



专题：空天地一体化通信技术

业务驱动的空天地海一体化网络技术研究

范珂欣, 安丽荣, 张钦宇

(哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055)

摘要: 面向不断涌现的新型应用和业务需求, 空天地海一体化网络具有全域覆盖、高效灵活、弹性可靠等优势, 为众多领域的多样化业务场景提供智能、协同、高效的泛在信息服务, 是未来移动通信系统的重要组成部分。首先, 分析了空天地海一体化的国内外发展现状、网络架构及其面临的需求挑战; 然后, 以海量差异化业务的承载需求为驱动力, 研究了网络切片、移动边缘计算、通感算一体化关键网络技术; 最后, 从智能化、融合化、安全化角度探讨了未来空天地海一体化发展方向。

关键词: 空天地海一体化; 6G; 网络技术; 人工智能

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024172

Research on service-driven network technologies for space-air-ground-sea integration

FAN Kexin, AN Lirong, ZHANG Qinyu

Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

Abstract: Facing the emerging novel applications and service demands, space-air-ground-sea integrated network offers advantages such as global coverage, high efficiency, flexibility, elasticity, and reliability. It provides intelligent, collaborative, and efficient ubiquitous information services for diverse service scenarios in many fields, and is an important part of future mobile communication system. Firstly, the domestic and international development status, network architecture, demands, and challenges of space-air-ground-sea integration were analyzed. Then, driven by the demand for carrying massive diverse services, key network technologies, including network slicing, mobile edge computing, and communication-sensing-computing integration, were investigated. Finally, the future development direction of space-air-ground-sea integration was discussed from the perspectives of intelligence, integration, and security.

Key words: space-air-ground-sea integration, 6G, network technology, artificial intelligence

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61831008, No.62027802)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61831008, No.62027802)



0 引言

随着现代社会与科技的持续进步,人类活动范围不断扩展,新型应用场景与多样化业务需求不断涌现。受限于覆盖能力和网络容量,以5G移动通信系统为代表的地面通信系统难以支撑网络空间极大扩展的广域信息交互与泛在通信需求^[1]。当前地面通信系统仍存在大量通信盲区,无法服务80%以上的陆地、95%以上的海域以及距离地面1 km以上的空域^[2]。地面基础设施的抗毁性和灵活性较差,难以保障应急救援、热点区域等特殊通信场景的高效服务。此外,卫星、飞机、轮船等非地面设施的宽带接入需求逐步增长,新兴多元信息服务的多维资源需求不断提升。在此背景下,构建覆盖空、天、地、海的一体化网络成为6G移动通信系统的重要特征。各国相继启动了空天地海一体化研究,旨在构建全域覆盖、泛在智能、灵活可靠的新型通信网络架构,以实现6G全覆盖、全频谱、全应用的总体愿景。

空天地海一体化网络突破异构体制的边界限制,深度融合空基、天基、地基、海基网络,是未来信息基础设施的重要组成部分。通过综合利用空、天、地、海多维信息资源,结合人工智能、大数据、区块链等先进技术,空天地海一体化网络为航空航天、应急救援、海上运输和智慧交通等众多领域的广泛应用场景提供强大支撑。各场景业务复杂多样,多样化需求不断增长,对网络的能力、可靠性和稳定性提出了新要求。海量差异化业务的承载需求成为空天地海一体化网络技术发展的重要驱动力。然而,该一体化网络具有跨境跨介质、拓扑复杂动态、节点能力不均等特点,业务承载面临异构网络体系差异大、通信环境复杂不确定、多维资源稀疏高动态等难题和挑战。在资源受限、环境复杂、需求各异的约束下,实现海量业务需求的统一承载与多维异构

资源的高效管控成为巨大挑战。亟待研发灵活高效、智能协同的新型网络技术,以保障通信服务质量,实现系统级性能提升。

本文以业务承载需求为驱动力,对空天地海一体化关键网络技术进行研究。首先,介绍空天地海一体化的国内外发展现状与网络架构,分析多层次约束下通信服务的需求与挑战。其次,研究网络切片、移动边缘计算、通感算一体化三大关键网络技术,讨论相关研究进展。最后,展望未来空天地海一体化的发展趋势与技术方向。

1 空天地海一体化发展与挑战

1.1 发展现状

空天地海一体化的发展包含子网构建、网络融合、协同发展等阶段。从20世纪70年代至今,空基、天基、地基、海基网络持续演进发展。由于各子网采用不同的技术体制,网络系统间“信息孤岛”“烟囱效应”问题严重,信息交互能力差,发展程度不均衡。随着认知环境的扩展与服务需求的增加,网络融合成为必然发展趋势。未来空天地海一体化网络将整合各子网优势,通过强大的机动性能、广泛的覆盖范围、全局的协作能力,实现资源信息的统一管理、互联互通和综合利用。当前,空天地海一体化处于从子网独立发展向网络融合发展的初期过渡阶段。

近年来,国际标准化机构持续推进空天地海一体化的标准化工作,为空天网络技术与异构网络融合发展提出了实质性建议。国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)提出了包括中继到站、小区回传、动中通、混合多播的星地融合典型应用场景,并将空天地一体化网络建设列为七大关键网络需求之一^[3]。欧洲电信标准组织(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)提供了天基与地基网络融合的相关标准、规范、解决方案。空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for

Space Data Systems, CCSDS) 制定了一系列空间网络通信和空地通信协议标准^[4]。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)从Release 14阶段开始进行星地融合标准化研究,在部署场景、潜在需求、网络技术等方面开展了提案征集和技术报告工作,奠定了一定的研究基础^[5]。

