

BDSim[®]在 卫星导航中的应用

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

BDSim 在卫星导航中的应用

杨 俊 黄文德 陈建云 明德祥 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

BDSim 软件是国内首款全球卫星导航系统仿真软件。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。同时,BDSim 作为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。

本书是国内首本卫星导航仿真软件的应用书籍,填补了卫星导航领域软件工具应用相关专著的空白。全书共分6个部分,内容包括 BDSim 软件概述、BDSim 在卫星导航系统级仿真中的应用、BDSim 在卫星导航设计、分析与评估中的应用、BDSim 在卫星导航数据处理中的应用、BDSim 在卫星导航算法与模型协同开发中的应用、BDSim 外部接口设计等。本书与开源软件 BDSim 构成理论与实践相结合的有机整体,能够更好地提高人们对卫星导航系统的认识,为卫星导航系统的建设与应用提供有力支持。

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

BDSim 在卫星导航中的应用/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 978-7-03-048354-6

I. ①B… II. ①杨… III. ①卫星导航—全球定位系统—研究
IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 113648 号

责任编辑: 潘斯斯 / 责任校对: 郭瑞芝
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: 16 1/4

字数: 406 000

定价: 78.00 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、同协同创新，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

随着人们对导航定位授时需求的不断增长，位置服务已成为大众消费的重要服务产品。卫星导航系统的应用已经从最初的军事领域，扩展到专业领域，进而深入发展到大众领域。目前卫星导航系统的应用已无处不在，其应用只受到人们想象力的限制。对卫星导航系统的认识和了解决定了人们对卫星导航的应用能力和水平。为了普及卫星导航系统理论和应用知识，同时，为了减少实际卫星导航系统建设的调试周期，亟需开展卫星导航系统仿真软件的研制和开发。在此背景下，本书作者所在团队以卫星导航国家科技重大专项仿真与测试相关课题为基础，对重大专项中突破的一批关键技术进行总结与提炼，研制开发了国内首款全球卫星导航系统仿真软件——BDSim。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。

与此同时，开源软件的兴起吸引了大量的开发者，全球的开发者可以自由地参与进来，既可以对自己感兴趣的软件项目提供外部贡献，又可以把自己的创新想法发布出去，与全球的开发者共同完成、实现。开源运动将分布在全球的群体智慧汇集到开源软件作品中，把用户对高品质软件的需求、企业商业战略、抑制技术垄断、产业良性循环等诸多目标有效的集成到开源活动中，最终实现了对软件产业的根本性改造。BDSim 作为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。通过建立“中国北斗开源社区”，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。

本书以 BDSim 为基础，详细介绍了其在卫星导航中的应用，力求从导航基础理论、软件工具使用和仿真测试应用 3 个方面讲述卫星导航系统的运行机理和具体应用，强调理论与实践相结合，以期能够更好地提高人们对整个卫星导航系统的认识，为卫星导航系统的建设提供有力支持和参考。同时，本书将开源软件创新研发方法（即大规模开放在线研究）与卫星导航领域仿真工具的开发与应用相结合，理论紧密结合实践，创新性地将静态的知识与动态的科研活动相结合。一方面可以指导读者进行软件的开发，另一方面使读者更好地了解软件本身的应用，进而促进北斗卫星导航领域的基础教学、人才培养和行业应用。

全书共分 6 个部分。第一部分“BDSim 软件概述”介绍 BDSim 软件的研发背景、主要功能、模块组成、BDSim 软件入门以及 BDSim 开源社区思想和基于开源平台的 BDSim 开发流程；第二部分“BDSim 在卫星导航系统级仿真中的应用”全面系统地阐述了 BDSim 软件在卫星导航系统空间段、地面段、环境段和用户段等的仿真功能及实例，并介绍了 BDSim 软件全系统仿真过程中的数据产品；第三部分“BDSim 在卫星导航设计、分析与评估中的应用”以典型案例形式，重点介绍了 BDSim 在导航星座构型设计、地面站布局设计和终端测试与评估中的应用；第四部分“BDSim 在卫星导航数据处理中的应用”列举了 BDSim 软件作为数据模拟源，在地面段业务仿真分析和高精度后处理业务仿真分析中的具体应用；第五部分“BDSim 在卫星导航算法与模型验证中的应用”介绍利用 BDSim 构建算法和模型验证平台的

