



专题：确定性网络

## 空天地一体化确定性网络研究

彭国宇<sup>1</sup>, 汪硕<sup>1,2</sup>, 李桂珍<sup>1</sup>, 文昱涵<sup>1</sup>, 黄韬<sup>1,2</sup>

(1. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876;

2. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

**摘要:** 随着互联网从消费型网络向生产型网络升级, 新兴行业应用需要差异化的确定性服务质量保障以及全时空范围的通信能力。如何实现泛在多域网络的异构兼容, 支持空天地一体化网络(SAGIN)节点间的确定性传输成为当前的重要研究问题。首先分析了面向6G全域新兴应用场景的确定性服务质量保障需求, 然后提出了包含全域协同网络管控层、多域动态确定性融合层、泛在异构确定性组网层的分层空天地一体化确定性网络架构, 并研究相应场景的“固移卫”融合确定性网络关键技术, 最后研判了空天地一体化确定性网络的挑战和发展趋势。

**关键词:** 空天地一体化网络; 网络体系架构; 确定性网络; 6G

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2023238

## Research on space-air-ground integrated deterministic networking

PENG Guoyu<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1,2</sup>, LI Guizhen<sup>1</sup>, WEN Yuhan<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

**Abstract:** As the Internet evolves from a consumer network to a productive network, emerging industry applications necessitate differentiated and deterministic service quality assurance and communication capabilities that span all dimensions of time and space. How to realize the heterogeneous compatibility of ubiquitous multi-domain networks and support deterministic transmission between nodes in space-air-ground integrated network (SAGIN) has become a significant research problem. Firstly, the emerging full-domain 6G scenarios along with their requirements for deterministic services were analyzed. Then, the hierarchical space-air-ground integrated deterministic networking architecture, including global cooperative network management and control layer, multi-domain dynamic deterministic fusion layer, and ubiquitous heterogeneous deterministic networking layer, was proposed, and key technologies for fixed-mobile-satellite fusion networks in relevant scenarios were studied. Finally, the challenges and development trend of the space-air-ground integrated deterministic networking were presented.

**Key words:** space-air-ground integrated network, network architecture, deterministic networking, 6G

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62132022); 中国工程院咨询项目 (No.2022-XY-110); 中国通信学会青年托举项目 (No.YESS20200287)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62132022), The CAE Advisory Project (No.2022-XY-110), Young Elite Scientist Sponsorship Program by CAST and CIC (No.YESS20200287)



## 0 引言

近年来,指数级增长的互联网业务、海量接入的移动终端数,以及远程工业控制、全息通信等应用对网络的严格服务质量(quality of service, QoS)需求,推动了5G的蓬勃发展与大规模商业部署,促使地面移动网络从消费型应用向生产型应用升级<sup>[1]</sup>。网络功能从“信息传输”向“产业服务”转变,亟须差异化、可定制的传输保障以及广阔通信覆盖范围支撑。然而,地面移动通信整体上存在覆盖范围受限的问题,目前有80%以上的陆地区域和95%以上的海洋区域无宽带网络信号<sup>[2]</sup>,这无法满足下一代6G宽带无线通信网络“泛在连接,多网融合”的愿景<sup>[3]</sup>。作为地面网络的补充与扩展延伸,卫星网络、空基网络在覆盖范围和移动等方面与地面网络具有极强的互补性,能够提供泛在、智能、协同、高效的信息通信能力。因此,融合垂直行业应用的多维资源需求,为用户提供无盲区的宽带移动通信服务,构建全球广域覆盖的空天地一体化网络(space-air-ground integrated network, SAGIN)成为6G网络的重要特征<sup>[4-6]</sup>。在国家战略层面,太空域和信息域是国家经济发展两个重要战略制高点,空间信息资源已成为各个国家的重要战略资源。

一方面,全球全网域用户接入与业务分布存在泛在性、差异性,单一域内的网络资源难以满足海量设备接入与差异化业务所需的计算、存储、传输能力,“固移卫”融合的一体化网络架构成为必然的演进方向。然而,现有地面移动通信网络和卫星通信网络的建设与发展相对独立,难以提供空天地一体的资源管控和业务连续性服务能力<sup>[7]</sup>。此外,泛在异构接入网络存在多域组网兼容性差、资源协同编排困难、接口协议不统一等诸多问题。因此,空天地一体化网络不是卫星、飞行器与地面网络的简单互联,而是在系统层面实现地面与非地面网络(non-terrestrial network,

NTN)的全面一体化,在体制、协议、网络、业务、终端等方面实现深度融合<sup>[8]</sup>。另一方面,随着新兴业务应用演进,用户业务对能够提供时延敏感、质量可预测的服务保障的确定性网络需求越来越迫切<sup>[1]</sup>。例如,医疗系统将GB级别的CT影像上传到云端,连接时延要求在10 ms内,抖动须控制在微秒级。传统的IP网络采用“尽力而为”的转发模式,无法提供可靠有界的网络服务质量。面对时延敏感型业务的迫切需求,能够“准时、准确”地控制端到端的时延和抖动的确定性网络相关技术成为全球研究热点。现有相关研究基于地面网络提出局域时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)、广域确定性网络(deterministic networking, DetNet)以及固移融合的5G确定性网络等确定性技术<sup>[9-10]</sup>。然而,这些技术无法为跨海、陆、空的多域网络提供可预期、可规划、可验证、覆盖确定、连接确定、时延确定、带宽确定的端到端服务质量保障能力<sup>[11]</sup>。

空天地一体化确定性网络是指在大时空尺度下为泛在异构接入域提供统一的算网资源保障与确定性低时延传输保障的网络。由于空天地一体化网络和确定性网络均处于早期发展阶段,如何实现多域融合的空天地一体化确定性网络是一个重要挑战。文献[11]提出了空天地网络确定性服务架构,从全域确定性业务服务角度分析了星地端到端智能切片、资源智能分配的相关机制,但未从底层网络一体化构建角度考虑时变星链、跨层广域承载技术等对端到端确定性组网的影响。文献[12]提出了弹性可重构的天地一体化信息网络架构,通过业务场景按需部署网络功能,保障网络按需确定性服务能力。但缺乏确定性调度机制对星地、星间、空基网络内队列转发机制的考虑,难以满足时延敏感任务的可控时延上界。文献[13]呈现了确定性网络的相关技术与机制,但未考虑与非地面网络的适配性。文献[14]提出了空地无状态移动核心网功能部署,将卫星状态与轨道核心功能解

