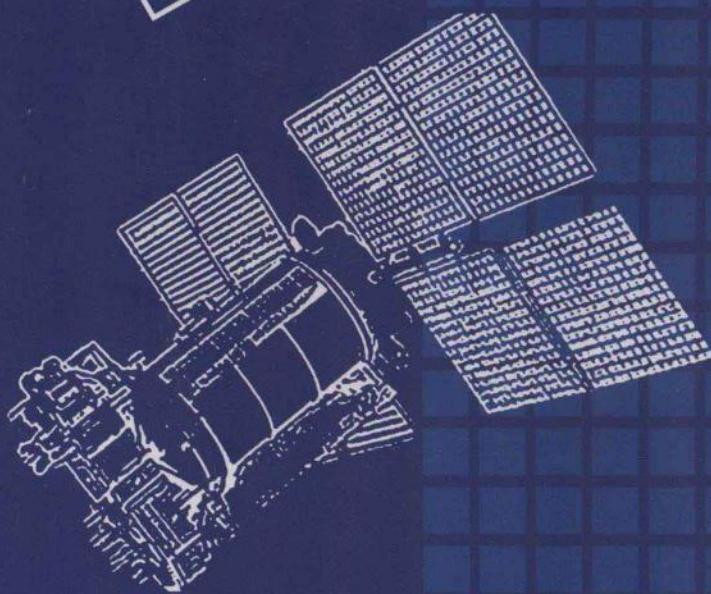


高等职业技术教育“十二五”规划教材——工程测量技术类

GPS CELIANG JISHU
YU YINGYONG

GPS测量技术与应用

主编 张福荣 田 倩
主审 高雅萍



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等职业技术教育“十二五”规划教材——工程测量技术类

GPS 测量技术与应用

主 编 张福荣 田 倩

主 审 高雅萍

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

GPS 测量技术与应用 / 张福荣, 田倩主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2013.8

高等职业技术教育“十二五”规划教材. 工程测量技术类

ISBN 978-7-5643-2509-1

I. ①G… II. ①张… ②田… III. ①全球定位系统 -
测量 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 183351 号

高等职业技术教育“十二五”规划教材——工程测量技术类

GPS 测量技术与应用

主编 张福荣 田倩

责任编辑	王旻
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川五洲彩印有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	12.75
字 数	315 千字
版 次	2013 年 8 月第 1 版
印 次	2013 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2509-1
定 价	26.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 侵权必究 举报电话: 028-87600564

前 言

GPS 测量技术作为现代测量技术“3S”技术之一，具有无需通视、灵活性强、精度高、自动化程度高、测量范围广、操作简单等特点，已经广泛应用于我国地方经济建设和社会可持续发展中。近几年，随着我国高速铁路的快速发展，GPS 测量技术已成为土建类专业技术人员必备的技能之一。

本教材按照任务驱动、项目导向设计教学内容，融“教、学、做”为一体，强化学生职业能力的培养，能满足高职高专院校工程测量技术、铁道工程技术、高速铁路工程技术、道路桥梁工程技术等专业的教学使用，同时也能满足企业技术人员培训。

本教材由成都理工大学高雅萍副教授主审，陕西铁路工程职业技术学院张福荣、田倩主编，并负责全书统稿。具体编写分工如下：第一部分项目一、第二部分项目三由刘舜编写；第一部分项目三由刘舜与大庆钻探工程公司地球物理勘探一公司于海滨编写；第一部分项目二、第二部分项目一由王涛编写；第二部分项目二由滕春江编写；第三部分由曾庆伟编写；第四部分项目一由张福荣、田倩编写；第四部分项目二、项目三、第五部分由田倩编写。

本教材参考了大量相关专业文献（包括纸质版和电子版），引用了部分内容，在此表示感谢！中铁二十局集团公司左志刚与中铁十六局城轨公司施振丁为本教材的编写提供了支持和帮助，在此表示感谢！同时对西南交通大学出版社为本书所做的辛勤工作表示感谢！

