

卫星导航系统 建模与仿真

杨 俊 黄文德 陈建云 明德祥 著



科学出版社

卫星导航系统测试与评估系列丛书

卫星导航系统建模与仿真

杨 俊 黄文德 陈建云 明德祥 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

卫星导航系统建模与仿真技术是当今卫星导航系统重要研究领域之一,为全球卫星导航系统的论证、建设和应用提供技术支撑。完备的仿真试验可以充分验证系统体制的可行性,提前识别并控制系统的不确定因素及问题,以最小的时间和成本代价实现系统建设总目标。本书是国防科学技术大学三院天衡导航团队科研成果的总结和提炼,从卫星导航理论、建模与仿真技术、软件开发等方面,详细阐述了全球卫星导航系统的运行机理、建模思想以及仿真技术。全书共14章,主要内容包括卫星导航系统建模与仿真基础,卫星导航系统时空基础,卫星导航系统空间段、地面段、用户段和环境段的建模方法,模型的有效性验证方法,面向对象建模规范与仿真软件开发技术,仿真软件的应用以及外部数据在卫星导航仿真中的应用等。全球卫星导航系统是一种典型的复杂大系统,也是复杂的航天系统。本书从系统层、应用层、仿真层等多个维度对整个系统进行阐述,对其他航天系统,如卫星通信系统、遥感系统等具有借鉴意义。

本书可作为从事卫星导航科技工作者和工程师的工具书和参考资料,以及卫星导航领域相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航系统建模与仿真 / 杨俊等著. —北京: 科学出版社, 2016.11
(卫星导航系统测试与评估系列丛书)
ISBN 978-7-03-048355-3

I. ①卫… II. ①杨… III. ①卫星导航—全球定位系统—系统建模
②卫星导航—全球定位系统—系统仿真 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 113659 号

责任编辑: 潘斯斯 / 责任校对: 桂伟利
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第二次印刷 印张: 24 1/2

字数: 561 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

卫星导航系统作为经济社会发展和国家安全不可或缺的信息基础设施，体现着一个国家的国际地位和综合国力。中国自主建设的北斗卫星导航系统，2012年已正式向亚太部分地区提供区域服务，2016年发布了《中国北斗卫星导航系统》白皮书，预计2020年将面向全球提供服务。北斗卫星导航系统已被联合国确认为全球卫星导航系统四大核心供应商之一，并被国际海事组织、国际民航组织等国际组织认可。北斗应用正逐渐向全球拓展，成为继高铁出海、核电外交后的又一张“中国名片”。

随着军事和科学技术的迅猛发展，仿真已成为各种复杂系统研制工作的一种必不可少的手段。本书作者伴随我国北斗卫星导航系统建设发展，率先开展卫星导航系统建模与仿真技术研究，构建了包括卫星导航基础理论数据、地面观测数据、星间观测数据、空间环境、导航电文等高保真仿真模型库，建立了精密定轨、轨道长期预报、时间测定与预报、电离层业务处理、用户导航解算(定位、测速、授时)等测试与评估算法模型，形成了面向卫星导航系统试验验证与测试评估的体系化模型和算法库，研发了卫星导航系统首款开源仿真软件，直接服务于北斗系统建设，以数学仿真和信息/信号仿真的方式近乎真实地再现卫星导航系统，为卫星导航系统方案论证、关键技术攻关、试验验证、核心设备研制及其应用效果评估等各个方面提供了全新手段，不仅为建设高精度、高可用卫星导航系统做出了大贡献，而且有效缩短了系统建设周期、提升了系统性能，加速了应用产业化推广，是中国卫星导航领域又一重要自主创新成果，将为培养和集聚跨行业、跨领域、懂技术、善运营的复合型高端人才，促进卫星导航产、学、研、用协同创新，培育新的应用模式，推动北斗应用产业化发展提供坚实基础。

本系列著作的出版凝聚了该团队十余年的研究成果，理论性与实践性都很强，希望借此推动我国北斗全球卫星导航系统建设和产业化应用，节约系统建设和运行维护成本，降低技术风险，促进国际合作，加速应用产业化推广，不断提升我国卫星导航系统的建设和服务水平。

