面向6G的NTN网络架构演进：从广域覆盖到星地融合服务

Evolution of Non-Terrestrial Network Architecture Toward 6G: From Wide-Area Coverage to Satellite-Terrestrial Integrated Services

施嵘/Shi Rong，张诗壮/Zhang Shizhuang，
周将运/Zhou Jiangyun，李数林/Li Shulin

（中兴通讯股份有限公司，中国 深圳 518057）
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202605010
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20261020.1407.008
网络出版日期：2026-10-20
收稿日期：2026-07-25

摘要：非地面网络（NTN）未来的核心价值将不再局限于广域覆盖，而是需要与地面蜂窝网络深度融合，形成覆盖、容量、连续性和业务保障一体化综合能力。分析了6G NTN的演进逻辑、标准化趋势、总体架构、关键技术体系和工程挑战，并结合非均匀业务分布下的容量调度问题，说明业务感知调度、多星协同、星地负载均衡、预测式移动性管理和AI自治对未来NTN规模商用的重要意义。研究表明，6G NTN需要从“覆盖驱动”的星座建设模式，演进为业务感知、容量增强、确定性保障和星地融合协同的网络建设模式，为全球泛在连接、应急通信、行业数字化和国家战略通信能力提供重要支撑。

关键词：6G；非地面网络；星地融合；业务感知；智能调度

Abstract: Going forward, the core value of non-terrestrial network (NTN) will extend beyond wide-area coverage to deep integration with terrestrial cellular networks, yielding integrated capabilities in coverage, capacity, continuity, and service assurance. This paper analyzes the evolution logic, standardization trends, overall architecture, key technologies, and engineering challenges of 6G NTN. It further discusses capacity scheduling under non-uniform traffic distribution, highlighting the importance of service-aware scheduling, multi-satellite cooperation, satellite-terrestrial load balancing, predictive mobility management, and AI-native autonomy. The analysis shows that 6G NTN needs to evolve from a coverage-driven constellation deployment model to a service-aware, capacity-enhanced, deterministic-service-guaranteed, and satellite-terrestrial integrated network model, supporting global ubiquitous connectivity, emergency communication, vertical industry digitalization, and national strategic communication capabilities.

Keywords: 6G; non-terrestrial network; satellite-terrestrial integration; service awareness; intelligent scheduling

引用格式：施嵘, 张诗壮, 周将运, 等. 面向6G的NTN网络架构演进：从广域覆盖到星地融合服务 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(5): 71-81. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605010
Citation: Shi R, Zhang S Z, Zhou J Y, et al. Evolution of non-terrestrial network architecture toward 6G: from wide-area coverage to satellite-terrestrial integrated services [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(5): 71-81. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605010

移动通信网络正从地面二维蜂窝覆盖向空-天-地-海一体化三维覆盖演进。传统地面蜂窝网络以地面基站、传输网络及配套能源设施为支撑，其覆盖能力受地理环境、建设成本、运维条件和抗灾能力等多重因素制约。然而，在海洋、航空航线、山区、荒漠、边境、极地及灾害等场景中，地面网络通常难以实现连续覆盖。为此，非地面网络（NTN）通过引入卫星、高空平台、无人机等非地面节点，为实现全球泛在连接提供了重要技术路径，并已成为6G天地一体化网络的关键组成部分[1-4]。

以卫星通信为代表的NTN正经历深刻变革。得益于低成本卫星制造、可重复使用运载火箭、星载相控阵、数字处理载荷、星间链路及星上计算等技术的快速发展，卫星互联网已进入以大规模低地球轨道（LEO）星座为代表的新阶段。低轨星座通常由数百至数千颗卫星构成，能够形成全球连续覆盖能力；与地球静止轨道（GEO）卫星相比，其传播时延显著降低，并可为海洋、航空、偏远地区及地面网络盲区提供宽带接入服务。当前，Starlink、中国“GW”星座等商业LEO项目在全球范围内加速部署，推动卫星通信由专用通信系统向大众化、宽带化和网络化演进[5]。

然而，低轨星座的大规模部署并不等同于服务能力充

分。覆盖能力主要解决空间可达性问题，而容量、调度与业务体验则取决于星上功率、频谱、波束资源与业务空间分布之间的匹配程度。在用户稀疏区域，星上波束、功率与频谱资源可能长期处于低利用率状态；在航空航线、海上航道、城市边缘、灾害现场、能源基地及行业热点区域，业务需求又可能高度聚集，进而引发局部容量短缺与用户体验劣化。因此，卫星互联网的建设目标正由“泛在覆盖”逐步转向覆盖、容量、移动性与业务体验的协同优化。

面向6G，NTN将不再仅是独立于地面网络之外的覆盖补盲系统，而需与地面蜂窝网络、核心网、边缘计算、网络切片及智能运维体系深度融合。未来网络应依据用户位置、业务类型、地面网络负载、卫星可见性、波束资源状态及服务等级协议（SLA），动态选择接入网络与传输路径。这意味着卫星互联网将从“大规模低轨星座阶段”进一步演进为“业务感知的星地融合NTN阶段”。

从产业与网络架构视角看，6G NTN的战略价值不仅在于拓展网络覆盖边界，更在于推动通信网络由地面连接基础设施升级为空天地一体化数字底座。未来，运营商、卫星制造商、终端厂商、行业客户与监管机构需围绕标准、频谱、终端、星座、核心网、算力及运维体系开展协同创新，共同推动NTN由技术验证迈向规模商用。

1 卫星互联网与NTN标准化演进

1.1 卫星互联网演进

卫星互联网的发展大致可分为传统卫星通信阶段、大规模低轨星座阶段、5G-A NTN阶段和6G NTN阶段。不同阶段的网络形态、建网目标和技术重点存在明显差异，如表1所示。

由上述演进可见，卫星互联网的核心矛盾正发生转变。传统卫星通信主要解决广域通信问题，大规模低轨星座聚焦全球覆盖与低时延接入，而6G NTN阶段则需进一步应对容量匹配、业务确定性、跨域移动性及网络智能自治等挑战。换言之，未来卫星互联网的竞争焦点将不再局限于星座规模，而在于网络能否在适当时间与区域，为目标业务提供服务质量可保障的接入与服务能力。

1.2 NTN典型应用场景

NTN的典型应用场景可分为广域补盲、应急通信、行业立体连接、大众终端直连及星地融合增强等类型。

广域补盲覆盖是NTN最基础的应用场景。针对海洋、山区、荒漠、边境、极地及偏远农村等地面网络难以覆盖的区域，NTN可提供基础语音、消息、物联网及宽带接入能力，从而缩小数字鸿沟。

