



专题：空天地一体化通信技术

面向空天地海一体化的卫星通信关键技术研究

张更新^{1,2}, 廖磊瑶^{1,2}, 何元智³

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学空天地海通信技术一体化研究院, 江苏 南京 210003;

3. 中国人民解放军军事科学院, 北京 100091)

摘要: 构建空天地海一体化网络是6G的愿景之一, 也是实现“万物智联”的重要手段。卫星通信具备全球覆盖、广域连接能力, 是未来空天地海一体化网络的关键要素。首先, 讨论空天地海一体化网络的基本架构和发展现状, 介绍面向空天地海一体化网络的卫星通信技术; 然后, 分析空天地海一体化网络场景下卫星通信的若干关键技术, 包括体系架构、空中接口、资源调度、网络切片和组网管理等技术; 最后, 讨论空天地海一体化发展趋势下, 卫星通信面临的挑战及其发展前景。

关键词: 卫星通信; 空天地海一体化; 体系架构; 空中接口; 资源调度

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024163

Study on the key technologies of satellite communication for space-air-ground-sea integration

ZHANG Gengxin^{1,2}, LIAO Leiyao^{1,2}, HE Yuanzhi³

1. School of Communications and Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Institute of Space-Air-Ground-Sea Communication Technology Integration,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

3. Academy of Military Science, Beijing 100091, China

Abstract: Building a space-air-ground-sea integrated network is one of the visions of 6G, and it is also an important means to realize the “intelligent connection of all things”. The key element of the future space-air-ground-sea integrated network is satellite communication, which provides global coverage and wide-area connectivity. The basic architecture and development status of the space-air-ground-sea integrated network were discussed, and the satellite communication technology for the space-air-ground-sea integrated network was introduced. Then, several key tech-

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-06-06

通信作者: 廖磊瑶, 20230117@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U21A20450); 江苏省基础 Research 计划 (前沿引领技术) 资助项目 (No.SBK20192002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.U21A20450), Jiangsu Province Basic Research Project on Leading Technologies (No.BK20192002)



nologies of satellite communication in the space-air-ground-sea integration scenario were analyzed, including adaptive air interface, multi-satellite cooperative robust beamforming, multi-dimensional resource on-demand scheduling, networking/network management, and network slicing technology. Finally, the challenges and application prospects of satellite communication were discussed under the development trend of space-air-ground-sea integration in the future.

Key words: satellite communication, space-air-ground-sea integration, system architecture, air interface, resource scheduling

0 引言

在过去数十年中,移动通信系统经历了持续的商业化部署,以10年为一个周期。这一过程不断地满足用户对网络连接、信息传输以及新服务类型的需求。1G到6G的发展过程示意图如图1所示。1G到3G,移动通信系统主要满足了人与人之间的通信需求。随着技术的不断进步,移动通信发展到了4G阶段,实现了人与物之间的高效通信。当前,5G网络处在大规模建设中,通过融合边缘计算、人工智能等新技术实现万物互联,将对各垂直行业领域产生重要影响,但5G网络仍不能满足人类对网络覆盖广度和深度的要求。为此,构建空天地海一体化网络成为6G的愿景之一。空天地海一体化网络以地面网络为基础,以空间网络为延伸,覆盖太空、天空、陆地、海洋等自然空间,目标是扩展通信的覆盖广度和深度,即在传统地面蜂窝网络的基础上分别与卫星通信和深海远洋通信(水下通信)深度融合,为各类天基、空基、陆基和海基用户提供信息保障。其中,天基网络是指基于各类高、中、低轨卫星构成的网络,由于地面通信网覆盖面积只占地球表面积的不到10%,建立卫星网络,使之成为地面通信网的补充和延伸,可有效解决网络覆盖的广度;空基网络是指基于各类空中平台(无人机/有人机、气球)、临近空间平台(飞艇)的网络,其主要功能被定位为临时应急通信;地基网络是指地面通信网,主要定位于解决网络覆盖的深度;海基网络是指深海远洋和水下无线通信及近海沿岸无线网络。未来,需要将高空卫星通信、低空空中通信、陆地地面

通信和海洋水下通信系统进行整合设计,并实现高效融合与管理,从而构建一个空天地海一体化网络,以满足全球无缝覆盖的需求^[1]。

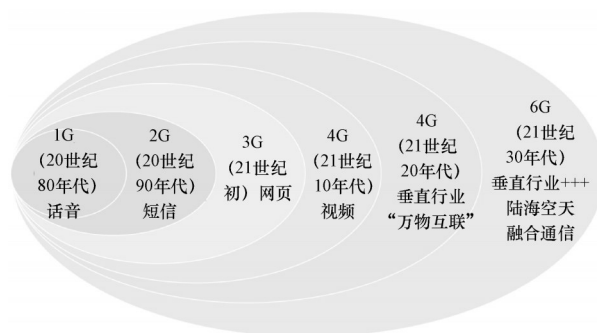


图1 移动通信系统从1G到6G的发展过程示意图^[2]

相比于前5代以地面通信为主的通信系统,卫星通信将在6G网络中承担更加重要的角色,由于其广泛的覆盖范围、高容量的传输以及不受地形环境限制等特性,将成为5G、6G移动通信系统的重要组成部分和业务增长点。2020年6月,国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunications Union-Telecommunications Standardization Sector, ITU-T)发布了《网络2030架构框架》建议书,初步定义了6G网络架构^[3]。2022年11月,国际电信联盟无线电通信部门(International Telecommunications Union-Radiocommunication, ITU-R)正式发布了《面向2030年及以后的陆地国际移动通信系统技术趋势》建议书的首个版本,就6G关键的新兴服务、应用趋势和相关驱动因素进行了描述,同时还明确了包括与非地面网络(non terrestrial network, NTN)互连在内的多种无线电网络增强功能。2023年11月23日,ITU-R发布《2030年及以后IMT未来发展的框架

和总体目标》技术建议书的第一个版本,标志着ITU在6G标准研发方面又迈出重要一步。根据IMT-2030(6G)工作组《6G总体愿景与潜在关键技术白皮书》,6G将在2030年实现商用,实现从万物互联到万物智联的跃迁。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)已经完成了5G标准化的Release 17版本,支持NTN场景的接入服务^[4],包括透明转发模式下的卫星通信服务。通过将卫星通信整合到6G移动通信,可实现全球无缝覆盖。在各种NTN系统中,卫星通信系统具有传输损耗小、时延低、成本较低等优势,在构建空天地海一体化网络方面具有重要意义^[1]。

