



面向 6G 的天地一体融合网 络技术白皮书

(2024 年)

发布单位：中移智库

编制单位：中国移动通信研究院

前言

近年来，全球天地一体技术研究及应用进入全新快速发展阶段。各国卫星和地面移动通信巨头在政策、市场需求推动下开展实质性合作，促进天地产业的快速发展，加速了天地一体融合网络的成熟和商用。我国相继出台相关政策积极推进卫星互联网建设，加快推动地面移动通信与卫星通信向天地一体化发展。

本白皮书针对面向 6G 的天地一体融合网络，提出“一体架构”、“统一高效”、“动态灵活”、“一网多能”四大技术体系，并对天地一体融合组网的应用场景、愿景及目标、挑战和系列创新技术进行了阐述。本白皮书希望联合广大产业合作伙伴，从技术攻关、标准制定、产业推进和生态构建四个方面推进天地一体融合网络技术的发展和成熟。

本白皮书由中国移动通信研究院（新一代移动通信技术国家工程研究中心）、中兴通讯股份有限公司、中信科移动通信技术股份有限公司、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、武汉大学共同编制，由清华大学-中国移动联合研究院提供技术指导。未经授权，任何单位或个人不得复制或拷贝本建议之部分或全部内容。

联合编写单位及作者

中国移动通信研究院（新一代移动信息通信技术国家工程研究中心）

主编

丁海煜、邓伟、程锦霞、张龙、马克、崔诗雨、翁玮文、赵琳、杜琴、
刘京、王桂英、邓平科、施南翔

参与编写单位（排名不分先后）

中兴通讯股份有限公司：郝瑞晶、朱和合、田开波、亓涓、周晓强

中信科移动通信技术股份有限公司：孙韶辉、康绍莉、缪德山、徐晖、
汪永明、韩波、侯利明、关鹏

哈尔滨工业大学：王振永、李德志、邱实、周文杰

北京航空航天大学：肖振宇、耿宇晖、杨峻一

武汉大学：王密、徐彦彦、仵倩玉

技术指导单位

清华大学-中国移动联合研究院

目录

1 天地一体融合网络应用场景	6
1.1 大众手机直连卫星服务	6
1.2 行业终端直连卫星服务	7
1.3 应急救援保障服务	7
2 天地一体融合网络愿景及目标	9
3 天地一体融合网络技术挑战	11
3.1 网络拓扑高速动态变化	11
3.2 星地信道环境差异巨大	11
3.3 星地网络各自独立组网	11
3.4 星上网元平台能力受限	12
3.5 通感算异构网融合困难	12
4 天地一体融合网络创新技术	13
4.1 一体架构	14
4.1.1 集中和分布协同的自治网络架构	14
4.1.2 智能动态协作的新型无线组网架构	15
4.2 统一高效	16
4.2.1 统一空口	16
4.2.2 统一频率	18
4.3 动态灵活	19
4.3.1 灵活波束管理	19
4.3.2 统一资源调度	21
4.3.3 弹性多轨组网	22
4.4 一网多能	22
4.4.1 感知融合	23
4.4.2 算力融合	23
4.4.3 测控融合	24
5 天地一体融合网络技术发展倡议	26
缩略语列表	28
参考文献	29

习近平总书记在2021年十九届中央政治局第三十四次集体学习讲话时强调，“加快建设高速泛在、天地一体、云网融合、智能敏捷、绿色低碳、安全可控的智能化综合性数字信息基础设施”。“天地一体”成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。

国际上天地一体技术研究及应用也进入了全新快速发展阶段。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，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。

中国移动积极开展手机直连、天地融合技术攻关、标准推进和产业合作。2022年8月，中国移动率先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，完成了我国首款5G NTN手机直连卫星实验室验证。

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，卫星网络需作为地面网络的补充，共同构建涵盖陆海空天的全空间立体通信网络。随着3GPP 5G非地面网络技术（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，通过地面网络的先进通信技术、设备研发和产业规模、庞大的用户群体，带动卫星产业快速发展，实现双方价值提升。

为加速天地一体融合网络技术及产业成熟，本白皮书针对6G天地一体融合网络的场景及五大技术挑战，提出天地一体融合网络一体架构和统一高效、动态灵活、一网多能的技术体系，并对创新关键技术进行了详细阐述。最后，面向产业发出面向6G的天地一体融合网络技术发展倡议。

1 天地一体融合网络应用场景

为实现“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：



图 1-1 天地一体融合网络应用场景

1.1 大众手机直连卫星服务

全球的移动通信手机用户获得的服务主要来自于地面移动通信网络。随着人类活动空间的拓展，依托于大众手机的高便携性、高移动性以及高普及性，手机直连卫星成为了面向普通大众的天地一体融合网络应用热点。面向人烟稀少的高山、沙漠、极地地区的户外探险、极地科考人员，以及跨国场景下的出国劳务人员和出境旅游人员，对手机直连卫星有迫切的刚性需求，天地一体融合网络能够让他们感受到“处处有、时时有、人人有”的通信福利，并且体验的业务也将从早期的短信、语音等窄带业务发展到后期的高清视频等宽带业务。

天地一体融合网络针对不同业务类型对于服务保障需求（如低时延、确定性、高可靠等）的差异，可通过星地协同管理灵活选择最优的承载网络。面向密集城市及热点地区，优先由地面蜂窝网络为用户提供服务保障，卫星网络辅助支持大连接、分流和非实时业务，缓解地面网络压力；针对高山、沙漠、极地、海岛等低密度业务区或极端环境区域，通过卫星网络提供包括语音、短信、数据、视频

等各类通信业务服务，挖掘星地融合的潜能，提高网络整体服务投入产出比。

1.2 行业终端直连卫星服务

机载、广域物联、船载等行业市场的卫星通信需求持续高涨。全球航空正逐步推动 Wi-Fi 覆盖，飞行数据仪、机舱娱乐等空中互联网业务通信需求正盛；全球物联网发展迅速，面向矿产、油气、电网、物流、动保、农业等智慧新兴领域，宽窄带广域物联潜力巨大；面向海洋渔业、沿海运输及远洋客轮等各类船舶、海上油气及风电作业平台等远洋设备，各类宽窄带通信服务需求不断增加，包括全球海上安全系统、商船货物跟踪、远洋捕捞直播、游客上网需求、自动化作业通信需求等等。