方法,并重点阐述了 BDSim 在用户导航算法研究方面、卫星导航仿真模型建模和定轨算法研究方面的应用;第六部分“BDSim 外部接口设计”介绍 BDSim 与卫星导航信号源、卫星导航终端、高精度数据处理软件、STK 等的接口与使用方法。本书是国内首套卫星导航仿真软件的应用书籍,填补了卫星导航领域软件工具应用相关专著的空白。本书可作为卫星导航仿真及测试领域相关专业的教学辅助用书,以及从事卫星导航仿真测试及其用户终端检测的科技工作者和工程师的工具书和参考资料。(BDSim 软件和相关视频资料可免费在中科云教育平台下载,网址为: <http://www.coursegate.cn/cms>。)

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

第一部分 BDSim 软件概述

序 前言

第 1 章	BDSim 软件简介	1
1.1	BDSim 仿真对象	1
1.2	BDSim 研发背景	2
1.2.1	国外背景	3
1.2.2	国内背景	6
1.3	BDSim 主要功能	7
1.3.1	多系统数据仿真与处理	7
1.3.2	性能指标分析与评估	8
1.3.3	外部接口功能	9
1.4	BDSim 模块组成	9
1.4.1	仿真模块	9
1.4.2	仿真场景及模型参数配置模块	9
1.4.3	仿真控制模块	10
1.4.4	系统消息报告模块	10
1.4.5	数据分析与评估模块	10
1.4.6	模型加载与验证模块	11
1.4.7	数据导入导出模块	11
1.5	BDSim 应用领域	11
1.6	免责声明	12
第 2 章	BDSim 软件入门	13
2.1	BDSim 的安装	13
2.2	创建第一个 BDSim 场景	14
2.2.1	BDSim 界面	15
2.2.2	创建场景	20
2.2.3	创建对象	21
2.2.4	设置和保存新场景	22
2.2.5	创建第一个实例场景	23
第 3 章	BDSim 开源社区	26

3.1	BDSim 开源社区简介	26
3.1.1	什么是开源软件和开源社区	26
3.1.2	BDSim 开源社区	26
3.2	BDSim 的开源开发流程	26
3.2.1	项目创建与托管	26
3.2.2	协同开发与集成	30
3.2.3	项目测评与开源	34
3.3	基于开源平台的开发实例	34

第二部分 BDSim 在卫星导航系统级仿真中的应用

第 4 章	BDSim 的多系统仿真功能	36
4.1	公共基础数据仿真	36
4.1.1	公共基础数据仿真对象分析	36
4.1.2	公共基础数据 BDSim 仿真实现	38
4.1.3	公共基础数据仿真结果分析	44
4.2	BDSim 在空间段的仿真	45
4.2.1	空间段仿真对象分析	45
4.2.2	空间段 BDSim 仿真实现	49
4.2.3	空间段仿真结果分析	57
4.3	BDSim 在地面段的仿真	60
4.3.1	地面段仿真对象分析	60
4.3.2	地面段 BDSim 仿真实现	62
4.3.3	地面段仿真结果分析	68
4.4	BDSim 在环境段的仿真	74
4.4.1	环境段仿真对象分析	74
4.4.2	环境段 BDSim 仿真实现	76
4.4.3	环境段仿真结果分析	81
4.5	BDSim 在用户段的仿真	82
4.5.1	用户段仿真对象分析	82
4.5.2	用户段 BDSim 仿真实现	84
4.5.3	用户段仿真结果分析	88
4.6	北斗全球系统 BDSim 仿真实例	91
4.6.1	北斗全球系统组成	91
4.6.2	BDSim 仿真场景构建	92
4.6.3	BDSim 仿真结果	95
第 5 章	BDSim 仿真数据产品	97
5.1	卫星导航数据交换标准格式简介	97
5.2	BDSim 数据产品及格式	98

