

## 面向6G全域融合的智能接入关键技术综述

王雪 孟姝宇 钱志鸿\*  
(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

**摘要:** 针对空天地一体化接入网络, 该文在总结相关研究的基础上, 阐述了未来空天地一体化接入架构的关键技术, 分析了空口技术、多址技术、干扰分析、计算技术和人工智能(AI)技术等几个重点方向的研究进展, 提出了多种接入形式并存的灵活性网络架构。针对6G全域融合网络接入的重点研究问题, 结合用户的服务质量需求, 构建了一体化AI赋能架构, 提出了大规模混合多址接入及弹性资源适配策略。基于网络架构立体化、网络协同传输、一体化网络资源管理、未来空天地接入技术以及网络协同计算等未来重点研究方向进行了讨论和展望。

**关键词:** 6G; 网络架构; 接入技术; 空天地一体化接入网络; 空口技术

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)YU-0001-19

DOI: [10.11999/JEIT231224](https://doi.org/10.11999/JEIT231224)

## An Overview of Key Technologies for Intelligent Access Toward 6G Full-domain Convergence

WANG Xue MENG Shuyu QIAN Zhihong

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Considering the integrated air-to-ground access network, based on summarizing the relevant research, the key technologies of future air-to-ground integrated access architecture are elaborated, and the research progress in several key directions, such as air-port technology, multiple-access technology, interference analysis, computation technology, and Artificial Intelligence (AI) technology are analyzed, and a flexible network architecture with the coexistence of multiple access forms is proposed. Considering the key research problems of the access architecture in the current air-to-ground integrated network, an integrated AI-enabled architecture is constructed by combining the user's quality of service demand, and the large-scale hybrid multiple access and flexible resource adaptation strategy are proposed. Based on the future key research directions of network architecture stereoscopic, network cooperative transmission, integrated network resource management, future air-to-ground access technology, and network cooperative computation are discussed and outlooked.

**Key words:** 6G; Network infrastructure; Access technology; Integrated air-to-ground access network; Air-port technology

### 1 引言

在强调众连接和智能化的未来6G移动通信系统中, 适用于“智联万物”的通信技术正日益受到人们的关注<sup>[1]</sup>。当前的无线通信系统具有异构性、低延迟、高吞吐量和高计算能力的特点, 支持大规模并发连接和多样化服务<sup>[2]</sup>, 但据国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)统

计, 截至2022年, 全球约 $4.9 \times 10^9$ 使用互联网的人口中仍然有约 $2.7 \times 10^9$ 人口受限于地域、经济条件等多方面因素, 未接入互联网<sup>[3]</sup>。6G将扩展到太空、天空、陆地等自然空间, 实现全域智能的“泛在连接”。并通过多种接入方式协同传输、对多个系统资源统一管理, 提高网络的整体资源利用效率<sup>[4]</sup>。

近年来我国卫星应用行业快速发展, 其中Starlink星链的颠覆性技术和服务模式正在改变人们对卫星上网的认知和期望。卫星互联网可以填补我国偏远地区互联网接入的空白, 提供高速稳定的互联网服务, 促进农村地区和老少边穷偏远地区的数字经济发展, 为航空、航天、海洋等领域提供通信保障, 提高工作效率和安全性。为了实现低时延、高带

收稿日期: 2023-11-03; 改回日期: 2024-01-24; 网络出版: 2024-01-31

\*通信作者: 钱志鸿 [dr.qzh@163.com](mailto:dr.qzh@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金(62171198)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62171198)

宽、全球覆盖的要求,低轨卫星星座逐渐成为研究热点。它与成熟的高轨卫星星座、中轨卫星星座共同组成了天基网络的基础设施<sup>[5]</sup>。卫星通信相比于地面无线通信系统,最主要的特点是信号传输距离相对较远,因此非常依赖视距传输。同时,卫星网络面临着拓扑复杂、传输时延大以及部署成本高等问题。可以看出,仅仅依靠卫星网络提供通信服务的稳定性明显低于目前已经成熟的商用移动通信网络,成熟的商用移动通信网络基本格局是卫星移动通信和地面移动通信在一定程度上互相补充。空天地一体化网络(Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN)<sup>[6]</sup>通过结合卫星系统、空中无线电设备和地面网络<sup>[7]</sup>的优势,预计将为全球人事物提供无缝、大规模的连接和高速率的宽带接入,是未来移动通信系统的发展趋势。SAGIN具有大量的网络节点,如卫星、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、高空平台和地面基站,能够提供每秒千兆比特的连接,规模远远超出了其他网络群<sup>[8]</sup>。空天地全域融合网络建设对我国具有重大意义,为满足陆上重要经济带、海外热点地区等信息服务需求,实现“一带一路”周边地区和“四海两边两洋”全部覆盖,快速发展全域一体化网络技术,形成合理且完善的网络体系,在技术和资源等方面抢占先机。空天地一体网络架构被ITU列为7大关键网络需求之一,是6G的核心方向<sup>[9]</sup>。相较于单一层面网络,SAGIN立体式网络结构可以突破海拔、地形等条件的限制,满足全域全方位用户的接入需求,支持人机物大跨度、多样化的业务特性,提供个性

化的通信服务。显然,网络接入体量、终端性能需求以及实现难度都呈现倍率级的增长。为此,国内外研究机构与学者都在积极拓展研究维度,我国“十四五”信息化规划已明确将其列入应用示范工程建设计划中,低轨通信星座建设也在加速推进,图1为本文的研究背景。随着6G愿景逐渐清晰,SAGIN接入的空口、多址以及计算等关键技术将成为持久的研究主题<sup>[10]</sup>。

未来全域融合的通信网络接入将立足于空天地多种异构接入场景和多维立体组网架构,采用统一的空口技术和核心网架构,实现海量用户无感知、极简的泛在接入,涉及到从网络架构到多个协议层的关键技术,其中包括接入协议体系、空口设计、多址接入、传输技术等。目前SAGIN面临网络动态性高、结构复杂、资源约束等问题,需要研究者在异构、多维度的SAGIN中,针对不同网络的个性化特点,对干扰抑制、覆盖范围、资源配置等问题进行研究,以满足用户多样化的服务需求。近年来,面向SAGIN的接入架构已经开始布设,但技术层面远没有达到可以应对未来海量接入和高流量密度所要求的水平。令人欣慰的是,国内外学者针对未来SAGIN接入技术的研究已经取得了具有前瞻性的成果。

## 2 研究现状

随着接入终端数量以及新业务类型的急剧增加,多域融合式网络架构、接入技术等方面都在飞速发展,本节总结空天地一体化网络接入关键

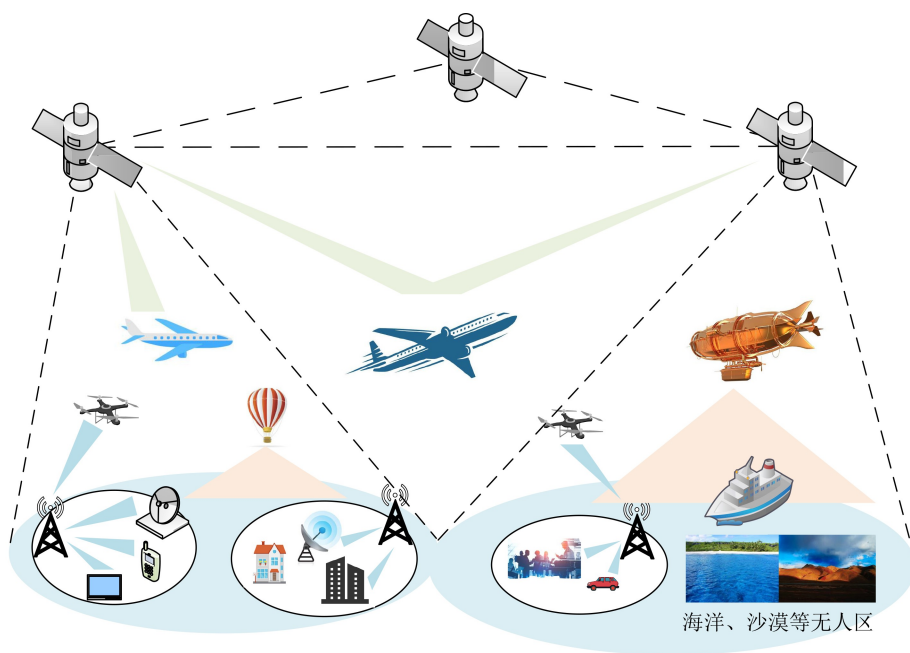


图1 研究背景

技术及发展现状，针对接入技术从空口技术、多址技术、干扰问题进行了分析。最后，总结了空天地一体化接入架构、计算以及与AI技术的融合发展现状。

### 2.1 空天地一体化空口技术

面向6G的通信网络将卫星通信作为地面移动通信网络的重要补充和延伸<sup>[11]</sup>，实现基站上星、同轨道卫星或不同轨道卫星之间的星间链路(Inter Satellite Link, ISL)，从而支持星间以及卫星与地面之间的协作传输，显著提升网络的接入性能和立体覆盖水平。在SAGIN接入架构中，“空中接口”定义了终端设备与网络设备之间电波链接的技术规范，保证了通信的可靠性。接下来将探讨传统的地面移动通信网络和星通信网络的空口接入协议。

在地面移动通信网络中，随机接入可确保用户成功接入网络。对于不同场景下的无线传输环境，采用的随机接入方式有所区别。3GPP标准已支持4步随机接入和两步随机接入过程<sup>[12]</sup>。4步随机接入过程虽然可保证用户接入时的可靠性，但需要用户与基站进行4轮信息互动，接入效率不高，而两步随机接入在一定程度上减少了传输时延和信令开销。由于卫星平台之间存在一定延迟且卫星链路在传输过程中有较大损耗，因此两步随机接入会大大影响系统性能。为提高系统容量和卫星的信道利用效率，业内已经开展了对算法的性能优化研究。目前，3GPP标准化正在讨论非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)的定时提前量(Time Advance, TA)补偿方式，其中包括根据用户位置和星历信息自动获取TA值，和基于网络侧指示获取TA值<sup>[13]</sup>。

在非地面移动通信网络中，基于卫星通信网络的随机接入是需要研究的关键技术之一，卫星通信网络中的接入方式有按需分配接入、最短距离优先接入和最长覆盖时间接入等<sup>[14]</sup>。在星地融合的空口

技术研究中，可变参数集的有效使用促进了星地融合系统的发展。可变参数集是指适用于卫星通信及蜂窝通信的空口技术参数，根据星地传输的不同使用场景，选取不同值的参数组成一个集合。可变参数集的设计是星地融合统一空口系统的核心，表1给出了主要的空口参数示例，不同业务按需匹配相对应的参数集，其中匹配规则中的约束条件包括当前业务要求的带宽、时延等指标以及当前网络所能提供的有效接入资源等<sup>[15]</sup>。对于用户而言，采用可变参数集后直接通过配置不同的空口参数接入网络，进行统一的资源配置和网络管理，而不需区分卫星或地面网络。可以实现星地传输无缝切换，真正做到无感知的星地网络一体化融合<sup>[16]</sup>，图2为星地统一空口设计思路。

目前SAGIN的业务逐渐发展至更高的通信频段，为了满足计算效率需求，在空中计算中引入了多天线系统，以实现多个函数同时计算且多发多收的目的<sup>[17]</sup>。引入空中计算后，SAGIN可以在物理层空口实现<sup>[18]</sup>。针对多天线系统的研究主要在于物理层波束设计，现有研究集中于星载相控阵多波束天线总体设计、多波束形成网络集成以及波束灵活赋型等关键技术。在SAGIN中，物理层波束设计可以促进频谱重用、干扰缓解、覆盖增强和物理层安全，还可以处理感知信息以协助通信，提升6G全域一体化网络的感知能力。

