

航空航天工程类专业规划教材

A detailed illustration of a satellite in space, showing its complex structure, solar panels, and antennas, set against a backdrop of a blue sky and a white cloud layer.

全球导航 卫星系统

主编 曾庆化 副主编 刘建业 赵伟 李荣冰 熊智



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内容简介

全球导航卫星系统

主 编 曾庆化

副主编 刘建业 赵伟 李荣冰 熊智

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

《全球导航卫星系统》比较全面地阐述了全球导航卫星系统(GNSS)各方面的基本理论与应用。全书共分7章,前6章着重介绍GNSS的概述、理论及技术,最后1章介绍GNSS的应用。

《全球导航卫星系统》在吸纳团队及他人成果的基础上,加强了对GNSS知识体系、理论及应用的优化。书中深入浅出地介绍了GNSS的起源、发展及各个系统的特色情况;比较全面地阐述了GNSS时空系统、卫星运动理论及星座等基础知识;对GPS、北斗、GLONASS和伽利略系统的导航卫星信号编码、接收等信号处理技术进行了讨论;给出了GNSS接收机常用观测量及其影响因素,并说明了观测量数据的组合等价性;阐述了GNSS授时、定位、测速、测姿等基本功能的实现原理;较为详细地介绍了各种GNSS差分增强技术;最后1章阐述了GNSS在海、陆、空、天及其它领域的应用情况。每章末尾均配有相关的思考题和参考文献,可供读者在学习过程中灵活应用。

本教材是“自动控制系列课程国家教学团队”规划教材和航空航天工程类专业规划教材,凝聚了GNSS系列课程的国际化教学、双语教学和中文教学的多年经验积累。

本教材可作为卫星导航定位及相关领域的大学本科高年级学生或者研究生教材和参考书,也可以作为相关专业科研人员的自学和业务参考书。

图书在版编目(CIP)数据

全球导航卫星系统 / 曾庆化主编. —北京: 国防工业出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 09379 - 7

I. ①全... II. ①曾... III. ①卫星导航 - 全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第238067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 16 1/4 字数 372 千字

2014年11月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价49.90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

全球导航卫星技术是导航技术的重要分支,是一门学科高度综合的应用技术,它是海、陆、空、天各载体顺利完成导航任务的保障条件之一,也是国家综合科技实力的重要体现,在军事和民用领域都处于极为重要的地位。随着科学技术、现代控制理论以及计算机软硬件的飞速发展,卫星导航技术朝着多星座、多功能、高精度、高可靠性方向发展。

本教材内容起源于袁信、俞济祥、陈哲等三位教授编著的《导航系统》教材(1993年版),发展于刘建业教授主编的《导航系统理论与应用》教材(2010年版),结合了近些年作者及其所在南京航空航天大学导航研究中心(www.nuaanrc.com)教师开展的本科生及研究生国际化培养教学等系列化教学经验积累,同时及时吸纳了南京航空航天大学导航研究中心在卫星导航相关领域的研究成果。

本书主编师从南京航空航天大学刘建业教授,在多年的学习及教学科研工作中,得到了刘建业教授多方面的指导和教诲。

随着科学技术的迅猛发展,全球导航卫星技术获得了快速全面的提高,在各星座完善、系统理论、定位算法、误差分析和导航应用等方面有诸多进展,编者的前2个版本《全球导航卫星系统》校内教材,5年来进行了大量的教学应用和完善,效果显著。

本教材主要是针对高校学生的教学特点,对校内教材进行再修改和完善,力求包含全球导航卫星系统的最新发展,特别是我国北斗卫星导航系统的近况。本教材共分7章,分别详细地讨论了全球导航卫星系统的概述、基础知识、信号编码、观测量、功能实现、增强技术和应用等。

本教材最终的完成需要感谢共同付出智慧与辛勤劳动的南京航空航天大学导航研究中心的同事们,同时导航研究中心的多位研究生也一起为本教材的编著和完善做了大量细致繁杂的技术和文字工作。本教材受到了南京航空航天大学自动化学院“自动控制系列课程国家教学团队”、南京航空航天大学精品课程和教学改革项目、国家自然科学基金项目,以及《全球定位系统》编辑部的大力支持,在此一并表示感谢。

本教材涵盖面较广,注重全书知识的条理化和继承性,以方便读者理解和掌握。本教材可作为本专业课程教材,也可作为从事卫星导航及相关技术的研究人员和工程技术人员参考。卫星导航技术是一门不断发展的学科,其技术内容涉及广泛且不断更新扩展,编者努力使本教材能较好满足读者需求,同时诚恳期待广大读者对教材中存在的缺点和错误提出批评指正。

