

数字孪生卫星互联网：架构与关键技术

刘垚圻^{1,2,3}, 李红光^{1,2,3}, 周一青^{1,2,3}, 石晶林^{1,2,3}, 苏泳涛⁴, 钱晋希⁵

(1. 中科南京移动通信与计算创新研究院, 江苏 南京 211135;

2. 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 北京中科晶上科技股份有限公司, 北京 100190;

5. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要：提出一种数字孪生卫星互联网系统架构，通过平行孪生、安全内生、智能衍生的立体式闭环机制，为卫星互联网全生命周期过程稳定发展提供支撑；然后对数字孪生卫星互联网关键问题与关键技术进行探讨。针对复杂多变的卫星互联网系统，提出基于机理与数据双驱动的标准化模型处理和生成方法；面对海量信息和不均匀分布形成的数据洪流，提出三级分流的池化存算架构；为了实际系统的特征孪生高保真，设计智能编排与分布式异构的处理平台，对不同模型和事件进行分类快速计算；利用通感算控一体化技术，形成感知-判断-决策-执行的卫星互联网孪生循环演进系统，从而实现卫星互联网全生命周期的稳定运行。

关键词：卫星互联网；数字孪生；模型标准化；资源池化；智能编排

中图分类号：TP927

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022009

Digital Twin Satellite Internet: Architecture and Key Technologies

LIU Yaoqi^{1,2,3}, LI Hongguang^{1,2,3}, ZHOU Yiqing^{1,2,3}, SHI Jinglin^{1,2,3}, SU Yongtao⁴, QIAN Jinxi⁵

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

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

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

4. Beijing Sylincom Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China

5. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract: A digital twin satellite internet (DTSI) architecture was proposed, which provided support for the whole life cycle of satellite internet through the three-dimensional closed-loop mechanism of parallel twin, security endogenous and intelligent evolution. Then, the key problems and technologies of DTSI were discussed. Aiming at the complex and changeable satellite internet system, a standardized model processing and generation method based on mechanism and data driving was proposed. In the face of the data torrent formed by massive information and uneven distribution, a pool computing-storage strategy of three-level diversion strategy was proposed. In order to achieved high fidelity with the characteristics of the actual system, an intelligent orchestration and distributed heterogeneous processing platform was designed to classified and quickly calculated different models and events. In order to achieved high fidelity with the characteristics of the actual system, an intelligent orchestration and distributed heterogeneous processing platform was designed to classified and quickly calculated different models and events, the satellite internet twin cycle evolution system of observation-orientation-decision-act was formed, so as to realized the stable development of the whole life cycle of satellite internet.

Keywords: satellite internet, digital twin, model standardization, resource pooling, intelligent orchestration

收稿日期：2021-11-15；**修回日期：**2022-01-30

基金项目：国家重点研发计划（No. 2020YFB1808004）；国家自然科学基金项目（No. 61975234）；浙江省重点研发计划（No. 2021C01040）；江苏省重点研发计划（No. BE2021013-2）

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1808004), The National Natural Science Foundation of China (No. 61975234), The Zhejiang Key Research and Development Program (No. 2021C01040), The Jiangsu Key Research and Development Program (No. BE2021013-2)

0 引言

近年来通信与网络技术迅速发展,但在任何时间和地点,用户以任意方式进行通信仍然未能完全实现^[1]。

《世界互联网发展报告2020》指出,2020年,全球互联网用户数约为45.4亿人,普及率达59%,我国互联网用户规模为9.4亿人,普及率达67%。由于经济发展程度、地形和成本制约等原因,地球上近一半的人口仍然未能接入互联网。相对于区域受限的地面网络,具有频谱资源丰富、覆盖面积广、通信距离长、部署快、成本低等独特优势的卫星通信迎来新热潮,其在抢险救灾、远海作业、偏远地区通信等场景将发挥重要作用^[2-4]。

由于频率和轨位资源稀缺^[5]以及商业潜力巨大,卫星互联网已成为各国的战略焦点^[6]。俄罗斯的《2016-2025年联邦航天计划》将通信卫星列为优先发展方向,并指出要增加民用卫星数量,积极拓展商业市场^[7]。2018年3月,美国制定首个《国家航天战略》,强调要使国家安全航天、商业航天和民用航天3个领域更具活力,并开展与商业航天的合作^[8]。与此同时,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)针对卫星导航、遥感、通信、航天运输、太空态势感知、海洋态势感知和早期预警等领域发布《第四期中长期发展规划》(2018-2025年)。我国在2020年4月将卫星互联网纳入“新基建”通信网络基础设施范畴^[9-10]。

近年来,ITU、3GPP、Sat5G等各类国际通信组织,针对卫星互联网开展标准化、应用场景定义及试验验证工作^[11-13]。国内外的诸多学者也对卫星互联网架构、标准体制、关键技术和运维管理等方面进行探讨和研究^[14-15]。卫星互联网是由数以千计的各类卫星、全球分布的信关站及海量终端组成的复杂网络^[2],来自全域状态反馈引发的“数据洪流”,高动态的运动特点导致网络拓扑的实时变化^[5],用户与业务分布不均匀而产生的“潮汐效应”^[2],复杂电磁环境造成的时变干扰以及频轨资源使用规则带来的约束^[2]等问题十分突出。随着需求的日益激增,网络负载的不断增加,网络规模的持续扩大,由此带来的网络复杂性成倍增长,使得网络的运行维护和迭代优化变得越来越烦琐^[15]。同时,由于网络运营的高可靠性要求,网络故障的高代价、昂贵的试验成本和网络的难变动性,新技术的部署与运营愈发困难。这些需求和问题对卫星互联网的设计论证、建设部署、运维优化带来诸多挑战。

针对复杂系统的运维和优化等问题,一方面需要对系统状态、环境信息等物理实体进行数据采集;另一方面需要对网络 and 用户情况进行实时收集管理,将提取的海量数据分析整理,制定优化的方案并执行。