由于编者水平有限，书中存在不足之处，敬请读者予以批评指正。

编 者
2013年6月

目 录

第一部分 GNSS 全球导航卫星系统	1
项目一 GNSS 的现状与发展	2
任务 1.1 卫星定位技术的产生与发展	3
任务 1.2 GNSS 的组成及特点	5
任务 1.3 我国导航定位卫星系统	9
项目二 GPS 全球定位系统与 GPS 信号	11
任务 2.1 GPS 全球定位系统的组成	12
任务 2.2 GPS 定位的时间系统与坐标系统	16
任务 2.3 GPS 卫星轨道运动	26
任务 2.4 GPS 卫星的信号结构	31
任务 2.5 GPS 卫星位置的计算	35
项目三 GPS 信号接收机	38
任务 3.1 GPS 信号接收机组成及工作原理	39
任务 3.2 GPS 信号接收机的分类	42
任务 3.3 几种常见的测地型 GPS 信号接收机	45
任务 3.4 GPS 接收机的选用与检验	47
第二部分 GPS 定位测量方法与误差分析	52
项目一 GPS 定位的基本原理	52
任务 1.1 GPS 定位原理与方法	53
任务 1.2 伪距相位测量	56
任务 1.3 载波相位测量	60
任务 1.4 周跳分析与整周未知数的确定方法	63
任务 1.5 GPS 绝对定位	67
任务 1.6 GPS 相对定位	72
项目二 实时动态定位测量	75
任务 2.1 RTK 动态定位系统的组成	77

任务 2.2	RTK 定位测量作业模式	79
项目三	GPS 定位误差	94
任务 3.1	GPS 定位误差的来源与分类	95
任务 3.2	与卫星有关的误差	96
任务 3.3	与信号传播有关的误差	98
任务 3.4	与接收机有关的误差	99
任务 3.5	其他误差	100
第三部分	GPS 测量技术设计与数据采集	103
项目一	GPS 测量技术设计	103
任务 1.1	GPS 测量技术设计的依据	104
任务 1.2	GPS 网的精度与密度设计	109
任务 1.3	GPS 网形的基准设计	111
任务 1.4	GPS 测量的图形设计	113
任务 1.5	GPS 测量技术设计书的编写	117
项目二	GPS 测量的数据采集	120
任务 2.1	选点与埋石	122
任务 2.2	GPS 卫星预报与观测调度计划	124
任务 2.3	GPS 测量数据采集	125
任务 2.4	GPS 测量的作业模式	129
任务 2.5	技术总结与成果资料提交	131
第四部分	GPS 测量数据处理	137
项目一	GPS 观测数据预处理	137
任务 1.1	观测数据解析	138
任务 1.2	观测数据的传输与存储	145
任务 1.3	观测数据预处理	148
项目二	GPS 基线解算	150
任务 2.1	基线解算	152
任务 2.2	基线解算的质量控制	157
任务 2.3	影响基线解算结果的因素及采取的措施	159
项目三	网平差与坐标转换	162
任务 3.1	基线向量网平差	165
任务 3.2	坐标转换	170
任务 3.3	GPS 高程	176

第五部分 GPS 定位技术的应用.....	180
项目一 GPS 在工程测量中的应用.....	180
任务 1.1 GPS 在线路勘测中的应用.....	181
任务 1.2 GPS 在桥梁工程中的应用.....	183
任务 1.3 GPS 在隧道工程中的应用.....	185
任务 1.4 GPS 在工程变形监测中的应用.....	187
项目二 GPS 在其他方面的应用.....	189
任务 2.1 GPS 在农业中的应用.....	190
任务 2.2 GPS 在海洋测绘中的应用.....	192
参考文献.....	195

第一部分 GNSS 全球导航卫星系统

GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统) 又称天基 PNT 系统, 其关键作用是提供时间/空间基准和所有与位置相关的实时动态信息, 目前已成为国家重要的空间和信息化基础设施, 并且也是体现现代化大国地位和国家综合国力的重要标志。它是经济安全、国防安全、国土安全和公共安全的重大技术支撑系统和战略威慑基础资源, 也是建设和谐社会、服务人民大众、提升生活质量的重要工具。

由于 GNSS 在国家安全和社会经济发展中有着不可或缺的重要作用, 所以世界各主要大国都竞相发展独立自主的卫星导航系统。估计在 2020 年前, 全世界将有四大 GNSS, 它们是: 现有的美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS, 欧盟计划在 2013 年建成的 GALILEO 系统, 以及我国正在建设的 COMPASS。GNSS 实际上泛指卫星导航系统, 包括全球星座、区域星座, 及相关的星基增强系统。除了上述 4 个全球系统及其增强系统(美国的 WAAS、欧洲的 EGNOS 和俄国的 SDCM)外, 日本和印度等国也在建设自己的区域系统和增强系统, 即日本的 QZSS 和 MSAS, 印度的 IRNSS 和 GAGAN, 以及尼日利亚运用通信卫星搭载实现的 NicomSat-1 星基增强。

