

6G 非地面网络架构及关键技术概述

何世文^{1,2,3}, 姚晓燕¹, 安振宇², 彭丞佐³, 钱育蓉¹, 黄 伟⁴, 唐 清⁵

(1. 新疆大学软件学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111;

3. 中南大学计算机学院, 湖南 长沙 410083;

4. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601;

5. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘 要: 开展面向第六代无线通信系统的非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 架构及关键技术分析。首先, 系统性梳理 NTN 的基本概念, 包括其关键组成、部署场景、网络架构和面临的挑战。随后, 聚焦支撑 6G 网络中 NTN 发展的网络切片、智能反射面、动态频谱共享、人工智能赋能的通信网络自主优化、移动性管理、非正交多址接入技术。最后, 对 NTN 关键技术方法进行系统整理与分析, 并提出未来的研究方向与机遇。

关键词: 6G; 物联网; 卫星通信; NTN; 网络架构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025030

Overview of 6G Non-Terrestrial Network Architecture and Key Technologies

HE Shiwen^{1,2,3}, YAO Xiaoyan¹, AN Zhenyu², PENG Chengzuo³, QIAN Yurong¹, HUANG Wei⁴, TANG Qing⁵

1. School of Software, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2. Purple Mountain Laboratory, Nanjing 211111, China

3. School of Computer Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

4. School of Computer Science and Information Engineering, HeFei University of Technology, Hefei 230601, China

5. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen 518057, China

Abstract: Carry out the analysis of the architecture and key technologies of non-terrestrial network (NTN) for the sixth generation wireless communication system. First, Systematically sort out the basic concepts of NTN, including key components, deployment scenarios, network architecture and challenges. Subsequently, the review focus on network slicing, intelligent reflecting surface, dynamic spectrum sharing, AI-enabled autonomous optimization of communication network, mobility management, and non-orthogonal multiple access technology, which support the development of NTN for 6G network. Finally, based on the systematic organization and analysis of key technical approaches in NTN, future research directions and opportunities are proposed.

Keywords: 6G, Internet of things, satellite communications, NTN, network architecture

0 引言

当今全球, 特别是发达国家及我国大部分地区, 已

实现较为完善的地面网络 (terrestrial network, TN) 覆盖, 但在海洋、沙漠、森林等自然环境中, 以及自然灾害、战争等特殊场景下, 地面基础移动设施可能损毁,

收稿日期: 2025-06-11; 修回日期: 2025-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171474); 湖南省2025年度十大技术攻关项目 (No.2025QK1009); 中兴通讯产学研合作基金 (No. IA20241014013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.62171474), Top-Ten Technological Projects for Hunan Province in 2025(No.2025QK1009), ZTE Industry-University-Institute Cooperation Funds (No. IA20241014013)

传统地面基站难以覆盖。为解决上述问题^[1], 第三代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 开展了 6G 移动通信网络标准化研究与研发工作, 部分聚焦于非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 通信技术与 TN 通信技术的深度融合, 即空天地一体化通信。该技术通过卫星、无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV)、高空平台 (high altitude platform station, HAPS) 等非地面通信基础设施实现全球通信覆盖, 旨在推动 NTN 和 TN 通信在技术、标准、产业和应用层面的全方位融合^[2]。6G NTN 通信技术的持续发展, 不仅将扩大通信覆盖范围, 还将提升数据传输速率、降低通信时延、增强网络的可靠性和智能化水平, 具有广阔的市场和商业应用潜力, 能够为偏远地区、荒漠、海洋、天空等全域立体空间提供“泛在连接”, 支持大众手机、行业终端直连卫星等场景服务。

3GPP 等国际标准化组织一直在积极推进 6G NTN 通信技术的标准化工作, 以确保其全球兼容性和互操作性。自 2017 年 Rel-15 版本启动后, 3GPP 技术规范组 (technical specification groups, TSGs) 便开始了无线接入网 (radio access network, RAN) 和系统方面 (system aspects, SA) 的 NTN 通信技术研究。TR 38.811 技术报告对 NTN 通信研究工作进行了描述, 其主要聚焦于 NTN 部署场景和相关系统参数的定义, 并确定了新空口 (new radio, NR) 接口的关键影响区域^[3]。Rel-16 版本的 TR 38.821、TR 22.822 技术报告体现了 NTN 对 5G NR 技术的支持^[4-5], 包括将 5G 移动通信网络中的 NR 技术应用于包括卫星网络在内的非地面基础设施, 探讨 RAN 架构和相关接口协议的解决方案, 同时考虑将 NTN 接入组件集成到 5G 系统时, 需确定由此产生的新服务和需求对应的服务交付用例。在 Rel-17 阶段正式启动了 NTN 规范版本的制定, TR 36.763 技术报告重点研究了如何支持 NTN 中的窄带物联网 (narrow band Internet of things, NB-IoT) 和增强型机器类通信 (enhanced machine-type communication, eMTC), 这标志着 NTN 与 5G 融合发展的开端^[6]。Rel-18 的 TR 38.882 技术报告是物联网连接 (包括 NTN) 领域的一项关键进展, 将设备的覆盖范围扩展到地面以外, 并强调了为紧急服务等场景提供准确的用户设备 (user equipment, UE) 位置信息^[7]。在 Rel-19 之前的版本中, NTN 研究重点针对基于透明载荷的组网架构, 该架构下的信号处理等操作依赖于地面信关站的建设, 在很大程度上受地理位置限制。2024 年 2 月, 3GPP TSG RAN 会议上提出了一个新工作提案 RP-234078, 规定了对用于

进一步增强 NR 的 NTN 通信能力、扩展应用场景, 开展下行覆盖增强、上行容量/吞吐量提升等标准的制定, 以及进一步提升 IoT-NTN 场景性能、开展全基站为再生负载的存储转发架构设计与上行容量增强研究等。TR 22.865 技术报告基于星上再生模式, 增加对新 NTN 场景的相关研究^[8], 其在 Rel-16/17 已有 NTN 用例基础上, 进一步提出并细化无实时馈线的存储-转发数据回传、UE-卫星-UE 直连通信、卫星边缘计算/缓存等增强场景, 并给出相应的性能指标、功能需求与监管考量。国际电信联盟的未来网络研究组则聚焦于 5G/6G 的空天地一体化、固定网络-移动通信-卫星通信多接入融合等领域的标准化工作, 规范了星地融合网络卫星回传场景下的会话管理机制, 以确保卫星回传网络类型和服务质量等级更好匹配实际业务需求^[9]。与标准化工作同步, 卫星制造商、通信设备供应商、网络运营商和政策制定者也在紧密合作, 共同推动 NTN 通信技术的发展和应用^[10]。联发科发布的 6G NTN 通信技术白皮书中指出, 通过卫星和地面基站的兼容互补打造陆海空全地形、全空间的立体覆盖范围, 并成功商用全球第一组 5G 卫星物联网通信芯片, 展示了 5G 卫星宽频通信技术验证平台^[11]。华为提出基于低地球轨道 (low earth orbit, LEO)/超低地球轨道 (very low earth orbit, VLEO) 卫星的 6G NTN 通信概念, 强调蜂窝和卫星通信在物理层的完全一体化是 6G 时代实现 LEO/VLEO 卫星通信商业成功的关键。2024 年, 中国电信卫星公司等完成国内首次 6G 星地链路外场地面测试, 该测试基于 3GPP NTN 标准协议, 优化了低轨星间协同传输机制, 实现了终端侧高速率空口数据合并, 最高速率超过 1 Gbit/s^[12]。

NTN 关键技术扩展通信覆盖范围方面已取得突破性进展, 特别是在 TN 无法较好提供服务的场景中展现出其独特优势。但现有研究在 NTN 与 TN 深度融合、系统兼容性以及性能评估等方面仍存在不足。针对这一现状, 本文对 6G 移动通信系统中的 NTN 架构及其关键技术进行了整体性梳理: 首先描述包含空间段、地面段以及用户段的 NTN 三维架构标准模型, 阐述该模型在不同部署场景下的相关技术挑战; 继而重点分析网络切片、智能反射面、动态频谱共享等六大关键技术, 揭示其对天地一体化网络深度融合与全域无缝覆盖的支撑机制; 最后本文旨在构建一个较为全面的 NTN 技术发展分析框架, 为推动高可靠、低时延的全球通信网络构建提供思路。

1 非地面网络通信发展历程及研究现状

1.1 非地面网络发展历程

NTN通信技术的起源可追溯至20世纪60年代,历经几十年的发展,目前已取得突破性进步。1965年,国际卫星通信组织发射了世界上首颗通信卫星“Early Bird”,由此开启了卫星通信时代,其主要采用地球同步轨道卫星传输模拟信号。但受限于高时延和较小的传输带宽,卫星通信技术的应用仅局限于高需求场景。20世纪80年代,数字通信技术的引入提升了卫星通信网络容量。国际海事卫星组织Inmarsat系列卫星的成功商业化,为全球航运和航空业提供可靠的数据业务和移动通信服务。随着卫星通信技术的进一步发展,20世纪90年代后期,通过蜂窝卫星通信技术,卫星通信能够支持更高的数据传输率和更广泛的业务类型。进入21世纪后,先进的高容量宽带卫星通信技术和卫星星座组网技术使得卫星通信网络的容量和速率得到显著提升,推动其从窄带通信向宽带通信演进。2007年,Inmarsat推出Global Xpress卫星宽带服务,提供全球宽带互联网连接。与此同时,高空平台作为通信设备也进入发展阶段:以谷歌为代表的互联网公司开始探索通过平流层平台为偏远地区提供无线网络接入的可能性,2011年,谷歌启动Project Loon项目,旨在部署大量漂浮在平流层的气球,为用户提供无线通信服务。

随着NTN通信技术的不断进步,在5G移动通信网络标准化进程中,NTN通信网络与TN通信网络深度融合的概念被提出^[13],NTN通信网络也正进一步与无人

机、气球等其他非地面平台结合,以支持更多多样化的应用场景。自2020年Starlink正式投入商用以来,其凭借低轨卫星星座的独特优势,为偏远地区提供了高速、稳定的互联网接入服务^[14]。2025年,中国移动构建的5G网联UAV系统的核心技术是利用5G移动通信网络代替传统的自建通信链路,实现对UAV的超视距远程控制与实时的海量信息传输。这一方案的提出大幅提升了UAV的通信效率和灵活性,为UAV在复杂环境中的应用提供更便捷的技术支持。最近,在6G移动通信网络标准化进程中,TN与NTN通信网络的融合引起广泛关注,标准组织不断提出并采纳创新的网络架构设计。例如,为满足未来通信系统对即时性和多功能性的需求,标准组织3GPP提出了多项低时延操作优化方案。2022年,3GPP组织在Rel-17版本框架下特别设立专项工作组,致力于NTN通信技术的研究。如图1所示,该工作组规划了一条从5G融合到6G的标准化发展路线图:2025年,实现NTN与5G移动通信网络整合;预计到2030年,NTN通信技术将成为6G移动通信网络统一标准体系中的核心组成部分。