GRIEVES^[16]提出“信息镜像模型”概念,充分利用实时参数和历史数据,在虚拟空间完成对物理实体的映射,这也是数字孪生技术的雏形。美国国家航空航天局(NASA)的“阿波罗计划”,即构建两个相同的航天飞行器,留在地球上的航天器用于反映太空中航天器的工作状态,辅助工程师分析处理太空中出现的紧急事件,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。2012年,美国NASA发布“建模、仿真、信息技术和处理”路线图,数字孪生概念被广泛知晓^[17]。刘蔚然等^[18]提出数字孪生卫星,对卫星全生命周期进行探讨,提升卫星工程的整体管理水平与流程管控能力。孙滔等^[19]提出数字孪生网络能对物理网络进行全息映射,使用全面准确的数据进行精准建模,从而实现对整个网络通信的平行控制,进而有效地解决不断变化的网络需求,针对网络的灵活性、可扩展性、安全性等要求通过软件定义网络来实现集中控制和优化决策^[20]。

数字孪生的理念适用于价值大、精度要求高、结构复杂的系统或设备^[19]。卫星互联网系统庞大复杂,单一节点的建设成本仍然较为高昂,巨星座、全球分布的信关站、海量接入终端、复杂多变的空环境都为系统建设部署与运维优化带来严峻挑战^[18]。本文针对卫星互联网系统特点,结合数字孪生理论,提出平行孪生、安全内生、智能衍生的数字孪生卫星互联网(Digital Twin Satellite Internet, DTSI)立体式闭环架构。一方面通过感知与重建实现卫星互联网的物理网络与空环境的实时镜像,增强物理网络所缺少的系统性优化与控制能力;另一方面通过模型拟合与系统预测形成自演进自生长的智能卫星互联网,从而实现卫星互联网全生命周期的可靠保障。本文结合DTSI架构特点和技术需求,对模型的感知与标准化、洪流数据的池化溶解处理、孪生编排与调度以及自演进的孪生优化决策机制方面进行研究讨论。

1 数字孪生卫星互联网系统架构

数字孪生卫星互联网系统由卫星互联网实体层、资源层、孪生与预测层以及应用与决策层组成。平行孪生、安全内生、智能衍生的四层三维立体式闭环架构,更清晰地感知系统状态,将物理系统由“黑盒”变成“白盒”,为数字孪生卫星互联网系统全生命周期提供支撑。数字孪生卫星互联网系统架构如图1所示。

(1) 实体层

实体层由实际网络系统与物理环境构成,包含节点设备、网络状态的运行监控和管制,以及物理数据的感知反馈。具体包括网元设备信息、用户状态、网络流量、业务分布、路由拓扑、电磁环境、卫星姿轨等。实

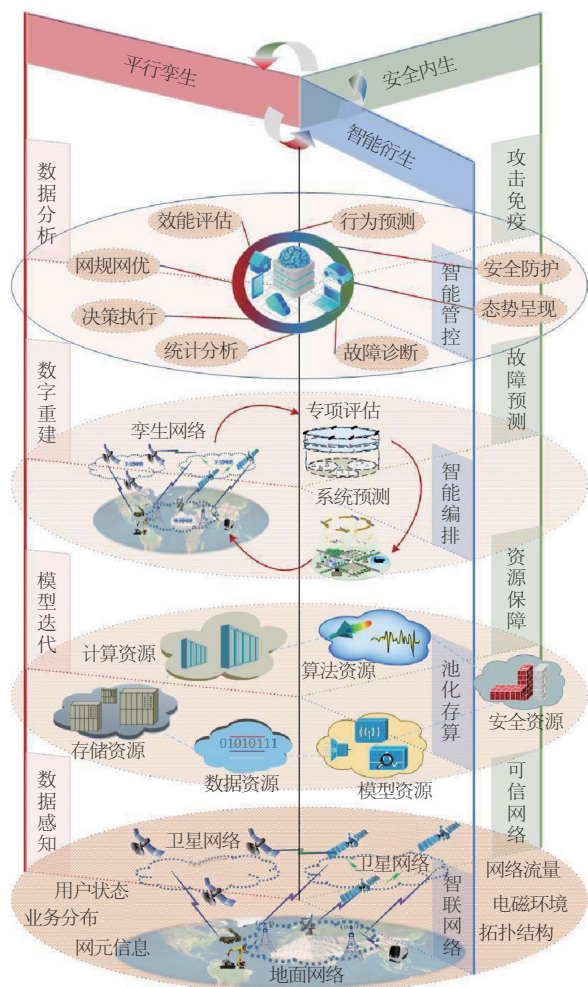


图1 数字孪生卫星互联网系统架构

体层不仅要构建向上反馈，向下执行，可为用户提供全域全时的智联可信网络，还要构建数据采集回传的全息智慧感知网络。

(2) 资源层

资源层是卫星互联网的孪生保障。具体包含实体数据资源、算法模型资源、池化的存算资源以及安全保障资源等。资源层通过实体层的北向接口可获取实时可靠的数据资源。结合实体数据量大、结构多样化的特点，对海量数据进行转换、分类、清洗，然后通过拟合训练，更新机理或算法的标准化模型，可为数字重建和孪生预测提供数据和理论基础。构建池化的存算资源可解决卫星互联网实体数据洪流的潮汐冲击。安全资源主要用于保障整个网络的安全可靠，同时提供应急调度与备份功能。

(3) 孪生与预测层

孪生与预测层包含意图解析、智能编排、数字重

建、评估预测等重要功能。一方面根据物理实体状态，高效调度存算资源进行模型的编排映射，对实体网络中网元状态、拓扑情况、环境信息等进行高保真模拟，重建全息的卫星互联网系统，同时为应用与决策层提供当前系统的评估数据；另一方面根据应用与决策层的需求意图，编排机理模型，对系统未来状态或行为进行预测，推演最优的决策机制，为系统优化提供依据。

