

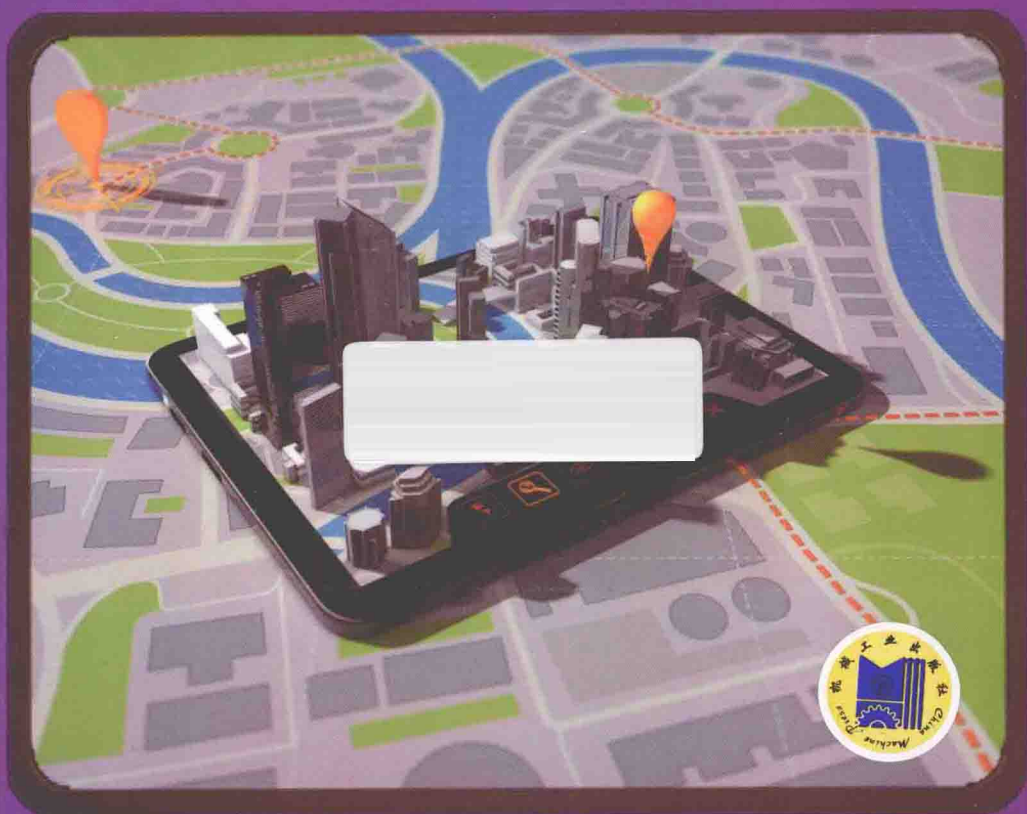


职业教育 工程测量技术专业 “十二五” 规划教材

GPS测量及应用

GPS CELIANG JI YINGYONG

罗强◎主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电子教案

职业教育工程测量技术专业“十二五”规划教材

GPS测量及应用

主 编 罗 强

副主编 邓 军 马华宇

参 编 吴尚科 李 建 杨忠祥



机械工业出版社

本书是职业教育工程测量技术专业“十二五”规划教材，也是高职高专测绘类专业的核心课程教材。全书共分9个单元，主要介绍了GPS的组成、限制性政策及其技术现代化进程，GPS的坐标和时间系统，GPS卫星信号、接收机和导航电文，GPS卫星定位的误差来源及其处理措施，GPS卫星的运动，GPS定位的原理，GPS网的技术设计、外业施测和内业数据处理过程，实时动态测量系统及其应用，GPS测量技术在各种工程中的应用。

本书可作为职业教育工程测量专业及相关专业教材，也可作为GPS相关技术培训和从事测量工作的专业技术人员学习、提高GPS测量技术能力的参考书。

为方便教学，本书配有电子课件和习题答案，凡选用本书作为授课教材的教师均可登录 www.cmpedu.com，以教师身份注册下载。编辑咨询电话：010-88379934。

图书在版编目（CIP）数据

GPS 测量及应用/罗强主编. —北京：机械工业出版社，2013. 11
职业教育工程测量技术专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-43369-9

I. ①G… II. ①罗… III. ①全球定位系统-测量-职业教育-教材
IV. ①P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 248161 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：刘思海 责任编辑：刘思海

版式设计：常天培 责任校对：陈延翔

封面设计：鞠 杨 责任印制：刘 岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 11.5 印张 · 265 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-43369-9

定价：26.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

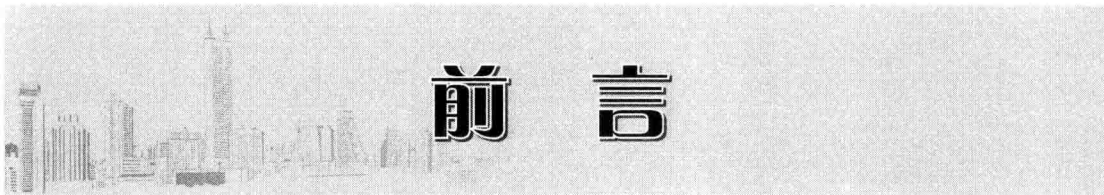
网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版



