

空天地一体化网络研究现状与新技术的应用展望

张晓凯, 郭道省, 张邦宁

(中国人民解放军陆军工程大学, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了实现全时全域“泛在连接”, 全球覆盖、随遇接入、按需服务的空天地一体化网络, 是未来无线通信系统发展的方向。建设空天地一体化网络, 需要深度结合天基网络、空基网络、地基网络, 在不同的空间维度上发挥自身的功能, 不断突破网络体制的边界限制, 进而实现广域的全覆盖和无线网络的互联互通。文中主要从科研项目实施、技术研究和标准推进等方面探讨空天地一体化网络发展进程。同时, 对新技术在空天地一体化网络中的应用进行展望, 并探讨未来空天地一体化网络的发展方向。

关键词: 空天地一体化网络; 协同传输技术; 认知无线电; 非正交多址接入技术; 内容分发网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021039

Research Status of Space-air-ground Integrated Network and Application Prospects of New Technologies

ZHANG Xiaokai, GUO Daoxing, ZHANG Bangning
PLA Army Engineering University, Nanjing, 21007, China

Abstract: To achieve the demand of all-time all-area coverage of wireless communications, space-air-ground integrated network (SAGIN) is important systematic development direction with global coverage, optional reception, and proportional demand service, which deeply integrate the satellite-based network, aerial-based network, and terrestrial-based network to break down the systematic barriers of each network and give full play to the functions of different network dimensions. The development process of the SAGIN from the aspects of policy orientation, academic innovation, standards and norms were discussed. At the same time, the applications of the new emerged technology in the SAGIN were prospected, and the possible development direction of the SAGIN in the future was discussed.

Keywords: space-air-ground integrated network, cooperative transmission technology, cognitive radio, non-orthogonal multiplex access, content delivery network

1 引言

为了解决在任意位置无缝的信息接入问题, 天基、空基、海基、地基等各种网络服务不断涌现^[1]。地面无线通信系统经过五代的发展, 目前已经较为成熟, 但是仍然存在覆盖范围不够广的问题。为了实现低时延、高带宽、全球覆盖的要求, 低轨 (LEO) 卫星星座逐渐成为研究热点。以Starlink、OneWeb为代表的商业LEO星座项目的开展, 使得全球任意位置实现无线接入高速互

联网成为可能。它与成熟的高轨 (GEO) 卫星星座、中轨 (MEO) 卫星星座共同组成了天基网络的基础设施^[2]。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。若传输信号受到遮挡或者产生衰落, 视距传输链路将变得不可靠。例如位于城市中心人口密集场所被各种高楼大厦遮挡的用户、人口稀少的丛林地区被灌木丛和树林遮挡的用户、室内的用户以及处于波束边缘的用户等^[2]。同

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2021-11-06

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (No. BK20191328)

Foundation Item: Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No. BK20191328)

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相互独立,在一定程度上互相补充。空天地一体化网络(Space-Air-Ground Integrated Networks, SAGIN),被广泛认为是未来无线通信系统的发展方向^[3-6]。建设空天地一体化网络,需要深度结合天基网络、空基网络、地基网络,在不同空间维度上发挥各自优势,不断突破网络边界限制,进而实现广域的全覆盖和无线网络的互联互通。未来的网络架构将实现在不同空间维度上部署通信基础设施的目标。网络的演进路线如图1所示。

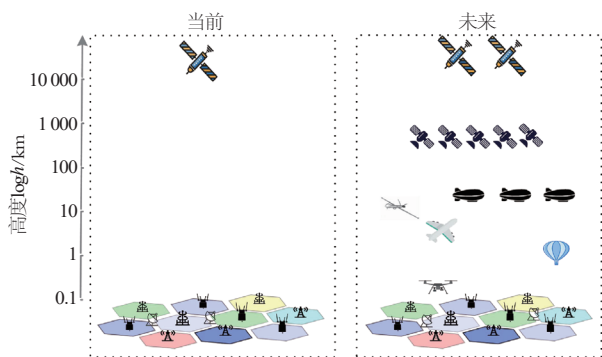


图1 网络的演进路线

从3GPP的R16开始,5G网络开始研究非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)的主要技术特性^[7]。为了满足“任何人(Anyone)在任何时间(Anytime)、任何地点(Anywhere)与任何人(Anyone)进行任何业务(Any-service)”的“5A”泛在通信需求,空天地一体化网络将成为6G网络重要组成部分^[8]。目前,我国商用5G系统走在了世界前列,但是网络覆盖无法走出去。空天地一体化网络可以提供全时全域连续可靠的信息支撑能力,满足我国西部人口稀疏地区以及海外热点地区的信息覆盖需求。

