

21 世纪高等院校教材

GPS定位技术与应用

主 编 吴学伟 伊晓东
副主编 龚文峰 徐 峰
主 审 郭英起



科学出版社

21 世纪高等院校教材

GPS 定位技术与应用

主 编 吴学伟 伊晓东
副主编 龚文峰 徐 峰
主 审 郭英起

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍了 GPS 定位技术的基本理论和方法,并列举了 GPS 在经济建设各个领域的发展思路和实施方案。全书共 8 章,主要内容包括:绪论;GPS 卫星运动轨道及卫星定位信号;GPS 定位基本原理;GPS 定位误差分析;GPS 测量的技术设计与实施;GPS 测量数据处理;GPS 接收机;GPS 定位技术的应用。本书结构简洁,内容翔实,简单易懂。

本书可作为高等院校土木工程、测绘专业本科生教材,也可供相关领域的科研工作者和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

GPS 定位技术与应用/吴学伟,伊晓东主编. —北京:科学出版社,2010
21 世纪高等院校教材
ISBN 978-7-03-029653-5

I. ①G… II. ①吴…②伊… III. ①全球定位系统(GPS) IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 231849 号

责任编辑:杨 红 赵 冰/责任校对:朱光兰

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 华 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 12 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 12 月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—3 000 字数: 290 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

全球定位系统(GPS)技术的出现,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、操作简单等优点,因此它已是测绘空间信息采集的主要手段。从载波相位相对测量定位技术到差分定位技术再到广域差分定位技术,GPS 定位精度已达厘米级甚至毫米级以上,这是常规测量技术难以比拟的。

随着 GPS 定位技术不断走向成熟,其应用的领域也在广度和深度上得到发展和扩大。除了传统的测绘领域外,GPS 技术在军事部门、交通部门、邮电部门、地矿石油部门以及农业、气象、旅游、土地管理、防灾减灾、建筑、物流等部门和行业都得到了普及和应用。

自从 1993 年 GPS 定位系统开始正式实施以来,由于 GPS 软硬件设备的不断完善,面向对象应用的功能不断加强,其价格也在不断下降,这为 GPS 定位技术的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,并能为与空间信息定位有关的行业提供动态、快速、准确、全域的定位服务。仅以测绘行业应用为例就可见一斑:

首先,GPS 作业有着极高的精度。它的作业不受距离限制,小到一個施工现场点位定位,大到全球范围的地壳形变监测。

其次,GPS 定位技术大大提高了定位工作的速度和质量。例如,在工程测量中,相对于常规测量方法,GPS 定位技术不仅降低了劳动作业强度,而且使作业效率提高 3 倍以上。

最后,GPS 定位技术彻底改变了传统测量模式。例如,GPS-RTK 能实时地给出所在位置的空间三维坐标。这给与实时定位工作有关的工程测图、放样、建筑物的结构健康监测等都带来了便捷。

因此,本书就是在上述 GPS 定位技术应用背景框架的思路下编写的。书中首先介绍了 GPS 定位技术的发展现状,重点分析了 GPS 定位系统的组成和参考基准。在介绍 GPS 定位基本原理时,对两种主要的 GPS 差分定位方式(包括基于伪距差分测量和载波相位差分测量)进行了介绍。由于 GPS 面向应用的行业的多样性,不同行业对 GPS 精度的选择也不同。在第 4 章中,主要介绍了 GPS 定位误差的来源和影响大小及其削弱方法。从测量专业的角度出发,第 5 章和第 6 章从 GPS 测量的外业工作和内业工作出发,分别对 GPS 测量实施方法、GPS 网平差进

行了较详细的介绍。本书的一个重点是突出了 GPS 的应用,在第 8 章,用了较大的篇幅分析了 GPS 定位技术在各个行业尤其是与测绘技术有关的应用现状。考虑到卫星定位技术的迅速发展,本书也对其他卫星定位系统,如俄罗斯的“格洛纳斯”卫星导航系统(GLONASS)、我国的“北斗”卫星导航系统(CNSS)、欧洲“伽利略”卫星导航系统(Galileo)进行了介绍和比较。全书既强调了 GPS 基础理论和方法的重要性,也兼顾了 GPS 在应用领域的现实性。

