫星数(颗)		6	21+3
轨道数(个)		6	6
卫星高度(公里)		1100	202000
运行周期(分钟)		107	720
载波频率(兆赫)		400, 150	1575, 1227

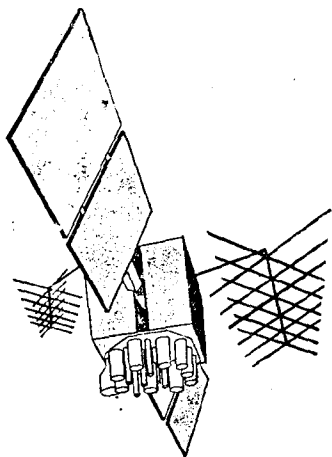


图 1-2 第三代 GPS 卫星

开始, 1989年2月14日, 第一颗 GPS 工作卫星的发射成功, 宣告 GPS 系统进入了生产作业阶段。表 1-1 列出了 GPS 试验卫星 (第一代) 和 GPS 工作卫星 (第二、三代) 的发展概况。按照目前的实施计划, 1993 年将发射第 24 颗 GPS 工作卫星*, 从而建成由分布在 6 个轨道平面内的 (21+3) 颗 GPS 卫星组成的 GPS 工作星座。它和子午卫星星座的基本参数如表 1-2 所示。第三代 GPS 卫星 (BLOCK II R) 的外形如图 1-2 所示。图 1-3 表示两种星座的基本情况。

在 GPS 系统设计之初, 美国国防部的主要目的是使 GPS 系统能够在陆海空三个领域内提供实时、全天候和全球性的导航服务, 并用于情报收集、核爆监测和应急通讯等一些军事目的。但是, 对 GPS 试验卫星的应用开发表明, 不仅 GPS 系统能够达到上述目的, 而且用 GPS 卫星发送的导航定位信号 (简称为 GPS 信号) 能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态定位, 米级甚至亚米级精度的动态定位, 亚米级甚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 系统展现了极其广泛的应用前景。

* 截至 1993 年 8 月 31 日为止, 共发射了 22 颗 GPS 工作卫星 (9 颗 BLOCK II 和 13 颗 BLOCK II A), 加上 3 颗仍能正常工作的 GPS 试验卫星, 现有 25 颗 GPS 卫星可供导航和定位测量。目前的一些商品接收机能够及时报告 GPS 卫星工作星座的现势情况。

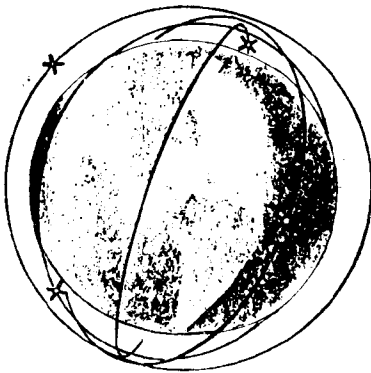


图 1-3a 子午卫星 (Transit) 星座
(拟于 1996 年 12 月停止使用)

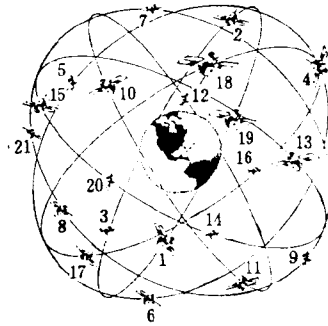


图 1-3b GPS 工作卫星星座
(拟于 1993 年建成)

GPS 系统的广泛应用, 不仅吸引着一些不同行业科学家们的热心研究和开发, 而且激起了 GPS 信号接收机制造厂商们的激烈竞争。对于世界各国的广大用户而言, 使用 GPS 信号的关键设备是能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 信号的接收机, 称之为 GPS 信号接收机。它已成为一些电子仪器厂家竞相生产的高技术电子产品。目前国际上约有 53 个厂家生产着 172 种用途广泛的 GPS 信号接收机, 我国机械电子工业部第 20 研究所和深圳华达电子有限公司也研制成功了几种型号的导航接收机, 步入了 GPS 信号接收机的制造行列。据报导, 在 1991 年初春的海湾战争中, 以美国为首的多国部队购买了 17000 台 GPS 信号接收机用于陆海空三军: 其中 5000 台手持式 C/A 码商品接收机, 8000 台轻小型接收机(亦叫助击器), 4000 台军用接收机。他们使用后的结论是: GPS 是作战武器的效率倍增器, GPS 是赢得海湾战争胜利的重要技术条件之一。至于 GPS 信号接收机在民间的应用, 则是一个难以用数字预测的广阔天地。有人预言, 手表式的 GPS 信号接收机, 将成为旅游者行进的忠实导游。由此可想而知, GPS 信号接收机将会何等广泛地应用于众多的行业。

