

卫星互联网资源管控技术研究

王龙河^{1,2,3}, 周一青^{1,2,3,4*}, 曹欢^{1,2,3}, 刘子凡^{1,2,3}, 陈岩^{1,2,3,4},
陈道进^{1,2,3}, 石晶林^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. 处理器芯片全国重点实验室, 北京 100190; 3. 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190; 4. 中国科学院大学计算机科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 卫星互联网支持全球无缝覆盖, 是地面通信系统的重要扩展和延伸、构建“空天地”一体化网络的关键环节、实现网络强国的重要基础信息设施; 发展卫星互联网战略意义重大, 相应的资源管控研究较为迫切。本文阐述了卫星互联网的基本概念及国际发展前沿、卫星互联网资源管控的基本要素与研究进展, 辨识了以卫星互联网新环境、新模式为代表的卫星互联网资源管控发展挑战, 形成了相应的应对策略。设计了卫星互联网资源管控技术路线, 涵盖星地网络互联互通、星地异构资源融合、智能按需服务、智慧内生等主要阶段; 论证提出了卫星互联网资源管控模式与架构, 构建了包括高时空动态资源表征、多维资源时间连续确定性分析、多维时变能力池索引、智能决策规划在内的卫星网络资源管控关键技术体系。研究建议, 重点关注资源异构、网络结构动态变化、服务需求差异化的网络特征, 按照优化的技术路线循序渐进发展, 突破卫星网络资源管控关键技术并融合人工智能技术, 从而实现智能高效的卫星网络资源管控。

关键词: 卫星互联网; 资源管控; 空天地一体化网络; 动态资源表征; 智能规划决策

中图分类号: TN927.23 文献标识码: A

Resource Management and Scheduling for Satellite Internet

Wang Longhe^{1,2,3}, Zhou Yiqing^{1,2,3,4*}, Cao Huan^{1,2,3}, Liu Zifan^{1,2,3}, Chen Yan^{1,2,3,4},
Chen Daojin^{1,2,3}, Shi Jinglin^{1,2,3,4}

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. State Key Lab of Processors, Beijing 100190, China; 3. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China; 4. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Supporting seamless global coverage, satellite Internet is an important expansion and extension of terrestrial communication systems, plays a key role in the space-air-ground integrated network, and acts as an important information infrastructure for building China's strength in cyberspace. Developing satellite Internet is of great strategic significance, and corresponding research on its resource management and scheduling is urgently needed. This study illustrates the fundamental concepts and international development frontiers of satellite Internet as well as the basic elements and research progress of satellite Internet resource management and scheduling, identifies the challenges imposed by the new environment and new modes of satellite Internet, and proposes the development strategies. Moreover, it designs a technical route for satellite Internet resource management, including the primary stages of satellite-ground

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-12-08

通讯作者: *周一青, 中国科学院计算技术研究所研究员, 研究方向为通信与计算融合; E-mail: zhouyiqing@ict.ac.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1808004); 中国工程院咨询项目“6G 带动数字经济双循环发展战略研究”(2022-XBZD-03)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

network interconnection, integration of heterogeneous resources, intelligent on-demand service, and native intelligence. In addition, this study proposes the model and architecture of satellite Internet resource management and scheduling, and constructs a key technical system involving high spatio-temporal dynamic resource characterization, multi-dimensional resource time-continuum deterministic analysis, multi-dimensional time-varying capacity pool indexing, and intelligent decision planning. To realize the intelligent and efficient management and scheduling of satellite Internet resources, we should focus on the network characteristics such as resource heterogeneity, dynamic change of network structure, and differentiated service requirements, implement satellite Internet resource management and scheduling according to the optimized technical route, achieve breakthroughs regarding corresponding key technologies, and integrate artificial intelligence technologies into the resource management and scheduling.

Keywords: satellite Internet; resource management and scheduling; space-air-ground integrated network; dynamic resource characterization; intelligent planning and decision-making

一、前言

近年来, 卫星互联网技术快速发展, 星地网络逐步融合, 网络资源规模呈爆发式增长^[1]。在空间段, 卫星应用已从单一卫星服务模式逐渐发展为多星组网、卫星集群的多星协同服务模式^[2]; 在星地网络方面, 卫星网络和地面网络由“各自一张网”逐渐融合为“空天地”一体化网络^[3,4]; 在业务方面, 卫星由原来的专用服务逐渐转变为面向社会公众的开放性通信服务^[5]。可以预判, 卫星互联网将集通信、遥感、导航、计算服务于一体^[6-8], 面向诸多行业提供即时可用的卫星信息服务^[9]。

卫星互联网资源管控技术是保障网络资源高效利用的关键技术, 协调网络中的多维资源, 形成差异化的多维服务能力, 优化网络性能以提高用户服务满意度, 进而保障卫星互联网自身的稳定运行以及对外的可靠服务, 实现高效、绿色、集约网络。然而, 当前卫星业务相互独立, 卫星参数、资源、能力各异; 网络资源孤立, 相应调度仍依赖规则、经验、人工干预等方式。现有卫星通信资源管控技术主要采用分层管理方案, 主流研究仍围绕局部智能化管控展开, 导致针对卫星互联网的高动态、大规模、资源多维异构特性的高效管控技术较为薄弱, 不适应未来卫星网络的信息服务需求^[10]。

研究卫星互联网资源管控技术, 提高资源运用效率、增强信息服务能力, 是空间信息技术领域发展亟需。本文立足我国卫星互联网建设的重大背景, 面向卫星互联网的资源高效运用需求, 以星地网络融合、“通导感算”协同应用为驱动要素, 研判卫星互联网的新环境、新特点并提出相应资源管控的新模式, 设计智能化资源管控架构并阐述关键技术, 以期为我国卫星互联网资源管控的创新发展提供先导性、基础性参考。

二、卫星互联网发展与资源管控

(一) 卫星互联网概述

卫星互联网的本质是“卫星通信承载的互联网络”, 核心在于基于卫星通信系统构建互联互通网络^[11]; 发射大量卫星, 组成覆盖全球的大规模卫星网络, 为社会公众提供全域、全天候的宽带互联网接入服务。与地面网络相比, 卫星互联网覆盖区域大、通信距离远、服务机动灵活, 不易受地面灾害影响, 在海上通信、空中通信、超视距传输、抢险救灾等应用上具有特殊优势。卫星互联网被视为未来网络实现全球覆盖、万物互联的必由之路^[12], 实现“空天地”一体化网络的关键组成部分^[13]。

卫星互联网的体系架构主要分为空间段、地面段、用户端三部分(见图1)。^①空间段由通信、导航、遥感等卫星构成。通信卫星主要负责用户链路、星间链路、馈电链路之间的信号传输, 网络节点之间通信数据的处理及传递; 导航卫星提供定位、授时服务; 遥感卫星提供环境监测、资源探测等服务。“通导遥”一体化网络指将导航、遥感卫星接入卫星互联网, 实现“通导遥”融合网络。基于卫星互联网, 导航资源、遥感资源可实现资源共