目前,世界各航天、通信大国都加强了对卫星通信系统的研究、规划和建设,并支持本国企业发展卫星通信技术,建设卫星通信网络。6G空天地海一体化网络将充分利用不同轨道卫星(包括高中低轨卫星)等空中资源,实现多层次、多连接、多接入的新型融合架构。然而,相比于高中轨卫星,低轨卫星具有传输损耗小、时延低、成本低等优点,对低轨卫星移动通信进行研究和设计对构建空天地海一体化网络具有深远的意义。欧美国家在低轨星座的研发建设方面起步较早,20世纪末便出现了铱星(Iridium)、全球星(Globalstar)和Orbcomm三大低轨卫星星座通信系统。近年来,以星链(Starlink)和OneWeb为代表的低轨宽带互联网星座的建设如火如荼,可为用户提供宽带卫星互联网接入服务,其商业前景备受关注。我国于2021年成立了中国卫星网络集团有限公司(简称中国星网),负责建设和运营低轨卫星互联网系统,目前规划分为一期星座和二期星座。其中,一期星座由60颗近极轨窄带卫星和108颗倾斜轨道宽带卫星组成。采用支持标准速率语音、数据、短消息、物联网服务的窄带体制,以卫星数字视频广播(digital satellite TV system, DVB-S)协议为基础改进的宽

带体制和以5G协议为基础改进的宽带演进体制3种通信体制。二期星座由约4 000颗低轨卫星组成,使用以5G为基础的宽带演进体制。2020年9月,我国向ITU提交了两个申报名称,分别为GW-2和GW-A59的星座,计划发射卫星12 992颗。此外,我国很多民营企业也积极开展低轨星座建设。2020年1月16日,银河航天发射全球首颗Q/V高频毫米波频段的低轨宽带卫星,单星可覆盖300 000 km²,轨道高度1 200 km。“G60星链”系统是上海垣信卫星科技有限公司提出建设的一个低轨星座,旨在提供全球宽带多媒体服务。

在卫星通信发展浪潮下,实现空天地海一体化网络将成为必然趋势。本文首先介绍空天地海一体化网络的基本架构和研究进展,然后基于此应用场景,分析卫星通信网络的发展现状、关键技术和面临的挑战,最后结合当前技术的发展,总结了卫星通信的未来发展方向。

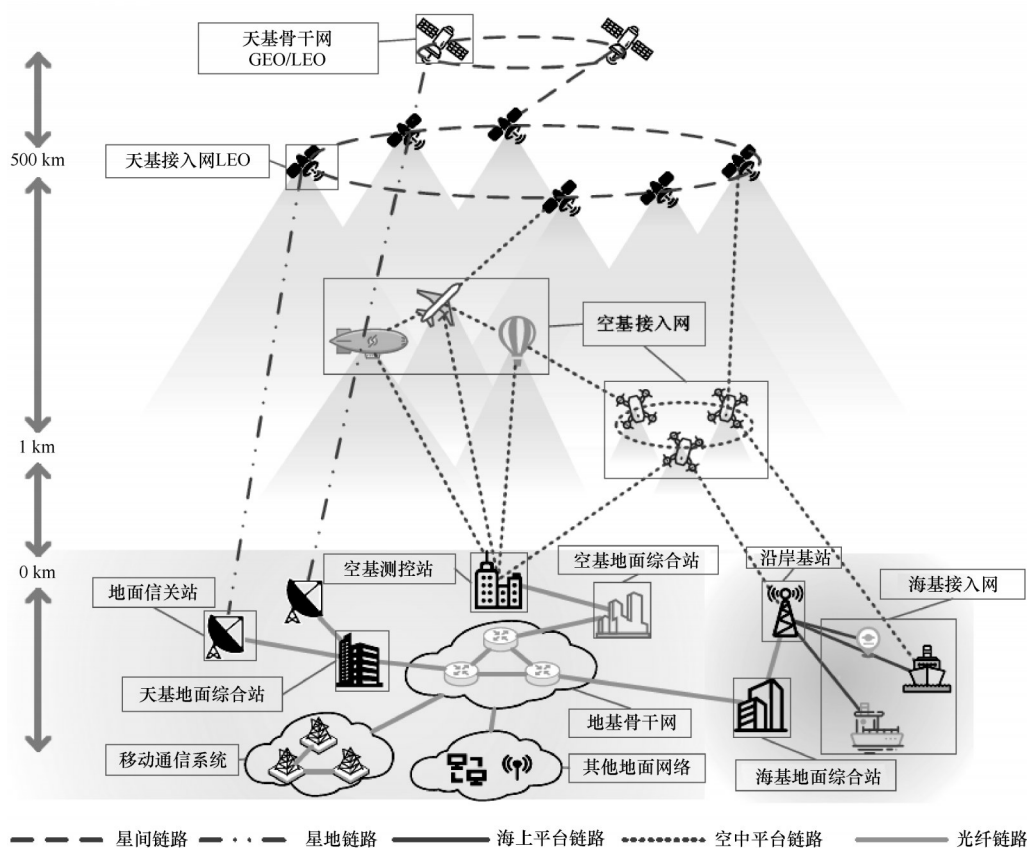
1 空天地海一体化网络和卫星通信技术发展

1.1 空天地海一体化网络发展现状

(1) 网络架构

空天地海一体化网络基本架构如图2所示,由太空、天空、陆地及海洋中的网络组成。陆基网络作为核心,空基和海基网络为其延伸部分,而天基网络则起到连接各部分的作用,形成了一个覆盖太空、天空、陆地、海洋等全方位自然空间的通信网络。图2中,空基、天基、地基和海基网络之间通过构建通信链路形成一个全球泛在通信网。比如,地基网络可与低空的空基网络建立空地链路进行通信,与海基网络建立岸地链路进行通信,与天基网络建立星地链路进行通信。

天基网络由多颗卫星组成,包括各类同步轨道卫星、中轨/低轨卫星等。这些卫星将构建一个多层次、多连接的数据传输和处理系统,为全球用户提供高速、可靠、连续的通信服务。当前,天基网络发展迅速,是通信领域的研究热点。文

图2 空天地海一体化网络基本架构^[5]

文献[6]探讨了卫星通信的集成,详细阐述了卫星通信的架构和技术特点,包括波形、高级编码和调制、多普勒频移补偿、同步、随机接入、移动管理、寻呼、新型网络架构等一系列关键技术。文献[7]结合大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)体制,分析了卫星信道的特性,并提出了针对低轨卫星信道特性设计的低复杂度信道估计解决方法。随着卫星互联网的不断发展,文献[8]针对多星之间的频谱干扰问题进行了深入分析,着重探讨了低轨卫星的波束成形技术和适合高轨卫星的跳波束技术,并提出了多星协作波束成形辅助的随机接入算法和业务驱动跳波束算法。文献[9]总结了卫星互联网的发展情况,分析了星地资源特征,提出了智能化资源管控模式与架构,设计了符合实际情况的技术路线,以适应卫星互联网新环境和新模式的挑战和需求。