早在 1983 年 3 月, 在美国测绘学会第 43 届年会上, 加拿大的 A. Chrzanowski 和 D. E. Wells 等几位学者便指出, GPS 系统的问世, 将导致测绘行业一场深刻的技术革命。此后, 又有几位学者提出了与之相似的见解。其根由何在? 我们认为, 可概括为下述几个方面。

1. 用途广泛

近年来, 对 GPS 卫星的应用开表明, 用 GPS 信号可以进行海空导航、车辆引行、导弹制导、精密定位、工程测量、动态观测、设备安装、时间传递、速度测量等。对于测绘行业而言, GPS 卫星定位技术已用于: (1) 测量全球性的地球动态参数和全国性的大地测量控制网。例如, 1991 年 1 月 22 日至 2 月 13 日开展的“地球自转和地球动力学国际首次 GPS 试验”, 分布在世界各地的 124 测站参加了这次盛况空前的全球性地球动态参数测量试验, 取得了令人兴奋的试验成果。(2) 建立陆地海洋大地测量基准。例如,

1990年3、4月间,我国完成了南海5个岛礁8个点位和陆地上4个大地测量控制点之间的GPS联测,初步建立了陆地南海大地测量基准。这次GPS测量的站间距离远达808687.519m,这对于常规大地测量技术是无法实现的,只有依靠GPS卫星定位技术才能进行远达千余公里的海岛陆地联测定位,实现海洋国土的精确划界。(3)监测现代板块运动状态,捕获地震信息。(4)测定航空航天摄影瞬间的相机位置,甚至航片、卫片的姿态参数。例如,我国用Trimble TANS接收机的飞行试验表明,单点动态定位所测得的摄站坐标优于10m。GPS动态测量技术的进一步发展,将会导致无需地面大地测量控制点的大中小比例尺航测快速成图技术的兴起,将会导致地理信息系统、全球环境遥感监测和自然灾害遥感实时监测的技术革命。(5)进行工程建筑的设计、施工、验收和监测。例如,在斯坦福直线加速器的扩建工程中,采用Macrometer V-1000 GPS信号接收机测量了9个工程控制点,经过联合平差的点位精度,水平位置达到了 $\pm 1.5\text{mm}$ 左右,高程精度约为 $\pm 2.5\text{mm}$,满足了扩建工程的急需。在欧洲、远东地区、澳大利亚、南美洲和整个北美洲的试验测量表明,GPS卫星定位技术在工程测量中有着极其广阔的应用前景。

2. 观测简便

怎样减少野外的作业时间和劳动强度,一直是测绘工作者苦心探索的重大课题,GPS系统的问世,为解决这个问题开拓了广阔的途径。我们的实践表明,在用Trimble 4000 SST双频接收机进行定位测量时,测量员只要将天线单元准确地安设在测站上,接通电源,启动接收单元。在结束测量时,只需量测天线高度,关闭电源,收装接收机,便完成了野外数据采集任务。如果在一个测站上需要作较长时间的连续测量,还可实行无人值守的数据采集,而通过数据通讯方式,将所采集的GPS定位数据传递到数据处理中心,实现全自动化的GPS测量。