前言

全球导航卫星定位系统是美国国防部所研制的新一代导航卫星定位系统。它的出现，是20世纪后人类在空间信息技术探索中的一次革命，由于GPS定位技术具有精度高、速度快、操作简单等特点，它已成为测绘信息采集的重要手段之一。

自GPS系统实施以来，由于GPS软硬件的不断完善和成熟，为GPS定位技术应用走向普及提供了便捷的通道。而现代GPS定位技术已经进入了一个基于网络化并与多学科交叉的实用阶段，并能为空间信息定位有关的行业提供动态、快速、准确和全域的定位服务。

随着GPS定位技术不断地走向成熟，其应用领域也在广度和深度上得到发展和扩大。除传统的测绘地理领域外，GPS在交通、地矿、农林业、防灾减灾等行业都得到了普及和广泛的应用。

本书反映了最新的行业规范、方法和新的工艺；内容浅显易懂，体现“实用、够用”的原则；图文并茂，突出实践，着重培养学生解决实际问题的能力。

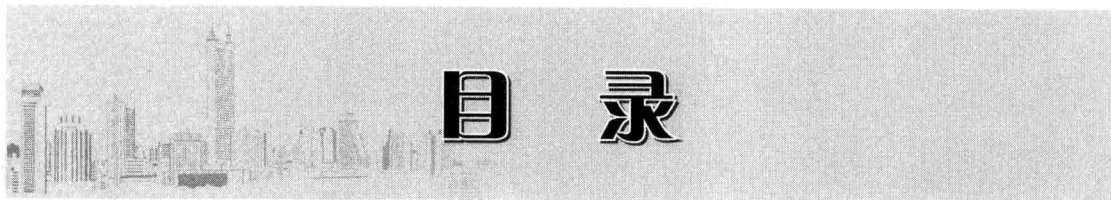
本教材各单元的建议学时如下：

单 元	建议课时
单元1 绪论	4
单元2 GPS定位基准	6
单元3 GPS卫星信号和导航电文	4
单元4 GPS测量误差	6
单元5 卫星运动基础	4
单元6 GPS卫星定位基本原理	8
单元7 GPS测量技术实施	38
单元8 实时动态测量系统及应用	4
单元9 GPS测量技术的应用	4
合 计	78

本书由罗强任主编，邓军、马华宇任副主编。编写人员及分工如下：罗强编写单元4和附录，邓军编写单元7，马华宇编写单元8和单元9，吴尚科编写单元3和单元6，李建编写单元1和单元2，杨忠祥编写单元5。全书由罗强定稿。

因编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者



前言

单元1 绪论	1
课题1 GPS 概述	1
课题2 GPS 定位的限制策略	6
课题3 GPS 的重大发展及技术现代化进程	7
课题4 其他卫星定位系统	11
单元小结	15
单元2 GPS 定位基准	16
课题1 坐标系的类型	16
课题2 天球坐标系	18
课题3 地球坐标系	23
课题4 大地测量基准及换算	30
课题5 高程基准与常用大地水准面模型	37
课题6 时间系统	39
单元小结	42
单元3 GPS 卫星信号和导航电文	43
课题1 GPS 卫星测距码信号	43
课题2 GPS 接收机的分类及其基本原理	49
课题3 GPS 卫星信号	53
课题4 GPS 导航电文	55
单元小结	57
单元4 GPS 测量误差	58
课题1 GPS 误差概述	58
课题2 GPS 卫星误差	60
课题3 信号传播误差	63

课题 4 接收机误差	65
课题 5 其他误差与卫星的几何强度	66
单元小结	70
单元 5 卫星运动基础	71
课题 1 卫星运动概述	71
课题 2 卫星的无摄运动	72
课题 3 卫星的受摄运动	74
课题 4 GPS 卫星星历	77
单元小结	78
单元 6 GPS 卫星定位基本原理	79
课题 1 GPS 定位原理概述	79
课题 2 载波相位测量	82
课题 3 GPS 静态定位	84
课题 4 GPS 动态定位	88
单元小结	93
单元 7 GPS 测量技术实施	94
课题 1 GPS 网技术设计	94
课题 2 GPS 点设置	109
课题 3 GPS 接收机	111
课题 4 GPS 外业施测	116
课题 5 GPS 数据处理	121
课题 6 GPS 数据处理软件	136
单元小结	145
单元 8 实时动态测量系统及应用	146
课题 1 RTK 测量方法概述	146
课题 2 常规 RTK 测量系统	147
课题 3 网络 RTK 测量系统	151
课题 4 RTK 测量技术的应用	154
课题 5 GPS 测速与测时简介	156
单元小结	158
单元 9 GPS 测量技术的应用	160
课题 1 GPS 在大地测量及控制测量中的应用	160



