

高等教育“十二五”规划教材

GPS

测量与数据处理

GPS Survey and Data Process

余学祥 王 坚 刘绍堂 吕伟才 柯福阳 刘 辉 赵兴旺 编著

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

GPS 测量与数据处理

余学祥 王 坚 刘绍堂 吕伟才 编著
柯福阳 刘 辉 赵兴旺

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

全球导航卫星系统(GNSS)在经济建设、国防建设和日常生活中得到了越来越广泛的应用。本教材是在读者已较系统地学习了《GPS定位原理及应用》前提下,结合教学、科研、生产实践和当前的研究热点问题,从导航定位系统现状、卫星在轨瞬时位置的计算、载波相位观测值周跳探测与修复、GPS测量误差来源及其改正、基线向量解算、网平差及成果转换、监测网数据处理方法、VRS技术与PPP技术、GPS/INS组合导航基本原理等九个方面,对GNSS的基本原理和数据处理方法进行较详细的介绍,部分章节给出了相关的算例。

本书可作为高等学校测绘工程专业及其相关专业本科生和研究生的教材使用,教师可根据专业性质、已有的学习基础、学时数和学生的层次从中选择所需的内容讲解。本书也可从事GNSS技术理论研究和应用研究的科研人员和工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

GPS测量与数据处理/余学祥等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2000 - 4

I. ①G… II. ①余… III. ①全球定位系统—测量学—高等学校—教材②全球定位系统—数据处理—高等学校—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第196573号

书 名 GPS测量与数据处理
编 著 余学祥 等
责任编辑 潘俊成
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 21 字数 538千字
版次印次 2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
定 价 35.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

1978年2月22日第一颗GPS试验卫星发射成功,开创了以导航卫星为动态已知点的无线电导航定位新时代,为交通、运输、测绘、通信、军事、载人航天、石油勘探、资源调查、农林渔业、时间比对、大气研究、气象预报、地质灾害的监测和预报等提供了一种高精度、全天时和全天候的导航定位技术,使导航定位技术产生了一场深刻的变革,促进了相关行业的整体技术进步,为促进世界文明进步提供了一种新的高科技方法。

目前,导航系统包括全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)、惯性导航(包括惯性导航INS、航位推算导航DR)、天文导航系统(CNS)、重磁导航(重力导航、磁力导航)、匹配导航(地形匹配导航、影像匹配导航)等。GNSS泛指所有的卫星导航系统,包括全球的、区域的和增强的,如美国的GPS系统、俄罗斯的GLONASS系统、中国的COMPASS系统、欧洲的GALILEO系统以及相关的增强系统,如美国的WAAS(广域增强系统)、欧洲的EGNOS(欧洲静地导航重叠系统)、日本的QZSS系统、印度的IRNSS系统等,还涵盖在建和将建的其他卫星导航系统。

2012年12月27日,北斗卫星导航系统新闻发布会在国务院新闻办公室新闻发布厅召开,我国北斗系统在继续保留北斗卫星导航试验系统有源定位、双向授时和短报文通信服务基础上,自即日起开始向亚太大部分地区正式提供连续无源定位、导航、授时等服务;同日,公布了北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号B1I(1.0版),该文件定义了北斗系统公开服务信号B1I的卫星与用户终端之间的接口关系,明确了北斗系统所采用的坐标系统和时间系统,规范了B1I信号结构和基本特性参数以及测距码等相关内容,给出了北斗导航电文,是开发制造接收终端和芯片所必备的文件,为推进我国北斗卫星导航系统的广泛应用提供了基础。

本教材虽然以“GPS测量与数据处理”命名,但主要篇幅放在数据处理上。对于目前世界上的四个主要导航卫星系统(GPS、GLONASS、COMPASS、GALILEO)来说,其导航定位的基本原理是相似的,因此本教材介绍的GPS数据处理方法,大部分(如周跳探测与修复、基线向量解算、网平差、VRS技术、变形监测等)也适用于其他三个导航定位系统,并不局限于GPS系统。本教材是在读者已较系统地学习了《GPS定位原理及应用》前提下,结合教学、科研、生产实践和当前的研究热点问题,对GNSS的基本原理和数据处理方法进行较详细的介绍,部分章节给出了相关的算例。

全书共分九章。第一章简要介绍了全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)的现状与进展、惯性导航系统的基本概念与基本原理、我国全球导航卫星连续运行站网构建的现状等方面的内容。第二章主要介绍GPS数据处理中常用的时间标示方法及其换算、坐标系统、广播星历和精密星历文件格式,重点介绍卫星轨道拟合和基于观测历元卫星瞬时坐标的计算方法,并对COMPASS卫星的在轨位置计算进行了介绍。第三

章在介绍 RINEX 格式观测值文件的基础上,重点介绍周跳的探测与修复的方法。第四章主要讨论 GPS 测量的误差来源及改正措施。第五章在介绍两种基本观测量(伪距观测值和载波相位观测值)的观测方程的基础上,主要讨论利用载波相位双差观测值解算基线向量的方法,其重点在于采取 LAMBDA 算法获取双差模糊度固定解的方法。第六章主要介绍 GPS 网的外业观测质量评价方法、基线向量网的平差模型、坐标系统和高程系统的转换模式。第七章主要解决动态卡尔曼滤波方法、似单差方法、小波变换方法在 GPS 监测网数据处理中的应用问题。第八章在介绍传统的差分定位技术基础上,重点介绍虚拟参考站(VRS)技术的基本原理和关键算法,并对 PPP 定位的基本原理进行简单介绍。第九章在介绍 GPS/INS 组合导航基本原理的基础上,重点介绍了几种 GPS/INS 组合导航系统的基本原理和应用。

