



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Theory and Method of GNSS Monitor and Assessment

GNSS监测评估 理论与方法

张清华 隋立芬 贾小林 王源 著



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

GNSS 监测评估理论与方法

Theory and Method of GNSS Monitor and Assessment

张清华 隋立芬 贾小林 王源 著

测绘出版社

· 北京 ·

©张清华 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

本书较为系统地介绍了 GNSS 监测评估相关的概念、理论和方法,以及目前国内外的前沿研究成果,重点针对 GNSS 监测评估的若干个关键参数从原理、算法和实现方面进行了论述,同时介绍了整个监测评估系统的体系结构、软硬件设计和功能实现,并附有作者及所属团队在监测评估方面新的研究成果。

本书可作为高等学校测量与导航相关专业本科生和研究生,以及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 监测评估理论与方法 / 张清华等著. —北京: 测绘出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5030-4009-2

I. ①G… II. ①张… III. ①卫星导航—全球定位系统—卫星监测—评估方法 IV. ①P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 294707 号

责任编辑	余易举	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	11			字 数	212 千字		
版 次	2017 年 1 月第 1 版			印 次	2017 年 1 月第 1 次印刷		
印 数	001—700			定 价	52.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4009-2

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

全球导航卫星系统(GNSS)目前形成了 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 多极化发展的新趋势,为了使用户获得更好的服务,多导航系统之间的兼容与互操作成为大势所趋。然而不同导航系统在时间基准、坐标基准、星座构型、空间信号精度和服务性能等方面都存在着一一定程度上的差异,那么如何监测和评估多导航系统之间的差异并寻求消除或减弱差异的方法,为进一步兼容与互操作奠定基础,具有重要的理论意义和现实意义。

本书系统、全面地阐述了 GNSS 监测评估的基本理论、数学模型和算法,并根据实测数据进行了大量详细深入的算例分析。全书共有 7 章:第 1 章介绍了本书编写的背景和意义,阐述了 GNSS 监测评估理论的研究现状,最后简要叙述了本书的内容和结构安排;第 2 章针对 GNSS 时间偏差的监测评估问题,分析了偏差的来源,提出了监测和评估的模型和实现方法,并通过实测算例进行了验证;第 3 章介绍了 GNSS 坐标基准的定义和实现,分析了不同基准之间的差异,并研究了多种模型参数的估计方法;第 4 章围绕 GNSS 星座状态的评估展开论述,包括在轨卫星运行状态的监测、星座轨位的监测、多 GNSS 条件下的精度衰减因子值计算等内容;第 5 章围绕 GNSS 导航信息监测与评估展开论述,包括空间信号用户测距精度分析、电离层模型参数精度的评估和卫星原子钟精度的评估等内容;第 6 章简要介绍了监测评估系统的软硬件和部分监测评估参数;第 7 章总结了全书的内容,分析了目前存在的问题,并对下一步的研究做了展望。

本书反映了 GNSS 监测评估的前沿研究成果,内容充实,结构完整,理论与实践相结合,不仅包括了 GNSS 监测评估的基本理论和数学模型,还包含了大量反映监测评估结果的实测算例。GNSS 监测评估是卫星导航领域一个快速发展的研究方向,目前仍存在大量悬而未决的问题,而且作者的研究范围也有很大的局限性,望通过抛砖引玉,引起广大科研工作者进一步深入研究。由于作者水平有限,且编纂时间较为仓促,本书错漏之处在所难免,望读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 背景与意义	1
§ 1.2 GNSS 的现状与发展	2
§ 1.3 国内外 GNSS 监测评估机构的发展动态	8
§ 1.4 GNSS 监测评估理论与方法的研究现状	13
§ 1.5 本书主要内容	17
第 2 章 GNSS 时间偏差监测与评估	19
§ 2.1 概 述	19
§ 2.2 GNSS 时间系统的定义、实现与溯源	20
§ 2.3 直接比对法的基本原理	25
§ 2.4 基于秒脉冲精密测量的系统时差监测方法	29
§ 2.5 基于融合精密单点定位的系统时差估计算法	36
§ 2.6 本章小结	42
第 3 章 GNSS 坐标基准偏差监测与评估	43
§ 3.1 概 述	43
§ 3.2 GNSS 坐标基准的定义与实现	44
§ 3.3 常用的坐标基准转换方法	48
§ 3.4 转换参数的估计方法	53
§ 3.5 融合地面点与星历的坐标基准转换算法	57
§ 3.6 适用于北斗卫星导航系统的坐标基准转换算法	64
§ 3.7 本章小结	69
第 4 章 GNSS 星座状态监测与评估	71
§ 4.1 概 述	71
§ 4.2 在轨卫星运行状态监测	72
§ 4.3 星座轨位监测及参数范围选择	74
§ 4.4 多 GNSS 条件下 DOP 值的计算	92

