

 **北斗开放实验室**  
BDS/GNSS Open Laboratory

北斗技术与应用丛书

# 卫星导航终端复杂电磁环境 仿真测试系统理论与应用

谭述森 杨俊 明德祥 等 编著



科学出版社

北斗技术与应用丛书

# 卫星导航终端复杂电磁环境 仿真测试系统理论与应用

谭述森 杨俊 明德祥等 编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书紧密结合卫星导航终端在复杂电磁环境下需要具备高安全、高可靠应用的发展趋势,围绕复杂电磁环境下导航终端抗干扰抗欺骗能力测试、试验和评估的最新发展方向,阐述卫星导航系统基本原理以及卫星导航面临的复杂电磁环境,系统总结卫星导航终端测试系统作用意义、基本原理、建设成果和应用现状,着重从总体设计、系统集成、测试计量、运行维护、标准规范、典型案例等方面系统阐述卫星导航复杂电磁环境测试系统的设计、建设和维护等内容。

本书可作为从事卫星导航终端各类测试试验系统设计、计量检测平台建设以及导航终端设计、研制、生产、检测的科技工作者和工程师的工具书与参考资料,也可作为高等院校相关专业教师和研究生教学的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统理论与应用 / 谭述森等编著.  
—北京: 科学出版社, 2018.6  
(北斗技术与应用丛书)  
ISBN 978-7-03-057392-6

I. ①卫… II. ①谭… III. ①卫星导航-电磁环境-终端仿真-测试系统-系统理论 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 093144 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝  
责任印制: 吴兆东 / 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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 465 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 丛书编委会

主编：

谭述森

副主编(按姓氏笔画排序)：

吴美平 吴光辉 杨俊 周建华

赵文军 赵金贤 曹冲

编委(按姓氏笔画排序)：

王礼亮 王永泉 王辉 文援兰

史鹏亮 叶祥平 刘志俭 乔纯捷

向常淦 刘金长 何海波 李峰

李军 李明栋 张华 孟川舒

明德祥 岳亚洲 钟小鹏 胡斌

唐大泉 郭敏 高关根 黄文德

温日红 彭明

本书作者：

谭述森 杨俊 明德祥 王礼亮

钟小鹏 周冬柏

## 丛 书 序

北斗卫星导航系统是我国定位、导航和授时(PNT)的重要基础设施。我国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主研制、自主建设、独立运行北斗卫星导航系统,可实现全球用户全天候、全天时、高精度的PNT服务。我国于20世纪90年代开始自行研制北斗卫星导航系统;2000年底,北斗一号系统建成,使我国成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家;到2012年,建成了覆盖亚太地区的北斗二号区域卫星导航系统;计划到2020年前后,建成覆盖全球的北斗三号全球卫星导航系统,向全球用户提供高精度PNT服务,并在此基础上加快构建稳健可靠的国家综合PNT服务体系。北斗卫星导航系统正与云计算、物联网、大数据,以及高端制造业、先进软件业等进行深度融合,服务智能社会,推动生产方式和发展模式的变革。

国家利益的拓展、经济全球化及海洋强国战略,都要求我国具有独立自主的PNT服务体系。国家利益到哪里,PNT服务就应该到哪里。当前,北斗卫星导航系统已成为高铁和核电之外的第三张国家名片;优先服务国家“一带一路”倡议,全面服务经济社会发展,正在成为北斗卫星导航系统走向世界的主旋律。

2015年10月,习近平主席在党的十八届五中全会上提出“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念。随即,孙家栋院士倡导的北斗领域资源开放共享平台——北斗开放实验室正式挂牌成立。北斗开放实验室秉承“融合、开放、合作、共赢”的发展理念,以“推动北斗应用”为核心使命,以推动数据、仪器、专家和研究成果等资源的开放共享为主要途径,以吸引国际导航领域人才研究北斗、应用北斗、推广北斗为目标,让发展中的北斗系统不仅服务中国,而且惠及“一带一路”沿线国家和地区,并以更精准、更优质、更可靠的服务造福全人类,成为名副其实的“世界的北斗”。

