

《国防科研试验工程技术系列教材》

导弹航天测量控制系统

GPS 技术与应用

中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

《国防科研试验工程技术系列教材》

导弹航天测量控制系统

GPS 技术与应用

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

• 北京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

GPS 技术与应用 / 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京: 国防工业出版社, 2004. 6

国防科研试验工程技术系列教材. 导弹航天测量控制系统

ISBN 7-118-03316-2

I. G... II. 中... III. 全球定位系统 (GPS) —教材 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 105202 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{1}{4}$ 352 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4500 册 定价: 43.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

当前,卫星导航定位在经济、军事、科研和社会生活等各个领域得到广泛的应用,日益显示了其优越性。美国建立的全球定位系统——GPS (Global Positioning System)是卫星导航定位系统的主要代表,另外还有俄罗斯的 GLONASS、我国的“北斗 1 号”和欧洲的 GALILEO。

GPS 具有全球、全天候、连续实时的三维定位、测速和定时能力。它不仅可以为各种运动载体,如车辆、舰船、航天器等提供实时导航定位,为各种非直接火力武器系统提供制导,还可以应用于高精度定位和高精度时间传递等方面。

本书是在张守信教授的《GPS 卫星测量定位理论与应用》基础上,根据当前 GPS 技术的发展和应用,特别是在航天测量控制方面的应用,由装备指挥技术学院、总装备部测量通信总体研究所和原电子部 22 所共同编著。全书共 10 章,其中第 1 章~第 8 章由张守信、徐冬梅、解海中、李智、任宇飞撰写,第 9、10 章由黄学德、柳仲贵、张波、孙传娥、刘延利、李巍、张立滨和吴健撰写。全书由张纪生研究员主审。

本书编著过程中,得到了总装备部司令部、装备指挥技术学院、总装备部测量通信总体研究所和原电子部 22 所等单位的大力支持,在此深表感谢。

本书力求做到理论与实践相结合,反映当前的新技术和应用,但由于作者水平有限,书中难免有不足和错误之处,请读者批评指正。

编著者

2003 年 6 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 美国卫星导航定位系统发展概况	2
1.1.1 海军导航卫星系统	3
1.1.2 全球定位系统	4
1.2 GPS 的组成	6
1.2.1 空间卫星星座	6
1.2.2 地面监控系统	9
1.2.3 用户设备	11
1.3 GPS 的特点和用途	13
1.3.1 GPS 的特点	13
1.3.2 GPS 的用途	14
1.3.3 GPS 存在的主要问题	15
1.4 美国的 GPS 限制性政策和导航战	16
1.4.1 美国实施的 GPS 限制性政策和措施	16
1.4.2 美国的导航战	18
1.4.3 美国 GPS 的现代化	19
1.4.4 克服美国限制性政策和措施的主要技术和方法	19
1.5 其他卫星导航定位系统	20
1.5.1 全球导航卫星系统 GLONASS	20
1.5.2 欧洲的 GNSS	22
1.5.3 GEOSTAR 系统	23
第 2 章 GPS 信号和伪码测距原理	26
2.1 GPS 信号的基本结构	26
2.1.1 概述	26
2.1.2 GPS 信号的基本构成	27

2.1.3 GPS 信号的特点	28
2.1.4 GPS 卫星发射的其他信号	29
2.2 GPS 伪随机码及其特性	30
2.2.1 伪随机码的产生及特性	30
2.2.2 C/A 码	34
2.2.3 P 码	36
2.3 GPS 卫星的广播导航电文	37
2.3.1 导航电文的格式	37
2.3.2 导航电文的内容	38
2.4 扩频技术和相关接收	45
2.4.1 扩频技术	46
2.4.2 相关接收	48
2.5 伪码测距原理	50
2.6 GPS 导航接收机工作原理	52
2.6.1 C/A 码和 P 码的捕获	52
2.6.2 码的锁定与导航电文的解码	54
2.6.3 载波的跟踪	56
2.6.4 接收机的通道	57
第 3 章 GPS 卫星位置和速度计算	58
3.1 GPS 导航定位中常用的时间系统	58
3.1.1 时间的有关概念	58
3.1.2 世界时系统	59
3.1.3 原子时系统	62
3.1.4 力学时系统	63
3.1.5 GPS 时间系统	63
3.1.6 GLONASS 时间系统	65
3.2 GPS 导航定位中常用的坐标系	65
3.2.1 地心空间直角坐标系及其等价坐标系	65
3.2.2 卫星测量中的常用坐标系	71
3.2.3 WGS-84 大地坐标系	77
3.3 卫星运动基本理论	77
3.3.1 卫星运动概述	77