耦,通过转移到地面网络减少状态迁移,进而提升故障弹性恢复能力,但未考虑星地间的服务时延保障。文献[15]研究了有线无线融合的卫星时间敏感网络流调度机制,分析了星地间有线和无线链路资源分配与业务时敏需求关系并进行建模调度,但是缺乏空天地一体化确定性路由与调度的架构设计。

基于以上问题和趋势,本文首先分析了 6G 全域新兴应用场景的确定性需求,以及面向确定性服务的 SAGIN 需求与动机,提出了包含全域协同网络管控层、多域动态确定性融合层以及泛在异构确定性组网层的分层空天地一体化确定性网络架构,研究相应场景的固移卫融合确定性网络关键技术,包括 6G、星地融合确定性组网、广域确定性承载网络、全域确定性路由与调度等技术。在此基础上,研判了空天地一体化确定性网络的挑战和发展趋势。

## 1 场景、需求与动机

6G 的新兴应用需求正处于初步探索之中。预期 6G 应具备智慧内生、安全内生、多域融合、算网一体等特征,而目前的 5G 网络架构难以满足这些愿景。作为一种新兴的网络架构,SAGIN 架构以地基网络为基础、以天基网络和空基网络为补充和延伸,为广域空间范围内的各种网络应用提供泛

在、智能、协同、高效的信息保障的基础设施,在满足未来 6G 业务需求方面具有巨大的潜力<sup>[16]</sup>。

### 1.1 6G 全域新兴应用场景与确定性需求

6G 新兴应用的出现与发展赋予了网络架构计算、感知、智能、安全等新的需求,6G 全域应用场景及其对通信网络的需求见表 1。与传统地面确定性网络相比,面向 6G 全域服务的确定性需求的 SAGIN 旨在为差异化业务应用提供广覆盖接入、确定性连接、超低时延、超高可靠、超大数据量处理与超高带宽、差异化需求可预测可定制的智能端到端服务质量保障能力。

(1) 广覆盖接入:由于高山、海洋、极地等极端环境建网成本高昂,需要将卫星和国际移动通信基站高空平台(high altitude platform station as IMT base station, HIBS)通信的低成本与广域覆盖作为地面网络的补充,为偏远地区用户提供无死角全覆盖的宽带移动通信服务和位置导航服务<sup>[17]</sup>。

(2) 确定性连接:对于有建设专网需求且分支机构分散的企业(如跨国/跨地区的头部企业),需要打破地理限制的确定性连接,以保障集团公司的全球业务管理<sup>[18]</sup>。

(3) 超低时延:大宗货物交易、证券交易中的高频电子交易、区块链节点广播等广域通信业务,需要借助低轨卫星高速直线传播的优势有效降低时延和抖动<sup>[18]</sup>。

表 1 6G 全域应用场景及其对通信网络的需求

| 应用场景   | 核心业务                                                          | 网络需求                                                           |
|--------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 大规模物联网 | 工业物联网、智慧城市、智能家居、导航                                            | 需要网络具有高连接密度、海量数据处理和传输能力,支持差异化应用的能力,以支持覆盖范围广、成本低、部署简单、连接广泛的万物互联 |
| 生态遥感监测 | 利用遥感技术对人口稀少的自然区域等生态系统的动态变化进行监测                                | 需要引入卫星网络,通过多颗遥感卫星实现有效的覆盖和监测                                    |
| 全息通信   | 云化扩展现实(extended reality, XR)与全息技术的结合将被广泛应用于文娱、教育、社会生产等沉浸式业务体验 | 需要实现万物的全息智能连接,在确定的网络环境下满足超低时延与超高带宽的智能化需求                       |
| 检测与感知  | 精准定位、4D 成像、材料特征识别                                             | 需要在感知精度、感知容量、感知时延和感知范围等维度提高网络性能                                |
| 医疗健康   | AI 辅助的智能疾病预测、靶向治疗、远程诊断与手术                                     | 需要网络具有超高的云存储和计算能力,以及对数据的有效性和安全性的保护                             |



(4) 超高可靠：工业设备全自动化控制与操作、机器人交互、应急服务、远程医疗、输配电监控等应用对通信能力具有超高的可靠性需求<sup>[19]</sup>。特别地，应急通信场景的可靠性保障将极大受益于非地面网络特征。卫星和 HIBS 通信以其不受地理环境和自然灾害影响的稳定性，在地震、洪涝等自然灾害导致地面网络阻断情况下，可以快速部署，为抢险救灾构建高效可靠的指挥调度及信息传输通道<sup>[17]</sup>。

(5) 超大数据量处理与超高带宽：越来越多的家用设备、无人驾驶车辆、工业机器人等成为广域物联网的智能终端，大量传感器所探测的海量信息、大量智能终端的高密度互联通信以及 6G 网络的自学习自维护能力，都需要网络支持对超大数据量的智能处理能力<sup>[20]</sup>和超高带宽的传输能力。

(6) 差异化需求可预测可定制：全息通信、扩展现实、数字孪生等新兴业务的出现使用户数量、业务种类和差异化程度激增，针对实时变化的环境和用户需求，需要网络预测用户需求和网络状态，进行网络资源的动态精准调度和分配。

## 1.2 面向确定性服务的 6G SAGIN 需求

典型的空天地一体化网络架构如图 1 所示。地基网络主要由蜂窝网络、移动自组网、无线局域网等地面通信系统组成，负责业务密集区域的高速网络服务，但对偏远地区的网络覆盖有限；空基网络是以飞行器为载体进行信息采集、传输和处理的空中移动系统，其中无人机、飞机、气艇是构成高/低空平台系统的主要基础设施，具有部署成本低、覆盖范围大、网络重构灵活等特点，提供区域性的无线接入服务；天基网络由地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO）、中地球轨道（medium earth orbit, MEO）、低地球轨道（low earth orbit, LEO）卫星系统及其相应的地面基础设施组成，其中地球静止轨道卫星系统使用宽带提供高速数据传输服务，中/低地球轨道卫星系统主要为全球用户提供语音和低速率数据

