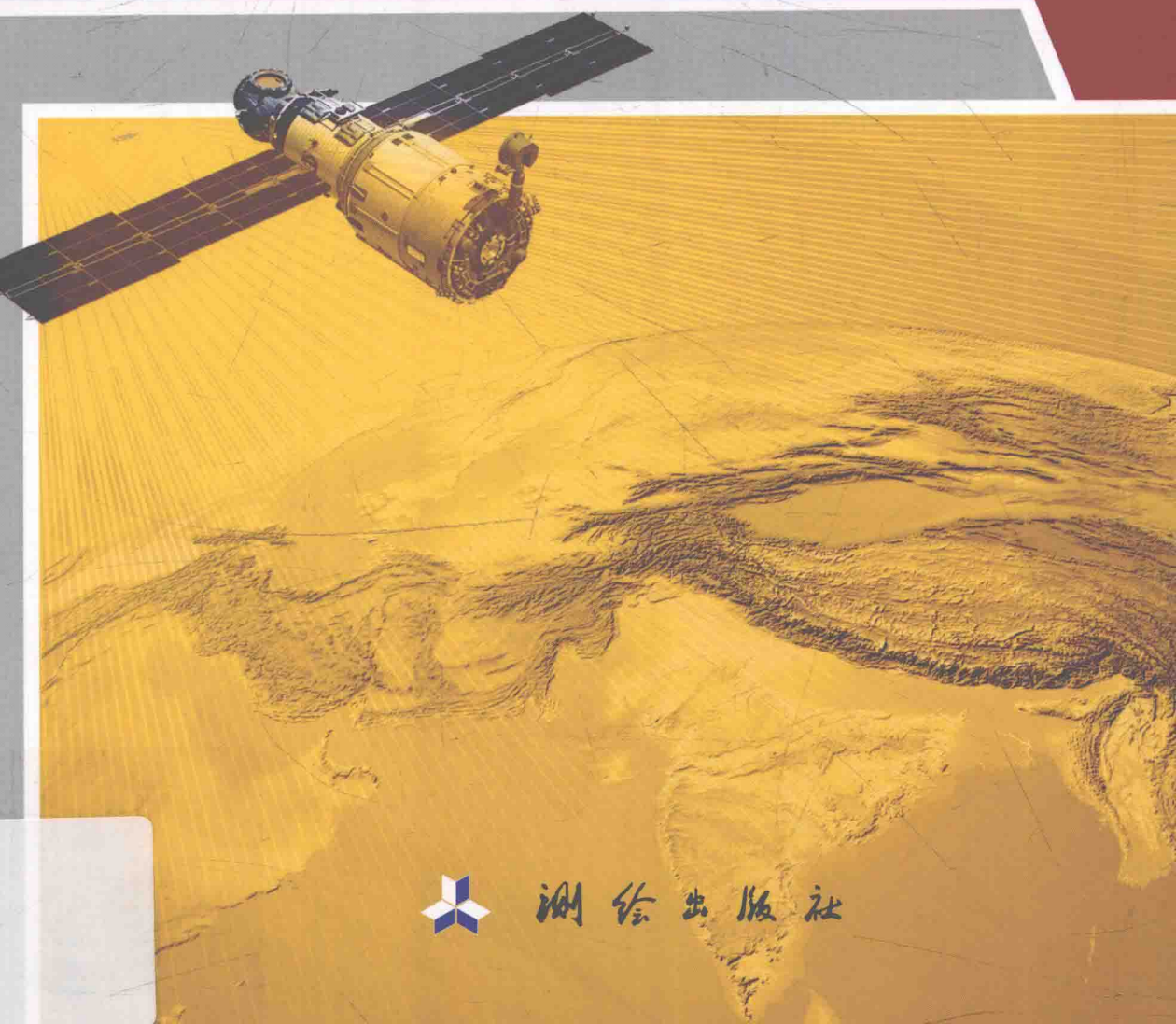


高等学校教材

卫星定位原理与应用

Principles and Applications of Satellite Positioning

王 坚 主 编
张安兵 副主编



测绘出版社

高等学校教材

卫星定位原理与应用

Principles and Applications of Satellite Positioning

王 坚 主 编

张安兵 副主编

测绘出版社

· 北京 ·

© 王 坚 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书是高等院校测绘相关专业的专业课教材。全书立足于卫星定位技术的最新发展,对卫星定位涉及的时间系统与坐标系统、卫星运动与卫星位置计算、卫星信号、卫星测量误差源、单点定位、基线向量解算、基线向量网平差、大地水准面精化及应用、控制测量设计与实施、实时动态定位、卫星导航增强技术、导航定位技术等基本原理与模型进行了系统阐述。随后,给出 GNSS 在测绘、矿山、地质、农业、海洋、交通、大气、文化遗产及军事等多个领域的应用案例。全书充分考虑了测绘工程专业学生知识结构的特点,对卫星定位原理及应用课程的内容进行更新与重组,提供了完整的卫星定位知识体系架构,能满足创新型人才培养的要求。