本教材由安徽理工大学余学祥、吕伟才、赵兴旺,中国矿业大学王坚,河南工程学院刘绍堂,南京信息工程大学柯福阳,河北工程大学刘辉共同完成,最后由余学祥负责统稿。

本教材结合教学和科研成果,反映了 GNSS 领域的部分最新成果,如 GNSS 的现状、COMPASS 卫星的在轨瞬时位置的计算、精密星历 SP3-c 格式文件的介绍、似单差方法在变形监测中的应用、VRS 技术的关键算法、PPP 技术的基本模型等,但当前 GNSS 技术(特别是我国的北斗卫星导航系统)处于迅速发展阶段,我们编写时力求与时俱进,但未必如愿。

在本书编写过程中,笔者参阅了大量文献,引用了相关书刊中的资料,在此一并向有关作者表示衷心的感谢。

本教材得到安徽省国土资源科技项目“淮南市城乡土地资源集约化利用‘3S’技术支撑系统研究”项目(编号:2011-K-22)和“基于 GIS 技术的淮南煤田开采沉陷监测系统研究”项目(编号:2011-K-18)的资助,在此表示感谢!

由于时间仓促,编者虽做了很大努力,但书中难免有疏漏和不妥之处,真诚希望广大读者批评指正。

编著者

2013 年 3 月

目 录

| | | |
|-----|----------------------|-----|
| 第一章 | 导航定位系统简介 | 1 |
| 第一节 | 卫星导航定位系统简介 | 1 |
| 第二节 | 惯性导航系统简介 | 22 |
| 第三节 | 我国全球导航卫星连续运行站网构建 | 25 |
| 第二章 | 卫星在轨位置的计算 | 37 |
| 第一节 | GPS 定位的时间系统 | 37 |
| 第二节 | GPS 定位的坐标系统和星历 | 45 |
| 第三节 | 卫星瞬时坐标的计算 | 76 |
| 第四节 | 北斗系统卫星瞬时坐标的计算 | 81 |
| 第三章 | 载波相位观测值周跳探测与修复 | 85 |
| 第一节 | RINEX 格式观测文件 | 85 |
| 第二节 | 周跳探测基本方法 | 97 |
| 第四章 | GPS 测量误差来源及其改正 | 109 |
| 第一节 | 与卫星有关的误差 | 110 |
| 第二节 | 与传播路径有关的误差 | 115 |
| 第三节 | 与接收设备有关的误差 | 125 |
| 第四节 | 其他误差 | 128 |
| 第五章 | 基线向量解算 | 131 |
| 第一节 | GPS 定位的基本观测方程 | 131 |
| 第二节 | 载波相位双差观测方程 | 134 |
| 第三节 | 双差观测值的基线向量浮点解 | 137 |
| 第四节 | 模糊度固定解 | 143 |
| 第五节 | 基于 LAMBDA 算法的整周模糊度解算 | 150 |
| 第六节 | 回代解算基线向量 | 164 |
| 第七节 | 基线解算软件简介 | 165 |

| | | |
|------|---------------------|-----|
| 第六章 | GPS 网平差及成果转换 | 176 |
| 第一节 | 外业观测成果检核 | 177 |
| 第二节 | GPS 网空间无约束平差及其质量评价 | 182 |
| 第三节 | GPS 网坐标系统转换 | 191 |
| 第四节 | GPS 网高程系统转换 | 210 |
| 第七章 | GPS 监测网数据处理方法 | 220 |
| 第一节 | Kalman 滤波方法 | 220 |
| 第二节 | 似单差方法 | 231 |
| 第三节 | 小波分析方法 | 243 |
| 第八章 | VRS 技术与 PPP 技术简介 | 263 |
| 第一节 | GPS 差分定位技术简介 | 263 |
| 第二节 | VRS 的基本原理 | 271 |
| 第三节 | 精密单点定位简介 | 289 |
| 第九章 | GPS/INS 组合导航基本原理与应用 | 297 |
| 第一节 | 惯性导航系统 | 297 |
| 第二节 | GPS/INS 组合导航系统 | 301 |
| 第三节 | GPS/INS 组合导航系统应用 | 313 |
| 参考文献 | | 319 |

第一章 导航定位系统简介

不论是早期的航海还是现在的航天,都离不开导航,导航已成为海、陆、空、天各种运动载体不可或缺的指南。随着科技的发展,导航系统除了众所周知的传统导航设备外,又出现了先进的卫星导航。目前,导航系统包括全球导航卫星系统(GPS、GLONASS、GALILEO、BD)、惯性导航(包括惯性导航 INS、航位推算导航 DR)、天文导航系统(CNS)、重磁导航(重力导航、磁力导航)、匹配导航(地形匹配导航、影像匹配导航)等。

本章主要介绍全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)的现状与进展、惯性导航系统的基本概念与基本原理、我国全球导航卫星连续运行站网构建的现状等方面的内容,为后期的课程学习做个基本的铺垫。