单一卫星通信系统带宽能力有限，通过天地一体融合网络面向 VSAT 终端、物联终端、车载终端、机载终端、船载终端等多种行业终端类型的不同业务场景进行统一资源管理，有效提升业务服务质量。且随地面网络不断向空、天、地、海等空间扩展，部分行业用户可将空中网络作为地面网络的有效补充，形成分层、稳定和可靠的通信网络体系，体验高可靠的垂直行业服务。

1.3 应急救援保障服务

在地震、洪水等自然灾害和突发事件中，地面通信网络易遭破坏，且短时间内将难以修复。随着我国卫星通信产业发展逐渐成熟，应急通信逐渐走向卫星化、宽带化。依托于卫星的覆盖广、容灾性强、天然广播能力等特性，天地一体融合网络能够快速、持续地提供极端情况下各类个人、公众及专业等紧急通信和救援服务。

天地一体融合网络充分结合卫星与地面蜂窝网络的优势，还将在支持一带一路、交通强国、乡村振兴等国家战略方面应用广阔，发挥不可比拟的巨大社会价值。

1.4 通感融合服务

随着技术的发展，移动通信和微波遥感已形成了双向互动的趋势。首先，移

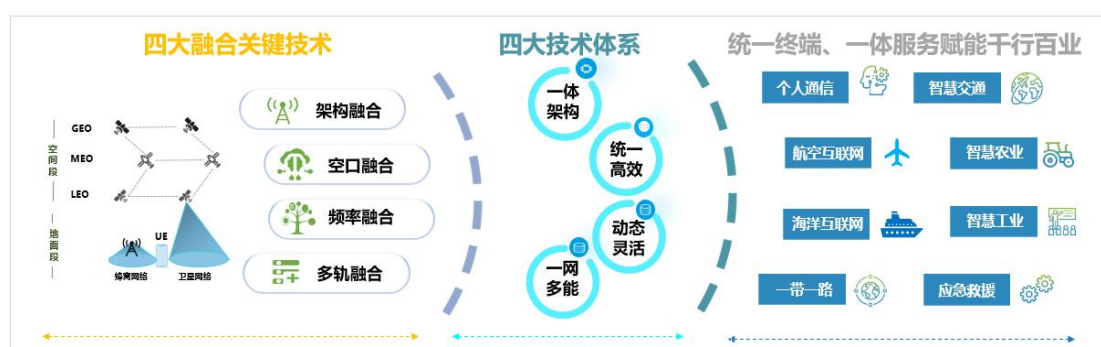
移动通信频谱与微波遥感在频谱资源有了一定的趋同性；其次，基于移动通信大流量和微波遥感分辨率的提高，均提出大规模阵列天线、高精度信号同步等技术要求，从而造就了移动通信和感知两大功能的基础条件，移动通信和感知存在一体化设计的可能性。在垂直行业应用需求的驱动下，“通、导、遥”融合成为近年业界探讨和探索热门方向。从天基信息实时服务系统的角度提出定位、导航、授时、遥感、通信（PNTRC, Positioning, Navigation, Timing, Remote sensing, Communication）五位一体的融合构想，并进一步提出建议加速构建“通、导、遥”融合服务基础设施与平台的期望。国家也从顶层设计的角度出发，提出“打造全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系”导向，从而为“通、导、遥”融合提供了政策可行性支撑。随着通感一体能力的构建，将面向政府、企业用户提供大范围微波遥感服务，如大范围风场预报、湿地面积监控、冰层监控、航空监视、自动驾驶等等服务。

1.5 通算融合服务

随着国家“东数西算”战略及“碳达峰、碳中和”的日益临近，我国呈现出算力紧缺与严格控制碳排放之间的矛盾。可以充分利用卫星在轨运行仅利用再生能源、无污染、零排放以及覆盖范围大的优势和特点，通过星地、星间链路提供天基云服务，承担通信、计算、模型训练、内容分发等方面的功能。对于地面中心来说，天基算力节点可以充当移动边缘服务器，汇总终端的感知数据信息，进行初步数据处理和模型运算。与此同时，卫星也是广域感知数据的采集和发送者，可以为广域物联网系统提供信息采集、处理与输入。随着通算一体能力的构建，既可以为政府、企业等用户提供高性能的实时网络接入和数据处理业务，如遥感数据的实时处理与高效分发、大范围态势感知情报分发、企业用户的大范围实时交易等应用，也可以为个人用户提供实时交互式娱乐服务，XR 等应用。

2 天地一体融合网络愿景及目标

移动通信系统由 5G 向 6G 逐步演进，将充分结合社会发展的新需求和新场景打造 6G 全新技术生态。6G 的愿景是助力人类社会实现“万物智联、数字孪生”，空天地一体化作为 6G 核心基础技术之一，目标是支持终端融合一体、连接全球无缝的信息服务能力。移动通信运营商基于天地一体化网络可为公众和企业、政府提供全球覆盖和泛在连接的高可靠、高速率、低延迟空天地一体化移动通信服务。为最大化产业规模、最高效网络组织，这要求天地一体支持以架构、空口、频率、多轨四大融合关键技术为基础的“一体架构”、“统一高效”、“动态灵活”、“一网多能”四大技术体系，构建泛在通信、立体感知、导航定位、算力协同四大核心业务能力，最终实现卫星和地面网络在技术、标准、产业和应用的全方位融合，为大众客户和千行百业提供统一终端、一体服务。



面向个人通信场景，个人智能终端基于手机直连卫星技术具备地面网络与卫星网络接入能力，无需专用卫星终端即可实现个人通信的全球无缝覆盖与按需接入；面向航空互联网场景，实现地空通信（ATG）技术与卫星机载通信（ATS）技术融合，在地面 ATG 网络覆盖区，提供低延时、高带宽服务，在跨洋航线等 ATG 难以覆盖区域，切换为由卫星提供网络服务，实现航空互联网的低成本建设与全球无缝覆盖；面向海洋互联网场景，实现岸基对海覆盖蜂窝网络与卫星网络协同组网，船只、渔场、风电、油气平台等根据网络情况实现岸基网络与卫星网络无缝切换；面向智慧交通、智慧农业、智慧工业等场景，天地一体融合网络可以作为地面网络的备份或为无地面网络覆盖区域提供卫星通信连接，为行业应