编者

2013年10月

目 录

第 1 章 全球导航卫星系统概述	1
1.1 绪论	1
1.2 美国 GPS 概况	2
1.2.1 GPS 的发展	2
1.2.2 GPS 的组成结构	4
1.2.3 GPS 的现代化	10
1.3 俄罗斯 GLONASS 概况	12
1.3.1 GLONASS 发展历程	12
1.3.2 GLONASS 系统组成	13
1.3.3 GLONASS 现代化	17
1.4 中国北斗卫星导航系统概况	18
1.4.1 北斗导航试验系统	19
1.4.2 北斗导航试验系统原理与特点	21
1.4.3 北斗卫星导航系统的发展	22
1.5 欧洲伽利略系统概况	24
1.5.1 伽利略计划的背景情况	25
1.5.2 伽利略系统的整体架构	25
1.5.3 伽利略系统的特色	28
1.6 其他重要的区域导航卫星系统	30
1.6.1 日本准天顶卫星系统	30
1.6.2 中国区域定位系统	32
1.6.3 印度区域导航卫星系统	33
1.7 本章小结	35
思考题	35
参考文献	35
第 2 章 GNSS 坐标及运动基础知识	37
2.1 卫星运行的时间坐标系统	37
2.1.1 平太阳时、世界时、恒星时	37
2.1.2 原子时(AT)	38

2.1.3	协调世界时(UTC)	38
2.1.4	四大全球导航卫星系统的时间体系	38
2.1.5	地球动力学时(TDT)	39
2.2	卫星运行的空间坐标系统	40
2.2.1	基本概念	40
2.2.2	协议天球坐标系	41
2.2.3	协议地球坐标系	43
2.2.4	大地坐标系介绍	44
2.2.5	坐标系的转化算法	48
2.3	卫星运动的物理理论基础	52
2.3.1	开普勒定律	52
2.3.2	牛顿三大运动定律	53
2.3.3	多普勒效应	53
2.3.4	爱因斯坦相对论	54
2.4	卫星的无摄运动	54
2.4.1	导航卫星的运动方程求解	54
2.4.2	卫星运动的轨道参数	56
2.4.3	卫星的瞬时位置	57
2.4.4	卫星的运行速度	60
2.5	卫星的受摄运动	61
2.5.1	地球引力场摄动力对卫星轨道的影响	61
2.5.2	太阳、月亮引力对卫星轨道的影响	63
2.5.3	太阳光压对卫星轨道的影响	63
2.5.4	相对论效应影响	63
2.6	卫星轨道与星座知识	64
2.6.1	卫星的工作区域	64
2.6.2	卫星轨道划分及其特点	66
2.6.3	卫星星座基本构型及其约束	69
2.6.4	常见星座构型模型	70
2.7	本章小结	71
	思考题	71
	参考文献	72
第3章	导航信号编码、调制与接收	73
3.1	信息编码基本原理	73
3.1.1	信息编码及其特点	73
3.1.2	GPS的导航电文格式	76

3.1.3	GPS 信号中的伪随机码及其特点	79
3.2	GPS 的信号编码及调制	82
3.2.1	卫星信号的 BPSK 调制方式	82
3.2.2	卫星信号的 BOC 调制方式	84
3.2.3	调制后的 GPS 信号汇总	84
3.3	GPS 信号接收机对卫星信号的处理	85
3.3.1	接收机信号的处理流程	85
3.3.2	接收机对 GPS 信号的捕获	86
3.3.3	接收机对 GPS 信号的跟踪	88
3.3.4	GPS 卫星星历的用户算法	89
3.4	北斗系统的信号规范和导航电文	91
3.4.1	北斗系统发布的信号规范	91
3.4.2	北斗系统的导航电文	94
3.4.3	北斗卫星系统的服务性能及其他说明	107
3.5	其他 GNSS 信号以及导航电文	109
3.5.1	GLONASS 信号以及导航电文	109
3.5.2	GALILEO 系统的信号特征	117
3.6	GNSS 信号处理技术的相关发展	118
3.6.1	GNSS 信号接收机的软件化	118
3.6.2	接收机射频干扰应对技术	120
3.6.3	GNSS 的通信定位一体化趋势	121
3.7	本章小结	121
	思考题	121
	参考文献	121
第 4 章	接收机的观测量及其性质	123
4.1	GNSS 的时间概念	123
4.2	测码伪距观测量	124
4.2.1	测码伪距观测量	124
4.2.2	测码伪距观测方程	125
4.2.3	测码伪距观测方程的线性化	125
4.3	测相伪距观测量	126
4.3.1	载波相位观测量与测相伪距观测方程	127
4.3.2	测相伪距观测方程的线性化	128
4.3.3	整周模糊度及周跳	129
4.4	多普勒积分观测量	132
4.5	对 GNSS 观测量的物理影响	133