当前,北斗开放实验室携手区域优势单位已在国内先后建成并开通了10余家分实验室,聚集园区、企业、高校等成员单位近100家,覆盖了华东、华南、华中、华北、西南、西北、东北等区域,涵盖无线电检测认证、高精度应用、导航信息安全、测试计量检定、智慧城市应用、车载应用等领域,有力推动了北斗卫星导航系统的研究与产业化,拓展了北斗卫星导航系统的应用,支撑了国家“一带一路”倡议的推进。

为了更好地汇聚资源,创新北斗发展和应用模式,总结北斗卫星导航系统建设成果,北斗开放实验室先后组织出版了《卫星导航信号模拟源理论与技术》《卫星导航终端测试评估技术与应用》《卫星导航系统建模与仿真》《BDSim在卫星导航中的应用》等北斗系列著作,并在行业内引起了良好反响。为进一步加强发挥各分实验室特色优势,北斗开放实验室组织北斗领域资深专家组成编委会,集中编著出版北斗系统在高铁、电力、海洋渔业、智慧城市、车载导航和导航安全等领域的应用系列丛书。通过该丛书的撰写、编辑、出版和发行,旨在进一步梳理北斗应用特色和潜能,推动北斗产业应用、促进国家综合PNT体系建设、普及北斗科学知识以及提升北斗的国际影响力和市场竞争力等。

杨元喜

# 序

时空信息是人类生产生活的最基本信息，在人们日常生活和国民经济建设中，90%以上的信息都与时间、空间相关。卫星导航系统能够为人类提供时间基准和空间坐标，是当今时代最重要的时空基础设施。我国目前已经建成了覆盖亚太地区的北斗二号区域卫星导航系统，并计划到 2020 年前后建成覆盖全球的北斗三号全球卫星导航系统，向全球用户提供高精度 PNT 服务，并在此基础上加快构建稳健可靠的国家综合 PNT 服务体系。

随着北斗卫星导航系统建设和服务能力的提升发展，我国现已形成比较完备的包括基础产品、应用终端、应用系统和运营服务等全产业链应用体系，相关产品已经推广应用到交通运输、海洋渔业、水文监测、气象预报、通信时统、电力调度、救灾减灾等诸多领域。在享受卫星导航带来科技进步的同时，导航安全问题也变得更加现实和紧迫，尤其是广大导航终端面临着复杂的电磁环境，容易受到各种有意或无意的干扰，从而潜伏着很大的危机和隐患。当前，着眼提升导航终端安全性能的各种抗干扰技术不断涌现，如滤波技术、波束形成技术、军码直捕技术以及组合导航技术等，有的已经用于导航终端产品，然而如何科学、准确、快捷地对导航终端抗干扰性能进行测试与评估，是当前导航终端测试领域的一项紧迫课题。

以卫星导航信号模拟源为核心的导航终端测试评估系统，能够在受控实验室环境中产生多种场景下的卫星导航信号对导航终端进行测试和评估，是支撑导航终端研发、测试和定型的关键设备和系统。我国在“十二五”期间设立重大专项，资助建设了多套测试系统和检测中心，极大地促进了卫星导航产业发展。然而，由于面向复杂电磁环境的抗干扰导航终端试验、测试和检定等，具有许多新特点、新要求、新技术，现有的测试系统和检测中心尚无法满足复杂电磁环境下导航终端安全应用相关测试检定需求。

本书依托北斗开放实验室各承建单位，充分发挥专家优势和资源优势，围绕卫星导航抗干扰接收终端的试验、测试和检定需要，总结北斗二号系统建设经验以及各类测试系统应用成果，面向北斗三号及卫星导航未来发展，针对卫星导航复杂电磁环境测试系统建设这一全新课题，开展了深入研究，取得了一系列新的成果。通过将成果编撰成书，希望能对我国卫星导航系统建设和北斗安全产业发展提供一些有益的借鉴。

