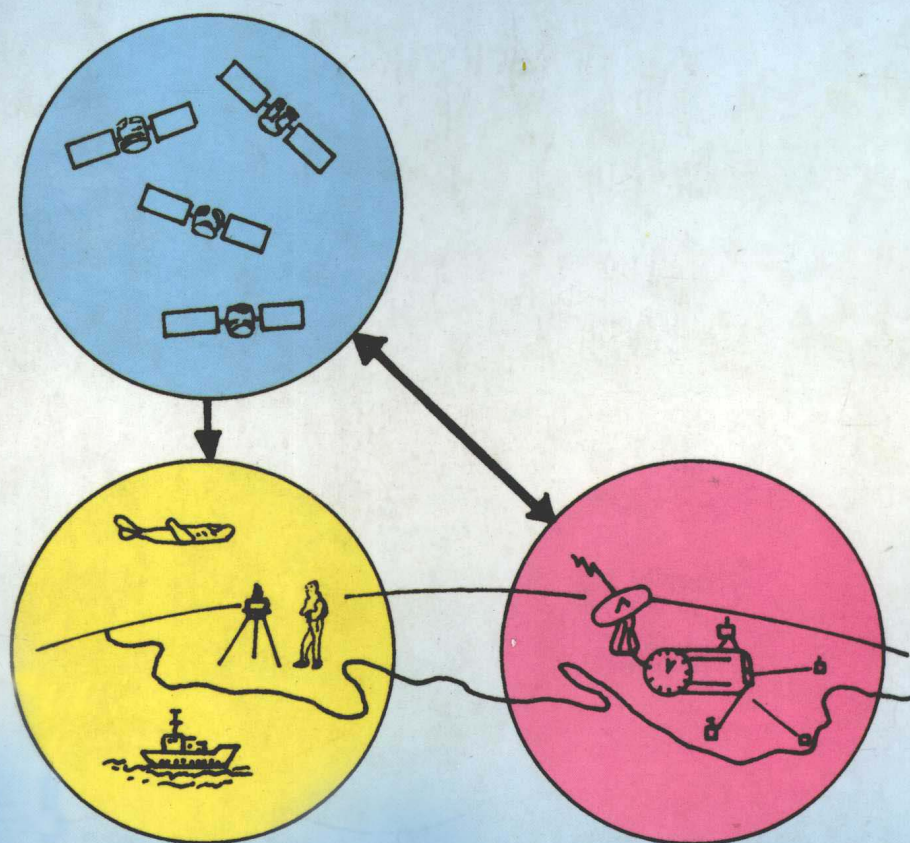


❖ 现代测绘科技丛书

GPS卫星定位原理及其在测绘中的应用

乔仰文 赵长胜 谢宏全 徐爱功 编著



教育科学出版社

GPS 卫星定位原理及其 在测绘中的应用

乔仰文 赵长胜 谢宏全 徐爱功

教育科学出版社

责任编辑:徐长发
装帧设计:安广军
责任校对:乔仰文、赵长胜

图书在版编目(CIP)数据

现代测绘科技丛书/武文波 主编

GPS 卫星定位原理及其在测绘中的应用/乔仰文 赵长胜 谢宏全 徐爱功 编著
北京:教育科学出版社,2000.05

ISBN 7-5014-1648-6

I. ①现…②武…

Ⅱ. ①G…②乔…③赵…④谢…⑤徐…

Ⅲ. P. 228

中国版本图书馆 CIP 数据核字(20)第 01469 号

GPS 卫星定位原理及其在测绘中的应用

编著 乔仰文 赵长胜 谢宏全 徐爱功

教育科学出版社出版

(北京海淀区北三环中路 46 号)

通州印刷厂印刷

2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月北京第 1 次印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15.25

字数:370 千字 印数:1000 册

ISBN 7-5014-1648-6/P. 208-6(课)

定价:25.00 元

《现代测绘科技丛书》编著说明

辽宁工程技术大学测量工程系具有近五十年的办学历史,具有雄厚的师资力量、较先进的教学设备及丰富的办学经验。“大地测量学与测量工程”学科为辽宁省重点学科,“测量工程实验室”为国家煤炭工业重点实验室。现有“大地测量学与测量工程”、“地图制图学与地理信息工程”、“摄影测量与遥感”三个硕士授权点。近年来在科研和教学上均取得了可观的成果和经验,在东北地区、煤炭工业系统乃至全国都有一定的影响。