4.5.1	与卫星有关的误差	133
4.5.2	与卫星信号传播有关的误差	134
4.5.3	多路径效应影响	137
4.5.4	与接收设备有关的误差	139
4.5.5	其他误差来源	139
4.6	观测量的数据组合	140
4.6.1	数据组合的基本模式	141
4.6.2	各种不同的数据组合方式	142
4.6.3	组合模式在 TCAR 整周模糊度求解中的应用	143
4.6.4	组合算法与未组合算法的等价性说明	144
4.7	本章小结	145
	思考题	145
	参考文献	145
第 5 章	GNSS 功能实现原理	147
5.1	GPS 授时功能原理	147
5.1.1	单站测时法	148
5.1.2	共视测时法	149
5.1.3	各种测时方法精度对比	149
5.2	GNSS 定位基本概念和原理	150
5.2.1	GNSS 测码伪距定位	153
5.2.2	GNSS 测相伪距定位	155
5.2.3	导航卫星几何分布及其对定位精度影响	156
5.3	GNSS 载体速度测量原理	159
5.3.1	平均速度法	159
5.3.2	多普勒频移法	159
5.4	GNSS 测姿原理	161
5.4.1	单天线测姿原理与算法	161
5.4.2	多天线测姿原理与算法	165
5.5	GNSS 演示试验	168
5.5.1	GNSS 软件接收机定位演示试验	168
5.5.2	GNSS 应用软件演示试验	173
5.5.3	北斗/GPS 双星座接收机演示试验	174
5.6	本章小结	175
	思考题	175
	参考文献	175

第 6 章 各类 GNSS 增强技术	176
6.1 差分 GPS 定位原理	176
6.1.1 伪距差分定位	177
6.1.2 载波相位差分定位	178
6.1.3 差分与非差分方法的等价性说明	182
6.1.4 GPS RTK 工作原理	182
6.2 伪卫星增强技术	183
6.2.1 伪卫星技术背景及分类	183
6.2.2 伪卫星信号结构及其发射强度分析	185
6.2.3 伪卫星增强技术相关技术问题	186
6.3 星基差分增强系统	189
6.3.1 美国广域差分增强系统(WAAS)	191
6.3.2 欧洲静地导航重叠系统(EGNOS)	195
6.3.3 俄罗斯卫星差分校正和监测系统(SDCM)	197
6.3.4 日本多功能卫星的星基增强系统(MSAS)	197
6.3.5 美国 NavCom 公司的 StarFire 系统	198
6.4 基于卫星导航系统的 CORS 系统	199
6.4.1 世界主要 CORS 的发展现状	200
6.4.2 CORS 的构成和定位中的误差源	201
6.4.3 世界主要 CORS 应用领域和特点	203
6.5 GNSS 兼容互操作技术	204
6.5.1 GNSS 系统的时间互操作	204
6.5.2 GNSS 兼容互操作的难点和解决途径	205
6.5.3 GNSS 信号及其兼容接收机	209
6.6 GNSS 完好性及其组合导航技术	212
6.6.1 接收机自主完好性检测(RAIM)	212
6.6.2 外部检测站完好性检测	213
6.6.3 多星座 GNSS 组合导航性能分析	214
6.6.4 GNSS 与其他系统的组合应用	219
6.7 本章小结	222
思考题	222
参考文献	222
第 7 章 GNSS 的各类应用探讨	225
7.1 卫星授时在电力系统中的应用	225
7.1.1 授时技术在电力系统中的应用	225

7.1.2	卫星时间同步装置原理	226
7.1.3	高精度 GNSS 时间同步装置设计应注意的问题	227
7.2	GNSS 在大地测量方面的应用	228
7.2.1	不同层次的 GPS 网应用实例	228
7.2.2	RTK 技术的控制测量与测图应用研究	230
7.2.3	基于 GNSS 的航空摄影测量	231
7.3	GNSS 在车辆交通系统中的应用	233
7.3.1	自动车辆定位导航系统	233
7.3.2	基于 GPS - GPRS 的车载导航定位系统的应用	234
7.3.3	GNSS 增强系统在智能交通应用发展	237
7.4	GNSS 在航海中的应用	237
7.4.1	GNSS 导航仪在航海中的航迹导航	237
7.4.2	北斗系统的通信功能在航海方面重要应用	239
7.4.3	DGPS 在打捞残骸过程中的定位应用	240
7.5	GNSS 在航空航天方面的应用	242
7.5.1	GNSS 在航空航天中应用概述	242
7.5.2	GNSS 主要军事的应用领域	243
7.5.3	GNSS 在精确打击武器上的应用	244
7.6	GNSS 在其他领域的应用	246
7.6.1	GNSS 信号在大气、海洋、陆面遥感探测方面的应用	246
7.6.2	GNSS 在精密农业中的应用	248
7.6.3	GNSS 在林业管理方面的应用	248
7.7	本章小结	249
	思考题	250
	参考文献	250