作者

2018年4月

# 前 言

时代发展到今天，国家利益已经超出传统领土、领海、领空，不断向远洋、两极、太空以及虚拟网络延伸，全球化经济战略需要全球化时空信息保障，传统定位 (positioning) 导航 (navigation) 授时 (timing) 手段已经无法满足经济社会发展需求。卫星导航系统能够在全世界、全天候、全天时提供定位导航授时 (PNT) 服务，是国家的重要基础设施，是保障国家安全、发展现代国防军事应用的重要支撑平台，是国家经济实力、科技实力和综合国力的重要体现。自美国 GPS 建成以来，卫星导航技术在军民领域发挥着越来越重要的作用，出于军事安全以及商业利益的考虑，俄罗斯、欧盟、日本、印度等国家或组织，相继投入巨资发展全球卫星导航系统。我国着眼于国家安全和经济社会发展需要，自主建设北斗卫星导航系统；20 世纪后期，中国开始探索适合国情的卫星导航系统发展道路，并逐步形成了三步走发展战略：2000 年年底，建成北斗一号系统，向中国提供 PNT 服务；2012 年年底，建成北斗二号区域系统，向亚太地区提供 PNT 服务；计划在 2020 年前后，建成北斗三号全球系统，向全球提供 PNT 服务。

伴随着我国北斗卫星导航系统建设热潮，卫星导航技术得到了越来越广泛的应用，卫星导航应用已经在交通运输、测绘、资源勘探等静态定位以及高精度授时、科学研究、武器装备等领域获得了广泛的发展，显示出广阔的产业市场空间和军事应用价值。随着导航设备大量进入各行各业，其应用场景千差万别，随之不断提升的是用户对于卫星导航终端性能的要求。卫星导航测试评估技术能为导航终端的研制、测试、定型提供技术支撑，是当今卫星导航科学重要研究领域之一。卫星导航测试评估技术，能在受控的实验环境中实现对卫星导航信号及其环境条件的完全模拟和控制；能够针对不同类型的终端测试需求，便捷地生成和运行多种不同的场景；能够对导航系统全链路环节提供完全的控制，大大缩短产品研发到产业化的进程，提升企业竞争力。

早在北斗二号系统研制建设阶段，为实现系统级的仿真任务，以及在卫星不在轨条件下完成地面运控系统的联调联试，同时在实验室条件下完成用户终端和监测接收机主要指标的测试任务，国家即已安排北斗专项任务，开展模拟测试系统研制，突破了卫星导航信号源的核心关键技术。“十二五”期间，为了满足各类导航终端的试验、测试和检定需求，以卫星导航模拟源为核心，国家建设了包含测试检定基准系统、行业检测中心、装备试验系统等各种有线/无线终端测试环境。当前，面对各类抗干扰接收终端的测试需求，卫星导航复杂电磁环境测试系统逐步成为导航终端性能评估的新方法、新手段。

不同于卫星导航信号源和传统的测试系统，卫星导航复杂电磁环境测试系统以单星信号输出为基本能力、以接近真实卫星导航系统的导航信号布局和多种干扰信号布局为基本特色，以场景驱动的仿真测试评估为基本手段，体现了卫星导航测试评估的最新发展方向。

本书内容汇聚北斗开放实验发起单位、分实验室建设单位以及相关合作单位的大量工程经验和研究成果，由长期从事北斗导航测试试验相关技术研究、标准制定、产品研发、工程建设等领域专家和科技工作者编著。本书系统总结提炼卫星导航复杂电磁环境测试技术的原



理内涵、发展现状、关键技术及工程成果,全面详细介绍卫星导航复杂电磁环境测试系统的概念、理论、方法和建设与应用,反映了近年来卫星导航测试评估领域最新技术成果以及卫星导航测试系统建设、导航终端检测计量的发展新趋势,是国内首部全面系统介绍卫星导航复杂电磁环境测试系统相关理论及软/硬件体系结构的著作。

全书分三篇,共十章。第一篇分两个章节系统地介绍卫星导航系统概况、卫星导航面临的复杂电磁环境以及卫星导航终端测试系统的发展趋势,是本书的基础篇;第二篇分六个章节从基本原理、总体设计、系统集成、测试计量、运行维护、标准规范等,详细介绍卫星导航复杂电磁环境测试系统的设计、建设、维护的全流程,是本书的技术篇;第三篇分两个章节主要阐述“场景驱动的仿真测试系统”的场景设计思想,并给出卫星导航复杂电磁环境测试系统的典型应用案例,便于读者加深对卫星导航复杂电磁环境测试系统的理解和升华,是本书的扩展篇。

