

航空航天工程类专业规划教材

卫星导航原理与应用

WEIXING DAOHANG YUANLI YU YINGYONG

刘海颖 王惠南 陈志明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013062017

TN967.1
26

航空航天工程类专业规划教材

卫星导航原理与应用

Principles and Applications of Satellite Navigation

刘海颖 王惠南 陈志明 编著



TN967.1
26

国防工业出版社

·北京·



北航

C1669926

内 容 简 介

本书阐述了卫星导航定位及其应用的基本原理,全书共由10章构成。第1章介绍了全球导航卫星系统(GNSS,包括GPS、GLONASS、Galileo、北斗以及增强系统)的发展和构成;第2章介绍了时空参考系以及卫星轨道基础;第3章介绍了GNSS卫星信号;第4章讲解了GNSS接收机;第5章、第6章较详细地讲解了GNSS定位解算;第7章讲解了GNSS的速度、时间、姿态测量方法;第8章着重阐述了GNSS/INS组合导航技术;第9章深入讲解了GNSS完好性监测技术;第10章介绍了GNSS在一些典型领域的应用。

本书较为全面系统地介绍了卫星导航定位技术,深入浅出地阐述了GNSS的原理及其应用,并充分反映了近年来卫星导航领域的新发展。

本书可以作为高等院校航空、航天、航海、民航、交通、信息、导航、测绘等相关专业的教学用书,也可供从事导航学、测量学、信息学等领域的专业人员及科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航原理与应用 / 刘海颖,王惠南,陈志明编著.
—北京:国防工业出版社,2013.8
航空航天工程类专业规划教材
ISBN 978-7-118-08691-1

I. ①卫... II. ①刘... ②王... ③陈... III. ①卫星导航—高等学校—教材 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第064108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100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 389千字
2013年8月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 33.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

卫星导航定位系统是一种全新的天基无线电导航系统,它不仅具有全天候、全球性、连续性的精密三维定位能力,而且能够实时地对运动载体进行速度、姿态测定以及进行精密授时。自从 20 世纪 90 年代中期美国的全球定位系统(GPS)正式投入使用以来,卫星导航定位技术得到了广泛的应用,近十年来又进一步取得了显著发展。美国的 GPS 系统正在开展现代化改造;俄罗斯的 GLONASS 系统也正在全面复兴和现代化改进;欧洲的 Galileo 系统正在建设;我国的“北斗一代”卫星导航系统已经投入使用,“北斗二代”正在建设当中;日本和印度也分别提出建设自己的 QZSS 和 GAGAN 卫星导航系统。

未来的卫星导航定位将出现多系统共存的局面,在本书中统一称为全球导航卫星系统(GNSS)。GNSS 的应用已经从最初的军事领域,扩展到专业领域,进而深入发展到大众领域。目前 GNSS 的应用几乎无处不在,覆盖航空与航天导航、海上与陆地导航、测绘和测量、大众消费等领域,已经广泛渗透到国防建设、国民经济发展的各个领域,可以说,GNSS 的应用只受到人们想象力的限制。

从全球范围来看,目前的 GNSS 市场主要还是由 GPS 及其局域、广域增强系统构成,然而随着 GLONASS 系统的复兴、Galileo 和中国北斗系统的部署,以及日本 QZSS 和印度 GAGAN 系统的建设等,未来 GNSS 的应用将出现更广阔的前景。尽管其他 GNSS 系统的建设完成并正式投入使用还需要一定的时间,但给整个 GNSS 发展带来了巨大潜力。

本书是在教育部学位管理与研究生教育司推荐的研究生教学用书《GPS 原理与应用》(王惠南著,科学出版社于 2003 年 8 月出版)基础上发展和编写的。《GPS 导航原理与应用》经过这些年来的教学使用,获得了广泛好评,已经进行了多次的重印发行。鉴于该教材发行以来 GNSS 系统已经经历了显著的发展,为了进一步适应卫星导航定位技术的发展需求,并更好地满足读者的使用需求,我们进行了新教材的重新编写,包括对已有内容的调整、删减和修订,同时增加大量新的内容,以期为读者提供一部较好的教学和参考书。

卫星导航定位是一门新兴的交叉学科,目前正处于迅速发展,其理论正在不断发展和完善,其应用也在不断深化和拓展。由于作者水平有限,加之成书时间紧促,书中难免有错误或疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者
南京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪论	1	2.2.2 岁差和章动、协议 天球坐标系	19
1.1 卫星导航技术的发展	1	2.2.3 岁差矩阵与章动 矩阵	20
1.2 GPS 全球定位系统	3	2.3 地球坐标系	21
1.2.1 GPS 空间部分	3	2.3.1 地球坐标系定义	21
1.2.2 GPS 地面部分	5	2.3.2 协议地球坐标系、 极移矩阵	22
1.2.3 GPS 用户部分	6	2.3.3 WGS-84 与 PZ-90 坐标系	23
1.2.4 GPS 限制性政策	6	2.3.4 站心坐标系	23
1.3 GLONASS 全球定位系统	7	2.3.5 坐标系之间的 转换关系	24
1.3.1 GLONASS 空间部分	7	2.4 时间参考系统	25
1.3.2 GLONASS 地面部分	9	2.4.1 恒星时(ST)、 世界时(UT)	25
1.3.3 GLONASS 用户部分	9	2.4.2 原子时(AT)、 动力学时(DT)	26
1.4 Galileo 卫星导航定位系统	10	2.4.3 协调世界时、GPS 时、 GLONASS 时、 Galileo 时	27
1.4.1 Galileo 空间部分	10	2.4.4 儒略世纪、儒略年、 儒略日	28
1.4.2 Galileo 地面部分	10	2.4.5 时间参考系的 转换关系	28
1.4.3 Galileo 用户部分	11	2.5 卫星轨道基础	29
1.5 北斗卫星导航定位系统	11	2.5.1 卫星无摄运动规律	29
1.5.1 发展计划	11	2.5.2 卫星无摄运动 轨道描述	30
1.5.2 “北斗一代”卫星导航 系统	12	2.5.3 卫星瞬时位置 与速度	31
1.5.3 “北斗二代”卫星导航 系统	13		
1.6 卫星导航增强系统	13		
1.6.1 卫星导航增强措施	13		
1.6.2 广域增强系统	14		
1.6.3 局域增强系统	15		
第 2 章 GNSS 时空参考系统	17		
2.1 时空参考系简介	17		
2.2 天球坐标系	18		
2.2.1 天球坐标系定义	18		

