



研究与开发

面向卫星通信网的综合仿真集成技术研究

邵富杰¹, 李文屏¹, 肖双爱², 王志浩²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 中国电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 以支撑构建通用、开放、高可信度的卫星通信网仿真系统为应用目的, 研究卫星通信网综合仿真集成技术。针对卫星通信网多层次仿真需求, 设计了基于软总线的卫星通信网仿真集成架构, 用于支撑实现卫星通信网各层级粒度模型软件的灵活交互集成。面向卫星通信网及其建模仿真工具特点, 设计数据+模型+软件的综合集成方式, 用于支持松耦合卫星通信网仿真系统的集成构建。针对卫星通信网组成系统设备特点, 从物理链路、网络协议、运行控制3个层面设计虚实结合的仿真集成方法, 为开展卫星通信网虚实结合仿真验证提供支撑。最后, 结合具体项目进行了应用实践。

关键词: 卫星通信网; 多层次仿真; 仿真集成; 虚实结合

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025180

Research on comprehensive simulation integration for satellite communication networks

SHAO Fujie¹, LI Wenping¹, XIAO Shuang'ai², WANG Zhihao²

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

2. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: The research of integrated simulation technologies for satellite communication networks was focused on, aiming to support the construction of a universal, open, and high reliable satellite communication network simulation system. In response to the multi-level simulation requirements of satellite communication networks, a software bus-based simulation integration architecture was proposed to enable flexible interactive integration of hierarchical granularity models and software components. Addressing the characteristics of satellite communication networks and their modeling/simulation tools, a comprehensive integration approach was designed combining data, models, and software to facilitate the development of loosely-coupled satellite communication network simulation systems. Considering the system equipment features of satellite communication networks, a virtual-real integrated simulation methodology was developed from three dimensions: physical link layer, network protocol layer, and operational control layer, providing technical support for virtual-real collaborative simulation verification. Finally, practical application was demonstrated through specific implementation projects.



Key words: satellite communication network, multi-level simulation, simulation integration, virtuality and reality combination

0 引言

卫星通信网包括在轨卫星、信关站、管控中心以及各类用户通信终端等,是规模大、造价高的复杂通信系统。为了降低系统的研制风险和成本,提高系统研制质量,在卫星通信网的研究建设过程中经常要采用建模与仿真的方法,对设计方案、关键技术、系统指标等进行验证评估。卫星通信网仿真涉及卫星轨位、通信链路、网络协议、运行控制以及用户业务等专业领域内容,开展卫星通信网的整体发展论证、技术研究以及研制建设,需要一个通用系统性综合各专业领域的卫星通信网仿真平台,高效集成贯穿各专业不同粒度模型仿真已成为其面临的重要问题。

建模仿真手段作为人类认识客观世界的一种重要途径,广泛应用于社会经济和国防建设各领域。随着网络化、智能化发展,各领域对复杂问题进行研究的需求大大增加,同时促进了仿真技术的不断发展和应用,仿真模式、技术体系逐步拓展完善^[1-6]。面向复杂工程体系的分析、研制,张霖等^[1]给出了基于建模仿真的体系工程研发模式。面向提升航天工程系统设计、验证能力,包为民^[2]论述了航天器仿真技术体系的需求与构想,阐述了所涉及的关键技术。彭超等^[3]分析阐述了北约建模与仿真组(NMSG)提出的建模与仿真即服务的概念,并设计了相应参考架构,支撑按需部署与执行组件化的分布式仿真环境。段红等^[4]梳理了网络化仿真的模式和应用。程健庆^[5]梳理了国内外仿真主要项目、系统和技术,分析了主要差距。卞雪卡^[6]分析了建模与仿真的发展趋势。在卫星通信网仿真相关方面,国内利用商用工具软件也开展了一定的联合仿真方案设计和集成开发实践^[7-10],针对复杂星座设计的需

求分析介绍了卫星星座设计软件和网络仿真软件,并提出了一种基于 Windows 平台的总体仿真方案,将 STK (satellite tool kit) 与 OPNET Modeler 相结合进行设计仿真^[7]。针对天地一体化信息网络规模庞大且技术多样,提出了一种云计算环境中卫星链路仿真方法,融合 OpenStack 和 STK 构建天地一体化信息网络仿真平台^[8]。针对星地链路设计与计算,提供了一种利用 STK/MATLAB 接口与 MATLAB 程序进行动态链路数据交互的联合仿真方法^[9]。针对现代微小卫星多领域复杂系统的建模与仿真,通过 MATLAB 软件接口实现了 MATLAB/Simulink、ADAMS、ModelSim、Pro/E 以及 STK 等软件集成^[10]。上述实践基本上都是基于 MATLAB 接口调用的集成,仿真规模、运行效率、开发方式都比较受限。