随着计算机技术、微电子技术、空间技术、通讯技术和信息技术的不断进步,测绘仪器设备不断更新换代,测绘技术领域也发生了深刻的变化。从数据的采集、处理和管理,到数据的存储、输出,不断向自动化、数字化、集成化、科学化的方向迈进。GPS技术、RS技术、GIS技术、数字化测绘技术开始广泛地应用于国民经济建设的各个领域。为了适应测绘科学技术的迅猛发展,满足科教兴国战略方针的需要,从1995年开始,我们进行了面向二十一世纪的课程体系和教学内容的改革,已取得显著成果,并按新的教学体系和教学内容组织编著了这套《现代测绘科技丛书》。该科技丛书是按新科学体系经过优化组合后编著而成,其特点是面向未来、面向现代化,删除陈旧内容,纳入新理论和新技术。每部书既注意基本原理、基础知识的阐述,又大量的融入高新技术,并具有大量的实际操作内容。这些都是全体科技人员的科研成果、生产实践和教学经验的科学总结。该科技丛书密切结合教学实践妥善处理了传统技术与新技术之间的关系,各书之间既相互衔接,又自成体系。

在本科技丛书的编著中,徐州师范大学、东北大学、河北理工学院、黑龙江工程学院、鞍山钢铁学院、长春建筑高等专科学校、本溪冶金高等专科学校等院校的有关专家参加了编著工作,并提出了宝贵意见,对本科技丛书的完成给予了有益的帮助。

本科技丛书是经过多年教学试用后重新组织编著的。编著者都是具有丰富教学、科研和生产实践经验的教授和副教授,同时组织了专家审阅和修改,现决定正式出版。该科技丛书适用对象为测绘生产及科研工作者的参考和自学用书,亦可作为“测绘工程”、“地理信息系统”、“城市规划”、“土地管理”及相关专业本、专科生教学用书。

《现代测绘科技丛书》编著委员会成员:

主 任:武文波

副主任:宋伟东、金继读、刘谊、马洪滨、王仲锋、包永德、王晏民

编委(以姓氏笔画为序):马洪滨、马明栋、马振利、马俊海、王家贵、王仲锋、王国君、王晏民、石金锋、包永德、宋伟东、刘立忱、刘谊、乔仰文、朱伟刚、邢贵和、任秀、杜维甲、杜明义、李勇、李正中、金继读、武文波、张永彬、徐爱功、施群德、赵长胜、赵波、景海涛、谢宏全

秘书:马振利、朱伟刚

《现代测绘科技丛书》(第一部分)名称、编著者:

- | | |
|-----------------------|-----------------|
| 1、数据库原理及在测量中应用 | 武文波、马洪滨、景海涛、王崇倡 |
| 2、面向对象的测量程序设计 | 马明栋、赵长胜、施群德、杜维甲 |
| 3、计算机绘图原理及应用 | 杜明义、包永德、朱伟刚、李巍 |
| 4、数字化测图原理及应用 | 宋伟东、张永彬、金继读、赵波 |
| 5、GPS 卫星定位原理及其在测绘中的应用 | 乔仰文、赵长胜、谢宏全、徐爱功 |
| 6、测量平差 | 赵长胜、石金锋、王仲锋、李勇 |
| 7、测绘学基础 | 王家贵、金继读、刘立忱、马俊海 |
| 8、地理信息系统原理 | 马明栋、武文波、申立群、宋伟东 |
| 9、遥感技术基础 | 徐爱功、杜明义、刘谊、武文波 |
| 10、现代路线工程测量 | 李正中、任秀、周涌波、武文波 |
| 11、测量学(非测绘专业用) | 刘谊、邢贵和、马振利、王国君 |

《现代测绘科技丛书》编著委员会

辽宁工程技术大学测量工程系

2000 年 1 月 20 日

前 言

全球定位系统(Global Positioning System—GPS)卫星定位技术的迅速发展,已使测绘学科发生了巨大的变革,其惊人进展及其重大影响已出乎GPS设计者的最初预料。许多学者预言,即使在21世纪初期,它仍将独领风骚20年以上,并极大地推动空间科学、大气科学、海洋科学、地球科学以及工程技术的发展。同时它也将广泛地渗透到人类社会发展的诸多领域,激起社会生活的变革及人们观念的更新。把握卫星定位技术的发展脉搏是实现测绘科技发展并迈向新台阶的重要保证。

随着GPS的不断完善以及俄罗斯GLONASS的组网完成,两种高精度实时卫星导航定位系统的同时存在以及GPS/GLONASS一体化接收设备的开发成功,必将为全球卫星定位系统在导航与测量领域的应用开拓更为广阔的前景;为了消除美国现行SA政策对实时定位精度的影响,近些年来差分GPS(DGPS)技术发展十分迅速,1993年提出的广域GPS增强系统(WAAS),不仅是一个广域实时定位导航系统,而且技术上也可以发播大地测量所需要的相位观测值,因此它也是一个静态的和动态的大地测量永久性运行系统;远距离、高动态、高精度定位;在数十数百公里范围内,用机载或星载GPS来确定高速飞行体的运动轨迹、速度乃至姿态。机载GPS已成功应用于大比例尺航测空中三角测量,星载GPS可用于海洋测高卫星上,对于确定全球大地水准面和海面地形及其变化起到了决定性的作用;短距离、实时动态、高精度定位;采用载波相位、双差模型进行流动站的实时动态定位技术(RTK),在20—30km范围内,实时定位精度可达厘米级,这一技术为GPS在工程测量中的应用开辟了广泛的应用前景,RTK与全站仪的组合,构成全能型超级全站仪或全能测量工作站,等等。凡此种种发展都是测绘界极为关注的,也是需要实时地了解和掌握的。