空基网络利用无人机、直升机等高空平台作为载体。这些设备能够在空中部署,为地面用户提供灵活、高效的通信服务。通过空基通信手段,可以将地面网络的覆盖范围进行扩展和延伸,并且将地面基站的通信信息在空中完成转换。空基网络由于处在低空范围,相比于高空的卫星网络灵活性更高,且信息通信的响应时间较短,基站设置的成本更低,通常用于临时通信需求,并且可作为中继站辅助地面基站和海洋基站进行通信。同时,空基网络还可以与天基网络协同工作,实现更广泛的覆盖和更高的通信性能。随着无人机等空中平台研究的不断推进,空基通信网络得到了迅速的发展,并产生了许多相关研究成果。文献[10]提出了一种新的性能预测模型,以满足未来空中管制通信的需求,通过综合考虑空中和地面数据链路的传输特性,构建了更合理的模型。文献[11]

针对空基平台特点,提出了一种新型空地通信模式,通过在无人机平台上安置多天线基站,从而和多个地面用户高效快速地进行信息交互。此外,文献[12]针对无人机编队和卫星系统之间的通信需求,提出了一种高效资源分配的频谱共享方法,设计了功率和频谱资源的联合分配算法,以提高无人机编队通信的效率并保证频谱共享效果。

地基网络由地面基站和各类用户终端组成,这些设备能够直接连接用户并进行数据传输。在地面信息基础设施完备的城市区域,地基网络可以为覆盖范围内的用户提供高质量的信息传输服务,包括超高吞吐量和超低时延。然而,地基网络受基站部署成本高、覆盖范围局限、容易受人为和环境因素破坏等影响,导致其难以满足全域通信的服务需求,需要结合其他通信手段才能满足网络覆盖广度的需求。文献[13]结合天基网络的优点,针对天地融合网络中存在的信道干扰问题进行研究,实现干扰抑制通信的目的。文献[14]针对运营商的资源受限需求,重点研究了天地融合网络的体系架构,提出了一种资源最小化的分配方案,实现了资源的高效利用。文献[15]结合天地融合网络的特点,提出了一种最大化系统效率的资源分配方案,实现用户的高效关联。

海基网络通常由具有通信能力的船舶、浮标和无人水面舰艇等水面设施以及水下航行器、水下传感器等水下设施组成。相比于天基、空基和地基网络,海基网络仍处在初期发展阶段,受限于基站设立的困难等环境因素,目前研究进程相对缓慢。针对海上通信应用场景,文献[16]提出了一种面向海基网络的通信方式,重点解决了海上通信数量大、环境复杂多变和用户分布密度差异大等问题,提升了海上通信能力。文献[17]针对高频数据数据传输过程中面临的信道冲突问题,提出了一种时分多址接入协议,有效缓解了海上信息通信过程中的信道冲突,保障了通信的稳定性。

空基、天基、地基、海基网络的主要特点总结如图3所示。

空天地海一体化网络具有多种优势,包括不受地理条件限制、覆盖范围广、组网方式多样和带宽资源丰富等,可以广泛应用于地球观测与测绘、智能交通、灾难救援等领域,具有全域覆盖、高速智能、安全可靠和灵活部署等特点。

- 全域覆盖:空天地一体化网络通过整合卫星、无人机、高空平台等空中资源,以及地面蜂窝网络等地面资源,实现全球范围内通信网络的无缝覆盖。这种全

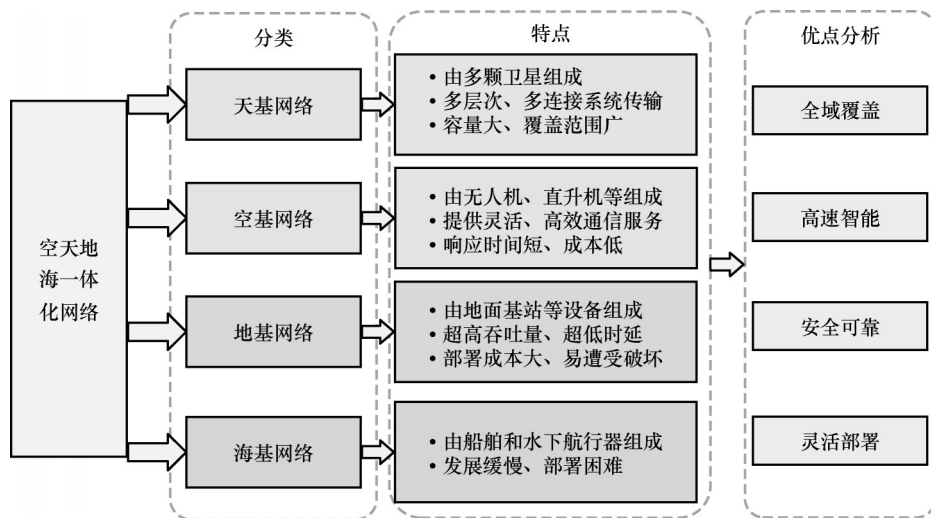


图3 空基、天基、地基、海基网络的主要特点总结



域覆盖包括偏远地区、海洋、空中等网络难以覆盖的区域，消除了“数字鸿沟”，为全球用户提供更加公平、便捷、高效的通信服务。

- 高速智能：空天地海一体化网络支持高速移动、大容量、低时延、高可靠性的通信需求，可以满足物联网、工业互联网、智能制造、智能交通等领域对通信网络的要求。同时，该网络还具备智能化管理和调度能力，可以根据不同业务场景的需求，动态调整网络资源，实现最优的网络性能和服务质量。
- 安全可靠：空天地海一体化网络注重网络安全和隐私保护等方面的问题，采用了多种安全技术和手段，确保网络的安全性和可靠性。同时，该网络还具备抗毁性、鲁棒性和自适应性等特点，可以在复杂多变的环境及场景下稳定运行，保障通信服务的连续性和稳定性。
- 灵活部署：空天地海一体化网络采用模块化、标准化的设计理念，可以根据不同的业务场景和需求，快速、灵活地部署并扩展网络资源及设备，降低建设和运营成本，提高网络效益和效率。

