



专题：空天地一体化通信技术

基于星地协同组网的天地一体关键技术研究

翁玮文, 程锦霞, 刘京, 刘姗姗, 马克, 邓伟
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 随着天地一体通信的快速发展, 面向泛在宽带通信需求, 卫星与地面蜂窝通信产业生态系统逐步走向融合。为实现卫星与地面网络在覆盖、资源、调度等方面的高效协同, 提升网络整体性能, 星地协同组网将是未来天地一体发展的重要方向。面向天地融合网络的目标愿景, 阐述了天地一体融合组网的发展现状及存在的技术挑战, 创新性地提出基于星地协同部署的天地一体网络架构与技术体系, 并深入分析星地波位级、业务级、规划级协同关键技术方案与优势, 为后续业界星地网络协同技术研究提供方向指引。

关键词: 天地一体; 星地协同组网; 波位级; 业务级; 规划级

中图分类号: TN915.85

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024173

Key technical research of space-terrestrial integrated network based on satellite-terrestrial collaborative networking

WENG Weiwen, CHENG Jinxia, LIU Jing, LIU Shanshan, MA Ke, DENG Wei
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the rapid development of space-terrestrial integrated communication technologies, the satellite and terrestrial cellular communication industry ecosystems are gradually converging to meet the needs of ubiquitous broadband communication. In order to achieve efficient collaboration between satellite and terrestrial networks in terms of coverage, resources and scheduling, and improve the overall network performance, satellite-terrestrial collaborative networking will be an important direction of space-terrestrial integrated network in the future. Aiming at the goal and vision of space-terrestrial integrated network, the development status and technical challenges of space-terrestrial integrated network were explained, and the satellite-terrestrial integrated network architecture and technical system based on satellite-terrestrial collaborative deployment were proposed innovatively. The key technical schemes of satellite-terrestrial network collaboration at beam-level, service-level and planning-level were analyzed deeply, which provided guidance for the following research on satellite-terrestrial network collaboration technology.

Key words: space-terrestrial integrated network, satellite-terrestrial collaborative networking, beam-level, service-level, planning-level



0 引言

随着第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）、5G 非地面网络（non-terrestrial network, NTN）和6G天地一体技术的持续演进，卫星和地面网络正逐步形成深度融合趋势，天地一体融合组网可以充分结合卫星与地面蜂窝网络在覆盖范围、系统容量、产业规模 and 用户群体等方面的优势^[1]，实现优势互补；星地协同组网可实现网络资源高效智能调度、融合共享，从而提升网络使用效率^[2]。由于卫星移动网络与地面移动网络的巨大差异性，星地高效协同组网当前尚存在一系列技术挑战。本文正是从这些技术挑战以及星地各自的特性着手，系统性地提出了一种面向星地协同的天地一体网络架构，有助于实现星地网络间的高效协同。

1 天地一体融合组网研究背景及现状

国际上天地一体技术及应用进入了全新的快速发展阶段。管制机构、卫星及地面设备厂商和运营商巨头纷纷入场。一是加速制定天地频率共享政策。2023年4月，美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）启动了地面频谱共享的提案，为手机直连卫星提供政策支持。二是推进手机直连卫星端到端能力构建和启动商用试点，如泰雷兹、高通、爱立信启

动5G太空项目，利用低轨卫星开展NTN试验。SpaceX和T-Mobile成立技术联盟，开展手机直连卫星研究测试^[3]。国内将“天地一体”作为数字信息技术和网络发展的重要目标。政府密集出台政策推进卫星互联网发展，产学研用各方积极投入，产业发展迅速。中国移动积极开展手机直连、天地融合的技术攻关、标准推进和产业合作。2022年8月，中国移动完成全球首个运营商5G NTN终端直连卫星技术外场验证。2023年5月，中国移动完成了我国首款5G NTN手机直连卫星实验室验证。2024年2月，搭载中国移动星载基站和核心网设备的两颗5G-Advanced/6G天地一体低轨试验卫星成功发射入轨。