服务，多层卫星网络协作实现全球覆盖、泛在连接、宽带接入等功能。

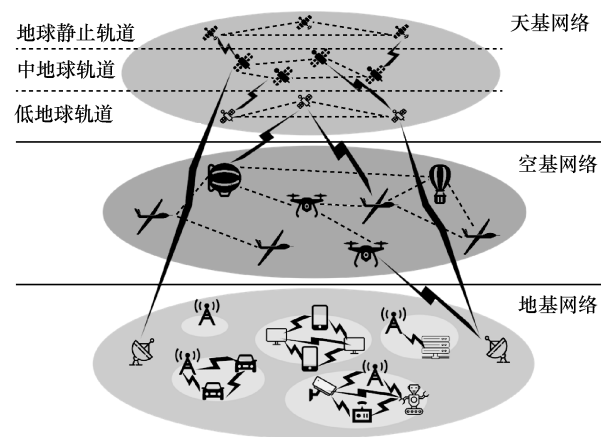


图 1 典型的空天地一体化网络架构

目前国内外对空天地一体化网络架构的研究正在进一步深入，结合了软件定义网络（software defined network, SDN）、虚拟化网络功能（virtual network function, VNF）、人工智能（artificial intelligence, AI）、服务化和网络切片等技术的架构方案在边缘计算、车联网、无人机辅助通信等服务场景中有效提升了网络性能。文献[21]提出基于 SDN 和 VNF 技术的卫星无线接入网络架构 SatCloudRAN，实现了对卫星设备灵活、可编程的控制和管理，为用户提供高性价比的资源可获得性和灵活的资源共享。文献[22]基于微服务的 SAGIN 架构在卫星基站上部署核心网服务功能，有效降低了接入时延，利用 SDN 和 VNF 技术将核心网和接入网部分功能软件化，以进行灵活分配和动态部署。文献[23]在 SAGIN 各层中使用多个 SDN 控制器设置不同的路由提供层，以允许服务根据其安全性和 QoS 需求请求路由，解决了在高动态和多维网络中提供端到端路由的问题。文献[24]基于 AI 赋能的民用飞机辅助 SAGIN 架构，通过计算民用飞机辅助网络的服务缺口设计了联合覆盖星座，有效降低了建设成本和节约空间资源。文献[25]提出了一个支持边缘计算的 SAGIN 框架 EC-SAGIN，实现了车辆和地面边缘计算基

基础设施之间无处不在的数据处理和内容共享,以支持偏远地区的各种车联网服务。文献[26]设计了卫星地面边缘计算网络架构 STECN,直接赋予卫星边缘计算能力,使用户能够在世界任何地方获得计算服务,从而提高用户的体验质量(quality of experience, QoE)并减少冗余网络流量。

然而,以上研究仅在特定场景中增强架构性能,并未覆盖全域范围内的差异化确定性服务需求,忽视了用户业务感知和预测的连续性管理,缺乏异构网络融合和管控的智能化策略,如全域异构资源的协同管理与调度、跨层广域的确定性组网协议、端到端确定性路由与调度机制等。在面向确定性服务的全域高动态网络环境下,当前 SAGIN 架构仍面临着组网复杂、传输时延高、灵活性差、可扩展性受限、部署成本高、QoS 难以保障等问题。因此,未来空天地一体化确定性网络架构应进一步满足以下需求:首先,异构网络资源和虚拟资源需要全域协同的网络管控。多维网络资源的灵活分配和按需组合可以通过 AI 赋能的管理策略实现,以达到快速、实时的资源编排和任务规划。网络功能的轻量级分布式部署可以将不同节点处的网元柔性分割和按需定制,实现网络切片一体化管理。其次,多域动态网络需要一体化的确定性融合。构建统一的接口协议和组网协议能够突破异构网络之间移动性管理的封闭性<sup>[12]</sup>,保障用户业务的无感知接入与连续性切换。最后,泛在异构网络需要进行相互赋能的确定性组网。通过非地面网络的泛在覆盖优势和地面网络的低时延传输优势互相提供服务保障,可以增强不同时空跨度的端到端确定性服务能力。

## 2 空天地一体化确定性网络架构

空天地一体化确定性网络架构如图 2 所示,主要由 3 个部分组成:全域协同网络管控层、多域动态确定性融合层和泛在异构确定性组网层。该架构集合了空天地多域接入的全球立体广域覆

盖能力,确定性网络高可靠、低时延抖动的传输特性,以及软件定义网络集中/分布协同、灵活管控的优点。相比现有 SAGIN 架构<sup>[21-25]</sup>和多维资源域联合调度方案<sup>[27-28]</sup>受限于传统 IP 网络“尽力而为”的转发瓶颈,该架构通过融合星地间云网资源,进行全域协同的策略管理与网络编排,并结合 TSN/DetNet 等时延敏感网络特征对星内、星间、星地业务转发进行确定性增强,为多网络域提供服务连续性保障与大时空尺度的确定性端到端通信能力。

### 2.1 全域协同网络管控层

全域协同网络管控层基于全网多维信息感知探测,采用生成式人工智能获取全络域协同的管理策略,实现空天地一体化的网络资源与虚拟资源编排,对星地异构网络进行一体化管理与控制,满足确定性业务跨大时空尺度的执行需求。如图 2 所示,全域协同网络管控层根据星地用户业务需求,探测并收集网络运行数据、网络拓扑数据和星历数据等信息,感知分析与业务需求匹配的移动管理、接入控制与确定性路由策略与网络能力。基于 AI 赋能的全网协同策略管理可以按需、自动化地生成兼容二层/三层网络的确定性调度策略,实现网络资源与虚拟化的智能分析、编排与管理,形成动态跨域资源的实时自治闭环系统,避免资源浪费,保障关键用户的确定性业务需求。此外,管控层采用星地网络切片一体化管理,实现天基和地基之间、不同卫星子网间、同层网络不同卫星节点间网元功能的柔性分割。例如,在天基网络基于关键业务,按需实现轻量化、可裁剪的网络功能部署,如高轨卫星通过部署控制网元功能作为控制节点,处理能力弱的低轨卫星仅部署数据转发平面功能进行数据处理和发送。地基网络具备更强大的计算、存储、通信能力,用于实现完整的网络功能。