全书共 8 章,分别由东北林业大学、大连理工大学、黑龙江大学等高校相关教师协作完成。其中第 2、4、5、7 章和附录由东北林业大学的吴学伟执笔,第 1、6 章和第 8 章的前四节由大连理工大学的伊晓东执笔,第 3 章由黑龙江大学龚文峰执笔,第 8 章的后两节由大连理工大学城市学院的徐峰执笔。全书由黑龙江工程学院的郭英起主审。

本书主线清晰、结构简洁,以面向应用为重点,既适合高等院校测绘类专业本科生使用,也适合高等工科院校非测绘类本科生或研究生使用;同时也可供从事与 GPS 定位和导航工作相关的科研工作者和技术人员参考。

书中借鉴了许多同行的应用实例,在此表示衷心的感谢。同时,由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,诚请广大读者和同行提出宝贵的意见。

编 者

2010 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 GPS 定位技术发展概述	1
1.2 全球定位系统的组成	11
1.3 GPS 定位参考基准	15
习题	31
第 2 章 GPS 卫星运动轨道及卫星定位信号	32
2.1 卫星在轨定位方法	32
2.2 GPS 卫星的载波信号	36
2.3 GPS 卫星的测距码信号	37
2.4 GPS 卫星的导航电文	45
2.5 GPS 卫星星历	49
2.6 GPS 卫星位置坐标计算	51
习题	54
第 3 章 GPS 定位基本原理	55
3.1 伪距定位测量原理	55
3.2 载波相位观测原理	60
3.3 差分 GPS 定位原理	68
习题	79
第 4 章 GPS 定位误差分析	80
4.1 概述	80
4.2 与卫星有关的误差	82
4.3 与信号传播有关的误差	86
4.4 与接收机有关的误差	95
4.5 其他误差	96
习题	98
第 5 章 GPS 测量的技术设计与实施	99
5.1 GPS 测量的技术设计	99
5.2 GPS 测量的组织实施	109
5.3 GPS 测量的作业模式	119

习题.....	123
第 6 章 GPS 测量数据处理	124
6.1 GPS 原始测量数据处理	126
6.2 GPS 网整体平差基本方法	129
6.3 GPS 基线处理方法	132
6.4 GPS 网的三维平差	136
6.5 GPS 网平差成果分析	141
6.6 GPS 高程测量技术	148
习题.....	158
第 7 章 GPS 接收机	159
7.1 GPS 接收机的分类	159
7.2 GPS 接收机的组成和工作原理	162
7.3 GPS 接收机的选用和检验	166
7.4 GPS 接收机的维护	168
习题.....	169
第 8 章 GPS 定位技术的应用	170
8.1 GPS 定位技术在地球形变测量方面的应用	170
8.2 GPS 定位技术在航空、航海及车辆导航方面的应用	179
8.3 GPS 在工程测量中的应用	189
8.4 GPS 技术在林业工作中的应用	199
8.5 GPS 在农业、旅游、气象中的应用	201
8.6 基于 GPS 技术的建筑结构健康监测	204
8.7 智能运输系统和 GPS 车辆导航	213
习题.....	217
主要参考文献	218
附录 其他卫星定位系统	220

第 1 章 绪 论

进入 20 世纪后,人类对空间信息技术的开发进入快速发展时期,从航空摄影测量技术开始,人类第一次可以站在高空观测并描绘自己居住的家园。而随着 1957 年第一颗人造卫星 SPUTNIK-1 的发射成功,人类又站在更高的太空上以更广的视野去观测自己生活的星球。20 世纪知识大爆炸的背景,大大促进了多种空间信息科学技术的发展,全球定位系统就是其中的典型代表。

