



研究与开发

基于MBSE的卫星互联网仿真平台架构建模

李红光^{1,2}, 刘垚圻^{1,3}, 周一青^{1,3,4}, 石晶林^{1,3,4}

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 处理器芯片全国重点实验室, 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190;

4. 中科南京移动通信与计算创新研究院, 江苏 南京 211135)

摘要: 针对传统基于文档的系统工程方法在高复杂度卫星互联网仿真平台开发中存在的系统设计协调性差及早期仿真验证不足等问题, 提出采用基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)方法开展卫星互联网仿真平台架构建模。首先, 提出基于MBSE的双V模型(dual V model based on MBSE, DV-MBSE)及与外部软件集成验证架构; 然后, 基于MBSE方法论对卫星互联网仿真平台顶层架构开展需求分析、功能分解及交互结构建模; 最后, 通过运行逻辑验证与外部模型集成验证实现了模型的有效性验证, 从而支撑卫星互联网设计论证。

关键词: 卫星互联网; MBSE; 仿真建模; 仿真平台; 集成验证

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024201

Architecture modeling of satellite Internet simulation platform based on MBSE

LI Hongguang^{1,2}, LIU Yaoqi^{1,3}, ZHOU Yiqing^{1,3,4}, SHI Jinglin^{1,3,4}

1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Lab of Processors, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

4. Zhongke Nanjing Mobile Communication & Computing Innovation Institute, Nanjing 211135, China

Abstract: The traditional text based system engineering method has some problems in the development of high complexity satellite Internet simulation platform, such as poor system design coordination and insufficient early simulation verification. The model-based systems engineering (MBSE) method was proposed to model the architecture of satellite Internet simulation platform. Firstly, a DV-MBSE and an integration verification architecture with external

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-06-15

通信作者: 刘垚圻, liuyaoqi@ict.ac.cn

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (No.BE2021013-2); 中国科学院计算所创新课题项目 (No.E261020); 中国科学院特别研究助理资助项目 (No.2022)

Foundation Items: Jiangsu Key Research and Development Program of China (No.BE2021013-2) The Innovation Funding of ICT, CAS (No.E261020), The CAS Specific Research Assistant Funding Program (No.2022)



software were proposed. Secondly, based on MBSE methodology, the requirements analysis, functional decomposition and interaction structure modeling of the top architecture of the satellite Internet simulation platform were carried out. Finally, the validity of the model was verified by running logic verification and external model integration verification, thus supporting the design of satellite Internet.

Key words: satellite Internet, MBSE, simulation modeling, simulation platform, integration verification

0 引言

近年来, 网络通信技术迅猛发展^[1-6], 但随时随地接入互联网仍未实现。《世界互联网发展报告 2023》指出, 2023 年全球互联网用户数已超 50 亿, 受经济发展程度、地形和成本等约束, 地球上超 1/3 的人口仍然不能通过地面网络接入互联网。具有超视距、丰富频谱资源、快速部署、成本较低等独特优势的卫星互联网在偏远地区通信、抢险救灾等场景中发挥着重要作用^[7], 并已迎来快速发展的热潮^[8]。随着卫星互联网从高轨向低轨、从窄带向宽带、从专用向通用的演变, 通信卫星将由传统的单点透明转发工作模式, 向具备星座组网通信、星上路由交换等星上处理工作模式发展, 同时卫星互联网的星座规模结构、星地协同组网模式、信息交互流程也日趋复杂^[9]。如何快速高效构建天地一体化卫星互联网仿真平台以支撑卫星互联网不同层级的设计论证及运维, 已成为大型复杂系统设计及工程建设亟待解决的难题。

卫星互联网通信仿真研究主要分为链路级仿真和系统级仿真, 其中链路级仿真关注调制编码等技术, 主要对通信链路的物理层和数据链路层进行仿真^[10], 而系统级仿真关注系统性能及协议设计等方面, 主要对带拓扑结构的通信系统进行仿真^[11]。传统仿真平台, 例如, STK、NS3 及 OPENT 等存在单机部署效率低、功能局限、不易扩展、不可控、组合使用不便等问题, 无法满足构建巨型卫星互联网系统级仿真的新需求。中国科学院计算技术研究所团队研制的天地一体化

信息网络综合试验平台 (super-simulation, emulation and test bed, S-SET)^[12]、IPLOOK 团队研制的卫星仿真平台、中国卫通发布的星地一体化设计仿真验证平台 V2.0 等都实现了链路级仿真, 并实现了部分系统级仿真功能。卫星互联网系统级仿真平台主要难点在于底层模型多、模型交互依赖多、海量节点仿真等, 研制复杂, 需采用系统工程方法解决系统工程生命周期中的描述、设计、验证、维护等问题。目前系统工程方法主要有霍尔系统工程方法、切克兰德方法、协同设计方法、5W1H8C 分析方法、基于文档的系统工程 (text-based systems engineering, TBSE) 和基于模型的系统工程 (model-based systems engineering, MBSE) 等^[13]。其中, 传统系统工程基于 TBSE^[14], 其产出物是一系列用自然语言描述的、以文本格式为主的各类文档, 例如卫星通信系统的任务筹划及评估方案、卫星管控方案、用户服务方案、网络运维方案、载波监视方案、有效载荷方案、用户通信方案等, 并通过定性描述的技术要求及定量描述的技术指标关联相关文档。虽然 TBSE 是严格的, 但系统需求和设计信息保存在不同的文档中, 参与系统设计和研制等人员通常以复制电子文件的方式实现信息流转, 很难保证信息的有效性、完整性和一致性, 当系统规模及复杂度提升、研制单位增多时, 该问题将愈发突出, 因此也越来越难以应对复杂系统的设计挑战。为应对日益增长的系统复杂度, 国际系统工程学会早在 2007 年正式提出了基于模型的系统工程概念^[15], 即 “MBSE 是对建模活动的一种形式化应用, 用于支持系统需求、设计、分析、验证

