

面向星地协同的接入网架构与关键技术

邓伟, 赵琳, 翁玮文, 杜琴, 马克, 程锦霞, 张龙

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘 要: 随着泛在宽带通信需求和星地通信技术的演进, 卫星与地面蜂窝通信产业生态系统正逐步走向融合。为满足星地协同应用场景及技术需求, 分析星地协同的接入网架构面临的主要技术挑战, 基于连接动态、资源统一管控、地面控制的总体原则, 从空间段、地面段及星地协同段阐述面向星地协同的接入网架构。从需求出发, 基于所提网络架构提出对应的覆盖协同、业务协同、节能协同与测控协同的关键技术, 通过设计智能动态协作网元、动态 Xn 接口、分布式测控单元等协同网元, 星地两网深度交互有用信息, 实现动态高效的星地协同机制, 推动卫星网络与地面网络进一步互补, 提高系统在资源利用率、能源消耗以及网络建设成本等方面的整体性能。

关键词: 卫星互联网; 星地协同; 接入网架构

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023026

Architecture and Key Technologies of Access Network for Satellite-Terrestrial Cooperation

DENG Wei, ZHAO Lin, WENG Weiwen, DU Qin, MA Ke, CHENG Jinxia, ZHANG Long

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the development of ubiquitous and broadband communication requirements and the satellite-ground integration communication technology, the satellite and ground cellular communication industry ecosystem is gradually moving towards integration. In order to meet the application scenarios and technical requirements of satellite-terrestrial cooperation, the main technical challenges of the access network architecture were analyzed. Based on the overall principles of connection dynamics, unified resource management and controlled by ground network, the architecture of access network for satellite-terrestrial cooperation was elaborated from space segment, ground segment and cooperative segment. Key technologies of coverage cooperation, service cooperation, energy saving cooperation and capability cooperation were proposed based on the elaborated network architecture. By design cooperative network elements, such as intelligent dynamic cooperative unit, dynamic Xn interface, distributed TT&C units, the useful information between satellite and ground networks interacted deeply, a dynamic and efficient satellite-terrestrial cooperation mechanism could be realized. It could promote further complementarity between satellite and ground networks and improved overall system performance in resource utilization rate, energy consumption, and network construction cost.

Key words: satellite internet, satellite-terrestrial cooperation, access network architecture

0 引言

卫星网络与地面网络在覆盖范围和系统容量方面有极强的互补性, 长期以来, 卫星和地面移动通信作为两个产业链各自独立发展。随着泛在宽带通信需求和星地通信技术的演进, 卫星与地面移动通信产业生

态系统正逐步走向融合^[1]。卫星互联网成为 6G 网络的重要特征^[2], 将基于一体化终端向偏远地区、海洋、航空等泛在立体空间提供全场景融合新服务。面向未来的目标愿景, 本文结合技术标准及产业发展情况, 研究星地接入网发展路径, 并设计构建高效协同的星地接入网架构。

1 星地接入网发展现状及路径

1.1 技术及标准发展现状

卫星网络具有覆盖范围广、容灾能力强等优点，作为地面网络的补充和扩展，可以很好地与地面网络有机融合，形成卫星互联网^[3]，在全球任何地点、任何时间为更广泛的终端用户提供信息服务。

近年来，随着商业航天的兴起，国内外纷纷开展低轨卫星星座的建设工作，低轨化、宽带化、手机直联成为卫星通信的重要发展趋势，全球星地技术研究及应用进入快速发展阶段。2017年，3GPP在无线接入网工作组中设立了非地面网络（Non-Terrestrial Network, NTN）相关的研究项目，并明确将卫星接入列为5G的接入技术之一。2019年，3GPP完成TR38.821研究报告，对新空中接口（New Radio, NR）支持NTN需要具备的必要功能进行了研究，提出了基于透明转发模式和星上再生模式的NTN应用场景架构，如图1所示。2022年，3GPP NR NTN R17面向透明转发模式完成了第一版本基于5G的卫星通信技术标准制定，R18基于R17，围绕覆盖、高频段以及移动性管理等技术进行针对性的增强。

3GPP在卫星通信领域的标准化工作主要以地面5G通信标准为基础，结合卫星通信的技术特点做出适应性改进^[4]，但暂未涉及星地深度融合的架构设计工作。面向未来网络的演进需求，学术界对星地网络架构开展了积极探索。参考文献[5-8]均考虑基于网络功能虚拟化（Network Functions Virtualization, NFV）技术实现星地间网络功能

的柔性分割，根据卫星载荷能力与服务场景，实现网络功能的灵活按需部署。同时，参考文献[5,8-9]研究基于软件定义网络（Software Defined Network, SDN）技术将网络抽象为用户平面、控制平面、管理平面。参考文献[10-12]提出构建传输、计算、存储能力于一体的星上节点，通过星地移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）实现计算任务的分布式协作处理。面向星地协同的架构，参考文献[9,13]主要考虑基于统一网络管控功能，获取全局网络状态信息，实现星地网络的协同管控。综上所述，现有技术多讨论基于NFV和SDN的弹性可重构网络架构^[14]，考虑各个网络功能的灵活按需部署，星地协同相关技术则主要聚焦在统一网络管理方面，以星地高效协同为目标的接入网架构及协同机制讨论较少。

1.2 接入网发展路径

接入网由以地面蜂窝网络为基础的地基接入网和以低轨卫星星座为基础的天基接入网构成，星地全方位融合是卫星互联网实现全球无缝覆盖的关键技术目标，但也面临诸多难题与挑战，需要结合技术、标准、产业和应用场景设计接入网的演进路径。

受限于卫星平台对功耗、重量的限制，平台通信有效载荷功能相对简单，卫星采用透明转发模式有利于规避初期面临的技术不成熟、卫星研制成本高等问题。随着技术的不断发展，卫星平台能力逐渐增强，研制成本降低，激光星间链路等技术发展趋于成熟，卫星具备同时支持透明转发模式与星上再生模式的能力，低轨卫星星座组网成本