§ 4.5 本章小结	100
第 5 章 GNSS 导航信息监测与评估	102
§ 5.1 概 述	102
§ 5.2 空间信号用户测距精度评估	103
§ 5.3 利用统计学方法分析空间信号用户测距误差分量	114
§ 5.4 电离层模型参数评估	120
§ 5.5 在轨卫星原子钟精度评估	123
§ 5.6 空间信号的连续性监测	128
§ 5.7 空间信号的可用性监测	133
§ 5.8 本章小结	139
第 6 章 GNSS 监测评估系统软硬件设计与功能实现	141
§ 6.1 概 述	141
§ 6.2 监测评估系统的定义、内涵和需求分析	141
§ 6.3 监测评估系统的总体结构	142
§ 6.4 监测评估参数	144
§ 6.5 监测评估系统的功能实现	146
§ 6.6 本章小结	150
第 7 章 总结与展望	151
§ 7.1 主要内容总结	151
§ 7.2 展 望	154
参考文献	156
附 录	165

Contents

Chapter 1 Overview	1
§ 1.1 Background	1
§ 1.2 Status and Development of GNSS	2
§ 1.3 Development Trend of GNSS Monitoring and Assessment Institutions at Home and Abroad	8
§ 1.4 Current States and Progress of GNSS Monitoring and Assessment	13
§ 1.5 Main Contents of This Book	17
 Chapter 2 Monitoring and Assessment of Time Offset among GNSS System	19
§ 2.1 Introduction	19
§ 2.2 Definition, Realization and Traceability of GNSS Time System	20
§ 2.3 Basic Principle of Direct Comparison Method	25
§ 2.4 Second Pulse Measuring Based Method for System Time Offset Monitoring	29
§ 2.5 Fusion Precise Point Positioning Based Method for System Time Offset Monitoring	36
§ 2.6 Chapter Summary	42
 Chapter 3 Monitoring and Assessment of GNSS Coordinate Reference Difference	43
§ 3.1 Introduction	43
§ 3.2 Definition and Realization of GNSS Coordinate Reference	44
§ 3.3 Common Coordinate Reference Transformation Method	48
§ 3.4 Methods for Estimating Conversion Parameters	53
§ 3.5 Reference Transformation Fusion Algorithm of Ground Points and Ephemeris	57

§ 3.6	Coordinate Reference Conversion Algorithm for BeiDou Navigation Satellite System	64
§ 3.7	Chapter Summary	69
Chapter 4	Monitoring and Assessment of GNSS Constellation Status	71
§ 4.1	Introduction	71
§ 4.2	Operation Status Monitoring of Satellites in Orbit	72
§ 4.3	Constellation Orbit Monitoring and Selection of Parameter Range	74
§ 4.4	Calculation of DOP Value Under Multi-GNSS Condition	92
§ 4.5	Chapter Summary	100
Chapter 5	Monitoring and Assessment of GNSS Navigation Information	102
§ 5.1	Introduction	102
§ 5.2	Accuracy Assessment of Signal-in-Space	103
§ 5.3	Using Statistical Method to Analyze Error Component of Signal-in-Space	114
§ 5.4	Assessment of Ionospheric Model Parameters	120
§ 5.5	Accuracy Assessment of Satellite Atomic Clocks	123
§ 5.6	Continuity Monitoring of Signal-in-Space	128
§ 5.7	Availability Monitoring of Signal-in-Space	133
§ 5.8	Chapter Summary	139
Chapter 6	Software and Hardware Design and Function Realization of GNSS Monitoring and Assessment System	141
§ 6.1	Introduction	141
§ 6.2	Definition, Connotation and Requirement Analysis of Monitoring and Assessment System	141
§ 6.3	Overall Structure of Monitoring and Assessment System	142
§ 6.4	Parameters of Monitoring and Assessment System	144
§ 6.5	Function Realization of Monitoring and Assessment System	146
§ 6.6	Chapter Summary	150

