

6G 技术中的空中接入网：进展与展望

杨睿哲^{1,2}, 何若兰^{1,2}, 孙恩昌^{1,2}, 张 卉^{1,2}, 张延华^{1,2}

(1. 北京工业大学信息学部, 北京 100124; 2. 北京工业大学先进信息网络北京实验室, 北京 100124)

摘要: 空中接入网(aerial access network, AAN)具有抗毁性强、覆盖范围广、视距传播概率高的特点,与地面网络相结合能够缓解流量负载压力,提供全时空的连接与服务,可有效助力第六代移动通信网络(6th generation mobile networks, 6G)“万物智联”愿景的实现。因此,在分析 AAN 中的卫星通信和高空平台(high altitude platform station, HAPS)技术研究进展的基础上,研究了卫星通信在数据接入方面的应用以及 HAPS 在一体化网络架构中的作用,探究了卫星与 HAPS 两种技术对未来网络的影响以及进一步优化二者的潜在方法。最后,对卫星接入的数据碰撞问题和 HAPS 的缓存问题进行讨论分析,并从上述问题出发展望了卫星通信和 HAPS 技术的未来发展方向。

关键词: 第六代移动通信网络(6th generation mobile networks, 6G); 卫星通信; 高空平台(high altitude platform station, HAPS); 空中接入网(aerial access network, AAN); 空天地一体化; 网络架构

中图分类号: TN 929

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)11-1175-14

doi: 10.11936/bjtxb2021050008

Air Access Network in 6G Technology: Progress and Prospect

YANG Ruizhe^{1,2}, HE Ruolan^{1,2}, SUN Enchang^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, ZHANG Yanhua^{1,2}

(1. Faculty of Information Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The air access network (AAN) has the characteristics of strong invulnerability, wide coverage and high line-of-sight propagation probability. Combined with the terrestrial network, it can effectively alleviate the traffic load pressure, provide all-time connection and services, and effectively contribute to the realization of the vision of “intelligence of everything” of the sixth generation mobile networks (6G). Based on the analysis of satellite communication and high altitude platform station (HAPS) technology research progress in AAN, the application of satellite communication in data access and the role of HAPS in the integrated network architecture was studied, and further explores the effect of satellite and HAPS in future networks as well as the potential methods for optimization were explored. Finally, the data collision problem of satellite access and the cache problem of HAPS were discussed and analyzed, and the future development direction of satellite communication and HAPS technology was prospected from the above problems.

Key words: 6th generation mobile networks (6G); satellite communication; high altitude platform station (HAPS); aerial access network (AAN); space-air-ground integrated; network architecture

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671029);北京市博士后工作经费资助项目(ZZ2019-73);北京市教育委员会科技计划资助项目(KM202010005017)

作者简介: 杨睿哲(1982—),女,副教授,主要从事无线通信与网络、区块链、深度学习方面的研究, E-mail: yangruizhe@bjut.edu.cn

通信作者: 孙恩昌(1977—),男,副教授,主要从事无线通信与网络、区块链、深度学习方面的研究, E-mail: ecsun@bjut.edu.cn

随着第五代移动通信网络(5th generation mobile networks, 5G)技术开始商用,用户数量和需求不断增长,各种新兴技术快速发展,研究人员已经开始进行第六代移动通信网络(6th generation mobile networks, 6G)技术的相关研究. 芬兰牵头举办了6G无线峰会,会中提出了“偏远地区连接”的技术专题,指出由于农村和偏远地区缺乏适当的连接,导致出现了巨大的数字鸿沟,降低了投资和运营网络的价值^[1]. 面向用户及各行业对于社会信息化和网络智能化的需求,需要不断提高网络的覆盖范围与连接密度,从而减少地区之间因为缺乏网络连接而造成的差距. 6G是无处不在的无线智能网络^[2],具有立体覆盖^[3]、泛在连接^[4]的特点,而仅依靠地面网络难以实现这些特点并满足用户要求,因此,非地面网络引起了业界的广泛关注与研究. 非地面网络使用机载或星载工具作为传输的中继节点或基站,能够促进未来网络服务的推出,确保任何地方的服务可用性^[5],是未来6G中的重要组成部分.

空中接入网络(aerial access network, AAN)是由高、中、低纬度卫星或高、低空飞行器平台组成的综合网络,具有覆盖范围广、抗毁性强、视距传播概率高^[6]、可扩展性好、可提供全时空的连接与服务优势,能够缓解地面网络日益增长的流量负载压力,支持6G时代的空天地一体化网络构建. 卫星通信与高空平台(high altitude platform station, HAPS)相比较,卫星通信的覆盖范围更广、运行时间更长,却存在着运行维护成本高、传输时延大的不足; HAPS具有成本低、时延短、部署灵活、易于回收的优势,但是容易受到系统容量和能量的限制. 因此,卫星通信与HAPS通信相结合,可扬长避短,提供容量更大、稳定性更好、经济性更强的空中接入链路. 同时,二者深度融合地面网络,可以显著提高用户空口接入能力^[7]和网络立体覆盖能力,并为用户提供全球全域的接入服务,以实现6G网络的覆盖与连接扩展到太空、天空、陆地等自然空间的目标.

当前针对AAN的研究,可分为卫星-地面网络、空中-地面网络、空天地一体化网络3个方向. 对于卫星-地面网络的研究,主要包括接入方案和传输性能的优化. 文献[8]提出一种综合的卫星-地面自回程方案,为地面用户提供高质量的卫星接入链路. 文献[9]研究了卫星-地面协同传输的综合方案,在业务量分流和能量效率上有显著提升. 对于空中-地面网络的研究,主要是利用空中平台提高系统通信性能. 文献[10]构建了HAPS-无人机

(unmanned aerial vehicle, UAV)综合网络,采用基于非正交多址技术的传输方案,并提出一种功率管理方案以改善信号失真问题. 最后,对于空天地一体化网络架构,研究的重点集中在3层网络的互联互通和协同配合. 文献[11]提出了一种以高速、低成本机载网络为核心的综合空间-地面体系架构,空中机载平台作为骨干节点连接地面和卫星. 文献[12]提出一种HAPS预留的空天地传输方案,利用HAPS来补充卫星-地面传输链路,加强地面通信并节省传输功率. 本文基于AAN对未来网络技术发展的重要影响,分析了卫星通信技术和HAPS技术的优势和不足,探讨了6G下卫星通信和HAPS两种空中接入技术的研究进展,并对卫星接入方案和性能优化、HAPS与卫星和地面之间的互联互通、空天地一体化架构的研究进行了综述、总结和归纳,最后,对卫星通信和HAPS的未来发展方向进行了展望.

1 6G 愿景及性能指标

6G技术的愿景是“万物智联”^[13],即要在全球范围内建立起无处不在的网络连接,使任何人、机器、平台达到全息交互、人机协作的程度. 同时,未来人类的活动范围将从地面扩展到天空甚至太空区域,未来网络需要应人类需求扩展为空天地一体化的网络架构. 为了满足新场景和新业务的更高要求,6G技术需要在系统容量、传输速率、覆盖范围、连接密度等性能上进行提升.