全球定位系统(GPS)即“授时与测距导航系统/全球定位系统”(NAVSTAR/GPS, navigation system timing and ranging/global positioning system)的简称,它由美国政府组织研究,历经约 20 年的探索和试验,从 1973 年开始,到 1993 年全部建成并投入使用。GPS 是伴随现代科学技术的迅速发展而建立起来的新一代精密卫星导航和定位系统,不仅具有全球性、全天候、连续的三维测速、导航、定位与授时能力,而且具有良好的抗干扰性和保密性。其作业特点具体体现在如下三个方面。

(1) 全球、全天候工作:GPS 能为用户提供连续、实时的三维位置、三维速度和精密时间,不受天气的影响。

(2) 定位精度高:目前 GPS 单机定位精度优于 10m,若采用差分定位,精度可达厘米级和毫米级。

(3) 功能多、应用广:GPS 不仅在测量、导航、测速、测时等方面体现出其便捷和快速,而且在其他方面也得到了广泛的应用。GPS 技术率先在大地测量、工程测量、航空摄影测量、海洋测量、城市测量等测绘领域得到了应用,并在军事、交通、通信、资源、管理等领域展开了研究并得到广泛应用。

随着全球定位系统的不断改进,软、硬件的不断完善,GPS 应用的领域也正在不断地拓展,目前已遍及国民经济各个部门,并开始逐步深入到人们的日常生活中。

1.1 GPS 定位技术发展概述

1.1.1 GPS 定位技术的提出

GPS 定位技术的出现不是偶然的,它是多种学科成果发展和融合的结果,包括卫星在轨技术、空间大地测量技术、无线电数字通信与导航技术等,下面列出几个支持 GPS 发展的关键支持技术。

1. 多普勒频移效应与子午卫星定位技术

1) 多普勒频移效应

当波源与观测者做相对运动时,波源发射频率与观测者接收频率产生了频移现象,这一现象由奥地利物理学家多普勒于 1842 年发现,被称为多普勒频移效应。

如图 1-1 所示,设 f_s 为卫星波源发射频率, f_R 为测站接收频率, C 为光速, α 为卫星波源运动方向与测站方向间的夹角, v 为波源运动速度,测站接收频率与卫星波源发射频率有如下关系:

$$f_R = \frac{c}{c - v \cdot \cos \alpha} \cdot f_s \quad (1-1)$$

而 $\Delta f = f_s - f_R$ 称为多普勒频移。

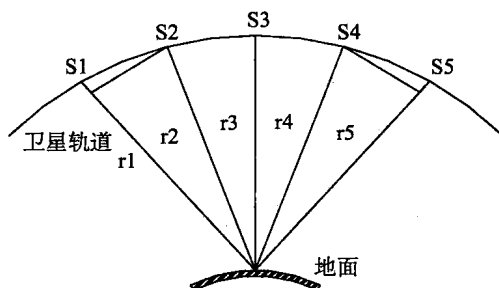


图 1-1 多普勒频移效应

产生多普勒频移的主要原因是卫星到测站的径向相对速度 v_1 变化,即

$$v_1 = \frac{dr}{dt} = -v \cdot \cos \alpha \quad (1-2)$$

若把式(1-1)代入式(1-2)中,则有

$$f_R = \left(1 - \frac{v_1}{c}\right) \cdot f_s \quad (1-3)$$

或

$$v_1 = c \cdot \frac{\Delta f}{f_s}$$

因此,多普勒频移与卫星到测站的径向相对速度 v_1 成正比,如果等时间间隔求算出卫星 S1 和 S2、S2 和 S3……之间的平均频移量,就能利用积分方法求出相应的时间间隔段 dt 下径向平均相对速度,再乘以 dt ,就可以求得测站到两个不同卫星间的距离差 Δr ,即

$$\Delta r = r_2 - r_1 \quad (1-4)$$

如图 1-2 所示,根据几何学中双曲线的定义,如果以相邻的两个卫星位置为双曲线焦点,则每一个距离差可作出一对双曲线,而测站必在此双曲线左枝或右枝上,若取三个距离差来作双曲线,必能交会出测站位置。这一原理称为多普勒距离差法测量,是子午卫星导航定位系统所依据的主要理论思想。