本书结合北斗卫星导航系统建设成果和发展趋势,紧密围绕卫星导航复杂电磁环境测试系统的建设与应用,具有以下特点。

### 1. 突出北斗特色

本书围绕北斗卫星导航系统集成基本导航、定位报告和星基增强三种服务为一体的突出特色,全面介绍北斗卫星导航系统基本原理、卫星导航面临的复杂电磁环境,系统阐述北斗导航测试系统建设成果以及各类各级检测平台建设应用现状,总结归纳北斗导航系统建设应用各类标准规范。

### 2. 瞄准发展趋势

本书结合卫星导航终端在复杂电磁环境下需要具备高安全、高可靠应用的发展趋势,紧密围绕复杂电磁环境下导航终端抗干扰抗欺骗功能性能指标测试、试验和评估的最新发展方向,全面系统阐述卫星导航复杂电磁环境测试系统的设计、建设、维护的全流程,以及复杂电磁环境下“场景驱动的仿真测试系统”设计思想与典型应用案例。

### 3. 侧重工程应用

本书作者均为长期承担和参与北斗卫星导航系统建设、论证以及北斗用户终端测试系统与检测平台建设、规划、运营、维护的一线科研工作者,内容汇集我国北斗导航系统建设应用的优秀成果以及国内北斗领域三百余家科研院所、高等院校和国防工业部门各类测试试验系统最新工程经验,紧密结合导航终端在复杂电磁环境下应用的新问题、新趋势和新需求,系统阐述卫星导航复杂电磁环境测试系统的设计、集成、计量、维护以及标准规范等工程建设应用相关内容。

### 4. 围绕体系建设

本书在简要介绍卫星导航系统基本原理、基础知识以及导航终端面临的复杂电磁环境及其应对措施基础上,从体系层面总结归纳卫星导航终端测试系统作用意义、基本原理以及卫星导航终端基准测试系统、标准检测系统和测试试验系统的建设成果和应用现状,并从总体设计、系统集成、测试计量、运行维护、标准规范、典型案例等方面系统阐述卫星导航复杂电磁环境测试系统的设计、建设和维护等内容。

在本书的策划编写过程中,我国北斗卫星导航系统副总设计师谭述森院士对本书给予策划指导,并抽出宝贵时间对本书进行了审阅;国防科技大学杨俊教授、北斗综合实验室王礼亮高级工程师、北斗(北京)分实验室刘志俭高级工程师、北斗(长沙)分实验室明德祥高级工



程师和钟小鹏高级工程师等参与了全书策划。王礼亮、王辉、刘志俭、唐大泉、魏立栋等参与了第 1、2 章的编写，杨俊、明德祥、刘志俭、钟小鹏、魏立栋、周冬柏等参与了第 3~5 章的编写，刘春阳、乔纯捷、秦然等参与了第 6 章的编写，钟小鹏、常富国、何蓉、李刚等参与了第 7 章的编写，王礼亮、唐大泉、张明等参与了第 8 章的编写，明德祥、史鹏亮、王辉、左启耀、文莹莹等参与了第 9、10 章的编写。杨俊、王礼亮、刘志俭、明德祥、钟小鹏、魏立栋、陈振宇、王辉等进行了全书的统稿及校对工作，北斗二号地面运控系统周建华总工程师、北斗三号应用验证系统赵文军总工程师、北斗三号地面运控系统赵金贤副总工程师以及国家高技术研究发展计划(“863”计划)专家、环球新时空信息技术研究院曹冲研究员对本书进行了审阅指导。

由此，衷心感谢为本书编著付出努力的各级技术人员及管理人员，感谢给予指导的有关专家及领导。

本书部分内容参考了国内外同行专家学者的最新研究成果，在此向他们致以诚挚谢意。在本书策划编写过程中，得到相关部门和同行专家的关怀和支持，特别是得到北斗副总设计师谭述森院士亲自关心和指导，在百忙之中对本书进行了审阅，以及北斗副总设计师杨元喜院士为丛书亲自写序，在此表示衷心感谢和崇高敬意！

