

# 数实融合的大规模卫星云网仿真技术

丁文慧, 丁熙浩, 徐志平, 高吉星, 陆洲, 虞志刚

(中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041)

**摘要:** 现有卫星网络仿真聚焦通信接入、网络路由等网络层的系统评估, 难以满足未来卫星网络多功能融合场景下的仿真验证需求。针对以上问题, 提出一种数实融合、云网融合的大规模卫星云网仿真方法, 基于虚拟化技术构建通信、网络、计算功能融合的卫星网络节点, 通过高精度的链路模拟实现卫星网络时变拓扑的模拟, 通过数实接口实现数字空间和物理实体空间的交互, 最终构建一张数实融合的规模卫星云网, 以期为未来卫星网络的仿真验证提供有效支撑。

**关键词:** 卫星云网; 星载计算; 算力网络; 数实融合

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2025008

## Simulation Technology for Large-scale Satellite Cloud Network with the Integration of Digital and Reality

DING Wenhui, DING Xihao, XU Zhiping, Gao Jixing, LU Zhou, YU Zhigang

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

**Abstract:** Existing satellite network simulations focus on system assessments of network layer functions and performance such as communication access and network routing, which are insufficient to meet the simulation verification requirements in scenarios where communication, networking, and computing functions are integrated. In view of the above problems, this paper proposed a large-scale satellite cloud network simulation method that integrated digital and physical domains and cloud-network convergence. By utilized virtualization technology to constructed nodes with integrated communication, networking, and computed functions, high-precision simulation of dynamic and time-variant topologies of satellite networks was achieved through topological connection relationships. Interaction between the digital space and the physical entity space was realized through a digital-physical interface, ultimately constructing a large-scale satellite cloud network that integrated the digital and physical domains. This Approach provided effective support for the simulation and verification of future satellite networks.

**Keywords:** satellite cloud network, satellite computing, computing power network, digital and reality integration

### 0 引言

近年来, 随着一箭多星、高性能卫星载荷等先进电子技术的飞速发展, 以低轨星座为代表的卫星网络迎来了新的一波发展热潮<sup>[1-10]</sup>, 几千颗乃至几万颗的低轨星座计划层出不穷, 如 Starlink<sup>[11]</sup>、Iridium NEXT<sup>[12]</sup>、OneWeb、天算星座<sup>[13]</sup>、智慧天网等星座建设如火如荼。

与此同时, 卫星网络的应用场景也日趋丰富, 除了传统的通信、导航、气象观测等领域, 卫星通信还在应急抢险、航空应用、海洋应用等垂直行业得到了广泛应用<sup>[14-16]</sup>。

面向如此大规模的卫星网络建设, 为保证卫星网络在轨稳定可靠运行, 迫切需要在卫星网络在轨部署之前进行仿真验证, 与真实系统建设相比, 具有成本低、耗

收稿日期: 2024-10-19; 修回日期: 2025-01-10

通信作者: 虞志刚, yzg11@tsinghua.org.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62201534); 北京市科技新星计划 (No.20240484748)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201534), Beijing Nova Program (No.20240484748)

时少等突出优势。

为了验证卫星组网协议的功能和性能，国内外科研人员已经开展了大量探索和研究<sup>[17-22]</sup>，大致可以分为3条技术路线：一是采用STK与MATLAB联合的数值计算方法，该方法可以有效刻画网络的拓扑特性，但是无法支持网络协议仿真以及业务加载；二是采用OPNET、NS/3、Qualnet等网络仿真软件的离散事件仿真方法，该方法无法支持真实业务加载，且网络协议相较于真实协议也存在较大差距；三是采用Docker/VMware等基于虚拟化技术的仿真方法，该方法支持在容器或者虚拟机中加载真实协议，并支持与实物设备进行交互，具有更高的可信度。

然而，随着星载计算能力的不断提升，卫星互联网逐渐从提供广域通联服务的卫星网络向提供全球信息服务的卫星云网转变<sup>[23-25]</sup>。卫星云网是卫星网络与星上计算深度融合的产物，它是指在星间链路互联的卫星网络基础之上，将计算、存储及信息服务功能“前置”到星上处理，极大地提升卫星网络信息服务响应时间<sup>[25]</sup>。与传统的卫星信息网络仅利用卫星作为中继站实现连接功能不同，卫星云网不仅提供信息服务的连接功能，而且提供“连接+计算”的星上服务功能，促使卫星网络由“连接”的网络向“连接+服务”的卫星云网转变。

卫星云网是卫星网络与云计算深度融合的产物，卫星节点在传统的通信、网络功能之外，提供计算服务，并在此基础上，通信、网络、计算资源高度共享、融合，实现卫星网络从传统的管道向服务跃升，提供多样化信息服务。现有的卫星网络仿真聚焦通信接入、网络路由等网络层功能和性能的系统评估，难以满足通信、网络、计算功能融合场景下的仿真验证需求。除此之外，纯实物仿真成本高、周期长、代价大，纯虚拟仿真的真实性又无法得到保障，因此亟须改进当前的卫星网络仿真技术。

本文面向通信、网络、计算功能融合的卫星网络仿真需求，提出了一种数实融合的大规模卫星云网仿真技术。基于虚拟化技术构建通信、网络、计算功能融合的节点，通过高精度的连接关系模拟实现卫星网络动态时变拓扑的模拟，通过数实接口实现数字空间和物理实体空间的交互，最终构建一张数实融合的规模卫星云网，以期对未来卫星网络的仿真验证提供有效支撑。

## 1 研究现状

目前，常见的仿真分析技术手段包括基于数值计算

的仿真、基于离散事件的仿真、基于虚拟化技术的仿真，以及基于实物的仿真验证。

### (1) 数值计算

基于数值计算的仿真分析手段以STK最具代表性，能够为卫星网络拓扑、链路状态等部分特性参数提供理论分析依据<sup>[26-28]</sup>。2009年Achanta等<sup>[29]</sup>在数学仿真分析的基础之上，提出了位置与姿态耦合动力学模型，并利用STK与MATLAB仿真卫星交会对接场景；2023年陈瑞泽<sup>[30]</sup>采用MATLAB和STK软件结合的方式进行了仿真试验，对抗毁性等方面进行了效能评估。但是基于数值计算的仿真分析手段不支持网络协议及业务应用的加载，无法仿真复杂网络场景。

### (2) 离散事件

基于离散事件的仿真分析手段包括OPNET、Qualnet、NS2等<sup>[31-35]</sup>，该类手段可以构建复杂网络场景，并对吞吐量、时延、误码等网络性能进行评估，成本低、可扩展性高。2020年王志浩等<sup>[36]</sup>基于Qualnet网络仿真软件搭建了高低轨混合卫星网络仿真平台，对网络拓扑、协议模型体系和分析评估指标体系进行设计。2020年李星辰<sup>[37]</sup>提出了一种低轨卫星网络仿真系统设计方案，基于容器和虚拟网络设备载体进行离散事件仿真，支持高动态拓扑变化与大规模节点的仿真，支持真实业务流量的承载、分布式扩展及半实物扩展。但是基于离散事件的仿真分析手段不具备加载真实业务流的能力，仿真结果缺乏真实性。