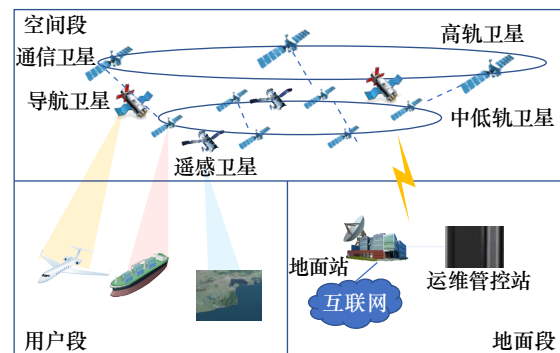


图1 卫星互联网体系架构

享与融合,形成一体化服务的能力。考虑到导航、遥感卫星的资源运用与卫星互联网资源管控存在直接关系,本研究将导航资源、遥感资源纳入卫星互联网资源管控范围。②地面段主要包括地面站、运维管控站,主要功能有地面网络接入、卫星数据落地处理、卫星资源综合管控、卫星运行状态分析及维护等。③用户段主要指通过卫星进行通信的各类用户终端,包括固定终端、车载终端、机载终端、船载终端、便携/手持终端等。

(二) 卫星互联网发展

国际上,OneWeb、O3b、SpaceX、Telesat等企业推出了卫星互联网计划^[4]。其中,O3b星座系统是目前唯一成功投入商业运营的中轨卫星通信系统;SpaceX公司是拥有卫星数量最多的商业卫星运营商。Starlink是Space X公司建造的卫星互联网星座,目标是建设由约 4.2×10^4 颗卫星组成的中低轨卫星群;单颗卫星容量可达20 Gbps,星间链路采用激光通信技术。截至2023年11月,Starlink星座已有在轨卫星5057颗^[5],面向60多个国家和地区的超过 2×10^6 个用户提供由卫星接入的互联网通信服务。在民用领域,Starlink星座可提供500 Mbps下行速率、40 Mbps上行速率、20 ms延迟的互联网接入服务,实测性能已与地面宽带网络的平均水平持平。

我国卫星互联网起步稍晚,但近年来发展迅速,已提出“虹云”“鸿雁”“行云”“银河”“国网”等星座计划,组网数量大于30颗的低轨卫星项目超过10个,规划卫星发射总量超过 1.5×10^4 颗。卫星互联网被纳入“新基建”范围^[6],卫星互联网建设上升为国家重大工程^[7]并将融入遥感工程、导航工程,成为国家天地一体化信息系统的重要组成部分^[5]。

随着第五代移动通信(5G)的成熟应用,国际电信联盟(ITU)、第三代合作伙伴计划(3GPP)等标准化组织开始研究新一代卫星系统的星地融合标准化问题^[11]。ITU提出了5G和卫星通信融合的4种应用场景:服务于偏远地区的中继通信场景、为地面小区扩容和增强的小区回传场景、服务于移动平台用户的动中通场景、服务于内容分发的混合多播场景。3GPP标准组织提出了卫星互联网与5G融合的三大场景:业务服务、泛在服务、扩展服务^[18]。在网络架构方面,3GPP提出了基于星上处理/透明转发、有/无中继的4种星地融合网络架构方案。整

体上,国际标准化组织将卫星通信作为未来通信系统的重要组成部分,针对非地面网络制定了通信标准,提出了卫星与地面网络融合方案^[19]。

(三) 卫星互联网资源管控

卫星互联网资源指信息获取、处理、存储、传输过程中必要的设施和能力,按照设施所处位置的不同分为天基资源、地面资源:前者由各种不同轨道的卫星组成,后者由分布在各处的信关站、管控站、地面网络资源组成。其中,信关站是实现地面资源、天基资源连接的重要“桥梁”。

天基资源主要指卫星资源,根据卫星结构分为平台资源、有效载荷资源:前者指保障卫星正常运行的基础资源,如蓄电池、太阳能设备为系统提供能源,动力设备用于调整卫星姿态以保持正常在轨运行;后者是卫星提供服务的有效资源,根据卫星有效载荷类型的不同将天基卫星分为通信卫星、导航卫星、遥感卫星等,分别对应通信资源、导航资源、遥感资源等。

按照资源能否共享,卫星互联网资源分为固定资源、可共享资源。星上能源设备、温控设备、姿态控制设备等维持卫星在轨运行的卫星平台资源属于固定资源,无法实现资源共享;有效载荷中的通信、计算、遥感等资源可通过网络共享,属于可共享资源。可共享资源通过软件定义网络(SDN)、虚拟化技术映射为统一的服务资源,是智能化资源运用技术的重点研究对象。

卫星互联网的主要资源及其特征如表1所示。计算、通信、存储、遥感、导航资源均存在于空间段卫星中,但是受限于卫星制造成本以及星载设备入轨后难以扩充等因素,导致资源受限^[20]。例如,卫星受质量、体积、发射成本的约束,星上载荷及存储能力有限;卫星工作中受宇宙辐射严重,星载处理器需具备抗辐射能力,难以沿用地面高性能处理芯片,导致星上芯片处理性能大幅低于地面,制约了星上计算能力。地面资源集中在计算、通信、存储方面,受建造因素的影响较小,可灵活扩展升级,能够实现高性能、大容量的网络资源。

现阶段,我国在役通信卫星主要是“天通”“中星”“亚太”等系列,卫星网络结构简单,在实际管控系统中多采用基于规则与策略的固定或半固定资源管控技术。这类资源管控技术易于实现,但

表1 卫星互联网关键资源及其特征

设备类型	物理设备	资源类型	资源位置	服务能力
计算设备	CPU GPU FPGA DSP	计算资源	星地	数据处理能力 计算能力
通信设备	激光器 微波转发器 抗干扰转发器 天线	处理资源	星地	传输能力
存储设备	硬盘 磁盘阵列	存储资源	星地	存储能力
遥感设备	光学相机 激光扫描仪 合成孔径雷达 辐射计	观测资源	星上	观测能力
导航设备	时钟 信标	导航资源	星上	导航能力 定位能力 跟踪能力

注：CPU表示中央处理器；GPU表示图像处理器；FPGA表示现场可编程门阵列；DSP表示数字信号处理。

缺乏灵活性，导致系统资源利用率低下，影响网络综合性能^[21]。

在学术研究方面，网络管控方法主要是分层管理，将大规模网络划分为多个组或域，降低管控复杂度^[22]。分层管控概念将网络分为高轨层、低轨层，增强了传统卫星的灵活性和扩展性^[23]；进一步发展的分层管理、域内自治的分布式域管控策略，有效降低了地面管控节点数目，适用于大规模卫星网络的管理域划分及动态维护^[24]。高低轨双层智能接入算法能够提高卫星网络的接入效率^[25]。采用频率及功率混合优化算法，设计智能时隙共享策略，以优化多层卫星网络的功率、提高资源利用效率^[26]。