随着6G移动通信网络技术的快速发展,NTN作为6G的重要技术组成部分,正逐步从理论研究阶段过渡到实验验证和产业化应用阶段。近年来,国内外众多研究机构和企业已开展相关的实验验证工作。2024年,在欧洲的Hexa-X-II项目中,Ericsson等公司开发出6G的预标准化平台,验证了多星间链路与地面基站的协同工作,并提出了一个6G NTN通信架构,如图2所示。

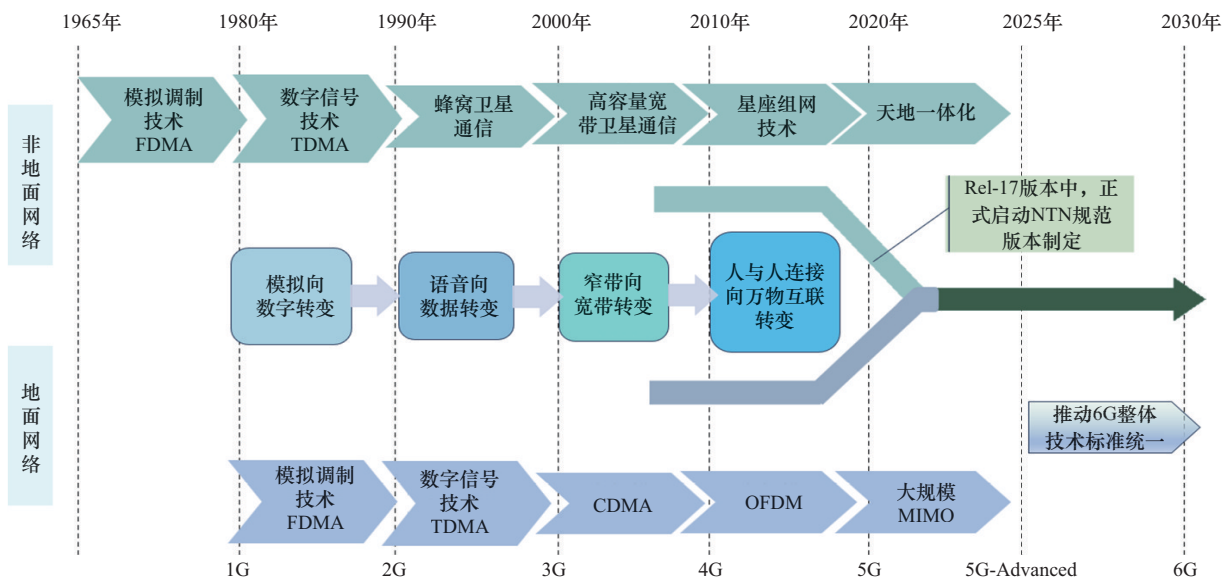


图1 3GPP TN-NTN演进趋势：构建统一融合接入网络

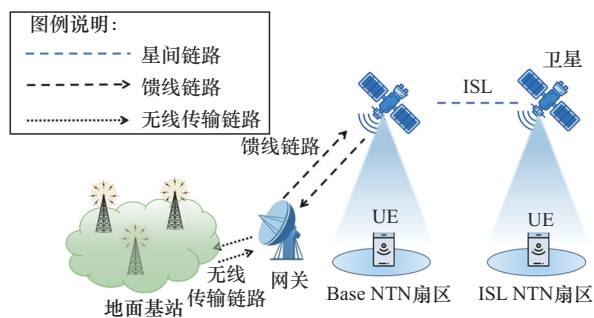


图2 6G NTN通信架构：支持地面或机载基地的多跳星间链路通信^[16]

同时，Hexa-X-II项目提出基于子网络的架构，该架构通过模块化的控制平面和管理网络实现灵活的网络部署，推动了6G NTN通信技术的商业化落地，如图3所示。2024年11月，中国电信研究院基于自主研发的NTN终端模拟器、基站和核心网原型样机，完成了面向低轨卫星的6G NTN原型样机测试，这为未来星地融合的商业化应用提供了技术支撑^[15]。此外，中兴通讯与中国移动研究院及Media Tek等公司合作，完成了手机直连低轨卫星NR-NTN实时语音技术的实验验证，标志着该实时语音技术在卫星通信领域的应用迈入新阶段。

1.2 非地面网络国内外研究现状

除标准化工作外，国内外学者对于NTN通信技术本身也开展了大量研究，主要聚焦于网络架构、应用部署、协同通信等关键内容。当前有关NTN通信技术研究的文献综述主要讨论NTN的概念与架构、使能技术及NTN的应用案例与场景三类。第1类文献重点研究NTN的概念、架构等问题：文献[17]概述3GPP在5G无线技术方向的演进以支持NTN方面的工作，并详细介绍NTN的基本概念、框架及标准化进展。文献[18]研究了NTN在5G中的

重要性以及在6G生态系统发展中的关键作用，包括NTN与TN集成的特征、服务和用例、架构和技术推动因素等。文献[19]在讨论6G及未来通信中多层NTN架构的潜力与挑战的基础上，提出了一个包含高空气球平台超级宏基站、配备智能反射面（intelligent reflecting surface, IRS）的无人机以及下一代多址接入技术的多层NTN架构，通过集成先进技术弥补路径传播损耗、提升网络性能。第2类文献侧重于使能技术的介绍：例如，文献[20]通过介绍人工智能（artificial intelligence, AI）对网络虚拟化的作用，提出了一个集成TN-NTN虚拟化的4级综合分类体系，并探讨如何通过软件定义网络（software defined network, SDN）、网络功能虚拟化（network function virtualization, NFV）和NS等虚拟化技术实现天地一体化网络的集成。文献[21]详细讨论NTN在物联网中的集成应用及其对未来物联网发展的潜在影响，特别关注了蜂窝网络、广域网和NTN在实现大规模、低时延、高可靠性等方面的关键技术和挑战。基于学术界和工业界的角度，文献[22]介绍了网络切片（network slicing, NS）、AI/ML和开放无线接入网络等NTN通信关键技术及其面临的技术挑战。第3类文献侧重于NTN的使用案例与场景：文献[23]探讨了NTN中的轨迹规划与用例，涵盖远洋船舶宽带、极地科考实时数据回传、无人机应急网络快速部署、偏远IoT传感、灾后蜂窝恢复以及手持终端直连卫星语音的六大场景。文献[24]提出基于LEO卫星与MEC的计算卸载场景，在远洋科考船、无人岛科研站等缺乏地面核心网的区域，能够实现边缘AI推理与数据预处理，以降低回传时延。文献[25]利用AI技术解决NTN面临的挑战、适用场景及潜在的研究方向。文献[26]探讨了当5G移动通信技术与卫星、HAPS和UAV等

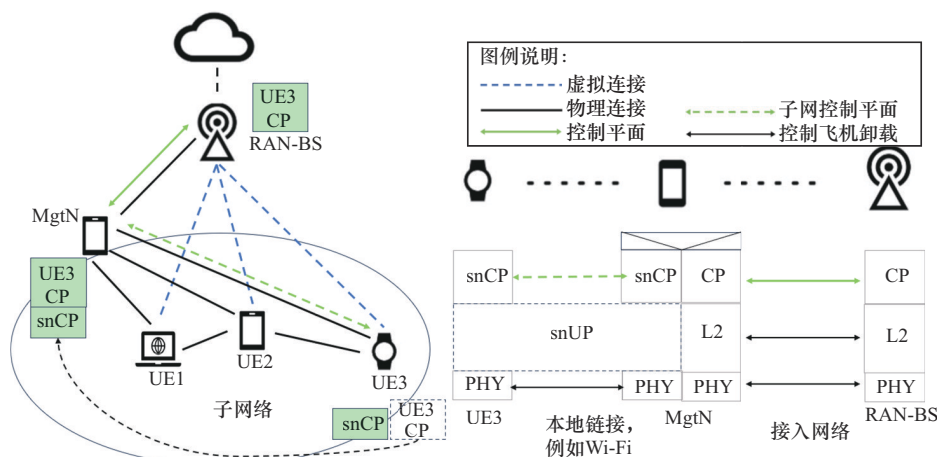


图3 子网架构：借助MgtN的子网控制平面^[16]

非地面组件集成时,信息时效性在海量物联网和增强型移动宽带等应用场景中的重要性。尽管当前文献综述从不同角度对NTN通信技术进行了总结与讨论,但却忽略了其与TN的兼容性以及对性能的影响和评估方面的概括与讨论。

本文从6G移动通信网络的NTN通信愿景出发,遵循网络架构、当前挑战及关键技术的总体思路进行展开,并结合现有重点研究成果对NTN近年的关键技术发展做进一步总结,探讨如何利用AI/ML、频谱资源管理等前沿技术,推动NTN智能化、自动化及其在6G中的垂直应用,实现更高效、可靠的全球通信覆盖。表1提供了本文与相关文献之间的详细内容比较。

表1 与相关文献的比较

文献	架构	应用场景	关键技术	AI/ML
[17]	√	√		
[18]	√	√		
[19]	√	√		
[20]		√	√	√
[21]			√	
[22]			√	√
[23]		√		
[24]		√		√
[25]		√		√
[26]	√	√	√	
本文	√	√	√	√

2 非地面网络基础概述

2.1 网络架构

5G移动通信网络中的NTN架构主要包括透明转发模式、再生模式、IoT-NTN模式和NR-NTN模式4种模式。这些模式涵盖了不同的技术方案和部署场景:透明转发模式和再生模式是卫星通信系统中的两种主要架构^[4],如图4和图5所示。IoT-NTN模式侧重于支持低复杂度的增强型机器类型通信和窄带物联网终端的卫星物联业务,主要应用于全球资产追踪等场景,借助卫星通信网络与地面5G移动通信网络的融合,提供无处不在的覆盖能力。NR-NTN模式采用5G移动通信网络中的NR框架实现智能手机直连卫星,提供低速率数据服务和语音服务,该模式适合构建To-B的全域物联网和To-C的应急通信网,具备显著的商业竞争优势。在Rel-17与Rel-18版本中,NTN的架构被限定为透明模式,即卫星仅作为一个简单的中继站,对信号进行频率转换和放大,不会对信