本文面向通用系统性卫星通信网络仿真平台系统的建设,针对卫星通信网主流的建模仿真方法,开展了综合仿真集成技术研究,设计了基于软总线的仿真集成架构、数据+模型+软件的数字仿真综合集成模式,并对虚实结合的仿真集成技术进行了研究,以实现对各专业仿真不同粒度模型、不同类型仿真资源集成,支撑构建通用、开放、高可信度的卫星通信网仿真系统。

1 基于软总线的仿真集成架构

卫星通信网仿真可分为卫星网络层面仿真、系统节点层面仿真、载荷设备层面仿真。卫星网络层面仿真以网络节点模型为基础,主要模拟网络节点(卫星节点、信关站、用户节点)之间的连接、交互以及整个通信网络的工作运行;系统节点层面仿真以载荷设备模型为基础,主要模拟通信卫星、信关站、用户等类网络节点内部的各载荷设备(天线、通信处理载荷、交换路由设

备、星载控制设备)之间的连接关系、信息交互,以反映单个网络节点的工作运行情况;载荷设备层面仿真以设备模块模型为基础,主要模拟各组成模块单元(接收天线、发射天线、天线波束控制、射频通道、数模转换模块、波形处理模块、基带接口处理等)之间的关系和信息交互,反映载荷设备的工作运行情况及设备性能效能。面对上述不同类型系统、众多节点、各类通信载荷、大量模块的模型集成仿真,设计提出基于软总线的卫星通信网多层次仿真结构,如图1所示,支撑卫星通信网多层次仿真系统构建。

仿真软总线是仿真系统的通信交互层,通过定义不同类型卫星通信网仿真系统软件交互的标准接口,使得符合标准要求的各类网络节点/载荷设备等仿真模型能够以“即插即用”的方式灵活地进行互联互通互操作,解决卫星通信网仿真模型之间的互操作和数据交换问题。为仿真各成员之间、数字模型之间提供消息通信,完成数据的传输、匹配、服务质量(quality of service, QoS)管理,将数据准确、实时可靠地从一个仿真模型传输到另一个仿真模型。鉴于中间件可支持实现

分布式应用软件在不同技术之间的数据共享和应用互操作,仿真软总线一般基于主流中间件(middleware)进行适配扩充,可支持数据分发服务(data distribution service, DDS)、消息队列(message queue, MQ)等多种通信中间件的应用。针对卫星通信网络集成、系统网络节点集成等不同集成层次,通过配置总线交互范围实现数据共享与隔离。

卫星网络层面仿真通过体系仿真总线将星座轨位、网络结构、通信链路、网络节点、运行管控等数字模型集成,实现网络整体规模、总体架构和主要业务流程的模拟仿真。其中网络节点模型可接入节点级仿真模型,进行不同粒度节点模型的仿真运行。

系统节点层面仿真通过节点仿真总线将卫星节点内部、信关站节点内部、用户节点内部主要的载荷设备组成和功能模型进行数据交互集成,实现各网络节点载荷设备组成、功能流程、工作机制等的模拟仿真。