和确认活动, 这些活动从概念设计开始、贯穿整个开发过程及后续的生命周期阶段。”在复杂系统工程实践中, 相较于 TBSE, MBSE 最大的优势在于通过方法论、建模规范及标准图形化建模语言, 对系统研制中的各个阶段进行描述及关联, 有效解决了知识表示的二义性、系统设计关联的一致性、设计修改的及时性与故障的可追溯性等问题, 同时, 通过仿真能在设计初期快速验证方案的可行性。此外 MBSE 可围绕存储系统架构模型数据的数据中心来并行开展工作, 同时将项目管理等模型软件接入系统架构模型, 从而有效缩短研制周期。

MBSE 在需求多变的复杂大型项目研制中具有显著优势, 国内外众多机构院所基于 MBSE 开展了大量设计与研究。例如, 国外的达索、波音等公司, 基于 MBSE 在航空航天等领域开展了较为深入的研究和应用^[16-18], 逐步实现了模型演进及需求全生命周期追溯。国内的中国商用飞机、中国航天科工等研究院所, 在飞机、火箭、卫星的型号研制任务中, 将 MBSE 应用在系统设计、建模仿真、平台集成等方面的工程实践^[19-22]。MBSE 具有软件工程特性, 跨行业的工程人员难以掌握, 因此在实践中仍存在严重的抵触情绪; 此外, MBSE 前期需要大量投资, 合理评估成本

回报、制定建模颗粒度及标准等也是实践中需考虑的难题。

本文针对卫星互联网仿真平台工程复杂性, 首先提出了 DV-MBSE 开发模型, 并设计了与多源异构专业仿真软件联合的集成验证架构; 然后对卫星互联网仿真平台关键模型展开建模及讨论; 最后通过运行逻辑验证以及和外部软件的集成验证, 检验了模型有效性。

1 基于 MBSE 的开发验证架构

1.1 DV-MBSE 模型

卫星互联网仿真平台庞大, 开发流程烦琐复杂, 双 V 模型开发与验证并行, 能较早发现问题, 结合 MBSE 可有效避免生命周期中的知识表示、设计关联及可追溯性等问题。对此本文提出了 DV-MBSE 模型, DV-MBSE 模型如图 1 所示。

DV-MBSE 模型主要由内部架构 V 和外部实体 V 组成, 用于描述顶层逻辑关系。内部架构 V 模型主要关注系统架构的设计验证, 开发流程主要包括需求分析、总体架构设计、分系统设计、模块设计、数字模块测试、数字分系统测试、集成测试、仿真运行测试。通过引入 Magicgrid、OOSEM 等 MBSE 方法论指导, 在 No Magic-Draw、Thales Capella、EA 等建模工具平台上,

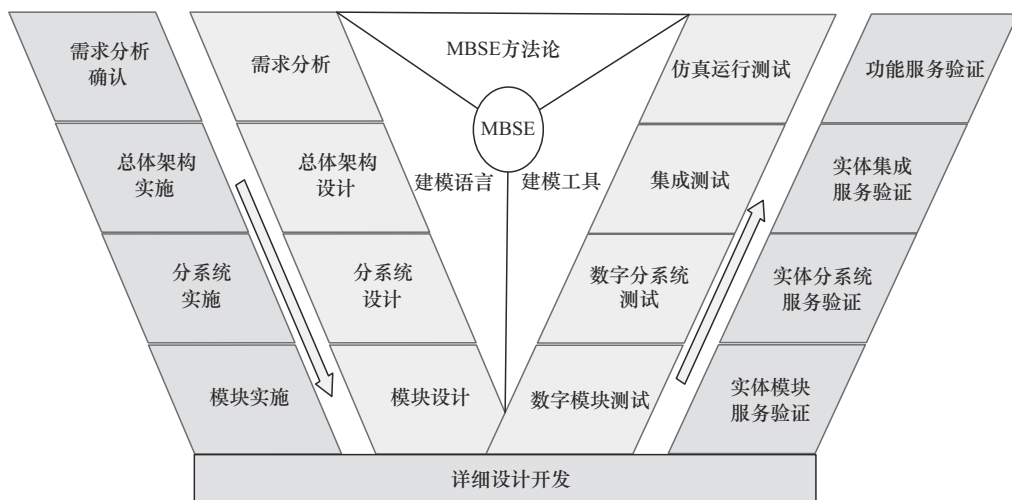


图 1 DV-MBSE 模型



采用SysML建模语言进行描述、分析和验证内部架构V。在执行过程中需对建模语言、组织规范、命名规范及集成规范选择、模型变更管理以及模型工具和环境等方面对各数字模型进行统一约束,确保最终建立的模型具有一致性、可理解性和可靠性,从而提高系统的开发效率和质量。外部实体V模型主要关注组成架构对应软硬件的实体元素的实施与验证,开发流程主要包括需求分析确认、总体架构实施、分系统实施、模块实施、详细设计开发、实体模块服务验证、实体分系统服务验证、实体集成服务验证与功能服务验证,通过分析目标系统的特性,选用合适的前后端框架完成研制。在实际工程研制过程中,相对于外部实体V,内部架构V通常执行速度更快,颗粒度更大,因此内部架构V常用于指导实体V的实施及验证,而外部实体V在实施过程中会根据实际情况修正补充设计,并反馈参数范围、验证指标及失效模式等,以提升系统的完备性和鲁棒性,最终实现复杂系统的迭代演进。