由于卫星导航测试评估领域涉及多门学科前沿，其理论与技术仍在不断发展中，加之作者水平和经验有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2018 年 4 月

# 目 录

## 第一篇

第 1 章 卫星导航系统概述	9
1.1 卫星导航系统发展概况	9
1.1.1 中国北斗卫星导航系统	9
1.1.2 美国 GPS 及其现代化	11
1.1.3 俄罗斯 GLONASS 及其现代化	11
1.1.4 欧洲 Galileo 系统	12
1.1.5 其他卫星导航系统及增强系统	12
1.2 卫星导航系统组成及定位原理	13
1.2.1 卫星导航系统组成	13
1.2.2 卫星导航系统定位原理	15
1.3 卫星导航终端的工作原理	20
1.3.1 捕获	21
1.3.2 跟踪	25
1.3.3 电文解调	27
1.3.4 定位解算	28
1.3.5 定位结果的完好性判别	29
1.4 卫星导航系统信号体制	30
1.4.1 频段选择和信号频率	30
1.4.2 多址接入方式	32
1.4.3 信号调制方式	33
1.4.4 多路复用技术	36
1.4.5 测距码设计	38
1.4.6 导航电文编排	41
1.5 卫星导航系统产业应用	43
1.5.1 卫星导航应用领域	43
1.5.2 卫星导航产业发展	44
参考文献	45
第 2 章 卫星导航面临的复杂电磁环境	48
2.1 卫星导航系统脆弱性分析	48
2.1.1 系统相关的脆弱性	48

2.1.2	传播通道相关的脆弱性 .....	49
2.1.3	电磁干扰相关的脆弱性 .....	50
2.2	复杂电磁环境的组成要素 .....	52
2.2.1	宽带干扰 .....	53
2.2.2	窄带干扰 .....	55
2.2.3	脉冲干扰 .....	57
2.2.4	多径干扰 .....	58
2.2.5	欺骗干扰 .....	58
2.3	电磁环境对卫星导航终端的影响分析 .....	59
2.3.1	宽带干扰对卫星导航终端性能影响分析 .....	59
2.3.2	窄带干扰对卫星导航终端性能影响分析 .....	60
2.3.3	脉冲干扰对卫星导航终端性能影响分析 .....	64
2.3.4	多径对卫星导航终端性能影响分析 .....	66
2.3.5	欺骗干扰对卫星导航终端性能影响分析 .....	69
2.4	卫星导航终端抗干扰技术 .....	70
2.4.1	组合导航抗干扰技术 .....	71
2.4.2	军码直接捕获抗干扰技术 .....	71
2.4.3	滤波抗干扰技术 .....	72
2.4.4	波束形成抗干扰技术 .....	74
参考文献 .....		75
<b>第3章 卫星导航终端测试系统概述</b> .....		77
3.1	卫星导航终端测试技术 .....	77
3.2	终端测试系统作用意义 .....	78
3.2.1	能够快速准确经济地测试和评价被测终端产品 .....	78
3.2.2	有利于构建我国自主的测试指标体系 .....	79
3.2.3	有助于促进我国卫星导航产业推广 .....	79
3.3	终端测试系统工作原理 .....	80
3.3.1	需求分解 .....	80
3.3.2	环境构建 .....	81
3.3.3	测试评估 .....	82
3.4	终端测试系统功能及主要测试项目 .....	83
3.5	终端测试系统应用现状 .....	84
3.5.1	基准测试系统 .....	85
3.5.2	标准检测系统 .....	86
3.5.3	测试试验系统 .....	90
3.6	复杂电磁环境测试系统 .....	92
3.6.1	基于多模拟器组合的构建模式 .....	97
3.6.2	基于单星输出模拟器的构建模式 .....	97