本书理论阐述力求简洁,案例描述完整,易于理解。可作为测绘工程专业课教材,亦可作为测绘、导航、车辆工程、地震及相关领域专业科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星定位原理与应用/王坚主编. — 北京:测绘出版社, 2017.9

高等学校教材

ISBN 978-7-5030-4048-1

I. ①卫… II. ①王… III. ①卫星定位—高等学校—教材 IV. ①P228.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 221236 号

责任编辑 巩 岩 封面设计 李 伟 责任校对 孙立新 责任印制 陈 超

出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543956(发行部)
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)
电子邮箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司	经 销	新华书店
成品规格	184mm×260mm		
印 张	18.5	字 数	462 千字
版 次	2017 年 9 月第 1 版	印 次	2017 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500	定 价	52.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-4048-1

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

编委会成员

主 编：王 坚

副主编：张安兵

成 员：郑南山 李丽华 李爱国

王胜利 张 卡 吕伟才

陶庭叶 胡 洪 谭兴龙

前 言

本书立足于卫星定位技术的最新发展,考虑测绘工程专业学生知识结构的特点,以问题为导向,按照强调案例教学的要求,对卫星定位原理及应用课程的内容进行更新与重组,提供了完整的卫星定位知识体系架构,能满足创新型人才培养的要求。

本书为测绘专业学生的专业课教材,涵盖了卫星定位的基础理论、模型与应用的主要内容。教材编写过程中,对不同卫星导航定位系统的差异进行了详细阐述,介绍了卫星定位技术的最新研究成果,尤其是北斗卫星导航系统的相关内容,吸纳了部分卫星定位技术在不同行业领域的应用案例,便于学生自主学习。数字测图、大地测量学和测量平差三门课为本课程的先修课程,建议学生在学习本教材之前对上述三门课程的知识进行学习。

本书由中国矿业大学王坚主编,河北工程大学张安兵为副主编,中国矿业大学郑南山、中国地质大学(北京)李丽华、河南理工大学李爱国、山东科技大学王胜利、南京师范大学张卡、安徽理工大学吕伟才、合肥工业大学陶庭叶、安徽大学胡洪、江苏师范大学谭兴龙为参编,全书由王坚协调统稿。在撰写的过程中,多位学者提出了宝贵意见,编者的研究生们做了大量的文字录入和校对的工作,在此一并表示谢意。本书还得到了中国矿业大学卓越采矿工程师教材、卓越测绘工程师教材计划的部分资助。

在编写过程中,虽然编者做了很多努力,但书中仍可能有不妥与疏忽之处,恳请读者予以批评指正。

编者
2017年6月

目 录

第 1 章 概 述	1
§ 1.1 GPS	1
§ 1.2 北斗卫星导航系统	6
§ 1.3 GLONASS	9
§ 1.4 Galileo 系统	11
§ 1.5 准天顶卫星导航系统	11
§ 1.6 印度星座导航系统	12
第 2 章 时间系统与坐标系统	14
§ 2.1 时间系统	14
§ 2.2 坐标系统	20
§ 2.3 GNSS 时空系统	29
§ 2.4 GNSS 时空系统的转换	31
第 3 章 卫星运动与卫星位置计算	36
§ 3.1 二体问题	36
§ 3.2 开普勒定律	36
§ 3.3 开普勒轨道参数	37
§ 3.4 卫星的无摄运动	38
§ 3.5 卫星的受摄运动	40
§ 3.6 卫星位置计算	42
§ 3.7 精密星历	50
§ 3.8 国际 GNSS 监测评估系统	51
第 4 章 卫星信号	53
§ 4.1 GPS 信号	53
§ 4.2 北斗卫星导航系统信号	62
§ 4.3 GLONASS 信号	65
§ 4.4 Galileo 信号	68
第 5 章 卫星测量误差源	72
§ 5.1 卫星测量误差分类	72
§ 5.2 与卫星有关的误差	73
§ 5.3 与信号传播过程有关的误差	75

§ 5.4	与接收机有关的误差	86
§ 5.5	其他误差	88
第 6 章	单点定位	91
§ 6.1	伪距单点定位	91
§ 6.2	精密单点定位	97
第 7 章	基线向量解算	102
§ 7.1	载波相位测量	102
§ 7.2	差分观测值	109
§ 7.3	基线解算双差数学模型	114
§ 7.4	整周模糊度固定	115
第 8 章	基线向量网平差	123
§ 8.1	网平差目的	123
§ 8.2	网平差流程	124
§ 8.3	网平差原理	125
§ 8.4	GNSS 数据处理软件	131
第 9 章	大地水准面精化及应用	143
§ 9.1	大地水准面及高程系统	143
§ 9.2	大地水准面精化	144
§ 9.3	GNSS 水准测量	145
§ 9.4	GNSS 高程异常拟合	146
§ 9.5	高程异常拟合建模实例	148
第 10 章	卫星控制测量实施	151
§ 10.1	基本概念	151
§ 10.2	控制网图形设计	152
§ 10.3	控制测量设计准备	156
§ 10.4	质量控制指标	160
§ 10.5	控制测量实施	163
§ 10.6	控制测量数据处理实例	170
第 11 章	实时动态定位	174
§ 11.1	RTK 测量系统	174
§ 11.2	动态相对定位原理	176
§ 11.3	RTK 测量作业规定	178
§ 11.4	RTK 地形测量案例	182

