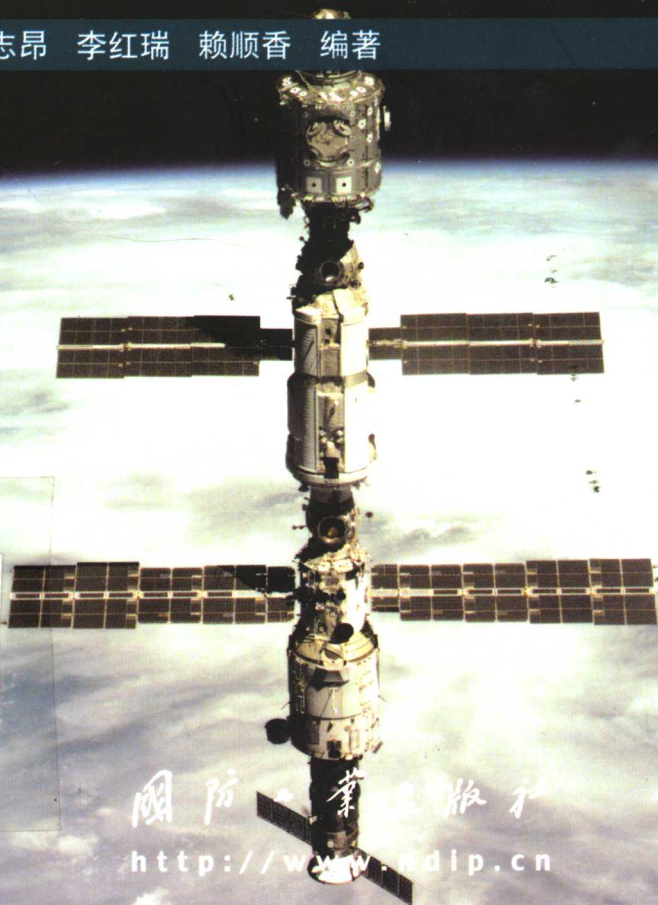


GPS

技术与工程应用

熊志昂 李红瑞 赖顺香 编著



国防工业出版社
<http://www.ndip.cn>

GPS

技术与工程应用

PLATE 10000 10000 10000 10000



GPS 技术与工程应用

熊志昂 李红瑞 赖顺香 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

GPS 技术与工程应用 / 熊志昂等编著. —北京:国防工业出版社, 2005. 4

ISBN 7-118-03637-4

I. G... II. 熊... III. 全球定位系统(GPS) - 基本知识 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 101731 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 3/4 305 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

全球定位系统 (GPS) 是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System 的字头缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称。它的含义是利用导航卫星进行测时和测距。GPS 是目前最先进、应用最广的卫星导航定位系统。

GPS 是一种全新的空基无线电导航系统,它不仅具有全球性、全天候和连续的精密三维定位能力,而且能实时地对运动载体的速度、姿态进行测定以及精确授时。GPS 已成为导航技术现代化的里程碑。

GPS 技术正日益广泛地应用于各个领域,尤其是自 1990 年的海湾战争以来, GPS 技术在军事领域得到了全方位的应用,它从根本上解决了空中、陆地和海上各种运行平台的定位和导航问题。目前,大量 GPS 用户设备已应用于舰艇、战车、飞机的导航;应用于战术导弹、战略导弹的试验、测控与制导;应用于各种卫星测控等军事领域。未来战争的形态将是高科技的“数字化战争”,而先进的导航定位技术是“数字化战争”的重要保证。因此, GPS 技术的发展和军事应用已引起了各国的普遍关注。

GPS 技术已广泛地应用于工程领域的各个方面。比如,它已成功地应用于靶场试验的测量与监控,靶场试验数据的同步录取,应用于陆地车辆的智能交通管理等。GPS 技术在各个方面的应用正在蓬勃发展。可以相信,它在军用、民用各个领域的渗透、应用必将朝着更宽广的范围和更深刻的层次迅速发展。

