



21 世纪高等院校教材

# GPS 测量原理及应用

张 勤 李家权 等 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了 GPS 全球卫星导航定位系统的基础知识及其发展,包括系统的组成、与卫星定位相关的坐标和时间参考系统、卫星轨道、卫星信号、定位原理、GPS 信号接收机及全球卫星导航定位系统(GNSS)的近期发展动态。书中重点介绍了 GPS 静态和动态定位的原理,讨论了 GPS 卫星定位中的有关误差及其处理措施、GPS 测量中网的设计与实施作业;详细介绍了 GPS 定位中的数据处理。本书还较全面地概述了 GPS 定位测量技术的应用,最后对几种常用的空间大地测量技术作了简要介绍。

本书可作为高等院校测绘类本科生或相关专业研究生教材,也可作为测绘专业的科技人员和从事定位与导航工作的科技人员及高等院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量原理及应用/张勤,李家权等编著. —北京:科学出版社,2005

(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-015402-9

I. G… II. ①张…②李… III. 全球定位系统(GPS)-高等学校-教材  
IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 036239 号

责任编辑:杨红 郭森 / 责任校对:李奕莹  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈敬

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 7 月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—3 000 字数:377 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 序

自从 1978 年 2 月 22 日第一颗 GPS 试验卫星进入轨道以来, 27 年间 GPS 已经显示了它巨大的社会、军事作用与经济、社会效益。GPS 卫星发射的导航、定位信号, 作为一种时空信息资源, 可在全球范围内向无数用户提供位置、速度和时间信息。现在, 不论人们是从事何种职业, 也不论是在白天还是晚上, 只要手中有一台价格低廉、大小接近手机的 GPS 信号接收机, 就可以准确知道自己身在何处。当前, GPS 的应用范围正在不断扩大, 一切需要空间位置、速度与时间信息的行业, 都需要 GPS。

27 年来 GPS 已经给许多相关学科带来了革命性的变化, 大地测量学就是变化最显著的学科之一。GPS 不仅极大地丰富了大地测量的学科内容, 而且还将大地测量的应用范围由陆地延伸到海洋、由局部地区扩展到全球, 由静态测量发展到动态测量。在 20 世纪中期开始崛起的空间大地测量学, 就是以 GPS、VLBI 与 SLR 等为主要技术手段来研究大地测量学中的科学与应用问题。这些大地测量的崭新技术, 可以在全球任意尺度上使测距相对精度达到  $10^{-6} \sim 10^{-9}$ , 尤其是 GPS 更能在一瞬间向用户提供亚米级 (WAAS)、甚至厘米级 (RTK) 点位坐标, 这就从根本上突破了传统大地测量的时空局限性。在最近 10 年间, GPS 连续运行参考站的发展, 实现了在无人值守的情况下对地学事件及重大工程项目的自动连续监测, 并可连续发布差分改正数信号, 提供厘米级精度的导航、定位服务, 以此在地学领域用以监测地球运动状态, 研究地学中的相关问题。在测绘学领域, GPS 的应用范围早已超出了传统大地测量学的界限, 而渗入到工程测量、地籍测量、摄影测量与遥感, 以及地理信息系统 (GIS) 等各个分支学科领域内。在航天与导航、地质调查、农业与林业、环境保护等许多应用领域, GPS 的作用也越来越明显。GPS 还可用来进行大气可降水量的研究, 监测电离层中自由电子浓度和分布, 开展 GPS 气象学服务。利用 GPS 定位中的多路径效应发展的 GPS 测高技术, 可用于测定海面或冰面地形、波浪形态、洋流速度和方向等。

GPS 技术的这种划时代的革命性巨大的应用潜力, 使其在许多学科和行业中受到普遍重视与关注。我国高校测绘类专业与其他相关专业都开设了 GPS 方面的课程, 或者在测量学中增加了有关 GPS 的章节。《GPS 测量原理及应用》一书就是应测绘工程专业 GPS 课程的教学之需, 由长安大学的张勤与李家权两位教授编著的教材。全书系统地介绍了 GPS 采用的坐标与时间系统、卫星的运行