号进行任何处理或解码,且信号在地面站和用户设备之间直接传输。由于不对卫星进行复杂处理,系统设计和维护都相对简单。文献[27]认为,未来的3GPP迭代版本预期将采纳更先进的架构(如再生架构)。该架构赋予了卫星额外的处理功能,如路由决策、数据缓存和信号再生,因而在技术层面更复杂,但能够显著降低控制层面的时延并提升馈电链路(feeder link, FL)的效能。在透明转发架构中,由于地面接收器负责处理无线电频段的数据,因此需将整个频段数据通过FL传输至地面站点(并反向传输)。而在再生架构中,数据处理过程在卫星上完成,这表明仅需传输用户数据部分,从而在频谱效率与服务链路相等且平均小区负载达到50%的条件下,理论上可以节约一半的FL带宽,这使得在再生架构中单个FL能够支持的小区数量是透明架构的两倍。透明架构模式与再生架构模式虽均采用UE、卫星和地面站作为基本组成,但透明模式下的卫星仅作为信号中继的角色,不进行信号处理。而在再生架构模式下,卫星具备处理和可再生信号的能力,相当于一个星上基站。

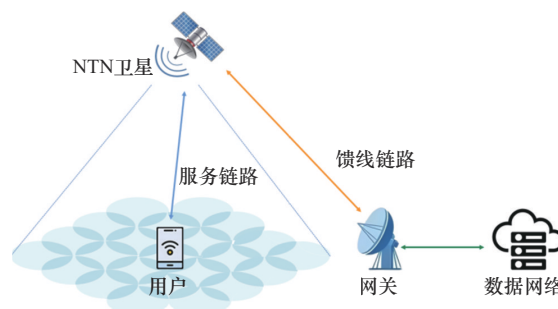


图4 基于透明转发的NTN^[3]

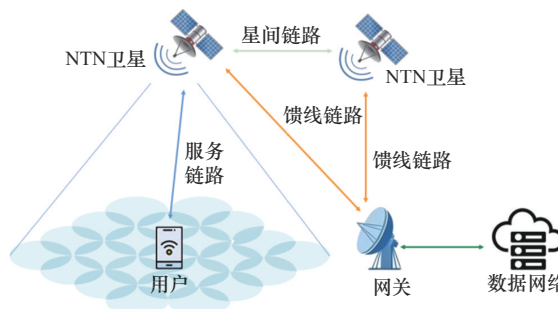


图5 基于再生架构的NTN^[3]

近年来,电信行业对开放式无线电接入网(open radio access network, O-RAN)架构的关注大幅提升^[28-30]。O-RAN支持集成多种无线接入技术,包括但不限于传统蜂窝网络,且NTN平台可作为O-RAN架构中的异构接入

点, 为地面网络中难以覆盖的地区提供持续连接服务。此外, O-RAN 架构的模块化设计特性允许网络组件灵活地进行部署与升级, 该特性可被 NTN 集成所利用, 从而根据需求快速调整网络配置, 例如在救灾工作或临时事件中迅速提供通信支持。考虑到空-天-地网络的独特性, 直接采用地面 O-RAN 的设计、组件、接口和控制器会面临诸多技术难题。首要挑战在于开发连接无线接入网络与空中控制中心的新控制/通信接口。从技术角度看, 其催生了对新型 O-RAN 智能控制器的需求, 控制器需具备对不同供应商网络资源进行自动化和智能化管理的能力。在集成 NTN 时, 该智能控制器可进一步扩展其功能, 涵盖对卫星网络资源的管理。在接口开放方面, O-RAN 通过开放前传接口并引入新型控制器和接口以增加灵活性, 但也提高了架构复杂性和安全风险。此外, O-RAN 硬件的白盒化设计也可能引起能耗及功能冗余性问题, 尽管无法完全消除, 但可以通过优化设计来缓解其对系统性能的负面影响。

随着 3GPP 等标准化组织的持续推进, 预计在 6G 时代将实现 TN 与 NTN 的全面融合, 并构建起一个立体化的三维网络体系, 进而超越仅将 NTN 作为 5G 通信技术补充的范畴。未来 NTN 的发展需要不断采纳创新的网络架构设计并针对低时延操作进行优化, 以满足未来通信系统中对即时性和多功能性的需求^[31]。2022 年, 3GPP 组织在 Rel-17 版本框架下设立了专项工作组, 其提出的 3D 无小区 (cell-free, CF) 架构被视为 6G 通信发展中的一项关键创新, 该架构的核心优势在于能够在多接入点或多天线的环境下消除传统的小区边界, 从而实现更高效的无干扰通信。该理念与分布式多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 或协同多点 (coordinated multiple points, CoMP) 传输类似, 但突破了小区边界的桎梏: 用户的接入点选择不再受限于传统蜂窝划分, 而可在更大范围内动态、无缝地进行协同服务^[32]。文献^[33]研究表明, 与传统的大规模 MIMO 网络相比, CF 通信技术具有明显性能优势, 特别是在 UAV 通信领域。近年来, 卫星基站数量大幅增多, 地面上的每个位置都会得到来自不同卫星的多个波束覆盖, 这使得 CF 卫星通信网络成为实现高吞吐量、高密度卫星通信系统的关键技术解决方案。为实现 CF 通信的空间复用, 该技术需要具备角分辨能力, 即利用接收阵列上的相位梯度差异区分来自多颗卫星的信号。得益于卫星的高度优势, 其可以从多个方向为地面上的特定小区域提供服务, 这些方向可以通过中等规模的阵列进行高效分辨。此外, 考虑到

卫星的高空位置, 其垂直空间的多层部署 (多层卫星或 UAV 网络) 为构建 3D 通信网络提供了可能, 同时也为通过幅度信息解析来自不同层次的信号提供了新的技术途径。

2025 年, 3GPP 在 TR23.700 技术报告中系统性探讨了卫星组件与 5G 架构的深度融合路径, 基于核心网网元划分提出了分层式网络架构, 包括用户平面功能网元、控制平面功能网元等, 并适用于不同卫星接入场景与模式的架构方案^[34]。在星上再生模式下, 核心网功能可部分或全部嵌入卫星载荷, 星载核心网功能实体承担会话管理和移动性管理等任务, 同时与地面核心网协同工作; 在透明转发模式下, 核心网网元主要部署在地面, 用户平面功能负责用户数据传输, 控制平面功能网元处理控制信息。为应对卫星通信中的高时延和链路不稳定性问题, NTN 借助专用网关 (gateway, GW) 作为卫星与地面核心网的接口以缓冲时延和优化数据传输, 同时对 IP 多媒体子系统的相关功能实体进行增强, 使其更好适应高时延场景下的语音服务与紧急呼叫需求。

2.2 非地面网络的关键组成

6G NTN 实体可划分为星载平台和机载平台两类, 二者通过协同组网共同构建 6G 通信网络非地面域的基础设施体系。如图 6 所示, 该基础设施系统具有多维度功能定位: 其一, 通过动态异构网络拓扑实现全球立体覆盖; 其二, 借助空间分集特性增强网络抗毁韧性; 其三, 依托泛在接入能力支撑新型垂直行业应用^[35]。随着 6G 通信系统向空天地海全域覆盖的纵深发展, 此类基础设施将呈现动态可重构的演进特征, 其系统复杂度与功能完备性将持续提升^[27]。

LEO 卫星: LEO 卫星部署在距地球表面 500~2 000 km 的轨道范围内, 具有较低的传输时延和能源消耗。因其轨道较低, 信号传输时延较小, 能够支持多跳数据传输。其链路预算相对于中高轨卫星较低, 对卫星和用户设备的规格要求也较低, 这使得小型化卫星和便携式用户终端的应用成为可能。然而, LEO 卫星的高速运动特性导致对单个用户可见的卫星从地平线升起到再次落下的时间相对较短, 这就要求卫星之间或不同载波之间需进行频繁切换, 增加了系统构建和维护的复杂性, 也使得建设和运营成本相对较高。

中地球轨道卫星 (medium earth orbit, MEO): MEO 卫星部署在距地球表面 2 000~20 000 km 的轨道范围内, 虽其传输时延较 LEO 卫星系统更长, 但能够提供更广阔的通信覆盖区域。MEO 卫星通信系统结合了同步地球轨

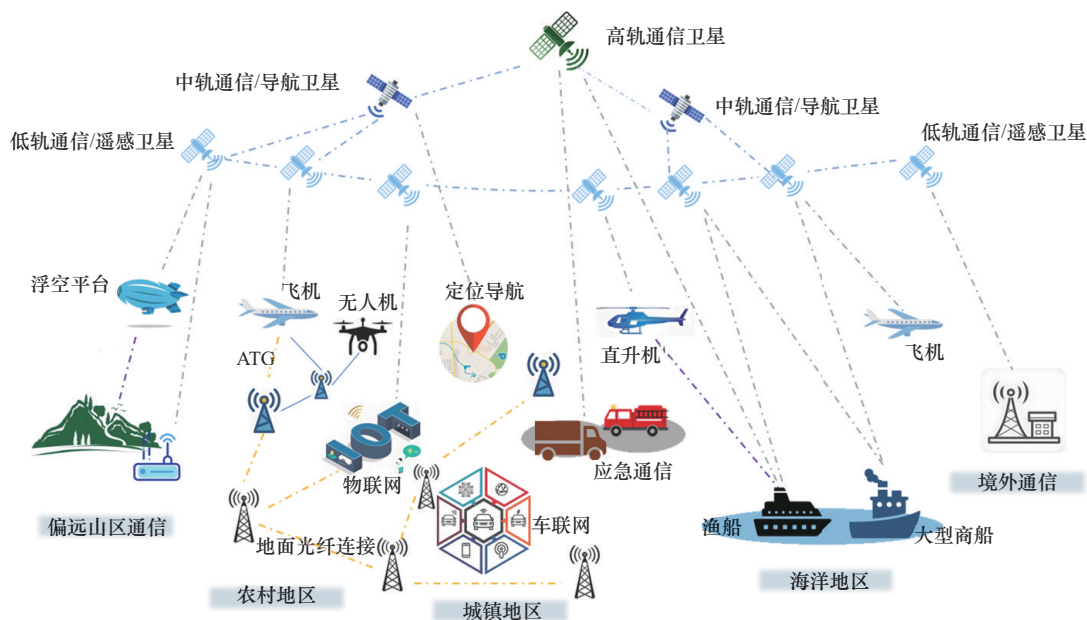


图6 NTN关键组成成分

道卫星（geostationary earth orbit, GEO）和LEO的优势，在一定程度上克服了两者的局限性。

同步地球轨道卫星：GEO卫星部署于距地球赤道上方35 800 km的轨道，自应用于通信领域以来便成为构建全球卫星通信网络的标准方案。然而，GEO卫星面临一些固有挑战，包括较高的传输时延和较大的信号衰减等，这些因素限制了其在移动通信领域的应用。GEO卫星通信系统主要用于甚小地球站卫星通信系统网络和电视信号传输等领域，而在个人通信领域的应用相对较少。