本书作者近些年一直致力于 GPS 技术研究与应用,书中有关 GPS 的基本理论、基本原理深入浅出、全面客观。书中重点论述了 GPS 技术及工程应用,省略了各种繁琐的数学模型的推演过程,力

求做到概念清晰、内容新颖、通俗易懂,并将近几年来我们在理论和工程应用的成果融入到有关章节中。编写本书的目的是促进 GPS 新技术的应用,同时也为 GPS 研究和开发人员提供应用思想和可操作性技术。

本书共分为 6 章。第 1 章为绪论,简要地介绍了技术的发展及组成概况。第 2 章简要地介绍了 GPS 测量所需要的坐标系统和时间系统、坐标系的转换方法,对于深入掌握 GPS 技术的应用是不可缺少的。第 3 章简要地介绍了 GPS 卫星信号、GPS 卫星的导航电文、GPS 接收机工作原理、GPS 定位技术以及对定位误差来源进行了较详细的讨论。第 4 章详细介绍了 GPS 开发应用的主要技术,包括 GPS 测量数据的采集与处理、GPS 接收机、GPS OEM 板的开发以及与计算机通信等技术。第 5 章主要介绍了目前较为流行的 GPS 干扰与抗干扰技术。GPS 干扰与抗干扰技术发展很快,它与 GPS 应用的发展是相辅相成的。第 5 章是抛砖引玉,以期 GPS 干扰与抗干扰技术有更大的发展,以适应现代信息化战争的需要。第 6 章介绍 GPS 技术在一些工程项目中的应用,希望能对 GPS 工程技术人员在项目开发上有所启迪,有所帮助。

本书由熊志昂、李红瑞、赖顺香、石景岚共同策划编著,该书的完成体现了团队精神,刘明辉、张部生、朱逸武等在本书的编写工作中查阅、翻译、提供了大量的资料,同时也为文稿的最终完成和校对工作付出了辛勤的劳动,63880 部队领导对本书的编著和出版给予了极大的支持,王远功总工程师审阅了本书,提出了宝贵的意见,在此表示诚挚的感谢。

内 容 简 介

本书阐述了全球定位系统(GPS)及其工程应用的最新技术。介绍了全球定位系统发展概况、系统组成、导航定位的时空参照系、GPS 卫星信号、GPS 定位技术等;着重阐述了 GPS 工程应用以及开发 GPS 设备时所需的基本技术;介绍了电子对抗领域的 GPS 干扰与抗干扰技术,目的是更好地把握 GPS 在未来战争中的应用;最后介绍了 GPS 技术在一些比较重要的工程项目中的应用,主要内容有工程应用背景,以及工程应用方法和技术。

本书可作为高等院校学生学位论文撰写、工程实践的参考用书,也可供从事 GPS 开发及工程应用等领域的专业技术人员以及科技人员参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星定位技术	1
1.1.1 早期的卫星定位技术	1
1.1.2 子午卫星导航技术	1
1.1.3 GPS 技术	3
1.1.4 GLONASS 技术	5
1.1.5 伽利略(Galileo)GNSS 导航定位技术	6
1.1.6 双星导航定位技术(“北斗一号”)	6
1.2 GPS	8
1.2.1 GPS 组成	8
1.2.2 GPS 特点及用途	14
1.2.3 GPS 的最新发展与改进	18
1.3 GLONASS	23
1.3.1 GLONASS 组成	24
1.3.2 GLONASS 信号特性与系统性能	32
1.3.3 GLONASS 的未来发展	41
1.4 卫星导航定位技术在军事上的应用	45
第 2 章 坐标系统和时间系统	51
2.1 地球坐标系及其转换	52
2.1.1 地心坐标系	52
2.1.2 瞬时地球坐标系与协议地球坐标系	55
2.1.3 天文坐标系	58
2.1.4 参心坐标系	59
2.1.5 站心坐标系及其转换	60