第 12 章 卫星导航增强技术	187
§ 12.1 卫星增强系统的分类	187
§ 12.2 差分 GNSS 技术	190
§ 12.3 地基增强网络 RTK 技术	199
§ 12.4 增强网络通信协议	212
第 13 章 导航定位技术	217
§ 13.1 概 述	217
§ 13.2 GNSS 导航定位技术	217
§ 13.3 GNSS/INS 组合导航定位技术	219
§ 13.4 室内导航定位技术	230
§ 13.5 导航系统完备性监测	235
第 14 章 GNSS 在传统测绘中的应用	238
§ 14.1 参考框架建设与维持	238
§ 14.2 大地控制测量	239
§ 14.3 工程测量	240
§ 14.4 道路放样应用案例	242
第 15 章 GNSS 在摄影测量中的应用	244
§ 15.1 空中三角测量流程	244
§ 15.2 空中三角测量像控点布设	245
§ 15.3 GNSS 像控点联测	247
§ 15.4 GNSS 辅助空中三角测量	248
§ 15.5 无人机摄影测量案例	248
第 16 章 GNSS 在矿山测量中的应用	250
§ 16.1 矿山测绘基准建设	250
§ 16.2 矿山卫星定位连续运行基准站系统应用案例	251
§ 16.3 矿山开采沉陷监测应用案例	252
第 17 章 GNSS 在地面移动测量系统中的应用	254
§ 17.1 车载移动测量系统	254
§ 17.2 无人驾驶测量系统	255
§ 17.3 车载移动测量系统应用案例	256
第 18 章 GNSS 在地质测量中的应用	259
§ 18.1 地质测量	259
§ 18.2 地质剖面测量案例	260

§ 18.3	矿产勘查测量·····	261
§ 18.4	勘探网布测应用案例·····	262
第 19 章 GNSS 在变形监测中的应用 ·····		265
§ 19.1	高层建筑物监测中的应用·····	265
§ 19.2	大坝变形监测中的应用·····	265
§ 19.3	滑坡监测中的应用·····	267
§ 19.4	桥梁变形监测应用案例·····	268
第 20 章 GNSS 在其他行业的应用 ·····		270
§ 20.1	GNSS 农业测绘应用·····	270
§ 20.2	GNSS 海洋测绘应用·····	271
§ 20.3	GNSS 交通运输应用·····	273
§ 20.4	GNSS 灾害救援应用·····	274
§ 20.5	GNSS 大气监测应用·····	276
§ 20.6	GNSS-R 技术及应用·····	278
§ 20.7	GNSS 地壳运动应用·····	282
§ 20.8	GNSS 精密授时应用·····	283
§ 20.9	GNSS 文化遗址测绘应用·····	284
§ 20.10	GNSS 现代军事应用·····	284
参考文献 ·····		286

第 1 章 概 述

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)是所有导航卫星系统的总称,包括全球的、区域的和相关的增强系统,以及在建的其他导航卫星系统。目前,GNSS 主要包括美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、中国的北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)、俄罗斯的格洛纳斯导航卫星系统(global navigation satellite system, GLONASS)、欧洲的伽利略(Galileo)导航卫星系统、日本的准天顶卫星导航系统(quasi-zenith satellite system, QZSS),以及印度星座导航系统(navigation with Indian constellation, NavIC)等。

GNSS 可为广大用户提供实时、连续、高精度的定位、导航和授时服务,广泛应用于社会公共服务、军事、测绘及科研等领域。目前,它已成为促进社会发展的重要空间基础设施,是体现国家综合实力的重要标志。

本章主要介绍四大导航系统的组成部分。首先介绍 GPS、北斗卫星导航系统、GLONASS 及 Galileo 导航卫星系统的发展、组成、现状及未来的规划,然后简要介绍准天顶卫星导航系统和印度星座导航系统。

§ 1.1 GPS

1.1.1 GPS 的发展

1973 年 12 月,美国国防部批准海陆空三军联合研制新的导航卫星系统——授时与测距导航系统/全球定位系统(navigation satellite timing and ranging/global positioning system, NAVSTAR/GPS),简称 GPS。该系统是以卫星为基础的无线电定位系统,具有全球(陆地、海洋、航空和航天)、全天候、连续和实时的导航、定位和定时功能,可以向全球用户提供连续、实时、高精度的空间位置、三维速度和时间信息。