应急通信保障是NTN的重要刚性需求场景。地震、洪水、台风及森林火灾等灾害发生后，地面通信基础设施可能受损或发生拥塞，NTN能够快速提供临时通信链路，支撑灾情上报、应急指挥、人员定位与救援协同。

行业立体连接主要面向航空、航运、能源、农业、物流、低空飞行器及远程巡检等场景。此类业务通常具有覆盖范围广、终端分布稀疏、移动性强及服务连续性要求高等特点，适宜通过卫星、高空平台（HAPS）、无人机（UAV）与地面网络协同提供连接。

大众终端直连是NTN产业化的重要方向。面向普通智能手机，NTN可在无地面网络覆盖区域提供应急消息、低速数据、语音及位置上报等服务。

星地融合增强是面向6G的新型应用形态。在城市热点、交通干线、航空航路、灾害现场及大型活动区域，NTN可与地面网络协同，实现补充覆盖、业务卸载、负载均衡、可靠性增强及跨域连续服务。

1.3 3GPP NTN标准化演进

3GPP自5G阶段起系统性地推进NTN标准化工作。3GPP TR 38.811研究了NR支持NTN的部署场景、系统参数及无线接口影响[6]，3GPP TR 38.821进一步研究了NR支持NTN所需的协议与物理层适配方案[7]。如表2所示，从标准演进来看，Rel-17主要完成NTN基础能力的引入，Rel-18针对覆盖、移动性、终端节能及频段能力等方面进行增强，Rel-19进一步研究再生载荷、存储转发及馈电链路切换等能力[8]。面向6G，NTN将从“兼容接入”进一步迈向“原生

表1 卫星互联网与NTN网络演进阶段

阶段	网络形态	主要目标	关注点
传统卫星通信	GEO/MEO专用系统	广域通信	专用系统、专用终端
低轨星座阶段	LEO独立组网	全球低时延覆盖	星座规模、波束能力、网关
5G-A NTN阶段	NTN纳入3GPP体系	标准化接入	NR-NTN、IoT-NTN、终端生态
6G NTN阶段	空天地一体化	融合服务保障	星地协同、智能调度、业务保障

GEO：地球静止轨道　IoT：物联网　LEO：低地球轨道　MEO：中地球轨道　NR：新空口　NTN：非地面网络

表2 3GPP NTN标准化演进趋势

阶段	NTN定位	关键能力	技术重点	发展目标
Rel-17	NTN基础能力引入	基础接入	NR-NTN、IoT-NTN、透明载荷、时延与频偏补偿	实现“能接入”
Rel-18	5G-A NTN增强	覆盖与移动性增强	覆盖增强、移动性优化、终端节能、定位增强	实现“更稳定”
Rel-19	高能力NTN探索	再生载荷与多星协同	多场景增强、再生载荷、星间链路、终端直连增强	面向商用增强
6G阶段	NTN原生融合	星地一体化	统一空口、AI原生、多层协同、数字孪生、自治网络	实现“深度融合”

AI：人工智能 IoT：物联网 NR：新空口 NTN：非地面网络

融合”。然而，多星协同、星间链路深度协同及星地统一调度等能力仍需在标准、产业与工程实现层面持续提升。

从标准化趋势看，5G-A NTN仍主要体现为对地面NR体系的适配，即解决NTN终端接入、时延频偏补偿、覆盖增强和移动性增强等问题。而6G阶段的星地融合将进一步从“接入兼容”走向“网络原生融合”，需要在统一核心网、跨域移动性、业务连续性、网络切片、星间链路、星上处理和AI自治等方面形成系统性能力[9-11]。

2 面向6G的NTN总体架构

面向6G，NTN架构应从空间接入层、地面接入层、核心网与算力层、智能管理层4个层面构建统一架构[12-13]，如图1所示。

空间接入层包括LEO、MEO、GEO卫星，以及HAPS、UAV等非地面节点。其中，LEO卫星具备低时延和宽带接入优势，适合全球连续覆盖和移动宽带业务；GEO卫星覆盖范围大、服务关系稳定，适合广播、控制面承载和广域低速业务；HAPS和UAV具备区域快速部署能力，适合应急通信、低空经济和热点增强[14]。

地面接入层包括宏基站、小基站、专网基站和低空接入节点，是高容量、低时延和高可靠业务的主要承载网络。星地融合并不是用卫星替代地面网络，而是通过卫星网络补充地面网络的覆盖盲区，并在特定区域与地面网络形成容量互补和可靠性增强。

核心网与算力层负责统一用户管理、会话管理、移动性管理、网络切片、边缘计算和业务编排。未来NTN不应作为孤立卫星网络运行，而应通过核心网和算力平台融入移动通信体系，实现统一认证、统一计费、统一服务质量（QoS）和统一服务级别协议（SLA）保障。

智能管理层负责跨域资源编排、AI辅助调度、数字孪生仿真、故障预测和自治运维。由于星座网络具有高速动态、拓扑复杂、资源受限和业务分布非均匀等特点，传统人工配置和静态优化难以适应6G NTN需求，因此必须引入智能化和自治化机制。

基于上述分层架构，面向6G的NTN架构具有3个核心特征：一体化空口、跨域统一调度、确定性业务感知。这3类能力相互支撑，共同保障星地融合网络的高效、稳定运行。



图1 面向6G的非地面网络总体架构

2.1 一体化空口：从适配增强到原生融合

一体化空口是实现星地融合通信的基础。面向地面热点区域，空口应优先保障高容量与低时延；面向卫星广域覆盖场景，空口应重点实现覆盖增强、同步鲁棒及低功耗接入；面向低空经济与应急场景，空口需具备快速部署、灵活波束调控与通感一体化能力。

6G NTN空口将从5G-A阶段的“地面NR适配增强”逐步走向原生融合。一方面，空口需要兼容地面蜂窝网络，降低终端复杂度和产业部署成本；另一方面，需要针对NTN高动态、大时延和弱链路特征进行增强。未来可通过多频段协同、高动态波形、AI辅助信道估计、星历辅助同步、轻量化协议和可重构帧结构，实现地面网络与NTN之间更自然的融合。

一体化空口并非所有场景采用完全相同的物理层参数，而是在统一框架下支持差异化配置。面向手机直连卫星场景，需重点优化链路预算、终端功耗与接入可靠性；面向车载、船载、机载终端，可借助更高天线增益与更强处理能力承载宽带业务；面向物联网终端，则应突出低功耗、低速率、广覆盖及长时在线能力。