孙永梅
2016.11.4

前 言

卫星导航系统是国家重大基础设施，也是体现大国地位和国家综合国力的重要标志。伴随着我国北斗卫星导航系统建设热潮，以北斗卫星导航系统为代表的卫星导航产品、应用和服务也正处于飞速发展之中。卫星导航系统建模与仿真技术是当今卫星导航系统重要研究领域之一，为全球卫星导航系统的论证、建设和应用提供技术支撑。完备的仿真试验可以充分验证系统体制的可行性，提前识别并控制系统的不确定因素及问题，达到以最小的时间和成本代价实现系统建设总目标的目的。

在北斗卫星导航系统的系统建设中，卫星导航系统的各个分系统都需开展相应的建模与仿真工作。2005年以来，本书作者所在团队承担了卫星导航国家科技重大专项多项任务，突破了一批关键技术，积累了丰富的工程经验，相关技术达到国内领先水平。本书是作者所在研究团队所取得科研成果的总结和提炼。从卫星导航理论、建模与仿真技术、软件开发等方向，详细阐述了全球卫星导航系统的运行机理、建模思想以及仿真技术，以期能够推动国内的导航、仿真和测试领域发展，更好地为提升我国北斗卫星导航系统服务水平提供理论和技术支撑。全球卫星导航系统是一种典型的复杂大系统，也是复杂的航天系统工程。本书对其它航天系统，如通信系统、遥感系统等具有借鉴意义。

本书完整阐述了卫星导航系统空间段、地面段、用户段等全系统、全要素仿真测试与评估技术，涵盖了概念模型、模型抽象、数学建模、仿真模型、软件实现、仿真运行、测试评估等系统级仿真体系架构的全部过程，涉及航天轨道动力学、无线电传播、参数估计与误差统计、仿真建模等与卫星导航领域相关的理论、方法和算法。本书包含了作者近年来在卫星导航领域突破的一批关键技术，其中星间链路的仿真建模与自主导航、仿真模型的有效性验证、卫星导航系统级仿真软件的研制、外部数据在卫星导航仿真的应用等多项技术填补国内空白，相关技术达到国内领先、世界先进水平。书中建模方法与仿真软件研制技术符合相关国标和军标要求，其构建的时空基础与国际时空基准协议一致，所有模型都经过实测数据或第三方成熟软件有效性的验证。

本书力求从模型层、仿真层、应用层等多个维度对整个系统进行阐述，全书共分十四章和三个附录，其中，正文可分为四大部分。第一部分是卫星导航系统理论基础部分，包括第1章和第2章，主要阐述了卫星导航系统基本原理和系统建模与仿真技术。第二部分是卫星导航系统数学建模部分，包括第3章至第8章，主要提出了卫星导航系统时空基础，卫星导航系统空间段、地面段、用户段和环境段等建模方法，以及上述卫星导航系统模型的有效性验证方法。第三部分是卫星导航系统仿真软件实现及应用部分，包括第9章至第13章，主要描述了卫星导航系统面向对象建模规范与仿真软件开发技术，第四部分是外部数据的应用部分，即第14章，主要介绍了外部实测数据(如IGS精密星历、钟差产品，欧洲定轨中心的电离层产品等)在卫星导航仿真中的应用。附录部分介绍了国内外现有卫星导航仿真软件及其应用、国际天文联合会(IAU)时空转换工具包SOFA，以及卫星导航建模与仿真所需外部数据来源及格式说明。

本书是国内首款全球卫星导航系统仿真软件——BDSim 的理论基础,为 BDSim 的设计、开发和应用提供理论与方法指导。BDSim 可模拟卫星运行真实环境,提供多样化的仿真场景服务,以及数据分析、数据共享和多种模型验证功能,能直观、全面地展现卫星导航系统的运作机理及运行流程,可为导航领域仿真测试与评估提供有力手段和支撑。同时,BDSim 也是卫星导航领域国内首款开源软件,以“开源共享、共同开发”为理念,免费向广大互联网用户发布,吸引全世界卫星导航领域专家、学者、学生共同开发和完善,形成大众参与、合作共赢、创新发展的卫星导航领域开源服务平台。本书与作者的另一本专著《BDSim 在卫星导航中的应用》形成姊妹篇。前者注重导航系统知识与理论部分,后者注重导航应用。