分层管控技术在一定程度上降低了管控复杂度，但额外引入跨域问题；卫星网络的高动态特性导致

频繁跨域切换，难以实现高动态网络环境下的全局最优规划。随着人工智能（AI）技术的发展，将机器学习、强化学习等技术应用到卫星网络资源管控成为热点。例如，基于双层深度Q网络实现中继卫星网络任务动态调度，提升了任务分配效率^[27]；采用图卷积神经网络实现动态网络拓扑中的路由预测，支持资源连接关系的动态预测^[28]；基于深度强化学习的卫星动态功率分配算法能够提高系统吞吐量增益^[29]。也要注意，AI技术中的网络结构复杂度极高，针对多维资源的智能管控技术仍在探索中。

三、卫星互联网资源管控面临的挑战

随着卫星互联网的不断发展，相应信息服务的空间范畴不断扩大，多维综合信息服务需求也在逐步提升。卫星互联网将成为“全域覆盖、随遇接入、泛在连接”的核心服务，其网络环境和服务模式均呈现新特性。

（一）卫星互联网新环境

卫星互联网的新环境主要体现在应用场景、网络结构、网络资源等方面。卫星互联网的应用场景更加丰富多样（见表2），网络需求具有显著的多样性、差异性。相比传统卫星通信、地面通信，卫星互联网的服务行业更加广阔、应用场景更加丰富，而这些应用场景下的服务需求存在显著的差异性。例如，军事保密通信、政府外交通信的需求重点是安全和可靠，国土资源监测、科研服务场景中的传感资源获取服务偏向高速下行传输速率，军事侦查、空间对抗服务需求重点关注低时延、高速率，物联网场景关键需求是海量连接。

卫星覆盖的技术场景主要有连续广域覆盖、热点高容量、超大规模连接、低时延/高可靠。不同

表2 卫星互联网服务场景

服务类型	服务内容
军事服务	抗干扰通信、保密通信、空间对抗、侦查、防御等
政府服务	指挥、外交、国土安全、资源监测、应急保障、抗灾抢险、农业观测、林业监测、自然灾害监测等
科研服务	气象观测、空间观测等
交通服务	航空、航海、铁路、公路、车联网等
公众服务	卫星电视、卫星电话、卫星广播、卫星宽带等
其他服务	科学考察、远程医疗、物联网、金融交易等

技术场景面临的性能挑战各不相同,传输速率、传输时延、连接密度、抗干扰、安全加密等指标都有可能成为挑战性指标。例如,军事通信对抗干扰指标有着严格要求,外交通信要求数据不能落地且具备加密功能。

卫星互联网规模庞大,网络结构动态复杂多变,网络资源具有异质、异构特征。随着全球在轨星座的不断增加、星座规模趋向巨型化发展,网络规模更大、节点更多。此外,低轨卫星移动速度快,网络节点位置动态变化,网络拓扑需要动态更新,也使网络结构更加复杂、网络资源动态变化。随着卫星网络的发展,卫星承载的业务增多,卫星节点的类型和功能呈现多样化发展趋势;不同类型的卫星具有不同的功能,所提供的资源和服务能力也存在差异性,使得网络呈现异质、异构特性。例如,卫星网络中的部分卫星只可透明转发,部分卫星不具有星间链路,部分卫星功能固化且不具备虚拟化功能;在资源管控过程中需针对不同体制卫星建立不同模型,带来了更大的资源管理难度。

(二) 卫星互联网新模式

卫星互联网将彻底改变传统天基系统以平台为中心的单星服务模式,通过网络融合、资源虚拟化协作共享、网络切片等技术应用,实现按需扩展、自治、自演进的多星协同柔性服务模式,提供灵活多样、快速实时的信息服务。

卫星互联网除了进行数据的传输和共享,还支持海量的信息服务,对服务和网络资源进行综合管控,为不同用户的服务需求提供合适、可靠的资源。传统卫星网络资源在可扩展性、控制管理等方面存在不足,难以满足不同服务类型和服务对象对资源的需求。面向卫星互联网资源的强变时空尺度特性、多样化业务的复杂不确定性,一旦网络环境发生变化,卫星互联网需要及时制定应对策略,按需动态匹配有限的可用网络资源,实现柔性自治、弹性服务,为超大容量广域覆盖网络应用提供高可靠、高质量服务。

柔性服务模式依托高动态虚拟化技术,针对车联网时延敏感性服务、物联网海量连接服务、宽带接入高速率通信服务等垂直行业的差异化服务需求,在大规模、一体化融合的卫星逻辑网络内,抽象出多个互相隔离、互不影响的端到端虚拟网络。

针对差异化的广域信息网络应用需求,动态构建适应不同业务特征、差异化的虚拟网络切片,精确匹配各类业务的数据资源,实现网络功能的“按需伸缩、自主演进”。

(三) 卫星互联网新服务

随着大规模星座的规划与建设,各类卫星的数量大幅增加,在轨卫星的类型、配置、轨道位置呈现多样化发展态势,导致卫星互联网的网络结构复杂、网络资源高度异质化。星地网络融合代表了网络服务用户(行业)的进一步融合,业务类型更加丰富,用户业务需求更显多样化、个性化、随机化。各类业务对卫星网络的高效运行、高质量服务提出了直接挑战。一方面,以单一业务服务质量(QoS)为评价标准的传统服务模式不再适应多种用户(行业)的保障质量需求^[4],亟需针对行业特征和独特需要来设计新的保障评估体系。另一方面,当前以经验、规则为主的传统规划与调度方法,难以应对卫星组网规模大幅增长带来的复杂调度问题,导致资源运用效率低下,无法即时响应用户需求。

满足差异化的用户(行业)网络服务需求,提高通、导、遥、算、存资源的利用效率,是卫星互联网资源高效运用技术的发展目标,可采取如下方法予以实现。①建立新的用户服务质量评估手段,基于服务水平协议(SLA)构建用户服务体系,将用户需求转化为行业差异化的服务保障指标,智能评估针对不同行业、不同场景、不同需求的服务能力^[1]。②建立灵活、轻量、可重构的天基和地基网络底座,基于SDN、网络功能虚拟化(NFV)等技术设计按需服务的智能资源编排器^[30]。在统一表征网络异构分层多维资源的基础上,应用高效资源索引、智能化决策等技术,按照各行业差异需求灵活开展网络功能重定义(如“通导遥”卫星通信载荷、计算载荷、感知载荷)以及节点服务切片组网,实现网络资源能力的动态表征描述和高效运用,保障用户(行业)的差异化服务需求。

四、卫星互联网资源管控技术路线

当前,地面网络资源管控研究已进入AI赋能阶段^[31-33],而相应技术不能直接应用于卫星网络;

