



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Precise Orbit Determination of BeiDou
Navigation Satellite System

刘伟平 郝金明 著

北斗卫星导航系统 精密轨道确定



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

北斗卫星导航系统精密轨道确定

Precise Orbit Determination of BeiDou Navigation Satellite System

刘伟平 郝金明 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 刘伟平 2016

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

北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统。本书围绕北斗卫星导航系统精密轨道确定这一核心问题展开研究:首先总结、对比了各卫星导航系统及其精密定轨方法的发展现状,并介绍了北斗卫星精密定轨的理论基础;在此基础上,从单系统精密定轨、多系统融合精密定轨、精密定轨后处理、低轨道地球卫星辅助北斗卫星精密定轨,以及实时轨道确定等方面对北斗卫星精密定轨方法进行了系统研究。

本书可作为高等院校大地测量、导航工程专业高年级本科生和研究生的教材或参考书,也可作为从事导航卫星精密定轨特别是北斗卫星精密定轨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

北斗卫星导航系统精密轨道确定 / 刘伟平, 郝金明
著. —北京: 测绘出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5030-3935-5

I. ①北… II. ①刘… ②郝… III. ①全球定位系统
—卫星导航—卫星轨道—研究 IV. ①V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 129097 号

责任编辑	李莹	封面设计	李伟	责任校对	董玉珍	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)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	10.25			字 数	198 千字		
版 次	2016 年 6 月第 1 版			印 次	2016 年 6 月第 1 次印刷		
印 数	001—800			定 价	49 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3935-5

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统。2012年12月27日,系统正式提供亚太区域服务以来,已经开始在交通运输、海洋渔业、水文监测、气象预报等领域发挥重要作用。导航卫星的轨道精度是衡量系统服务能力的重要性能指标,提供高精度的北斗卫星精密轨道,对提高系统竞争力、促进系统推广应用具有重要的现实意义。

然而,作为后起建设的卫星导航系统,北斗卫星精密定轨方法的研究尚处于起步阶段,相比全球定位系统(Global Position System, GPS)等成熟系统,理论方法还不完善,定轨精度也还有较大的提升空间。在此背景条件下,借鉴已有系统的成熟经验,结合北斗系统自身特点,以导航卫星精密定轨方法的最新发展方向为牵引,积极推动北斗卫星精密轨道确定方法的发展与完善,进一步提高北斗卫星精密定轨精度水平,对系统的建设发展尤显重要。

为此,本书紧紧围绕北斗卫星导航系统精密轨道确定这一核心问题展开研究,首先总结对比了各卫星导航系统及其精密定轨方法的发展现状,并介绍了北斗卫星精密定轨的理论基础,在此基础上,从单系统精密定轨、多系统融合精密定轨、精密定轨后处理、低轨道地球卫星辅助北斗卫星精密定轨,以及实时轨道确定等方面对北斗卫星精密定轨方法进行了系统研究。

本书第1章主要阐述了研究背景和意义,以及相关技术的国内外研究现状;第2章系统介绍了北斗卫星精密定轨的理论基础;第3章研究了北斗卫星单系统精密定轨方法;第4章研究了北斗卫星多系统融合精密定轨方法;第5章从轨道分网合成和轨道多时段合成两方面研究了北斗卫星精密定轨后处理方法;第6章研究了低轨卫星辅助北斗卫星精密定轨方法;第7章研究了基于抗差自适应滤波的地球静止轨道卫星实时轨道确定方法;第8章总结了本书的主要工作,并对后续研究做了初步设想。

本书的有关研究得到了信息工程大学许其凤院士的帮助和指导,得到了信息工程大学导航与空天目标工程学院导航工程教研室领导和同事们的大力支持。吕志伟教授、杜兰教授阅读了原稿,并提出了许多建设性意见;谢建涛、田英国、于合理、张辉及许多未提及姓名的同学和朋友帮助检校了书稿。此外,本书的出版得到了测绘地理信息科技出版资金的资助。在此一并表示作者由衷的感谢。