2.2	天球坐标系及其转换	66
2.2.1	天球和天球坐标系	66
2.2.2	瞬时天球坐标系与协议天球坐标系	69
2.2.3	天球坐标系的转换	71
2.3	WGS-84 坐标系和我国常用坐标系	74
2.3.1	WGS-84 坐标系	74
2.3.2	我国使用的地心坐标系	77
2.3.3	我国使用的参心坐标系	77
2.3.4	WGS-84 与跟踪测量设备测量坐标系转换举例	79
2.4	GPS 与 GLONASS 的坐标转换	81
2.5	时间系统	85
2.5.1	世界时系统	86
2.5.2	原子时系统	89
2.5.3	力学时系统	91
2.5.4	协调世界时	91
2.5.5	GPS 时间系统	92
第 3 章	GPS 卫星定位技术	94
3.1	GPS 卫星信号	94
3.1.1	概述	94
3.1.2	伪随机码的产生和特性	97
3.1.3	伪随机码扩频与相关接受	99
3.1.4	码分多址	103
3.1.5	粗码 C/A 码	103
3.1.6	精码 P 码	105
3.2	GPS 卫星的导航电文	106
3.2.1	遥测码	107
3.2.2	转换码	107
3.2.3	第 1 数据块	108
3.2.4	第 2 数据块	109
3.2.5	第 3 数据块	110

3.3	GPS 接收机	111
3.3.1	GPS 接收机的分类	111
3.3.2	GPS 接收机的组成及工作原理	113
3.3.3	GPS/GLONASS 集成接收机	117
3.3.4	GPS 软件接收机	120
3.3.5	GPS 接收机的检验、使用与维护	127
3.4	GPS 定位技术	132
3.4.1	伪距测量技术	132
3.4.2	载波相位测量技术	135
3.4.3	差分 GPS 定位技术	140
3.4.4	GPS 定位技术最新发展	151
3.5	GPS 定位误差	153
3.5.1	GPS 定位精度、误差等基本概念	153
3.5.2	GPS 定位的主要误差来源及其精度影响	154
3.6	GPS 载体速度测量、姿态测量以及时间测量	162
3.6.1	GPS 的载体速度测量	162
3.6.2	GPS 的载体姿态测量	165
3.6.3	GPS 测时	171
第 4 章	GPS 开发与应用技术	177
4.1	GPS 输出数据的采集与处理技术	177
4.1.1	提高 GPS 定位精度的数据处理技术	178
4.1.2	GPS 接收机输出数据的格式	186
4.1.3	GPS 动态测量定位系统数据采集与处理技术	187
4.1.4	用 GPS 求定正常高	205
4.2	GPS 接收机与计算机通信技术	213
4.2.1	基于 VB 的 GPS 接收机与计算机通信技术	214
4.2.2	基于 VC 的 GPS 接收机与计算机通信技术	217
4.3	利用 GPS 接收机进行精确授时	224
4.3.1	利用 GPS 对计算机实现精确授时	224
4.3.2	利用 GPS 实现分布式控制系统的时间同步	231

4.4	GPS OEM 板开发与应用技术	237
4.4.1	GPS OEM 板简介	237
4.4.2	GPS OEM 板与计算机的通信技术	239
4.4.3	利用 GPS OEM 板进行精确授时	247
4.5	利用嵌入式操作系统进行 GPS 应用开发	251
第 5 章	GPS 干扰与抗干扰技术	257
5.1	GPS 干扰技术	257
5.1.1	现役 GPS 的脆弱性	258
5.1.2	对 GPS 的潜在干扰	259
5.1.3	对 GPS 的人为干扰	264
5.1.4	干扰类型与典型干扰源	270
5.1.5	干扰对 GPS 信号接收的影响机理	271
5.1.6	干扰功率计算	273
5.1.7	干扰距离计算	275
5.1.8	干扰效果分析	276
5.1.9	压制干扰对 GPS 定位误差的影响	278
5.2	实例分析——对 GPS/INS 制导巡航导弹的干扰	281
5.2.1	伪距差分动态定位导航	281
5.2.2	对 GPS/INS 制导巡航导弹的干扰	283
5.3	GPS 抗干扰技术	290
5.3.1	几种主要的 GPS 抗干扰技术	290
5.3.2	军用 GPS 接收机的抗干扰技术	294
5.4	GPS 中 P(Y)码直接捕获技术	303
5.4.1	低功耗微型时钟技术	304
5.4.2	并行相关器技术	305
5.4.3	电光相关器	307
5.4.4	搜捕算法的改进	308
5.4.5	XFAST 算法	309
5.5	空时自适应抗干扰技术	311
5.5.1	时域、频域滤波技术	311

