

前言

全球卫星导航系统是中国北斗卫星导航系统、美国 GPS、欧洲 GALILEO、俄罗斯 GLONASS 等全球性卫星系统和日本 QZSS 等区域性卫星系统和其他增强性卫星系统的统称。GNSS 提供的定位导航授时服务,已成为支撑社会经济、保障国家安全和推动科技进步的重要时空底座。

全球卫星导航技术是导航技术的重要分支,是一门学科高度融合交叉的综合技术。它融合了数学、物理、电子、通信、计算机等众多学科的知识,为海、陆、空、天各载体顺利完成导航任务提供了重要保障。

本教材内容起源于袁信、俞济祥、陈哲三位教授编著的《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),丰富于曾庆化教授主编的《全球导航卫星系统》(2014 年版),结合了南京航空航天大学导航研究中心团队开展的本科生及研究生国际化培养教学中的系列实践经验,同时及时吸纳了教学和科研团队在卫星导航相关领域的研究成果。

本教材旨在为学生提供全面、系统的全球卫星导航原理与应用指南。在编写过程中,充分考虑了学生的知识背景和学习特点,将复杂的理论知识用深入浅出的方式呈现,使学生能够更好地理解和掌握全球卫星导航系统的原理技术、实现方法和应用领域。

本教材共 7 章,每章主要内容如下:

第 1 章,全球卫星导航系统概述:介绍了全球卫星导航系统的概念和基本组成,简要介绍了我国北斗卫星导航系统、美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧洲伽利略卫星导航系统,以及日本、印度等区域增强系统的发展与现状。

第 2 章,GNSS 坐标系及运动基础知识:针对全球卫星导航系统所涉及的基础知识,重点介绍了时、空坐标系及不同坐标系间的转换,介绍了卫星运动理论与卫星位置、速度的解算方法。

第 3 章,GNSS 信号构成及接收:聚焦导航信息的获取思路,从整体到个体介绍了卫星导航信号的构成与特点,并介绍了接收机对卫星信号的处理流程。

第4章,观测量及观测量处理:对全球卫星导航系统观测量细节及其误差影响因素进行介绍,并对观测量的组合进行阐述。

第5章,GNSS 导航解算原理:介绍了利用卫星导航观测量实现载体定位、测速、定向、测姿与授时的基本原理,为精确描述载体运动状态,实现时空定位与导航功能奠定基础。

第6章,GNSS 增强技术:介绍了差分定位原理、完好性监测技术、伪卫星增强技术、惯性组合导航技术等多种类型的全球卫星导航增强技术,极大地拓展了卫星导航系统的应用范围。

第7章,GNSS 的各类应用:介绍了全球卫星导航系统的代表性应用,包括军事、民航、航海、交通、电力、大地测量及其他领域应用情况。

希望通过本教材的学习,学生能够理解北斗精神,掌握全球卫星导航系统的基本理论和技术方法,培养创新思维和实践能力,为今后从事相关领域的研究工作打下坚实的基础。相信在全球卫星导航技术的推动下,人类将能够更好地探索未知、创造未来。

在编写本教材过程中,我们得到了许多专家、同行以及导航研究中心师生的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。同时,非常感谢出版社的编辑为教材出版付出的辛勤劳动。由于全球卫星导航技术发展极其迅速,教材难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2025 年 1 月

目 录

第 1 章 全球卫星导航系统概述	1
1.1 GNSS	1
1.1.1 什么是“GNSS”	1
1.1.2 GNSS 系统结构	3
1.2 北斗卫星导航系统	6
1.2.1 北斗卫星导航系统的发展	6
1.2.2 北斗卫星导航系统组成	7
1.2.3 北斗卫星导航系统服务	8
1.3 其他全球卫星导航系统概况	11
1.3.1 美国 GPS 概况	11
1.3.2 GLONASS 概况	14
1.3.3 欧洲伽利略卫星导航系统概况	16
1.4 其他重要的区域卫星增强/导航系统	18
1.4.1 日本准天顶卫星系统	18
1.4.2 印度区域卫星导航系统 (NAVIC/IRNSS)	20
思考题	22
第 2 章 GNSS 坐标系及运动基础知识	23
2.1 空间坐标系及其变换	23
2.1.1 常用天球坐标系	23
2.1.2 常用地球坐标系	24
2.1.3 其他常用坐标系	27
2.1.4 空间坐标系的变换	28
2.2 时间坐标系及其转换	33
2.2.1 恒星时、太阳时、世界时	33
2.2.2 国际原子时、协调世界时、GNSS 系统时	34
2.2.3 地球时	37
2.2.4 时间系统间的变换	37