(4) 应用与决策层

应用与决策层是卫星互联网全生命周期自动化迭代演进的控制核心。南向负责接收数字重建数据的结果，统计分析后加载策略，在孪生与预测层进行编排推演，迭代试验生成决策机制，为卫星互联网实体提供优化方案并监督执行；从而形成全系统感知-判断-决策-执行（Observe-Orient-Decide-Act, OODA）的闭环控制，有效实现网规网优、自动化运行控制等。另外，本层可以用于新架构、新体制、新技术的试验验证，同时具有孪生平台智能管控、可视化、预测验证、监控等功能。

以上述系统架构为基础，结合数字孪生卫星互联网特点，本文从数据、决策、资源调度、平台管理4个维度进行孪生平台执行架构设计，如图2所示。

2 关键技术

2.1 机理与数据双驱动的标准化模型

卫星互联网由众多分系统构成，如通信分系统、测控分系统、感知分系统。各分系统的组件元素包括机体设备、系统配置、物理参数和指标性能等。孪生系统是将组件元素数字化表示，高保真地拼接还原物理实体系统。标准化模型是对客观事物、实际状态、规律特点进行抽象后的一种形式化表达^[21]，构建组件元素的标准化模型是孪生的关键。

模型根据是否存在物理关系或数学表达，分为机理模型和数据模型。卫星互联网的空间动力模型、通信链路模型等属于机理模型，可以用数学定理或物理公式进行描述；网络实时状态、环境实时情况等属于数据模型，主要由感知系统统计反馈。卫星互联网的空间环境复杂、用户业务分布不均，且系统具有时变性，单一使用机理模型或数据模型建模，难以满足日益复杂的系统特征。通过大规模数据与机理的融合驱动，一方面对感知数据进行纠偏，另一方面对已有的机理模型进行迭代演进，形成标准化模型，如用户分布模型、业务分布模型、资源分配模型与网络路由模型等。基于标准模型的孪生系统不仅可以高保真地还原系统状态，还能对未来系统行为预测推演。机理与数据双驱动的标准化模型建立过程如图3所示。

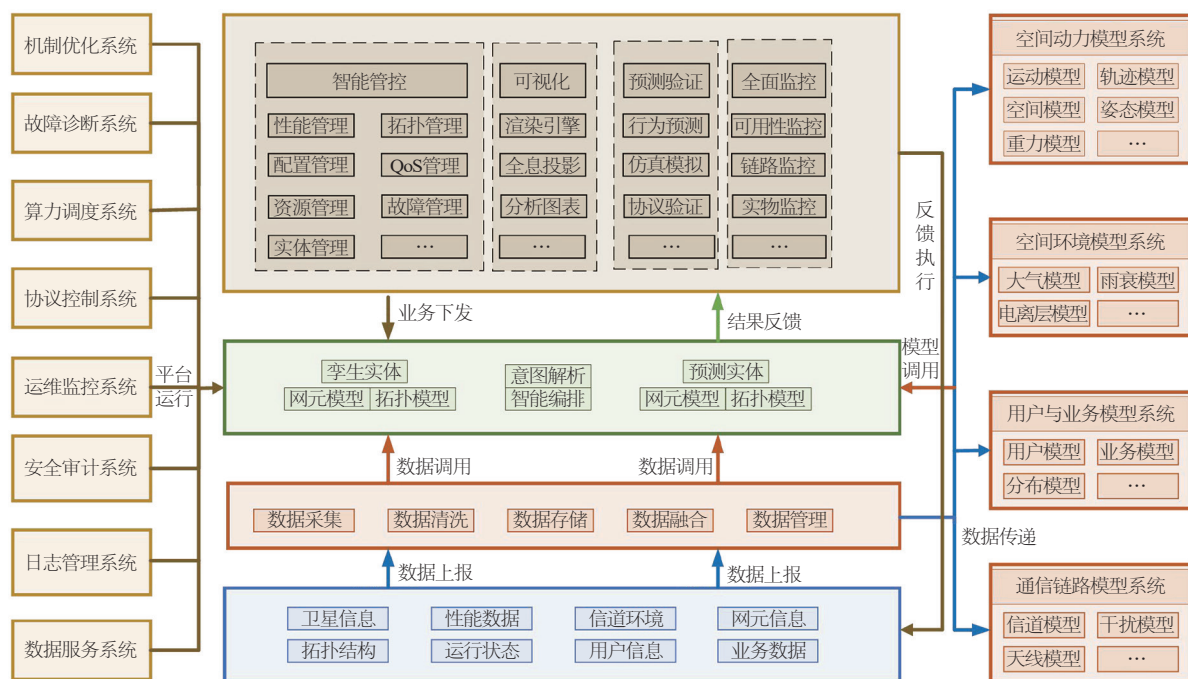


图2 卫星互联网数字孪生平台执行架构

标准化模型形成过程主要包含数据感知、数据处理、机理与数据融合迭代。

(1) 数据感知

数据感知是使用智慧感知网得到关于物理环境和卫星通信网络的信息数据。物理环境影响网络，对其进行仿真建模，有助于网络的平稳运行。物理环境包括系统各组件元素所处位置、温湿度、重力环境、电磁环境等信息，可使用各类传感器进行采集，然后通过遥测和指令分系统向地面站反馈。网络数据包括网络流量、业务分布、路由拓扑等，对于构建星间链路模型、网络拓扑模型和网络协议模型等起着关键的作用。网络数据的采集方式很多，例如简单网络管理协议（Simple Network Management Protocol, SNMP）、sFlow、NetFlow、网络遥测等^[22-26]。基于SNMP的轮询模式数据采集效率低且只能实现分钟级别的流量采集。sFlow和NetFlow可采集原始码流，并统计其起始和结束时间、服务类型、包含的数据包数量和字节数量等流量信息。网络遥测具有需求可定制的特点，其推送模式能使流式数据采集达到毫秒级别，且单位时间内能上传海量数据，在占用网络资源的同时，对服务器的存储和数据处理性能提出更高要求^[27]。