2.2 跨域统一调度：从单域优化到跨域协同

未来星地融合网络需实现跨域统一调度。网络应综合考虑用户位置、业务类型、链路状态、卫星负载、地面网络负载及SLA需求，动态选择接入网络与传输路径。

具体而言，城市区域可优先采用地面网络，卫星网络则作为备份链路或广播增强手段；海洋与航空场景可优先利用LEO卫星提供连续覆盖；灾害场景可由LEO卫星、HAPS、UAV与地面应急基站协同提供临时覆盖；高可靠控制业务可采用GEO/LEO/TN多连接方式保障业务连续性。

由此可见，天地一体化并非简单的“星地互联”，而是无线接入、传输承载、核心网、计算资源与运维体系的全栈融合。

2.3 确定性业务感知：从尽力而为到可保障服务

NTN中的确定性业务保障并非要求所有业务均追求极低时延，而是要求网络能够依据业务等级提供可预测、可度量且可承诺的服务能力。例如，应急通信强调高优先级与高可用性，航空航运业务要求连续覆盖与稳定吞吐，工业远程控制则受时延和可靠性约束，普通补盲业务更关注低成本与基本可达性。不同业务在速率、时延、可靠性、连续性及成本等方面的需求各异，因此6G NTN需具备业务识别、业务分级、资源预留及服务质量闭环评估能力。

在6G NTN场景下，确定性保障还需考虑跨域资源协同。例如，当地面网络拥塞或受灾失效时，卫星网络应能为高优先级业务提供临时资源保障；当卫星波束进入热点区域时，网络应提前预测负载，并调整功率、频谱及波束驻留时间[12]；当终端即将发生星间或星地切换时，核心网与接入网应协同降低业务中断风险。

3 NTN关键技术体系

面向6G NTN，关键技术不应被理解为相互孤立的技术要素，而应围绕“能否接入、资源如何匹配、热点如何扩展、服务如何连续、网络如何自治”5类核心问题加以组织。表3给出了本文所构建的关键技术体系。

3.1 一体化空口与接入增强

大规模低轨星座建设首先需解决“能否稳定接入”的问题。由于NTN链路具有大时延、大多普勒频移和高路径损耗等特征，单星物理层接入能力是卫星互联网由传统专用系统迈向移动通信体系的基础。然而，面向6G星地融合，卫星接入不仅需保证链路可用，还需支撑统一空口、跨域移动性及业务连续性保障。

在时延方面，卫星与终端之间的传播距离远超地面蜂窝网络。即使是LEO系统，其传播时延与往返时延也显著高于地面基站场景，进而影响随机接入、上行定时、调度偏移、混合自动重传请求（HARQ）反馈及控制面流程。

在频率方面，LEO卫星高速绕地运行，相对地面终端的运动速度较大，会引入显著且快速变化的多普勒频偏。对于正交频分复用（OFDM）系统，多普勒频偏会破坏子载波正交性，引入子载波间干扰，降低解调性能。

在链路预算方面，普通手机与低功耗物联网终端天线增益低、发射功率有限，而卫星链路自由空间损耗大，并可能叠加大气吸收、降雨衰减、遮挡及波束边缘效应。因此，NTN物理层设计应首先解决可靠接入与链路稳定问题，而非单纯追求峰值速率。

表3　面向6G NTN的关键技术体系

技术层次	解决的问题	关键技术	意义
接入增强	能否稳定接入	一体化空口、时频同步、覆盖增强、链路预算优化	支撑统一接入体验
资源调度	资源是否高效利用	业务感知跳波束、功率与频谱联合调度	提升星上资源利用率
容量增强	热点容量是否足够	波束域多输入多输出、多星协同、星地分流	扩展热点服务能力
移动性管理	服务是否连续	星历辅助切换、条件切换、多连接	降低中断和切换失败
智能自治	网络能否自优化	AI调度、数字孪生、分层自治	支撑复杂网络动态编排

3.2 时频同步与链路可靠性增强

对于下行链路，终端可基于同步信号、广播信息和频率栅格完成初始时频同步。对于上行链路，NTN需要采用终端位置与卫星星历辅助的预补偿机制。终端通过GNSS获取自身位置，通过系统信息获取卫星星历，并实时估算终端与卫星之间的传播时延和多普勒频偏。

定时提前可表示为：

$$\mathrm{TA}_{\mathrm{total}} = \mathrm{ta}_{\mathrm{common}} + \mathrm{ta}_{\mathrm{UE}} + \mathrm{ta}_{\mathrm{offset}} \quad (1),$$

其中，$\mathrm{ta}_{\mathrm{common}}$为网络广播的公共定时提前量，$\mathrm{ta}_{\mathrm{UE}}$为终端根据自身位置和卫星星历计算的用户专属定时提前量，$\mathrm{ta}_{\mathrm{offset}}$为系统配置偏移，用于适配NTN长往返时延（RTT）条件下的调度时序。基站侧还需要考虑星历误差、终端全球导航卫星系统（GNSS）误差和下行同步误差，选择合适的随机接入信道（RACH）配置和接收窗口，以兼容不同终端前导码到达时间。

终端可根据卫星星历和自身GNSS位置估计径向相对速度v_r，并据此估算载波频率f_c下的多普勒频偏：

$$f_D \approx -\frac{f_c}{c} v_r \quad (2),$$

其中，c为光速，v_r为卫星与终端连线方向上的径向相对速度。在工程实现中，多普勒变化率可通过连续星历点差分或轨道预测模型估算，并用于上行频偏预补偿和接收侧跟踪环路配置。

链路可靠性增强技术主要包括大子载波间隔、重复传输、分集合并、解调参考信号（DMRS）Bundling及大规模相控阵等。较大的子载波间隔可提升系统对多普勒频偏的鲁棒性，但会缩短符号时长，进而对残余时延补偿与终端射频性能提出更高要求。重复传输通过时间分集获取信噪比增益，适用于低速率、远距离及弱覆盖场景。卫星侧大规模相控阵可借助数字波束形成获得较高天线增益，并支持多波束覆盖、波束指向调整与动态资源调度。相控阵能力不仅决定链路预算，也为后续跳波束、波束域多输入多输出（BMIMO）及多星协同奠定实现基础。

3.3 业务感知跳波束调度

当星座覆盖能力基本具备后，系统瓶颈将由覆盖不足转向容量分布失配。跳波束调度是覆盖型星座向容量型星座演进的关键技术，其本质在于依据业务空间分布动态调配有限波束资源，突破“一个波束长期对应一个波位”的静态映射约束，实现星上功率、带宽与波束资源在时空维度上的灵活复用和按需供给。