参考文献 .....	98
------------	----

## 第二篇

第 4 章 卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统总体设计 .....	101
4.1 总体建设目标 .....	101
4.1.1 单星输出的导航信号仿真能力 .....	102
4.1.2 仿真多种干扰信号的能力 .....	102
4.1.3 仿真多类载体轨迹的能力 .....	103
4.1.4 接近真实的星座和干扰天线布局 .....	103
4.1.5 纯净的暗室环境 .....	104
4.1.6 自动化测试评估的能力 .....	104
4.2 总体设计理念 .....	105
4.3 总体设计方案 .....	106
4.3.1 设计原则 .....	106
4.3.2 系统架构 .....	107
4.3.3 系统组成 .....	109
4.3.4 工作原理 .....	111
4.3.5 关键技术 .....	112
4.4 分系统建设方案 .....	119
4.4.1 导航信号分系统 .....	119
4.4.2 干扰信号分系统 .....	132
4.4.3 测试环境分系统 .....	136
4.4.4 监测自校分系统 .....	143
4.4.5 综合控制分系统 .....	147
参考文献 .....	151
第 5 章 卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统集成 .....	153
5.1 综合布局设计 .....	153
5.1.1 系统布局 .....	153
5.1.2 天线布局 .....	155
5.1.3 结构方案 .....	160
5.2 关键设备选型 .....	162
5.2.1 导航信号模拟源选型 .....	162
5.2.2 干扰信号模拟源选型 .....	164
5.2.3 转台选型 .....	165
5.2.4 采集回放仪选型 .....	166
5.3 微波暗室工程 .....	166

5.3.1	屏蔽工程	166
5.3.2	吸波工程	170
5.4	布局布线工程	174
5.4.1	设备结构设计	174
5.4.2	布线原则和布线工程	175
5.4.3	工程实施的注意事项	177
5.4.4	综合布局布线	179
5.5	综合控制系统	180
5.5.1	管理功能集成	181
5.5.2	评估功能集成	187
5.5.3	人机交互功能集成	188
5.6	系统交付验收	190
5.6.1	信号源验收与性能检测	191
5.6.2	暗室工程验收与性能检测	194
<b>第 6 章</b>	<b>卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统测试计量</b>	<b>195</b>
6.1	概述	195
6.2	复杂电磁环境测试系统指标体系	196
6.3	标校使用的通用仪器	197
6.4	单机设备的校准计量	198
6.4.1	模拟源关键指标测量方法	199
6.4.2	干扰源关键指标测量方法	204
6.4.3	采集回放仪关键指标测量方法	205
6.4.4	入站接收机关键指标测量方法	206
6.4.5	转台关键指标测量方法	208
6.5	微波暗室性能检测	209
6.5.1	暗室屏蔽性能检测	209
6.5.2	暗室静区性能检测	211
6.5.3	静区其他性能测试方法	216
6.6	系统链路的校准计量	216
6.6.1	系统功率标定	217
6.6.2	系统时延标定	220
6.7	卫星导航信号模拟源溯源技术	223
6.7.1	卫星导航设备溯源	223
6.7.2	基于 MAP 的导航信号模拟源溯源方案	224
6.7.3	导航信号模拟源关键指标溯源实现	228
6.8	测试系统性能和功能验证	233
6.8.1	性能核检工作模式	233
6.8.2	用户终端工作模式	233

6.9 导航产品质量保证体系建设的思考与探讨	234
6.9.1 北斗导航终端产品检测认证方面存在的差距	234
6.9.2 建立新型检测认证标校体系的思路	235
6.9.3 北斗导航终端质量保证体系建设的内容	235
参考文献	236
<b>第7章 卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统运行维护</b>	<b>237</b>
7.1 可维护性设计	237
7.1.1 自检功能	237
7.1.2 备份功能	238
7.1.3 实时监测设计	238
7.1.4 快速修复设计	238
7.2 运行维护内容	238
7.2.1 日常监测维护	239
7.2.2 故障诊断维护	239
7.2.3 扩展升级维护	240
7.2.4 系统标定维护	240
7.3 运行维护策略	242
7.4 运行维护流程	242
参考文献	244