卫星互联网系统复杂，且对实时性和鲁棒性要求较高，如何使用与时俱进的传感器技术感知更加全面精确的物理环境信息，如何制定新的协议体制来高效地采集传输网络数据，仍需要学术界和工业界不断探索。

(2) 数据处理

数据处理包括物理环境感知数据和网络数据的预处理、分类、清洗和入库。

物理环境原始数据和网络原始数据具有速度快、容量大和维度高等特点，如果不进行预处理而是直接传输，很容易造成网络拥塞，同时对服务器的存储要求也会很高。RICKS等^[28]提出能提高数据处理效率的数据降阶技术。胡佳兵^[29]提出在传输过程中建立模型库，减少图像传输冗余，节约带宽资源的节带化处理系统。此外，如何利用卫星的周期性和历史数据来减少发送冗余信息也是值得研究的方向。在各个节点对数据预处理，减少传输的数据体量后，数据处理站将接收到的不同结构类型数据进行分类、清洗，以去除错误和冗余数据。随后将正常的数据存入目标数据库中以便调用，将错误和冗余数据存入临时数据库中，并反馈给采集器，形成负反馈，以纠正数据采集。

(3) 机理与数据融合迭代

机理模型根据机理是否恒定可分为恒定机理模型和非恒定机理模型。卫星互联网涉及众多非恒定机理模型，例如用户分布模型、路由优化模型、资源分配模型等，电磁环境、多尺度衰落及用户移动等因素都会影响非恒定机理模型的准确性，若直接运用非恒定机理模型对卫星互联网建模预测，得到的理论结果与实际结果往往相差较大。通过大量的历史数据和实时数据对原始非

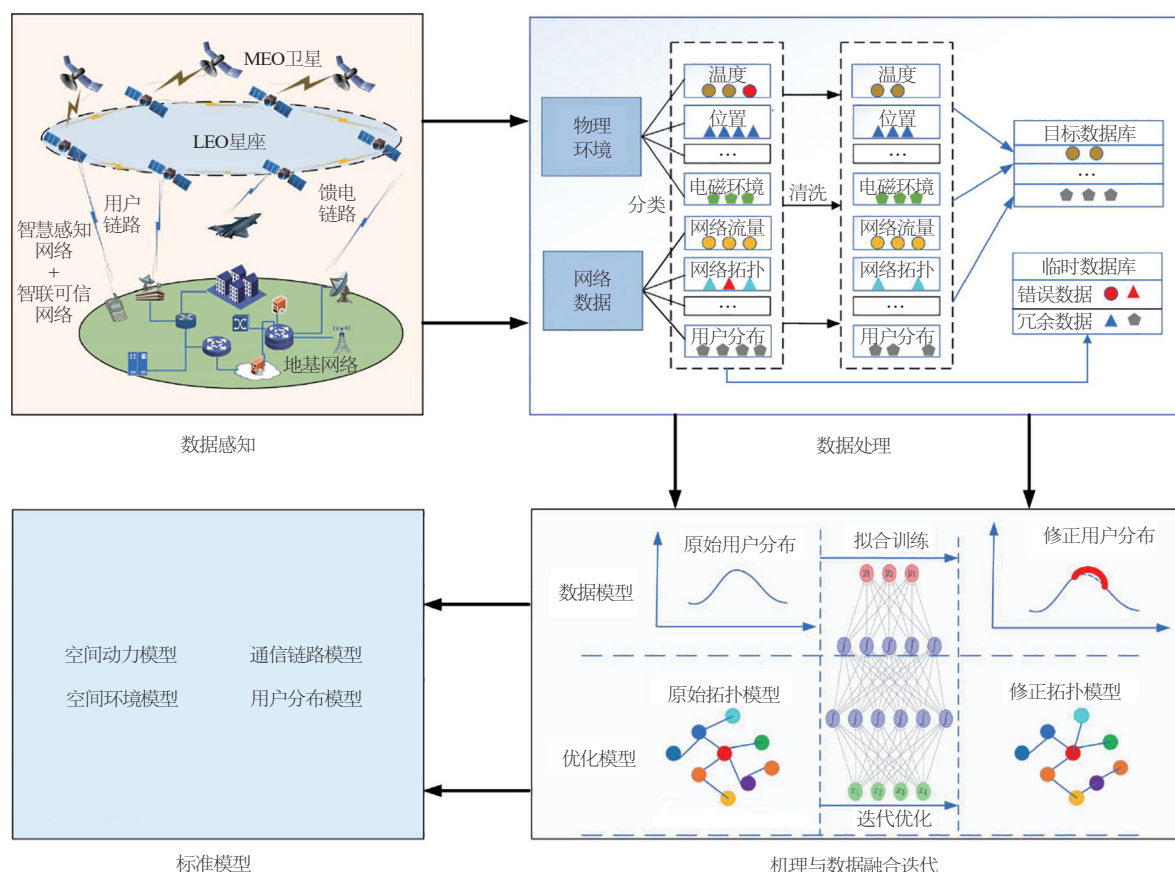


图3 机理与数据双驱动的标准化模型建立过程

恒定机理模型进行拟合训练、优化参数、完备约束条件及持续迭代更新,是提高卫星互联网行为预测准确度,高保真地实现卫星互联网孪生的关键。

2.2 洪流数据的池化计算与存储

随着5G在VR/AR、车联网、物联网、智能制造、无线医疗、超高清8K视频和云游戏等场景业务中的应用,流量将呈指数增长。据IDC报告预测,到2025年全球会有163 ZB的数据量。按照咨询公司的测算方式,卫星互联网用户为移动互联网用户的0.2%~1%,随着卫星互联网的迅猛发展,人们对其业务需求会逐渐增多,同时地理环境使得人口分布不均,网络需求昼夜也有所差异,由此引起了明显的网络负载潮汐效应。庞大的数据业务需求及网络负载潮汐效应很容易造成卫星互联网数据洪流。这给卫星互联网的計算和存储带来巨大的挑战。