### (3) 虚拟化技术

虚拟化技术和云计算技术的飞速发展，为卫星网络仿真带来了新的发展思路。基于虚拟化技术的仿真分析手段主要利用容器、虚拟机等虚拟化手段，针对卫星网络节点多样、高度动态的特点，通过加载差异化的网络协议构建异构网络节点，并利用拓扑模拟和链路模型实现动态拓扑的高精度模拟，支持复杂网络场景构建，能够加载真实的网络协议和业务流量，支持与实物设备的联动<sup>[38-40]</sup>。除此之外，在虚拟化技术仿真的基础之上，联合利用OpenStack、Kubernetes等云平台技术，可以将广域分布的天基资源联合起来，构建云化的卫星网络仿真系统，支撑更广泛的新技术、新体制的验证。2019年，江南大学研究团队提出了高性能天地一体化信息网络仿真关键技术，利用STK和OpenStack等平台搭建了天地一体化信息网络仿真场景，对卫星网络组网、传输性能进行了测试<sup>[41]</sup>。2022年，北京邮电大学提出一种基于容器的低轨卫星网络协议测试床，以容器为载体，在多核处

理器主机上实现上千个网络节点的仿真与流量测试<sup>[42]</sup>。2023年,西安电子科技大学研究团队提出一种基于云计算技术的低轨卫星网络仿真系统,针对低轨卫星网络结构复杂、节点繁多等特点,利用容器良好的隔离性和资源占用少的优势,在有限的物理资源平台上实现大规模部署,降低了平台部署的复杂度与冗余度,提升了平台的可用性与规模的可扩展性<sup>[43]</sup>。基于虚拟化技术的仿真手段不仅能够支持大规模节点拓展,还可以通过虚实接口实现半实物仿真,成为卫星网络仿真的主流手段<sup>[44-47]</sup>。但是,目前基于虚拟化技术的仿真手段主要针对网络层性能仿真和评估,甚少涉及通信、计算融合仿真与验证。

#### (4) 实物验证

基于实物的分析手段,以国际空间站上的太空通信与导航(SCAN)测试平台为例,以在轨运行的有效载荷为载体,实现对通信、网络、服务等功能的配置与效能评估,但是其运行成本高、灵活度较低,且不支持大规模的网络拓展,不适用于目前规模日渐庞大的卫星网络仿真。

## 2 发展趋势

通过主流的卫星网络仿真方法的对比分析,未来大规模、高动态、功能融合的卫星网络仿真逐渐向轻量化、融合化、云网化、虚实结合方向发展。

(1) 轻量化。卫星网络规模普遍向千星级甚至万星级方向发展,传统的基于虚拟机和CPU内核的虚拟化仿真手段占用资源较多,构建大规模低轨星座网络消耗硬件资源较多,因此,亟须研究轻量化的卫星网络仿真方法,实现低成本、高效率的系统仿真验证。

(2) 融合化。在航天电子技术的推动下,卫星在轨处理能力日益增强,卫星节点不再仅具有传统转发器功能,而是通信、网络、计算功能融合的单元。因此,卫星网络仿真不应局限于网络自身和性能的仿真评估,而应该向通信、网络、计算功能综合性仿真评估能力拓展。

(3) 云网化。当前,商业航天迅猛发展,星上处理促使卫星通信系统从单星走向星群、星座。与此同时,在垂直行业差异化应用需求和航天电子技术发展的驱动下,迫切需要将广域分布的天基资源联合起来,构建卫星云网,通过仿真测试系统将信息处理、内容分发、在轨存储等服务功能前移至卫星边缘,验证前置服务对用户服务响应速度的提升。

(4) 虚实结合。大规模低轨星座构建需批量化生产在轨运行设备,星座构建前对设备的技术成熟度进行测试验证显得尤为重要。卫星网络仿真测试系统应在大规模虚拟仿真的基础之上,具备实物接入能力,支持在轨设备的地面验证测试。

综上所述,随着大规模低轨星座的发展,亟须构建虚实结合的轻量化、融合化、云网化卫星网络仿真测试系统。

## 3 数实融合的大规模卫星云网仿真系统

面向卫星网络仿真测试系统轻量化、融合化、云网化的发展趋势,提出数实融合的大规模卫星云网仿真系统,利用轻量级虚拟化技术,构建集通信、网络、计算功能于一体的仿真系统,形成数实融合的大规模卫星云网。通过构建卫星云网仿真系统,降低实际系统建设风险和成本,推动卫星互联网建设。

### 3.1 功能组成

数实融合的大规模卫星云网仿真系统在功能上主要由数字部分和实物部分两部分组成。其中,数字部分利用虚拟化技术(例如容器、虚拟机等)实现卫星网络通信、网络、计算功能的模拟,构建一张卫星云网;实物部分主要提供实装的卫星终端、星载基站、星载路由交换、星载计算处理等各类设备,在此之上,通过控制层、管理层和应用层的协同,实现对数实节点的统一管控,为用户提供按需的服务保障能力。数实融合的大规模卫星云网仿真系统功能组成如图1所示。

其中数字部分包括设施层、平台层、连接层、节点层等4层。

设施层是数字部分的运行实体,主要包括服务器、计算机、加速设备、路由器和交换机等基础设施,是卫星云网的节点、链路等具体功能的部署设施。

平台层是数字部分的云化基础平台,通过虚拟化技术将设施层的设备进行抽象,形成统一的云化计算环境,并且利用资源调度编排技术支持规模弹性扩展、功能按需重构,主要包括容器、虚拟机、容器引擎、虚拟机监视器、虚拟化管理平台等,可通过容器或虚拟机的方式为模型部署提供云化环境。

连接层为节点按需配置互联关系,主要是基于开源虚拟交换机(Open Virtual Switch, OVS)、虚拟专用网络(Virtual Private Network, VPN)、虚拟局域网(Virtual Local Area Network, VLAN)等技术,接收控制层连接配置管理的需求,根据控制层的调度策略,形成数字节



图 1 数实融合的大规模卫星云网仿真系统功能组成

点及实物节点之间的连接关系模拟。

节点层主要是基于容器、虚拟机等虚拟化技术构建的卫星网络节点要素，通过加载不同的功能软件或协议，形成通信、网络、计算功能相融合的网络要素，包括卫星、地面站、卫星终端、用户终端、管控系统、应用系统。其中卫星加载连接管理、基础信息、卫星平台模型、接入/路由/核心网模型等功能；地面站加载连接管理、基础信息、接入/路由/核心网模型、算力模型等功能；卫星终端加载连接管理、基础信息、接入模型等功能；用户终端加载连接管理、基础信息、业务 App 等功能；管控系统加载连接管理、基础信息、核心网模型、网控模型、算力模型等功能；应用系统加载连接管理、基础信息、算力模型、应用 App 等功能。

实物部分包括实物连接层和各类实物设备。

实物连接层是数字部分连接层的补充，主要提供实物设备与数字部分之间的接口，接收控制层的调度控制。

控制层是整个仿真系统的控制中枢和大脑，负责全系统的指挥控制功能，主要包括轨道仿真计算、时间统一服务、连接配置管理、节点配置管理、虚实映射关系等。控制层一方面接收管理层的配置策略，并将其转译成控制指令；另一方面将控制指令下发给数字部分和实物部分的连接层和节点层，完成相应的配置。