载荷设备层面仿真主要实现载荷设备工作情况及功能性能的模拟,主要是对载荷设备组成模

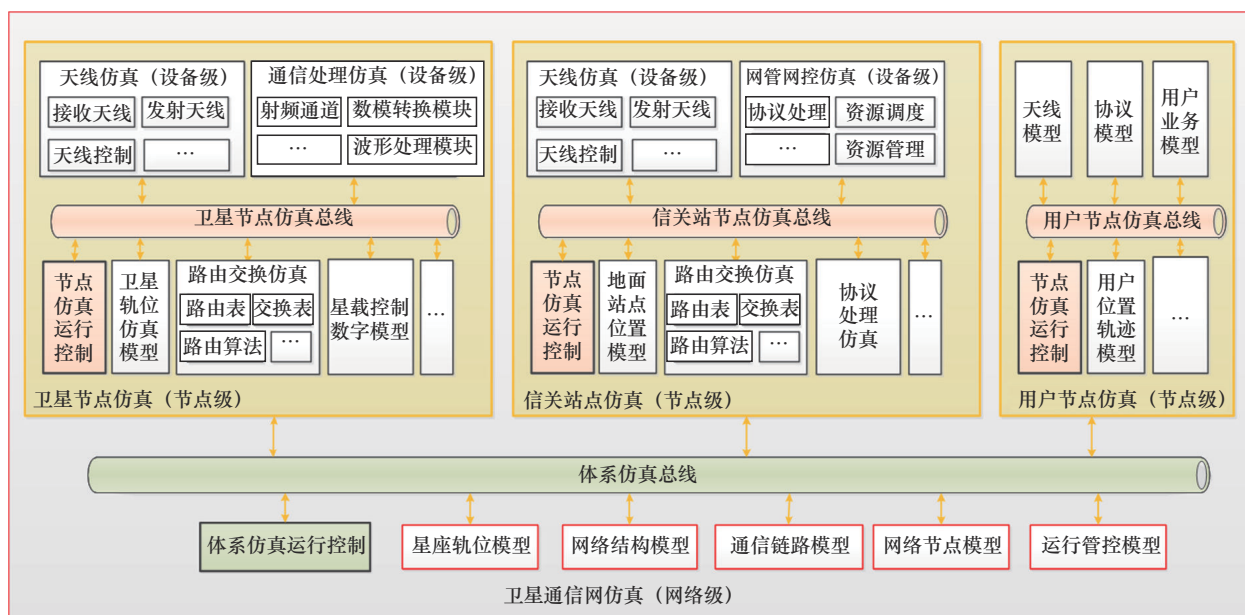


图1 基于软总线的卫星通信网多层次仿真结构



块的功能性能模型进行集成,考虑载荷功能模块间的仿真交互数据相对较少,建议采用模块调用集成或软件消息交互集成。虽然此仿真集成架构也支持载荷设备通过软总线进行集成,但本文主要针对系统节点层面和网络层面仿真集成开展研究。

2 数据+模型+软件的数字仿真综合集成模式

在卫星通信网的研制过程中,一般要搭建实物系统的测试验证环境用以测试卫星通信系统实物设备的功能实现情况和达到的性能指标;也要利用数字仿真技术开展系统架构及关键技术的试验验证,模拟计算通信网络的主要能力指标。针对卫星通信系统研制中的各类设计指标、实物测试验证环境中的测试试验数据、不同工程研究专业领域积累的数字化模型、仿真算法以及软件系统等,提出数据+模型+软件的数字仿真综合集成模式,支撑实现高可信度松耦合全功能的卫星通

信网仿真系统构建。卫星通信网综合集成模式如图2所示。

数据集成方面,本文研究采用面向卫星通信网仿真运行和系统评估的综合数据集成方法,构建的数据模型一方面用于参与仿真运行,另一方面用于支撑系统效能评估。对载荷装备的设计参数、通信性能指标、网络规模配置等进行梳理建模,形成数据参数模型,通过仿真模型参数配置加载耦合,参与仿真运行;对实物测试验证环境中的任务时间、传输组网性能等指标测试数据进行采集录入集成为卫星通信网能力数据模型,支撑系统效能评估。

模型集成方面,本文针对分布式建模需求和卫星通信网各异的仿真工具环境,研究卫星通信网差异化模型集成方法。针对卫星通信网设计研制中产生的系统设计模型,采用sysML语言统一描述,分解模型组成、规范定义接口关系,采用MagicDraw工具进行模型合并集成;针对通信卫星的三维外观模型及各节点设备参数模型,采用