5.5.2	空域滤波技术	312
5.5.3	空时自适应(STAP)技术	313
第 6 章	GPS 工程应用	318
6.1	GPS 多目标测量系统	318
6.1.1	系统组成	319
6.1.2	工作原理	321
6.1.3	关键技术	322
6.2	GPS 授时在试验数据录取中的应用	325
6.2.1	系统组成	326
6.2.2	工作原理	328
6.2.3	关键技术	329
6.2.4	系统实现	331
6.3	GPS 精度鉴定系统及其在机载雷达动态试验中的应用	339
6.3.1	试验方法	340
6.3.2	飞行试验验证	343
6.4	“北斗”/GPS 组合定位在道路勘测自动化系统中的应用	346
6.4.1	概述	346
6.4.2	系统组成	348
6.4.3	数据处理	350
6.4.4	系统特点	355
参考文献		359

第 1 章 绪 论

1.1 卫星定位技术

1.1.1 早期的卫星定位技术

卫星定位技术是利用人造地球卫星进行点位测量的技术,即已知卫星在每一时刻的位置和速度的基础上,以卫星为空间基准点,通过测站接受设备,测定至卫星的距离或多普勒频移等观测量来确定测站的位置、速度。当初,人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标,由地面观测站对它进行摄影观测,测定测站至卫星的方向,建立卫星三角网;也可以用激光技术对卫星进行距离观测,测定测站至卫星的距离,建立卫星测距网。这种对卫星的几何观测能够解决用常规大地测量技术难以实现的远距离陆地海岛联测定位的问题。20 世纪 60 年代至 70 年代,美国国家大地测量局在英国和德国测绘部门的协助下,用卫星三角测量的方法花了几年时间测设了有 45 个测站的全球三角网,点位精度 5m。但是这种观测方法受卫星可见条件及天气的影响,费时费力,不仅定位精度低,而且不能测得点位的地心坐标。因此,卫星三角测量很快就被卫星多普勒定位所取代,使卫星定位技术从仅仅把卫星作为空间观测目标的低级阶段,发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

1.1.2 子午卫星导航技术

1958 年底,美国海军武器实验室就开始实施建立为美国军用舰艇导航服务的卫星导航系统,即“海军导航卫星系统”(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。该系统的卫星轨道通过地球的南北

两极,卫星的地迹与地球的子午圈重合,故又称为“子午卫星导航系统”。1964年 NNSS 建成,美国军方启用,1967年美国批准该系统解密,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、定位速度快和经济效益好等一系列优点,因此,迅速被世界各国所采用。卫星导航定位技术迅速兴起,它不仅用于导航,还广泛用于石油、地质勘探和测绘等部门。我国于20世纪70年代中期,开始引进 NNSS 定位技术,用于舰船导航,进行了西沙群岛的大地测量基准联测,布测了全国卫星多普勒大地网和西北地区石油地球物理勘探的卫星多普勒定位网。南极乔治岛上我国长城站的地理位置,也是用 NNSS 定位技术测定的。

子午卫星导航系统采用6颗卫星,并都通过地球的南北极运行。卫星轨道接近圆形,轨道高度为1100km,周期约为107min,每天卫星运行13周~15周。每颗卫星覆盖半径约为3000km~3500km。NNSS系统导航定位的原理是:用户接收机接收卫星发播的信号,并根据多普勒(Doppler)效应原理,测定因卫星相对用户接收机不断运动而产生的多普勒频移。由于多普勒频移反映了卫星与接收机相对运动速度,包含了卫星与接收机相对位置的信息,故根据已知的卫星位置,就可以解算出用户接收机的位置。故该定位系统又称为卫星多普勒定位。

