

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107039

基于 BDSim 的卫星导航系统级测试 及地面操作人员培训方法

黄文德^{1,3} 王芳¹ 刘沉² 张利云³ 李靖³ 康娟³(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室 北京 100081; 2.北京卫星导航中心 北京 100094;
3.广西科学院北斗创新应用研究中心 南宁 530007)

摘要: 全球卫星导航系统是一个巨大、复杂的系统。如果直接在真实环境中进行试验验证和人员培训,除了耗费巨大的系统资源外,可能还会存在巨大的风险。通过建立卫星导航系统高保真度的空间段、地面段和用户段模型,开发系统级功能和性能评估算法,并实现由 ICD 文件定义的系统间接口仿真,研制了一款支持“北斗三号”的全球卫星导航系统级仿真与分析软件—BDSim。本文重点阐述 BDSim 作为系统级测试仿真平台用于系统测试与评估以及地面操作人员培训的方法。首先,提出卫星导航高保真度模型体系的构建方法,给出 BDSim 的模型体系;然后,针对“北斗三号”分步实施和阶梯式组网的特点,提出了天地一体“虚-实结合”的系统级测试与评估方法;最后,针对“北斗三号”地面段高复杂和高精度的特点,提出了基于 BDSim 高保真度数据驱动真实系统的沉浸式人员培训与考核方法。相关方法均在工程实践中得到有效应用,结果表明,所提出的方法可以为卫星导航系统各分系统的联调联试、系统级的功能和性能测试、地面操作人员的培训与考核提供技术支持,对“北斗三号”相关工程建设具有参考意义。

关键词: 卫星导航;系统级测试;人员培训;BDSim;高保真度;模型体系

中图分类号: V11 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.99

BDSim-A GNSS simulation tool for system-level tests and OCS operators' training

Huang Wende^{1,3} Wang Fang¹ Liu Chen² Zhang Liyun³ Li Jing³ Kang Juan³(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;
3. BeiDou Innovation and Application Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: Global satellite navigation system is a huge and complex system. If the test verification and ground operators' training are carried out directly in the real environment, there may be a huge risk in addition to the huge system resources. By establishing the high-fidelity model of space segment, ground segment and user segment of the satellite navigation system, developing the system-level function and performance evaluation algorithm, and realizing the system indirect port simulation defined by ICD file, developing a global satellite navigation system level simulation and analysis software to support “BeiDou III”—BDSim. This paper focuses on BDSim as a system-level test simulation platform for system testing and evaluation and ground operator training. Firstly, the method of constructing satellite navigation high fidelity model system is proposed, and the model system of BDSim is given. Then, according to the characteristics of “BeiDou III” step-by-step implementation and stepwise networking, the system level test and evaluation method of integrating heaven and earth with “virtual and real integration” is proposed. Finally, according to the characteristics of high complexity and high accuracy of “BeiDou III” ground segment, an immersion operators' training and assessment method based on BDSim high-fidelity model system and system real data drive is proposed. All relevant methods have been effectively applied in engineering practices. The results show that the methods proposed can provide technical support for the joint debugging test of each subsystem of the satellite navigation system, the functional and performance test of the system level, and the training and assessment of ground operators, which is of reference significance for the construction of “BeiDou III” related projects.

Keywords: satellite navigation; system level testing; operators training; BDSim; high fidelity; model system

0 引言

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。80 年代中期, 美国 Rockwell 公司建立了一套星地回路仿真系统, 以

收稿日期: 2021-06-24

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 II F 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。

卫星导航信号的准确性、完整性和可用性, 在很大程度上是训练有素的地面操作人员利用可靠的地面控制系统管理卫星星座的结果。今天, 全球定位系统内的一个风险领域是持续依赖运营资产进行某些形式的操作员培训和新软件测试。如果在这些训练或测试期间引入错误或异常, 则对卫星操作的影响可能是灾难性的。在 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^[1-3], 即 HFSS (high fidelity satellite simulator), 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/IIA 和 Block IIR 卫星, 也包括 4 个注入站和 20 个监测站。通过 HFSS 模拟器, 操作人员可以在离线逼真、无惩罚的环境中熟悉 GPS 操作和新功能。此外, 开发人员可以在交付前进行全面的测试控制系统升级, 而无需使用任何操作资源。借鉴 GPS 的成功经验, 我们研制了一款支持“北斗二号”的全球卫星导航系统级仿真与分析软件—BDSim^[4-5], 研究了基于 BDSim 的卫星导航系统级测试及地面操作人员培训方法。本文主要阐述基于 BDSim 的天地一体“虚实结合”^[6-8]的系统级测试与评估方法, 以及基于 BDSim 高保真度数据驱动真实系统^[9-10]的沉浸式人员培训与考核方法, 并给出 BDSim 软件在相关工程中应用的结果。

1 卫星导航系统级测试与人员培训需求

1.1 卫星导航系统级测试需求

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^[11-13]。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。