空天地一体化网络的本质是将原本独立的地面网络、空基网络和天基网络进行有机融合,实现空天地一体化,充分利用不同网络在不同空间维度上的优势,建立可靠、灵活、高效的融合网络架构。天基网络和空基网络均可为地面用户提供网络接入服务,但是各种网络之间往往是异构的,不同终端难以在不同的网络中实现随遇接入。随着新场景、新需求的出现,天基网络、空基网络与地基网络正朝着不断融合的趋势进行演进^[9]。空天地一体化网络将实现人联与物联、近域与广域、空天与地面的全面连接,为用户提供泛在的通信服务。

2 空天地一体化网络重要科研项目

近十年来,众多国家和地区在空天地一体化网络发展的进程上做出了积极探索,多个重大科研项目积极展开,具有非常强的导向性。接下来主要介绍在空天地一体化网络领域的重大项目内容和研究进展。

2012年,CoRaSat项目^[10]将认知无线电技术与卫星网络结合,以提高频谱资源的利用率。CoRaSat项目主要研究基于Underlay模式的频谱共享技术,主要考虑在不会对共享频谱的卫星或地面系统产生有害干扰的前提下,将未被充分利用的频谱资源进行灵活、智能的利用,提高资源利用率。

2015年,欧盟启动“地平线2020”研究项目SANA^[11],目的是利用卫星网络提高地面移动无线网络回程的性能,同时实现在不同区域提供灵活的网络覆盖。紧接着2017年,欧盟“地平线2020”5GPPP的第二阶段提出SaT5G项目^[12]。该项目主要目标是将卫星系统以低成本集成到5G网络服务当中,主要以卫星回程和流量卸载方式确保5G网络的无缝接入。同时,SaT5G参与推进欧洲电信标准化协会(ETSI)和关于空地融合网络的标准化工作。

VITAL^[13]项目通过将网络功能虚拟化和软件定义网络引入星地混合网络中,将网络中的资源进行统一的管理和动态的调度,使得整个网络资源的利用率更高,传输的稳健性更强。VITAL将通过卫星网络和地基网络灵活集成,聚焦于卫星虚拟网络运营商服务、卫星回传服务和卫星—地面的混合接入等场景,可以带来更广的覆盖范围、更高的通信资源使用率和更好的网络弹性。

欧洲航天局于2017年启动SATNEX IV^[14]研究项目。该项目目的是在空间网络中评估地面无线通信的典型技术和应用。例如,对卫星集群、天基自组织网络等方案进行评估。

2018年,SATIS5^[15]项目启动。该项目的目的是在卫星和地面网络相集成的情况下,为5G网络传输体制构建验证测试平台。将新兴的使能技术运用于该平台之上,推动卫星网络与5G网络的融合进程。

为推进空天地一体化网络发展的进程,我国于2010年启动了LTE技术标准的卫星移动通信技术研究,并向ITU提交了基于LTE技术标准的卫星移动通信系统草案^[16-17]。2019年11月启动的6G专项研究计划将卫星通信与B5G/6G地面移动通信技术的融合问题列为移动通信网络发展的方向。2020年4月,国家发展和改革委员会首次明确将基于卫星的互联网视为通信网络基础设施,并纳入“新基建”范畴。2020年6月,中国联通发布《空天地一体化通信网络白皮书》,对空天地一体化网络的应用场景进行了分析,对空天地一体化发展愿景进行了规划。“十四五”规划和2035远景目标强调,我国要建设成为网络强国,重点发展新一代移动通信和下一代互联网。