### 第三篇

<b>第8章 卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统标准规范</b>	<b>247</b>
8.1 卫星导航标准体系分析	247
8.1.1 国外体系	247
8.1.2 国内体系	250
8.2 测试系统标准体系分析	254
8.3 模拟器相关标准规范	254
8.3.1 北斗用户设备检定规程(CHB5.6-2009)	254
8.3.2 北斗/全球卫星导航系统(GNSS)信号模拟器性能要求与测试方法(BD 420012-2015)	256
8.3.3 全球导航卫星系统(GNSS)信号模拟器校准规范(JJF 1471-2014)	262
8.4 干扰源相关标准规范	263
8.5 采集回放仪相关标准规范	267
8.6 微波暗室相关标准规范	268
8.6.1 高性能屏蔽室屏蔽效能的测量方法(GB/T12190-2006)	268
8.6.2 雷达吸波材料反射率测试方法(GJB 2038-94)	269
8.6.3 射频吸波材料吸波性能测试方法(GJB 5239-2004)	269

8.6.4	电磁波暗室工程技术规范(GB50826-2012)	270
8.6.5	军用电子设备方舱屏蔽效能测试方法(GJB6785-2009)	271
8.6.6	微波暗室性能测试方法(GJB6780-2009)	271
	参考文献	272
<b>第9章</b>	<b>卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统场景技术</b>	<b>274</b>
9.1	场景概述	274
9.1.1	场景的要素	275
9.1.2	场景的分类	276
9.1.3	场景的设计原则	277
9.2	场景构建	278
9.3	场景管理	281
9.3.1	管理场景文档	281
9.3.2	完善典型场景集	282
9.3.3	场景维护升级	282
9.4	典型应用分析	283
9.4.1	仿真场景	283
9.4.2	实测场景	283
9.4.3	采集回放场景	284
	参考文献	285
<b>第10章</b>	<b>卫星导航终端复杂电磁环境仿真测试系统典型案例</b>	<b>286</b>
10.1	精密进近着陆测试系统	286
10.1.1	系统概述	286
10.1.2	系统组成	286
10.1.3	关键设备性能指标	287
10.1.4	系统具备能力	288
10.2	调零天线抗干扰测试系统	289
10.2.1	系统概述	289
10.2.2	系统组成	289
10.2.3	关键设备性能指标	290
10.2.4	系统具备能力	291
10.2.5	系统现场图	292
10.3	波束成形抗干扰测试系统	292
10.3.1	系统概述	292
10.3.2	系统组成	293
10.3.3	关键设备性能指标	293
10.3.4	系统具备能力	294
10.3.5	系统现场图	294
10.4	小结	295





# 绪 论

卫星导航系统是当今世界信息技术发展水平的集中体现，展示了一个国家在军事、科技和经济领域的实力，是衡量一个国家综合国力的重要标志<sup>[1,2]</sup>。由于卫星导航系统在当今和未来社会发展中发挥的基础性关键性作用，世界主要航天大国和集团不惜巨资发展全球导航卫星系统，目前已经形成了美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、中国北斗系统 BDS 和欧盟 Galileo 四大全球导航卫星系统的格局，同时，日本的准天顶卫星导航系统、印度的卫星导航系统也在加紧布局。

进入 21 世纪，卫星导航在武器装备、科学研究、社会服务等领域获得越来越广泛的发展和应 用，现今的全球卫星导航应用产业已经成为全球高新技术产业。在空间技术领域，它和阿波罗登月、航天飞机（或国际空间站）被称为人类航天事业的三大成就<sup>[1]</sup>；就高新科技应用产业来说，它和蜂窝移动通信、互联网，一道成为当今发展最快的三大信息产业。卫星导航应用已从最初的军用导航定位服务深入到许多专业应用领域，并引起了众多领域的巨大变革。尤其在民用领域，当前已广泛应用于智慧城市、精密农业、GIS 技术、电网监控、林渔业、物联网、地震监测、地质调查、海洋测绘及海洋环境监测等众多行业及其他对定位、测速和授时有需求的领域。