作为未来的重要通信基础设施,空天地海一体化网络建设周期长、投入大,需要政府和企业的持续性投入。20世纪初,美国国防部为适应全球信息栅格的发展,提出建设转型通信体系结构(transformational communications architecture, TCA),集成空基、天基、地基、海基通信系统^[6]。日本提出 STICS (satellite terrestrial integrated mobile communication system),通过星地融合保障应急通信和国家安全^[7]。欧洲先后提出 ISICOM (integrated space infrastructure for global communication)^[8]、VITAL (virtualized hybrid satellite-terrestrial systems)^[9]和 SATis5 (satellite-terrestrial integration in the 5G context)^[10]项目,推动卫星和地面网络的融合进程。此外,大量国外企业开展了相关技术研究和设备研制。美国 SpaceX 公司的 Starlink 项目拟通过 11 943 颗卫星实现全球网络覆盖,已完成商业模式闭环,展现了低轨卫星网络的巨大应用前景。英国 OneWeb 公司计划部署 6 372 颗低轨卫星,构建全球覆盖、高速低时延的网络连接。随着空中平台成本的降低,谷歌公司的 Loon 项目和 Facebook 公司的 Aquila 项目分别通过热气球和高空太阳能无人机提供低成本网络服务。虽然国外政府、企业对空天地海一体化的研发工作起步较早,实现了初步的网络融合探索,但仍处于起步阶段。

由于地缘政治的影响,我国全球建设地面信关站难度大,卫星频谱、轨位资源严重受限,在传统的通信架构下无法满足“一带一路”等战略决策,严重影响我国军事部署与经济发

展需求。空天地海一体化网络的建设可以打破这一僵局,快速形成全球信息服务能力,为国内外重大活动提供高可靠的通信保障,满足陆上重要经济带、海上交通要道、海外热点区域的信息需求。2016年,天地一体化信息网络作为“科技创新2030——重大项目”中首个启动的重大工程项目被列入国家“十三五”规划纲要以及《“十三五”国家科技创新规划》。2020年,卫星互联网首次被国家发展和改革委员会纳入新基建范畴,成为新一代信息基础设施的重要组成部分。2024年,工业和信息化部等七部门发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》,再次提及卫星互联网,并将其列入未来产业。此外,我国相继启动了“鸿雁”星座、“虹云”工程、“天启”星座等卫星星座计划,研制了“彩虹无人机”“飞云”工程“快云”工程等高空平台,为建设空天地海一体化网络提供了技术积累和前期验证。

国内外空天地海一体化项目见表1,汇总了上述项目的技术、优势和问题。各国在空天地海一体化建设上各有特点和优势,主要侧重于空天互联网的建设,但普遍面临技术、成本等方面的难题,仍须进一步深入研究与技术创新。

1.2 网络架构

空天地海一体化网络综合利用现代信息技术,深度融合空基、天基、地基、海基网络,提供广域、智能、协同、高效的信息服务。空天地海一体化网络架构如图1所示,主要包含以下几个部分。

(1) 天基网络

包括地球同步静止轨道 (geosynchronous earth orbit, GEO)、中地球轨道 (medium earth orbit, MEO)、低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 等不同轨道高度卫星,以及地面站、控制中心等相关地面设施^[11]。高轨卫星通常作为稳定中继节点服务于超远距离传输,中轨卫星多用于接入、转发与导航,低轨卫星以较低时延为用户



表1 国内外空天地海一体化项目

国家和地区	名称	核心技术	优势	问题
美国	TCA	IP技术, 激光通信	全球覆盖, 高度集成	系统复杂度高, 部署成本高
	Starlink	相控阵天线, 激光通信	全球覆盖, 高速互联网	太空碎片风险, 频谱干扰
	Loon	LTE无线通信	快速部署, 低成本网络	受天气影响, 覆盖范围有限
	Aquila	激光通信	节能环保, 覆盖较广	长航时飞行技术不成熟
日本	STICS	高线性放大器, 多波束技术	服务范围广, 高速率	频谱资源有限, 系统可靠性低
欧洲	ISICOM	IP路由, 多波束天线	高频谱利用率, 高速率	集成复杂, 安全风险高
	VITAL	虚拟化网络功能, 软件定义网络	高灵活性和扩展性	技术复杂, 标准化要求高
	SATIS5	5G NR, 边缘计算	高速率, 响应快	资源协调复杂, 成本高
英国	OneWeb	渐进倾斜技术, 开放式架构	全球覆盖, 高速低时延	发射和运营成本高, 频谱干扰
中国	鸿雁	在轨可重构技术	全球覆盖, 实时双向通信	频谱和轨位资源有限
	虹云	毫米波相控阵技术	全球覆盖, 高速接入	业务系统尚需优化论证
	天启	通信载荷自检技术, 高速下载技术	低成本, 服务范围广	终端设备成本高, 频谱资源有限
	彩虹无人机	宽带接入技术, 多模通信技术	安全可靠, 部署快速灵活	通信距离有限, 资源管理复杂
	飞云	空基局域网技术	覆盖范围广, 续航时间长	受气象条件和飞行环境影响
	快云	宽带通信技术, 抗干扰技术	快速部署, 连续性服务	配套系统成本高, 环境复杂