未来的SAGIN接入网络需要为用户提供无感知一致性服务，这需要在空口系统上对星地进行深度系统整合。不难看出，统一空口技术是解决星地融合、实现泛在互联的关键技术，是实现“万物互联”、“随遇而入”、“全球无缝覆盖”的重要途径。

### 2.2 空天地一体化多址接入技术

面向未来广域智连与全球随遇接入等迫切需求，SAGIN面临着越来越多的挑战，从而催生出创新性的解决方案。SAGIN接入架构由天基、空

表1 空口可变参数集的主要参数

主要参数	参考范围	备注
信道带宽	180 kHz~1 GHz	适应物联网、带宽传输等多类型业务需求
调制波形	循环前缀-正交频分复用(Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, CP-OFDM)	单载波波形/OFDM
编码方式	Polar码、卷积码等	可支持其他类型编码
子载波间隔	15 kHz, 60 kHz等	提供多种子载波间隔
多址接入方式	正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), 图样分割非正交多址接入(Pattern Division Multiple Access, PDMA)等	根据不同场景选取不同多址接入方式
多波束协同传输	支持多场景波束联合传输	发挥多波束联合分集增益, 提高系统容量
随机接入方式	随遇、极简接入	根据业务需求、网络状态选择接入
切换方式	极智切换	支持基于位置、终端需求的切换方式



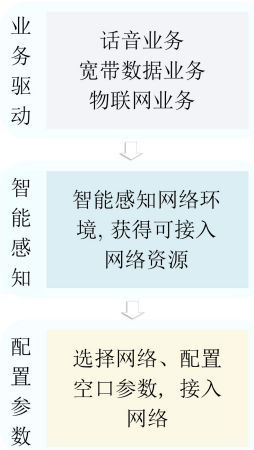


图2 星地统一空口设计思路

基以及地基网络组成,在该架构中引入灵活、多样的多址技术可以保证用户获得高质量服务,缓解网络拥塞,降低时延。在SAGIN接入架构中,多址技术的演进并非一蹴而就,各种技术相互补充且在通信覆盖范围重叠的情况下共存。本节将介绍SAGIN中常用的以及潜在的多址接入方法,并分析各类方法的特性。

早期的卫星通信陆续引入了频分多址、时分多址<sup>[19,20]</sup>、码分多址和空分多址<sup>[21]</sup>等多址接入技术。面对5G提升5~15倍频谱效率的业务速率需求,正交频率资源并不能完全满足接入容量需求,业内学者提出了非正交多址接入技术。为了解决频谱资源利用的困境,在SAGIN接入架构中引入了非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术,该技术可在同一资源块中为不同用户提供服务,以提供更高的频谱效率<sup>[22]</sup>。NOMA的核心思想是利用现有资源通过不同的功率来区分并接入尽可能多的用户,在接收端通过串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)接收机<sup>[23]</sup>消除多址干扰来实现信号检测。稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)和多用户共享接入(Multi-User Shared Access, MUSA)也是具有潜力的非正交多址技术,在SCMA中,不同用户的信息位直接映射到稀疏的多维码字上,由于精心构建的代码本,可以获得更高的频谱效率和可靠性<sup>[24]</sup>。此外,有研究表明,SCMA能够在没有基站状态信息的情况下提高整体链路吞吐量,并提供更灵活的链路自适应性<sup>[25]</sup>。这些特性使SCMA成为应用于空天地一体化过载网络的一项潜力技术。除上述多址接入技术外,速率分拆多址技术(Rate Splitting Multiple Access, RSMA)作为一种新型的、通用的、强大的框架出现,用于设计和优化未来无线网络的非正交传输、多址和干扰管

理策略<sup>[26]</sup>。RSMA通过对用户消息的拆分,以及多用户解码的通用消息和相应用户解码的私有消息的非正交传输,可以使用调和完全解码干扰作为其干扰管理策略。与5G中使用的传统干扰管理策略相比,RSMA能够增强频谱效率、能源效率、覆盖范围、用户公平性、可靠性和服务质量(Quality of Service, QoS),以应对广泛的网络负载(包括负载不足和过载情况)和用户通道条件,并且它对发射机上的不完全信道状态信息具有较高的鲁棒性,较低的反馈开销和复杂性。除上述非正交多址接入技术外,各通信公司均提出了接入方案,主要包括LG公司提出的非正交编码多址接入、IDCC公司提出的交织域多址接入、SAMSUNG公司提出的交织网多址接入、Ericsson提出的韦尔奇界扩展多址接入、NTT DOCOMO公司提出的用户特定广义韦尔奇界多址接入、Nokia公司提出的非正交编码接入、大唐公司提出的图样分割多址接入技术及Intel公司提出的低码率扩频非正交多址等。目前针对非正交多址接入技术的研究呈现百花齐放的状态,业内研究者也将在此领域持续深入地研究。

由于现有多址技术已趋于饱和,而电磁波本身的正交性赋予了多址技术更多研究空间,尤其是随着通信继续向高频段发展以及大规模天线阵列的兴起,近场通信已成为新的研究热点。清华大学戴凌龙团队提出距分多址(Location Division Multiple Access, LDMA)的思想,创新性地对电磁波进行更精确的球面波近似,研究发现了近场波束向量的聚焦特性,并以此为理论基础实现距离域区分用户的可能性。LDMA的基本原理是利用近场电磁波波束的能量聚焦特性,为位于不同位置(角度、距离)的用户服务,充分利用距离域资源来区分用户,减少用户干扰,提高系统性能<sup>[27]</sup>。LDMA为使用空间资源区分用户,提升频谱效率提供了距离域这个新的维度,理论上可实现频谱效率以及系统容量的成倍增长。仿真结果验证了与空分多址相比,LDMA方案在近场通信中线性分布场景和均匀分布场景中,频谱效率有200%和50%的提高<sup>[28]</sup>。随着智能超表面(Reconfigurable Intelligence Surface, RIS)技术的发展,近场通信场景在极大程度地进行扩大,所以近场多址技术LDMA还有很多研究和应用的空间<sup>[29]</sup>,LDMA中针对毫米波多径信道的近似处理还有待进一步研究。在SAGIN接入架构中,远、近场协同通信保证跨域度、大尺度密集接入成为主导,各种多址接入技术的相互补充和融合将对进一步扩大SAGIN接入架构的覆盖区域,增加系统容量,提高频谱利用率具有重要意义。

随着3GPP Rel-16<sup>[30]</sup>的冻结，5G技术已经进入了一个相对平稳的发展阶段。目前，学术界和工业界都在续力实现6G愿景，攻关潜在技术。机器型通信(Machine-Type Communication, MTC)是5G~6G发展的一个关键场景，与5G相比，6G MTC网络提出了非常具有挑战性的关键性能指标。在短包传输设置下，高连接密度和高连接可靠性的要求将给现有的多址技术带来挑战，因此，机器类通信多址接入技术需要从传输模型设计和资源管理策略方面取得突破，以满足6G未来网络的更高标准。针对上述需求，Li等人<sup>[31]</sup>提出了无源多址接入技术(Unsourced Multiple Access, UMA)，UMA将无授权访问更改为不协调访问，协调中心和资源分配过程将被删除，所有用户都使用一个公共码本随机发送他们的数据包。在信道中随机发生碰撞，碰撞只影响数据包是否被正确解码，而接收方忽略它们的源。UMA在面向6G的全域融合接入架构中具有极高的发展前景，引起了业内学者的广泛关注。

### 2.3 空地一体化干扰分析

无线网络接入的本质在于协调和抑制无线干扰，达到提升频谱利用率<sup>[1]</sup>、逼近网络性能极限的目的，其中传播环境特性和链路间干扰关系是影响无线干扰的核心因素。SAGIN中包含非地面网络和地面网络。地面网络中的干扰是无线电接入网中最常见的问题之一，也是蜂窝网络中影响性能和服务质量的主要问题，干扰可以由来自相邻小区的相同频率呼叫，或对同一小区/相邻小区中的相邻信道呼叫引起。因此，地面网络干扰通常可以分为小区内干扰和小区间干扰进行研究和和管理<sup>[32]</sup>。在地面网络中，用户覆盖范围有限，而目前网络业务激增，地面网络资源重复使用频率的增加导致了复杂且多样的干扰引入，地面用户的服务质量受到了业内人员的关注。在地面网络传输链路中，路径损失、阴影效应和衰落等现象均会导致信号质量下降，干扰对齐方式和有效资源管理的研究会缓解地面网络的干扰。目前常用的干扰分析方法有Matern簇聚类过程、泊松点建模方法、随机几何分析等<sup>[33-35]</sup>，利用上述方法构建接近真实通信场景的干扰环境，再有针对性地进行干扰管理和资源分配。非地面网络传输距离远、覆盖范围大，具有极大的时空尺寸，从而导致电磁波频域和空域的传播具有时变性，甚至呈现非平稳性。在网络结构方面，非地面网络干扰关系结构复杂多样，机械性地沿用地面网络接入理论与方法将导致无线干扰量化不充分、接入能力受限、资源利用率不足、通信切换不

畅等问题。非地面网络和地面网络的网络拓扑和多址方式不同，导致链路间干扰关系模式不同。空地一体化网络的传输特性和链路间干扰关系是影响网络的传输容量以及用户的传输能力的主要因素。

对卫星业务来说，在利用空间频率复用技术来提高系统频谱利用率的过程当中，天线方向图存在旁瓣效应导致两波束不能完全分开，导致信号之间存在共信道干扰<sup>[36]</sup>，当近地轨道(Low Earth Orbit, LEO)星座卫星系统与地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)星座卫星系统之间共享频谱时，会出现不同系统之间波束相互交叠的现象，加剧共信道干扰问题，主要源于以下几个方面：

- (1)对于极轨道卫星通信系统，卫星在地球两极区域内出现严重的星间干扰；
- (2)同一颗卫星相邻点波束间干扰程度不一，该现象在点波束边缘区域表现尤为突出；
- (3)会发生两系统交叠覆盖在同一地区或某一个系统发射天线的主瓣与另一个系统接收天线对齐的情况，这时存在系统间干扰。

与地面移动通信系统相比较，卫星通信链路的传播距离更长，损耗更高，所以考虑干扰时一般只考虑某些卫星用户距离地面移动通信设施较近的情况下产生的干扰<sup>[37]</sup>。干扰情形参见图3，其干扰情况包括卫星移动通信系统中地面移动通信基站和终端之间上行链路对移动通信卫星的干扰和地面移动通信基站下行链路对卫星移动终端的干扰。

卫星通信系统受干扰及环境影响因素较多，考虑卫星间干扰通常使用自由空间传输模型进行计算，同时还要考虑来自大气的损耗<sup>[38]</sup>，例如自由空间损耗，大气损耗以及雨衰。

关于卫星间干扰的研究，Deng等人<sup>[39]</sup>考虑了

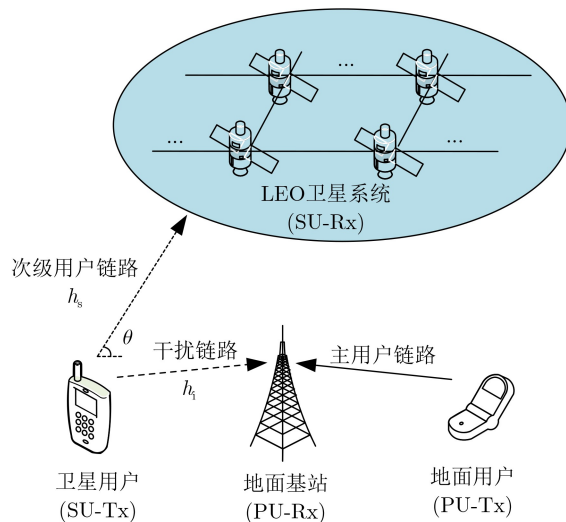


图3 卫星对地面系统产生干扰



一个基于LEO的超密集地面卫星网络,其中地面用户可以通过LEO辅助的回程访问该网络。其中分析了每个用户终端到卫星的干扰,目标是在满足终端回程要求的同时,尽量减少星座中的卫星数量。算法在推导出每个终端的平均总回程能力的基础上,提出了一种3维星座优化算法,以最小化星座中的卫星数量,可实现任何给定覆盖率要求下的性能优化。