表1给出了6G与5G的性能指标,与5G技术

表1 5G和6G技术的主要性能指标对比^[14-15]
Table 1 Comparison of main performance indexes of 5G and 6G technologies^[14-15]

性能指标	5G	6G
峰值数据速率	20 Gbit/s	≥1 Tbit/s
用户体验速率/(Gbit·s ⁻¹)	1	10
端到端时延	1 ms	10 ~ 100 μs
吞吐量	1 Gbit/s	1 Tbit/s
陆地覆盖率/%	约70	>99
连接密度/km ⁻²	10 ⁶	10 ⁷ ~ 10 ⁸
频谱效率/((bit·s ⁻¹)·Hz ⁻¹)	30	100
移动性/(km·h ⁻¹)	500	≥1 000
区域通信容量	10(Mbit·s ⁻¹)/m ²	1(Gbit·s ⁻¹)/m ²
可靠性/%	99.999 0	99.999 9

相比,6G 技术各方面性能都有不同程度的提高。在数据传输方面,峰值数据速率提高了 50 倍以上,时延降低了 90%~99%,吞吐量提高了约 1 000 倍;在网络的覆盖方面,6G 的覆盖率提高到 99% 以上,连接密度提高了 9~99 倍。基于 6G 性能的大幅提升,地面固定基础设施已无法满足用户需求,为此可在 5G 技术的基础上引入 AAN 技术。一方面,AAN 的多层结构给用户另外提供接入方式,为地面提供大容量的回程链路,提高视距传播概率,能够缓解流量拥塞,有效提升 6G 的速率、时延等性能;另一方面,利用 AAN 提供的空中接入链路,能够助力偏远地区通信网络的建设,增加用户密集区域的接入节点,同时增强信号的移动覆盖,显著提升 6G 覆盖率、连接密度、移动性等性能。AAN 的独特优势促进 6G 技术相关性能指标的增长,推动 6G 逐步发展为无处不在的智能信息网络,能够支持智能医疗^[16]、增强现实^[17]等高要求应用,是 6G 时代不可或缺的技术之一。

2 6G 空中接入网

地面网络通过集成 AAN 技术能够为空天地 3 层网络提供互联网服务。本节主要介绍 AAN 中卫星通信、HAPS 两种代表性技术,分析二者的优势、研究进展以及存在的问题,探讨二者在实现立体化全覆盖 6G 的过程中起到的作用。

2.1 卫星通信

6G 集卫星通信系统、空中平台和地面无线通信于一体,能够支持多样化的业务场景,提供差异化的网络服务。卫星通信系统位于几百甚至上万 km 的太空轨道上,以卫星作为中继站转发信号,可在多个地面站点以及用户之间进行通信。一般来说,卫星通信系统的覆盖范围广、抗毁性强、广播能力好,可提供定位、广播、传真等服务,如 Orbcomm 系统、Globalstar 系统等^[18]。近年来,低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星的部署数量呈爆发式增长,通信卫星领域呈现出低轨化分布特征。新兴的 LEO 卫星系统有“OneWeb”星座^[19]、“Kuiper”星座^[20]、“Starlink”星座^[21]、“虹云”星座^[22]等,它们由几百甚至上万颗卫星组成,可提供移动数据服务和宽带多媒体服务。

2.1.1 卫星通信研究现状

卫星通信系统的发展对 6G 大容量、广覆盖、高速率的要求创造了新的契机。首先,由大量卫星组成的星座可以更为全面地覆盖空天地多层空间,帮

助实现 6G 全球全域无线覆盖的目标;其次,应用卫星系统可以为用户提供接入服务,使用户不再完全依赖于地面基站,以减轻地面网络因用户日益增长的流量需求而导致的负载压力;最后,卫星通信集成地面无线通信网络,可以为地面基站、空中平台等接入节点提供高速多播回传服务,以及为飞机、车辆等移动性工具提供直接或补充的连接服务。卫星通信能够提供更广的接入范围和更多的接入节点,使 6G 技术在吞吐量、通信容量等性能上有所提升。此外,6G 时代的通信频段将在 5G 技术的基础上进一步扩大到太赫兹频段^[23],该频段具有超高速传输^[24]、低时延、在太空中不会产生传输损耗^[25]的特点。6G 网络下的卫星通信技术,具有更高的传输速率和更低的传输损耗、传播时延,与地面网络、HAPS 技术相集成,能够推进 6G 空天地一体化网络的构建,有助于实现 6G 网络“泛在连接”“全面覆盖”的目标。为了实现这一目标,航天业已经在发展辅助卫星通信改善地面网络局限性的新技术,在体系结构、频谱以及天线设计方面都有较好的进展^[26]。此外,移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)等新兴技术也推动了卫星-地面融合网络的进展,MEC 技术和人工智能(artificial intelligence, AI)算法的结合可以实现一种双边智能卫星-地面融合的网络架构^[27]。卫星-地面集成技术的发展,为地面、空中用户提供了额外的接入方式,能够实现更好的传输效果。

近年来,针对卫星通信系统的研究与部署已经有了诸多进展。在国外,美国 SpaceX 公司在 2020 年成功部署 833 颗“Starlink”卫星^[28],网速可达 50~150 Mbit/s;英国 OneWeb 公司成功部署 104 颗“OneWeb”星座卫星^[29],其单星容量达到 8 Gbit/s;俄罗斯国家航天集团公司开始建设“Sphere”星座,可提供宽带通信、机器对机器通信、侦察、导航等多种功能^[30];美国特超巨星公司推出“超智能航天器增强”卫星任务管理系统,旨在利用 AI 技术和云计算技术降低卫星任务管理成本,支持人为远程任务操控。在国内,2020 年 1 月成功发射银河航天首发星,可通过卫星终端为用户提供宽带通信服务;同年 7 月初,亚太 6D 通信卫星成功发射,通信容量达 50 Gbit/s,可满足海事通信、机载通信、车载通信、固定宽带接入等多种应用需求^[31];7 月底,北斗三号全球卫星导航系统正式开通,可提供导航定位和短报文通信^[32]等服务。从国内外的研究进展可以看出,现阶段卫星通信系统的研究和应用集中在通信、地面数据监测、导航等方面,并且卫星系统智能化是未

来的重要发展趋势. 在通信领域, 研究人员针对卫星与地面之间的接入网络, 主要从提升卫星系统性能、增加链路传输可靠性以及减轻地面网络流量负载等方面进行了研究.

2.1.2 卫星通信接入方案

将地面网络中的部分任务接入到卫星通信网络中进行数据分流, 是缓解地面网络流量负载的有效方法, 目前已有诸多研究成果. 文献[33-35]从业务定价、业务类型和回程容量3个方面探讨了不同的卫星网络接入方案. 文献[33]在基于超密集 LEO 卫星的卫星-地面网络场景中, 从运营商的角度考虑了将部分地面网络数据卸载到 LEO 卫星上进行卫星回程网络接入的方案. 此方案采用 Stackelberg 博弈方法, 依据运营商的成本和资费设计分流和定价机制, 通过激励卫星运营商和地面运营商协作实现数据分流. 除了运营商的收益, 基于 6G“以应用服务为中心”^[36]的网络架构需求, 还需要考虑接入方案对用户业务的影响. 文献[34]提出一种基于业务类型的接入方案, 从时延敏感性入手, 将超可靠低延迟通信 (ultra-reliable low latency communication, URLLC) 业务卸载到地面回程以提升传输时延性能, 而将增强型移动带宽 (enhanced mobile broadband, eMBB) 业务分流到卫星网络中满足其对传输带宽的要求. 对运营商成本、资费以及用户业务需求的关注, 能够促使运营商和用户以积极的态度面对卫星接入工作, 推动卫星接入网络的发展与应用, 同时, 提升系统的吞吐量、传输速率、时延等性能. 上述方案将卫星系统的回程容量视为定量, 实际上受到系统资源分配的影响, 卫星的回程容量会发生动态变化, 对系统的时延、频谱效率等性能产生不利影响. 文献[35]采用基于功率控制和梯度剪枝的交换匹配算法, 优化卫星网络的总回程容量以及总和速率, 最大化系统效率, 并实现了最优的业务分配方案.