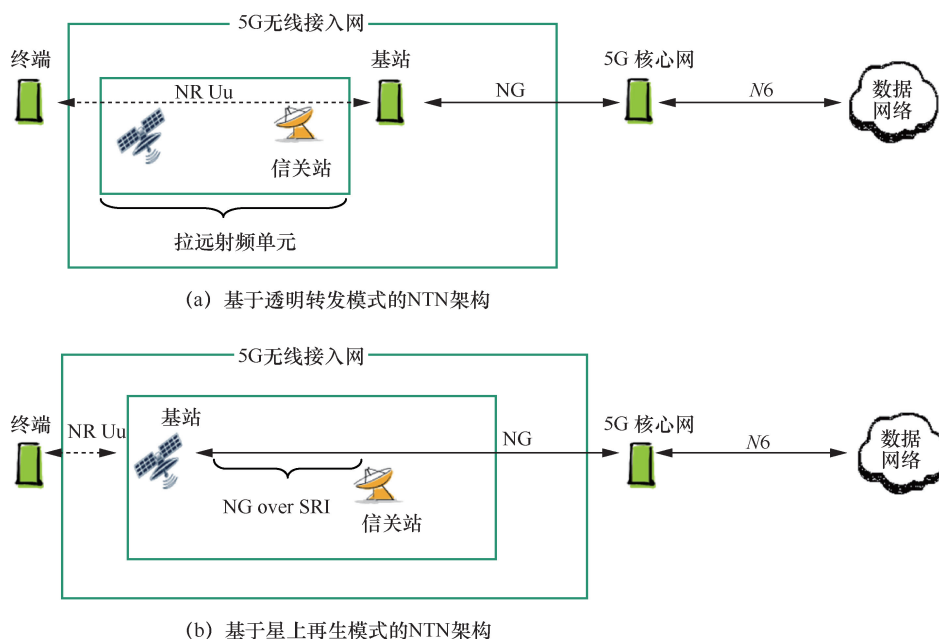


图1 基于透明转发模式和星上再生模式的NTN应用场景架构

逐渐下降, 卫星网络进入成熟商用期。

本文主要根据卫星平台处理能力的增强演进, 将接入网发展路径中可能存在的组网方式分为 3 类。

方式一: 基于透明转发模式的网络架构。

方式二: 透明转发与星上再生混合组网。

方式三: 基于星上再生模式的网络架构。

2 星地协同应用场景及技术需求

卫星互联网将充分利用星地资源, 实现全球无缝覆盖。根据多样化的业务需求, 星地需要实时动态协同来满足终端的随遇接入和业务服务质量要求。研究星地协同应用场景及技术需求, 对于接入网架构至关重要。

2.1 覆盖协同

卫星网络不受地形限制, 且具备较低成本的广覆盖能力, 但在单星容量和星上处理能力方面有较大的局限性。因此, 星地协同覆盖主要考虑 3 个方面应用场景:

(1) 卫星网络为航空、海洋、森林、沙漠、极地等地面网络难以覆盖的区域提供覆盖服务;

(2) 卫星网络为业务分布分散且容量要求较低的区域提供覆盖服务, 节省地面网络铺设所需的巨大成本, 提高经济性;

(3) 洪水、地震等自然灾害的发生导致地面网络服务中断时, 卫星网络能够代替中断的地面网络提供容灾覆盖。

2.2 业务协同

卫星网络与地面网络结合各自优势进行有机融合, 可以为大众及行业用户提供更加优质以及差异化的通信服务。一方面, 由于卫星网络与地面网络适宜承载的用户数量、业务类型不同, 针对不同业务类型的差异, 通过星地协同管理可灵活选择最优的承载网络或实现两个网络间的负载均衡及优势互补^[15]。例如, 卫星网络具有较大覆盖范围, 可以高效满足大范围内用户的广播或者多播需求。另一方面, 由于星地拓扑高动态变化, 用户在不同卫星间频繁切换, 极易导致业务中断, 并为网络带来大量信令开销。可建立星地协同的业务管理机制, 通过感知用户业务需求, 对用户进行统一资源管理, 以达到优化业务体验, 保证业务连续性的目的。

2.3 节能协同

5G 网络的众多新技术特性使得功耗急剧增加。由于移动通信业务存在明显的“潮汐效应”, 为节省基站能耗, 目前主流的基站节能解决方案是利用人工智能技术进行负载预测并实时控制基站进入节能模式。然而, 地面蜂窝用户的通信需求是动态变化的, 具有突发性, 用户在 5G

基站关断的时间段内可能会存在通信需求, 贸然降低 5G 基站的功耗会使得用户的业务受到较大影响。

利用星地双重覆盖特性, 卫星互联网可以根据不同地区、不同时间的业务分布情况, 在轻负载区动态调整地面网络的通信资源, 采用卫星网络提供基础覆盖。由于卫星网络由太阳能提供电力, 太阳能是绿色能源, 因此星地协同节能在避免能源浪费的同时, 还可保证用户基本通信需求。

2.4 能力协同

卫星网络与地面网络作为两个独立的产业链发展至今, 为支撑自身系统的各项基本能力, 两者存在一定的冗余设计。星地能力协同可促进卫星互联网高度集成, 降低网络建设成本。本文主要关注星地网络通信与测控能力的协同。

在传统的航天测控领域, 一般采用“一站一星”模式。随着商业航天的兴起, 低轨卫星互联网将发展为由成千上万颗卫星组成的大规模卫星星座。为保障测控需求, 缓解测控压力, 需大量建设地面测控站, 但会产生高昂的建设成本^[16-17]。考虑到卫星馈电链路与测控链路都是通过电磁波的发射和接收来完成数据的传递, 因此可基于 NTN 基站和地面大网基站的卫星馈电单元与测控单元的能力协同, 通过复用馈电链路基础设施, 实现降本增效。