轨道、GPS 静态定位与动态定位原理，以及 GPS 数据处理的原理与方法。学生在学过这些基本章节后，对 GPS 将有一个比较完整的了解，这对学生将来的工作或继续深造都非常有益。该书第 7 章还介绍了 GPS 在大地测量、地球动力学研究、摄影测量与遥感，以及工程测量等许多领域内的应用。第 8 章介绍了俄罗斯 (GLONASS)、欧洲 (Galileo) 的卫星导航定位系统，以及美国的 GPS 现代化计划，并对我国发射的北斗双星定位系统作了专门介绍。全书最后还简要介绍了空间大地测量的其他一些近代技术，如甚长基线干涉测量 (VLBI)、卫星激光测距 (SLR)、合成孔径雷达干涉测量 (INSAR) 等。这些内容对于学生可以起到开拓视野，放眼未来的作用。

本书内容丰富，图文并茂，各章最后都附有思考题。全书章节编排合理，脉络清晰，理论和应用配合适当，叙述通俗易懂。两位作者都具有长期从事教学和 GPS 科研生产的经验，这本书也是在他们多年教学与科研积累的基础上撰写出来的，包含了他们多年辛勤劳动的成果。本书既适合作为测绘类专业本科生学习 GPS 课程的教材，又可供相关专业的本科生与研究生参考。

在本书出版之前，我有幸先睹为快，就此写下一些阅读后的心得与感想，供读者与作者参考。

中国工程院院士

全国高等学校测绘学科教学指导委员会主任

2005 年 5 月于武汉大学

## 前 言

自 20 世纪 50 年代末人类成功地把第一颗人造地球卫星送入太空以来,空间科学与技术即以异常迅猛的速度飞速发展,以全球定位系统 GPS (global positioning system) 为代表的卫星导航定位系统成为现代空间科学与其他多个学科高新技术融合发展的结晶。GPS 是一种全新的空基无线电导航定位系统,它不仅能够实现全天候、全天时和全球性的连续三维空间定位,而且还能对运动载体的速度、姿态进行实时测定以及精确授时。正是由于 GPS 具有其他定位技术难以比拟的优越性,所以 GPS 计划从一开始就引起了世界各国学者的广泛关注,使得 GPS 的应用开发也几乎与其本身的发展同步进行。20 余年的发展及使用历史已经证明, GPS 全球卫星导航定位系统具有极其广泛的应用范围,从地面、海上到空中、空间,从高空飞行的卫星、导弹到地壳运动与灾害监测,从地球动力学、地球物理学、大地测量学、工程测量学到交通管理、海洋学和气象学等。毫不夸张地说, GPS 的应用几乎触及人类社会生活每一领域的每个方面,甚至有人形容它的应用“只受到人们想象力的限制”。可以相信,随着“GPS 现代化”的逐步实施和完成, GPS 必将迅速地向更为宽广的范围与更加深刻的层次发展和普及。

作者于 1984 年初 (GPS 发展的中期阶段) 在国内院校较早地开始为本、专科生开设 GPS 卫星定位测量课程,以后又为研究生开设了空间定位理论课程,并先后承担完成了大量有关 GPS 理论与应用方面的科研和生产任务。在此基础上,为了满足教学的需要,作者于 20 世纪 90 年代初编写了“GPS 定位测量原理与应用”的校内讲义,随后又编写出版了《全球定位系统 (GPS) 测量原理及其数据处理基础》,得到了使用者的好评,目前该版本的书籍已销售一空。鉴于此,作者以原有教材为基本素材,结合近年来全球空间定位技术的最新发展情况,以及作者多年的教学科研成果,编写了本书,旨在为初学者提供一本内容深入浅出、覆盖面广,既易于掌握卫星定位基本原理与方法,又能紧密跟随现代空间定位技术发展与应用脉络的教材。

全书共 8 章,内容包括: GPS 卫星定位测量基础, GPS 卫星信号及其测量原理, GPS 静态与动态定位原理, GPS 控制网的设计与外业工作, GPS 网平差与数据处理方法, GPS 定位技术的应用和现代全球卫星导航定位系统发展等。同时,为使读者对空间定位技术有一个全面的了解,本书还介绍了除美国 GPS 全球定位系统以外的俄罗斯 GLONASS 系统、欧洲 Galileo 系统和我国的北斗双

