



# “3S” 理论与技术

## “3S” LILUNYU JISHU

范文义 李明泽 毛学刚 于颖 编著



 东北林业大学出版社

# “3S” 理论与技术

范文义 李明泽 编著  
毛学刚 于颖



东北林业大学出版社  
· 哈尔滨 ·

---

图书在版编目 ( CIP ) 数据

“3S”理论与技术 / 范文义等编著. --2 版. --哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 5674 - 0788 - 6

I. ①3… II. ①范… III. ①地理信息系统②全球定位系统③遥感技术 IV. ①P208②P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 150518 号

---

责任编辑: 姜俊清

封面设计: 彭宇

出版发行: 东北林业大学出版社 (哈尔滨市香坊区哈平六道街 6 号 邮编: 150040)

印装: 三河市佳星印装有限公司

开本: 787mm × 1092mm 1/16

印张: 22.75

字数: 510 千字

版次: 2016 年 8 月第 2 版

印次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

定价: 103.00 元

## 内容简介

本书全面地介绍了“3S”技术的概念及其地理空间基础 GPS 定位的概念、原理和技术，航空像片和卫星图像的处理及专题信息提取的方法；地理信息系统的有关概念、理论、技术和应用，“3S”集成的技术和综合应用方法。

本书可作为“3S”技术应用的教材，对从事资源与环境监测、管理评价和规划决策的人员具有极大的参考价值。

# 前 言

近年来，在空间信息及与之有关的领域，3S 的概念方兴未艾。3S 是指以遥感 RS (Remote Sensing)、地理信息系统 GIS (Geography Information System) 和全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 为主的、与地理空间信息有关的科学技术领域。有的学者在讨论这三种技术的完备性时提出过“4S”和“5S”的概念，但目前中国学者和广大应用者还是习惯用“3S”来概括这一类技术，在国际上，与此对应的英文为“Geomatics”。因此，可以认为“3S”就是我国的“Geomatics”。其中遥感是数据收集的技术手段，GPS 实现空间信息的定位和配准，GIS 则是各种空间信息管理和分析的核心。

“3S”集成技术的发展，形成了综合的、完整的对地观测空间信息系统，提高了人类认识地球的能力；相应地，它拓展了传统测绘科学的研究领域。作为地理学的一个分支学科，“Geomatics”产生并对包括遥感、全球定位系统在内的现代测绘技术的综合应用进行探讨和研究。同时，它也推动了其他一些相关学科的发展，如地球信息科学、地理信息科学等，它们成为“数字地球”这一概念提出的技术基础。同时，“3S”技术的概念提出后，受到相关的科研单位、生产部门和高等院校的重视，并在地学领域得到广泛应用。

本书力求全面论述“3S”的概念、基本理论和应用技术，同时也介绍发展的现状和趋势，使读者对该领域有一个清晰和全面的了解。本书是在笔者近年来教学的讲稿和科研课题（国家攻关课题、国家自然科学基金项目、黑龙江省攻关课题等）成果的基础上编写而成的。全书共分 5 篇，第一篇第 1 章由范文义和李明泽共同完成，第 2 章由于颖完成；第二篇第 1、2 章由毛学刚完成，第 3 章由于颖完成，第 4 章由李明泽完成；第三篇第 1、2 章由于颖完成，第 3、4 章由毛学刚完成，第 5 章由李明泽完成；第四篇第 1 章由李明泽完成，第 2、4 章由毛学刚完成，第 3 章由于颖完成；第五篇由李明泽完成。全书由范文义统稿。本书的出版得到东北林业大学出版基金的资助，并有幸被评为黑龙江省重点图书，同时也得到出版社的领导和同志们们的热情帮助，在此一并致谢！