为了满足教学和科研工作的需要,本书的编写就是在以上背景下动意的。辽宁工程技术大学测量工程系从80年代末就开始和现场及科研单位一起开展了GPS卫星定位的生产和科研工作,并为本科生和研究生开设了相关课程。通过生产、教学和科研实践,对GPS卫星定位的若干理论和应用问题进行了深入地探讨,取得了一批科研成果。目前研制的基于Windows操作系统的全汉化的GPS数据处理软件已投放市场可以应用。

本书共分九章,由乔仰文、赵长胜主编,谢宏全、徐爱功参加了部分编写工作。在编写过程中,参阅了大量的书刊资料,在援引已有基本理论的基础上,着意反映GPS定位技术的最新发展以及对教学经验和科研成果的总结。在此谨向有关书刊的作者及给予本书支持和帮助的同志表示衷心地感谢。

作为现代测绘科技丛书,它不仅可以作为本学科和相关学科的本科生、研究生的教学用书,而且也可作为有关科技工作者的参考资料。

GPS技术发展迅速、日新月异,应用领域也在不断拓宽。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中错误与不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 著 者

二〇〇〇年三月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 GPS 的发展	1
第二节 GPS 概论及其应用特点	2
一、GPS 概论	2
二、GPS 应用特点	3
第三节 GPS 政策及基本对策	5
一、GPS 的现行政策及基本对策	5
二、GPS 政策的变化及其影响	7
第四节 发展我国卫星导航定位系统	7
第二章 坐标系和时间系	10
第一节 天球坐标系	10
一、天球的基本概念	10
二、岁差与章动	11
三、天球坐标系的建立	12
第二节 地球坐标系	13
一、地心坐标系	13
二、地极移动与协议地球坐标系	14
三、卫星大地测量基准—WGS84 大地坐标系	16
四、参心坐标系	17
第三节 时间系统	21
一、时间的有关概念	21
二、恒星时(ST)	22
三、世界时(UT)	22
四、原子时(TA)	24
五、协调世界时(UTC)	24
六、力学时(DT)	24
七、GPS 时(GPST)	25
第三章 GPS 的组成及其信号	26
第一节 GPS 的组成	26
一、空间星座部分	26
二、地面监控部分	29

	三、用户接收设备部分	30
第二节	卫星运动及其轨道	30
	一、概述	30
	二、卫星运动的开普勒定律	31
	三、无摄卫星轨道参数	33
	四、摄动力对卫星运行轨道的影响	35
第三节	数据通讯基本知识	36
	一、电磁波波段及频谱	36
	二、电磁波传播	36
	三、数据通讯原理	38
第四节	GPS 信号	41
	一、GPS 卫星信号的基本构成及表述	41
	二、伪随机噪声码	43
	三、GPS 的测距码	47
	四、卫星信号的解调	49
第五节	GPS 卫星的导航电文	49
	一、导航电文及其格式	49
	二、导航电文的内容	51
第六节	GPS 卫星星历与卫星位置计算	55
	一、GPS 卫星星历	55
	二、卫星位置的计算	56
第七节	GPS 接收机	58
	一、GPS 接收机及其分类	58
	二、GPS 接收机天线	61
	三、GPS 接收机通道	62
	四、GPS 接收机的基本工作原理	63
第八节	GLONASS 及其它导航定位系统	66
	一、GLONASS	66
	二、其它独立的卫星导航系统的概况	71
第四章	GPS 静态定位原理	72
第一节	GPS 定位的基本观测量与定位方法	72
第二节	GPS 定位模式	73
	一、静态定位与动态定位	73
	二、单点定位与相对定位	73
	三、差分定位—差分 GPS(DGPS)	74
	四、主动式测距和被动式测距	74
第三节	伪距法定位	75
	一、伪距及其测量	75