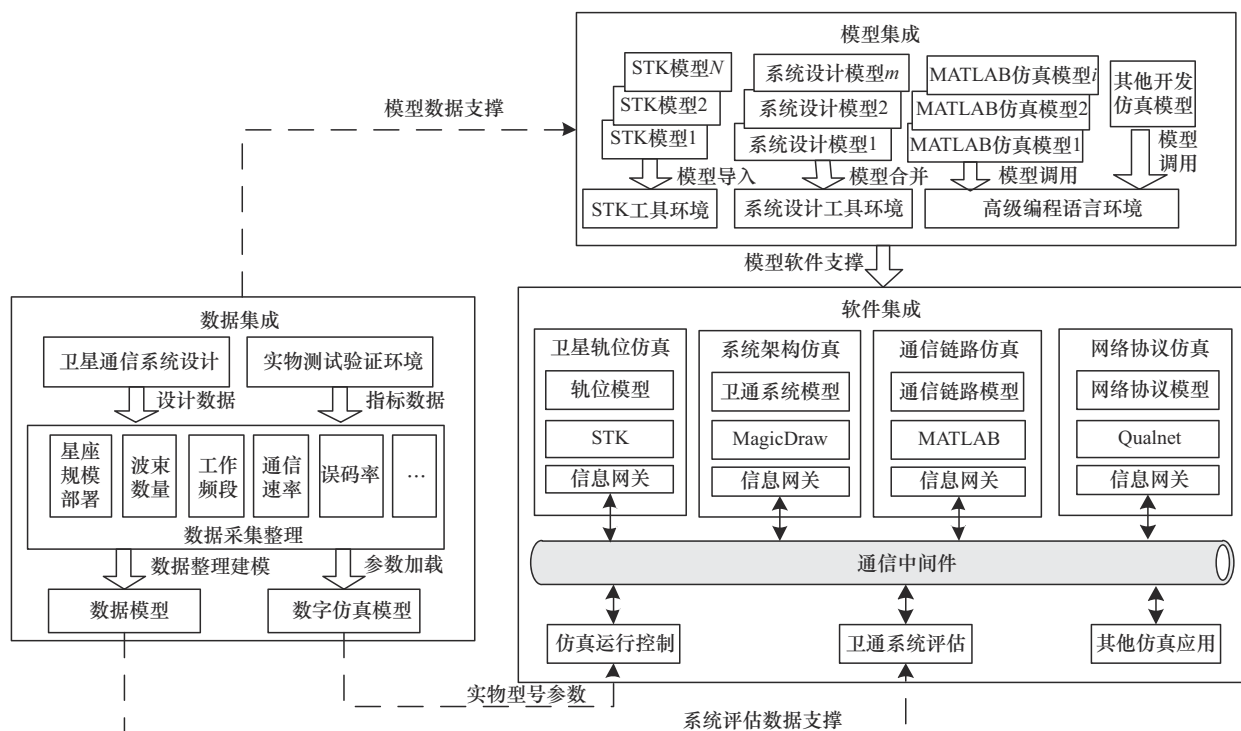


图2 卫星通信网综合集成模式

STK工具进行分类集成,对三维外观模型将3D模型转换成STK支持的格式进行直接导入集成,对通信设备模型按照参数配置进行集成;对于轨道模型集成,可采用星历数据文件导入集成和参数配置集成;针对基于MATLAB开发的卫星通信仿真算法(如天线仿真模型、通信处理仿真模型等)以及其他编程语言开发的仿真模型,采用高级语言环境对模型算法进行嵌入调用或服务调用集成。

软件集成方面,主要是针对可运行的卫星通信网模型软件或数字系统进行消息交互集成。开展全系统卫星通信网仿真包括卫星轨位仿真、通信链路仿真、网络协议仿真、系统架构仿真等。单一仿真工具软件已难以满足复杂通信网络仿真需求。卫星工具包STK是航天领域先进的系统分析软件,具有强大的分析能力,能够生成轨道/弹道星历表,建立各类卫星的轨道运动学和动力学模型,可进行卫星与地球站的可见性分析、卫星的覆盖性分析、链路特性分析等^[11],但是欠缺对通信网络的建模能力;MATLAB提供的通信工具箱或SIMULINK提供的模型库建模和动态仿真已成为通信链路仿真的普遍方法^[12],但不能开展网络协议仿真;OPNET、NS2、QualNet等流行网络仿真软件,支持对数据链路及以上各层网络协议建模,但不能对卫星轨位和通信链路建模仿真。MagicDraw是用于描述系统架构的建模工具软件,用来对卫星通信网的系统架构和行为流程仿真。设计实现的基于容器的低轨卫星网络协议测试床,利用STK导出的拓扑进行网络配置,不进行动态交互集成^[13]。已有研究者针对各自仿真研究任务需求实现了部分仿真软件集成,实现了QualNet与STK的混合仿真集成^[14],实现了STK与MATLAB的集成^[15]。上述集成方式都是基于商用软件的接口开发调用集成模式,运行效率、集成范围和规模受限。本文面向通信网全系统全领域仿真需求,提出利用通信中间件以及结合信

息网关方式实现STK、MATLAB、QualNet、MagicDraw等各类别的仿真软件的集成,实现卫星轨位、通信链路、网络协议以及系统架构的统一集成仿真运行。

本文针对卫星通信网全域多层次仿真需求,研究设计的数据+模型+软件的数字仿真综合集成模式,3种集成方式既各有侧重应用,又互相支撑递进。数据集成可充分利用卫星通信网系统实际参数和数据对仿真模型进行修正补充和完善,进一步提升卫星通信网仿真可信度;模型集成可充分利用系统研制各单位的数字成果,支持模型的分布式开发,有利于数字成果的复用,可提高系统的开发效率;软件集成可实现不同类型模型软件的协同仿真,支持松耦合仿真系统实现。