1.2 MBSE模型与多源异构模型的集成验证架构

目前MBSE基于图形化模型,主要用于支持系统架构的逻辑验证,而不直接用于全系统动态行为的仿真计算。为实现更全面的系统仿真验证,可通过接口转换等方式集成其他专业仿真软件或工具,确保系统设计的准确性和可靠性,并为系统的综合分析和验证提供有效途径。MBSE与异构模型的集成验证架构如图2所示。

MBSE与异构模型的集成验证架构主要由MagicDraw、MATLAB与专业仿真软件组成。其中,MagicDraw用于建模,MATLAB用于通用处理及计算,专业仿真软件完成特定领域的仿真。

MagicDraw与外部软件集成验证主要设计为直接集成验证和间接集成验证方案。直接集成验证方案通过在MagicDraw中构建Socket通信模块,然后与专业仿真软件的外部交互插件直接交

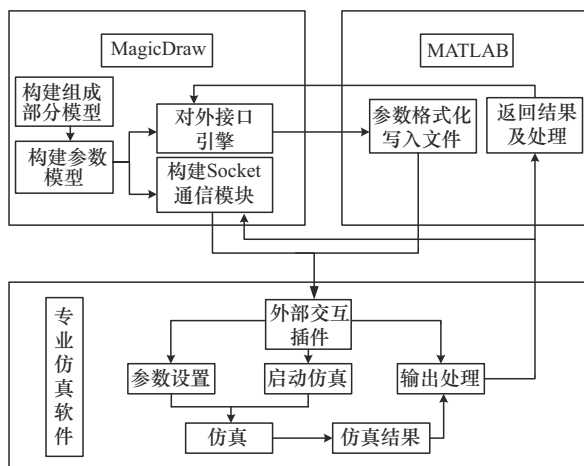


图2 MBSE与异构模型的集成验证架构

互。外部交互软件中包含对模型参数的设置代码、仿真启动代码以及仿真结果处理代码。专业仿真软件启动仿真得到仿真结果后,将结果直接返回至构建的Socket通信模块,实现集成验证,功能项与仿真软件工具对应见表1。间接集成验证方案主要利用MagicDraw中自带的MATLAB引擎,通过MATLAB与其他外部专业仿真软件进行交互,MATLAB将处理后的结果返回至MagicDraw中,以完成卫星互联网仿真验证系统的集成验证。

表1 功能项与仿真软件工具对应

序号	功能项	仿真软件工具
1	轨道预报	STK
2	链路预算	STK
3	可见性	STK
4	链路仿真	OPNET
5	拓扑建模	OPNET
6	路由协议性能分析	OPNET
7	多波束仿真	SNS3
8	卫星切换	SNS3

2 基于MBSE的卫星互联网仿真平台顶层关键模型建模

2.1 需求分析

卫星互联网仿真系统的成功取决于贯穿生命

周期内满足不同利益相关方的需求。利益相关方是对系统拥有合法权益的任何实体,如行业用户、上下游制造厂商、运营商及监管机构等。识别利益相关方即识别可能受系统影响或能够影响系统的任何实体。识别利益相关方后,还需捕获并综合利益相关方的需求,需求主要分为功能需求和性能需求。通过调研及实践经验,得到卫星互联网仿真平台关键功能需求如下。

(1) 具备卫星互联网典型仿真场景构建及规划能力,包括仿真需求录入、仿真环境设置、仿真节点参数设置及部署、离散事件流程规划、通信体制及通信策略配置等能力。

(2) 具备卫星互联网运行时的仿真推演能力,包括仿真任务推演及回放、仿真流程及仿真速度控制、分布式仿真及并行仿真、模型库及算法库调度处理等能力。

(3) 具备友好的二三维可视化展示能力,包括仿真场景环境展示、仿真场景节点展示、仿真过程中的态势展示、仿真结果图表定制化展示、仿真平台交互界面的可视化展示等能力。

(4) 具备卫星互联网效能评估能力,包括评估指标体系自定义、仿真任务参数自定义、卫星通信异构性能指标分析、差异化方案的对比评估、评估报告自动生成等能力。

(5) 具备平台系统运维管控能力,包括用户鉴权及权限管理、系统监控及故障告警、系统配置及日志管理、操作记录统计与分析、菜单管理、并行计算、服务治理及容器编排等能力。

(6) 具备丰富的场景对象模型库,包括异构格式的卫星、信关站、终端及载具等三维模型、卫星及信关站等通信节点对象模型、常见语音视频及文件等业务模型等。

(7) 具备高保真的算法库,包括坐标系转换算法、轨道预报算法、终端轨迹计算及编队构建算法、可见性及覆盖分析算法、切换算法、星间路由算法、传播损耗模型算法、语音视频等业务

模型算法、网络性能评估算法等。

(8) 具备高精度的场景数据库,包括不同精度的全球全国卫星影像离线地图数据、全球高程数据、全国矢量数据、全国路网数据、卫星及地面站数据、全国兴趣点数据、全球行政边界数据、全球气象水文数据等。

(9) 具备模型、算法及数据管理能力,包括三维模型、业务模型及算法模型的维护管理操作、具备三维模型的可视化组装拖拽、异构模型调用示例说明及元数据管理、算法标准化封装及组合、标准服务接口在线调用等能力。

上述功能需求颗粒度较大,在详细设计时,需要衍生细化。根据上述功能需求设计的卫星互联网仿真平台可由场景规划分系统、仿真推演分系统、可视化分系统、效能评估分系统、系统运维分系统、对象模型库、算法库、场景数据库及模型数据算法管理分系统组成,分系统组成架构如图3所示,该模块图在 MagicDraw 中生成。