	二、伪距法定位原理	75
	三、伪距定位的计算	76
第四节	载波相位测量	78
	一、载波相位测量	79
	二、载波相位测量的观测方程	80
	三 载波信号的传播时间($\Delta\tau$)	82
第五节	整周跳变的探测与修复	83
	一、产生整周跳变的原因	83
	二、周跳的探测及修复	84
第六节	整周模糊度的确定	87
	一、经典方法(将 N_0 作为待定参数求解)	87
	二、两次设站法	88
	三、“停一走”(Stop and go)法	88
	四、快速确定整周未知数法	89
第七节	载波测量的线性组合	92
	一、概述	92
	二、在接收机间求一次差	93
	三、在接收机和卫星间求二次差	96
	四、在接收机、卫星和历元间求三次差	97
	五、求差法和非差法的比较	99
	六、两个载波(L_1 、 L_2)观测值间的线性组合	99
第五章	GPS 动态定位原理	102
第一节	动态定位的基本特点	102
	一、用户多样性	102
	二、速度多异性	102
	三、定位实时性	103
	四、数据短时性	103
第二节	实时定位方法	104
	一、单点动态定位	105
	二、伪距差分动态定位	106
	三、载波相位差分动态定位—RTK	107
第三节	差分 GPS	112
	一、差分 GPS 原理	112
	二、差分 GPS 的分类	114
	三、差分 GPS 的新进展	119
第四节	GPS 动态定位的发展特点	120
第五节	卡尔曼滤波与平滑	120
	一、卡尔曼滤波状态方程与观测方程	120

二、卡尔曼滤波的解算公式与步骤	122
三、平滑	123
第六节 GPS 测定速度	123
一、多普勒频移 f_d 的测定	124
二、GPS 单点测速	125
三、GPS 差分测速	126
第七节 GPS 测定时间	128
一、单点定时法	128
二、共视比对定时法	129
第六章 GPS 定位误差	130
第一节 概述	130
一、误差的分类	130
二、消除、削弱误差影响的措施和方法	131
三、选择较好的接收机和较好的观测条件	131
第二节 时钟误差	131
第三节 星历误差	132
一、星历数据的来源	132
二、星历误差对定位的影响	133
三、解决星历误差的办法	133
第四节 电离层折射	134
一、电离层及其影响	134
二、单频接收机的电离层改正方法	135
三、双频接收机的电离层改正方法	136
第五节 对流层折射	138
一、折射指数模型	138
二、对流层改正模型	140
三、气象元素的测定	142
第六节 其它误差及其改正方法	142
一、相对论效应	142
二、地球潮汐改正	143
三、多路径误差	144
第七节 观测卫星的几何分布及其对定位精度的影响	147
一、精度因子 DOP 与定位精度	147
二、卫星分布的几何图形对精度因子的影响	148
第七章 GPS 测量的实施	150
第一节 GPS 网的技术设计	150
一、GPS 网技术设计的依据	150

	二、GPS 网的精度标准	150
	三、GPS 网的图形设计	152
第二节	精度与可靠性指标及设计说明书编写	155
	一、GPS 网精度与可靠性预计	155
	二、GPS 测量的外业准备	158
	三、技术设计书编写	159
第三节	GPS 测量的外业工作	160
	一、选点、埋石	160
	二、外业观测	161
第四节	GPS 相对定位的作业模式	165
	一、静态相对定位模式	165
	二、快速静态定位模式	165
	三、准动态定位模式	165
	四、动态定位模式	166
	五、实时动态定位的作业模式	166
第五节	观测成果的外业检核	167
	一、数据预处理及基线解算	167
	二、观测成果的外业检核	168
	三、GPS 网平差及其检核	169
	四、技术总结	170
	五、上交资料	170
第八章	GPS 数据处理	171
第一节	观测数据预处理	171
	一、概述	171
	二、数据传输与分流	172
	三、预处理	172
第二节	GPS 基线向量的解算	175
	一、平差模型的建立	175
	二、双差法基线向量解算	177
	三、基线向量解算结果分析	181
第三节	GPS 坐标系统的转换	182
	一、同一坐标系内空间直角坐标与大地坐标的换算	182
	二、GPS 定位成果至国家/地方参考椭球的二维转换	183
	三、GPS 定位成果转换为国家大地坐标系的坐标	185
	四、不同空间直角坐标系之间的坐标换算	186
	五、利用不同空间直坐标系的转换方法将 GPS 定位成果转换至国家大地坐标系	187
	六、坐标转换中协因数阵的转换	188