全球导航卫星系统的起源要追溯到 1957 年苏联发射第一个人造地球卫星时期, 由其发现了多普勒定位原理, 推动并产生了美国的海军导航卫星系统——子午仪 (Transit), 进而出现了美国的 GPS 和苏联的 GLONASS。美国 1973 年 GPS 被批准立项, 1978 年发射第一颗卫星, 至今已经过 30 余年。从 1995 年 GPS 宣布投入完全工作阶段起, 也已经有 20 多年, 目前和今后 3~5 年内它仍将是全球唯一的全功能稳定运营的卫星导航系统。卫星导航系统具有广泛的应用范围, 能深入到国民经济的各个领域, 进入人民生活的方方面面, 从而产生巨大的经济效益。而这一切应归功于 GPS 的产生和应用, GPS 是技术的成功范例, 从军民两用的角度来看, 它对军事和民用世界的影响, 远远超出了 20 世纪 70 年代当时系统设计者的构想。作为军事系统, GPS 在海湾战争、阿富汗战争、科索沃战争和伊拉克战争中经受了一系列实战考验, 无可争辩地证明了其“军力倍增器”的强大作用; 作为民用系统, 它远远出乎系统开发者的意料, 在商业市场和大众消费领域, 显示出极其强劲的高速发展势头, 应用面之广大, 服务层之深入, 反响之强烈, 前景之良好, 均让人叹为观止。这是美国军方继互联网之后, 对民用世界的第二个最重要的贡献。

项目一 GNSS 的现状与发展



项目描述

GNSS 全球导航卫星系统, 主要包括 GPS、GLONASS、Galileo、DORIS、IRNSS 和 CNSS 等系统。

GPS 发展到 GNSS, 应该说是一种巨大的进步。实际上, GPS 从正式投入工作后, 于 1996 年便开始其现代化计划, 2000 年 5 月 1 日取消其人为恶化民用信号精度的可用性选择 (SA) 的举措, 标志着现代化计划进入实施阶段, 并预计在 2013 年完成, 现在已经启动新一代的 GPS III, 届时有可能继续成为世界上最先进的系统。

GLONASS 已经恢复正常使用, 2011 年达到额定 24 颗星的工作状况, GLONASS 也在开展现代化计划, 在 2010 年发射其利用 CDMA 编码的 GLONASS-K, 实现与 GPS/Galileo 在 L1 频点上的兼容与互用, 其现代化计划预计在 2017 年完成, 星座卫星数量达到 30 颗。Galileo 系统预期在 2013 年完成部署, 投入运行, 它将与 GPS 在 L1 和 L5 频点上实现兼容和互用。我国的 BD-2 区域卫星导航系统, 由 12 颗卫星组成, 在 2010 年已建成, 并择机启动全球系统建设, 估计建成期为 2020 年, 星座卫星数量为 30 个。



教学目标

1. 能力目标

- 能够描述卫星定位系统的发展;
- 能够描述 GNSS 的组成及特点;
- 能够描述我国定位系统的特点。

2. 知识目标

- 了解卫星定位系统的发展;
- 了解 GNSS 的组成及特点;
- 了解我国定位系统的特点。

3. 素质目标

- 具备一定阅读总结能力;

- 具备一定的查阅、整理资料能力。



相关案例——GNSS 的现状

GNSS 全球导航卫星系统,主要包括 GPS、GLONASS、Galileo、DORIS、IRNSS 和 CNSS 等系统。其中,评定系统性能有 4 个主要技术指标。① 可用性:用户使用该系统做导航定位的正常运行时间;② 精度:该系统用于测得的运动载体在航位置与其真实位置的差异性;③ 完好性:该系统不能用于导航定位的告警能力;④ 连续性:该系统在一个导航周期内出现间断导航的概率。

目前,根据这 4 项主要技术指标,能正常使用的导航系统只有 GPS 和 GLONASS。

任务 1.1 卫星定位技术的产生与发展

1.1.1 任务描述

1957 年 10 月 4 日,苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星后,人们就开始利用卫星进行定位和导航的研究,人类的空间科学研究和应用跨入了一个崭新的时代,世界各国争相利用人造地球卫星为军事、经济和科学文化服务。同时,卫星定位技术在大地测量学的应用也取得了惊人的发展,迅速跨入了一个崭新的时代。

本次任务主要是认识卫星定位技术的产生与发展,了解现有的主要卫星定位系统。

1.1.2 相关知识

1. 早期的卫星定位技术

卫星定位技术是指人类利用人造地球卫星确定测站点位置的技术。卫星大地测量是利用人造地球卫星为大地测量服务的一门技术,它的主要内容是在地面上观测人造地球卫星,通过测定卫星位置的方法,来解决大地测量任务,例如测定地面点的相对位置、地球的形状和大小等。