现有地面网络仅覆盖了地球表面陆地约20%的地区，覆盖面积小于地球表面积的6%。为提供全域无缝覆盖服务，实现“任何人、任何时间、任何地点”都可以通信的移动通信目标，为地面网络无法部署或建网维护成本高昂的地点填补覆盖空洞，天地一体融合网络将面向偏远地区、荒漠、海洋、航空等陆海空全域立体空间实现“泛在连接”，提供大众手机直连、行业终端直连卫星和各类应急救援保障等“泛在场景”新服务^[4]。天地一体融合网络应用场景如图1所示。

2 面向星地协同的天地一体网络架构

面向星地协同的天地一体网络架构的目标是

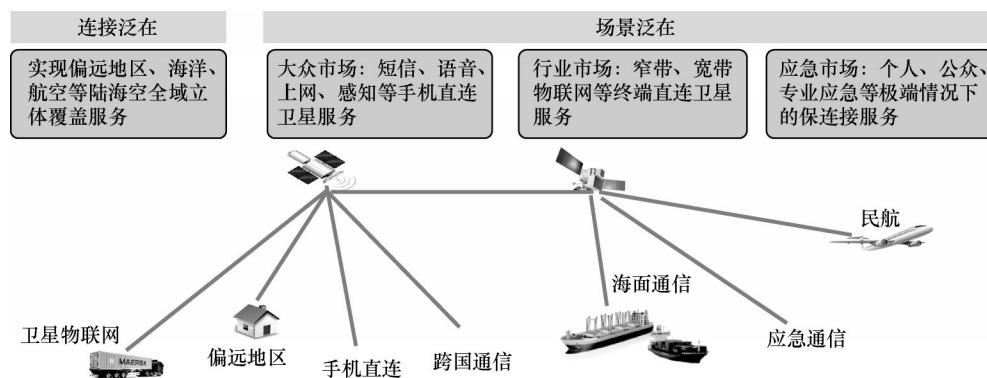


图1 天地一体融合网络应用场景

实现星地覆盖、资源、调度等高效协同,最大化网络效率,降低网络成本,同时实现无缝的星地切换能力,保障业务连续性和用户体验^[4-5]。天地一体融合中存在诸多挑战,如星地网络结构差异大、卫星网络拓扑高速动态变化、星上网元算力受限等^[6-7],这些挑战不可避免地带来以下技术问题。

(1) 星地邻区关系建立难

众所周知,邻区关系的建立有助于实现用户高效的移动性管理,从而保障业务连续性,但星地间精准邻区关系的建立面临诸多问题:卫星网络中一颗卫星的覆盖区域为几十万平方千米,包含成百上千个波位,其映射到地面,星地交叠区可能跨越数个省(区市),包含的地面基站数量巨大。因此,如何进行星地交叠区内星地邻区关系智能编排,即卫星与地面基站的信息关联及动态管理是一个亟须关注的问题。

(2) 星地频率共享难。

随着美国联邦通信委员会通过了太空补充覆盖(supplemental coverage from space, SCS)新规则,星地频率共享是未来星地融合的一大方向。由于星地交叠区域涵盖地面基站数量众多,这些地面基站的状态并不是恒定不变的,存在变化的可能性,因此精细化的星地频率共享也存在挑战。针对此问题,可考虑基于卫星波位的星地共享频率智能编排,实现星地网络的动态协商,在地面网络无覆盖或者部分频率覆盖的区域,卫星网络能够使用地面网络频率,实现星地频率的高效利用。

(3) 星地基站连接建立难

星地交叠区可能包含的地面基站数量巨大,而卫星基站和地面基站很大可能归属于不同的核心网,那么卫星基站如何高效地与星地交叠区内的某一基站开展精细化业务协同(星地连接编排)也是一个需要考虑的问题。