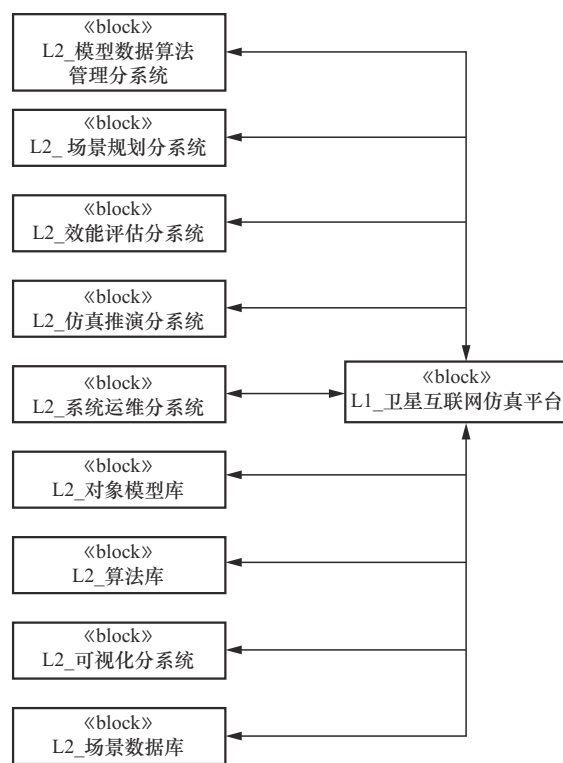


图3 分系统组成架构



卫星互联网仿真平台的总体性能需求主要从节点规模、响应时间、显示性能、模型精度、结果精度等方面进行衡量,在衡量时需要多因素约束描述,以免出现单因素性能较优,综合仿真时性能较差的情形。经调研及项目实践,捕获的阶段性能需求示例如下。

(1) 支持单星座 1 000 颗卫星实时位置仿真,平均帧率不低于 30 f/s。

(2) 单用户进行 1 000 颗卫星星座轨道仿真时,设置仿真步长 60 s,仿真时长 1 天,卫星及轨道响应平均时间不大于 10 s。

(3) 单用户进行 1 000 颗卫星星座星间路由拓扑计算时,设置仿真步长 60 s,仿真时长 1 天,平均计算时间不大于 60 s。

(4) 单用户加载 1 000 颗卫星、5 000 个终端,场景初始化显示平均响应时间不大于 10 s。

(5) 使用 TwoBody、SGP4 等轨道预报算法与主流仿真软件 STK 的误差不超过 2%。

(6) 自实现函数的多普勒频移结果与主流仿真软件 STK 的结果最大偏差不超过 10 kHz。

2.2 卫星互联网仿真平台功能分解

基于第 2.1 节所述卫星互联网仿真平台需求及总结归纳的分系统,可得到用户使用仿真平台的平台仿真用例。平台仿真用例属于复杂功能难以直接描述,可通过功能分解将复杂任务分解为若干可识别的子功能,促进设计求解。通过功能逐级分解,并将子功能有意义地、相容地连接成总功能,最终形成功能架构。目前主要根据作用对象类型和作用对象状态变化进行功能分解。通过作用对象类型分解的子功能相对独立,无直接关联关系。而通过作用对象状态变化分解的子功能之间往往存在一定逻辑关系。两类功能分解方法相互补充以完成功能分解。采用 MagicDraw 中的活动图对平台仿真用例场景进行功能分解,平台仿真功能分解如图 4 所示。

平台仿真功能分解活动图主要通过活动、交

互、对象流、控制流、判断、合并等表征。在系统运维分系统中,采用对象类型功能分解,将系统运维主要分为用户登录系统、系统监控、用户权限管理及系统服务管理功能。在系统运维分系统、场景规划分系统等分系统中采用作用对象状态的功能分解方法,当系统运维分系统中完成用户登录后,选择仿真;然后在场景规划分系统中规划场景;接着将可分析的场景对象传递至效能评估分系统中,同时也将场景相关对象及参数传递至仿真推演分系统;当仿真推演系统收到效能评估分系统中选择的评估指标、约束条件以及场景规划分系统中的场景对象及参数后,仿真引擎调用算法库评估,并将结果传递至可视化分系统;最后可视化分系统通过图表等形式呈现数据及仿真推演过程。

2.3 卫星互联网仿真平台交互结构

卫星互联网仿真平台中两个分系统之间存在信息交互时,首先需要定义信息交互项流,例如信号、能量和信息等,然后定义接口,最后应用到端口。各分系统交互接口需在上游的系统逻辑架构模型中定义,交互接口也作为下游各分系统团队的开发约束,以确保目标系统设计和模型的完备性。如需更改已定义的接口或者额外增加接口,需要向上游申请,并且将变更情况同步给其他团队,以确保系统级设计变更的高效性和完整性。结合第 2.1 节和第 2.2 节内容,卫星互联网仿真平台交互结构如图 5 所示。

图 5 描述了各分系统之间主要接口的交互关系,具体接口使用的通信协议类型,以及传输信息等需迭代补充。图 5 中每个模块内部可定义状态机图,在状态机图中的每个状态内可以定义活动图,通过状态机图和活动图可以实现更加详细的设计。为配合下游众多厂商的联合研制工作,上游总体单位通常需要为下游供应商或设计单位提供接口配置文件,可使用 MagicDraw 自动生成系统的黑盒接口控制文档(interface control docu-