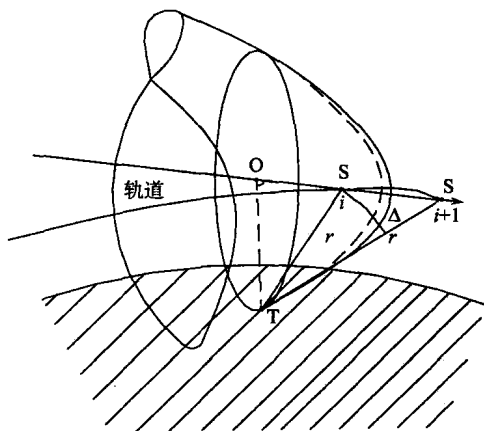


图 1-2 多普勒距离差法测量

2) 子午卫星系统

子午卫星系统(Transit)是美国海军研制、开发、管理的第一代卫星导航定位系统,又称海军导航卫星系统(navy navigation satellite system, NNSS)。

1957 年,苏联发射了人类第一颗人造地球卫星,美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的古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产生了浓厚的兴趣。他们的研究表明,利用地面跟踪站上的多普勒测量资料可以精确确定卫星轨道。在应用物理实验室工作的另外两位科学家麦克卢博士和克卜纳博士则指出,对一颗轨道已被准确确定的卫星进行多普勒测量的话,可以确定用户的位置。这个“反向观测方案”设想为子午卫星系统的诞生奠定了基础。

子午卫星导航设备的用户设备为卫星多普勒接收机,其基本工作原理是:接收一颗通过用户上空的子午卫星发送的导航定位信号,测量该信号的多普勒频移,并从导航电文中解调出在视卫星的在轨实时点位和时标信息,从而解算出用户点位坐标。

在实际定位时,进行卫星多普勒测量后我们即可根据多普勒频移计数 N ,求得观测时域 $[t_1, t_2]$ 内始终点卫星至接收机的距离差

$$(\rho_2 - \rho_1) = [N - (f_g - f_s)(t_2 - t_1)]\lambda \quad (1-5)$$

式中: λ 、 f_g 分别为卫星多普勒接收机本极振荡的波长和频率; f_s 为子午卫星发射信号的频率。

若该卫星的轨道已被确定,则 t_1 、 t_2 时刻卫星在空间的位置 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 是已知的,针对地面用户 (x_u, y_u, z_u) ,那么我们就列式(1-6)

$$\begin{aligned} (\rho_2 - \rho_1) = & \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} \\ & - \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} \end{aligned} \quad (1-6)$$

根据式(1-5)和式(1-6),利用在视子午卫星多个观测时段数据,可以建立多组观测方程,并利用最小二乘原理求算出地面用户位置 (x_u, y_u, z_u) 。

子午卫星在几乎是圆形的极轨道(轨道倾角约 90°)上运行。卫星离地面的高度约为 1070km, 卫星的运行周期为 107min。子午卫星星座一般由 6 颗卫星组成。如图 1-3 所示, 这 6 颗卫星应均匀地分布在地球四周, 即相邻的卫星轨道平面之间的夹角均应为 30° 。但由于各卫星轨道面的倾角 i 不严格为 90° , 故进动的大小和符号各不相同。这样, 经过一段时间后, 各轨道面的分布就会变得疏密不一。位于中纬度地区的用户平均 1.5h 左右可观测到一颗卫星, 但最不利时要等待 10h 才能进行下一次观测。