课题2 GPS在工程测量中的应用	163
课题3 GPS在航空摄影测量中的应用	167
课题4 GPS在海洋测绘方面的应用	168
单元小结	169
附录 GPS测量及应用练习题库	170
参考文献	175

单元 1

绪 论



【单元概述】

本单元主要阐述了 GPS 的形成历史及其在不同阶段的特征、GPS 的组成概况、GPS 定位的基本原理和限制性政策、GPS 的应用领域及重大发展。



【学习目标】

通过学习，了解 GPS 卫星的轨道分布；重点掌握 GPS 的组成和 GPS 定位的基本原理；初步了解美国政府对 GPS 的限制性政策；了解 GPS 的主要应用领域及重大发展。

课题 1 GPS 概述

一、GPS 发展历史

1. 海军导航卫星系统

1957 年 10 月，苏联成功发射了第一颗人造地球卫星（以下简称卫星）。半个多世纪以来，航天技术在通信、气象、导航、遥感、测绘、资源勘查、地球动力、天文等各个学科得到了极其广泛的应用，对人类政治、经济、军事以至人类进步都产生了深远的影响，极大地促进了现代科学技术的发展。毋庸置疑，卫星对导航定位的发展起到了重要的推动作用。第一颗卫星运行不久，美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的吉尔博士和魏芬巴哈博士对该卫星发射的无线电信号的多普勒频移进行了深入研究——利用地面跟踪站上的多普勒资料可以精确确定卫星轨道。根据这一试验成果，应用物理实验室的另外两名科学家麦克卢尔博士和克什纳博士进而指出，若已知卫星的轨道参数并准确测定其信号的多普勒频移，则可确定用户的位置。上述工作为第一代导航卫星系统的诞生奠定了基础。

1958 年年底，美国海军与霍普金斯大学应用物理试验室合作，研制、开发、管理为美国军用舰艇导航服务的导航卫星系统，即“海军导航卫星系统”（Navy Navigation Satellite System, NNSS）。由于该系统的卫星通过地极，沿地球子午线运行，故又称为“子午（Transit）卫星系统”。该系统于 1964 年建成，共有 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 11000km, 周期为 13 ~ 15 周。1967 年 7 月 29 日, 美国政府宣布解密海军导航卫星系统所发送的导航电文的部分内容提供民用。由于该系统具有全天候、自动定位、全球覆盖性、定位精度较高、定位速度较快和经济性好等一系列优点, 迅速被世界各国使用。

2. GPS 全球定位系统的建立

鉴于 NNSS 系统的局限性, 为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航定位, 满足军事部门和民用部门对连续实时、高精度、高动态导航定位的迫切要求, 在第一代导航卫星系统 NNSS 投入使用不久, 美国于 1967 年着手研制新一代导航卫星系统。1973 年 12 月, 美国国防部正式批准海陆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)”。全球定位系统的建立过程到目前为止经历以下几个阶段:

1) 第一阶段: 1973 年 ~ 1979 年。此阶段为方案论证和初步设计阶段。共发射了 4 颗实验卫星(Block), 研制了地面接收机, 建立了地面跟踪网。

2) 第二阶段: 1980 年 ~ 1989 年。此阶段为全面研制和实验阶段。1978 年, 第一颗 GPS 实验卫星的成功发射, 标志着工程研制阶段的开始。1979 年 ~ 1984 年, 又陆续发射了 7 颗实验卫星, 研制了各种用途的接收机。实验表明, GPS 定位精度远远超过设计标准。

3) 第三阶段: 1990 年 ~ 1999 年。此阶段为实用组网阶段。这一阶段发射了第二代 GPS 工作卫星, 称为 Block II 和 Block IIA, 构成 24 颗卫星星座, 满足了民用标准定位服务(100m)的要求, 1995 年实现了精密定位服务(10m)。

4) 第四阶段: 2000 年 ~ 2030 年。此阶段为 GPS 现代化更新阶段。1996 年美国国防部和交通部组成了联合管理 GPS 事务局(IGEB), 在 IGEB 的主持下于 1997 年 ~ 1998 年期间讨论了增加 GPS 民用信号, 从而改进了民用 GPS 的状况, 并与空间已经开始的计划相结合, 更新了 GPS 运行要求, 并于 1999 年 1 月由美国副国务卿戈尔以“GPS 现代化”的名称发布通告, 其具体实施以 2000 年 5 月 1 日取消 SA 政策为标志。

二、GPS 系统的构成

GPS 整个系统主要由空间部分(空间卫星星座、GPS 卫星)、地面监控部分(主控站、监控站、注入站、通信和辅助设备)和用户部分(GPS 接收机、数据处理软件、用户设备)三个部分构成。