第一节 卫星导航定位系统简介

GNSS 泛指所有的卫星导航系统,包括全球的、区域的和增强的,如美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统、中国的 COMPASS 系统、欧洲的 GALILEO 系统,以及相关的增强系统,如美国的 WAAS(广域增强系统)、欧洲的 EGNOS(欧洲静地导航重叠系统)、日本的 QZSS 系统、印度的 IRNSS 系统等,还涵盖在建和以后将要建设的其他卫星导航系统。国际 GNSS 系统是个多系统、多层面、多模式的复杂组合系统,本节仅对 GPS 系统、GLONASS 系统、COMPASS 系统、GALILEO 系统、QZSS 系统和 IRNSS 系统等进行简单介绍,重点放在其现状与进展方面,详细内容请参考相关文献。

一、GPS 简介

1. GPS 起源

20 世纪上半叶,大地测量处于低潮,它的复苏始于 20 世纪 50 年代。使大地测量走出低谷的最初冲击,来自第二次世界大战期间及其以后电子学的发展。50 年代末,人造卫星的出现,为大地测量带来了崭新的面貌。卫星大地测量方法刚一出现,就显示出了非凡能力。首先是由短期的观测数据求定了精确的地球扁率,接着推证了南北半球的不对称性。70 年代,卫星多普勒技术得到了广泛的应用,使得大地测量定位发生了巨大的变革;海洋卫星测高(SA)技术,为大地测量应用于海洋学研究开辟了道路;激光对卫星测距(SLR)技术,不仅可用于高精度定位,还可以测定地球自转参数和板块运动,推动了地球动力学的发展。进入 80 年代,全球定位系统(Global Positioning System,GPS)得到了全面发展,由于它具有用途广泛、定位精度高、观测简便及经济效益显著等特点,使大地测量发生了一场深刻的

技术革命。以上这些卫星测量技术,形成了大地测量学的一个新的分支学科——卫星大地测量学。

近 50 年来,人造地球卫星技术在军事、通讯、气象、资源勘察、导航、遥感、大地测量、地球动力学、天文等众多学科领域得到极其广泛的应用,从而推动了科学技术的迅猛发展,也丰富了人类的科学文化生活。

GPS 的前身为美军研制的一种子午仪卫星定位系统(Transit),1958 年研制,1964 年正式投入使用。该系统由 5~6 颗卫星组成的星网工作,每天最多绕过地球 13 次,并且无法给出高度信息,在定位精度方面也不尽如人意。然而,子午仪系统使得研发部门对卫星定位取得了初步的经验,并验证了由卫星系统进行定位的可行性,为 GPS 的研制埋下了铺垫。由于卫星定位显示出在导航方面的巨大优越性及子午仪系统存在对潜艇和舰船导航方面的巨大缺陷,美国海陆空三军及民用部门都感到迫切需要一种新的卫星导航系统。为此,美国海军研究实验室(NRL)提出了名为 Tinmation 的、用 12~18 颗卫星组成 10 000 km 高度的全球定位网计划,并于 1967 年、1969 年和 1974 年各发射了一颗试验卫星,在这些卫星上初步试验了原子钟计时系统,这是 GPS 系统精确定位的基础。而美国空军则提出了 621-B 的、以每星群 4~5 颗卫星组成 3~4 个星群的计划,这些卫星中除 1 颗采用同步轨道外其余的都使用周期为 24 h 的倾斜轨道,该计划以伪随机码(PRN)为基础传播卫星测距信号,其强大的功能,当信号密度低于环境噪声的 1%时也能将其检测出来。伪随机码的成功运用是 GPS 得以取得成功的一个重要基础。海军的计划主要用于为舰船提供低动态的二维定位,空军的计划能提供高动态服务,然而系统过于复杂。由于同时研制两个系统会造成巨大的费用,而且这里两个计划都是为了提供全球定位而设计的,所以 1973 年美国国防部将两者合二为一,并由国防部牵头的卫星导航定位联合计划局(JPO)领导,还将办事机构设立在洛杉矶的空军航天处。该机构成员众多,包括美国陆军、海军、海军陆战队、交通部、国防制图局、北约和澳大利亚的代表。

最初的 GPS 计划在联合计划局的领导下诞生了,该方案将 24 颗卫星放置在互成 120° 的六个轨道上。每个轨道上有 4 颗卫星,地球上任何一点均能观测到 6~9 颗卫星。这样,粗码精度可达 100 m,精码精度为 10 m。由于预算紧缩,GPS 计划减少发射卫星,改为将 18 颗卫星分布在互成 60° 的 6 个轨道上。然而这一方案不能确保卫星可靠性。1988 年又进行了最后一次修改:在互成 30° 的 6 条轨道上有 21 颗运作卫星和 3 颗备份卫星。这也是现在 GPS 卫星所使用的工作方式。图 1-1 为 GPS 系统星座标准配置图。



图 1-1 GPS 星座标准配置图

2. 计划实施

GPS 计划的实施共分三个阶段。

第一阶段——方案论证和初步设计阶段。

从 1978 年到 1979 年,由位于加利福尼亚的范登堡空军基地采用双子座火箭发射 4 颗

试验卫星,卫星运行轨道长半轴为 26 560 km,倾角 64° ,轨道高度 20 000 km。这一阶段主要研制了地面接收机及建立地面跟踪网,结果令人满意。

第二阶段——全面研制和试验阶段。

从 1979 年到 1984 年,又陆续发射了 7 颗称为 BLOCK I 的试验卫星,研制了各种用途的接收机。实验表明,GPS 定位精度远远超过设计标准,利用粗码定位,其精度就可达 14 m。