为解决移动互联网的瞬时峰值处理,全球最大云计算商Amazon储备的数据中心等设备是平常的10倍。虽然有效地抵挡了数据冲击,但是效率却只有30%。中国科

学院计算技术研究所提出的“信息高铁”,是由智能物端、超级基站、高通量计算中心组成的可测、可调、可控和可信的“云网边端综合信息网”。其通过虚拟化技术实现对全局资源的动态共享和按需分配,有效解决负载不均衡,高负载下处理速度慢的问题^[30]。

针对卫星互联网的物理实体、孪生体和建模过程存在的数据洪流和海量存储问题,本文设计“三级池化分流”的存算架构,如图4所示。

(1) 物端存算

未来终端计算与存储能力越来越强,可以加载更加复杂的算法。一方面可以通过计算与通信融合,利用节带化语义技术实现信息的高效传输;另一方面,卫星互联网属于全球覆盖的服务网,海量终端存在潮汐忙闲状态,实行池化的共享存算资源机制,增加系统存算能力,能减小传输网通信压力。

(2) 传输存算

传输网由卫星、地面站等节点组成,具有不同的存算能力。地理环境、人口分布以及时间等因素,造成严

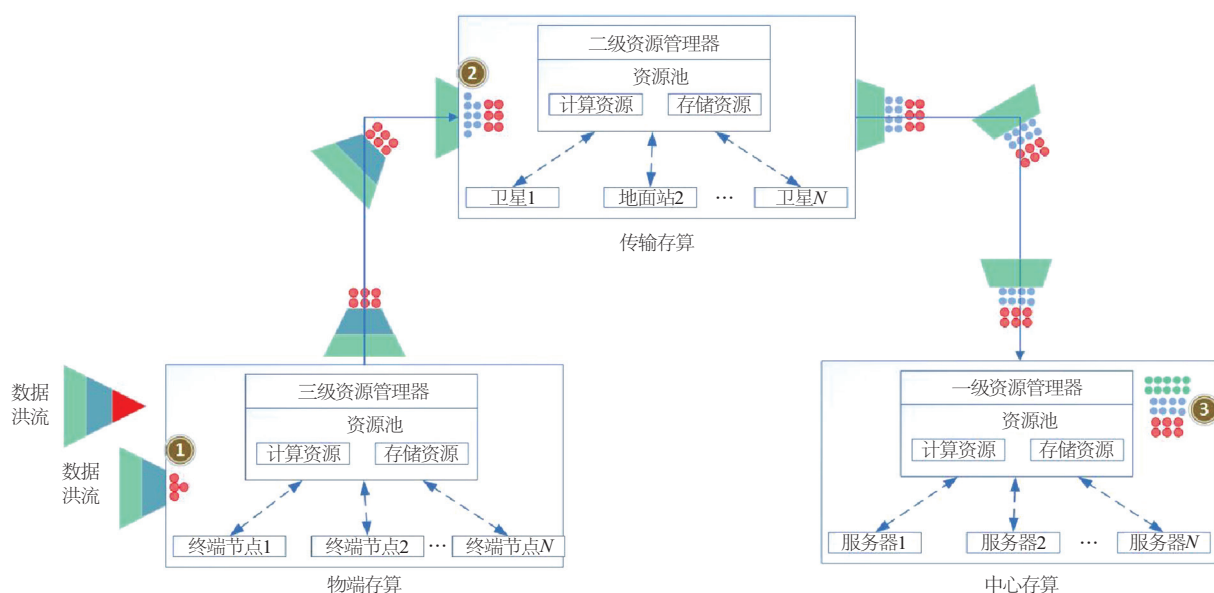


图4 三级池化分流存算架构

重的节点负载不均衡问题。通过卫星一体化网管中心进行资源的集中管控，使用边缘计算、自适应路由等策略调整目标节点的存算资源。

(3) 中心存算

存算中心是卫星互联网处理核心，利用分布式和虚拟化技术，可以将多地的高通量计算/存储平台进行资源池化，以满足复杂系统的运行维护、算法执行与模型迭代。

通过对智能物端、传输网节点和处理中心的存算资源进行多级资源虚拟池化，将数据洪流分级引流，将有效保障系统的平稳运行。

2.3 孪生平台的智能编排与调度

卫星互联网不仅网络实体规模大、用户业务种类多，很多参数还具有时变性，导致最终形成众多的标准化模型。不同的模型有不同的特点，比如，网络拓扑优化模型以逻辑关系为主；大气模型以数学计算为主；用户链路接入模型混合逻辑与数学运算。不同处理器擅长处理的任务也不同，例如，单颗CPU擅长处理串行逻辑的复杂任务；GPU擅长并行处理大量任务；DSP擅长数字信号处理算法相关任务；FPGA进行专用通信算法加速。对此，本文设计如图5所示的基于智能编排的分布式异构处理平台方案，将标准化模型快速、精准地分配到不同硬件平台上处理，以提高系统建模的实时性。

上文对卫星互联网实体网络中提取出标准化模型流程进行分析。得到标准化模型后，需要进行智能编排调度。智能编排调度分为模型分解、分类存储、编排调度

和模型重组4个部分。

以移动性管理中的切换问题为例，智能编排调度首先需要根据拓扑模型、轨道模型和切换模型等的子模型对CPU、GPU、DSP和FPGA等算力类型的需求，将模型进行分解单体化，同时做好算力需求类型标识。其次为便于编排器快速调度，需要将做好算力需求标识的子模型进行分类存储。然后基于分布式的编排调度器在时间基准器（例如铷钟、北斗系统）的驱动下，将子模型以事件的形式按正确时空顺序调度到计算资源池的不同算力处理器中处理。例如将波束选择分配给CPU处理，将大气阻力子模型分配给GPU进行运算加速，将调制解调分配给DSP完成，将编解码分配给FPGA加速，同时要为子模型正确调度存储资源池中的数据或者其他子模型处理后的数据来完成建模。最后将各个子模型得到的结果，通过模型重组与映射来实现卫星互联网的孪生重建。