本书内容是作者主持或参与国家科技重大专项所获得成果的总结与提炼,除作者外,国防科学技术大学机电工程与自动化学院周永彬、钟小鹏、胡助理、胡梅、郭熙业等先后参与了相关课题的研究工作;研究团队的工程技术人员吕慧珠、张利云、康娟、李靖、王芳、刘勇,以及研究生冷如松、刘友红、周杨淼、彭海军、谢友方、李阳林、谢玲、张敏、杨飞、肖振国、林魁、彭利、张冠显、王红建、黄方鸿、宋诗谦等参与了本书的编写、排版和校对工作。在本书的编写过程中,得到各级部门和有关专家的关怀与支持,特别是国家最高科技奖获得者——两院院士、北斗工程总设计师孙家栋院士在相关课题研究中一直给予最直接的关心和指导,在此表示衷心感谢和崇高敬意!

由于作者水平和经验有限,书中错误和纰漏在所难免,敬请广大读者指正。

作 者

2016年10月于长沙

目 录

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	卫星导航系统概述	1
1.1.1	卫星导航系统组成及运行原理	1
1.1.2	全球四大卫星导航系统简介	2
1.2	卫星导航系统建模与仿真需求分析	4
1.2.1	卫星导航系统指标论证需求	5
1.2.2	卫星导航系统测试与评估需求	9
1.3	卫星导航系统建模与仿真发展现状	11
1.3.1	美国 GPS 系统建模与仿真发展现状	11
1.3.2	欧洲 Galileo 系统建模与仿真现状	13
1.3.3	中国北斗系统建模与仿真现状	17
第 2 章	卫星导航系统建模与仿真基础	20
2.1	卫星导航基本原理	20
2.1.1	导航电文模型	21
2.1.2	卫星空间位置计算	23
2.1.3	接收机伪距测量模型	28
2.1.4	接收机导航解算模型	30
2.2	系统建模与仿真理论基础	31
2.2.1	系统建模与仿真的概念	31
2.2.2	系统建模与仿真的方法	33
2.2.3	面向实体仿真方法	35
2.2.4	系统建模与仿真的作用和意义	39
2.3	卫星导航系统建模与仿真的任务	39
2.3.1	卫星导航系统实体对象和类抽象	39
2.3.2	卫星导航系统建模与仿真总体任务划分	41
第 3 章	卫星导航系统时空系统模型	44
3.1	时间系统模型	44
3.1.1	世界时系统	44
3.1.2	协调世界时	47
3.1.3	卫星导航时	47

3.1.4	力学时系统	48
3.1.5	时间系统间转换模型	48
3.1.6	时间标示法及其转换关系	50
3.2	坐标系统模型	54
3.2.1	地球地固坐标系统	54
3.2.2	地心惯性坐标系统	58
3.2.3	站心坐标系统	59
3.2.4	坐标系统间转换模型	60
3.2.5	坐标表示方法及其转换关系	62
3.3	地球自转模型	64
3.3.1	岁差模型	64
3.3.2	章动模型	66
3.3.3	极移模型	68
3.4	国际参考框架	68
3.4.1	国际地球参考系 ITRS 及其参考框架 ITRF	69
3.4.2	国际天球参考系 ICRS 及其参考框架 ICRF	70
3.4.3	天球坐标系和地球坐标系之间的转换	71
第 4 章	卫星导航系统空间段模型	72
4.1	卫星导航系统空间段概述	72
4.2	卫星导航星座构型	72
4.2.1	均匀对称星座	73
4.2.2	混合非对称星座	74
4.3	导航卫星轨道力学模型	77
4.3.1	二体问题	77
4.3.2	地球非球形摄动	81
4.3.3	第三体引力模型	82
4.3.4	太阳光压模型	83
4.3.5	其他模型	95
4.3.6	轨道摄动力量级分析	98
4.3.7	轨道数值预报模型	99
4.3.8	轨道计算模型	101
4.4	导航卫星姿态模型	102
4.4.1	导航卫星姿态数学模型	102
4.4.2	导航卫星姿态计算模型	103
4.5	星载原子钟模型	104
4.5.1	星载原子钟类型	104
4.5.2	星载原子钟数学模型	104
4.5.3	钟差计算模型	108