3 新技术在空天地一体化网络中应用展望

近年来,无线通信围绕着频谱效率和功率效率,提出众多的新技术。例如协同通信(Cooperative Communication, CC), 认知无线电(Cognitive Radio, CR), 非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), 移动边缘计算等。

3.1 基于中继的空天地一体化协作传输技术

空天地协同传输网络通过空中或者地面中继辅助传输卫星信号,能够有效提高卫星通信的覆盖范围,改善卫星和用户之间无法直接建立可靠传输链路的矛盾^[18]。参考文献[19-20]研究了星地混合协同传输网络的性能,其中卫星链路服从Rician分布、中继到用户链路服从Nakagami-m分布,地面中继采用放大转发(Amplify and Forward, AF)协议,推导了用户中断概率和误符号率的解析表达式,通过仿真结果可以看出协同传输在扩大卫星覆盖范围与提高功率资源利用率上具有较大的优势。参考文献[21]将协同传输思想推广到星地混合自由空间光通信网络。参考文献[22]对星地协同传输网络在不同中继选择策略下的系统性能进行了分析。由于卫星通信距离较远,传输过程中路径损耗大、传输时延长等因素,通过导频估计的信道状态信息与实际值之间会存在一定的误差^[23-24]。参考文献[25]分析了不准确信道状态信息情况下星地协同传输网络性能。

在卫星直达链路被遮挡或者产生严重衰落时,通过地面辅助中继可以有效提升网络的覆盖,但若地面辅助节点的地理位置不佳,在协同传输过程中分集增益往往非常有限。为了解决这个问题,一个可行的方案是设置多个地面中继。参考文献[26]分析了在星地协同传输网络中多个中继下多用户和联合调度的场景,在Max-Max准则下,推导出了用户中断概率的闭合表达式。但该方法在传输过程中需要保证信号的同步,使得实现复杂度较高。另外一个简单的策略是在多个中继中选择链路质量最佳的中继进行传输,以提升系统性能。参考文献[27]推导了星地协同传输网络中在最优中继选择策略下用户精确的中断概率表达式。参考文献[28]推导了最优用户选择策略下用户中断概率和遍历容量性能,同时利用高信噪比下的渐进表达式分析了系统分集度。

因此,在未来空天地一体化网络中,利用空基或者地基的中继进行传输,可以大大增强传输的稳定性。协同传输需要将传输分为多个子时隙,会带来传输协议的复杂性。因此,在多个用户的情况下,如何合理有效地进行协同传输,将是未来研究的重点。

3.2 基于认知无线电的空天地一体化网络频谱共享技术

为了提升频谱资源的利用率,认知无线电技术被引入空天地一体化网络,构建空天地认知网络框架。通过卫星网络和地面网络进行频谱资源共享,以提升频谱资源的利用率^[29]。目前,星地之间动态频谱共享的研究可分为Interweave、Underlay和Overlay三种模式^[30],也可以分为卫星网络为主用户和地面网络为主用户两种模式。

卫星通信传输带宽较大,在非热点地区空闲频谱较多。基于Interweave模式的星地混合网络,次级网络可以在主用户空闲时,进行机会频谱接入。参考文献[31]基于地理频谱数据库,研究了Interweave模式下卫星宽带信号的频谱感知以及地面次级用户动态接入问题。参考文献[32-35]研究了在多波束卫星通信系统中出现频谱空洞时,地面网络采用频谱租赁的方式接入卫星空白频谱,其通过议价博弈、频谱拍卖、“市场营销”等策略和方法,进一步提升频谱资源在次级网络中的利用率。