用提供差异化网络服务，构建智能应用信息新底座；面向紧急救援场景，在海事、航空遇险应急通信，以及在地震、洪水等自然灾害和突发事件中，依托于卫星的覆盖广、容灾性强等特性，能够快速、持续地提供极端情况下各类个人、公众及专业等紧急通信和救援服务，满足用户应急通信需求。

3 天地一体融合网络技术挑战

3.1 网络拓扑高速动态变化

由于低轨卫星的快速移动，导致卫星网络拓扑高速动态变化，一方面造成了星地/星间通信链路性能变化大、稳健性差等问题；另一方面也存在低轨卫星网络下卫星用户因服务卫星的频繁变化导致用户在星间频繁切换问题。同时卫星网络拓扑的高速动态变化也意味天地一体融合网络中星地/星间路由的建立、维护等在高效、可靠、安全方面存在挑战。这一切导致天地一体融合网络在全域覆盖及业务协同上存在挑战。

3.2 星地信道环境差异巨大

卫星网络与地面网络的信道传输条件差异巨大，主要体现在传输时延、多普勒频偏和信道多径等方面。卫星通信通常以视距传输为主、多径分量少，而地面蜂窝网络因障碍物较多，反射径丰富，信道容易遭遇快衰落。在信道的时频特性方面，对于低轨卫星，由于卫星快速运动，多普勒频移大且变化快、时延变化率大，对信号时频同步带来严峻的挑战；高轨卫星的时频变化较小，但因星地距离远、传输时延大，对链路稳定性、数据传输可靠性带来较大挑战。

3.3 星地一体组网复杂度高

当前卫星与地面网络独立发展，彼此耦合度低。面向未来的天地一体融合网络覆盖区域，需通过星地波束联合管理、重叠覆盖区资源灵活调度等为用户提供高质量保障服务，而卫星与地面网络的深度耦合是未来天地一体融合网络的动态高效管理机制的关键。而星地组网架构具备高动态的特性，且需兼容透明转发及再生模式，同时其架构及网元位置具备高度灵活性，这为卫星与地面网络深度耦合在接口设计及规范化方面带来了新的挑战。

3.4 星上网元平台能力受限

当前卫星系统单星重量、体积以及发射功率等指标在系统定型后均为确定值，这样卫星上通信及算力单元在重量、体积以及功率的分配上都受到限制，因此单星在通信网元及算力的部署上存在挑战。同时与地面网络差异最大部分，卫星上天后其通信及算力单元不再具备可扩展性，亟需通过天地一体融合组网，取长补短，充分发挥星地各自特有优势，实现最大效用。

3.5 通感算异构网融合困难

当前天地一体网络通感算融合理论还未成熟，感知、通信和计算之间相互依赖关系的模型尚未建立，需要进一步探索。另一方面，天地一体通感算融合架构趋于多元化、智能化的特点使得网络能力更为复杂、资源约束和优化目标更为多样。因此，为了保障通感算业务连续性和服务质量，形成连续覆盖的可靠连接，突破异构网络之间移动性管理的封闭性、保障星地业务的高效协作将是一大技术挑战。此外，感知不同场景下的各类业务需求、提供相应网络服务，以及实现面向天地一体融合网络的多类型服务质量保障也是亟需解决的攻关难题。

4 天地一体融合网络创新技术

2023 年 6 月，国际电联完成了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》。作为 6G 纲领性文件，该建议书汇聚了全球 6G 愿景共识，描绘了 6G 目标与趋势，提出了 6G 的典型场景及能力指标体系。其中 6G 用户和应用将呈现泛在智能、泛在计算、沉浸式多媒体和多感官通信、数字孪生和扩展世界、智能工业、数字医疗与健康、泛在连接、感知和通信的融合、可持续性 9 大趋势。在典型场景方面，6G 在 5G 三大场景基础上增强和扩展，包含沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能与通信的融合、感知与通信的融合、泛在连接等 6G 六大场景。同时建议书在 6G 技术趋势中明确指出了“IMT-2030 地面网络与非地面网络（NTN）的互通预计将进一步实现“随时随地连接”的目标”，本白皮书专注于天地一体融合网络技术以架构、空口、频率、多轨四大融合关键技术为基础，发展包含以“一体架构”、“统一高效”、“动态灵活”、“一网多能”为核心的天地一体网络技术图谱，着眼泛在连接，包含人工智能与通信的融合，兼顾感知与通信的融合，面向个人、企业及政府提供大众手机直连、广域物联及应急救援保障等多场景连接服务，实现“随时随地连接”。



图 4-1 天地一体融合网络创新技术图谱

4.1 一体架构

通过架构融合，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。攻关集中和分布协同的自治网络架构及智能动态协作的新型无线组网架构，打造高效、无缝的一体化网络架构。

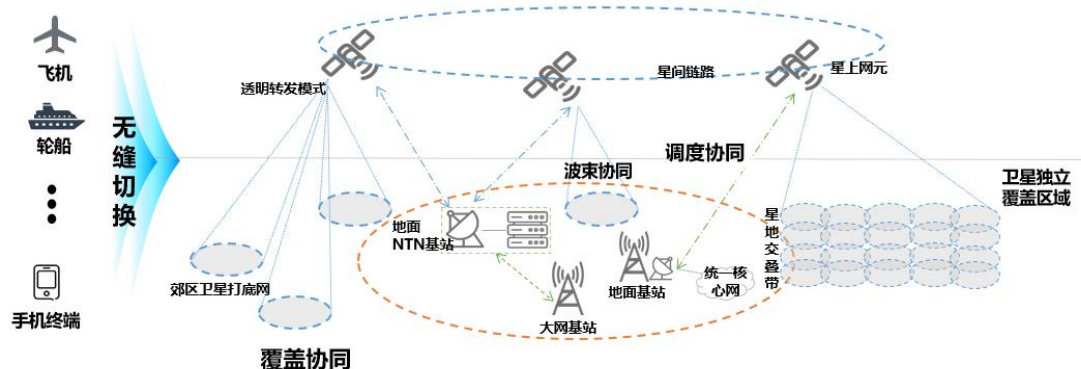


图 4-2 一体架构

4.1.1 集中和分布协同的自治网络架构

天地一体融合网络技术的核心是卫星网络与地面移动网络异构融合。在统一网络框架下，形成多轨位、多体制、多接入融合的天地一体集中和分布协同的自治网络架构，通过对卫星和地面网元统一设计，网络功能柔性分割、动态协作，采用一体化分布式自治、网元灵活部署、融合网络使能等技术实现天地一体动态自治组网。