在SAGIN接入架构中针对各种关键技术以及资源分配算法的研究十分重要,对干扰的分析也不可或缺,分析干扰不仅能够规避网络中可能出现的故障,还可以在资源分配前对系统进行整体把控,有利于资源合理分配和利用。

#### 2.4 空天地一体化计算技术

B5G/6G通信网络涉及到较大的计算与通信数据量,实现计算与网络的深度融合至关重要<sup>[40]</sup>,通过这种融合,SAGIN和业务可以作为一个单一的集成系统共同优化。利用空中和空间网络提供的计算能力,可以处理SAGIN中日益增长的业务量。为了支持这些分布式系统,通信和计算的互操作融合必不可少。例如,数据通信需要路径计算,其执行取决于实现策略和服务器端处理,其中多接入边缘计算(Multi-access Edge Computing, MEC)与SAGIN的融合得到了业内研究人员的广泛关注。

与地面网络中的多接入边缘计算服务器部署方式相比,在空天地一体化网络中,多接入边缘计算拥有更多的应用场景。通过将多接入边缘计算服务器配置到低轨卫星上,有效节省星地链路间流量数据传输带宽。另外,海上作业及边远山区无陆地网络通讯设施支持的使用者,可将计算任务直接卸载至低轨卫星进行处理。文献<sup>[41]</sup>使用动态网络虚拟化技术来整合LEO卫星覆盖范围内的计算资源,以最小化用户感知时延和系统能耗为目标提出了一种卫星边缘计算场景下的协同计算卸载方法。文献<sup>[42]</sup>提出了一个基于软件定义网络(Software-Defined Networking, SDN)的卫星-地面网络框架来动态地管理和协调网络、缓存和计算资源,并提出一种基于深度Q学习资源分配优化算法。

由于UAV具有高移动性和易于部署的优势,多接入边缘计算技术使能的UAV融合网络架构因具有低时延和低传输能耗的特点而备受关注<sup>[43]</sup>。通过应用多接入边缘计算技术,在高空无人机平台的边沿为其提供一个类似于云端服务器的计算能力,使其能够将复杂的计算任务迁移至高空无人机平台。海洋通信系统的飞速发展使得其在能耗、传输带宽、计算延迟等方面面临着巨大的挑战。为了给不同需求的用户提供计算卸载服务,文献<sup>[44]</sup>提出

了一个具有边缘云和中心云计算功能的SAGIN融合网络架构,从而为海事服务提供灵活的混合计算服务。文献<sup>[45]</sup>提出了一种基于UAV微云的多接入边缘计算机制,无人机具备运算能力,可以计算用户卸载的计算任务。为了最大限度地减低系统总能耗,对UAV航迹和资源分配进行了联合优化。文献<sup>[46]</sup>提出了一个SAGIN边缘/云计算架构。在此架构中,无人机提供边缘计算的功能,而卫星则类似于云计算。首先,研究UAV边缘服务器上多个虚拟机的协同计算资源分配与任务调度机制,实现对多个虚拟机的高效资源分配。其次,针对SAGIN中的计算迁移问题,设计基于深度学习的无人机运动路径迁移算法,实现无人机运动轨迹的动态学习与卸载策略优化。除上述研究外,也有大量学者在高空平台-MEC网络架构下为用户提供卸载等服务<sup>[47,48]</sup>。

将多接入边缘计算技术应用于SAGIN接入网,其优点在于降低了时延、缓存以及节约了回传带宽,可以有效解决大量的上行链路业务所带来的延迟增大的问题,同时减少地面和卫星之间的非必要通讯交互。在用户发出内容请求的同时,可以迅速从多接入边缘计算服务器缓存中获得所需内容,既提高了用户的使用体验,又减轻了上行链路的数据传输负荷。

#### 2.5 空天地一体化AI技术

随着B5G发展和6G时代的到来,基于AI技术、大数据、云计算、MEC等,卫星互联网的发展正趋向于智能化。AI核心技术包括机器学习(Machine Learning, ML)、计算机视觉(Computer Vision, CV)、自然语言处理(Natural Language Processing, NLP)、深度学习(Deeping Learning, DL)等。经典ML算法包括决策树、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、K-近邻(K Nearest Neighbor, KNN)、朴素贝叶斯等;CV技术涵盖图像处理与识别、模式识别等;NLP的核心任务包含语音识别、语义分析及文本分类等;DL利用多层神经网络学习并执行任务,算法主要包括生成对抗网络、卷积神经网络、循环神经网络和强化学习等。

在星地互联通信系统不断发展的形势下,AI技术在SAGIN中的应用可以应对不断增加的系统维度与决策复杂度,在组织与管理上实现全域一体化智能运维<sup>[49]</sup>。在卫星通信领域中,AI技术的应用主要涉及波束跳频、资源管理、网络流量预测、信道建模和干扰管理等,在通信数据传输、星上操作以及安全监控等方面发挥重要作用。文献<sup>[50]</sup>提出AI赋能的6G卫星通信网络总体架构、接入网及核心网架构,其中网络接入架构如图4所示。

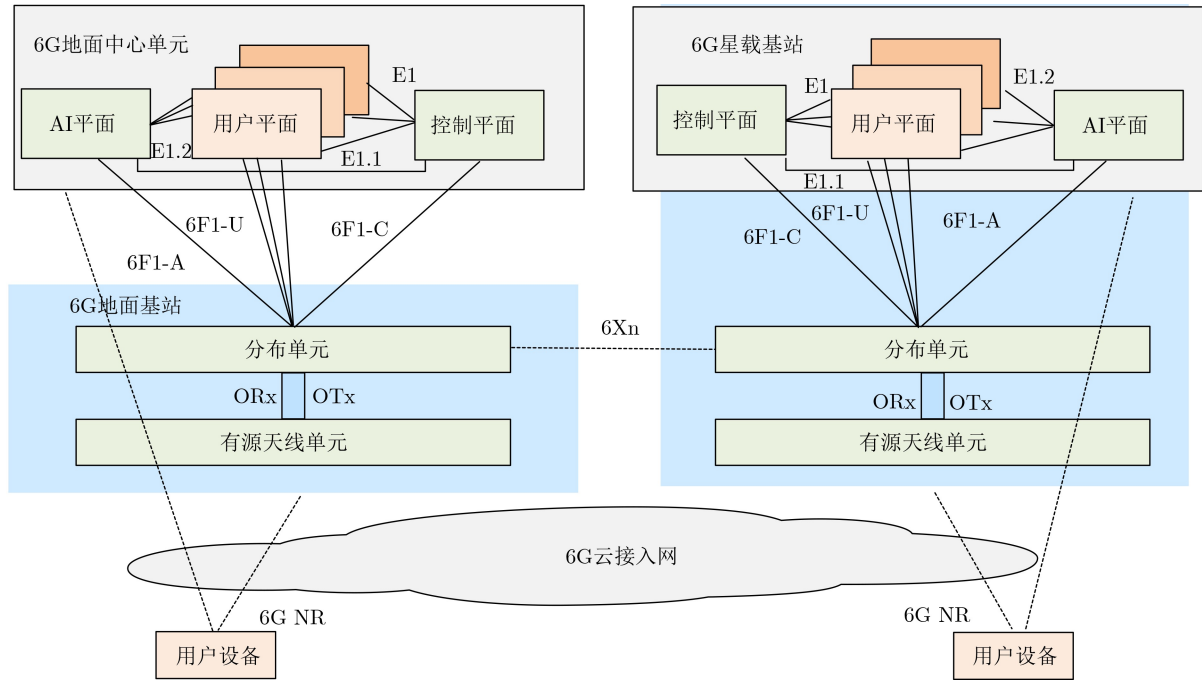


图 4 6G卫星通信网络接入架构

将AI技术应用于SAGIN接入架构中，能够保障系统容量的弹性适配以及天地异构网络的智能自我修复与重构。整体网络接入架构实现高度的弹性与灵活性，并实现智能化，但是在架构的具体实现上，还存在诸多挑战。

文献[51]将AI技术应用到多层卫星通信过程中，通过调整卫星地球站天线的指向优化天线角度，实现系统接入量的增加。考虑卫星通信系统需适应不同终端需求，提出了一种基于AI的快速天线指向算法。通过建立实验平台，将传统天线搜索算法Auto-Acquire算法作为基准进行验证。文献[52]基于卫星光电效应的应用，通过表面充电研究了其为航天器带来的影响，具体包括性能、关键测量及不同环境下的光发射。采用AI算法预测了卫星在表面充电时通信的可行性，使用ML检测周围环境，实现对太阳能充电电池的控制。

人工智能作为支撑先进计算技术的智力支柱，由于其在动态计算环境中实现智能过程的能力，越来越受到人们的关注。特别是，由于SAGIN需要处理的数据业务量不断增加，地、空、天之间传输的数据量正在迅速扩大，使用传统技术处理大量数据不再合适，而深度学习算法能够有效地处理这种规模的高维数据。因此，深度学习技术已被广泛用于为各种网络服务提供大数据分析，包括地面网络监控和管理[53]。在现实世界的卫星通信业务中实施AI-based程序的潜力总结于文献[54]。深度学习技术的有效性在相关自动化操作中已经得到了验证，表2总结了近3年AI技术在SAGIN中的研究近况。

在多种人工智能解决方案中，Q学习、DQN和DDPG等强化学习算法能够通过学习网络过去的经验来训练网络，并根据当前网络条件动态分配资源，是新兴的解决方案。此外，在SAGIN接入架

表 2 AI技术研究现状

智能化内容/目标	AI方法	代表文献
卫星通信干扰感知	循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)	[55]
卫星通信智能干扰技术	强化学习(Reinforcement Learning, RL)	[56]
信道资源调度	智能水滴算法	[57]
卫星信道中信号失真问题	RL	[58]
多波束卫星资源分配	多目标强化和自适应神经网络	[59]
6G卫星通信网络	AI赋能技术	[60]
多层卫星通信	智能改进的深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)算法	[61]
多波束卫星动态资源分配	DRL	[62]

构中应用这些算法可以优化资源分配结果,从而为用户提供更好的网络性能。在该领域,Liu等人<sup>[63]</sup>提出了一种基于DQN的无人机协助移动终端用户的QoS保障算法。文献<sup>[64]</sup>中,DQN被用于提高卫星通信系统的资源利用率,该类研究也是AI技术在通信网络中应用的主体形式,在文献<sup>[65-67]</sup>中可以找到其他在SAGIN接入架构中利用强化学习优化资源分配问题的研究。目前SAGIN提供的计算资源有限,通过合理有效地引入人工智能,可以最大限度地利用现有资源,实现SAGIN高效、大容量接入的目的。

为了充分发挥AI技术的优势,提高智能SAGIN运行性能,研究人员要针对用户的个性化需求,对系统架构进行科学设计<sup>[68]</sup>,为实现网络流量的智能化管控创造良好的条件,确保智能SAGIN的持续、健康发展。智能SAGIN的发展和普及为在有限系统容量内提高接入量创造良好的条件,最大限度地提高用户的使用体验,在一定程度上解决了SAGIN的数据拥塞以及密集接入等问题。