3. 定位精度高

近年来,美国的试验表明,对于3000km以内的站间距离,GPS相对定位数据经过精细的处理,可达到 $\pm(5\text{mm}+1\times 10^{-8}D)$ 的距离(D)精度, $\pm 3\text{cm}$ 左右的三维位置精度。1990年5月,我们用Trimble 4000 SST双频接收机测量了由16个点位构成的崇阳试验网,以检验Trimble 4000 SST的外部符合测量精度。试验结果表明,通过GEOLAB网平差的GPS点位与整体大地测量平差点位相比较,二维位置(B, L)的最大较差亦不过万分之三点七秒,最小较差为 $0.00000''$;正高的较差稍大一些,其最大值为 43.43mm ,其最小值为 1.9mm ,但未发现系统性的偏差。22个GPS站间距离(平均长度为 1.9km)与ME-5000光电测距边相比较,平均外部符合精度达到了三十一万分之一,且未发现系统偏差(如表1-3所示)。这充分说明,GPS卫星定位测量能够获得厘米级的点位精度。用GPS相对定位结果,还可推算出站间测线的方位角,其初步试验结果如表1-4所示。C/A码的单点动态定位精度为 $\pm 40\text{m}$ 左右;P码的单点动态定位精度约为 $\pm 20\text{m}$;C/A码的差分动态定位精度在 $\pm 10\text{m}$ 以内;动态载波相位测量的定位精度可达到厘米级。对动态用户而言,也可采用一定的精细测量方法(见§4.2),获得高精度的动态测量结果。

国外学者预计,二十一世纪初叶, GPS 卫星定位精度可以达到毫米级,其详细情况如表 1-5 所示。由此可见,在未来的岁月,应用 GPS 卫星定位技术既可大为缩短数据采集时间,又可显著地提高定位精度。

GPS 测边和 ME-5000 光电测距的较差 (m)

表 1-3

边 名	长 度	ME-5000	GPS	较 差	外部符合精度
YS01—JC02	2256+	0.1282	0.1256	+0.0026	1: 80,6000
YS01—GY03	2354+	0.9192	0.9102	+0.0094	1: 25,9000
YS01—YJ04	2210+	0.1426	0.1445	-0.0019	1:116,0000
YS01—ZX06	2041+	0.8573	0.8561	+0.0012	1:170,1000
YS01—JB08	1557+	0.1078	0.1062	+0.0016	1: 97,3000
JC02—GY03	2522+	0.9806	0.9694	+0.0112	1: 22,5000
JC02—YJ04	1957+	0.6234	0.6149	+0.0085	1: 23,0000
GY03—YJ04	3918+	0.7558	0.7298	+0.0260	1: 15,0000
GY03—DL05	1735+	0.3587	0.3551	+0.0036	1: 48,2000
YJ04—DX09	2760+	0.3766	0.3595	+0.0171	1: 16,1000
DL05—SX07	1591+	0.9549	0.9595	-0.0046	1: 34,6000
ZX06—JB08	1021+	0.4072	0.3985	+0.0087	1: 11,7000
ZX06—ZB12	1450+	0.0813	0.0811	+0.0002	1:725,0000
ZX06—XW11	1281+	0.6289	0.6311	-0.0022	1: 58,0000
SX07—ZB12	1966+	0.3952	0.3947	+0.0005	1:393,3000
DY09—HE10	727+	0.3099	0.3122	-0.0023	1: 31,6000
DY09—FJ14	1641+	0.8856	0.8933	-0.0077	1: 21,3000
DY09—NS13	2362+	0.7212	0.7291	-0.0079	1: 29,9000
HE10—XW11	1269+	0.2722	0.2657	+0.0065	1: 19,5000
XW11—ZB12	1574+	0.9217	0.9261	-0.0044	1: 35,8000
ZB12—NS13	2240+	0.1741	0.1728	-0.0013	1:172,3000
NS13—FJ14	1508+	0.0716	0.0760	-0.0044	1: 34,3000
说 明	1. ME-5000 光电测距仪的标称精度为士(0.2mm+0.2ppm) 2. GPS 测量采用 Trimble 4000SST 双频接收机				

用 GPS 信号测定方位角的精度

表 1-4

方位角 精度 定位方式	距 离					
	1m	10m	100m	1000m	2000m	5000m
静态差分	7'~2'	40"~10"	5"~2"	0.6"~0.3"		
动态差分			3.5'	21"	11"	5"

GPS 卫星定位精度的预计

表 1-5

使用卫星	定位数据采集时间	定 位 精 度	备 注
第一代卫星	10分钟~数小时(1分钟)	<1ppm	圆括号中的数据表示 差分动态定位
第二代卫星	15分钟(1分钟)	0.01ppm	
第三代卫星	几个毫秒	1mm	