管理层是用户对仿真系统进行配置及功能调用的窗

口，包括场景配置、态势呈现、数据采集、状态管理及数据管理等功能，通过管理层实现对整个仿真系统节点、连接及系统等功能的配置，同时通过数据采集、状态管理、数据管理等功能支持仿真系统的态势呈现。

应用层是整个仿真系统的对外输出服务，包括场景库、模型库、效能评估等功能，为用户提供预设的场景、模型及效能评估方法，也支持场景、模型及效能评估方法的增删改查。

### 3.2 物理组成

数实融合的大规模卫星云网仿真系统在物理上主要由数字部分、实物部分、星座仿真、仿真总控 4 个部分构成。数实融合的大规模卫星云网仿真系统物理组成如图 2 所示。其中数字部分主要是采用虚拟化技术构建的网络仿真系统，实现对天基、地基、用户端节点的仿真模拟，以及网络节点之间动态连接关系的模拟。

实物部分主要是接入仿真系统的各类设备，通过实物连接交换机与数字部分相连。

星座仿真是数字部分构建网络仿真系统的前置内容，根据星座规划完成轨道计算、链路计算，输出结果作为网络仿真的依据。

仿真总控主要实现对数字部分和实物部分的管理、控制，并提供场景库、模型库、效能评估等应用层功能。

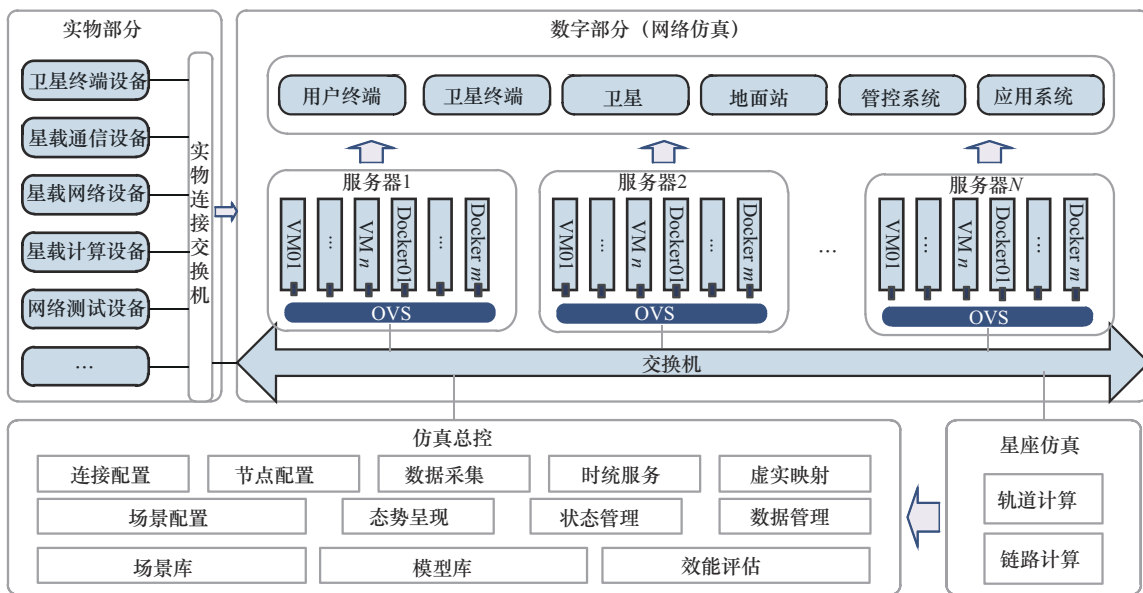


图2 数实融合的大规模卫星云网仿真系统物理组成

### 3.3 仿真特点

本文提出的数实融合的大规模卫星云网仿真系统具有通信/网络/服务功能融合、轻量化节点模拟、虚实结合仿真等特点，其仿真规模、仿真功能和性能对计算能力具有一定的依赖性。

#### (1) 功能融合

面向星载计算能力提升带来的多功能融合卫星网络仿真需求，卫星云网仿真系统在传统卫星网络仿真的基础之上，增加通信、服务等功能部署，不仅能够对网络性能指标进行效能评估，还能够进一步扩展，对用户接入数量、接入带宽等通信指标，以及业务响应速率、分发效率、信息的时效性等服务指标进行评估，为卫星网络运营全流程的系统性评估和仿真分析提供有力支撑。

卫星云网仿真系统功能融合对比分析如图3所示。

#### (2) 轻量化节点

卫星云网仿真系统的数字部分采用虚拟化方式构建节点仿真，对真实节点的通信、网络、计算资源进行虚拟化映射，支持协议、应用功能软件按需加载。采用基于容器的轻量级虚拟化技术，通过构建容器引擎为各类协议软件提供基础运行环境，每个节点的通信、网络、服务功能都可以用一个或多个容器来模拟，同一个节点的功能容器之间通过网络配置进行直连。容器虚拟化软件相较于虚拟机更加轻量化，能够在单台物理机上启动大量的容器节点支撑大规模卫星网络节点仿真，同时容器具备独立的资源空间、完整的内核协议栈和管理接口，因此每个容器节点都能够根据用户配置加载原生的或定

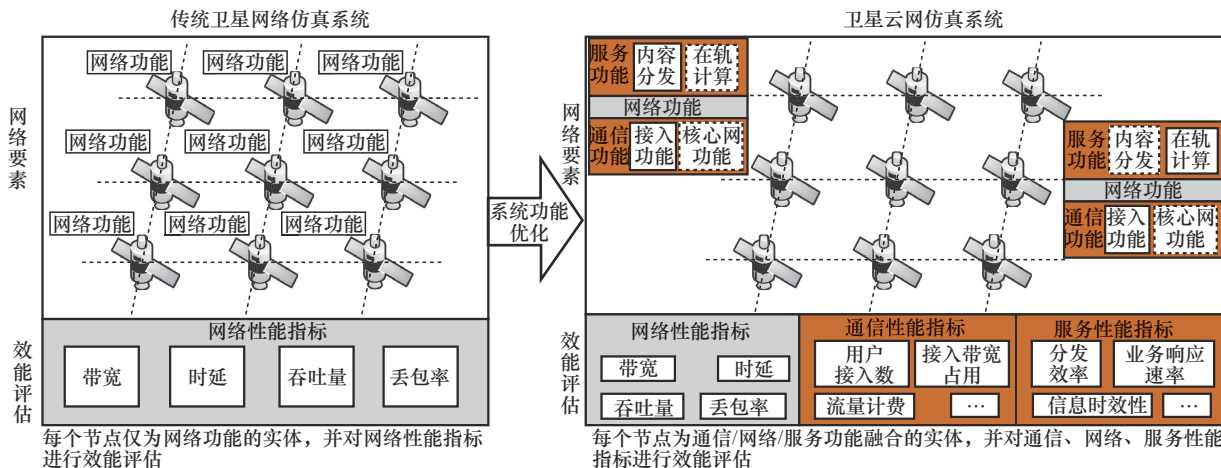


图3 卫星云网仿真系统功能融合对比分析

制化的协议栈，以处理真实的网络流量。轻量化节点构建如图4所示。

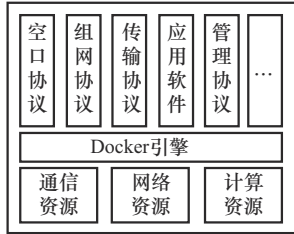


图4 轻量化节点构建

(3) 虚实模拟

卫星云网仿真系统在数字部分大规模网络仿真的基础上，还提供了数实交互接口支持实物设备的接入，能够支持实物设备的功能性能验证测试。卫星网络设备的技术验证需要虚实结合的仿真验证。一方面，卫星网络设备实物验证需要进行实际的部署，成本高昂，周期比较长，灵活度较低；另一方面，纯数字仿真避免了实际部署的难度，但是其可信度取决于仿真模型的准确性和完整性，其仿真的真实性较难保证。因此，实物设备在轨服务前的地面仿真验证就显得尤为必要。卫星云网仿真系统利用计算机、交换机等通用设备，高效率地模拟实物设备在轨运行的动态网络环境，对实物设备进行提前验证，降低了验证成本和部署风险，提高了试验验证的真实性。