整理书稿期间,我的妻子周蕊女士分担了许多家庭琐事,她的付出与陪伴永远是我前进的动力。

鉴于作者水平能力有限,书中难免有疏漏、不当之处,甚至可能存在提法或认知方面的不妥之处,敬请各位师长及同行批评斧正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 引 言	1
§ 1.2 卫星导航系统发展现状	2
§ 1.3 卫星导航系统精密定轨方法研究现状	9
§ 1.4 本书主要研究内容	17
第 2 章 北斗卫星精密定轨基础	20
§ 2.1 引 言	20
§ 2.2 时空系统	20
§ 2.3 北斗观测量及其组合	23
§ 2.4 卫星动力学模型	27
§ 2.5 统计定轨基本原理	32
§ 2.6 本章小结	35
第 3 章 北斗卫星单系统精密定轨方法	37
§ 3.1 引 言	37
§ 3.2 非差动力法精密定轨	38
§ 3.3 双差动力法精密定轨	40
§ 3.4 算例分析	45
§ 3.5 本章小结	58
第 4 章 北斗卫星多系统融合精密定轨方法	59
§ 4.1 引 言	59
§ 4.2 北斗卫星融合非差精密定轨方法	59
§ 4.3 基于模糊度固定的北斗卫星融合非差精密定轨方法	61
§ 4.4 算例分析	64
§ 4.5 本章小结	73
第 5 章 北斗卫星精密定轨后处理方法	75
§ 5.1 引 言	75

§ 5.2	法方程叠加原理	76
§ 5.3	轨道合成方法	80
§ 5.4	算例分析	88
§ 5.5	本章小结	95
第 6 章	LEO 辅助北斗卫星精密定轨方法	97
§ 6.1	引 言	97
§ 6.2	LEO 星载 GNSS 精密定轨方法简介	99
§ 6.3	伪随机脉冲的快速参数估计方法	102
§ 6.4	LEO 辅助北斗卫星精密定轨方法	105
§ 6.5	算例分析	113
§ 6.6	本章小结	127
第 7 章	基于抗差自适应滤波的 GEO 卫星实时轨道确定方法	129
§ 7.1	引 言	129
§ 7.2	总体思路	129
§ 7.3	基于中位数抗差估计的几何法定轨	131
§ 7.4	基于时隙自适应因子的自适应滤波	134
§ 7.5	算例分析	136
§ 7.6	本章小结	142
第 8 章	总结与展望	143
§ 8.1	主要工作	143
§ 8.2	研究展望	145
参考文献		147

Contents

Chapter 1 Prolegomenon	1
§ 1.1 Introduction	1
§ 1.2 Development Status of Navigation Satellite System	2
§ 1.3 Research Status of Precise Orbit Determination of Navigation Satellite System	9
§ 1.4 Main Research Content	17
Chapter 2 Basis of BeiDou Precise Orbit Determination	20
§ 2.1 Introduction	20
§ 2.2 Time and Coordinate System	20
§ 2.3 BeiDou Observation and Its Combination	23
§ 2.4 Satellite Dynamic Model	27
§ 2.5 Principle of Statistical Orbit Determination	32
§ 2.6 Brief Summary	35
Chapter 3 Single-system Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites	37
§ 3.1 Introduction	37
§ 3.2 Zero-difference Dynamic Precise Orbit Determination	38
§ 3.3 Double-difference Dynamic Precise Orbit Determination	40
§ 3.4 Analysis of Examples	45
§ 3.5 Brief Summary	58
Chapter 4 Multi-GNSS Joint Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites	59
§ 4.1 Introduction	59
§ 4.2 Zero-difference Joint Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites	59
§ 4.3 Zero-difference Joint Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites Based on Ambiguity Fixing	61
§ 4.4 Analysis of Examples	64
§ 4.5 Brief Summary	73

Chapter 5	Post-processing on BeiDou Precise Orbit Determination	75
§ 5.1	Introduction	75
§ 5.2	Principle of Normal Equation Stacking	76
§ 5.3	Method of Orbit Combination	80
§ 5.4	Analysis of Examples	88
§ 5.5	Brief Summary	95
Chapter 6	Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites Assisted by LEO	97
§ 6.1	Introduction	97
§ 6.2	Brief Introduction of LEO Space-borne GNSS Precise Orbit Determination	99
§ 6.3	Fast Parameter Estimation of Pseudo-stochastic Pulse	102
§ 6.4	Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites Assisted by LEO	105
§ 6.5	Analysis of Examples	113
§ 6.6	Brief Summary	127
Chapter 7	Real-time Orbit Determination of GEO Based on Adaptively Robust Filtering	129
§ 7.1	Introduction	129
§ 7.2	General Thought	129
§ 7.3	Geometric Orbit Determination Based on Median Robust Estimation	131
§ 7.4	Adaptive Filtering Based on Time-interval Adaptive Factor	134
§ 7.5	Analysis of Examples	136
§ 7.6	Brief Summary	142
Chapter 8	Summary and Expectation	143
§ 8.1	Main work	143
§ 8.2	Expectation	145
References		147