与传统的地面网络相比, 卫星通信与地面网络相结合能够为用户提供更加快速、高效的服务. 然而, 卫星与地面距离较远, 卫星系统的发射功率有限且路径损耗较大, 为此, 文献[37-38]在卫星-地面网络中加入 HAPS 作为中继来增加地面和卫星之间传输链路的可靠性. 文献[37]研究了空地 3 层网络的上行链路传输, 以 HAPS 作为空中基站, 利用射频 (radio frequency, RF)、空分多址 (space division multiple access, SDMA) 以及自由空间光学 (free-space optical, FSO) 通信技术, 最大化了系统的遍历

总和速率. 该方案的研究是基于地面基站仍然可以提供网络连接的情况, 而 AAN 适用的重要场景之一就是地面网络失效的灾害环境. 文献[38]探究了灾害环境下的星空一体化网络中的地面人员和空中救援人员 2 层用户的关联和卸载决策问题. 该方案捕捉地空 2 层用户、HAPS 以及 LEO 卫星三者之间的三维映射关系, 采用基于局部搜索的三维超图匹配算法, 实现 3 层网络的互联互通, 满足灾害场景下的通信需求, 最大化系统的总和速率.

尽管卫星接入方法能够有效缓解地面网络面临的压力, 但是卫星通信系统是典型的资源受限系统, 随着业务量的不断增多, 卫星系统中的部分节点将不可避免地遭遇数据拥塞、碰撞、冲突的问题, 会导致数据损坏和丢失, 影响接入链路的吞吐量和传输可靠性. 针对该问题, 研究人员对卫星网络的随机接入方案进行了研究. 文献[39]采用基于随机预编码的随机接入技术, 在发射端对子帧中的分组进行预编码, 并在接收端采用基于最小均方误差的连续干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 检测算法对子帧中的重叠分组进行解码, 与传统方法相比, 具有更高的吞吐量性能. 该方案降低了数据传输过程中的碰撞概率, 优化了系统性能, 但是仅用冲突概率来表现接入方案的应用效果, 并没有明确的参数指标评估方案的传输可靠性. 文献[40]利用分组丢失率、可行通信参数和系统故障率量化网络可靠性. 该方案将软件无线电 (software-defined radio, SDR) 技术和增强型冲突解决 ALOHA (enhanced contention resolution ALOHA, ECRA) 协议相结合, 利用 SDR 技术提升卫星平台的信号处理和路由能力, 增强了网络灵活性和适应性, 提高了卫星上行链路的分组冲突方面的可靠性, 并降低了系统功耗. 在未来网络数据流量不断增长的情况下, 随机接入方案往往会受到访问规则和网络规模的限制, 影响组网性能, 因此, 文献[41]针对卫星网络在大规模并发访问测距的情况, 提出一种多目标抗碰撞算法, 联合优化测距信道数、测距时间和冲突概率, 根据组网需求匹配信道和节点数量, 能够提高访问过程中的时延性能, 降低碰撞概率. 综上, 卫星接入过程中数据碰撞问题的优化可以从以下 2 个方面考虑. 一是提高收发端对数据的处理能力, 例如: 利用编码技术保证数据传输的安全性; 结合 SIC 技术等消除数据传输过程中受到的干扰; 引入 SDR 技术等提高卫星平台的信号处理能力, 从而提高传输可靠性. 二是优化传输过程, 使信道中的节点组数量

达到较好的匹配状态, 提高传输效率, 降低冲突概率。

本文对卫星接入网络的相关研究进行了总结, 如表 2 所示。卫星和地面网络之间的互通对于缓解有限的地面容量带来的预期高负荷至关重要, 并且能够在原有网络的基础上提升系统的传输速率、时延、吞吐量等性能。运营商资费、业务类型、卫星回程容量等是影响卫星网络接入方案的重要因素。同时, 数据的冲突、碰撞问题是卫星接入过程中不可忽视的影响因素, 解决此问题一般从系统的收发端入手, 在发射端利用数据分组、功率分集传输的方法, 在接收端用 SIC 技术对分组解码, 消除接收过程中受到的干扰, 增强卫星系统的传输可靠性, 同时, 结合随机预编码、SDR 等技术来提升系统的吞吐量性能并降低系统能耗。基于此, 未来接入方案的设计

可以考虑以用户的业务需求为前提, 针对不同的通信场景对成本、资费、容量、速率、可靠性等因素进行折中, 以达到用户和运营商双方需求的平衡。在推进一体化网络架构发展的过程中, 通过部署 HAPS、UAV 等空中平台作为中继, 可以提高通信质量并保证链路可靠性。同时, 在网络传输数据量不断增加的情况下, 需要消除接入数据的碰撞对系统性能的影响。除了上述提高信号处理能力以及优化信道与节点匹配的方法, 还可以结合相控阵列天线等技术, 它们能够灵活控制天线波束的指向和形状, 同时, 对数据传输路径和时间进行规划安排, 实现快速有序的数据传输, 减少数据间的冲突, 再利用 SIC 技术和 SDR 技术降低卫星接入过程中的数据碰撞概率。此外, 在未来一体化的网络架构下, 还需要考虑网络的异构性和动态性。

表 2 卫星网络的接入方案
Table 2 Access schemes for satellite networks

场景	方法	特点	性能表现	文献
不同约束条件下 的卫星-地面接 入网络	Stackelberg 博弈模型	从运营商资费的角度设计分流方案, 平衡用户和运营商的需求	激励卫星-地面网络数据卸载	[33]
	业务分流方案	考虑了 URLLC 业务和 eMBB 业务 2 种异类流量的卸载	提高了网络可用性	[34]
	基于功率控制和梯度剪枝的交换匹配算法	考虑了回程容量的动态变化对接入网络的影响	优化了网络的总和速率	[35]
加入 HAPS 的卫 星接入网络	RF、SDMA 和 FSO 技术	地面以基于 SDMA 的 RF 链路连接 HAPS, HAPS 以 FSO 链路连接卫星	最大化系统遍历总和速率	[37]
	基于局部搜索的三维超图匹配算法	灾害环境下, 利用 HAPS 和卫星网络实现地面用户和空中救援用户的通信	最大化系统总和速率	[38]
卫星接入网络的 抗冲突性能优化	随机预编码方法与 SIC 检测技术结合	跨子帧进行 SIC 处理, 去除已经恢复的接收信号	提高了系统带宽利用率以及吞吐量	[39]
	SDR 技术与 ECRA 协议结合	利用分组丢失率、可行通信参数、系统故障率来量化网络可靠性	增强了网络适应性, 降低了系统功耗	[40]
	多目标防冲突算法	考虑物联网接入的测距过程对网络状态的影响, 可根据组网需求选择接入节点	提高了时延性能	[41]

2.1.3 卫星通信与 MIMO 技术

随着新兴技术的不断发展与应用, 用户对于卫星接入业务的多样性和系统服务质量 (quality of service, QoS) 提出了更高的要求。除了系统的容错率和可靠性, 还需要进一步提高传输速率、通信质量等性能。为此, 多输入多输出 (multiple input multiple

output, MIMO) 等技术被提出用于卫星接入系统中。MIMO 技术在收发两端之间建立多个并行的空间传输信道, 具有空间复用、空间分集和波束赋形的特性, 可以提高传输速率^[42]、系统容量^[43], 保证传输可靠性^[44]以及提升通信质量。最初 MIMO 技术的分集增益被用于降低雨衰现象对卫星系统性能的影响。