5.2.1 空间段数据	98
5.2.2 环境段数据	102
5.2.3 地面段数据	104
5.2.4 用户段数据	108

第三部分 BDSim 在卫星导航设计、分析与评估中的应用

第 6 章 BDSim 在导航星座构型设计中的应用	111
6.1 导航星座构型设计要点	111
6.1.1 星座基本构型	111
6.1.2 导航星座设计要素	112
6.2 导航星座性能指标	112
6.2.1 星座覆盖性	112
6.2.2 星座可用性	112
6.3 基于导航星座性能评估指标的卫星星座设计应用	113
6.3.1 区域导航星座性能分析	113
6.3.2 全球导航系统星座性能分析	123
第 7 章 BDSim 在地面站布局设计中的应用	129
7.1 地面站布局因素分析	129
7.1.1 测站几何分布	129
7.1.2 测站数量	130
7.2 地面站布局分析流程	130
7.3 地面站几何分布设计	131
7.3.1 仿真环境设计	131
7.3.2 软件实现	131
7.3.3 数据处理与分析	132
7.4 地面站数量选择	133
7.4.1 仿真环境设计	133
7.4.2 软件实现	134
7.4.3 数据处理与分析	134
7.5 小结	135
第 8 章 BDSim 在终端测试与评估中的应用	136
8.1 终端测试评估场景需求分析	136
8.2 基于 BDSim 的终端测试评估	137
8.2.1 伪距测量精度测试	138
8.2.2 定位精度测试	139
8.3 终端测试 BDSim 场景构建	139
8.3.1 面向终端不同轨迹的 BDSim 场景构建	140
8.3.2 伪距测量精度测试 BDSim 场景构建	143

8.3.3 定位精度测试 BDSim 场景构建	146
-------------------------	-----

第四部分 BDSim 在卫星导航数据处理中的应用

第 9 章 BDSim 在地面段试验验证中的应用	149
9.1 地面段业务及其评估方法简介	149
9.1.1 地面段主要业务处理流程	149
9.1.2 地面段主要业务评估方法	150
9.2 基于监测站观测数据的精密定轨试验	151
9.2.1 试验分析	151
9.2.2 BDSim 数据生成	152
9.2.3 试验结果及分析	153
9.3 基于星间观测数据的自主定轨试验	156
9.3.1 试验分析	156
9.3.2 BDSim 数据生成	156
9.3.3 试验结果及分析	159
9.4 基于星间星地观测数据的联合定轨试验	160
9.4.1 试验分析	160
9.4.2 BDSim 数据生成	160
9.4.3 试验结果及分析	161
9.5 利用星地观测数据进行时间同步试验	162
9.5.1 试验分析	162
9.5.2 BDSim 数据生成	163
9.5.3 试验结果及分析	163
9.6 利用站间观测数据进行时间同步试验	164
9.6.1 试验分析	164
9.6.2 BDSim 数据生成	165
9.6.3 试验结果及分析	165
9.7 利用双频伪距解算电离层 TEC 试验	166
9.7.1 试验分析	166
9.7.2 BDSim 数据生成	166
9.7.3 试验结果及分析	167
第 10 章 BDSim 在高精度导航定位仿真分析中的应用	168
10.1 精密单点定位技术概述	168
10.1.1 精密单点定位基本原理	168
10.1.2 精密星历与精密钟差来源	169
10.2 BDSim 仿真实现	170
10.3 Bernese 软件对 BDSim 数据进行高精度处理	172
10.4 结果分析	181