集中和分布协同的自治网络架构：基于统一 IP 基座实现一套既支持卫星通信和移动通信，又支持接入、控制和路由的一体化协议栈，从“集中”向“集中+分布协同”转变，支持融合动态网络新型路由、以及多星多波束动态波束管理下的 IP 搜索，解决单星能力受限导致核心网上星难，以及卫星动态变化导致与地面 IP 地址路由关系大难题，奠定未来空天地一体化网络部署基础。

网元灵活部署：透明转发模式对卫星能力要求最低，卫星仅作为地面 NTN 基站的射频拉远，易于与地面协同组网，成本较低；再生模式下的卫星具备较强

的星上处理能力，配合星间链路可降低卫星网络对地面网络的依赖度，具备更强的性能及灵活性，实际部署中可以实现网络部分或者全部功能按需上星。其中基站 DU 或基站上星配合星间链路组网，进一步降低接入时延；UPF+MEC/CDN 上星实现星上直接交换和就近路由，满足低时延大带宽业务的需求；AMF+SMF 上星实现星上就近处理，降低接入时延，地面网络故障时可提供应急基础通信能力。多轨融合情况下，再生网元可以灵活部署在不同轨道，通过分层组网架构，降低卫星转发跳数，简化传输路由与网络传输，简化网络架构。

面向动态网络的新型路由体系：高、中、低轨星座异构，传统 IP 难以解决拓扑动态性、资源异构性等问题，通过建立面向动态网络新型的路由体系，基于卫星运动轨迹划分地表区块，构造层次化的 IPv6 编制，实现编址与移动性解耦，避免用户 IP 地址频繁切换和网关地址转换，保持动态连接下地址的稳定性，实现高、中、低轨星座构型解耦的统一编址寻址与多层异轨混合组网下的多级路由，构建天地一体融合网络。

融合网络使能：利用 NFV、边缘计算、动态网络切片、确定性网络、智能资源调度以及能力开放等技术，解决天地一体化组网、动态拓扑组网以及大规模用户连续性问题，形成适配卫星和地面环境下的星地一体化组网解决方案。

4.1.2 智能动态协作的新型无线组网架构

天地一体协同组网的目标是实现星地覆盖、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丝滑体验。为应对天地一体融合中存在的诸多挑战，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，引入“星地智能动态协作网元”，实现星地智能动态协作的高效新型无线组网架构。

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变动而频繁变动的问题，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配置，实现透明转发与再生模式的统一组网，降低天地协同复杂度，保障服务质量。

卫星与地面网络的高效资源调度：针对卫星覆盖面积大，星地交叠覆盖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同覆盖区下卫

星网络网元和大量地面网络网元，实现卫星与地面网络的高效资源调度，实现覆盖快速切换、业务负荷均衡、智能干扰规避等。

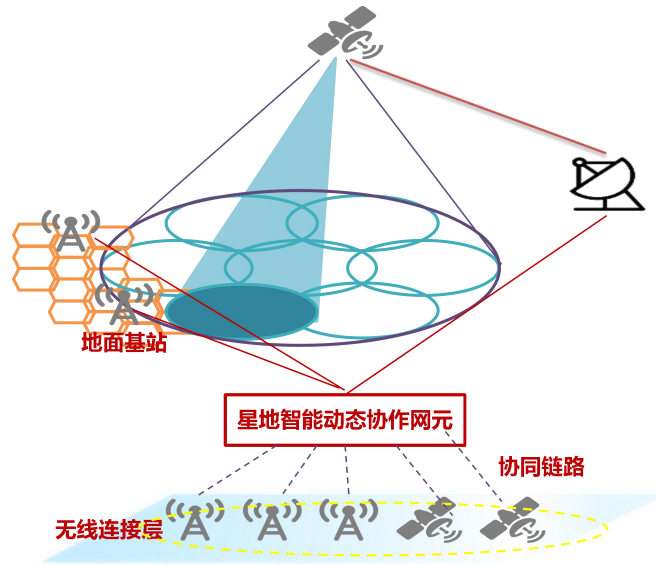


图 4-3 星地智能动态协作的高效新型无线组网

4.2 统一高效

随着网络接入类型多样化、业务需求复杂化、用户规模指数化、通信资源稀缺化，现有的星地松耦合协议和异频部署模式已经无法满足面向 6G 的天地一体融合网络需求，需开展统一空口、统一频率技术研究，使卫星与地面网络共用空口技术体系和框架，兼顾卫星和地面传输的差异性，最大程度实现星地网络的有机融合。由此，可充分复用蜂窝通信技术基带芯片和射频器件的研发和产业规模，从根本上解决卫星产业规模小及终端成本高的问题，缓解卫星频谱资源紧张，使卫星通信最大程度复用蜂窝产业，有利于大规模商用推广，进一步增强卫星的战略、社会和商业价值。

4.2.1 统一空口

天地一体融合网络的空口设计总体目标是面向空、天、地、海等泛在连接场景，支持参数化可配置可裁剪的统一空口设计。为了保障终端快速接入与网络可靠传输，需要进一步研究包含波形、多址接入、时频同步、极简接入以及覆盖增强等关键技术。

新波形设计：考虑卫星通信时延大、带宽和功率受限、器件非线性程度高等

特点，面向 6G 的天地一体融合网络的新波形研究，可从以下两方面考虑：一是增强已有波形。复用地面系统的 OFDM 波形，如采用 CP-OFDM 波形，同时通过削波峰和滤波技术、压缩扩张技术和部分传输序列技术等降低 PAPR，以提高功放效率。或者采用低峰均比的 DFT-S-OFDM 波形，以提升系统在多用户资源调度方面的灵活性；二是设计新型波形。如业界讨论的恒包络相位调制、单载波频域均衡、非直接载波调制、超耐奎斯特调制、正交时频空等均可作为备选波形。