早期,人造地球卫星仅仅作为一种空间观测目标,由地面上的观测站对卫星的瞬间位置进行摄影测量,测定测站点至卫星的方向,建立卫星三角网。同时也可利用激光技术测定观测站至卫星的距离,建立卫星测距三角网。通过这两种观测方法,均可以实现地面点的定位,也能进行大陆同海岛的联测定位,解决了常规大地测量难以实现的远距离联测定位问题,这是常规定位技术望尘莫及的。

1966—1972 年期间,美国国家大地测量局在英国和联邦德国测绘部门的协作下,用卫星三角测量方法测设了一个具有 45 个测站点的全球三角网,获得了 $\pm 5\text{m}$ 的点位精度。然而,由于卫星三角测量受天气和可见条件影响,观测和成果换算需耗费大量的时间,同时定位精度不甚理想,并且不能得到点位的地心坐标。因此,卫星三角测量技术成为一种过时的观测技术,很快就被卫星多普勒定位技术所取代。

2. 卫星多普勒定位系统

1958年12月,美国海军武器实验室和詹斯·霍普金斯(Johns Hopkins)大学物理实验室为了给美国海军“北极星”核潜艇提供全球性导航,开始研制一种卫星导航系统,称之为美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System),简称NNSS系统。在这一系统中,由于卫星轨道面通过地极,所以又被称为子午卫星导航系统。从1959年9月美国发射了第一颗实验卫星,到1961年11月,先后发射了9颗实验导航卫星。经过几年实验研究,解决了卫星导航的许多技术问题。从1963年12月起,陆续发射了由6颗卫星组成的子午卫星星座,1964年NNSS系统建成并投入使用。该系统轨道接近圆形,卫星高度为1100 km,轨道倾角为90°左右,周期约为107 min,在地球表面上的任何一个测站上,平均每隔2 h便可观测到其中一颗卫星。

卫星多普勒定位系统即美国海军导航卫星系统,它由3部分组成:卫星星座、地面跟踪网和用户接收机。其中,地面跟踪网由跟踪站、计算中心、注入站、海军天文台和控制中心5部分组成,它们的任务是测定各颗卫星的轨道参数,并定时将这些轨道参数和时间信号注入到相应的卫星内,以便卫星按时向地面播发。接收机是用来接收卫星发射的信号、测量多普勒频移、解译卫星的轨道参数,以测定接收机所在位置的设备。由于接收机都是采用多普勒效应原理进行接收和定位的,所以也称为多普勒接收机。

1967年7月29日,美国政府宣布解密子午卫星的部分导航电文而提供民用。由于卫星多普勒定位具有经济、快速、精度较高、不受天气和时间限制等优点,只要能见到子午卫星,便可在地球表面的任何地方进行单点和联测定位,从而获得测站的三维地心坐标。因此,卫星多普勒定位迅速从美国传播到欧亚及美洲的许多国家。

20世纪70年代中期,我国开始引进卫星多普勒接收机。西沙群岛的大地测量基准联测,是我国应用卫星多普勒定位技术的先例。自80年代初期以来,我国开展了几次较大规模的卫星多普勒定位实践:国家测绘局和总参测绘局联合测设的全国卫星多普勒大地网;由原武汉测绘科技大学与青海石油管理局、新疆石油管理局、原石油部地球物理勘探局合作测设西北地区卫星多普勒定位网;即使在远离我国17000 km的南极乔治岛上,也用卫星多普勒定位技术精确测得我国长城站的地理位置为南纬 $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$,西经 $58^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$,高程为 43.58 ± 0.67 m,长城站至北京的距离为17501949.51 m。

在美国子午卫星系统建立的同时,苏联于1965年开始建立卫星导航定位系统CICADA,它与NNSS系统相似,也是第一代卫星定位导航系统。该系统由12颗卫星组成CICADA星座,轨道高度为1000 km,卫星的运行周期为105 min。

虽然子午卫星系统将导航和定位技术推向了一个崭新的发展阶段,但仍然存在一些明显的缺陷。该系统卫星数目较少(6颗工作卫星)、运行高度较低(平均约为1000 km)、从地面站观测到卫星的时间间隔也较长(平均约1.5 h),无法进行全球性的实时连续导航定位服务。从大地测量学来看,该系统定位速度慢(测站平均观测1~2天)、精度较低(单点定位精度3~5 m,相对定位精度约1 m),在大地测量学和地球动力学研究方面受到了极大的限制。为了满足军事及民用部门对连续实时三维导航和定位的需求,第二代卫星导航系统应运而生。子午卫星系统也于1996年12月31日停止发射导航及时间信息。

3. 全球导航卫星系统

具有全球导航定位能力的卫星定位导航系统称为全球导航卫星系统，英文全称为 Global Navigation Satellite System，简称为 GNSS。目前已有的卫星导航系统包括美国的全球卫星定位系统（GPS）、俄罗斯的全球导航卫星系统 GLONASS，正在发展研究的有欧盟的 GALILEO 系统、中国北斗卫星导航广域增强系统。