3 虚实结合的仿真集成方法

在卫星通信网系统集成验证中,面临关键指标性能验证、协议一致性测试验证、网络传输能力验证、网络运行流程验证等需求。为了充分开展系统指标能力验证,需要将已研制的物理样机、功能软件等实物系统在虚拟构造的仿真环境中进行测试和反复验证。因此,卫星通信网仿真系统中需要集成天线、通信处理、通信波形、路由交换、网管网控、用户终端等实物系统设备,针对这些不同功能类别的实物设备,按照物理链路、网络协议、运行控制3个层面分析设计实物系统与虚拟仿真的结合验证及仿真集成。物理链路层面虚实结合主要指接入天线、信号处理、通信波形等物理层功能设备,网络协议层面虚实结合主要指接入网络骨干节点、用户业务终端等网络层以上设备,运行控制层面虚实结合主要指接入实际网管网控等控制面设备。

对于天线、信号处理、通信波形等物理层功能设备/软件,不能直接接入卫星通信网仿真系统。需要构建与其功能性能一致的数字孪生,再将数字孪生集成到整个通信网络系统仿真中。

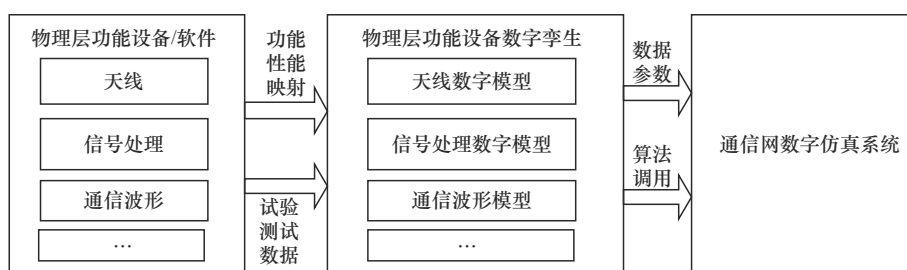


图3 物理链路层虚实交互方法

“数字孪生是物理对象的数字模型，该模型可以通过接收来自物理对象的数据而实时演化，从而与物理对象在全生命周期保持一致。基于数字孪生可进行分析、预测、诊断、训练等并将仿真结果反馈给物理对象，从而帮助对物理对象优化和决策。”^[16]卫星通信网物理层功能设备数字孪生是其在数字虚拟空间的功能映射，通过与实物设备数据不断交互迭代，实现逼真体现物理设备的性能效能。数字孪生与整个通信网络系统仿真集成可采用数据集成或者模型集成方式，物理链路层虚实交互方法如图3所示。数据集成方式是物理层功能设备数字孪生将设备性能效能参数（如通信误码率）等整理成数据剖面表集成到整个通信网络系统仿真中；模型集成方式是将物理层功能设备数字孪生模型进行算法封装，通信网络系统仿真根据状态变化进行软件算法调用。

对于网络骨干节点实物样机（路由交换设备），可采用网络节点映射方式接入通信网数字仿真系统中。在通信网仿真系统中利用数字仿真模型构建了卫星通信仿真网络，针对实物骨干网络节点设备接入，采用网络节点地址映射与转换方法实现虚实节点交互。骨干网络节点虚实交互方法如图4所示。即实物节点端口和虚拟节点端口进行网络节点地址映射，建立并存储二者之间的网络地址映射关系。当虚拟空间内的节点与实物节点需要进行数据交互时，进行网络地址转换，从而虚拟节点能够接收处理实物节点发送的数据包，实物节点能够接收处理仿真系统发送的虚拟节点数据包。

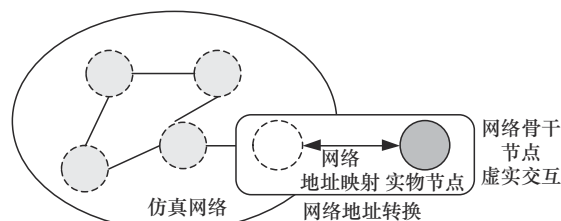


图4 骨干网络节点虚实交互方法

对于实际用户业务终端，可通过设计自定义接口（包括应用传输协议）接入通信网数字仿真系统中。卫星通信网数字仿真系统中的仿真网络与用户实物设备通过自定义接口确定实物节点与虚拟节点的映射关系，建立并存储二者之间的节点映射关系。用户节点虚实交互方法如图5所示。当虚拟空间内的节点向实物节点传输数据时，传输至已映射的虚拟节点时，经过自定义半实物接口直接转发至实物节点进行处理；当实物节点向虚拟空间内的节点传输数据时，经过自定义半实物接口直接转发至已映射的虚拟节点，再经过虚拟网络转发至目的节点。