响^[45],随着 MIMO 技术的不断发展,其在卫星通信中也起到了更多的作用.文献[46]研究了一种基于 LEO 卫星的 MIMO 传输方法,将控制信号和数据信号分配到不同的信道,从而抵消多普勒频移的影响.此方案显著提升了系统下行链路容量,但是没有关注卫星系统与用户之间的接入情况.文献[47]在卫星下行链路中利用具有多个波束的 MIMO 来同时服务同一频率信道中的不同用户,并对发射信号进行预编码,以缓解多用户下行链路中波束间的干扰.该方案解决了卫星-地面网络上下行链路的带宽限制,提升了系统的吞吐量.上述 2 种方法研究了卫星下行链路中不同类型数据流的空间复用,而文献[48]从用户的业务需求考虑,提出了基于空间角度的用户分组算法.该方案将大规模 MIMO (massive MIMO, M-MIMO) 技术应用于全频率复用的 LEO 卫星通信系统中,根据业务需求对接入的用户端分组,每组用户使用相同的时间和频率资源,显著提高了 LEO 卫星通信系统的数据传输速率.除了上述空间复用特性的运用,文献[49]在卫星和关口站链路的切换算法中应用了 MIMO 技术的分集增益特性,在卫星和关口站之间形成多对多的关系,提高了系统

的通信质量. MIMO 技术的应用在提升卫星系统容量、吞吐量等性能的同时,系统的复杂度和成本也随之提高.针对这一问题,文献[50]结合多波束 (multi-beam, MB) 技术以简化 M-MIMO 在系统和卫星有效载荷级别的实现,同时,提出了基于混合整数二次规划的无线资源管理方法以实现更高的宽带卫星吞吐量.该方案在有效载荷中采用基于多级多维快速傅里叶变换的多级固定波束形成矩阵,通过有效的多级网络以及“分治”范式,将大问题划分为一组更容易解决的小问题,能够进一步降低系统载荷的复杂度.

本文对卫星与 MIMO 的相关研究进行了总结,如表 3 所示.卫星通信系统结合 MIMO 技术能够缓解卫星-地面链路之间的信道衰落影响,提升卫星-地面网络的容量、吞吐量、传输速率等性能.在此基础上,未来在空天地一体化网络中 MIMO 技术与卫星通信系统的结合可以进一步优化用户的调度方案,提高用户接入链路的性能,最大化用户接入卫星网络的效益.若进一步扩大 MIMO 技术的应用,未来还需要继续优化 MIMO 技术的复杂度,提升 MIMO 技术与卫星通信结合的可行性.

表 3 MIMO 技术应用于卫星通信系统

Table 3 Applications of MIMO technology in satellite communication systems

场景	方法	特点	性能表现	文献
	考虑卫星动态切换和多普勒频移的多卫星 MIMO 通信方案	LEO 终端连接到多颗卫星,可进行 MIMO 传输	提高系统容量	[46]
空间复用特性的运用	采用多波束天线和全频率复用的高吞吐量卫星宽带业务	MIMO 技术应用于馈线链路和多用户下行链路	解决链路带宽限制,提高吞吐量	[47]
	结合 M-MIMO 的全频率复用 LEO 系统传输方案	基于空间角度进行用户分组,并补偿多普勒频移	提高数据传输速率	[48]
空间分集特性的运用	融合 MIMO 技术的卫星切换策略	卫星和关口站之间形成多对多关系	缓解信道衰落影响,提高通信质量	[49]
MIMO 应用性能的优化	基于 MB 技术和混合整数二次规划的宽带 LEO M-MIMO 系统	简化了 M-MIMO 在卫星上的载荷复杂度	提高宽带吞吐量	[50]

2.2 HAPS 通信

地面通信系统虽然建设完善,技术成熟,但是在面临自然灾害等不可抗力因素导致基站损毁的情况时,无法保证通信服务且在环境恶劣地区难以部署基站,限制了网络覆盖范围.卫星通信系统拥有广泛的覆盖范围和较强的抗毁性,但是距离地面较远,存在通信时延大^[51]、实施成本高的不足.空中基站位于地面和卫星之间,具有很多突出特点,因而受到了研究人员的广泛关注.

2.2.1 HAPS 研究进展

HAPS 通信系统位于距地面 20 ~ 50 km 的平流层中,通常以飞艇、飞行器作为空中基站,可以为用户提供网络覆盖和数据传输服务.现有的 HAPS 通信系统的相关项目主要用于提高偏远农村地区的网络覆盖、应急通信等方面. Google 公司 X 实验室推出了 Project Loon 计划^[52],利用发射在平流层的氦气球向偏远地区提供网络连接,希望实现全球互联互通. Facebook 公司开发的 Aquila 无人机^[53]项目,

计划使用激光和无线电连接形成高速通信网络,在高空提供用户能搜寻到的网络信号并为偏远地区提供网络连接. 中国移动开展高空应急基站的研究工作^[54],通过氦气艇搭载小型通信设备,规避了地形起伏的遮挡,实现了远距离的网络覆盖,同时可解决灾区语音通信问题. HAPSMobile 公司提出的 Sunlider 项目^[55],于 2020 年完成了多次试飞测试,并成功与地面智能手机进行了视频通信,推动了 HAPS 技术的发展.

随着 HAPS 技术的逐步发展,研究人员对 HAPS 的研究应用不再局限于提高网络覆盖率,开始关注 HAPS 与其他网络层次的联合. 近年来,HAPS 的研究主要集中在与地面和卫星网络的接入、地空传播模型^[56-57]、能源续航^[58-59]等方面. 在 6G 空天地一体化网络架构中,HAPS 作为接入基站能够增加用户可接入节点,弥补卫星-地面网络在时延、可靠性、成本等方面的不足,并进一步提高网络的性能. 下面探讨 HAPS 接入网络的相关研究,包括 HAPS 与地面和卫星网络之间的接入方案、对系统性能的优化以及 HAPS 在接入过程中的切换策略.

2.2.2 HAPS 接入网络架构

为了应对大规模突发事件以及自然灾害等应急通信场景,文献[60]提出了一种混合的空天地网络. HAPS 以网状网络互相连接以实现更大的区域覆盖,卫星在地面节点和 HAPS 之间建立远程中继连接,将覆盖网络接入骨干交换网络. 这一网络架构有效缓解了卫星-地面网络的巨额成本压力并提高了通信系统的可靠性. 除了在应急通信中的应用,HAPS 还能满足高移动通信的需求,文献[61-62]探究了车载网络在 HAPS 中接入的场景. 文献[61]提出了一种空地一体化车辆网络体系结构,HAPS 以广播的方式推送信息,同时结合车载缓存技术和网络切片方法实现访问性能的优化和资源管理. 该方案减轻了地面交通的网络负载,降低了车辆网络延迟并提高了内容访问率. 在 HAPS 接入车载网络的基础上,文献[62]进一步结合软件定义网络 (software defined network, SDN) 实现流量的灵活控制,为网络拥塞情况下的车辆提供可靠的连接. 该方案减轻了地面网络的负担,并且利用 SDN 和 AI 算法优化系统在各个场景下的资源分配方案,提高了系统吞吐量,增强了网络适应性. 在上述车载网络架构中,HAPS 为车辆提供了新的网络接入方式,减轻了卫星网络与地面网络的负载压力,有助于实现交通信息的实时感知和智能决策.

此外,HAPS 还可以作为空中基站接入卫星和地面网络中,提供通信服务. 文献[63]提出了一种将 HAPS 作为超级宏基站的设想,在卫星和地面之间使用 HAPS 系统作为基站提供连接,同时结合 MIMO 技术,获得了更高的系统容量并降低了传播时延. HAPS 用作宏基站,能够在提高网络覆盖范围的同时,满足用户对于时延、容量、计算等性能的超高性能要求. 文献[64]提出了一种将 HAPS 系统应用在航空及卫星网络中进行计算卸载的想法. HAPS 具有的准静态位置和覆盖范围广的特点,使其可以承担卫星网络或其他空中节点的计算任务,相比于将计算卸载到地面网络中,可以减少响应延迟和由于卫星或 UAV 移动性而造成的卸载中断问题.