2.5.4	卫星受摄运动 与卫星星历	33	3.6.1	北斗卫星及其信号 特点	62
2.5.5	由预报星历计算 卫星位置	35	3.6.2	“北斗一代”卫星 信号结构	63
第3章 GNSS 卫星信号		37	3.6.3	“北斗一代”卫星 扩频码结构	63
3.1	GNSS 信号基础	37	3.6.4	“北斗一代”卫星 导航电文	64
3.1.1	GNSS 信号简介	37	3.6.5	“北斗二代”卫星 信号	65
3.1.2	伪随机码及其特性	37	第4章 GNSS 信号接收机		67
3.1.3	调制、解调、信号 复用	40	4.1	GNSS 接收机基础	67
3.1.4	扩频、相关接收、 伪码测距	42	4.1.1	GNSS 接收机简介	67
3.2	GPS 卫星信号	44	4.1.2	GNSS 接收机类型	67
3.2.1	GPS 信号结构	44	4.1.3	GNSS 接收机构成	68
3.2.2	C/A 码与 P(Y) 码	45	4.2	GNSS 软件接收机	69
3.2.3	GPS 导航电文	48	4.2.1	软件无线电概念	69
3.2.4	GPS 信号功率电平	50	4.2.2	GNSS 软件接收机 的特点	70
3.3	GPS 现代化的信号	51	4.2.3	GNSS 软件接收机 的架构	71
3.3.1	GPS 现代化信号 简介	51	4.3	GNSS 天线与射频前端	72
3.3.2	BOC 调制技术	52	4.3.1	GNSS 信号接收	72
3.3.3	L2C 信号	53	4.3.2	GNSS 接收机天线	73
3.3.4	L5C 信号	54	4.3.3	GNSS 接收机射频 前端	75
3.3.5	M 码、L1C 信号	54	4.3.4	射频前端专用集成 电路	77
3.3.6	GPS 信号小结	55	4.4	GNSS 接收机信号处理	78
3.4	GLONASS 卫星信号	55	4.4.1	GNSS 信号捕获	78
3.4.1	GLONASS 信号结构	55	4.4.2	GNSS 信号跟踪	81
3.4.2	GLONASS 信号频率	56	4.4.3	GNSS 信号解码	84
3.4.3	GLONASS 信号码 特性	57	4.4.4	GNSS 导航解算	86
3.4.4	GLONASS 导航电文	57	4.5	多模式兼容 GNSS 接收机	86
3.5	Galileo 卫星信号	58	4.5.1	多模卫星导航技术	86
3.5.1	Galileo 频率规划	58	4.5.2	多模接收机射频 前端	86
3.5.2	Galileo 信号设计	59			
3.5.3	Galileo 扩频码	60			
3.5.4	Galileo 导航电文	61			
3.6	北斗卫星信号	62			

4.5.3	GPS/GLONASS 组合接收机	88	定位	110
4.5.4	GPS/Galileo 多模 接收机	88	6.2.2 测相伪距静态绝对 定位	112
4.5.5	GPS/北斗多模 接收机	89	6.2.3 定位精度的几何 评价	113
第5章 GNSS 观测方程与误差分析		91	6.2.4 几何分布对定位 精度影响	115
5.1	GNSS 的基本观测量	91	6.3 GNSS 静态相对定位	115
5.1.1	导航定位观测量	91	6.3.1 基本观测量与 差分组合	115
5.1.2	测码伪距观测量	91	6.3.2 基于单差模型 的相对定位	117
5.1.3	测相伪距观测量	92	6.3.3 基于双差模型 的相对定位	119
5.1.4	多普勒频移观测量	93	6.3.4 基于三差模型 的相对定位	122
5.2	GNSS 的观测方程	94	6.3.5 相对观测量组 合的权矩阵	123
5.2.1	观测方程中时间 概念	94	6.4 GNSS 动态绝对定位	125
5.2.2	测码伪距观测方程	94	6.4.1 最小二乘法的 动态绝对定位	125
5.2.3	载波相位整周 模糊度	95	6.4.2 卡尔曼滤波法的 动态绝对定位	126
5.2.4	测相伪距观测方程	96	6.5 GNSS 动态相对定位	128
5.3	观测方程的线性化	97	6.5.1 位置差分相对 动态定位	128
5.3.1	测码伪距观测方程 线性化	97	6.5.2 测码伪距动态 相对定位	129
5.3.2	测相伪距观测方程 线性化	98	6.5.3 测相伪距动态 相对定位	130
5.4	GNSS 的误差分析	99	6.5.4 载波相位求差 法动态定位	131
5.4.1	GNSS 误差简介	99	第7章 GNSS 速度、时间及姿态测量	
5.4.2	GNSS 卫星的误差	99	133	
5.4.3	信号传播的误差	100	7.1 基于 GNSS 的速度测量	133
5.4.4	接收设备的误差	104	7.1.1 平均速度法速度 测量	133
5.4.5	其他相关的误差	106	7.1.2 多普勒频移法速度	
第6章 GNSS 静态定位与动态定位		108		
6.1	GNSS 定位基本概念	108		
6.1.1	GNSS 定位原理	108		
6.1.2	GNSS 定位分类	109		
6.2	GNSS 静态绝对定位	110		
6.2.1	测码伪距静态绝对			