4. 经济效益高

1983年9月至1984年5月,在联邦德国 Eifel 地区建立了一个由 35 个点位组成的 I 等加密网。该网的实践表明, GPS 卫星定位技术比常规大地测量技术要节省 85% 的外业费用。详情如表 1-6 所示。根据统计,美国用常规大地测量技术建立一个 I 等水平控制点需要耗费近 7000 美元,用 GPS 卫星定位技术建立同等精度的一个控制点,仅需花费 2000 美元,节约了 71.43% 的费用。我国约有 5 万个 I、II 等三角点和导线点,若按美国的标准估算, GPS 卫星定位技术将使我国节省约 2500 万美元的开支。如此显著的经济效益,主要源于 GPS 卫星定位不要求站间通视,而不必建立费时费力费钱的觐标。GPS 信号在其他场合应用的经济效益,目前虽无统计,但估计是很高的。例如,弹道导弹的弹道测量,地面监测站一般只能测量它的主动段,而用测量船测量它的被动段,如前苏联向太平洋发射试验性导弹时,派出了五、六艘测量船。如果弹道导弹装备上 GPS 信号接收机,就可以实现导弹位置的实时测量,这既可准确地控制导弹的弹着点,又可大幅度地减少监测费用。

外业费用比较

表 1-6

名称	技术	常规大地测量	GPS 卫星定位
费用		10000美元	1500美元
外业用时		3个月	1个月
精度		2~10ppm	1~2ppm

从现势可见, GPS 信号接收机将朝着高精度、多功能、超小型和集成式的方向迅速发展, GPS 也将随之而广泛地应用于众多的行业,甚至进入社会科学领域,促进人类文明的高度发展。

§ 1.3 其它卫星导航系统

一、前苏联的 ГЛОНАСС (GLONASS) 全球导航卫星系统

GPS 系统的广泛应用,引起了许多不同行业科学家的关注和研究。前苏联和西欧国家的科学家们不仅积极开发 GPS 信号的广泛应用,而且致力于建设各自的卫星导航系统。前苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星导航系统优劣的基础上,认真地吸收了美国 GPS 系统的成功经验,自 1982 年 10 月开始,不断地发射第二代导航卫星,以便建成自己的第二代卫星导航系统——ГЛОНАСС (GLONASS) 全球导航卫星系统*。据计划,在 1995 年以前,将建成 ГЛОНАСС (GLONASS) 工作星座,它由 (21 + 3) 颗卫星组

* 它的俄文全称为 Глобальная Навигационная Спутниковая Система, 缩写成 ГЛОНАСС; 它的英文全称为 Global Orbiting Navigation Satellite System, 缩写成 GLONASS。

成。这 24 颗卫星 (21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星) 均匀分布在 3 个轨道平面内 (如图 1-4 所示)。卫星高度为 19100km, 轨道倾角为 64.8° , 卫星的运行周期为 11 小时 15 分钟; 卫星的射电频率为 $1.6 \times 10^3 \text{MHz}$ 和 $1.2 \times 10^3 \text{MHz}$ 。由此可见, 前苏联的 GLONASS 系统类似于美国的 GPS 系统, 但前者是静悄悄地建设起来的。自 1982 年至 1987 年, 前苏联发射了 27 颗 GLONASS 试验卫星。表 1-7 列出了截至 1993 年 2 月在轨工作的部分试验卫星。它们和 GPS 试验卫星一样, 也是分布在两个轨道平面内。1989 年 8 月 14 日, 在英国立茨 (Leeds) 大学能见到的 GLONASS 卫星如图 1-5 所示。根据英国学者 S.A.Dale 和 P.Daly 的实际观测结果可知, 有的 GLONASS 试