由于作者水平和时间所限，书中错误之处在所难免，敬请指正。

范文义  
2016 年 6 月

# 目 录

## 第一篇 “3S” 技术概念及地理空间基础

1 绪论 .....	( 3 )
1.1 “3S” 技术概念 .....	( 3 )
1.2 GPS 定位技术的由来和发展 .....	( 5 )
1.3 遥感技术及其发展历程 .....	( 21 )
1.4 地理信息系统的概念及发展概况 .....	( 27 )
2 3S 技术地理空间基础 .....	( 43 )
2.1 地球椭球 .....	( 44 )
2.2 大地坐标系和空间直角坐标系 .....	( 51 )
2.3 地图投影 .....	( 55 )
2.4 地形图分幅与编号 .....	( 61 )

## 第二篇 全球定位系统

1 GPS 定位的坐标系统与时间系统 .....	( 71 )
1.1 坐标系统的类型 .....	( 71 )
1.2 协议坐标系及其之间的转换 .....	( 72 )
1.3 时间系统 .....	( 76 )
2 GPS 信号与卫星坐标计算 .....	( 81 )
2.1 GPS 卫星信号 .....	( 81 )
2.2 GPS 卫星的导航电文 (数据码) .....	( 87 )
2.3 GPS 卫星信号的构成 .....	( 89 )
2.4 GPS 卫星的坐标计算 .....	( 92 )
3 GPS 的定位原理 .....	( 95 )
3.1 GPS 定位的方法与观测量 .....	( 95 )
3.2 观测量的误差及其影响 .....	( 100 )
3.3 绝对定位原理 .....	( 105 )
3.4 差分定位原理 .....	( 109 )
4 GPS 定位应用 .....	( 115 )
4.1 坐标系统转换—GPS 校正参数的计算 .....	( 115 )
4.2 基于两台手持 GPS 的坐标差分 .....	( 116 )

### 第三篇 遥感技术

1 遥感基础 .....	(119)
1.1 电磁波与电磁波谱 .....	(119)
1.2 地物的光谱特性 .....	(122)
1.3 大气对电磁辐射的影响 .....	(127)
1.4 遥感图像彩色合成的原理 .....	(130)
2 航空遥感 .....	(136)
2.1 航空摄影的种类 .....	(136)
2.2 航空像片的物理特性 .....	(138)
2.3 航空像片的几何特性 .....	(141)
2.4 航空像片的立体观察与量测 .....	(148)
3 航天遥感 .....	(156)
3.1 遥感数据 .....	(156)
3.2 卫星遥感平台 .....	(161)
4 遥感图像的目视判读 .....	(172)
4.1 遥感信息提取 .....	(172)
4.2 图像判读 .....	(172)
4.3 判读要素 .....	(174)
4.4 判读标志 .....	(175)
4.5 判读图的制作 .....	(177)
5 遥感数字图像处理及应用 .....	(178)
5.1 遥感图像校正 .....	(178)
5.2 遥感图像增强和变换 .....	(181)
5.3 遥感图像分类 .....	(191)
5.4 遥感图像处理与应用 .....	(199)

### 第四篇 地理信息系统

1 空间数据模型与结构 .....	(211)
1.1 空间信息 .....	(211)
1.2 空间数据模型 .....	(214)
1.3 空间数据结构 .....	(215)
1.4 地貌的表达——数字化地形模型 .....	(229)
2 地理信息系统数据库的组织 .....	(241)
2.1 空间区域框架与地理网格及图层结构 .....	(241)
2.2 空间数据库的总体结构 .....	(244)
2.3 空间数据的数字化及地理编码 .....	(249)
2.4 空间数据管理 .....	(257)

3	空间数据处理、分析的基本方法及应用模型 .....	(272)
3.1	GIS 空间查询的概念 .....	(272)
3.2	空间数据处理、分析的技术方法 .....	(274)
4	空间分析的模型方法 .....	(286)
4.1	从符号模型到图形、图像模型 .....	(286)
4.2	地图分析模型方法 .....	(287)
4.3	应用分析模型与 GIS 系统工具的集成和 GIS 应用系统的环境模式 .....	(287)
4.4	在自然资源和环境领域中 GIS 的应用 .....	(292)