全球卫星导航系统地面段数据处理是一个复杂的过程, 每一项业务处理功能的测试和验证都是一个从单元到系统的循序渐进的过程, 期间需要各种不同类型的数据作为系统输入, 然而由于在卫星导航系统设计研制阶段缺少实测数据, 在运行阶段实测数据又包含各种复杂的误差, 不便于主控站业务处理功能的测试和验证。特别是当对某项功能指标进行测试, 尤其需要只针对该项指标测试的观测数据作为系统的激励输入时, 实测数据难以满足需求。在这种情况下, 就迫切需要一种理想的观测数据, 以便对主控站业务处理功能进行测试和评估。

1.2 卫星导航地面操作人员培训需求

通过地面段主控站 (MCS) 控制导航卫星, 需要定期为执行该任务的操作人员安排训练课程。目前, 大多数培训课程都主要以“纸质培训”为主。这种训练模式无法充分模拟给卫星发送指令的影响, 也没有办法可以将异常引入培训体系中。因此, 传统的培训与考核急需改变, 主要体现在如下两种需求。

1) 培训与考核对高保真环境的需求

培训的目的是为了让操作人员能够更快、更熟练地使用地面操作系统, 提高他们的工作效率, 减小甚至杜绝出错几率。因此, 对于操作人员的培训与考核最好是在真实环境下进行, 以便他们能够在上岗时不会因为操作环境的改变而产生操作失误, 给系统造成不可估量的损失^[14]。但系统开通运行后, 由于连续运行不间断的要求, 系统所属设备技术状态要求固化, 技术参数的调整等技术状态变更需严格按照操作规程和相关规定执行, 客观上不允许对在线系统设备的技术状态进行随意调整和模拟操作。因此, 培训与考核对高保真操作环境提出了需求, 高保真操作环境既保证了操作人员的对操作环境一致性的需求, 又避免了由于操作失误产生的巨大风险。

2) 培训与考核故障或异常情况的需求

培训与考核的目的主要是测试学员在实际系统操作时对故障或异常情况的应急处理能力, 而地面运控系统是一个庞大且复杂的多学科融合大系统, 就对培训与考核的故障与异常提出更高的要求。一方面, 故障或异常需要区分为设备故障和数据异常; 此外, 故障或异常能够在训练过程中实时加入, 并可以实现手动添加和随机添加两种方式, 用于测试对指定故障异常的处理能力和应急处理能力, 最后, 对于故障和异常处理的结果进行自动评估, 输出故障和异常处理的统计报表。

高保真仿真系统将极大地提高培训操作人员的能力。它还将有助于解决没有既定处理程序的问题。例如, 如果卫星上出现问题, 可能存在各种用于修复它的建议解决方案, 但是给定解决方案的有效性和连带效应可能是未知的。高保真仿真系统将产生数据以帮助选择最佳解决方案。

2 BDSim 软件及其模型体系

2.1 BDSim 软件

测控与导航技术国家地方联合工程中心研究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 5 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: 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,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。BDSim 软件的主界面如图 1 所示。