星定位系统的组成特点和原理, 以及 GPS 现代化的内涵与作用, 最后本书还对其他几种空间大地测量技术作了简要介绍, 如甚长基线干涉测量 (VLBI)、卫星激光测距 (SLR)、合成孔径雷达干涉测量 (INSAR) 和卫星测高等。

本书第 1、2 章由李家权教授编写; 第 3 章 1、2 节由李家权教授编写, 第 3、4 节由张勤教授编写, 第 5 节由王利讲师编写; 第 4、5、6 章由张勤教授编写, 其中第 5 章第 2 节由高雅萍讲师编写, 第 6 章第 1、6 节由刘万林副教授编写; 第 7 章第 1 节由李家权教授编写, 第 2、3、4 节由王利讲师编写; 第 8 章第 1、2、3 节由张勤教授编写, 第 5 节由高雅萍讲师编写, 第 4、6 节由赵超英博士编写。王利讲师还完成了本书各章思考题的编写及全书的校对工作, 张勤、李家权教授完成了全书最后的审阅工作。

本书可作为高等院校测绘类专业本科生或非测绘专业研究生学习 GPS 相关课程的教材, 也可作为测绘专业的科技人员和从事定位和导航工作的有关人员及高等院校有关师生学习 GPS 的“通用教材”。实际授课时, 教师可根据本专业学生的基础情况和学时选择部分重点章节进行讲授, 而适当地忽略某些内容。

GPS 卫星定位测量是以多学科相互渗透而形成的一门新兴学科, 涉及数学、天文学、数字通讯技术、无线电技术、现代数据处理技术和测绘科学等诸多学科的相关知识, 加之作者水平有限, 书中难免有错误和疏漏之处, 恳请读者不吝斧正。

作者

2005 年 6 月

# 目 录

序

前言

第 1 章 GPS 卫星定位测量基础 .....	1
1.1 GPS 定位系统概述 .....	1
1.1.1 卫星大地测量的发展概况 .....	1
1.1.2 GPS 系统的组成 .....	5
1.1.3 其他卫星导航定位系统 .....	8
1.2 GPS 定位系统的坐标系 .....	9
1.2.1 天球概述 .....	10
1.2.2 两种天球坐标系及其转换模型 .....	12
1.2.3 极移与国际协议地极原点 .....	15
1.2.4 两种地球坐标系及其转换模型 .....	15
1.2.5 瞬时极（真）天球坐标系到瞬时极（真）地球坐标系的转换模型 .....	18
1.2.6 WGS-84 世界大地坐标系 .....	19
1.3 GPS 定位的时间系统 .....	20
1.3.1 世界时系统 .....	20
1.3.2 原子时 .....	22
1.3.3 力学时 .....	23
1.3.4 协调世界时 .....	23
1.3.5 GPS 时间系统 .....	24
1.4 人造地球卫星的正常轨道运动 .....	24
1.4.1 二体问题意义下卫星的运动方程 .....	24
1.4.2 开普勒定律和卫星运动的轨道参数 .....	25
1.4.3 卫星的瞬时位置计算 .....	32
1.4.4 卫星运动的瞬时速度计算 .....	34
1.5 人造地球卫星的受摄运动 .....	35
1.5.1 卫星运动的摄动力和受摄运动方程 .....	35
1.5.2 地球引力场摄动力及其对卫星轨道运动的影响 .....	37
1.5.3 日、月引力摄动 .....	39
1.5.4 太阳光压摄动 .....	40