1. 空间部分

(1) 空间卫星星座 GPS 的空间部分是由 24 颗 GPS 工作卫星所组成, 这些 GPS 工作卫星共同组成了 GPS 卫星星座, 其中 21 颗为可用于导航的卫星, 3 颗为活动的备用卫星, 如图 1-1 所示。这 24 颗卫星分布在 6 个倾角为 55°的轨道上绕地球运行, 这样分布的目的是为了保证在地区的任何地方同时可以

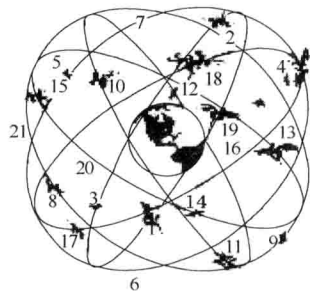


图 1-1 GPS 卫星星座

观测到 4~12 颗卫星，从而使地球表面上任何地点、任何时刻均能实现三维定位、测速与测时。卫星轨道为近圆形，轨道平均高度为 202000km，运行周期约为 11h58min（12 恒星时）。

表 1-1 给出了截至 1995 年 3 月 GPS 卫星的组成情况，从表中可以看出：现在空间共有 25 颗 GPS 卫星，其中有一颗 Block I 尚在工作，其余均为 Block II 和 Block II A 工作卫星。

表 1-1 GPS 卫星组成情况一览表

类型	序号	编号 (SVN)	发射年份	类型	序号	编号 (SVN)	发射年份
Block I	1	12	1984	Block II A	14	28	1992
Block II	2	14	1989		15	26	1992
	3	02	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	09	1993
	10	15	1990		23	05	1993
	Block II A	11	23		1990	24	04
12		24	1991		25	06	1994
13		25	1992		—	—	—

(2) GPS 卫星及其功能 GPS 卫星主体为圆柱形，两侧有太阳能帆板，能自动对日定向。GPS 卫星外观结构 (Block II) 如图 1-2 所示。太阳能电池为卫星提供工作用电。每颗卫星配备有 4 台原子钟，可以为卫星提供高精度的时间标准。卫星可在地面控制系统的控制下调整自己的运行轨道。

GPS 卫星的主要功能是：

- 1) 接收并存储来自地面控制系统的导航电文。
- 2) 进行必要的数据处理。
- 3) 提供精密的时间标准。
- 4) 向用户连续不断发送导航定位信号。

2. 地面监控部分

GPS 的地面监控部分由分布在全球的由若干个跟踪站所组成的监控系统所构成，根据其作用的不同，这些跟踪站又被分为主控站、监控站和注入站，其中主控站 1 个，监控站 5 个，注入站 3 个，另外还配备有通信和辅助系统，如图 1-3 所示。

(1) 主控站 主控站是整个地面监控系统的管理中心和技术中心，位于美国科罗拉多州的法尔孔空军基地联合空间工作中心。其主要作用是：

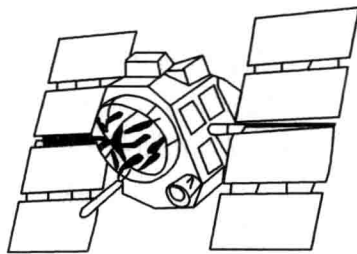


图 1-2 GPS 卫星外观结构 (Block II)

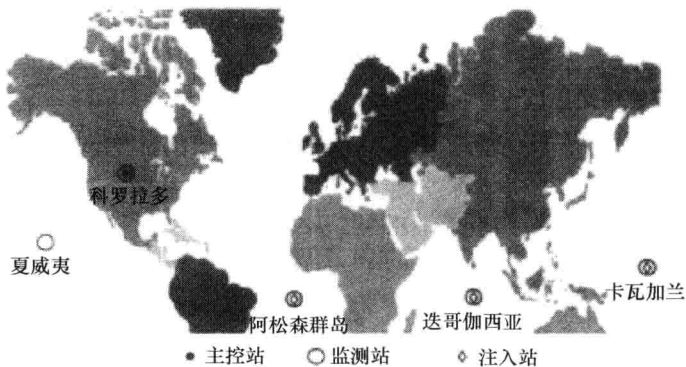


图 1-3 GPS 卫星的地面监控分布图

1) 负责管理、协调地面监控系统中各部分的工作。

2) 根据各监控站对 GPS 的观测数据, 计算出卫星的星历和卫星钟的改正参数等, 并将这些数据通过注入站注入到卫星中去。

3) 对卫星进行控制, 向卫星发布指令, 当工作卫星出现故障时, 调度备用卫星, 替代失效的工作卫星工作。

另外, 主控站也具有监控站的功能。

(2) 监控站 监控站是在主控站控制下的数据采集中心。整个全球定位系统共设立了 5 个监控站, 它们分别位于科罗拉多州 (美国本土)、夏威夷岛 (太平洋)、阿松森群岛 (大西洋)、迭哥伽西亚 (印度洋)、卡瓦加兰。其主要作用是:

1) 对视场中的各 GPS 卫星进行连续观测, 以采集数据和监测卫星的工作状态。

2) 通过气象传感器自动测定并记录气温、气压、相对湿度等气象数据。

3) 将观测数据进行初步处理后送到主控站, 用以确定 GPS 卫星的各项参数。

(3) 注入站 注入站是向 GPS 卫星输入导航电文和其他命令的地面设施。3 个注入站分别位于阿松森群岛、迭哥伽西亚、卡瓦加兰。其主要作用是将主控站计算出的卫星星历和卫星钟的改正数等“注入”到卫星中去, 并检测“注入信息”的正确性。

(4) 通信和辅助设备 通信和辅助设施是指地面监控系统中负责数据传输以及提供其他服务的机构和设施。全球定位系统的通信系统由地面通信线、海底电缆和卫星通信等联合组成。此外, 美国国防制图局将提供有关极移和地球自转的数据以及各监测站的精密地心坐标, 美国海军天文台将提供精密的时间信息。

3. 用户部分

GPS 的用户部分由 GPS 接收机、数据处理软件及相应的用户设备 (如计算机、气象仪器) 等组成。其主要功能是能够捕获到按一定卫星截止角所选择的待测卫星, 并跟踪这些卫星的运行。当接收机捕获到跟踪的卫星信号后, 就可测量出接收天线至卫星的伪距离和距离的变化率, 解调出卫星轨道参数等数据。根据这些数据, 接收机中的微处理计算机就可按定位解算方法进行定位计算, 计算出用户所在地地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。

接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收单元两部分。接收机一般采用机内和机外两种直流电源。设置机内电源的目的在于更换外电源时不中断连续观测。在用机外电源时机内电池自动充电。关机后机内电池为 RAM 存储器供电，以防止数据丢失。

目前各种类型的 GPS 接收机体积越来越小，重量越来越轻，便于野外观测使用。

三、GPS 定位的基本原理

GPS 定位的基本原理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，确定待测点的位置。如图 1-4 所示，假设 t 时刻在地面待测点上安置 GPS 接收机，可以测定 GPS 信号到达接收机的时间 Δt ，再加上接收机所接收到的卫星星历等其他数据可以确定下列方程组：

$$\begin{cases} [(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2]^2 + c\delta t^i = d_1 \\ [(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2]^2 + c\delta t^i = d_2 \\ [(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2]^2 + c\delta t^i = d_3 \\ [(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2]^2 + c\delta t^i = d_4 \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 (x_i, y_i, z_i) ——卫星空间坐标；

(x, y, z) ——接收机坐标；

c ——电磁波传播速率；

δt^i ——接收机时钟误差。

由式 (1-1) 可知，只要观测 4 颗以上卫星，就可以求出 x 、 y 、 z 、 δt ，从而获得接收机的地面点坐标。

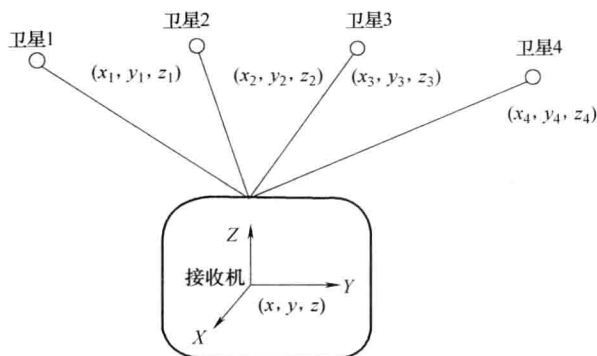


图 1-4 GPS 定位原理图

四、GPS 定位优势

GPS 作为一种先进的导航与定位系统，以其高精度、全天候、高效率、易操作等特点著称。

(1) 高精度的三维定位 大量实践和研究表明，GPS 可以精密地测定测站的平面位置



和高程。目前在小于 50km 的基线上,其相对定位精度可达 1×10^{-6} ;而在 100 ~ 500km 的基线上,精度可达到 1×10^{-7} 。随着观测技术与数据处理方法的不断更新与优化,可望在大于 1000km 的距离上,其相对定位精度达到 1×10^{-8} 。

(2) 全天候作业 GPS 卫星布局使得同一测站上出现的卫星分布大致相同,能够保证全球范围内被覆盖,任何用户在任何时候至少可以接收到 4 颗卫星,在可观测卫星信号的区域, GPS 接收机可以连续工作,一般不受天气状况的影响。

(3) 测站之间无需通视 经典的三角测量或导线测量技术一般既要求保持良好的通视性,又要求保障测量控制网的良好结构,这就要求在野外作业时建立大量的测量标志,耗费大量时间。GPS 作业只要求测站净空开阔,与卫星之间保持良好的通信即可,这样就节省了大量的时间与经费,也给点位的选择带来了很大的灵活性。在类似于高速铁路精密控制网建设中,可以省去经典测量传算点和过渡点的测量工作,提高了工作效率。