卫星互联网发展相对缓慢，网络架构落后于地面。面向卫星互联网的新特点、新模式及其资源管控需求，着力提升卫星互联网的星地资源利用效率，才能实现网络资源的高效运用。本研究立足我国卫星通信系统发展现状，论证提出了卫星互联网资源管控技术发展路线（见图2）。相应技术路线主要分为星地网络互联互通、星地异构资源融合、智能按需服务、智慧内生4个阶段。

（一）星地网络互联互通

当前，通信、导航、遥感卫星是相互独立的服务系统，设计功能及作用各不相同，如“通导遥”卫星系统的运行和服务模式自成体系，体制、接口、协议、服务流程等差异明显。然而，随着用户需求的提高，未来“通导遥”卫星系统之间资源协同、综合保障复杂任务是发展趋势。卫星互联网建设的目标之一即整合不同领域的卫星资源，为垂直行业用户提供高质量服务。

卫星互联网资源管控应将不同卫星网络之间的

互联互通作为首要的阶段性任务，实现异构网络“通导遥”等资源和能力的集成运用，从而打破异构卫星网络之间“烟囱式”信息服务框架，实现异构网络之间的信息交互与快速流转。以遥感卫星网络为例，多采用缓存方式，与地面站建立连接后再将缓存数据传输至地面；通过星间链路接入通信卫星网络，可实现观测数据的实时回传，从而提高即时信息的获取能力^[34]。

星地网络的互联互通，需要打破天、地界限，实现互操作、共资源、同服务；主要难度在于当前各个网络具有不同的用户群体、体系结构、协议标准、交互流程，难以协同资源开展服务保障。可从空口技术、网络架构、网络管控3个层面进行顶层综合设计。在统一空口上，“通导遥”网络的星地、星间、地面通信接口采用统一的传输体制和标准，从信息传输层面着手打通通路；在统一网络架构上，“通导遥”网络进行一体化设计，实现组网框架共享功能；在统一资源管控上，设计主从管理架构，经由主控对“通导遥”中分控进行统一管理，实现多网系管控系统的集成化应用、对异构网络资源的协同调度和控制。

（二）星地异构资源融合

星地异构资源融合将在互联互通的基础上进一步融合多维资源，打破传统网络中资源孤立和闭塞的限制。以天基观测感知场景为例，遥感卫星将采集的原始数据下发至地面网络，地面网络对其分析后根据判断结果进一步请求兴趣区域的高精度图像；该场景下大量的原始数据传输限制了感知效率。融合遥感卫星网络资源与天基计算资源，将遥感卫星的图像分析任务卸载到天基计算网络，在星上直接完成分析以缩短任务周期、提升天基感知效率。

在实现“通导遥”星地异构网络互联互通的基础上，融合异构资源管理关键在于建立资源的统一表征。由于不同网络自身资源的异质异构，互联互通层面上的资源统一调度仅能实现协同工作，而系统之间的资源共享、灵活复用效率仍不高，导致资源综合利用效率较低。为此，打破异构网络中的资源壁垒，对资源进行统一表征，形成时变虚拟化资源池模型并对资源的能力进行映射，据此支撑网络资源管控开展高效配置。

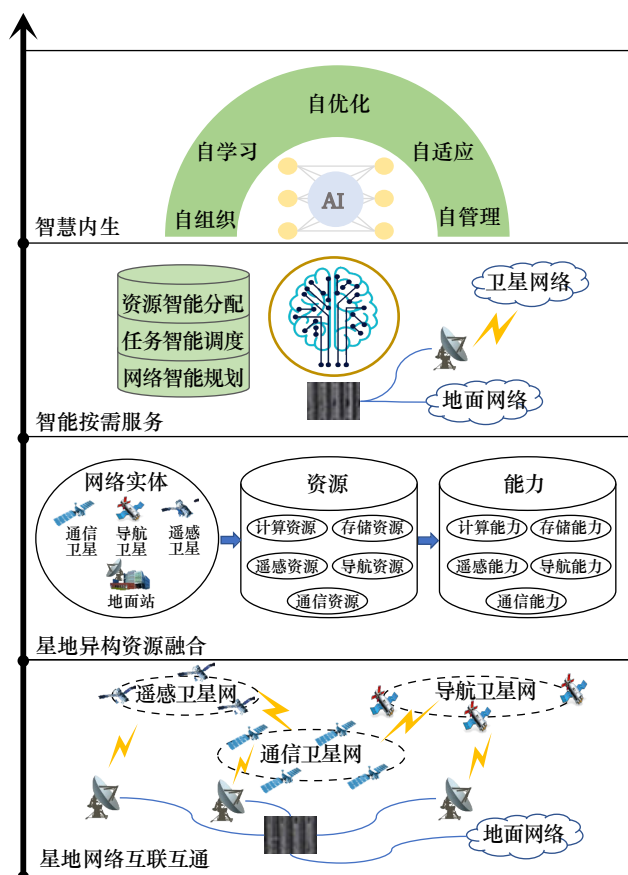


图2 卫星互联网资源管控技术路线

(三) 智能按需服务

在融合网络架构下，“通导遥”卫星网络资源的运用较为复杂。当前基于规则、人工干预的管理方法很难高效运用网络资源，保障不同用户需求的能力不强。需要针对部分重要且复杂的网络功能进行智能化设计，根本性提升网络运行的服务效率。例如，3GPP对核心网中的网络数据分析功能进行智能化增强以提升分析效率。中国通信标准化协会的TC1WG1、TC5WG6、TC5WG10均开展了智能化技术的应用研究，旨在解决通信服务网络中业务及应用的部署、运行、拓展、安全等问题，消除复杂网络及平台的规划、优化、维护、节能，无线资源的动态按需分配等问题。在“通导遥”一体化网络中，采用重点功能局部智能化的方法提升网络资源运用效率是技术发展趋势。

智能按需服务通过对资源进行更细粒度的融合，形成具备确定性服务能力的若干子网，充分适应网络中的差异性服务需求。尽管星地异构资源融合可实现多维资源之间的联动，但是卫星互联网呈现高的动态特性，从高动态的多维时变资源中建立满足差异性用户需求的网络仍是智能按需服务的难点。需要研究时变多维资源检索方法，以快速高效地获取资源集合、响应服务需求。

(四) 智慧内生

局部智能化方法是提升网络运行服务能力的手段，但在资源运用效率上还有较大的提升潜力。这是因为，局部智能化方法没有跨层、跨域联合优化能力，无法综合全局信息进行规划以实现星地网络资源运用的最优。因此，未来网络服务架构需实现AI能力的全网渗透，即智慧内生。智慧内生网络可自动感知网络变化，自动协调全局资源实现负载均衡、故障恢复，保证服务质量、增强网络可靠性。在未来智能化通信服务场景中，AI赋能卫星互联网，为行业用户提供实时AI服务、实时计算类新业务，在数据隐私、极致性能、海量数据传输等方面提供更优化的解决方案。