2.4 自学习自演进的OODA闭环

随着移动互联网及物联网的发展，海量终端设备的接入，各种新业务的普及，平均每40个月，全球的数据量就会翻倍。卫星互联网的系统复杂性和海量终端使得其运行、维护、优化和管控亟须智能化处理。智能处理过程可分解为OODA 4个步骤的循环过程。OODA闭环可以将一个复杂智能过程映射为一个可计算的过程，同时融合控制理论中的闭环迭代原理，实现自学习和自演化。本文针对卫星互联网的运行、维护、优化和管控，设计的卫星互联网OODA闭环如图6所示。

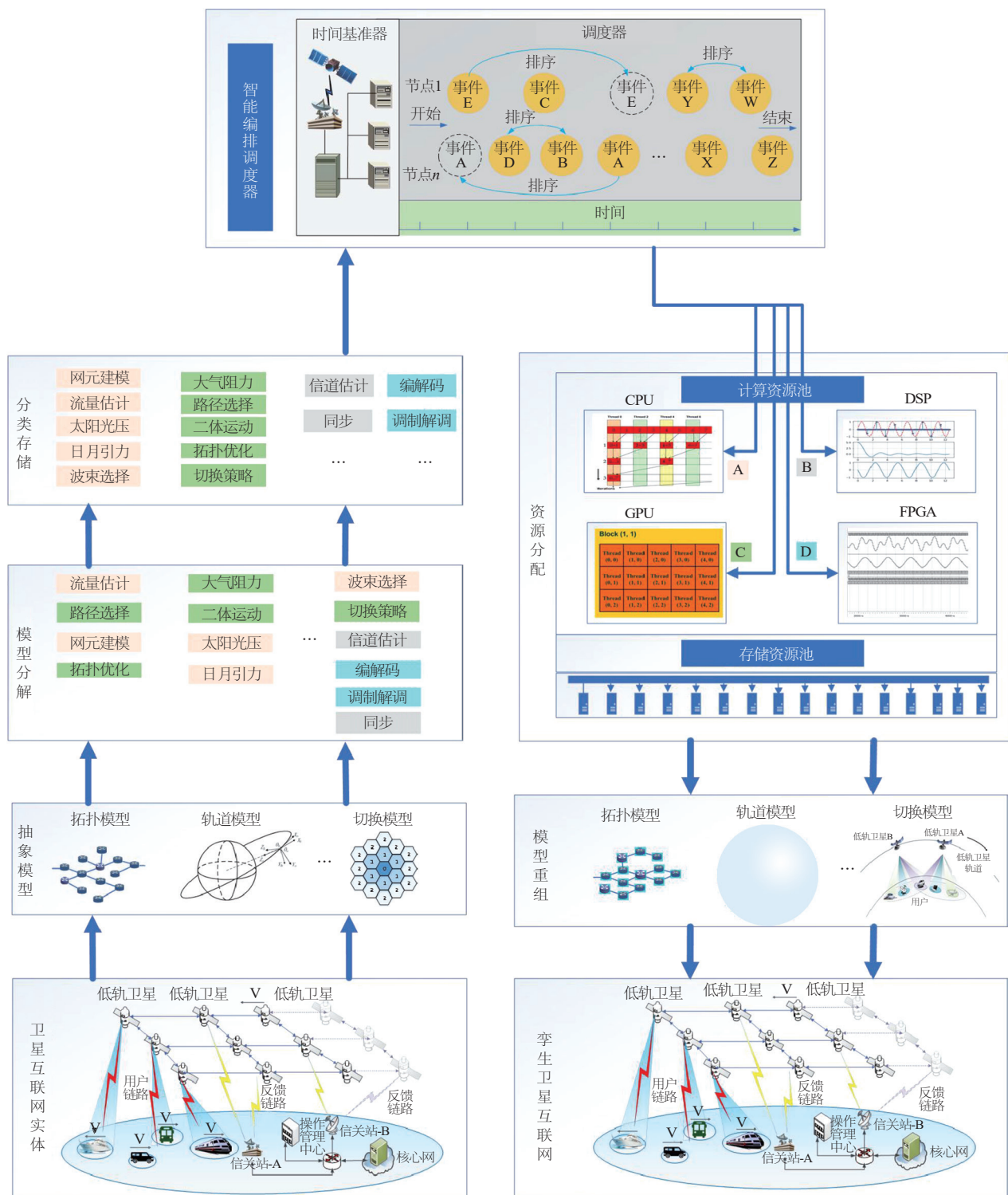


图5 基于智能编排的分布式异构处理平台方案

感知（Observe）：数据感知是智能化处理的基础。物理环境数据主要通过遥测或者通信分系统向地面站反馈，网络数据主要由网络协议进行采集上报。

判断（Orient）：卫星互联网的判断主要分为通信指标和网络安全两项。通信指标包含卫星覆盖能力、系统容量、用户容量、时延、丢包率和误码率等，通过统计

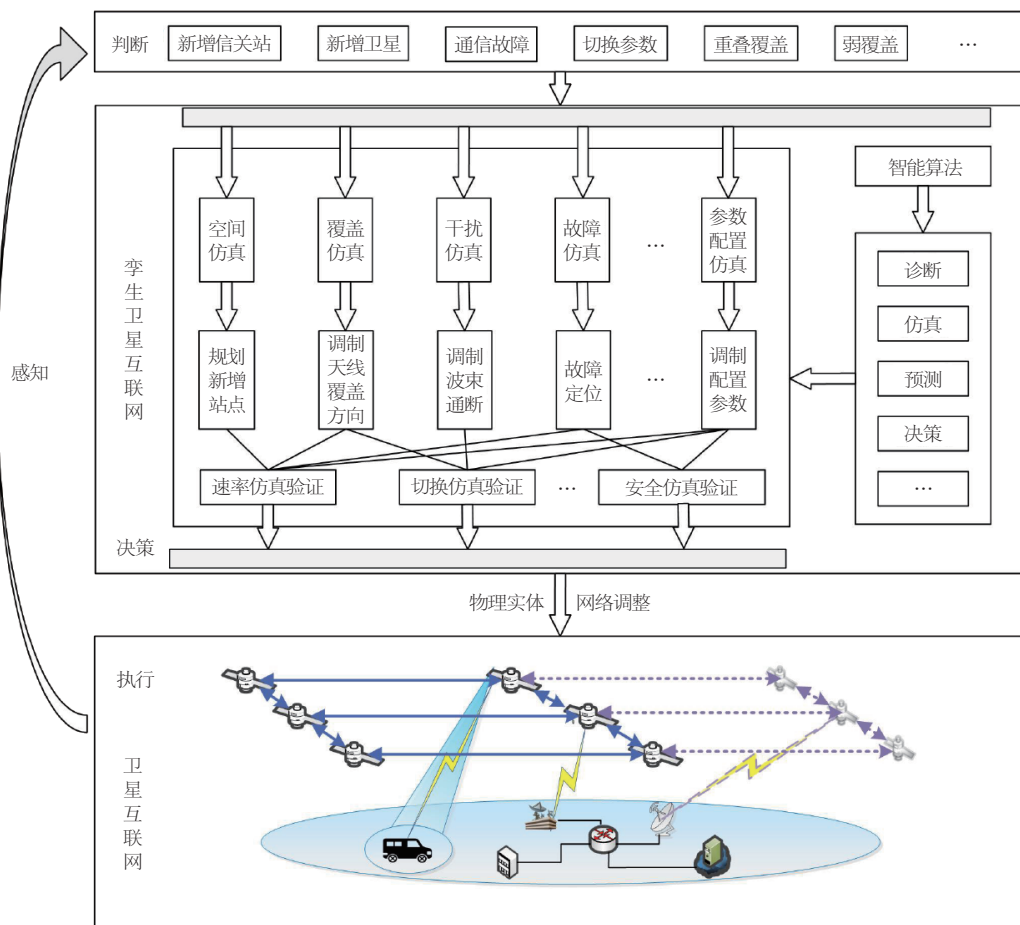


图6 OODA闭环

分析和仿真，判断卫星互联网系统的实际通信指标能否满足设计系统的通信指标要求。网络安全是指网络系统的硬件、软件及其系统中的信息受到保护，在卫星互联网中主要需要诊断网络故障并检测恶意攻击。