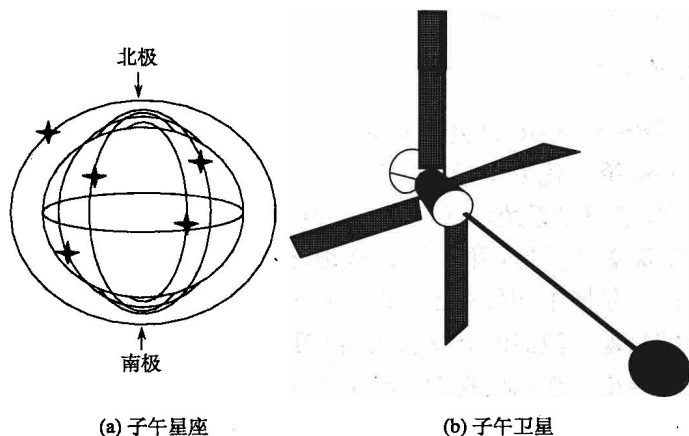


图 1-3 子午卫星及星座

虽然美国“海军导航卫星系统”是导航技术的一大创举, 但是该系统还存在一定的缺陷。由于 NNSS 卫星数目少(5~6 颗), 地面观测站至轨道卫星之间信号传播时间间隔较长(平均约 1.5h 以上), 卫星运行轨道高度低(约 1000km), 难以精密定轨, 卫星上射电频率低而难以补偿电离层效应影响, 因此本系统难以充分满足军事要求, 尤其是对高动态目标导航的要求。

2. 卫星制作技术

人造卫星(天体)用于导航与测量, 是从几何原理和动力学原理两个方面考虑的, 人造卫星离地球近且质量小, 它的运动取决于地球引力场; 从几何上看, 人造卫星可以认为是一个空中的运动目标(点)。

就研究地球本身来说, 人造卫星一般可分为气象卫星、海洋卫星、地球物理卫星、大地测量卫星、通信卫星、导航卫星等。但是总体来说, 这些卫星都是起着一种信息传感或中继的作用, 都共同有一些需要解决的问题, 即测定卫星轨道, 测定地球重力场, 以及如何更有效地传输信息。因此, 这些卫星的任务互有联系, 彼此需要密切配合。大地测量卫星, 实际上并不单纯为了收集大地测量本身所需要的数

据,它的设备是综合其他学科的需要而装备的。其他卫星也同样如此。这样,凡是有适用设备的卫星都可用于大地测量。

用于大地测量的卫星(其他卫星也类似),除了要考虑它的大小、质量、高度、传输信息的设备等因素外,还要考虑它运动所经的空间环境不同于在地面的运动环境,并采取相应措施。

一个卫星的功能性设备应包括电源部分、跟踪遥感及数据处理部分、各类传感设备部分。

电源主要利用太阳能,用几片由半导体组成的翼形集能板,可将太阳能转换为电能存储在镍镉电池中。跟踪遥感部分应有双向无线电通信系统,通过多普勒信标或应答器保持与地面控制站的联系,包括将卫星测出的地面信息数据,卫星自身的工作状态,以及设备的各种参数传输给地面站,并接受地面指令完成指定动作。卫星上的计算机同时进行必需的数据处理并加以储存,传感部分主要包括适于各种用途的发射、接收、测量仪器,如雷达测高仪、激光测距仪、红外辐射仪、多普勒测频仪及时钟等。

我国已发射的“嫦娥一号”,就搭载了多项科学考察设备,如测绘月球地图的 CCD 传感器,完成月球表面每个探测点的高度测量的激光高度计;探测月球上 14 种元素分布的 γ/X 射线谱仪,测量月球土壤厚度和氦-3 的总量及分布的微波探测仪等。

自 20 世纪 70 年代后期以来,发射的卫星趋向于多功能、高效率、高精度。除了专题研究以外,为单一项目目的而设计的卫星并不太多,而是着重于发展卫星群,例如,前面提到的 NNSS 子午卫星群,以及后面将要介绍的 GPS 卫星星座(群)等。

3. 无线电通信信号

为了保证卫星和地面接收机之间的信息联系,卫星本身应具备双向通信能力,即它可以发射无线电信号,也可以接收无线电信号。同样为了利用多普勒频移进行定位测量,需要提供一定频率的发射信号,如在 NNSS 中,子午卫星的射电频率有两个,分别为 400MHz 和 150MHz。