在6G NTN阶段，跳波束调度不应仅基于卫星侧资源状态进行优化，还应联合考虑地面网络负载、业务SLA、用户移动状态及多星可见性。当某区域地面网络拥塞或受灾失效时，卫星波束可临时增加驻留时间与功率分配；当区域业务稀疏时，则可降低照射频度，将资源转移至热点区域。

业务感知跳波束调度可分为感知层、决策层与执行层。感知层实时采集各波位的队列长度、业务类型、用户数量、信道质量、剩余覆盖时间、地面网络负载及移动性状态；决策层根据感知数据计算各波位服务优先级，综合权衡吞吐量、公平性、业务时延、用户移动性及区域保障需求；执行层将调度结果转化为波束指向、功率分配、频率复用与时隙配置，驱动相控阵天线完成波束跳变。

跳波束调度可抽象为多目标优化问题。假设同一时间卫星可空分的波束数量最大为K，整个卫星覆盖范围内一共U个终端，卫星上的小区数量为N，在小区$n \in N$内存在U_n个终端。针对终端u的不同业务请求$s \in S$，如速率、时延等，$m \in M$为业务s对应的具体QoS指标类型（如m=1表示速率，m=2表示时延等），则终端u实际达到的第m项QoS指标为$x_{u,s,m} \leqslant \overline{x_{u,s,m}}$。其中，$\overline{x_{u,s,m}}$代表3GPP标准协议规定的$s$类业务必须满足的QoS指标要求。

在卫星系统中，在给定的调度时间内，根据决策层的波束选择策略，存在J种可能的调度波束组合$\boldsymbol{F}=\{F_1,F_2,\cdots,F_j,\cdots,F_J\}$，每一种调度组合为波束激活矩阵$F_j=\left[f_j^1,\cdots f_j^n,\cdots,f_j^N\right]$，$f_j^n \in \{0,1\}$，$f_j^n$=1代表该波位被波束照亮，为该波位下的用户进行服务；反之则代表波位未被选中进行服务。在每个调度组合F_j内，还包含每个用户分配到的功率和频率，功率集合为$P_j=\left[P_{j,1},\cdots,P_{j,u},\cdots,P_{j,U}\right]$，频率集合为$B_j=\left[B_{j,1},\cdots,B_{j,u},\cdots,B_{j,U}\right]$。定义卫星到用户下行链路的载干噪比为$\mathrm{CNIR}_{k,u}$，使用效用函数$\mu(x_{u,s,m})$表征用户QoS指标的满足率，则可构建如下最大化整星吞吐量与用户满意度目标：

$$\begin{aligned}
&\max \mu\left(x_{u,s,m}\right) \times F_j \times \sum_{n=1}^{N} \sum_{u=1}^{U_n} \mathrm{B}_{j,u} \times \log_2(1+\mathrm{CNIR}_{k,u}) \\
&\text{s.t. } \mathrm{x}_{u,s,m} \leqslant \overline{\mathrm{x}_{u,s,m}},\ \forall u \in U,\ \forall s \in S, \\
&\sum_{u=1}^{U_j} P_{j,u} \leqslant P_{\mathrm{total}}, \\
&\sum_{n=1}^{N} f_j^n \leqslant K,\ j=1,2,\cdots,J,\ f_j^n \in \{0,1\}, \\
&\sum_{u \in U_n} B_{j,u} * f_j^n \leqslant B_{\mathrm{total}},\ n \in N
\end{aligned} \quad (3)。$$

约束条件包括QoS指标、总功率、总带宽及可同时激活波束数量等。该模型表明，跳波束调度并非单纯的波束点亮问题，而是涉及功率、频谱、时间、干扰与业务优先级的联

合优化问题。在工程实现中，需结合星上算力、信令开销与调度周期，选用适宜的近似算法，以避免复杂优化问题难以实时求解。

3.4 BMIMO与波束域资源池化

跳波束主要解决波束资源在时间维度上的动态分配问题。BMIMO则通过波束域与频域资源池化，提升多波位并发服务能力，是NTN由容量增强迈向频谱效率提升的重要技术，如图2所示。

BMIMO协同通常包括3个步骤。首先，进行波束域用户分组，即根据用户角度、地理位置、信道相关性及业务需求，将用户划分至不同波位或波束域资源集合。其次，进行波束间干扰抑制，将同频干扰较强的相邻波位映射至不同频域资源，或通过调度互斥降低干扰。最后，进行多波位联合传输，将业务需求较低或空间隔离较好的多个波位映射至同一波束域资源池，以提高资源利用率与频谱效率。

例如，若单星具备32个可调度波束，并将20 MHz频域资源划分为4个5 MHz子载波，则调度器可形成32×4个“波束–载波”资源单元，用于更细粒度地实现用户分组、频率复用与干扰协调。

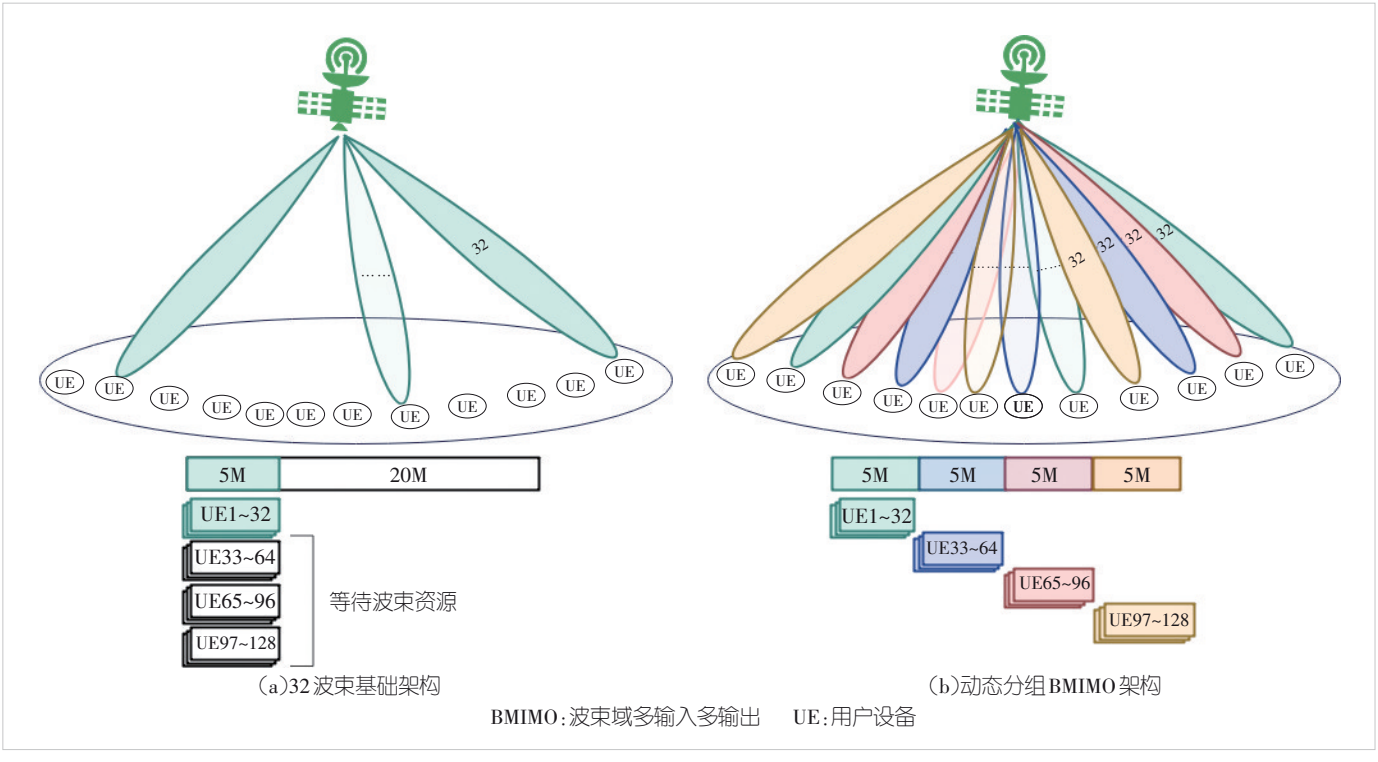
BMIMO面临的挑战主要包括星上数字处理复杂度高、信道状态信息获取困难、波束域预编码设计复杂、星载功耗受限以及实时调度算法复杂度较高等。面向6G，BMIMO需与跳波束、多星协同及AI调度相结合，形成跨时间、频率、空间与波束域的联合资源优化能力。