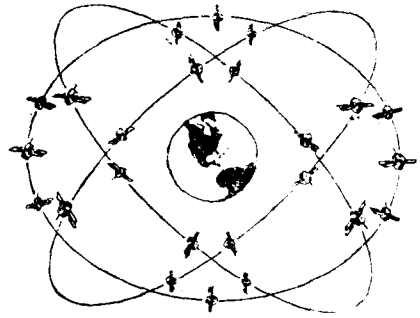


图 1-4 ГЛОНАСС 工作卫星星座

GLONASS 卫星星座现状

表 1-7

发射日期	宇宙卫星编号	GLONASS编号	卫星识别号 (CHN)	所在轨道平面
90.12.8	2111	49	19	1
91.4.4	2140	51	11	3
92.1.29	2178	54	2	1
92.1.29	2179	55	17	1
92.7.30	2204	56	1	3
92.7.30	2205	57	24	3
92.7.30	2206	58	8	3
93.2.17	2234	59	12	1
93.2.17	2235	60	5	1
93.2.17	2236	61	23	1

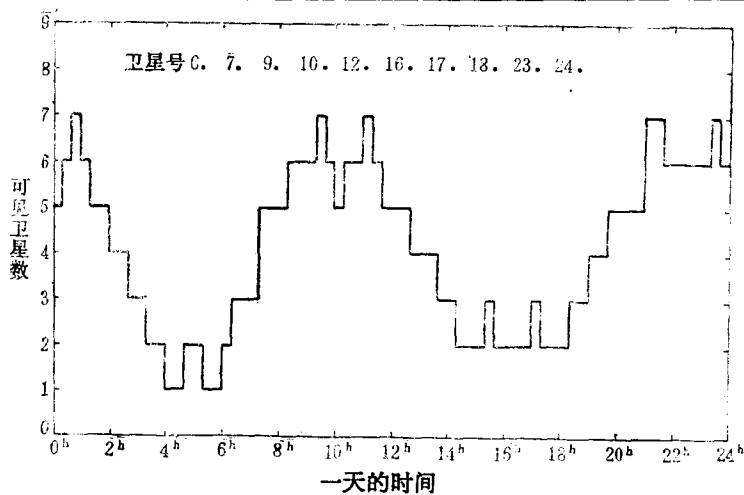


图 1-5 在英国立茨大学能见到的 GLONASS 卫星

验卫星发送频率为 $1.6 \times 10^8 \text{MHz}$ 和 $1.2 \times 10^8 \text{MHz}$ 的射电信号, 但仅 $1.6 \times 10^8 \text{MHz}$ 的射电信号传送导航电文, $1.2 \times 10^8 \text{MHz}$ 的射电信号不作载波, 仅用于削弱电离层影响; 有的 GLONASS 试验卫星不发送 $1.2 \times 10^8 \text{MHz}$ 的射电信号, 仅发送 $1.6 \times 10^8 \text{MHz}$ 的射电信号; 有的 GLONASS 试验卫星, 是时断时续地间歇发送导航电文; 有的 GLONASS 试验卫星, 则不能观测到它们的射电信号。对整个 GLONASS 试验卫星星座而言, 它们的射电频率为 $1602.5625 \sim 1615.5 \text{MHz}$ 和 $1246.4375 \sim 1256.5 \text{MHz}$ 。值得特别注意的是, GLONASS 试验卫星星座不像 GPS 试验卫星星座, 采用了一个公共的射电频率, 而是各颗 GLONASS 卫星的射电频率分别为

$$f_{j1} = f_1 + (j-1)\Delta f_1$$

$$f_{j2} = f_2 + (j-1)\Delta f_2$$

式中:

$$f_1 = 1602.5625 \text{MHz}$$

$$\Delta f_1 = 0.5625 \text{MHz}$$

$$f_2 = 1246.4375 \text{MHz}$$

$$\Delta f_2 = 0.4375 \text{MHz}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, 24$$

GLONASS 卫星也采用扩频技术传送导航电文(见§2.5), 但它的易捕码 (C/A 码) 比 GPS 卫星 C/A 码短一半, 仅有 511 个码元, 而码率又比 GPS 卫星的 C/A 码低一倍, 仅为 $511 \times 10^3 \text{Hz}$ 。图 1-6 表示 GLONASS 卫星 C/A 码的形成框图。图中 1~9 表示 D 触发器的序号, 由它们构成产生 C/A 码的最长线性移位寄存器, 其特征多项式为

$$f_c(x) = 1 + x^5 + x^9$$

该抽头式反馈移存器所产生的输出序列 (C/A 码) 为 1111111000.....共 511bit, 其时间周期为 1ms。GLONASS 卫星也采用了类似于 GPS 信号的 P 码。尽管前苏联严格保密, 英国立茨大学的 G.R.Lennen 博士还是成功地破译了 GLONASS 卫星所用的 P 码, 并公开了他的初步研究结果, 这可供我们进一步研究参考。