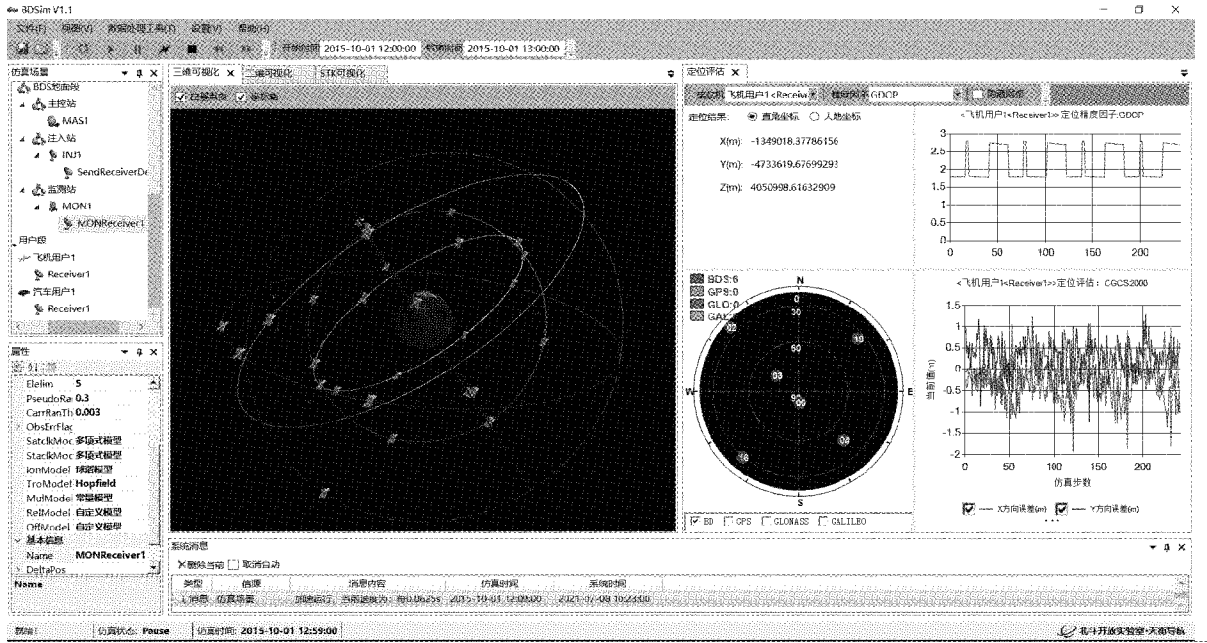


图 1 BDSim 主界面

BDSim 软件主要包含高保真仿真模块、仿真场景及模型参数配置模块、数据导入导出等,模块结构如图 2 所示。BDSim 软件高保真仿真模块利用系统建模与仿真技术建立高精度的全球卫星导航系统空间段、地面段、用户段以及环境段(电离层、对流层等)仿真模型^[15],并实现由 ICD 文件定义的系统间接口仿真,是 BDSim 能够真实反映卫星导航系统工作原理及运行机制的关键。数据分析与评估模块主要针对系统级的功能和性能,开发评估及分析算法,为卫星导航系统的测试与评估提供有力支撑。BDSim 软件能够仿真生成全球卫星导航系统空间段、地面段、用户段以及环境段的各类数据,支持在线查看以及导出为 Rinex 格式或自定义格式;同时支持卫星轨道数据、观测数据、误差数据等各类数据的精度评估,以及定位精度、DOP 值等系统级功能和性能的评估分析。BDSim 软件的建设是一个迭代增量的开发过程,当前版本除支持北斗二号、GPS、GLONASS、Galileo 4 个卫星导航系统的仿真和分析外,新增了“北斗三号”的数据仿真模型和功能/性能评估分析模型,支持“北斗三号”的全球卫星导航系统级仿真与分析。

2.2 BDSim 高保真度模型体系构建方法

卫星导航系统的复杂性、评估项的多层次性及评估结果的有效性要求导致卫星导航系统仿真模型的复杂性、多样性,并对仿真模型的逼真度提出了不同的需求。为了描述卫星导航系统数学模型体系,BDSim 建立了如下描述方法:

$$S = \langle F, M, R \rangle \quad (1)$$

其中, F 为数学模型体系的功能,体现了数学模型体

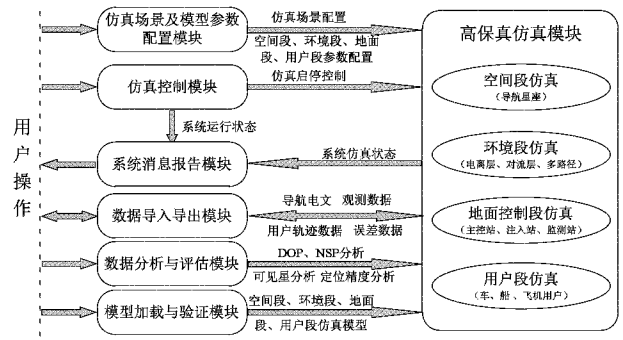


图 2 BDSim 软件模块结构

系满足的需求; R 为数学模型体系的构建准则,如同一支的数学模型功能一致;数学模型的颗粒度层级关系与实际卫星导航系统一致;数学模型的逼真度与数学模型体系的功能一致。 M 是组成数学模型体系的个体。卫星导航系统的数学模型种类繁多、数量大,然而它们具有如下共性,形成数学模型的组成要素:

$$M = \langle MP, MR \rangle \quad (2)$$

其中, MR 为数学模型的约束准则,主要为数学模型体系的功能对数学模型的逼真度的约束; MP 为数学模型的属性,指数学模型具有的全部有效特征,表示如下:

$$MP = \langle \text{function, granularity, fidelity} \rangle \quad (3)$$

其中, function 为数学模型的功能,说明该数学模型是对卫星导航系统中实体/功能的抽象简化还是对实体/功能的操作的抽象简化或是对卫星导航系统中某类数学模型进行操作的抽象简化。 granularity 为数学模型的颗粒

度,该属性是根据卫星导航系统的组成特点提取的,数学模型的颗粒度主要指数学模型的分辨率。颗粒度小的数学模型分辨率大,描述低层次物理实体或系统的细节和具体行为。数学模型的颗粒度越小,分辨率越高,对问题的描述就越详细。fidelity 为数学模型的逼真度,是指数学模

型对仿真对象整体或某个状态/行为描述的忠实程度。

基于上述方法,BDSim 建立了 GNSS 完整的模型体系,如图 3 所示。通过模拟整个 GNSS 的信息流和运行流程,可以作为 GNSS 系统级的测试与评估工具,用于系统设计、体制论证、关键指标和算法的验证等。