3.3.2 卫星运动二体问题	79
3.3.3 地球引力场摄动力及其影响	81
3.3.4 日、月摄动	83
3.3.5 太阳光辐射压摄动	84
3.3.6 GPS 卫星 Y 轴偏差摄动	85
3.3.7 地球潮汐摄动和大气摄动	86
3.4 GPS 广播星历卫星位置和速度的计算	86
3.4.1 卫星位置的计算	87
3.4.2 卫星速度的计算	91
3.5 IGS 的 GPS 精密星历及其应用	94
3.5.1 国际 GPS 服务 (IGS) 概述	94
3.5.2 IGS 精密星历的获取与数据	95
3.5.3 IGS 精密星历在事后 GPS 数据精密处理中的应用	97
第 4 章 GPS 伪距导航定位原理	101
4.1 GPS 定位的基本概念	101
4.1.1 绝对定位与相对定位	101
4.1.2 静态定位与动态定位	103
4.2 伪距导航定位原理	104
4.2.1 GPS 定位的基本观测量与定位模型	104
4.2.2 GPS 伪距定位解算	106
4.2.3 精度估算	108
4.3 GPS 定位的几何精度因子	109
4.3.1 影响 GPS 定位精度的因素	109
4.3.2 几何精度因子	109
4.3.3 最佳星座的选择	111
4.4 伪距测量相对定位	112
4.4.1 相对定位概述	112
4.4.2 直接观测值的线性组合	114
4.4.3 单差观测值相对定位	115
4.4.4 双差观测值相对定位	117
4.4.5 相对定位的分析讨论	118
4.5 GPS 测速原理	120

4.5.1 多普勒频移的测定	120
4.5.2 GPS 单点测速	121
4.5.3 GPS 测速误差	123
4.5.4 GPS 相对测速	123
第 5 章 GPS 定位的主要误差源	126
5.1 概述	126
5.2 电离层延迟误差	126
5.2.1 电离层延迟的产生与特点	126
5.2.2 电离层中电子总量的计算	128
5.2.3 电离层延迟误差改正模型	130
5.2.4 双频观测量组合消除电离层影响	135
5.3 对流层延迟误差	136
5.3.1 对流层延迟误差的产生与特点	136
5.3.2 对流层折射的改正模型	137
5.3.3 气象参数计算	139
5.4 多路径误差	140
5.5 相对论效应	142
5.6 时钟误差	145
5.6.1 频率与时钟误差	145
5.6.2 卫星钟差	147
5.6.3 接收机钟差	147
5.7 卫星星历误差	148
5.8 SA 干扰误差	150
5.9 地球旋转改正	152
5.10 地球潮汐的影响	153
第 6 章 载波相位测量定位技术	158
6.1 载波相位测量原理	158
6.1.1 重建载波	159
6.1.2 载波相位测量原理	160
6.2 载波相位测量定位原理	161
6.2.1 载波相位测量的基本观测量	161

6.2.2	载波相位测量的观测方程	164
6.2.3	载波相位定位解算	166
6.3	载波相位测量相对定位	171
6.3.1	单差相位观测值相对定位	172
6.3.2	双差观测值相对定位	175
6.3.3	三差观测值相对定位	177
6.3.4	相对定位的误差改正	179
6.4	载波观测值的线性组合	181
6.4.1	双频相位的线性组合	181
6.4.2	常用的线性组合	183
6.4.3	伪距与载波相位的组合	186
6.5	整周跳变的探测与修复	189
6.5.1	高次差探测与修复周跳法	190
6.5.2	多项式拟合法	192
6.5.3	星际差探测和修复法	194
6.5.4	电离层残差法	195
6.5.5	利用无周跳卫星观测数据进行周跳的探测和修复	196
6.5.6	伪距与相位组合法	197
6.5.7	根据平差或数据处理后的残差来探测和修复周跳	198
6.6	静态整周模糊度确定方法	199
6.6.1	经典方法——将 N_0 作为待定参数求解	199
6.6.2	三差法	200
6.6.3	“停一走”法	200
6.7	动态整周模糊度确定方法	203
6.7.1	快速模糊度解算法	204
6.7.2	双频 P 码伪距/载波组合法	207
6.7.3	模糊度函数法	210
6.7.4	最小二乘搜索法	212
6.7.5	模糊度协方差法	213
6.7.6	优化的 Cholesky 分解算法	215
6.8	高精度 GPS 动态定位的卡尔曼滤波方法	219
6.8.1	基本滤波模型	219