第五部分 BDSim 在卫星导航算法与模型协同开发中的应用

第 11 章	BDSim 在用户导航算法协同开发中的应用	182
11.1	软件协同开发	182
11.2	导航定位授时算法概述	182
11.2.1	测速算法	182
11.2.2	授时算法	184
11.2.3	定位算法	185
11.3	定位算法协同开发	187
11.3.1	BDSim 中的默认定位算法	187
11.3.2	用户添加自定义定位算法	192
11.4	载体定位算法验证	194
11.4.1	定位算法验证一般方法	194
11.4.2	用户定位算法验证	195
第 12 章	BDSim 在卫星导航建模研究方面的应用	196
12.1	环境仿真模型的验证支持	196
12.1.1	环境仿真模型分类	196
12.1.2	基于 BDSim 的电离层模型验证	196
12.2	新增观测类型数据仿真模型验证支持	203
12.2.1	新增观测类型数据仿真模型添加	203
12.2.2	新增观测类型数据仿真模型验证	208
第 13 章	BDSim 在定轨算法研究方面的应用	210
13.1	自主定轨的基本算法	210
13.1.1	自主定轨概述	210
13.1.2	自主定轨的数学模型	211
13.1.3	伪逆平差定轨算法	212
13.2	基于 BDSim 平台的自主定轨实现方法	212
13.2.1	软件协同开发	212
13.2.2	仿真实例	215

第六部分 BDSim 外部接口应用

第 14 章	BDSim 外部接口使用方法	216
14.1	BDSim 与卫星导航信号源的接口	216
14.1.1	离线数据接口	216
14.1.2	在线数据接口	220
14.2	BDSim 与卫星导航终端的接口	225
14.3	实测数据的导入	229

14.3.1 数据导入作用及目的	229
14.3.2 RINEX 导航电文数据导入	230
14.3.3 SP3 数据导入	233
14.3.4 用户轨迹数据导入	234
14.4 BDSim 与高精度数据处理软件的接口	237
14.5 BDSim 与 STK 的接口	239
参考文献	247

第一部分 BDSim 软件概述

第 1 章 BDSim 软件简介

1.1 BDSim 仿真对象

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能够为地球及近地空间的任意地点提供高精度、全天时、全天候的导航、定位和授时信息,是当今国民经济和国防建设不可或缺的重要空间基础设施。卫星导航系统在国民经济众多领域应用非常广泛,已形成庞大的卫星导航产业,带动交通、通信等基于时空定位的现代信息服务业的发展,产生巨大的效益;在军事领域是实现武器平台精确导航定位和制导武器远程精确打击的关键支撑,是现代高技术信息化战争的重要保障,对世界新军事变革具有积极推动作用,已成为一个影响国计民生的重要基础设施。

卫星导航系统由空间段导航卫星、地面段监控设备和用户接收段设备三大部分组成。空间段包括数十颗运行于不同轨道高度、不同轨道面的卫星,它们是用户定位、授时的空间基准和时间基准,它们接收并存储地面监控部分上注的导航信息,执行地面监控部分发送的控制指令,将测距码和电文调制在载波上连续不断地向地面播发导航信号。地面段监控设备一般由主控站、注入站和导航信号监测站组成,实现监视卫星运动,收集卫星运行信息,完成卫星运行信息、控制指令的生成及上注。主控站是整个导航系统的核心,实现接收、处理所有监测站、注入站传来的数据,完成对空间导航卫星的控制及信息更新。用户段接收设备包括市场上种类繁多、形式多样的导航终端设备,它们是卫星导航系统应用的最终体现。用户设备跟踪可见卫星,接收导航信号,经数据处理后获得定位所需信息,完成用户的导航定位及其他任务。卫星导航系统组成如图 1.1 所示。

卫星导航系统的运行原理简单概括如下:空间段运行的各颗卫星实时向地面发射信号;地面监控部分接收、测量各卫星信号,确定卫星的轨道信息,将卫星的运行轨道信息和控制指令上注给卫星,用于卫星向用户播发导航信息;用户设备接收、测量各可见卫星的信号,将卫星作为空间基准/时间基准,进而确定自身的空间位置/时间信息。