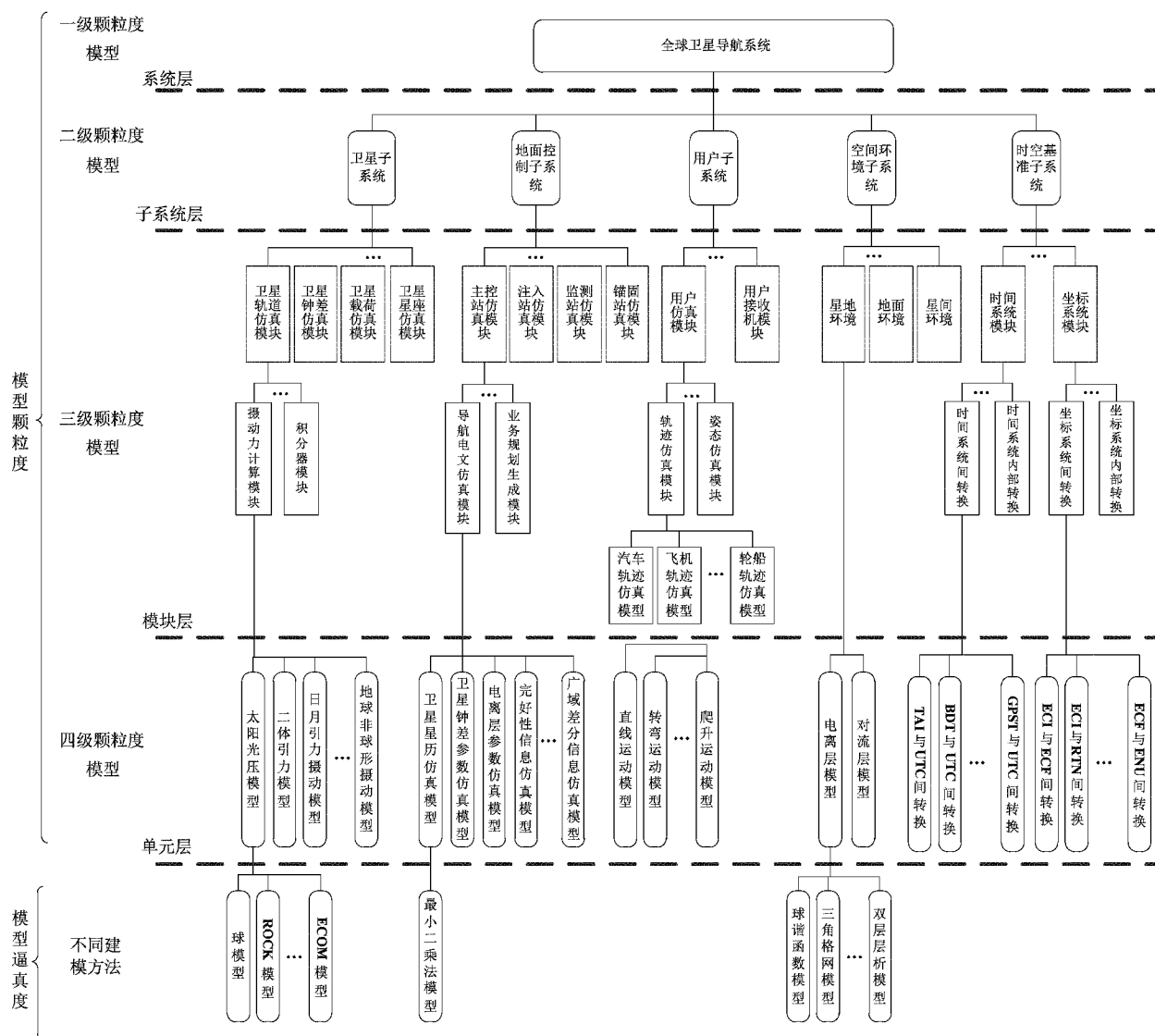


图 3 BDSim 的数学模型体系

3 基于 BDSim 的卫星导航系统级测试

3.1 “虚实结合”的测试模式

在“北斗三号”系统全球组网完成之前,以少量实际在轨卫星作为硬件基础,以 BDSim 软件平台为软件基础,构建一个天地一体“虚-实结合”的系统级测试与评估环境。通过地面站模拟与在轨卫星具有相同功能的卫星(物理虚星),物理虚星与在轨卫星之间的测量与通信链路构成物理星间链路;以在轨卫星为参考和标准,通过 BDSim 模拟其他未在轨的卫星(仿真虚星),仿真虚星之间的测量与通

信链路构成虚拟星间链路;然后,将虚拟星间链路(虚)和物理星间链路(实)集成,组成整网运行的卫星导航系统。随后,可利用“虚-实结合”的整网卫星系统进行地面运控系统、星间链路等系统级项目的测试和评估。基于 BDSim 的虚实结合系统级测试场景如图 4 所示。