新型多址接入：目前无论 5G NR 还是 3GPP NTN 均采用正交多址方式。面向 6G 天地一体融合网络的应用场景更加复杂、终端类型更加多样、用户数量呈级数式增长，传统的正交接入方式难以适应未来发展的需求，需要研究非正交多址接入技术来增强频谱效率、提升接入用户数量、降低高可靠场景的时延等。基于功率域、编码域以及随机交织域的非正交多址接入方式，将会进一步改善 6G 天地一体融合网络的容量，在未来的系统中发挥更重要的作用。

时频同步：3GPP NTN 在 R17 版本已经初步完成了基于 GNSS 信息的星地时频同步补偿方案。但是在面向 6G 的天地一体融合网络中，高、中、低轨道卫星以及高空平台等同时存在，终端需要具备测量、监测、接入到不同的网络的能力，因此需要在时频同步技术方面进一步开展研究，一方面需要增强时频补偿的能力，另一方面需要适应多重异构网络下的不同时序关系，保障星地时频同步、有效调度。

极简接入：卫星通信因为传输路径长具有更大的时延，此外卫星的快速运动也会带来很大的多普勒频偏，因此，需要解决随机接入中的上行频率和时间估计问题。面向 6G 的天地一体融合网络，因不同网络类型对接入带来的时延影响不同，因此有必要研究极简接入方式，在接入信号设计、接入流程、身份校验等方面开展研究，提高接入效率。一是考虑增强两步接入机制减少信令开销，降低随机接入时延；二是针对卫星移动轨迹可知等特点，可对卫星波束服务时间进行预测，通过人工智能技术提前预判和调度无线接入资源，减少随机接入碰撞概率，实现用户智能接入。

覆盖增强：目前 3GPP NTN 虽然已经针对 NTN 场景开展了覆盖增强的研究，但是在未来 6G 天地一体融合网络下，由于实际应用场景的需求变化，可能存在链路预算不足的场景，为了保证正常的接入及数据传输，可以考虑从以下几个方

面进行覆盖增强：一是重复传输，通过重复传输可以有效提高增益；二是联合信道估计，在低信噪比场景下，通过适当的联合信道估计可以提升信道估计的可靠性；三是跳波束，通过采用时分的方式覆盖不同区域来保证覆盖范围；四是盲重传，通过盲重传获得分集增益或者冗余版本合并增益。

4.2.2 统一频率

适用于手机直连卫星场景的 6GHz 以下低频段资源紧张、频谱资源利用率较低，为低轨卫星网络分配独立使用的频段难度较大。星地统一频率可以极大地提高资源利用率，缓解低频段资源紧张，但需要避免严重的星地频率间干扰。为实现星地统一频率场景下的高频谱效率和低频率干扰，需积极开展分布式频谱感知、高效干扰抑制及动态干扰规避等关键技术研究。

分布式频谱感知技术：选择天地一体融合网络网元作为分布式协同感知单元，感知系统是否存在空闲频谱，由统一决策中心收集全局感知结果确定空闲频谱，以此实现两网频率动态共享。

高效干扰抑制技术：采用超窄波束、超低 ACLR 设计及相关波束成形技术，缩小星地统一频率下的空间隔离带范围，减轻星地同频干扰。

动态干扰规避技术：基于星地网络频率信息的实时交互，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。

跳波束作为一种新兴波束技术，可在空间、时间、频率和功率四个维度上进行资源分配以适应业务的不均匀分布和动态变化。因此，基于跳波束的星地统一频率方案也将变得更加实时动态，灵活高效。

基于跳波束的星地统一频率方案：面向 6G 的天地一体融合网络，卫星、地面蜂窝网络可以基于星地智能动态协作单元进行深度信息交互，利用两张网的信息集中式地进行资源分配及波束管理，最大程度地降低星地频率干扰。基于跳波束在时域、频域及空域的灵活性，当业务波束跳变至具有星地频率干扰的波位，两网根据频谱资源分配方案进行频率划分，以规避星地频率干扰；而当业务波束跳离该波位，卫星波束及该波位的地面蜂窝网络则可以恢复全频段频率复用。其中，资源分配方案应兼顾波束间公平性、业务时延限制以及混合共信道干扰等因

素，对跳波束进行合适的跳波束图样设计以及频谱分配，提升异系统联合效益。值得说明的是，若天地一体融合网络内不同网元采用同一跳变图样，星地传播时延仍会产生严重星地频率干扰，需在跳波束图样中进行时延预补偿，形成针对各个网元的特定跳变图样。