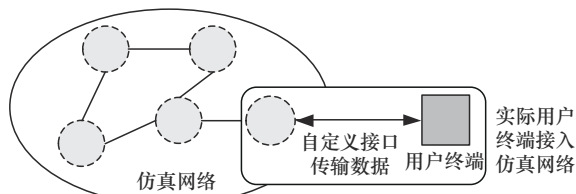


图5 用户节点虚实交互方法

对于实际网管网控系统，可将其软件移植到通用计算环境中，经过接口适配集成接入卫星通信网数字仿真系统中。运行控制面虚实交互方法如图6所示。卫星通信网数字仿真系统中配置输

出网络场景和通信需求，激励实际网管网控系统运行，网管网控将资源分配和控制策略输出给卫星通信网数字仿真系统，数字仿真系统根据网管网控的调度控制运行网络。

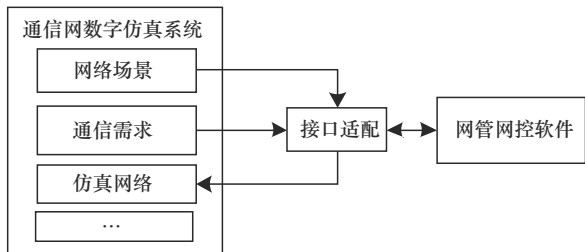


图6 运行控制面虚实交互方法

4 应用实践

以实际项目为应用背景，依托本文提出的基于软总线的卫星通信网仿真集成架构、数据+模型+软件的综合集成方式、虚实结合仿真集成技术等进行了实践，开展了某卫星通信网的虚实结合仿真验证系统的集成设计。某虚实结合仿真验证

系统综合集成设计如图7所示。各算法模型集成为模型软件：卫星轨位、通信节点、链路计算等模型集成为场景仿真软件，路由交换、网络拓扑、网络协议等模型集成为网络仿真软件，收发天线、通信处理等模型集成为链路仿真软件，资源调度、网络管理等模型集成为管控仿真软件；各仿真模型软件之间通过软总线集成为通信网综合仿真系统；对实物系统设计与集成试验过程中，通信设备指标参数和测试数据进行整理建模，作为模型配置参数和试验驱动信息来支撑系统仿真验证；对网控软件、路由设备、用户业务终端等实物系统接入集成通过研发实装网关实现虚实系统之间的交互与操作。

依此设计，开展了相关卫星通信网设计指标参数的数据录入与应用集成、通信波形模型的服务调用集成、场景仿真的消息交互集成等。波束参数编辑录入界面如图8所示，天线参数编辑录入界面如图9所示，波形模型调用集成如图10所示，系统集成交互消息记录如图11所示。