Chapter 7 Summary and Outlook	151
§ 7.1 Summary of Main Contents	151
§ 7.2 Outlook	154
References	156
Appendix	165

第1章 绪论

§ 1.1 背景与意义

目前全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)已经在世界范围内取得了巨大成功,利用其进行定位与导航的理论与方法的研究也已经相当成熟,特别是针对 GNSS 采用一些技术(精密单点定位和相对定位等)时达到了厘米级甚至亚厘米级的精度。与此同时,关于导航系统监测评估研究的开展则相对滞后,出于对系统建设和用户需求考虑,其必将成为卫星导航体系内的重要研究方向。

在当前国际卫星导航系统迅猛发展的背景下,构建 GNSS 监测评估系统,并研究其实现理论与方法,是紧跟国际卫星导航发展步伐、发展我国独立自主的卫星导航系统及推动系统建设跨越式发展的必经之路。目前我国已经开展全球连续监测评估系统(international GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)的建设,并已经具有了初步的监测评估能力。充分利用全球 GNSS 观测数据对导航系统进行全面、深入且体系明确的监测评估研究显得既重要又迫切,这是因为:

1. 为系统建设者提供参考和依据

通过长期的监测评估,可积累独立于运控系统的相关资料。这些关于系统的监测评估结果可在系统的设计、研发、部署、运行、维护和扩展的各个阶段提供重要的参考和依据。

2. 构建 GNSS 性能指标体系

目前各 GNSS 对性能指标的定义和实现存在很大的差异,研究不同 GNSS 提出的性能指标的内涵以及它们之间的关系,并提出一套适合我国北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)且与其他 GNSS 有良好兼容性的性能指标很有必要。而针对各个指标的实现,需吸取各个 GNSS 指标实现的方法和经验,寻求最优的指标实现方法。

3. 提高 GNSS 的用户服务质量

从用户使用的角度出发,在精度达到一定要求的前提下,对于导航系统性能的一些参数,如卫星运行中反常工作状态,服务的完好性、可用性和连续性需及时反馈给用户,以满足其不同类型(定位、授时、导航)和不同精度(航空、汽车导航、精密定位)的需要。

4. GNSS 兼容与互操作的开展

GNSS 兼容与互操作是以后多导航系统发展的必然趋势,而各系统在坐标基准、时间系统和导航信号方面都存在着差异。对这些差异的监测与评估,并为多系统导航应用提供相应的参数和产品,可以提高 GNSS 兼容与互操作的质量和可靠性。

5. 支持 BDS 建设与发展

当前我国自主研发的 BDS 正处于高速发展的阶段,下一步计划向全球系统过渡。通过对 BDS 和其他 GNSS 的监测评估,不仅可以发现系统中存在的问题,而且能够评估我国现有系统的精度和服务,为下一步建设全球系统提供参考和依据。

本书就是在以上背景下进行撰写的,主要任务是研究 GNSS 监测评估的理论与方法,构建监测评估的指标体系,开展监测评估相关的关键技术研究,并搭建多导航系统监测评估系统,最终实现多 GNSS 监测与评估。