整个 GPS 发展计划分三个阶段实施:方案论证阶段(1974 年至 1978 年)、系统论证阶段(1979 年至 1987 年)、生产试验阶段(1988 年至 1993 年)。该计划投资超过 200 亿美元,整个系统分为卫星星座、地面控制和监测站、用户接收设备三大部分。第一颗可运行的原型卫星于 1978 年发射。1993 年 7 月,进入轨道可正常工作的 Block I 试验卫星和 Block II、Block II A 型工作卫星的数量已达 24 颗,系统已具备了初步运行能力,GPS 将在此基础上不断完善。1995 年 4 月,GPS 宣布具备完全运行能力。1997 年,美国开始发射 GPS Block II R 卫星。2000 年 5 月 1 日,美国取消了对 GPS 卫星民用信道的选择可用性(selective availability, SA)政策,民用 GPS 的定位精度达到平均 6.2 m 的实用化水平,从而掀起 GPS 产业的应用热潮。自 2005 年开始,美国不断推进 GPS 现代化,扩展二代改进型 GPS 卫星的军事用途。美国将于 2018 年推出第三代卫星导航系统,配备更高性能的 GPS III 卫星,彻底实现军码和民码的分离。第三代 GPS 卫星将提供高达 0.63 m 的定位精度。

1.1.2 GPS 的组成

GPS 由三部分组成:空间端(GPS 卫星星座)、控制端(地面监控系统)及用户端(GPS 信号接收机)。

1. 空间端

GPS 的空间端由向用户端发射无线电信号的卫星星座组成。美国计划发射 24 颗 GPS 卫星,由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成,记作(21+3)GPS 星座,从而确保在 95%的时间内维持 GPS 定位服务。GPS 卫星星座如图 1.1 所示。

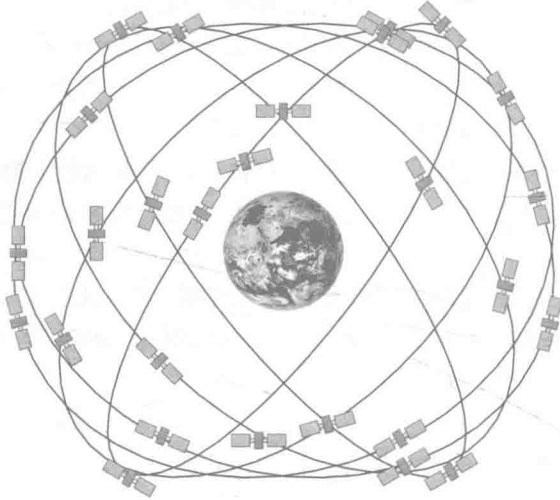


图 1.1 GPS 卫星星座

24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道倾角为 55° ,各个轨道平面之间相距 60° ,即轨道的升交点赤经各相差 60° 。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差 90° ,任一轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30° 。轨道高度约为 20 200 km,运行周期约为 12 小时(717.88 分钟)。对于地面观测者来说,每天将提前 4 分钟见到同 1 颗 GPS 卫星。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而不同,最少可见 4 颗,最多可见 12 颗。在利用 GPS 信号进行导航定位时,为了解算测站的三维坐标,至少需要同时观测 4 颗 GPS 卫星。

GPS 工作卫星重达 1 500 kg,设计寿命为 7.5 年,其核心部件是高精度的时钟、导航电文存储器、双频发射和接收机及微处理机,每颗卫星都以两个 L 波段频率发射无线电载波信号($L_1=1\ 575\ 042\ \text{MHz}$,波长约 19 cm; $L_2=1\ 227.60\ \text{MHz}$,波长约为 24 cm)。在 L 载波上测距用精码(precise code,P 码,码长约为 30 m)和粗码(coarse/acquisition code,C/A 码,码长约为 300 m),P 码专供美国军方和特许用户使用,C/A 码提供民用的标准定位服务。此外,在载波上还调制了 50 bit/s 的数据码和导航电文,内容包括卫星星历、电离层模型系数、状态信息、时间信息、卫星钟偏差及漂移信息等。

GPS 卫星可分为试验卫星(Block I)和工作卫星两类,其中,工作卫星又可分为 Block II、Block II A、Block II R 和 Block II F 等类型(图 1.2)。目前,GPS 在轨正常运行卫星有 31 颗(2016 年 3 月 16 日状态如表 1.1 所示),包括 Block II R 型卫星 12 颗、Block II R-M 型卫星

7 颗、Block II F 型卫星 12 颗。

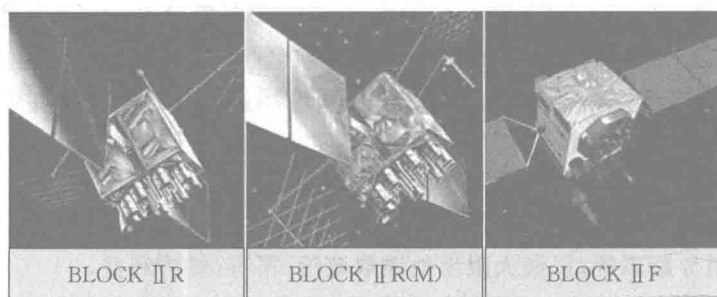


图 1.2 GPS 工作卫星

表 1.1 GPS 当前星座卫星发射日期和型号(2016 年 3 月 16 日状态)