3 面向星地协同的主要技术挑战

天地一体化接入网是一个包含星地网络的多层次异构系统, 传统基于地面或者卫星独立系统的接入网架构无法满足实时泛在的星地协同需求, 并面临星地灵活实时协同、立体网络层间动态资源管理、与演进路径中不同组网方式的兼容等多方面的挑战。

3.1 高动态拓扑结构下的灵活实时协同

天基网络以低轨卫星通信作为主要的接入方式, 卫星数量在几千到几万颗, 以 600 km 轨道高度为例, 卫星以 7.5 km/s 的速度高速移动, 平均地面可见时间只有 5~10 min。对于地面固定区域而言, 提供通信服务的过顶卫星快速频繁变化^[18]。面对广域泛在的业务需求以及星地协同需求, 如何通过星地接入网间的配合, 快速感知终端位置, 并选择合适的卫星节点、灵活实时地调整卫星波束以满足突发的星地协同需求, 将是接入网层面面临的重要挑战。

3.2 立体网络异构层间的动态资源管理

传统异构网络之间的协同一般采用终端漫游, 系统侧

互联互通的方式实现,而卫星互联网具有星地异构、立体延伸、拓扑复杂的特点^[19],需要在接入网层面设计支持星地动态关系构建的接口进行实时信息交互,促进星地通信的深度耦合,高效管理星地网络的时间、空间、频率、功率及测控资源,实现多层网络的联合资源优化,并具备针对多层网络的协调能力和管控能力,为用户提供最佳的业务体验。

3.3 兼容不同组网方式的星地协同架构设计

按照卫星的工作模式不同划分为3种组网方式,不同组网方式下卫星处理能力不同,星地之间的协同方式也将不同。接入网需要兼容卫星工作于透明转发和星上再生等两种模式,并具备高度灵活性,这进一步加剧了天地一体化接入网架构和相关接口设计的复杂程度。

4 面向星地协同的接入网架构

为了有效利用地面网络拓扑稳定的特点,降低星地在高动态环境下协同组网的难度和复杂度,进一步提升天地一体化接入网的整体性能,促进端星两侧的轻量化、低成本实现,本文基于连接动态、资源统一管控、地面控制的总体原则,基于对统一融合空中接口、星地动态智连、高效的资源管理和调度等关键技术的研究,提出了面向星地协同的天地一体化接入网架构,如图2所示。该架构包含空间段、地面段、星地协同段3部分。

4.1 空间段

空间段包含透明转发卫星通信子系统和星上再生卫星通信子系统^[20]。

透明转发卫星通信子系统中,NTN基站位于地面,波束控制器及波束控制命令接收器位于星上。透明转发卫星的波束分为打底覆盖波束与业务协同波束。打底覆盖波束的主要功能是为地面网络提供补充覆盖,一般情况下为凝视波束,由地面NTN基站静态或者半静态配置波束指向^[21]。业务协同波束主要完成负载均衡、流量卸载等业务协同功能,支持根据地面网络需求由地面NTN基站控制进行缓慢跳变。

星上再生卫星通信子系统中,星载NTN基站、波束控制器全部基于星上处理实现。同时,该子系统可兼容支持透明转发模式和星上再生模式。工作于星上再生模式时,卫星波束服务于整个星下覆盖区域,分为接入波束和业务波束。接入波束负责终端同步、随机接入以及终端切换到业务波束前的数据传输,一般采用多波束基于固定周期的扫描机制工作。在接入波束完成同步接入后,业务波束根据用户的业务需求及位置,在星载NTN基站调度模块的控制下采用按需凝视、动态跳变的方式为用户提供体验更好的数据传输服务。