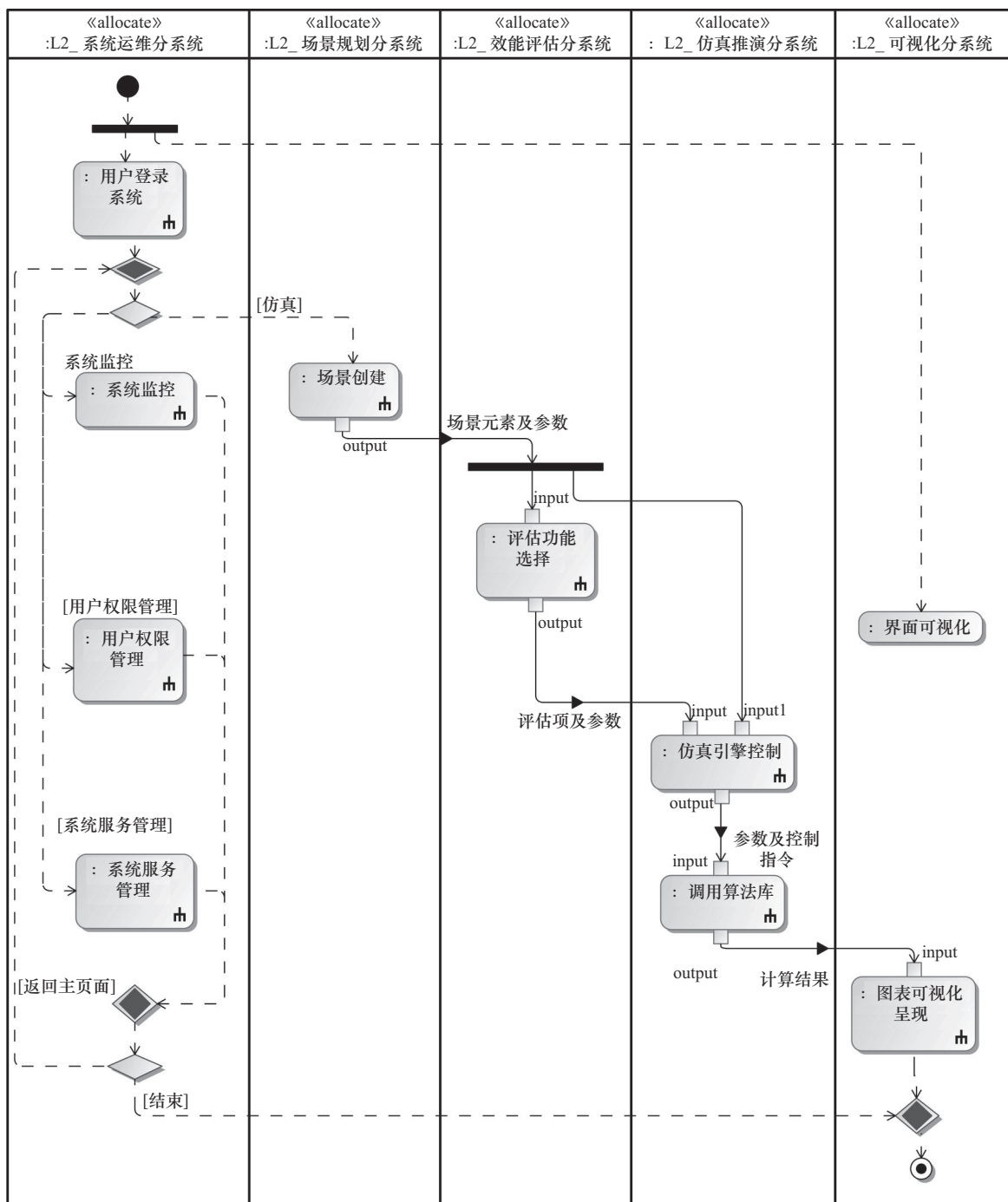


图4 平台仿真功能分解

ments, ICD) 和白盒 ICD。卫星互联网仿真平台交互结构白盒 ICD 如图 6 所示。

3 仿真验证

本文主要基于 MBSE 对卫星互联网仿真平台

的顶层架构展开设计, 可基于云原生架构对平台进行开发部署。为验证设计阶段的有效性, 对所建立模型展开运行逻辑验证和外部集成验证。本文选用 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7- 11800H 处理器, 其中 CPU 主频为 2.3 GHz, 内存为 32 GB,