第1章 全球导航卫星系统概述

导航主要目的是获取运动物体的众多状态参数,该技术发展历史悠久。指南车、记里鼓车、指南针^[1]、牵星板等技术就是我国古代导航技术的典型代表。随着科学技术的不断进步,导航技术的应用对象逐步从陆地、海洋的载体扩展至飞机、导弹、飞船等航空航天载体。现代全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的出现和使用对于提高载体的导航精度,保障载体/人员的安全起了重要作用,促进了导航技术及其精度的跨越式发展^[2],本章主要对全球导航卫星系统做一个较为全面的概述。

1.1 绪 论

中国明代永乐年间,郑和率领规模庞大的船队七下西洋,采用罗盘、测深器、牵星板等先进技术,史书称航程十万余里,完成了我国和世界航海史上的壮举。17世纪初,开始进入资本主义社会的欧洲各国,积极发展对外贸易并掠夺殖民地,进一步促进了航海业和天文导航技术的共同发展。随着现代科学技术的发展和时代的不断进步,运动载体对自身定位以及导航精度要求越来越高,原始的磁罗盘和天文导航方法已经无法满足运动载体的工作需要。

随着现代文明的不断深入,19世纪的数学和物理学领域取得了长足的进展。依据牛顿力学原理测量载体运动状态的惯性导航技术,以及以电磁波为基础的近代无线电导航技术,在促进导航定位技术的发展方面做出了巨大贡献。然而,惯性导航系统的定位误差容易随时间积累发散,难以满足长时间、高精度的使用要求,并且高性能惯性导航设备属于精密仪器,价格非常昂贵,难以普及。同期出现的无线电导航系统,如罗兰、奥米伽和台卡等,由于存在受气象影响大、精度低、信号覆盖面积小等局限,因此不易广泛应用到各类导航应用中。

1957年10月4日,苏联第一颗人造地球卫星(Sputnik 1)的成功发射将人类带入了太空时代。随后,美国和苏联空间技术以及各种人造卫星进一步发展,促使人们思考利用卫星发射无线电信号进行载体导航定位的可行性,并相继出现了建设卫星导航定位系统的构想。由于导航卫星系统相比地基无线电导航系统而言具有无法比拟的优点和精度,因此得到了迅速的发展。尤其是美国全球定位导航系统(Global Position System, GPS)的投入使用和广泛应用,逐渐结束了传统的天文导航和地面/近地无线电导航定位系统的长期垄断地位。

诸多不同类型的导航卫星系统统称为全球导航卫星系统(GNSS,也称为全球卫星导航系统),又称定位导航测时(Positioning Navigating Timing, PNT)系统,能够提供时间/空间基准以及与定位有关的实时信息。GNSS作为重大空间和信息化基础设施和战略威慑基础资源,能够体现现代化国家的综合国力,是国家经济安全、国防安全、国土资源安全和国家公共安全的重大技术支撑系统。由于GNSS具有广泛的产业关联度,并与通信产业

具有固有的融合度,能有效地渗透到国民经济的诸多领域和人们日常生活中,有助于服务广大人民群众,提升国民的生活质量。

GNSS 应用的大众化、全球化特质,及其与通信/网络产业良好的融合性优势,使之成为高技术产业的催化剂,成为全球继移动通信和互联网后的又一个快速发展的电子信息产业。据国外专业咨询公司预测,至 2014 年,全球具备 GPS 功能的移动电话年销量可达 9.6 亿台,占当年手机销量的 60%。我国卫星导航产业植根于我国巨大的移动通信和汽车产业两大市场,预计将形成年产值超过 1000 亿元的卫星导航应用与服务产业。

由于 GNSS 在国家安全和经济与社会发展中具有极其重要的作用,所以世界各主要大国都竞相发展其独立自主的导航卫星系统。预计到 2020 年,世界将拥有四大全球性的导航卫星系统,它们分别是美国的 GPS、我国的北斗卫星导航系统、俄罗斯的 GLONASS 和欧盟的伽利略(GALILEO)系统。除此以外,GNSS 还包括区域导航卫星系统及其增强系统,例如,日本的准天顶卫星系统(QZSS)和多功能卫星增强系统(MSAS),印度的无线电导航卫星系统(IRNSS)和 GAGAN 系统(GPS 辅助型静地轨道增强导航系统),尼日利亚运用通信卫星搭载所实现的 NicomSat-1 星基增强系统等。