星上再生模式下,卫星具备对数据进行处理和分发的能力,由此星上再生卫星通信子系统可以引入星间链路。

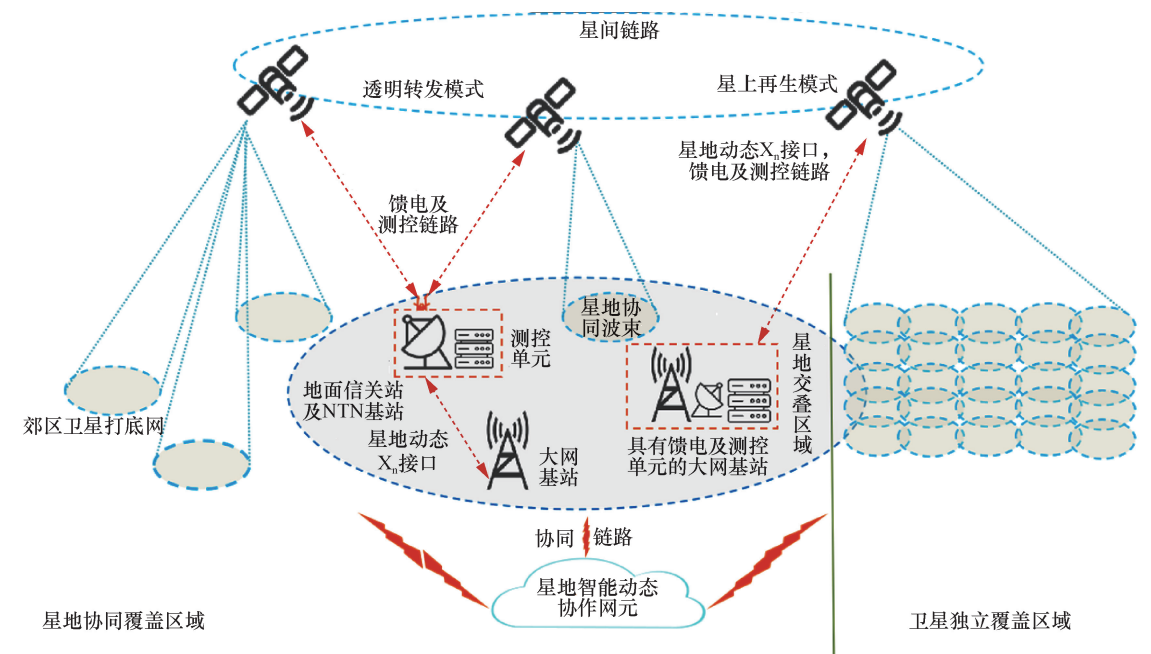


图2 面向星地协同的天地一体化接入网架构

星间链路既可以在同轨道卫星间建立,也可以连接异轨道卫星。基于星间链路,数据可以在星间更灵活地传输,减少对地面信关站的依赖,不再局限于国内,不受海外建站限制。

4.2 地面段

地面段分为星地协同覆盖区域和卫星独立覆盖区域。

4.2.1 星地协同覆盖区域

星地协同覆盖区域,是指地面网络能够大面积连续覆盖,但也存在地面网络覆盖空洞、对星地协同有需求的地理区域,如图2所示。地面网络覆盖空洞如郊区、山区等,可以由地面控制卫星的打底覆盖波束进行凝视覆盖保障基本覆盖,提供基础通信和应急通信服务。对星地协同有需求的区域,指地面网络能够覆盖,但有星地协同需求触发的地理区域,地面控制卫星的业务协同波束协同完成相关业务。此外,星地协同覆盖区域还包括星地交叠区域,其处于地面网络的覆盖边缘,与卫星网络的覆盖形成交叠,是发生星地切换的主要区域。

面向星地协同覆盖区域,地面段网元中存在部分 NTN 基站新增测控单元以支持测控能力,部分大网基站新增馈电单元、测控单元以实现星地动态连接、馈电测控一体化。地面信关站及地面 NTN 基站属于透明转发卫星通信子系统,负责透明转发卫星馈电和基带信号的收发和处理。支持星地动态连接的地面大网基站,一方面具有为地面蜂窝用户提供通信服务的能力,另一方面具备通过动态星地连接与星上处理卫星的星载 NTN 基站进行信息交互的能力。支持馈电测控一体化的 NTN 基站及大网基站则额外具备测控能力。基于以上网元,实现星地协同区域的按需接入、资源协调以及卫星测控。

4.2.2 卫星独立覆盖区域

卫星独立覆盖区域,是指航空、海洋、森林、沙漠、极地等地面网络难以覆盖的区域,只能通过卫星网络进行覆盖。星载 NTN 基站为星下可见区域提供覆盖,数据由星间链路回传落地。

4.3 星地协同段

4.3.1 星地智能动态协作网元

星地协同组网的目标是实现星地覆盖、资源、调度的高效协同,基于智慧内生能力,最大化系统效益,降低网络成本,同时实现无缝的星地切换能力,保障业务连续性及服务用户体验。为应对本文第3节提出的面向星地协同的接入网架构面临的技术挑战,引入“星地智能动态协作

网元”,构建星地智能动态协作的新型接入网架构,如图3所示。

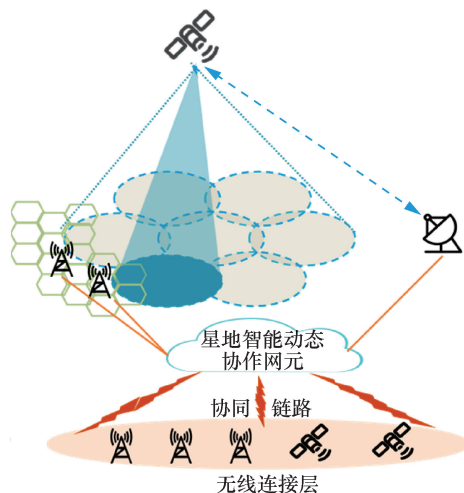


图3 星地智能动态协作的新型接入网架构

星地智能动态协作网元作为动态智连的“大脑”,具备以下功能,具体见表1。

表1 星地智能动态协作网元功能

功能分类	具体描述
组网协同	作为再生模式下星上网元的地面锚点,实现透明转发与再生模式统一动态组网
资源协同	精准的星地邻区关系; 高效的星地频率复用; 灵活的波束管理
能力协同	动态协同测控

透明转发与再生模式的统一动态组网:针对低轨卫星过顶时间短,再生模式下的星上网元随低轨卫星的高速运动而频繁变动导致组网复杂的问题,星地智能动态协作网元作为锚点可实现再生模式下的星上网元动态接入及合理快速配置,实现再生模式与透明转发的统一组网,降低星地协同复杂度,保障服务质量。

卫星网络与地面网络的资源智能高效调度:针对卫星覆盖面积大,星地交叠区域涵盖大量地面基站,星地智能动态协作网元通过协同链路汇聚星地协同覆盖区域下卫星网络网元和大量地面蜂窝网元,实现卫星网络与地面网络在星地交叠区域精准的邻区关系建立、高效的星地频率复用、灵活的波束管理^[22]等,从而达到覆盖快速切换、业务负载均衡、智能干扰规避等目的。

面向分布式测控的动态高效调度:卫星规模巨大、拓扑高度动态加剧了有限的测控资源与繁重的测控任务之间的矛盾,使得测控压力更大、调度更复杂。星地智能动

态协作网元结合分布式测控单元信息与卫星星历信息,考虑测控任务对时延的需求,基于动态测控调度算法实现对测控任务的高效分配。

4.3.2 星地动态 Xn 接口

星地接入网中,卫星通信层和地面通信层之间通过扩展 Xn 接口实现星地间动态关系构建,作为星地动态智连的“神经”,交互传递各项协同信息及决策。

透明转发卫星通信子系统中,NTN 基站与地面大网基站都位于地面,星地动态 Xn 接口基于地面网络连接建立。星上再生卫星通信子系统中,NTN 基站位于星上,星地动态 Xn 接口基于馈电链路窄带频点建立,因此,支持星地动态连接的地面大网基站需要增加窄带馈电单元。星地动态 Xn 接口负责完成动态邻区关系、星地干扰信息、业务负载信息、测控指令信息等的传递。