(4) 计算资源依赖

卫星云网仿真系统通过设备扩展能够支持大规模卫星网络仿真，但是其仿真的规模、功能、性能对仿真系统的算力有一定的依赖性。通过仿真试验，以某品牌服务器为例（CPU：64核2.5 GHz，内存：256 GB），单个基础容器CPU占用约0.2%，内存占用约为800 MB，因此

一台服务器最大可模拟不低于300个容器，考虑到其他基础软件占用资源，设计一台服务器实现300个节点仿真，通过服务器规模扩展可以实现千星级甚至万星级的卫星网络仿真。

4 运行流程

数实融合的大规模卫星云网仿真方法支持全数字的场景仿真，也支持数实互动的仿真，全数字场景仿真是指在没有实物部分接入时，该套网络仿真系统能够独立运行，实现卫星网络通信、网络、计算功能的模拟，支持大规模网络的按需拓展；数实互动仿真是指存在实物设备接入的情况下，该套网络仿真系统能够将实物设备进行统一纳管，并支持在实物设备上的功能灵活部署。

4.1 全数字的场景仿真

全数字的场景仿真是指在服务器、计算机、交换机等通用设备上，利用虚拟化技术手段，模拟卫星节点及其连接关系，构建大规模的低轨星座，验证技术体制的有效性和可行性。全数字的场景仿真如图5所示。

(1) 数字基础设施开启：将设施层的服务器、计算机、交换机等设备加电开机。

(2) 数字平台管理启动：启动设施层上的平台管理功能，例如容器、容器引擎和容器管理软件、虚拟机、虚拟机监视器、虚拟机管理软件等虚拟化功能软件，为节点层、连接层功能部署提供云化资源池。

(3) 仿真管理配置：在管理层根据用户需求进行场景配置，首先配置卫星、地面站、卫星终端、用户终端、管控系统、应用系统等要素的基础信息，在此基础上配置节点上的协议模型和App，如卫星平台模型、接入/路由/核心网模型、算力模型、网控模型、业务App、应用App等，并配置各节点要素之间的连接逻辑。

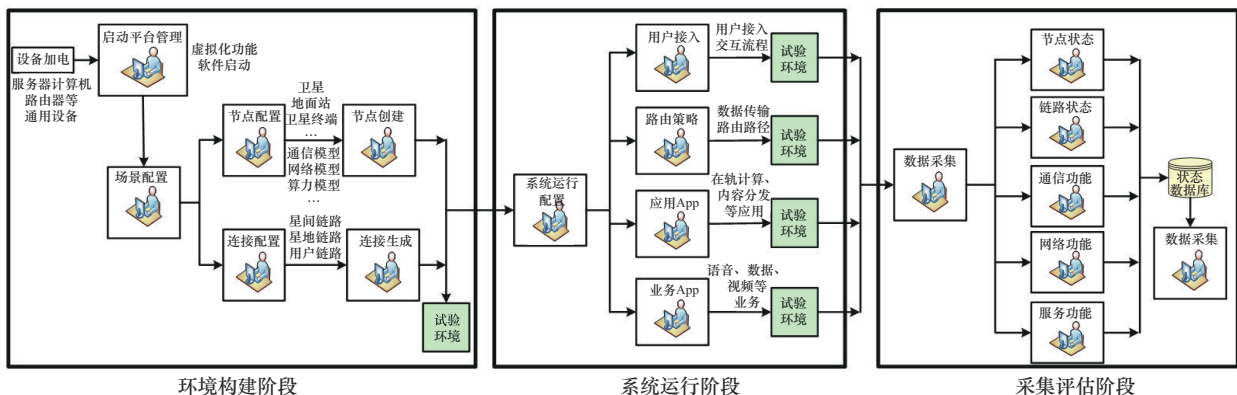


图5 全数字的场景仿真

(4) 控制策略生成：根据管理层的场景配置信息，利用轨道仿真计算实现对各个要素的连接计算，通过节点配置管理、连接配置管理将控制策略下发给节点层和连接层。

(5) 节点创建：节点层根据控制层的策略按需加载协议模型和App，构建不同功能的网络节点。

(6) 连接生成：连接层根据控制层的策略配置生成节点之间的连接关系，包括星间链路、星地链路、用户链路等。

(7) 系统运行：在场景配置触发节点层各要素之间的数据交互流程，包括用户终端的接入流程、路由策略以及应用App、业务App之间的业务数据交互。

(8) 数据采集和管理：在系统运行过程中，通过管理层的数据采集、状态管理、数据管理等模块协同合作，对节点、连接、通信功能、网络功能、服务功能的信息和状态进行采集和管理，并实现数据的持久化存储和实时更新。

(9) 态势呈现：根据数据采集的结果，对网络仿真整体场景进行二维三维显示，包括三维地球渲染与二维地图显示能力、网络拓扑的呈现、通信功能、网络功能、业务功能相关数据的呈现，例如端到端传输路径的实时显示和更新，业务传输的时延、带宽、丢包率等性能参数。

(10) 场景库和模型库：根据场景配置生成的场景可以存储到场景库中，同时提供模型库存储接入/路由/核心网模型、算力模型、业务App、应用App等模型。

#### 4.2 数实互动的场景仿真

数实互动的场景仿真在全数字的仿真基础之上，集成了实物的设备，通过实物连接层实现对设备状态和业务数据的互联互通。数实互动的场景仿真如图6所示。

(1) 实物设备启动，包括卫星终端设备、星载基站

设备、星载路由交换设备、星载计算处理设备等，实物设备通过统一的应用程序编程接口（Application Programming Interface, API）接入实物连接层，通常采用以太网接入交换机的形式，再通过实物连接层即交换机接入数字部分的连接层。

(2) 场景配置过程中在配置数字部分的基础上，给出实物部分的配置信息，包括设备的功能配置，设备之间的连接关系、虚实映射关系等，并将配置信息通过控制层下发到实物部分以及连接层，完成网络环境的构建。

(3) 系统运行过程中，通过场景配置可以触发实物设备与数字仿真节点之间的数据交互，包括用户接入流程、路由策略以及应用App、业务App之间的业务数据交互，其交互逻辑通过实物连接层实现互联互通。