在卫星互联网中，多网系、分层次、高动态、极复杂的组网环境，差异化的用户业务需求，使网络资源的最优化运用十分困难。在卫星互联网架构层面进行内生智能化设计，通过网络性能的自优化能力实现智能连接、智能管理，显著增强

用户体验。

五、卫星互联网资源管控模式、架构及关键技术

(一) 卫星互联网资源管控模式

卫星互联网需要打破传统基于经验和规则的资源运用方式，转而采用智能化的资源管控（见图3），才能满足多样性、差异化的服务需求，实现按需分配、按需增强的弹性服务模式。该管控模式将贯穿本研究提技术路线的全阶段，相应流程为：将星地网络物理设备的资源表征为资源池，作为资源智能高效运用的前提；将用户服务需求转化为SLA相关的服务指标，确定所需的服务能力；基于服务能力对网络资源进行切片编排，调度网络资源来实现用户服务需求。卫星互联网资源管控模式中，资源组织层是网络互联互通阶段、异构资源融合阶段的主要内容；资源分配与调度层是智能按需服务阶段的重点内容；资源服务能力层是智慧内生阶段的核心内容。

在资源组织层面，卫星互联网可基于SDN、

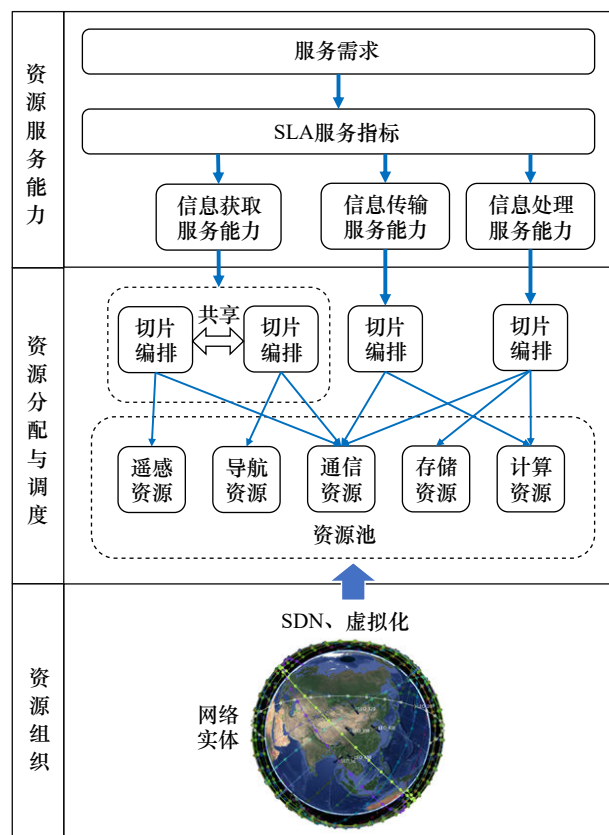


图3 卫星互联网资源管控模式

NFV 统一表征地面资源和天基资源^[35]，将星地网络实体中的物理设备资源整合为网络资源池，为高效灵活开展资源分配及调度提供基础技术支持。针对卫星互联网资源的时变特性，建立动态资源与服务能力的关系表征，是开展资源高效管控的必备前提。

在资源分配与调度层面，根据所需服务能力，采用切片技术从网络资源池中选择具备特定能力的资源集合，编排形成一组逻辑上独立的专用服务保障网络。根据信息处理类型的不同，可将星地一体化网络中的资源划分为通信、计算、存储、导航、遥感等类型，经过切片编排后形成信息获取、信息传输、信息处理等网络服务能力，满足差异化的服务需求。从多种时变多维资源集合中匹配最优资源调度方案，是资源智能管控的核心。

在资源服务能力层面，用户的多维信息需求持续增长，用户网络需求呈现出差异化，不同行业和场景的网络业务对 QoS 的定义存在不同。例如，物联网场景的服务质量与最大连接数相关，远程医疗和自动驾驶对网络时延敏感，高清视频通话、高清直播应用同时关注时延和速率指标。卫星互联网需面向不同行业和场景提供多样化的网络能力组合。划分不同等级的 SLA 服务指标，量化业务能力需求，从资源池中检索满足能力需求的资源集合。从动态变化的资源池中检索出满足服务需求的能力集合，是资源智能管控的基础。

(二) 卫星互联网资源管控架构

卫星互联网系统资源受限、具有高的时空动态特性，提高资源运用效率是瓶颈环节。卫星互联网星地资源管控技术架构（见图4）是资源管控模式的一种实现方案：针对卫星互联网资源异构、异质的特点，面向分布式资源集群引入能力池概念，涵盖多项关键技术。能力池指由多种资源通过共享或互联形成的服务能力集合，如通信资源与计算资源通过网络融合形成统一服务单元，为用户提供信息处理的能力。能力属于资源组合形成的抽象概念，在网络中不是实体形式的存在，将资源编排成实体网络后才能真实存在。能力池是网络具备的多种能力集合，引入能力池可实现服务需求与资源池的匹配。