4.5.4	相对论效应模型	108
4.6	导航卫星有效载荷模型	111
4.6.1	导航卫星有效载荷	111
4.6.2	有效载荷的图形化建模方法	114
4.7	星间链路与星座组网模型	116
4.7.1	GPS 星间链路模型	116
4.7.2	Galileo 星间链路模型	117
4.7.3	星间可见性模型	119
4.8	星载自主导航模型	121
4.8.1	星间观测值模型	121
4.8.2	自主导航模型	122
第 5 章	卫星导航系统环境段模型	129
5.1	卫星导航系统环境段概述	129
5.2	对流层模型	129
5.2.1	对流层天顶延迟数学模型	130
5.2.2	对流层延迟映射函数模型	134
5.2.3	对流层延迟模型特性分析	135
5.2.4	对流层计算模型	139
5.3	电离层模型	140
5.3.1	电离层 TEC 变化特性分析	140
5.3.2	全球电离层 TEC 数学模型	147
5.3.3	电离层延迟修正模型	154
5.3.4	电离层延迟映射函数模型	157
5.3.5	电离层计算模型	158
5.4	地面监测站多路径效应模型	159
5.4.1	多路径特性分析	159
5.4.2	多路径效应模型	161
5.4.3	多路径效应计算模型	162
第 6 章	卫星导航系统地面段模型	164
6.1	卫星导航系统地面段概述	164
6.1.1	主控站概述	164
6.1.2	注入站概述	165
6.1.3	监测站概述	165
6.2	地面站观测计算模型	165
6.2.1	地面可见性模型	165
6.2.2	伪距观测值模型	166
6.2.3	载波相位观测值模型	168

6.2.4	伪距变化率观测值模型	171
6.2.5	星地时间同步观测值模型	173
6.2.6	站间时间同步观测值模型	176
6.2.7	激光测距观测值模型	178
6.3	地面观测误差模型	180
6.3.1	系统误差模型	180
6.3.2	随机误差模型	181
6.4	主控站信息处理模型	182
6.4.1	精密定轨模型	182
6.4.2	时间同步模型	186
6.4.3	电离层解算模型	187
6.4.4	上注导航电文生成模型	189
6.5	主控站计算模型	196
第 7 章	卫星导航系统用户段模型	198
7.1	卫星导航系统用户段概述	198
7.2	用户接收机载体模型	198
7.2.1	载体轨迹数学模型	200
7.2.2	载体姿态数学模型	213
7.2.3	载体动态计算模型	215
7.3	用户接收机模型	216
7.3.1	用户接收机类型	216
7.3.2	用户接收机安装	217
7.3.3	天线相位中心模型	218
7.4	用户接收机导航解算模型	220
7.4.1	定位数学模型	220
7.4.2	定速数学模型	224
7.4.3	授时数学模型	225
7.4.4	接收机导航解算计算模型	226
7.5	卫星导航高精度解算模型	227
7.5.1	实时动态高精度(RTK)解算模型	227
7.5.2	单点精密定位(PPP)解算模型	232
第 8 章	卫星导航系统模型有效性验证方法	239
8.1	模型一致性验证方法	239
8.1.1	一致性验证理论与方法简介	239
8.1.2	钟差计算模型的有效性验证	239
8.2	理论值比对法	241
8.2.1	理论值比对法概述	241