2.3	GNSS 卫星运动	38
2.3.1	卫星无摄运动	38
2.3.2	卫星受摄运动	41
2.4	卫星位置与速度计算	43
2.4.1	卫星瞬时位置的求解	43
2.4.2	卫星的运行速度	47
	思考题	48
第3章	GNSS 信号构成及接收	49
3.1	GNSS 信号构成概述	49
3.1.1	导航电文与编码	49
3.1.2	伪随机码序列与扩频调制	50
3.1.3	载波与载波调制	56
3.2	GPS 信号结构	59
3.2.1	GPS L1 C/A 信号	59
3.2.2	GPS 其他信号	62
3.3	北斗卫星导航系统的信号结构	64
3.3.1	北斗 B1I 信号	65
3.3.2	北斗 B1C 信号	70
3.3.3	其他北斗卫星信号	71
3.4	其他 GNSS 信号结构	73
3.4.1	GLONASS 信号结构	73
3.4.2	伽利略信号结构	75
3.5	卫星导航接收机对卫星信号的处理	77
3.5.1	接收机组成及信号处理流程	77
3.5.2	GNSS 信号的捕获	79
3.5.3	GNSS 信号的跟踪	82
	思考题	84
第4章	观测量及观测量处理	86
4.1	伪距观测量	86
4.1.1	伪距观测量的提取	87
4.1.2	伪距观测方程	88
4.2	载波相位观测量	89
4.2.1	载波相位观测量的提取	90
4.2.2	载波相位观测量模型	91

4.2.3 周跳探测及整周模糊度固定	91
4.3 多普勒频率观测量	94
4.4 GNSS 观测量误差	95
4.4.1 与卫星有关的误差	96
4.4.2 与卫星信号传播有关的误差	98
4.4.3 与接收设备有关的误差	106
4.4.4 其他误差	107
4.5 观测量的数据组合	108
4.5.1 单频观测量载波相位-伪距组合	108
4.5.2 不同频伪距/载波相位观测量组合	110
4.5.3 组合算法与未组合算法的等价性说明	113
思考题	113
第5章 GNSS 导航解算原理	114
5.1 GNSS 定位原理	114
5.1.1 GNSS 定位基本原理	115
5.1.2 单星座单频伪距单点定位算法	116
5.1.3 多星座联合伪距单点定位算法	121
5.1.4 相对定位算法	123
5.2 GNSS 测速原理	127
5.2.1 平均速度法	127
5.2.2 多普勒频移测速法	127
5.3 GNSS 定向、测姿原理	129
5.3.1 单天线测姿原理	130
5.3.2 多天线测姿原理	132
5.4 GNSS 授时原理	134
5.4.1 RNSS 授时	134
5.4.2 RDSS 授时	136
5.4.3 各种测时方法精度比较分析	138
思考题	139
第6章 GNSS 增强技术	140
6.1 GNSS 定位性能评价	140
6.2 GNSS 差分定位原理	143
6.2.1 位置差分定位	144
6.2.2 伪距差分定位	145