通常由于发射的这些信号频率较低,难以穿透大气层及电离层,因此还需要把这些信号进行调制加载到其他高频信号里进行传输。可运载调制信号的高频振荡波称为载波。

在卫星无线电通信中,为了更好地传送相关信息,我们往往将这些信息调制在高频的载波上,然后再将这些调制波播发出去,而不是直接发射这些信息。

子午卫星和 GPS 卫星等发射的无线电信号均由载波、测距码和导航电文三部分组成。

为了识别 GPS 卫星群中不同卫星信息,同时也是为了保密需要,在卫星信息通信中,还要采用编码技术进行接收信号识别。

在一般的通信中,当调制波到达用户接收机并解调出有用信息后,载波的作用便告完成。但在全球定位系统中情况有所不同,载波(包括 L1 和 L2 两个微波段)除了加载包括测距码和导航电文等调制波外,还可以利用载波作为测距信号,从而获得较高的测量定位精度,这是由于载波为高频电磁波信号,其波长通常比测距码波长要短得多,而采用高频率载波可以更精确地测定多普勒频移和载波相位(对应的距离值),从而提高 GPS 测速和定位的精度。

1.1.2 GPS 的建立及应用

1. GPS 的建立

为了满足军事部门和民用部门的需要,实现全天候、全球性和高精度的连续导航定位的迫切要求,1973 年 12 月,美国国防部批准陆海空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统 NAVSTAR/GPS,通称为 GPS 卫星全球定位系统,简称 GPS。

GPS 是一种以空间卫星为基础的无线电导航与定位系统,是一种被动式卫星导航定位系统,能为世界上任何地方,包括空中、陆地、海洋甚至于外层空间的用户,全天候、全时间、连续地提供精确的三维位置、三维速度及时间信息,具有实时性的导航、定位和授时功能。

GPS 计划的实施共有三个阶段,如表 1-1 所示。

表 1-1 GPS 卫星发展过程

产品级别	名称	卫星类型	卫星数量	发射时间	用途
第一代	概念证实卫星	BLOCK I	11	1978~1985 年	实验
第二代	工作生产卫星	BLOCK II (A)	28	1989~1994 年	工作
第三代	后期补充卫星	BLOCK II R	20	1997 年至现在	改进 GPS
第四代	升级卫星	Block III		2012 年开始	换代

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

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

第三阶段为实用组网阶段。1989 年,第一颗 GPS 工作卫星成功发射,GPS 宣告进入生产作业阶段。GPS 工作卫星的发射成功也表明了 GPS 进入工程建设阶

段。1993 年底实用的 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。

到 1993 年 7 月,已进入轨道可正常工作的 Block I 试验卫星、Block II 和 Block II A 工作卫星总数已达 14 颗,全球定位系统已具备全球连续导航定位能力,故美国国防部于 1993 年 11 月 8 日正式宣布全球定位系统已具有初步工作能力。这是研制组建全球定位系统过程中具有重要意义的事件。它标志着研制、试验阶段已结束,系统已进入运行阶段。它意味着除特殊情况外,美国政府必须以公开承诺的精度向全世界用户提供连续的全球导航定位服务。

1995 年 4 月 27 日,美国空军指挥部空间部宣布全球定位系统已具有完全的工作能力,进入轨道能正常工作的 Block II 和 Block II A 工作卫星数量之和已达到 14 颗。

1996 年 3 月 28 日,美国政府以总统指令的形式公布了美国政府新的 GPS 政策,对国防部宣布的原 GPS 政策作了较大的调整。

2000 年 5 月 2 日(UTC 4 时左右),美国政府终止了已实行多年的 SA 政策,民用方在使用 GPS 时所受到的限制已明显减少。此外,美国政府也承诺要不断改进、完善全球定位系统,实现全球定位系统的现代化。

美国陆续发射了系列 GPS 卫星,目前在太空有 32 颗以上 GPS 工作卫星。至此,GPS 导航定位系统进入了成熟阶段。

2. GPS 的特点及应用

1) GPS 的特点

由于 GPS 卫星数目较多,分布合理,在地球任何地点均可连续同步观测到至少 4 颗卫星,在我国最多可同时观测到 13 颗卫星(按运行的 27 颗卫星推算),从而保障了全球、全天候连续的三维定位。