基于Underlay模式的星地混合认知网络,次级网络产生的同频干扰不能超过主网络的容限。参考文献[36]研究了地面次级网络通过功率控制的方式满足干扰噪声温度约束,同时推导了星地混合认知网络在Underlay模式下主、次用户的传输中断概率、系统遍历容量等性能表达式。参考文献[37]研究了地面网络为主网络的星地混合认知网络的系统性能,其中,地面主网络用户同时受到来自卫星次级网络干扰和地面小区间同信道干扰。参考文献[38]提出一种双认知中继连续为同一个移动用户提供放大转发服务的通信模型,并将同信道干扰转化为传输功率约束,通过功率控制实现可达速率最大化的问题。参考文献[39]对星地混合认知网络中的实时应用通信场景进行了讨论,针对认知卫星用户的时延容忍容量和中断容量这两项性能指标,提出两种不同的最优功率控制方案,在满足地面网络主用户干扰约束的情况下,获得了认知卫星用户的最优化性能指标。参考文献[40]对参考文献[39]的星地混合网络模型进行了更深入的分析,提出一种非完全信道状态信息条件下的功率优化控制方案,在保证地面主用户通信质量的情况下实现了认知卫星用户的中断容量最大化。参考文献[40]研究了存在硬件损伤的情况下,在多波束认知星地混合网络存在多个主用户以及干扰时的用户中断概率。

在基于Overlay模式星地认知网络中,次级网络通过中继主用户信号以获取频谱接入的机会。因此在Overlay模式下,既提升了主网络覆盖范围,又为次级网络提供了频谱接入的机会,实现“双赢”的局面。参考文献[41-42]研究了在卫星直传链路受到遮挡的条件下,卫星主网络与地面认知网络进行协作频谱共享,在地面的认

知中继采用AF协议转发卫星信号的情况下,推导了主、次级用户传输中断概率,并对关键参数对系统的影响进行了分析。目前对星地混合网络中的Overlay模式的研究不够深入,需进一步探索在空天地一体化网络中的应用优势。

3.3 基于非正交多址接入技术的空天地一体化多址接入技术

功率域的NOMA在功率这一个新的维度上进行频谱的复用,可以显著增加用户接入数量和提高频谱资源的利用率。随着数字信号处理技术的快速发展,叠加编码(Superposition Coding, SC)、多用户检测(Multi-users Detection, MUD)和串行干扰消除(Serial Interference Cancellation, SIC)技术逐渐成熟,功率域NOMA的可实现性不断增加,近年来受到学术界和产业界的广泛关注。

由于NOMA的众多潜在优势,NOMA传输技术在星地混合网络中的应用逐渐成为了热点。参考文献[43-44]对NOMA传输技术在移动卫星网络的可行性进行了分析,并推导用户的中断概率、遍历容量和平均误符号率。参考文献[45]将C-NOMA概念引入星地混合网络,在Shadowed-Rician信道下和强用户采用AF转发策略的情况下,推导了用户的中断概率和遍历容量。参考文献[46]推导了在星地混合中继网络中基于NOMA传输方式的用户中断概率表达式。参考文献[47]推导了在星地混合认知网络中采用NOMA传输的方式下主、次级用户的遍历容量。参考文献[48]将NOMA应用于星地混合网络的地面部分,并通过波束成形和功率资源分配最大化系统传输容量。参考文献[49]同样对仅有地面部分采用NOMA的星地混合网络进行了研究,并对波束成形与功率分配进行了联合优化。

学术界已经开始对NOMA这一新型多址接入技术在星地混合网络中的应用展开了探索。NOMA传输技术存在诸多的优点,但在空天地混合网络中的应用及相应的关键技术方面的研究仍有较大的空白。在空天地混合网络设计中,结合NOMA传输方式的灵活特点,探索NOMA赋能在不同网络架构下的系统性能具有重要意义。

3.4 空天地一体化内容分发网络

随着制造业的不断发展,智能终端的数量和种类在不断增加,随之而来的各种高带宽业务也不断涌现。例如超高清视频业务、虚拟现实(Virtual Reality, VR)业务、增强现实(Augmented Reality, AR)业务等,导致通信网络传输的数据量呈现爆炸性增长态势^[50]。无线网络承载的内容已经从文字、语音、视频等传统业务转变为

流媒体视频、内容共享等“内容导向”的新兴业务^[51]。目前卫星提供的互联网服务架构却仍是根据“连接导向”的理念设计的,例如基于TCP/IP的框架。尽管卫星通信技术在不断的发展,研究人员提出了星上处理转发、高通量卫星等新型技术,但是由于卫星的功率限制以及频谱资源的稀缺性,仍然无法保证不同用户服务质量要求和体验质量要求^[52]。