发射日期	型号	卫星号	发射日期	型号	卫星号	发射日期	型号	卫星号
1997.07.23	II R	13	2004.11.06	II R	2	2013.05.15	II F	27
1999.10.07	II R	11	2005.09.26	II R-M	17	2014.02.21	II F	30
2000.05.11	II R	20	2006.09.25	II R-M	31	2014.05.17	II F	6
2000.07.16	II R	28	2006.11.17	II R-M	12	2014.08.02	II F	9
2000.11.10	II R	14	2007.10.17	II R-M	15	2014.10.29	II F	3
2001.01.30	II R	18	2007.12.20	II R-M	29	2015.03.25	II F	26
2003.01.29	II R	16	2008.03.15	II R-M	7	2015.07.15	II F	8
2003.03.31	II R	21	2009.08.17	II R-M	5	2015.10.30	II F	10
2003.12.21	II R	22	2010.05.28	II F	25	2016.02.05	II F	32
2004.03.20	II R	19	2011.07.16	II F	1			
2004.06.23	II R	23	2012.10.04	II F	24			

2. 控制端

GPS 的控制端是指支持整个 GPS 正常运行的地面监控系统,包括 1 个主控站、1 个备用主控站、11 个注入站、15 个监测站及通信和辅助系统。

监测站是无人值守的数据自动采集中心,其主要任务是对视场中的各 GPS 卫星进行伪距测量,通过气象传感器自动测定并记录气温、气压、相对湿度(水汽压)等气象元素,对伪距观测值进行改正后再进行编辑、平滑和压缩,然后传送给主控站。

主控站设在美国本土科罗拉多斯普林斯,其主要任务是收集、处理本站和监测站收到的全部资料,编算每颗卫星的星历和 GPS 时间系统,将预测的卫星星历、钟差、状态数据及大气传播改正编制成导航电文传送到注入站。同时,还负责纠正卫星的轨道偏离,必要时调度卫星,让备用卫星取代失效的工作卫星等。

注入站主要向 GPS 卫星输入导航电文和发送其他信号,其功能是将主控站发来的导航电文注入相应卫星的存储器。同时,可以向主控站发射信号,每分钟报告一次自己的工作状态。

3. 用户端

GPS 的用户端是指 GPS 信号接收机,它是能接收、处理、量测 GPS 卫星信号以进行导航、定位、定轨、授时等多项工作的仪器设备。GPS 接收机由带前置放大器的接收天线、信号处理设备、输入输出设备、电源和微处理器等部件组成。

GPS 接收机能够捕捉按一定卫星截止高度角所选择的待测卫星的信号,并跟踪这些卫星

的运行,对所接收的 GPS 信号进行变换、放大和处理,以便测出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间,解译 GPS 卫星所发送的导航电文,实时地计算测站的三维位置,甚至是三维速度和时间。根据用途的不同,GPS 接收机可分为导航型接收机、测量型接收机、授时型接收机等,按接收的卫星信号频率数,可分为单频接收机和双频接收机。

1.1.3 GPS 的现状

卫星导航系统在军事、民用的各个领域正发挥着越来越大的作用,世界各发达国家都在积极发展自己的卫星导航系统,以最大限度地谋取政治、军事、经济利益。

为了与正在筹建中的 Galileo 系统争夺市场,确保 GPS 在卫星导航领域的霸主地位,使 GPS 更好地满足军事、民间和商业用户不断增长的应用需求,美国决定用先进技术改进和完善 GPS 推出了 GPS 现代化的计划。

1. 研制新一代卫星、构建新型星座布局

尽管 GPS II 在导航信号精度、完好性、可监测性、抗干扰性能等方面获得了空前成功,但是其系统结构框架源于 20 世纪七八十年代的规划设计和技术基础,无法满足未来军事、民用和商业用户的更高要求。GPS III 代表着 GPS 现代化计划的最高水平,将采用全新的设计方案,融合配置各种技术资源,并具有向后技术兼容能力,以满足未来系统的技术扩展和用户的需求。同时,GPS III 还将提供新任务型服务(点波束),并大大提高现代化的任务型服务及密钥管理。军事用户可以与控制段交互提出特定的 GPS 服务。

未来 GPS III 的星座将是高椭圆轨道(highly elliptical orbit, HEO)卫星和地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星相结合的新型 GPS 高椭圆轨道混合星座,由 33 颗卫星组成,整个星座计划将用近 20 年的时间完成。