实时确定运动目标的三维位置和速度,既可保障运动载体沿预定航线的运行,也可监视和修正航行路线,以及选择最佳航线。

定位精度高。目前在大于 1000km 的基线上,相对定位精度可达 10^{-9} ;100km 可达 10^{-8} 。观测站之间无需通视,又可使观测时间缩短。

实时定位这一导航技术是现代化的重要标志,它使 GPS 的应用领域不断拓宽,成为 20 世纪最大科技成就之一。

2) GPS 技术应用

GPS 卫星所发送的导航定位信号,是一种可供无数用户共享的空间信息资源;陆地、海洋和空间的广大用户,只要持有一种能够接收、跟踪、变换和测量

GPS 信号的接收机,就可以全天候和全球性地测量运动载体的七维状态参数和三维姿态参数;其用途之广,影响之大,是任何其他接收设备望尘莫及的;上至航空航天器,下到打鱼船、导游、摄影、移动通信和精细农业,都可以利用 GPS 信号接收机。

图 1-4 反映了 GPS 功能及部分应用领域。

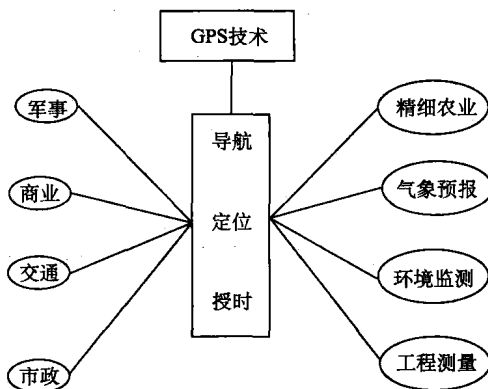


图 1-4 GPS 功能及部分应用领域

1.1.3 GPS 技术现代化

GPS 现代化包括地面监控部分和空间卫星部分。GPS 现代化政策主要有三点:一是要发展军码和强化军码的保密性能,加强抗干扰能力,保护美方和友好方的使用;二是在必要时施加 SA、AS(反电子欺骗技术)等技术进行干扰,干扰敌对方的使用;三是保持有威胁地区以外的民间用户能更精确、更安全地使用。

20 世纪 90 年代以来,微电子技术和数字化技术已获得重大进展,卫星导航/定位的理论也日趋成熟。时至今日,GPS 的现代化已成为可能。

GPS 空间卫星现代化首先是把剩余的 9 颗 Block II R 卫星改造为 Block II R-M(Block II R-Modified)卫星,使它们具有一些新的功能。其中第一颗 Block II R-M 已于 2005 年 9 月 26 日发射升空。

Block II R-M 卫星具有下列特点:在 L2 上加载第二民用码 C/A 码;在 L1 和 L2 同时加载新的军码(M 码);提高卫星测距码 P 码和 C/A 码信号的发射功率;增加应变能力,例如,实现 GPS 卫星间测距和数据通信,在轨自主更新 GPS 卫星的广播星历等,以减少对地面监控系统的依赖程度,增强 GPS 的自主导航能力。

在 L2 上加载第二民用码 C/A 码后,民间用户就可以用 L1-C/A 码和 L2-C/A 码进行导航定位,实现精确而又实时的电离层改正,从而提高定位、测速和定时的精度。

在对 Block II R 改造的同时,美国军方对卫星进行了进一步升级,从 2007 年开始,发射了新型的 Block II F 型卫星,截至 2009 年 8 月已发射了 21 颗此类卫星。它除了具有 Block II R-M 型卫星的功能外,还进一步强化了发射 M 码的功率并增加了第三民用频率,即 L5 频道,其载波频率为 1176.45MHz。预计到 2012 年,在空中运行的 GPS 卫星中,至少有 18 颗 II F 型卫星,达到初始工作能力,以保证 M 码的全球覆盖。到 2015 年达到完全工作能力。