它通过“虚”仿真模型解决了部分系统不全的问题,又通过与实物相连的方法解决了模型的实时性问题,并以此构建了一个闭环试验环境,用于有效地评估和分析待测实物。

3.2 评估方法

通过实物试验技术与仿真试验技术相结合的方法构

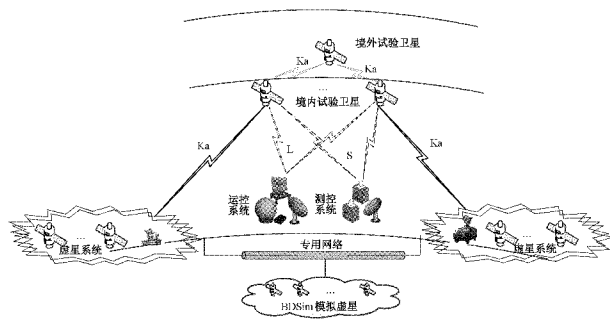


图 4 基于 BDSim 的虚实结合系统级测试场景

建立一个整网的运行环境,复现整个 GNSS 运行处理流程,完成对 GNSS 星间链路组网、地面运控业务处理技术等系统级关键技术的功能及性能的试验验证。该方法在 GNSS 星间链路论证阶段、地面运控业务处理建设阶段不仅可以充分测试在轨卫星的功能和性能,同时也充分挖掘了系统不全时地面试验的验证能力,能够在试验阶段及时发现星间链路、地面处理机制等方面的设计缺陷,为及时改进或优化系统建设方案提供试验依据。

利用 BDSim 软件与实际在轨卫星、地面站构建“虚-实结合”的整网卫星系统开展系统级测试评估的方法如图 5 所示。

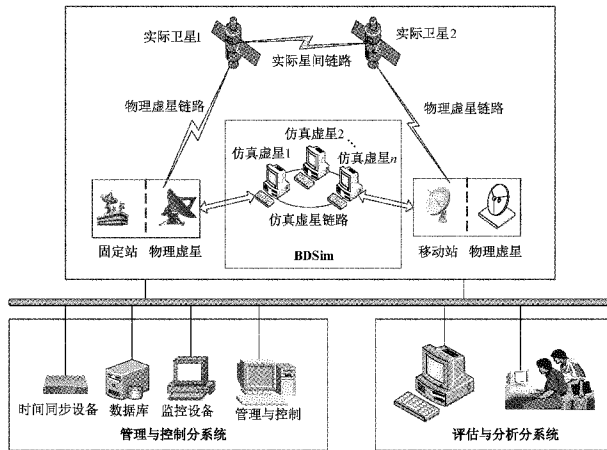


图 5 基于 BDSim 的虚实结合地面试验验证系统

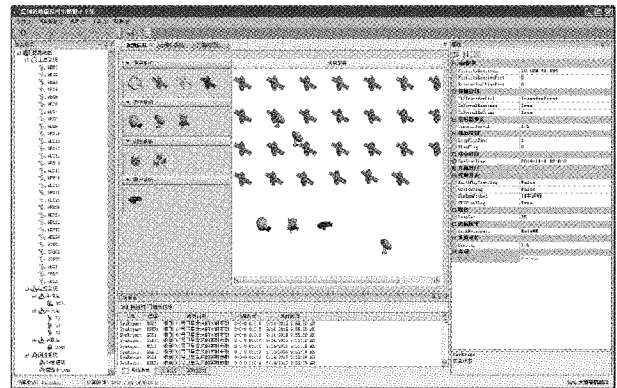
具体步骤如下:

步骤 1:根据实际在轨卫星轨道和地面站布局,配置试验场景,如图 6 所示。计算地面站与在轨卫星的可见性,以确定试验时间区间。

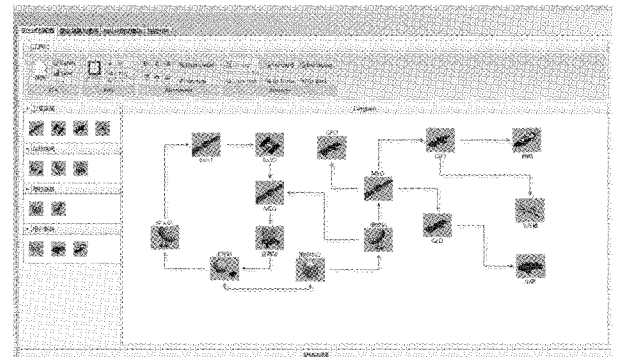
步骤 2:根据实际在轨卫星及 GNSS 星座设计方案生成所有卫星试验时间区间内的轨道和钟差数据。

步骤 3:根据实际在轨卫星与未在轨卫星的可见关系和星间路由策略,设计星间链路建链规划表与路由表。

步骤 4:根据步骤 3 形成的星间链路建链规划表与路由表,将与实际在轨卫星建链的未在轨卫星分配给地面站,形成物理虚星网;未与实际在轨卫星建链的卫星自动构成仿真虚星网。