6.2.3	载波相位差分定位	146
6.2.4	网络 RTK 技术与连续运行参考站系统	146
6.3	GNSS 完好性监测技术	149
6.3.1	完好性监测分类	149
6.3.2	接收机自主完好性监测 (RAIM)	150
6.4	伪卫星增强技术	154
6.4.1	伪卫星技术分类	154
6.4.2	伪卫星技术特点	156
6.4.3	伪卫星信号结构及其发射强度分析	156
6.4.4	伪卫星增强技术相关问题	157
6.5	GNSS/惯性组合导航技术	159
6.5.1	GNSS/惯性松组合	159
6.5.2	GNSS/惯性紧组合	160
6.5.3	GNSS/惯性深组合(超紧组合)	161
6.6	GNSS 增强系统	163
6.6.1	星基增强系统	163
6.6.2	地基增强系统	165
6.6.3	低轨导航增强系统	167
	思考题	169
第 7 章	GNSS 的各类应用	170
7.1	GNSS 在军事方面的应用	170
7.2	GNSS 在民航中的应用	171
7.3	GNSS 在航海中的应用	172
7.4	GNSS 在车辆交通系统中的应用	174
7.5	GNSS 在电力系统中的应用	175
7.6	GNSS 在大地测量方面的应用	176
7.7	GNSS 在其他领域的应用	178
7.7.1	GNSS 在农、林、牧、渔业中的应用	178
7.7.2	GNSS 在气象服务领域的应用	180
	思考题	181
	主要参考文献	182

“导航”是获取运动物体的位置、速度、姿态等状态参数的过程。指南车、记里鼓车、指南针、牵星板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。现代全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)^①的出现和使用对于提高载体的导航精度,保障载体/人员的安全起到了重要作用,促进了导航技术及其精度的跨越式发展。

1.1 GNSS

如今,全球卫星导航系统(GNSS)不仅在军用领域大放异彩,在日常生活也随处可见它的身影,从点外卖、无人机表演、自动驾驶智能车,到智能电网、智慧城市无一不需要全球卫星导航系统提供精确的位置、速度与时间信息。GNSS 作为重大空间和信息化基础设施与战略威慑基础资源,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 and 国家公共安全的重大技术支撑系统。由于具有广泛的产业关联度,并与通信产业具有固有的融合度,GNSS 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。

1.1.1 什么是“GNSS”

全球卫星导航系统是一个能在地球表面或近地空间的任何地点为其用户提供全天候、全天时的精确三维位置、速度及时间(position, velocity and timing, PVT)信息的天基无线电定位系统。

从狭义上讲,全球卫星导航系统(GNSS)能够在全球范围内提供时间/空间基准以及与定位有关的实时信息,具体包括美国全球定位系统(global positioning system, GPS)、俄罗斯格洛纳斯导航卫星系统(global navigation satellite system, GLONASS)、中国北斗卫星

^① 全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS),直译也称全球导航卫星系统。

导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 与欧洲伽利略导航卫星系统 (Galileo navigation satellite system, GALILEO)。

随着卫星导航技术以及增强技术的发展,及其对国家安全等领域与日俱增的重要性,全球主要经济体竞相发展其独立自主的卫星导航系统,包括区域卫星导航系统和增强系统,这使得 GNSS 的范畴不断扩大。

从广义上讲,除全球性的四大卫星导航系统外,GNSS 还包括区域卫星导航系统和增强系统。例如,区域卫星增强系统——日本准天顶卫星系统 (Quasi-Zenith satellite system, QZSS) 用于增加日本本土可见导航卫星数量,区域卫星导航系统——印度区域导航卫星系统 (navigation Indian constellation/Indian regional navigation satellite system, NAVIC/IRNSS)^① 为印度本土及周边大约 1 500 km 范围内的区域提供导航服务。增强系统通过地球静止同步轨道卫星或地面设施播发导航增强信息,前者形成星基增强系统,后者形成地基增强系统。主要的星基增强系统如美国广域增强系统 (wide area augmentation system, WAAS)、欧洲地球静止导航重叠服务 (European geostationary navigation overlay service, EGNOS)、俄罗斯差分校正与监测系统 (system for differential correction and monitoring, SDCM) 等。地基增强系统服务范围较为灵活,可以服务一个国家,也可只服务一个城市,国家级别的地基增强系统如美国区域增强系统 (local area augmentation system, LAAS) 和全国差分全球定位系统 (nationwide differential global positioning system, NDGPS)。表 1-1 列出了目前部分卫星导航系统与星基、地基增强系统及其所属国家。我国的北斗卫星导航系统自身具有星基增强与地基增强服务。本书主要围绕四大全球卫星导航系统展开,为减少歧义,GNSS 一般指全球性的卫星导航系统,对于区域导航系统以及增强系统会在独立章节进行介绍。

表 1-1 卫星导航系统与星基、地基增强系统及其所属国家 (部分)