### 5 仿真功能

数实融合的大规模卫星云网仿真技术主要支撑网络、通信、服务功能仿真，具体仿真流程如下。

#### 5.1 网络功能仿真

利用管理层的场景配置功能，配置数字节点的组成，包括卫星、地面站，并接入星载路由交换设备等实物设备，配置连接关系，包括数字节点及实物节点之间的连接关系。

场景配置信息下发给控制层，其中节点配置管理接收节点配置信息，并控制生成节点层的节点，以及在数字节点和星载路由交换设备上加载相应的路由模型；轨道仿真计算接收连接关系配置计算出网络拓扑连接关系，发送给连接配置管理，连接配置管理控制连接层和实物连接层，构建满足连接关系配置的网络拓扑，完成基础网络构建。

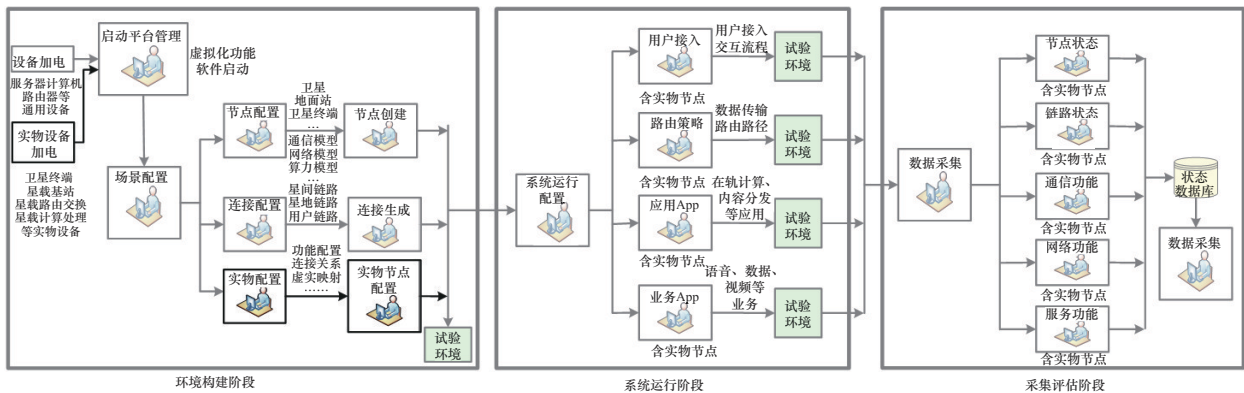


图6 数实互动的场景仿真

在此基础上，可以通过配置网络测试设备或者发包的形式实现对网络性能的测试，例如利用实物连接层和连接层的配合，将网络测试设备连接到两个节点之间，测试其端到端的时延、带宽、丢包率、误码率等信息。在登录节点上，利用 ping 或者 iperf 等命令向另一个节点发送数据包，测试端到端的时延、带宽、丢包率、误码率等信息。

### 5.2 通信功能仿真

在网络功能仿真的基础上，可以融合加入通信功能仿真。利用管理层的场景配置功能，除配置数字和节点的网络层功能外，增加配置卫星终端、管控系统等数字节点，以及星载基站设备、卫星终端设备等实物节点。控制层在数字节点和实物节点上加载相应的接入模型、核心网模型、网控模型等功能。

在此基础上，登录数字或实物的卫星终端，发起用户接入请求，卫星终端的接入模型判定该终端能够接入的卫星，并将请求发送至卫星，卫星的接入模型接收到终端接入请求，将该请求发送给本星的核心网模型或者管控系统的核心网模型。核心网模型根据用户类型判定是否允许该用户接入，如该用户为合法用户，则核心网模型反馈接入成功，并记录用户接入信息。同时将用户接入的资源需求发送给网控，网控根据卫星资源情况及用户请求为用户提供波束、带宽等资源。

### 5.3 服务功能仿真

在网络、通信功能仿真的基础上，可以继续融合计算功能。增加配置用户终端及应用系统等数字节点，以及星载计算处理设备实物节点。控制层在数字节点和实物节点上加载相应的算力模型、业务 App 等功能。

卫星终端接入成功后，用户终端业务 App 发起业务请求，根据业务类型的不同路由模型将业务请求导入相应的应用 App。例如对于宽带业务，用户终端业务 App 请求会被传输至宽带业务服务器，服务器上的应用 App 为用户反馈宽带服务内容。对于移动业务，用户终端业务 App 请求被传输至移动业务服务器查询对方用户终端地址，并将两个用户终端接通，实现移动通话；对于物联网业务，用户终端业务 App 为传感器采集程序，该数据被传输至物联服务器，服务器上的应用 App 接收传感器数据并存储。该应用 App 可以是在地面的算力模型上加载功能，也可以是在星上算力模型中运行。

## 6 关键技术

### 6.1 节点仿真

面向大规模卫星网络仿真需求，对卫星、信关站、用户等节点进行节点仿真，构建不同数量节点的基础试验环境，满足用户不同试验仿真需求。节点仿真可分为单节点仿真和规模化节点仿真。

对于单节点仿真，通过在虚拟化平台中构建单个容器，实现对卫星、信关站等单个网络节点的模拟。根据模拟节点硬件资源需求，创建具备要素完备的虚拟硬件资源和软件资源的虚拟机，如 CPU、内存、硬盘、网口等硬件环境，操作系统、协议模型、应用程序等软件环境，提供兼容各类协议模型的基础平台，便于灵活部署或迁移需验证的各类协议模型。其中，节点的 CPU、内存、硬盘等计算存储资源可直接通过在服务器上映射切分资源实现，而节点的网口还需要虚拟交换机映射调用服务器物理端口实现。此外，为了保证各仿真节点自身网口间数据的隔离性，在每个网口设置不同的 VLAN 号，通过划分 VLAN 的方式实现仿真节点自身网口间数据隔离。网络节点模型示意如图 7 所示。

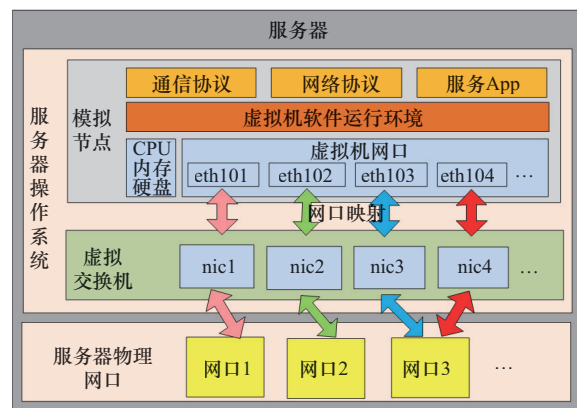


图 7 网络节点模型示意

对于规模化节点仿真，通过规模化部署控制器综合调度资源，在单个服务器上部署多个节点，或者在多个服务器上分别部署节点，实现对卫星、信关站等规模化网络节点的仿真。其中，在多个服务器上部署实现时，各服务器需连接交换机，向各节点提供底层互联互通环境。此外，为了保证各仿真节点间数据的隔离性，在各链路上设置不同的 VLAN 号，通过划分 VLAN 的方式实现仿真节点间的数据隔离。网络系统仿真硬件架构如图 8 所示。