6.8.2	滤波递推方程	222
6.8.3	周跳的探测与修复	223
第7章	GPS 差分定位技术	227
7.1	位置差分原理	227
7.2	伪距差分原理	228
7.3	载波相位差分原理	231
7.3.1	概述	231
7.3.2	逼近法	232
7.3.3	求差法	232
7.4	扩展伪距差分(广域差分)	233
7.5	广域增强系统	237
7.5.1	基本原理	237
7.5.2	WAAS 信号设计	239
7.5.3	WAAS 测距功能	241
7.5.4	WAAS 的电文	242
7.6	差分定位的数据链	244
7.6.1	地波系统	246
7.6.2	VHF 和 UHF 网络	246
7.6.3	移动卫星通信	247
7.7	差分电文格式	248
7.7.1	概述	248
7.7.2	通用电文格式	248
7.7.3	电文类型、内容与格式	250
第8章	GPS 组合导航定位技术	268
8.1	GPS/INS 组合系统的原理与方法	268
8.1.1	经典组合原理	268
8.1.2	GPS 与 INS 硬件一体化组合	270
8.1.3	GPS 与 SINS 软件组合方式	272
8.2	GPS/INS 组合系统的数据处理	279
8.2.1	问题描述	279
8.2.2	全组合滤波法	280
8.2.3	分布式滤波法	281

8.2.4 GPS/INS 分布式组合滤波器	282
8.3 组合系统的统计质量控制	284
8.3.1 统计质量控制方法概述	285
8.3.2 SINS/GPS 滤波器的质量控制	285
8.3.3 SINS/GPS 滤波器的可靠性分析	290
8.4 INS 解决 GPS 周跳检测与整周模糊度求定	291
8.5 应用 GPS 速度改进惯性平台姿态精度	293
8.5.1 用 GPS 速度辅助提高惯性平台水平姿态精度	294
8.5.2 水平失准误差估计	296
8.6 GPS/GLONASS 组合导航定位方法	297
8.6.1 GLONASS 卫星的广播星历计算	297
8.6.2 GPS/GLONASS 数据融合	301
第 9 章 GPS 在导弹航天器测控领域中的应用	306
9.1 GPS 在导弹测控领域中的应用	306
9.1.1 GPS 外弹道测量	308
9.1.2 多目标测量	337
9.2 GPS 在航天器测控中的应用	345
9.2.1 中低轨道航天器轨道确定	345
9.2.2 GPS 测定航天器的姿态	354
9.2.3 GPS 在空间交会对接中的应用	361
第 10 章 GPS 在测控支持领域中的应用	373
10.1 GPS 定时与测频	373
10.1.1 时间频率统一系统简介	373
10.1.2 GPS 定时与测频	375
10.1.3 GLONASS 及 GPS/GLONASS 兼容时频接收机	377
10.1.4 GPS 定时测频在我国测控系统的应用	378
10.1.5 GPS 时频接收机测量数据的处理	380
10.1.6 GPS 信号在时频领域中的其他应用	381
10.2 GPS 用于航天测量船的定位和测姿	382
10.2.1 GPS 的定位应用	383
10.2.2 GPS 用于船姿船位系统的工作原理	384
10.2.3 展望	390

10.3 GPS 在外测设备精度鉴定中的应用	391
10.3.1 GPS 鉴定外测设备精度的原理及特点	392
10.3.2 GPS 精度鉴定系统	394
10.4 GPS 在电离层和对流层测量中的应用	397
10.4.1 对流层和电离层对 GPS 信号时延的影响	397
10.4.2 基于 GPS 的电离层测量方法	400
10.4.3 基于 GPS 的对流层测量方法	406
10.5 GPS 在靶场大地测量中的应用	411
10.5.1 靶场大地测量的基本任务	411
10.5.2 GPS 布设靶场大地基准网	412
10.5.3 设备点、发射点、目标点、落点的 GPS 大地联测	412
10.5.4 GPS 测定各类设备标校基准	413
10.5.5 坐标系统与转换系数	413
10.5.6 GPS 点的高程	413
参考文献	414

第 1 章 概 论

自 1957 年 10 月第一颗人造地球卫星(以下简称卫星)发射成功,40 多年来,航天技术在通信、资源勘察、气象、导航、遥感、测绘、地球动力、天文和生物等各个科学领域得到极其广泛的应用,对政治、经济、军事以至人类社会生活都产生了广泛而深远的影响,促进了现代科学技术的进步。