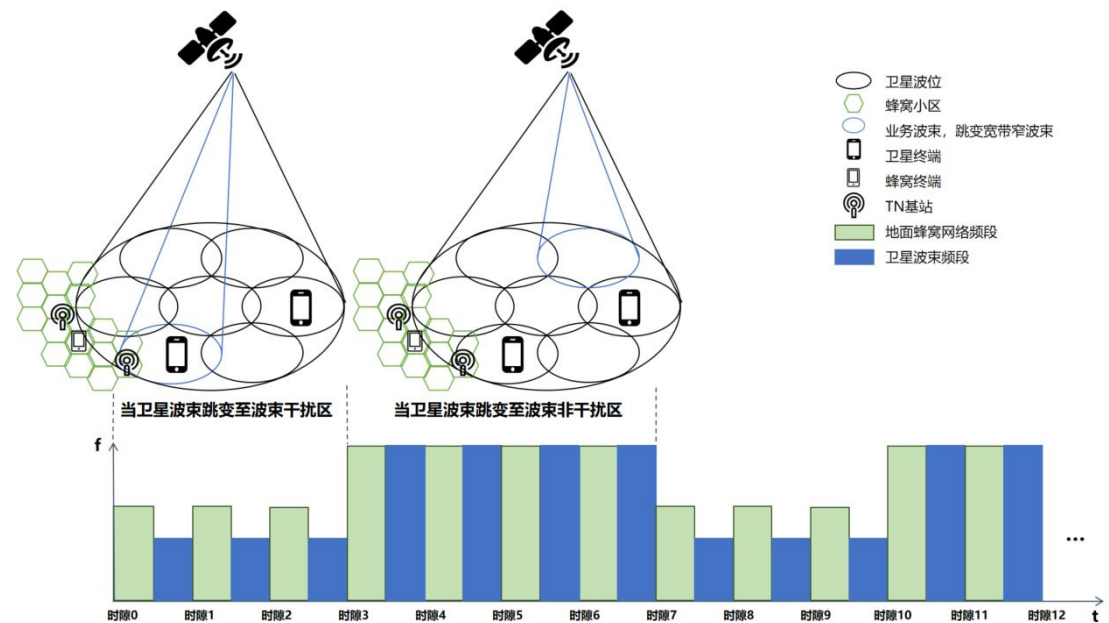


图 4-4 基于跳波束的星地统一频率方案

4.3 动态灵活

在天地一体融合网络架构中，网络拓扑呈现高速移动特性，导致用户频繁切换，这会增加业务中断概率，降低网络鲁棒性且增大业务协同信令开销。同时卫星间的可见性、覆盖范围、信道容量等随时间及轨道变化，导致某些节点或区域过载或空闲，使得网络资源不均衡，影响业务效率和公平性，需要发展动态灵活的网络资源管理技术。基于地面控制的卫星波束管理全新技术，将促进地面网络深度参与卫星资源的管理调度来提高星地协同覆盖效果，提高透明转发架构的性能，从而减少星上基站的数量，降低星座成本；基于星地智能动态协作网元，实现星地动态感知、快速交互、统筹调度、协同控制，可在降低协同复杂度的同时保障服务质量；基于高中低轨卫星的分层协作机制，可提升全局性能和建设效率。

4.3.1 灵活波束管理

卫星通信面临星地超远距离传输、卫星平台功率受限等难题，多采用高定向

波束赋形技术提升功率使用效率。由于卫星覆盖区域较大，星下用户的通信需求在地理、时间、带宽等多维度分布不均匀且动态变化，波束管理是卫星通信领域的关键解决方案。传统卫星的波束管理机制独立于地面网络，一般采用相对地面固定的波束设计，即波束在地面的覆盖区域基本固定，将地球表面划分为数万个波位小区，采用波束扫描的方式为用户提供随遇接入和业务传输服务，卫星通信资源使用效率不够高。为满足卫星与地面网络间覆盖、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天地一体融合网络中一条全新的技术路径。针对透明转发和基站上星两种模式的卫星，卫星波束能够根据地面网络发送的波束控制指令，灵活的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，并有效降低星座建设成本。

星地动态关系构建：天地一体融合网络具备按需、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。考虑采用拓展的动态星地 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同等信息。一是针对星上处理模式的星载 NTN 基站，地面蜂窝基站增加馈电链路窄带传输模块，采用基于馈电链路的星地 Xn 动态增强接口；二是针对透明转发模式卫星，NTN 基站位于地面，地面蜂窝基站基于地面连接即可以与地面 NTN 基站建立星地动态 Xn 接口，实现星地间面向各项协同场景需求的实时波束控制。

透明转发架构下端星地三方精准同步技术：现有 3GPP NTN 技术基于透明转发架构下的凝视或平扫波束完成超远距离和超高速移动传输技术的标准化工作，天地一体融合网络中卫星波束需要根据星下动态变化的业务需求和地面网络的协同需求灵活跳变。透明转发架构下 NTN 基站位于地面，相控阵天线及波束控制器位于星上，基于地面控制的波束管理受星地时延及信道环境多变的影响。NTN 基站位于地面，相控阵天线及波束控制器位于星上，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 基站调度器统一控制下，保证地面发送的波束切换指令和空口信号经过远距离高动态时变传输后在星上的精准同步，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。

4.3.2 统一资源调度

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，由于业务分布和需求的非均匀性，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，导致卫星通信系统、地面移动通信系统分配的资源与业务需求不匹配，网络资源利用率不高。天地一体融合组网场景下，通过新增星地智能动态协作网元，采用高效统一资源调度方法，可以实现卫星、地面资源的动态共享，如通过在业务量较少且广覆盖的区域，动态调整该地区地面网络深度休眠，使终端通过卫星接入到网络，降低地面网络能源消耗等方式，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，达到星地资源利用系统最优优化。

面向业务连续性的快速切换：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。天地一体融合网络切换场景多样且复杂，包括卫星网络内切换、卫星与地面网络间切换等，对切换管理提出更高的要求。可通过建立星地协同的业务管理机制，感知用户业务指标数据，对用户统一进行资源管理，优化业务体验。一是面向星地切换场景快速构建星地网络邻区关系，优化星地网络参数配置及按需采用星地双连接等方式，保证星地业务连续，同时尽可能降低星地切换时延；二是在切换过程中引入基于强化学习的人工智能等算法，有效提高切换后的业务体验，抑制切换带来的信令风暴。

面向不同业务等级的智能调度：空天地一体化通信系统网络结构复杂且接入终端类型较多，需满足不同服务等级的业务需求。一是面向星地业务负荷均衡的智能调度，通过星地网络负荷信息的实时交互，结合用户业务需求及星地双链接等方案，开展星地业务负荷的动态智能卸载，有助于在保证用户业务体验情况下实现星地网络业务负荷均衡；二是天地一体端到端网络切片编排与设计。因天地一体融合网络拓扑结构具有时变特性，可通过引入动态网络拓扑结构预测、网络一体虚拟化等技术保障统一业务管理，根据业务需求和用户密度定制化编排网元，提升用户的服务体验。

4.3.3 弹性多轨组网

多轨道协同组网打破现有低、中、高轨卫星网络独立模式，推动实现多轨混合星座组网，有效利用高轨和中轨星座在网络拓扑简单稳定、覆盖能力强等特点以及低轨卫星低延时、低损耗特点，降低组网、星间链路复杂度和测控难题，进一步提升天地一体网络的全局系统性能和降低星座建设成本。