(4) 星上网元算力受限

星上网元算力受限,卫星网络如何高效运用

人工智能通过星地间关联关系以及自身业务情况开展卫星基站规划变更(星地算力编排)也是未来需要考虑的一个方向。

基于以上邻区关系智能编排、星地频率智能编排、星地连接编排、星地算力编排等需求,引入星地智能动态协作网元以及面向波位/波位组的NTN卫星基站功能扩展设计,实现星地智能动态协作及编排的高效新型无线组网架构,星地智能动态协作的高效新型无线组网架构如图2所示。星地智能动态协作网元作为卫星网络与地面网络信息交互的协作平台,其功能如下:星地智能动态协作网元能够提供与地面及卫星基站或地面及卫星网络操作维护中心(operation and maintenance center, OMC)等网元接口能力;星地智能动态协作网元能够向地面基站或地面OMC等网元提供卫星规划覆盖图;星地智能动态协作网元可以接收地面基站或地面OMC等网元提供的在其覆盖区域内按波位归属对应的基站初始及增量信息(包括基站地理位置信息、基站工作频段等)。协同设计包含3个方面:一是通过星地智能动态协作网元能够基于卫星波位与星地交叠区内的地面基站实现星地基站间波位级协同,星地智能动态协作网元能够与星地交叠区域内的地面基站、卫星基站基于波位实现星地在位置、频率等关键信息的动态感知、自动更新,从而能够基于卫星波位粒度实现星地邻区建立、动态频率共享及高效的星地移动性增强^[8-10],即星地智能动态协作网元能够实现星地交叠区内邻区关系智能编排以及基于卫星波位的星地共享频率智能编排;二是星地智能动态协作网元能够响应星地交叠区内卫星基站与地面基站建立直连关系的需求,支撑实现星地基站间业务级协同,星地智能动态协作网元能够支撑星地交叠区域内的星地基站间建立虚拟Xn接口,基于虚拟Xn接口,星地基站间可实现细粒度业务协同,即星地智能动态协作网元能够实现星地连接编排;三是星地智能动态协



作网元能够基于星地交叠区域内卫星基站和地面基站在统计时间内的关联关系以及业务情况, 实现星地基站间规划级协同, 能够实现卫星覆盖区域以及内部波束的按需收缩及扩展。星地智能动态协作网元可作为一个独立实体, 也可采用分布式架构, 即包含卫星侧星地智能动态协作网元以及地面侧星地智能动态协作网元, 通过彼此之间的协作一起完成。

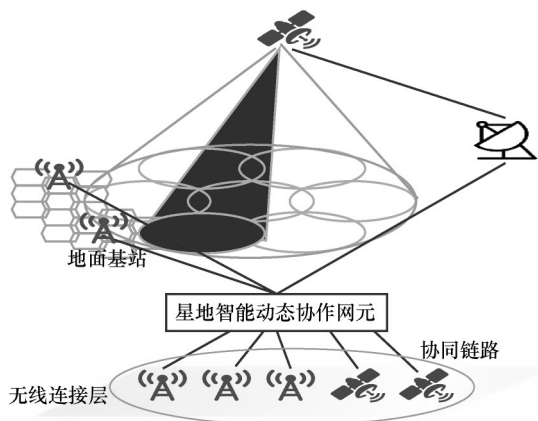


图2 星地智能动态协作的高效新型无线组网架构

3 面向星地协同的关键技术

为实现更加精细化的业务保障, 基于面向星地协同的天地一体架构, 提出了包括波位级、业务级和规划级的多级别多颗粒度的网络协同技术。通过面向星地覆盖波位级协同技术, 可实现对卫星波位级的星地交叠区内邻区关系配置、动态星地共享频率干扰协调以及精细化信息配置的编排管控。通过面向星地协同的业务级协同技术, 可实现在星地基站间建立直接联系, 进行干扰协调、负荷均衡以及星地双连接建立等, 实现星地基站间细粒度业务协同。通过面向星地覆盖规划级协同技术, 可基于星地基站的关联关系、业务情况等变化实现卫星覆盖区域以及内部波束的按需收缩及扩展, 更好地实现星地协同。

3.1 面向星地覆盖波位级协同

面向多波束卫星小区场景, 卫星覆盖区域波

位数量众多, 且相较地面小区而言覆盖范围巨大, 因此针对星地交叠覆盖区域, 其地面跨度可能跨越多个省(区市), 涵盖成百上千个甚至上万个地面基站, 如果基于传统小区级配置的方式无法构建有效的星地邻区关系, 则考虑引入面向波位/波位组的扩展功能设计, 基于星地智能动态协作网元的双向信息交互实现精细化配置及高效邻区关系建立。