第四节	基线向量网平差·····	194
一、GPS 基线向量网的三维平差	·····	195
二、GPS 基线向量网的二维平差	·····	200
三、平差实施及成果应用	·····	202
四、GPS 大地高及其转换	·····	203
第九章	GPS 技术在测绘和导航中的应用 ·····	206
第一节	在地球动力学方面的应用·····	206
一、概述	·····	206
二、GPS 对研究地球动力学的作用及其应用	·····	207
第二节	在大地测量方面的应用·····	210
一、利用 GPS 建立全球大地控制网	·····	210
二、利用 GPS 建立、改善、加密国家和地区性大地控制网	·····	211
第三节	在工程测量方面的应用·····	213
第四节	在工程变形监测方面的应用·····	219
第五节	在海洋测绘方面的应用·····	221
一、在海洋资源勘探方面的	·····	221
二、在海洋大地测量方面的应用	·····	221
第六节	在摄影测量与遥感中的应用·····	223
第七节	星载 GPS 的应用 ·····	224
一、GPS 为对地观测卫星提供精密定轨	·····	224
二、GPS 为对地遥感卫星测定三维摄站坐标	·····	224
三、GPS 为低轨通讯卫星的信道切换提供数据基准	·····	225
四、GPS 为卫星入轨和卫星回收作实时点位测量	·····	227
第八节	GPS 在导航中的应用 ·····	228
一、概述	·····	228
二、GPS 在导航方面的应用	·····	229
三、GPS 在军事上的应用	·····	231
参考文献	·····	232

第一章 绪 论

1957年10月4日,前苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星,之后大地测量学取得了惊人的发展。随着人造地球卫星的不断入轨运行,利用卫星作定位测量已成为可能,从而产生了卫星大地测量学;60年代末期,甚长基线射电干涉测量(VLBI)和卫星激光测距(SLR)技术的成功,使卫星大地测量学发展成为空间大地测量学。近年来,由于GPS系统的建成,理论研究的不断深入和应用领域的不断拓宽,GPS已发展成为最有潜力的高科技全能型的空间测绘技术。诚然,GPS设计之初,美国国防部的主要目的是为陆海空三个领域内提供实时、全天候和全球性的导航服务,但是经过20余年的开发应用,GPS不仅能完成上述导航任务,而且目前GPS相对定位的相对精度优于 1×10^{-8} ,已接近VLBI和SLR的精度,实实在在的说,GPS定位已引起了大地测量乃至整个测绘学科发生了革命性的变化,极大地推动了地球动力学、地球物理学和地震学的发展。GPS定位技术的惊人进展及其重大影响和广泛应用大概也出乎设计者的最初预料的。

本章将主要介绍GPS的发展,GPS概论及其应用特点,GPS政策及基本对策,其他独立的卫星导航定位系统的概况。

第一节 GPS的发展

1957年10月世界上第一颗人造地球卫星的发射成功,是人类致力于现代科学技术发展的结晶,它使空间科学技术的发展迅速跨入了一个崭新的时代。

三十多年来,人造地球卫星技术在军事、通讯、气象、资源勘察、导航、遥感、大地测量、地球动力以及天文等众多学科领域得到极其广泛的应用,从而推动了科学技术的迅猛发展,也丰富了人类的科学文化生活。

人造地球卫星的出现,首先引起了各国军事部门的高度重视。1958年底,美国海军武器实验室就着手实施建立为美国军用舰艇导航服务的卫星系统,即“海军导航卫星系统”(Navy Navigation Satellite System—NNSS)。该系统中卫星的轨道都通过地极上空,故也称“子午卫星系统”。1964年该系统建成,并开始在美国军方启用;1967年美国批准该系统解密,并提供民用。由于该系统不受气候条件的影响,自动化程度较高,且具有良好的定位精度,所以它的出现也立即引起了大地测量学者的极大关注。尤其是在该系统提供民用之后,在大地测量方面进行了大量的应用研究和实践,并取得了许多令人瞩目的成就。这就预示着经典的大地测量技术面临着一场重大的变革。

虽然NNSS在导航技术的发展中具有划时代的意义,但是由于该系统卫星数目较少(5~6颗)、运行高度较低(平均约1000km)、从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均约1.5小时),因而它无法提供连续地实时三维导航。加之获得一次导航解所需的时间较长,所以难以充分满足军事方面,尤其是高动态目标(如飞机、导弹)导航的要求。而从大地测量学方面来看,由于它定位速度较慢(一个测站一般平均观测1~2天),精度也较低(单点定位精度3

~5m,相对定位精度约为 1m),所以该系统在大地测量学和地球动力学研究方面的应用,也受到了很大的限制。

为了满足军事部门和民用部门对连续实时和三维导航的迫切要求,1973 年美国国防部正式开始组织海陆空三军,共同研究建立新一代卫星导航系统的计划。即“导航卫星授时与测距/全球定位系统”(Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System—NAVSTAR/GPS),通常简称为“全球定位系统”(GPS)。

GPS 计划分为三期工程。第一期工程(1973—1979)为制定方案和方案论证,包括制定规划、总体设计、理论研究、发射实验卫星、研制用户接收机等。第二期工程(1979~1985)为系统试验,包括操作控制系统的研制和运转、工作卫星的研制等等。第三期工程(1985~1994)为生产作业和发展应用。