相较于卫星通信系统，NTN通信中成本效益较高的组成部分是机载平台，其设计和功能依据具体应用需求和搭载设备类型而定，主要包括高空平台和UAV。

HAPS系统：HAPS通过在平流层中的飞行器上部署通信基站实现，这些飞行器通常在距地面20~50 km的高度运行，包括固定翼飞机、高空气球或飞艇等。在通信领域，HAPS系统可作为传统地面基站的有效补充，特别是在需要快速部署的紧急通信场景或难以覆盖的偏远地区，其用途尤为关键^[36]。

UAV系统：UAV是一种经济高效的NTN平台。UAV的飞行路径可以预先规划或实时调整，从而提升移动网络的效率和性能。在预设路径规划的应用场景中，UAV按照设定的飞行路线行进，以满足预定的性能标准；而在实时路径规划的应用场景中，UAV能够根据环境情况实时动态调整飞行路线，以实现性能的最优化。

除上述两类机载平台外，NTN还包括以下地面组

件：UE和GW。UE是用户直接访问网络服务的设备或系统，通常在Ka频段或S频段进行通信。在透明载荷场景中，GW仅负责透明传输无线通信接口信号，不同的透明传输卫星均可连接至相同的地面5G移动通信网络基站；在再生载荷场景中，GW则充当通信和控制的核心枢纽，负责数据的收集和传输、执行控制系统的指令以及实现不同设备间的信息交换^[37]。

2.3 应用场景与关键挑战

近年来，非地面设施已被广泛应用于多个服务领域，包括无线通感融合、高频段无线传输、全球卫星网络覆盖以及泛在的IoT广播等，如图7所示。航空航天领域技术的进步为TN与NTN技术的深度融合铺平道路，并促进了更高级应用场景的实现，UAV、HAPS与卫星的集成进一步扩充了TN覆盖范围，为6G NTN通信提供了技术支持。然而，在NTN的应用与部署中，各种技术也面临着诸多挑战。下面将结合具体应用场景，探讨NTN面临的关键挑战及应对策略^[38-39]。

(1) 无线通感融合

IMT-2030提出的网络架构旨在为连接设备与未连接设备提供广泛的地理空间信息与实时的动态运动数据以及精准的环境感知能力。此外，该架构还需具备高精度定位和感知功能，涵盖距离测量、速度与角度估算、目标检测、精准定位、成像以及环境建模等关键功能。不同类型的NTN终端（如卫星、UAV、HAPS等）在多种应用场景中展现出不同的性能特征。以LEO卫星和UAV

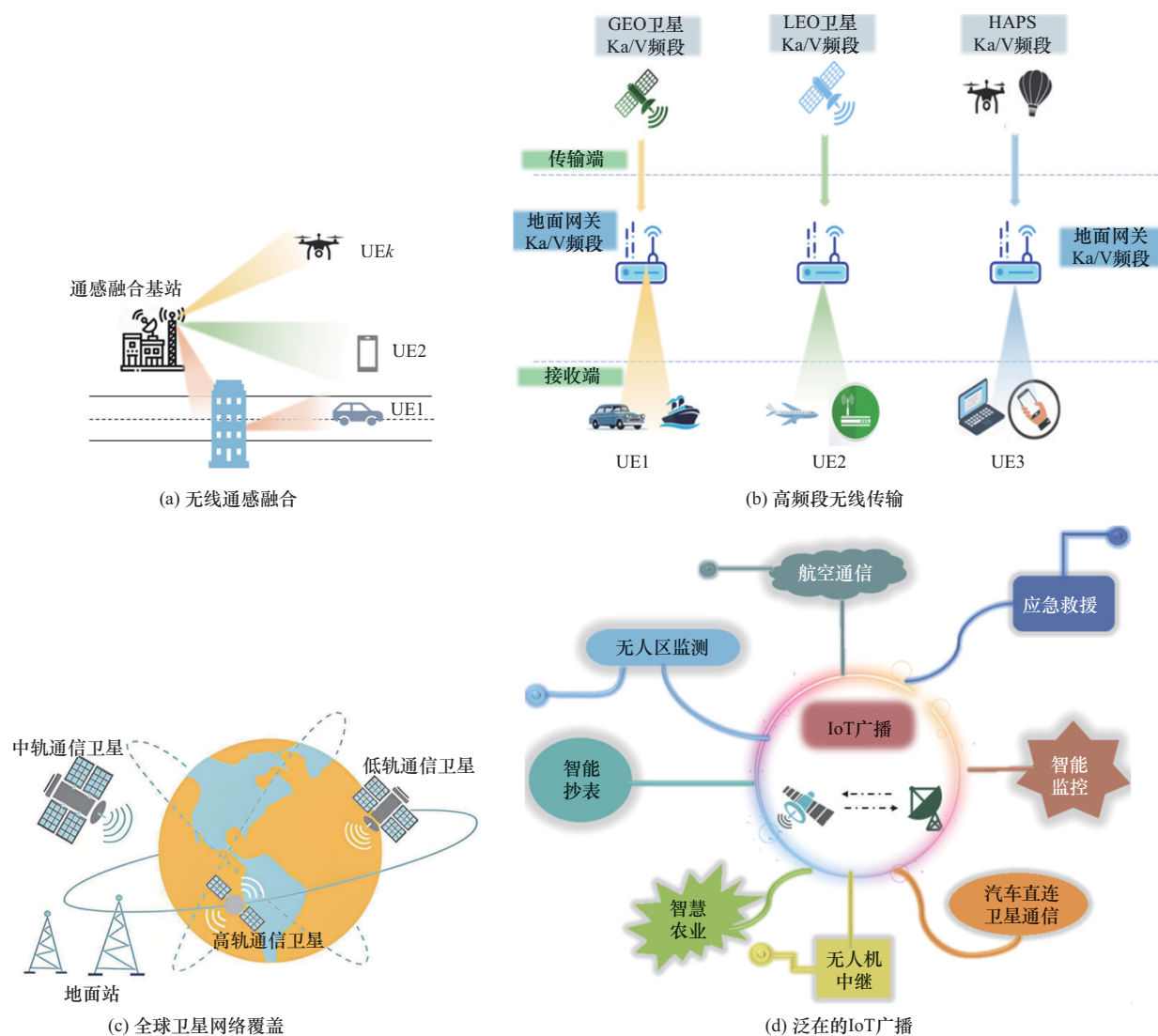


图7 应用和部署场景

为例，其在广域感知和高精度定位方面具有显著优势，但在多径传播环境中或恶劣气象条件下，信号质量和稳定性可能受到一定影响，且LEO卫星的高移动性可能会在通信链路中引入显著的多普勒效应。假设通信链路高度为600 km，载波频率为2 GHz，多普勒频移峰值可达48 kHz，大约是高速列车的10倍。因此，多普勒频移成为一个亟待改善的关键性能指标^[22]。利用非正交多址接入（non-orthogonal multiple access, NOMA）等关键技术可以有效改善多普勒频移产生的影响，其通过为高速移动的终端进行非正交的更多功率分配，补偿频移带来的信号损失，以保持通信的质量。

(2) 高频段无线传输

毫米波技术凭借其高带宽、高速率、低时延、灵活

部署、高安全性和精细感知等特性，已成为满足垂直行业专网以及热点区域需求的理想选择。但在NTN中，毫米波通信的性能可能因天线设计、波束成形技术和传播环境的不同而有所差异。一方面，部署于无人机或气球平台的毫米波终端，虽能够支持高带宽应用，但传播损耗较大。此外，高频段信号的穿透能力易受建筑物等障碍物的影响，从而导致覆盖范围受限。另一方面，部署于卫星平台的毫米波终端，无线信号在传输过程中会受到较强衰减，尤其是当信号穿越大气层时，水蒸气和氧气等因素可能会导致信号具有低信噪比的特性，使得信号质量下降并提高误码率，进一步影响数据传输的可靠性与速率。上述挑战在复杂的城市环境中尤为明显，为解决这一问题，可能需要更多的中继节点或小型基站扩

展覆盖范围以达到通信目标,逐步提升其在大数据传输和高清实时视频等场景中的应用潜力。

(3) 全球卫星网络覆盖

随着地面设施之间距离的不断延伸,利用光纤进行直接连接的成本可能会显著上升。在此背景下,由卫星星座构建的空间网状网络成为一种更具成本效益的替代方案。通过星间链路相连的卫星能够有效中继用户信号,从而为地面终端提供高带宽的接入服务。LEO卫星和MEO卫星因其较低的传输时延和广泛的覆盖范围,成为构建全球通信网络的理想选择。其中,LEO卫星尤其适合为移动用户以及偏远地区用户提供通信服务,但其轨道管理和卫星维护工作相对复杂,可能直接影响用户的通信体验,在通信资源有限的情况下,这一问题尤为关键。此外,卫星网络覆盖范围较大,可能超过一个公共陆地移动网络或一个国家的范围,这对广域覆盖管理场景下的跨网络漫游及跨国鉴权与计费等问题提出了一些挑战。同时,NTN平台的移动性导致大量终端产生的会话在短时间内频繁切换,这对会话的服务质量也提出了更高要求。

(4) 泛在的IoT广播

IoT广播技术利用其广泛的地理覆盖范围和空中/空间平台的强大广播能力,能够向大量用户设备高效分发多媒体内容,主要适用于TN覆盖范围及之外的区域,例如航空器、轮船等移动设备的应用场景中。UAV和卫星可以作为物联网数据的移动汇聚节点,为全球范围内基于传感器的应用提供持续服务。然而,在不同应用场景中的性能表现可能会受信号强度、网络架构和数据流量等多种因素制约,进而影响通信服务质量。随着物联网设备数量的急剧增加,NTN平台通常面临着带宽的限制,特别是在远距离的卫星网络中。如何有效地为逐步增多的IoT设备提供服务并确保网络连接的稳定性,仍然是当前面临的一个关键挑战。利用AI/ML技术实现智能化的网络管理和资源调度,可确保带宽、时延和负载的最优平衡。例如,当某个区域的网络流量突然增加时,系统可自动识别并进行资源调度和分配,确保不出现拥堵现象。此外,AI/ML技术能根据不同应用场景如应急救援、航空通信、无人区检测等的特殊需求,动态调整宽带分配,提升网络资源的使用效率。

3 非地面网络通信关键技术

本节将讨论NTN的六大关键技术,包括网络切片、智能反射面、动态频谱共享(dynamic spectrum sharing,

DSS)、人工智能赋能通信网络、移动性管理以及非正交多址接入技术。这些技术使得设备能够在卫星网络与蜂窝网络之间进行无缝切换,从而推动卫星通信服务从学术研究走向标准化及商业应用,为用户提供持续的连接体验。