第1章 绪论

§ 1.1 引言

精密的卫星轨道能够为用户导航定位提供高精度的空间基准,其精度水平是衡量卫星导航系统服务能力的重要性能指标。因此,精密定轨作为卫星导航系统的核心技术,历来是导航领域的研究重点。

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)作为我国自主建设、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,自2012年12月27日正式提供亚太区域服务以来,已经开始在交通运输、海洋渔业、水文监测、气象预报、森林防火、通信时频、电力调度、救灾减灾等方面发挥重要作用^[1-3]。随着系统应用领域的不断拓展,对北斗卫星轨道精度的要求也越来越高,仅依托系统自身播发的广播星历,已经无法满足相关领域的高精度应用需求。然而目前,北斗系统建成运行不久,精密定轨理论尚不完善,轨道精度水平有限,严重制约了系统的进一步拓展应用。在此条件下,加强北斗卫星导航系统精密定轨方法的研究,不断提高北斗卫星轨道的精度水平,对促进系统建设发展具有重要的现实意义。

截至目前,已建或正在建设的卫星导航系统主要有美国的GPS、俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS)、欧盟的Galileo和我国的北斗系统。国外卫星导航系统大多具有先发优势,特别是GPS等成熟系统,在国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)等国际组织多年的数据分析和研究中,精密定轨方法不断改进,轨道理论体系不断完善,最终精密轨道精度已经达到厘米量级。相比之下,北斗系统正处于建设发展的初级阶段,无论精密定轨方法的研究力度还是精密轨道的精度水平都与GPS等成熟系统具有较大差距。为了将北斗系统建成世界一流的卫星导航系统,不断缩小与GPS等成熟系统之间的差距,提高其在卫星导航领域的国际竞争力,也需要进一步加强北斗卫星导航系统精密轨道确定方法的研究。

此外,为了能够对全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)(特别是北斗系统)的运行状况和主要性能指标进行监测评估,我国正在积极倡导建设全球连续监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS)^[4]。其主要任务包括建立北斗导航卫星全弧段、多

重覆盖的全球近实时跟踪网,以及相应的数据采集、存储、分析、管理、发布等信息服务平台,提供北斗卫星导航系统的共享数据与产品,支持技术试验、监测评估、科学研究和专业应用等,其中,北斗卫星精密轨道是其核心产品之一。深入研究北斗卫星的精密定轨方法,对 iGMAS 的建设发展也具有积极的推动作用。

总之,开展北斗卫星导航系统精密轨道确定方法的研究,进一步完善北斗系统精密定轨理论体系,不断提高北斗卫星精密轨道精度,对促进北斗系统建设发展、拓展系统应用领域、提高系统国际竞争力、实现北斗精密轨道产品化都具有十分重要的意义。

§ 1.2 卫星导航系统发展现状

卫星导航系统的研究建设是伴随着人类探索太空的步伐而逐渐兴起的。1957 年 10 月,苏联成功发射了第一颗人造地球卫星(Sputnik)。在对该卫星进行跟踪测量的过程中,美国约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室的基尔博士和魏芬巴哈博士发现利用地面测站的多普勒观测量可以精确确定卫星轨道,他们的同事麦克卢尔博士和克什纳博士则进一步指出:对轨道已被精确确定的卫星进行多普勒测量,可以确定用户的位置。从而为最早的卫星导航系统——子午仪卫星导航系统的诞生奠定了理论基础。以此为起点,卫星导航系统的研究发展已有近 60 年的历史^[5]。

全球卫星导航系统可以为数量不受限制的空中、海上和其他类型用户,在全世界或近地空间的任何地方提供全天候、全天时、高精度的三维定位、测速及授时服务,是拓展人类活动、促进社会发展的重要空间基础设施。2007 年,我国自主建设的北斗卫星导航系统与 GPS、GLONASS、Galileo 等一起被全球卫星导航系统国际委员会(ICG)确认为四大卫星导航系统核心供应商。下面将对主要卫星导航系统目前的发展现状进行简要介绍。