8.2.2	轨道数值积分模型有效性验证	241
8.3	实测数据比对法	242
8.3.1	方法简介	242
8.3.2	基于 IGS 实测数据的电离层模型有效性验证	242
8.3.3	基于 IGS 实测数据的地面站观测数据有效性验证	243
8.4	成熟软件比对法	244
8.4.1	成熟软件简介	244
8.4.2	基于 STK/HPOP 的轨道计算结果有效性验证	245
8.4.3	基于 Bernese 的空间环境计算模型有效性验证	246
8.5	数据处理验证法	249
8.5.1	数据处理方法简介	249
8.5.2	基于星地联合定轨的观测数据有效性验证	249
8.5.3	基于 Bernese 单点定位的用户观测数据有效性验证	252
第 9 章	卫星导航系统面向对象仿真模型标准规范	255
9.1	卫星导航系统仿真模型描述方法	255
9.2	卫星导航系统仿真模型规范	256
9.2.1	模型设计基本原则	257
9.2.2	模型组成要素	257
9.2.3	模型计算约束	258
9.2.4	模型开发规范	258
9.3	基于 UML 的卫星导航系统模型描述方法	261
第 10 章	卫星导航系统面向对象仿真模型设计	265
10.1	仿真模型设计概述	265
10.1.1	仿真模型分类	265
10.1.2	模型间关系	266
10.2	仿真模型设计实例	268
10.2.1	空间段模型设计	268
10.2.2	地面段模型设计	272
10.2.3	用户段模型设计	274
10.2.4	环境段模型设计	277
10.3	仿真模型集成	279
10.3.1	仿真模型集成设计	279
10.3.2	仿真模型集成框架	280
第 11 章	卫星导航系统仿真软件架构设计与实现	282
11.1	仿真软件运行模式设计	283
11.1.1	实时运行模式	283
11.1.2	超实时运行模式	284

11.1.3	演示运行模式	284
11.2	仿真软件的模块组成	284
11.2.1	仿真场景配置模块	286
11.2.2	仿真进程控制模块	286
11.2.3	数据处理与分析模块	286
11.2.4	导航仿真业务调度模块	286
11.2.5	可视化输出与监控模块	287
11.2.6	状态消息报告模块	287
11.2.7	系统输入输出模块	287
11.2.8	系统应用接口模块	288
11.2.9	算法模型验证与评估模块	288
11.3	仿真软件的交互设计	288
11.3.1	模型	288
11.3.2	视图	289
11.3.3	视图模型	289
11.4	卫星导航仿真软件实现	290
11.4.1	仿真场景配置模块实现	290
11.4.2	可视化与评估实现	293
11.4.3	系统输入输出实现	295
第 12 章	卫星导航系统仿真软件接口设计	298
12.1	输入/输出模块设计	298
12.1.1	系统输入	298
12.1.2	系统输出	299
12.2	外部接口设计	300
12.2.1	与 STK 接口设计	300
12.2.2	与 Google Earth 接口设计	306
第 13 章	卫星导航系统仿真软件的应用	309
13.1	在卫星导航平行系统中的应用	309
13.1.1	GNSS 平行系统支持模型精化的计算实验设计	311
13.1.2	GNSS 平行系统支持地面试验验证的计算实验设计	311
13.2	在地面操作人员培训系统中的应用	312
13.2.1	地面操作人员培训需求	312
13.2.2	基于平行系统的地面操作人员培训方法及流程	313
13.3	在卫星导航系统故障诊断中的应用	317
第 14 章	外部数据在卫星导航仿真中的应用	318
14.1	实测数据来源与简介	318
14.1.1	IGS 数据	318

14.1.2	CODE 数据	319
14.2	实测数据在卫星导航仿真中的应用	319
14.2.1	IGS 精密星历的应用	319
14.2.2	IGS 精密钟差的应用	321
14.2.3	IGS 地面站观测数据的应用	322
14.2.4	CODE 电离层延迟数据的应用	324
参考文献		328
附录 A 卫星导航仿真软件		337
附录 B IAU 时空转换工具包 (SOFA)		354
附录 C 外部数据来源及格式说明		361

第1章 绪 论

卫星导航系统一般由全球分布的数十颗卫星、若干个地面站、大量用户组成,形成空间段、地面段、用户段三个部分。为了减少建设成本,提前识别技术风险,提高系统运行维护能力,世界主要的卫星导航系统大国都十分重视通过构建仿真系统对卫星导航系统建设和运行维护提供测试评估与分析验证的支持。在此背景下,卫星导航系统建模及仿真在卫星导航系统的设计与建设、运行与维护等方面都得到了广泛应用,推进了卫星导航系统本身的建设。