第三阶段——实用组网阶段。

1989 年 2 月 4 日第一颗 GPS 工作卫星发射成功,这一阶段的卫星称为 BLOCK II 和 BLOCK II-A。此阶段宣告 GPS 系统进入工程建设状态。1993 年底使用的 GPS 网即(21+3)GPS 星座已经建成,今后将根据计划更换失效的卫星。

目前在轨工作的 GPS 卫星共有 31 颗,其中 II-A 型卫星 9 颗、II-R 型卫星 12 颗、II-R-M 型卫星 7 颗、II-F 型卫星 3 颗(表 1-1)。

表 1-1 GPS 星座现状(截止 2013 年 2 月 4 日)

| Plane | Slot | PRN | NORAD | Type SC | Launch date | Input date | Active life (months) |
|-------|------|-----|-------|---------|-------------|------------|----------------------|
| A | 1 | 9 | 22700 | II-A | 26.06.93 | 20.07.93 | 233.3 |
| | 2 | 31 | 29486 | II-R-M | 25.09.06 | 13.10.06 | 75.7 |
| | 3 | 8 | 25030 | II-A | 06.11.97 | 18.12.97 | 180.7 |
| | 4 | 7 | 32711 | II-R-M | 15.03.08 | 24.03.08 | 58.4 |
| | 5 | 24 | 38833 | II-F | 04.10.12 | 14.11.12 | 2.7 |
| B | 1 | 16 | 27663 | II-R | 29.01.03 | 18.02.03 | 119.4 |
| | 2 | 25 | 36585 | II-F | 28.05.10 | 27.08.10 | 29.3 |
| | 3 | 28 | 26407 | II-R | 16.07.00 | 17.08.00 | 149.7 |
| | 4 | 12 | 29601 | II-R-M | 17.11.06 | 13.12.06 | 73.6 |
| | 5 | 30 | 22779 | II-A | 30.08.93 | 28.09.93 | 200.0 |
| C | 1 | 29 | 32384 | II-R-M | 20.12.07 | 02.01.08 | 61.1 |
| | 2 | 3 | 23833 | II-A | 28.03.96 | 09.04.96 | 200.5 |
| | 3 | 19 | 28190 | II-R | 20.03.04 | 05.04.04 | 106.0 |
| | 4 | 17 | 28874 | II-R-M | 26.09.05 | 13.11.05 | 85.5 |
| | 5 | 6 | 23027 | II-A | 10.03.94 | 28.03.94 | 225.5 |
| D | 1 | 2 | 28474 | II-R | 06.11.04 | 22.11.04 | 98.3 |
| | 2 | 1 | 37753 | II-F | 16.07.11 | 14.10.11 | 15.7 |
| | 3 | 21 | 27704 | II-R | 31.03.03 | 12.04.03 | 117.7 |
| | 4 | 4 | 22877 | II-A | 26.10.93 | 22.11.93 | 230.4 |
| | 5 | 11 | 25933 | II-R | 07.10.99 | 03.01.00 | 157.1 |

续表 1-1

| Plane | Slot | PRN | NORAD | Type SC | Launch date | Input date | Active life(months) |
|-------|------|-----|-------|---------|-------------|------------|---------------------|
| E | 1 | 20 | 26360 | II-R | 11.05.00 | 01.06.00 | 152.0 |
| | 2 | 22 | 28129 | II-R | 21.12.03 | 12.01.04 | 108.8 |
| | 3 | 5 | 35752 | II R-M | 17.08.09 | 27.08.09 | 41.3 |
| | 4 | 18 | 26690 | II-R | 30.01.01 | 15.02.01 | 143.6 |
| | 5 | 32 | 20959 | II-A | 26.11.90 | 10.12.90 | 217.3 |
| | 6 | 10 | 23953 | II-A | 16.07.96 | 15.08.96 | 196.8 |
| F | 1 | 14 | 26605 | II-R | 10.11.00 | 10.12.00 | 145.8 |
| | 2 | 15 | 32260 | II R-M | 17.10.07 | 31.10.07 | 63.2 |
| | 3 | 13 | 24876 | II-R | 23.07.97 | 31.01.98 | 180.0 |
| | 4 | 23 | 28361 | II-R | 23.06.04 | 09.07.04 | 102.8 |
| | 5 | 26 | 22014 | II-A | 07.07.92 | 23.07.92 | 245.8 |

3. GPS 现代化

GPS 是当今世界上功能最强、性能最好、应用最广泛的天基导航系统,不管是和平年代的日常生活,还是战时军事行动,美国都已离不开 GPS,但其在应用过程中暴露出了一些问题:容易受到干扰、安全性较差、使用不可控。因此,1998 年美国副总统戈尔提出了 GPS 现代化这一概念,其实质是要加强 GPS 对美军现代化战争的支撑和保持全球民用导航领域中的领导地位。GPS 现代化包括军事和民用两部分。GPS 现代化的军事部分包括 4 项措施:增加 GPS 卫星发射的信号强度,以增强抗电子干扰能力;增加具有更好的保密性和安全性的新的军用码(M 码),并与民用码分开;军用接收设备比民用的有更好的保护装置,特别是抗干扰能力和快速初始化能力;创造新的技术,以阻止或阻扰敌方使用 GPS。GPS 现代化的民用部分包括三项措施:① 在一年一度的评估基础上,决定是否将 SA 信号强度降为零(已于 2000 年 5 月 1 日零点取消了 SA);② 在 L2 频道上增加第二民用码(即 C/A 码),这样有利于提高定位精度和进行电离层改正;③ 增加 L5 民用频率,这有利于提高民用实时定位的精度和导航的安全性。