(2) 融合网络发展现状

随着互联网、物联网、人工智能技术的不断发展，这些新技术正在不断推动网络进入万物互联和万物智联的新时代。然而，传统卫星网络侧重覆盖广度，地面网络侧重覆盖深度，空中平台侧重应急通信，海上平台通信能力较弱，其中任意单一网络都难以同时满足人、机、物对覆盖的广度和深度的要求，且空、天、地、海四者独立的发展模式也将无法满足人、机、物无感用网需求。为此，空天地海通信网络须从传统的共存走向融合，建立空天地海一体化网络。空天地海一体化网络的关键在于融合，融合可划分为3个层

次：服务层融合、网络层融合和空口层融合。其中，服务层融合指空天地海一体化网络可提供同样的服务；网络层融合指网络协议的融合；空口层融合偏向底层，即终端可基于同一体制连接空天地海一体化网络。这3个层次的融合越靠底层，设计的复杂度越大，但可获得更高的网络资源利用率。通过融合实现统一终端、统一协议和统一服务。

图2中，空天地海一体化网络是一个覆盖了全球范围的立体通信网络系统，结构庞大且复杂，不同平台之间相互关联、建立通信链路。目前，针对天基、空基、地基和海基网络，包含多个网段之间的融合研究，包括天地网络^[5,18-19]、空天地网络^[20-21]、天地海网络^[22]等。然而，对于空天地海一体化网络，目前的研究主要集中于网络架构^[23-26]、安全性^[27-28]、协议研究^[29]。空基、天基、地基和海基不同网段融合网络的研究方向和特点如图4所示。具体地，网段融合的方法主要包括以下几种。

- 制定统一的通信标准和协议：不同网段的通信设备相互交流和协同工作，实现跨网段的资源共享和协同调度，提高整体通信系统的效率和性能。
- 建立跨域资源共享和优化：通过智能算法，根据用户需求和网络负载情况动态调整资源分配，以实现最优的通信体验，使地面移动通信、卫星通信、空中通信和海上通信之间共享通信资源，如频谱、带宽和信道资源。
- 多接入技术支持：支持多种接入技术，包括LTE、5G、卫星通信等，使移动终端可以根据当前环境和需求灵活选择最佳的接入方式。
- 智能网络管理和优化：引入智能网络管理和优化技术，通过实时监测和分析各个通信网段的状态和负载情况，动态调整资源分配和优化网络路由，以实现最佳的通信性能。

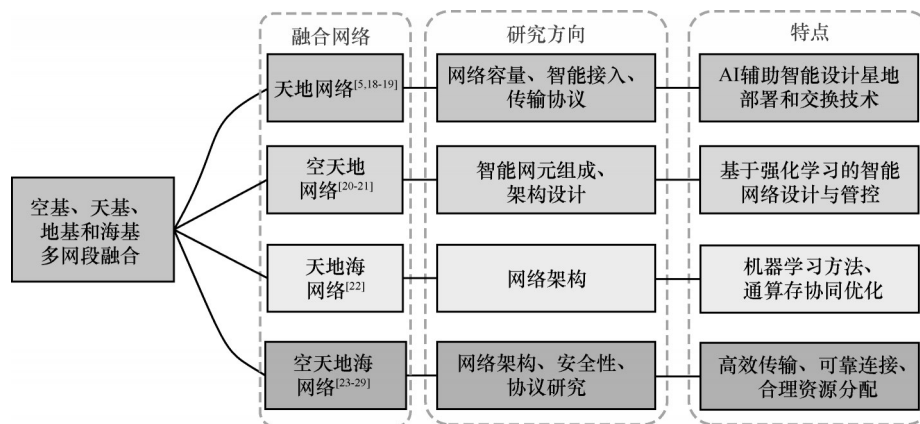


图4 空基、天基、地基和海基不同网段融合网络的研究方向和特点

- 边缘计算和数据处理：在各个通信网段的边缘部署计算和数据处理资源，利用边缘计算和数据处理技术对通信数据进行实时处理和分析，提高通信系统的响应速度和效率，支持各种实时应用和服务。在未来6G的应用场景中，各个网段的相互协同和相互融合，包括通信协议、网络架构、通信服务和资源管控等方面，以满足全球泛在连接愿景下的用户实时、智能、无缝连接服务需求。

文献[5,18-19]针对天地一体化信息网络进行详细介绍，包括网络容量分析、智能接入方法和传输协议改进等方面，利用人工智能方法辅助智能设计星地部署方案和交换技术，并且对天地融合网络的应用场景及其所面临的技术挑战进行了分析。其中，文献[5]面向架构、空口、频率、多轨融合的天地一体化发展方向，提出一种面向星地同频部署场景的干扰协调创新方案，从功率域、频域+空域两个角度开展星地同频干扰协调技术研究，为天地一体化组网奠定技术基础。文献[20-21]提出空天地一体化网络结构，分别从智能网元组成和架构设计两方面对一体化网络进行介绍，设计基于强化学习的智能网络设计与管控方法，实现高效的网络设计、分析、优化和管理。针对天地海融合网络，文献[22]提出了一种资源高效利用的一体

化通信网络架构，将通信—计算—缓存（通算存）等信号智能感知功能进行协同优化，并结合人工智能领域中的边缘计算和强化学习、迁移学习等方法进行一体化功能实现，验证了一体化架构中通算存实现的可行性。另外，结合天基、空基、岸基及海基网络的通信特点，文献[23-29]分别从网络架构、安全性和协议研究等方面对空天地海一体化网络进行详细分析。其中，文献[23-26]针对一体化网络的架构，分析了网络切片技术对于网络结构的影响，分别提出了业务边缘化管理的一体化网络架构和多站协作的多点传输的立体网络架构等，以实现高效业务管理。文献[27-28]针对一体化网络的完全性问题，根据空天地海一体化网络中的结构拓扑动态变化、结构不稳定、复杂多变和资源分布不均衡等特点，研究基于强化学习的媒体接入控制（media access control, MAC）随机接入方法，提升网络传输和接入的安全性。文献[29]针对空天地海一体化场景下的通信协议不统一、多维资源受限等问题，结合不同轨道卫星的多维资源和地面运营商的网络资源等，创建多样化的融合应用场景。