HAPS 和卫星网络都具有自己独特的优势,能够在 6G 时代提供更好的通信连接服务,为此,研究人员针对 HAPS 与卫星的相互结合展开了研究. 文献[65]使用 HAPS 来辅助从智能设备到 LEO 卫星的数据传输,提出一种两阶段联合资源分配和 HAPS 部署算法. 通过求解 HAPS 部署位置,进一步优化 HAPS 与卫星之间的信道增益,在可接受的算法复杂度下优化了系统传输速率,降低了系统功耗. 除了 HAPS 的部署会影响与卫星连接的系统增益,文献[66]从卫星与 HAPS 连接的稳定性考虑,提出了基于 HAPS 海量接入和卫星回程协同的优化系统模型. 该方案中采用基于盖尔-沙普利的两两稳定匹配算法,减轻了卫星与 HAPS 之间动态连接的复杂性,提高了系统连接的可靠性,保证了卫星收益和服务用户数.

卫星系统与 HAPS 系统的有效结合,推动了空天地一体化网络的发展,能够显著提升未来网络的传输性能,基于此,文献[67]研究了在混合 FSO/RF 卫星-地面网络之间设置 HAPS 作为中继站的一体化网络的传输性能. 该方案中采用了一种基于自适应组合的交换方式,对比了单跳和双跳混合系统的上下行链路的传输性能,表明采用 HAPS 作为中继站能够显著提高上行卫星通信系统在高信噪比区域的可靠性. 由于一体化网络架构集成了地面网络与 AAN,会发生网络覆盖范围重叠的情况,为此,文献[68]提出基于强化学习的空天地一体化网络设计与优化框架,利用分布式管理架构和中心式控制方式混合的分层控制架构,增强空天地一体化网络对异构复杂环境的适应度. HAPS 在卫星和地面之间作为基站或中继能够提高传输可靠性,缓解网络压力,在此基础上,可以用强化学习等 AI 算法,增强一

体化网络在异构环境下的适应性和稳定性,同时 AI 技术可实现智能的网络接入选择,根据组网信息和用户需求选择接入网络,提升了一体化网络的性能。

随着一体化网络架构的研究与发展,卫星、HAPS、地面的互联互通为用户提供了其他的接入方案,同时空天地三者的协同合作能够为智能时代提供更多的可能. 文献[69]针对列车通信网络的需求,联合空天地3层网络体系架构,提出了基于SDN的铁路系统,将天基、空基网络,结合专网、公网形成多模融合网络,保证西部偏远地区的铁路沿线得到有效覆盖,确保数据互联互通和超可靠传输. 此外,在车辆网络中,可通过卫星为车辆提供软件更新^[62],HAPS等空中平台作为基站为车辆提供灵活可靠的网络连接,从而实现一体化网络中空天地不同层次的协同配合. 综上,为了实现卫星、地面和HAPS三者之间的互联互通,一方面,HAPS可作为空中基站与卫星、地面网络相结合,缓解卫星-地面网络上行链路流量负载压力,提高一体化网络的信号覆盖强度;另一方面,HAPS作为通信中继传送、接收数据,可为卫星和地面基站提供回程链路,增加

用户接入链路,优化一体化网络的QoS. 同时,可结合SDN技术驱动空天地3层网络设备与功能的运行,获取、整合数据信息并控制数据流向,再引入MEC等技术进行协同管理,在边缘节点进行数据收集处理和就近共享,缓解一体化网络大规模数据流量对核心网造成的压力.

本文对HAPS与一体化架构的研究进行了总结,如表4所示. HAPS可以为用户提供接入链路或是辅助用户进行计算卸载,减轻了卫星与地面网络的流量负载,缓解了卫星部署的成本压力. 随着空天地一体化网络架构的提出,HAPS等空中平台需要与卫星、地面网络建立连接,从而实现空天地3层网络的互联互通. 通过优化HAPS的部署位置以及HAPS与卫星之间的匹配稳定性,能够在HAPS与卫星之间建立可靠的连接. 在此基础上,用户从HAPS转接卫星网络,可以提高卫星、地面之间上行传输的可靠性. 此外,引入AI算法,并在卫星、地面和HAPS之间建立稳定的链接,协助优化一体化网络中用户的接入选择,以提高系统QoS和用户体验质量(quality of experience, QoE). 总体而言,HAPS

表4 HAPS与一体化网络结构

Table 4 HAPS and integrated network structure

场景	网络结构	特点	性能表现	文献
应急通信	混合的空天地网络	HAPS 扩大网络覆盖范围,并 利用卫星建立远程中继连接	减轻系统成本压力,提高 系统可靠性	[60]
车载网络	基于网络切片和车辆缓存的空 地一体化	HAPS 以广播的形式为车辆推 送信息	优化资源调配,强化系统 性能	[61]
	基于 SDN 和 AI 算法的空天地 一体化	不同场景下,平衡获取网络状 态的开销和信令开销	提高系统吞吐量	[62]
HAPS 提供通信 服务	基于 HAPS 超级宏基站的无线 接入体系架构	在计算卸载、瞬时网络需求等 方面具有较大的优势	提高系统吞吐量,降低 时延	[63]
	用于计算卸载的空天地网络	HAPS 携带更先进的计算服务 器,具有较强的计算能力	减少卸载中断,降低时延	[64]
卫星通信与 HAPS 的结合	基于卫星-HAPS-地面一体化 的两阶段联合优化网络	提出了一种较低复杂度的 HAPS 部署算法	优化系统传输速率,降低 系统功耗	[65]
	基于 HAPS 海量接入与卫星回 程协同的空天地一体化	利用两两稳定匹配方法优化卫 星和 HAPS 的连接	优化卫星收益和服务用 户数	[66]
空天地3层网络 的一体化	HAPS 作为中继加入混合的 FSO/RF 卫星-地面网络	对比研究了 HAPS 在一体化网 络中的积极影响	提高卫星系统上行传输的 可靠性	[67]
	基于强化学习的空天地一体化 网络架构	采用分层混合控制架构和底层 分布式管理,实现用户接入;上 层中心控制资源分配	增强网络的适应性和稳 定性	[68]
	基于 SDN 的空天地一体化	针对铁路系统的通信需求进行 一体化网络的设计	提高网络覆盖的有效性和 可靠性	[69]

最开始的提出是为了解决偏远地区没有网络覆盖的问题,随着网络流量的增加,研究人员开始将 HAPS 应用在通信连接方面,能够增加通信链路,降低传输时延,减轻网络负载,由此推动了一体化网络架构的发展与应用。对于 6G 一体化的网络架构,HAPS 可作为空中基站或是通信中继连接卫星网络和地面通信系统,并结合 SDN 等技术协同控制一体化网络,通过引入 MEC 技术、缓存技术等缓解大规模流量传输给核心网造成的压力。最后,除了考虑 HAPS 在未来网络中的应用,同时还需要进一步考虑其性能的优化与提升。