### 2.2 多域动态确定性融合层

为满足空天地一体化确定性网络中用户的全

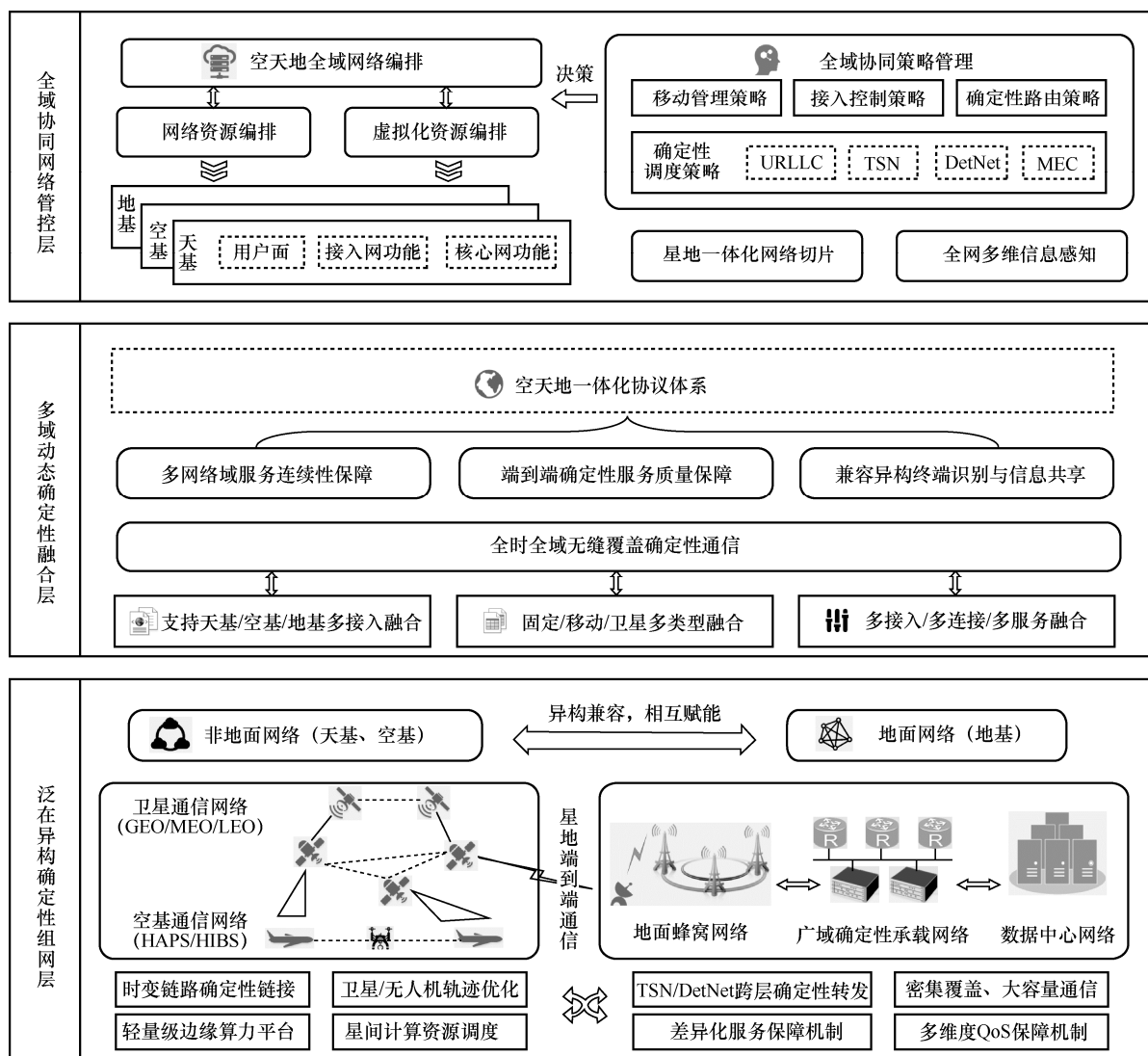


图2 空天地一体化确定性网络架构

时全域无缝覆盖确定性通信需求,多域动态确定性融合层需要实现卫星网络、空基平台网络与地面网络域的深度融合,实现人联与物联、无线与有线、广域和近域、空天和地面等的智能全连接。多域动态确定性融合层综合考虑新型接入/空口设计、异构组网、通用接口、资源分配以及内生网络安全的空天地一体化协议体系,以克服动态多域网络组成结构差异大、信息协议转化开销高、用户业务分布不均等缺点,旨在实现不同地域、不同用途、不同行业网络的跨界融合,构筑泛在异构网络确定性连接基座。固定网、移动网、卫

星网等网域通过多接入、多连接、多服务融合打破原有固定边界,共同形成一体化确定性网络,实现在多网域下的终端识别、服务连续性保障、终端信息共享、端到端服务质量保障等,为用户提供无感知的确定性网络接入、数据传输及切换体验。

### 2.3 泛在异构确定性组网层

空天地一体化确定性网络涵盖多种不同时空跨度的泛在异构网络,其架构呈现立体多层次化,地面网络支持海量连接,具有低时延、高速率数据处理能力;非地面网络突破地表限制,具备广

域低成本覆盖和大时空尺度的快速通信服务能力。如图 2 所示, 泛在异构确定性组网层采用多种关键技术实现地面网络与非地面网络的相互赋能和异构兼容。具体而言, 地面网络和非地面网络采用统一的无线空中接口协议设计, 通过时频同步技术解决卫星快速运动引起的时频快速变化的问题, 以提升空中接口的传输性能。无缝切换技术能够用于保证非地面网络和地面网络多重覆盖场景下的零时延和高可靠切换。在非地面网络方面, 针对非同步轨道卫星的高速移动导致的终端设备和卫星之间连接不可靠的问题, 移动性管理技术可用于保证切换的可靠性和大规模用户切换的有序性; 通过对星链轨道以及无人机轨迹进行优化, 能够提升空基、天基网络时变链路链接稳定性, 高轨、低轨多路径路由能够为时敏业务提供差异化调度服务; 通过星载/机载轻量级算力平台对算网资源进行分配, 满足“时敏-计算密集”任务间的确定性通信需求。在地面网络方面, 数据中心网络、广域确定性承载网络以及地面蜂窝网络之间可通过建立异构兼容的确定性通信机制实现差异化服务保障和多维度 QoS 保障。例如, 通过地面蜂窝网络系统构建逻辑 TSN 网桥, 支持有线/无线融合确定性通信; 利用广域确定性承载技术实现灵活以太网 (flex ethernet, FlexE) 与 DetNet 的跨层结合, 提供有保障的传输时延、精细化的资源分配和零丢包的确定性业务承载能力。

### 3 固移卫融合确定性网络关键技术

#### 3.1 星地融合确定性组网技术

星地融合确定性组网技术是空天地一体化确定性网络架构的重要组成部分, 旨在解决地面网络与非地面网络集成时卫星高速运动导致的空中接口传输性能降低的问题, 如链路时频不同步、网络切换时延高以及传输中断等。该技术适用于泛在异构确定性组网层, 包括移动性管理技术、无缝切换技术和时频同步技术。