节点规模化仿真对计算资源有一定的依赖性，根据



图8 网络系统仿真硬件架构

“3.3节仿真特点（4）计算资源依赖”中的测算，星地直连通信仿真试验中，实现千星级卫星云网仿真共需4台服务器提供支撑。

### 6.2 链路仿真

针对大规模卫星网络拓扑动态时变、传输时延大等特点，对星间、星地链路进行仿真，主要针对链路连接模拟和链路状态模拟。根据大规模星座仿真设计，利用STK计算星座连接信息、链路特征参数，以此作为链路连接模拟和链路状态模拟的输入。

在链路连接模拟方面，服务器内节点间链路构建通过本服务器中的虚拟交换机实现。各仿真节点可以通过将自身网口映射至相同虚拟交换机的相同端口实现链路构建，也可以将自身网口映射至相同虚拟交换机的不同端口，并配置相同VLAN实现链路构建。服务

器内节点间链路构建如图9所示。

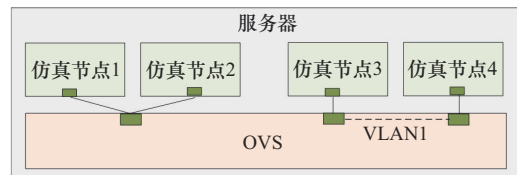


图9 服务器内节点间链路构建

服务器外节点间链路构建通过中间服务器的虚拟交换机实现，即中间服务器中的虚拟交换机通过监测数据流表，并修改链路两端网口数据报文的VLAN号来实现链路构建。服务器外节点间链路构建如图10所示。

在链路状态模拟方面，卫星链路带宽、时延仿真采用的是虚拟网络流量控制技术。通过在相应的虚拟网卡

上建立根队列规则，对经过该虚拟网卡的数据报文进行匹配，符合则将报文放入根队列当中，根队列再根据根分类以及过滤器将报文进行分类，不同的分类可以设置不同的规则，例如设置不同的时延、带宽规则等。并且，由于卫星链路上下行链路带宽往往不对称，因此卫星链路具有单向性，即卫星链路 A-B 的链路特性仿真不同于卫星链路 B-A 的仿真，应当视为两条不同的链路进行仿真。

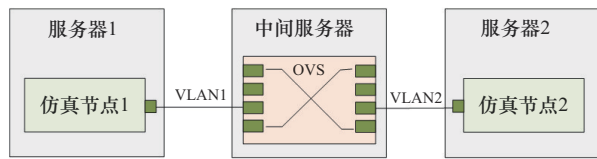


图 10 服务器外节点间链路构建

### 6.3 数实接口

数实融合的大规模卫星云网仿真系统还具备实物系统接入的功能，支持实物部分与数字部分的交互，但数实接口存在协议匹配、数据同步、接口标准化等问题。一方面，数字部分和实物部分通常采用不同的通信网络协议，数实连接时需要做针对性复杂的协议转换和适配，通过交换机在网络层进行数据交互，根据星座设计利用流量引导技术可以将实物节点的数据发送至数字部分相应端口，实现数实交互；另一方面，数字部分和实物部分需保持数据同步，但由于传输时延的存在，数据同步成为一个难题。

除此之外，随着人工智能、数字孪生技术的飞速发展，卫星云网仿真系统也为新型技术的发展和验证提供了有力支撑。一方面，卫星云网仿真系统能够支持真实协议的运行，并产生协议运行结果，可以有效支撑数字孪生的创建和运行，卫星云网仿真系统能够支持虚实联动的仿真，可以为数字孪生系统构建提供前期探索试验；另一方面，卫星云网仿真系统提供的星上计算能力，能够与地面的充足算力协同，实现“地面模型训练，星上模型识别”的功能，为人工智能算法在航空航天领域的技术先期探索提供地面验证试验。

### 6.4 智能管控

随着空间与信息技术的迅猛发展，卫星网络逐渐向规模化、多应用方向发展，星上算力日渐提升，使在轨应用的按需部署越来越受到关注。卫星云网仿真系统为支撑规模化节点和在轨应用的部署，需构建卫星网络的综合管控功能，对仿真系统的网络及应用状态进行实时监控和分析。在此基础之上，利用基于大数据的人工智

能管控算法，根据业务需求和网络状况优化资源调度方案，提高资源利用效率，避免计算资源浪费，从而提升仿真系统的整体性能和效率。

## 7 星地直连通信仿真实例

针对星地直连通信仿真需求，构建通信/网络/服务功能融合的卫星云网仿真系统，测试星上服务和传统地面服务的性能。

在传统卫星网络仿真中，卫星节点仅作为网络层路由节点完成数据转发功能，由地面业务服务器提供服务；而在卫星云网仿真中，卫星节点不仅具有网络功能，还具备通信、服务功能，用户可通过直连卫星完成接入访问请求，并由核心网提供星上服务的地址，直接访问星上业务服务功能，由卫星提供服务。卫星云网仿真与传统仿真系统对比分析如图 11 所示。

针对卫星网络高动态、多功能融合的特性，构建了卫星云网仿真系统，包括 120 个低轨、10 个地面节点及若干个用户的网络环境，并按需在节点上启动通信、网络、服务功能。

针对高价值热点信息，在考虑星历信息、星上存储资源负载均衡以及内容热度的基础上，按需在星上进行数据缓存。对比分析地面提供服务和星地协同服务的访问时延和星地带宽占用，试验结果见表 1、表 2。

表 1 访问时延对比

场景	时延平均值/ms	时延降低百分比
对照组:热点视频通过地面进行分发	31.069	32.42%
试验组:热点视频通过星地协同分发	20.996	

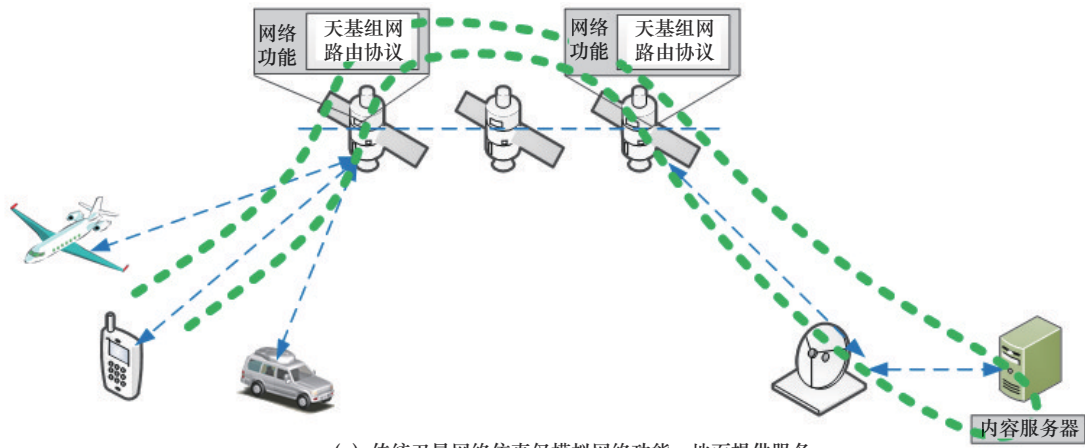
表 2 星地带宽占用对比

对比项	用户数为 2 个	用户数为 3 个	用户数为 4 个	用户数为 5 个
	星地带宽资源占用降低百分比	38.67%	40.02%	45.85%
平均值:42.70%				