当前,信息技术革命不仅推动产业革命,同时也推动军事革命。卫星导航技术是信息技术的重要组成部分,在高新技术战争中起着举足轻重的作用。美国国防部长 2000 财政年度“国防报告”中提出:“美军以信息为基础的军事革命,包括精确制导弹药、全球定位系统、空基和天基传感器的研制与应用。”

卫星导航从开始就与军事应用紧密相连。美国的第一代导航卫星系统——NNSS,就是为美国海军导航研制的;第二代导航卫星系统——GPS 是为美国陆、海、空三军作战研制的,服务于美国的全球战略。在冷战时期,苏联为了与美国争霸,在 1965 年开始研制了与 NNSS 相类似的 CICADA 卫星导航系统;在 20 世纪 70 年代末开始研制类似 GPS 的导航卫星系统——GLONASS,并于 1996 年 1 月由俄罗斯建成,投入使用。

现在,卫星导航技术已经得到广泛的应用,日益显示了卫星导航的巨大优越性和其在经济、军事领域的重大作用。在 1991 年的海湾战争中,GPS 首次应用于军事行动。为此,美国紧急发射了 3 颗 GPS 卫星,与原有 GPS 卫星构成 16 颗 GPS 导航星座,使海湾地区基本实现全天候 24h 覆盖,满足了全天候连续实时导航定位的需要;同时紧急订购和征用了近 20000 台 GPS 接收机,装备全军各部队。在海湾战争中,GPS 实时准确地为地面、空中、海上部

队和导弹发射、制导,提供了导航定位数据,对战争的胜利起到了重要作用。美国前国防部长迪克·切尼在海湾战争后递交国会的报告中,高度评价了 GPS 的作用,“对所有的作战胜利,GPS 发挥了至关重要的作用。”海湾战争以后,GPS 引起了美国政府、国会和国防部的高度重视,把 GPS 作为美军的主要装备之一,随后在所有的飞机、舰船、战车、非直接火力武器系统和平台中加装 GPS 接收机,并把 GPS 作为提高“战斧”巡航导弹和防空区外发射联合武器系统(JSOW)等精确打击武器攻击精度的主要措施。在 1998 年底的“沙漠之狐”、1999 年的“科索沃”战争中,美军大量使用了 GPS 制导的巡航导弹和炸弹。从战区外几十千米、几百千米、甚至上千千米处发射,这些武器都能精确命中目标。命中精度可达 10m,甚至 3m。1999 年 5 月 8 日美国使用“B-2”隐形轰炸机对中国驻南联盟大使馆进行的野蛮轰炸,其所使用的炸弹就是由 GPS 制导的炸弹。这明确警示我们,为了保卫我国社会主义经济建设,保卫祖国领土和主权完整,完成祖国统一大业,我们必须认真研究和掌握卫星导航技术,建立和完善我国的卫星导航系统,形成我国的卫星导航产业,加快我国国防现代化建设的步伐。

1.1 美国卫星导航定位系统发展概况

卫星导航定位系统是以卫星为空间基准点,用户利用接收设备测定至卫星的距离或多普勒频移等观测量来确定其位置和速度的系统。卫星导航定位系统主要由三大部分组成:空间卫星、地面监测网和用户设备。空间由若干个卫星组成导航星座。卫星沿一定的轨道运行,星上除电源、天线外,还有专用导航系统,其中包括导航电文存储器、高稳定频标、双频发射机等。地面监测网连续跟踪观测卫星,计算编制卫星星历和卫星的钟偏差等参数,并将其注入到卫星的存储器。卫星连续发射双频无线电信号和导航电文(包括卫星星历等参数)。用户设备接收卫星信号和电文,由无线电信号测定用户至卫星的距离,或多普勒频移等观测量;根据导航

电文,计算所观测时刻的卫星位置和速度。根据观测量和卫星位置、速度,解算出用户的位置和速度。

1.1.1 海军导航卫星系统

1958 年底,美国海军武器实验室开始建立为美国海军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,简称 NNSS)。该系统的卫星轨道通过地极,故又称为子午(Transit)卫星系统。1964 年 NNSS 建成,供美国军方使用,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、定位精度较高和经济效益好等一系列优点,因此迅速被世界各国所采用,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。