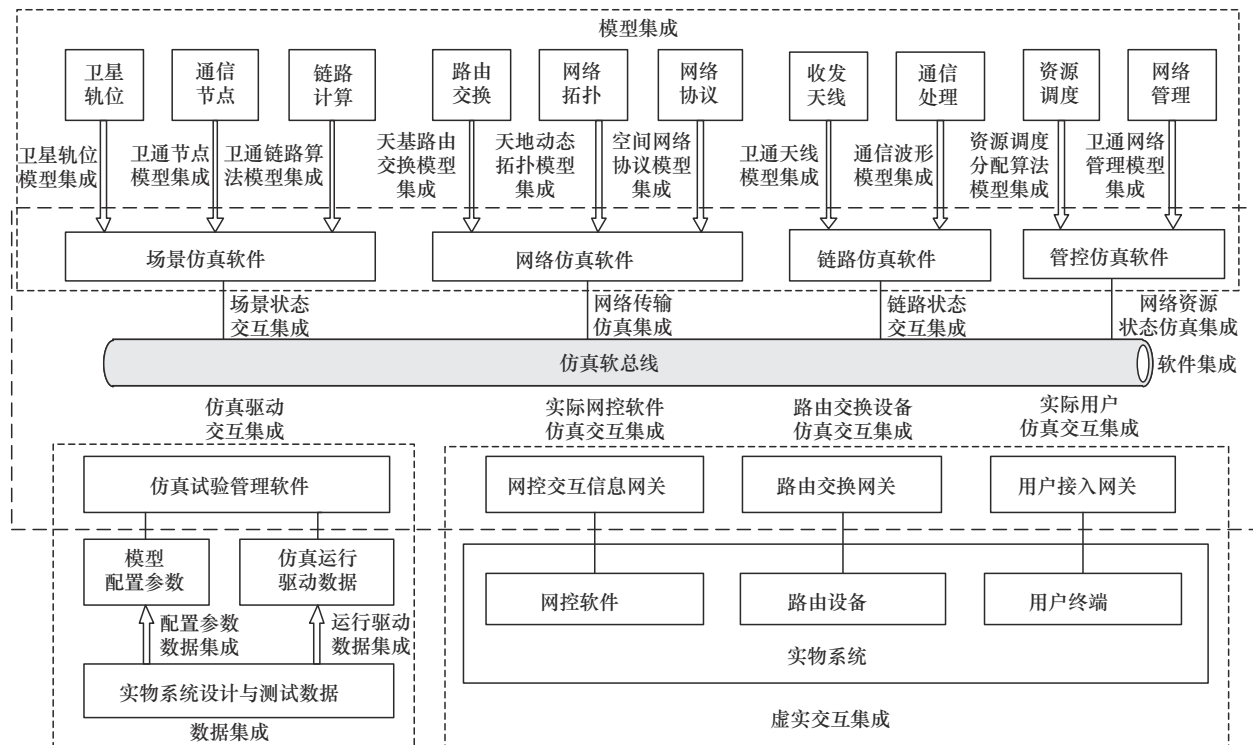


图7 某虚实结合仿真验证系统综合集成设计



图8 波束参数编辑录入界面



图9 天线参数编辑录入界面

在项目实践中,通过对卫星通信网相关数据、模型、软件松耦合设计,场景、天线、波形、网络等各组成部分模型并行开发集成迭代开展,总体仿真集成效率大大提高。

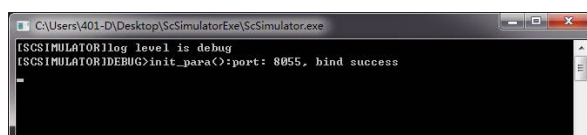


图10 波形模型调用集成

5 结束语

本文针对卫星通信网多层次多粒度多类别模型仿真集成,提出了设计基于软总线的卫星通信网仿真集成架构、数据+模型+软件的数字仿真综合集成方式,同时针对卫星通信网系统能力验证需要,研究分析了虚实结合仿真验证技术,设计了从物理链路、网络协议、运行控制3个层面的开展虚实结合的仿真集成方法。并结合实际项目对本文提出的方法进行了实际仿真集成设计和部分实现。但是卫星通信网仿真任务目标各异,建模工具环境多样、仿真模拟方式不尽相同,仿真集成技术方法也会有差异,本文研究侧重通信网络功能仿真集成,旨在为卫星通信网仿真集成提供一种技术思路和参考方法,对于具体信号处理集成、模型算法以及仿真系统构建等还待后续研究。

参考文献:

- [1] 张霖,王昆玉,赖李媛君,等.基于建模仿真的体系工程[J].系统仿真学报,2022,34(2).

```
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_GG_TOPD_UPDATE","net_id":1,"scene_id":1,"topo":{"3002,3001},{3005,3003}}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VI_TASK_LOAD_RSP","net_id":1,"scene_id":1,"result":1}
=====场景启动消息发送=====
{"msg_type":"IV_DEMON_START","net_id":1,"scene_id":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"IV_DEMON_START","net_id":1,"scene_id":1,"result":1}
=====终端启动消息发送(业务ID)=====
{"msg_type":"IV_TER_START","net_id":1,"scene_id":1,"buss_id":{"55","58","56","57"}}
=====终端启动消息发送(终端ID)=====
{"msg_type":"UT_TER_START","net_id":1,"scene_id":1,"ter_id":{"3009,2013,5004,2015,4004,2014,4005,2014}}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":0,"ter_id":3009,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":0,"ter_id":2013,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":1,"ter_id":3009,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1,"sat_id":3001,"forbear":6015,"backbear":6015}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":1,"ter_id":2013,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1,"sat_id":3001,"forbear":6003,"backbear":6003}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":0,"ter_id":5004,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":0,"ter_id":2015,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":1,"ter_id":5004,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1,"sat_id":3001,"forbear":6001,"backbear":6001}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":1,"ter_id":2015,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1,"sat_id":3001,"forbear":6003,"backbear":6003}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":0,"ter_id":4004,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":0,"ter_id":2014,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1}
=====消息接收=====
{"msg_type":"VP_TER_ONLINE","net_id":1,"scene_id":1,"process":1,"ter_id":4004,"time":"2025-03-16 17:29:53","result":1,"sat_id":3001,"forbear":6013,"backbear":6013}
```