出于军事和商业利益的考虑,世界主要航天大国和国家集团不惜巨资建设、发展全球卫星导航系统,目前形成了美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统、欧盟的 Galileo 系统和中国的北斗(BeiDou/COMPASS)系统四大全球卫星导航系统共存的格局,此外,日本的准天顶卫星导航系统(QZSS)、印度的卫星导航系统(IRNSS)也是正在发展的具有各自特色的区域卫星导航系统。随着 GNSS 的现代化建设,虽然各卫星导航系统的组成、功能不尽相同,但都已开始充分考虑与其他系统的兼容性问题。多个卫星导航系统配合,在定位精度、可用性、连续性和完好性方面的保障远比单一系统好。多系统信息融合,包括卫星导航系统的星座构型设计、信号频率选择、接收机模块设计及复用等,将成为卫星导航领域的热点研究,也是充分利用卫星导航信息资源、空间资源的重要手段。

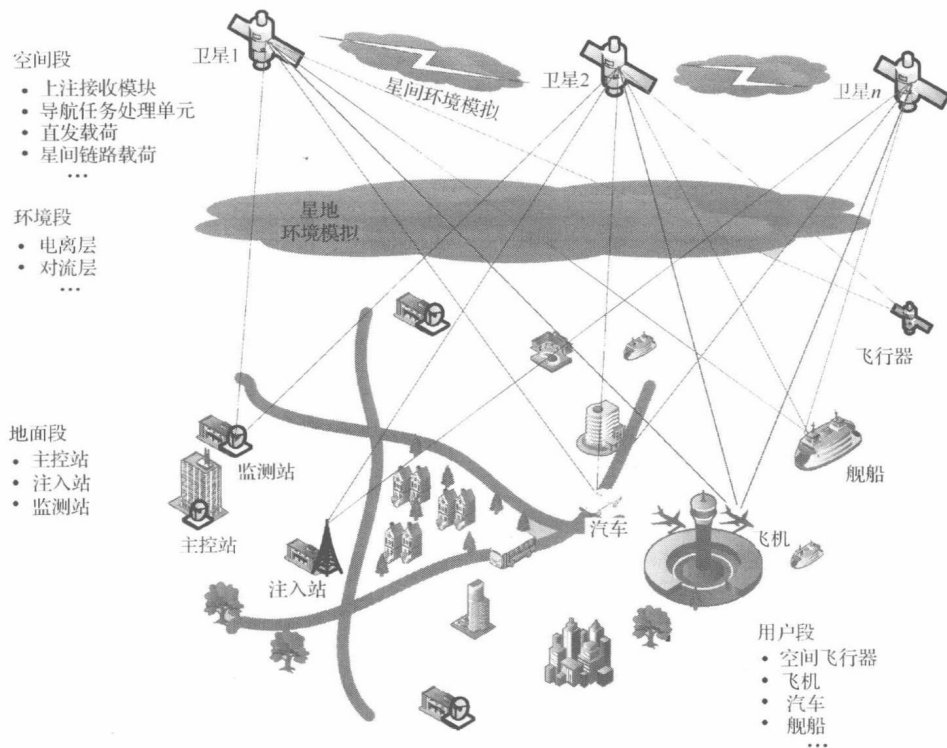


图 1.1 卫星导航系统组成示意图

卫星导航系统是一个巨大、复杂的系统工程，不管是单系统的生产建设和运行维护，还是多系统融合应用等，如果直接在真实环境中进行试验验证，必将耗费巨大的人力资源和资金资源。构建近乎真实的卫星导航仿真系统，建立高精度的空间段、地面段和用户段模型，实现模型功能、接口仿真及系统性的功能和性能，在卫星导航系统新体制、关键技术、核心模块尚未应用之前，一方面为卫星导航系统的正常运行提供一个驱动工具，支持卫星导航系统各分系统的联调联试；另一方面可以为卫星导航系统的功能和性能测试提供一个软件平台，有利于降低试验成本，提高效率。

国防科学技术大学天衡导航“卫星导航仿真测试与评估团队”依托在卫星导航领域十余年的研究与工程实践基础，结合计算机仿真技术，于 2014 年率先研发国内首款全球卫星导航系统仿真软件平台，并在同年第五届中国卫星导航学术年会上进行展示。孙家栋院士参观后对该软件平台寄予重托：“我希望你们推出的卫星导航仿真软件系统不仅可以支持大系统运行，还希望你们将系统简化，惠及青少年创新人才的培养。”后经过研发团队两年的改进完善，全球卫星导航仿真软件平台（简称 BDSim）于 2016 年正式上线发布，其将为卫星导航系统的建设提供试验验证平台，并将助推北斗产业应用的发展和北斗专业人才的培养。