1.2.1 国外卫星导航系统发展现状

1. GPS 系统

为了弥补第一代卫星导航系统——子午仪卫星导航系统的不足,美国军方于 1973 年启动了 GPS 系统的建设任务。1995 年,GPS 系统具备完全工作能力(full operational capability, FOC)^[6]。

按照系统设计,GPS 空间星座由 24 颗中圆地球轨道(middle earth orbit, MEO)卫星(其中 3 颗备份卫星)组成,共 6 个轨道面,每个轨道面上包含 4 颗卫星,轨道倾角约 55° ,轨道平面升交点赤经相差 60° ,轨道高度 20 200 km,运行周期 11 小时 58 分^[7]。实际运行中,卫星数目往往多于 24 颗,主要是为了进一步改善 GPS 覆

盖性能,这些额外的卫星并不包含在 GPS 基础星座中。2011 年 6 月, GPS 完成了星座升级,依然采用 6 个轨道面,但是将基础星座卫星个数增加为 27 颗。截至 2014 年 2 月 10 日, GPS 在轨卫星共 32 颗, 31 颗在轨工作, 1 颗处于调试状态,其中包括 8 颗 BLOCK II A 卫星、12 颗 BLOCK II R 卫星、8 颗 BLOCK II R(M) 卫星和 4 颗 BLOCK II F 卫星。GPS 卫星采用码分多址(CDMA),大部分 GPS 卫星仅能播发双频信号(L1 和 L2),只有 BLOCK II F 卫星具备播发第三频信号(L5)的能力。L1、L2 和 L5 的主频分别为 1 575.42 MHz、1 227.60 MHz 和 1 176.45 MHz。目前, GPS 系统的运控主要依托分布于全球的 2 个主控站(1 主 1 备)、16 个监测站和 12 个注入站进行。

为了维持 GPS 的性能优势,并增强其在国际 GNSS 领域的竞争能力,继 2000 年关闭选择可用性(SA)政策起, GPS 陆续推出了一系列针对空间星座及地面运控部分的现代化措施^[7,8],见图 1.1。其中,空间星座的现代化主要是依靠发射新的导航卫星来实现,相比之前的卫星, BLOCK II R(M) 卫星增加了 L2C 信号和军用 M 码信号,在此基础上, BLOCK II F 卫星又增加了第三频率信号 L5,并配备了更加先进的星载原子钟。 BLOCK III 卫星具有更加优良的特性。而地面运控部分的现代化则是在原先运控系统(Legacy Operational)的基础上,进行两个主要的性能升级:①Architecture Evolution Plan (AEP):利用现代通信和计算机技术对原先的地面运控系统进行升级改造,该工作已于 2011 年 4 月完成;②Next Generation Operational Control System (OCX):发展下一代地面运控系统,以支持对新增导航信号的处理分析能力,特别是为 BLOCK III 卫星的运控做好准备, OCX BLOCK 1 计划 2016 年投入应用。



图 1.1 GPS 现代化计划^①

2. GLONASS 系统

20 世纪 70 年代中期,苏联启动了 GLONASS 系统的建设^[9]。1996 年,俄罗斯宣布 GLONASS 具备完全工作能力。此后,由于经济原因,系统一度处于瘫痪状态。从 2003 年起,系统加速发展,目前已经恢复正常工作能力。

①图 1.1 摘自“<http://www.gps.com>”。

按照系统设计, GLONASS 空间星座部分包含 24 颗 MEO 卫星, 分布于 3 个轨道面, 每个轨道面内 8 颗卫星, 轨道倾角约 64.8° , 轨道平面升交点赤经相差 120° , 轨道高度约 19 100 km, 运行周期 11 小时 15 分^[10]。地面控制部分包括位于莫斯科的系统控制中心, 以及分布于俄罗斯各地的指令和跟踪站网络。截至 2014 年 2 月 10 日, GLONASS 在轨卫星共 28 颗, 其中 24 颗处于工作状态, 3 颗为备份, 1 颗在轨测试。GLONASS 卫星采用频分多址 (frequency division multiple access, FDMA), 主要发射两个频带的信号 (G1 和 G2), 每颗卫星发射的信号频率由式 (1.1) 确定, 即

$$\left. \begin{aligned} f_{K1} &= f_{01} + K\Delta f_1 \\ f_{K2} &= f_{02} + K\Delta f_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中: K 表示 GLONASS 卫星播发信号的频道号, 每一卫星的频道号可从其播发的导航信息中获取; 对于 G1 频带, $f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$, $\Delta f_1 = 0.562\,5\text{ MHz}$; 对于 G2 频带, $f_{02} = 1\,246\text{ MHz}$, $\Delta f_2 = 0.437\,5\text{ MHz}$ 。