GPS 历时 20 余年,耗资逾三百亿美元,于 1994 年建成投入运行。通过导航定位实践证明,GPS 系统是一个高精度、全天候和全球性的导航、定位和定时的多功能系统。GPS 技术已经发展成为多领域(陆地、海洋、航空、航天)、多模式(GPS、DGPS、LADGPS、WADGPS、WAAS 等)、多用途(在途导航、精密定位、精确定时、卫星定轨、灾害监测、资源调查、工程建设、市镇规划、海洋开发、交通管制,等等)、多机型(测地型、全站型、定时型、手持型、集成型、车载式、船载式、机载式、星载式、弹载式)的高新技术国际性产业。GPS 导航与定位技术的迅猛发展已成为 20 世纪后期人类科技进步的里程碑。许多学者预言,即使在 21 世纪初期,它仍独领风骚 20 年以上,并极大地推动空间科学、大气科学、海洋科学、地球科学以及工程技术的发展。同时,它也将广泛地渗透到人类社会发展的多个领域,激起社会生活的变革以及人们观念的更新。

第二节 GPS 概论及其应用特点

一、GPS 概论

GPS 是全球性的卫星定位和导航系统,能提供连续的、实时的位置、速度和时间信息。整个系统包括空间卫星、地面监控站和用户接收机三部分。空间部分有 24 颗卫星,均匀分布在六个倾角为 55° 的近似圆形的轨道上,每个轨道有四颗卫星。轨道距地面平均高度约为 20200km。卫星绕地球一周需要 11h58min。这样,地球上任何地方,任何时刻都能收到至少四颗卫星发射的信号。

每颗 GPS 卫星可连续地发送两个 L 频带的无线电载波: $L_1=1575.42\text{MHz}$, $L_2=1227.60\text{MHz}$ 。载波上调制了多种信号,用于计算卫星位置,辨别卫星和测量站星距离等。

GPS 测量有两种基本的观测量:“伪距”和载波相位。接收机利用相关分析原理测定调制码由卫星传播至接收机的时间,再乘上电磁波传播的速度便得距离,由于所测距离受大气延迟和接收机时钟与卫星时钟不同步的影响,它不是几何距离,故称之为“伪距”。载波相位测量是把接收到的卫星信号和接收机本身的信号混频,从而得到拍频信号,再进行相位差测量,相位测量装置只能测量载波波长的少数部分,因此所测的相位可能看成是波长整数未知(也称整周模糊度)的“伪距”。由于载波的波长短(L_1 为 19.03cm, L_2 为 24.42cm),所以测量的精度比“伪距”高。

GPS 定位时,把卫星看成是“飞行”的已知控制点,利用测量的距离进行空间后方交会,

便得到接收机的位置。卫星的瞬时坐标可以利用卫星的轨道参数计算。

GPS 定位包括单点定位和相对定位两种方式。单点定位确定点在地心坐标系中的绝对位置。相对定位则利用两台以上的接收机同时观测同一组卫星,然后计算接收机之间的相对位置。定位测量时,许多误差对同时观测的测站有相同的影响。因此在计算时,大部分误差相互抵消,从而大大地提高了相对定位的精度。

影响 GPS 定位的精度有两个因素。一个是观测误差,另一个是定位时卫星位置的几何图形,后者称为定位几何因素,用 DOP 表示,设 σ 为定位误差, σ_0 为测量误差,则有:

$$\sigma = \text{DOP} \cdot \sigma_0$$

DOP 取何种形式,取决于 σ 所代表的精度的含义,详细以后还会讨论。目前,GPS 单点定位的精度为几十米,而相对定位精度可达 $(1-0.01)\text{ppm}$ 。

二、GPS 应用特点

自 80 年代起,随着 GPS 实验卫星和工作卫星先后不断升空,经各国科学家的积极开发研究和各生产厂家的竞相研制,GPS 的硬件和软件不断更新,日趋完善,使 GPS 技术在导航、测绘等领域迅速获得推广应用,通过实践,GPS 定位技术的应用特点可归纳如下:

(一)GPS 应用于导航定位的特点

1. 全球地面连续覆盖。由于 GPS 卫星的数目较多且分布合理,所以地球上任何地点均可连续同步地观测到至少 4 颗卫星。从而保障了全球、全天候连续地实时导航与定位。

2. 功能多,精度高。GPS 可为各类用户连续地提供动态目标的三维位置、三维速度和时间信息。一般来说,目前其单点实时定位精度如不受 SA 影响可达 $5\sim 10\text{m}$,静态相对定位精度可达 $1\sim 0.01\text{ppm}$,测速精度为 0.1m/s ,而测时精度约为数十纳秒。随着 GPS 测量技术和数据处理技术的发展,其定位、测速和测时的精度将进一步提高。