### 3 面向6G的全域智能接入技术设想

#### 3.1 空天地一体化AI赋能架构

SAGIN与大数据、云计算、AI的深度融合在业界已经达成共识,未来AI技术将成为SAGIN的“大脑”。鉴于目前复杂且不兼容的网络环境,结合SAGIN需求和已有研究基础,未来或将提出极简的AI赋能SAGIN整体架构。SAGIN接入组网中,网络拓扑空间将从2维扩展至3维,构建全球地表及空域的无缝覆盖通信网络,满足海量通信业务的连续性需求。同时,天基与地基深度融合,网络连接涵盖星间、星地和地面通信,在AI赋能技术的智能协作下,保障了星地资源动态分配和天地异构网络智能自愈<sup>[50]</sup>。在未来的SAGIN中,需充分发挥天基和地基资源的优势和特点,展开AI赋能的SAGIN高动态接入网络技术研究,形成智能化全域接入方案。在SAGIN上增加AI赋能平面,将AI赋能技术始终贯穿整个网络平面,可以实现一体化网络智能化和服务业务智能化<sup>[69]</sup>,提高资源的利用效率。

随着6G全域一体化网络的发展,地面网络与非地面网络正在逐步演进融合,通信设备数量呈现爆发式增长,现有网络中存在接入效率低、时延难以保证、频谱短缺、频谱利用率低等问题,因此如何利用有限时频资源实现网络多维无感接入与系统容量提升,满足用户时延、能效等异质性服务质量需求,是一个高维度的复合难题。未来SAGIN接

入架构综合考虑地面网络与非地面网络不同维度特性,划分跨域与域内双向维度复用群组;开展混合多协议下基于组内网络和速率最大化的资源分配优化研究,基于大尺度空间多协议传输的属性与关联关系,在保证时延约束的基础上从系统能效最大化的角度来实现用户无感的高效接入。图5为SAGIN接入架构中基于多接入协议共存的AI赋能架构,其中无人机将叠加信息通过NOMA协议发送给多个蜂窝的基站,实现域间接入与传输;基站通过近距离LDMA协议保证密集接入,再通过NOMA技术协同空天地一体化非正交接入,拓展接入体量,提升频谱效率。考虑蜂窝网络中给定子区域内无人机辅助的上行通信,由无人机通过NOMA协议将混合叠加信息传输至地面基站。在地面下行链路的传输过程中,以其中一个蜂窝为例,基站将信息通过混合多协议传输发送给蜂窝中的用户。基站到近距离用户的信息传输使用LDMA协议完成,LDMA利用近场电磁波波束的能量聚焦特性,为位于不同位置(角度、距离)的用户服务,充分利用距离域的额外资源来区分用户,减少用户干扰,提高系统性能。在时分双工(Time Division Duplex, TDD) ELAA单蜂窝小区通信场景中,基站配备了大规模天线阵列,并且近距离用户均配备单个天线。LDMA能够有效利用近场光束的能量聚焦特性,为位于不同角度和不同距离的不同用户提供服务,以充分利用距离域中的额外资源来增加系统接入容量,提升系统性能。为了满足地面大规模机器类通信需求,在地基网络中引入无源多址接入<sup>[30]</sup>,满足了移动通信系统的发展趋势。它通过去除协调中心来提高效率,同时采用叠加编码方法设计无源码本,以应对增加的多用户干扰。

#### 3.2 协同多址接入技术

未来的空天地一体化网络愿景逐渐明晰,频谱资源的合理有效利用和绿色通信方向是研究的重中之重。基于此,该方案针对上述架构设计分布式域间求解架构与集中式域内优化算法,提出了基于异质组间资源块配置的分布式联邦学习求解架构,在该架构下基于绿色通信需求利用深度强化学习框架完成资源块内的功率资源分配优化,按用户需求合理分配SAGIN中的通信资源,达到充分利用网络资源、均衡网络性能与能量消耗和提高网络接入能力的作用。

首先引入基于联邦学习的分布式域间求解架构。联邦学习作为一种分布式机器学习框架,通常包含参与者与服务器两种实体。本方案将SAGIN中已经进行分组的各组用户作为参与者,并且每组



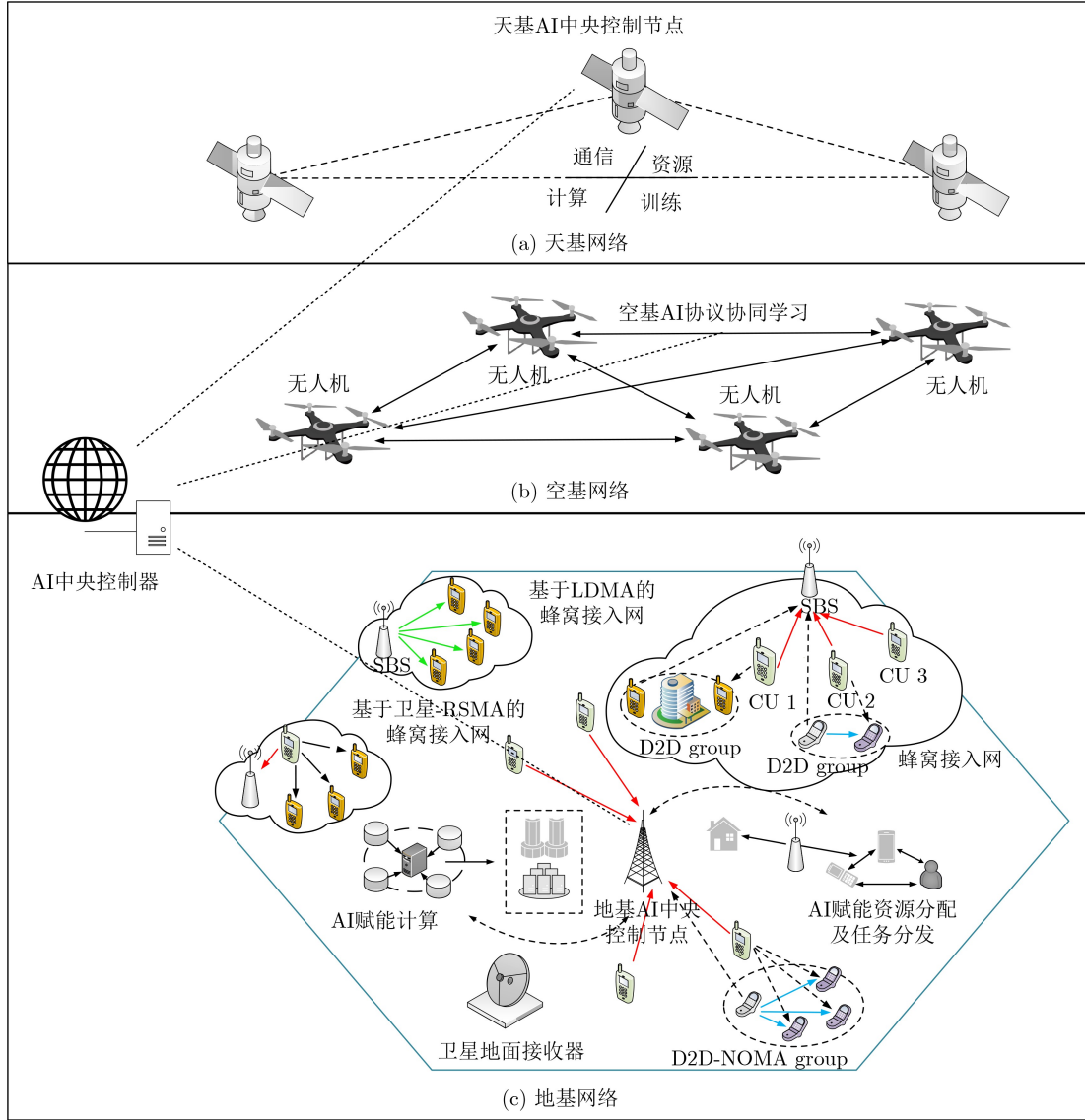


图5 SAGIN接入架构中的AI赋能应用

用户都拥有各自的数据集。在联邦学习架构下，各组用户通过本地训练更新模型参数，并上传参数至中央服务器聚合的方式协同训练模型。首先将联邦学习训练过程中系统有效性量化为  $E = \sum_{k=1}^K R_k$ 。其中， $R_k = a_k p_k$ ， $p_k$ 表示参与者 $k$ 本地训练的模型在中央服务器聚合时所占的权重。为了考虑异质组间用户对于业务的不同需求，引入参数 $\alpha$ 平衡用户的不同需求和各自所需达到的QoS，通过确定最佳 $\alpha$ 实现资源分配。在此框架下定义单个用户的效用为  $U_\alpha(x) = \begin{cases} \log_2(x), & \alpha = 1 \\ (1 - \alpha)^{-1} x^{1-\alpha}, & \alpha \geq 0, \alpha \neq 1 \end{cases}$ 。因此，可以在最大化效用总和  $\sum_{k=1}^K U_\alpha(a_k p_k)$  的约束下，得到权重 $p_k$ 的最优解  $p_k^{\text{opt}} = a_k^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} / \sum_{i=1}^K a_i^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}$ ，将其带入有效性公式可以得到  $E(\alpha) = \sum_{k=1}^K a_k^{\frac{1}{\alpha}} /$

$\sum_{k=1}^K a_k^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}$ 。综上所述，该方案在确保达到经典联邦学习同等有效性 $E_T$ 的基础上，实现SAGIN中异质组间资源块的有效配置。通过基于梯度的逼近算法求解有效性约束下的优化问题，得到最优 $\alpha$ 。

为了提升网络性能和大规模接入能力，该文进一步提出基于改进谱聚类 and P中心算法的用户分组策略，分析地面网络与非地面网络的时间、空间与频域维度特性，调整用户接入策略，保证接入时延。首先将用户划分为空中用户、卫星用户以及地面蜂窝用户。针对部分空中用户和蜂窝用户的个性化时延需求，根据信道关系构建用户权重关系图，利用基于改进谱聚类的正则表达式分组算法划分基站群组，从而减小用户间干扰；针对卫星用户，根据P中心算法调整小组成员，得到最佳分组，使系统的接入量最大化。基于所提出的SAGIN模型，

分析地面网络与非地面网络的维度特性,划分跨域与域内双向维度的复用群组。在大规模接入地面蜂窝网络中,面临频谱资源紧缺的问题,基站到用户之间会产生严重的同频干扰,基于图论构建地面网络链路间的干扰关系。为了降低基站簇内用户之间的干扰,同时满足不同用户的个性化时延需求,基于差异性信道干扰、用户个性化时延需求等特征建模,提出基于改进谱聚类的正则表达式分组算法,将分组问题转化为传统的空间聚类问题,然后运用改进的初始点优化的K-Means聚类方法实现快速分组,对基站簇内的用户进行组群划分,将相互影响较小的用户分为一组,为其分配同一资源块,不同用户组分配正交的资源块,避免产生干扰。通过建立聚合干扰关系表达式,对分组结果进行调整<sup>[70]</sup>。

与地面网络相比,卫星的信道、能量等资源十分有限,面对卫星用户地理位置分布范围广及流量需求分布不均匀的问题,基于卫星用户地理位置的用户分组,可以实现对卫星资源的合理分配和高效利用。由于卫星的一个波束难以覆盖所有的用户,因此在多波束卫星场景下,针对信道资源紧张、位置复杂等问题利用P中心算法,根据用户的地理位置对卫星用户进行分组,确定天基覆盖下的小组数目和分组方案,用最少的波束覆盖所有卫星用户,在不牺牲吞吐量的情况下缩减用户排队延迟<sup>[71]</sup>。