4.3.3 分布式测控单元

天地一体化接入网为实现卫星馈电与测控协同,需对测控单元进行改造。一方面采用馈电链路开辟的独立频点,以复用基站的馈电天线;另一方面将馈电与测控联合考虑,使两者在硬件架构、波形设计、协议设计、信号处理等方面进行深度融合,实现部分软硬件复用。

透明转发卫星通信子系统中,选择部分或全部 NTN 基站部署分布式测控单元;星上再生卫星通信子系统中,选择部分或全部具备馈电单元的地面大网基站部署测控单元。由于大网基站的馈电单元是否建立、与哪颗卫星建立星地动态 Xn 接口都是不确定的,因此,大网基站的馈电单元与测控单元存在馈电-测控接口,负责完成星地动态 Xn 接口建立信息、测控指令信息的传递。

5 星地协同关键技术

5.1 覆盖协同关键技术

为满足卫星网络与地面网络间覆盖、业务、算力等方面的紧密协同需求,基于地面控制的灵活波束管理技术将成为卫星互联网中一条全新的技术路径。针对透明转发和星上再生两种模式的卫星,卫星波束能够根据地面网络发送的波束控制指令,灵活地调整波束的指向及功率分配等参数,通过地面网络深度参与卫星资源的管理调度来提高星地协同效果,有效降低星座建设成本。但需要研究突破星地交互动态关系构建、端星地三方精准波束控制同步等核心技术,并辅以终端位置感知技术、对波束跳变场景的快速接入流程进行重新设计,以提升终端用户的接入及业务传输性能。

星地动态关系构建:需具备按需、动态建立星地交互连接的能力以支持实时高效的波束管理信息交互。考虑采用拓展的星地动态 Xn 接口在地面蜂窝基站和 NTN 基站之间传输波束管理及干扰协调等信息。一是针对透明转发卫星,地面蜂窝基站基于地面连接即可以与 NTN 基站建立星地动态 Xn 接口;二是针对星上再生模式的星载 NTN 基站,地面蜂窝基站增加窄带馈电单元,采用基于馈电链路的星地动态增强 Xn 接口。由此,实现星地间面向各项协同场景及需求的实时波束控制。

透明转发模式下的端星地三方精准同步技术:现有 3GPP NTN 技术基于透明转发模式下的凝视或平扫波束,已经完成 R17 的技术标准制定。但是,卫星波束还需要根据动态变化的业务需求和地面网络的协同需求灵活跳变^[23]。透明转发模式下 NTN 基站位于地面,相控阵天线及波束控制器位于星上^[24],基于地面控制的波束管理受星地时延及高动态信道环境的影响。如图 4 所示,

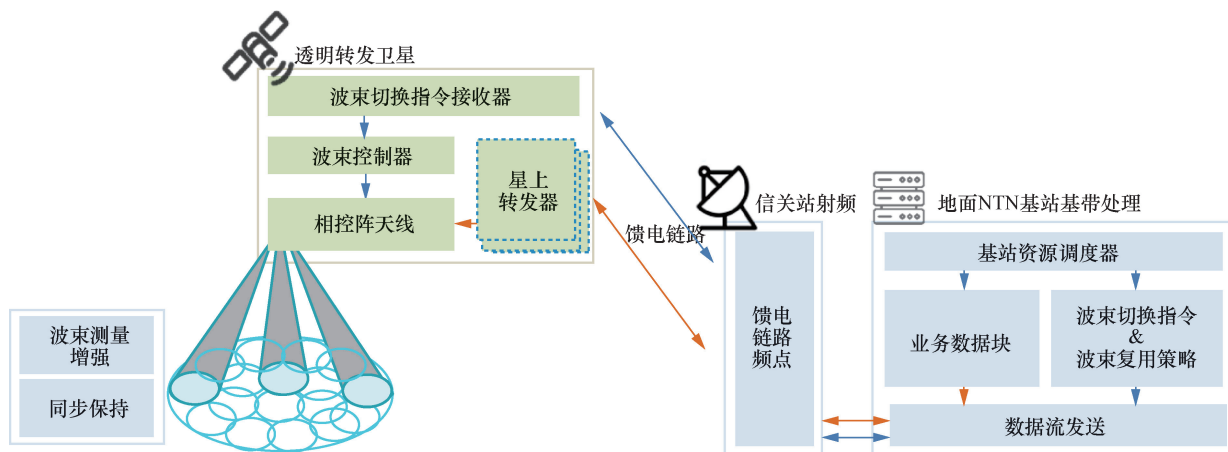


图4 基于地面控制的灵活波束管理

考虑采用星上轻量化带内接收指令的波束控制机制,在地面 NTN 基站统一控制下,保证地面控制的波束切换时刻和空中接口信号经过远距离高动态时变传输后,在星上达到精准同步,支持多波束扫描、凝视波束跳变,按需提供业务传输,提高频谱效率及整星容量。

5.2 业务协同关键技术

现有卫星、地面网络独立组网,信息交互灵活性不高、网络特性差异较大,星地静态网络能力面临与动态、分布不均匀、多样化的业务需求之间的矛盾,导致卫星网络与地面网络分配的资源与业务需求不匹配,网络资源利用率不高。通过新增星地智能动态协作网元,采用高效统一的资源调度方法,实现卫星网络与地面网络资源的动态共享,在时间、空间、频率以及功率维度上进行灵活分配,以适应业务的不均匀分布和动态变化,实现星地资源利用最优化。

面向业务连续性的快速切换:由于星地拓扑动态频繁变化,网络切换场景多样且复杂,业务连续性保障难度加大,对切换管理提出了更高的要求。可通过建立星地协同的业务管理机制,感知用户业务需求,对用户进行统一资源管理,优化业务体验。如图 5 所示,可面向星地切换场景动态发现、快速精准构建星地网络邻区关系,优化卫星网络与地面网络邻区参数配置,保证用户业务连续,尽可能降低星地切换时延,提升用户体验。