虽然子午卫星导航系统在导航和定位技术发展中具有划时代的意义,但是仍然存在着明显的缺陷。由于卫星数少,而且轨道较低,故每隔1h~2h才有一次卫星通过地面观测站而被跟踪观测。另外,由于采用多普勒定位原理,一台接收机需要观测15次合格的卫星通过,才能获得精度为 $\pm 10\text{m}$ 的单点定位参数。由于观测解算导航参数的时间长,因此它不能满足连续实时三维导航的要求,尤其不能满足高动态目标(比如飞机、导弹等)的高精度要求。

从大地测量学方面来看,由于它定位速度慢(一个测站一般平均观测1天~2天),精度也较低(单点定位3m~5m,相对定位精度约1m),因此在大地测量学和地球动力学研究方面的应用受到了很大的限制。

1.1.3 GPS 技术

20 世纪 60 年代中期,鉴于子午仪卫星导航系统的成功及其存在的缺陷,促使美国海军和空军研究更先进的卫星导航系统,以提高导航性能。海军提出的计划称为“Timation”(时间导航),空军的计划名为 621B。这两个方案差别很大,各有优缺点。“Timation”方案采用 12 颗 ~ 18 颗卫星组成全球定位网,卫星高度约 10000km,轨道呈圆形,周期为 8h,并于 1967 年 5 月和 1969 年 11 月分别发射了两颗试验卫星。“Timation”计划基本上是一个二维系统,它不能满足空军的飞机或导弹在高动态环境中连续给出实时位置参数的要求。空军的“621B”计划能在高动态环境下工作,为了提供全球覆盖,621B 计划拟采用 3 个 ~ 4 个星座,每个星座由 4 颗 ~ 5 颗卫星组成,中间一颗采用同步定点轨道,其余几颗用周期为 24h 的倾斜轨,每一个星座需要一个独立的地面控制站为它服务。该系统的主要问题有两个,一是极区覆盖问题,二是国外设站问题,使得系统难以独立自主安全可靠地运行。

1973 年美国国防部在这两个方案的基础上,决定发展各军种共同使用的全球定位系统。美国国防部指定这项计划由空军牵头负责研制。在空军系统司令部空间部成立了一个联合计划办公室,具体负责 GPS 的研制、试验、采购和部署。参加的单位有空军、陆军、海军、海军陆战队、海岸警卫队、运输部、国防地图测绘局及国防预研计划局。1978 年一些北大西洋公约组织成员和澳大利亚通过双边协议也参加了 GPS 计划。

GPS 是一种可以定时和测距的空间交会定点导航系统,它可以向全球用户提供连续、实时、高精度的三维位置、三维速度和时间信息,满足军事部门和民用部门的需要。

GPS 由空间卫星、控制设备和用户设备(接收机)三部分组成。24 颗空间卫星基本上均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道面相对于赤道平面的倾角为 55° ,各个轨道平面之间的交角为 60° ,位于离地球约 20200km 的轨道上,卫星轨道周期约为 12h,这种配置能实现

24h 全球覆盖,可保证地球上任何地点的用户在任何时候至少能接收到 4 颗以上的卫星信号。GPS 技术的基本原理是采用测距交汇确定点位的方法。GPS 卫星不断向地面发送导航电文,在地面上任何位置只需根据接收机接收到的 4 颗不同卫星发送的电文,就可以解算出接收机当时当地的三维位置。

GPS 整个发展过程可分为以下 3 个阶段。

第 1 阶段为原理方案可行性验证阶段,从 1978 年 ~ 1979 年,共发射了 4 颗试验卫星,建立了地面跟踪网,研制了地面 GPS 接收机,对系统的硬件和软件进行了嗽验,试验结果令人满意。