提供高速互联网服务。同轨、异轨卫星之间通过微波、毫米波、太赫兹或激光链路构建天基网络, 协同实现全球覆盖的宽带通信和泛在连接。

(2) 空基网络

由高空平台 (high-altitude platform, HAP) 和低空平台 (low-altitude platform, LAP) 组成, 提供灵活、高效的通信服务^[12]。平流层飞艇、高空气球等高空平台位于距离地面 18~50 km 的平流层空域, 可长时间定点驻留, 提供持续性服务, 是连接天基和地基的重要中继节点。无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 等低空平台飞行高度在 10 km 内, 为城市热点区域和偏远地区提供增强覆盖, 具有成本低、机动强、响应快等优点。

(3) 地基网络

由蜂窝网、无线局域网 (wireless local area network, WLAN)、移动自组网 (mobile ad hoc network, MANET) 等地面通信网络组成, 为大部分人类活动提供实时、稳定的通信服务。地基网络是通信系统的基础设施, 提供地面覆盖和连接, 支持固定通信、移动通信、互联网接入等服

务, 具有高带宽、低时延、易于部署维护等优势。

(4) 海基网络

包括水面网络, 以及由水下观测网和水下自组织网组成的水下网络。水面网络由船舶、浮标和无人水面舰艇等设施组成, 支持海上通信和船舶间通信^[13]。水下观测网通过水下传感器长期监测海洋环境变化、海洋生物活动、地质情况等。水下自组织网包括自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV)、遥控潜水器 (remote-operated vehicle, ROV) 和各类水下节点, 通过声波、电磁波、光波等方式实现水下通信与数据传输。

空天地海一体化异构网络特点^[14-16]见表 2, 各异构网络相互独立又相辅相成, 使得一体化网络具备广覆盖、大容量、高可靠等优势, 以支撑未来泛在信息服务需求。

1.3 需求挑战

面向 6G 全覆盖、全频谱、全应用的总体愿景, 空天地海一体化网络须具备支持超高速率、超低时延、全球覆盖、海量连接、超高可靠和超

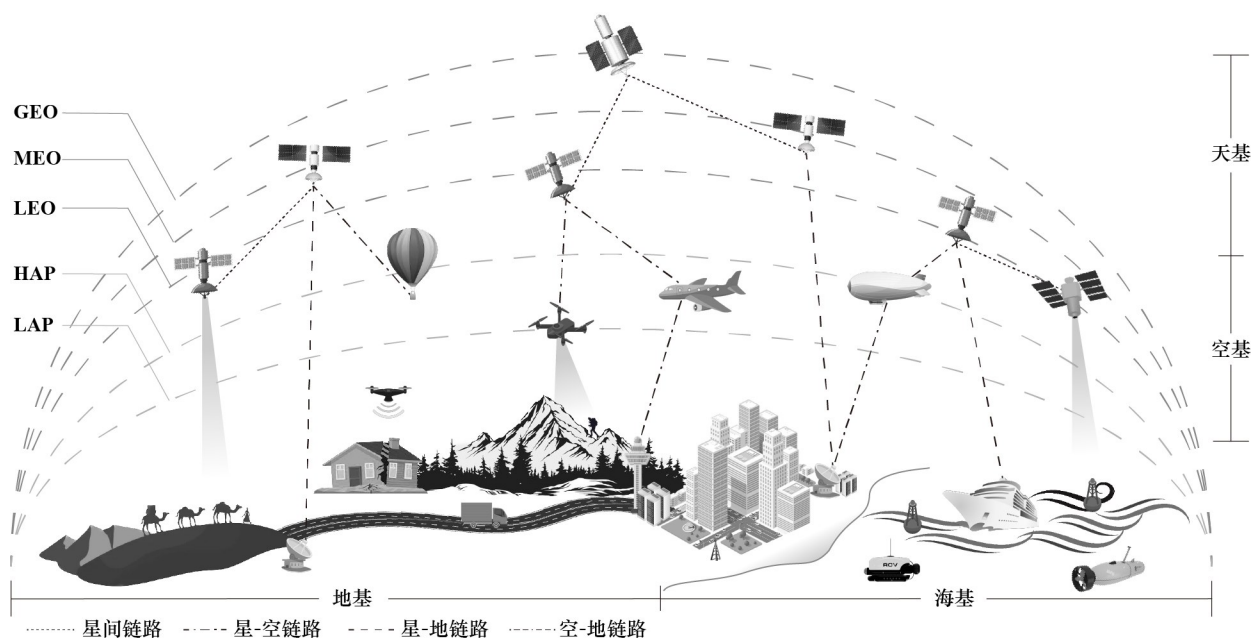


图1 空天地海一体化网络架构

表2 空天地海一体化异构网络特点

网段	组成	高度/km	覆盖	移动性	速率/(bit·s ⁻¹)	时延/ms	服务
天基	GEO	35 786	全球	对地静止	1~10 G	239	通信, 广播, 定位
	MEO	1 200~35 786	全球	中	1.2 G	12.5~125	通信, 导航
	LEO	200~1 200	全球	高	3.75 G	3~50	通信, 遥感, 互联网
空基	HAP	18~50	广域	低	10 G	< 3	中继通信, 环境监测
	LAP	< 10	局部	高	10 G	< 3	应急通信, 航空测绘
地基	蜂窝网、WLAN、MANET	—	局部	静止	20 G	< 1	通信, 互联网
海基	水面网络	—	局部	中	12 800 k	10~50	海上通信, 船舶通信
	水下网络	< -0.01	局部	低	< 80 k	100~1 000	水下通信, 海域监测