在智能应用不断普及的今天,算力、算法、数据将成为业务智能化的“铁三角”,未来SAGIN接入架构需要结合天基计算能力、星地协同AI算法框架和星上资源与处理能力,以及针对分布式学习、设计星上AI学习模型的星地协同AI算法架构;研究适配星计算能力的多级协同AI机制,结合地面站的大容量、强算力优势,基于海量数据设计深度强化学习模型。总之,AI是SAGIN的“大脑”,未来AI赋能的SAGIN,将构建高度弹性、灵活的智能网络。在未来的SAGIN中,通信环境复杂、通信协议不兼容等问题亟待解决。根据不同通信协议需求、组内用户干扰、用户数量等设计混合多址接入方案不仅能提升网络容量,还能有效提升用户的QoS。在未来SAGIN场景下,庞大的用户接入量、多元化的通信业务需求以及不断增加的网络场景与通信系统规模,所带来的能量消耗问题不可忽视,绿色通信的理念也逐渐成为研究中不可或缺的参考,在网络性能与能量消耗这两大关键目标中达到均衡成为了未来SAGIN发展的重点。上述基于AI赋能的SAGIN接入架构以及资源配置方案是对未来SAGIN接入架构的展望,而目前关于SAGIN的研究主要集中在单/双空间维度的关键技

术、计算功能偏弱的通信网络、卫星资源未被充分利用的一体化网络,不能完全解决未来空天地一体化资源高度融合发展面临的问题或瓶颈。未来SAGIN将在全球范围内实现计算协同的一体化网络,该文也将面向未来全域融合的复杂性特征,对关键技术及其发展给出预判。

## 4 展望

### 4.1 网络架构立体化

SAGIN实现网络融合能力的关键是高效无缝服务,即打破天地界限,实现一体化网络互通、资源共享、服务一致。SAGIN涵盖了天基网、空基网、地基网、Internet等多种不同时空跨度的异构网络<sup>[72]</sup>,以现有通信技术为基础,提供全天候、无缝、无死角、高效传输的网络服务,连接成一个立体的全覆盖网络空间,泛在密集接入,用户无缝连接,高效联合传输<sup>[1]</sup>。SAGIN中业务海量且多样,网络节点动态变化、广域发布,资源异构受限,如何有效地对系统资源进行分配,满足各类用户的需求已经成为SAGIN建设中需要解决的关键问题。目前针对SAGIN的跨域接入研究尚少,接入研究大都针对单一层面或者空地网络协同接入而展开,缺少大规模、异质、跨域接入的多址接入与一体化解决方案。为了从根本上提升网络容量,高效利用时频空等多址资源,这就需要一种融合的空天地一体化多址接入方式,以解决资源分配问题。

未来SAGIN中的卫星体量较大,卫星之间会产生一定程度的干扰,这需要研究多星协作或星地协作下的联合传输机制,以减少网络中的干扰,提升系统资源效率<sup>[73]</sup>。由于地面网络重复使用相同的频谱进行传输,频谱共享技术可以提高频谱效率。通过协同安全传输构建物理层安全,无需复杂的加密技术,即可增强用户的信息安全性,减少通信延迟<sup>[74]</sup>。

在SAGIN中,卫星和其他飞机(如UAV)的高机动性通常会导致频繁用户切换和动态网络拓扑,切换管理是保持业务连续性和满足用户QoS需求的重要手段<sup>[75]</sup>。因此,在密集用户切换的场景下,信令开销小、时延小、终端用户无感知的切换是尤为重要的<sup>[76]</sup>。从目前的研究来看网络切换维度单一,跨域一体化网络切换链路稳定性差。SAGIN中,多元化网络生态中通信链路稳定性差、网络节点信息繁杂、网络跨度大、切换时延高、切换频繁等问题直接影响切换性能。现有的空天地一体化切换研究缺乏考虑节点负载均衡度对切换判决的影响、信道聚合干扰对链路稳定性的影响、节点业务等待时延对用户低时延需求的影响。因此如何在空天地大

尺度空间下实现用户无缝切换是亟待解决的问题。

目前,空天地一体化通信系统尚未成熟,面临的挑战性问题还有很多,需设计融合的多址接入方式、高效联合传输机制和大尺度空间下的用户无缝切换。空天地之间不同的传输模式使立体化(接入、传输、切换)困难重重,如何组建有效的空天地立体化接入、传输和切换机制以提供高质量通信服务是当下需重点研究的课题。

#### 4.2 全域协同传输

卫星通信网络具有通信范围大、可靠性高、电路设置灵活等优势,卫星星座的加入使得真正的空天地一体化网络成为可能,全域协同传输的研究在未来的SAGIN网络中不可或缺。其中认知卫星地面网络(CSTN)允许卫星和地面网络之间的频谱共享,已成为一种有效提高频谱效率的方法,并在未来5G/6G<sup>[77]</sup>中提供高通量覆盖的方法<sup>[78]</sup>,采用一种新的合作频谱共享框架,作为中继的次要地面节点在实现自身传输的前提下,分配部分功率或时间资源来辅助主卫星网络<sup>[79]</sup>。

星地传输距离过大导致传输过程中存在严重的损耗,而UAV可以作为中继转发和放大信号,具有高灵活性、快速部署和可持续管理的优点,于是UAV与卫星或地面的协同传输是全域协同传输的关键纽带,但UAV的引入带来严重的能耗问题,对于未来的空天地一体化无人机协同传输网络来说,设计能够在保证星/地和无人机之间协同连接的同时最大化能量效率的传输方案十分重要<sup>[80]</sup>。

与此同时,基于卫星互联网的星间协同传输将为扩大全球一体化接入与通信覆盖提供可行性。在高障碍物环境或极地地区,卫星能见度显著下降,导致全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)服务性能严重下降。为了提高卫星的可用性和定位精度,以全球定位系统、北斗

导航卫星系统、伽利略导航卫星系统和全球导航卫星系统为代表的4个全球导航卫星系统已经创建了现代化计划来升级这些功能。自2018年初以来,GPS一直在部署新卫星。下一代系统正在评估增加低地球轨道增强星座的可行性<sup>[81]</sup>,并期望提高北极地区的性能<sup>[82]</sup>,计划创建一个高轨道空间段,以提高在航天器在地平线以上25°以上可见的困难条件下的性能<sup>[83]</sup>。

部署在非平稳轨道上的遥感卫星(Remote Sensing Satellite, RSS)网络作为支持各种应用<sup>[84]</sup>的重要基础设施越来越得到研究界的认可。遥感工作分为两个阶段,在采集阶段,卫星传感器从目标收集辐射或反射信号,在传输阶段,作为数据源的卫星将收集到的数据发送回地球站。许多遥感应用,如森林火灾监测,需要以低延迟向地面发送大量数据。因此,依靠通信卫星和遥感卫星间的合作来实现连续传输的合作传输成为一种不可或缺的技术。然而,动态拓扑结构和时变结构仍然可用RSS网络中的资源使合作传输方案更加复杂化,因为它需要动态调整以优化延迟<sup>[85]</sup>。因此,RSS网络中的延迟最优合作传输成为一个关键并困难的问题,在针对未来空天地一体化协同传输网络的研究中需要研究者给予高度关注。

随着航天技术的快速发展,卫星通信在远程通信、气象探测、灾害预警、月球探测等军事和民用领域发挥着越来越重要的作用<sup>[86]</sup>,而以上研究表明,针对星-地、星-星以及通信-遥感卫星协同传输等方面的研究尚不充分,未来的SAGIN将会有完整的卫星通信体系与可靠性保障,这有赖于研究者的不断探索和创新。

#### 4.3 一体化网络资源管理

随着用户海量业务需求的增长,空天地频谱资源愈发稀缺,卫星和地面网络的频率利用率和传输

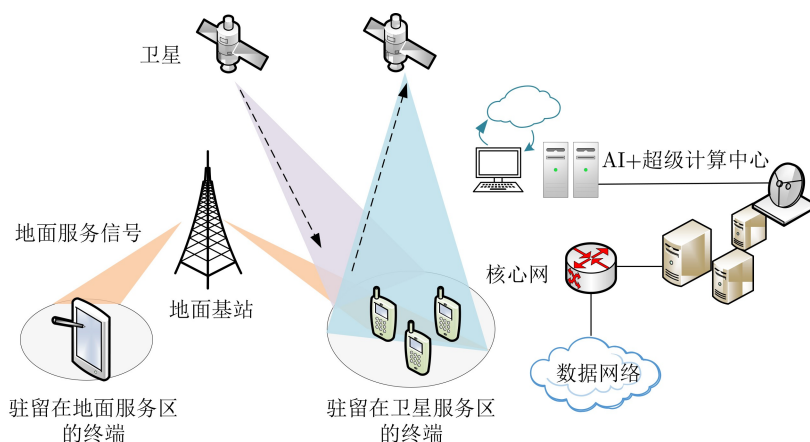


图6 星地频率共享与干扰规避



效率大大降低。图6给出星地频率共享与干扰规避示意图。综合卫星地面网络(ISTN)为实现全时、无缝和全球覆盖提供了一种新颖的网络范式,最近引起了广泛的研究关注。6G通信网络还将期望ISTN支持无数具有不同要求的新兴任务。为此,在动态复杂的环境中,智能高效的多维资源管理策略(传输和计算资源)在资源有限的情况下至关重要。

目前已有研究讨论ISTN中多维资源管理问题的要求和挑战,基于多维度资源管理策略设计智能任务资源双向匹配框架<sup>[87]</sup>。此外,ISTN为工业互联网(Industrial Internet of Things, IIoT)提供大规模的无缝连接<sup>[88]</sup>,将IIoT节点与服务端相匹配,以降低系统总时延。在过去几年中,卫星界着力于从非对地静止轨道系统提供宽带服务,访问整个可用频谱而不必在不同的运营商之间共享,是这些系统实现收支平衡的关键<sup>[89]</sup>。

未来SAGIN需要应对无缝覆盖的无线设备爆炸性激增<sup>[90]</sup>。纯粹依赖于陆地网络,并不能在地球上的任何地方提供无处不在的服务<sup>[91]</sup>。因此,SAGIN框架正在普遍支持全球多媒体通信基础设施以缓解频谱稀缺问题<sup>[92]</sup>,在该背景下研究功率及波束等资源的优化是至关重要的。近年来,提高能源效率、覆盖率和频谱效率的资源优化技术得到广泛关注<sup>[93]</sup>。在小区中,具有少量天线的多个接入点(Access Point, AP)在地理上分布在外,并通过前端链路连接到中央处理单元,用于协调和数据处理<sup>[94]</sup>。由于多个AP可以在不观察任何单元边界的情况下为一组用户提供服务,因此系统能够通过减轻衰落来提供宏观多样性增益,从而提高了系统性能<sup>[95]</sup>。另一方面,非正交多址技术不断涌现,通过允许多个用户共享一个特定的资源<sup>[96]</sup>来提高所支持的用户数量,获得支持大规模连接的联合利益<sup>[97]</sup>。与传统的小小区非正交多址接入方式相比,用户在AP上由共同定位的天线提供服务,由一组分布式天线提供服务,提供额外的自由度,以提高网络性能<sup>[98]</sup>。

在SAGIN中,针对频率、功率以及波束等多种资源联合优化的挑战,研究者还需进一步研究无线资源管理算法,以实现SAGIN资源的高效利用。

#### 4.4 未来空天地一体化接入技术

未来的通信网络区域划分更加细致,未来SAGIN中的接入技术将会考虑多个领域多种技术的结合。在5G阶段,卫星通信与地面移动通信尝试技术体制的融合,例如3GPP标准正在研究将5G新空口适用于NTN<sup>[13]</sup>。为了提高对SAGIN中频谱和硬件资源的有效利用,针对集成传感和通信

(ISAC)的研究已经引起了广泛的关注,并在全球覆盖方面发挥着重要作用。现有的ISAC主要专注于地面网络并已经应用于许多通信场景<sup>[99]</sup>。然而,尽管MIMO技术的应用使性能得以提高,但大量的天线可能会导致频率依赖的阵列响应,并导致严重的波束斜视效应,这需要通过适当的波束设计<sup>[100]</sup>来缓解。此外,在现有的陆地ISAC系统中,混合收发器集成的子阵列MIMO雷达通常与大规模MIMO技术相结合,以减少射频链<sup>[101,102]</sup>的数量。由此可见,现有的ISAC工作大多集中在地面网络上,由于电磁波传播特性显著不同,不能直接应用于卫星系统。在未来的SAGIN接入网络中,需要研究人员在缓解波束斜视效应的基础上,研究ISAC在MIMO高/低地球轨道卫星系统中的应用。