3.5 干扰管理与星地频谱协同

时频空维度的跳波束调度虽提升了资源利用率，但也引入了复杂的干扰问题，主要包括系统内同频干扰、系统间干扰及星地干扰，如图3所示。

系统内同频干扰源于相邻波束同时复用相同频率资源，可采用空间隔离、波束分簇、图着色、时隙互斥及功率控制等方法加以抑制。系统间干扰主要发生于低轨星座、高轨卫星与其他异构网络之间，可通过规避角约束、频率协调、旁瓣抑制及动态波束控制予以缓解。星地干扰则源于卫星波束与地面蜂窝网络之间的频谱共享，需借助星地频谱感知、动态频率复用及跨域干扰协调进行管理。卫星–地面融合网络中的频谱共享框架与资源管理已成为近期研究重点[15-16]。

随着NTN网络规模持续扩大，频谱资源将日趋紧张，星间与星地干扰的频谱协同将成为关键。接入网络与智能管理层需综合考虑区域业务负载、频谱使用状态、卫星仰角、波束方向及地面小区干扰水平，动态选择频率资源与发射功



(a)32波束基础架构　　(b)动态分组BMIMO架构

BMIMO：波束域多输入多输出　UE：用户设备

图2　BMIMO协同原理

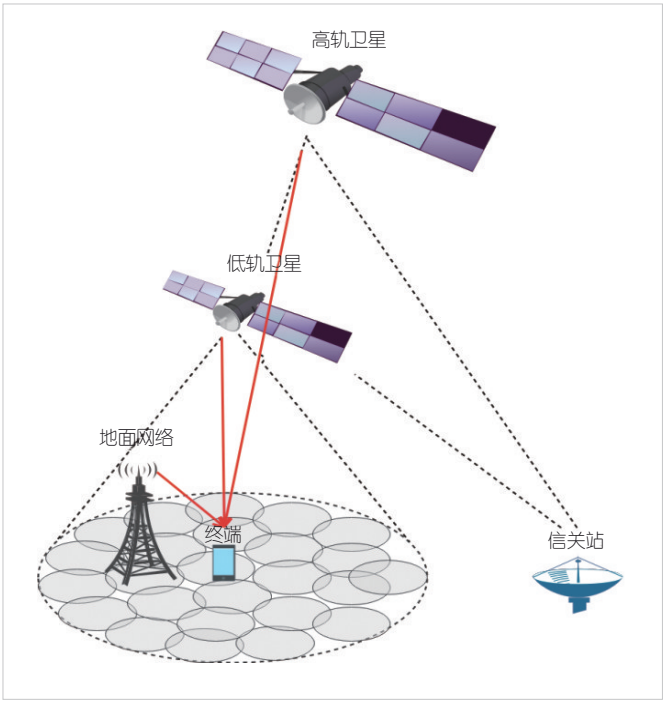


图3　多重网络覆盖下干扰示意图

率，从而在保障卫星覆盖的同时降低对地面网络的影响。

3.6 星历辅助的预测式切换

尽管LEO卫星高速运动，其轨道运行仍具有高度可预测性。图4展示了星间邻区关系。基于星历数据、波束指向模型及终端地理位置信息，网络侧或终端可提前计算未来一段时间内的可见卫星、覆盖窗口、仰角变化、多普勒趋势及

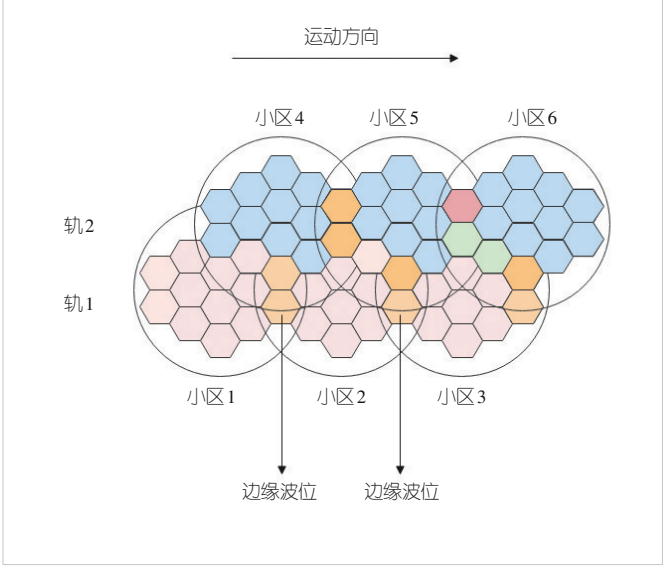


图4　星间邻区关系

候选切换目标。因此，NTN移动性管理不宜完全沿用地面网络“测量–上报–判决–执行”的被动流程，而应转向预测式移动性管理。网络可预先向终端下发候选卫星或候选波束列表及其对应触发条件。当终端进入特定地理围栏、到达预设协调世界时（UTC）时间窗口，或当前服务卫星的仰角降至设定阈值以下时，终端可自主执行预配置切换，而无需等待网络实时判决。