测量	133
7.2 基于 GNSS 的时间测量	134
7.2.1 单站法时间测量	134
7.2.2 共视法时间测量	135
7.3 基于 GNSS 的姿态测量	136
7.3.1 GNSS 姿态测量	
原理	136
7.3.2 整周单差与基线	
向量	137
7.3.3 载体的三轴姿态	
确定	138
7.4 整周模糊度的确定方法	139
7.4.1 整周模糊度确定	
简介	139
7.4.2 待定系数法确定	
整周模糊度	141
7.4.3 交换天线法确定	
整周模糊度	141
7.4.4 FARA 法确定整	
周模糊度	143
7.4.5 LAMBDA 法确定	
整周模糊度	144
第 8 章 GNSS/INS 组合导航系统	147
8.1 卡尔曼滤波技术	147
8.1.1 组合导航技术简介	147
8.1.2 卡尔曼滤波与	
最优估计	148
8.1.3 离散系统卡尔	
曼滤波方程	150
8.1.4 计算转移矩阵	
与噪声方差阵	153
8.1.5 有色噪声条件	
下卡尔曼滤波	154
8.2 卡尔曼滤波的组合方法	155
8.2.1 组合方法简介	
与状态选取	155
8.2.2 GNSS/INS 硬件	

一体化组合	156
8.2.3 GNSS/INS 软件	
组合方法	157
8.2.4 GNSS/INS 松散	
与深度组合	161
8.3 GNSS/INS 松散组合模式	162
8.3.1 GNSS/INS 组合	
系统状态方程	162
8.3.2 GNSS/INS 组合	
系统量测方程	170
8.3.3 状态方程与量测	
方程离散化	172
8.3.4 GNSS/INS 组合	
卡尔曼滤波器	172
8.4 GNSS/INS 深度组合模式	175
8.4.1 GNSS/INS 的伪距、	
伪距率组合	175
8.4.2 INS 速度辅助 GNSS	
接收机环路	178
8.4.3 GNSS/INS 组合系统	
的综合仿真	185
第 9 章 GNSS 完好性监测	192
9.1 GNSS 的完好性监测概念	192
9.1.1 GNSS 的性能	
评价简介	192
9.1.2 GNSS 完好性	
监测技术	193
9.1.3 民航对 GNSS 性	
能要求	194
9.2 GNSS 接收机自主完好	
性监测	196
9.2.1 RAIM 技术概念	
及发展	196
9.2.2 最小二乘残差	
的 RAIM 方法	196
9.2.3 奇偶空间矢量	
的 RAIM 方法	199

9.3	辅助信息的接收机完好性监测	201	10.2	GNSS 在航空、航天导航中的应用	212
9.3.1	基于辅助信息的完好性监测简介	201	10.2.1	空中交通管制	212
9.3.2	GNSS/INS 组合的残差监测法	202	10.2.2	精密进近着陆	215
9.3.3	GNSS/INS 组合的 AIME 方法	203	10.2.3	弹道轨迹测量	219
9.3.4	GNSS/INS 组合的 MSS 方法	204	10.2.4	航天器轨道测定	222
9.4	GNSS 的广域增强完好性监测	206	10.3	GNSS 在海上、陆地导航中的应用	224
9.4.1	广域增强完好性监测简介	206	10.3.1	海上舰船导航	224
9.4.2	广域增强完好性监测体系	206	10.3.2	陆地车辆导航	225
9.4.3	UDRE 验证处理	208	10.3.3	智能交通系统	226
9.4.4	GIVE 验证处理	209	10.3.4	GNSS/GIS 组合	227
9.4.5	定位域验证处理	209	10.4	GNSS 在测绘、测量中的应用	229
9.5	GNSS 的局域增强完好性监测	210	10.4.1	陆地与航空测绘	229
9.5.1	局域增强完好性监测简介	210	10.4.2	大地测量控制网	231
9.5.2	局域增强完好性监测体系	210	10.4.3	工程测量与形变监测	232
10	GNSS 的市场应用	212	10.4.4	地球地壳运动监测	234
10.1	GNSS 的市场应用概述	212	10.5	GNSS 在大众消费市场的应用	236
			10.5.1	消费电子市场	236
			10.5.2	高灵敏度 GNSS	237
			10.5.3	创造性应用领域	238
			参考文献	240	