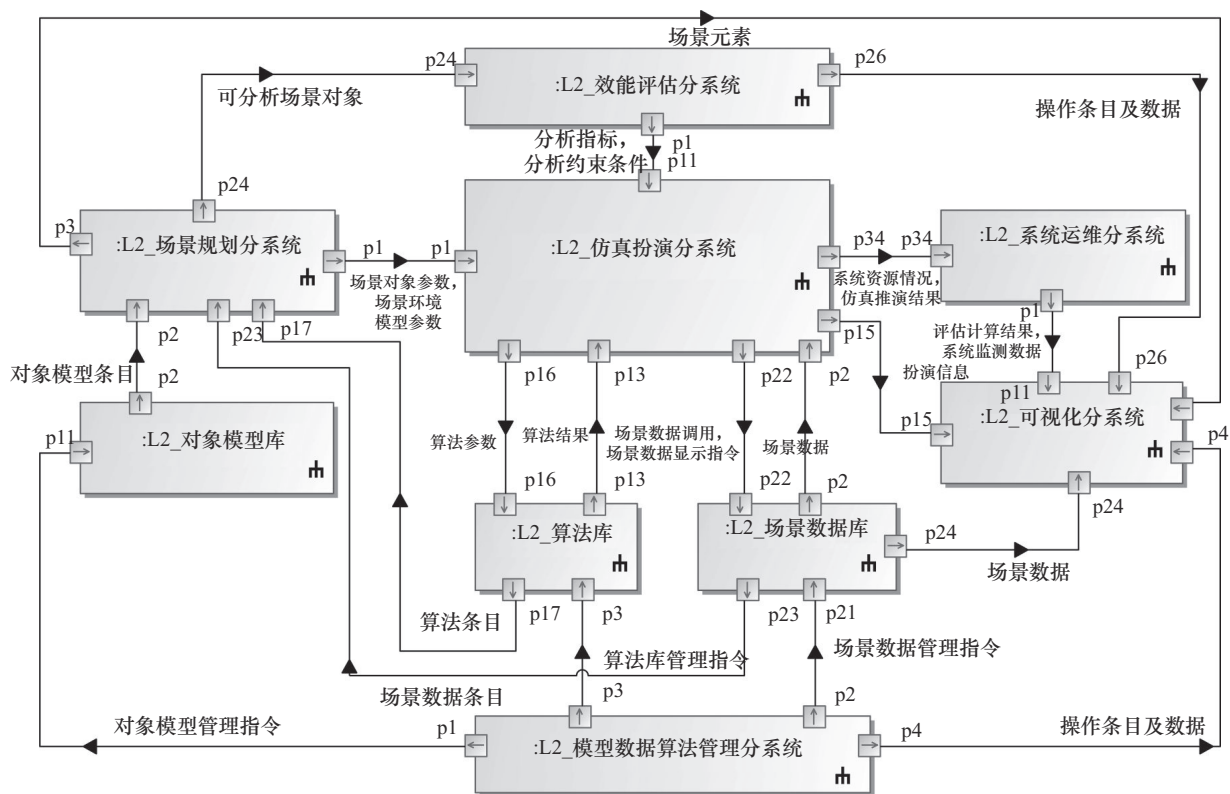


图5 卫星互联网仿真平台交互结构

#	Part A	Port A	Port A Features	Item Flow	Port B	Port B Features	Part B
1	: L2_场景规划分系统	out p1	out 信息	场景对象参数 场景环境模型参数	in p1	in 信息	: L2_仿真推演分系统
2	: L2_场景规划分系统	in p2	in 信息	对象模型条目 对象模型条目	out p2	out 信息	: L2_对象模型库
3	: L2_场景规划分系统	out p3	out 信息	场景元素	in p2	in 信息	: L2_可视化分系统
4	: L2_场景规划分系统	out p24	out 信息	可分析场景对象	in p24	in 信息	: L2_效能评估分系统
5	: L2_场景数据库	out p2	out 信息	场景数据	in p2	in 信息	: L2_仿真推演分系统
6	: L2_场景数据库	in p22	in 信息	场景数据调用 场景数据显示指令	out p22	out 信息	: L2_仿真推演分系统
7	: L2_场景数据库	out p23	out 信息	场景数据条目	in p23	in 信息	: L2_场景规划分系统
8	: L2_场景数据库	out p24	out 信息	场景数据	in p24	in 信息	: L2_可视化分系统
9	: L2_仿真推演分系统	in p13	in 信息	算法结果	out p13	out 信息	: L2_算法库
10	: L2_仿真推演分系统	out p15	out 信息	推演信息	in p15	in 信息	: L2_可视化分系统
11	: L2_仿真推演分系统	out p16	out 信息	算法参数	in p16	in 信息	: L2_算法库
12	: L2_仿真推演分系统	out p34	out 信息	系统资源情况 仿真推演结果	in p34	in 信息	: L2_系统运维分系统
13	: L2_模型数据算法...	out p1	out 信息	对象模型管理指令	in p11	in 信息	: L2_对象模型库
14	: L2_模型数据算法...	out p2	out 信息	场景数据管理指令	in p21	in 信息	: L2_场景数据库
15	: L2_模型数据算法...	out p3	out 信息	算法库管理指令	in p3	in 信息	: L2_算法库
16	: L2_模型数据算法...	out p4	out 信息	操作条目及数据	in p4	in 信息	: L2_可视化分系统
17	: L2_算法库	out p17	out 信息	算法条目	in p17	in 信息	: L2_场景规划分系统
18	: L2_系统运维分系统	out p1	out 信息	评估计算结果 系统监测数据	in p11	in 信息	: L2_可视化分系统
19	: L2_效能评估分系统	out p1	out 信息	分析指标 分析约束条件	in p11	in 信息	: L2_仿真推演分系统

选用操作系统为64位Windows 10,并选用MagicDraw19.0工具、MATLAB2016b、STK完成相关验证。

3.1 卫星互联网仿真平台交互结构

为验证卫星互联网仿真平台各分系统间的运行逻辑及数据收发是否与设计者的思路一致,采用仿真生成时序图及在仿真窗口控制台打印的方式完成验证。本文以用户登录及容器启动为例,模型运行逻辑验证如图7所示。

图7中时序图展示了用户登录和启动容器过程中可视化分系统、系统运维分系统及算法分系统及其子系统之间的交互过程逻辑及信号流向。信号流向先在分系统间交互,然后分系统再将信号传递到内部的子系统,从而实现解耦合,以减小众多子系统间交互信息的复杂度。此外通过在活动图中嵌入打印信息的行为模块,实现控制台打印交互过程中的重要信息,进而辅助判断系统运行逻辑的正确性。

3.2 外部集成数值验证

为验证卫星互联网仿真平台设计与外部专业软件之间的集成交互,采用参数图中定义参数及约束,调用MATLAB函数的方式完成验证。

本文以多普勒频移计算验证为例,假设场景为单颗低轨卫星和单个静止终端通信,仿真参数见表2,轨道六根数的设置时刻为2024年1月20日4时0分0秒。集成MATLAB验证多普勒频移如图8所示。

表2 仿真参数

序号	主要参数	数值及单位
1	轨道倾角	137.8°
2	升交点赤经	10.89°
3	近地点幅角	0°
4	轨道偏心率	0
5	轨道半长轴	6 678 137 m
6	真近点角	0°
7	可见窗口起始时间	2024年1月20日 4时8分40秒
8	载波频率	14.5 GHz
9	终端经度	116.25°
10	终端纬度	39.54°
11	终端高度	1 000 m

图8左半部分为参数图。约束模块的输入参数为卫星轨道六根数(轨道倾角、升交点赤经、近地点幅角、轨道偏心率、轨道半长轴和真近点角)、终端位置(经度、纬度和高度)、可见窗口起始时间及载波频率,通过调用自实现的多普勒