## 第五篇 “3S” 集成及综合应用

1	RS 与 GIS 的集成 .....	(317)
1.1	航空像片自动纠正及矢量化 .....	(317)
1.2	遥感信息进入 GIS .....	(319)
1.3	GIS 提高 RS 的解译性 .....	(324)
2	遥感信息模型 .....	(326)
2.1	遥感信息模型的概念 .....	(326)
2.2	建立遥感信息模型的方法 .....	(336)
3	“3S” 集成综合应用 .....	(339)
3.1	RS 与 GPS 的结合 .....	(339)
3.2	GIS 与 GPS 的结合 .....	(339)
3.3	“3S” 之间的集成综合应用 .....	(340)
	参考文献 .....	(352)



# 第一篇 “3S” 技术概念及 地理空间基础



# 1 绪 论

## 1.1 “3S” 技术概念

近年来,在空间信息及与之有关的领域,“3S”的概念方兴未艾。“3S”是指以遥感 RS (Remote Sensing)、地理信息系统 GIS (Geography Information System) 和全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 为主的、与地理空间信息有关的科学技术领域。有的学者在讨论这三种技术的完备性时提出过“4S”和“5S”的概念,但目前中国学者和广大应用者还是习惯用“3S”来概括这一类技术,在国际上,与此对应的英文为“Geomatics”。因此,可以认为“3S”就是我国的“Geomatics”。

Geomatics 一词也有其演化过程,最早于 20 世纪 60 年代末期出现在法国,法国的大地测量和摄影学家 Bernart Dubuisson 于 1975 年将该词的法文“Geomatique”正式用于科学文献。1990 年 Gagnon P 将“Geomatics”定义为“利用各种手段,通过一切途径来获取和管理有关空间基础信息的空间数据的科学技术领域”。随即加拿大、澳大利亚、英国、中国香港、荷兰等国家和地区的一些高等学校的测量工程系、政府机构、杂志等出现了更名热潮。如加拿大拉瓦尔大学等将测量工程系改名为“Geomatics”系;加拿大学者 Groot 到荷兰 ITC 任教,将测量学、摄影测量学、遥感图像处理、地图制图、土地信息系统以及计算机科学几个教研室合起来成立了“GeoInformation”系;同年,加拿大能源矿产资源部将其测量杂志和遥感局改名为“GeomaticsCanada”。

从以上“Geomatics”一词出现的过程可以看出,“Geomatics”反应了现代测绘科学、遥感和地理信息科学与现代计算机科学和信息科学相结合的多学科集成以满足空间信息处理要求的趋势。“Geomatics”一词译为“地球空间信息学”,是以全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感(RS)等空间信息技术为主要内容,并以计算机技术为主要技术支撑,用于采集、量测、分析、存储、管理、显示、传播和应用与地理空间分布有关的数据的一门综合的、集成的信息科学的重要组成部分,构成数字地球的基础。

综上,无论是研究人员还是应用人员,“3S”技术为科学研究、政府管理、社会生产提供了新一代的观测手段、描述语言和思维工具。“3S”的结合应用,取长补短,是一个自然的发展趋势,三者之间的相互作用形成了“一个大脑,两只眼睛”的框架,即 RS 和 GPS 向 GIS 提供或更新区域信息以及空间定位,GIS 进行相应的空间分析,并从 RS 和 GPS 提供的浩如烟海的数据中提取有用信息、进行综合集成,使之成为决策的科学依据。

GIS、RS 和 GPS 三者集成利用,构成为整体的、实时的和动态的对地观测、分析和应用的运行系统,提高了 GIS 的应用效率。在实际的应用中,较为常见的是“3S”