本章首先概述卫星导航系统的组成及运行原理,然后讨论卫星导航系统建设和运行维护过程中需要的仿真支持,最后简要介绍目前世界主要卫星导航系统在建模与仿真中的研究现状。

1.1 卫星导航系统概述

卫星导航系统泛指所有的卫星导航系统,包括全球系统、区域系统和增强系统。全球卫星导航系统主要包括美国的 GPS (Global Positioning System)、中国的北斗卫星导航系统、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo。同时,许多国家正在大力发展和建设自主的卫星导航系统,如欧洲地球同步卫星导航增强系统 (European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS), 印度正在建设的区域卫星导航系统 (India Regional Navigation Satellite System, IRNSS) 以及日本正在建设中的准天顶卫星导航系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)。毋庸置疑,全球卫星导航系统的发展正逐渐趋向世界多极化。

1.1.1 卫星导航系统组成及运行原理

尽管卫星导航系统存在多样化发展的趋势,但是卫星导航系统的组成及其运行原理却大体相似。卫星导航系统一般由空间段、地面段和用户段组成,如图 1.1 所示。

1. 空间段

卫星导航系统的空间段即空间卫星星座,星座中各颗卫星的基本功能可总结如下:接收并解析地面控制段发射的导航信息,执行地面控制段发射的控制指令,进行部分必要的数据处理,生成并向地面播发导航信息,以及通过推进器调整自身的运行姿态。

2. 地面段

地面段,又称地面控制段,主要由主控站、注入站及监测站组成。主控站负责收集各个监测站的观测数据,进行数据处理,生成卫星星历、卫星钟差、大气层延迟等导航电文中包含的修正参数、广域差分信息和完好性信息等,完成任务规划与调度,实现系统运行控制与管理等;注入站在主控站的统一调度下,向卫星注入导航电文、广域差分及完好性信息,并确保传输信息的正确性,同时,将主控站发送来的控制指令发给相应卫星,实现有效载荷的

控制管理；监测站负责对导航卫星进行连续跟踪监测、接收导航信号，并将数据发送给主控站，为主控站信息处理业务提供观测数据。

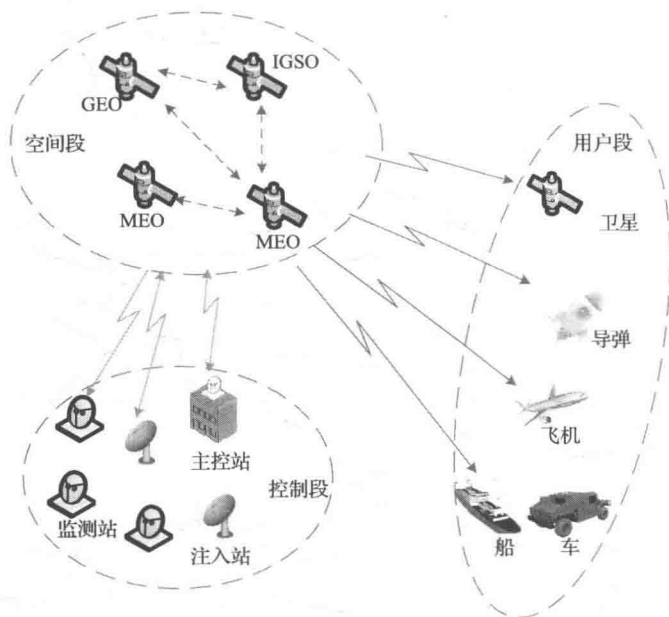


图 1.1 卫星导航系统组成

3. 用户段

用户段主要指用户导航定位设备，其主要任务是跟踪可见卫星，对接收到的卫星无线电信号进行相关数据处理得到定位所需的测量值和导航信息，最后完成定位、测速、授时等导航解算任务。