1.2 面向空天地海一体化的卫星通信技术发展现状

移动互联网和物联网应用需求的持续增长，促使移动通信网络向全场景服务和全球深度覆盖



发展，但单纯依赖地面移动通信将难以满足此需求。利用卫星通信特有的覆盖广特征，以及低轨卫星具有星地间通信距离短、传播时延低等优势，将低轨卫星通信与地面移动通信融合设计成为满足互联网和物联网应用需求的重要选择之一。目前，发展低轨卫星通信已成为下一代信息技术竞争新高地。3GPP从Release15开始重点关注NTN，尤其是卫星网络，并在Release16和Release17中持续对NTN进行研究；美国联邦通信委员会在2023年通过了太空补充覆盖的提案，明确了用卫星来补充地面移动通信网络覆盖，支持手机直连卫星。

在各种NTN系统中，低轨卫星通信系统具有鲜明的特色与优势。低轨卫星支持全球无缝、随

需覆盖需求，更适合在荒漠戈壁、山区、森林、海洋等区域进行全球通信，且具有传输损耗小、时延低、成本低等优点。因此，低轨卫星通信对构建空天地海一体化通信具有深远的意义。近几年，全球多家公司展开了低轨卫星星座部署的计划，国外典型低轨卫星通信星座见表1。

在低轨卫星通信发展的浪潮下，实现星地融合成为发展趋势，其中的热点之一是手机直连卫星业务。在具体的实现途径方面，手机直连卫星业务可分为双模（星地采用各自独立的通信体制）、融合（卫星采用3GPP NTN体制）和直连（卫星支持地面3GPP体制，利用存量手机直接与卫星通信）3种方式。2022年3月，爱立信、泰

表1 国外典型低轨卫星通信星座^[7-10]

低轨星座名称		星座构型				申报卫星总数/颗	工作频段			
		轨道高度/km	轨道倾角/（°）	轨道数	卫星数/颗					
Starlink	一代	550	53.0	72	22	4 408	Ku, Ka			
		570	70.0	36	20					
		560	97.6	6	58					
		540	53.2	72	22					
		560	97.6	4	43					
	二代	340	53.0	48	110	26 628	Ku, Ka, V, E			
		345	46.0	48	110					
		350	38.0	48	110					
		360	96.9	30	120					
		525	53.0	28	120					
		530	43	28	120					
		535	33	28	120					
		604	148	12	12					
		614	115.7	18	18					
		Kuiper	630	51.9	34			34	3 236	Ku, Ka, V
			610	42	36			36		
			590	33	28			28		
OneWeb	一代	1 200	87.9	18	40(4颗备用)	720(72颗备用)	Ku, Ka, V			
	二代	1 200	87.9	18	58	5 652				
		1 200	55	32	72					
		1 200	40	32	72					
AST		725~745	0	1	18	243	LTE, V			
		40	1	150						
		55	1	75						

雷兹和高通3家公司联合启动全球首个基于卫星的5G NTN技术实验。2022年8月,SpaceX宣布其第二代星链卫星将与美国第三大移动通信运营商T-Mobile合作,目前已发射首批6颗手机直连卫星并完成下行测试,速率接近17 Mbit/s,采用的是直连体制,2024年上半年发射840颗同类卫星。2023年8月,华为公司发布全球首款支持卫星通话的大众手机Mate60 Pro,通过使用中国的“天通一号”卫星移动通信系统,率先实现了手机直连卫星的语音业务运营,目前使用的是双模体制,下一代终端将向融合和直连演进。2023年9月,美国AST SpaceMobile公司宣布其测试卫星BlueWalker 3,首次实现了手机与低轨卫星的5G通信连接,下行速率约为14 Mbit/s,也采用直连体制。

随着各类型卫星通信服务的迭代发展,通信业务平台化、网络宽带化、标准全球化、终端易用化等发展趋势更加明显,进一步实现与海基、地基、空基通信网络融合,打造空天地海一体化网络是当前卫星通信技术的发展趋势。目前,面向空天地海一体化的卫星通信技术已取得不少研究成果。文献[30]致力于满足6G时代空天一体化发展的需求,将传统的地面移动通信一体化模式拓展到卫星网络,构建全球范围内的空天地一体化网络。提出了一套星地协作的通感一体化解决方案,包括网络结构、通感一体化波形设计、通感一体化波束成形技术和通感一体化干扰消除技术。文献[17]提出了一种面向卫星通信的6G雾计算网络技术,可以实现对卫星通信网络的智能化增强。通过在卫星终端和地面站部署雾节点,可以实现对卫星通信数据的近端处理和分析,从而减少数据传输时延和带宽消耗,提高通信效率和用户体验。文献[31]提出了一种针对卫星通信的6G通感算融合架构,将通信、感知和计算三者融合在一起,形成一个统一的系统,可以实现更高效的数据传输和处理,以及更智能的决策和控制,从而提升卫星通信系统的性能和用户体验。

2 空天地海一体化场景下的卫星通信关键技术

在空天地海一体化网络场景下,卫星通信面临着更加复杂的挑战和需求,因此需要一系列关键技术来支撑其发展,包括体系架构、空中接口、资源调度、网络切片和组网管理等技术。下面对这几项关键技术作进一步阐述。

2.1 低轨卫星通信新型体系架构

随着大规模低轨星座的部署与空天地海一体化网络的发展,低轨卫星网络呈现出拓扑动态性高、连接关系复杂多变、资源分配维度激增、各类业务量持续提升等特点,并且将从单纯的信息传输通道向“通—感—算—存—控”一体化方向演进。传统的集中式网络架构,势必带来网络僵化与迟滞性,而完全分布式协同架构,不仅会带来海量开销问题,同时单颗低轨卫星载荷能力也无法胜任完全分布式所需要的计算和处理能力。地面移动通信网络借助其算力和存储优势,大力发展云处理、边缘计算结合人工智能赋能来解决类似问题,但在面对未来空天地海一体化网络时,仍然需要低轨卫星网络探索全新的网络架构、组网方式,以适配大规模、高动态、密集覆盖、算力受限的网络管理需求。

针对空天地海一体化网络面临不同网络融合难、立体多层网络弹性控制难、轻量化终端和边缘节点(卫星、无人机)智能难等挑战,需要在给定通信、感知、计算和存储等资源前提下,研究低轨卫星网络新型架构、弹性控制方法和内生智能机理等内容,以支撑空天地海一体化网络融合。需要解决的问题包括:

- 寻求低轨卫星网络柔性体系架构和网络能力表征模型,解决网络融合难问题;
- 寻求面向多层多域组网的网络拓扑控制、面向快速收敛和自愈的分布式路由方法,消除异构网络动态性和突发故障等不利影



响,解决立体多层网络弹性控制难问题;

- 寻求基于多节点间协作的网络赋能模型以及基于低复杂度压缩的模型匹配网络方法,实现网络与模型间适配和端简网智,解决终端和边缘节点智能难问题。

2.2 人工智能赋能的低轨卫星通信空中接口技术

与地面网络相比,低轨卫星网络具有一些特殊性,具体如下:

- 传统地面网络是平面网络,引入低轨巨型星座后网络发展为立体多层网络,波束覆盖情况复杂,人机物大跨度、多频段、多协议混合接入;
- 低轨卫星围绕地球做高速运动,卫星波束将以每秒数千米的速度掠过地面,不仅引起传输信道时变,而且导致终端与地面网/卫星网连接关系快速动态变化;
- 地面终端的通信距离一般是千米量级,而低轨卫星终端的信号传播距离通常是 10^3 千米量级,大尺度时空的传输导致传播时延大;低轨卫星信道以直射分量为主,信道特性是欠散射信道,难以获得MIMO分集增益;
- 相比于地面基站,低轨卫星的存储、计算、传输资源受限平台,服务能力有限;
- 天地一体化信息网络具有覆盖范围广,卫星轨道移动、用户和业务需求的不均性,使得系统内多址干扰和系统间同频干扰在空间、时间、频率和功率维度呈现高度的不规则性,从而导致系统的可用资源具有动态时变性和高维不规则性。

空天地海一体化网络人机物大跨度、多频段、多协议混合接入,网络立体多层,并且卫星的高速运动和用户的随机移动导致终端与地面网/卫星网的连接关系和传输环境动态变化,使得传播信道多样复杂、动态变化,难以建模;同时,天地融合网络中终端业务需求、传输信道特征、

网络负载、系统内外干扰、动态波束服务时间、用户的成组分簇、接入用户公平性等多个约束参数和性能指标形成相互作用的NP-hard问题;并且,服务终端海量、卫星处理能力有限,使得信道参数难以准确求解;天地网络间、不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大,系统内的多址干扰和系统间的同频干扰动态变化,固定或事先设定模式的接入与传输方式会导致工作效率低下,需要采用具备自学习、自演进能力的接入与传输方式以适应多样化的动态场景。因此,需要研究基于迁移学习的低轨卫星信道知识低开销提取方法,构建基于模型驱动多任务深度学习的预编码神经网络,从而实现系统鲁棒性的适变传输需求;探索面向空天地海一体化的广域自主接入方法,构建基于多接入点协同的多任务模型,研究基于图神经网络的终端接入方法,从而实现终端自主接入的需求。

2.3 大规模低轨星座多维资源按需调度

在空天地海一体化场景下,多维资源按需调度是指针对不同环境中的各种资源(如频谱、带宽、计算资源等),根据实时需求和环境变化,动态调整资源分配和利用,以最大化系统效率和性能。且大规模低轨卫星星座的网络高动态性、应用的多样性和用户分布的时空不均性,对资源调度提出很高的要求。为此,不仅要调度星地链路无线资源,还要按需动态调度计算、存储和星间链路通信资源,资源调度的维度也从时、空、频、能的无线资源扩展到计算和存储资源,大大增加了资源调度的复杂性。因此,空天地海一体化网络场景中的资源管控问题转化为高度复杂且深度耦合的优化问题,必须采用分层分域的多维资源规划与调度架构进行解耦,并通过知识、数据、信息多层次交互的群智协同,解决分层分域的开销与性能的矛盾,大幅度减少算法复杂度,提升资源管控能力,满足一体化场景中用户多样化的服务需求。这种调度方法不仅考虑单一资源类型的优化,而且综合考虑多种资源的相互影响

和约束, 以实现系统资源的整体优化和高效利用。通过多维资源按需调度, 系统可以更加灵活和高效地响应各种服务请求, 提高服务质量、资源利用率和系统的能效比。

随着低轨卫星覆盖广度和深度的发展, 低轨卫星通信系统中用户数量急剧增长, 且不同用户业务服务质量和体验质量需求具有明显差异, 导致未来低轨卫星通信系统需同时提升系统容量、用户接入能力和用户体验。然而低轨卫星通信系统可用功率和频率资源受限, 且面临用户和卫星数量多、连接关系动态性强、信道状态信息(channel state information, CSI)矩阵维度大、优化目标多样且要求高, 导致传统优化建模方法难以适用。考虑人工智能在处理这样的问题时表现突出, 但星上可用计算资源同样受限, 星上难以直接应用人工智能。因此, 需要针对低轨卫星可用算力资源受限的特点, 结合云边端设计架构和轻量化模型设计思路, 探究神经网络与低轨卫星网络间的适配方法, 构建适用于多星协同处理需求的算力平台; 基于所构建的算力平台, 建立分层分域的多维资源规划与调度架构, 并利用低轨卫星网络流量的时空演变特征、用户的业务和资源需求的短时强相关性、信道和电磁环境的长时相似性, 探索基于知识共享和迁移学习的多维资源高效利用方法, 提升系统速率容量和用户容量。

2.4 低轨星座系统网络切片和组网管理

在空天地海一体化场景下, 网络切片技术是一种关键的网络管理和资源分配方法, 它允许将一个物理网络划分为多个逻辑网络实体, 每个实体可以根据特定的需求和应用场景进行定制化配置和管理。通过网络切片技术, 可以根据不同应用场景和服务需求, 将网络资源(如带宽、频谱、计算资源等)进行灵活分配和优化, 以满足不同用户和应用的需求。网络切片技术允许根据具体的业务需求和性能要求, 对网络进行灵活划分和定制化配置, 从而提供个性化的服务和定制

化的网络体验。通过网络切片技术, 可以实现多种不同业务和服务在同一物理网络上共存, 并且彼此之间相互隔离, 避免互相干扰和影响, 从而提高网络资源的利用率。网络切片技术可以根据不同业务和服务的性能要求, 对网络资源进行合理分配和调度, 以保障服务质量和用户体验, 同时最大化资源利用率。随着空天地海一体化中各种应用需求的不断变化, 网络切片技术可以实现对网络资源的动态调整和管理, 以适应不同时段和不同区域的需求变化。通过网络切片技术, 可以实现不同网络切片之间的逻辑隔离, 确保网络安全和数据隐私, 防止跨切片的攻击和数据泄露。因此, 网络切片技术为空天地海一体化的各种应用提供了灵活、高效的网络管理和资源分配手段, 能够有效地满足不同业务需求和性能要求。