可以看出,受现有卫星通信架构以及紧缺的频谱资源的桎梏,现有的网络框架已经难以满足用户对海量内容的获取以及对多样化业务的需求,仅靠提高通信连接能力无法有效破除卫星网络目前所处的僵局。只有从当前通信架构处理海量内容分发业务的本质特点出发,对新的网络构架和通信模式进行挖掘,才是未来空天地混合网络的发展方向。

近年来,通过面向内容以及集成现有的内容分发网络(Content Delivery Network, CDN),逐渐构建了以信息为中心的网络(Information-Centric Networking, ICN)。相比于传统以连接为中心的网络,ICN采用发布(Publish)和订阅(Subscribe)的模式,可以实现更有效的内容感知路由策略^[53-54]。ICN两个重要的特点是网内缓存(In-Network Caching)以及命名路由(Routing by Name)。在无线侧,基于无线边缘缓存(Wireless Edge Caching)的内容共享技术被提出^[55-56],其通过用户对流行内容的偏好程度进行分析,将流行程度高的内容提前缓存在距离请求用户更近的边缘无线节点。当终端用户发起请求时,若请求的内容已经提前存在于边缘缓存节点,可以直接从边缘缓存的无线节点获取而无须通过核心网获取内容。因此,系统可以减少流行程度高的内容通过回程链路的重复性传输,进一步降低传输时延,提高用户服务质量,降低网络负载的压力。

因此,借鉴无线边缘缓存的概念,考虑空天地一体化网络的中继具有边缘缓存能力,将热点内容提前缓存至网络节点之中。待用户需要内容时,首先向缓存节点进行请求,若请求的内容存在于缓存节点中,则直接由缓存节点进行服务,进而减少传输时延和缓解天基网络的内容卸载压力。

3.5 空天地一体化网络中的边缘计算

随着5G的发展,许多的应用要求具有高速宽带接入、低时延的特点,同时又需要巨大的计算复杂度,例如VR/AR、高保真8K视频、机器学习实时信息处理等。诸多网络节点的计算能力较弱,因此需要进行计算卸载,可以降低处理所需的时延^[55-56]。

目前在星地融合网络移动边缘计算概念刚刚兴起,

而面向5G的地面蜂窝网络已经有了很深入的研究。借鉴地面移动边缘计算的研究方式,可以研究空天地一体化网络的移动边缘计算服务器的部署问题。目前空天地一体化网络中MEC服务器可以部署在地面基站、LEO卫星以及信关站;同时需要考虑消耗总能量、传输时延、信道占用度、用户优先级等限制条件;最终需要实现最小化用户感知时延、最小化能量消耗、最大化能量效率等目标;从而实现连接基站侧MEC服务器、连接LEO星上MEC服务器(包括选星策略)、连接网关站MEC服务器,如图2所示。

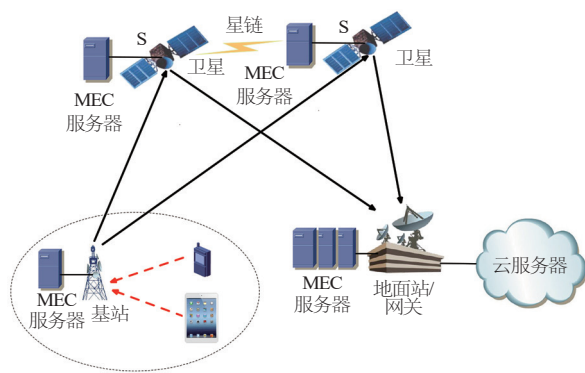


图2 空天地一体化网络边缘计算框架

表1 空天地一体化网络标准化进程(部分)