1.1.2 全球四大卫星导航系统简介

1. 美国 GPS

20 世纪 50 年代末，人造卫星的成功发射及其后人造卫星技术的发展和运用，为卫星导航系统的出现和发展奠定了基础。第一代卫星导航系统是 20 世纪 60 年代出现的美国子午 (Transit) 卫星系统和 70 年代苏联建立的 Cicada 系统，其贡献在于开辟了世界卫星导航的历史，回答了高定位精度和远作用距离统一的可行性问题。由于覆盖上存在时间间隙，定位时间较长，加之定位精度不尽人意，美国于 20 世纪 70 年代开始研制第二代卫星导航系统 (GPS)，1993 年 12 月 8 日系统达到初始工作能力，1995 年 7 月 17 日达到全运行能力 (Full Operation Capability, FOC)。它能为全球陆海空天各类载体，全天候 24 小时连续提供高精度的三维位置、速度和时间信息。GPS 凭借其优良性能被誉为是导航领域的一场革命，其应用前景仅受人们的想象力限制。

进入 21 世纪后，由于 GPS 应用技术发展和其他卫星导航系统的竞争，美国出台了一系列 GPS 现代化计划，主要包括：①取消 SA：消除 SA 产生的伪距误差，已于 2000 年 5 月 1

日实施。②增发两个新的民用码：一个调制在 L_2 (1227.6MHz) 上，一个调制在新增的 L_5 (1176.45MHz) 上，三频制使得用户能进行更高精度的电离层延迟改正，并方便解算载波相位整周模糊度，从而提高定位精度。③增加导航卫星：保证 21 加 3 颗在轨卫星，并可能增加到 30 颗卫星，以增加可用性。④改善精度：通过运行控制系统的升级使 PPS 的测距误差提高到 2.5m，强化军用功能，民用精度在取消 SA 和加发第二频率后也将得到改善。⑤增加 30dB 的抗干扰能力。

2. 中国北斗

1994 年我国开始双星导航定位系统“北斗一号”（也称为北斗卫星导航试验系统）的建设。该系统由 2 颗地球静止卫星、1 颗在轨备份卫星、中心控制系统、标校系统和用户机组成，可为用户提供快速定位、简短数字报文通信和授时服务，是一种新型、全天候、区域性的卫星定位系统。

由于北斗卫星导航试验系统是区域性的，采用有源定位体制，不能完全满足我国武器装备建设和国民经济发展日益增长的需求，因此，在此基础上我国开始建设“北斗二号”卫星导航系统，简称北斗卫星导航系统，空间段如图 1.2 所示。2007 年 4 月 14 日，成功发射了第 5 颗北斗卫星，这颗代号为 Compass M-1 的北斗卫星是我国发射的第 1 颗 MEO 导航卫星，入轨不久后开始发射三个频点的导航信号。2012 年 12 月，我国宣布 BDS 面向亚太区域提供正式运行服务，在轨卫星达到 14 颗，定位精度优于 20m。2013 年，北斗系统保持连续稳定运行，覆盖亚太地区的服务信号监测评估表明，系统服务性能满足 10m 指标要求，部分地区性能略优于指标要求。如在北京、郑州、西安、乌鲁木齐等地区，定位精度可达到 7m 左右；东盟国家等低纬度地区，定位精度可达 5m 左右。

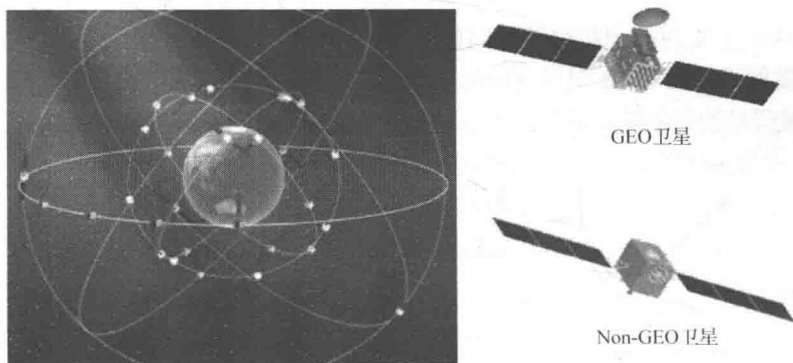


图 1.2 北斗卫星导航系统空间段示意图

2015 年 3 月底，我国首颗新一代北斗导航卫星成功发射，标志着北斗卫星导航系统已由区域运行向全球运行拓展。新一代北斗导航卫星瞄准北斗卫星导航系统全球组网需求，卫星寿命由 8 年延长到 10~12 年，卫星空间环境防护和抗干扰能力将进一步提高。我国 2015 年 7 月 25 日成功发射两颗北斗导航卫星，近几年还将加快发射新一代北斗导航卫星，到 2020 年北斗导航定位精度将提高到 2.5m。届时，30 余颗新一代北斗导航卫星将覆盖全球，为全球用户提供更高精准、更可靠的服务，并通过星间链路实现星-星组网、互联互通。