1.5.5 其他摄动力影响 .....	40
思考题 .....	41
<b>第 2 章 GPS 卫星信号及其测量原理 .....</b>	<b>42</b>
2.1 GPS 卫星的测距码信号与伪距测量原理 .....	42
2.1.1 码的基本概念 .....	42
2.1.2 伪随机噪声码及其产生 .....	43
2.1.3 GPS 卫星的测距码信号 .....	45
2.1.4 码相关伪距测量原理 .....	47
2.2 GPS 卫星的导航电文 .....	48
2.2.1 导航电文的组成格式 .....	48
2.2.2 导航电文的内容 .....	49
2.3 GPS 卫星星历 .....	52
2.3.1 GPS 卫星的预报星历 .....	52
2.3.2 GPS 卫星的后处理星历 .....	53
2.4 GPS 卫星的载波信号与相位测量原理 .....	55
2.4.1 GPS 卫星的载波信号 .....	55
2.4.2 GPS 卫星信号的调制 .....	55
2.4.3 GPS 卫星信号的解调 .....	57
2.4.4 载波相位测量原理 .....	59
2.5 美国政府关于 GPS 卫星信号的限制使用政策 .....	60
2.5.1 GPS 工作卫星的 SA 与 AS 技术 .....	60
2.5.2 GPS 用户的反限制技术措施 .....	61
2.6 GPS 信号接收机 .....	62
2.6.1 GPS 信号接收机的基本工作原理 .....	62
2.6.2 GPS 信号接收机分类 .....	66
2.6.3 几种常见的测量型 GPS 信号接收机 .....	68
思考题 .....	71
<b>第 3 章 GPS 静态定位原理 .....</b>	<b>73</b>
3.1 GPS 定位方法分类及其误差源 .....	73
3.1.1 GPS 定位方法分类 .....	73
3.1.2 GPS 测量误差概述 .....	75
3.1.3 卫星星历误差 .....	76
3.1.4 时钟误差 .....	78
3.1.5 卫星信号传播误差 .....	79
3.1.6 与接收设备有关的误差 .....	85

3.2 静态绝对定位原理	87
3.2.1 伪距观测方程及其线性化	87
3.2.2 伪距法绝对定位解	88
3.2.3 卫星几何分布精度因子	90
3.3 静态相对定位原理	92
3.3.1 静态相对定位的一般概念	92
3.3.2 载波相位观测方程及其线性化	93
3.3.3 基线向量的单差模型及其解算	95
3.3.4 基线向量的双差和三差模型及其解算	99
3.3.5 相位观测量线性组合的相关性	102
3.4 整周未知数的确定方法与周跳分析	104
3.4.1 整周未知数的确定方法	105
3.4.2 周跳的探测与修复	109
3.5 GPS 快速静态相对定位	112
3.5.1 准动态定位法	112
3.5.2 快速整周未知数解算原理	113
3.5.3 快速整周未知数求解方法	114
3.5.4 快速静态定位作业方式	116
思考题	117
<b>第4章 GPS 动态定位原理</b>	<b>118</b>
4.1 GPS 动态绝对定位原理	118
4.2 GPS 动态相对定位与差分 GPS	120
4.3 差分 GPS 定位原理	122
4.3.1 位置差分原理	122
4.3.2 伪距差分原理	123
4.3.3 相位平滑伪距差分	125
4.4 载波相位差分原理	128
4.4.1 载波相位差分 GPS 定位原理	128
4.4.2 整周未知数的动态求解	131
4.4.3 RTK GPS 定位设备	134
4.5 动态相对定位中的坐标转换	135
4.5.1 三维空间直角坐标系下的坐标转换	135
4.5.2 平面坐标转换	136
4.6 广域差分 GPS	137
4.6.1 单站差分 GPS	137

4.6.2	局部区域差分 GPS .....	138
4.6.3	广域差分 GPS 系统 .....	139
	思考题 .....	142
<b>第 5 章</b>	<b>GPS 控制网的设计与外业工作 .....</b>	<b>143</b>
5.1	GPS 网的构网特点与网形设计一般原则 .....	143
5.1.1	GPS 网的构网特点 .....	143
5.1.2	GPS 控制网的构网方式 .....	144
5.1.3	GPS 控制网网形设计的一般原则 .....	146
5.2	GPS 控制网的优化设计 .....	146
5.2.1	GPS 测量的特点以及优化设计的内容 .....	147
5.2.2	GPS 网基准的优化设计 .....	148
5.2.3	GPS 网的精度设计 .....	149
5.2.4	GPS 网精度设计实例 .....	151
5.3	GPS 网的可靠性设计 .....	152
5.3.1	GPS 网可靠性概念 .....	152
5.3.2	传统控制网可靠性设计标准 .....	153
5.3.3	GPS 控制网可靠性设计标准 .....	155
5.3.4	顾及可靠性标准的 GPS 网的设计 .....	159
5.4	GPS 测量的外业工作 .....	161
5.4.1	选点与埋设标志 .....	161
5.4.2	GPS 接收机的检验 .....	162
5.4.3	GPS 卫星预报与观测调度计划 .....	163
5.4.4	GPS 外业观测工作 .....	165
5.4.5	GPS 相对定位作业模式 .....	167
5.5	GPS 基线向量解算与网平差概述 .....	169
5.5.1	GPS 基线向量解算 .....	169
5.5.2	GPS 网平差与坐标转换概述 .....	170
5.6	GPS 观测成果检验与技术总结 .....	171
5.6.1	GPS 观测成果的检验 .....	171
5.6.2	GPS 测量的技术总结与上交资料 .....	172
	思考题 .....	173
<b>第 6 章</b>	<b>GPS 定位测量数据处理 .....</b>	<b>174</b>
6.1	概述 .....	174
6.2	国家坐标系与地方独立坐标系 .....	175
6.2.1	旋转椭球与参心坐标系 .....	175