面向波位/波位组的扩展功能设计主要思想是, 在传统小区设计的基础上, 以卫星的最基本覆盖单位——波位为参照, 将卫星小区覆盖范围内的一个或多个波位的集合作为一个波位组, 并引入对应标识来提升卫星小区管理的精细度。卫星基站基于星地智能动态协作网元代表的星地交叠区域动态更新信息进行波位/波位组粒度的信息配置。

(1) 精准邻区关系配置星地移动性增强技术

地面基站与卫星网络可基于星地智能动态协作网元进行波位关联关系信息的交互, 进而可知星地交叠覆盖区域信息。基于此信息, 卫星基站可针对不同波位/波位组在专用系统消息中进行同频邻区、异频邻区、异系统邻区等信息的配置, 便于用户精准邻区测量。当用户移动到不同波位/波位组内, 需重新接收当前波位/波位组系统消息内的邻区配置信息。地面小区精准邻区关系的配置方式同理。依照星地间精准邻区关系, 可实现星地交叠区域内用户空闲态及连接态移动性增强^[10-13], 星地精准邻区关系配置如图3所示, 同一个卫星小区, 实线波位需要配置星地邻区, 虚线波位则不需要。

本方案通过在广播消息中引入面向波位/波位组对应的专用广播信息, 可实现面向波位/波位组的精细化邻区关系配置, 将卫星中的最小覆盖单元波位信息引入卫星小区设计中, 同时借助于星地智能动态协作网元获取卫星对应波位内的地面小区信息, 从而能够建立基于波位的精准的星地

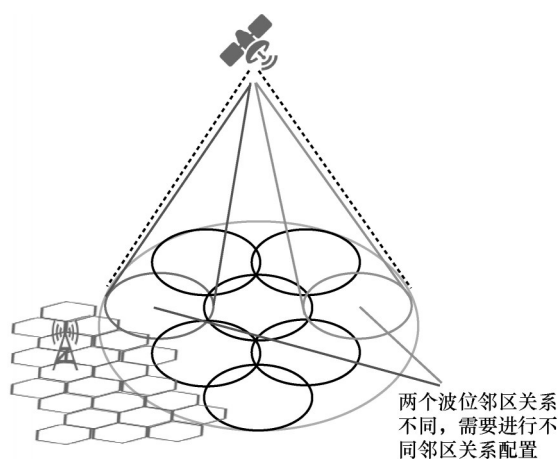


图3 星地精准邻区关系配置

邻区关系。其优势在于卫星小区以波位为基准进行星地移动性管理，相比于以整个卫星覆盖区域作为一个小区，广播的邻区信息可包含波位内地面基站的详细信息，有助于避免终端空闲态用户在小区重选中的大量无效测量，同时精准的星地邻区关系也有助于当连接态用户处于星地交叠区域内时卫星小区能针对性地下发面向地面基站的测控指令，加速星地切换的流程。

(2) 动态频率共享干扰协调技术

卫星与地面同频部署时，针对星地交叠区域，地面基站与卫星网络可基于星地智能动态协作网元进行波位关联关系以及频率使用情况信息的交互，实现高效频率共享。卫星基站通过扩展当前频率范围、上行补充频谱（supplementary uplink, SUL）、下行补充频谱（supplementary downlink, SDL）或载波聚合（carrier aggregation, CA）的方式以波位为最小单位复用地面所用频率，星地动态频率共享如图4所示，同一个卫星小区，实线波位不能使用波位内地面基站的对应频率，虚线波位则不受限制，可直接使用。

与传统方案相比，本方案借助于星地智能动态协作网元获取卫星对应波位覆盖范围内的地面小区信息（包含地理位置以及频段信息），实现波位与星地间可用频率关联关系的建立。通过将星地共享频率进行波位/波位组粒度的精细划分，