进入 21 世纪以来, GLONASS 系统推出了一系列现代化措施, 主要包括发展新一代卫星 GLONASS-M 和 GLONASS-K, 以及研制 GLONASS-KM 新型卫星。2003 年 12 月 10 日, 首颗 GLONASS-M 卫星发射升空, 该卫星的 G2 频带上调制了第二民用导航码; 2011 年 2 月 26 日, 发射了第一颗 GLONASS-K 卫星, 该卫星能够播发第三民用频率 G3 信号, 从而开启了新一代 GLONASS 三频系统的建设。

3. Galileo 系统

2002 年, 欧盟启动 Galileo 系统的组建计划, 与其他系统不同, 该系统将完全处于民用控制之下^[11]。但是由于各种原因, Galileo 系统的建设计划一再延迟。2005 年 12 月 28 日和 2008 年 4 月 27 日, 欧盟分别发射了 GIOVE-A 和 GIOVE-B 两颗实验卫星, Galileo 系统进入实质建设阶段。

按照计划, Galileo 系统空间星座将包含 30 颗 MEO 卫星 (3 颗备份卫星), 分布于 3 个轨道面, 每个轨道面上包含 10 颗卫星, 轨道倾角 56° , 轨道平面升交点赤经相差 120° , 轨道高度约 23 222 km, 运行周期约 14 小时 5 分。2011 年 10 月 21 日和 2012 年 10 月 12 日, 欧盟又以“一箭双星”的形式发射了 4 颗在轨实验卫星 (IOV1~4), 加上已于 2012 年 6 月 30 日和 2012 年 7 月 23 日服役期满的 GIOVE-A 和 GIOVE-B 卫星, Galileo 系统共发射了 6 颗卫星, 目前在轨工作 4 颗卫星。Galileo 卫星采用码分多址 (code division multiple access, CDMA), 可在 E1 (1 575.42 MHz)、E5a (1 176.450 MHz)、E5b (1 207.140 MHz) 和 E6 (1 278.750 MHz) 频段上调制 10 个导航信号。

Galileo 系统计划在完成目前的在轨实验之后, 再发射 14 颗卫星, 形成 18 颗卫星的空间星座, 提供初始运行能力 (initial operational capability, IOC)。而后, 对星座进行进一步升级, 形成包含 30 颗卫星、具备完全工作能力 (FOC) 的全球卫

星导航系统。同时,还将建成包含大约 40 个全球分布的监测站网络。

4. 其他

除了四大卫星导航系统之外,日本和印度也正在积极筹建自己的区域卫星导航系统:准天顶卫星系统(QZSS)和印度区域导航卫星系统(IRNSS)。准天顶卫星系统建成后将包含 3 颗倾斜地球同步轨道卫星(indined geosynchronous earth orbit satellite,IGSO)卫星,2010 年 9 月 11 日,发射了第一颗 IGSO 卫星,目前,该卫星已经开始提供导航信号,系统正处于建设阶段。印度区域导航卫星系统则计划建成一个包含 3 颗地球静止轨道(GEO)卫星和 4 颗 IGSO 卫星的区域卫星导航系统,并于 2013 年 7 月 1 日,发射了第一颗组网卫星。此外,某些国家和地区为了增强本地的导航服务性能,还积极建设和发展了多个星基增强系统(satellite based augmentation system,SBAS),如广域增强系统(WAAS)、欧洲地球静止导航重叠服务(EGNOS)、GPS 辅助型静地轨道增强导航系统(GAGAN)、亚洲多功能卫星增强系统(MSAS)等。

总之,卫星导航技术目前已经进入蓬勃发展期,各卫星导航系统正在加快建设步伐,不断提升系统服务性能,在这样的背景下,建设性能优良的北斗系统,提升其国际全球导航卫星系统领域的竞争力,对北斗的推广应用具有重要的现实意义。