美国国防部(DoD)制订了具体的现代化计划,包括采购性能更好的新型 GPS 卫星、对地面运行控制系统进行改造、采购 M 码信号接收机等,以期大幅提升 GPS 的各项性能。美国的升级计划将全面覆盖 GPS 系统的 3 个组成部分:采购 GPS II-F、GPS III 卫星替换整个星座;升级改造地面控制系统;研制开发新型军用接收机。2012~2016 年期间总投资约 73 亿美元,在随后的 15 年,还需投资约 150 亿美元。到 2030 年全部计划完成时,DoD 将实现 GPS 的全面升级,有效提升系统在干扰环境下的性能。

① 空间段卫星的替换。GPS II-F 和 GPS III 是能播发 M 码信号的新型卫星。GPS II-F 共计划发 12 颗,目前已发 3 颗,美国将在 2014 年前发射完成剩余的 11 颗。2014~2018 年间发射 8 颗 GPS III-A 卫星,2018~2024 年间发射 16 颗 GPS III-B;2025~2030

年间发射 8 颗 GPS III—C 卫星。

② 地面控制系统的升级改造。只更新 GPS 卫星星座,是不可能使 GPS 系统的抗干扰及其他性能全面提升的。因此,升级改造地面控制系统,提高其对新型卫星的运行控制能力是十分必要的。地面控制系统升级后应具备的能力是:能监控所有在轨运行卫星播发的军用 M 码信号;可以连续更新卫星播发的时间和卫星位置校正信息(而目前的系统每天只可以更新 1 次);能够有效控制 GPS III—C 卫星“点波束功率增强”天线(GPS III—C 卫星配备一个大型天线,可实现地面上指定区域的功率增强,即“点波束功率增强”)。

③ 新型军用接收机的开发。对于新型接收机的开发,DoD 计划在 2012~2016 年间,完成全功能 M 码接收机的研发。2013 年完成样机研制,2016 年开始各种武器平台的应用测试工作。

GPS 现代化最具标志性的是在 2009 年 4 月实现了 GPS 卫星 L5 频道的发播。这意味着 GPS 用户可以收到 3 个频率(L1、L2、L5)的导航无线电信号,有更完善的电离层改正,更好的定位、定时和导航的可靠性和精度。此外,与已有的 GPS 民用导航码相比,L5 有较高的芯片运行速率,可以进行更精确的码和相位测量。

GPS 现代化计划的全面实施,将使 GPS 系统的生存能力及其各种性能得到非常显著的增强,美军武器装备的作战效能、部队的整体战斗力会有大幅度提升。

二、GLONASS 系统简介

1960 年晚些时候,当时已有的卫星导航系统不能达到导航定位的目的。当时苏联军方确认需要一个卫星无线电导航系统(SRNS)用于规划中的新一代弹道导弹的精确导引。1968~1969 年,苏联国防部、科学院和海军的一些研究所联合起来要为海、陆、空、天武装力量建立一个单一的解决方案。1970 年这个系统的需求文件编制完成。进一步研究之后,在 1976 年,苏联颁布法令建立 GLONASS(Global Orbiting Navigation Satellite System,全球导航卫星系统)。

GLONASS 的起步比 GPS 晚 9 年。从苏联于 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始,到 1996 年,13 年时间内经历周折,虽然遭遇了苏联的解体,由俄罗斯接替部署,但始终没有终止或中断 GLONASS 卫星的发射。

1995 年初只有 16 颗 GLONASS 卫星在轨工作,1995 年进行了三次成功发射,将 9 颗卫星送入轨道,完成了 24 颗工作卫星加 1 颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整和检验,已于 1996 年 1 月 18 日,整个系统正常运行。

按照设计,GLONASS 星座卫星由中轨道的 24 颗卫星组成,包括 21 颗工作星和 3 颗备份星,分布于 3 个圆形轨道面上,轨道高度 19 100 km,倾角 64.8° 。和 GPS 不同,GLONASS 使用频分多址(FDMA)的方式,每颗 GLONASS 卫星广播两种信号,L1 和 L2 信号。具体地说,频率分别为 $L1=1\ 602+0.562\ 5\times k(\text{MHz})$ 和 $L2=1\ 246+0.437\ 5\times k(\text{MHz})$,其中 k 为 1~24 每颗卫星的频率编号,同一颗卫星满足 $L1/L2=9/7$ 。图 1-2 为 GLONASS 系统星座标准配置图。

GLONASS 系统标准配置为 24 颗卫星,而 18 颗卫星就能保证该系统为俄罗斯境内用户提供全部服务。该系统卫星分为“GLONASS”和“GLONASS—M”两种类型,后者使用寿命更长,可达 7 年。研制中的“GLONASS—K”卫星的在轨工作时间可长达 10~12 年。

GLONASS 一开始就没有加 SA 干扰,所以其民用精度优于加 SA 的 GPS。不过,其应用普及情况则远不及 GPS,这主要是俄罗斯没有开发民用市场。另外,GLONASS 卫星平均在轨道上的寿命较短,且由于经济困难无力补网,在轨可用卫星少,不能独立组网。2003 年的伊拉克战争对俄罗斯产生了相当大的震动,迫使俄罗斯领导层再次对太空的军事用途重视起来。