多轨分层组网，简化网络架构：由中高轨为主承担骨干控制与承载网络，低轨为主承担用户接入网络，通过分层组网架构，降低卫星转发跳数，简化传输路由与网络传输；另外，特定轨道高度下高轨和低轨卫星轨道周期成倍数关系，高低轨混合组网可简化卫星连接关系；

网络覆盖与资源联合优化：高、中、低轨卫星网络异构，网络节点能力差异大，网络协同与统一资源调度难度大。通过多轨融合组网优化算法，实现多星座星间组网的性能和部署成本达到协同最优；通过空时频资源最优化算法，实现分场景星地联合组网时的空口资源最优分配。

中高轨星基测控，解决全球测运控难题：通过利用中轨卫星覆盖优势与激光星间链路，对低轨卫星实施测控，解决低轨巨型星座海外测控站建设难题。弹性多轨组网优势明显，但亟待解决异构网络协同与资源优化、网元功能部署、面向动态网络的新型路由等问题。

优化星间链路，降低星座成本：低轨卫星通过星间链路接入中轨星座，降低低轨激光星间链路使用量。

4.4 一网多能

随着通信技术发展与需求驱动，天地一体融合网络将承载除泛在通信外的更多功能。中国移动提出了以“三体四层五面”为基础的 6G 网络架构，融合了通信、感知、计算等能力。天地一体融合网络通过通信与感知融合、通信与算力融合、通信与测控融合，构建起一网多能的全球三维立体网络。

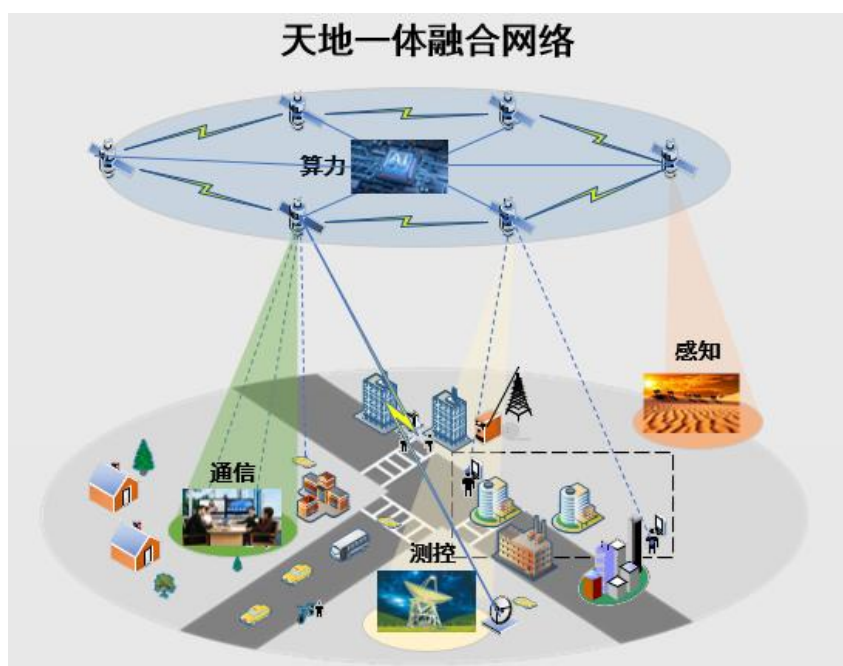


图 4-5 一网多能场景

4.4.1 感知融合

传统天基信息系统中通信、遥感卫星系统孤立、信息分离、服务滞后，现阶段部署的遥感卫星组网服务模式仅在数据获取方面实现了协同观测，主要面向专业用户提供非实时服务，处理和服务模式存在形式固化、服务滞后的问题，难以满足大众化、高时效的卫星应用服务需求。面向 6G，通过两个阶段实现天地一体融合感知。

阶段一：通信、感知协同，实现遥感实时服务。通信、遥感协同组网，天地网络互联，提升遥感节点信息在轨处理、压缩能力，使用天基通信网络实时传输，通过地面通信网络分发或手机直连卫星方式，实现用户遥感数据实时获取。

阶段二：通信、感知一体，实现泛在感知。面向 6G，可以利用通信信号实现对目标的检测、定位、识别、成像等感知功能，地面基站、高/中/低轨星载基站、终端等通感节点以及专用遥感卫星系统，组成空天地海立体多层次泛在感知网络。

4.4.2 算力融合

通信和计算融合是将边缘计算、联邦学习等技术应用于通算融合的场景。天

地一体融合网络可以搭载一定重量的计算与通信载荷,通过将计算任务下发到星上边缘计算节点,由边缘计算节点配备更多的算力执行计算任务,从而有效降低系统时延、提升通信效率、提高系统吞吐量和稳定性。目前的研究理论和架构集中在星上边缘计算体系,关键技术包括基础星上边缘计算结构设计、通算融合的业务场景设计等等。同时,面向星上感知数据计算的需求,可探索基于星上分布式云计算、雾计算等框架技术、以及协同感知与计算模型构建技术,对于星上计算效率和感知准确度进行提升。

4.4.3 测控融合

面对急剧增长的大规模星座管理、控制与应用需求,利用地面大量蜂窝基站的处理能力,创新天地一体化测控技术体制,提高大规模星座测控通量与时间精准度,实现大规模星座长期运营管理、星地高效协作及网络动态调整。

基于 5/6G 标准的测控通信一体化技术: 结合航天测控标准,充分挖掘 5/6G 通信感知一体化能力,研究测控通信一体化协议,实现遥测或数传数据接收及处理、遥控指令编排发送及数据上注、测定轨或轨控等相关轨道技术支持等功能。

基于蜂窝基站的分布式测控云服务: 利用 5/6G 网络构建面向大规模星座的分布式测控网络,实现卫星测控服务向能力网络化、节点智能化、响应实时化、功能分散化、系统开放化和产品集成化的方向实现数字转型,提升大规模星座测控覆盖率和资源利用率。

同时可利用基于数字孪生的自主运行管理、基于大数据分析的卫星健康状态监测与管理等实现,通过虚实数据融合驱动及自动化超实时推演验证,实现大规模星座的自主运行管理与大规模星座的在轨智能异常检测与故障诊断。