组网管理是指针对空天地海一体化网络中的多种通信网络(包括陆地、空中、海洋和空间网络)进行有效的规划、配置、监控和优化, 以实现整个网络的高效运行和服务覆盖。根据通信需求和覆盖范围, 设计并规划网络拓扑结构, 确定各个网络节点的位置和连接关系, 以实现全方位的通信覆盖和连通性。根据实时需求和环境变化, 动态分配和调度网络资源, 包括频谱资源、带宽资源、计算资源等, 以最大化资源利用率和系统性能。管理和优化通信链路, 包括信道选择、功率控制、调制解调方式等, 以提高通信质量和可靠性, 并降低通信时延。针对移动终端和移动平台(如无人机、卫星等), 进行移动性管理, 包括移动路由等, 以确保移动设备的连通性和稳定性。加强网络安全管理, 包括身份认证、数据加密、漏洞修补等, 以保障通信系统的安全性和可靠性, 防止恶意攻击和数据泄露。实时监控网络性能指标, 包括吞吐量、时延、丢包率等, 及时发现和解决问题, 并进行网络优化, 以提高用户体验和服务质量。实现不同通信网络之间的协同管理和资源共享, 包括卫星网络、无人



机网络、海洋传感器网络、地面移动网络等，以提高整体通信系统的效率和覆盖范围。因此，有效的组网管理能够提高通信系统的整体性能和可靠性，满足空天地海一体化的各种应用需求。

3 空天地海一体化场景下卫星通信面临的挑战及发展前景

空天地海一体化网络具备多种独特特征，包括网络异质异构、空间节点高度动态、拓扑结构时变、时空尺度巨大、空间节点资源受限以及卫星广播传输链路易受攻击等。这些特征为网络架构、星地融合通信制式以及星间组网协议的设计带来了更高的挑战。具体而言，这些特征导致以下几个问题出现。

- 网络架构设计挑战：由于空天地海一体化网络涉及多种异质异构网络，如卫星通信网络、地面移动通信网络、海洋通信网络等，因此需要设计灵活、可扩展的网络架构，以适应不同网络之间的互联互通。
- 星地融合通信制式设计挑战：将地面通信系统与卫星通信系统进行融合是一项复杂的任务，需要考虑地面用户终端和卫星之间的距离、信号传播时延、功率控制等问题，同时设计合适的通信制式以确保通信的可靠性和效率。
- 星间组网协议设计挑战：在空天地海一体化网络中，卫星之间需要进行有效的组网和路由，以实现数据的传输和交换，设计星间组网协议需要考虑卫星轨道的动态变化、链路质量的波动以及网络拓扑结构的时变性等问题。
- 动态拓扑结构管理挑战：由于空间节点高度动态和拓扑结构时变，管理和维护通信系统的拓扑结构变得更加复杂，需要实时监测和调整网络拓扑，以确保通信的连续性和稳定性。

- 时空尺度巨大的数据处理挑战：空天地海一体化网络涉及大量的数据传输和处理，数据时空尺度巨大，因此需要设计高效的数据处理和存储方案，以满足系统对数据处理能力的需求。
- 空间节点资源受限的挑战：卫星通信系统中空间节点资源受限，具体问题包括卫星能源、计算和处理能力、存储、通信资源以及姿态控制和导航等方面，管理者需要有效地管理和优化资源的利用，以提高系统的性能和效率。
- 卫星广播传输链路安全挑战：卫星传输链路易受攻击，可能面临窃听、篡改、拒绝服务等安全威胁，因此需要采取有效的安全措施保护通信链路的安全性和可靠性。

在未来的空天地海一体化场景下，卫星通信将在高通量卫星技术、手机直连卫星、混合通信网络、智能化卫星网络、卫星网络安全技术、新型通信技术应用和环境友好型卫星技术等方面进一步发展，实现更高效、更安全、更可靠的通信服务，为全球泛在互联提供更多可能性。具体包括如下。

- 高通量卫星技术：高通量卫星利用高度集成的通信载荷和频谱再利用技术，提高了卫星通信系统的频谱效率和数据传输速率，未来高通量卫星技术将进一步发展，实现更高的数据传输速率和更广泛的服务覆盖。
- 手机直连卫星：近年来，卫星载荷、火箭运输等技术不断突破，特别是低轨卫星，一箭多星等技术有利于卫星快速密集组网，卫星的部署成本不断降低，并且低轨道空间资源丰富，对地信号强度高，有利于通信的实现，低轨卫星也可以适应地面通信协议，通过服务手机直连卫星，摆脱地形时间束缚，由于手机直连卫星具有即时性、灵活性、独立性和隐私保护等特点，用户可以随时随地进行实时通信，不受传统基础设施的

限制,实现卫星通信功能。

- 混合通信网络:未来的卫星通信系统将与地面移动通信网络、光纤网络等其他通信网络进行混合,实现网络资源的优化配置和互操作性,提高通信系统的灵活性和可靠性。
- 智能化卫星网络:利用人工智能和自主决策技术,实现卫星通信网络的智能化管理和优化,包括资源调度、故障诊断、网络优化等方面,提高系统的性能和效率。
- 卫星网络安全技术:随着对卫星通信安全性的关注不断增加,未来将加强卫星通信系统的安全技术研究和应用,包括加密通信、安全认证、反干扰技术等,保护通信数据的安全和隐私。
- 新型通信技术应用:未来的卫星通信系统将应用新型通信技术,如量子通信、光通信等,提高通信系统的安全性、速率和带宽,推动卫星通信系统向更高水平发展。
- 环境友好型卫星技术:随着对环境保护意识的增强,未来的卫星通信系统将注重绿色环保,采用环境友好型的卫星技术,减少对地球环境的影响,促进可持续发展。