2. 增加民用信号

现行的 GPS 导航信号采用码分多址(code division multiple access, CDMA)体制和四相移相键控(quadrature phase shift keying, QPSK)调制方法,以实现军、民测距码在同一载波频率上复用。虽然该方法具有占用频带较窄、扩频增益高等特点,却给导航站的实施带来相当大的困难。

GPS II F 卫星中新增加了 L5(1 176.45 MHz)民用导航信号,并采用了军码直捕等一系列措施,但至今尚未达到军用信号不影响民用信号的要求。2003 年起发射的 GPS II R-M 卫星在 L2C 频点(1 227.6 MHz)上增加了新的民用导航 W 信号 L2M,但该码至今未向民用用户解密。未来的 GPS III 还将提供第 4 个民用信号 L1C。由此可见,美国对于军民信号互扰问题在做持续的努力。

3. 改进军码加密技术

GPS 初始阶段的 P 码经过加扰后变为 Y 码(encrypted P-code),而后又独立为 M 码(military code, L1M 和 L2M),具有较强的抗干扰能力,以及较强的保密性能。M 码信号采用二进制偏移载波调制技术,将信号功率调制到载波频率两侧的旁瓣上,实现频段公用基础上的频谱分离。不仅如此,新的 M 码信号将在已有二进制偏移载波调制技术的基础上,增设时分数据调制方式,完成对基带信号导航数据电文的扩频处理。

相较于早期的 GPS I 和 GPS II 卫星,Block II R-M 型卫星不但有广角(面向全球)天线,可以用于美国军用全球导航,还有高增益的方向性天线,可以向特定方向强化播发 M 码信号。

2013年6月,美军对接收M码的GPS接收机进行了测试,利用M码信号首次成功实现实时导航,标志着美军向“将下一代M码技术应用于所有美军平台”的目标迈出了关键一步。

4. 提升自主导航能力

目前,GPS采用地面定轨模式,其致命缺陷在于一旦地面站被摧毁,则预报期过后整个导航卫星系统将陷于崩溃。鉴于此,美国军方提出了GPS卫星自主导航的概念。

新型GPS II R卫星增加了维持180天上自主工作的时间保持系统,提升了自主导航及卫星空间程序可改编性能,实现了星上自主更新星历、星钟校正及工作的飞行软件重新编程等功能。

5. 发展星间链路技术

导航星座的星间链路承担着辅助地面精密定轨、增加星历注入频度、增强卫星测控管理和支持卫星自主运行等多种功能。自Block II R卫星安装了具有自主导航功能的星间链路收发设备起, GPS成了目前自主导航星座中唯一实现星间链路的系统。特高频(ultrahigh frequency, UHF)(250~290 MHz)频段星间链路采用了时分多址和扩频体制,能够进行双频测距和通信,但其发展十分受限。一方面,特高频频段星间链路的数据速率较低,且宽波束的星间链路抗干扰能力难以提升;另一方面, GPS所选择的特高频频段不是国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)分配给星间链路使用的合法频段,其单个阵元发射的宽波束星间链路会对地面特高频频段合法用户存在干扰。因此,美国计划在GPS III上装载中高频率窄波束(Ka频段)星间链路,替代特高频频段星间链路,从而提高星间数据通信容量,增强抗干扰能力。

6. 改造备份主控站

在信息化战争下,主控站可能面临多样卫星故障、多种毁伤途径、多类破坏效应。建设备份主控站可以预防自然灾害、战时打击及运行故障。

目前, GPS的控制端包括主控站、备份主控站、监测站、国家地理空间情报局跟踪站。GPS现代化计划完成后,将由位于科罗拉多斯普林斯的新主控站接替当前主控站,并由位于范登堡空间基地的备份主控站接替当前备份主控站。新主控站的设计建造理念源于体系演进计划,该计划将于新主控站正式运行之前完成。

新主控站在功能上等同于旧主控站,在旧主控站故障时新主控站进行接管,并且在接口控制文件中不区分新旧主控站。这预示着新主控站将是旧主控站的全功能完整备份,且各方面更加完善。

1.1.4 GPS的相关政策

伴随着国际和国内形势的巨大变化,美国政府不断地调整GPS政策,最大限度地维护自己国家的利益。GPS卫星发射的无线电信号含有两种精度不同的测距码,即P码和C/A码。对于两种测距码, 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)。

美国政府对标准定位服务采用明码广播,任何用户都能使用。对精密定位服务进行加密,供美国及其授权用户使用。为了防止未经许可的用户将GPS用于军事目的(进行高精度实时动态定位),美国政府在1989年11月至1990年9月,进行选择可用性和反电子欺骗(anti-spoofing, AS)技术的试验,并于1991年7月开始实施。

1. 选择可用性技术

选择可用性技术指人为地将误差引入卫星钟和卫星数据,故意降低 GPS 定位精度。主要技术手段为:①在卫星的广播星历中人为地加入误差,以降低卫星星历的精度,这就是所谓的 ϵ 技术;②有意识地使卫星钟频产生一种快速的抖动,以降低钟的稳定性,从而影响导航定位的精度,即 δ 技术。2000 年 5 月,美国政府取消了限制民用精度的选择可用性政策,仅在个别卫星上实施选择可用性技术。