低能耗的能力, 以满足多样化业务场景日益增长的通信服务需求。作为大尺度综合网络, 空天地海一体化网络同时为空基、天基、地基、海基众多领域的业务场景提供服务。各场景业务种类繁多, 不同业务在带宽、时延、可靠性等方面的需求差异巨大, 包含复杂的逻辑与语义关系, 需要定制化服务^[2]。现代科技的快速发展催生了虚拟现实、远程医疗、自动驾驶等大规模新型应用, 带来业务需求的大幅增加。海量业务需求需要充足的传输、处理、存储资源支撑, 部分复杂业务则需要多种网络、多类资源协同服务。此外, 业务按需承载的同时, 还须保证通信服务的实时

性、连续性与可靠性。这对网络的能力、高效性和稳定性提出了新要求。

然而, 空天地海一体化网络具有跨域跨介质、拓扑复杂动态、节点能力不均等特点, 满足海量多样化业务需求面临异构网络体系差异大、通信环境复杂不确定、多维资源稀疏高动态等难题和挑战。空天地海一体化由于跨域跨介质多层级建设, 网络体系架构极为复杂。各异构网络发展相对独立, 在通信协议、传输能力、网络特性等方面存在较大差异, 导致信息共享能力弱、融合程度低。一体化网络通信节点复杂多样, 且动态性各异。中低轨卫星相对地球呈周期性高速运



行，UAV、AUV等节点的轨迹则难以预测。受节点移动性与信道环境变化影响，空天地海一体化网络拓扑呈高度动态性，通信窗口碎片化、链路断续连通，难以保障连续性服务。星地远距离传输与水下复杂环境传输的跨介质衰减和通信时延较大，难以确保信息的实时获取与可靠传输。此外，由于卫星节点暴露、信道开放等客观物理因素，复杂不确定环境下的网络安全与隐私保护问题也更为突出。受载荷容量、能源供应、设备维护等限制，天基、空基和海基节点的计算、存储能力相比地面通信系统较为有限，多维异构资源分布极不均衡。同时，物理拓扑与业务需求的双重高变性，以及协作式数据传输、网间互联与网内通信的存在，进一步导致网络资源高度动态，难以有效管控。在此背景下，一体化网络的业务承载与资源配置面临巨大挑战。

2 关键网络技术

面对上述空天地海一体化需求与挑战，亟待研发灵活高效、智能协同的新型网络技术，以承载海量差异化业务，实现系统级性能提升。其中，网络切片、移动边缘计算、通感算一体化被视为实现这一目标的关键技术。空天地海一体化关键网络技术见表3，其给出了这3项技术的总体介绍与对比，接下来将对具体解决方案展开分析讨论。

2.1 网络切片

作为空天地海一体化的关键网络技术之一，网络切片被视为实现网络灵活化、定制化的重要手段。针对异构网络体系差异大、通信环境复杂不确定等难题，网络切片可以通过逻辑分割方式将空天地海一体化物理网络按需划分为多个逻辑上独立的、可定制的网络切片实例。尽管底层网络环境复杂多变，但网络切片在逻辑上稳定，且可以根据需求进行独立配置和优化，为差异化业务需求提供定制化保障^[17]。

网络切片通常由网络功能虚拟化（network function virtualization, NFV）和软件定义网络（software defined network, SDN）辅助实现^[18]。网络切片逻辑功能架构如图2所示，NFV将通信、计算、存储、感知等传统网络资源虚拟化为资源块并聚合至资源池，以实现网络功能的灵活部署，为网络切片提供基础支撑。SDN通过控制器负责业务适配、切片管理、资源编排等任务，实现集中管理与网络优化。研究表明，基于SDN和NFV的网络切片架构可以实现网络资源的灵活分配和管理，有效提升服务质量与网络性能。相比传统网络，空天地海一体化网络的环境拓扑更为复杂多变、业务需求更为多样，需要新的切片架构以实现高质量服务。在此背景下，文献[19]构建了基于SDN和NFV的卫星网络按需切片框架，在考虑需求差异的同时提升服务质量水平。文献[20]提出了软件定义的空天地一体化网络架

表3 空天地海一体化关键网络技术

对比项	网络切片	移动边缘计算	通感算一体化
定义	将物理网络按需划分为多个切片实例	将计算、存储资源部署至网络边缘	深度融合通信、感知、计算功能
特点	网络资源隔离，按需灵活配置	近场数据处理，实时分析决策	多功能融合，环境业务感知
优势	提供定制化服务，提升网络资源利用率，提高服务质量	提升用户体验，降低网络负载，支持高实时性业务	保障高质量、连续性服务，提升网络整体性能
针对挑战	异构网络差异大，环境复杂多变	传输环境复杂，资源有限不均衡	通信环境不确定，资源稀疏高动态
技术依赖	SDN、NFV、SFC、AI	在轨计算、空基计算、AI	通感、通算、感算双边融合，AI
技术难点	资源编排复杂，业务需求高动态	业务逻辑复杂，数据规模大	技术整合难度高，性能指标独立



图2 网络切片逻辑功能架构

构，以应对设备多样、网络动态、资源异构等挑战，支撑无缝高效的多样化车载业务。

基于NFV与SDN，网络切片可以通过资源隔离避免业务间相互影响，并根据业务需求进行资源编排，提供定制化服务。然而，在空天地海一体化网络中，多维异构资源分布极不均衡，难以利用有限资源承载海量业务需求。因此，提升资源利用率成为空天地海一体化网络切片的核心目标之一。文献[21]提出了一种自动网络切片框架，解决天地一体化网络的路由计算和资源分配问题。文献[22]为软件化空天地一体化网络建立了新的资源分配与编排框架，以在准静态状态下提供高效可靠的切片服务。在车联网场景中，文献[23]研究了广播速率、单播速率、缓存等多维异构资源的网络切片问题，文献[24]更深入地将频谱资源进行虚拟化，根据时变环境设计了动态切片方案。此外，部分研究利用服务功能链（service function chain, SFC）实现灵活可重构的服务，进一步提升资源利用率与系统整体性能^[25-27]。