卫星互联网星地资源管控技术架构中，网资源管控基本流程为：根据 SLA 服务协议，将差异化的服务需求转化为包括时延、带宽、速率、容量、可靠

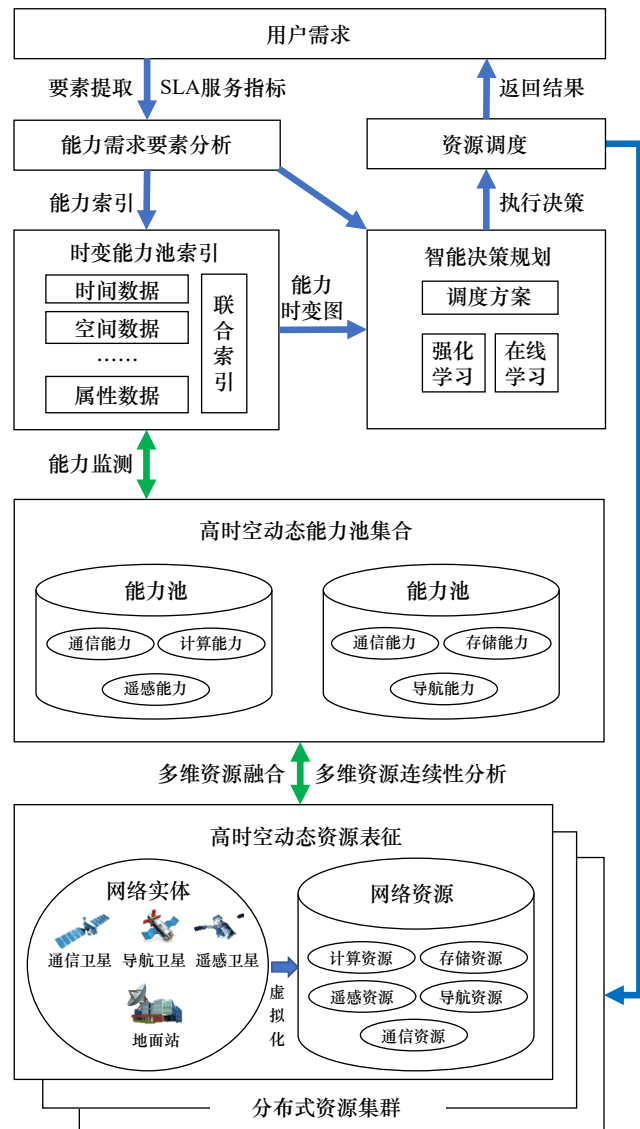


图4 卫星互联网星地资源管控技术架构

性、安全性在内的通信服务指标集合；根据服务指标集合，提取所需的信息获取、传输、处理等服务能力要素；分析所需服务能力的要素特性，检索能力池以获取可用能力资源；采用智能决策规划技术，确定资源调度方案；根据调度方案对资源进行聚合、编排，形成具备服务能力的网络并反馈至用户。

(三) 卫星网络资源管控关键技术

1. 高时空动态资源表征技术

卫星互联网天基资源分散在环绕地球周期运行的卫星上，整体呈现分布式、时空动态变化的特性。针对卫星资源的分布特性，建立统一的资源表征技术（见图5），是高效资源管控的基本要求。卫

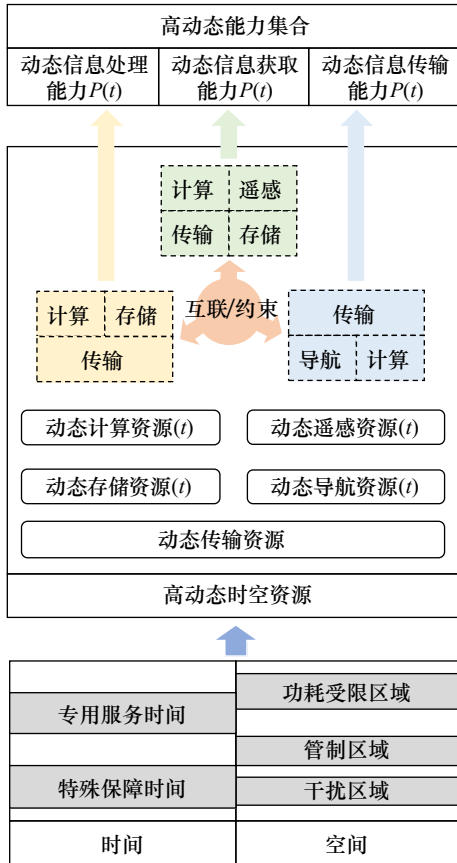


图5 高时空动态资源表征技术
注：P表示能力集合。

星资源在时间维度上受到运营规划的影响，如某段时间是特定用户的专用服务时间，整体或部分资源将被锁定，导致卫星可用资源处于随时间变化的状态。卫星环绕其轨道持续运行，所处空间位置不断变化，如运行至没有光照位置时，卫星功耗将受到限制；卫星运行至受国际法律或法规管制区域时，卫星的部分功能不能启用，导致相应资源不可使用；卫星运行至地磁或太阳辐射严重区域时，卫星射频功能受到干扰，导致资源利用效率不足。因此，卫星的运动是有规律的，其空间位置与时间具有统一性，可将卫星资源时空动态特性描述为与时间 t 相关的表达式。

卫星互联网可通过星间链路或其他网络连接，将不同的网络资源组合成差异化的服务能力，可将卫星互联网的能力描述为 $P(t)$ 。不同能力的 $P(t)$ 由不同资源构建而得，而资源之间还可通过网络连接使不同能力 $P(t)$ 之间具备互联关系；构建不同能力的 $P(t)$ 时，可能采用相同的资源，导致能力之间存

在冲突或约束。高时空动态资源表征技术可将种类繁多、异构、动态变化的资源表征为一系列的动态服务能力集合，结合服务能力之间的互联/约束关系，从而为资源管控系统提供完备的数据集合。

2. 多维资源时间连续确定性分析技术

卫星互联网的空间卫星处于周期性运动状态、用户业务动态变化、空间卫星与地面设备的通信环境差异性动态变化，这都导致资源关联具有时变性。星地链路时延高，资源更新具有滞后性，导致网络拓扑维护不及时、端到端性能难以保障^[36]，将明显制约资源管理算法的效能。需要对网络多维资源的时间连续性进行确定性描述。对于大时延通信环境造成的信息滞后问题，可设计预测算法，根据卫星运动规律和数据统计规律，对网络拓扑、链路、路由等资源连接关系的变化趋势进行预测，将预测结果更新并映射到动态能力池，从而为资源管理算法设计提供精准支撑^[5]。

3. 多维时变能力池索引技术

卫星互联网的能力及其关联资源均呈现动态特性，能力之间存在互联/约束，资源之间存在关联，导致能力需求匹配过程复杂、匹配结果离散。针对性提出了一种基于时变图的多维时变能力池索引技术。

能力集合 P 在 t 时刻与多种资源集合相关联，能力集合之间也存在关联，这种动态关系模型的拓扑变化可由时变图 $G(t)$ 表征。时变图 $G(t)$ 中的顶点和边均随时间动态变化，难以直接进行搜索，故采用快照方式将其离散化为多个静态的子图 $g(t_1)$, $g(t_2)$, ..., $g(t_n)$ ；对于子图，采用广度或深度有限算法、树形分割算法等进行快速搜索匹配。将时变图离散化为多个快照，尽快便于开展搜索，但也增大了搜索过程的计算量。可基于并行搜索技术对相应时变图进行索引（见图6）：将时变图 $G(t)$ 离散为

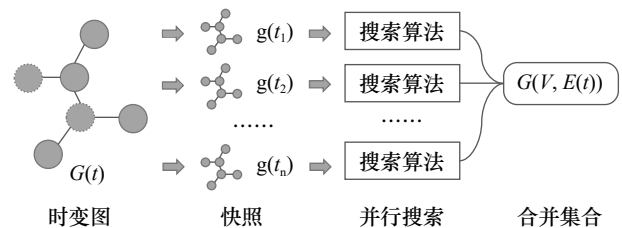


图6 时变图并行索引技术
注：V表示顶点；E表示边。

快照子图后，子图之间相互独立，搜索过程互不影响；采用并行处理技术以显著提高搜索效率；统一合并各个快照子图的搜索结果，得到最终的索引结果 $G(V, E(t))$ 。

4. 智能决策规划技术

卫星互联网的大规模星座、高时空动态等特性，对当前集中式的运维、控制中心综合资源管控模式构成了极大挑战，亟待发展基于AI算法的智能决策方法，提高资源规划及决策的实时性和有效性。在前述能力要素分析、能力时变图构建的基础上，提出了卫星互联网资源智能决策规划技术（见图7），进一步细分为离线训练、在线学习两部分。