1.2.2 北斗卫星导航系统发展现状

北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统^[1]。按照“先区域,后全球”的总体思路,北斗卫星导航系统正按照“三步走”战略^[2](图 1.2)稳步推进:

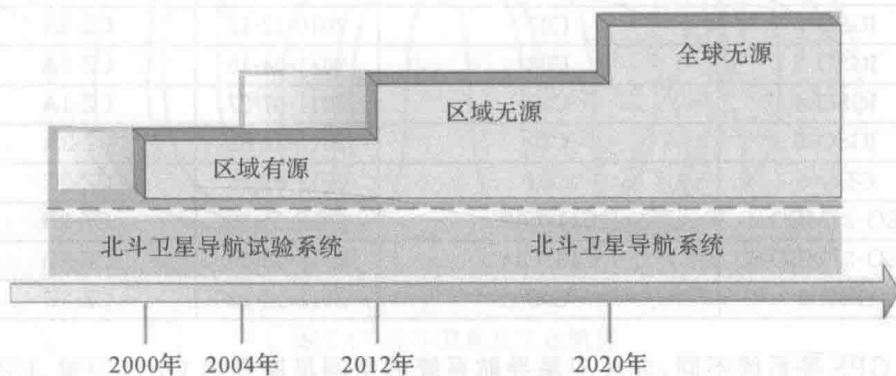


图 1.2 北斗卫星导航系统“三步走”战略

第一步,北斗卫星导航试验系统。1994 年,我国启动北斗卫星导航试验系统建设。2000 年,相继发射两颗 GEO 卫星,首先建成具备区域有源服务能力的北斗卫星导航试验系统,使我国成为继美、俄之后第三个拥有自主卫星导航系统的国

家。2003 年,我国又发射了一颗 GEO 卫星,进一步增强系统性能。

第二步,北斗卫星导航系统区域服务。2004 年,我国启动北斗卫星导航系统工程建设。2012 年年底开始为中国及周边地区提供区域无源服务。

第三步,北斗卫星导航系统全球服务。2014 年开始,继续开展后续组网卫星发射,提升区域服务性能,并向全球扩展。2020 年左右,将完成覆盖全球的系统建设目标,开始提供全球无源导航服务,最终建成的北斗卫星导航系统将包含 5 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星和 27 颗中圆地球轨道(MEO)卫星^[12-14]。

截至 2012 年 10 月 25 日,北斗系统共发射 16 颗卫星(表 1.1),其中,G2 卫星失效,M1 卫星仅用于信号测试和在轨验证,后由于星钟故障已停止工作^[15]。2012 年年底,北斗卫星导航系统完成了区域组网,并于 2012 年 12 月 27 日起,正式开始为亚太大部分地区提供无源定位、导航和授时服务^[2]。至此,北斗卫星导航系统圆满完成第二步建设任务。截至 2014 年,北斗卫星导航系统已经正式开通运行一年有余^[3],下面将从空间星座、地面控制和用户终端三大部分对北斗系统的发展现状予以简要介绍^[12-14]。

表 1.1 北斗系统卫星信息

卫星类别	伪随机噪声码编号(PRN)	发射日期	运载火箭
MEO-1	C30	2007-04-14	CZ-3A
GEO-2	—	2009-04-15	CZ-3C
GEO-1	C01	2010-01-17	CZ-3C
GEO-3	C03	2010-06-02	CZ-3C
IGSO-1	C06	2010-08-01	CZ-3A
GEO-4	C04	2010-11-01	CZ-3C
IGSO-2	C07	2010-12-18	CZ-3A
IGSO-3	C08	2011-04-10	CZ-3A
IGSO-4	C09	2011-07-27	CZ-3A
IGSO-5	C10	2011-12-02	CZ-3A
GEO-5	C05	2012-02-25	CZ-3C
MEO-3/MEO-4	C11/C12	2012-04-30	CZ-3B
MEO-5/MEO-6	C13/C14	2012-09-19	CZ-3B
GEO-6	C02	2012-10-25	CZ-3C