近年来，人工智能（artificial intelligence, AI）在网络切片领域展现了巨大潜力，为解决高动态网络下的复杂切片问题提供了可行方案^[28]。

部分研究工作者结合机器学习、强化学习等方法，根据业务需求与网络资源变化进行切片配置的动态调整，提高服务质量。文献[29]为6G网络构建了内生AI的网络切片架构，利用集成AI的SDN控制器支持新型智能业务。文献[30]通过机器学习与网络切片技术为用户请求配置地面和卫星网络资源。文献[31]提出了内生智能的空天地一体化网络切片方案，给出了高安全性、高传输速率、低时延场景下的网络切片染色机制实例。根据业务种类与需求，文献[32]利用深度确定性策略梯度算法动态调整网络切片与相关资源，以最大化网络性能。文献[33]提出了可获得帕累托最优解的多智能体深度强化学习算法，联合优化一体化网络中的高通量、低时延、广覆盖切片。

以上研究针对空天地海一体化网络切片的动态配置提出了一系列解决方案，尤其在提升网络资源利用率方面取得了显著进展。然而，多维异构资源的协调调度较为复杂，频繁的资源重组与再分配会导致管理开销和资源消耗增加，进而影响网络的稳定性和运行效率。在面对快速变化的业务需求时，当前技术仍存在局限性，缺乏对多样化业务需求的精准预测，难以保证连续性服务。因此，尚需进一步研究资源虚拟融合和协同



优化技术,探索更为灵活、自适应的网络切片方案,以实现网络性能整体提升。

2.2 移动边缘计算

移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)为海量业务服务提供有力技术支持,可以有效扩充空天地海一体化网络能力,提升全域用户服务质量。MEC将计算、存储资源部署在网络边缘节点,支持高效、快速的近场数据处理^[34]。这一技术可以有效应对空天地海一体化传输环境复杂、资源有限不均衡等问题,缩短数据传输路径,减少远距离传输与复杂环境传输带来的高延迟与高能耗,提高响应速度和用户体验质量。

目前,地面云边端协同架构已较为成熟。该架构融合云计算与边缘计算,为按需服务提供多层异构计算资源,满足低时延、大带宽、低成本三大指标^[35]。近年来,空天地海一体化网络将移动边缘计算扩展至天基和空基,进一步扩大网络服务能力与服务范围^[36]。这一新型计算框架将边缘计算设备部署在卫星、高空平台、无人机等非地面节点,支持计算密集型业务的在轨计算与空基计算,提供更为灵活高效的服务方案,提升整体服务效率。文献[37]提出了卫星边缘计算系统,为通信受限区域提供低时延、低能耗的数据处理服务。文献[38]研究了单无人机使能的空基边缘计算,文献[39]提出了多无人机边缘计算网络,文献[40]则进一步将边缘计算集成至无人机群,有效缓解地面网络压力,提高用户服务质量。空天地海一体化网络资源的多维异构性决定了多层计算框架的重要性。文献[15]阐述了一体化网络多层计算架构的基本概念,并详细分析了各异构网络的特征与计算能力。文献[41]论述了边缘计算在内容缓存、计算卸载和网络服务方面的优势,提出了包含空基、天基、地基、海基边缘计算集群的多层网络架构。在此多层计算框架中,业务可以在边缘节点执行,或卸载至云服务器处理,使得服务更为灵活地适应不同需求。

由于卫星、无人机等边缘节点的通信、计算、存储能力有限,业务的传输、处理选择多样,需要设计合理的任务调度与资源分配方案,以同时满足海量差异化需求^[42]。文献[43]为多无人机任务卸载构建了低成本的编码分布式计算框架。文献[44]提出了分布式鲁棒的计算卸载优化算法,最小化能量约束下的系统时延。文献[45-47]使用了李雅普诺夫等传统优化方法解决任务卸载与资源分配联合优化问题,降低成本开销与系统能耗。作为大规模、高动态网络,空天地海一体化网络的边缘计算问题具有内生动态性,相关决策呈现高维特征。得益于其快速收敛和自适应决策的优势,深度强化学习被视为解决复杂决策问题的有效方法。文献[48]设计了深度风险敏感强化学习算法,在无人机能源约束下最小化卸载与计算时延。文献[49]在空天地一体化云边端协同框架下提出了基于深度行动器—评判器的队列感知任务调度算法,在能源和时延约束下降低能耗。考虑空天地海一体化节点的多样异质性,部分研究利用多智能体强化学习解决复杂任务调度与资源分配问题。文献[50]通过多智能体合作框架优化多无人机边缘计算的轨迹设计、任务卸载、功率分配联合策略。文献[51]研究了低轨卫星互联网的任务卸载问题,提出了多智能体信息广播与判断算法,实现网络资源的协同优化。

随着网络尺度与应用场景的不断扩展,现有移动边缘计算解决方案难以应对大规模、多层次的业务需求。相关研究应进一步关注复杂业务逻辑关系,深入探索适应大尺度网络的可扩展技术,以提升网络稳定性,保障用户服务质量。为减轻大规模数据带来的网络负载压力,还需研究缓存资源管理方案。通过提前缓存潜在服务内容,避免信息重复传输、处理,从而降低网络负担,提升请求响应速度与服务体验质量。