两两之间的集成,如 GIS/RS 集成, GIS/GPS 集成或者 RS/GPS 集成等,但是同时集成并使用“3S”技术的应用实例则较少。美国 Ohio 大学与公路管理部门合作研制的测绘车是一个典型的“3S”集成应用,它将 GPS 接收机结合一台立体视觉系统载于车上,在公路上行驶以取得公路以及两旁的环境数据并立即自动整理存储于 GIS 数据库中。测绘车上安装的立体视觉系统包括有两个 CCD 摄像机,在行进时,每秒曝光一次,获取并存储一对影像,并做实时自动处理。

RS、GIS、GPS 集成的方式可以在不同的技术水平上实现,最简单的办法是 3 种系统分开而由用户综合使用,进一步是三者有共同的界面,做到表面上无缝的集成,数据传输则在内部通过特征码相结合,最好的办法是整体的集成,成为统一的系统。

单纯从软件实现的角度来看,开发“3S”集成系统在技术上并没有多大的障碍。目前一般工具软件的实现技术方案是:通过支持栅格数据类型及相关的处理分析操作以实现与遥感的集成,而通过增加一个动态矢量图层以与 GPS 集成。对于“3S”集成技术而言,最重要的是在应用中综合使用遥感以及全球定位系统,利用其实时、准确获取数据的能力,降低应用成本或者实现一些新的应用。

目前,在学位论文、科研论文、科研项目的综述中,“3S”集成的概念被提到了空前的高度。但必须清醒地看到,真正的“3S”集成系统是很少的。用遥感(RS)和全球定位系统(GPS)收集数据,用地理信息系统(GIS)作为管理平台去解决地学的相关问题,这只是 3 种技术的综合应用,不能称之为集成;把遥感数字图像处理和地理信息系统在软件系统中编制成一套菜单不难实现,也不能称为集成。真正的“3S”集成系统应当在数据结构的层次上实现,以地理信息系统为信息管理平台,GPS 数据作为点矢量数据比较容易进入 GIS 空间数据库,而遥感数据则相对困难。因为,遥感数据虽然是栅格的结构,但每个像元存储的是光谱值,不直接代表某种专题值,因此也不能直接进入地理信息系统的空间数据库。从目前 GIS 的矢量和栅格数据结构的角度,遥感数据进入 GIS 空间数据库必须按照 GIS 的数据结构的要求进行。

从矢量结构的角度,应该充分研究遥感图像的物目标提取和自动分类的技术,通过分形算法、小波变换、区域生长、边缘检测等方法提取物目标的图形结构信息,由于遥感图像的复杂性,要实现全自动提取,还需要很长时间的 research。在自动分类中,由于经常出现许多散点和过小的图斑,虽然通过阈值的方法可以合并,但又需要保留一些点状的地物,人机交互式必要的类间边界处理清晰后,方能用栅格矢量转换方法提取图形信息,且所得到图形信息大部分需要进行编辑(如断接、不平滑、位置不合理、多边形不封闭,等等)。总之,遥感数据以矢量的结构进入 GIS 空间数据库,需要进行充分的研究。

从栅格结构的角度,用遥感信息模型的方法提取专题信息比较容易与 GIS 集成。因为从地理信息系统数据结构的角度,遥感数据是栅格结构的,每个栅格(像元)存储的是相应地面大小的地物的平均光谱辐射的量化值,遥感信息模型就是要将每个栅格(像元)的光谱辐射值通过模型转化为不同的专题值(如生物量、植被盖度、森林蓄积量等),从而使遥感信息模型的结果变为地理信息系统空间数据库的栅格数据结构的图层。

遥感信息模型与一般的数学模型是有重要区别的,数学模型是在抽象的数学空间内完成计算的,它可以是连续的,也可以是离散的,不一定与图像有关。用这样的模型可以定量地获得一些点或同质区域的地物参数,而一些地学或生物学参量是随着地理分布变化的,如森林蓄积量、生长量、植被的盖度、生物量等,一般的数学模型对地学参量的地理分布通常是无能为力的。遥感既然是信息收集的技术,理应承担起这样的任务,遥感信息模型正是基于此建立起来的,它一定是离散的、与图像有关的模型,是在数学模型的基础上按像元计算能提供地学参数地理分布的可视化模型。许多数学模型,稍加修改补充可以转化为遥感信息模型。