国家/地区	全球卫星导航系统	区域卫星导航 (增强) 系统	星基增强系统	地基增强系统
中国	北斗卫星导航系统 (BDS)		卫星导航增强系统 (satellite navigation augmentation system, SNAS)、BDS	BDS
美国	全球定位系统 (GPS)		广域增强系统 (WAAS)	区域增强系统 (LAAS)、全国差分全球定位系统 (NDGPS)
俄罗斯	格洛纳斯导航卫星系统 (GLONASS)		差分校正与监测系统 (SDCM)	LCCS-A-2000
欧洲	伽利略导航卫星系统 (GALILEO)		欧洲地球静止导航重叠服务 (EGNOS)	

^① 印度区域导航卫星系统英文名称从 IRNSS 改为 NAVIC,但中文名称并未对应修改,为阅读方便 NAVIC 与 IRNSS 均表示印度区域导航卫星系统。

续 表

国家/地区	全球卫星导航系统	区域卫星导航(增强)系统	星基增强系统	地基增强系统
日本		准天顶卫星系统(QZSS)	多功能卫星增强系统 (multi-functional satellite augmentation system, MSAS)	
印度		区域卫星导航系统(NAVIC)	GPS 辅助型静地轨道增强导航 (GPS - aided GEO augmented navigation, GAGAN)	
韩国			韩国卫星导航增强系统(Korea augmentation satellite system, KASS)	
加拿大			加拿大广域增强系统(Canadian wide area augmentation system, CWAAS)	
澳大利亚			南方定位增强网络 (southern positioning augmentation network, SouthPAN)	
南美			加勒比、中美洲和南美洲增强服务	
非洲			星基增强系统 (satellite based augmentation systems, SBAS)	

1.1.2 GNSS 系统结构

全球卫星导航系统需要有相应的设施与设备实现三边测量法,虽然不同的卫星导航系统在系统结构的名称上和划分上有所差别,但大致都可以分为三个部分:空间段、地面控制段和用户段。这三个部分有机整合、共同作用,实现用户的三维定位、测速、授时等功能。图 1 - 1 为全球卫星导航系统基本组成结构的示意图。

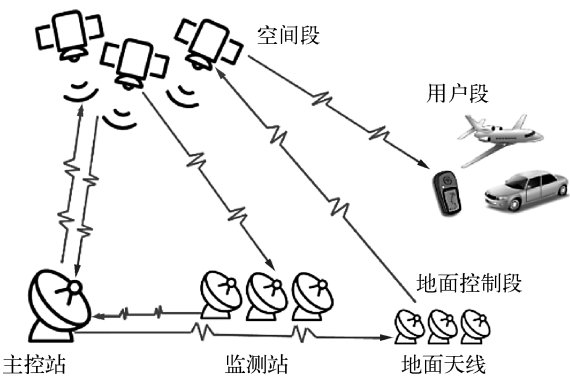


图 1 - 1 全球卫星导航系统基本组成结构示意图

1. 空间段

卫星导航系统的空间段由导航卫星构成。与其他卫星类似,每颗导航卫星都包括通用平台与有效载荷两部分。通用平台用于维持卫星在轨的基本操作,是任何一种卫星均

需要配备的系统。一般地,通用平台又细分为电源部分、姿态与速度控制部分、遥测跟踪与指令部分、温控部分、结构部分和推进部分六个部分;而有效载荷则是根据卫星的功能而专门搭载的具有某种任务功能的系统,若卫星具有多种功能,相应地需要搭载多个有效载荷。导航卫星基本组成及功能如表 1-2 所示。

表 1-2 导航卫星基本组成及功能

平台	名 称	组成及功能
通用平台	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
	姿态与速度控制部分	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
	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
	温控部分	由百叶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
	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
有效载荷	反作用控制变轨发动机(推进)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
	导航部分	由微处理机、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,为导航系统测量提供同步时间,协调卫星和地面站的工作

卫星导航系统若要实现用户端的定位,需要用户同时可以观测到足够数量的卫星,因此每个卫星导航系统都需要有足够多的卫星,这些卫星按照一定的规则分布构成导航卫星网,即空间星座,覆盖全球范围,确保地面用户在任意时间、任意地点都可以观察到足够的卫星。GPS、GLONASS、GALILEO 和北斗卫星导航系统卫星星座虽然有所差别、各有特点,但均需要满足覆盖全球,保证观测的基本要求。