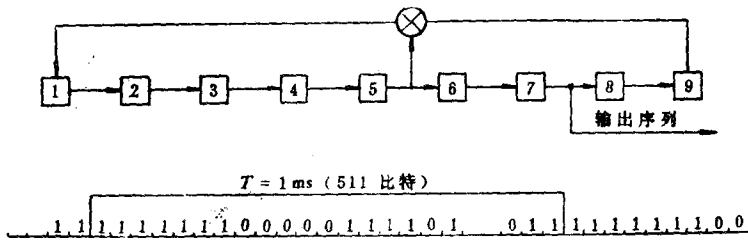


图 1-6 GLONASS 卫星 C/A 码的形成

二、欧洲空间局的 NAVSAT 导航卫星系统

GPS 系统和 GLONASS 系统主要是为军事应用建立的卫星导航系统。西欧欧洲空间局 (ESA) 正在筹建的 NAVSAT 导航卫星系统, 则是一种民用卫星导航系统。NAVSAT

系统采用6颗地球同步卫星(GEO)和12颗高椭圆轨道卫星(HEO)组成混合卫星星座(如图1-7所示)。从图可见,12颗HEO卫星均匀分布在6个轨道平面内,6颗GEO卫星同处于一个轨道平面内。NAVSAT卫星的地面轨迹如图1-8所示。表1-8列出了

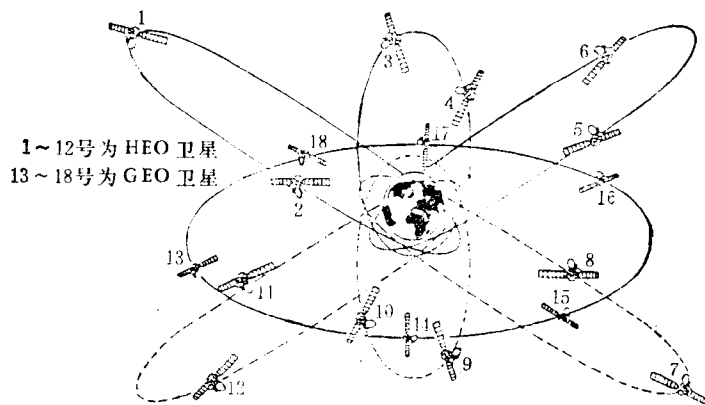


图 1-7 NAVSAT混合卫星星座

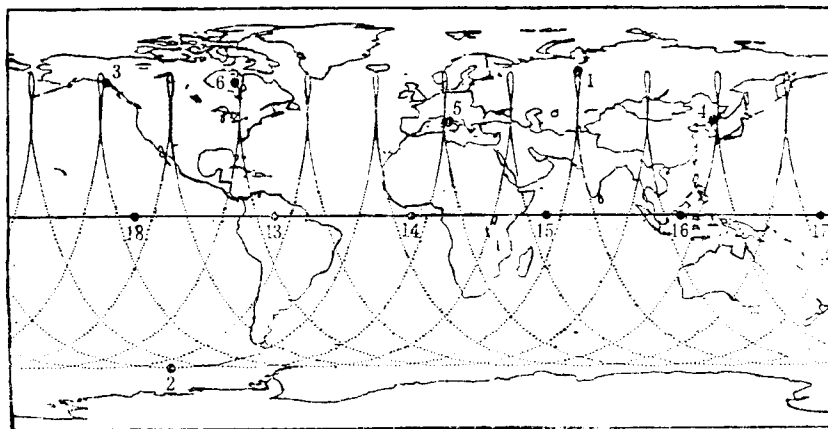


图 1-8 NAVSAT卫星的地面轨迹

NAVSAT卫星的轨道参数

表 1-8

名称	卫星	HEO	GEO
卫星运行周期		12恒星时	24恒星时
长半轴		26600km	42164km
偏心率		0.713	0.423
近地点高度		1250km	17961km
远地点高度		39105km	53632km
轨道倾角		63.45°	
近地点角距		90°或270°	