6.2.2	54 北京和 80 西安国家坐标系	177
6.2.3	站心坐标系	179
6.2.4	地方独立坐标系	180
6.2.5	高斯平面直角坐标系和 UTM 坐标系	180
6.3	GPS 定位测量中的坐标转换	183
6.3.1	空间直角坐标系与椭球大地坐标系的关系	183
6.3.2	三维坐标转换模型	185
6.3.3	三维坐标差转换模型	187
6.3.4	联合平差确定转换参数	188
6.4	GPS 网的三维平差	190
6.4.1	三维无约束平差	191
6.4.2	GPS 网的三维约束平差	193
6.4.3	GPS 网的三维联合平差	195
6.4.4	GPS 网的三维平差中若干问题的处理	196
6.5	GPS 基线向量网的二维平差	201
6.5.1	GPS 基线向量网的二维投影变换	202
6.5.2	GPS 基线向量网的二维平差	205
6.5.3	GPS 网平差约束基准兼容性检验	206
6.6	GPS 高程	212
6.6.1	高程系统简介	212
6.6.2	GPS 水准	214
6.6.3	GPS 重力高程	217
6.6.4	GPS 高程精度	218
	思考题	219
<b>第 7 章</b>	<b>GPS 定位测量技术应用</b>	<b>220</b>
7.1	GPS 在大地测量与地球动力学研究中的应用	220
7.1.1	GPS 在大地测量中的应用	220
7.1.2	GPS 在地球动力学研究中的应用	225
7.2	GPS 在灾害监测与预报中的应用	230
7.2.1	GPS 在滑坡、矿山地面沉降等灾害地质监测中的应用	230
7.2.2	GPS 在大城市地面沉降监测中的应用	233
7.2.3	GPS 在大坝、桥梁、海上钻井平台等工程形变监测中的应用	240
7.3	GPS 在工程测量以及摄影测量与遥感技术中的应用	243
7.3.1	GPS 在桥梁与隧道控制测量中的应用	244
7.3.2	GPS 在各种线路工程测量中的应用	247

7.3.3 GPS 在摄影测量与遥感技术中的应用 .....	251
7.4 GPS 定位技术的其他应用 .....	254
7.4.1 GPS 在海洋测绘中的应用 .....	254
7.4.2 GPS 在农业、林业与野外考查中的应用 .....	258
7.4.3 GPS 在导航、航天及天气预报中的应用 .....	260
7.4.4 GPS 测时、测速 .....	265
思考题 .....	266
<b>第 8 章 现代全球卫星导航定位系统发展</b> .....	<b>268</b>
8.1 全球导航卫星系统概述 .....	268
8.2 俄罗斯卫星导航系统——GLONASS 卫星系统 .....	269
8.2.1 GLONASS 系统的发展与结构 .....	269
8.2.2 GLONASS 系统频率和信号 .....	270
8.2.3 现阶段 GLONASS 系统存在的问题与发展方向 .....	271
8.3 欧洲卫星导航系统——Galileo 系统 .....	272
8.3.1 Galileo 系统的结构和组成 .....	272
8.3.2 Galileo 系统的信号 .....	275
8.3.3 Galileo 系统的特点与 GPS 的同异及兼容性 .....	277
8.4 北斗双星导航定位系统——RDSS 系统 .....	279
8.4.1 双星定位系统的组成 .....	279
8.4.2 双星定位系统的定位原理及方法 .....	280
8.4.3 双星导航定位系统的功能与特点 .....	282
8.5 GPS 现代化的构架与作用 .....	284
8.5.1 现有 GPS 系统存在的问题 .....	284
8.5.2 GPS 现代化的构架 .....	285
8.5.3 GPS 现代化计划的进程安排 .....	288
8.6 空间大地测量新技术简介 .....	288
8.6.1 甚长基线干涉测量 .....	288
8.6.2 卫星激光测距 .....	291
8.6.3 卫星测高 .....	293
8.6.4 合成孔径雷达干涉测量 .....	294
8.6.5 由卫星集成的多普勒定轨和无线电定位系统 .....	295
8.6.6 精密测距及其变率测量系统 .....	296
思考题 .....	296
<b>参考文献</b> .....	<b>297</b>