1.2 BDSim 研发背景

当前国际上已存在知名度较高的卫星导航仿真软件有 HFSS (High Fidelity Simulation System, 高逼真仿真系统)、GSSF, 分别针对 GPS、Galileo 卫星导航系统而研制，主要用于卫星导航的辅助教学与研究，已获得较大范围的应用。

1.2.1 国外背景

根据国外卫星导航系统的发展情况,尤其是从GPS系统、GLONASS系统和目前的Galileo卫星导航系统来看,仿真测试系统是地面运控系统必不可少的测试手段。在此主要介绍分别针对GPS和Galileo卫星导航系统研制的仿真系统情况,同时对具有数据仿真功能的Bernese软件也做一些功能说明。

1. GPS 仿真软件

GPS从概念提出到系统完全建成,前后历时二十余年,期间对定位的基本概念、基本原理、基本模式,系统算法、系统控制等都进行了大量的工程计算与试验。但由于GPS概念提出是在20世纪70年代,当时各种条件尤其是计算机技术极大地限制了系统分析工作的开展,主要分析和验证工作均采用卫星在轨演示验证完成,造成系统建设周期长达二十年。

仿真测试一直是GPS系统研制中的重要手段。20世纪70年代后期,GPS尚处于方案论证阶段,美国空军就在尤马试验场建立了地面测试与数据处理系统。

20世纪80年代中期,美国Rockwell公司建立了一套星地回路仿真系统,以支持GPS BLOCK II和BLOCK II A卫星系列的研制。90年代中期,Rockwell公司又对以前的仿真系统进行了技术改造,以支持GPS BLOCK IIF卫星系列的研制。为了配合GPS系统的现代化及GPS III计划的实施,更好地适应卫星导航新技术的研发,Rockwell等公司对已有的仿真系统资源进行了组合、配置和更新。

20世纪90年代中期,Lockheed开发了一个可用于人员培训的高精度GPS卫星模拟器,即HFSS,该模拟器可以对整个GPS星座进行高精度仿真,不仅包括超过30颗Block II/II A和Block IIR卫星,也包括4个注入站和20个监测站,其中有14个监测站是国家图像测绘局(National Imagery and Mapping Agency, NIMA)站。HFSS设计模型如图1.2所示。

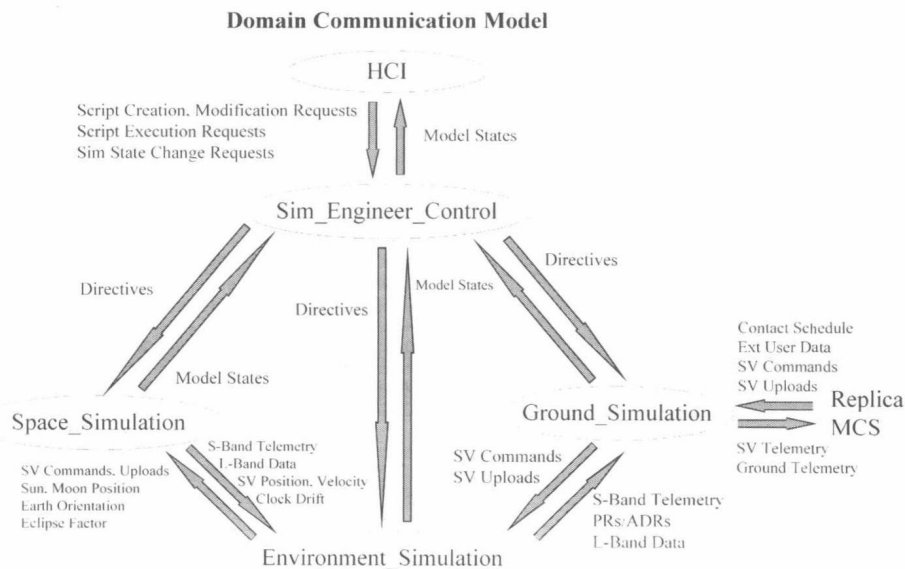


图 1.2 HFSS 模型图

高精度 GPS 卫星模拟器可以提供交互式的模型、全部的环境仿真以及可选载体仿真, 为全世界最复杂的导航系统的培训和分析提供一个前所未有的机会, 可提高控制员随时准备控制卫星的能力, 为控制段提供更高的见解, 对军事和民用都有极大裨益。