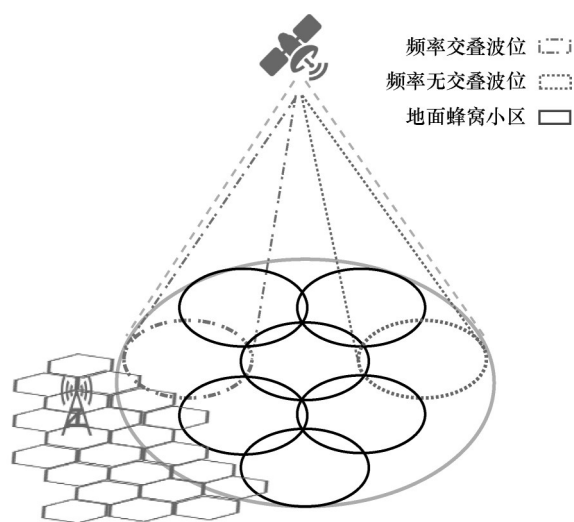


图4 星地动态频率共享

可基于波位/波位组级别实现星地频率的高效配置，在抑制星地交叠区同频干扰的前提下可有效提升频率使用效率，从而实现星地频率的高效共享。

(3) 精细化信息配置技术

地面基站发生注销或故障时，可由卫星上对应的一个或多个波位来进行服务区域接管，当前覆盖区域的位置信息、区域内业务情况等均可通过星地智能动态协作网元同步给卫星网络。为保证用户服务能力同时避免资源浪费，卫星网络需要针对新增的一个或多个波位内的业务分布或容量情况进行波位/波位组级别的精细化信息配置以适配不同区域的差异化需求（如随机接入时机（random access channel occasion, RO））。基于星地协同的精细化信息配置如图5所示，同一个卫星小区，实线波位与虚线波位可以配置不同的RO能力。

本方案着重面向卫星对地面基站进行补充覆盖的业务场景，与传统方案相比，可针对性地与地面网络形成优势互补。借助星地智能动态协作网元获取卫星对应波位覆盖范围内的地面小区信息（包含用户业务状态），基于故障基站覆盖范围内的用户业务信息，以波位/波位组为单位进行

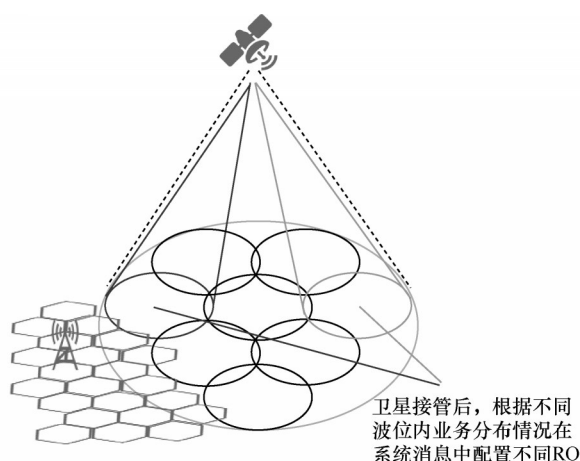


图5 基于星地协同的精细化信息配置

参数配置（如随机接入参数等）可满足对应波位里用户的差异化需求，有效避免地面基站区域故障对用户带来的不利影响，实现星地高效协作。

3.2 面向星地覆盖业务级协同

卫星覆盖范围巨大，常常横跨多个省份，即便在一个波位范围内，其覆盖范围也在几百至上千平方千米，星地交叠覆盖区内的地面基站与卫星基站在归属上当前分属于不同的网络系统，它们之间要建立直连关系存在挑战^[14]。星地智能动态协作网元作为星地交叠覆盖区内卫星基站与地面基站的星地协作节点，能够为卫星基站与地面基站建立直接或间接连接关系提供协作，即在星地智能动态协作网元上，能够接收卫星基站或地

面基站的动态发现及业务协作请求，能够支持卫星基站与地面基站建立虚拟接口，基于虚拟接口，星地基站间可实现细粒度业务协同。

面向星地覆盖的业务级协同如图6所示，通过星地智能动态协作网元，在同一波位内的卫星基站和地面基站能够动态发现对方，建立邻区关系。对于传统网络部署，由于星地分属于不同的核心网，卫星基站与地面基站无法建立直接的联系。如果具备邻区关系的卫星基站和地面基站希望实现细粒度业务协同，则地面基站或卫星基站可以通过星地智能动态协作网元发起连接，建立虚拟连接，这样卫星基站和地面基站就可以直接进行2个站点间的干扰协调、负荷均衡以及星地双连接的建立。面向星地覆盖的业务级协同尤其适合星地交叠区域内仅有少数地面基站的场景。