组织	标准号	研究内容
3GPP	3GPP TR 38.913 ^[57]	开发下一代接入技术的部署场景和需求,将卫星网络作为地基网络扩展的场景
	3GPP TS 22.261 ^[58]	卫星接入技术被纳入5G网络的基本接入技术之一
	3GPP TR 22.891 ^[59]	在使用卫星进行5G网络连接的场景下,指出当前地基网络技术需要进一步提升以实现全球无缝覆盖、时延不超过275 ms的空中接口以及地面与卫星网络之间的无缝切换
	3GPP TR 23.799 ^[60]	卫星集成到5G网络架构中,可实现高效的路径重选,并以最小的服务中断支持服务的连续性
	3GPP TR 38.811 ^[61]	支持NTN的新无线研究项目,研究考虑并比较了卫星网络、空中接入网以及地面蜂窝网络的架构原理和信道模型差异
	3GPP TR 22.822 ^[62]	在5G卫星网络的架构下确定了未来以及现有的服务在设置、配置和维护方面的需求以及卫星和地基网络之间切换的监管问题
ETSI	ETSI TR 103 124 ^[63]	卫星网络和地基网络场景的定义和分类
	ETSI TR 103 263 ^[64]	将CR技术在遵守规定的前提下引入卫星通信,并强调了在Ka频段的使用场景
	ETSI TR 103 293 ^[65]	卫星网络作为回程链路,解决了无线接入网中的流量分配问题
	ETSI TR 103 351 ^[66]	提出卫星和地基网络融合的典型场景
	ETSI TS 102 357 ^[67]	提出利用卫星构建独立服务接入点,并规范了物理空中接口
DVB	DVB-S2X ^[68]	将卫星视为向地面提供数字电视和IP服务的广播者
CCSDS	CCSDS标准体系 ^[69]	根据空间通信特点制定的空间卫星通信协议标准
ECPTA	ECC report 280 ^[70]	提出5G集成网络中基于卫星的几种典型用例

4 空天地一体化网络的标准规范

随着科研项目和学术界对空天地一体化网络的深入研究,该系统的价值逐渐得到更多关注,空天地一体化网络标准化工作在同步进行,包括与目前5G网络体制相结合。其主要有3GPP, ESTI, 数字视频广播(Digital Video Broadcast, DVB)组织,空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS), 欧洲邮政和通信管理局会议(European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, ECPTA), 电子通信委员会(Electronic Communication Committee, ECC)等组织在推进空天地融合网络标准化中的主要进程。部分标准以及主要内容见表1。随着标准化工作的推进,空天地一体化网络将会成为未来通信网络的重要组成部分。

参考文献:

- [1] 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.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information Network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230.
ZHANG N T, ZHAO K L, LIU G L. Thought on constructing the integrated space-terrestrial information Network Chinese full text[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223-230.
- [3] ZHAO Y, XIE L, CHEN H F, et al. Ergodic channel capacity analysis of downlink in the hybrid satellite-terrestrial cooperative system[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(3): 3799-3815.
- [4] 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.
ZHANG P, ZHANG J H, QI Q, et al. Ubiquitous-X: constructing the future 6G Networks Chinese full text[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(6): 913-930.
- [5] 王海超, 王金龙, 丁国如, 等. 空天地一体化网络中智能协同抗干扰技术[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(3): 185-191.
WANG H C, WANG J L, DING G R, et al. Intelligent cooperative anti-jamming technology in space-air-ground integrated Networks Chinese full text[J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(3): 185-191.
- [6] KUANG L L, CHEN X, JIANG C X, et al. Radio resource