§ 1.2 GNSS 的现状与发展

卫星导航技术是航空航天、无线电传播技术、原子物理、现代信号处理、大气科学和地球科学等多种现代科学技术融合发展的结晶,其较传统的天文导航、惯性导航、地基无线电导航等技术具有不可比拟的优势,近年来在科学研究、工程技术、抗震救灾、军事和国防安全上取得了广泛的应用(王淑萍 等,2002;邵恩坡 等,2006;严秀夫 等,2006;刘卫军 等,2007;徐伟声,2009)。卫星导航技术的承载体是卫星导航系统,在历史的长河中,曾经产生过但停用的卫星导航系统有子午仪卫星导航系统(transit navigation satellite system,TRANSIT)、海军卫星导航实验系统、旋风系统等。现阶段正在运行的导航系统呈现多极化的态势,截止到 2014 年年初,仅美国的全球定位系统(GPS)和俄罗斯的格洛纳斯导航卫星系统(GLONASS)是能够提供一定精度服务的全球导航卫星系统,而中国的北斗卫星导航系统(BDS)和欧盟的伽利略卫星导航系统(Galileo)是目前正在建设的全球导航卫星系统,日本的准天顶导航卫星系统(quasi-zenith satellite system,QZSS)和印度的印度区域导航卫星系统(Indian regional navigation satellite system,IRNSS)是正在建设的区域卫星导航系统。目前共有 70~80 颗在轨运行的导航卫星(不包括增强系统卫星),但到 2020 年,大约会有 100 颗以上的导航卫星可以提供服务。

GNSS 译为全球导航卫星系统,泛指所有的卫星导航系统,包括现有的全球系统(GPS、GLONASS、BDS、Galileo)、区域系统(准天顶导航卫星系统和印度区域导航卫星系统)和增强系统(广域增强系统、欧洲地球同步导航覆盖服务、多功能卫星增强系统),还涵盖未来要建设的卫星导航系统。可以说,GNSS 是一个多系统、多层面、多模式的复杂组合系统。由于 GNSS 的迅猛发展,可用的在轨导航卫星的数量急剧增加,用户完全可以利用多个 GNSS 进行导航定位服务。导航系统间

的兼容和互操作是不可避免的,由于不同导航系统在时间系统、坐标系统、空间星座和服务精度等方面都存在着明显的差异,为了深入了解各个导航系统的性能以及其运行状态,并通过一定手段得到它们的精度、服务性能、系统间偏差参数等指标以及相互之间的差异,需要同时对多个 GNSS 进行监测和评估。

本节主要针对目前正在运行的全球导航卫星系统以及区域卫星导航系统的前沿发展动态进行较为详细的介绍,同时对其建立背景、发展历程、系统组成、时空基准和信号特性等基本问题进行简要的描述。

1.2.1 GPS

美国对 GPS 的研发始于 20 世纪 70 年代初期,随着美苏军备竞赛的升级,成为阿波罗计划和航天飞机计划后的又一大航天技术工程。伴随着 20 年的实验和探索,终于在 1994 年建成由 24 颗卫星组成的全球导航卫星系统。目前在轨运行的 GPS 达到 31 颗(2014 年 1 月),可以为全球范围内特定的用户提供标准定位服务(standard positioning service, SPS)和精密定位服务(precise positioning service, PPS)。

GPS 分为空间段、控制段和用户段三部分。空间段即 GPS 星座,基本技术参数是:星座为 $21+3$ (6 个轨道面、高度 20 200 km、倾角 55° 、周期 11 小时 58 分,具有 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz 两个载波频率以及部分新卫星上含有的 L5 频率 1 176.45 MHz),主要的卫星类型有四种(IIA、IIR、IIR-M、IIF)。地面控制段主要由 1 个主控站(master control station, MCS)、3 个注入站(ground antenna)和 5 个监测站(monitor station)组成。用户段主要指的是 GPS 接收机及对应的数据处理软件,GPS 接收机通常分为天线部分和接收部分两大单元,随着技术的发展,将二者集成到一起的接收机早已出现(如带有导航功能的手机),但测量型的接收机一般是二者分离的。

如今,对 GPS 的发展起较大推动作用的项目即 GPS 的现代化(Rajan et al, 2003, 2005; Pullen et al, 2004; 金际航 等, 2005; 陈勛 等, 2010; 陈俊勇, 2010),它是美国政府关于导航系统的一项政策,其目的是改善 GPS 服务性能以及提升其在全球 GNSS 市场的竞争力。GPS 现代化计划是一个持续的、价值数十亿美元的项目,其目的是努力提升空间和控制部分的性能。