该机制的核心思想在于：NTN移动性管理并非在链路质量恶化后再触发切换，而是在链路恶化前即明确目标切换对象。借助星历辅助、条件切换与资源预配置，NTN可降低对实时信令的依赖，减少切换失败率并缩短业务中断时间。

3.7 多连接保障业务连续性

对于高可靠业务，当前NR–NTN单连接切换仍难以满足业务连续性要求。因此，6G NTN可采用多连接机制增强鲁棒性[17]。

一种典型方案是GEO/LEO双连接：GEO卫星覆盖范围广、服务关系稳定，可承载控制面连接、广播业务及广域低速业务；LEO卫星时延低、容量高，可承载高速用户面数据。当LEO卫星即将离开覆盖区域时，控制面可经由稳定链路提前完成切换准备，从而降低业务中断风险。

另一种方案是TN/NTN双连接：当用户位于地面网络边缘区域时，地面网络可承担主连接，NTN提供补充覆盖或备份链路；当地面网络不可用时，业务可切换至卫星链路。对于航空、航运、应急救援、低空飞行器及能源巡检等场景，多连接机制可显著提升业务连续性与网络韧性。

3.8 AI辅助与智能自治

面向6G NTN高动态、广覆盖、多域协同的网络特征，AI将成为提升NTN自治能力的核心使能技术。在空口侧，AI可辅助实现高精度信道估计、多普勒频移预测、波束智能跟踪及自适应调制编码选择，从而提升复杂空间信道环境下的传输可靠性与频谱效率[18]。在资源调度侧，AI可基于历史业务热力分布、用户移动轨迹、地面网络负载状态及卫星可见窗口时序，预测未来业务需求与资源缺口，并提前优化波束驻留时长、功率分配策略及多星协同服务模式。在移动性管理侧，AI可通过预判链路质量趋势确定最佳切换时机与目标接入链路，降低卫星过境切换导致的业务中断概率。

数字孪生技术为全局智能决策提供了仿真验证基础。通过在虚拟空间中实时映射卫星轨道运行状态、波束覆盖范围、空间链路质量、用户分布特征、业务负载水平及地面网络运行态势，网络可在真实配置下发前开展策略仿真评估、

潜在故障预演与参数迭代优化，进而有效提升网络自治决策的准确性与运维效率[19]。

考虑到星地链路传播时延、星上算力与功耗约束以及网络事件时间尺度差异等客观特征，6G NTN的智能管理架构需采用集中控制与分布自治相结合的分层设计。其中，星上节点承担本地快速自治功能，通过部署轻量化AI模型，实现波束动态调整、链路快速切换与本地故障隔离等高实时性操作；星座层承担区域协同管控功能，借助星间链路交互实现域内星间路由优化、区域负载均衡与多星资源联合调度；地面云网管理平台承担全局智能管控功能，依托充足算力与全量数据，负责全局策略生成、跨域资源编排、端到端业务保障及全域安全管理。

分层自治的核心目标在于，在保障全局优化方向一致性的前提下，最大化提升本地场景的实时响应能力。对于链路快速衰落、卫星过境切换、波束突发拥塞等短时高动态事件，由星上或边缘节点在预设策略框架内完成快速自治决策；对于跨区域容量调度、星地频谱资源协同编排、长期业务容量规划等大时间尺度全局优化问题，则由地面云平台结合数字孪生仿真系统完成全局最优求解与策略下发。

4 非均匀业务分布下的容量调度观察

4.1 仿真目的与仿真配置

本文仿真重点并非验证低轨星座能否覆盖目标区域，而是在星座覆盖能力基本具备的前提下，分析非均匀业务分布对星上波束资源利用率、单用户平均速率、单波束吞吐能力及资源分配公平性的影响。

明确这一区分具有重要意义。对于低轨星座而言，覆盖是网络建设的首要步骤，但覆盖并不等同于容量充足，亦不意味着业务体验可获得保障。某一区域即使处于卫星覆盖范围内，仍可能因波束数量有限、功率受限、频谱受限、馈电链路受限或用户过度集中，而难以提供稳定的业务体验。相反，在用户稀疏区域，网络虽具备覆盖能力，却可能出现波束资源长期空闲，导致整星资源利用率偏低[20–21]。

本文通过典型区域星座组网仿真，重点验证以下问题：

1） 在业务稀疏区域，低轨星座是否存在波束资源闲置？

2） 在业务热点区域，增加用户数是否能够提升波束利用率和区域吞吐能力？

3） 当热点用户数持续增长时，单用户平均速率是否会下降？

4）上述结果是否说明NTN需要从覆盖驱动转向业务感知调度、容量增强和星地融合协同？

从工程实现角度看，表4所示配置能够反映低轨星座的典型能力边界。600 km轨道高度可在覆盖范围与传播时延之间取得平衡；53°倾角适用于覆盖中低纬及部分中高纬区域；单星128波束表明星载相控阵具备一定的多波束并发服务能力，但仍受星上功率、频谱及处理能力制约。S/Ka频段组合可兼顾手机直连、低速接入与宽带链路，但需考虑降雨条件下的衰减影响。

4.2 典型区域场景设计

本文选取中国区域与巴西区域作为典型仿真场景。

中国区域业务空间分布非均匀性显著。东部沿海及城市群区域人口密度高、产业集中、业务需求旺盛，适用于分析热点区域容量竞争与业务感知调度问题；西部高原、山区、荒漠及海域等区域业务密度较低，适用于分析广域补盲与低密度区域资源利用问题。因此，中国场景主要用于验证低轨星座在热点容量增强与稀疏区域补盲之间的资源协调能力。

巴西区域主要位于低纬地区，兼具热带雨林、农业区、偏远内陆及海岸线等多种地理特征。该场景适用于分析低纬区域低轨星座可见性、热带降雨对Ka频段链路可用性的影响，以及沿海热点与内陆稀疏区域间的资源调度差异。因此，巴西场景主要用于验证低纬区域星座覆盖、链路可用性及波束资源利用效率。

表4 星座资源调度仿真参数配置

参数分类	参数项	取值或描述
星座参数	轨道高度，倾角，星数	600 km，53°，24轨×72星
载荷参数	频段，波束数	S/Ka频段，单星128波束
业务场景	用户分布	非均匀空间分布，包含热点区与稀疏区
链路模型	降雨模型	ITU-R P.618
调度策略	资源管理方式	业务感知跳波束调度
评价指标	资源与体验指标	波束利用率、波位流量、单波束吞吐、用户平均速率