(4) 观测时间短 过去,对于高精度 GPS 控制网而言,完成一条基线的静态相对定位需要数小时的时间。随着 GPS 系统的不断完善和数据处理软件的不断更新,观测时间已缩短至几十分钟,甚至几分钟;采用 RTK 定位模式每测站观测只需要几秒钟。采用 GPS 建立控制网,可大大缩短作业时间,提高作业效率。

(5) 仪器轻便,自动化程度高 随着 GPS 接收机的技术改进,其体积越来越小,携带搬运均较方便;另一方面 GPS 测量的自动化程度越来越高,已基本趋于“傻瓜化”操作。测量技术人员在观测中只需要安置并开关仪器、量取仪器高、记录气象数据和监视仪器工作运行状态等工作,通过数据通信定时将所采集的数据传送到数据处理中心,即可实现数据采集与处理全过程的自动化。

(6) 应用广泛 随着 GPS 技术的不断发展, GPS 测量形式越来越多样。由常规的静态测量已经发展到快速静态、实时动态 (RTK)、实时差分定位 (RTD) 和利用多基站网络 RTK 技术建立的连续运行卫星定位服务综合系统 (CORS),这些技术已经广泛地运用到工程测量的各个方面。

课题 2 GPS 定位的限制策略

全球定位系统是美国国防部门为军事用途而研究组建的导航卫星系统,虽然美国政府实施了鼓励民用的政策,但是为了保护其自身利益,防止在未来的高科技战争中,对手使用精密的 GPS 制导技术给美国造成威胁,对非经美国政府授权的 GPS 用户采用了限制性政策。SA 政策与 AS 政策就是典型的例证。

一、美国政府的 GPS 政策

现阶段 GPS 有两种导航定位服务功能:一是标准定位服务 (Stand Positioning Service, SPS),包括 L_1 频率上的 C/A 码和导航电文,即粗码 C/A 码定位,未经美国政府授权的广大用户可使用此类服务,其定位精度为平面位置 $\pm 100\text{m}$,高程 $\pm 156\text{m}$;二是精密定位服务

(Precise Positioning Service, PPS), 它主要是 L_1 、 L_2 频率上的 P/Y 码与事后提供的精密星历, 美国及其盟国的军方用户以及少数境内美国政府授权的非军方用户可使用此类服务, 其定位精度为 $\pm 16\text{m}$ 或更高。总的来说, 美国政府的 GPS 政策可归结为以下三条:

- 1) 标准定位服务 (SPS) 向世界范围内公开使用, 不收取直接费用。
- 2) 精密定位服务 (PPS) 将长期保密, 仅提供美军和盟国及特许授权用户使用。
- 3) 美国政府不保证 GPS 的精度之可靠性, 对民间用户不承担责任。处于国家安全性考虑, 美国政府宣布将对精度进行控制, 引入可变误差。

二、实施选择可用性 (Selective Availability, SA) 政策

在全球定位系统的研制组建阶段, 大量的试验结果表明, 使用 C/A 码来进行导航定位, 也能获得优于美国军方预先估计的精度。考虑到 GPS 在军事上的巨大潜力以及 C/A 码是公开向全球所有用户开放的政策, 为防止敌对方利用 GPS 危害美国国家安全, 美国国防部于 1991 年 7 月 1 日起在所有的工作卫星上实施 SA 技术。这种干扰是通过 ε 技术与 δ 技术实现的。 ε 技术是通过在卫星的广播星历中人为地加入误差, 降低卫星星历的精度; δ 技术是对 GPS 的卫星钟频有意识地加入一种快速抖动, 这种抖动降低了钟的稳定性, 从而影响导航定位的精度。

由于科技进步, 未经美国政府授权的广大用户利用差分 GPS 等技术已经能够较好地解决 SA 政策所产生为各种问题, 而且俄罗斯政府管理的全球导航卫星定位系统 (Global Navigation Satellite System, GLONASS, 也称为“格魯纳斯”) 早已宣布不实施 SA 政策, 所以其导航精度远比实施 SA 政策的 GPS 高, 如果美国政府不终止 SA 政策, 大量用户将舍弃 GPS 而改用 GLONASS。上述情况使得美国政府对 GPS 政策作出了调整, 因此, SA 政策已于 2000 年 5 月 2 日 4 时左右 (UTC) 取消。

三、反电子诱骗 (Anti-Spoofing, AS) 政策

AS 政策是美国国防部为防止敌对方发射适当频率的信号对 GPS 卫星信号进行欺骗与电子干扰而采取的一种措施。其目的是保护 P 码, 防止敌对方对 P 码进行精密定位, 将 P 码与更加保密的 W 码的模二相加形成新的 Y 码。实施 AS 政策后, 美国特许用户可以在接收到的 Y 码中剔除 W 码而获得 P 码, 非特许用户不能进行 P 码和 C/A 码相位测量的联合求解而获得 P 码。

近些年, 广大的接收机生产厂家针对 AS 政策进行了不懈努力, 未经美国政府授权的一般测量用户只要采用 Z 跟踪技术仍能利用 P 码进行测距, 从而较好地克服了 AS 政策所造成的不利影响。