北斗卫星导航系统现已形成包括基础产品、应用终端、运行服务等较为完整的产业体系。

随着自主北斗芯片、模块等关键技术的全面突破,北斗卫星导航技术已广泛应用于我国交通运输、海洋渔业、水文监测、气象预报、大地测量、救灾减灾、手机导航等领域,产生了显著的社会效益和经济效益。目前,北斗卫星导航系统正逐步进入国际民航、国际海事、移动通信等国际组织,已被国际海事组织接纳认可为全球第三个卫星导航系统。

3. 俄罗斯 GLONASS

20 世纪 70 年代中期,为了满足军事上的需要,苏联军方开始提出 GLONASS 计划。GLONASS 是继美国的 GPS 之后又一全天候、高精度的卫星定位导航系统。1994 年,俄罗斯开始按计划进行第一次卫星发射,1995 年 12 月,俄罗斯成功发射 3 颗卫星,布满了 24 颗卫星星座。GLONASS 也使用军用和民用两种码,但民用码不采用 SA 政策,能达到 50~70m 的水平定位精度。之后,俄罗斯由于国内经济紧张,无资金注入用于更换新的卫星,且 GLONASS 卫星寿命较短,致使星座不全。直至 2013 年 4 月,GLONASS 系统正常工作卫星终于达到了 24 颗,实现了全球覆盖。

4. 欧洲 Galileo

1999 年 2 月 10 日,欧洲联盟(简称欧盟)公布了欧洲的 Galileo 导航卫星系统,该系统由欧洲安全局、欧盟和欧洲空间局(简称欧空局)3 个机构联合研制,与 GPS 和 GLONASS 兼容,是民用全球卫星导航系统。欧盟之所以积极筹划 Galileo,主要是为了摆脱对美国 GPS 系统的依赖,打破美国对全球卫星导航产业的垄断。2002 年 3 月 26 日,欧盟 15 国交通部长会议一致决定正式启动 Galileo 卫星导航系统计划,欧盟宣称 Galileo 将是第一个专门面向民用的卫星导航系统。

2005 年 12 月 28 日,欧洲成功发射了第 1 颗 Galileo 系统试验卫星 GIOVE-A,经过一系列在轨测试,2008 年 4 月欧洲航空航天局(ESA)宣布 GIOVE-A 满负荷运行工作成功。2008 年 4 月 27 日成功发射了 GIOVE-B 卫星。Galileo 卫星采用空间载体有史以来最稳定的时钟——无源氢钟,卫星射频信号的调制除采用传统的二相移键控(Binary Phase-Shift Keying, BPSK)调制技术外,还采用一种新的调制技术——二进制补偿载波(Binary Offset Carrier, BOC)。2007 年 11 月,欧盟宣布 Galileo 系统建成后将为用户提供误差小于 1m 的精确定位服务,但由于各方面的原因,系统建设滞后,预计 2020 年能够投入使用。目前 Galileo 已有 8 颗卫星在轨运行。

1.2 卫星导航系统建模与仿真需求分析

北斗全球卫星导航系统的建设,将是一个非常复杂的系统工程。在关键技术攻关、试验卫星系统、组网建设等各个阶段,需要合理地规划、管理全过程的技术工作,并在卫星组网发射之前,通过较为完备的仿真试验手段,充分验证系统体制的可行性,提前识别并控制系统的不确定因素及问题,以最小的时间和成本代价实现系统建设的总目标。因此,全球卫星导航系统仿真软件将是降低全球卫星导航系统建设风险的有效途径。

全球卫星导航系统仿真软件通过系统集成,构建卫星空间段、地面段、用户段、环境段于一体的综合软件验证平台,在此平台上,能够进行大系统服务性能仿真试验、星间链路与自主导航试验等需要系统集成后才能综合进行的试验验证。