##### (1) 移动性管理技术

在星地融合确定性组网中, 非同步轨道卫星的高速移动带来了终端设备和卫星之间连接的不断变化, 导致业务中断和用户体验下降<sup>[29]</sup>。因此, 增强对星地融合确定性组网的移动性管理成为解决上述问题的关键。星地融合的移动性管理技术基于星历信息、终端设备位置信息和无线资源管理测量信息进行切换联合判决, 能够解决星内切换和星间切换判决的不准确性以及切换信令带来的开销问题, 保证切换的精确性和有效性。同时, 为了应对馈电切换在切换过程中可能引发的业务中断、大规模资源需求和切换时延等问题, 移动性管理技术采用预先通知用户将连接切换到新的卫星的策略, 对用户进行分类接入管理, 能够实现有序、可靠的用户接入, 避免冲突和资源拥塞。

##### (2) 无缝切换技术

在卫星网络和地面确定性网络多重覆盖的场景下, 星地网络和高/低轨多层卫星网络的无缝切换是保障数据连续性传输和网络负载均衡的关键。首先, 对于支持双连接或多连接能力的终端设备, 通过在与新网络建立连接之前与原有网络断开连接的方式, 实现确定性零时延切换。其次, 对于不支持双连接能力的终端设备, 采用切换预测和数据前传的方法, 将切换对数据传输的影响最小化。终端设备的无缝切换技术能够利用卫星广覆盖和地面低时延覆盖的优势, 通过星历信息切换预测、目标节点数据前传以及终端设备多连接建立等方式, 有效减少切换引起的时延和传输中断, 并进一步提高星地融合确定性组网的覆盖质量。

##### (3) 时频同步技术

在星地融合确定性组网中, 低轨卫星的高速运动导致时间和频率快速变化, 从而引发了空中接口传输链路难以保持同步的问题<sup>[29]</sup>。例如, 上行链路由于连续参考信号不足, 时频调整存在困难。因此, 利用时频同步技术解决上行链路的时频偏移问题显得尤为关键。



对于具有全球导航卫星系统定位和时频自主补偿能力的终端设备,时频同步技术能够利用预存或广播的星历信息获取卫星位置信息,随后结合终端自身地理位置信息,通过计算时频预补偿以最小化时频偏移。对于没有全球导航卫星系统定位和时频预补偿能力的终端设备,时频同步技术采用更加可靠的物理随机接入信道信号克服上行链路中的时频偏移。当网络侧检测到物理随机接入信号时,能够精准识别时频偏移,并将这些信息反馈给终端设备,以协助上行信号实现同步。

### 3.2 广域确定性承载技术

广域确定性承载技术适用于空天地一体化确定性网络架构的泛在异构确定性组网层,为地面网络和非地面网络的异构融合提供确定性承载能力,包括 FlexE 技术、广域确定性队列技术以及 TSN 与 DetNet 跨域融合技术。

#### (1) FlexE 技术

FlexE 是一种被广泛应用于地面网络的广域确定性承载技术<sup>[13]</sup>,旨在满足地面网络对高带宽和灵活性的严格需求。FlexE 技术具备多项关键的确定性特性,首先, FlexE 提供带宽灵活性,能够实现对子通道带宽的动态分配和调整,以确保每个时间敏感流(time-sensitive flow, TSF)都能获得所需的带宽,从而提高带宽的利用率。其次,通过引入 TSF 标记, FlexE 确保传输的可靠性,使 TSF 能够按时传输数据,并降低时延和抖动。此外, FlexE 在物理层和数据链路层之间引入 FlexE Shim 层以提供硬隔离特性,并通过时分复用分发机制将多个用户接口的数据按时隙方式分配至不同的子通道,确保带宽和业务层面的确定性传输。最后, FlexE 能够支持多种应用模式,包括链路捆绑模式、子速率模式和通道化模式,能够根据不同的应用需求和流量类型为 TSF 选择适当的配置,以满足网络中多样化的通信需求。

#### (2) 广域确定性队列技术

为满足广域范围内数据的转发时延、抖动有界可控,相关研究提出了多种基于 TSN 增强或适用于大规模地面网络的队列机制,如 Stop-Go、周期具化队列与转发(cycle specified queuing and forwarding, CSQF)、异步确定性网络(asynchronous deterministic networking, ADN)、时隙队列转发(timeslot queuing and forwarding, TQF)、Deadline 等<sup>[30]</sup>。Stop-Go 通过将数据传输划分为停止和继续阶段,降低了对时间同步的依赖,提高了数据传输的可靠性。CSQF 是在循环队列的基础上进行的拓展,通过增加容忍队列降低广域确定性复杂组网的时间同步要求。CSQF 允许广域网络中的多域控制器协同工作,以确保 TSF 传输的可靠性和稳定性。ADN 采用聚合流调度的异步技术,不受时间同步或频率同步的限制,有助于实现域内时延的有界性,并保证业务抖动的有界性。TQF 是在时间感知门控队列的基础上进行的扩展,采用时分复用的思想构建全局时隙分配表,满足广域确定性复杂组网中多样化时间敏感业务的时延和抖动保障需求。Deadline 是一种基于队列的异步调度技术,利用授权时间和倒计时时间完成数据转发,并提供有界时延和抖动,特别适用于需要跨域通信的情况。

#### (3) TSN 与 DetNet 跨域融合技术

TSN 与 DetNet 跨域融合技术在地面网络中发挥着重要作用。广域确定性承载技术图谱如图 3 所示, TSN 与 DetNet 跨域融合技术主要包括分层分域的确定性网络技术和异构网络时隙周期的映射匹配技术。分层分域的确定性网络技术包括多域控制器、单域控制器和局域控制器等组件,以确保 TSN 和 DetNet 之间协同工作。局域控制器负责 TSN 中 TSF 的门控转发控制和计算;单域控制器完成 DetNet 内部的 FlexE 切片、SRv6(segment routing IPv6)策略、分段路由标识符(segment routing identifier, SID)标签计算和带宽