2. 反电子欺骗技术

反电子欺骗技术的具体方法是将 P 码和保密的 W 码相加形成 Y 码,非授权用户无法接收 P 码,无法进行精密导航定位,这项技术只在特殊情况下使用。

§ 1.2 北斗卫星导航系统

1.2.1 北斗卫星导航系统的发展

北斗卫星导航系统是我国正在实施的、自主研发的、独立运行的导航卫星系统,其目标是在全球范围内全天候、全天时地为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务。与 GPS 不同的是,它还兼具短报文通信能力。

北斗卫星导航系统建设在根据“质量、安全、应用、效益”的总要求和坚持“自主、开放、兼容、渐进”的发展原则下,按照国家制定的“三步走”发展战略稳步推进,总体发展遵循“先区域、后全球”的思路。

(1)推动北斗卫星导航试验系统建设。中国于 1994 年正式启动建设北斗卫星导航试验系统;2000 年,发射 2 颗北斗导航试验卫星,标志试验系统初步建成;2003 年,发射第 3 颗北斗导航试验卫星,从而进一步增强北斗卫星导航试验系统性能。

(2)提供北斗卫星导航系统区域服务。在北斗卫星导航试验系统的基础上,2004 年启动了北斗卫星导航系统工程建设,并于 2007 年 4 月 14 日成功发射第一颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)组网卫星,标志着我国自主研发的北斗卫星导航系统迎来新的发展阶段。至 2012 年底,已部署完成了由 5 颗地球静止轨道卫星、5 颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星(2 颗在轨备份)和 4 颗中圆地球轨道卫星组成的区域星座,初步具备了区域服务能力。

(3)2020 年前后北斗卫星导航系统将全面建成,并具备全球服务能力。北斗卫星导航系统除了保留试验系统的有源定位、双向授时和短报文通信等服务功能外,于 2011 年 12 月 27 日起又增加了向我国及周边区域提供无源定位、导航和授时等运行服务,并从 2012 年 12 月 27 日开始正式提供区域服务。我国首颗用于全球组网的新一代北斗导航卫星于 2015 年 3 月 30 日正式发射升空,以此标志着北斗卫星导航系统由区域运行向全球拓展;2016 年 2 月 1 日,第 5 颗新一代北斗导航卫星也顺利入轨,它将与先期发射的 4 颗新一代北斗导航卫星共同展开新型导航信号体制、星间链路和新型原子钟等国产自主可控设备试验的工作。根据制定的北斗卫星导航系统全球组网建设计划,北斗卫星导航系统将于 2018 年开始为“一带一路”沿线国家提供全球初始服务。

北斗卫星导航系统采用码分多址扩频通信体制,区域星座卫星在 B1(1 561.098 MHz)、

B2(1 207.14 MHz)和 B3(1 268.52 MHz)三个频点播发卫星导航信号。北斗卫星导航系统的卫星发射情况如表 1.2 所示(中圆地球轨道/中圆地球轨道代表同时发射两颗中圆地球轨道卫星)。

表 1.2 北斗卫星导航系统卫星发射日期

北斗导航试验卫星			北斗导航卫星					
发射日期	类型	完好性	发射日期	类型	完好性	发射日期	类型	完好性
2000.10.31	地球静止轨道	停止	2007.04.14	中圆地球轨道	正常	2012.02.25	地球静止轨道	正常
2000.12.21	地球静止轨道	停止	2009.04.15	地球静止轨道	停止	2012.04.30	中圆地球轨道/ 中圆地球轨道	正常
2003.05.25	地球静止轨道	正常	2010.01.17	地球静止轨道	正常	2012.09.19	中圆地球轨道/ 中圆地球轨道	正常
2007.02.03	地球静止轨道	停止	2010.06.02	地球静止轨道	正常	2012.10.25	地球静止轨道	正常
			2010.08.01	倾斜地球同步轨道	正常	2015.03.30	倾斜地球同步轨道	正常
			2010.11.01	地球静止轨道	正常	2015.07.25	中圆地球轨道/ 中圆地球轨道	正常
			2010.12.18	倾斜地球同步轨道	正常	2015.09.30	倾斜地球同步轨道	正常
			2011.04.10	倾斜地球同步轨道	正常	2016.02.01	中圆地球轨道	正常
			2011.07.27	倾斜地球同步轨道	正常	2016.03.30	倾斜地球同步轨道	正常
			2011.12.02	倾斜地球同步轨道	正常	2016.06.12	地球静止轨道	正常