3.1 网络切片

2015年,下一代移动网络联盟在“5G移动通信网络”的白皮书中首次提出了NS的概念^[40],即在共享的物理基础设施上部署多个虚拟网络,NS使得每个网络都能够根据特定服务需求进行相应优化。2020年,3GPP在Rel-14阶段的TR 22.864^[41]报告中首次提出了NS的需求,为其后续标准化奠定了基础。在Rel-15阶段,NS的相关概念及技术方案被正式纳入TS 23.501^[42]标准中。进入Rel-16阶段后,TS 28.530^[43]报告对NS的编排管理及相关要求进行了详细阐述,并进一步优化了NS的管理机制,提升了用户体验。在Rel-17版本中,3GPP针对GSMA NG.116中定义的NS属性展开了深入研究,致力于实现更细粒度的切片管理,并在安全性和可靠性方面对其进行改进,推动NS技术向更高性能、更高质量的方向发展。与此同时,欧洲电信标准协会也在积极参与NS技术的研究工作,提出端到端NS的参考框架及信息模型,为NS的跨域管理和编排提供了重要理论指导,有助于实现NS在不同网络域之间的无缝协同与高效管理。NS使得运营商能够根据不同场景的性能需求,构建定制化的网络解决方案^[44],包括资源分配、服务质量保证和特定网络功能,从而灵活且迅速地提供多样化的服务。在文献[45]中,提出一种基于模型的优化方法以解决运营商在网络中的长期回报最大化问题。但随着网络规模的扩大,传统的优化技术已难以应对当前网络切片所带来的复杂挑战。文献[46]基于AI技术,将原始问题转化为马尔可夫决策过程,并应用深度强化学习解决网络切片带来的挑战。

NS的实现涉及多项技术的综合运用,包括软件定义网络、网络功能虚拟化以及网络编排技术。SDN通过分离网络设备的控制层面和数据转发层面,并使得控制层面可编程,以实现网络的动态配置和管理,从而提升了网络的性能和灵活性^[47]。NFV通过将网络服务与资源(如防火墙、路由器和负载均衡器等)进行虚拟化^[48],为网络运营商提供硬件与软件解耦、网络功能灵活部署以及资源动态扩展等服务^[49]。网络编排技术则通过自动化规则动态地控制和编程网络,确保服务满足既定的服务级别协议(service level agreement, SLA)。在当前众多研

究中，UAV 被广泛视为扩展 TN 至空中平台的关键工具之一，集成的 UAV-TN 架构便利用 NS 技术增强网络的可靠性、安全性，并提升其能源效率^[50]。文献[51]提出一种基于 UAV 通信的 NS Air Slice 框架，该框架遵循 3GPP 的标准化流程，根据 QoS 机制对流量进行区分，并在实际环境中验证其能够提供高可靠、低时延的通信服务。

凭借可扩展性、确保安全隐私及提高服务质量等特点，NS 技术正逐渐成为应对 NTN 领域诸多难题的有力工具之一。2024 年，中国电信研究院在 IMT-2030(6G)推进组的指导下，借助自主研发的 NTN 终端模拟器、基站和核心网原型样机，测试了 NS 技术对多样化业务场景的支持，为星地融合研究提供了先行的实践依据。在 NTN 环境中，卫星平台可以通过虚拟化手段实现资源和功能的灵活分配以适应多种服务需求，这与传统网络组件的虚拟化理念相一致。同时，也有助于缓解卫星星座建设中的高成本和传输时延问题，通过为不同服务构建定制化的网络环境，优化资源利用。基于 NS 技术，文献[52]提出一种“卫星切片即服务”（satellite slicing as a service, SSAS）框架，其在卫星网络内部实现切片化。该研究还提供了一套系统化方法创建和管理切片，并为如何将这此切片用作传输网络提供指导。为支持高度智能化和开放性的互联环境，文献[53]提出一种基于深度强化学习的确定性网络切片实例策略模型，旨在提升资源分配效率和数据速率，并有效减少切片实例的平均队列等待时间。随着卫星星座规模不断扩大，资源管理也变得愈加复杂，文献[54]提出一种基于超密集低地球轨道卫星网络分组与聚类的可重构 RAN 切片架构，旨在使切片的资源利用率、服务水平协议满意度和重配置效益最大化。文献[55]构建出一个自维持的 RAN 切片框架，通过整合多层次网络资源的自主管理、切片管理性能的自我优化能力以及自我学习能力，实现在不可预测网络环境下的动态自适应控制策略。文献[56]指出星地一体化网络的异构性给网络资源访问控制带来诸多挑战。为确保用户能够安全高效地跨多个管理域进行访问服务，提出一种基于分片许可区块链的网络切片访问认证和服务授权方案。随着 NTN 技术的不断发展，NS 将在未来的通信网络中发挥更

加重要的作用，并辅助 NTN 适应不断变化的市场需求，提供更加个性化与差异化的服务。表 2 提供了当前几种 NS 架构的对比。

3.2 智能反射面

通过在平面上集成大量低成本的无源反射元件，IRS 能够对无线信号进行智能反射，重新配置无线传播环境，从而提高无线通信网络的性能^[57]。近年来，研究人员聚焦于开发更高效的算法以联合优化 IRS 的反射系数和基站的波束成形矩阵。通过适当调整波束形成方向，IRS 反射的信号可与其他路径信号进行叠加，既能增强接收机处的期望信号功率，也能消除同信道干扰等非期望信号。IRS 的引入使得 NTN 能够更高效地利用有限的频谱资源，同时为不同的用户提供定制化服务，满足 5G 及未来 6G 网络对高数据率、低时延和高连接密度的需求^[58]，为实现智能可编程无线环境提供了新的解决方案。目前，部分研究致力于在地面环境中部署 IRS，但该部署策略可能会遇到一些挑战，包括选址困难、服务覆盖范围受限以及在城市环境中可能产生非期望信号等问题。为克服上述地面部署的局限性，研究者开始探索在空中 UAV 部署 IRS，通过与地面用户建立直接的视距通信链路，从而减少信号传输过程中的功率损耗。但 UAV 通常只能承载有限的有效载荷，这限制了其携带大型射频收发设备的能力；此外，主动节点（如基站/中继器等）的能耗较高，可能会缩短 UAV 的续航能力和使用寿命。采用被动的红外辐射系统作为 UAV 上的 IRS，则可以在一定程度上节省能源。文献[59]探讨了 IRS 与 NTN 融合的可行性，特别是在支持 6G IoT 的应用方面，该方案具备提高空间分辨率、减少空中信号处理复杂度、改善自适应覆盖并增强信息安全等特性。文献[60-61]详尽分析了 IRS 集成于 NTN 时能耗降低与能效提升的策略。进一步地，文献[62-63]报告了 IRS 集成于 NTN 时在提升系统总吞吐量方面的显著增益，该系统还被证明具备加强无线通信安全性的潜力。与仅反射入射信号的传统 IRS 不同，能够同时进行传输和反射的智能反射面（simultaneously transmitting and reflecting-intelligent reflecting surface, STAR-IRS）打破了对发射器和接收器位置的限制，能够实现在整个区域的

表 2 不同 NS 架构的对比

文献编号	架构特点	使能技术	QoS 需求
[53]	多层次	SDN、NFV、DRL	时延敏感、对数据传输速率要求低
[54]	分组和聚类	DRL、多离散掩码近端优化	对数据传输的完整性要求高
[55]	自持续的 RAN 切片框架	SDN、NFV、AI	异构并发配置
[56]	快速跨域认证	哈希函数、可编辑区块链	高时延、要求强大的错误恢复能力和安全性保障

信号覆盖。文献[64]通过联合优化BS处的发射波束成形,以及STAR-IRS处的发射与反射系数,提出一种高效的迭代交替优化方法,以降低目标函数和众多耦合变量的计算复杂度,同时扩大接收器的放置范围。文献[65-66]针对莱斯衰落信道上STAR-RIS辅助的NOMA网络性能展开研究,其中基站发送的入射信号分别被传输和反射给附近和远处的UE。结果表明,STAR-IRS辅助的NOMA网络在中断概率和遍历速率方面明显优于STAR-IRS辅助的正交多址方法,具体见表3。

3.3 动态频谱共享

随着频谱资源的日益紧张,传统的静态频谱分配方式逐渐暴露出其局限性,制约了无线通信领域进一步发展。这种分配模式将特定频段固定分配给特定用户,实行排他性的使用权,即禁止未授权用户接入未被使用的频段,导致频谱资源在某些时间和区域产生闲置,也使得整体频谱使用效率较低。DSS技术通过频谱监测、管理和动态共享等功能,可实现对空闲频谱的高效利用。2020年,索尼公司宣布成功研发DSS技术,实现了在秒级时间内快速完成频谱的分配和控制,相较于以往数小时甚至数天的频谱管理方式,其效率提升了数个量级。该技术通过集中式数据库系统对射频资源进行统一管理,不仅提高了管理效率,同时确保了在这一过程中不会对现有网络传输造成干扰。2025年5月,Space X“星链”计划已部署的卫星数量接近7 500颗,导致近地轨道拥挤。动态频谱共享需要协调相同频段卫星的干扰时延问题,但LEO卫星过顶时间较短(如“星链”卫星为3~5分钟),使得实时共享算法面临误差率上升等诸多挑战。

当无法获取新的频率资源时,实现与TN的和谐共存就变得至关重要。在平台高度较低的情况下,DSS要求

多个系统或服务在相同频段内共享频谱,与TN的相互干扰便显著增加。文献[67]提出了一种在5G及未来通信系统中NTN与TN之间的集中式协调动态频谱共享策略,旨在通过频谱管理服务器保护主要地面网络(primary terrestrial networks, PTN)的同时,为NTN提供足够的频谱资源。文献[68]介绍4种频谱共享框架,并讨论了频谱共享在多层级NTN/TN、多连接合作星地一体化网络、多址接入认知频谱共享及不同卫星星座中的应用前景。文献[69]针对终端分布不均匀场景,设计分布式/集中式基站策略,并结合3种DSS模式(包括正交/非正交/速率分割多址),旨在提升有限频谱限制下的接入灵活性。文献[70]聚焦于6G中TN与NTN之间的频谱共享机制及其可行性,在不同频谱共享场景下,通过仿真评估正常配对和反向配对两种方法的性能,并指出反向配对在减少干扰方面表现更优。未来,DSS技术将继续扩展至新兴频段,如毫米波和太赫兹频段。其中,太赫兹波段具有极高的频谱容量,但其传播特性复杂,且频谱资源有限。DSS技术可以有效管理和利用这些频谱资源,通过实时频谱感知和智能频谱决策机制,动态地分配频谱资源以提升整体的频谱利用效率。