GPS 现代化计划包括一系列连续卫星发射需求,即 GPS IIR(M)、GPS IIF 和 GPS III,还包括改善的控制段,其中含有传统主动精度改善计划(legacy accuracy improvement initiative, LAII)、体系结构进化计划(architecture evolution plan, AEP)、发射与早期轨道异常情况解决系统(launch and early orbit, anomaly resolution, and disposal operations, LADO)和下一代运控系统(next generation operational control system, OCX)。图 1.1 为 GPS 现代化的进程图。

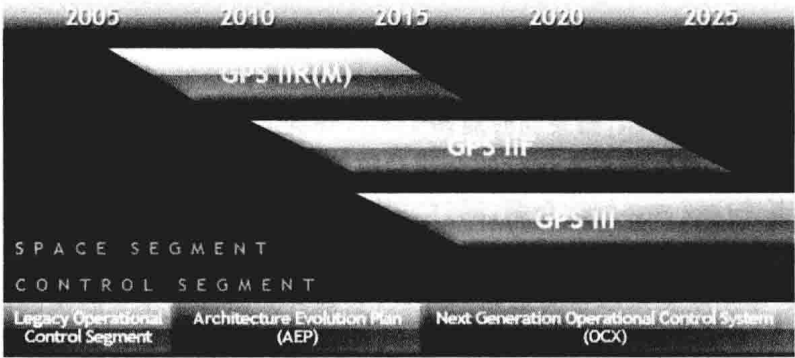


图 1.1 GPS 空间段与控制段的现代化进程

传统主动精度改善计划完成于 2008 年,控制段在全球范围内的监测站从 6 个增加到 16 个,收集到的 GPS 轨道数据是以前的两倍以上,使 GPS 卫星的广播数据的精度有了 10%~15% 的提高。传统主动精度改善计划升级囊括了现代科学与工程多个领域,包括数字标准、重力场模型、监测站位移模型、地球自转的潮汐变化、对流层延迟、卫星帆板所受太阳辐射压的模型等。

体系结构进化计划目前尚未完成,长期以来,美国空军一直未对地面控制系统进行重大改进,部分设备从 20 世纪 70 年代 GPS 建成之初一直沿用至今,但是面对 GPS 卫星技术的迅速发展,地面控制系统必须具备快速适应新型号卫星上所采用的一系列新技术和新信号的情况。基于此,体系结构进化计划的主要任务是对 GPS 主控站的软硬件进行整体性的换代,并将主控站大型计算机更换为分布式架构,同时增加具有全功能的备份主控站。2007 年 9 月,美国空军计划把原来的主控站升级到一个全新的框架中,体系结构进化计划用现代的分布式计算机架构取代旧的电脑主机。这种改进的灵活性和快速响应能力为下一代控制段系统的升级奠定了基础。

在 2007 年年初,第二太空作战中队(2nd Space Operations Squadron, 2SOPS)建立发射与早期轨道异常情况解决系统,主要用以处理除 GPS 卫星星座以外的其他事务,包括对新发射的导航卫星进行检查、对存在异常卫星服务的剔除、冗余在轨卫星的存储和卫星报废的处置。为了处理这些事务,主要依靠发射与早期轨道异常情况解决系统的三个功能:一是遥测、跟踪和控制,二是计划和执行发射与早期轨道异常情况解决系统对卫星轨道运动的控制,三是模拟 GPS 遥测任务的有效载荷和子系统。通常情况下,发射与早期轨道异常情况解决系统只使用美国空军的远程跟踪站,设有专门的地面天线。2007 年后,发射与早期轨道异常情况解决系统已升级多次。