2.3 通感算一体化

通感算一体化技术通过软硬件资源协同共

享,实现通信、感知、计算的深度融合与互惠增强^[52]。通信有效传递和汇聚信息,支撑多节点协作感知与分布式泛在计算。感知涵盖对电磁和物理环境的外部感知,以及对业务需求、物理与数字空间的网络内生感知,为通信和计算提供先验信息与数据来源。计算对数据进行融合处理与分析,提供最优传输策略,增强从环境感知到认知的能力。三者的紧密耦合可以在复杂不确定的通信环境与稀疏高动态的资源条件下,协同感知环境需求变化,动态调整资源配置策略,进而满足高精度、低时延、高算力的业务需求,保障连续性服务,提升网络整体性能。

面向空天地海一体化的通感算一体化技术还在初步研究阶段,现有相关工作集中于通感、感算、通算的双边能力融合。通信与感知系统在射频架构、信道特性、信号处理等方面的相似性催生了通信感知一体化相关技术的发展^[3]。通感一体化通过空口及协议联合设计、时频空资源复用和硬件设备共享等方式,在高精度感知的同时进行高质量数据传输,提升通信效率、扩展感知范围^[53]。文献[54]使用强化学习方法解决了无人机通感一体化系统中的资源分配问题,实现了通信与感知的性能平衡。文献[55]则为低轨卫星系统提出了波束斜面感知的通感一体化技术,解决节点高速移动和远距离通信带来的高时延和大频移问题,实现通信与感知功能的联合优化。感知计算一体化技术融合数据感知收集与实时计算分析,实现更为准确高效的数据处理和决策。文献[56]将群体感知计算与空天地一体化网络相结合,为大规模复杂业务提供低时延计算与高速率传输服务。通信计算一体化研究更为成熟,大量工作结合移动边缘计算技术进行通信与计算资源联合优化,有效应对空天地海一体化的环境复杂、资源有限、需求多样等挑战,提高网络承载力与稳定性^[42]。

基于上述通信、感知、计算两两融合的可行

性,研究者们提出了通感算一体化模型架构的初步设想。针对6G数据驱动的多维业务需求,文献[57]构建了由中心网云、一体化网元和分布式终端组成的通感算融合网络架构。部分工作则聚焦于空天地海一体化的特有难题,开展了通感算一体化研究。文献[58]提出了基于联邦学习的通感算融合架构,使卫星与无人机具备通感算一体化的数据采集、处理、分发能力,有效解决节点数量多、能力有限导致的通信阻塞问题,为地面终端提供低时延、高质量的服务。文献[59]给出了无人机通感算系统模型,并深入讨论了资源受限与动态环境约束下的资源分配、轨迹规划、波形设计3个典型科研问题。

尽管以上工作取得了一定进展,空天地海一体化网络的通感算一体化系统级优化有待进一步研究。通信、感知和计算技术整合难度高,多模数据融合复杂,需要构建智能化的系统集成平台来提升一体化协同性,满足复杂应用需求。通感算一体化性能指标见表4,通信、感知、计算性能指标相对独立,单方面指标优化难以保障全面性服务^[60]。因此,未来研究需要建立通感算一体化基础理论,制定合理的综合评价体系,以实现三者的深度融合与内在平衡。

表4 通感算一体化性能指标

功能	类型	指标
通信	安全	加密强度, 认证机制
	可靠	误比特率, 用户体验
	效率	峰值速率, 通信时延, 能量效率
感知	定位	定位精度, 目标分辨率
	探测	感知范围, 空间分辨率, 图像熵
计算	系统	算力密度, 连接数密度, CPU/GPU利用率
	服务	服务响应时间, 峰值算力

3 未来展望

未来空天地海一体化网络技术将朝着智能化、融合化、安全化方向发展,以支撑万物互



联、全域覆盖、泛在智能、安全可靠的美好愿景。

3.1 智能感知与定制化服务

随着空天地海一体化网络的业务场景日益多样化,智能感知和精准预测将成为实现定制化服务的重要手段。先进的智能感知技术可以实时监测、分析数据流量、通信环境与网络负载的动态变化,使得一体化网络更加灵活地调整服务策略,保障信息服务的连续性与确定性。人工智能算法可以实现业务需求与用户轨迹的精准预测,根据需求变化定制专属服务策略,提前部署所需网络资源、缓存潜在服务内容,进而加快服务响应速度,提升用户服务质量和用户体验。与此同时,智能感知技术还可以根据业务流变化辅助网络资源配置优化,提高网络整体运行效率,实现负载均衡。

3.2 自主决策与融合化管控

未来空天地海一体化网络将综合运用强化学习、深度学习、联邦学习等人工智能算法,实现复杂巨系统的自主决策与融合化管控。其中,强化学习算法将扮演关键角色,协助链路节点进行按需自主决策,为动态路由、任务调度、资源分配等复杂决策问题提供有效解决方案。深度学习技术将进行大数据分析,推演网络演进策略和周期,为一体化网络的自学习、自演进提供有力支持。联邦学习则允许异构节点间的数据共享与协同合作,实现资源全局管控,促进网络融合发展。这些先进技术将共同支撑空天地海一体化网络的智能化融合管控与系统级性能优化,满足未来复杂业务场景的多样化需求。

3.3 安全可信与全面化保障

空天地海一体化网络面临来自不同方面、不同层次的安全威胁,数据安全和隐私保护问题日益凸显。为确保通信服务的连续性和稳定性,未来空天地海一体化网络将构建具备抗毁性、鲁棒性和自适应性的高效安全防护机制。在此内生安