(a) 场景构成要素



(b) 链路配置效果

图 6 BDSim“所见即所得”场景编辑功能

步骤 5:将步骤 4 形成的物理虚星网和仿真虚星网通过天地一体、软硬协同技术进行集成,形成虚实结合的完全组网卫星导航系统。

步骤 6:利用步骤 5 形成的整网运行的卫星导航系统,进行星间链路整网通信性能评估、星间/星地双向测量精度分析、地面运控业务处理等系统级关键技术的试验验证。

步骤 7:综合各次试验结果,对 GNSS 星间链路关键技术指标、地面运控系统各项业务处理能力等进行评估,得到如图 7 所示评估结果。

卫星 ID	星座 ID	星座名称	星座类型	星座轨道	星座倾角	星座半长轴	星座偏心率	星座升交点	星座近地点	星座周期	星座相位	星座速度	星座加速度	星座位置	星座速度	星座加速度
1	1	北斗-1	地球静止轨道	111.76°E	0°	42164 km	0	111.76°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	111.76°E	0°	0
2	1	北斗-1	地球静止轨道	117.90°E	0°	42164 km	0	117.90°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	117.90°E	0°	0
3	1	北斗-1	地球静止轨道	125.75°E	0°	42164 km	0	125.75°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	125.75°E	0°	0
4	1	北斗-1	地球静止轨道	134.93°E	0°	42164 km	0	134.93°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	134.93°E	0°	0
5	1	北斗-1	地球静止轨道	145.59°E	0°	42164 km	0	145.59°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	145.59°E	0°	0
6	1	北斗-1	地球静止轨道	158.05°E	0°	42164 km	0	158.05°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	158.05°E	0°	0
7	1	北斗-1	地球静止轨道	172.53°E	0°	42164 km	0	172.53°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	172.53°E	0°	0
8	1	北斗-1	地球静止轨道	189.05°E	0°	42164 km	0	189.05°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	189.05°E	0°	0
9	1	北斗-1	地球静止轨道	207.80°E	0°	42164 km	0	207.80°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	207.80°E	0°	0
10	1	北斗-1	地球静止轨道	228.90°E	0°	42164 km	0	228.90°E	0°	23h 56m 04s	0°	0	0	228.90°E	0°	0
11	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	116.37°E	55°	42164 km	0.01	116.37°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	116.37°E	55°	0
12	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	117.90°E	55°	42164 km	0.01	117.90°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	117.90°E	55°	0
13	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	125.75°E	55°	42164 km	0.01	125.75°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	125.75°E	55°	0
14	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	134.93°E	55°	42164 km	0.01	134.93°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	134.93°E	55°	0
15	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	145.59°E	55°	42164 km	0.01	145.59°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	145.59°E	55°	0
16	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	158.05°E	55°	42164 km	0.01	158.05°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	158.05°E	55°	0
17	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	172.53°E	55°	42164 km	0.01	172.53°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	172.53°E	55°	0
18	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	189.05°E	55°	42164 km	0.01	189.05°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	189.05°E	55°	0
19	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	207.80°E	55°	42164 km	0.01	207.80°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	207.80°E	55°	0
20	2	北斗-2	倾斜地球同步轨道	228.90°E	55°	42164 km	0.01	228.90°E	55°	23h 56m 04s	0°	0	0	228.90°E	55°	0
21	3	北斗-3	中圆地球轨道	116.37°E	55°	21500 km	0.02	116.37°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	116.37°E	55°	0
22	3	北斗-3	中圆地球轨道	117.90°E	55°	21500 km	0.02	117.90°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	117.90°E	55°	0
23	3	北斗-3	中圆地球轨道	125.75°E	55°	21500 km	0.02	125.75°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	125.75°E	55°	0
24	3	北斗-3	中圆地球轨道	134.93°E	55°	21500 km	0.02	134.93°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	134.93°E	55°	0
25	3	北斗-3	中圆地球轨道	145.59°E	55°	21500 km	0.02	145.59°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	145.59°E	55°	0
26	3	北斗-3	中圆地球轨道	158.05°E	55°	21500 km	0.02	158.05°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	158.05°E	55°	0
27	3	北斗-3	中圆地球轨道	172.53°E	55°	21500 km	0.02	172.53°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	172.53°E	55°	0
28	3	北斗-3	中圆地球轨道	189.05°E	55°	21500 km	0.02	189.05°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	189.05°E	55°	0
29	3	北斗-3	中圆地球轨道	207.80°E	55°	21500 km	0.02	207.80°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	207.80°E	55°	0
30	3	北斗-3	中圆地球轨道	228.90°E	55°	21500 km	0.02	228.90°E	55°	12h 55m 41s	0°	0	0	228.90°E	55°	0

图 7 基于 BDSim 的星座组网性能评估结果

虚实结合技术虽然构造了一个接近真实的组网运行环境,但虚拟部分实现过程是通过现有的数学模型进行仿真和替代的;因此,虚拟部分还存在一些仿真误差,该误差对于 GNSS 组网功能试验不会存在太大的影响,但能够影响实际星间链路网络的性能评估结果。在试验过程中,获取和统计模型误差、建立模型误差对比库能够提高虚拟部分的仿真精度,从而提高评估的准确度。模型优化过程主要是建立模型误差库,然后根据模型误差库统计分析得到模型误差统计修正量,然后对数学模型进行补偿和修复,从而达到优化模型的效果。