第1章 绪论

1.1 卫星导航技术的发展

自从1957年10月苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星,人类便跨入了空间科学技术迅速发展的崭新时代,利用卫星进行导航和定位的研究引起了世界各国的高度重视。卫星导航系统是一种具有全能性(陆地、海洋、航空及航天)、全天候、连续性和实时性的无线电导航定位系统,它能提供高精度的导航、定位和授时信息,其应用几乎涉及到国民经济和社会发展的各个领域,已成为全球发展最快的信息产业之一。

卫星导航诞生于20世纪60年代初。1958年底,美国海军武器实验室着手研制为美国军用舰艇导航服务的卫星导航系统“Navy Navigation Satellite System”,即海军卫星导航系统(NNSS)。在该系统中,所有卫星轨道都通过地球的南北两极,卫星的星下点轨迹与地球的子午圈重合,故又称为“子午仪(Transit)卫星导航系统”。1964年1月子午仪卫星导航系统建成,成功应用于北极星核潜艇的导航定位,并逐步应用于其他各种舰艇的导航定位。1967年7月,美国政府宣布“子午仪卫星导航系统”的部分导航电文解密,供民间商业应用,为远洋船舶导航和海上定位服务,随着对子午仪卫星导航系统技术的进一步改善,提高了卫星轨道测定的精度,改善了用户接收机性能,其应用范围越来越广。同期苏联提出了圣卡达卫星导航系统,该系统由4颗位于高度1000km的圆轨道上的卫星组成,于1967年发射了第一颗圣卡达卫星,并于1979年交付使用。

子午仪和圣卡达系统属于第一代卫星导航系统。虽然第一代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,但是仍然存在明显的缺陷。如子午仪系统由6颗卫星组成导航网,卫星的轨道较低,为离地面约1080km的圆形极轨,每条轨道上只有1颗卫星,运行周期为107min。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,第一代卫星导航系统定位频度很低(约30min~110min),并且每一次定位需要10min~15min用于接收机处理和位置估计。由于观测解算导航参数的时间长,因此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(如飞机、导弹等)的高精度导航要求。

20世纪60年代中期,鉴于第一代卫星导航系统的成功及其存在的缺陷,促使了更先进的卫星导航系统研制,以提高导航定位的性能。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。

在此两个方案的基础上,1973年美国国防部确定了第二代全球卫星导航系统(GPS)的体制与研制计划。与此同时,苏联也设计研制了GLONASS的卫星导航定位系统。第二代卫星导航系统与第一代相比有着明显的区别:卫星轨道更高,GPS卫星的轨道高度约为20000km,GLONASS卫星的轨道高度约为19100km;卫星数目更多,GPS星座有24颗工作卫星,GLONASS星座有21颗工作卫星;工作频率更高,GPS和GLONASS均工作在L频段;定位原理为基于到达时间(TOA)测量的三球交会原理。由于这些特性,第二代卫星导航系统能够提供连续的高精度导航、定位、测速和授时能力。尽管GLONASS在设计之初就是为了与GPS抗衡,而事实上由于卫星寿命和其他方面的原因,俄罗斯未能维持始终布满整个卫星星座。因此,真正得到广泛应用的是GPS系统。

为了打破GPS的垄断局面,欧洲于1999年开始了欧洲全球导航卫星系统(GNSS)计划。欧洲的GNSS计划分为两个阶段,第一阶段是建立与美国GPS和俄罗斯GLONASS兼容的欧洲第一代全球卫星导航系统(GNSS-1)。GNSS-1利用已经建成的GPS系统,在欧洲建立了30个地面站和4个主控中心,通过增强卫星服务的完整性和提高定位的精度来加强GPS或GLONASS系统,因此也称为欧洲静止轨道导航重叠服务(EGNOS)。GNSS-1为欧洲提供了早期的利益,但是由于依赖于GPS或GLONASS,还不能成为一个独立的全球导航系统。第二阶段是建立独立的欧洲第二代的全球卫星导航系统(GNSS-2),即伽利略(Galileo)计划,该计划于2002年3月正式启动,其总体战略目标是建立一个高效、经济、民用的全球卫星导航定位系统,在性能上优于美国的GPS系统,使其具备欧洲乃至世界交通运输业可以信赖的高度安全性,并确保未来的系统安全由欧洲控制管理。尽管Galileo在初期声称是“纯民用”的系统,但是其军用目的不言而喻。

为了加强GPS对美军现代化战争的支撑作用并巩固它在全球民用导航领域中的领导地位,美国从1999年开始提出了GPS现代化计划,从卫星星座、信号体制、星上抗干扰、军民信号分离等角度,对GPS系统进行改进。特别是在信号体制方面,GPS做了很大程度的改进,包括增加新的军码(M码)和新的民用信号L2C和L5C。2004年,美国和欧盟就“推进GPS和Galileo系统及相关应用”达成共识,计划将在L1频率增加新的互操作信号L1C,并定义BOC(1,1)为GPS L1C和Galileo L1OS的共同基线。2007年7月,美国和欧盟发表联合声明将MBOC确定为L1C和Galileo L1OS的共同公共调制方式,并将在未来的系统GPS III中采用。

我国卫星导航建设起步较晚,20世纪80年代开始的第一代卫星导航定位系统选用了地球静止轨道(GEO)卫星为导航星座。我国先后在2000年10月、2000年12月和2003年5月发射了3颗“北斗”静止轨道试验导航卫星,组成了“北斗”区域导航系统,又称为“北斗一代”卫星导航系统。该系统具备在中国及其周边地区范围内的定位、授时、报文和GPS广域差分功能。随后建设了“北斗二代”卫星导航系统(又称Compass),并于2007年2月发射了第四颗北斗导航试验卫星。“北斗二代”增加了以中圆轨道(MEO)卫星为星座,导航频率为L频段的卫星无线电导航业务(RNSS),实现了第一代系统向第二代系统的平稳过渡。将RDSS和RNSS两种业务及工作体制融为一体,同导航、通信、识别集成一体化迈进。