除 Rockwell 公司外, Lockheed Martin 公司也一直致力于 GPS 增强系统的模型研究, 目的是研制一款可以用于量化导航系统性能的工具, 而集成 GPS 模拟器(Integrated GPS Simulator, IGPSS)就是这样一款工具, 其最初是用来对 WAAS 做性能分析, 后来随着 GPS 系统的升级, 该工具也逐渐向 GPS 全系统模拟仿真靠近, 目前 IGPSS 可用于 GPS III 模型仿真以及性能分析。

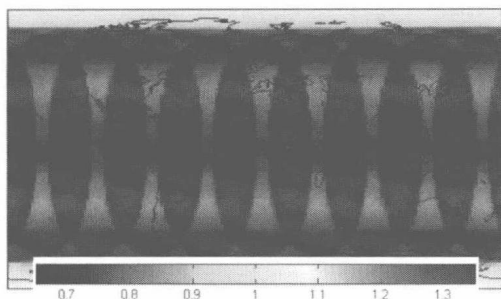


图 1.3 36 颗卫星时 PDOP 值分布

IGPSS 最初采用 FORTRAN 语言开发, 可被整合到 MATLAB 中以利用 MATLAB 中的图形功能。当前版本采用面向对象的思想, 利用 C++ 语言进行了重构, 这样更方便与其他软件进行相互调用以及二次开发。

IGPSS 可以实现对导航星座的架构评估、覆盖可视化显示、系统性能评估以及对增强系统的精度评估。可以预见, IGPSS 将在 GPS 现代化发展起到不可估量的作用。

图 1.3~图 1.5 所示为 IGPSS 评估结果图。

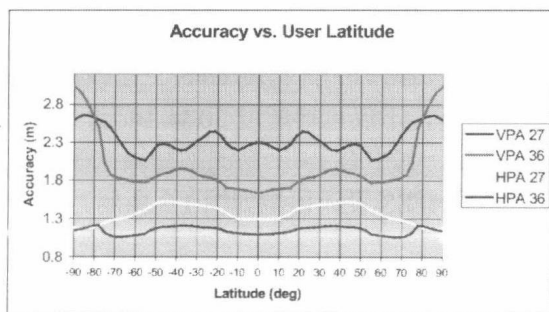


图 1.4 用户定位精度分析

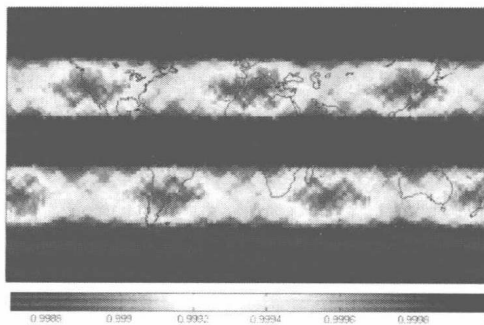


图 1.5 24 颗卫星星座时的可用性完好性

2. Galileo 仿真软件

在欧洲太空局(European Space Agency, ESA, 简称欧空局)的支持下, 德国 VEGA 公司组织设计开发的 Galileo 仿真系统(Galileo System Simulation Facility, GSSF)的主要功能之一是可以对地面任务部分进行测试, 其原始数据生成功能可以仿真地面监测站的观测数据, 为地面试验任务提供数据驱动, 同时为相关算法提供数据支持。GSSF 还将支持 Galileo 系统全生命周期中对系统仿真的需求。