2. 地面控制段

卫星在远离地面的宇宙空间运行,工作环境极为恶劣,发生故障的概率很大;此外,卫星并非飞行在真空中,仍受稀薄的空气阻力、地球引力等外部影响,其飞行轨道可能会发生改变。因此在卫星工作寿命的全过程里,都需要对卫星的工作状态和飞行状态进行跟踪,并控制卫星做各种调整,这就需要借助地面系统完成。

全球卫星导航系统的地面控制段主要工作可以概括为跟踪、测量和预报卫星轨道并对卫星上设备工作进行控制管理,通常包括跟踪站、遥测站、计算中心、注入站及时间统一系统部分。跟踪站用于跟踪和测量卫星的位置坐标。遥测站接收卫星发来的遥测数据,以供地面监视和分析卫星上设备的工作情况。计算中心根据这些信息计算卫星的轨道,预报下一段时间内的轨道参数,确定需要传输给卫星的导航信息,并由注入站向卫星发送。

3. 用户段

用户段一般指用户设备,即 GNSS 接收机,主要任务是接收 GNSS 卫星发射的信号,获得必要的导航/定位解算模型参数,以及观测量信息,并经微处理器处理上述信息求解位置等导航参数。接收机硬件构成包含天线、信号与数据处理单元、显示装置与存储单元等输出设备,以及电源模块,如图 1-2 所示。

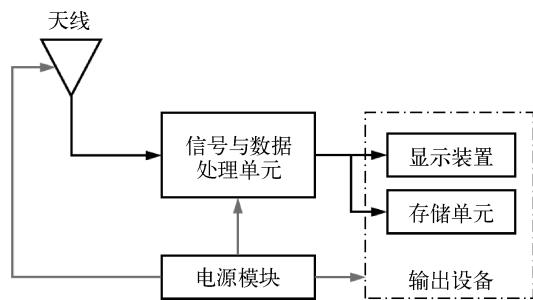


图 1-2 GNSS 接收机基本硬件构成

- (1) 天线: 天线是接收机的输入设备和信号采集单元,用于接收 GPS 卫星信号,要求灵敏度高和抗干扰性能强,一般为密封一体的天线及前置放大器。
- (2) 信号与数据处理单元: 接收来自天线的信号,经过中频放大,滤波和信号处理,实现对信号的跟踪、锁定、测量,由跟踪环路重建载波解码得到广播电文并获得伪距信息,继而求解出位置、速度、时间结果,由硬件和软件组成,是接收机的核心单元。
- (3) 输出设备: 以显示装置与存储单元为典型代表。显示装置可以提供屏幕便于接收机显示自检以及三维坐标、速度等信息,也可显示人机对话过程,便于对接收机进行人工设置和控制。存储单元主要有 GPS 接收机的内存硬盘或记录卡等,记录 GPS 接收机的解算结果以及相关的导航参量。
- (4) 电源模块: 为 GPS 接收机各个功能模块提供正常工作的直流供电,可以采用锂电池,亦可外接蓄电池或其他供电模块。



图 1-3 测量型、车载导航型及手持 GNSS 接收机

GNSS 接收机应用领域和方式极其广泛。按授权情况,分为军用接收机与民用接收机。按用途可以分为导航型接收机、测量型接收机和授时型接收机。导航型接收机主要为动态目标,如飞机、导弹、舰艇、战车以及野外作战人员,提供定位与测速服务;测量型接收机广泛应用于交通、大地测量、勘探和地球物理等领域,提供高精度静态或低速定位信息,如图 1-3 所示;授时型接收机则主要提供时间信息,用于时钟同步或授

时系统。按支持信号频点,接收机又可以分为单频接收机、双频接收机和多频接收机。按支持的卫星导航系统数量,又可分为单模接收机、双模接收机和多模接收机。按载体分类,分为弹载、机载、车载、手持等。

1.2 北斗卫星导航系统

北斗卫星导航系统(BDS)是我国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主建设运行的全球卫星导航系统,是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要时空基础设施。