GPS、GLONASS、Galileo以及北斗导航系统是目前主要的四个卫星导航系统,其主要特点如表1-1所列。其中“北斗一代”属于区域导航系统,“北斗二代”、GPS、GLONASS、Galileo为全球导航系统,为了方便起见,在本书中将以上卫星导航系统统一称为全球导航卫星系统

(GNSS)。同时,随着卫星导航技术的发展,也出现了各种 GNSS 的增强系统,下面将对主要的 GNSS 系统以及增强系统进行介绍。

表 1-1 典型 GNSS 系统的主要特点对比

参数		GPS	GLONASS	Galileo	北斗一代	北斗二代
参考系		WGS-84	PZ90	GTRF	BJZ54	CGS2000
时间系统		UTC	UTC	GST	BDT	BDT
在轨卫星数		24 + 3	24 + 3	30	3 + 1	30 + 5
轨道平面数		6(间隔 60°)	3(间隔 120°)	3(间隔 120°)		GEO + MEO + IGSO
轨道倾角		55°	64.8°	56°	GEO	55° + 同步
轨道高度		20230km	19390km	23616km	35786km	35786km、21500km
复用方式		CDMA	FDMA	CDMA	CDMA	CDMA
定位精度	普通	100m	50m	10m	水平 20m 高程 10m	10m
	特殊	10m	16m	1m		
业务类型		导航定位、授时、载波相位	导航定位、授时	导航定位、授时、通信、搜索救援	导航定位、授时、短报文通信	导航定位、测速、授时、通信

1.2 GPS 全球定位系统

1.2.1 GPS 空间部分

1. GPS 发展阶段

GPS 发展计划分为三个阶段实施。

第一阶段为原理方案可行性验证阶段。从 1978 年 2 月第一颗试验卫星发射成功,到 1987 年共发射了 11 颗试验卫星,试验表明 GPS 定位精度远远优于设计标准,这些试验卫星统称为 Block I 卫星。

第二阶段为系统的正式工作阶段。从 1989 年 2 月发射第一颗工作卫星,到 1994 年 3 月共成功发射了 24 颗卫星,建成了实用的 GPS 星座,宣告了 GPS 系统进入了工程实用阶段,今后根据计划更换实效的卫星。24 颗卫星分为 9 颗 Block II 卫星和 15 颗 Block II A 卫星,Block II 卫星存储星历为 14 天,Block II A 增强了军事应用功能,能存储 180 天的导航电文,确保特殊情况下的使用。

第三阶段为 GPS 系统的改进阶段。美国 GPS 系统始终采取部署一代,改进一代,研发一代的方针,每代间隔大约为 10 年。1987 年早在 GPS Block II 和 IIA 尚未发射时,改进型 Block II R 卫星的研制已启动。从 1997 年首颗发射,到 2004 年 11 月成功发射了 12 颗。第三阶段与第二阶段相比,提高了导航定位精度,解除了对民用的限制。

第四阶段为 GPS 现代化阶段:美国于 1999 年开始了 GPS 现代化计划,在 Block II R 的基础上发射新一代的 Block II R - M 卫星,增加新的军用信号 L1M 和 L2M 以及新的民用信号 L2C;在此基础上增加 L5C 信号,研制并发射 Block II F 卫星;在 Block II F 的基础上,于 2008

年开始了下一代的 Block III 卫星研制和发射。

截止到 2009 年 8 月, GPS 系统星座的在轨卫星为 32 颗, 其中 Block II A 卫星 12 颗, Block II R 卫星 12 颗, Block II R - M 卫星 8 颗。GPS 星座卫星的更新与星座卫星数量的增加, 有效地提高了导航服务的性能。GPS 卫星发射情况参如表 1-2 所列。

表 1-2 GPS 卫星发射情况

发展阶段	卫星类型	卫星数/颗	发射时间	用途
第一阶段	Block I	11	1978 年 ~ 1984 年	试验性
第二阶段	Block II, Block II A	24	1989 年 ~ 1994 年	正式工作
第三阶段	Block II R	12		改进 GPS 系统
第四阶段	Block IIR - M, IIF, III	>20	1999 年 ~ —	GPS 现代化

2. GPS 星座及卫星

正式工作的 GPS 空间星座构成: 24 颗卫星部署在 6 个轨道平面中, 每个轨道平面升交点的赤经相隔 60° , 轨道平面相对地球赤道面的倾角为 55° , 每根轨道上均匀分布 4 颗卫星, 相邻轨道之间的卫星要彼此叉开 30° , 以保证全球均匀覆盖的要求(图 1-1)。GPS 卫星轨道平均高度约为 20200km, 运行周期为 11h58min。因此, 地球上同一地点的 GPS 接收机的上空, 每天出现的 GPS 卫星分布图形相同, 只是每天提前约 4min。同时, 位于地平线以上的卫星数目, 随时间和地点的不同而相异, 最少亦有 4 颗, 最多时可达 11 颗。