与 GPS 等系统不同,北斗卫星导航系统的空间星座是由 GEO 卫星、IGSO 卫星和 MEO 卫星三类卫星构成的异构星座^[14],截至 2012 年共包含 5 颗 GEO 卫星、5 颗 IGSO 卫星和 4 颗 MEO 卫星。其中,GEO 卫星轨道高度为 35 786 km,分别定点于赤道上空 58.75°E、80°E、110.5°E、140°E 和 160°E;IGSO 卫星轨道高度为 35 786 km,轨道倾角 55°,分布在 3 个轨道面内,升交点赤经相差 120°,3 颗卫星的星下点轨迹重合,交叉点经度为 118°E,其他两颗卫星的星下点轨迹重合,交叉点

经度为 95°E ; MEO 卫星轨道高度为 21 528 km, 轨道倾角 55° , 回归周期为 7 天 13 圈, 相位从 Walker24/3/1 星座中选择, 第一轨道面升交点赤经为 0° , 4 颗 MEO 卫星分别位于第一轨道面 7、8 相位和第二轨道面 3、4 相位。图 1.3 和图 1.4 分别给出了北斗卫星导航系统空间星座结构及相应的星下点轨迹。北斗卫星采用码分多址, 目前, 所有卫星均能播发 3 个频率 (B1、B2、B3) 的信号, 其主频分别为 1 561.098 MHz、1 207.140 MHz 和 1 268.520 MHz。

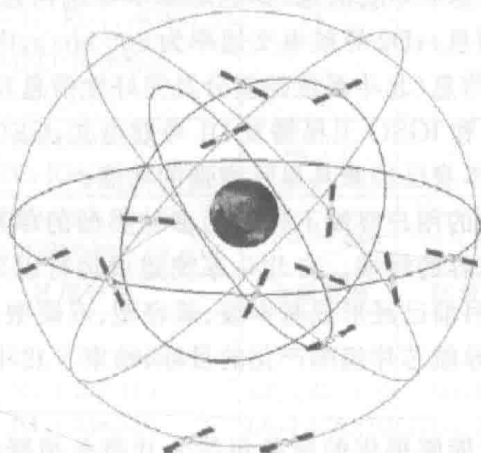


图 1.3 北斗卫星导航系统空间星座结构

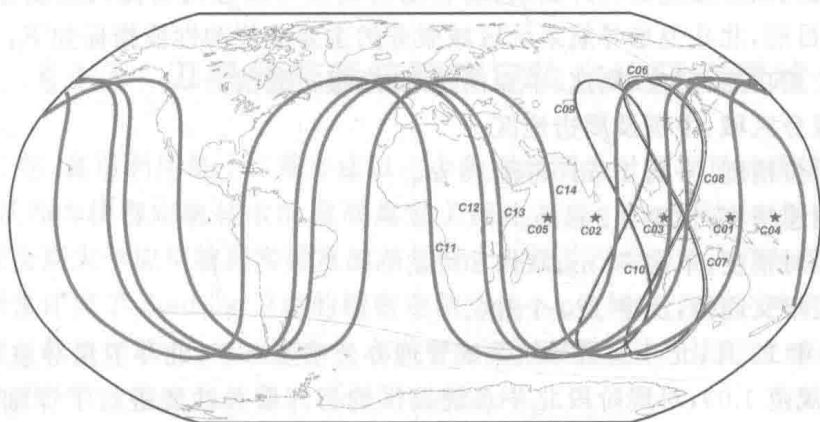


图 1.4 北斗卫星星下点轨迹

北斗卫星导航系统的地面控制段负责系统导航任务的运行控制, 由主控站、时间同步与注入站、监测站等组成, 由于受各种条件的限制, 目前这些站点主要分布在中国境内。主控站是北斗系统的运行控制中心, 主要任务包括: ①收集各时间同步与注入站、监测站的导航信号监测数据, 进行数据处理, 生成导航电文等; 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, 向卫星注入导

航电文参数;④负责卫星有效载荷监测和异常情况分析等。时间同步与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观测,为主控站提供实时观测数据。值得注意的是,与GPS等系统的地面运控相比,北斗系统具有一些鲜明特点:①包含时间同步站,能够进行星地时间同步,部分监测站通过站间无线电双向时间频率传递,能够实现站间时间同步。②生成两种不同种类的导航电文,即D1导航电文和D2导航电文。D1导航电文速率为50 bit/s,仅包含基本导航信息(本卫星基本导航信息、全部卫星历书信息、与其他系统时间同步信息);D2导航电文速率为500 bit/s,内容不仅包含基本导航信息,还包含增强服务信息(北斗系统的差分及完好性信息和格网点电离层信息)。北斗系统的MEO卫星和IGSO卫星播发D1导航电文,GEO卫星播发D2导航电文。事实上,北斗系统本身已经兼具星际增强的功能。