20 世纪 80 年代,卫星导航技术迅速发展,其在国民经济发展和现代战争中发挥越来越重要的作用,因此我国决定建立一个独立自主的卫星导航系统,并于 1994 年启动建设,经过 26 年的建设与发展,2020 年 7 月 31 日,北斗三号全球卫星导航系统正式开通,成为继 GPS、GLONASS 之后,能够独立提供全球导航服务的卫星导航系统,中国也成为联合国有关机构认定的全球卫星导航定位四大核心供应商之一。

北斗卫星导航系统经历北斗一号系统到北斗三号系统的发展,随着北斗三号系统建设完成,北斗系统服务由北斗二号系统和北斗三号系统共同提供,逐步过渡为由北斗三号系统为主提供。

1.2.1 北斗卫星导航系统的发展

北斗卫星导航系统的建设遵循开放性、独立性、兼容性、渐进性的原则,在建设过程中逐步形成了三步走发展战略。

第一步:1994 年至 2000 年,建设北斗一号系统,向中国提供服务。

第二步:2004 年至 2012 年,建设北斗二号系统,向亚太地区提供服务。

第三步:2009 年至 2020 年,建设北斗三号系统,向全球提供服务。

1. 北斗一号系统

北斗一号系统即“北斗双星系统”,也是我国建设的全球性卫星导航系统的验证系统,并于 1994 年启动建设。2000 年,发射 2 颗地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星,建成系统并投入使用;2003 年,发射备用的第 3 颗地球静止轨道卫星,进一步增强系统性能。北斗一号系统采用有源定位方式,通过双向短报文通信功能创造性地设计并实现了通(信)导(航)一体化,为中国用户提供定位、授时、广域差分 and 短报文通信服务。平面定位精度达 $20\text{ m}(1\sigma)$ (不设标校机区域为 100 m),高程定位精度为 $10\text{ m}(1\sigma)$;单向授时精度为 100 ns ,双向授时精度为 20 ns ;短报文通信能力为 120 个汉字。

作为卫星导航系统建设探索性的第一步,北斗一号系统初步满足中国及周边区域的定位、导航和授时需求,改变了我国长期缺少高精度、实时定位卫星的局面,打破了美国和

俄罗斯在这一领域的垄断地位,填补了我国卫星导航定位系统领域的空白,也使我国成为继美、俄之后第三个拥有卫星导航系统的国家。

2. 北斗二号系统

北斗一号系统有诸多的局限,2004年,我国启动北斗二号系统建设;2012年,完成14颗北斗卫星的发射组网。北斗二号系统在兼容北斗一号技术体制基础上,增加无源定位体制,为亚太地区提供定位、测速、授时和短报文通信服务。北斗二号系统发播B1I和B2a公开服务信号,免费向亚太地区提供公开服务。服务区为南北纬 55° 、东经 $55^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 区域,定位精度优于10 m,测速精度优于0.2 m/s,授时精度优于50 ns。

北斗二号系统的空间部分采用中高轨混合星座架构,共14颗卫星,其中5颗地球静止轨道(GEO)卫星,5颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous Orbit, IGSO)卫星和4颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星。北斗二号系统的中高轨混合星座架构是又一个北斗创造,为全世界卫星导航系统发展提出了新的中国方案。

此外,星载原子钟是导航卫星的核心部件,关系到整个卫星导航系统的定位与授时精度,在北斗二号建设初期,受国外技术封锁,用了不到两年的时间攻关,实现了国产高精度原子钟从无到有,打破了国外垄断。在2007年,装载有国产原子钟的首颗北斗二号卫星,顺利发射成功。随后发射的北斗三号卫星更是采用了更高性能铷原子钟,性能较之前提高了10倍,达到300万年差1秒的精度,达到世界先进水平。

3. 北斗三号系统

北斗二号系统是一个区域定位系统,2009年,北斗三号系统建设启动;2017年发射第一颗北斗三号卫星;2018年,完成18颗MEO卫星的发射、基本系统建设和1颗GEO卫星发射,开通全球服务;至2020年,完成全部的35颗北斗三号卫星的发射组网,全面建成北斗三号系统。北斗三号系统继承了前两代系统的特点,包含有源服务和无源服务两种技术体制,服务区域扩大至全球范围,能够为全球用户提供定位、测速和授时服务、全球短报文通信和国际搜救服务,同时可为中国及周边地区用户提供区域短报文通信、星基增强和精密单点定位等服务。