建立遥感信息模型通常可分成选择遥感信息的独立变量、建立模型和按像元计算并成图 3 个步骤,其中建立模型可按两类方法进行:

①将地学参量直接与遥感信息变量建立经验的回归模型,这类方法优点是建模方法简单,缺点是由于各次实验条件、影响因素都有些差异,关系常常不稳定,应用时重复性差、难于对比和推广。

②通过理论分析或概念分析建模。地理问题既有必然的规律又有偶然的因素影响,因此,研究地理问题既要弄清主要因子之间的关系,又要处理次要因子的随机影响。一般是先通过理论上的成因分析建立起数理方程,再将数理方程通过统计方法来处理。这种方法优点是所建立的模型稳定,缺点是建模困难。

因此,研究不同专题的遥感信息模型是实现空间信息系统集成的有效途径之一。

“3S”集成技术的发展,形成了综合的、完整的对地观测系统,提高了人类认识地球的能力;相应地,它拓展了传统测绘科学的研究领域。作为地理学的一个分支学科,“Geomatics”产生并对包括遥感、全球定位系统在内的现代测绘技术的综合应用进行探讨和研究。同时,它也推动了其他一些相联系的学科的发展,如地球信息科学、地理信息科学等,它们成为“数字地球”这一概念提出的技术基础。

## 1.2 GPS 定位技术的由来和发展

近 30 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。本节仅介绍卫星大地测量的发展和 GPS 定位的有关情况。

### 1.2.1 卫星大地测量及其发展

#### 1.2.1.1 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 3 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做出了艰辛的努力,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做了大量的研究工作，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。

#### 1.2.1.2 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1962~1965年，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4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2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一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6颗高约1000 km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 $90^\circ$ ,即卫星在子午面内运行,所以称为子午卫星,轨道近似圆形,运行周期约120min。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他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之间的距离,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 $90^\circ$ ,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1.5 h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。这些缺陷是由于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。

### 1.2.1.3 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他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,而且受到了天气条件的制约。

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。

可以想像,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 $\Delta t$ ,进而求出卫星和接收机之间的距离:

$$S = c \cdot \Delta t + \sum \delta_i$$



式中： $c$ ——信号传播的速度；

$\delta_i$ ——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  $v_i$ ，则由于卫星钟和接收机不同步对距离的影响为：

$$\Delta S = c(v_i - v_T)$$

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：

$$S_{AP} = [(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_A)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iA} - v_T)$$

$$S_{BP} = [(x_P - x_B)^2 + (y_P - y_B)^2 + (z_P - z_B)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iB} - v_T)$$

$$S_{CP} = [(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iC} - v_T)$$

$$S_{DP} = [(x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2 + (z_P - z_D)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iD} - v_T)$$

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  $55^\circ$  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 20 200 km，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 4 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 1 000 km 的距离上，相对定位精度可以达到  $10^{-8}$ ；在 100 ~ 500 km 的距离上，相对定位精度在  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ ；在小于 50 km 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站标又无需建造。它们的优越性是经典大地测量工作无法比拟的。

(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，其他如卫星捕获、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。

### 1.2.2 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有很大的局限性, 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。

#### 1.2.2.1 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 10 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 1 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 1 m。”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, 真正成为名副其实的“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 (见图 1.1.1)。卫星发射进入轨道后, 星体两侧各伸展由 4 叶拼成的太阳能电池翼板, 总面积为  $7.2 \text{ m}^2$ 。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, 整体在轨质量为 843.68 kg, 比实验卫星增加了 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  $30^\circ$ , 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 4 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。