ITU-R：国际电信联盟无线电通信部门

4.3 仿真结论：从覆盖型星座到业务感知网络

本节基于4.1节的仿真配置和4.2节的典型场景，分析非均匀业务分布下星上波束资源利用率和单用户速率的变化规律，主要结果如表5和图5所示。

表5给出了波位用户数与单用户平均速率之间的关系。在低负载波位，用户可独享波束资源，因此单用户平均速率较高。随着用户数增加，波束容量由多用户共享，单用户平均速率开始下降。当波位用户数超过900人时，单用户平均速率降至约1 Mbit/s，热点区域出现明显的容量竞争。若用户数进一步增长，单用户平均速率将低于业务保障要求，仅依靠单星波束调度已难以维持业务体验。

从波位内单用户平均流量的角度来看，上述趋势同样明显：当波位用户较少时，单用户平均流量可达数十Mbit/s量级，资源较为充裕。随着波位用户数增加至百人以上，波束容量由多用户共享，单用户平均流量迅速下降。当波位用户数接近1 000人时，单用户平均流量已降至约1 Mbit/s，并随用户数继续增加而进一步降低。

图5给出了单颗卫星波束利用率随波位负载的变化情况。在用户稀疏的波位（约1～32人），波束长期处于轻载状态，利用率约为25%，星上功率与频谱资源存在明显闲置；随着波位用户数增加，波束利用率快速上升，中等负载波位（约97～128人）的利用率约为52%，稠密波位（约257～288人）的利用率约为85%；当波位用户数达到700人以上时，波束利用率趋于饱和，约为95%，表明星上资源已接近承载上限。

从上述仿真结果可以得出以下3点结论：

第一，低轨星座建设能够提供广域覆盖能力，但广域覆盖并不必然带来高资源利用率。在用户稀疏区域，波束利用率不足25%，表明覆盖驱动型建网模式可能存在明显的资源闲置。

第二，业务热点可提升星上资源利用率和区域吞吐能力。当波位用户数超过200时，波束利用率可提升至90%以上，表明业务感知调度能够有效提高资源利用效率。

第三，业务热点也会引发容量竞争并导致用户体验下降。当波位用户数超过900时，单用户平均速率降至约1 Mbit/s，表明仅依靠单星波束调度难以长期保障热点区域的业务体验，需进一步引入BMIMO、多星协同、TN/NTN分流和确定性业务保障机制[19]。

因此，卫星互联网从大规模低轨星座建设阶段向星地融合阶段演进，并不是简单的架构升级，而是由业务承载矛盾驱动的必然趋势。大规模星座主要解决“覆盖有没有”的问题，而6G星地融合NTN还需进一步解决“容量够不够、资源用得好不好、业务能否保障”的问题。

5 工程挑战

尽管6G星地融合NTN前景广阔，但从规模商用和产业落地角度看，仍面临多方面挑战[22]：

1）频谱资源紧张，星地干扰协调复杂。卫星网络、地面蜂窝网络及其他无线系统之间需建立更精细的频率协调与干扰管理机制。尤其在星地共享频谱场景下，如何在保障卫星覆盖的同时降低对地面网络的影响，是未来网络规划与动态调度必须解决的问题。

2）终端能力与功耗受限。普通智能手机直连卫星面临天线增益低、发射功率有限、链路预算紧张和功耗敏感等问题，需在频段选择、协议设计、覆盖增强、功率控制策略和

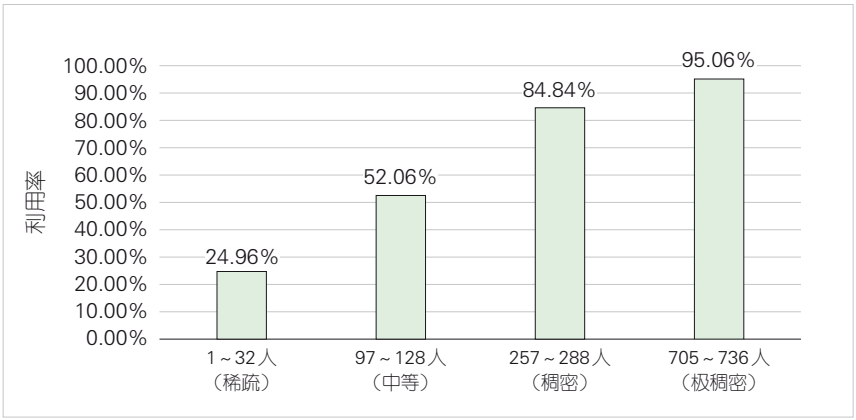


图5　单颗卫星波束利用率

表5　波位用户数与单用户平均速率关系

波位负载状态	用户规模	单用户平均速率变化	网络含义
低负载	用户数较少	单用户平均速率较高	资源充足但利用不足
中负载	用户数增加	单用户速率开始下降	容量开始被多用户共享
高负载	超过900人/波位	单用户平均速率约1 Mbit/s	热点容量竞争明显
极高负载	进一步增加	速率可能低于业务保障需求	需要多星协同和星地分流

终端功耗管理等方面进行系统优化。对于大众终端直连场景，终端生态成熟度将直接影响NTN商业化进程。

3）星上处理能力受限。再生载荷、星上路由、AI推理和动态波束调度会增加星上功耗、散热和计算复杂度。未来需在星载处理芯片、低功耗AI模型、轻量化协议栈和星上资源管理算法等方面持续突破。

4）多星协同实现难度高。多星MIMO、多星联合传输和分布式预编码需解决星间同步、信道状态信息（CSI）获取、星间链路容量和实时调度等问题。在高速动态拓扑下，如何以低开销实现多星资源协同，是从单星优化走向星座级优化的关键难题。

5）星地融合移动性管理复杂。未来网络需同时处理星间切换、波束切换、星地切换和多连接路径切换，对移动性管理提出更高要求。尤其在航空、航运、低空飞行器和高速交通等场景下，业务连续性保障需接入网、核心网与业务层协同实现。

6）标准体系和产业生态尚不成熟。6G NTN涉及卫星制造、终端芯片、运营商网络、核心网、频谱监管、国际协调和商业模式创新。只有标准、产业、监管和应用场景协同推进，NTN才能从技术可行走向规模可用。

7）商业闭环仍需探索。卫星网络建设和发射成本高，频谱、轨位、网关站和运维体系复杂。若仅依赖低密度补盲业务，商业回报可能不足。未来NTN需面向应急通信、航空航运、能源、低空经济、物联网、车联网和国家战略通信等多类场景，形成多元化商业模式。