北斗卫星导航系统的用户终端不仅包括多种类型的单系统用户终端,而且还包括与其他导航系统兼容的终端。自北斗系统建成运行以来,我国的导航用户终端技术不断取得突破,目前已经形成基本型、兼容型、双模型、定时型等不同类型的北斗用户终端,实现了导航芯片组国产化的目标,结束了北斗用户装备“有机无芯”的历史^[3]。

北斗卫星导航系统能够提供的服务包括公开服务和授权服务^[16]。前者是指利用北斗卫星导航系统的公开服务信号,来确定用户位置、速度、时间的无线电导航服务,这类服务是免费和开放的;后者是为确保可靠应用而提供的服务,需要授权获取。目前,北斗卫星导航系统区域服务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,双向20 ns。

(6)短报文通信:汉字120个/次。

2013年12月,北斗卫星导航系统管理办公室发布了《北斗卫星导航系统公开服务性能规范1.0》,对现阶段北斗系统提供的公开服务性能进行了详细说明^[17]。目前,北斗系统公开服务区(满足水平和垂直定位精度优于10 m的服务范围)包括55°S~55°N、70°E~150°E的大部分区域。此外,系统还可在55°S~55°N、55°E~160°E的大部分区域内提供不低于水平和垂直定位精度为20 m的导航服务,以及在55°S~55°N、40°E~180°E的大部分区域内提供不低于水平和垂直定位精度为30 m的导航服务。

为了进一步说明北斗系统的特点,表1.2对比了四大卫星导航系统的主要性能参数。

表 1.2 卫星导航系统性能参数对比

参数	BDS	GPS	GLONASS	Galileo
首次发射时间	2007-04-14	1978-02-22	1982-10-12	2005-12-28
开通运行时间	2012-12-27	1995-07-17	1996-06-18	—
星座构成	MEO/GEO/IGSO	MEO	MEO	MEO
在轨卫星数	14	32	28	4
设计卫星数	35	24	24	30
轨道个数	MEO:3;GEO:1;IGSO:3	6	3	3
轨道倾角 (°)	MEO/IGSO:55 GEO:0	55	56	64.8
轨道高度 (km)	MEO:21 528 GEO/IGSO:35 786	20 200	19 100	23 222
运行周期	MEO:12 h 53 min GEO/IGSO:23 h 56 min	11 h 58 min	11 h 15 min	14 h 05 min
地面运控	区域布站	全球布站	区域布站	全球布站
信号频率 (MHz)	B1:1 561.098 B2:1 207.140 B3:1 268.520	L1:1 575.420 L2:1 227.600 L5:1 176.450	G1:1 602 G2:1 246 G3:1 202.025	E1:1 575.420 E5a:1 176.450 E5b:1 207.140 E6:1 278.750

注:1.在轨卫星数是指在轨卫星总数,时间截止到 2014 年 2 月 10 日;

2.GLONASS G1 和 G2 频率为通道号对应为 0 时的频率。

§ 1.3 卫星导航系统精密定轨方法研究现状

1801 年,高斯利用最小二乘方法以三个角度观测量对谷神星的轨道确定进行了研究,从而为精密定轨技术的发展奠定了理论基础。20 世纪 50 年代,美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的基尔博士和魏芬巴哈博士利用地面测站的多普勒观测量研究了 Sputnik 卫星的精密定轨方法,人造地球卫星的精密定轨技术开始引起人们的兴趣^[5]。20 世纪 60 年代,子午仪卫星导航系统的建成运行,为卫星导航系统精密定轨方法的研究提供了有利条件。

卫星导航系统的精密定轨同时涉及多颗卫星、多个测站,以及多种类型的观测数据,通常需要处理覆盖全球的大网数据,较之通常的卫星精密定轨技术更加复杂、难度更高。随着 GPS、GLONASS、Galileo,以及我国北斗系统的建设发展,在相关研究机构及科研人员的共同努力下,卫星导航系统的精密定轨方法不断发展,定轨精度稳步提高,从而为优质、可靠的导航定位服务提供了有力保障。本节将对卫星导航系统精密定轨方法的研究现状,特别是北斗卫星导航系统精密定轨方法的研究现状,进行回顾和总结。