GNSS 各系统具有相似的基本组成结构,均包括空间星座(具有特定轨道的导航卫星)、地面监控(具有收集处理信息功能的地面站)和用户设备(具有捕获卫星信号解算导航参数的设备)3 个主要部分。

1.2 美国 GPS 概况

美国 GPS 的全称是导航星测时和测距全球定位系统(Navigation Satellite Timing and Ranging Global Position System),简称全球定位系统(Global Position System, GPS),可以实现地球表面附近范围的全天候三维位置等信息的获取,其具有实时性好、精确度高的优点,是当前世界发展最完善、应用最广泛的全球导航卫星系统。

1.2.1 GPS 的发展

1957 年 10 月 4 日,苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星 Sputnik 1,美国霍普金斯(Hopkins)大学应用物理实验室人员在观测该卫星时,发现卫星通过位置一定的接收站视界的过程中,所接收的无线电信号多普勒频移曲线与卫星轨道有对应关系,并成功测定了苏联卫星的轨道。依据这个原理的“反方案”,人们提出了研制导航卫星系统的建议,即根据接收站测得的轨道已知卫星信号的多普勒频移曲线,确定接收站在地面的位置。

1958 年 12 月,美国海军和霍普金斯大学联合研究海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NAVSTAR)解决北极星核潜艇在深海航行和执行军事任务的精确定位问题,由于这些卫星运行轨道通过地球南北极上空,因此也称为子午仪(Transit)导航卫星系统(图 1-1),它是世界上最早研制并试验成功的导航卫

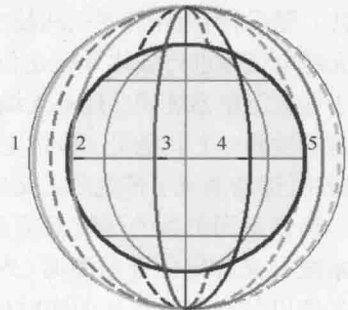


图 1-1 子午仪导航卫星系统示意图

星系统。子午仪系统的太空导航星座提供全天候全球导航覆盖和周期性二维(经纬度)定位的能力,集中了远程无线电导航台覆盖广泛和近程无线电导航台定位精度高的双方优点,使全球用户在统一的坐标系内实现高精度定位,是导航技术中的革命性突破。

虽然子午仪导航系统在导航/定位技术发展中具有划时代意义,但仍存在明显的缺陷。组成子午仪系统导航网的卫星轨道较低,为离地面约 1080km 的圆形极轨,每条轨道上只有 1 颗卫星,运行周期约为 107min。由于卫星数量少,故每隔 1~2h 才有 1 次卫星通过地面观测点。此外,由于采用多普勒定位原理,1 台接收机需要进行 15 次合格的卫星观测才能获得精度为 $\pm 10\text{m}$ 的单点定位性能。由于该系统观测卫星/解算导航参数的时间长,因此无法实时连续三维导航,不能满足高动态载体(飞机、导弹等)的高精度导航需求。

20 世纪 60 年代中期,基于子午仪导航卫星系统的实践经验,美国海军和空军分别提出了各自的方案继续研究更先进的导航系统。海军提出采用 12~18 颗卫星组成全球定位网的“Timation”方案,卫星高度约 10000km,采用周期为 8h 的圆形轨道,并于 1967 年 5 月和 1969 年 11 月分别发射了 2 颗试验卫星。空军提出的“621B”计划拟采用三四个星座,每个星座由四五颗卫星组成,中间 1 颗采用同步轨道,其余几颗采用周期为 24h 的倾斜轨道,每个星座都有独立的控制站,能满足高动态载体的导航/定位功能。经分析,“Timation”方案无法满足空军的飞机/导弹的高动态、连续、实时定位要求,而“621B”则存在设站和极区覆盖不全问题,无法实现安全、可靠的自主运行。

1973 年,美国国防部决定在前述 2 个方案的基础上,发展各军种共同使用、能实时连续提供三维位置/速度和精确时间的全球导航卫星系统。国防部决定空军牵头负责研制,并在空军系统司令部空间部成立一个联合计划办公室,具体负责 GPS 的研制、试验、采购和部署工作,参加该项目的包含空军、陆军、海军、海军陆战队、运输部、国防地图测绘局及国防预研计划局等多家单位。1978 年,一些北大西洋公约组织成员和澳大利亚也通过双边协议参加了 GPS 计划。