2.2.3 HAPS 与无线缓存

近年来,网络边缘的内容缓存被提出并用于以内容为中心的蜂窝网络^[70],以降低内容获取时延和缓解回程链路流量负载压力。为进一步提升系统性能并保证用户 QoE,研究人员将此技术应用于 UAV 等空中基站。文献[70]以最大化用户 QoE 为目标,结合用户内容偏好研究了 UAV 位置部署、缓存放置和用户关联的联合优化问题,在内容访问时延和回程流量分流方面取得了不错的性能。为了进一步满足用户需求,文献[71]从缓存内容的流行度入手研究 UAV 网络的缓存策略。该方案首先预测单个用户的内容偏好,在此基础上利用聚类 and 分簇的方法部署 UAV,最后,采用贪婪算法决定缓存放置方案,在缓存命中率和平均传输时延性能上均优于对比算法。在已经建立的 UAV 缓存网络中,文献[72]对时延性能进行了分析与优化,建立了边缘缓存网络下的多 UAV 动态飞行网络模型,利用随机微分博弈模型解决时延优化问题,在消耗相同能量的情况下达到更小的时延。

对于缓存方案的研究,需要从用户对于缓存内容的满意度考虑,只有当大量用户都需要使用缓存的内容时,缓存技术的应用才大有可为,并且,UAV 的动态性使其部署和运行轨迹也影响着缓存方案的设计。相比于 UAV 等低空平台,HAPS 相对静态、容量更大、续航更久,并且与地面距离较大,受到地面网络干扰较小,与无线缓存技术的结合具有很大的发展前景。基于 UAV 网络缓存技术和 HAPS 一体化网络架构的研究,可以得出,HAPS 结合无线缓存技术,可以直接为用户提供所需内容,能够进一步降低用户获取内容的延迟,减轻 HAPS 上行链路的流量负载并降低卫星的回程链路负荷,同时,可以将缓存技术用于用户设备间,采用与 HAPS 不同的缓存策略,当用户设备中无法获取内容时再向 HAPS 层

发送请求,能够实现更高的缓存命中率,降低系统时延。

2.2.4 HAPS 的切换策略

HAPS 与卫星、地面网络的一体化架构能够有效减轻卫星网络和地面网络的压力,优化系统性能,但受到大气湍流和用户移动性两方面的影响,用户接入链路的稳定性会有所降低。因此,HAPS 的切换策略对于未来多层网络的系统 QoS 和用户 QoE 有着极其重要的影响,研究人员对其进行了诸多研究。文献[73]中验证了 HAPS 的不稳定性对于切换概率的影响,指明合适的切换策略可以有效地降低切换的掉话率,能够保证通信的 QoS。在此基础上,文献[74]中 HAPS 搭载可操纵天线,根据自身姿态信息实现一定的天线指向调整,保证稳定的天线中心指向,同时,预测用户端接收信号强度,辅助进行切换判决。该方案降低了用户的非必要切换,有较低的平均掉话次数、平均切换次数以及链路失效率,同时,对系统中高速运动的用户也具有适用性。

除了 HAPS 的不稳定性,还需要考虑用户的移动性对 HAPS 接入网络性能的影响。文献[75]提出了基于协同传输的自适应切换方案,选择信道增益较高的平台节点进行协同传输。该方案结合信道增益来判定用户与 HAPS 的切换,减少了频繁切换造成的业务中断时间,而文献[76]是从用户的接收信号强度入手,预测移动用户在给定时刻的接收信号强度,根据信号强弱决定用户的切换,有效减少了不必要的切换次数,降低了无线链路失效率。除了上述针对 HAPS 与地面用户之间连接的研究,文献[77]进一步考虑 HAPS 和卫星之间的连接,研究了 LEO-HAPS 联合网络下的切换方案,提出一种动态切换策略来优化切换时刻和资源分配。这一策略利用拉格朗日对偶性求解切换时刻和资源分配构成的非凸优化问题,在时延、信令开销、丢包率和功耗等方面具有很好的性能。

本文对 HAPS 的切换策略研究进行了总结,如表 5 所示。在 6G 卫星-HAPS-地面多层网络下,合适的切换策略能够减少能源损耗、优化网络接入性能、提高系统 QoS 以及用户 QoE。用户接入信号强度是影响 HAPS 切换策略的主要因素,通过固定 HAPS 中心天线指向缓解气流影响,再通过预测用户移动轨迹、估算用户的信号强度来减轻用户移动对接入效果的影响,能够实现 HAPS 通信系统的最优切换策略并优化系统通信性能。基于此,针对

HAPS 的不稳定性,可通过调整波束指向减轻大气湍流的影响;针对用户的移动性,在未来业务多样化的情况下,可以通过业务分级的方式,量化不同业务类型的网络需求,首先预测用户轨迹并选择接入的节点,然后依据业务优先级决定接入顺序,对不同的

业务需求设置不同的切换阈值以更好地满足不同用户的需求.此外,HAPS 的部署方案会影响覆盖小区,从而影响其切换策略,可以参考博弈论的思想协调不同区域用户与 HAPS 之间的连接,联合优化 HAPS 部署方案与切换策略.

表 5 HAPS 的切换策略
Table 5 Handover strategies of HAPS

场景	方法	性能表现	文献
考虑 HAPS 的不稳定性	验证 HAPS 不稳定性对切换策略的影响	降低 HAPS 切换的掉话率	[73]
	调整 HAPS 天线的中心指向,结合用户端信号强度进行切换判决	减少不必要切换,降低平均掉话次数和链路失效率	[74]
考虑用户移动性	引入协作分集增益,由终端移动性和信道增益决定切换决策结果	降低链路中断概率,减少服务中断时间	[75]
	预测移动用户的给定时刻信号强度,决定切换方式	减少不必要切换次数,降低链路失效率	[76]
考虑 HAPS 与卫星网络的结合	利用拉格朗日对偶性,设计适用于 LEO-HAPS 系统的动态切换策略	优化切换时刻、系统时延、信令开销、丢包率、功耗等性能	[77]

3 问题与展望

作为还在研究开发中的无线通信技术,6G 技术存在着许多待解决的问题以及在研究中需要不断攻克的难题.本节对 6G 技术下卫星通信的数据碰撞问题和 HAPS 系统的缓存放置策略问题进行了探讨,并对未来的研究方向进行了展望.

3.1 存在的问题

基于文中对卫星和 HAPS 两种 AAN 技术的研究进展的阐述,对 2 种通信方式在未来应用过程中存在的问题进行了分析.

1) 卫星接入过程中的数据碰撞问题.在 6G 时代,大量卫星组成星座部署在太空中,这使得卫星系统能够为地面网络提供更多的接入链路,并进行数据分流工作,实现业务的合理分配和处理.但是,由于卫星系统覆盖面积增大以及服务的用户终端数量增多且卫星接入的频谱资源有限,海量接入用户之间的资源竞争极有可能导致传输和接收过程中发生数据碰撞的问题.

2) HAPS 系统中的无线缓存放置策略问题.与地面缓存不同的是,空中平台具有移动性,结合缓存技术能快速适应大规模突发通信需求,提供可靠的网络连接,满足用户需求.现有的缓存技术多用于低空 UAV,而 HAPS 与 UAV 在工作高度、系统容量、运行方式等多个方面均有差异,HAPS 的覆盖用户

数量、能够存储的内容都远远多于 UAV,因此,HAPS 通信网络中会发生用户需求不同、内容偏好差异过大的情况,使得 HAPS 的缓存方案设计面临着较大的挑战.

3.2 研究方向展望

针对上述卫星与 HAPS 应用过程中存在的问题,本文提出一些可行的解决方案,并基于上文所阐述的研究进展对其未来发展进行展望.

1) 针对卫星接入过程中存在的数据碰撞问题,可以从两方面考虑.一方面是在发生碰撞后消除影响、恢复数据,例如上文提到的 SIC 方法,或是利用前向纠错等方法在接收端恢复出错的数据.另一方面是减少数据碰撞的概率,例如以 MIMO 为代表的多天线技术,其波束赋形特性能够增强信号传输的方向性,使数据向特定方向传输,可避免数据全方向传播所受到的干扰.未来可采用波束赋形和 MB 技术,实现数据的多路低干扰传输,再结合机器学习等 AI 算法,对其他同步发送或异步发送的数据进行预测和控制,从而最小化数据碰撞概率.