1.2.2 北斗卫星导航系统的组成

北斗卫星导航系统同样由三部分组成,即空间端(北斗卫星星座)、控制端(地面监控系统)和用户端(信号接收终端)。

1. 空间端

北斗卫星导航系统的空间端是指北斗卫星导航系统的卫星星座。北斗卫星导航系统空间段计划组网完成之后由 5 颗地球静止轨道卫星和 30 颗非地球静止轨道(Non-GEO)卫星组成。地球静止轨道卫星分别定点于东经 58.75°、8°、110.5°、140°和 160°。非地球静止轨道卫星由 27 颗中圆地球轨道卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道卫星组成。其中,中圆地球轨道卫星轨道高度为 21 500 km,轨道倾角为 55°,均匀分布在 3 个轨道面上;倾斜地球同步轨道卫星轨道高度为 36 000 km,轨道倾角为 55°,3 颗倾斜地球同步轨道卫星星下点轨迹重合,均匀分布在 3 个轨道面上,交叉点经度为东经 118°,相位差 120°。在实际发射组网过程中,为提高定位精度和全球定位能力,增加了各类卫星的发射数量。截止到 2016 年 6 月,北斗卫星导航系统星座已有 6 颗地球静止轨道卫星、6 颗中圆地球轨道卫星和 8 颗倾斜地球同步轨道卫星,设计如图 1.3 所示。

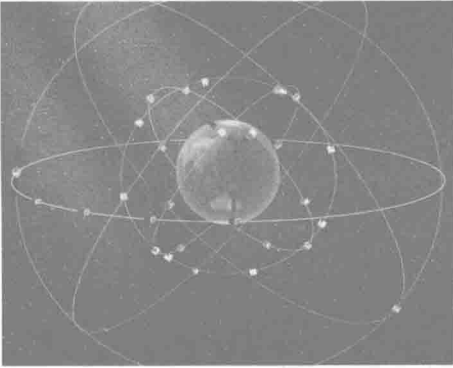


图 1.3 北斗卫星星座

北斗卫星有三种频率的卫星信号,分别为 B1、B2、B3。B1 信号和 B2 信号分别由 I、Q 两个支路的导航电文和伪随机噪声 (pseudo-random noise, PRN) 码对载波进行正交调制构成。其中, B1I、B1Q 信号的载波频率为 1 561. 098 MHz, B2I、B2Q 信号的载波频率为 1 207. 140 MHz, B3 信号的载波频率为 1 268. 52 MHz。B1I、B1Q 和 B2I 信号的码率均为 2. 046 MHz, 码长均为 2 046, B2Q 信号的码率为 10. 23 MHz, B3 信号的码率为 10. 23 MHz, B1-2I 和 B1-2Q 信号的码率均为 2. 046 MHz。

北斗卫星发射的信号均是利用四相移相键控调制的方式对载波进行调制的。

2. 控制端

北斗卫星导航系统的控制端由若干主控站、注入站和监测站组成。主控站的主要任务包括收集各注入站、监测站的观测数据,进行数据处理,生成卫星导航电文,向卫星注入导航电文参数,监测卫星有效载荷,完成任务规划与调度,实现系统运行控制与管理等;注入站的主要任务是在主控站的统一调度下,完成卫星导航电文参数注入、与主控站的数据交换、时间同步测量等任务;监测站的主要任务是对导航卫星进行连续跟踪监测,接收导航信号,发送给主控站,为导航电文生成提供观测数据。

3. 用户端

北斗卫星导航系统的用户端指各类北斗用户终端,包括与其他导航卫星系统兼容的终端,以满足不同领域和行业的应用需求。主要类型包括:①普通型,定位和点对点的通信,适用于一般车辆、船舶及便携等用户的定位导航应用,可接收和发送定位及通信信息,与中心站及其他用户终端进行双向通信;②通信型,适用于野外作业、水文测量、环境检测等各类数据采集和数据传输等应用,可接收和发送短信息、报文,与中心站和其他用户终端进行双向或单向通信;③授时型,适用于授时、校时、时间同步等应用,可提供数十纳秒级的时间同步精度;④指挥型,供拥有一定数量用户的上级集团管理部门使用,除具有普通用户机所具有的功能外,还能够播发和接收中心控制系统发给所属用户的定位通信信息;⑤多模型用户机,既能接收北斗卫星定位和通信信息,又可利用 GPS 或 GPS 增强系统进行导航定位,适用于对位置信息要求比较高的用户。

1. 2. 3 BDS 系统的现状

北斗卫星导航系统应用具有以下五大优势:

- (1) 同时具备定位和通信功能,不需要其他通信系统支持。
- (2) 融合北斗导航定位系统和卫星导航增强系统两大资源,提供更丰富的增值服务。
- (3) 覆盖中国及周边国家和地区,全天候服务,无通信盲区。
- (4) 定位解算都集中在地面控制中心站,特别适用于大范围移动监控与管理自主系统。
- (5) 高强度加密设计,安全、可靠、稳定,适用于关键部门。

自北斗卫星导航系统提供服务以来,我国卫星导航应用在理论研究、应用技术研发、接收机制造及应用与服务等方面取得了长足的进步。随着北斗卫星导航系统的建设和服务能力的