决策（Decide）：决策是智能化处理的核心。首先通过对通信指标和网络安全的判断，定位不达标通信指标，并输出是否存在网络故障和恶意攻击；然后基于孪生卫星互联网，借助人工智能、AI 算法、专家经验、大数据分析等技术实现参数优化和故障处理，并生成对应的执行命令下发到卫星互联网实体网络。

执行（Act）：卫星互联网网络实体将收到的执行命令进行解析，然后通过天线系统、姿态控制系统、路由器等各个系统共同协作执行。

卫星互联网对决策的推演能力、准确率、实时性和效率等有一定要求。面对大数据，使用人工优化处理数据的传统方式将会发生改变。相对于人，计算机处理数据的优势在于其不会受环境、情绪的影响，且处理速度

快、准确率高。随着人工智能技术的发展，计算机和机器已经越来越智能化，例如Alpha Go依靠深度学习和强化学习，拥有了自主学习、自我进化的能力^[31]。随着新算法的提出、已有算法的优化、XAI^[32]和量子计算的突破，人工智能技术的实时性和准确性问题将会得以解决。

卫星互联网物理网络实体及空间环境的感知、模型智能编排调度后形成的预测判断、基于智能算法的智能化决策和反馈执行，形成了自学习和自演进的OODA闭环，而池化的存算资源以及智能编排调度技术加快了整个OODA闭环的运转。

参考文献：

- [1] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.