2) 针对 HAPS 系统缓存策略问题的研究,需要从缓存命中率来考虑.一方面,HAPS 的覆盖人口众多,内容差异化大,因此,可以考虑其与低空层飞行器相结合,利用低空飞行器针对小范围用户需求进行缓存,HAPS 为其范围内的用户提供内容补充;另一方面,对于用户偏好模型的建立,可采用 AI 算法,

提取用户历史内容偏好并划分重要性. 在用户终端、HAPS 端、低空飞行器处都可以运用 AI 算法. 各处的算法互相融合, 最后将结果汇总到 HAPS 端, 根据内容重要性、各处存储空间大小等因素决定缓存放置方案, 以提高缓存命中率. 此外, 可结合地区用户和内容的分布等特点考虑 HAPS 的部署方案, 联合优化 HAPS 的部署方式与缓存方案, 实现低成本且高效缓存方案.

4 结论

1) 面向未来 6G 网络的全面覆盖、泛在连接需求, 地面网络、卫星通信以及 HAPS 三者的集成能够形成互补关系, 有助于构建空天地一体化的网络架构, 可为用户提供无感知的一致性服务, 保证网络的韧性和鲁棒性以及资源的合理运用.

2) 卫星通信能够提高网络覆盖, 为用户提供除地面基站以外的接入链路, 有效缓解地面网络的流量负载压力. 为解决卫星通信的信道衰落影响, 可应用 MIMO 技术, 同时, 提升系统的容量、吞吐量、通信质量等性能.

3) HAPS 具有部署灵活、成本低、时延小的特点, 可在空天地一体化网络中提供中继连接或是空中基站接入服务, 能够在地面网络和卫星网间起到较好的承接作用, 补充卫星-地面网络的不足. 选择合适的切换策略能够提高 HAPS 的通信质量, 降低链路失效率. HAPS 与无线缓存技术的结合, 能够进一步提升网络容量、时延性能, 具有较好的发展前景.

参考文献:

[1] SAARNISAARI H, DIXIT S, ALOUINI M S, et al. 6G white paper on connectivity for remote areas[R]. Oulu: University of Oulu, 2020.

[2] LATVA-AHO M, LEPPANEN K, JUNTTI M, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[R]. Oulu: University of Oulu, 2019.

[3] LIU G Y, HUANG Y H, LI N, et al. Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030[J]. *China Communications*, 2020, 17(9): 92-104.

[4] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. *中国科学(信息科学)*, 2019, 49(8): 963-987.

ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2019, 49(8): 963-987.

(in Chinese)

[5] 3rd Generation Partnership Project. Technical specification group radio access network: study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38. 811 V15. 4. 0 [S/OL]. [2021-01-03]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.811/.

[6] 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.

[7] 中国移动研究院. 2030+ 技术趋势白皮书[R/OL]. [2021-01-23]. <https://www.vzkoo.com/doc/25749.html>.
China Mobile Research Institute. 2030+ technology trends white paper [R/OL]. [2021-01-23]. <https://www.vzkoo.com/doc/25749.html>. (in Chinese)

[8] WANG Q M, ZHANG H, WANG J B, et al. Joint beamforming for integrated mmWave satellite-terrestrial self-backhauled networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 9103-9117.

[9] LI J, XUE K P, WEI D S L, et al. Energy efficiency and traffic offloading optimization in integrated satellite/terrestrial radio access networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(4): 2367-2381.

[10] ZHANG G B, HAN Z, XIN H. Power control for NOMA HAP-UAV integrated aerial access networks[C]//2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.

[11] HUANG X J, ZHANG J A, LIU R P, et al. Airplane-aided integrated networking for 6G wireless: will it work?[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 84-91.

[12] CAO X L, YANG B, YUEN C, et al. HAP-reserved communications in space-air-ground integrated networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 8286-8291.

[13] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28-41.

[14] ZHANG S Q, XIANG C L, XU S G. 6G: connecting everything by 1000 times price reduction[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2020, 1: 107-115.

[15] TARIQ F, KHANDAKER M R A, WONG K K, et al. A speculative study on 6G [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 118-125.

[16] CHOWDHURY M Z, SHAHJALAL M, AHMED S, et al. 6G wireless communication systems: applications,

- requirements, technologies, challenges, and research directions[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 957-975.
- [17] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(3): 55-61.
- [18] 王艳峰, 谷林海, 刘鸿鹏. 低轨卫星移动通信现状与未来发展[J]. *通信技术*, 2020, 53(10): 2447-2453. WANG Y F, GU L H, LIU H P. Status quo and future development of LEO satellite mobile communication[J]. *Communications Technology*, 2020, 53(10): 2447-2453. (in Chinese)
- [19] HENRY C. OneWeb's first six satellites in orbit following Soyuz launch [EB/OL]. [2021-02-13]. <https://spacenews.com/first-six-oneweb-satellites-launch-on-soyuz-rocket/>.
- [20] 纪凡策. “柯伊柏”星座介绍及与其他星座对比分析[J]. *国际太空*, 2020(12): 27-31. JI F C. The introduction of “Kuiper” constellation and comparative analysis with other constellations[J]. *Space International*, 2020(12): 27-31. (in Chinese)
- [21] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink 第二代系统介绍[J]. *卫星与网络*, 2020(12): 62-65. LIU S J, XU F J, LIU L X, et al. Introduction to the second generation system of “Starlink” [J]. *Satellite & Network*, 2020(12): 62-65. (in Chinese)
- [22] 陈静. 虹云工程首星[J]. *卫星应用*, 2019(3): 77. CHEN J. The first star of Hongyun project[J]. *Satellite Application*, 2019(3): 77. (in Chinese)
- [23] SARIEDDEEN H, SAEED N, AL-NAFFOURI T Y, et al. Next generation terahertz communications: a rendezvous of sensing, imaging, and localization [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(5): 69-75.
- [24] 魏克军. 全球 6G 研究进展综述[J]. *移动通信*, 2020, 44(3): 34-36, 42. WEI K J. Review of global 6G research progresses[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(3): 34-36, 42. (in Chinese)
- [25] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述[J]. *通信学报*, 2020, 41(5): 168-186. XIE S, LI H R, LI L X, et al. Survey of terahertz communication technology [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(5): 168-186. (in Chinese)
- [26] GIORDANI M, ZORZI M. Satellite communication at millimeter waves: a key enabler of the 6G era[C]//2020 International Conference on Computing, Networking and Communications. Piscataway: IEEE, 2020: 383-388.
- [27] ZHANG J X, ZHANG X, WANG P, et al. Double-edge intelligent integrated satellite terrestrial networks [J]. *China Communications*, 2020, 17(9): 128-146.
- [28] 张鑫伟, 付郁. 2020 年全球航天发射统计分析[J]. *国际太空*, 2021(2): 18-23. ZHANG X W, FU Y. Statistical analysis of global space launch in 2020[J]. *Space International*, 2021(2): 18-23. (in Chinese)
- [29] 纪凡策. 2020 年国外通信卫星发展综述[J]. *国际太空*, 2021(2): 36-41. JI F C. A summary of the development of foreign communication satellites in 2020 [J]. *Space International*, 2021(2): 36-41. (in Chinese)
- [30] 俄罗斯卫星通讯社. 俄航天国家集团总裁: 将于 2020 年开始为“球体”卫星星座面貌定形[EB/OL]. [2021-03-01]. <http://sputniknews.cn/russia/201912161030245986/>.
- [31] 卫星应用编辑部. 2020 年中国卫星应用十大事件 [J]. *卫星应用*, 2021(1): 20-22. Editorial Department of Satellite Application. Top ten events of China's satellite applications in 2020 [J]. *Satellite Application*, 2021(1): 20-22. (in Chinese)
- [32] 武中奇. 大众手机成功实现北斗三号短报文通信功能 [EB/OL]. [2021-04-04]. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202105/t20210524_22379.html.
- [33] DENG R Q, DI B Y, CHEN S Z, et al. Ultra-dense LEO satellite offloading for terrestrial networks: how much to pay the satellite operator? [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(10): 6240-6254.
- [34] ABDERRAHIM W, AMIN O, ALOUINI M S, et al. Latency-aware offloading in integrated satellite terrestrial networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 490-500.
- [35] DI B Y, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 47-62.
- [36] 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. (in Chinese)
- [37] HUANG Q Q, LIN M, ZHU W P, et al. Uplink massive access in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2413-2426.
- [38] ZHANG L, ZHANG H L, GUO C, et al. Satellite-aerial integrated computing in disasters: user association and offloading decision [C] // 2020 IEEE International