俄罗斯目前正在着手 GLONASS 现代化的工作。俄罗斯太空部队打算开始进行新一代 GLONASS—M 计划的飞行试验。新型 GLONASS—M 卫星除了将有更长的设计寿命(从现行的 3 年

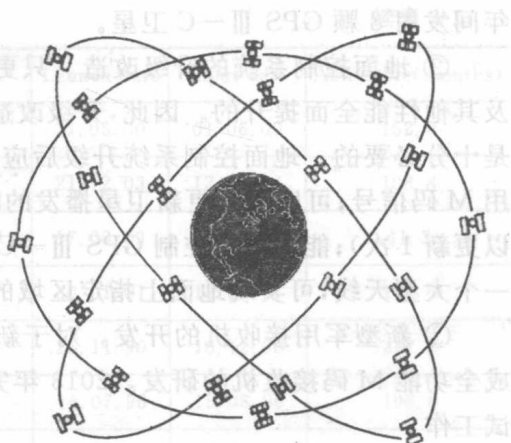


图 1-2 GLONASS 星座

提高到 7~8 年)以外,还将具有更好的信号特性。俄罗斯还计划要在将来转变到低质量(MASS)第三代 GLONASS—K 卫星,确保卫星工作寿命在 10 年以上。

莫斯科时间 2011 年 11 月 4 日 16 时 51 分(北京时间 20 时 51 分),俄罗斯航天部门使用一枚“质子—M”重型运载火箭,将 3 颗“GLONASS—M”全球导航卫星成功送入太空。俄航天署署长波波夫金说,该系统在轨卫星群已有 28 颗卫星,达到了设计水平。随着地面设施的发展,“GLONASS”系统预计将在 2015 年完全建成。届时,其定位和导航误差范围将从目前的 5~6 m 缩小为 1 m 左右,就精度而言该系统将处于全球领先地位。

目前在轨的 GLONASS 卫星共有 29 颗,其中工作卫星 23 颗、备用卫星 2 颗,3 颗卫星处于维修状态,1 颗卫星处于测试状态(表 1-2)。

表 1-2

GLONASS 星座现状(截止 2013 年 2 月 4 日)

| Orb. slot | Orb. pl. | RF chnl | #GC | Launched | Operation begins | Operation ends | Life-time (months) | Satellite health status | | Comments |
|-----------|----------|---------|-----|----------|------------------|----------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------|
| | | | | | | | | In alm -anac | In ephemer -is(UTC) | |
| 1 | 1 | 01 | 730 | 14.12.09 | 30.01.10 | | 37.7 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 2 | 1 | -4 | 728 | 25.12.08 | 20.01.09 | | 49.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 3 | 1 | 05 | 744 | 04.11.11 | 08.12.11 | | 15.1 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 4 | 1 | 06 | 742 | 02.10.11 | 25.10.11 | | 16.1 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 5 | 1 | 01 | 734 | 14.12.09 | 10.01.10 | | 37.7 | + | +13:31 04.02.13 | In operation |
| 6 | 1 | -4 | 733 | 14.12.09 | 24.01.10 | | 37.7 | + | +14:00 04.02.13 | In operation |
| 7 | 1 | 05 | 745 | 04.11.11 | 18.12.11 | | 15.1 | + | +14:01 04.02.13 | In operation |

第一章 导航定位系统简介

续表 1-2

| Orb. slot | Orb. pl. | RF chnl | # GC | Launched | Operation begins | Operation ends | Life-time (months) | Satellite health status | | Comments |
|-----------|----------|---------|------|----------|------------------|----------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------|
| | | | | | | | | In alm -anac | In ephemer -is(UTC) | |
| 8 | 1 | -6 | 743 | 04.11.11 | 20.09.12 | 05.01.13 | 15.1 | - | -12:59 04.02.13 | Maintenance |
| 9 | 2 | -2 | 736 | 02.09.10 | 04.10.10 | | 29.1 | + | +14:00 04.02.13 | In operation |
| 10 | 2 | -7 | 717 | 25.12.06 | 03.04.07 | | 73.4 | + | +14:00 04.02.13 | In operation |
| 11 | 2 | 00 | 723 | 25.12.07 | 22.01.08 | | 61.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 12 | 2 | -1 | 737 | 02.09.10 | 12.10.10 | | 29.1 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 13 | 2 | -2 | 721 | 25.12.07 | 08.02.08 | | 61.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 14 | 2 | -7 | 715 | 25.12.06 | 03.04.07 | | 73.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 15 | 2 | 00 | 716 | 25.12.06 | 12.10.07 | | 73.4 | + | +14:01 04.02.13 | In operation |
| 16 | 2 | -1 | 738 | 02.09.10 | 11.10.10 | | 29.1 | + | +14:01 04.02.13 | In operation |
| 17 | 3 | 04 | 746 | 28.11.11 | 23.12.11 | | 14.3 | + | +14:01 04.02.13 | In operation |
| 18 | 3 | -3 | 724 | 25.09.08 | 26.10.08 | | 52.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 19 | 3 | 03 | 720 | 26.10.07 | 25.11.07 | | 63.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 20 | 3 | 02 | 719 | 26.10.07 | 27.11.07 | | 63.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 21 | 3 | 04 | 725 | 25.09.08 | 05.11.08 | | 52.4 | + | +12:59 04.02.13 | In operation |
| 22 | 3 | -3 | 731 | 02.03.10 | 28.03.10 | | 35.2 | + | +13:00 04.02.13 | In operation |
| 23 | 3 | 03 | 732 | 02.03.10 | 28.03.10 | | 35.2 | + | +14:01 04.02.13 | In operation |
| 24 | 3 | 02 | 735 | 02.03.10 | 28.03.10 | | 35.2 | + | +13:01 04.02.13 | In operation |
| 21 | 3 | -5 | 701 | 26.02.11 | | | 23.3 | | | Flight Tests |
| 14 | 2 | | 722 | 25.12.07 | 25.01.08 | 12.10.11 | 61.4 | | | Spares |
| 17 | 3 | | 714 | 25.12.05 | 31.08.06 | 19.12.11 | 85.4 | | | Spares |
| 8 | 1 | | 712 | 26.12.04 | 07.10.05 | 22.11.12 | 97.4 | | | Maintenance |
| 8 | 1 | | 729 | 25.12.08 | 12.02.09 | 10.09.12 | 49.4 | | | Maintenance |