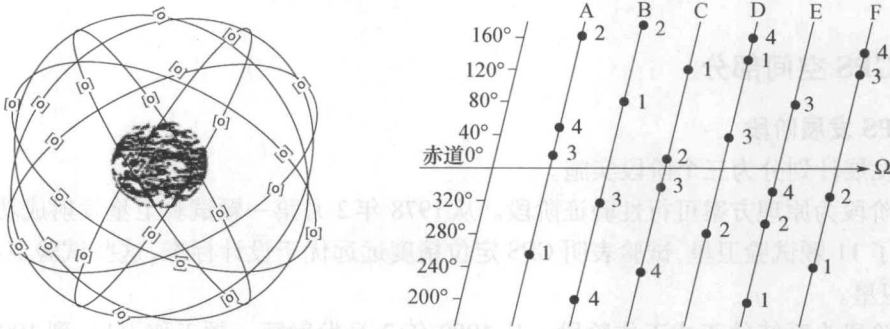


图 1-1 GPS 卫星星座及其平面投影

GPS 卫星的主要作用是接收和存储导航电文, 生成并发送用于导航定位的信号, 接收地面指令并执行相关操作。卫星本体由结构、电源、热控、通信、姿态控制及轨道控制等各个分系统组成, 以保证卫星正常运行, 主要载荷是导航信号生成与发射设备、高精度原子钟。

如 Block II 卫星主体呈柱形, 采用铝蜂巢结构, 柱形直径约 1.5m。卫星重约 774kg, 星体两侧装有两块双叶向日定向太阳能帆板, 全长 5.33m, 接受日光面积为 7.2m^2 , 给 3 组 15AH 镉镍蓄电池充电, 以保证卫星正常工作用电(图 1-2)。星体底部装有多波束定向天线, 发射 L1 和 L2 波段的信号, 其波束方向图能覆盖约半个地球。高精度铯原子钟(稳定度为 $10^{-13} \sim 10^{-14}$)具有抗辐射性能, 它发射标准频率信号, 为 GPS 定位提供高精度的时间标准。典型的 GPS 卫星外形如图 1-2 所示。

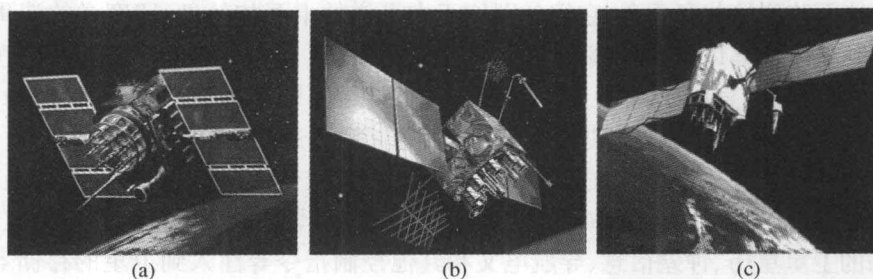


图 1-2 典型的 GPS 卫星

(a) Block II 卫星; (b) Block II R-M 卫星; (c) Block II F 卫星。

1.2.2 GPS 地面部分

GPS 的地面监控部分由 3 部分组成:1 个主控站,3 个注入站和 5 个监测站,分布于地球的 5 个地点,如图 1-3 所示。



图 1-3 GPS 地面监控站的分布

主控站又称联合空间执行中心(CSOC),它位于美国科罗拉多州普林斯附近的佛肯空军基地。它的任务是:①采集数据,推算编制导航电文。主控站的大型电子计算机采集本站和 5 个监测站的所有观测资料,其主要内容为监测站所测到的伪距和积分多普勒观测值、气象参数、卫星时钟、卫星工作状态参数、各监测站工作状态参数。根据搜集的全部数据,推算各卫星的星历、卫星钟差改正数、状态数据以及大气改正数,并按一定的格式编辑成导航电文,传送到 3 个注入站。②给定全球定位系统时间基准。GPS 的监测站和各个卫星上都有自己的原子钟,它们与主控站的原子钟并不同步,全球定位系统中以主控站的原子钟为基准,测出其他星钟和监测站站钟对于基准钟的钟差,并将这些钟差信息编辑到导航电文中,传送到注入站,转发至各卫星。③主控站负责协调和管理所有地面监测站和注入站系统,诊断所有地面支撑系统和天空卫星的健康状况,并加以编码向用户指示,使得整个系统正常工作。④调整卫星运动状态,启动备用卫星。根据观测到的卫星轨道参数以及卫星姿态参数,当发生偏离时,注入站发出卫星运动修正指令,使之沿预定轨道和正确姿态运行;当出现失常卫星时,主控站启用备份卫星取代失效卫星,以保证整个 GPS 系统的正常工作。

GPS 的地面监测站共有 5 个,它们分别位于太平洋的卡瓦加兰岛、印度洋的迭哥伽西亚、南大西洋的阿松森群岛以及夏威夷和主控站所在地佛肯。监测站装有双频 GPS 接收机和高精度铯钟,在主控站的直接控制下,自动对卫星进行持续不断的跟踪测量,并将自动采集的伪距观测量、气象数据和时间标准等进行处理,然后存储和传送到主控站。

GPS 的注入站共有 3 个,与前述三大洋的卡瓦伽兰、迭哥伽西亚、阿松森群岛上的监控站并置,注入站主要装有 1 台直径 3.6m 的天线,1 台 C 波段发射机和 1 台计算机。注入站将主控站传送来的卫星星历、钟差信息、导航电文和其他控制指令等注入到卫星的存储器中,使卫星的广播信号获得更高的精度,满足用户的需要。