4 结束语

随着技术的进步和人类活动空间的扩展,未来的通信网络须涵盖空天地海空间。6G将使人类进入一个“人机物”三元融合的万物智能互联时代。要做到万物智联,“人机物”须是无感用网。然而,由于空天地海传播特征的异构性,各类空天地海网络如果仅是共存(简单相加),显然难以支撑无感用网,必须实现空天地海各类网络相互融合,做到网络全覆盖才能满足此要求。在这个空天地海一体化网络中,卫星通信依靠其广域覆盖、不受地面条件限制等突出优势,将发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 吴巍,张更新.天基物联网技术[M].北京:电子工业出版社,2021.
WU W,ZHANG G X. Space-based internet of things technology [M].Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [2] 李妍,范筱,黄晓明,等.面向未来的陆海空天融合通信网络架构[J].移动通信,2020,44(6):104-115,125.
LI Y,FAN X,HUANG X M, et al. Emerging network architectures for integrated communications among land, sea, air and sky[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 104-115, 125.
- [3] ITU-T FG-NET-2030. Network 2030-gap analysis of network 2030 new services, capabilities and use cases[S]. 2020.
- [4] 3GPP. Technical specification group services and system aspects; study on using satellite access in 5G: TR 38.822[S]. 2018.
- [5] 孙志颖.天地一体化网络协议的研究与仿真[D].西安:西安电子科技大学,2012.
SUN Z Y. The research and simulation of the network protocol of the integrated earth network[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [6] 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.
- [7] 李想.基于大规模MIMO的低轨卫星通信系统研究[J].中国宽带,2023,19(4):55-57.
LI X. Research on LEO satellite communication system based on large-scale MIMO[J]. China BroadBand, 2023, 19(4): 55-57.
- [8] 张更新,王运峰,丁晓进,等.卫星互联网若干关键技术研究[J].通信学报,2021,42(8):1-14.
ZHANG G X, WANG Y F, DING X J, et al. Research on several key technologies of satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 1-14.
- [9] 王龙河,周一青,曹欢,等.卫星互联网资源管控技术研究[J].中国工程科学,2023,25(6):27-38.
WANG L H, ZHOU Y Q, CAO H, et al. Resource management and scheduling for satellite Internet[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 27-38.
- [10] GÓMEZ DEPOORTER D, KELLERER W. Designing the air-ground data links for future air traffic control communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(1): 135-146.
- [11] ZHAO J J, ZHU Y B, MU X D, et al. Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface (STAR-RIS) assisted UAV communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(10): 3041-3056.
- [12] 李俊峰,刘承骁,冯伟,等.空天地海一体化网络中的高效频谱共享方法[J].移动通信,2020,44(9):2-6,26.
LI J F, LIU C X, FENG W, et al. Energy-efficient spectrum sharing for space-air-ground-sea integrated networks[J]. Mobile Communications, 2020, 44(9): 2-6, 26.
- [13] AN K, LIN M, OUYANG J, et al. Symbol error analysis of hybrid satellite-terrestrial cooperative networks with cochannel interference[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11): 1947-1950.



- [14] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Energy efficient resource allocation in cloud based integrated terrestrial-satellite networks[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [15] WANG L N, WU Y N, ZHANG H J, et al. Resource allocation for NOMA based space-terrestrial satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(2): 1065-1075.
- [16] PANG Y, WANG D S, WANG D D, et al. A space-air-ground integrated network assisted maritime communication network based on mobile edge computing[C]//Proceedings of the 2020 IEEE World Congress on Services (SERVICES). Piscataway: IEEE Press, 2020: 269-274.
- [17] HU X, LIN B, WANG P, et al. A novel MAC protocol for VDES in space-air-ground-sea integrated networks[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 60-61.
- [18] 吴昊, 王帅, 邓献策, 等. 面向天地一体化信息网络的星载交换技术发展现状与趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 2-10.
- WU H, WANG S, DENG X C, et al. On-board switching for space-integrated-ground information network: progress and trends[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 2-10.
- [19] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 2-10.
- XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [20] 张平, 许文俊, 王凤玉, 等. 智简空天地一体化网络[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 381-384.
- ZHANG P, XU W J, WANG F Y, et al. Intellicise air-space-ground integrated networks[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(3): 381-384.
- [21] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 2-6.
- TIAN K B, YANG Z, ZHANG N. Prospects for the air-space-ground integrated network technology[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(5): 2-6.
- [22] 徐晓帆, 王妮炜, 高瓊园, 等. 陆海空天一体化信息网络发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 39-45.
- XU X F, WANG N W, GAO Y Y, et al. Development of land-sea-air-space integrated information network[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 39-45.
- [23] 林彬, 张治强, 韩晓玲, 等. “空天地海”一体化的海上应急通信网络技术综述[J]. 移动通信, 2020, 44(9): 19-26.
- LIN B, ZHANG Z Q, HAN X L, et al. Key technologies for space-air-ground-ocean integrated networks towards maritime emergency: an overview[J]. Mobile Communications, 2020, 44(9): 19-26.
- [24] 付书航, 周笛, 盛敏, 等. 空天地海一体化网络体系架构与网络切片技术[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 8-14.
- FU S H, ZHOU D, SHENG M, et al. An architecture and network slicing technology in space-air-ground-sea integrated network[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 8-14.
- [25] 韩笑雪, 王万龙, 孙尚, 等. 3C融合的空天地海一体化通信系统设计与实现[J]. 中国新通信, 2022, 24(5): 22-24.
- HAN X X, WANG W L, SUN S, et al. Design and implementation of integrated communication system of air, space and sea based on 3C fusion[J]. China New Telecommunications, 2022, 24(5): 22-24.
- [26] 管莹莹, 宋静, 宋清洋, 等. 空天地海一体化网络切片研究综述[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 20-25.
- GUAN Y Y, SONG J, SONG Q Y, et al. Space-air-ground-sea integrated network slicing: a survey[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 20-25.
- [27] 徐克, 徐友云, 王小明. 空天地海一体化的大规模随机接入方法研究[J]. 移动通信, 2023, 47(7): 58-63, 91.
- XU K, XU Y Y, WANG X M. Research on massive random access method for space-air-ground-sea integrated networks[J]. Mobile Communications, 2023, 47(7): 58-63, 91.
- [28] 刘丹丹, 朱斌, 胡悦, 等. 空天地海一体化协同路由方案研究[J]. 邮电设计技术, 2023(5): 56-63.
- LIU D D, ZHU B, HU Y, et al. Research on cooperative routing scheme of space-ground-sea integration[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(5): 56-63.
- [29] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的6G通感算融合架构、技术与挑战[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 12-20.
- JING Y, JIANG C X, ZHAN Y F. 6G communication, sensing and computing integration for satellite communication: architectures, technologies and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 12-20.
- [30] 赵亚飞, 周家恩, 王鑫洋, 等. 面向卫星通信的6G雾计算网络技术研究与展望[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 834-841.
- ZHAO Y F, ZHOU J E, WANG X Y, et al. Research and prospect of 6G fog computing network for satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 834-841.
- [31] 刘光毅, 楼梦婷, 王启星, 等. 面向6G的通信感知一体化架构与关键技术[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 8-16.
- LIU G Y, LOU M T, WANG Q X, et al. Towards 6G: research on integrated sensing and communication architecture and key technology[J]. Mobile Communications, 2022, 46(6): 8-16.

[作者简介]



张更新 (1967-), 男, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络等。

廖磊瑶 (1996-), 女, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为卫星通信、深度学习、遥感信号处理、雷达目标检测识别等。

何元智 (1974-), 女, 中国人民解放军军事科学院研究员, 主要研究方向为卫星通信。