# 第 1 章 GPS 卫星定位测量基础

GPS 是全球定位系统 (global positioning system) 的英文缩写, 是随着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定位系统。GPS 卫星定位测量是利用 GPS 系统解决大地测量问题的一项空间技术。本章介绍 GPS 卫星定位测量的基础知识, 包括 GPS 系统简介、卫星定位测量采用的坐标系统和时间系统、GPS 卫星的轨道运动和星历计算等内容。

## 1.1 GPS 定位系统概述

### 1.1.1 卫星大地测量的发展概况

1957 年 10 月 4 日, 世界上第一颗人造地球卫星 (SPUTNIK-1) 发射成功, 标志着空间科学技术的发展进入到了一个崭新的时代。随着人造地球卫星的不断入轨运行, 利用人造地球卫星进行定位测量已成为现实。20 世纪 60 年代卫星定位测量技术问世, 并逐渐发展成为利用人造地球卫星解决大地测量问题的一项空间技术。卫星定位测量技术的发展过程可归结为三个阶段: 卫星三角测量、卫星多普勒定位测量、GPS 卫星定位测量。

#### 1. 卫星三角测量原理

卫星定位测量技术问世之初, 人造地球卫星仅仅作作为一种空间的动态观测目标, 由地面测站拍摄卫星的瞬时位置而测定地面点的坐标, 称为卫星三角测量。

设 A、B 是地面上两个已知点, C 是待定点 (图 1-1), A、C 两个测站用卫星摄影仪 (记时照相机) 同步拍摄卫星  $S_1$  的相片, 由此得到的摄影底片, 既有卫星  $S_1$  在两张相片上的同步影像  $S_a$  和  $S_c$ , 又有某些恒星的影像  $S^*$ 。在天文年历中可查出恒星  $S^*$  的坐标, 并以此为起算数据在相片上量算  $S_a$  和  $S_c$  的坐标, 进而推算方向  $AS_1$  和  $CS_1$ , 获得同步平面  $ACS_1$ 。用同样的方法观测

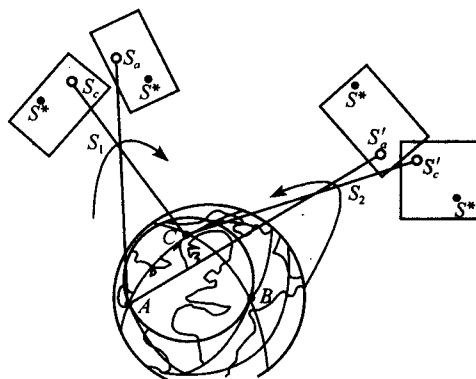


图 1-1 卫星三角测量原理

另一颗卫星  $S_2$ ，可得另一同步平面  $ACS_2$ 。两平面的交线即弦  $AC$ 。类似地，在  $B$ 、 $C$  设站，同样观测卫星  $S_1$  和  $S_2$ ，则可得弦  $BC$ 。弦  $AC$  与  $BC$  的交点，即得定点  $C$ 。如果  $A$ 、 $B$  两测站位于大陆，而  $C$  点在远海岛屿上，用上述卫星三角测量的方法可实现大陆与海岛间的联测定位，这是常规大地测量技术所不及的。