1.2.3 GPS 用户部分

GPS 的空间星座部分和地面监控部分是用户应用该系统进行导航定位的基础,而用户只有使用 GPS 接收机才能实现其定位、导航的目的。根据 GPS 用户的不同需求,已经研制出多种类型的接收机,从最简单的单通道便携式接收机到性能完善的多通道接收机。不同类型和不同结构的接收机适应于不同的精度要求、不同的载体运动特性和不同的抗干扰环境。一次定位的时间从几秒钟至几分钟不等,这取决于接收设备的结构完善程度。

导航型 GPS 接收机可为飞机、导弹、舰艇、战车以及野外作战人员提供导航和定位服务。工程测量工作的 GPS 接收机可被广泛地应用于交通、大地测量、勘探和地球物理等领域。近年来出现了阵列式天线(如十字形、三角形或四方形)的 GPS 接收机,不仅能提供精确位置信息,还能确定运动载体的姿态角。星载接收机可以为低空侦察卫星定位,例如法国的 Spot 卫星就是利用星载 GPS 接收机来确定遥感图像的精确位置的。

尽管各种类型的接收机结构复杂程度不同,但都必须完成下列功能:选择卫星、捕获信号、跟踪和测量导航信号、校正传播效应、计算导航解、显示及传输定位信息。其基本组成从功能看,主要由天线单元(有源或者无源,目前大部分的 GPS 接收机天线是有源的)、射频单元、基带处理单元和电源单元组成,其结构如图 1-4 所示。

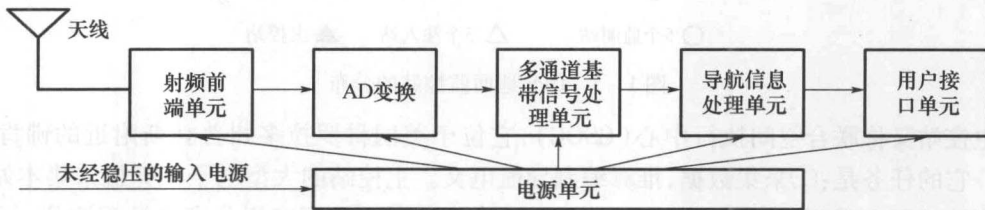


图 1-4 GPS 接收机基本构成

1.2.4 GPS 限制性政策

美国发展 GPS 系统的初衷是为美国的国防现代化服务的,故为了保障美国的安全和自身的利益,它必然会采取措施,限制非经美国特许的用户利用 GPS 定位的高精度。一方面,在系统设计方面采取许多保密性技术;另一方面,在系统运行中还采取了或可能采取其他方法,来限制 GPS 非特许用户获得高精度的测量。这些限制性政策主要包含三个方面:

(1) 两种服务。在 GPS 设计中计划提供两种服务,一种为标准定位服务 SPS;另一种为精密定位服务 PPS。前者利用粗测距码(C/A 码)定位,其精度约为 100m,其服务对象为民间普通用户。后者利用精测距码(P 码)定位,其精度可达到 10m,其服务对象为美国军方或美国盟

国及得到特许的民间用户。

(2) 实施选择可用性(SA)政策。在 GPS 计划试验阶段,利用粗码(C/A 码)定位的精度远远高于设计精度,甚至可达到 14m。于是美国政府采取了 SA 政策,人为地将误差引入卫星时钟和卫星星历数据中,故意降低标准定位(SPS)的定位精度,以防止未经特许的用户将 GPS 用于军事目的。美国政府已宣布,自 2000 年 5 月 1 日子夜开始,取消 SA 政策,使民用 C/A 码的定位精度大大提高。

(3) 精测距码(P 码)加密措施。P 码的加密措施,也称为“反电子欺骗”(A-S)措施。在某些特殊情况下,如战时或泄密的情况下,如果有人知道了特许用户接收机所接受卫星的频率和相位,从而发射适当频率的干扰信号,这一欺骗电子信号可诱使特许用户接收机错锁信号,产生错误的定位导航信息。美国政府为了防止这种电子欺骗采取了 A-S 措施,这是一种必要时对 P 码进一步加密的措施。

对于美国的限制性政策,世界各国的非特许用户都极其关注。为了摆脱或减弱上述限制性政策的影响,广大用户进行了积极的研究、开发和实验,取得了有效的结果。其中,对美方限制性政策的反措施主要包含以下四个方面:

(1) 独立精密地测定 GPS 卫星轨道。1986 年以来,包括美国民用部门在内的世界各国(欧洲诸国、加拿大、澳大利亚等)积极实施区域性或全球性合作,在欧、亚、非、美、大洋洲等五大洲布设 GPS 卫星跟踪站,并将跟踪站联网,这一独立的跟踪网称为国际合作 GPS 卫星跟踪网。该跟踪网对 GPS 卫星连续跟踪监测,以确定卫星的精密轨道参数(测轨精度可达分米级),为用户摆脱 SA 政策的影响提供服务,从而提高用户定位精度。

(2) 加强 GPS 差分定位技术的研究与开发。所谓差分技术,指的是同一个测站对两颗卫星的同时观测量,或两个测站对一颗卫星的同时观测量,或一个测站对一颗卫星在两个历元里的观测量之间求差。其目的在于消除有关公共误差项,以提高定位精度。差分 GPS 定位技术(DGPS)是目前非特许 GPS 用户广泛采用的最经济有效的措施之一,它能有效地减弱相关误差的影响,显著地提高定位精度。