北斗“三步走”的发展战略,是在结合我国国情和不同阶段技术经济发展实际提出的发展路线,北斗系统的成功实践,走出了在区域快速形成服务能力、不断扩展为全球服务,具有中国特色的卫星导航发展道路,丰富了世界卫星导航的发展模式和发展路径。

1.2.2 北斗卫星导航系统组成

作为典型的全球卫星导航系统,北斗系统由空间段、地面段和用户段三部分组成。空间段由若干颗地球静止轨道卫星、倾斜地球同步轨道卫星和中圆地球轨道卫星等组成。地面段包括主控站、时间同步/注入站和监测站等若干地面站,以及星间链路运行管理设施。用户段包括北斗及兼容其他卫星导航系统的芯片、模块、天线等基础产品,以及终端

设备、应用系统与应用服务等。

1.2.2.1 北斗卫星导航系统空间段

北斗卫星导航系统(BDS)——北斗三号,标称的基础空间星座由 30 颗卫星构成,采用中高轨混合星座架构,包含 3 颗地球静止轨道(GEO)卫星、3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 24 颗中圆地球轨道(MEO)卫星;此外,还包含若干备用卫星,如图 1-4 所示。

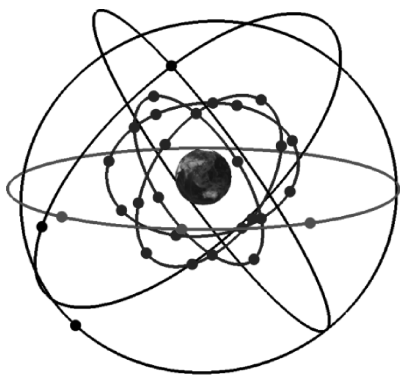


图 1-4 北斗卫星星座构型示意图

GEO 卫星轨道高度约 35 786 km,轨道倾角为 0°。3 颗卫星相对地球静止,分别定点于东经 80°、东经 110.5°和东经 140°,可覆盖亚太大部分地区。

IGSO 卫星轨道高度约 35 786 km,轨道倾角 55°,轨道周期与地球自转同步,3 颗卫星分别位于三条倾斜地球同步轨道上,升交点地理经度分别为东经 95°、东经 112°和东经 118°,每颗卫星星下点轨迹呈 8 字,向亚太地区提供服务。

MEO 卫星轨道高度约 21 528 km,轨道倾角 55°,24 颗卫星分布于 3 个轨道平面,每条轨道运行 8 颗卫星,为 Walker24/3/1 星座。

由于当前北斗卫星导航系统处于北斗二号与北斗三号系统同时提供服务阶段,在轨卫星星数达 44 颗(2025 年 6 月 28 日数据)。

1.2.2.2 北斗卫星导航系统地面段

地面控制段负责系统导航任务的运行控制,主要由主控站、时间同步/注入站、监测站等组成。

主控站是北斗系统的运行控制中心,主要任务包括:

- (1) 收集各时间同步/注入站、监测站的导航信号监测数据,进行数据处理,生成并注入导航电文等;
- (2) 负责任务规划与调度和系统运行管理与控制;
- (3) 负责星地时间观测比对;
- (4) 卫星有效载荷监测和异常情况分析等。

时间同步/注入站主要负责完成星地时间同步测量,向卫星注入导航电文参数。

监测站对卫星导航信号进行连续监测,为主控站提供实时观测数据。

1.2.3 北斗卫星导航系统服务

北斗三号系统提供 3 种全球服务:卫星无线电导航服务(radio navigation satellite service, RNSS)、全球短报文通信(global short message communication, GSMC)和国际搜救(search and rescue, SAR)服务,以及 4 种面向我国及周边地区的服务:星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)、地基增强系统(ground augmentation system,

GAS)、精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 和区域短报文通信 (regional short message communication, RSMC) 服务。北斗卫星导航系统服务规划如表 1-3 所示。