3.3 面向星地覆盖规划级协同

星地智能动态协作网元引入人工智能^[15]，可基于一段时间内星地交叠区域内卫星基站和地面基站的关联关系以及业务情况变化，通过卫星波位变更实现卫星覆盖区域以及内部波束的按需收缩及扩展。由于在星地交叠区域内卫星小区的波位收缩及扩展都会带来星地间邻区关系、频率共享关系的变化，需要由星地智能动态协作网元来协调星地间应对此变化带来的影响。基于星地协

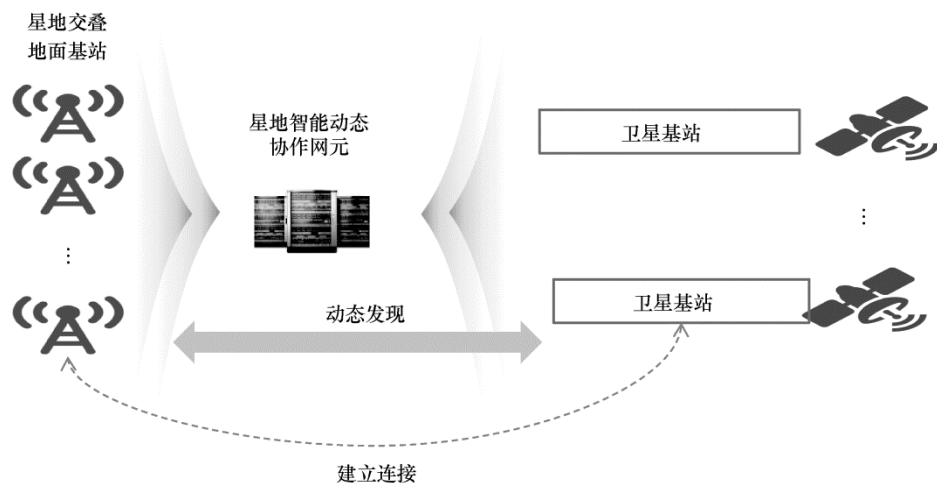


图6 面向星地覆盖的业务级协同

同的卫星小区波位减少协同示例如图7所示,星地智能动态协作网元能够通过长时间的分析统计,判定X所在波位的地面覆盖已完善,建议去除该波位。星地智能动态协作网元会基于星地间覆盖规划信息以及业务情况,向卫星小区发起对应波位收缩请求,卫星小区如确认采用该配置请求,则在其配置正式生效前,星地智能动态协作网元能够协调星地间信息同步变更,即星地智能动态协作网元提前将该波束覆盖信息剔除并下发至星地交叠区域与之相关的地面基站,保证信息同步。在得到星地智能动态协作网元的确认信息后,星上小区配置生效,去除相应波位。星地智能动态协作网元也会基于同样的规则协调处理波位扩展。

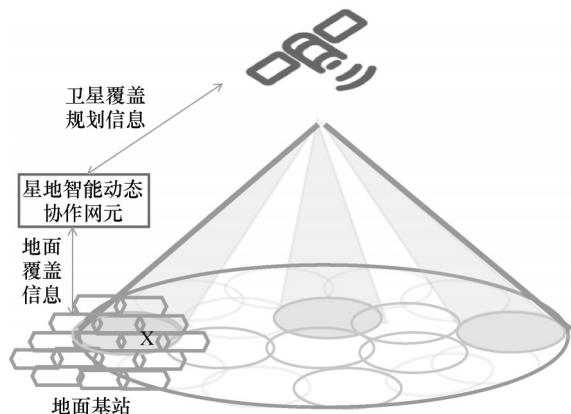


图7 基于星地协同的卫星小区波位减少协同示例

此方案相对传统技术,可以基于业务变化情况,灵活调整卫星波束资源。一方面,考虑卫星的功耗资源极其宝贵,在卫星网络与地面网络重叠覆盖区域且地面网络可以满足业务需求的场景下,面向业务变化的灵活波位收缩技术可以将有限的功耗资源投向更有需求的波位;另一方面,对于地面网络或业务变化且地面网络覆盖不满足业务需求的情况下,面向星地覆盖规划级的协同技术可以及时扩充波位,作为地面网络的补充,实时保障业务的连续性作业,提供更优质的网络保障。