GPS 卫星的第三民用导航定位信号分为载波频道(carrier channel)和数据频道(data channel);前者不传送数据码,只是简化了 GPS 信号接收机对 GPS 信号的捕获和跟踪;数据频道的设立,使 GPS 信号接收机能够快速准确地获取 GPS 卫星导航电文,更能加速 GPS 动态用户导航定位的测量过程。

第四代 GPS 工作卫星 Block III (GPS III),已于 2001 年开始了实质性的研制,预计 2012 年将发射第一颗 GPS III 卫星。GPS III 卫星全部投入运行后,将改变现行的六轨道 GPS 卫星星座的布局 and 结构,构建成高椭圆轨道和地球静止轨道相结合的新型 GPS 混合星座。

图 1-5 是 Block III 卫星系统的主要特点。



图 1-5 Block III 卫星系统

采用三个导航定位信号,可以拓宽 GPS 信号的实用范围。Block III 卫星,不仅将和 Block II F 卫星一样采用 L1、L2、L5 三个导航定位信号,为民间用户提供厘米级的实时点位测量精度,而且将 GPS 卫星及其导航定位信号故障的预警时

间,从现行的 30min 缩短到 60s 以内,使 GPS 导航定位可以在高动态环境下使用。

强化军用功能,提高军用信号发射功率,实施点波束定区发射技术。在实现军民信号分离后,将军用伪噪声码——ME 码的发射功率提高 20dB 左右;这不仅强化了抗干扰能力,而且便于(兵)器载 GPS 信号接收机的高速有效作业。再加上 GPS 信号对所选地区的点波束发射,进一步强化了美国军队的实用功能。

对民间用户而言,GPS 现代化后,第二和第三民用信号的增加将改善民用导航和定位的精度;扩大服务的覆盖面和改善服务的持续性;提高信号的完好性和可用性;加强对无线电频率干涉的抗干扰性。第二和第三民用信号将在飞机的进港着陆、测绘、精细农业、机器控制和地球科学研究等应用领域发挥重要的作用。

1.1.4 GPS 技术与测绘工作

GPS 定位技术自问世以来,就以其精度高、速度快、操作简单等优点引起了测绘界的普遍关注。GPS 定位技术在测绘行业深入最早,也是精度最高的应用领域。发展至今,定位技术从载波相位相对测量定位技术到差分定位技术再到广域差分定位技术,其定位精度已达厘米级甚至毫米级;作业方式也从原来的静态测量到目前的实时动态测量技术(GPS RTK),大大提高了作业效率。国内外大量的实践表明,利用 GPS 进行平面相对定位的精度能够达到 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6} D$ (D 为基线长度,单位为 km)甚至更高,这是常规测量技术难以比拟的。

GPS 在测绘工作中已得到广泛应用,主要包括如下四个方面。

(1) 大地控制测量:时至今日,可以说 GPS 定位技术已经完全取代了用常规测角、测距手段建立大地控制网。我们一般将应用 GPS 卫星定位技术建立的控制网称为 GPS 网。归纳起来,大致可以将 GPS 网分为两大类:一类是全球或全国性的高精度 GPS 网,这类 GPS 网中相邻点的距离在数千千米至上万千米,其主要任务是作为全球高精度坐标框架或全国高精度坐标框架,为全球性地球动力学和空间科学方面的科学研究工作服务,或用以研究地区性的板块运动或地壳形变规律等问题。另一类是区域性的 GPS 网,包括城市或矿区 GPS 网、工程 GPS 网等,这类网中的相邻点间的距离为几千米至几十千米,其主要任务是直接为国民经济建设服务。

因此,利用 GPS 定位技术可以实施如下大地测量工作:

- 1) 建立和维持高精度三维地心坐标系统;
- 2) 不同大地控制网之间的联测和转换;
- 3) 建立新的地面控制网(点);
- 4) 检核和改善已有地面网;
- 5) 对已有的地面网进行加密;
- 6) 研究与精化大地水准面。