未来的SAGIN接入网络中,针对多址技术的研究是重中之重,在已有的方案中面向大量机器无源类节点会使用UMA,面向近距离近场通信使用LDMA,很难有一种多址接入方式同时覆盖多个领域的多种QoS需求,因此,未来的多址方式是在不同的领域协同使用上述多址技术。其中UMA的难点在于综合考虑能效和计算复杂度的基础上设计多址编码方案,这将是针对UMA的未来研究重点。为了提高接入容量,很多研究者正在研究非正交多址接入。非正交多址接入从多种不同维度扩展接入能力,其中功率域NOMA体现在功率方面,RSMA体现在速率方面。非正交多址接入技术可以通过非正交过载无线电资源来增加系统容量,但系统容量的增加给系统的码型和接收机设计带来了新的挑战<sup>[103,104]</sup>,需要研究人员加大对该方面的研究力度。除以上地面区域外,非正交多址接入技术在卫星中的应用也得到了广泛的关注,其中有学者探讨了NOMA信令对改进多波束卫星下行链路的一些相关指标的贡献<sup>[105]</sup>。同时,在非正交多址接入技术应用于卫星网络中,需要额外考虑主用户的服务质量、卫星平台的最大功率和NOMA组中的次级用户数量的约束<sup>[106]</sup>。非正交多址接入技术具有更高的光谱效率、更高的单元边缘吞吐量、宽松的信道反馈和更低的传输延迟等优点,在未来的空天地一体化网络中应用非正交多址接入技术,可以在实现高频谱效率的基础上,结合地面和卫星网络的优势,分区域协同使用多种多址接入技术,受到了业界和学术界的广泛关注。

随着卫星和无人机的部署,6G网络将创造3维无线电环境,具有更加多元化和个性化的QoS配置。其中地形、建筑甚至家具都不可避免地影响复

杂的3维信号传播,为了量化3维空间中无线传输的频谱利用效率和能源效率,引入体积数据率等新型指标,更全面地评估6G性能<sup>[107]</sup>。在6G通信场景中,针对智能多维多址QoS/资源感知多样性6G服务供应,大型天线阵列和新兴的物理层技术不断涌现,传统时频资源在空间域、功率域、码域等维度逐渐扩展,多维多址接入(Multi-Dimensional Multiple Access, MDMA)的出现引领了多址接入技术的新研究方向<sup>[108]</sup>。MDMA中的一个关键挑战是,如何在不同的场景下利用不同的无线电资源领域,以支持智能多维多重访问,同时实现来自不同终端用户的期望QoS需求。未来的6G全域网络依赖于智能MDMA,它可以动态地统一不同类型的多重访问(正交或非正交),并根据最终用户的动态资源约束和异构性QoS需求有效地利用多维无线电资源。

未来的6G将面临更多场景,6G典型应用场景有全息通信、感官互联、智慧交互等,不同场景面临的接入需求不同,其中全息通信要求用户吞吐量达到Tbps量级,感官要求毫秒级时延保证,因此未来多址接入是融合性发展,多接入方式协同并存的。

#### 4.5 一体化网络协同计算

未来SAGIN的超大组网规模是现代通信与网络技术无法企及的。为实现未来SAGIN的众连接、高速率和大容量,通信与计算不应该独立地进行,二者的融合应贯穿于整个SAGIN接入架构中。空中计算为通信计算一体化架构提供了一种解决方案<sup>[74]</sup>,利用信道特性实现函数在空口信道中的运算,计算传播角度、传播途径、极化参数,在全双工通信中消除干扰。目前,基于传统通信理论的网络系统极大地限制了性能的进一步改进。因此,有必要通过通信与计算技术相融合来提高网络的效率。未来的6G网络将是一体化协同计算的新型网络,然而许多技术的理论研究还处于起步阶段,在未来移动通信中,缺乏智能化通信与计算融合框架,这是未来需要解决的问题,通信与计算融合技术将是SAGIN中值得期待的发展方向。

为顺应未来SAGIN发展趋势,SAGIN-MEC融合网络架构近年来已被提出<sup>[109]</sup>。在该架构中,MEC服务器为终端提供异构且多层次的计算资源,使终端用户能够在全球范围内获得服务。在SAGIN-MEC融合异构网络中,如何解决异构网络中断和网络负载不均衡问题是一个挑战。虽然当前已有远程云中心、轨道边缘计算服务器和数据节点的分层卫星-地面协同体系结构<sup>[110]</sup>,但针对上述难点问题的研究目前仍在进展当中。

## 5 结束语

本文围绕6G全域融合的智能接入关键技术问题展开研究,总结了对其发展具有支撑作用的关键技术,分别从空天地一体化空口技术、多址接入技术、干扰分析、计算技术和AI技术5个方面对研究进展进行了总结;针对SAGIN接入以及资源分配问题,提出了AI赋能的SAGIN接入架构。在此架构基础上,提出了基于混合多址接入场景优化网络中的资源配置方案,提高系统性能和接入容量。最后,对未来将会涉及的关键技术给出了前瞻性的描述,未来SAGIN将呈现更加立体化的网络架构、体系完整且可靠的协同传输机制、高效且智能的资源管理方法、全域覆盖的接入机制、高度协同融合的通信与计算能力,这些技术将共同为6G通信网络全域融合的接入架构提供有力保证。

### 参考文献

- [1] 钱志鸿,肖琳,王雪.面向未来移动网络密集连接的关键技术综述[J].通信学报,2021,42(4):22-43. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021094.  
QIAN Zhihong, XIAO Lin, and WANG Xue. Review on strategic technology of dense connection for the future mobile network[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(4): 22-43. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021094.
- [2] DAO N N, PHAM Q V, TU N H, et al. Survey on aerial radio access networks: Toward a comprehensive 6G access infrastructure[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 1193-1225. doi: 10.1109/COMST.2021.3059644.
- [3] ITU. Statistics[EB/OL].<https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>, 2022.
- [4] 周天清,胡海琴,曾新亮. NOMA-MEC系统中基于改进遗传算法的协作式计算卸载与资源管理[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(9): 3014-3023. doi: 10.11999/JEIT220306.  
ZHOU Tianqing, HU Haiqin, and ZENG Xinliang. Cooperative computation offloading and resource management based on improved genetic algorithm in NOMA-MEC systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(9): 3014-3023. doi: 10.11999/JEIT220306.
- [5] 吴巍.天地一体化信息网络发展综述[J].天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16. doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200101.  
WU Wei. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(1): 1-16. doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200101.
- [6] LIU Jiajia, SHI Yongpeng, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. *IEEE*

- Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714–2741. doi: [10.1109/COMST.2018.2841996](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841996).
- [7] 袁祖霞, 程铭, 郭克锋. 基于上行非正交多址接入技术的星空地融合网络性能分析[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2666–2676. doi: [10.11999/JEIT220379](https://doi.org/10.11999/JEIT220379).  
YUAN Zuxia, CHENG Ming, and GUO Kefeng. Performance analysis of satellite-aerial-terrestrial integrated network based on uplink NOMA technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(8): 2666–2676. doi: [10.11999/JEIT220379](https://doi.org/10.11999/JEIT220379).
- [8] GUO Yan, LI Qing, LI Yuanzhe, *et al.* Service coordination in the space-air-ground integrated network[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(5): 168–173. doi: [10.1109/MNET.111.2100153](https://doi.org/10.1109/MNET.111.2100153).
- [9] ITU. ITU-T NET2030 SUB. G1: 2020 Representative use cases and key network requirements for Network 2030[S]. Geneva: ITU, 2020.
- [10] 张平, 张建华, 戚琦, 等. Ubiquitous-X: 构建未来6G网络[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(6): 913–930. doi: [10.1360/SSI-2020-0068](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0068).  
ZHANG Ping, ZHANG Jianhua, QI Qi, *et al.* Ubiquitous-X: Constructing the future 6G networks[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(6): 913–930. doi: [10.1360/SSI-2020-0068](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0068).
- [11] 中国移动通信有限公司研究院. 2030+技术趋势白皮书[R]. 2020.  
China Mobile Communication Co., Ltd. 2030+ Technology trends white paper[R]. 2020.
- [12] 3GPP. Physical layer procedures for data V16.6. 0 (release 16)[R]. 3GPP TS 38.214, 2021.
- [13] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) V1.0. 0 (release 16)[R]. 3GPP TR 38.821, 2019.
- [14] 周卫兵. 卫星网络资源管理与接入技术研究[D]. [硕士论文], 北京邮电大学, 2018.  
ZHOU Weibing. Research of resource management and access technology based on satellite network[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [15] 王爱玲, 刘建军, 潘成康, 等. 空天地一体化空口接入协议研究[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 53–56. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2021.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2021.05.009).  
WANG Ailing, LIU Jianjun, PAN Chengkang, *et al.* Research on air interface access protocol of space-air-ground integrated networks[J]. *Mobile Communications*, 2021, 45(5): 53–56. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2021.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2021.05.009).
- [16] 侯利明, 韩波, 缪德山, 等. 基于5G及演进的星地融合空口传输技术[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 21–29. doi: [10.12267/j.issn.2096-5931.2021.09.004](https://doi.org/10.12267/j.issn.2096-5931.2021.09.004).  
HOU Liming, HAN Bo, MIAO Deshan, *et al.* Research of air-interface technologies for 5G based integrated satellite-terrestrial communication[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2021, 47(9): 21–29. doi: [10.12267/j.issn.2096-5931.2021.09.004](https://doi.org/10.12267/j.issn.2096-5931.2021.09.004).
- [17] LI Xiaoyang, ZHU Guangxu, GONG Yi, *et al.* Wirelessly powered data aggregation for IoT via over-the-air function computation: Beamforming and power control[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(7): 3437–3452. doi: [10.1109/TWC.2019.2914046](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2914046).
- [18] 李晓阳, 周梓钦, 贡毅. 通信感知计算一体化波束赋形设计[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(5): 23–28. doi: [10.12142/ZTETJ.202205006](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202205006).  
LI Xiaoyang, ZHOU Ziqin, and GONG Yi. Beamforming design for integrated sensing, communication and computation[J]. *ZTE Technology Journal*, 2022, 28(5): 23–28. doi: [10.12142/ZTETJ.202205006](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202205006).
- [19] SINGYA P K and ALOUINI M S. Performance of UAV-assisted multiuser terrestrial-satellite communication system over mixed FSO/RF channels[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(2): 781–796. doi: [10.1109/taes.2021.3111787](https://doi.org/10.1109/taes.2021.3111787).
- [20] JIA Ziyue, SHENG Min, LI Jiandong, *et al.* Joint HAP access and LEO satellite backhaul in 6G: Matching game-based approaches[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 1147–1159. doi: [10.1109/JSAC.2020.3018824](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3018824).
- [21] HUANG Qingquan, LIN Min, ZHU Weiping, *et al.* Uplink massive access in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2413–2426. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3049364](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3049364).
- [22] KONG Huaicong, LIN Min, ZHANG Jian, *et al.* Ergodic sum rate for uplink NOMA transmission in satellite-aerial-ground integrated networks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(9): 58–70. doi: [10.1016/j.cja.2021.10.039](https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.10.039).
- [23] CHUNG K. Correlated superposition coding: Lossless two-user NOMA implementation without SIC under user-fairness[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(9): 1999–2003. doi: [10.1109/LWC.2021.3089996](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3089996).
- [24] PAN Zhipeng, LIU Wei, LIE Jing, *et al.* Multi-dimensional space-time block coding aided downlink MIMO-SCMA[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(7): 6657–6669. doi: [10.1109/TVT.2019.2915351](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2915351).
- [25] NIKOPOUR B, YI E, BAYESTEH H, *et al.* SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks[C]. 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, USA, 2014: 3940–3945. doi: [10.1109/GLOCOM.2014.7037423](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7037423).