全球定位系统（GPS）是众多卫星导航系统之一，GPS 是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System 的字头缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称。它的含义是：利用导航卫星进行测时和测距，以构成全球定位系统。GPS 具有全能性、全球性、全天候、连续性和实时性的精密三维导航与定位功能，而且具有良好的抗干扰性和保密性。因此，在大地测量、工程测量、航空摄影测量、海洋测量、城市测量等测绘领域得到了广泛的应用，并在物探测量工作中广泛普及与应用。在物理点的放样中已经不再仅仅是采用测角和量距，而是借助 GPS 导航卫星信号来确定地面点的准确位置。

随着 GLONASS 系统、GALILEO 系统以及中国的北斗系统逐步组网运营，综合各大导航系统的多星系统接收机逐步替代了先前的 GPS 定位的单一系统，其作业效率、定位精度、定位的稳定性与可靠性都得到了大幅度改善。

任务 1.2 GNSS 的组成及特点

1.2.1 任务描述

GNSS，它是所有全球导航卫星系统及其增强系统的集合名词，是利用全球的所有导航卫星所建立的覆盖全球的全天候无线电导航系统。目前，GNSS 包含了美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的 Compass（北斗）、欧盟的 Galileo 系统、SBAS 广域差分系统、DORIS 星载多普勒无线电定轨定位系统、QZSS 准天顶卫星系统和 GAGAN GPS 静地卫星增强系统等，可用的卫星数目达到 100 颗以上。

本次任务主要是认识 GNSS 的组成，掌握其主要特点。

1.2.2 相关知识

1. GNSS 的由来

早在 20 世纪 90 年代中期开始，欧盟为了打破美国在卫星定位、导航、授时市场中的垄断地位，获取巨大的市场利益，增加欧洲人的就业机会，一直在致力于一个雄心勃勃的民用全球导航卫星系统计划，称之为 Global Navigation Satellite System。该计划分两步实施：第一步是建立一个综合利用美国的 GPS 系统和俄罗斯的 GLONASS 系统的第一代全球导航卫星系统（当时称为 GNSS-1，即后来建成的 EGNOS）；第二步是建立一个完全独立于美国的 GPS 系统和俄罗斯的 GLONASS 系统之外的第二代全球导航卫星系统，即正在建设中的 Galileo

卫星导航定位系统。由此可见, GNSS 从一问世起, 就不是一个单一星座系统, 而是一个包括 GPS、GLONASS、Compass、Galileo 等在内的综合星座系统。众所周知, 卫星是在天空中环绕地球而运行的, 其全球性是不言而喻的; 而全球导航是相对于陆基区域性导航而言, 以此体现卫星导航的优越性。

2. GPS 全球定位系统

1973 年 12 月, 美国国防部在总结了 NNSS 系统的优劣之后, 批准美国海陆空三军联合研制新一代卫星导航系统——NAVSTAR GPS, 即为目前的“授时与测距导航系统/全球定位系统”(Navigation Satellite Timing And Ranging / Global Positioning System), 通常称之为全球定位系统, 简称为 GPS 系统。GPS 系统的全部投资为 300 亿美元。自 1974 年以来, 系统的建立经历了方案论证、系统研制和生产实验等 3 个阶段, 是继阿波罗计划、航天飞机计划之后的又一个庞大的空间计划。1978 年 2 月 22 日, 第一颗 GPS 实验卫星发射成功, 卫星距离地球表面的平均高度为 20 200 km, 运行速度为 3 800 m/s, 运行周期为 11 h 58 min。1989 年 2 月 14 日, 第一颗 GPS 工作卫星发射成功, 宣告 GPS 系统进入了营运阶段, 截止到 1994 年 3 月 28 日完成第 24 颗工作卫星的发射工作, GPS 共发射了 21 颗工作卫星, 3 颗备用卫星, 它们均匀地分布在 6 个相对于赤道倾角为 55° 的近似圆形轨道上, 每颗卫星可覆盖全球约 38% 的面积, 如图 1.1 所示。卫星的分布可保证在地球上任何地点、任何时刻, 同时能观测到 4 颗卫星。