第 2 阶段为系统的研制与试验阶段,从 1979 年 ~ 1984 年,又陆续发射了 7 颗试验卫星。第 1 阶段和第 2 阶段共发射 11 颗试验卫星,这些试验卫星称为第 1 代卫星——Block I。与此同时,研制了各种导航型接收机和测地型接收机,试验表明,GPS 的定位精度大大超过设计标准,其中粗码(C/A 码)的定位精度远远超过设计指标,高达 20m。由此证明,GPS 计划是成功的。

第 3 阶段为最后的工程发展与完成阶段。1989 年的 2 月 4 日,发射了 GPS 第一颗工作卫星,到 1994 年 3 月 10 日共研制发射了 28 颗工作卫星。这些工作卫星称为 Block II 和 Block II A 卫星,与 Block II 相比较,Block II A 卫星增强了军事应用功能,扩大了数据存储容量。与此同时,不仅研制了高精度导航型接收机,还研制了能对卫星载波信号进行相位测量的定位精度极高的接收机和采用相位差分的 GPS 载体姿态测量接收机,满足了精密导航与制导等一系列军事目的要求。

美国所设计和试验的第 3 代工作卫星改进系统(Block II R),在 20 世纪末发射完毕,包括 20 颗 Block II R 卫星,Block II R 卫星逐步取代第 2 代卫星,进一步改善全球定位系统。

GPS 从根本上解决了人类在地球及其周围空间的导航及定位问题,它不仅可以广泛地应用于海上、陆地和空中运动目标的导航、制导和定位,而且可为空间飞行器进行精密定轨,满足军事部门的需要。同时,它在各种民用部门也获得了成功的应用,在大地

测量、工程勘探、地形普查测量、地壳监测等众多领域展现了极其广阔的应用前景。

1.1.4 GLONASS 技术

全球导航卫星系统(GLONASS)由苏联研制, GLONASS 的起步比 GPS 晚 9 年。从苏联于 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始, 到 1996 年, 13 年时间内历经周折, 虽然遭遇了苏联的解体, 由俄罗斯接替部署, 但始终没有终止或中断 GLONASS 卫星的发射。1995 年初只有 16 颗 GLONASS 卫星在轨工作, 1995 年进行了 3 次成功发射, 将 9 颗卫星送入轨道, 完成了 24 颗工作卫星加 1 颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整和检验, 已于 1996 年 1 月 18 日, 整个系统正常运行。

GLONASS 进展较快, 运行正常, 但生产用户设备的厂家较少, 生产的接收机多为专用型。美国的 3S 公司研制 GLONASS 接收机以及 GPS/GLONASS 联合接收机。GPS 与 GLONASS 联合型接收机有很多优点: 用户同时可接收的卫星数目增加约一倍, 可以明显改善观测卫星的几何分布, 提高定位精度(单点定位精度可达 16m)。由此可见卫星数目增加, 在一些遮挡物较多的城市、森林等地区进行测量定位和建立运动目标的监控管理比较容易开展; 利用两个独立的卫星定位系统进行导航和定位测量, 可有效地削弱美、俄两国对各自定位系统的可能控制, 提高定位的可靠性和安全性。

早在 1991 年俄罗斯首先宣称: GLONASS 可供国防民间使用, 不带任何限制, 也不计划对用户收费, 该系统将在完全布满星座后遵照已公布的性能运行至少 15 年。民用的标准精度通道(CSA)精度数据为: 水平精度 50m~70m, 垂直精度 75m, 并声明不引入选择可用性(SA); 测速精度 15cm/s; 授时精度为 $1\mu\text{s}$ 。俄罗斯空间部队的合作科学信息中心已作为 GLONASS 状态信息的用户接口, 正式向用户公布 GLONASS 咨询通告。

1995 年 3 月 7 日俄罗斯联邦政府签署了一项法令“有关 GLONASS 面向民用的行动指导”。此法令确认了 GLONASS 系统