Galileo 是由 ESA/ESTE 负责组建的, 通过仿真模拟 Galileo 系统环境以评估其工作性能。当前的 GSSF 版本(GSSF V2.0)支持 Galileo 系统性能分析和地面试验系统的前期确认。

GSSF 也可通过用户的期望进行模块选择来完成一些简单的仿真, 它具有强大的服务容量仿真能力和高逼真的原始数据生成能力。在 GSSF 建模时, GSSF V2.0 提供了以下两种仿真模式。

(1) 服务容量仿真：适用于低精度模型仿真，用户可根据具体环境及接收机性能进行自主配置仿真模型。

(2) 原始数据生成：适用于高精度模型仿真，可对试验环境高逼真度仿真并以标准格式存储数据以便 Galileo 试验台进一步分析。

GSSF 用户界面如图 1.6 所示。

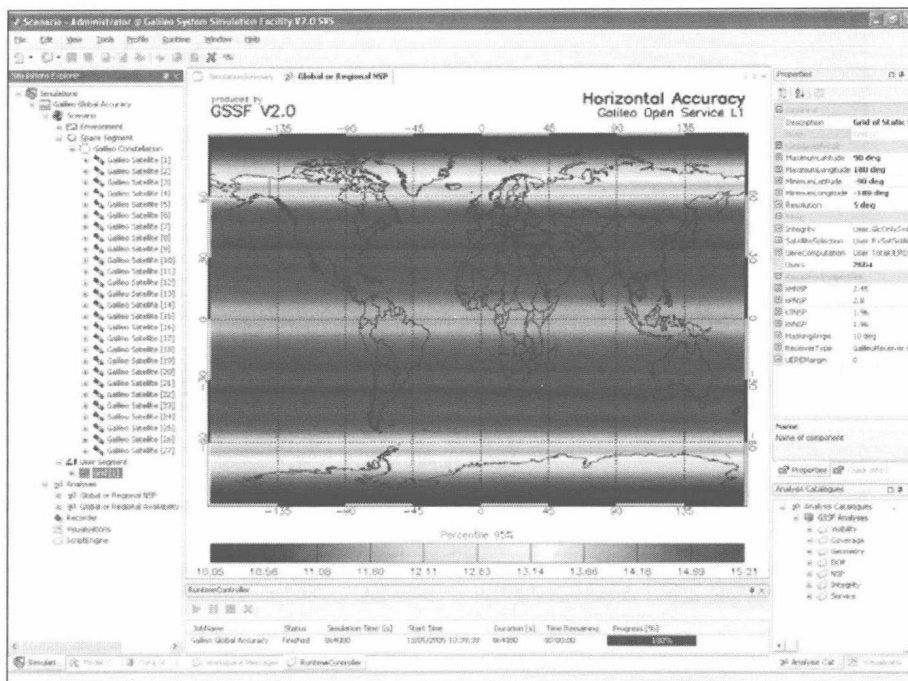


图 1.6 GSSF 用户界面

3. Bernese 软件的仿真功能

Bernese 软件是由瑞士伯尔尼大学天文研究所研发的 GNSS 数据处理软件，在数据处理方面功能十分强大，且具有高精度的模型，能够仿真 GNSS 地面监测站和低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 的原始观测数据。

Bernese 软件中各类高精度的模型支持其能够仿真高逼真度的原始观测数据。其模型主要有以下几种。

(1) 轨道模型：利用变分方程实现轨道积分，给定开普勒六根数和光压模型 9 参数即可得到指定时段内的卫星轨道。

(2) 钟差模型：采用多项式模型，卫星钟差采用 2 阶多项式模型，接收机钟差则采用 5 阶多项式模型。

(3) 对流层模型：提供多种模型，包括 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型、Marini-Mur 模型、Niell 模型等。

(4) 电离层模型：提供两种模型，一种是高精度的 15 阶球谐模型，一种是简易的电子含量模型，即直接输入白天和夜晚的电离层电子总含量，根据时间计算电离层延迟。

(5) 相位中心偏移模型：同时顾及高度角和方位角变化的接收机天线相位中心变化改正模型。