- management in future terrestrial-satellite communication networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(5): 81-87.
- [7] 刘立祥. 天地一体化网络[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- LIU L X. Space-Integrated-Ground Information Networks[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [8] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.2.0[S]. 2019.
- [9] 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 Chinese Full Text[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(3): 3-19.
- [10] LIOLIS K, SCHLUETER G, KRAUSE J, et al. Cognitive radio scenarios for satellite communications: the CoRaSat approach[C]// *Proceedings of 2013 Future Network & Mobile Summit*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [11] European Union. SANSa[EB]. 2015.
- [12] European Union. SaTIS5[EB]. 2017.
- [13] European Union. Virtualized hybrid satellite-terrestrial systems for resilient and flexible future networks[EB]. 2017.
- [14] European Space Agency. SATNEX IV[EB]. 2017.
- [15] SATIS5 Consortium. SATIS5[EB]. 2018.
- [16] 闫岩. 认知星地网络中的稳健波束成形技术研究[D]. 南京: 陆军工程大学, 2020.
- YAN Y. Research on robust beamforming technology in cognitive satellite-ground network[D]. Nanjing: Army University of Engineering, 2020.
- [17] 陈祝允. 面向频谱共享的星地混合网络无线资源管理技术研究[D]. 南京: 陆军工程大学, 2020.
- CHEN Z Y. Research on radio resource management technology of satellite-ground hybrid network oriented to spectrum sharing[D]. Nanjing: Army University of Engineering, 2020.
- [18] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Cooperative transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(3): 204-210.
- [19] IQBAL A, AHMED K M. A hybrid satellite-terrestrial cooperative network over non identically distributed fading channels[J]. *Journal of Communications*, 2011, 6(7): 581-589.
- [20] BHATNAGAR M R, M K A. Performance analysis of AF based hybrid satellite-terrestrial cooperative network over generalized fading channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(10): 1912-1915.
- [21] BHATNAGAR M R, ARTI M K. Performance analysis of hybrid satellite-terrestrial FSO cooperative system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(22): 2197-2200.
- [22] SAKARELLOS V K, KOUROGIORGAS C, PANAGOPOULOS A D. Cooperative hybrid land mobile Satellite-Terrestrial broadcasting systems: outage probability evaluation and accurate simulation[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 79(2): 1471-1481.
- [23] ARTI M K. Channel estimation and detection in satellite communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(12): 10173-10179.
- [24] M K A. Performance evaluation of maximal ratio combining in Shadowed-Rician fading land mobile satellite channels with estimated channel gains[J]. *IET Communications*, 2015, 9(16): 2013-2022.
- [25] M K A. Channel estimation and detection in hybrid satellite-terrestrial communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(7): 5764-5771.
- [26] UPADHYAY P K, SHARMA P K. Max-max user-relay selection scheme in multiuser and multirelay hybrid satellite-terrestrial relay systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(2): 268-271.
- [27] SRENG S, ESCRIG B, BOUCHERET M L. Exact outage probability of a hybrid satellite terrestrial cooperative system with best relay selection[C]// *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 4520-4524.
- [28] AN K, LIN M, LIANG T. On the performance of multiuser hybrid satellite-terrestrial relay networks with opportunistic scheduling[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(10): 1722-1725.
- [29] GÜR G. Spectrum sharing and content-centric operation for 5G hybrid satellite networks: prospects and challenges for space-terrestrial system integration[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(4): 38-48.
- [30] JIA M, GU X M, GUO Q, et al. Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(6): 96-106.
- [31] SHARMA S K, MALEKI S, CHATZINOTAS S, et al. Joint carrier allocation and beamforming for cognitive SatComs in ka-band (17.3-18.1 GHz)[C]// *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 873-878.
- [32] LI F, LAM K Y, HUA J Y, et al. Improving spectrum management for satellite communication systems with hunger marketing[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(3): 797-800.
- [33] LI F, LAM K Y, ZHAO N, et al. Spectrum trading for satellite communication systems with dynamic bargaining[J]. *IEEE*