GPS 系统的研制分为 3 个阶段:

1973—1978 年是方案论证阶段,美国共发射 4 颗第一代 GPS 试验卫星,研制地面 GPS 接收机,并建立了地面跟踪网,对系统的软硬件试验结果表明,系统性能令人满意。

1979—1985 年是工程研制和系统试验阶段,该阶段主要是发射了第一代 Block I 试验卫星,研制了各种导航型接收机和测地型接收机,试验结果表明,GPS 粗码(C/A 码)的定位精度远远超过了设计指标,误差约 20m,证明 GPS 计划是成功的。

第三阶段为改善系统性能,整个系统投入使用阶段。1989 年 2 月 4 日,GPS 第一颗工作卫星发射,截至 1994 年 3 月 10 日共发射了 28 颗工作卫星。这些工作卫星统称为 Block II 和 Block II A 卫星,为 GPS 的第二代卫星。此时,通过卫星载波信号进行测量定位的高精度接收机和采用相位差分的 GPS 姿态测量接收机也开始研制,满足了军事方面精密导航与制导等应用需求。1993 年 12 月系统达到初始运行能力,1995 年 4 月系统达到全运行能力。

此后,GPS 卫星发射的大多为第三代卫星,是在第二代 GPS 卫星基础上的升级版本。GPS 卫星的发射情况如表 1-1 所列。

表 1-1 GPS 卫星发射情况

项目	发射时间	卫星类型	卫星数量/颗	用途
第一代	1978—1984 年	Block I	11	试验性
第二代	1989—1994 年	Block II, Block II A	28	正式工作
第三代	20 世纪 90 年代末	Block II R, 超过 IIR - M, 超过 IIF 等	超过 20	改进 GPS 系统

GPS 计划提出到 GPS 系统建成前后历经 20 余年,耗资数百亿美元。该项目与阿波罗登月计划、航天飞机计划并称为美国三大空间工程项目,解决了人类在地球表面附近及其周围空间的导航与定位问题,可以广泛地应用于海、陆、空、天运动目标的导航、制导、定位及定轨,也可以在各种民用部门和领域开展应用,如大地测量、地壳监测、工程勘探、地质测量等。

1.2.2 GPS 的组成结构

GPS 的组成结构主要分为 3 个部分,即空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。这 3 个部分有机整合、共同作用,实现用户的三维定位、测速等功能。

1. GPS 的空间星座部分

1973 年美国国防部批准的初始的 GPS 星座方案为:卫星总数 24 颗,分布在 3 个圆形轨道面上,每个轨道面 8 颗。然而,在实际工程实施过程中,为了将有限的试验卫星集中保障美国亚利桑那州尤马(Yuma)试验场的有效测试,改 3 个轨道面为 6 个轨道面,后来为了不浪费已经布设的卫星,GPS 导航星座仍然维持了 6 个轨道面^[3,4]的布局,每个轨道面上分布 4 颗卫星。

GPS 卫星轨道平均高度约为 20200km,每个轨道面相对地球赤道面的倾角为 55°,各轨道平面升交点的赤经相差 60°,在相邻轨道上的卫星升交点赤经相互间隔 30°。卫星运行周期为 11h58min,同一观测站上每天出现的卫星分布图形相同,只是每天提前约 4min。同时位于地平线以上的卫星数目最少为 6 颗,最多可达 11 颗,与用户所在地点和时间有关(图 1-2)。为了保障 GNSS 空间部分正常而高效地工作,空间部分同时运行备用 GPS 卫星,将在必要时根据指令代替发生故障的卫星。

GPS 卫星主要由下面 7 个部分组成:

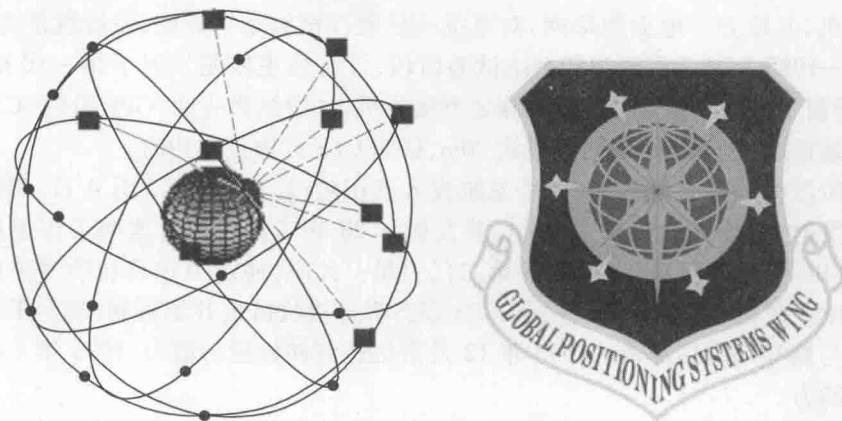


图 1-2 GPS 可见星在星座中示意图以及 GPS 的标志

(1) 电源部分。由太阳能电池、蓄电池、电源调节装置、分流器、耗散器等组成。当卫星在非阴影区时,太阳能电池提供能源并为蓄电池充电;当卫星进入阴影区时,由蓄电池供电。