离线训练时，基于构建的能力时变图数据来训练规划策略。利用图卷积神经网络^[37]捕获能力时变图中节点之间的复杂关系，采用注意力机制^[38]学习资源状态的演变，以此预测每个资源的可用时间。针对接收的资源状态信息，由强化学习智能体决策出一个调度动作，再根据优化目标计算一个奖励分数。通过最大化奖励分数，使策略网络不断更新自身参数。经过训练后，得到一个资源规划决策代理，支持在网络中规划出服务时间最长的资源。

静态的训练参数难以满足各种网络条件，需要在决策过程中采取更新策略；实施更新策略时，可根据预先训练的模型制定规划策略。当使用该模型在进行资源规划时，从经验缓冲区中提取经验并更新模型参数；在参数更新过程中，使用优先经验重播方法^[39]来存储最优的经验，使模型的决策方案达到最优。

六、结语

卫星互联网是提高空间生产力、扩大空间影响力、增强空间国防力、掌握空间主权、推进网络强国战略的重要基础信息设施。本文面向我国卫星互联网建设的重大背景，针对资源高效运用需求，调研了国内外卫星互联网的发展现状，分析了卫星互联网的新环境和新模式。针对我国卫星通信服务主体众多、资源运用不畅的现实发展局面，结合我国卫星通信现状与卫星网络特性，提出了以智慧内生网络为目标，层次明确、循序渐进、切实可行的发展路线。针对卫星互联网规模庞大、结构复杂多变、资源异质异构、服务需求差异多样的新环境和新特征，提出了包括高时空动态资源表征、多维资源时间连续确定性分析、多维时变能力池索引、智能决策规划在内的卫星网络资源管控模式和技术架构，可为我国高效开展卫星互联网资源管控系统建设提供直接参考。

卫星互联网资源复杂多变，资源管控技术在实际应用中仍面临诸多挑战。为进一步加快我国卫星互联网建设，从资源管控角度出发提出以下发展建议。① 合理加大卫星互联网基础研究投入，深化星间激光链路、星载高性能处理器、星载高性能阵列天线技术研究，为网络资源灵活配置、资源互联互通、异构资源融合打破技术“硬障碍”。② 适时发布网络融合政策，推动通信、导航、遥感网络融合进程，加快星地一体化网络建设，实现网络资源深度融合，扫清各类资源之间的“软屏障”，为实施高效网络资源管控创造良好条件。③ 鼓励研

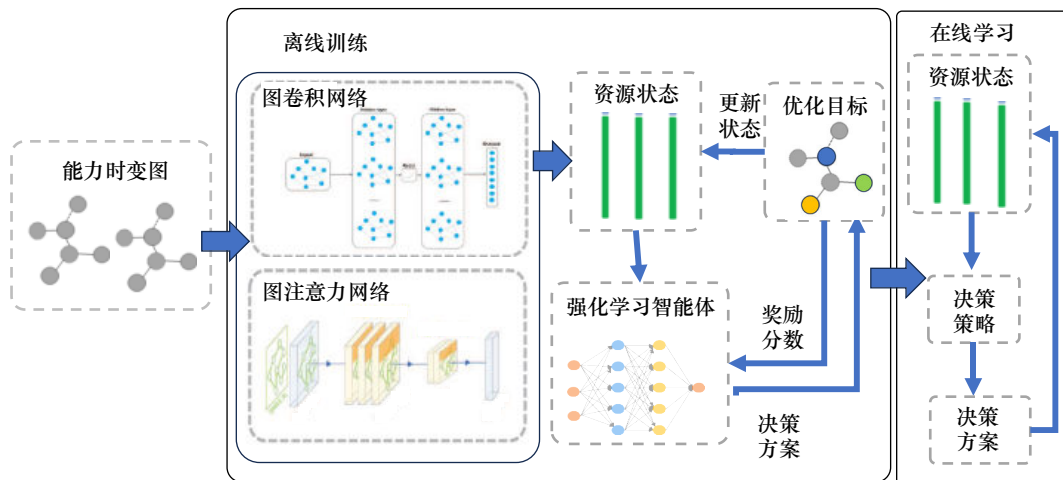


图7 智能决策规划技术框架

发具有自主知识产权的专业软件,如电磁仿真、卫星轨道仿真、电波传播仿真等关键工具,打破国外专业软件垄断工程应用的不利局面,为资源管控系统提供自主可控、高性能、高精度的推演及预测能力。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 3, 2023; **Revised date:** December 8, 2023

Corresponding author: Zhou Yiqing is a research fellow from the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. Her major research field is convergence of communications and computing. E-mail: zhouyiqing@ict.ac.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2020YFB1808004); Chinese Academy of Engineering project “Research on National Grain Security Strategy in the Context of Dual Circulation” (2022-XBZD-03)

参考文献

- [1] 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.
- [2] 欧阳曼, 刘江, 廖新悦, 等. 新型网络架构发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 12–21.
Ouyang M, Liu J, Liao X Y, et al. Development of novel network architectures [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 12–21.
- [3] 徐晖, 孙韶辉. 面向6G的天地一体化信息网络架构研究 [J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 2–9.
Xu H, Sun S H. Research on network architecture for the space-integrated-ground information network in 6G [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 2–9.
- [4] 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.
- [5] 曹欢, 陈岩, 周一青, 等. 空天地网络确定性服务架构、挑战及关键技术 [J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(3): 1–18.
Cao H, Chen Y, Zhou Y Q, et al. Deterministic service of space-air-ground integrated networks: Architecture, challenges and key technologies [J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(3): 1–18.
- [6] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术——机遇与挑战 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144–152.
Wang L, Li D R, Chen R Z, et al. Low earth orbiter (LEO) navigation augmentation: Opportunities and challenges [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 144–152.
- [7] 周一青, 李国杰. 未来移动通信系统中的通信与计算融合 [J]. 电信科学, 2018, 34(3): 1–7.
Zhou Y Q, Li G J. Convergence of communication and computing in future mobile communication systems [J]. Telecommunications Science, 2018, 34(3): 1–7.
- [8] 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.
- [9] 崔新雨, 伍杰, 周一青, 等. 空天地一体化融合组网的挑战与关键技术 [J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(1): 1–11.
Cui X Y, Wu J, Zhou Y Q, et al. Challenges of and key technologies for the air–space–ground integrated network [J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(1): 1–11.
- [10] 曹欢, 苏泳涛, 周一青, 等. 基于星地协同处理的资源管理技术研究 [J]. 高技术通讯, 2020, 30(12): 1205–1214.
Cao H, Su Y T, Zhou Y Q, et al. Research on resource management technology based on satellite-ground collaborative processing [J]. Chinese High Technology Letters, 2020, 30(12): 1205–1214.
- [11] 梅强, 史楠, 李彦骁, 等. 天地一体化信息网络应用运营发展研究 [J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 95–102.
Mei Q, Shi N, Li Y X, et al. Research on application operation development of space-integrated-ground information network [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 95–102.
- [12] 赵雄文, 张钰, 秦鹏, 等. 空天地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势 [J]. 电子学报, 2022, 50(1): 1–17.
Zhao X W, Zhang Y, Qin P, et al. Key technologies and development trends for a space–air–ground integrated wireless optical communication network [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 1–17.
- [13] 徐晓帆, 王妮炜, 高瓊园, 等. 陆海空天一体化信息网络发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 39–45.
Xu X F, Wang N W, Gao Y Y, et al. Development of land–sea–air–space integrated information network [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 39–45.
- [14] 李峰, 禹航, 丁睿, 等. 我国空间互联网星座系统发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 137–144.
Li F, Yu H, Ding R, et al. Development strategy of space Internet constellation system in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 137–144.
- [15] Jonathan’s Space Pages. Starlink launch statistics [EB/OL]. (2023-11-08)[2023-11-08]. <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>.
- [16] “新基建”之中国卫星互联网产业发展研究白皮书 [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-10-15]. <https://n2.sinaimg.cn/tech/cbc3161f/20200528/SatelliteInternetWhitePaper.pdf>.
White paper on the development of China’s satellite Internet industry in the “new infrastructure” [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-10-15]. <https://n2.sinaimg.cn/tech/cbc3161f/20200528/SatelliteInternetWhitePaper.pdf>.
- [17] 李德仁, 张洪云, 金文杰. 新基建时代地球空间信息学的使命 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, 47(10): 1515–1522.
Li D R, Zhang H Y, Jin W J. The mission of geo-spatial information science in new infrastructure era [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1515–1522.
- [18] 3GPP. Study on satellite access in 5G (TR22.822) [R]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2018.
- [19] 汪志斌, 王寒俏, 韩国骅. 卫星互联网发展与挑战 [J]. 上海信息化, 2021 (8): 24–28.
Wang Z B, Wang H Q, Han G H. Development and challenge