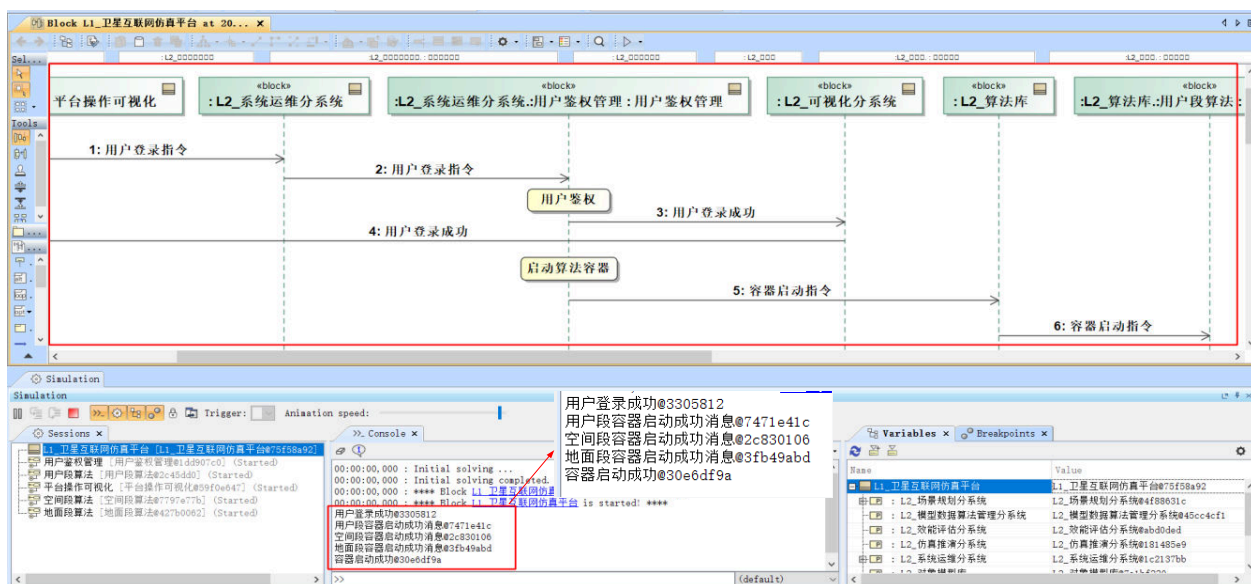


图7 模型运行逻辑验证

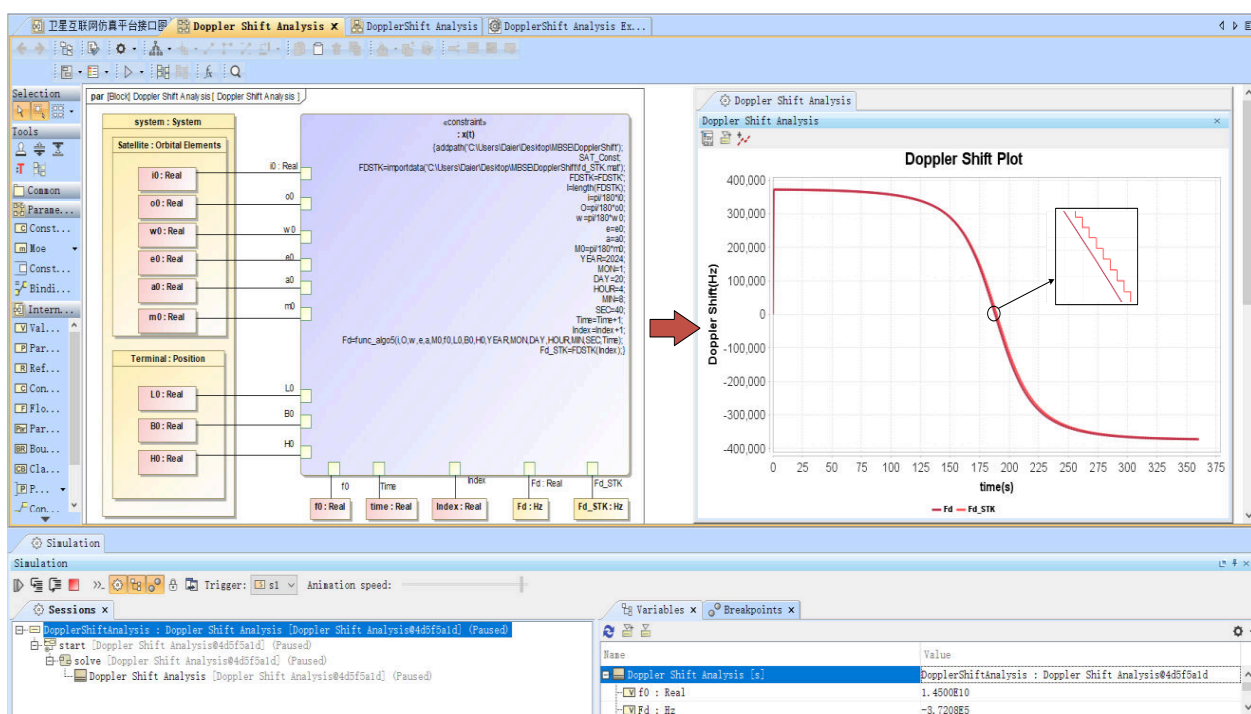


图8 集成MATLAB验证多普勒频移

频移函数及STK接口分别得到多普勒频移输出结果。在相同参数设置下,自实现函数的多普勒频移结果与STK中计算生成的多普勒频移结果对比如图8右半部分所示。假设以STK计算的多普勒频移为标称值,通过多次计算得到自实现函数的计算结果与标称值的最大偏差为3 321.26 Hz,将自实现函数的计算结果用于多普勒频移预补偿后,满足终端接收机的多普勒频移捕获能力 ± 10 kHz。在图8右下角的变量区域,可以改变输入参数及查看具体参数,从而满足不同需求下的设计验证。总而言之, MagicDraw中的模型与外部模型可以友好集成交互,为方案论证阶段提供了极大便捷。