3.4 人工智能赋能通信网络

在无线通信网络领域,AI/ML技术正逐渐成为提升通信性能的重要工具,并为NTN克服传统方法难以应对的严峻挑战提供了重要技术支持^[71]:其主要通过处理多元数据、预测网络行为等方法适应不断变化的环境,以增强NTN的性能表现^[72-73]。此外,该技术通过深度分析与自主化决策支持,可进一步提升NTN的运行效率和鲁棒性。SpaceX的“星链”(Starlink)计划提出利用大量LEO卫星构建全球通信网络,在该项目中,AI技术已广

表3 IRS集成于NTN不同方面的性能分析

文献编号	性能分析方法	主要性能指标	结论
[60-61]	交替优化方案	传输功率、安全速率	通过优化波束成形和IRS反射系数提升性能
[62-63]	分层聚类算法、两层交替优化算法	加权和速率	在不同的网络场景下均能取得较好的性能增益
[64-66]	STAR-IRS辅助模型	平均速率	凸显出相较于传统IRS的性能提升

表4 DSS集成于NTN的方法分析

文献编号	方法	框架	性能分析
[67]	提出集中式方案	集中式DSS方案	通过系统模拟评估该方案在TN和低地球轨道卫星场景中的性能
[68]	提出新颖的动态频谱共享方法,主要适用于GEO卫星和LEO卫星网络	4种频谱共享框架	系统容量
[69]	分布式/集中式基站策略	与3种DSS模式融合	最大/最小速率
[70]	正向/反向配对	两种频谱共享配置	信噪比性能

泛应用于卫星的轨道管理、信号处理和网络运维等方面。华为在 NTN 领域也开展了大量研究工作：一方面，基于 AI 的智能轨道管理技术，对卫星轨道进行精准预测和优化；另一方面，提出智能信号处理算法，提高了信号的抗干扰能力和传输效率。下一代无线网络的多维复杂结构为传统通信网络带来了额外的挑战，使得实际网络问题的解决变得更加困难，而 AI/ML 技术能够有效应对上述挑战，并为其提供新的解决思路。

以深度神经网络 (deep neural networks, DNN) 为代表的 AI/ML 技术在图像识别、游戏策略优化和语言理解等多个方面已取得突破性成就。其中，深度学习 (deep learning, DL) 技术，特别是卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 与循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 等在处理 NTN 中的非线性效应和信道退化问题方面表现出极高效率。这些先进技术能够识别并纠正信道中的复杂干扰，从而提高信号传输质量和网络整体性能。通过集成 AI/ML 技术，NTN 能够实现更智能化的网络管理，提高网络的适应性和可靠性，从而满足未来通信网络对高速率、低时延和高连接密度的需求。文献[74]探讨了 DL 技术在基于 NTN 的工业物联网 (industrial Internet of things, IIoT) 服务中的应用前景，涵盖星载和机载智能 IIoT 系统；该研究还阐述了如何依据特定优化目标、可利用能源以及处理能力，对适用于 NTN 驱动的 IIoT 系统的多种 DL 算法进行评估和应用。文献[75]则探究了多种基于 ML 和 DL 的优化技术，其专注于提升路由策略的更新效率和效果。文献[76]研究了自主优化资源分配、智能路由与切换、自主网络操作和有效频谱管理的作用，为 NTN 提供了独立决策能力，从而提高整体网络效率，并促进最佳频谱分配。文献[77]全面分析了 UAV-NTN 中无人自主智能系统在定位、导航、感知、决策和运动规划等方面的应用及相关挑战，并采用分布式计算架构来完成计算密集型任务和大量数据卸载工作。

3.5 移动性管理

在 NTN 平台高速移动和覆盖范围快速变化的场景中，

移动性管理技术确保了通信连续性和无缝切换。如 NTN 终端 (卫星、HAPS 与 UAV 等) 与用户终端之间的相对高速运动引起的服务连续性问题，需采用高效的移动性管理技术加以解决。此外，NTN 的广域覆盖特性意味着终端可能分布在广阔的地理区域，这会导致信号质量、传播时延和连接稳定性发生一定变化，因此，高效的移动性管理方法对于确保所有终端都能获得一致的服务体验至关重要。3GPP 正在积极推进 NTN 的标准化工作，制定了一系列关于移动性管理的协议和规范。在 Rel-17 阶段定义了卫星网络与 TN 之间的互操作性架构，为 UE 的移动性管理提供标准化支持^[13]。2024 年，3GPP 完成 Rel-18 的初步工作，进一步完善了 NTN 中的移动性管理协议，支持 UE 在多种 NTN 之间的无缝切换和高效管理^[41]。SpaceX 的 Starlink 项目也在全球范围内开展大规模的 LEO 卫星网络实验，重点研究了 UE 在 LEO 卫星网络的移动性管理问题，包括接入、切换和位置跟踪等^[14]。为实现天地一体化信息网络和 6G 愿景中的“泛在连接”，移动性管理技术必须能够支持全球全域随时接入和万物互联。

在 6G 移动通信网络时代，NTN 与 TN 的融合带来了多样化且复杂的切换场景，包括卫星网络内部切换及卫星与 TN 之间的切换等。这就要求移动性管理具备提高切换可靠性、减少信令开销等特点，还要适应 TN 和 NTN 之间的显著传播时延差异。由于覆盖范围、传输时延以及小区和跟踪区域设置的不同，UE 在 NTN 系统中的移动性管理与 TN 系统中的管理存在显著差异。因此，需要基于地理位置的移动性管理进行增强，并统一设计 TN 和 NTN 的位置管理策略，通过采用基于地理位置的统一管理方法，UE 和基站能够在通信网络中实现真正融合。为增强 NTN-TN 融合网络的切换可靠性，双激活协议栈 (dual active protocol stack, DAPS) 是一个潜在的解决方案^[78]。在切换过程中，UE 在维持与源小区连接的同时，会尝试与目标小区建立连接，一旦成功接入目标小区，UE 便释放与源小区的连接，以确保数据传输的连续性。由于 TN 和 NTN 的特性差异，DAPS 机制面临诸多挑战。例如，NTN 的传播时延远大于 TN，同时无线链路故障和

表 5 AI 集成于 NTN 的技术方法性能优势对比

文献编号	技术/方法	优点	缺点
[74]	AI、DL 和 ML	通过 AI 和 DL 提供决策支持和程序预测,降低复杂性	对计算能力要求高,可能不适合资源受限的设备
[75]	基于蜂窝网络的 LPWAN 技术和 基于 LoRa 的调制技术等	支持大量设备连接	可能存在与现有蜂窝网络技术的兼容性问题
[76]	AI/ML	降低运营成本	模型训练和优化难度大
[77]	分布式架构、移动边缘计算	多领域融合	难以持续提供通信服务

切换失败处理流程未能适应基站高速运动场景。在 TN 场景中, 移动性管理策略主要考虑信号强度、终端移动性、小区负荷等因素; 而在 NTN 场景中, 则更多考虑卫星的剩余服务时间、仰角、空闲信道数量等。因此, 如何综合考虑多种因素选择进行驻留或切换的最佳小区, 是 6G NTN 通信领域的一个重要研究方向^[79]。

在 NTN 环境下, 通信的连续性和质量可能因频繁进行切换而受到严重影响。通过部署 HAPS 平台和利用地面中继技术能够在一定程度上降低移动性问题的影响^[80], 且应用缓冲策略有助于确保在切换过程中服务的连贯性^[81], 但对于飞机等高速飞行的快速移动用户, 其移动性管理需求依然极具挑战性^[82]。同时, 卫星通信的长传播时延特性, 以及地面设备部署的固定性和扩展限制, 均增加了利用现有 NTN 架构优化移动性管理时的时延和成本复杂性。文献[79]提出了一种在综合地面-卫星网络中具有增强可重配置管理平面的移动性管理架构, 该架构部署于较高轨道上, 能够支持空间分布式移动性管理的灵活配置。文献[83-84]提出移动性管理功能可以放置在 LEO 层上或由非 LEO 卫星承载。尽管移动性管理已有许多创新进展, 仍存在许多值得进一步探索的学术问题, 例如高层星座设计、考虑相对移动性的层间管理结构优化等。

3.6 非正交多址接入

由于频域资源的稀缺, 非正交多址接入技术在 NTN 通信系统中的应用已成为研究热点。在高空平台(如平流层飞艇、UAV 等)通信中, NOMA 技术已得到实际应用, 这些平台可以作为中继节点, 扩展 TN 的覆盖范围、提高频谱效率, 从而满足未来网络对于高速率、低时延和大规模连接等的需求^[85-86]。该技术的核心是在发送端采用非正交方式传输信号, 主动引入干扰信息, 并在接收端通过串行干扰消除技术实现正确解调, 从而允许多个用户在同一时刻复用相同的时频资源。因此, 其非常适用于远近效应和广覆盖多点接入的场景, 尤其是在上行密集场景中, 相较于传统的正交接入技术, NOMA 能

够显著提升频谱效率^[85]。此外, 在 6G NTN 通信系统中, NOMA 技术被认为是实现海量物联网场景、支撑每平方千米百万级别设备接入的关键技术之一。文献[87]探讨作为下一代多址技术的 NOMA 在 NTN 中的应用及其协同作用, 并深入研究 NTN 与 NOMA 的融合以满足 6G 中的高连接密度、低时延、高频谱效率等要求。为应对同信道干扰、复杂衰落和卫星网络动态影响的限制, 文献[88]论证了一种基于 NOMA 的多层卫星网络系统, 并推导出 LEO-UE 观测到的仰角概率密度函数表达式, 并对星地与星间链路的统计特性和信道容量进行详细讨论。为确保不同用户间信道条件的显著差异, 文献[89]提出了一种基于 Q 学习的 NOMA 以提升卫星-地面中继网络中的性能, 主要聚焦于上行链路场景中的能效和归一化吞吐量指标。文献[90]通过将 NOMA 与 MIMO 技术相融合, 在卫星用户干扰限制条件下, 探讨了实现最大化系统总容量的功率分配方案。

在多波束卫星小区环境中, NOMA 的下行链路性能也进行了深入研究。文献[91]提出一种基于贪婪原理的联合用户分组和子信道接入算法, 并在此基础上推证出一种基于深度强化学习的功率分配算法, 通过优化系统的可达性和速率, 使用邻近策略优化算法实现最优分配, 从而为卫星系统中 NOMA 技术的实施提供了坚实理论基础和技术支持。为降低卫星用户的中断概率, 文献[92]提出一种创新的星-地协作中继传输策略, 其利用地面节点的功能增强并转发信号, 以改善信号覆盖和质量。通过在欠感知与过感知间实现动态平衡, 文献[93]提出一种面向 LEO-地面通信上行链路 NOMA 系统的自适应频谱感知技术, 该技术基于创新的感知阈值推导机制, 能够精准捕捉未被利用或未被充分利用的频谱资源段并减轻误报波动, 从而有效提升多卫星覆盖场景下的频谱检测效率。为实现最优系统性能并保证服务质量, 文献[94]通过构建混合整数非线性规划模型最大化次级网络的吞吐量, 将非凸优化问题解耦为子信道分配和功率分配两个子问题, 同时分别设计贪心启发式子信道分配算法和基于连续凸