课题 3 GPS 的重大发展及技术现代化进程

自美国开始研制 GPS 以来, 由于科学技术的发展、美国国内外形势的变化和广大用户应用的研究, GPS 系统性能、应用领域和定位精度等诸多方面均发生了巨大变化。



一、美国对 GPS 的技术改进与政策调整

1. 政策调整

众所周知，GPS 技术最初设计目的是为了美国军事用途的各种飞行器与运载器的实时导航，但为了经济利益，美国政府也对民用的 GPS 标准定位服务进行了规划设计。由于在研制过程中逐步发现民用与军用之间的相互冲突，为了保护美国的军事安全与国家利益，美国政府先后实施了 SA 与 AS 政策。1995 年后，由于受到俄罗斯政府管理的 GLONASS 的国际竞争与国内就业压力的原因，使得美国政府对 GPS 政策作出了调整。

在上述背景下，1996 年 3 月 29 日，美国以总统指令的形式公布了新的 GPS 政策，宣布将在 4~10 年内取消 SA 政策，进一步鼓励民间用户为商业、科研等和平用途而广泛使用 GPS。美国为更好地满足军事系统的需求，继续扩展民用市场，确保 GPS 在导航卫星定位系统中的霸主地位，劝说其他国家放弃建立自己的导航卫星定位系统的计划，决定对 GPS 实施现代化。

2. 技术改进及 GPS 现代化

1999 年 1 月，美国政府宣布了一项新的 GPS 现代化提案，其目的是保持美国在 GPS 定位系统及其产业的领先地位：

(1) GPS 现代化计划中的军事部分

- 1) 增加信号强度，以增加抗电子干扰能力。
- 2) 在 GPS 信号频道上，增加军用码（M 码），与民用码分开。
- 3) 军用比民用接收机有更好的保护装置。
- 4) 发展新技术，以阻止和干扰敌方使用 GPS。

(2) GPS 现代化计划中的民用部分

- 1) 改善民用导航和定位的精度。
- 2) 扩大服务的覆盖区和改善服务的持续性能。
- 3) 提高导航的完好性（Integrity），如增强信号功率、增加导航型号和频道。
- 4) 保持 GPS 在全球定位系统中技术和销售的领先地位。
- 5) 注意与现有的和将来的其他民用导航系统的匹配和兼容。

(3) GPS 现代化的进程

1) 现代化的第一阶段：发射 12 颗改进型的 GPS Block II R 型卫星，其具有一些新功能，能发射第二民用码，即在 L_2 上加载 C/A 码，在 L_1 和 L_2 上播发 P 码的同时，在其上试验性地加载新的军码（M 码）。

2) 现代化的第二阶段：发射 6 颗改进型的 GPS Block II F 型卫星，除具有 GPS Block II R 型卫星的功能外，进一步强化发射 M 码的功率和增加发射第三民用频率（ L_5 频道）。到 2008 年，空中运行的 GPS 卫星至少有 18 颗 Block II F 型卫星，以保证 M 码的全球覆盖。到 2016 年，GPS 卫星系统全部以 Block II F 卫星运行，共计（24 + 3）颗，其中工作卫星 24 颗，备用卫星 3 颗。

3) 现代化的第三阶段: 讨论 GPS III 型卫星系统结构、系统安全性、可靠性和各种可能的风险, 2008 年发射 GPS III 第一颗试验卫星, 计划用 20 年时间完成 GPS III 计划, 取代目前的 GPS II。

二、GPS 应用技术的最新发展

伴随科技发展和广大民用用户对 GPS 的潜心研究与不断开拓, GPS 应用技术在方法、定位精度与计算方面取得了长足进步。

1. 导航卫星系统兼容性与组合导航定位技术

近年来, 以 GPS、GLONASS 和 Galileo 等为代表的导航卫星系统逐渐完成现代化技术改造和星座组网, 系统性能得到大幅度提升。导航卫星系统将从独立建设走向合作开发利用, 共享空间信息资源和国际导航卫星用户市场, 然而多个系统共用 L 导航频段, 存在相互干扰问题。因此, 美国、俄罗斯和欧洲空间局就导航卫星系统的民用信号兼容与互操作性问题进行了多轮谈判, 达成了基本共识: 修改新型导航卫星系列的相关设计方案, 遵从开放接口协议和频段共用原则, 避免导航卫星系统相互干扰, 共同开发导航卫星空间资源。届时, 多个导航卫星系统信号兼容, 采用多模式组合接收机可以获得精度、连续性、有效性、可用性和可靠性更高的导航定位信息。