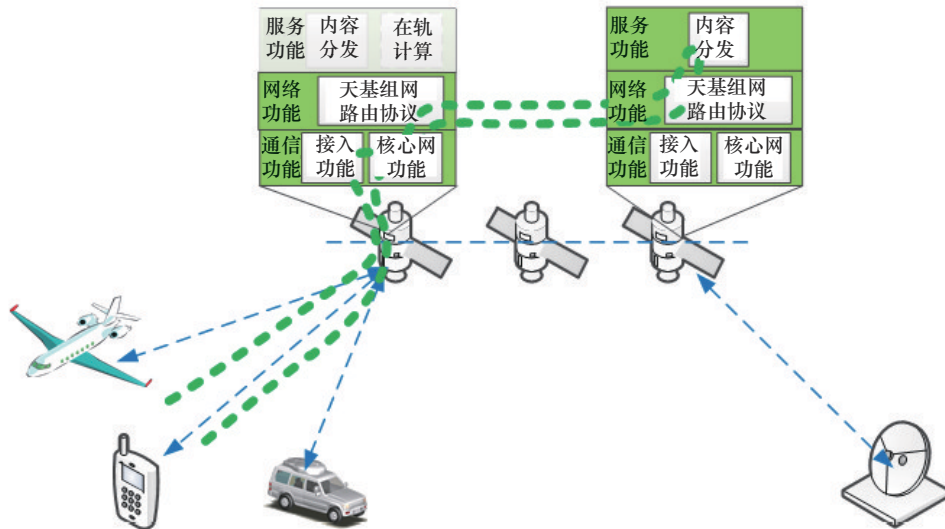
试验结果表明，在卫星云网仿真系统中，通过利用星上缓存资源，热点信息无须从地面获取，而直接从星上提供服务，有效地节省了星地带宽，降低了服务响应时延。

## 8 结束语

面向卫星通信网络体系结构，提供一种数实融合、云网融合的卫星网络仿真方法，利用虚拟化技术将卫星



(a) 传统卫星网络仿真仅模拟网络功能，地面提供服务



(b) 卫星云网仿真支持通信/网络/服务融合功能仿真，卫星提供通信接入与服务功能

图 11 卫星云网仿真与传统仿真系统对比分析

网络节点抽象成通信、网络、计算功能的融合节点，同时通过数实接口实现数字空间和物理实体空间的交互，最终构建一张数实融合的规模卫星云网，支撑未来卫星网络的仿真实验。

参考文献:

[1] 吴巍, 秦鹏, 冯旭, 等. 关于天地一体化信息网络发展建设的思考[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 3-9.  
WU W, QIN P, FENG X, et al. Reflections on the development and construction of space-ground integration information network[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 3-9.

[2] 陆洲, 秦智超, 张平. 天地一体化信息网络系统初步设想[J]. 国际太空, 2016(7): 20-25.  
LU Z, QIN Z C, ZHANG P. Initial layout of space-ground integrated information network system[J]. Space International, 2016

(7): 20-25.

[3] 姜文华, 王学磊, 曾志毅. 国内外卫星互联网发展现状、风险及对策分析[J]. 信息通信, 2016, 29(11): 11-12.  
JIANG W H, WANG X L, ZENG Z Y. Analysis on the development status, risks and countermeasures of satellite Internet at home and abroad[J]. Information & Communications, 2016, 29(11): 11-12.

[4] 王韵涵, 李博, 刘咏. 国外低轨卫星互联网发展最新态势研判[J]. 国际太空, 2022(3): 7-12.  
WANG Y H, LI B, LIU Y. Research on the latest development trend of foreign LEO satellite Internet[J]. Space International, 2022(3): 7-12.

[5] 王子剑, 杜欣军, 尹家伟, 等. 低轨卫星互联网发展与展望[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 49-52.  
WANG Z J, DU X J, YIN J W, et al. Development and prospect of LEO satellite Internet[J]. Application of Electronic Technique,

- 2020, 46(7): 49-52.
- [6] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148.  
LIU Y, LIAO C F. The development of emerging satellite Internet constellations[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(7): 139-148.
- [7] 谢鹰. 卫星互联网: 发展, 现状与未来[Z]. 2024.  
XIE Y. Satellite Internet: development, present situation and future [Z]. 2024.
- [8] 张恺悦, 张煌, 王沛文. “星链”军事化发展对太空情报信息安全构成的挑战与应对[J]. 情报杂志, 2024, 43(6): 22-30.  
ZHANG K Y, ZHANG H, WANG P W. Challenges and countermeasures posed by the militarized development of “starlink” to space intelligence and information security[J]. Journal of Intelligence, 2024, 43(6): 22-30.
- [9] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.  
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [10] 虞志刚, 冯旭, 戴天, 等. 空间边缘计算: 需求、架构及关键技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4416-4425.  
YU Z G, FENG X, DAI T, et al. Space edge computing: requirement, architecture and key technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(12): 4416-4425.
- [11] Starlink[EB]. 2024.
- [12] Iridium NEXT[EB]. 2024.
- [13] Celestial constellation[EB]. 2024.
- [14] 周宇, 彭勇军, 马青学. “星链”卫星在俄乌冲突中的军事运用[C]//第十二届中国指挥控制大会论文集(上册). 北京: 兵器工业出版社, 2024: 592-596.  
ZHOU Y, PENG Y J, MA Q X. The military application of "Star Chain" satellite in the conflict between Russia and Ukraine[C]// Proceedings of the 12th China Command and Control Conference (Part I). Beijing: Ordnance Industry Press, 2024: 592-596.
- [15] 高瓔园, 王妮炜, 陆洲. 卫星互联网星座发展研究与方案构想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.  
GAO Y Y, WANG N W, LU Z. The development research and construction suggestion of satellite Internet constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(8): 875-881.
- [16] 朱立东, 张勇, 贾高一. 卫星互联网路由技术现状及展望[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 33-42.  
ZHU L D, ZHANG Y, JIA G Y. Current status and future prospects of routing technologies for satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 33-42.
- [17] 申建平, 虞红芳, 章小宁, 等. 基于OPNET的低轨卫星网络仿真平台[J]. 计算机工程, 2009, 35(18): 237-239.  
SHEN J P, YU H F, ZHANG X N, et al. OPNET based low earth orbit satellite network simulation platform[J]. Computer Engineering, 2009, 35(18): 237-239.
- [18] 朱晓辉, 吴志强, 李绍旸, 等. 一种低轨卫星星座的仿真方法及系统: CN202211343666.8[P]. 2024-09-27.  
ZHU X H, WU Z Q, LI S Y, et al. A simulation method and system for LEO satellite constellation: CN202211343666.8[P]. 2024-09-27.
- [19] 胡智伟, 文峰. 一种大规模低轨卫星综合仿真平台: CN202310910127.6[P]. 2024-09-27.  
HU Z W, WEN F. A comprehensive simulation platform for large-scale LEO satellites: CN202310910127.6[P]. 2024-09-27.
- [20] 韩锐, 潘冀, 李伟, 等. 一种低轨宽带卫星星座兼容仿真系统: CN115276753A[P]. 2022-11-01.  
HAN R, PAN J, LI W, et al. A compatible simulation system for LEO broadband satellite constellation: CN115276753A[P]. 2022-11-01.
- [21] 刘立祥, 刘帅军. 大型低轨星座网络规划方法与仿真分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 87-93.  
LIU L X, LIU S J. Network planning method and simulation analysis for large-scale low earth orbit satellite constellation networks [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 87-93.
- [22] 李元龙, 李志强. Starlink星座通信建模仿真分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(4): 118-126.  
LI Y L, LI Z Q. Modeling and simulation analysis of Starlink constellation communication[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(4): 118-126.
- [23] 虞志刚, 冯旭, 黄照祥, 等. 通信、网络、计算融合的天地一体化信息网络体系架构研究[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 11-29.  
YU Z G, FENG X, HUANG Z X, et al. Research on the architecture of space-ground integrated information network: integration of communication, networking and computing[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 11-29.
- [24] 虞志刚, 冯旭, 戴天, 等. 空间边缘计算: 需求、架构及关键技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4416-4425.  
YU Z G, FENG X, DAI T, et al. Space edge computing: requirement, architecture and key technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(12): 4416-4425.
- [25] 虞志刚, 丁文慧, 陆洲, 等. 卫星云网: 一种云网融合的卫星网络体系架构[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(3): 23-30.  
YU Z G, DING W H, LU Z, et al. Satellite cloud network: a satellite network architecture based on cloud-network integration[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 23-30.
- [26] 张九龙, 鄂广增. 我国中低轨移动卫星星座设计及动态仿真[J]. 无线电通信技术, 2002, 11(3): 56-60.  
ZHANG J L, FENG G Z. Constellation design and dynamic simulation of MEO and LEO mobile satellite communication of China