表 1-3 北斗卫星导航系统服务规划

服务类型		信号	播发卫星
全球	定位导航授时	B1C、B2a、B2b、B1I、B3I	标称空间星座全部卫星
	全球短报文通信	上行：L 下行：GSMC-B2b	上行：14 MEO 下行：3 IGSO+24 MEO
	国际搜救	上行/下行：406 MHz 返向链路：B2b	上行：6 MEO 下行：3 IGSO+24 MEO
中国及周边区域： 东经 75°~135° 北纬 10°~55°	PPP	PPP-B2b	3 GEO
	SBAS	BDSBAS-B1C、BDSBAS-B2a	3 GEO
	区域短报文	上行：L(1 610.0~1 626.5 MHz) 下行：S(2 483.5~2 500 MHz)	3 GEO
中国及周边移动通信覆盖区域	GAS	2G、3G、4G、5G 通信信号	移动通信网络

1. 定位导航授时 (RNSS) 服务

定位导航授时服务通过北斗系统空间星座中卫星的 B1C、B2a、B2b 和 B1I、B3I 信号提供,用户通过该服务可确定自己的位置、速度和时间。定位导航授时服务目前由北斗二号和北斗三号星座联合,向全球范围地球表面及其向空中扩展 1 000 km 高度的近地区域的用户提供。

2. 精密单点定位 (PPP) 服务

精密单点定位服务通过北斗三号标称空间星座中 3 颗 GEO 卫星播发的 PPP-B2b 信号提供,用户可通过该服务实现高精度定位。服务区域为中国及周边地区东经 75°~135°,北纬 10°~55°的区域。

3. 地基增强系统 (GAS) 服务

地基增强系统服务由北斗卫星导航系统通过移动通信向用户提供,用户可通过该服务实现实时米级、分米级、厘米级和事后毫米级的高精度定位,服务区域为中国及周边地区移动通信覆盖区域。

4. 星基增强系统 (SBAS) 服务

星基增强系统服务将由北斗卫星导航系统标称星座的 3 颗 GEO 卫星向用户提供,向中国及周边地区用户提供符合国际民航组织标准的单频增强和双频多星座增强免费服

务,旨在实现一类垂直引导进近指标和一类精密进近指标。

该服务利用 GEO 卫星播发差分修正、完好性信息及其他信息,以大范围提高卫星导航用户精度及其他性能的增强系统。系统按照国际民航组织标准建设,支持单频及双频多星座两种增强服务模式,满足国际民航组织相关性能要求。

北斗卫星导航系统 RNSS、PPP 与 GAS 服务性能指标如表 1-4 所示。

表 1-4 北斗卫星导航系统 RNSS、PPP 与 GAS 服务性能指标

性能特征 \ 服务		RNSS	PPP	GAS				
		全球平均	单系统	单频伪距	单频载波	双频载波	双频载波 (网络 RTK ^①)	后处理相对基线测量
定位精度/m	水平	≤9	≤0.3	≤1.2	≤0.8	≤0.3	≤0.04	≤0.004
	高度	≤10	≤0.6	≤2.5	≤1.6	≤0.6	≤0.08	≤0.008
收敛时间/min		—	≤30	—	≤15	≤30	≤0.75	—
测速精度/(m/s)		0.2	—	—	—	—	—	—
授时精度/ns		≤20	—	—	—	—	—	—
可用性/%		≥99	—	—	—	—	—	—

① 实时动态(real time kinematic, RTK)。

5. 国际搜救(SAR)服务

北斗卫星导航系统通过符合全球卫星搜救系统(COSPAS-SARSAT)标准的 406 MHz 信号和北斗系统的 B2b 信号,提供具有返向链路的 SAR 服务。服务区域为全球范围地球表面及其向空中扩展 50 km 高度的近地区域内,信标运动速度小于 $Ma=1$ 的所有用户。服务性能指标如表 1-5 所示。

表 1-5 北斗卫星导航系统搜救服务性能指标

性能特征	指标
定位精度	≤5 km
检测概率	≥99%
可用性	≥99%
返向链路时延	≤2 min
返向链路成功率	≥95%

该服务中,北斗卫星导航系统与其他中轨卫星搜救系统共同组成全球中轨卫星搜救