下一代控制系统将增加许多 GPS 控制段的新功能,包括有能力完全控制和处理现代化的民用信号(L2C、L5 和 L1C),分为三个阶段实施:第一阶段将取代现有

的指挥和控制段,并可以支持现有 GPS 卫星的所有任务,同时在这个阶段推出全功能的 L2C 导航信号,其将在 2015 年计划进入运行并提供服务;第二阶段将支持监测和控制导航信号,包括 L1C 和 L5;第三阶段将支持全新的 GPSⅢ 计划。

1.2.2 GLONASS

GLONASS 有比 GPS 更早的时间起点,它始于 20 世纪 60 年代末期,是由原苏联国防部建立并研发的系统。在此后的很长一段时期内,GLONASS 的具体信息对外公布得很少,直到原苏联解体后,关于其系统的具体信息才逐步被公开。1996 年,GLONASS 星座最终部署完毕并正常工作,但 2000 年后由于经济衰退等原因,在轨卫星数量急剧下降,降低了系统的服务性能。2007—2008 年,俄罗斯先后发射了 12 颗 GLONASS-M 卫星,进行了第一期的地面控制部分现代化,精化了其坐标系统(PZ-90.02),有 19 颗 GLONASS-M 卫星在轨工作。其后,俄罗斯分别于 2009 年年底和 2010 年年初各发射 3 颗 GLONASS-M 卫星,并提出 GLONASS-K 计划等 GLONASS 升级计划。到 2012 年,GLONASS 基本恢复了元气,运行星座也达到了 24 颗,同时服务精度也得到提高。

GLONASS 系统分为空间段、控制段和用户段三部分。空间段为 GLONASS 星座,基本技术参数是:星座为 $21+3$ (3 个轨道面、高度 19 100 km、倾角 64.8° 、周期 11 小时 15 分, L1 频率为 1.602~1.616 MHz, L2 频率为 1.246~1.256 MHz),主要的卫星类型有四种(GLONASS、GLONASS-M、GLONASS-K1 和 GLONASS-K2)。地面段由系统控制中心、中央同步器、遥测遥控站和外场导航控制设备组成。用户段与 GPS 类似。

虽然 GLOANSS 计划可以达到全球覆盖,但是它的商用化,特别是用户段的开发,还远远落后于 GPS。为了改善目前的状态,提高 GLONASS 的工作效率,改善其精度和服务的连续性,俄罗斯政府采取了一系列的激励计划,以增加其在空间飞行器、道路交通、水运、测绘和时间同步方面的应用。

对于空间段,为了维持和发展 GLOANSS 星座,2013 年第一、二、四季度进行 3 次发射,把 5 颗 GLONASS-M 卫星送入轨道,并在 2014 年至 2016 年间,将 4 颗 GLONASS-M 和 1 颗 GLONASS-K1 卫星送入预定轨道。其他方面的改进主要包括:①增加 GLONASS 与其他 GNSS 的兼容和互操作;②改善其卫星子系统的性能,并同时提高运行寿命。

对于地面段,GLONASS 计划增加 15 个地面参考站,其中 6 个位于境外,目前已经在南极建立 1 个站。另外,随着 GLONASS 卫星数目的增加,地面跟踪能力也获得相应的增强,已经提高了 GLOANSS 卫星轨道和钟差的精度。此外,俄罗斯联邦航天局希望在美国领土上建造 6 座 GLONASS 的监测站,校正 GLONASS 的信号以提高准确性和可靠性。

1.2.3 BDS

北斗卫星导航系统(BDS)是我国自主研发、具有独立知识产权的卫星导航系统,可以为服务区内用户提供全天候和全时段的高精度定位、导航和授时(PNT)服务和短报文服务。2012年12月27日,覆盖亚太地区的北斗区域卫星导航系统正式开通运行,中国卫星导航系统管理办公室在同月发布了《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)》,在2013年12月又发布了《北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.0版)》(中国卫星导航系统管理办公室,2013a)和《北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0版)》(中国卫星导航系统管理办公室,2013b),这反映了BDS目前已进入了快速发展和不断完善的阶段。