4 结束语

本文立足星地协同,提出基于星地智能动态协作网元的星地动态协作网络架构,实现星地覆盖及资源等高效协同,最大化网络效率,降低网络成本,同时实现高效的移动性支持能力,保证用户体验及区域差异化业务需求,为后续开展星地网络协同技术研究提供方向指引。

考虑星地网络动态更新对于星地信息交互带来的系统开销问题,为避免卫星覆盖范围频繁更新带来的影响,现阶段星地协同网络主要面向卫星地面固定波束场景。为实现全场景覆盖,后续将进一步研究面向卫星地面平扫波束场景以及多轨道交叠场景下的星地协同部署架构及部署模式,同时进一步开展星地智能动态协作网元功能增强设计,实现地面对于星上波束的精准调控以及信息高效配置,保障星地资源集中管控与高效协同服务。

参考文献:

- [1] 崔新雨, 伍杰, 周一青, 等. 空天地一体化融合组网的挑战与关键技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(1): 1-11.
CUI X Y, WU J, ZHOU Y Q, et al. Challenges of and key technologies for the air-space-ground integrated network[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(1): 1-11.
- [2] 徐晖, 孙韶辉. 面向6G的天地一体化信息网络架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 2-9.
XU H, SUN S H. Research on network architecture for the space-ground integrated information network in 6G[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 2-9.
- [3] 吴晓文, 凌翔, 朱立东, 等. 6G卫星通信接入及移动性管理技术[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 78-90.
WU X W, LING X, ZHU L D, et al. Access and mobility management technologies for 6G satellite communications network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 78-90.
- [4] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 437-461.
- [5] 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.



- HOU L M, HAN B, MIAO D S, 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.
- [6] 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.
- [7] 刘杨, 彭木根. 星地融合智能组网: 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(6): 1-12.
- LIU Y, PENG M G. Satellite-ground fusion intelligent networking: vision and key technologies[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(6): 1-12.
- [8] 李新, 贝斐峰, 王强. 天地一体化关键技术和组网架构探讨[J]. 通信与信息技术, 2023(1): 91-93, 120.
- LI X, BEI F F, WANG Q. Discussion on the key technologies and network architecture of heaven and earth integration[J]. Communication & Information Technology, 2023(1): 91-93, 120.
- [9] 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.
- [10] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821 v16.1.0[R]. 2021.
- [11] KIM J, YUN M Y, YOU D, et al. Beam management for 5G satellite systems based on NR[C]//Proceeding of 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2020: 32-34.
- [12] CAI H, WANG Y. Research on beam hopping technology of satellite resource management[C]//Proceedings of 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing(ICSP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1836-1840.
- [13] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020(1): 2-11.
- ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.
- [14] SHAHID S M, SEYOUM Y T, WON S H, et al. Load balancing for 5G integrated satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Access, 2020(8): 132144-132156.
- [15] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenge, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.

[作者简介]



翁玮文 (1978—), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化、移动物联网。



程锦霞 (1981—), 女, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, CCSA TC13 WG1 副组长、IMT-2020 5G 应用工作组组长, 主要研究方向为天地一体化、面向垂直行业的 5G 专网及 5G 工业互联网。



刘京 (1995—), 女, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



刘姗姗 (1994—), 女, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为 5G 专网、5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



马克 (1989—), 男, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



邓伟 (1978—), 男, 中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所所长、正高级工程师, CCSA TC12 副主席, 主要研究方向为 4G、5G 行业网技术及应用、5G-Advanced/6G 天地一体化技术等。