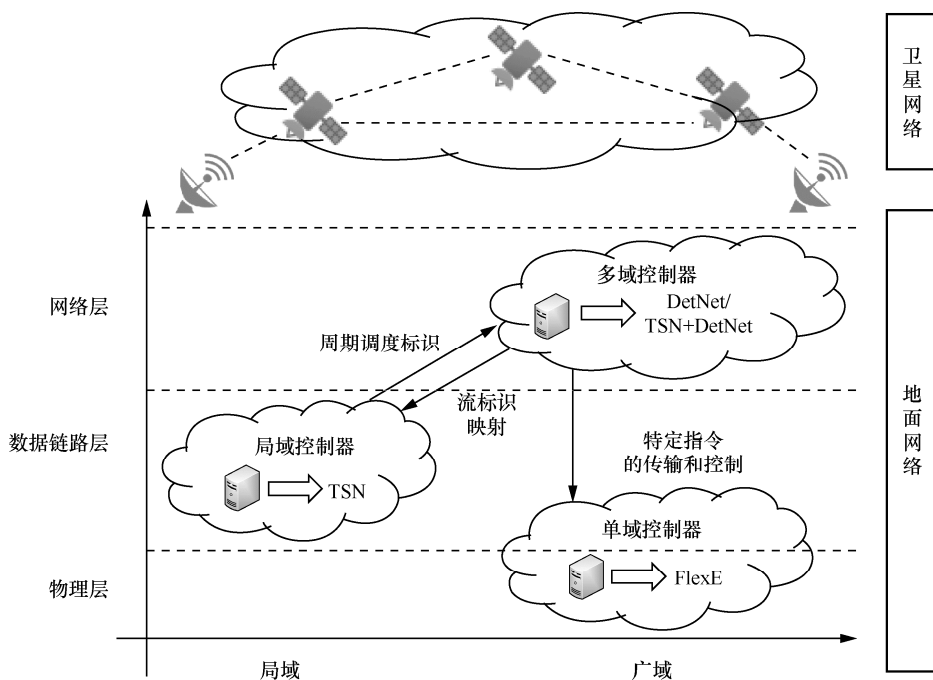


图3 广域确定性承载技术图谱

预留分配等任务；多域控制器主要承担跨域业务的时延指标分解预估、全局路径计算和资源编排。此外，多域控制器收集全局信息，以便对单域控制器之间的特定指令进行传输和控制。异构网络时隙周期的映射匹配技术旨在实现跨域流标识和周期对齐机制。TSN 采用时间同步技术，而 DetNet 采用频率准同步技术。异构网络时隙周期的映射匹配技术通过在跨域边缘设备上流量整形、控制器配置时隙绑定以及转发设备自动偏移映射，能够有效解决跨域确定性流标识匹配的问题。同时，异构网络时隙周期的映射匹配技术将链路层的标识信息封装为网络层的 IPv6 标识，并将 TSN 中的到达时隙转换为 DetNet 的周期调度标识，以实现跨域周期对齐。

### 3.3 空天地一体化确定性路由与调度技术

空天地一体化确定性路由与调度技术包括星地融合确定性路由技术和星地融合确定性调度技术，是空天地一体化确定性网络架构在泛在异构确定性组网层的关键技术，能够保障地

面网络与高动态变化的非地面网络之间端到端通信时的确定性传输，并满足时敏业务差异化服务质量需求。

#### (1) 星地融合确定性路由技术

在拓扑结构和网络节点高度动态变化且资源受限的空天地一体化确定性网络环境下，传统的静态拓扑路由技术已经无法满足 TSF 的端到端确定性传输需求。适用于高动态场景、满足 TSF 需求的确定性路由技术是解决上述问题的关键。星地融合确定性路由技术充分利用 SDN 技术和时变连续图模型的优势，满足不同 TSF 的确定性传输需求。一方面，SDN 控制器能够通过集中监测网络节点和链路的实时连接状态获取全局网络视图，实时了解整个网络的动态变化；另一方面，时变连续图模型能够分析和描述网络中的链路连通/间断时段、链路带宽和节点缓存容量等情况，并将节点信息和路由资源用聚合的方式表征。相较于传统的时变图模型，时变连续图模型降低了存储需求，同时提高了模型的高效性和精准性<sup>[31]</sup>。



星地融合确定性路由技术包含具有时延保障的确定性路由算法和路由协议两个要素。空天地一体化确定性网络路由与调度如图4所示,确定性路由算法基于链路累积流量计算规则、节点流守恒约束与节点缓存约束,为时变链路下信源到信宿之间的动态路由构建端到端最短时延路径<sup>[31]</sup>。确定性路由协议将确定性路由算法、TSN技术和分段路由技术结合,为时变网络环境下的拓扑建模、TSF的路由计算以及数据包的及时传输提供支撑。

## (2) 星地融合确定性调度技术

在空天地一体化确定性网络中,为了满足TSF差异化的服务质量需求,必须克服大规模空间覆盖和有限机载资源的挑战。通用的确定性调度模型能够将TSF映射到星地融合确定性网络的基础资源上,进而实现TSF的全网域端到端确定性调度。如图4所示,目前提出的星地融合确定性调度技术主要包括有线和无线融合的TSF调度机制<sup>[15]</sup>、TSN-MCQ机制<sup>[32]</sup>和循环优先级转发(cyclic pri-

ority and forwarding, CPF)机制<sup>[33]</sup>,利用上述不同调度机制可满足TSF的差异化调度需求。

一方面,有线和无线融合的TSF调度机制能够联合分配链路时隙,实现有线-无线链路无缝双向传输,通过无等待调度满足TSF的时延上限需求,进而保障网络传输数据的实时性。针对星间/星内链路的时隙分配,星间无线链路利用混合时分多址(time-division multiple access, TDMA)/载波监听多路访问(carrier sense multiple access, CSMA)的接入机制<sup>[34-35]</sup>,为星内时敏终端分配无线时隙的位置。其中,TDMA阶段用于保证TSF时延有界的传输数据,CSMA阶段用于时敏终端之间的时隙协商和任务切换。而星内有线链路则利用基于IEEE 802.1Qbv的门控方法,实现星内时敏终端匹配到达卫星的输出端口,确保星内TSF传输的确定性。另一方面,基于多循环队列的TSN技术能够提高卫星节点对TSF的转发能力,同时又不增加额外的复杂性。其中,TSN-MCQ