(3) 开发卫星导航多模接收机。目前除了美国的 GPS,还有苏联时期的 GLONASS、正在发展的 Galileo 和我国的北斗导航系统等。各类卫星导航系统在定位原理等方面与 GPS 是相似的,故研制 GPS/GLONASS、GPS/Galileo、GPS/北斗等多模的兼容性接收机是可行的,并已受到各国的广泛重视,这种接收机不仅增加了可观测卫星的数目,改善了可观测卫星的几何分布,而且增强了用户定位导航的精确性、可靠性和安全性。

(4) 研制、建立独立自主的卫星定位系统。根本摆脱美国的 GPS 限制性政策的方法是建立独立自主的卫星定位系统。迄今为止,一些国家和地区正在发展自己的卫星定位系统,比如上述的 GLONASS、欧洲空间局(ESA)曾规划和发展一种以民用为主的卫星定位系统 NAVSAT、正在实施的 Galileo 计划以及我国的北斗导航系统等。

1.3 GLONASS 全球定位系统

1.3.1 GLONASS 空间部分

GLONASS 系统在由苏联于 1976 年开始研究规划,于 1996 年建成并正式投入使用,由俄罗斯国防部控制。GLONASS 系统的空间星座部分,23+1 颗为工作卫星,1 颗为备用部分。卫

星分布在 3 个等间隔的椭圆轨道面内,每个轨道面上分布有 8 颗卫星,同一轨道面上的卫星间隔 45° 。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角为 64.8° ,轨道偏心率为 0.001,每个轨道平面的升交点赤经相差 120° 。卫星平均高度为 19100km,运行周期为 11 小时 15 分。由于 GLONASS 卫星的轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角,所以在高纬度 (50° 以上) 地区的可见性较好。在星座完整的情况下,在全球任何地方、任意时刻最少可以观测 5 颗卫星。GLONASS 星座及其平面投影如图 1-5 所示。

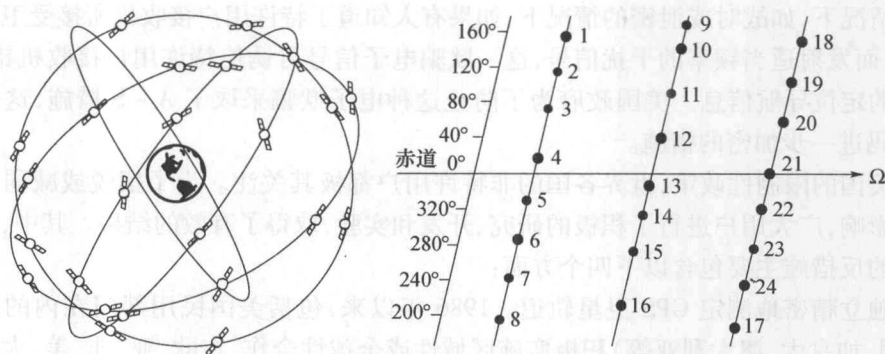


图 1-5 GLONASS 星座及其平面投影

GLONASS 提供两种类型的导航服务:标准精度通道(CSA)和高精度通道(CHA)。CSA 类似于 GPS 的标准定位服务 SPS,主要用于民用。CHA 类似于 GPS 的精密定位服务 PPS,主要用于特许用户。GLONASS 的导航精度要比 GPS 的导航精度低,但它的主要好处是没有 SA 干扰,民用精度优于加 SA 的 GPS。

GLONASS 在 1996 年初正式投入运行,但由于 GLONASS 卫星寿命较短,原来在轨卫星陆续退役,前一时期由于经济困难无力补网,使得 GLONASS 无法维持系统的正常工作。1998 年 2 月只有 12 颗正常工作,2000 年时仅有 6 颗工作。随着全球定位系统重要性日益提高,俄罗斯也提出了 GLONASS 的现代化改造,着手健全和发展 GLONASS 系统。目前已研制并发射了多颗改进型的 GLONASS-M 卫星,增加了第二民用频率,卫星寿命可达到 7 年;新研制的第三代 GLONASS-K 卫星,将增加用于生命安全的第三民用频率。2009 年 8 月在轨卫星已达 19 颗,可以覆盖俄罗斯全境,近期星座卫星将增加至 30 颗,其目标是保持与 GPS/Galileo 的兼容性。典型的 GLONASS 卫星如图 1-6 所示。

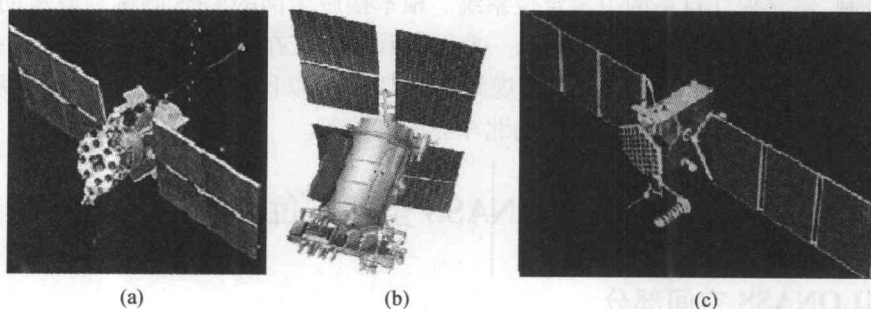


图 1-6 典型的 GLONASS 卫星

(a) GLONASS; (b) GLONASS-M; (c) GLONASS-K。