3. 实时定位速度快。利用全球定位系统一次定位和测速工作在一秒至数秒种内便可完成(NNSS 约需 $8\sim 10$ 分钟),这对高动态用户来说尤为重要。

4. 抗干扰性能好,保密性强。由于 GPS 采用了数字通讯的特殊编码技术,即伪随机噪声码技术,因而 GPS 卫星所发送的信号,具有良好的抗干扰性和保密性。

由于 GPS 主要是为满足军事部门高精度导航与定位的需要而建立的,所以上述优点对军事上动态目标的导航具有十分重要的意义。正因为如此,美国政府把发展 GPS 技术作为导航技术现代化的重要标志,并把这一技术视为 20 世纪最重大的科技成就之一。

(二)GPS 应用于测量的特点

GPS 定位技术的高度自动化和所达到的定位精度及其潜力(见图 1-1)使广大测量工作者产生了极大的兴趣。尤其从 1982 年第一代大地型无码 GPS 接收机 Macrometer V-1000 投入市场以来,在应用基础的研究、应用领域的开拓、硬件和软件的开发等方面都得到蓬勃发展。广泛的实验活动为 GPS 精密定位技术的应用展现了广阔的前景。

相对于经典的测量学来说,这一新技术的主要特点如下:

1. 观测站之间无需通视。既要保持良好的通视条件,又要保障三角网的良好图形,这一直是经典大地测量在实践方面的困难问题之一。GPS 测量不要求观测站之间相互通视,因而不需要建造觇标。这一优点既可大大减少测量工作的经费和时间(一般造标费用约占总经费的 $30\sim 50\%$),同时也使点位的选择变得甚为灵活。

不过也应指出,GPS 测量虽不要求观测站之间相互通视,但必须保持观测站的上空开

阔(净空),以使接收 GPS 卫星的信号不受干扰。

2. 定位精度高。现已完成的大量实验表明,在小于 50km 的基线上,其相对定位精度可达 $1 \sim 2 \times 10^{-6}$,而在 100 ~ 500km 的基线上可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。随着观测技术与数据处理方法的改善,在大于 1000km 的距离上,相对定位精度可达到或优于 10^{-8} 。

3. 观测时间短,效率高。目前,完成一条基线的精密相对定位所需要的观测时间,根据要求的精度不同一般约为 1~3 小时。为了进一步缩短观测时

间,提高作业速度,对于快速定位方法的应用正受到广泛的重视。近年来发展的短基线(例如不超过 20km)快速相对定位法,其观测时间仅需数分钟。

4. 提供三维坐标。GPS 测量在精确测定观测站平面位置的同时,可以精确测定观测站的大地高程。GPS 测量的这一特点,不仅为研究大地水准面的形状和确定地面点的高程开辟了新途径,同时也为其在航空物探航空摄影以及导航中的应用提供了重要的高程数据。

5. 操作简便,自动化程度高。GPS 测量的自动化程度很高,在观测中测量员的主要任务只是安装并开关仪器、量取仪器高和监视仪器的工作状态,而其它观测工作如卫星的捕获、跟踪观测等均由仪器自动完成。另外,GPS 用户接收机一般重量较轻、体积较小,例如 Ashtech MXI 型 GPS 接收机,包括电池在内的重量约为 3.9kg,体积为 $10 \times 20 \times 22 \text{cm}^3$;而 Wild200 型 GPS 测量系统,其控制器和传感器两部分共重约 3.3kg,因此携带和搬运都很方便。

6. 成本低,经济效益高。由国内外大地测量实测资料表明,用 GPS 定位技术建立控制网,要比常规大地测量技术节省 70%~80% 的外业费用,这主要是因为节省了造标的费用和效率高从而使工期大大缩短,随着 GPS 接收机性能和价格比的不断提高,经济效益将更加显著。

7. 全天候作业。GPS 观测工作可以在任何地点,任何时间连续地进行,一般也不受天气状况的影响。

综上所述,GPS 定位技术较常规测量手段有显著优势,而且它是一种被动式定位系统,可为无限多个用户使用,它必将逐步取代常规测量手段。此外,GPS 定位技术与另两种精密空间定位技术:卫星激光测距(SLR)和甚长基线干涉(VLBI)测量相比,据近些年全球网测量结果比较表明,其精度已能与 SLR 和 VLBI 相媲美,且 GPS 接收机轻巧方便,价格较低,更加显示出 GPS 定位技术较之 SLR 和 VLBI 具有更优越的条件和更广泛的应用前景。