4 基于 BDSim 的地面操作人员培训方法

4.1 培训与考核系统体系架构

使用 BDSim 进行卫星系统、运控系统之间的数据仿真与数据交互,模拟实际系统的运行流程产生相关数据,并实时监控仿真进度,可用于地面操作人员的培训,如图 8 所示。

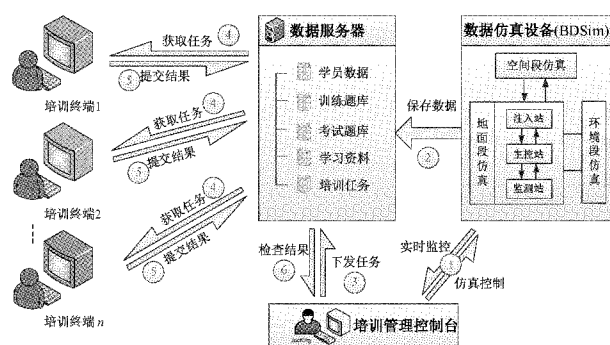


图 8 基于 BDSim 的地面操作人员培训体系架构

各组成部分说明如下:

1) 培训终端

培训终端可以进行某系统的软件操作训练和资料学习,受培训管理台控制,登录后可参与培训考核;能连接数据服务器下载学习资料和训练任务,训练完成后能上传训练结果。支持用户进行知识掌握方面的在线习题练习;支持用户对自身训练情况、评估结果进行查阅。

2) 培训管理控制台

培训管理控制台具有对学员、训练任务、训练过程、训练结果的管理和控制功能;通过配置训练任务上传到数据服务器并指定部分学员接收任务参与训练,在训练考核阶段还可以随时监控学员实时考核情况,最后对考核结果进行统计评估。

3) 数据仿真设备

数据仿真设备是在 BDSim 的基础上增加了卫星导航 ICD 接口仿真功能,在培训管理控制台的配置下仿真空间段、环境段、地面控制段数据及相互之间的接口数据,通过系统级的仿真,输出运控 ICD 接口数据到数据服务器,再由培训终端获取并开展预案演练。

4) 数据服务器

数据服务器负责存储学员的用户数据、培训任务数据、培训结果数据、接口数据等,向其他各个子系统提供数据访问功能,并对数据库进行定期备份与恢复,并可以输出数据报表。

4.2 “沉浸式”培训与考核模式

培训与考核系统采用内嵌实际目标系统软件的结构,如图 9 所示。使得学员在培训终端的操作与实际操作具有同等体验,从而达到“沉浸式”的训练目的。为了实现多方面的培训,培训与考核系统设计了 3 种培训考核模式。

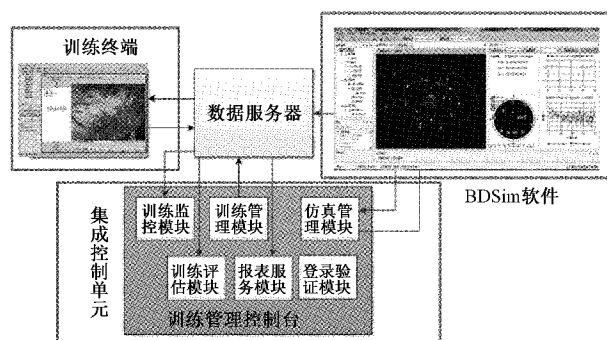


图 9 BDSim 驱动真实系统的沉浸式人员培训与考核模式

1) 在线学习模式

学员可以随时在培训与考核系统机房开展自主学习,在线学习相关的文献资料,在线观看教学视频,还可以下载部分资料,此外还可以选择题库自主进行模拟考核,对自己的学习进行评估,此模式只需要培训终端和数据服务器参与运行。

2) 训练考核模式

训练考核模式下,培训管理员通过下达考核任务到参与考核的学员,学员根据训练任务完成试题和动手实验,通过统一的考核模式为学员的学习进行评估,评估学员是否达到岗位要求,再决定是否上岗操作真实系统。

3) 预案演练模式

在预案演练模式下,培训管理控制台通过配置数据仿真设备进行数据仿真,数据经服务器输入到培训终端,学员在培训终端嵌入的实操系统监控软件中进行实际操作,实操系统监控软件包括训练目标系统软件。此模式下,管理员可以在培训管理控制台向数据仿真设备添加故障和异常数据,训练学员的实际操作能力和对故障、异常情况的解决能力。