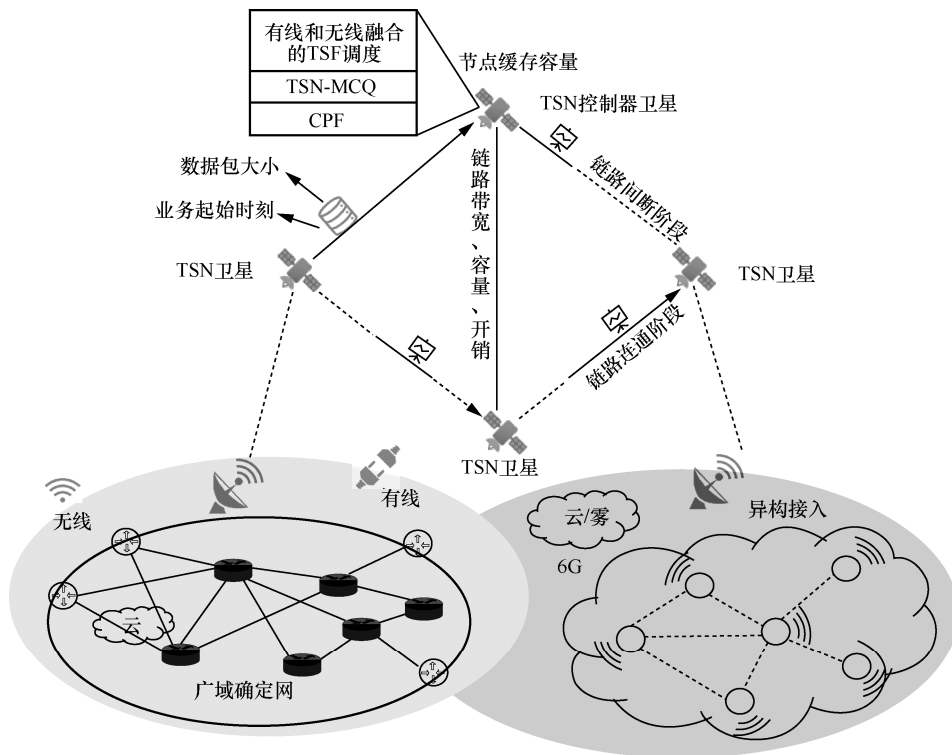


图4 空天地一体化确定性网络路由与调度

机制采用延迟-紧急转发方法, 基于 TSF 的截止日期特性计算流的路径和紧急度, 为卫星网络中的 TSF 分配延迟-紧急级别, 并将不同级别的流量排队到对应的延迟-紧急队列, 不再依赖以太网基于优先级的转发模式。通过上述方法, 确定性业务能够实现精确的延迟-紧急优先级转发, 而队列的延迟-紧急状态周期性变化也能确保差异化的 TSF 获得不同基本的转发服务。CPF 机制的核心思想是定期交换队列的优先级, 通过门控列表控制消除 CQF 机制中的带宽限制, 从而提高 TSF 转发的可靠性。

本节所介绍的星地融合确定性组网技术、广域确定性承载技术和空天地一体化确定性路由与调度技术能够无缝集成到泛在异构确定性组网层中。在集成过程中, 由全域协同网络管控层感知业务需求, 有效管理地面网络和非地面网络之间的资源, 协调泛在异构确定性组网层中的确定性路由和调度策略; 由多域动态确定性融合层制定统一的确定性通信协议体系和空中接口标准, 以确保设备和系统之间能够协同工作, 提升泛在异构确定性组网层中的空中接口传输性能, 为地面网络和非地面网络的确定性传输提供支撑。

## 4 空天地全域确定性服务挑战及趋势

### 4.1 全域异构资源协同调度

由于空天地一体化网络是多域融合网络, 不同域上的计算、存储、通信资源特征异质异构, 卫星的高移动性使资源时空属性动态变化, 卫星信道条件、业务时空分布、星地网络拓扑等网络参数难以充分获得和估计, 因此对全域资源进行精准统一的建模是相当困难的。此外, 在多卫星轨道构成的天域网络中, 卫星所在系统与其他系统之间、系统自身多个轨道间以及不同卫星间存在干扰, 而被干扰卫星的轨道难以进行精确的估计<sup>[36]</sup>, 因此目前亟须有效的多层卫星网络间资源分配策略。现有的资源调度算法在求解此类资源

分配优化问题时, 会转化成难以解决的 NP 困难问题, 资源特征的时变性导致很难在多项式时间内对其求解, 无法满足实时性要求。为了解决上述挑战, 更高效合理地面向业务需求调度网络资源, 引入 AI 赋能资源协同调度策略是一个未来重要的研究方向。

### 4.2 高动态融合网络中业务连续性管理

泛在连接的智能会话管理对保障业务连续性切换起着至关重要的作用, 而各接入网的带宽、时延、丢包率、网络拥塞控制状态各异且存在时变特性, 导致现有多径路由规则会影响接收端数据的无序性和传输时延。因此, 后续研究需要综合考虑用户需求、链路负载、网络状态等因素判断最佳连接链路, 获得高并发多连接的智能路由方案<sup>[19]</sup>。通过小区或者波束的预先切换可以有效降低切换时延, 减少信令交互开销, 但低轨道星的高速移动给终端测量的有效性带来了挑战<sup>[17]</sup>。此外, 将用户位置作为切换决策条件可以提高边缘用户服务质量的一致性, 而相关信息涉及用户隐私和安全问题。考虑现有的安全切换方案大多局限于地面无线网络, 仅适用于特定的网络环境, 难以支持域间切换, 因此如何实现全域范围安全切换是一个重要的难题<sup>[37]</sup>。

### 4.3 6G 全域确定性服务质量保障

SAGIN 的确定性服务质量容易受到其异构性、自组织性和时变性的影响, 具体表现为数据传输的时延、带宽和可靠性 3 个方面挑战。首先, 卫星系统内的链路拥塞以及系统间负载不均衡容易引入不可控排队时延。考虑卫星网络状态难以充分获取, 现有基于多径路由的策略难以实现对星间链路的拥塞控制。对于卫星网络层间负载分担, 未来针对各轨道不同类型流量的智能路由方案应采取适当的分流措施, 以优化路径选择。其次, 带宽资源是制约星地融合的主要瓶颈。由于用户需求各异、分布不均且动态变化, 亟须引入动态、高效、自适应的卫星带宽分配方案, 在满



足用户需求的同时最大化带宽利用率。最后，由于卫星和飞机的高机动性，SAGIN 拓扑结构动态变化，源和目的之间难以存在完整的端到端路径<sup>[38]</sup>。因此研究高效的异构网络协同传输机制，提升网络路由可控性，实现端到端的可靠传输，是值得持续关注方向。

## 5 结束语

空天地一体化确定性网络已经得到了全球学术界和产业界的充分重视，“泛在连接，多网融合”成为未来网络与智能社会发展的基石。基于6G 全域新兴应用场景，本文首先分析了面向确定性服务的SAGIN 需求与动机，然后提出了包含全域协同网络管控层、多域动态确定性融合层以及泛在异构确定性组网层的分层空天地一体化确定性网络架构，分析了相应的固移卫融合确定性网络关键技术，包括6G、星地融合确定性组网、广域确定性承载网络、全域确定性路由与调度等。最后，研判了空天地一体化确定性网络的挑战和发展趋势。