(2) 姿态、速度控制部分。由被动制动装置、自旋稳定装置、反作用飞轮三轴稳定装置以及传感卫星姿态的关键部件等组成,主要是感知卫星姿态、消除卫星的自旋,并通过反作用喷气装置进行三轴稳定控制。同时还采用对日定向控制系统,使卫星帆板始终指向太阳。

(3) 遥测、跟踪与指令部分。由具有通信、测距功能的设备组成,提供卫星测距、指令、控制与测量功能。前向锥形螺旋天线接收地面站发出指令与控制信号,是频率为 1750 ~ 1850MHz 的上行线路传输过程。遥测、跟踪用下行线路传输,采用频率为 2200 ~ 2300MHz 的双锥形喇叭天线和后向锥形螺旋天线。

(4) 温控部分。由百页窗与电热器等器件组成,调节温度使卫星内部温度保持在要求的范围内,主要包括绝缘/涂层等被动式温控以及电热器等主动式温控。

(5) 结构部分。GPS 卫星采用铝蜂窝结构和翼状帆板式太阳能电池,主要满足卫星部件的安放,并具备承受发射应力、重复过载、热变形的能力。

(6) 反作用控制变轨发动机部分。由众多的推力器和发动机喷管构成,主要用于卫星运行轨道的调节、卫星自旋稳定时姿态调整、初始转移轨道的调速,以及卫星三轴稳定控制和卫星正常位置保持。

(7) 导航部分。由微处理器、伪随机噪声码发生器、导航电文存储器、高稳定度原子频标、L 频段发射机和信号发播天线构成,是导航卫星的心脏,它可以存储地面控制站的星历数据,并将其转换成导航电文发给用户。星载原子钟是整个导航部分的核心,为 GPS 测量提供同步时间,协调卫星和地面站的工作。

GPS 卫星的基本功能大致可以归纳为如下 5 种:

- (1) 接收、存储和执行由地面监控站发来的导航信息和控制指令。
- (2) 利用卫星上的微处理器进行部分必要的信息处理工作。
- (3) 卫星推进器在地面监控站或系统的控制下调整卫星的姿态和位置。
- (4) 星载高精度原子钟为系统提供精密时间标准(如铷钟的秒稳定度约 $3 \times 10^{-12}/s$)。
- (5) 结合卫星编号,将码分多址编码后的导航定位信息进行广播式发送。

GPS 卫星本身从导航卫星系统建设开始,一直处于不断的更新和完善之中。经历了早期的该验卫星,以及正式工作的 GPS 导航卫星,还有导航星的各种改进型卫星,图 1-3 为截至 2013 年年底在轨工作的卫星。

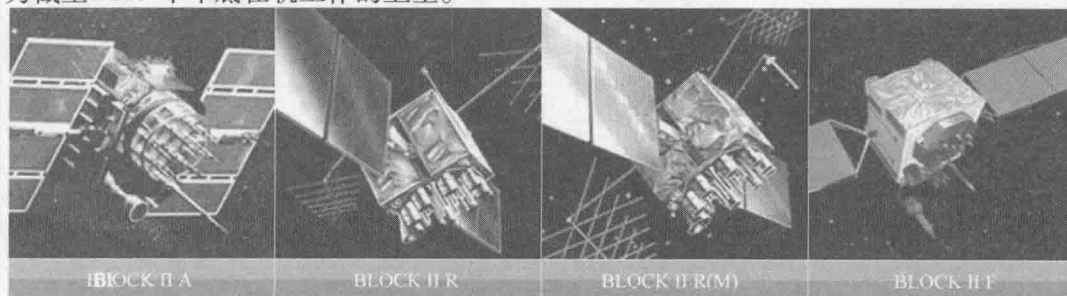


图 1-3 截至 2013 年年底在轨工作的卫星

截至 2013 年 10 月 10 日, GPS 系统的实际在轨卫星已经达到 31 颗。具体情况如表 1-2 所列^[5,6]。

表 1-2 GPS 卫星情况汇总表(截至 2013 年 10 月 10 日)