BDS同样分为空间段、控制段和用户段三部分。空间段目前由5颗地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)、5颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)和4颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星组成。其中地球静止轨道卫星高度为35 786 km,轨道面倾角为 55° ,分别位于东经 58.75° 、 80° 、 110.5° 、 140° 和 160° 。倾斜地球同步轨道卫星高度也为35 786 km,轨道面倾角为 55° ,分别位于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,交叉点经度为东经 118° ,其余2颗卫星的星下点轨迹重合,交叉点经度为东经 95° 。中圆地球轨道卫星轨道高度为21 528 km,轨道面倾角为 55° ,回归周期为7天13圈,相位属于Walker24/3/1,其中第1轨道面赤经为 0° ,有2颗卫星位于第1轨道面的第7、8相位,另外2颗卫星位于第2轨道面的第3、4相位,如图1.2所示。控制段负责导航系统任务的运行和控制,主要包含主控站、注入站和监测站等,值得注意的是,注入站同时又是时间同步站,用于完成星地时间同步,同时向卫星注入电文参数。用户段包括各式各样的BDS用户终端以及其他GNSS兼容终端。

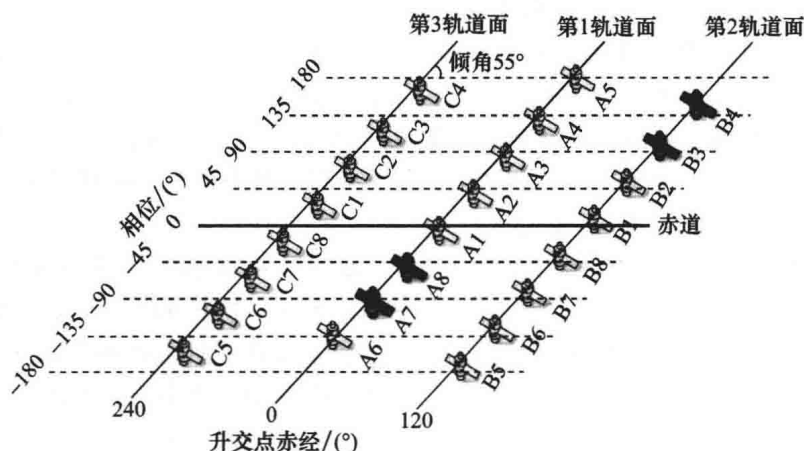


图 1.2 4 颗 MEO 卫星的位置图(2014 年 4 月 1 日)

目前 BDS 公开服务区指的是满足垂直和水平精度优于 10 m 的服务范围 (95%置信度),其包含了 $55^{\circ}\text{S}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 的大部分区域。

BDS 的建设战略分为“三步走”(谭述森,2008;杨元喜,2010;杨元喜等,2011): 第一步,从 2000 年到 2003 年,我国建成由 3 颗卫星组成的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;第二步,建设北斗卫星导航系统,于 2012 年前形成我国及周边地区的无源服务能力,这步已经完成;第三步,于 2020 年左右,北斗卫星导航系统将形成全球无源服务能力。2012 年 12 月,我国已经宣布 BDS 区域系统正式提供服务,而整个 2013 年我国并没有发射新的 BDS 卫星,但 BDS 全球系统已经进入实质研制阶段,并在 2014 年至 2016 年间发射了 7 颗全球系统试验卫星,以开展 BDS 全球系统体制,得到星间链路等关键技术验证,届时 BDS 全球试验系统将比 BDS 区域系统的性能获得显著提升。

1.2.4 Galileo

Galileo 系统的建设可以追溯到 1994 年,当时欧盟对 Galileo 系统方案进行了实施论证,之后在 2000 年欧盟已向世界无线电委员会申请并获准建立 Galileo 系统的 L 频段的频率资源。Galileo 计划由 30 颗(27+3)卫星组成。30 颗卫星部署在 3 个中高度圆轨道面上,轨道高度 23 616 km,倾角 56° ,星座对地面覆盖良好(李铁等,2005;李安等,2006;文青,2011)。