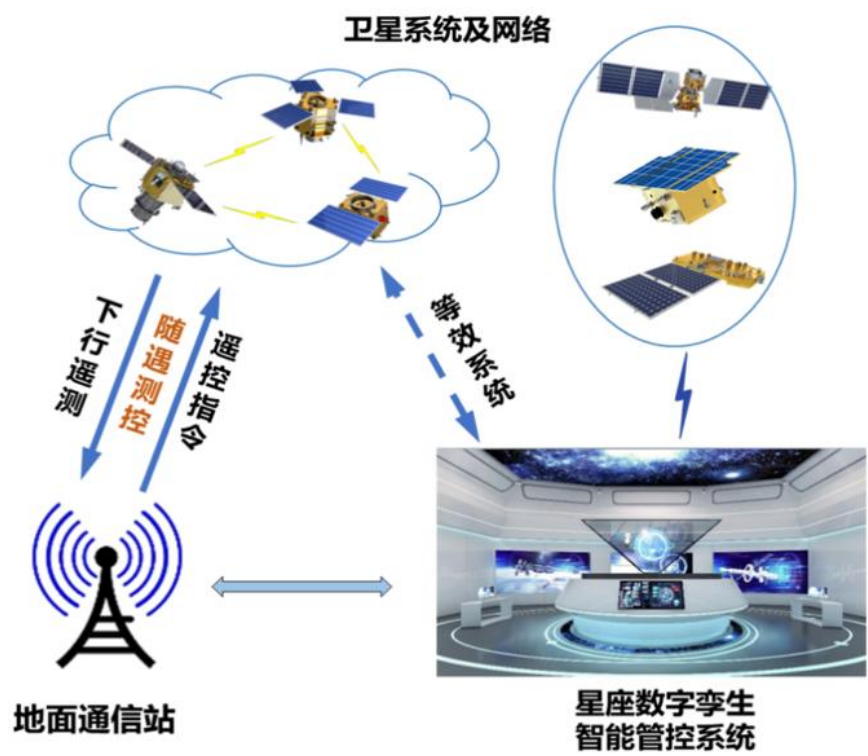


图 4-6 未来新型测控体制构想

5 天地一体融合网络技术发展倡议

天地一体网络是非常复杂的系统工程。当前，业界已在星地融合网络技术研究上取得阶段性进展，但距离实现 6G 天地一体的目标仍有一定的差距。面向未来，我们倡议地面移动通信领域和卫星领域的产、学、研、用各界同仁，共同从技术、标准、产业、应用四方面推进面向 6G 的天地一体融合网络技术的成熟商用。

技术共同攻关。以地面网络为基础，兼顾星地和地面传输的差异性，共同开展以架构、空口、频率、多轨四大融合关键技术为基础的“一体架构”、“统一高效”、“动态灵活”、“一网多能”天地一体融合网络技术体系攻关。

标准共同制定。以 3GPP NTN 标准演进为基础，共同制定和推动形成卫星与地面移动通信融合统一标准，促进天地一体技术规模化发展。

产业共同推进。共同构建开放健壮的融合产业生态，加速推进星地融合统一设备、一体服务能力的成熟和商用。中国移动也勇担策源地、移动信息现代产业链链长等国家重任，积极建设协同创新基地和天地一体化实验室，共同攻关“硬骨头”。

应用共同繁荣。围绕着“泛在连接”、“泛在场景”，在大众手机直连卫星、行业终端直连卫星、各类应急救援保障等领域形成繁荣、开放、创新的新型应用市场。

望星河璀璨，筑泛在互联，6G 天地一体发轫于 5G，未来成功的关键在于跨领域、跨环节各方深度协同和开放创新，愿大家携手共筑天地一体数字信息基础设施，共创“网络无所不达、算力无所不在、智力无所不及”的美好未来。

本白皮书不包含我国科技发展战略、方针、政策、计划等敏感信息。不包含涉密项目的背景、研制目标、路线和过程，敏感领域资源、数据，关键技术诀窍、参数和工艺信息。

缩略语列表

缩略词	英文全名	中文解释
3GPP	Third Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
CCSA	China Communications Standards Association	中国通信标准化协会
NTN	Non-terrestrial Network	非地面网络
TN	Terrestrial Network	地面网络
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest	混合自动重传请求
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
GPU	Graphics Processing Unit	图像处理器
UPF	User Plane Function	用户面功能
MEC	Multi-Access Edge Computing	多接入边缘计算
AMF	Access and Mobility Management Function	接入和移动管理功能
SMF	Session Management Function	会话管理功能
IP	Internet Protocol	网际互连协议
UE	User Equipment	用户设备
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
QoS	Quality of Service	服务质量

参考文献

- [1]J. Hu, G. Li, D. Bian, S. Shi, R. Ge and L. Gou, "Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Satellite Terrestrial Networks," in IEEE Access, vol. 8, pp. 161396-161405, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020846.
- [2]K. A. Shah, Wang Yong, W. Ur Rehman and F. A. Khan, "Simulation of elimination of Co-Channel interference in Hybrid Terrestrial-Satellite Mobile Communication System using adaptive Beam-Forming technique" 2015 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, 2015, pp. 620-622, doi: 10.1109/IBCAST.2015.7058570.
- [3]X. Liu, K. -Y. Lam, F. Li, J. Zhao, L. Wang and T. S. Durrani, "Spectrum Sharing for 6G Integrated Satellite-Terrestrial Communication Networks Based on NOMA and CR," in IEEE Network, vol. 35, no. 4, pp. 28-34, July/August 2021, doi: 10.1109/MNET.011.2100021.
- [4]V. Deslandes, J. Tronc and A. Beylot, "Analysis of interference issues in integrated satellite and terrestrial mobile systems", Proc. 5th Adv. Satellite Multimedia Syst. Conf. (ASMS) 11th Signal Process. Space Commun. Workshop (SPSC), pp. 256-261, 2010.
- [5]康绍莉;缪德山;索士强;孙韶辉. 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,(09):18-26.
- [6]S. Chen, S. Sun and S. Kang, "System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication —the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G," in China Communications, vol. 17, no. 12, pp. 156-171, Dec. 2020, doi: 10.23919/JCC.2020.12.011.
- [7]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,(04):2-9.
- [8]孙韶辉;戴翠琴;徐晖;康绍莉;缪德山. 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,(06):891-901.