- Conference on Communication. Piscataway: IEEE, 2020; 554-559.
- [39] SU J R, REN G L, WANG Q W, et al. Randomly pre-coded packets based random access scheme for IoT-oriented satellite networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 221148-221161.
- [40] JUNG S, CHOI J P. Reliability of small satellite networks with software-defined radio and enhanced multiple access protocol [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(3): 1891-1902.
- [41] HE Y Z, LIU Y, JIANG C X, et al. Multiobjective anti-collision for massive access ranging in MF-TDMA satellite communication system [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(16): 14655-14666.
- [42] 刘燕都, 王元钦, 焦义文, 等. 空间信息传输中的多天技术综述[J]. *电讯技术*, 2020, 60(3): 350-357.
LIU Y D, WANG Y Q, JIAO Y W, et al. A survey of multiple antenna technology in space-based information transmission[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(3): 350-357. (in Chinese)
- [43] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication-the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. *China Communications*, 2020, 17(12): 156-171.
- [44] CHATTOPADHYAY J, RAO S P V S. Task identification in massive MIMO technology for its effective implementation in 5G and satellite communication[C]//2020 International Conference on Communication and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2020; 268-271.
- [45] HODGE D B. An improved model for diversity gain on earth-space propagation paths[J]. *Radio Science*, 1982, 17(6): 1393-1399.
- [46] GOTO D, SHIBAYAMA H, YAMASHITA F, et al. LEO-MIMO satellite systems for high capacity transmission [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.
- [47] SCHWARZ R T, DELAMOTTE T, STOREK K U, et al. MIMO applications for multibeam satellites [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2019, 65(4): 664-681.
- [48] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [49] FENG L, LIU Y F, WU L, et al. A satellite handover strategy based on MIMO technology in LEO satellite networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(7): 1505-1509.
- [50] ANGELETTI P, DE GAUDENZI R. A pragmatic approach to massive MIMO for broadband communication satellites[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 132212-132236.
- [51] 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.
- [52] NAGPAL L, SAMDANI K. Project loon: innovating the connectivity worldwide[C]//2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2017: 1778-1784.
- [53] D'OLIVEIRA F A, DE MELO F C L, DEVEZAS T C. High-altitude platforms-present situation and technology trends [J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2016, 8(3): 249-262.
- [54] 李行政, 张冬晨, 朱禹涛. HAPS 通信系统研究现状及展望[J]. *电信网技术*, 2016(3): 17-22.
LI X Z, ZHANG D C, ZHU Y T. Research and prospect of high altitude platform station [J]. *Telecommunications Network Technology*, 2016(3): 17-22. (in Chinese)
- [55] HAPSMobile Inc. HAPSMobile successfully completes latest test flight of its unmanned aircraft designed for stratospheric telecommunications platform systems [EB/OL]. [2021-02-28]. https://www.hapsmobile.com/en/news/press/2020/20201008_01/.
- [56] SUZUKI H. HAPS to ground propagation model considering general terrestrial path [C] // 2020 International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2021: 683-684.
- [57] OMOTE H, KIMURA S, LIN H Y, et al. HAPS propagation loss model for urban and suburban environments [C] // 2020 International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2021: 681-682.
- [58] ZHOU D, GAO S, LIU R Q, et al. Overview of development and regulatory aspects of high altitude platform system[J]. *Intelligent and Converged Networks*, 2020, 1(1): 58-78.
- [59] DUDEK M, LIS B, RAZNIAK A, et al. Selected aspects of designing modular PEMFC stacks as power sources for unmanned aerial vehicles[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 675-701.
- [60] WANG Y, XU Y C, ZHANG Y, et al. Hybrid satellite-aerial-terrestrial networks in emergency scenarios: a survey[J]. *China Communications*, 2017, 14(7): 1-13.

- [61] 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.
- [62] WU H Q, CHEN J Y, ZHOU C H, et al. Resource management in space-air-ground integrated vehicular networks: SDN control and AI algorithm design [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(6): 52-60.
- [63] ALAM M S, KURT G K, YANIKOMEROGLU H, et al. High altitude platform station based super macro base station constellations [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(1): 103-109.
- [64] KURT G K, KHOSHKHOLGH M G, ALFATTANI S, et al. A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 729-779.
- [65] ZHU C Y, LI Y T, ZHANG M Q, et al. Optimal HAP deployment and power control for space-air-ground IoRT networks [C] // 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2021: 1-7.
- [66] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, 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.
- [67] SHAH S, SIDDHARTH M, VISHWAKARMA N, et al. Adaptive-combining-based hybrid FSO/RF satellite communication with and without HAPS [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 81492-81511.
- [68] 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. (in Chinese)
- [69] 滕颖蕾, 李鑫, 王剑, 等. 基于SDN的铁路系统空天地融合网络架构 [J]. *物联网学报*, 2020, 4(3): 30-41.
TENG Y L, LI X, WANG J, et al. SDN enabled space-terrestrial integrated network architecture of railway system [J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(3): 30-41. (in Chinese)
- [70] ZHANG T K, WANG Y, LIU Y W, et al. Cache-enabling UAV communications: network deployment and resource allocation [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(11): 7470-7483.
- [71] 任佳智, 田辉, 范绍帅, 等. 基于用户偏好预测的无人机部署和缓存策略 [J]. *通信学报*, 2020, 41(6): 1-13.
REN J Z, TIAN H, FAN S S, et al. UAV deployment and caching scheme based on user preference prediction [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(6): 1-13. (in Chinese)
- [72] LI L X, WANG M, XUE K Y, et al. Delay optimization in multi-UAV edge caching networks: a robust mean field game [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 808-819.
- [73] WANG X P, LI L T, ZHOU W Y. The effect of HAPS unstable movement on handover performance [C] // 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [74] 王晓鹏. 高空平台通信系统中的切换技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
WANG X P. Research on handover technology in high altitude platform communication system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [75] HE P F, CHENG N P, NI S Y, et al. An adaptive handover scheme based on cooperative transmission from high altitude platform stations [C] // 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway: IEEE, 2017: 1306-1310.
- [76] HE P F, CHENG N P, NI S Y. Improved LMS predictive link triggering for handover in HAPS communication system [C] // 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2016: 1-5.
- [77] LI K L, LI Y T, QIU Z K, et al. Handover procedure design and performance optimization strategy in LEO-HAP system [C] // 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2019: 1-7.

(责任编辑 梁洁)