2012 年 Galileo 系统取得了实质性的进展,建成了在轨试验星座,共包含 4 颗试验卫星,当年 10 月 12 日在法属圭亚那库鲁,俄罗斯联盟号运载火箭将第 3、4 颗 Galileo 试验卫星发射成功,并于年底开始传输 L1/E1 无线电信号。至此,加上之前的 2 颗试验卫星,构成了在轨验证的试验星座。而最近两年,由于欧盟对 Galileo 计划的决策与预算效率低下等问题,Galileo 的发展放慢了脚步,已经落在 BDS 的身后。

对于 Galileo 性能的研究,2013 年 3 月 12 日欧空局宣布利用目前在轨的 4 颗 Galileo 卫星在荷兰的实验室成功进行了三维定位试验,并获得了 10 m 左右的定位精度。国内清华大学电子工程系卫星导航技术研究室的陆明泉教授也于 2013 年 5 月 5 日成功接收到 4 颗 Galileo 在轨卫星的 E1 信号,定位精度达到 10 m 左右。

1.2.5 区域卫星导航系统

目前最具代表性的区域导航系统当属日本的准天顶导航卫星系统和印度的印度区域导航卫星系统。之所以会介绍这两个区域卫星导航系统,主要是由于二者发展都较为迅速,将来都会成为四大全球导航系统外重要的导航系统,对于多系统的融合应用必然会考虑到它们的贡献和影响。

2006 年后,日本政府正式启动了准天星(quasi zenith satellite, QZS)系统计

划。准天星系统计划由 3 颗卫星组成,在 2010 年完成该计划中的首颗卫星(即 QZS-1)的发射,于 2012 年和 2013 年分别发射 QZS-2 和 QZS-3,实现 3 星组网的运行与应用。根据应用情况,日本可能会考虑再发射 4 颗准天星卫星(QZS-4~QZS-7),从而实现 7 星组网的运行与应用。

准天顶导航卫星系统(Kawano et al,2004;孙宏伟 等,2010;廖宁华 等,2013)以高仰角服务和大椭圆非对称“8”字形地球同步轨道为特征,服务于闹市区和中纬山区的通信与定位,是 GPS 的区域增强系统,发射 L1、L2 和 L5 三种频率。准天顶导航卫星系统由 3 颗分置于相间 120° 的 3 个轨道面上的卫星组成,轨道周期为 23 小时 56 分钟,倾角为 45° ,偏心率为 0.1,轨道高度为 31 500~40 000 km。

印度政府于 2006 年 5 月 9 日正式批准实施印度区域导航卫星系统的重大工程(Suryanarayana,2007;高为广 等,2008),印度空间研究组织(Indian Space Research Organization,ISRO)负责新计划的实施,该系统可以覆盖全印度及整个南亚。如果这个系统成功建立,印度的军力将大幅提升。印度区域导航卫星系统由 7 颗卫星组成,在 2016 年 4 月发射了第 7 颗卫星,完成组网并投入运行。目前,印度区域导航卫星系统正处于调试阶段。

§ 1.3 国内外 GNSS 监测评估机构的发展动态

1.3.1 美国的海岸警卫队导航中心

美国海岸警卫队(United States Coast Guard,USCG)隶属于美国安全部,主要负责沿海和航道的执法、安全、遇难船只及飞机的救助、污染控制等任务。它是美国五大武装力量之一,致力于保护公众、环境和美国经济利益,以及海域内的国家安全(刘有钟,1998a,1998b;马道玖,2006)。导航中心为 USCG 的重要组成部分,为美国海上、水路和民用 GPS 的安全提供一定的服务和保障。这些服务与 GPS 监测和评估有关的内容主要包含以下几个方面(www.uscg.mil):

(1)差分 GPS 操作信息;

(2)GPS 星座状态信息,包括公布可用的和不可用的 GPS 卫星编号,其中包含不可用卫星的故障原因和报告;

(3)GPS 调试公告,提前 48 小时公布即将由于调试而变为不可用状态的 GPS 卫星;

(4)GPS 历书;

(5)NANUs(notice advisory to navstar users),是一种统计和发布 GPS 可用性信息的文件,同时也是一种综合的导航信息服务文件。

从一定意义上讲,美国海岸警卫队导航中心(USCG NC)只是一个导航信息发布