导航终端作为广大用户与卫星导航系统间的连接点，其准确性、稳定性、可靠性及安全性的优劣直接决定了用户对卫星导航系统体验的好坏，进而影响相关产业的发展。以导航信号模拟源为核心的卫星导航终端测试系统，可广泛应用于导航终端的测试、维护、评估和检定，对卫星导航系统建设及产业化应用具有重要意义，其发展伴随着卫星导航系统的发展而发展，并随着卫星导航系统应用的拓展而不断深入。以 BDS 为例，BDS 接收机测试大致经历了四个开发阶段<sup>[1,3]</sup>：①初始开发阶段，利用单信道测试信号生成器进行捕获和跟踪测试；②核心开发阶段，利用 BDS 空间信号或星座模拟器进行多信道测试；③整机开发阶段，利用软件环境（原始数据生成器，包括生成全部导航或差分电文的能力）对天线到后端方案的整个接收机性能测试；④真实环境测试阶段，从天线到后端方案的整个接收机环节的测试。

## 1. 卫星导航终端测试系统的分类

现有的卫星导航终端测试系统大体有以下三类，如图 0-1 所示。

(1) 纯数学仿真测试系统。该系统通过建立复杂的数学模型，集成了空间段、地面段和环境段全系统的仿真，实现了轨道、钟差、观测、定位以及导航服务性能等导航业务数据的协同处理，可对卫星导航系统的服务性能、监测接收机可见性以及用户的定位精度进行分析

评估,可生成仿真时段内空间段、地面段和用户段的各类数据。由于需要对全系统进行数学建模,必然存在逼真度不够高的缺陷,但同时由于没有复杂硬件设备,也具有成本低的优势。

数学仿真	射频注入式仿真	射频辐射式仿真	
		内场辐射式	外场辐射式
			
成本低	逼真度较高	逼真度高	逼真度高
逼真度低	灵活度高	保密性好	成本巨大
建模复杂	欠缺天线电磁辐射收发过程仿真	可重复性好	保密性差
		系统复杂	可重复性差

图 0-1 卫星导航终端测试系统基本分类

(2) 射频注入式测试系统。注入式仿真是一种半实物仿真,模拟产生真实的信号并注入实际的系统中,产生所模拟场景下接收终端所面临的卫星信号。该系统具有试验过程和环境可控、可仿真外场试验受各种客观条件限制无法实施的试验性能,重复性好,能获得比较全面的试验数据,具有逼真度和灵活度较高的优势,但由于将仿真的射频信号不经天线辐射而直接通过电缆送入被测设备,欠缺天线电磁辐射收发过程的仿真,因此,不能对接收终端天线系统进行测试,具有一定的局限性。

(3) 射频辐射式测试系统。该系统是指仿真信号通过向空中辐射射频信号来检验被测终端。这种方式可检验包括天线在内的整机性能,能较为逼真地复现真实的卫星信号。对于系统级设备的调试与研制极为有用,但由于采用辐射信号,需在微波暗室或外场条件下使用。在暗室使用时,称为内场辐射式测试系统,具有保密性好和可重复性好的优点,但是暗室系统的构建比较复杂;在外场使用时,称为外场辐射式测试系统,受外场条件绝对开放以及环境复杂的影响,系统保密性和可重复性均不佳,且构建野外测试场,也存在成本高昂的劣势。

目前,最常用的是内场辐射式测试系统,它能利用卫星导航信号模拟器仿真真实的导航卫星信号,通过设置不同的测试参数和场景,为接收机的研制和测试提供一个稳定、准确、可靠和易用的测试环境。

## 2. 我国卫星导航终端测试系统建设现状及问题

我国从卫星导航系统工程的技术总体,到卫星、运控、应用、测控以至各接收机研究机构和研制单位陆续安排了一些不同目的、不同层次的仿真与测试平台或辅助设计的软硬件工具建设,服务于系统的设计研制和性能测试试验。为了实现北斗二号卫星导航系统(从空间段到地面运控段)系统级的仿真任务和卫星不在轨的条件下,完成地面运控系统的联调与测试,并作为测试平台,在实验室条件下完成用户终端和监测接收机主要指标的测试任务,在北斗二号地面运控系统中就已安排了模拟测试系统研制任务。在此基础上,继续研发了用于各型谱用户设备功能和性能测试的北斗二号用户设备测试系统,通过模拟北斗二号的工作环境,为北斗二号用户设备的研制开发、产品生产、采购验收提供验证与测试,同时具备为