星座	序号	编号	北美防空司令部编号	卫星类型	发射时间/年.月.日	工作时间/月	工作时间/年
A	1	9	22700	BLOCK IIA	1993.06.26	242.9	大于 15
	2	31	29486	BLOCK IIRM	2006.09.25	84.0	7 年
	3	8	25030	BLOCK IIA	1997.11.06	189.9	大于 15
	4	7	32711	BLOCK IIRM	2008.03.15	66.6	大于 5 年
	5	24	38833	BLOCK IIF	2012.10.04	10.8	小于 1 年
B	1	16	27663	BLOCK IIR	2003.01.29	127.8	大于 10
	2	25	36585	BLOCK IIF	2010.05.28	37.5	大于 3 年
	3	28	26407	BLOCK IIR	2000.07.16	157.9	大于 10
	4	12	29601	BLOCK IIRM	2006.11.17	82.0	大于 6 年
C	1	29	32384	BLOCK IIR M	2007.12.20	69.3	大于 5 年
	2	3	23833	BLOCK II A	1996.03.28	210.2	大于 15 年
	3	19	28190	BLOCK II R	2004.03.20	114.2	大于 9 年
	4	17	28874	BLOCK IIR M	2005.09.26	94.9	大于 7 年
	5	27	39166	BLOCK II F	2013.05.15	3.6	小于 1 年
	6	6	23027	BLOCK II A	1994.03.10	234.6	大于 15 年
D	1	2	28474	BLOCK II R	2004.11.06	106.7	大于 8 年
	2	1	37753	BLOCK II F	2011.07.16	23.9	小于 2 年
	3	21	27704	BLOCK II R	2003.03.31	126.0	大于 10 年
	4	4	22877	BLOCK II A	1993.10.26	238.8	大于 15 年
	5	11	25933	BLOCK II R	1999.10.07	165.3	大于 10 年
E	1	20	26360	BLOCK II R	2000.05.11	160.4	大于 10 年
	2	22	28129	BLOCK II R	2003.12.21	117.0	大于 9 年
	3	5	35752	BLOCK IIR M	2009.08.17	49.5	大于 4 年
	4	18	26690	BLOCK II R	2001.01.30	151.9	大于 10 年
	5	32	20959	BLOCK II A	1990.11.26	274.2	大于 15 年
	6	10	23953	BLOCK II A	1996.07.16	206.0	大于 15 年
F	1	14	26605	BLOCK II R	2000.11.10	154.1	大于 10 年
	2	15	32260	BLOCK IIR M	2007.10.17	71.4	大于 5 年
	3	13	24876	BLOCK II R	1997.07.23	188.4	大于 15 年
	4	23	28361	BLOCK II R	2004.06.23	111.1	大于 9 年
	5	26	22014	BLOCK II A	1992.07.07	254.8	大于 15 年

2. GPS 系统的地面监控部分

GPS 的地面监控部分包括 1 个主控站、1 个备份主控站、12 个注入站(含 8 个美国空军卫星控制网网络(AFSCN)的远程跟踪站)和 17 个监测站,如图 1-4 所示为 GPS 系统的地面监控部分^[7]。



图 1-4 GPS 系统的地面监控部分

GPS 的主控站设在美国的科罗拉多,该主控站的备份站设在加利福尼亚州的范登堡空军基地。主控站负责协调和管理所有地面监控系统的整体工作,同时此外还完成下面的一些任务。

(1) 提供全球卫星定位系统的时间基准,将各监测站内的原子钟与主控站的原子钟同步或测出其间的时钟差。

(2) 汇总本站与其他监测站的所有观测资料,并利用卡尔曼滤波算法估计 GPS 系统的各星历、卫星钟差和大气层等修正参数。

(3) 调整偏离轨道的卫星,使之沿预定的正确轨道和姿态运行。

(4) 启用 GPS 备用卫星工作以代替失效的 GPS 卫星。

GPS 监控系统中除了主控站及其备份主控站外,还有设在印度洋的迭哥加西亚(Diego Garcia)、大西洋的阿松森群岛(Ascension)、太平洋的卡瓦加兰(Kwajalein)、美国本土的施里弗空军基地(Schriever AFS)、卡纳维拉尔角(Cape Canaveral)和夏威夷(Hawaii)的注入站和监测站。

注入站主要任务是在主控站的控制下,按照一定的周期将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文和其他控制指令等注入到 GPS 卫星的存储系统,同时注入站还负责监测注入卫星的导航信息的正确性,并向主控站汇报。

监测站是在主控站直接控制下的数据自动采集中心,负责跟踪接收卫星发射的 L 频