全机制中,安全路由方案与信任网络拓扑结构可以有效降低远距离传输与异构网络互联互通带来的数据窃听与仿冒风险。轻量级、高性能的加密算法能够降低系统复杂性,减少资源与成本开销。联邦学习通过传递参数避免原始数据共享,分布式处理方案可以降低传输过程的隐私风险,共同保障数据信息的安全性和私密性。全域密码管理体制则将进一步实现各场景通信服务的全面化保障。

4 结束语

空天地海一体化深度融合多维异构网络,承载广泛应用场景的差异化业务,当前处于初期研究阶段。本文首先讨论了空天地海一体化的国内外发展现状、网络架构与需求挑战。随后,分析介绍了业务驱动的关键网络技术,包括网络切片、移动边缘计算和通感算一体化。最后,面向智能化、融合化、安全化的美好愿景,从智能感知与定制化服务、自主决策与融合化管控、安全可信与全面化保障方向对未来空天地海一体化网络技术作出了展望。

参考文献:

- [1] 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, 4(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, 4(3): 3-19.
- [2] 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 and key technologies for the air-space-ground integrated network[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(1):1-11.
- [3] ITU. ITU-T technical report - representative use cases and key network requirements for network 2030[R]. 2020.
- [4] CCSDS. Blue books: recommended standards[EB]. 2019.
- [5] 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.
- [6] 丁雪丽. 美国转型通信体系结构(TCA)的发展[J]. *计算机与网络*, 2005, (9): 49-51.
- DING X L. The development of USA transformational communications architecture (TCA)[J]. *China Computer & Network*, 2005, (9): 49-51.
- [7] FUJINO Y, MIURA A, HAMAMOTO N, et al. Satellite terrestrial integrated mobile communication system as a disaster countermeasure[C]//*Proceedings of 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [8] 吴建军, 程宇新, 梁庆林, 等. 面向未来全球化网络的欧洲 ISICOM 卫星通信概念系统[J]. *卫星应用*, 2010 (5): 59-64.
- WU J J, CHENG Y X, LIANG Q L, et al. European ISICOM satellite communication concept system for future global networks[J]. *Satellite Application*, 2010 (5): 59-64.
- [9] European Union. Virtualized hybrid satellite-terrestrial systems for resilient and flexible future networks[EB]. 2017.
- [10] SATIS5 Consortium. SATIS5[EB]. 2018.
- [11] 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.
- [12] CAO X B, YANG P, ALZENAD M, et al. Airborne communication networks: a survey[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 1907-1926.
- [13] GUO H Z, LI J Y, LIU J J, et al. A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 24(1): 53-87.
- [14] LIU J, DU X Q, CUI J H, et al. Task-oriented intelligent networking architecture for the space-air-ground-aqua integrated network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(6): 5345-5358.
- [15] SHANG B D, YI Y, LIU L J. Computing over space-air-ground integrated networks: challenges and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(4): 302-309.
- [16] DAUREMBEKOVA A, SCHOTTEN H D. Opportunities and limitations of space-air-ground integrated network in 6G systems[C]//*Proceedings of 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-7.
- [17] 管莹莹, 宋静, 宋清洋, 等. 空天地海一体化网络切片研究综述[J]. *移动通信*, 2022, 46(10):20-25.
- GUAN Y Y, SONG J, SONG Q Y, et al. Space-air-ground-sea integrated network slicing: a survey[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(10):20-25.
- [18] YOU X, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64: 1-74.
- [19] AHMED T, ALLEG A, FERRUS R, et al. On-demand network slicing using SDN/NFV-enabled satellite ground segment systems[C]//*Proceedings of 2018 4th IEEE conference on network softwarization and workshops (NetSoft)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 242-246.
- [20] 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.
- [21] KAK A, AKYILDIZ I F. Towards automatic network slicing for the internet of space things[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(1): 392-412.
- [22] CAO H T, SHEN S G, GUO Y A, et al. Resource allocation and orchestration of slicing services in softwarized space-aerial-ground integrated networks[C]//*Proceedings of 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 769-774.
- [23] ZHANG S, QUAN W, LI J L, et al. Air-ground integrated vehicular network slicing with content pushing and caching[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 2114-2127.
- [24] LYU F, YANG P, WU H Q, et al. Service-oriented dynamic resource slicing and optimization for space-air-ground integrated vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(7): 7469-7483.
- [25] FENG B H, LI G L, LI G W, et al. Efficient mappings of service function chains at terrestrial-satellite hybrid cloud networks[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [26] WANG G C, ZHOU S, ZHANG S, et al. SFC-based service provisioning for reconfigurable space-air-ground integrated networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(7): 1478-1489.
- [27] ZHANG P Y, YANG P, KUMAR N, et al. Space-air-ground integrated network resource allocation based on service function chain[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(7): 7730-7738.
- [28] LIU R Q, LI R Y N, DIRENZO M, et al. A vision and an evolutionary framework for 6G: scenarios, capabilities and enablers[J]. *arXiv preprint arXiv:2305.13887*, 2023.
- [29] WU W, ZHOU C H, LI M S, et al. AI-native network slicing for 6G networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(1): 96-103.