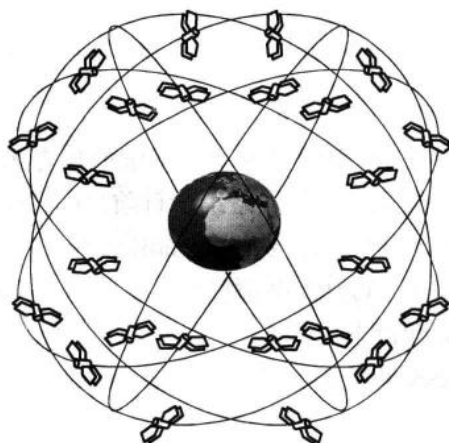


图 1.1 GPS 卫星工作星座

在 GPS 设计之初, 美国国防部的主要目的是使 GPS 系统能够为海陆空三军提供实时、全天候和全球性的导航服务, 并用于情报收集、核爆监测和应急通讯等一些军事目的。但随着 GPS 系统的开发应用, 它已经被广泛地应用于飞机、船舶和各种载运工具的导航、高精度的大地测量、精密工程测量、地壳形变测量、地球物理测量、航天发射和卫星回收等技术领域。

为了使 GPS 具有高精度的连续实时三维导航性能及良好的抗干扰性能, 在卫星的设计上采取了若干重大改进措施。GPS 与 NNSS 的主要特征比较如表 1.1 所示。

表 1.1 GPS 与 NNSS 的主要特征比较

系统特征	GPS	NNSS
载波频率/GHz	1.23, 1.58	0.15, 0.40
卫星平均高度/km	约 20 200	约 1 000
卫星数目/颗	24 (3 颗备用)	5~6
卫星运行周期/min	718	107
卫星钟稳定度	10^{-12}	10^{-11}

3. GLOASS 全球导航卫星系统

GLONASS 是 GLObal NAVigation Satellite System (全球导航卫星系统) 的字头缩写, 是苏联从 20 世纪 80 年代初开始建设的与美国 GPS 系统相类似的卫星定位系统, 也由卫星星座、地面监测控制站和用户设备 3 部分组成, 现在由俄罗斯空间局管理。

(1) GLONASS 的发展。

GLONASS 的起步比 GPS 晚 9 年。苏联于 1982 年 10 月 12 日发射第一颗卫星到 1996 年, GLONASS 历经周折, 虽然遭遇了苏联解体, 由俄罗斯接替部署, 但始终没有终止卫星的发射。1995 年进行 3 次成功发射, 将 9 颗卫星送入轨道后, 完成了 24 颗卫星加一颗备用卫星的布局。经过数据的加载、调整和检验, 整个系统已于 1996 年 1 月 18 日开始正常运行。

然而, 20 世纪 90 年代中期以来, 由于卫星寿命短、资金短缺等原因, 导致替补卫星不能如期发射, 地面控制系统不能正常维修更新, 从而使系统故障发生的概率明显增加, 提供的导航定位服务精度和可靠性变差。2001 年底, GLOASS 卫星数量降到最低点 (7 颗), 系统处于半瘫痪状态。

随着近几年俄罗斯经济的好转、大量民间和国外资金的介入, 经过对空间卫星的几次补网, 2003 年 12 月 10 日, 第一颗 GLONASS-M 卫星入轨运行, 并于 2004 年 1 月 29 日开始向广大用户发送导航定位信号, 这标志着 GLONASS 现代化迈出了坚实的第一步。目前 GLONASS 在轨工作卫星共 17 颗, 其中 10 颗为旧卫星, 7 颗为 GLONASS-M 新卫星。此外, 地面测控站设施也进行了一定的改进, 系统定位、测速和授时精度都得到了改善。2007 年 5 月 18 日俄罗斯总统颁布最新总统令, 除了要求继续发展完全免费的民用信号、确保提升 GLONASS 系统为政府战略决策服务的性能外, 还建议俄罗斯航空局维持、发展和推广应用 GLONASS 全球坐标系统, 建议政府机构制订 GLONASS 性能提升、GLONASS 与其他 GNSS 进行兼容和互操作以及 2012—2020 年间 GLONASS 新的发展计划等。

(2) GLONASS 的组成。

GLONASS 系统在系统组成和工作原理上与 GPS 类似, 也是由空间卫星星座, 地面控制中心和用户设备 3 大部分组成。

① 空间卫星星座。

GLONASS 系统的卫星星座由 24 颗卫星 (目前在轨 17 颗卫星) 组成, 均匀分布在 3 个近圆形的轨道平面上, 每个轨道面有 8 颗卫星, 轨道高度 19 100 km, 运行周期 11 h 15 min, 轨道倾角 64.8° 。由于 GLONASS 卫星的轨道倾角大于 GPS 轨道倾角, 所以在高纬度地区 (50°

以上)的可视性较好。

每颗 GLONASS 卫星上装有铯原子钟以产生卫星上高稳定的时标,并向所有星载设备提供同步信号。星载计算机将从地面控制站接收到的专用信息进行处理,生成导航电文向用户广播。导航电文包括星历参数、星钟相对于 GLONASS UTC 时(SU)的偏移值、时间标记及 GLONASS 历书。