2. 导航卫星系统的广域增强技术

利用地球静止轨道卫星进行辅助测距和导航信息转发的天基卫星增强系统, 是提高导航定位精度和系统完好性监测的有效手段, 如美国的广域增强系统 (WASS) 和欧洲地球静止导航卫星重叠服务 (EGNOS) 等, 对卫星星历及钟差参数, 以及电离层延迟误差进行短时预报, 并通过卫星播发至用户, 大大缩短了导航数据龄期, 使民用定位精度达到 2m, 并为导航信息安全提供了保障。在一些高精度导航应用领域, 如机场和港口等, 采用地基局域增强系统 (LAAS) 和伪卫星技术, 实时定位精度可达到厘米量级, 并能近实时监测导航信息, 增强系统完好性和可用性能。因此, 未来 10 年导航卫星系统增强技术将继续得到发展, 以满足人们日益增长的高精度、安全可靠导航等需求。

3. 导航卫星信号区域功率增强、加解密与 BOC 调制技术

在强干扰环境条件下, 导航卫星利用点波束天线, 增强指定区域信号功率, 专用接收机能够接收导航信号, 且不会降低导航定位精度。同时, 对导航信息进行加密处理, 具有抗电子欺骗能力, 以满足特定用户的实际应用需求。因此, 导航卫星系统的抗干扰、多点波束信号增强、小型化的高增益接收天线、导航信号编码与加密, 以及专用信号加解密模块等技术将是导航卫星系统技术的发展方向。

4. 导航星座自主导航与运行管理技术

导航星座自主导航与运行管理的意义在于: 能够有效地减少地面测控站的布设数量, 减少地面站至卫星的信息注入次数, 降低系统长期维持费用; 实时监测导航信息的完好性, 增强系统的生存能力; 在有地面测控系统支持的情况下, 通过星间双向测距能够提供一种独立的校验卫星星历及时钟参数的手段, 并能进一步改善系统性能和提高导航定位精度。因此,



星座自主导航、运行管理与实时监视技术是新一代导航卫星系统研究的热门课题和发展方向。

5. 基于星地星间链路高速宽带网络的导航与通信一体化技术

导航定位精度、完好性、可用性和连续性是设计和评价导航卫星系统的顶层性能指标，也是新一代导航卫星系统技术改造的目标要求。建立高速的星地、星间宽带通信网络，“接入到一颗卫星，等效于接入整个星座”，实现对星座的实时、连续和动态监视，保障导航信息的实时性和有效性，全面满足系统顶层性能指标要求。

随着地面移动通信技术的发展，人们逐渐意识到时间、地点和事件等基本信息要素的重要性。例如，城市车载导航卫星系统已能提供小范围内方便快捷的信息服务。但是，对于大范围，乃至“地球村”实时信息获取，则更有赖于卫星通信网络的支持。新一代导航卫星系统的星地、星间高速宽带通信网络，必然促进导航与通信技术的一体化，实现全球无缝接入和实时信息获取。

6. 对网络 GPS 技术的使用研究

网络 GPS 是一种把 GPS 技术与通信技术和互联网技术结合起来进行 GPS 测量的作业模式。就 GPS-RTK 测量技术来说，现在国际上有两种参考台站网络化的技术，即 FKP（地区修正参数，德语缩写为 FKP）和 VRS（虚拟基准站，Virtual Reference Stations），通过网络发送 FKP 和 VRS 信息。

VRS 所代表的是 GPS 网络 RTK 测量技术，它的出现将使一个地区的所有测绘工作成为一个有机的整体，结束以前 GPS 作业单打独斗的局面。同时，它将大大扩展 RTK 的作业范围，使 GPS 的应用更广泛，精度和可靠性将进一步提高，使从前许多 GPS 无法完成的任务得以完成。最重要的是，在具备了上述优点的同时，建立 GPS 网络成本反而会极大地降低。这是测量方法的巨大进步，就目前的相关技术条件来看，其可实现性已经完全具备，未来前景不可估量。

三、精密单点定位（Precise Point Positioning, PPP）技术

GPS 从投入使用以来，其相对定位的定位方式发展得很快，从最先的码相对定位到现在的实时动态（RTK），使 GPS 的定位精度不断升高。而绝对定位即单点定位发展得相对缓慢，传统的 GPS 单点定位是利用测码伪距观测值以及由广播星历所提供的卫星轨道参数和卫星钟改正数进行的。其优点是数据采集和数据处理较为方便、自由、简单，用户在任一时刻只需用一台 GPS 接收机就能获得 WGS-84 坐标系中的三维坐标。但由于伪距观测值的精度一般为数分米至数米，用广播星历所求得的卫星位置的误差可达数米至数十米，卫星钟改正数的误差为 $\pm 20\text{ns}$ 左右，因此只能用于导航及资源调查、勘探等一些低精度的领域中。随着我国海洋战略的实施，海洋科研、海洋开发、海洋工程等海上活动日益增加，对定位精度的要求也呈现出多样化，如精密的海洋划界、精密海洋工程测量等，要求能够达到十几或几十厘米的定位精度，而采用伪距差分定位只能提供米级的定位精度，如果使用 RTK 功能，作用距离又不能达到。对于这部分定位需求，现有的定位手段无法满足要求，需要寻求新的定位方式或技术。