- [26] LEI Hongjiang, ZHOU Sha, PARK K H, *et al.* Outage analysis of millimeter wave RSMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(3): 1504–1520. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3235349](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3235349).
- [27] CUI Mingyao and DAI Linglong. Channel estimation for extremely large-scale MIMO: Far-field or near-field?[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(4): 2663–2677. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3146400](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3146400).
- [28] WEI Xiuhong, DAI Linglong, ZHAO Yajun, *et al.* Codebook design and beam training for extremely large-scale RIS: Far-field or near-field?[J]. *China Communications*, 2022, 19(6): 193–204. doi: [10.23919/JCC.2022.06.015](https://doi.org/10.23919/JCC.2022.06.015).
- [29] WU Zidong and DAI Linglong. Multiple access for near-field communications: SDMA or LDMA?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(6): 1918–1935. doi: [10.1109/JSAC.2023.3275616](https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3275616).
- [30] 3GPP. Release 16 description; summary of rel-16 work items[R]. TR 21.906, 2021.
- [31] LI Yuanjie, DAI Jincheng, SI Zhongwei, *et al.* Unsourced multiple access for 6G massive machine type communications[J]. *China Communications*, 2022, 19(3): 70–87. doi: [10.23919/JCC.2022.03.005](https://doi.org/10.23919/JCC.2022.03.005).
- [32] SBIT S, DADI M B and RHAIMI B C. Interference evaluation in cellular networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 100(4): 1299–1311. doi: [10.1007/s11277-018-5637-1](https://doi.org/10.1007/s11277-018-5637-1).
- [33] ZHU Qiao, WANG Xue, QIAN Zhihong, *et al.* Performance analysis of an intelligent association scheme in ultra-dense networks using matern cluster process[C]. 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Changchun, China, 2019: 140–145. doi: [10.1109/ICCCChina.2019.8855839](https://doi.org/10.1109/ICCCChina.2019.8855839).
- [34] YAO Yao, LI Bin, LI Cheng, *et al.* Downlink performance analysis of the full-duplex networks with interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(4): 2324–2338. doi: [10.1109/TCOMM.2020.2965536](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2965536).
- [35] ALTAY C and KOCA M. Interference mitigation for non-orthogonal multiple access in heterogeneous networks[J]. *Wireless Networks*, 2023, 29(5): 2189–2202. doi: [10.1007/s11276-023-03274-z](https://doi.org/10.1007/s11276-023-03274-z).
- [36] 张更新, 丁晓进, 曲至诚. 天地一体化物联网体系架构及干扰分析研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 22–33. doi: [10.11959/j.issn.2096-8930.20200204](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-8930.20200204).
- ZHANG Gengxin, DING Xiaojin, and QU Zhicheng. Research on space-based integrated internet of things architecture and interference analysis[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(2): 22–33. doi: [10.11959/j.issn.2096-8930.20200204](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-8930.20200204).
- [37] ROIVAINEN A, YLITALO J, KYRÖLÄINEN J, *et al.* Performance of terrestrial network with the presence of overlay satellite network[C]. 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, 2013: 5089–5093. doi: [10.1109/ICC.2013.6655389](https://doi.org/10.1109/ICC.2013.6655389).
- [38] 贾敏, 孟士尧, 郭庆, 等. 低轨大规模卫星星座系统建模与干扰分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(1): 34–39. doi: [10.11805/TKYDA2021151](https://doi.org/10.11805/TKYDA2021151).
- JIA Min, MENG Shiyao, GUO Qing, *et al.* Analysis of inter-system interference of large-scale LEO satellite constellation[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2022, 20(1): 34–39. doi: [10.11805/TKYDA2021151](https://doi.org/10.11805/TKYDA2021151).
- [39] DENG Ruoqi, DI Boya, ZHANG Hongliang, *et al.* Ultra-dense LEO satellite constellations: How many LEO satellites do we need?[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4843–4857. doi: [10.1109/TWC.2021.3062658](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3062658).
- [40] SONG Liang, HU Xing, ZHANG Guanhua, *et al.* Networking systems of AI: On the convergence of computing and communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(20): 20352–20381. doi: [10.1109/JIOT.2022.3172270](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3172270).
- [41] ZHANG Zhenjiang, ZHANG Wenyu, and 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. doi: [10.1109/MNET.2018.1800172](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800172).
- [42] QIU CHAO, YAO Haipeng, YU F R, *et al.* Deep Q-learning aided networking, caching, and computing resources allocation in software-defined satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5871–5883. doi: [10.1109/TVT.2019.2907682](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2907682).
- [43] LI Bin, FEI Zesong, and ZHANG Yan. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 2241–2263. doi: [10.1109/JIOT.2018.2887086](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086).
- [44] XU Fangmin, YANG Fan, ZHAO Chenglin, *et al.* Deep Reinforcement learning based joint edge resource management in maritime network[J]. *China Communications*, 2020, 17(5): 211–222. doi: [10.23919/JCC.2020.05.016](https://doi.org/10.23919/JCC.2020.05.016).
- [45] JEONG S, SIMEONE O, and KANG J. Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(3): 2049–2063. doi: [10.1109/TVT.2017.2706308](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2706308).
- [46] CHENG Nan, LYU Feng, QUAN Wei, *et al.* Space/aerial-

- assisted computing offloading for IoT applications: A learning-based approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(5): 1117–1129. doi: [10.1109/JSAC.2019.2906789](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2906789).
- [47] ZHANG Long, ZHANG Hongliang, GUO Chao, *et al.* Satellite-aerial integrated computing in disasters: User association and offloading decision[C]. 2020 IEEE International Conference on Communications, Dublin, Ireland, 2020: 554–559. doi: [10.1109/ICC40277.2020.9148796](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148796).
- [48] ALSHAROA S and ALOUINI M A. Improvement of the global connectivity using integrated satellite-airborne-terrestrial networks with resource optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(8): 5088–5100. doi: [10.1109/TWC.2020.2988917](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2988917).
- [49] 崔新雨, 伍杰, 周一青, 等. 空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. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2023.01.001](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2023.01.001).
- CUI Xinyu, WU Jie, ZHOU Yiqing, *et al.* Challenges of and key technologies for the air-space-ground integrated network[J]. *Journal of Xidian University*, 2023, 50(1): 1–11. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2023.01.001](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2023.01.001).
- [50] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向6G的卫星通信网络架构展望[J]. *电信科学*, 2021, 37(7): 1–14. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2021147](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2021147).
- WU Xiaowen, JIAO Zhenfeng, LING Xiang, *et al.* Outlook on satellite communications network architecture for 6G[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(7): 1–14. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2021147](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2021147).
- [51] XIAO Wenjing, WANG Rui, SONG J, *et al.* AI-based satellite ground communication system with intelligent antenna pointing[C]. Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference, Taipei, China, 2021: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322562](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322562).
- [52] ZHANG Sitong. Research on photoelectric effect for artificial satellite communication[C]. Proceedings of 2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom), Exeter, UK, 2020: 1465–1469. doi: [10.1109/ISPA-BDCLOUD-SocialCom-SustainCom51426.2020.00220](https://doi.org/10.1109/ISPA-BDCLOUD-SocialCom-SustainCom51426.2020.00220).
- [53] YANG Lixuan and ROSSI D. Quality monitoring and assessment of deployed deep learning models for network AIops[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(6): 84–90. doi: [10.1109/MNET.001.2100227](https://doi.org/10.1109/MNET.001.2100227).
- [54] VÁZQUEZ M Á, HENAREJOS P, PAPPALARDO I, *et al.* Machine learning for satellite communications operations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(2): 22–27. doi: [10.1109/MCOM.001.2000367](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000367).
- [55] 刘佩璋, 杨博, 刘江春, 等. 基于深度学习的卫星通信抗干扰方法[J]. *电子测试*, 2020(1): 86–87. doi: [10.3969/j.issn.1000-8519.2020.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8519.2020.01.030).
- LIU Peizhang, YANG Bo, LIU Jiangchun, *et al.* Interference awareness method based on deep learning for satellite communication[J]. *Electronic Test*, 2020(1): 86–87. doi: [10.3969/j.issn.1000-8519.2020.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8519.2020.01.030).
- [56] 孔景娜. 基于强化学习的卫星通信智能抗干扰决策探讨[J]. *无线互联科技*, 2021, 18(5): 3–4. doi: [10.3969/j.issn.1672-6944.2021.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6944.2021.05.002).
- KONG Jingna. Research on intelligent anti-interference decision of satellite communication based on reinforcement learning[J]. *Wireless Internet Technology*, 2021, 18(5): 3–4. doi: [10.3969/j.issn.1672-6944.2021.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6944.2021.05.002).
- [57] 段超凡, 王锐. 基于智能水滴算法的卫星信道资源调度研究[J]. *现代计算机*, 2022, 28(7): 75–78,86. doi: [10.3969/j.issn.1007-1423.2022.07.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-1423.2022.07.013).
- DUAN Chaofan and WANG Rui. Satellite channel allocation based on the intelligent water drops algorithm[J]. *Modern Computer*, 2022, 28(7): 75–78,86. doi: [10.3969/j.issn.1007-1423.2022.07.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-1423.2022.07.013).
- [58] 杨伟超, 杜宇, 文伟, 等. 基于多重分形谱智能分析的卫星信号调制识别研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(6): 1336–1343. doi: [10.12263/DZXB.20210882](https://doi.org/10.12263/DZXB.20210882).
- YANG Weichao, DU Yu, WEN Wei, *et al.* Modulation recognition of satellite communication signal based on intelligent analysis of multi-fractal spectrum[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(6): 1336–1343. doi: [10.12263/DZXB.20210882](https://doi.org/10.12263/DZXB.20210882).
- [59] EBERT J, BAILER W, FLAVIO J, *et al.* A method for ACM on Q/V-band satellite links based on artificial intelligence[C]. Proceedings of 2020 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz, Austria, 2020: 1–5. doi: [10.1109/ASMS/SPSC48805.2020.9268889](https://doi.org/10.1109/ASMS/SPSC48805.2020.9268889).
- [60] NGUYEN T M. Advanced mathematical modeling of machine learning and artificial intelligent addressing satellite transponder distortions[C]. Proceedings of 2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC), Long Beach, USA, 2020: 1–6. doi: [10.1109/IGESSC50231.2020.9285157](https://doi.org/10.1109/IGESSC50231.2020.9285157).
- [61] OLIGERI G, SCIANCALEPORE S, RAPONI S, *et al.* PAST-AI: Physical-layer authentication of satellite transmitters via deep learning[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2023, 18: 274–289. doi: [10.1109/TIFS.2022.3219287](https://doi.org/10.1109/TIFS.2022.3219287).