4.3 模拟训练系统的优势

模拟训练系统集成了在线学习、训练考核、预案演练 3 种覆盖全面的培训模式,其优势有如下几点。

1) 随到随学的培训与考核系统,学员根据自身的时间安排,随时进入培训考核系统对各种权威资料开展自我学习。

2) 高精度数据仿真设备模拟实际系统输入,似是实

操,实是训练,让学员可以大胆开展操作学习而不怕误操作导致系统问题,提高培训效果。

3)故障可设定,异常可复现,让训练覆盖实际系统各种突发情况。

4)理论学习、培训考核、预案演练统一考核评估,让每一个上岗的操作员在较短的时间内达到合格标准,如图10所示。

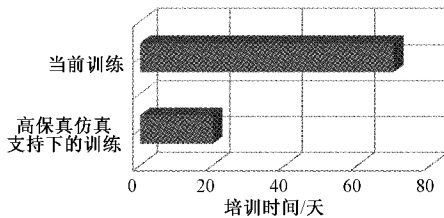


图10 获取地面操作上岗资格时间的改进

5 结 论

本文提出了基于 BDSim 开展卫星导航系统级测试与地面操作人员培训的基本方法和过程。工程实践经验表明, BDSim 高精度的数学仿真模型和符合 ICD 文件定义的系统间仿真接口,能够为卫星导航系统级功能、性能测试评估以及地面操作人员培训系统提供近乎真实的驱动数据和接口数据;根据“北斗三号”卫星导航系统的特点提出的“虚-实结合”的系统级测试与评估方法不仅可以充分测试在轨卫星的功能和性能,同时也充分挖掘了地面试验的验证能力,能够在试验阶段及时发现系统的设计缺陷,为及时改进或系统优化方案提供试验依据;基于 BDSim 高保真仿真数据驱动真实系统的沉浸式人员培训与考核方法,能够在不影响北斗导航系统正常运行的条件下,使地面运控系统操作人员进行与真实系统一致的操作训练,并通过考核初步判定自己的操作等级,保障北斗卫星导航系统的高效和低成本运行维护。

基于 BDSim 的卫星导航系统级测试与地面操作人员培训方法可以为卫星导航系统各分系统的联调联试、系统级的功能和性能测试、地面操作人员的培训与考核提供技术支持,同时能够提高卫星导航系统测试和人员培训的灵活性,减少人力物力消耗,对“北斗三号”相关工程建设和运行维护具有重要意义。

参考文献

- [1] DRIVER T. GPS high fidelity system simulator-a tool to benefit both the control and user segments[C]. Proceedings of the 54th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 1998; 507-515.
- [2] CORRIE L, GREENHUT D, HAZLEHURST R, et al. Simulating the GPS constellation for high fidelity operator training[C]. Position Location & Navigation Symposium, IEEE, 1996; 222-229.

- [3] MARK B, BRAD D, WILLIAM G. High fidelity GPS satellite simulation[C]. AIAA, 1997; 213-223.
- [4] 杨俊,黄文德,陈建云,等. 卫星导航系统建模与仿真[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [5] 杨俊,黄文德,陈建云,等. BDSim 在卫星导航中的应用[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [6] 杨俊,范丽,明德祥,等. 卫星导航地面试验验证的平行系统方法[J]. 宇航学报,2015,36(2):165-172.
- [7] 彭海军,王玲,黄文德,等. 一种虚实结合的星间链路组网地面试验验证框架[J]. 航天控制,2016,34(2):31-37,43.
- [8] 杨俊,黄文德,郭熙业,等. 全球卫星导航系统星间链路虚实结合试验验证方法:ZL201710045148.0[P]. 2017-06-27.
- [9] 黄文德,杨俊,张利云,等. 卫星导航系统高保真仿真模型的可信度验证方法:ZL201710609081.9[P]. 2017-07-24.
- [10] 黄文德,杨俊,张利云,等. 卫星导航系统试验验证与测试评估数学模型的建立方法:ZL201710608895.0[P]. 2017-07-24.
- [11] 胡素芸,邵斌澄,李坤,等. 面向航天员虚拟训练的人机交互系统研制和测试[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(12):1902-1911.
- [12] 贾卫松,王海红,燕洪成,等. 北斗全球系统自主导航地面模拟测试系统设计与实现[J]. 航天器工程,2017,26(3):105-111.
- [13] 冯旭哲,陈建云,周永彬,等. 基于地面站的星间链路全网测试技术[J]. 计算机测量与控制,2018,26(10):19-23.
- [14] 张新邦. 航天器半物理仿真应用研究[J]. 航天控制,2015,33(1):77-83.
- [15] 于焯,黄默,杨斌,等. 一种高精度导航卫星钟差中长期预报方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):36-43.

作者简介

黄文德,博士,主要研究方向为卫星导航系统及航天器轨道动力学。

E-mail:nn_hwd@126.com

王芳,教授,主要研究方向为卫星导航系统测试等技术。

E-mail:fang_w@bit.edu.cn

刘沉,高工,主要研究方向为星基导航与定位技术。

E-mail:liuchen_gfkd@163.com

张利云,硕士,主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail:634032814@qq.com

李靖,硕士,主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail:810868161@qq.com

康娟,硕士,主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail:15574978094@163.com