## 参考文献：

- [1] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.  
HUANG T, LIU J, WANG S, et al. Survey of the future network technology and trend[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 130-150.
- [2] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.
- [3] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(3): 55-61.
- [4] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [5] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 101-109.
- [6] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020(3): 3-19.  
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020(3): 3-19.
- [7] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向6G的空天地一体化系统设计和关键技术[J]. 信息通信技术与政策, 2022(9): 18-26.  
KANG S L, MIAO D S, SUO S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(9): 18-26.
- [8] IMT-2030 (6G)工作推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.  
IMT-2030 (6G) Promotion Group. 6G white paper on 6G vision and candidate technologies[R]. 2021.
- [9] 信金灿, 许森, 张化, 等. 面向时间敏感网络的5G无线网增强技术研究[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 18-25.  
XIN J C, XU S, ZHANG H, et al. Study on 5G wireless network enhancement technology for time sensitive networks[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(5): 18-25.
- [10] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.  
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [14] LI Y J, LI H W, LIU W, et al. A case for stateless mobile core network functions in space[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. New York: ACM Press, 2022: 298-313.
- [15] 徐川, 刘俊斌, 邢媛, 等. 有线无线融合的卫星时间敏感网络流调度研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 1014-1023.

- XU C, LIU J B, XING Y, et al. Research on flow scheduling of wired and wireless converged satellite time sensitive network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 1014-1023.
- [16] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术与演进展望[J]. *电信科学*, 2022, 38(3): 10-21.
- MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(3): 10-21.
- [17] 徐霞艳. 基于 5G 的非地面网络关键技术与标准化进展[J]. *移动通信*, 2020, 44(9): 44-48.
- XU X Y. Key technologies and standardization of 5G-based non-terrestrial networks[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(9): 44-48.
- [18] CUI H X, ZHANG J, GENG Y H, et al. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges[J]. *China Communications*, 2022, 19(2): 90-108.
- [19] 杨力, 潘成胜, 孔相广, 等. 5G 融合卫星网络研究综述[J]. *通信学报*, 2022, 43(4): 202-215.
- YANG L, PAN C S, KONG X G, et al. Review on 5G-satellite integrated network[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(4): 202-215.
- [20] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望[J]. *中兴通讯技术*, 2021, 27(5): 2-6.
- TIAN K B, YANG Z, ZHANG N. Prospects for the air-space-ground integrated network technology[J]. *ZTE Technology Journal*, 2021, 27(5): 2-6.
- [21] AHMED T, DUBOIS E, DUPÉ J B, et al. Software-defined satellite cloud RAN[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2018, 36(1): 108-133.
- [22] 杨峻一, 裴凡迪, 许兆龙, 等. 基于微服务的 6G 空天地一体化新型网络架构仿真系统[J]. *天地一体化信息网络*, 2022(3): 87-96.
- YANG J Y, PEI F D, XU Z L, et al. Simulation system of space-air-ground integrated micro-service new network architecture in 6G[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022(3): 87-96.
- [23] EIZA M H, RASCHELLÀ A. A hybrid SDN-based architecture for secure and QoS aware routing in space-air-ground integrated networks (SAGINs)[C]//*Proceedings of 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [24] LI S X, CHEN Q, LI Z, et al. Civil aircraft assisted space-air-ground integrated networks: architecture design and coverage analysis[J]. *China Communications*, 2022, 19(1): 29-39.
- [25] YU S, GONG X W, SHI Q, et al. EC-SAGINs: edge-computing-enhanced space-air-ground-integrated networks for Internet of vehicles[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(8): 5742-5754.
- [26] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 224-231.
- [27] 贾庆民, 丁瑞, 刘辉, 等. 算力网络研究进展综述[J]. *网络与信息安全学报*, 2021, 7(5): 1-12.
- JIA Q M, DING R, LIU H, et al. Survey on research progress for compute first networking[J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2021, 7(5): 1-12.
- [28] TANG M, GAO L, HUANG J W. Communication, computation, and caching resource sharing for the Internet of things[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(4): 75-80.
- [29] 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.
- [30] 中兴通讯股份有限公司. IP 网络未来演进技术白皮书 3.0——增强确定性网络(EDN)[R]. 2023.
- ZTE Corporation. IP network future evolution technology white paper 3.0 - enhanced deterministic network (EDN)[R]. 2023.
- [31] 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.
- [32] MA X, LI S Y, GUAN Z C, et al. Time-sensitive networking mechanism aided by multilevel cyclic queues in LEO satellite networks[J]. *Electronics*, 2023, 12(6): 1357.
- [33] WANG F, WU D, HE W J, et al. CPF: bridging time-sensitive networks into large-scale LEO satellite networks[C]//*Proceedings of 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [34] ZHENG G, YAO Y P, WANG D D, et al. Study of an access protocol for satellite network with open TDMA[C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 37-42.

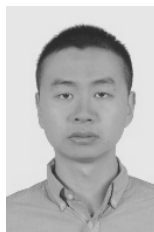


- [35] SHOAIE A D, DERAKHSHANI M, PARSAEEFARD S, et al. Learning-based hybrid TDMA-CSMA MAC protocol for virtualized 802.11 WLANs[C]//Proceedings of 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1861-1866.
- [36] 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.
- [37] WANG H, XIA X, SONG T, et al. Survey on space-air-ground integrated networks in 6G[C]//Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 315-320.
- [38] 李丹, 朱棣, 申涓. 全维可定义的天地协同组网架构与切片技术研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 30-38.
- LI D, ZHU D, SHEN J. Networking architecture and slicing technology of space-ground cooperative network based on full-dimension definability[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 30-38.

#### [作者简介]



彭国宇（1998-），男，北京邮电大学博士生，主要研究方向为时间敏感网络、确定性网络、未来网络体系架构。



汪硕（1991-），男，博士，北京邮电大学副教授，主要研究方向为软件定义网络、数据中心网络、确定性网络、网络人工智能等。



李桂珍（1999-），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为时间敏感网络、确定性网络。



文昱涵（2000-），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为时间敏感网络、确定性网络、边缘计算与任务卸载。



黄韬（1980-），男，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为路由与交换、软件定义网络、内容分发网络、确定性网络、算力网络等。