1966~1972 年间，美国国家大地测量局 (NGS) 在美国和联邦德国测绘部门的协助下，应用上述卫星三角测量的方法，测量了具有 45 个测站的全球三角网，并获得了 5m 的点位精度。但是，卫星三角测量资料处理过程复杂，且定位精度不高，不能获得待定点三维地心坐标，因此，目前已成为一种过时的测量技术。卫星三角测量是卫星定位测量历史发展的初级阶段，随着科学技术的进一步发展，卫星定位测量由初级阶段进入了高级阶段。

## 2. 卫星多普勒定位测量

1958 年 12 月，美国海军和詹斯·霍普金斯 (Johns Hopkins) 大学应用物理实验室开始联合研制美国海军导航卫星系统 (navy navigation satellite system)，简称 NNSS 系统。1959 年 9 月发射了第一颗试验卫星。美国海军研制 NNSS 系统的目的，是给“北极星”核潜艇提供全球性导航系统。经过几年试验研究，该系统于 1964 年建成并投入使用。1967 年美国宣布：NNSS 系统解密提供民用。NNSS 系统又称子午卫星导航系统，由 6 颗工作卫星组成子午卫星星座。卫星高度在 950~1 200km 之间，运行周期约为 107min，卫星轨道近似圆形且经过地球南、北极上空，故称子午卫星 (Transit)。子午卫星导航系统的出现，标志着卫星大地测量技术由初级阶段进入高级阶段，其特点是：①卫星不再作为一种单纯的空间动态观测目标，而是通过其轨道参数介入定位计算的动态已知点。②观测不再采用传统的几何模式，而是通过地面测站接收卫星发射的信号测定站星距离来定位。利用子午卫星射电信号测定地面点位置的技术，称为卫星多普勒定位技术，其基本原理基于奥地利物理学家多普勒 (Christian Doppler, 1803~1853) 于 1842 年发现的多普勒效应：当波源与观测者作相对运动时，波

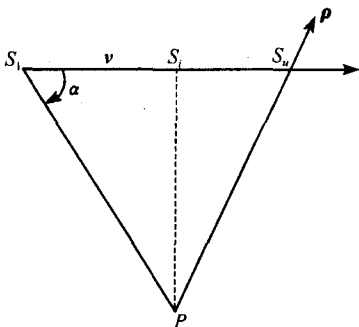


图 1-2 多普勒效应示意图

源发射频率与观测者接收频率之间具有以下关系：

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

式中， $f_s$  为波源发射频率； $f_r$  为测站接收频率； $c$  为光速； $\alpha$  为波源运动方向与测站方向间的夹角； $v$  为波源运动速度 (图 1-2)。

由图 1-2，卫星即波源运动的向径速度  $\rho_v$  可表示为

$$\rho_v = \frac{d\rho}{dt} = -v \cos\alpha \quad (1-2)$$

代入式 (1-1), 整理后可得

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

记  $\Delta f = f_s - f_r$  称为多普勒频移, 于是有

$$\rho_v = \frac{d\rho}{dt} = \frac{c}{f_s} \Delta f \quad (1-4)$$

多普勒频移一经确定, 即可求出  $\rho_v$ , 积分后可得卫星与测站间的距离  $\rho$ 。如果已知卫星在地心空间直角坐标系中的瞬时位置向量  $r$ , 并由卫星多普勒定位技术测得站星距离向量  $\rho$ , 那么测站位置向量  $R$  就可由式 (1-5) 求得 (图 1-3):

$$R = r - \rho \quad (1-5)$$

卫星多普勒定位技术具有经济、快速和不受天气、时间限制等许多优点。在地球上任何地方只要能见到子午卫星, 便可进行单点定位和联测定位, 采集两天数据可获得具有分米级定位精度的测站三维地心坐标。许多国家都采用了卫星多普勒定位技术。美洲各国大约测定了 500 多个多普勒点; 西欧各国测定了 30 多个多普勒点; 法国除在本土建立了多普勒网以外, 还在阿尔及利亚、利比亚、圭亚那和加蓬等国测定了 115 个多普勒点。我国也测定了近百个多普勒点, 并布设了全国性的多普勒网, 实现了大陆和西沙、南沙群岛的联测。尽管卫星多普勒定位技术在导航与定位技术的发展过程中具有划时代的意义, 子午卫星系统被称为第一代卫星导航定位系统, 但是该系统仍有许多明显的缺点, 主要是:

(1) 卫星颗数少, 不能实现连续实时导航定位

由于子午卫星星座仅有 6 颗工作卫星, 且运行轨道都通过地球南、北极上空 (图 1-4)。因而地面测站观测到卫星的时间间隔较短 (平均 1.5h)。同一颗子午卫星, 每天通过测站上空的次数最多为 13 次, 而一台卫星多普勒接收机一般需要成功地观测 15 次卫星通过, 才能达到  $\pm 10\text{m}$  的单点定位精度。当所有测站观测了 17 次卫星通过时, 联测定位精度才能达到  $\pm 0.5\text{m}$ 。由于卫星通过测站上空的时间太短, 而需要的观测时间又过长, 所以无法提供连续、实时的三维导航和定位服务。

(2) 卫星轨道高度低, 难以实现精密定轨

子午卫星飞行的平均高度为 1070km, 属于低轨道卫星。在这种情况下, 地球引力场模型误差, 大气密度、卫星质面比、大气阻力系数等摄动因子误差, 大

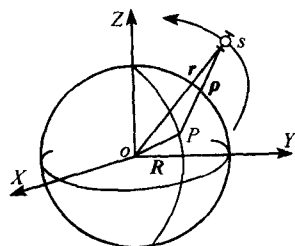


图 1-3 卫星定位测量原理



图 1-4 子午卫星运行图



气阻力模型误差,都将阻碍子午卫星定轨精度的提高。子午卫星星历参数的精度较低,致使卫星多普勒的定位精度局限在米级水平。

(3) 信号频率低,难以补偿电离层效应的影响

子午卫星射电信号的频率为 400MHz 和 150MHz,用这两种频率的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,而难以削弱电离层效应的高阶项影响。而电离层效应的高阶项影响,在地球赤道附近将导致测站高程产生±1m 以上的偏差。

子午卫星导航定位系统的上述缺陷,使其应用受到较大的限制。为了突破子午卫星导航系统的局限性,实现全天候、全球性和高精度的实时导航与定位,美国国防部于 1973 年 12 月批准陆海空三军联合研制了一种新的军用卫星导航系统——NAVSTAR GPS (navigation system timing and ranging global positioning system),即导航卫星测时与测距全球定位系统,简称 GPS 卫星全球定位系统。

### 3. GPS 卫星定位测量

GPS 系统的研制计划分 3 个阶段实施:

1) 原理与可行性实验阶段,1973 年 12 月到 1978 年 2 月 22 日第一颗试验卫星发射成功,历时 5 年。

2) 系统研制与实验阶段,1978 年 2 月 22 日到 1989 年 2 月 14 日第一颗工作卫星发射成功,历时 11 年。

3) 工程发展与完成阶段,1989 年 2 月 14 日到 1995 年 4 月 27 日,历时 7 年。1995 年 4 月 27 日美国国防部宣布:“GPS 系统已具备运作能力”,在全世界任何地方都可以实现全天候的导航、定位和定时。GPS 计划历时 23 年、耗资 130 多亿美元,截止 2000 年在轨道上正常工作的卫星有 28 颗,其中 26 颗为早期发射的 BLOCK II A 型卫星,2 颗为 1999 年发射的 BLOCK II R 型卫星。

GPS 系统是第二代卫星导航定位系统,它的出现导致测绘行业一场深刻的技术革命。和子午卫星导航定位系统相比,GPS 系统具有如下一些显著的优点。

(1) 提供全天候、全球性的导航、定位服务

GPS 系统卫星数目多而且分布合理,地球上任何地点、任意时刻均可连续同步观测到 4 颗以上卫星,从而保证了该系统导航、定位服务的全天和全球性。

(2) 可进行高精度、高速度的实时精密导航和定位

GPS 卫星在轨道平均高度、卫星钟稳定度以及信号频率等方面,都比子午卫星提高了 1 个数量级以上,其定位精度也相应地提高到厘米甚至毫米级,观测时间则缩短到几小时甚至几秒钟。目前,GPS 单点实时定位观测几秒钟,定位精度可达 10~15m;静态相对定位观测 1~3h,精度可达  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ ;如采用快