- [J]. *Wireless Communication Technology*, 2002, 11(3): 56-60.
- [27] 胡培培, 赵艳宾. 基于 STK 的低轨卫星物联网星座的仿真与覆盖分析[J]. *安防科技*, 2020(28): 47-47.  
HU P P, ZHAO Y B. Simulation and coverage analysis of LEO satellite constellation based on STK[J]. *Security Technology*, 2020 (28): 47-47.
- [28] 王欣, 金虎. 基于 STK/MATLAB 的通信卫星场景建模[J]. *电子测试*, 2009(4): 1-5.  
WANG X, JIN H. STK/MATLAB and application in setting up the scenario of the communication satellite[J]. *Electronic Test*, 2009 (4): 1-5.
- [29] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]//*Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1597-1604.
- [30] 陈瑞泽. 基于节点重要性的动态空天信息网络抗毁性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.  
CHEN R Z. Research on invulnerability of dynamic aerospace information network based on node importance[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [31] 王学华, 朱立东. 低轨卫星通信系统地面核心网设计与仿真[J]. *空间电子技术*, 2010, 7(2): 119-123.  
WANG X H, ZHU L D. Design and simulation of LEO satellite communication system ground core network[J]. *Space Electronic Technology*, 2010, 7(2): 119-123.
- [32] 索思亮. 低轨卫星通信系统仿真模型设计[J]. *科技资讯*, 2007, 5(1): 8-10.  
SUO S L. Design of simulation model for LEO satellite communication system[J]. *Science and Technology Information*, 2007, 5(1): 8-10.
- [33] 李楠. 基于 OPNET 的低轨卫星网络路由仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
LI N. Research on routing simulation of LEO satellite network based on OPNET[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [34] 李楠, 宗鹏. 基于 OPNET 的低轨卫星网络路由仿真与优化[J]. *飞行器测控学报*, 2013, 32(5): 408-413.  
LI N, ZONG P. OPNET based simulation and optimization of routing protocols in LEO satellite networks[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2013, 32(5): 408-413.
- [35] 张晓东. 基于 OPNET 的低轨星座卫星通信系统仿真建模研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
ZHANG X D. Research on simulation modeling of LEO constellation satellite communication system based on OPNET[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [36] 王志浩, 郎晓光, 肖双爱. 高低轨混合卫星网络仿真技术研究[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(1): 42-47.  
WANG Z H, LANG X G, XIAO S A. Research on simulation technology in high and low orbit hybrid satellite network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(1): 42-47.
- [37] 李星辰. 一种低轨卫星网络仿真系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.  
LI X C. Design and implementation of a LEO satellite network simulation system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [38] 殷平泽. 基于云计算技术的低轨卫星网络仿真系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.  
YIN P Z. Research on LEO satellite network simulation system based on cloud computing technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [39] 董若楠, 张光杰, 刘渊, 等. 天地一体化信息网络动态重构技术与仿真方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(5): 1065-1070.  
DONG R N, ZHANG G J, LIU Y, et al. Dynamic reconfiguration technology and emulation method of space-ground integrated information network[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(5): 1065-1070.
- [40] 沈怡麟, 张程, 何益康, 等. 基于虚拟化技术的卫星控制系统软件构件库运行监控与可信验证技术[J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27(8): 125-129.  
SHEN Y W, ZHANG C, HE Y K, et al. An operation monitoring and credible verification method of satellite attitude and orbit control software components library based on virtualization technology[J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(8): 125-129.
- [41] 叶海洋, 张桂珠, 王晓锋, 等. 面向天地一体化卫星网络的高性能仿真技术[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(17): 82-88, 190.  
YE H Y, ZHANG G Z, WANG X F, et al. High-performance emulation technology for space-ground integrated satellite network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(17): 82-88, 190.
- [42] 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.
- [43] 任鹏, 毕婧, 李毅, 等. 一种低轨卫星网络仿真平台以及仿真方法: CN116346200A[P]. 2023-03-06.  
REN P, BI J, LI Y, et al. A simulation platform and method for LEO satellite network: CN116346200A[P]. 2023-03-06.
- [44] 蒋姝丽, 刘渊, 王晓锋. 天地一体化信息网络宽带用户行为仿真技术[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(10): 75-82.  
JIANG S L, LIU Y, WANG X F. Broadband user behavior emulation technology for space-ground integrated information network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(10): 75-82.
- [45] 张光杰, 叶海洋, 王晓锋. 基于多尺度虚拟化的卫星终端用户行为仿真[J]. *计算机工程*, 2019, 45(8): 165-172, 189.  
ZHANG G J, YE H Y, WANG X F. User behavior simulation in

satellite terminal based on multi-scale virtualization[J]. Computer Engineering, 2019, 45(8): 165-172, 189.

[46] 殷平泽. 基于云计算技术的低轨卫星网络仿真系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

YIN P Z. Research on LEO satellite network simulation system based on cloud computing technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.

[47] 史琰, 盛敏, 白卫岗, 等. 一种虚实系统联合的大规模卫星网络仿真评估及测试系统: CN202111509071.0. [P]. 2021-12-10.

SHI Y, SHENG M, BAI W G, et al. A large-scale satellite network simulation evaluation and test system combining virtual and real systems: CN202111509071.0. [P]. 2021-12-10.

[作者简介]



丁文慧 (1987-), 女, 博士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



丁熙浩 (1993-), 男, 硕士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



徐志平 (1978-), 男, 硕士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



高吉星 (1988-), 男, 博士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



陆洲 (1970-), 男, 硕士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院研究员, 主要研究方向为卫星通信网络。



虞志刚 (1989-), 男, 博士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。