- [2] 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.
- [3] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 2-10.
XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [4] 翟立君, 潘沐铭, 汪春霆. 卫星5G技术的发展和展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 1-9.
ZHAI L J, PAN S M, WANG C T. Development and prospect of satellite 5G technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 1-9.
- [5] LIU Y Q, SU Y T, ZHOU Y Q, et al. Frequency offset estimation for high dynamic LEO satellite communication systems[C]//Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [6] 邹明, 赵子骏, 魏凡. 新兴低轨卫星通信星座发展前景研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(12): 1155-1162.
ZOU M, ZHAO Z J, WEI F. Research on the development prospect of emerging low earth orbit satellite communication constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(12): 1155-1162.
- [7] 周生东, 王永生. 俄罗斯联邦2016—2025年航天计划基本内容[J]. 国际太空, 2017(5): 14-18.
ZHOU S D, WANG Y S. Basic content of Russia federation space program 2016-2025[J]. Space International, 2017(5): 14-18.
- [8] 蔡闻一, 刘蒋, 佳玲, 等. 美国最新《国家航天战略》要点分析[J]. 中国航天, 2018(5): 21-25.
CAI W Y, LIU J, JIA L, et al. Analysis on main points of US new national space strategy[J]. Aerospace China, 2018(5): 21-25.
- [9] 刘畅, 夏禹, 崔彪. 卫星互联网建设运营模式研究与建议[J]. 卫星应用, 2020(11): 35-40.
LIU C, XIA Y, CUI B. Research and suggestion on the construction and operation mode of satellite Internet [J]. Satellite Application, 2020(11): 35-40.
- [10] 刘垚圻, 周一青, 苏晓旭. 低轨卫星互联网发展与挑战[J]. 中国电信建设, 2021(1): 32-40.
LIU Y Q, ZHOU Y Q, SU X X. Development and challenges of low-orbit satellite Internet[J]. China Telecom Construction, 2021(1): 32-40.
- [11] 何异舟. 国际天地融合的卫星通信标准进展与分析[J]. 信息通信技术与政策, 2018(8): 1-6.
- HE Y Z. Analysis and planning of international standard in space-ground integration satellite communication[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2018(8): 1-6.
- [12] SaT5G项目宣布成功进行一系列卫星5G演示[J]. 无线电工程, 2019, 49(8): 665.
SaT5G project announces successful series of satellite 5G demonstrations[J]. Radio Engineering, 2019, 49(8): 665.
- [13] 翟华. 融合5G的卫星移动通信系统[J]. 空间电子技术, 2020, 17(5): 71-76.
ZHAI H. Integration of 5G and satellite communication systems[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(5): 71-76.
- [14] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 26-35.
ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network Operation, Maintenance and Resource Management in Mega Constellation System Full text replacement[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.
- [15] CAO H, SU Y T, ZHOU Y Q, et al. QoS guaranteed load balancing in broadband multi-beam satellite networks[C]//Proceedings of ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [16] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1): 71.
- [17] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles[C]//Proceedings of 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012.
- [18] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588.
LIU W R, TAO F, CHENG J F, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588.
- [19] 孙滔, 周铖, 段晓东, 等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术[J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 569-582.
SUN T, ZHOU C, DUAN X D, et al. Digital twin network(DTN): concepts, architecture, and key technologies[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(3): 569-582.
- [20] GONG T R, SHLEZINGER N, IOUSHUA S S, et al. RF chain reduction for MIMO systems: a hardware prototype[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 5296-5307.
- [21] 朱婷婷, 张勇. 5G网络实现4K/8K/VR高清视频业务的标准化模型和应用场景研究[C]//第十七届中国标准化论坛. [S.l.:s.n.], 2020: 6.

- ZHU T T, ZHANG Y. 5G network realizes standardization of 4K/8K/VR high-definition video services model and application scenario research[C]//The 17th China Standardization Forum. [S.l.:s.n.], 2020: 6
- [22] 曾艳, 钱浩, 杨海涛. 基于SNMP的网络监测系统的设计与实现[J]. 科学技术创新, 2021(15): 77-79.
- ZENG Y, QIAN H, YANG H T. Design and implementation of network monitoring system based on SNMP[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(15): 77-79.
- [23] MACK S G, SRIRAM G. NetFlow: a tool for isolating carbon flows in genome-scale metabolic networks[J]. Metabolic Engineering Communications, 2021, 12:1-9.
- [24] 毛东峰, 贾曼, 何晓明, 等. 网络遥测技术及其在网络自动化运维中的应用[J]. 电信科学, 2021, 37(2): 154-163.
- MAO D F, JIA M, HE X M, et al. Network telemetry technology and its application in automatic network operation and maintenance[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(2): 154-163.
- [25] GUO J C, LI D C, CHEN Z. Performance analysis of heterogeneous traffic networks based on sFlow and NetStream[J]. International Journal of Performability Engineering, 2020, 16(10): 2-10.
- [26] 白煜. 基于NETCONF的网络设备配置与管理系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- BAI Y. Design and implementation of network equipment configuration and management system based on NETCONF[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [27] 毛东峰, 贾曼, 何晓明, 等. 网络遥测技术及其在网络自动化运维中的应用[J]. 电信科学, 2021, 37(2): 154-163.
- MAO D F, JIA M, HE X M, et al. Network telemetry technology and its application in automatic network operation and maintenance[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(2): 154-163.
- [28] RICKS T M, LACY T E, PINEDA E J, et al. Order-reduced solution of the nonlinear high-fidelity generalized method of cells micromechanics relations[C]//Proceedings of American Society for Composites 2017. [S.l.:s.n.], 2017.
- [29] 胡佳兵. 面向节带化视频监控的背景模型技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
- HU J B. Research of surveillance video background-model technology for transmission bandwidth saving[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [30] 王晓虹, 王卅, 唐宏伟, 等. 构建“新基建”国家战略的技术底座: “信息高铁”综合试验场建设的实践与思考[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1066-1073.
- WANG X H, WANG S, TANG H W, et al. Building substrate for national strategy of new infrastructure construction—practice and thought of information superbahn testbed[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1066-1073.
- [31] SILVER D, HUANG A, MADDISON C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, 2016, 529 (7587): 484-489.
- [32] VAN D W, NIEUWBURG E, CREMERS A, et al. Evaluating XAI: a comparison of rule-based and example-based explanations[J]. Artificial Intelligence, 2021, 291.

[作者简介]



刘垚圻 (1995-), 男, 中科南京移动通信与计算创新研究院空天地一体化研究室主任, 主要研究方向为天地一体化信息网络架构、先进信息网络试验平台。



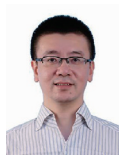
李红光 (1997-), 男, 中国科学院计算技术研究所硕士生, 主要研究方向为天地一体化信息网络标准化与移动性管理、先进信息网络试验平台。



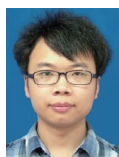
周一青 (1975-), 女, 中国科学院计算技术研究所无线中心副主任, 研究员, 主要研究方向为计算与通信融合、异构网络、干扰管理。



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信息网络、计算与通信融合。



苏泳涛 (1976-), 男, 北京中科晶上科技股份有限公司首席科学家兼技术研发部经理, 副研究员, 主要研究方向为卫星通信传输与组网技术。



钱晋希 (1986-), 男, 中国空间技术研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统研发及仿真评估技术研究。