俄罗斯联邦航天局于 2013 年 1 月 12 日发布了一份名为《俄罗斯 2013 至 2020 空间活动》的文件,宣布从现在起至 2020 年还将建造并发射 13 颗 GLONASS—M 卫星以及 22 颗 GLONASS—K 卫星。根据文件,俄罗斯将在未来 8 年中为 GLONASS 项目继续投资 3 265 亿卢布(约合 107.7 亿美元),并计划使 GLONASS 的定位精度在 2015 年达到 1.4 m,在 2020 年达到 0.6 m。2013 年,GLONASS 计划再发射 4 颗卫星,并大力维护和发展地面基础设施,以满足 GLONASS 系统现代化建设的需要。文件回顾了自 2001 年以来 GLONASS 的发展建设,肯定了过去所做出的成绩,指出目前 GLONASS 系统已经达到了 100% 的全球覆盖,而在 2002 年只有 18%。文件中还指出,相比 2006 年的 35~50 m 定位精度,目前 GLONASS 的定位精度已经达到了 5.6 m,基本满足了大多数用户的要求。

三、北斗卫星导航定位系统(COMPASS)

1. 系统概述

北斗卫星导航系统(BeiDou(COMPASS)Satellite Navigation System)是中国自主建设、独立运行,并与世界其他卫星导航系统兼容共用的全球卫星导航系统。

北斗卫星导航系统由空间星座、地面控制和用户终端三大部分组成。空间星座部分由 5 颗地球静止轨道卫星和 30 颗非地球静止轨道卫星组成。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 21 500 km,轨道倾角 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 36 000 km,均匀分布在 3 个倾斜同步轨道面上,轨道倾角 55° ,3 颗倾斜地球同步轨道卫星星下点轨迹重合,交叉点经度为东经 118° ,相位差 120° 。图 1-3 为 COMPASS 系统星座模拟图。

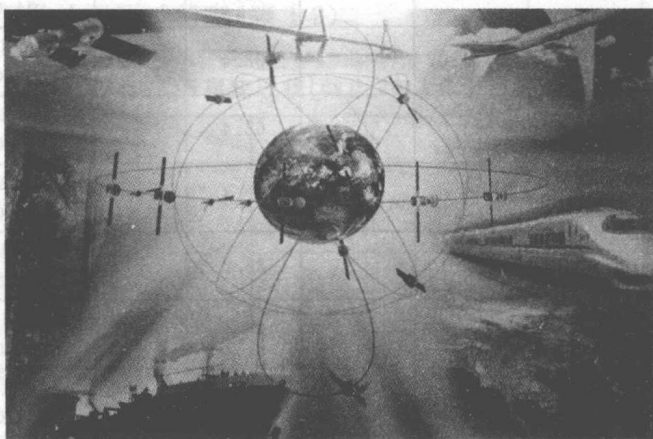


图 1-3 COMPASS 系统星座模拟图

地面控制部分由若干主控站、注入站和监测站组成。主控站主要任务是收集各个监测站的观测数据,进行数据处理,生成卫星导航电文、广域差分信息和完好性信息,完成任务规划与调度,实现系统运行控制与管理等;注入站主要任务是在主控站的统一调度下,完成卫星导航电文、广域差分信息和完好性信息注入,有效载荷的控制管理;监测站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,为卫星轨道确定和时间同步提供观测数据。

用户终端部分由各类“北斗”用户终端,以及与其他卫星导航系统兼容的终端组成,能够

满足不同领域和行业的应用需求。

北斗卫星导航系统时间基准采用北斗时(BDT),是一个连续的时间系统,秒长取为国际单位制(SI)秒,起始历元为2006年1月1日00:00协调世界时(UTC)。北斗时与协调世界时的偏差保持在100 ns以内。“北斗”卫星导航系统的坐标框架采用中国2000大地坐标系(CGCS2000)。

北斗卫星导航系统建成后将为全球用户提供卫星定位、导航和授时服务,并为我国及周边地区用户提供定位精度1 m的广域差分服务和120个汉字/次的短报文通信服务。

① 主要功能:定位、测速、单双向授时、短报文通信;

② 服务区域:全球;

③ 定位精度:优于10 m;

④ 测速精度:优于0.2 m/s;