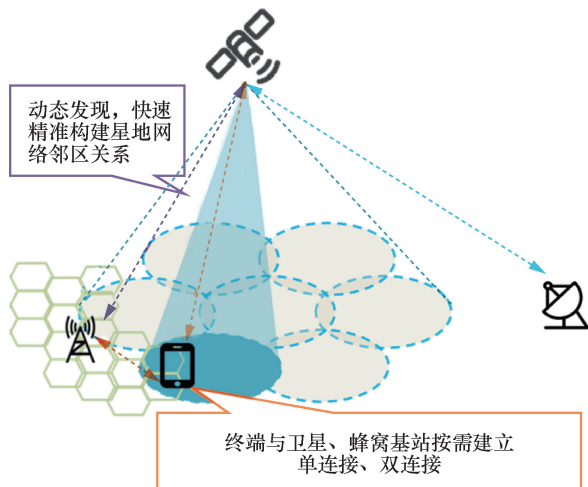


图5 星地快速切换及智能调度技术

面向不同服务等级的智能调度:网络构成复杂且接入终端类型众多,需满足不同服务等级的业务需求,实现面向星地业务负载均衡的智能调度:结合用户业务需求及星地双连接等方案,通过星地网络负载信息的实时交互,开展星地业务负载的动态智能卸载,有助于在保证用户体验的情况下实现星地网络业务负载均衡。如图 5 所示,

通过智能调度,用户和卫星、地面基站建立双连接,网络可以基于用户需求、星地网络特性及负载情况开展智能调度,如广播及多播业务可通过卫星链路实现关联并高效开展,单播业务可以优先通过地面网络提供服务。

动态干扰规避技术:基于星地网络频率信息的实时交互,可快速调整星地网络小区频率部署,开展星地网络小区频率动态规避,有助于保证星地频谱资源的高效利用^[25-26],为业务协同提供保障。如图 6 所示,NTN 基站发生频率调整,卫星能够在星地交叠区域及时通知蜂窝网络进行频率调整,实现干扰规避;反之,蜂窝基站若进行频率调整,卫星也能够快速感知,并进行卫星网络的频率调整,以保证频率利用最大化。

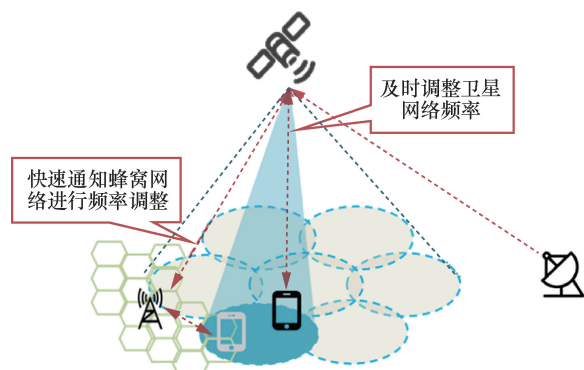


图6 星地动态干扰规避方案

5.3 节能协同关键技术

为避免轻负载区地面网络通信资源浪费,可以根据业务分布对地面蜂窝小区工作模式进行合理适配,基于卫星覆盖,实现地面网络的绿色节能。但卫星波束与蜂窝小区覆盖范围相差较大,星上处理能力受限,星地节能协同还需考虑卫星覆盖下的星地网络流量统计、流量负载与蜂窝小区工作模式的最优映射及面向节能协同的用户群切换等关键问题。

星地网络流量统计:星地智能动态协作单元存在星地资源块(Resource Block, RB)资源使用统计表。对于地面网络覆盖,星地智能动态协作网元可通过蜂窝基站或网管周期性上报获得的业务流量信息;对于卫星网络覆盖,NTN 基站将会把用户设备标识(User Equipment Identity Document, UE ID)、缓冲区状态报告(Buffer Status Report, BSR)与全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信息绑定,并根据其算力、存储能力,将波位划分为合适数量的地理区域,由此获得各区域对应的 RB 资源使用情况,上报给星地智能动态协作网元。协作网元将地理区域与蜂窝小区关联起来,形成统计表。