- [62] STHAPIT S, LAKSHMINARAYANA S, HE Ligang, *et al.* Reinforcement learning for security-aware computation offloading in satellite networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(14): 12351–12363. doi: [10.1109/JIOT.2021.3135632](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3135632).
- [63] LIU Qian, SHI Long, SUN Linlin, *et al.* Path planning for UAV-mounted mobile edge computing with deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(5): 5723–5728. doi: [10.1109/TVT.2020.2982508](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2982508).
- [64] DENG Boyu, JIANG Chunxiao, YAO Haipeng, *et al.* The next generation heterogeneous satellite communication networks: Integration of resource management and deep reinforcement learning[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 105–111. doi: [10.1109/mwc.001.1900178](https://doi.org/10.1109/mwc.001.1900178).
- [65] CAI Ting, YANG Zhihua, CHEN Yufei, *et al.* Cooperative data sensing and computation offloading in UAV-assisted crowdsensing with multi-agent deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2022, 9(5): 3197–3211. doi: [10.1109/TNSE.2021.3121690](https://doi.org/10.1109/TNSE.2021.3121690).
- [66] HE Ying, WANG Yuhang, YU F R, *et al.* Efficient resource allocation for multi-beam satellite-terrestrial vehicular networks: A multi-agent actor-critic method with attention mechanism[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(3): 2727–2738. doi: [10.1109/TITS.2021.3128209](https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3128209).
- [67] JUNG S, YUN W J, KIM J, *et al.* Infrastructure-assisted cooperative multi-UAV deep reinforcement energy trading learning for big-data processing[C]. 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN), Jeju Island, Korea, 2021: 159–162. doi: [10.1109/ICOIN50884.2021.9333895](https://doi.org/10.1109/ICOIN50884.2021.9333895).
- [68] 杜瑞. AI在现代通信中的应用与挑战分析[J]. *信息通信*, 2019(10): 166–167. doi: [10.3969/j.issn.1673-1131.2019.10.085](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1131.2019.10.085).  
DU Rui. Analysis of AI applications and challenges in modern communications[J]. *Information & Communications*, 2019(10): 166–167. doi: [10.3969/j.issn.1673-1131.2019.10.085](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1131.2019.10.085).
- [69] LETAIEF K B, CHEN Wei, SHI Yuanming, *et al.* The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(8): 84–90. doi: [10.1109/MCOM.2019.1900271](https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1900271).
- [70] 王雪, 刘京, 孙佳妮, 等. 基于谱聚类的异构蜂窝超密集网络高效资源分配算法[J]. *通信学报*, 2021, 42(7): 162–175. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021141](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021141).  
WANG Xue, LIU Jing, SUN Jiani, *et al.* Spectral clustering-based energy-efficient resource allocation algorithm in heterogeneous cellular ultra-dense network[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(7): 162–175. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021141](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021141).
- [71] WANG Xue, SHI Haotian, LI Yanqi, *et al.* Energy efficiency resource management for D2D-NOMA enabled network: A dinkelbach combined twin delayed deterministic policy gradient approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(9): 11756–11771. doi: [10.1109/TVT.2023.3267452](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3267452).
- [72] 张平, 秦智超, 陆洲. 天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑[J]. *中兴通讯技术*, 2016, 22(4): 24–28. doi: [10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.005).  
ZHANG Ping, QIN Zhichao, and LU Zhou. The space wideband backbone interconnected system in the integrated space and terrestrial information network[J]. *ZTE Technology Journal*, 2016, 22(4): 24–28. doi: [10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.005).
- [73] 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. doi: [10.12142/ZTETJ.202105002](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202105002).  
TIAN Kaibo, YANG Zhen, and ZHANG Nan. Prospects for the air-space-ground integrated network technology[J]. *ZTE Technology Journal*, 2021, 27(5): 2–6. doi: [10.12142/ZTETJ.202105002](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202105002).
- [74] LIN Min, LIN Zhi, ZHU Weiping, *et al.* Joint beamforming for secure communication in cognitive satellite terrestrial networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(5): 1017–1029. doi: [10.1109/JSAC.2018.2832819](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2832819).
- [75] ZHU Xiangming and JIANG Chunxiao. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: Architectures, applications, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 437–461. doi: [10.1109/JIOT.2021.3126825](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3126825).
- [76] WANG H, CHEN S, AI M, *et al.* Localized mobility management for 5G ultra dense network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8535–8552. doi: [10.1109/TVT.2017.2695799](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2695799).
- [77] SINGH V, UPADHYAY P K, and LIN Min. On the performance of NOMA-assisted overlay multiuser cognitive satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 638–642. doi: [10.1109/LWC.2020.2963981](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2963981).
- [78] RUAN Yuhan, LI Yongzhao, WANG Chengxiang, *et al.* Energy efficient power allocation for delay constrained cognitive satellite terrestrial networks under interference constraints[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(10): 4957–4969. doi: [10.1109/TWC.2019.2931321](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2931321).
- [79] WEN Xiting, RUAN Yuhan, LI Yongzhao, *et al.* Optimal



- cooperative transmission for overlay cognitive satellite terrestrial networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(2): 419–423. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3131599](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3131599).
- [80] GUO Kefeng, WU Min, LI Xingwang, *et al.* Deep reinforcement learning and NOMA-based multi-objective RIS-assisted IS-UAV-TNs: Trajectory optimization and beamforming design[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(9): 10197–10210. doi: [10.1109/TITS.2023.3267607](https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3267607).
- [81] WANG Lei, LI Deren, CHEN Ruizhi, *et al.* Low earth orbiter (LEO) navigation augmentation: Opportunities and challenges[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2020, 22(2): 144–152. doi: [10.15302/J-SSCAE-2020.02.018](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2020.02.018).
- [82] YANG Yuanxi, MAO Yue, and SUN Bijiao. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1. doi: [10.1186/s43020-019-0006-0](https://doi.org/10.1186/s43020-019-0006-0).
- [83] URLICHICH Y, KARUTIN S, TESTOEDOV N, *et al.* Directions 2021: GLONASS on the verge of a new decade[J]. *GPS World*, 2020, 31(12): 33–34.
- [84] YANG Jian, LI Dezheng, JIANG Xiaofeng, *et al.* Enhancing the resilience of low earth orbit remote sensing satellite networks[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(4): 304–311. doi: [10.1109/MNET.001.1900550](https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900550).
- [85] CHEN Long, TANG Feilong, LI Xu, *et al.* Delay-optimal cooperation transmission in remote sensing satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(9): 5109–5123. doi: [10.1109/TMC.2022.3172848](https://doi.org/10.1109/TMC.2022.3172848).
- [86] YANG Jie, WANG Xinlong, SHEN Liangliang, *et al.* Availability analysis of GNSS signals above GNSSs constellation[J]. *Journal of Navigation*, 2021, 74(2): 446–466. doi: [10.1017/S0373463320000594](https://doi.org/10.1017/S0373463320000594).
- [87] MI Xinru, YANG Chungang, SONG Yanbo, *et al.* Matching game for intelligent resource management in integrated satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(6): 88–94. doi: [10.1109/MWC.009.2100555](https://doi.org/10.1109/MWC.009.2100555).
- [88] CHEN Danyang, YANG Chungang, and GONG Peng. Resource cube: Multi-virtual resource management for integrated satellite-terrestrial industrial IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 11963–11974. doi: [10.1109/TVT.2020.3007263](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3007263).
- [89] RE E, MURRELL A, and ROQUES D. Radio resource management for large constellations in a spectrum sharing environment[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2021, 39(1): 78–91. doi: [10.1002/sat.1376](https://doi.org/10.1002/sat.1376).
- [90] YUAN Yifei, WANG Sen, WU Yongpeng, *et al.* NOMA for next-generation massive IoT: Performance potential and technology directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(7): 115–121. doi: [10.1109/MCOM.001.2000997](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000997).
- [91] ZHANG Hongming, JIANG Chunxiao, WANG Jingjing, *et al.* Multicast beamforming optimization in cloud-based heterogeneous terrestrial and satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1766–1776. doi: [10.1109/TVT.2019.2959933](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2959933).
- [92] YIN Zhisheng, CHENG Nan, LUAN T H, *et al.* Green interference based symbiotic security in integrated satellite-terrestrial communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(11): 9962–9973. doi: [10.1109/TWC.2022.3181277](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3181277).
- [93] KUSALADHARMA S, ZHU Weiping, AJIB W, *et al.* Achievable rate characterization of NOMA-aided cell-free massive MIMO with imperfect successive interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3054–3066. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3053613](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3053613).
- [94] BASHAR M, CUMANAN K, BURR A G, *et al.* On the performance of cell-free massive MIMO relying on adaptive NOMA/OMA mode-switching[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 792–810. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2952574](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2952574).
- [95] SHARMA E, BUDHIRAJA R, VASUDEVAN K, *et al.* Full-duplex massive MIMO multi-pair two-way AF relaying: Energy efficiency optimization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(8): 3322–3340. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2822273](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2822273).
- [96] VAEZI M, BADUGE G A, LIU Yuanwei, *et al.* Interplay between NOMA and other emerging technologies: A survey[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(4): 900–919. doi: [10.1109/TCCN.2019.2933835](https://doi.org/10.1109/TCCN.2019.2933835).
- [97] DAI Linglong, WANG Bichai, DING Zhiguo, *et al.* A survey of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 2294–2323. doi: [10.1109/COMST.2018.2835558](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2835558).
- [98] GAO Qiling, JIA Min, GUO Qing, *et al.* Jointly optimized beamforming and power allocation for full-duplex cell-free NOMA in space-ground integrated networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(5): 2816–2830. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3251342](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3251342).
- [99] LIU Fan, MASOUIROS C, PETROPULU A P, *et al.* Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3834–3862. doi: [10.1109/TCOMM.2020.2973976](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2973976).
- [100] CHENG Ziyang, HE Jinyang, SHI Shengnan, *et al.* Hybrid beamforming for wideband OFDM dual function radar

- communications[C]. ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Toronto, Canada, 2021: 8238–8242. doi: [10.1109/ICASSP39728.2021.9413497](https://doi.org/10.1109/ICASSP39728.2021.9413497).
- [101] LIU Fan and MASOUROS C. Hybrid beamforming with sub-arrayed MIMO radar: Enabling joint sensing and communication at mmWave band[C]. ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Brighton, UK, 2019: 7770–7774. doi: [10.1109/ICASSP.2019.8683591](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683591).
- [102] KAUSHIK A, MASOUROS C, and LIU Fan. Hardware efficient joint radar-communications with hybrid precoding and RF chain optimization[C]. ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications, Montreal, Canada, 2021: 1–6. doi: [10.1109/ICC42927.2021.9500661](https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500661).
- [103] ABEBE A T and KANG C G. Multiple codebook-based non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 683–687. doi: [10.1109/LWC.2020.2965939](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2965939).
- [104] YUAN Weijie, WU Nan, ZHANG A, *et al.* Iterative receiver design for FTN signaling aided sparse code multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(2): 915–928. doi: [10.1109/TWC.2019.2950000](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2950000).
- [105] RAMÍREZ T and MOSQUERA C. Contribution of NOMA signalling to practical multibeam satellite deployments[C]. 2022 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz, Austria, 2022: 1–8. doi: [10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914692](https://doi.org/10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914692).
- [106] LIU Rui, GUO Kefeng, KANG An, *et al.* Resource allocation for cognitive satellite-HAP-terrestrial networks with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(7): 9659–9663. doi: [10.1109/TVT.2023.3252642](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3252642).
- [107] WANG Xianbin, MEI Jie, CUI Shuguang, *et al.* Realizing 6G: The operational goals, enabling technologies of future networks, and value-oriented intelligent multi-dimensional multiple access[J]. *IEEE Network*, 2023, 37(1): 10–17. doi: [10.1109/MNET.001.2200429](https://doi.org/10.1109/MNET.001.2200429).
- [108] MEI Jie, HAN Wudan, WANG Xianbin, *et al.* Multi-dimensional multiple access with resource utilization cost awareness for individualized service provisioning in 6G[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(4): 1237–1252. doi: [10.1109/JSAC.2022.3145909](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3145909).
- [109] LIU Jun, DU Xinqi, CUI Junhong, *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. doi: [10.1109/JIOT.2020.2977402](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2977402).
- [110] ZHAO Ming, CHEN Chen, LIU Lei, *et al.* Orbital collaborative learning in 6G space-air-ground integrated networks[J]. *Neurocomputing*, 2022, 497: 94–109. doi: [10.1016/j.neucom.2022.04.098](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.04.098).
- 王雪：女，教授，研究方向为物联网、D2D通信技术与异构无线网络等。
- 孟姝宇：女，博士生，研究方向为非正交多址接入技术。
- 钱志鸿：男，教授，研究方向为物联网、D2D、Wi-Fi、RFID等无线网络与通信技术。

责任编辑：余蓉