GLONASS 卫星向空间发射两种载波信号。L1 为民用,频率为 1.602 MHz ~ 1.616 MHz; L2 为军用频率为 1.246 MHz ~ 1.256 MHz。信号格式为伪随机噪声扩频信号,测距码用最长序列码。同步码重复周期 2 s, 30 位,并有 100 周方波振荡的二进制码信息调制。各卫星之间的识别方法采用频分复用制(FDMA),L1 频道间隔 0.562 5 MHz,L2 频道间隔 0.437 5 MHz。FDMA 占用频段较宽,24 个卫星的 L1 频段占用约 14 MHz。

② 地面控制中心。

GLONASS 卫星星座的地面控制组(GCS)包括一个系统控制中心(在莫斯科区的 Golitsyno-2)和一个指令跟踪站(CTS),网络分布在俄罗斯境内。CTS 跟踪着 GLONASS 可视卫星,遥测所有卫星,进行测距数据的采集和处理,并向各卫星发送控制指令和导航信息。在 GCS 内有激光测距设备对测距数据做周期修正,为此所有 GLONASS 卫星都装有激光反射镜。

③ 用户设备。

GLONASS 接收机接收 GLONASS 卫星信号并测量其伪距和速度,同时从卫星信号中选出并处理导航电文。接收机中的计算机对所有输入数据处理并算出位置坐标的 3 个分量,速度矢量的 3 个分量和时间。

GLONASS 系统进展较快,运行正常,但生产用户设备的厂家还较少,生产的接收机多为专用型。国内上海华测导航技术有限公司研制出了 GPS/GLONASS 联合接收机。GPS 与 GLONASS 联合型接收机有以下优点:用户同时可接收的卫星数目约增加一倍,可以明显改善观测卫星的几何分布,提高定位精度;由于可见卫星的增加,在一些遮挡物较多的城市,森林等地区进行测量定位和建立运动目标的监控管理比较容易开展;利用两个独立的卫星定位系统进行导航和定位测量,可有效削弱美俄两国对各自定位系统的可能控制,提高定位的可靠性和安全性。

4. 伽利略(Galileo)GNSS 系统

欧盟从 1994 年开始对伽利略系统方案实施论证,2000 年向世界无线电委员会申请并获准建立伽利略系统的 L 频段的频率资源。2002 年 3 月,欧盟 15 国交通部长一致同意伽利略系统的建设。2005 年 12 月 28 日,欧洲航天局发射了第一颗伽利略演示卫星。

伽利略系统由欧盟各政策和私营企业共同投资 36 亿欧元,在欧洲建立两个控制中心。计划由 30 颗卫星(27 颗工作卫星和 3 颗备用卫星)组成,分别部署在 3 个高度圆轨道面上,轨道高度 23 616 km,倾角 56°,星座对地面覆盖良好,是将来精度最高的全开放的新一代定位系统。在欧洲建立两个控制中心。

Galileo 系统最主要的设计思想如下:

① 与 GPS/GLONASS 不同,完全从民用出发,建立一个最高精度的全开放型的新一代

GNSS 系统。

② 与 GPS/GLONASS 有机地兼容, 增强系统使用的安全性和兼容性。

③ 建设资金由欧洲各国和私营企业共同投资。

但是, 由欧盟挑选的 8 家欧洲公司组成的产业联盟, 由于职权斗争, 严重影响了 Galileo 系统的建设。据一位技术分析专家称, Galileo 有可能在 2014 或更晚时间才能够建设完成。

任务 1.3 我国导航定位卫星系统

1.3.1 任务描述

北斗卫星导航定位系统 (BeiDou (compass) Navigation Satellite System) 是由中国自行研发的区域性有源三维卫星定位与通信系统 (CNSS), 是继美国的全球定位系统 (GPS)、俄罗斯的格洛纳斯 (GLONASS) 定位系统之后, 世界第三个成熟的卫星导航系统。该系统分为“北斗一代”和“北斗二代”, 分别由空间端、地面端和用户终端 3 部分组成, 可向用户提供全天候、24 h 的即时定位服务。

本次任务主要是了解北斗卫星导航定位系统的特点及主要组成。

1.3.2 相关知识

我国早在 20 世纪 60 年代末就开展了卫星导航系统的研制工作, 但在自行研制“子午仪”定位设备方面起步较晚, 以致后来使用的大量设备, 基本依赖进口。70 年代后期以来, 国内开展了探讨适合国情的卫星导航定位系统的体制研究, 先后提出过单星、双星、三星和 3~5 星区域性系统方案, 以及多星的全球系统的设想, 并考虑到导航定位与通信等综合运用问题, 但是由于种种原因, 这些方案和设想都没能够得到实现。