图11 系统集成交互消息记录

- ZHANG L, WANG K Y, LAI L Y J, et al. Systems engineering based on modeling and simulation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2).
- [2] 包为民. 对航天器仿真技术发展趋势的思考[J]. 航天控制, 2013, 31(2): 4-8.
- BAO W M. The development trend of aerospace craft simulation technology[J]. Aerospace Control, 2013, 31(2): 4-8.
- [3] 彭超, 乐剑, 刘洁. 北约建模与仿真即服务研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 1-4, 100.
- PENG C, LE J, LIU J. A study on NATO modelling and simulation as a service[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 1-4, 100.
- [4] 段红, 邱晓刚. 网络化仿真及其发展趋势[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(7): 1526-1533.
- DUAN H, QIU X G. Networked simulation and its development trend[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1526-1533.
- [5] 程健庆. 军用系统建模与仿真技术发展展望[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(4): 1-8.
- CHENG J Q. Prospect and development of modeling & simulation technology of system in the military affairs[J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(4): 1-8.
- [6] 卞雪卡. 建模与仿真技术的发展及其展望[J]. 市场周刊, 2020, 33(5): 173-174.
- BIAN X K. Development and prospect of modeling and simulation technology[J]. Market Weekly, 2020, 33(5): 173-174.
- [7] 周砚茜, 冯旭哲, 代建中. 卫星星座设计仿真软件综述[J]. 计算机与现代化, 2019(8).
- ZHOU Y Q, FENG X Z, DAI J Z. Review on satellite constellation design and simulation software[J]. Computer and Modernization, 2019(8).
- [8] 刘渊, 张浩, 叶海洋, 等. 面向天地一体化信息网络的卫星链路仿真研究[J]. 通信学报, 2018, 39(4): 56-67.
- LIU Y, ZHANG H, YE H Y, et al. Research on satellite link emulation for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(4): 56-67.
- [9] 李博, 叶晖, 张宏伟, 等. 基于 STK/Matlab 接口的卫星通信链路研究[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(6): 37-40.
- LI B, YE H, ZHANG H W, et al. Dynamical satellite link budget analysis based on STK/Matlab interface[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(6): 37-40.
- [10] 何威, 张世杰, 曹喜滨. 基于软件接口的卫星多领域建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 7-12.
- HE W, ZHANG S J, CAO X B. Multi-domain modeling and simulation of satellite based on software interfaces[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(1): 7-12.
- [11] 高丽娟, 代健美, 李炯, 等. 卫星通信与 STK 仿真[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2022.
- GAO L J, DAI J M, LI J, et al. Satellite communication and STK simulation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2022.
- [12] 杨育红, 王彬, 韩乾, 等. 通信系统仿真实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- YANG Y H, WANG B, HAN Q, et al. Communication system simulation experiment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [13] 潘恬, 李星辰, 薛文浩, 等. 一种基于容器的低轨卫星网络协议测试床[J]. 计算机学报, 2022, 45(9): 2029-2046.
- PAN T, LI X C, XUE W H, et al. A docker-based LEO satellite network testbed[J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(9): 2029-2046.
- [14] 郑艺, 王玉文, 孟凡计. 卫星通信网建模与仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(7): 64-67, 100.
- ZHENG Y, WANG Y W, MENG F J. Research on satellite communication network modeling and simulation method[J]. Computer Simulation, 2013, 30(7): 64-67, 100.
- [15] 汪洲, 彭晓源. 基于 HLA 的分布式卫星通信仿真系统的构建[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2747-2750.
- WANG Z, PENG X Y. The construction of distributed simulation system for satellite communication based on HLA[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(12): 2747-2750.
- [16] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.
- ZHANG L, LU H. Discussing digital twin from of modeling and simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.

[作者简介]



邵富杰 (1980-), 男, 北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 主要研究方向为卫星通信系统总体设计、通信系统仿真。

李文屏 (1984-), 男, 北京跟踪与通信技术研究所副研究员, 主要研究方向为卫星通信系统总体设计、天基信息传输。

肖双爱 (1977-), 女, 中国电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为信息系统设计、系统仿真。

王志浩 (1992-), 男, 中国电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信、系统仿真。