表 6 移动性管理应用于 NTN 中的方法性能分析

文献编号	技术/方法	关键特性	缺陷
[78]	DAPS	通过在发送端调度数据包匹配路径的不对称性, 避免缓冲区阻塞	需要准确的 RTT 估计
[79]	提出一种灵活且支持分布式部署的移动性管理架构	支持空间分布式移动性管理功能的灵活配置	需要进一步研究高层星座设计和层间管理结构优化
[83]	SIN 专用的轻量级组密钥协商协议	支持群组安全通信与高效密钥更新	需要预共享密钥, 可能存在密钥管理问题
[84]	可重配置 SDN LEO 星座设计	SDN 控制器的动态放置和卫星到控制器的分配	引入 SDN 技术可能增加网络部署和维护的成本

近似的功率分配算法，并在大规模信道和用户场景下提出一种优于正交多址方案的迭代联合资源分配算法。表7对现有研究方法及其不足之处进行了汇总。

3.7 小结

本节深入探讨支持6G NTN通信的6项关键技术，其对实现NTN与TN紧密融合以及提升整体通信系统性能至关重要。NS技术能够在共享物理基础设施上创建多个虚拟网络，通过优化资源分配和服务质量满足不同应用需求。NC在NTN中的应用，可以灵活分配有限的资源和功能以适应各种服务场景，同时有效缓解大型卫星星座建设中存在的高成本与传输时延问题，为NTN当前面临的挑战提供有效技术解决方案。通过重新配置无线传播环境，IRS技术能够大幅提升信号覆盖范围与能源利用效率。在NTN中，IRS可智能化反射信号，改善无线网络性能，尤其是在UAV与卫星通信场景下，能够有效扩展信号覆盖范围并降低能耗。IRS的引入使得NTN能够更高效地利用有限频谱资源，以应对未来网络对大容量、高数据传输速率、低时延和高连接密度等要求。DSS技术利用频谱资源的动态监测、管理与共享功能提高频谱资源的使用效率。在NTN应用中，DSS技术运用无线设备动态识别和选择空闲频段，避免干扰并实现不同轨道卫星之间的频谱资源共享，增强NTN的连接能力。未来，DSS技术将扩展到毫米波和太赫兹频段，不断挖掘频谱资源的潜力，提升利用效率。AI与ML技术在NTN通信中的应用，已成为提升网络性能的关键因素之一。AI/ML技术通过对多种数据的分析与处理，预测网络行为并适应不断变化的网络环境，能够智能化进行资源管理和波束成形，优化资源分配，减少干扰，并提升NTN系统性能。当前，SpaceX的Starlink计划和华为在NTN领域的研究中，都广泛应用AI/ML技术，以提升资源利用率，为未来全球通信网络的发展提供重要技术支持。移动性管理技术在NTN中至关重要，尤其是在卫星高速运动和覆盖范围快速变化的场景下，能够保证通信的连续性与无缝切换。在6G移动通信时代，NTN与TN的融合将带来更为复杂的场景切换，因此移动性管理技术需要切实提高切换的可靠性，减少信令开销，以适应TN与

NTN之间的传播时延差异。NOMA技术在NTN中已成为关键研究方向之一。通过非正交的方式发送信号，主动引入干扰信息并在接收端通过串行干扰消除技术实现正确解调，从而允许多个用户在同一时刻复用相同的时频资源。NOMA技术在提升频谱效率的同时，增强了系统的可靠性和灵活性。

为适应未来6G移动通信网络的复杂需求，NTN需要在多个方面进行创新性融合发展。其中，AI/ML技术的集成至关重要，可辅助NTN应对实时数据处理、大规模数据分析和网络动态管理等挑战，深入研究AI/ML算法与模型，能够提升网络运营管理效率。为满足高速数据传输、低时延通信和广泛设备连接等要求，空天地一体化必须采用增强型网络架构，推动通信协议创新，以支持更高的数据吞吐量并确保传输的稳定性与安全性。这不仅要求升级硬件，还需要协同优化软件和协议等。当前，NTN面临的安全性与隐私保护问题尤为复杂，特别是在星间链路脆弱性、多域身份认证漏洞及边缘数据隐私泄露风险等方面，传统的安全措施已难以满足上述需求。因此，需要引入更先进的技术手段，如智能化的安全措施与防护机制，结合AI/ML算法进行自适应的安全响应。同时，在设计中着重考虑低时延、高移动的需求场景，创新提出适用于资源受限NTN环境的轻量化加密算法与可信传输机制，以提升网络的整体安全性。

上述关键技术的发展与融合为NTN通信的广泛应用提供了坚实理论基础和可行技术路径，推动全球通信网络朝着智能化、高效化方向不断延伸，助力实现具备全球无缝通信和高速互联能力的6G愿景。

4 总结与展望

近十年来，电信行业经历了智能设备的迅猛增长、关键技术的突破以及对新型服务需求的急剧上升。这些变革推动信息通信技术服务提供商和科研人员对NTN系统的关注，将其视为实现全球网络覆盖并提供普遍服务的关键途径。在5G及之后通信网络生态系统中，NTN将在独立卫星系统、地面与非地面元素结合的两种架构中扮演更加重要的角色。3GPP自发布Rel-15协议以来，一

表7 用于星-地融合网络的 NOMA 汇总

文献编号	用户配对	优化方法	缺点
[87]	基于CSI或QoS的用户聚类	匹配理论等	CSI获取困难
[88]	近用户与远用户	粒子群优化	扩展至多用户时存在局限性
[91]	基于信道增益差异进行分组	深度强化学习	可能导致局部最优
[93]	固定配对	基于能量检测的频谱感知	仅考虑固定用户

直致力于将NTN技术整合到5G和6G移动通信网络框架中,相关技术报告详细探讨了NTN的多种部署场景、信道模型、系统参数及解决方案。此外,移动性管理、AI/ML、NOMA等关键技术的突破,也为NTN与TN的融合发展提供了有力支撑。

未来,NTN通信技术将在6G中占据重要地位,应用前景十分广阔,但同时也面临诸多技术挑战。针对这些挑战,学术界、工业界和标准化机构之间将持续合作,提出更多创新解决方案。随着NTN技术的不断成熟,其将在全球通信中扮演至关重要的角色,支持卫星通信、电视广播、偏远地区通信等各类领域的广泛应用,为全球通信网络提供更高质量的技术支撑。

参考文献

- [1] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 905-974.
- [2] ARANITI G, IERA A, PIZZI S, et al. Toward 6G non-terrestrial networks[J]. IEEE Network, 2021, 36(1): 113-120.
- [3] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.811[R]. 2019.
- [4] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[R]. 2021.
- [5] 3GPP. Study on using satellite access in 5G: TR 36.763[R]. 2018.
- [6] 3GPP. Study on narrow-band internet of things (NB-IoT)/enhanced machine type communication (eMTC) support for non-terrestrial networks (NTN): TR 36.763[R]. 2020.
- [7] 3GPP. Study on requirements and use cases for network verified UE location for non-terrestrial-networks (NTN) in NR: TR 38.882 [R]. 2022.
- [8] 3GPP. Service requirements for scenarios using non-terrestrial networks (NTN): TR 22.865[R]. 2023.
- [9] ITU-T SG13. Requirements and architecture for fixed-mobile-satellite converged networks: Y 3200[S]. 2024.
- [10] QI W, XIA X, WANG H. Analysis and forecast on 5G-advanced evolution[C]//Proceedings of the 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1296-1300.
- [11] MediaTek. MediaTek to showcase its groundbreaking satellite connectivity technology[C]//Mobile World Congress 2023. 2023.
- [12] 夏旭. 面向5G/6G卫星: NTN标准发展、关键技术与未来思考[J]. 广播电视网络, 2024, 31(5): 60-65.
XIA X. Facing 5G/6G satellite: NTN standard development, key technologies and future thinking[J]. Radio & Television Network, 2024, 31(5): 60-65.
- [13] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22.261[S]. 2022.
- [14] MOHAN N, FERGUSON A E, CECH H, et al. A multifaceted look at starlink performance[C]//Proceedings of the ACM Web Conference 2024. New York: ACM, 2024: 2723-2734.
- [15] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.
CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.
- [16] ERICSON M. Hexa-X-II: 6G Architectural enablers and framework[C]//European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Antwerp, Belgium, 2024.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] KHENNOUFA F, ABDELLATIF K, YANIKOMEROGLU H, et al. A multi-layer non-terrestrial networks architecture for 6G and beyond under realistic conditions and with practical limitations[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2025, (99): 1-7.
- [20] AMMAR S, PONG LAU C, SHIHADA B. An in-depth survey on virtualization technologies in 6G integrated terrestrial and non-terrestrial networks[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 3690-3734.
- [21] VAEZI M, AZARI A, KHOSRAVIRAD S R, et al. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: a survey on 5G advances and the road toward 6G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1117-1174.
- [22] NGUYEN C T, SAPUTRA Y M, HUYNH N V, et al. Emerging technologies for 6G non-terrestrial-networks: from academia to industrial applications[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 3852-3885.
- [23] ALI JAMSHED M, KAUSHIK A, MANZOOR S, et al. A tutorial on non-terrestrial networks: towards global and ubiquitous 6G connectivity[J]. Foundations and Trends® in Networking, 2025, 14(3): 160-253.
- [24] ZHANG H Y, LIU R K, KAUSHIK A, et al. Satellite edge computing with collaborative computation offloading: an intelligent deep deterministic policy gradient approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(10): 9092-9107.
- [25] 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.
- [26] NGO Q T, TANG Z F, JAYAWICKRAMA B, et al. Timeliness of information in 5G nonterrestrial networks: a survey[J]. IEEE Inter-