NNSS 包括 6 颗在轨工作卫星。卫星轨道接近圆形,轨道倾角为 90° 左右,轨道高度为 1100km,周期约为 107min,每天卫星运行 13 周~15 周。在每一个运行周期内,地球相对卫星约转 27° 。每颗卫星覆盖半径为 3000km~3500km。对地面某一用户来说,一颗卫星每次通过其上空时,仅有 18min 的跟踪观测弧段。每颗卫星连续发播 400MHz 和 150MHz 两种载波信号,供用户对卫星进行双频多普勒频移观测。在 400MHz 的载波上调制有导航电文,为用户提供卫星位置和时间信息。

用户接收机接收卫星发播的信号,并根据多普勒原理,测定因卫星相对用户接收机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。

NNSS 开创了卫星导航的新时代,在导航技术发展中具有重

要的意义。它实现了全球、全天候导航,显示了卫星导航技术的优越性。但是,由于该系统的“单星、低轨、低频测速”体制的限制,不能满足高动态用户实时导航定位的要求,也不能满足现代军事和民用部门的高精度要求。具体存在以下两个问题。

(1) 单星观测,不能实时定位和连续导航定位。用户每次定位观测只能跟踪观测一颗卫星,需观测 $8\text{min}\sim 10\text{min}$ 才能进行一次定位,而观测一颗卫星后,要等 $0.8\text{h}\sim 1.5\text{h}$ 才能观测另一颗卫星,因此不能连续导航定位。

(2) 低轨、低频、定位精度低。由于卫星轨道高度只有 1100km ,因此受地球引力场模型和大气阻力模型误差的影响大,定轨精度低,即卫星星历误差大。卫星轨道低,星历误差对于定位精度的影响大。载波频率较低,电离层延迟误差大,从而多普勒定位精度较低。即使连续观测 2 天,其定位精度也只能达到 10m 左右。

苏联海军于 1965 年开始建立与 NNSS 相似的卫星导航系统,称为 CICADA。系统由 12 颗宇宙卫星组成卫星星座,轨道高度为 1000km ,运行周期为 105min ,每颗卫星发送 150MHz 和 400MHz 载波信号,导航电文调制在 150MHz 的载波上。

1.1.2 全球定位系统

为了满足军事部门和民用部门对连续实时、高动态、高精度导航定位的迫切需要,美国于 1967 年着手研究新一代卫星导航系统。经过研究试验,于 1973 年 12 月,美国国防部正式批准陆海空三军共同研制称为授时与测距导航/全球定位系统(Navigation System Timing and Ranging/Global Positioning System)的 NAVSTAR/GPS 卫星定位系统,简称为全球定位系统(GPS)。

经 20 多年的研究和试验,投资逾 200 亿美元,GPS 于 1993 年 12 月具有了初始运行能力(IOC),1995 年 4 月具有全运行能力(FOC)。这是美国继阿波罗登月、航天飞机之后的第三大空间工程。第一阶段(1973 年—1978 年)进行方案论证、理论研究和总体

设计。第二阶段(1978年—1988年)进行工程研制,发射了GPS试验型卫星,检验了GPS的基本性能。1978年2月22日,第一颗GPS试验卫星(称为BLOCK I)发射成功。第三阶段(1989年—1993年)进行实际组网,投入运行,在此阶段发射的GPS卫星称为BLOCK II和BLOCK II A。在空间构成24颗GPS卫星星座,分布在6个轨道面上,轨道倾角为 55° ,轨道高为20200km。在地球上和近地空间可同时观测4颗以上GPS卫星,进行实时导航定位。1997年开始发射GPS BLOCK II R卫星。表1-1列出了这3种GPS卫星的发射时间和性能。

表 1-1 GPS 卫星及主要性能

项 目	第 1 种	第 2 种		第 3 种
	Block I	Block II	Block II A	Block II R
序号	1~11	13~21	22~40	41~62
卫星数	11	9	19	22
发射时间	1978年— 1985年	1989年— 1990年	1990年— 1997年	1997年
用途	试验	正式工作	正式工作	改进GPS系统
设计寿命/年	5	7.3	7.3	7.8
质量/kg	774	845	845	1075
时标	1台铯钟和 2台铷钟	2台铯钟和 2台铷钟	2台铯钟和 2台铷钟	3台铷钟
SA能力	无	有	有	有
AS能力	无	有	有	有
自主运行/天	14	14	180	180
卫星通信能力	无	无	有	有
星间通信能力	无	无	无	有
每天注入次数	3	1	<1	<1
注: 1 SA——选择可用性干扰; 2 AS——反电子欺骗				