⑤ 授时精度:20 ns。

2. 系统发展

按照“质量、安全、应用、效益”的总要求,坚持“自主、开放、兼容、渐进”的发展原则,遵循“先区域、后全球”的总体思路,“北斗”卫星导航系统正在按照“三步走”的发展战略稳步推进。具体发展步骤如下:

第一步,北斗卫星导航试验系统。1994年,中国启动北斗卫星导航试验系统建设;2000年相继发射2颗“北斗”导航试验卫星,初步建成北斗卫星导航试验系统,成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家;2003年发射第3颗“北斗”导航试验卫星,进一步增强了“北斗”卫星导航试验系统性能。

北斗卫星导航试验系统空间星座部分包括3颗地球静止轨道卫星,分别定点于东经80°、110.5°和140°赤道上空。地面控制部分由地面控制中心和若干标校站组成,地面控制中心主要完成卫星轨道确定、电离层校正、用户位置确定及用户短报文信息交换等处理任务;标校站主要为地面控制中心提供距离观测量和校正参数。用户终端部分由手持型、车载型和指挥型等各种类型的终端组成,具有定位申请发送和位置坐标信息接收等功能。

北斗卫星导航试验系统主要功能和性能指标如下。

① 主要功能:定位、单双向授时、短报文通信;

② 服务区域:中国及周边地区;

③ 定位精度:优于20 m;

④ 授时精度:单向100 ns,双向20 ns;

⑤ 短报文通信:120个汉字/次。

第二步,北斗卫星导航区域系统。2004年中国启动北斗卫星导航系统工程建设,2012年底完成5颗GEO卫星、5颗IGSO卫星和4颗MEO卫星,具备区域服务能力。

北斗卫星导航区域系统的主要功能和性能指标如下。

① 主要功能:定位、测速、单双向授时、短报文通信;

② 服务区域:中国及周边地区;

③ 定位精度:平面10 m,高程10 m;

④ 测速精度:优于0.2 m/s;

⑤ 授时精度:单向50 ns;

⑥ 短报文通信:120 个汉字/次。

第三步,2020 年左右全面建成北斗卫星导航系统,形成全球服务能力。

3. 系统现状

截至 2012 年 10 月 25 日,北斗卫星导航系统已发射 16 颗卫星(参见表 1-3),并于 2012 年底前组网运行,形成区域服务能力。北斗系统在继续保留北斗卫星导航试验系统有源定位、双向授时和短报文通信服务基础上,面向我国周边大部分地区提供无源定位、导航、授时等服务。

表 1-3 北斗卫星导航系统发射卫星情况

| 卫 星 | 发射日期 | 运载火箭 | 轨道 |
|-----------------|--------------|-------|------|
| 第 1 颗北斗导航试验卫星 | 2000. 10. 31 | CZ-3A | GEO |
| 第 2 颗北斗导航试验卫星 | 2000. 12. 21 | CZ-3A | GEO |
| 第 3 颗北斗导航试验卫星 | 2003. 05. 25 | CZ-3A | GEO |
| 第 4 颗北斗导航试验卫星 | 2007. 02. 03 | CZ-3A | GEO |
| 第 1 颗北斗导航卫星 | 2007. 04. 14 | CZ-3A | MEO |
| 第 2 颗北斗导航卫星 | 2009. 04. 15 | CZ-3C | GEO |
| 第 3 颗北斗导航卫星 | 2010. 01. 17 | CZ-3C | GEO |
| 第 4 颗北斗导航卫星 | 2010. 06. 02 | CZ-3A | GEO |
| 第 5 颗北斗导航卫星 | 2010. 08. 01 | CZ-3A | IGSO |
| 第 6 颗北斗导航卫星 | 2010. 11. 01 | CZ-3C | GEO |
| 第 7 颗北斗导航卫星 | 2010. 12. 18 | CZ-3A | IGSO |
| 第 8 颗北斗导航卫星 | 2011. 04. 10 | CZ-3A | IGSO |
| 第 9 颗北斗导航卫星 | 2011. 07. 27 | CZ-3A | IGSO |
| 第 10 颗北斗导航卫星 | 2011. 12. 02 | CZ-3A | IGSO |
| 第 11 颗北斗导航卫星 | 2012. 02. 25 | CZ-3C | GEO |
| 第 12、13 颗北斗导航卫星 | 2012. 04. 30 | CZ-3B | MEO |
| 第 14、15 颗北斗导航卫星 | 2012. 09. 19 | CZ-3B | MEO |
| 第 16 颗北斗导航卫星 | 2012. 10. 25 | CZ-3C | GEO |

为鼓励国内外相关企业参与北斗应用终端研发,推动北斗广泛应用,中国卫星导航系统管理办公室于 2012 年 12 月 27 日公布了北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B1I(1.0 版)。该文件定义了北斗系统公开服务信号 B1I 的卫星与用户终端之间的接口关系,明确了北斗系统所采用的坐标系统和时间系统,规范了 B1I 信号结构和基本特性参数以及测距码等相关内容,给出了北斗导航电文,是开发制造接收终端和芯片所必备的文件。

2012 年 12 月 28 日中共中央、国务院、中央军委对北斗二号卫星导航系统开通服务向总参谋部、总装备部、国家国防科技工业局、中国科学院、中国航天科技集团公司、中国电子科技集团公司、国防科技大学等发出了贺电。贺电指出,建设我国独立自主的卫星导航系统,是党中央、国务院、中央军委着眼国家安全和发展的重大决策。北斗二号卫星导航