6 总结与展望

本文围绕卫星互联网向6G星地融合NTN演进的趋势，分析了NTN的网络定位、标准化进展、总体架构、关键技术体系、容量调度仿真结果与工程挑战。总体来看，以低轨卫星星座为代表的卫星互联网已推动NTN从传统专用卫星通信迈向全球低时延宽带覆盖阶段；然而，随着星座覆盖能力逐步增强，系统主要矛盾正从“有没有覆盖”转向“容量是否充足、资源是否高效利用、业务体验能否保障”。

仿真结果表明：在用户稀疏的波位，波束利用率不足25%，说明以覆盖为导向的星座在低业务密度区域存在资源闲置；当波位用户数超过200时，波束利用率可提升至90%以上，说明业务热点能够显著提高资源利用率和区域吞吐能力；但当波位用户数超过900时，单用户平均速率降至约1 Mbit/s，说明热点区域存在明显的容量竞争。上述结果表明，覆盖能力并不等同于业务保障能力；低轨星座建设完成后，仍需进一步解决容量分布不均、资源调度不均衡和业务体验难以保障等问题。

面向6G，NTN需从覆盖驱动的星座建设模式，演进为业务感知、容量增强、确定性保障与星地融合协同的网络建设模式。具体而言，单星物理层增强解决“能否接入”的问题；跳波束与BMIMO解决“容量如何匹配业务分布”的问题；多星协同与星地负载均衡解决“热点容量如何扩展”的问题；预测式移动性与多连接解决“服务如何连续”的问题；AI辅助与数字孪生则为复杂星地融合网络提供智能编排与自治优化能力。

从产业发展看，6G NTN将推动通信网络从地面蜂窝基础设施向空天地一体化数字基础设施演进。未来，卫星网络、地面网络、核心网、算力平台与智能运维体系将不再是彼此割裂的系统，而是通过统一架构、统一调度和统一服务保障，形成融合网络能力。随着标准体系、终端生态、星上处理、星间链路、频谱协同和智能运维能力不断成熟，卫星互联网有望成为6G天地一体化网络的重要基础设施，为全球泛在连接、应急通信保障、行业数字化转型和国家战略通信能力建设提供坚实支撑。

致谢

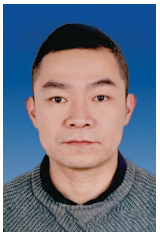
感谢中兴通讯股份有限公司蒙波、张欢庆、刘娜、曾召华等专家对本研究做出的贡献！

参考文献

[1] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021
[2] 徐晖, 陈山枝, 艾明. 面向6G的星地融合网络架构 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 9-15. DOI:10.12142/ZTETJ.202305003
[3] 瞿重希, 毛浩斌, 许憧, 等. 面向6G的星地融合网络频谱共享技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 50-56. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008
[4] Lei, J, Zhao, K, Hou, D, et al. Space network emulation system based on a user-space network stack [J]. ZTE communications, 2025, 31(2), 32-37
[5] 刘哲铭, 吴云飞, 魏肖, 等. 6G星地融合网络应用场景、架构与关键技术挑战 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(6): 1058-1064
[6] 3GPP TR 38.811: V15.4.0. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks [S]
[7] 3GPP TR 38.821: V16.2.0. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) [S]
[8] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems [EB/OL]. [2026-08-15]. https://www. itu. int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-12-201507-S!!PDF-E.pdf
[9] 3GPP. Non-terrestrial networks (NTN) overview [EB/OL]. [2026-08-15]. https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview
[10] Lin X Q, Rommer S, Euler S, et al. 5G from space: an overview of 3GPP non-terrestrial networks [J]. IEEE communications standards magazine, 2021, 5(4): 147-153. DOI: 10.1109/

MCOMSTD.011.2100038
[11] Azari M M, Solanki S, Chatzinotas S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(4): 2633-2672. DOI: 10.1109/COMST.2022.3199901
[12] Yuan S, Peng M G, Sun Y H. Satellite-terrestrial integrated fog networks: architecture, technologies, and challenges [PP/OL]. arXiv(2025-03-23) [2026-08-15]. https://arxiv. org/abs/2503.17912
[13] 章谦骅. 面向6G的天地一体去中心化网络架构 [J]. 天地一体化信息网络, 2025, 6(2): 57-64
[14] Feng W, Wang Y M, Chen Y F, et al. Structured satellite-UAV-terrestrial networks for 6G Internet of Things [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 48-54. DOI: 10.1109/MNET.2024.3380052
[15] Shang B D, Wang Z, Li X Y, et al. Spectrum sharing in satellite-terrestrial integrated networks: frameworks, approaches, and opportunities [J]. IEEE network, 2026, 40(4): 162-171. DOI: 10.1109/MNET.2025.3600150
[16] Wang F, Zhang S Y, Yang H T, et al. Non-terrestrial networking for 6G: evolution, opportunities, and future directions [J]. Engineering, 2025, 54: 56-68. DOI: 10.1016/j.eng.2025.05.013
[17] Li X Y, Shang B D. Advancing multi-connectivity in satellite-terrestrial integrated networks: architectures, challenges, and applications [J]. IEEE network, 2026, 40(1): 209-218. DOI: 10.1109/MNET.2025.3546646
[18] Mahboob S, Liu L J. Revolutionizing future connectivity: a contemporary survey on AI-empowered satellite-based non-terrestrial networks in 6G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2024, 26(2): 1279-1321. DOI: 10.1109/COMST.2023.3347145
[19] 陈新宇, 张强, 陆光辉. 天地一体网络场景下的数字孪生关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 51-58. DOI：10.12142/ZTETJ.202303010
[20] 王妮炜, 全子傲, 翟立君, 等. 6G空天地一体化多维立体网络容量分析方法 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 746-752
[21] 汪春霆. 卫星互联网技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2024: 10-97
[22] 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 等. 6G星地融合无线网络及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 42-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404007

作 者 简 介



施嵘，中兴通讯股份有限公司无线及算力研究院院长；研究方向为无线通信、智算等；主持国家级项目1个、企业级项目15个；2021年，获国家科学技术进步奖；发表论文3篇，申请专利3项。



张诗壮，中兴通讯股份有限公司无线及算力研究院副院长，教授级高工；主要研究方向为5G-A、NTN和6G等；主持并参与国家级重大科技项目多项；获国家科学技术进步奖特等奖1项、省部级科技进步奖多项。



周将运，中兴通讯股份有限公司算法部副部长；主要研究方向为6G、5G-A以及无蜂窝通信技术等；发表论文3篇，申请专利20余项。



李数林，中兴通讯股份有限公司算法部无线领域资深专家；主要研究方向为NTN、高铁移动通信、ATG等；申请专利15项。