1. 北斗一号卫星定位系统

北斗一号卫星定位系统的英文简称为 BD, 在 ITU (国际电信联合会) 登记的无线电频段为 L 波段 (发射) 和 S 波段 (接收)。

1983 年, “两弹一星”功勋奖章获得者陈芳允院士和合作者提出利用两颗同步定点卫星进行定位导航的设想, 经过分析和初步实地试验, 效果良好, 这一系统被称为“双星定位系统”。双星定位导航系统为我国“九五”列项, 其工程代号取名为“北斗一号”(BD), 有两颗工作卫星和两颗备用卫星实现定位、通信和授时的基本功能。2008 年北京奥运会期间, 它和已有的 GPS 卫星定位系统一起, 在交通、场馆安全的定位监控方面, 发挥了“双保险”作用。

2. 双星定位

北斗一号卫星导航定位系统的基本工作原理是“双星定位”: ① 以两颗在轨卫星的已知坐标为圆心, 分别以测定的卫星至用户终端的距离为半径, 形成两个球面, 用户终端将位于

这两个球面交线的圆弧上。② 地面中心站配有电子高程地图, 提供一个以地心为球心、以球心至地球表面高度为半径的非均匀球面。③ 用数学方法求解圆弧与地球表面的交点即可获得用户的位置。

用户利用“北斗一号”定位时, 首先向地面中心站发出请求, 地面中心站再发出信号, 分别经两颗卫星反射传至用户, 地面中心站通过计算两种途径所需时间即可完成定位。“北斗一号”对用户位置的计算不是在卫星上进行, 而是在地面中心站完成的, 因此, 地面中心站可以保留全部北斗用户的位置及时间信息, 并负责整个系统的监控管理。

由于在定位时需要用户终端向定位卫星发送定位信号, 由信号到达定位卫星时间的差值计算用户位置, 所以双星定位被称为“有源定位”。

3. 北斗第二代导航卫星网

继美国的 GPS 系统升级、俄罗斯的 GLONASS 系统扩建以及欧盟的“伽利略计划”之后, 我国也将升级自己的全球卫星导航定位系统——“北斗第二代导航卫星网”, 其英文为 COMPASS (即指南针)。

“北斗第二代导航卫星网”由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成, 其中, 5 颗静止轨道卫星是高度为 36 000 km 的地球同步卫星, 分别分布在在赤道上空的 58.75°E 、 80°E 、 110.5°E 、 140°E 、 160°E , 提供 RNSS 和 RDSS 信号链路; 30 颗非静止轨道卫星由 27 颗中轨 (MEO) 卫星和 3 颗倾斜同步 (IGSO) 卫星组成, 提供 RNSS 信号链路, 27 颗 MEO 卫星分布在倾角为 55° 的三个轨道平面上, 每个面上有 9 颗卫星, 轨道高度为 21 500 km。

每颗 COMPASS 卫星都发射 4 个频率的载波信号用于导航: 1 561.098 MHz (B1)、1 589.742 MHz (B1-2)、1 207.14 MHz (B2)、1 268.52 MHz (B3), 每个载波信号均有正交调制的普通测距码 (I 支路) 和精密测距码 (Q 支路)。卫星以不同地址码区分 (CDMA)。COMPASS 提供两种服务方式。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务, 定位精度为 10 m, 授时精度为 50 ns, 测速精度为 0.2 m/s; 授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

第二代导航卫星系统与第一代导航卫星系统在体制上的差别主要是: 第二代用户机可免发上行信号, 不再依靠中心站电子高程图处理或由用户提供高程信息, 而是直接接收卫星单程测距信号自己定位, 系统的用户容量不受限制, 并可提高用户位置隐蔽性。其代价是: 测距精度要由星载高稳定度的原子钟来保证, 所有用户机使用稳定度较低的石英钟, 其时钟误差作为未知数和用户的三维未知位置参数一起由 4 个以上的卫星测距方程来求解。这就要求用户在每一时刻至少可见 4 颗以上几何位置合适的卫星进行测距, 从而使得星座所需卫星数量大大增多, 系统投资将显著增加。

北斗卫星导航系统是重要的空间基础设施, 可提供高精度的定位、测速和授时服务, 能带来巨大的社会和经济效益。我国高度重视卫星导航系统的建设, 一直努力探索和发展拥有自主知识产权的卫星导航系统。我国已建成的北斗导航试验系统, 在测绘、电信、水利、交通运输、渔业、勘探、森林防火和国家安全等诸多领域发挥着重要作用。