- net of Things Journal, 2024, 11(21): 34652-34675.
- [27] WIGARD J, JUAN E, STANCZAK J, et al. Ubiquitous 6G service through non-terrestrial networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(6): 12-18.
- [28] POLESE M, BONATI L, D'ORO S, et al. Understanding O-RAN: architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 1376-1411.
- [29] EL-HAJJ M. Secure and trustworthy open radio access network (O-RAN) optimization: a zero-trust and federated learning framework for 6G networks[J]. Future Internet, 2025, 17(6): 233.
- [30] AGARWAL B, IRMER R, LISTER D, et al. Open RAN for 6G networks: architecture, use cases and open issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, (99): 1.
- [31] EVANS B. 6G satellite communications[C]//Proceedings of the 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 175-177.
- [32] TOKA M, LEE B, SEONG J, et al. RIS-empowered LEO satellite networks for 6G: promising usage scenarios and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(11): 128-135.
- [33] D'ANDREA C, GARCIA-RODRIGUEZ A, GERACI G, et al. Analysis of UAV communications in cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 133-147.
- [34] 3GPP. Study on 5G system support for AI/ML-based services: TR 23.700[R]. 2023.
- [35] HAROUNABADI M, HEYN T. Toward integration of 6G-NTN to terrestrial mobile networks: research and standardization aspects [J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(6): 20-26.
- [36] LOU Z Y, YOUCEF BELMEKKI B E, ALOUINI M S. HAPS in the non-terrestrial network nexus: prospective architectures and performance insights[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(6): 52-58.
- [37] 3GPP. Access to the 3GPP 5G Core Network (5GCN) via Non-3GPP access networks[S]. 3GPP TS 24.502, 2018.
- [38] HAN J R, GAO Y. General introduction of non-terrestrial networks for new radio[J]. ZTE Communications, 2022, 20(S1): 72-78.
- [39] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [40] AFOLABI I, TALEB T, SAMDANIS K, et al. Network slicing and softwareization: a survey on principles, enabling technologies, and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2429-2453.
- [41] 3GPP. Feasibility study on new services and markets technology enablers for network operation: TR 22.864[R]. 2020.
- [42] 3GPP. 5G system architecture: TS 23.501[S]. 2019.
- [43] 3GPP. Management and orchestration; Concepts, use cases and requirements: TS 28.530[S]. 2020.
- [44] 3GPP. Study on architecture for next generation system: TR 23.799[R]. 2016.
- [45] TANG J H, SHIM B, QUEK T Q S. Service multiplexing and revenue maximization in sliced C-RAN incorporated with uRLLC and multicast eMBB[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 881-895.
- [46] YU K, ZHOU H B, TANG Z X, et al. Deep reinforcement learning-based RAN slicing for UL/DL decoupled cellular V2X[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3523-3535.
- [47] XIA W F, WEN Y G, FOH C H, et al. A survey on software-defined networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 27-51.
- [48] HAN B, GOPALAKRISHNAN V, JI L S, et al. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(2): 90-97.
- [49] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICHIO J L, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 236-262.
- [50] PAYAGALAGE P M P, BASNAYAKA C M W, JAYAKODY D N K, et al. Network virtualization and slicing in UAV-enabled future networks[C]//Proceedings of the 2023 6th Conference on Cloud and Internet of Things (CIoT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 98-103.
- [51] YUAN Z H, MUNTEAN G M. AirSlice: a network slicing framework for UAV communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11): 62-68.
- [52] DRIF Y, CHAPUT E, LAVINAL E, et al. An extensible network slicing framework for satellite integration into 5G[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(4): 339-357.
- [53] KRISHNA M B, LORENZ P. Deterministic network slice instance policy for intra and inter slice resource management in 5G[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(3): 4904-4916.
- [54] LIU Y R, MA T, QIN X H, et al. Reconfigurable RAN slicing for ultra-dense LEO satellite networks via DRL[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2025, 11(1): 566-580.
- [55] MEI J, WANG X B, ZHENG K. An intelligent self-sustained RAN slicing framework for diverse service provisioning in 5G-beyond and 6G networks[J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(3): 281-294.
- [56] LUO Y R, CAO J, SHANG C, et al. NSAA: a network slice access authentication and service authorization scheme for integrated satellite-terrestrial network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(6): 7636-7651.

- [57] KANG Z Y, YOU C S, ZHANG R. Active-IRS-aided wireless communication: fundamentals, designs and open issues[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(3): 368-374.
- [58] FANG Y, ZHANG S Y, LI X M, et al. Multi-IRS-enabled integrated sensing and communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(9): 5853-5867.
- [59] ALI JAMSHED M, KAUSHIK A, TOKA M, et al. Synergizing airborne non-terrestrial networks and reconfigurable intelligent surfaces-aided 6G IoT[J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2024, 7(2): 46-52.
- [60] GE Y M, FAN J C. Active reconfigurable intelligent surface assisted secure and robust cooperative beamforming for cognitive satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 4108-4113.
- [61] LIAO C J, XU K, XIA X C, et al. IRS-assisted anti-jamming transmission for an integrated satellite-UAV-terrestrial network with imperfect CSI: a game-based perspective[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(23): 20484-20497.
- [62] DONG H, HUA C Q, LIU L Y, et al. Intelligent reflecting surface-aided integrated terrestrial-satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(4): 2507-2522.
- [63] LIU X Y, ZHAO B, LIN M, et al. IRS-aided uplink transmission scheme in integrated satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(2): 1847-1861.
- [64] SHI W P, PAN C H, SHU F, et al. Weighted sum power maximization for STAR-RIS-aided SWIPT systems with nonlinear energy harvesting[J]. *Science China Information Sciences*, 2024, 67(10): 202301.
- [65] YUE X W, XIE J, LIU Y W, et al. Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface assisted NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(1): 189-204.
- [66] WU C Y, LIU Y W, MU X D, et al. Coverage characterization of STAR-RIS networks: NOMA and OMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9): 3036-3040.
- [67] MARTIKAINEN H, MAJAMAA M, PUTTONEN J. Coordinated dynamic spectrum sharing between terrestrial and non-terrestrial networks in 5G and beyond[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 419-424.
- [68] LI X Y, SHANG B D. Advancing multi-connectivity in satellite-terrestrial integrated networks: architectures, challenges, and applications[J]. *IEEE Network*, 2025, (99): 1.
- [69] LI Z Q, HAN S, MENG W X, et al. Realistic cooperative strategies based on dynamic spectrum sharing for integrated satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, (99): 1.
- [70] LEE H W, MEDLES A, CHEN C C, et al. Feasibility and opportunities of terrestrial network and non-terrestrial network spectrum sharing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(6): 36-42.
- [71] ZHANG C C, ZHANG N, CAO W, et al. AI-based optimization of handover strategy in non-terrestrial networks[J]. *ZTE Communications*, 2021, 19(4): 98-104.
- [72] GIORDANI M, ZORZI M. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(2): 244-251.
- [73] 3GPP. Study on artificial intelligence (AI)/machine learning (ML) for NR NTN network operation: TR 38.843[R]. 2025.
- [74] MICHAILIDIS E T, POTIRAKIS S M, KANATAS A G. AI-inspired non-terrestrial networks for IIoT: review on enabling technologies and applications[J]. *IoT*, 2020, 1(1): 21-48.
- [75] 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.
- [76] KHALID M, ALI J, ROH B H. Artificial intelligence and machine learning technologies for integration of terrestrial in non-terrestrial networks[J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2024, 7(1): 28-33.
- [77] WANG X N, GUO Y, GAO Y. Unmanned autonomous intelligent system in 6G non-terrestrial network[J]. *Information*, 2024, 15(1): 38.
- [78] KUHN N, LOCHIN E, MIFDAOUI A, et al. DAPS: Intelligent delay-aware packet scheduling for multipath transport[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1222-1227.
- [79] JI S J, SHENG M, ZHOU D, et al. Flexible and distributed mobility management for integrated terrestrial-satellite networks: challenges, architectures, and approaches[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(4): 73-81.
- [80] EULER S, LIN X Q, TEJEDOR E, et al. A primer on HIBS: high altitude platform stations as IMT base stations[EB]. 2025.
- [81] LI J, XUE K P, LIU J Q, et al. A user-centric handover scheme for ultra-dense LEO satellite networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(11): 1904-1908.
- [82] XU H H, LI D S, LIU M L, et al. QoE-driven intelligent handover for user-centric mobile satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 10127-10139.
- [83] XUE K P, MENG W, ZHOU H C, et al. A lightweight and secure group key based handover authentication protocol for the software-defined space information network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(6): 3673-3684.
- [84] PAPA A, DE COLA T, VIZARRETA P, et al. Design and evaluation of reconfigurable SDN LEO constellations[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2020, 17(3): 1432-1445.

- [85] DAI L L, WANG B C, DING Z G, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2294-2323.
- [86] MA Y Y, MA G Y, WANG N, et al. OTFS enabled NOMA for MMTC systems over LEO satellite[J]. ZTE Communications, 2021, 19(4): 63-70.
- [87] BELMEKKI B E Y, ALOUINI M S. NOMA as the next-generation multiple access in nonterrestrial networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2024, 112(9): 1303-1345.
- [88] LU S Y, XU G J, ZHU L N, et al. An adaptive power allocation for NOMA-based multi-layer satellite system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(6): 5269-5281.
- [89] DE AGUIAR L P, PIVARO MONTEIRO M E, FARHAT J, et al. Performance analysis of Q-learning-based NOMA in satellite-terrestrial relay networks[J]. Physical Communication, 2025, 69: 102619.
- [90] ZHANG H M, JIANG C X, WANG J J, et al. Multicast beamforming optimization in cloud-based heterogeneous terrestrial and satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 1766-1776.
- [91] LIU Y H, WANG C W, DENG D H, et al. A DRL resource allocation for downlink NOMA multi-beam satellite communications [C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [92] 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.
- [93] ZHU J, XU T H, WANG C, et al. Flexible spectrum sensing in NOMA system for LEO satellite-terrestrial uplink communications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(11): 18439-18442.
- [94] LIU R, GUO K F, AN K, et al. Resource allocation for cognitive satellite-HAP-terrestrial networks with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 9659-9663.

[作者简介]



何世文 (1978–), 男, 中南大学、新疆大学教授, 主要研究方向为无线(蜂窝/卫星/局域网)通信与网络基础理论研究, 协议规范、并行计算机体系结构和可编程无线内生智能通信与网络原型系统。



姚晓燕 (1999–), 女, 新疆大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信物理层。



安振宇 (1988–), 男, 高级工程师, 主要研究方向为超可靠低时延通信、跨层优化、智能优化等。



彭丞佐 (1999–), 男, 中南大学博士生, 主要研究方向为卫星通信物理层、MAC层、射频智能控制与内生智能等。



钱育蓉 (1980–), 女, 新疆大学教授, 主要研究方向为人工智能(大数据、图像处理)、网络计算和农业遥感领域等。



黄伟 (1987–), 男, 合肥工业大学副教授, 主要研究方向为新一代B5G/6G移动通信物理层传输技术、智能无线通信等。



唐清 (1992–), 男, 高级工程师, 主要研究方向为无线通信、智能优化理论与应用。