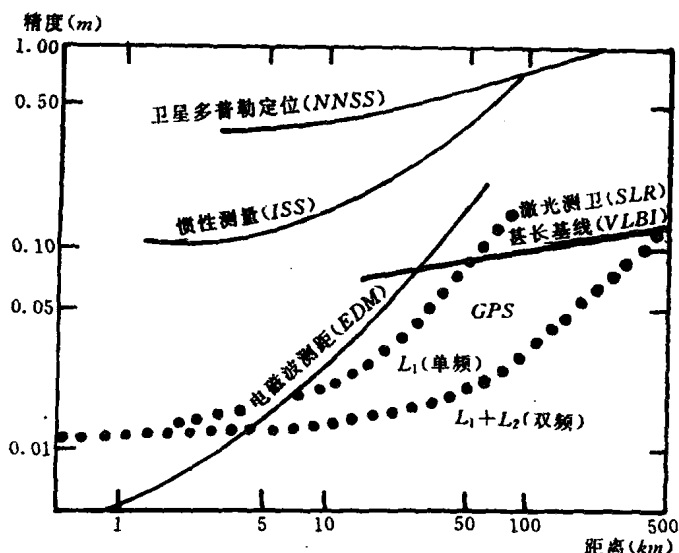


图 1-1 各种定位方法的精度比较

第三节 GPS 政策及基本对策

一、GPS 的现行政策及基本对策

(一)GPS 的现行政策

GPS 卫星发射的无线电信号,含有两种精度不同的测距码,即所谓 P 码(也称精码)和 C/A 码(也称粗码)。相应两种测距码,GPS 将提供两种定位服务方式,即精密定位服务(Precise Positioning Service—PPS)和标准定位服务(Standard Positioning Service-SPS)。

精密定位服务的主要对象是美国军事部门和其它特许的部门。这类用户可利用 P 码获得精度较高的观测量,且能通过卫星发射的两种频率信号量测距离,以消除电离层折射的影响。利用 PPS 也不会受到下述 SA 政策的影响,单点实时定位的精度可优于 10m;标准定位服务的主要对象是广大的民间用户。利用 SPS 所得到的观测量精度较低,且只能采用调制在一种频率上的 C/A 码测量距离,无法利用双频技术消除电离层折射的影响。其单点实时定位的精度约为 20m~30m。但是在 SA 政策的限制下,利用 SPS 的定位精度将进一步降低至约 100m。

因为 GPS 与美国的国防现代化发展密切相关,除以上的“双用途”政策以及该系统在设计方面采取了许多保密性措施外,在其全部投入运行后还实行了所谓选择可用性(Selective Availability-SA)政策,即人为地将卫星星历和 GPS 卫星钟的精度降低,以限制广大民间用户利用 GPS 定位的精度。

从 1991 年 7 月 1 日开始,在轨的 GPS 卫星全部实施 SA 技术,形成 GPS 卫星信号的人为干涉,其主要内容是:

1. GPS 卫星向全球用户播发的星历,是用两种伪噪声码进行传送的。P 码所传送的 GPS 卫星星历已从 20m 左右的精度提高到了 5m 左右。但是,只有工作于 P 码的接收机,才能从 P 码中解译出精密的 GPS 卫星广播星历(简称为 P 码星历)。C/A 码所传送的 GPS 卫星星历(简称为 C/A 码星历),经过 ϵ 技术处理后,将它的精度人为地降低到 $\pm 100\text{m}$ 左右。且知,它不是一个人为的固定偏差,而是一个无规则变化的人为随机值。目前绝大多数的商品接收机,都是工作于 C/A 码的,换言之,只能使用降低了精度的 C/A 码星历。在用 GPS 信号测定点位时,GPS 卫星是作为一种动态已知点,它是通过一定的公式,利用 GPS 卫星星历解算的。C/A 码星历精度的人为降低,必将给动态用户引入相应量级的误差。这是非特许用户进行高精度 GPS 测量时必须解决的一个大难题。

2. GPS 卫星的基准信号(10.23MHz)将经过 δ 技术处理,而人为地引入一个高频抖动信号。因为基准信号是所有卫星信号(载波、伪噪声码、数据码)的振荡源,故所有派生信号都将引入一个“快变化”的高频抖动信号。

3. P 码将经过译密技术处理而变成 Y 码。Y 码是由正常的 P 码和机密的 W 码之模二和而形成的,这也叫做反电子诱骗(AS,即 Anti-Spoofing)。实施 AS 技术的目的在于,防止敌方对 P 码作精密导航定位的电子干扰。当实施 AS 技术时,非特许用户不仅不能使用 P 码作实时定位,而且不能进行 P 码和 C/A 码相位测量的联合解算,甚至 P 码数据平滑。只有特许用户才知道 W 码的结构,从而可按伪噪声码的解码方法解译出 P 码。但是,据 GPS 联合办公室的人士透露,只有在国家紧急状态下或者短期试验时,才启用 W 码,一般情况下,