4 结束语

卫星互联网系统建设对我国弥合数字鸿沟和增进普惠民生福祉提供了重要支撑,是一项规模庞大且高复杂度的工程,同时创新理念将贯穿其全周期建设,为尽快提升我国卫星互联网系统建

设的正向设计水平和反向验证能力,同步开展卫星互联网仿真平台建设十分重要。本文主要设计了基于MBSE的开发验证架构,并对卫星互联网仿真平台的需求分析、功能分解及交互结构进行了初步建模,并通过用户登录及容器启动实例和多普勒频移计算实例,分别验证了运行逻辑验证及外部集成验证能力,为卫星互联网前期阶段的数字化验证提供了思路。考虑卫星互联网系统不断演进、涉及模型众多,接口异构异质信息繁多,后续工作将持续迭代细化模型。同时建议广大卫星互联网建设队伍在总体单位的指导下,科学采用MBSE高效协同,充分发挥自家积累优势,从而降低生产成本,实现我国卫星互联网的快速高效构建。

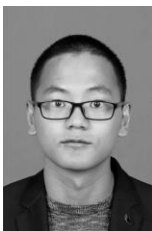
参考文献:

- [1] GONG S Q, XING C W, LIU H, et al. Hardware-impaired RIS-assisted mmWave hybrid systems: beamforming design and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2317-2334.

- [2] ZHAO Z X, DU Q H, KARAGIANNIDIS G K. Improved grant-free access for URLLC via multi-tier-driven computing: network-load learning, prediction, and resource allocation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(3): 607-622.
- [3] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service aware 6G: an intelligent and open network based on convergence of communication, computing and caching[J]. *Digital Communication Networks*, 2020, 6(3): 253-260.
- [4] LIU L, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache-enabled heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(7): 1584-1593.
- [5] LIU L, ZHOU Y Q, ZHUANG W H, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference aware CoMP[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 503-517.
- [6] ZHOU Y Q, LIU H, PAN Z G, et al. Two-stage cooperative multicast transmission with optimized power consumption and guaranteed coverage[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 274-284.
- [7] LIU Y Q, LI H G, ZHOU Y Q, et al. Digital twin satellite internet: architecture and key technologies[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022, 3(1): 62-71.
- [8] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 55-61.
- [9] LI W P, BAI H F, ZHAO Y, et al. Modeling and simulation of satellite communication system base on MBSE[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(1): 69-74.
- [10] SU M, XIAO Y, LIU Y Q, et al. Downlink design of LEO satellite communication system[J]. *Telecommunication Engineering*, 2022, 62(2): 168-173.
- [11] IKUNO J C, WRULICH M, RUPP M. System level simulation of LTE networks[C]//*Proceedings of 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [12] ZHANG J T, LIU Y Q, WEI E L, et al. A comprehensive test platform for space-ground integrated information network based on cloud-native[J]. *Mobile Communications*, 2023, 47(7): 49-57.
- [13] 陈杰, 卢梅. 系统工程方法论: 从TBSE进阶到MBSE[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2022.
- CHEN J, LU M. System engineering methodology: from TBSE to MBSE[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2022.
- [14] 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述[J]. *航空发动机*, 2016, 42(4): 12-16.
- ZHU J, YANG H, GAO Y H, et al. Summary of model based system engineering[J]. *Aeroengine*, 2016, 42(4): 12-16.
- [15] PARROTT E. SysML distilled: a brief guide to the systems modeling language[J]. *Insight*, 2014, 17(2): 63-63.
- [16] MORKEVICIUS A, BANKAUSKAITE J, JANKEVICIUS N. Towards standards-based execution of system of systems models[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 157-162.
- [17] GOUGH K M, PHOJANAMONGKOLKIJ N. Employing model-based systems engineering (MBSE) on a NASA aeronautic research project: a case study[C]//*Proceedings of 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. [S.l.: s.n.], 2018.
- [18] ANYANHUN A. The niftiness of executable MBSE black box models: a satellite subsystem exemplar[C]//*Proceedings of 2022 IEEE MetroCon*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-3.
- [19] DENG Y C, MAO Y X, LU Z A, et al. Analysis of the development of model-based systems engineering application[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(7): 49-54.
- [20] HE Q, LIU X Y. Tamp the foundation of systems engineering and steadily promot MBSE practice[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(7): 22-29.
- [21] 康开华, 杨秋皓. 基于模型的系统工程(MBSE)应用于航天运载型号[J]. *军民两用技术与产品*, 2022, (11): 28-32.
- KANG K H, YANG Q H. Model-based systems engineering (MBSE) applied to space launch vehicle[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2022, (11): 28-32.
- [22] SONG Y, ZOU R P, WANG J. On the practice of model-based system engineering in missile development[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(S1): 97-106.



[作者简介]



李红光 (1997-), 男, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为天地一体化网络、数字孪生、MBSE 建模。



周一青 (1975-), 女, 中国科学院计算技术研究所无线中心副主任、研究员, 主要研究方向为计算与通信融合、异构网络、干扰管理。



刘焱圻 (1995-), 男, 现就职于中国科学院计算技术研究所, 主要研究方向为天地一体化网络架构、先进信息网络试验平台、孪生平台。



石晶林 (1972-), 男, 中国科学院计算技术研究所无线中心主任、研究员, 主要研究方向为天地一体化网络、计算与通信融合、工业级 5G 基带芯片。