- of satellite Internet [J]. Shanghai Informatization, 2021 (8): 24–28.
- [20] 张美蓉, 镐梦婷, 王闯, 等. 高低轨卫星异构网络资源管控策略与技术研究 [J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 67–74.
Zhang M R, Gao M T, Wang C, et al. Research on strategies and technologies for resource management and control of heterogeneous network of high and low orbit satellites [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 67–74.
- [21] 于晓艺. 低轨卫星协同网络无线资源管控与仿真关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学 (博士学位论文), 2022.
Yu X Y. Research on key technologies of radio resource management and simulation in LEO satellite cooperative network [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications (Doctoral dissertation), 2022.
- [22] 廖新悦, 张然, 黄正璇, 等. 空间卫星网络组网与管控技术综述 [J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(3): 48–58.
Liao X Y, Zhang R, Huang Z X, et al. Review on networking and control technologies of space satellite network [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 48–58.
- [23] Lee J, Kang S. Satellite over satellite (SOS) network: A novel architecture for satellite network [C]. Tel Aviv: Proceedings IEEE INFOCOM 2000, 2000.
- [24] 李宁, 岳程斐, 郭海波, 等. 大规模卫星星群域管控策略设计 [J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(1): 18–28.
Li N, Yue C F, Guo H B, et al. Domain control strategy for the large-scale satellite cluster [J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(1): 18–28.
- [25] 张凤磊. 多层卫星网络系统接入选择技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学 (硕士学位论文), 2020.
Zhang F L. Research on access selection technology of multilayer satellite network system [D]. Xi'an: Xidian University (Master's thesis), 2020.
- [26] 徐炎, 崔司千. 多层卫星网络资源混合优化策略 [J]. 无线电工程, 2020, 50(8): 711–716.
Xu Y, Cui S Q. A resource combined optimization algorithm for STDMA MAC protocols in multi-layer satellite networks [J]. Radio Engineering, 2020, 50(8): 711–716.
- [27] 刘润滋, 马天赐, 吴伟华, 等. 基于分层强化学习的中继卫星网络任务动态调度方法 [J]. 通信学报, 2023, 44(7): 207–217.
Liu R Z, Ma T C, Wu W H, et al. Dynamic task scheduling method for relay satellite networks based on hierarchical reinforcement learning [J]. Journal on Communications, 2023, 44(7): 207–217.
- [28] Chen Y, Cao H, Zhou Y Q, et al. A GCN-GRU based end-to-end LEO satellite network dynamic topology prediction method [C]. Glasgow: 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2023.
- [29] Zhang P, Wang X H, Ma Z G, et al. An online power allocation algorithm based on deep reinforcement learning in multibeam satellite systems [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(5): 450–461.
- [30] 杨丹, 刘江, 张然, 等. 基于SDN的卫星通信网络: 现状、机遇与挑战 [J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 34–41.
Yang D, Liu J, Zhang R, et al. SDN-based satellite networks: Progress, opportunities and challenges [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 34–41.
- [31] 李文璟, 喻鹏, 张平. 6G智能内生网络架构及关键技术分析 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 2–8.
Li W J, Yu P, Zhang P. Architecture and key technologies of 6G intelligent endogenous network [J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(5): 2–8.
- [32] Wang Y Q, Li Y, Shi Q J, et al. ENGNN: A general edge-update empowered GNN architecture for radio resource management in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023 (99): 1.
- [33] Li Y, Chen Z L, Wang Y Q, et al. Heterogeneous transformer: A scale adaptable neural network architecture for device activity detection [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(5): 3432–3446.
- [34] 李德仁, 丁霖, 邵振峰. 面向实时应用的遥感服务技术 [J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 15–24.
Li D R, Ding L, Shao Z F. Application-oriented real-time remote sensing service technology [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 15–24.
- [35] 张然, 刘江, 杨丹, 等. 基于软件定义网络的卫星通信网络综述 [J]. 数据与计算发展前沿, 2020, 2(3): 3–17.
Zhang R, Liu J, Yang D, et al. A survey on satellite networks based on software-defined networking [J]. Frontiers of Data & Computing, 2020, 2(3): 3–17.
- [36] 李红艳, 张焘, 张靖乾, 等. 基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议 [J]. 通信学报, 2020, 41(10): 116–129.
Li H Y, Zhang T, Zhang J Q, et al. Time deterministic routing algorithm and protocol based on time-varying graph over the space-ground integrated network [J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 116–129.
- [37] Kipf T N, Welling M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks [EB/OL]. (2016-09-09)[2023-10-15]. <https://arxiv.org/abs/1609.02907>.
- [38] Veličković P, Cucurull G, Casanova A, et al. Graph attention networks [EB/OL]. (2017-10-30)[2023-10-15]. <https://arxiv.org/abs/1710.10903>.
- [39] Hou Y N, Liu L F, Wei Q, et al. A novel DDPG method with prioritized experience replay [C]. Banff: 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2017.