- [30] RODRIGUES T K, KATO N. Network slicing with centralized and distributed reinforcement learning for combined satellite/ground networks in a 6G environment[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(1): 104-110.
- [31] HU Y S, SHI N X, LU L, et al. Space-air-ground integrated heterogeneous network slicing with native intelligence[C]//*Proceedings of 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [32] SEID A M, ABISHU H N, ERBAD A, et al. Hierarchical DRL-empowered network slicing in space-air-ground networks[C]//*Proceedings of 2023 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 4680-4685.
- [33] ZHOU G R, ZHAO L Q, ZHENG G, et al. Multi-objective optimization of space-air-ground integrated network slicing relying on a pair of central and distributed learning algorithms[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 11(5): 8327-8344.
- [34] HU Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing—a key technology towards 5G[J]. *ETSI White Paper*, 2015, 11(11): 1-16.
- [35] 雷波, 刘增义, 王旭亮, 等. 基于云、网、边融合的边缘计算新方案: 算力网络[J]. *电信科学*, 2019, 35(9): 44-51.
- LEI B, LIU Z Y, WANG X L, et al. Computing network: a new multi-access edge computing[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(9): 44-51.
- [36] 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*, 2021, 9(8): 5742-5754.
- [37] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 70-76.
- [38] ZHOU F, WU Y, HU R Q, et al. Computation rate maximization in UAV-enabled wireless-powered mobile-edge computing systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 1927-1941.
- [39] CHENG N, XU W C, SHI W S, et al. Air-ground integrated mobile edge networks: architecture, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(8): 26-32.
- [40] CHEN W H, LIU B C, HUANG H W, et al. When UAV swarm meets edge-cloud computing: the QoS perspective[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(2): 36-43.
- [41] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N. Satellite terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 224-231.
- [42] 吴健, 贾敏, 郭庆. 基于移动边缘计算的空天地一体化网络架构[J]. *天地一体化信息网络*, 2024, 5(1): 24-31.
- WU J, JIA M, GUO Q. Space-air-ground integrated network architecture based on mobile edge computing[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, 5(1): 24-31.
- [43] GUO Y K, GU S S, ZHANG Q Y, et al. A coded distributed computing framework for task offloading from multi-UAV to edge servers[C]//*Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [44] CHEN Y L, AI B, NIU Y, et al. Energy-constrained computation offloading in space-air-ground integrated networks using distributionally robust optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(11): 12113-12125.
- [45] LIU J Y, ZHAO X W, QIN P, et al. Joint dynamic task offloading and resource scheduling for WPT enabled space-air-ground power internet of things[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, 9(2): 660-677.
- [46] QIN P, FU Y, ZHAO X W, et al. Optimal task offloading and resource allocation for C-NOMA heterogeneous air-ground integrated power internet of things networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(11): 9276-9292.
- [47] LI H R, WU S H, JIAO J, et al. Energy-efficient task offloading of edge-aided maritime UAV systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 72(1): 1116-1126.
- [48] ZHOU C H, WU W, HE H L, et al. Deep reinforcement learning for delay-oriented IoT task scheduling in SAGIN[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 20(2): 911-925.
- [49] WANG Z, ZHOU Z Y, ZHANG H, et al. AI-based cloud-edge-device collaboration in 6G space-air-ground integrated power IoT[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(1): 16-23.
- [50] ZHAO N, YE Z Y, PEI Y Y, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for task offloading in UAV-assisted mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 6949-6960.
- [51] LYU Y F, LIU Z, FAN R F, et al. Optimal computation offloading in collaborative LEO-IoT enabled MEC: a multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022, 7(2): 996-1011.
- [52] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告[R]. 2023.
- China Institute of Communications. Frontier report for integrated communication, sensing and computing[R]. 2023.
- [53] 吴晓文, 焦侦丰, 刘冰, 等. 面向6G的卫星通感一体化[J]. *移动通信*, 2022, 46(10): 2-11.
- WU X W, JIAO Z F, LIU B, et al. Satellite integrated sensing

- and communication for 6G[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 2-11.
- [54] WANG M, CHEN P, CAO Z X, et al. Reinforcement learning-based UAVs resource allocation for integrated sensing and communication (ISAC) system[J]. Electronics, 2022, 11(3): 441.
- [55] YOU L, QIANG X Y, TSINOS C G, et al. Beam squint-aware integrated sensing and communications for hybrid massive MIMO LEO satellite systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(10): 2994-3009.
- [56] WANG Y J, WANG M Z, MENG L K, et al. New crowd sensing computing in space-air-ground integrated networks[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 143-149.
- [57] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4):1-11.
- YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4):1-11.
- [58] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的 6G 通感算融合架构、技术与挑战[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 12-20.
- JING Y, JIANG C X, ZHAN Y F. 6G communication, sensing and computing integration for satellite communication: architectures, technologies and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 12-20.
- [59] 廖佳佳, 向路平, 胡杰, 等. 基于无人机的 6G 通感算研究概述[J]. 移动通信, 2023, 47(3): 92-100.
- LIAO J J, XIANG L P, HU J, et al. An overview of UAV-based communication-sensing-computing in 6G communication networks[J]. Mobile Communications, 2023, 47(3): 92-100.
- [60] 姜大洁, 袁雁南, 周通, 等. 面向 6G 的通感算融合服务、系统架构与关键技术[J]. 移动通信, 2023, 47(3): 2-13.
- JIANG D J, YUAN Y N, ZHOU T, et al. Services, system architecture and key technologies for 6G integrated communication, sensing and computing[J]. Mobile Communications, 2023, 47(3): 2-13.

[作者简介]



范珂欣 (1998-), 女, 哈尔滨工业大学(深圳) 博士生, 主要研究方向为空天地海一体化网络、任务调度和资源管理。



安丽荣 (1977-), 女, 哈尔滨工业大学(深圳) 广东省空天通信与网络技术重点实验室高级实验师, 主要研究方向为星地通信系统和卫星路由。



张钦宇 (1972-), 男, 博士, 哈尔滨工业大学(深圳) 教授、博士生导师, 主要研究方向为空天地海一体化网络、无线通信系统和深空通信。