流量负载与蜂窝小区工作模式的最优映射:如图 7 所

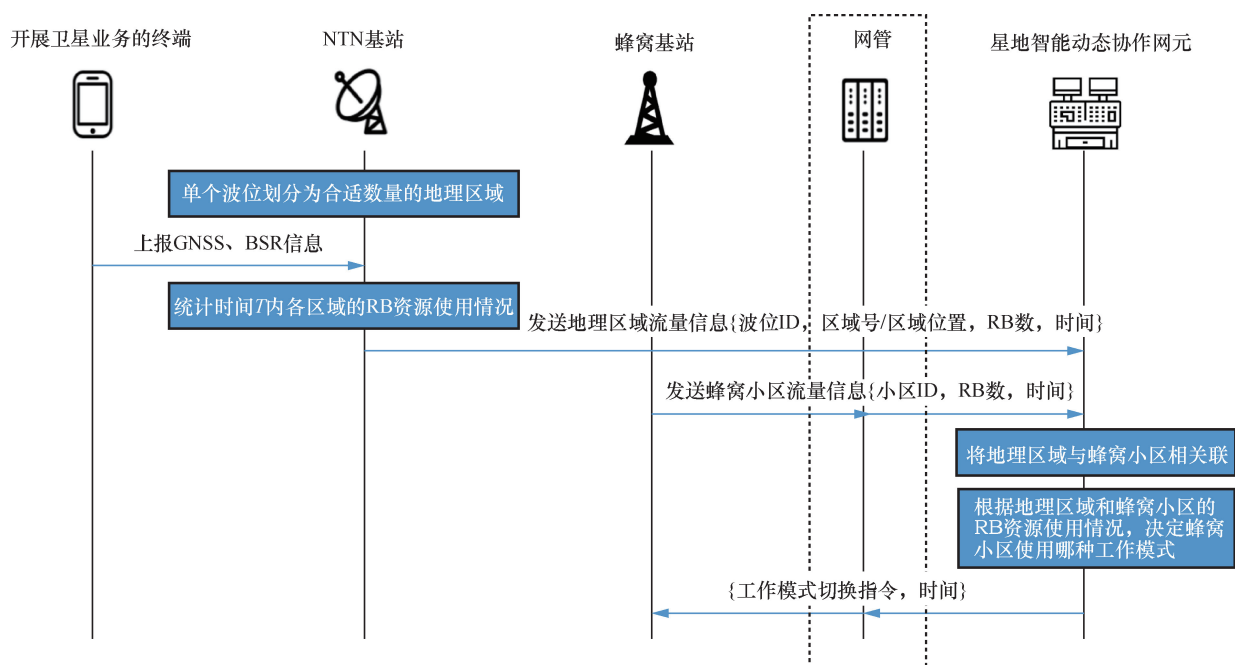


图7 面向星地节能协同的交互流程

示，星地智能动态协作网元基于RB资源使用统计表，根据网络负载情况决策该蜂窝小区选择何种工作模式。一方面，将蜂窝流量负载划分为多个区间，根据各个蜂窝小区在一段时间内的流量表现，决定采取正常工作模式、部分关断的节能模式或小区完全关断模式；另一方面，通过对各区域的卫星流量统计，决定哪些区域对应的蜂窝小区需要调整工作模式，避免卫星负载过高。同时，为避免蜂窝小区频繁调整，需联合考虑星地两网流量对工作模式的影响，并适时降低经过调整的蜂窝小区各负载区间的流量阈值。星地智能动态协作网元基于以上决策逻辑，向蜂窝基站下发工作模式调整命令。

面向节能协同的用户群切换：星地节能协同实则是卫星与蜂窝小区的协同覆盖，会存在部分用户同时进行卫星与蜂窝小区之间的群切换的情况，需研究有序可靠的群切换机制以保障切换稳定，避免业务中断。

5.4 测控协同关键技术

为缓解地面测控压力的同时降低测控投入成本，通过馈电测控协同实现部分NTN基站及大网基站的测控能力。针对有限、分布式的地面测控资源，需考虑其与批量化、多样化的测控任务如何构建动态高效的调度关系，以及面向动态测控的星地交互流程。

分布式测控高效调度：星地智能动态协作网元根据卫星星历信息、测控单元位置信息、测控单元复用的是

NTN基站还是地面大网基站的馈电单元、星地动态Xn接口建立消息等，确定测控单元在任意测控时间段内的可见卫星集。对于复用的是NTN基站和即将建立Xn接口的大网基站的馈电单元的场景来说，其可见卫星集只包含一颗卫星。

基于可见卫星集，星地智能动态协作网元根据卫星健康状态信息确定可见卫星集的期望测控周期，即健康状态越差，测控周期越短。星地智能动态协作网元根据可见卫星集的期望周期、距离上一次测控的时长，以及是否存在遥控指令、遥控指令的剩余执行时间等信息，对卫星进行测控紧急度排序，决策该测控单元是否需要进行检测，以及哪颗卫星被测控。

面向动态测控的星地交互：面向透明转发卫星，星地智能动态协作网元基于测控调度算法确定测控单元是否要对该卫星进行检测，与下一次测控的相关信息一起发送至测控单元。如图8所示，面向星上再生模式，星地智能动态协作网元需先确定是否接收到大网基站经由测控单元发来的星地动态Xn接口建立信息，根据测控调度算法确定待测卫星，其测控对象是动态不确定的。因此，测控单元收到测控指令后，需通过馈电-测控接口告知大网基站馈电单元，使其建立馈电链路或直接基于已有Xn接口告知待测卫星，及时开启测控载荷，下发遥测信息。待测卫星收到指令后，打开测控载荷进行遥测信息的下发。

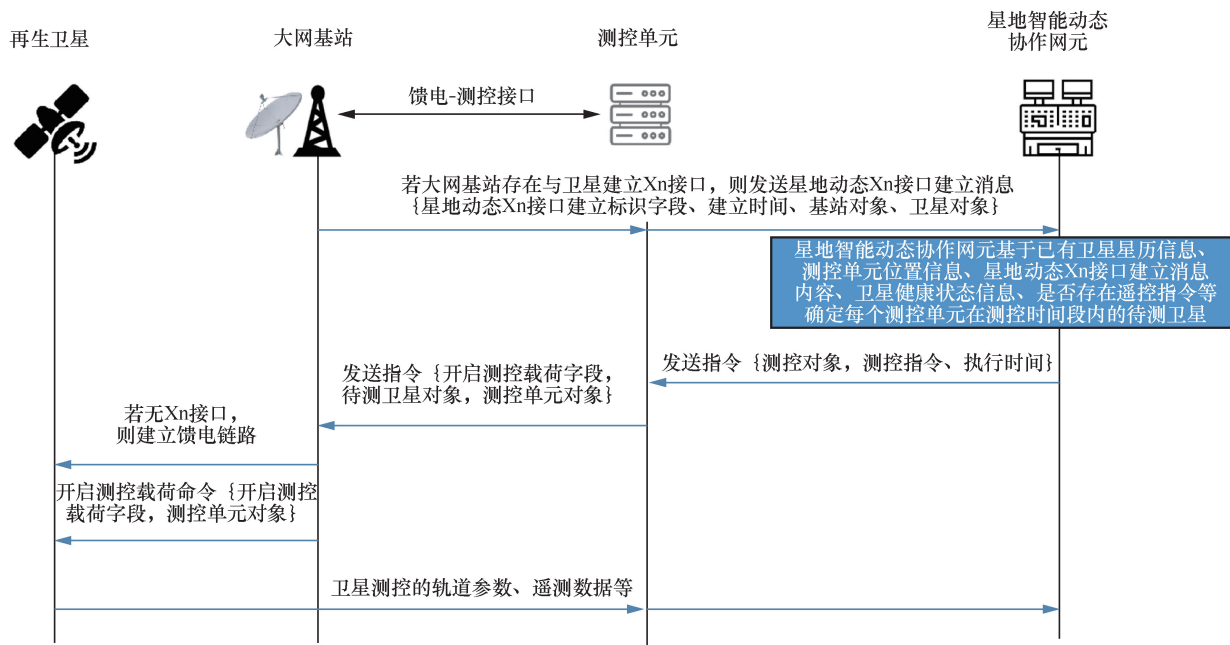


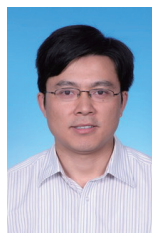
图8 面向星上再生模式的动态测控交互流程

参考文献:

- [1] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合卫星网络架构和传输关键技术[J]. 卫星互联网, 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.
- [2] 徐晖, 孙韶辉. 面向6G的卫星互联网架构研究[J]. 卫星互联网, 2021, 2(4):2-9.
XU H, SUN S H. Research on network architecture for the space-integrated-ground information network in 6G[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4):2-9.
- [3] LAKEW D S, TRAN A T, MASOOD A, et al. A review on satellite-terrestrial integrated wireless networks: challenges and open research issues[C]//Proceedings of 2023 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2023: 638-641.
- [4] DING R, CHEN T T, LIU L, et al. 5G integrated satellite communication systems: architectures, air interface, and standardization[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 702-707.
- [5] WANG J X, QUAN Z A, LIU Z M, et al. Satellite-ground integrated network architecture and key enabling technologies for 6G[C]//Proceedings of 2022 8th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [6] CUI H X, ZHANG J, GENG Y H, et al. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges[J]. China Communications, 2022, 19(2): 90-108.
- [7] HAN Z Z, XU C, LIU K, et al. A novel mobile core network architecture for satellite-terrestrial integrated network[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [8] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向6G的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 891-901.
- [9] 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.
- [10] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open

- issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [11] 邓平科, 张同须, 施南翔, 等. 星算网络——空天地一体化算力融合网络新发展[J]. 电信科学, 2022, 38(6):71-81.
- DENG P K, ZHANG T X, SHI N X, et al. Computing satellite networks—the novel development of computing-empowered space-air-ground integrated networks[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6):71-81.
- [12] 高媛, 方海, 赵扬, 等. 星地协同网络中的边缘计算技术综述[J]. 空间电子技术, 2023, 20(2):15-21.
- GAO Y, FANG H, ZHAO Y, et al. A survey on edge computing in satellite-terrestrial networks[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2):15-21.
- [13] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向 6G 的空天地一体化系统设计和关键技术[J]. 信息通信技术与政策, 2022(9): 18-26.
- KANG S L, MIAO D S, SUO S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(9): 18-26.
- [14] 魏肖, 张景, 金子傲, 等. 天地一体多业务融合的物联网架构和关键技术[J]. 卫星互联网, 2022, 3(3): 3-12.
- WEI X, ZHANG J, QUAN Z A, et al. The architecture and key technologies of the Internet of Things with integration of heaven and earth and multi services[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 3-12.
- [15] 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.
- [16] 刘阳, 周笛, 盛敏, 等. 面向巨型星座系统的多地面站协同测控技术[J]. 卫星互联网, 2023, 4(1): 2-11.
- LIU Y, ZHOU D, SHENG M, et al. Multi-ground station cooperative measurement and control technology for giant constellation system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(1): 2-11.
- [17] 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]. 卫星互联网, 2020(1): 26-35.
- 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.
- [18] ZHANG Y Y, WU Q, LAI Z Q, et al. Enabling low-latency-capable satellite-ground topology for emerging LEO satellite networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1329-1338.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] KIM J, YUN M Y, YOU D, et al. Beam management for 5G satellite systems based on NR[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2020: 32-34.
- [22] 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.
- [23] 刘婉莹, 夏师懿, 姜泉江, 等. 低轨卫星网络基于跳波束的资源调度算法[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6): 805-813.
- LIU W Y, XIA S Y, JIANG Q J, et al. Resource scheduling algorithm based on beam hopping in LEO satellite network[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(6): 805-813.
- [24] 张晨, 张更新, 王显煜. 基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统设计[J]. 通信学报, 2020, 41(7):59-72.
- ZHANG C, ZHANG G X, WANG X Y. Design of next generation high throughput satellite communication system based on beam-hopping[J]. Journal on Communications, 2020, 41(7):59-72.
- [25] YANG M C, GUAN X, MIAO X X. Spectrum sharing schemes in integrated satellite-terrestrial network [C]// Proceedings of the 37th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2019). Piscataway: IET Press, 2019:1-14.
- [26] JIA M, ZHANG X M, GU X M, et al. Energy efficient cognitive spectrum sharing scheme based on inter-cell fairness for integrated satellite-terrestrial communication systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[作者简介]



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、教授级高级工程师, 中国通信标准化协会 (CCSA) TC12 副主席, 主要研究方向为蜂窝移动通信及卫星通信。



赵琳（1986- ），女，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所高级工程师，主要研究方向为 TD-LTE、NB-IoT 及卫星互联网。



马克（1989- ），男，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所中级工程师，主要研究方向为卫星通信及卫星互联网。



翁玮文（1978- ），男，博士，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所高级工程师，主要研究方向为物联网及卫星互联网。



程锦霞（1981- ），女，博士，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所高级工程师，CCSA TC13 WG1 副组长、IMT-2020 5G 应用工作组组长，主要研究方向为卫星互联网、面向垂直行业的 5G 专网及 5G 工业互联网。



杜琴（1995- ），女，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所工程师，主要研究方向为卫星互联网。



张龙（1985- ），男，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所高级工程师，CCSA TC5 WG9 副组长，主要研究方向为 4G/5G 移动通信及其演进。