- Transactions on Communications, 2018, 66(10): 4680-4693.
- [34] LI F, LAM K Y, CHEN H H, et al. Spectral efficiency enhancement in satellite mobile communications: a game-theoretical approach[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 200-205.
- [35] LI F, LAM K Y, LIU X, et al. Joint pricing and power allocation for multibeam satellite systems with dynamic game model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2398-2408.
- [36] LI Z T, XIAO F, WANG S G, et al. Achievable rate maximization for cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with AF-relays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 304-313.
- [37] RUAN Y H, LI Y Z, WANG C X, et al. Outage performance of integrated satellite-terrestrial networks with hybrid CCI[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7): 1545-1548.
- [38] LI Z T, XIAO F, WANG S G, et al. Achievable rate maximization for cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with AF-relays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 304-313.
- [39] SHI S C, LI G X, AN K, et al. Optimal power control for real-time applications in cognitive satellite terrestrial networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1815-1818.
- [40] SHI S C, AN K, LI G X, et al. Optimal power control in cognitive satellite terrestrial networks with imperfect channel state information[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(1): 34-37.
- [41] GUO K F, AN K, ZHANG B N, et al. Outage analysis of cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with hardware impairments and multi-primary users[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 816-819.
- [42] SHARMA P K, UPADHYAY P K, DA COSTA D B, et al. Performance analysis of overlay spectrum sharing in hybrid satellite-terrestrial systems with secondary network selection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6586-6601.
- [43] YAN X J, XIAO H L, WANG C X, et al. Performance analysis of NOMA-based land mobile satellite networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 31327-31339.
- [44] YAN X J, AN K, LIANG T, et al. The application of power-domain non-orthogonal multiple access in satellite communication networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 63531-63539.
- [45] YAN X J, XIAO H L, AN K, et al. Hybrid satellite terrestrial relay networks with cooperative non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(5): 978-981.
- [46] YAN X J, XIAO H L, WANG C X, et al. Outage performance of NOMA-based hybrid satellite-terrestrial relay networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(4): 538-541.
- [47] YAN X J, XIAO H L, WANG C X, et al. On the ergodic capacity of NOMA-based cognitive hybrid satellite terrestrial networks[C]// Proceedings of 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [48] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Non-orthogonal multiple access based integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2253-2267.
- [49] LIN Z, LIN M, WANG J B, et al. Joint beamforming and power allocation for satellite-terrestrial integrated networks with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(3): 657-670.
- [50] FANG C, YAO H P, WANG Z W, et al. A survey of mobile information-centric networking: research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2353-2371.
- [51] WANG N, NOUWELL N, GE C, et al. Satellite support for enhanced mobile broadband content delivery in 5G[C]// Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [52] WANG X M, LIY H, YAO W B, et al. Content delivery for high-speed railway via integrated terrestrial-satellite networks[C]// Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [53] GÜR G, KAFILO, LU S. Layered content delivery over satellite integrated cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(3): 390-393.
- [54] 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.
- [55] WU H, LI J, LU H C, et al. A two-layer caching model for content delivery services in satellite-terrestrial networks[C]// Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [56] LI J, XUE K P, LIU J Q, et al. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 188-195.
- [57] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: TR 38.913 V15.0.0[S]. 2018.

- [58] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22.261 V17.2.0[S]. 2020.
- [59] 3GPP. Study on new services and markets technology enablers: TR 22.891 V14.2.0[S]. 2016.
- [60] 3GPP. Study on architecture for next generation system: TR 23.799 V14.0.0[S]. 2016.
- [61] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.2.0[S]. 2019.
- [62] 3GPP. Study on using satellite access in 5G: TR 22.822 V16.0.0[S]. 2018.
- [63] ETSI. Satellite earth stations and systems (SES); combined satellite and terrestrial networks scenarios: TR 103 124 V1.1.1[S]. 2013.
- [64] ETSI. System reference document (SRdoc); cognitive radio techniques for satellite communications operating in Ka band: TR 103 263 V1.2.1[S]. 2016.
- [65] ETSI. Broadband radio access networks (BRAN); broadband wireless access and backhauling for remote rural communities: TR 103 293 V1.1.1[S]. 2015.
- [66] ETSI. Satellite earth stations and systems (SES); multi-link routing scheme in hybrid access network with heterogeneous links: TR 103 351 V1.1.1[S]. 2017.
- [67] ETSI. Satellite earth stations and systems (SES); broadband

satellite multimedia (BSM); common air interface specification; satellite independent service access point (SI-SAP) interface: primitives: TS 102 357 V1.2.1[S]. 2015.

[68] DVB. DVB Specifications[EB]. 2019.

[69] CCSDS. Blue books: recommended standards[EB]. 2019.

[70] ECC Report 280. Satellite solutions for 5G[EB]. 2018.

[作者简介]



张晓凯（1992-），男，陆军工程大学讲师，主要研究方向为空天地一体化网络、卫星通信、非正交多址接入、信号极化特性等。



郭道省（1972-），男，陆军工程大学教授，主要研究方向为卫星通信、通信抗干扰、空天地一体化网络、物理层安全、无人机通信等。



张邦宁（1972-），男，陆军工程大学教授，主要研究方向为卫星通信、通信抗干扰、空天地一体化网络、无人机通信等。