Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Theory and Key Technologies in Satellite Internet Networking—Review

面向6G的非地面组网——演进、机遇与未来方向

王丰，张圣羽，杨惠婷，郭贵生*

Information System Technology and Design Pillar, Singapore University of Technology and Design, Singapore 487372, Singapore

ARTICLE INFO

Article history:
Received 12 November 2024
Revised 7 May 2025
Accepted 15 May 2025
Available online 2 June 2025

关键词
非地面网络
第六代移动通信网络
卫星网络
接入与移动性管理
星间传输

摘要

从第五代移动通信（5G）技术开始，非地面网络（NTN）已成为未来网络架构中的关键组成部分。尤其是随着低轨（LEO）卫星的兴起，NTN使空间互联网成为可能，并在为地球上最偏远地区提供可靠服务方面带来了范式转变。然而，卫星的大范围覆盖以及高速运动也给用户设备接入和星间传输带来了独特挑战，进而影响了服务质量与服务连续性。本文在第六代移动通信（6G）网络演进背景下，对当前NTN组网技术进行了深入调研，重点关注接入调控、卫星移动性管理以及异构网络服务切片等技术。在此基础上，结合NTN发展的最新趋势，本文进一步从卫星波束赋形、切换机制以及服务保障等方面提出新的研究视角。最后，本文总结了若干NTN关键开放研究问题，并提出未来NTN组网的研究方向，加速卫星互联网的落地部署。

© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

1.1. 背景

从第五代移动通信（5G）技术开始，非地面网络（NTN）已成为未来网络架构的重要组成部分，在实现三维（3D）全球无缝覆盖的愿景中发挥着关键作用[1–2]。NTN包括地球同步轨道（GEO）卫星、中轨（MEO）卫星、低轨（LEO）卫星以及高空平台（HAP），能够为地球上任意区域提供网络连接，如图1所示。这种能力在地面网络（TN）覆盖不足或建设成本受限的偏远地区尤为重要，如山区或海洋区域[3]。此外，在自然灾害或紧急情况导致TN基础设施受损的情况下，NTN也可作为重要的通信替代方案[4]。随着星载数据处理能力的提升以及大规模星座的发展，卫星通信正成为NTN演进中的关键技术，受到工业界与学术界的广泛关注[5–6]。

LEO卫星星座的发展推动了NTN的演进。由于其距离地球较近（约500~1200 km），相较于高轨卫星，LEO卫星能够提供更低时延的网络连接，并改善无线链路预算[7–8]。卫星通信技术的发展大致可分为三个阶段，对应用户设备（UE）类型的演进。

- 第一阶段为专用卫星系统阶段。在该阶段，UE独立地接入TN和卫星，如卫星与蜂窝网络双模手机，但此类设备通常体积较大。
- 第二阶段（当前阶段）是在太空部署“蜂窝基站”。在该模式下，UE无需进行硬件或固件修改即可运行，使终端能够直连卫星，并支持sub-6 GHz蜂窝数据服务。
- 第三阶段（预期阶段）为NTN增强阶段。该阶段将对卫星和UE进行新的设计，以进一步提升NTN移动

* Corresponding author.
E-mail address: tonyquek@sutd.edu.sg (T.Q.S. Quek).

2095-8099/© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 54(11): 56–68
引用本文：Feng Wang, Shengyu Zhang, Huiting Yang, Tony Q.S. Quek. Non-Terrestrial Networking for 6G: Evolution, Opportunities, and Future Directions. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.05.013

通信服务能力，并实现TN与NTN的统一设计。

从历史角度看，这三个阶段也反映了TN与NTN之间关系的演变：在5G之前两者基本独立发展；在5G及5G-Advanced阶段，通过对地面终端进行最小改动以支持NTN；而在第六代移动通信（6G）及未来，两者将朝着统一设计与协同优化的方向发展。在标准化方面，第三代合作伙伴计划（3GPP）在Release 15（Rel-15）和Release 16（Rel-16）中确立了NTN的关键应用场景和系统架构，并提供了基于卫星的NTN信道模型及系统级仿真假设。在Rel-17中，3GPP将NTN纳入5G新空口（NR）生态体系，详细描述了Sub-6 GHz频段下的NTN应用场景，包括大规模接入以及窄带物联网（IoT）应用。在Rel-18中，3GPP进一步研究了10 GHz及以上频段手持终端的5G NR NTN运行改进，重点关注频谱管理与共存问题，以促进NTN与TN的高效融合[9–12]。正在讨论的Rel-19将NTN视为长期研究方向之一，提升其在未来通信框架中的重要性。沿着NTN的发展轨迹构建可靠的空间互联网，连接世界每一个角落的愿景将成为现实。

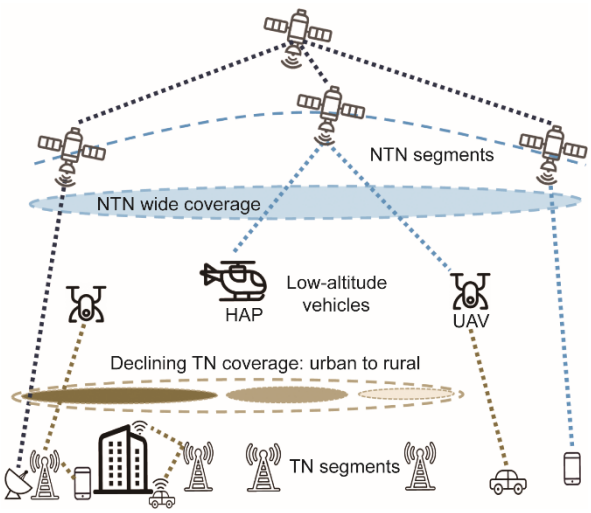

图1. NTN与TN的多样化网络场景。TN：地面网络；UAV：无人机。

1.2. NTN组网的问题与挑战

NTN的大范围覆盖和动态特性为实现无处不在的接入提供了机遇，但同时也带来了新的挑战。在多星座环境中，由于卫星覆盖范围大且覆盖区域重叠，需要管理实时、动态且大规模的连接，这使得卫星网络管理变得更加复杂。此外，当卫星搭载基站（BS）载荷时，与地面基站不同，卫星基站必须应对卫星快速运动和不断变化的覆盖状态，因此需要考虑动态卫星接入、移动性管理以及干扰管理策略。同时，卫星与UE之间需要进行远距离且频繁的信令交互，以支持实时连续的数据服务。这些挑战凸显了高效NTN组网策略的重要性，尤其是在接入调控、卫星移动性以及星上流量调度方面，以下将针对这些问题进行详细论述。

1.2.1. NTN无线资源管理

卫星网络的大规模接入常常导致大量UE在有限的带宽资源上竞争，从而不可避免地产生信号干扰问题[13–17]。因此，高效的干扰管理对于维持NTN接入可靠性至关重要[18–20]。其中的关键挑战在于准确估计信道状态信息（CSI），并设计高效的波束赋形策略[21–23]。CSI能够反映通信信道的当前状态，通常通过UE接收到的信号进行估计，并反馈给发送端，用于后续传输调控。精确的CSI反馈对于资源分配和干扰抑制策略至关重要。然而，卫星的高速运动使获取准确的CSI非常困难[24–26]。传统依赖接收端反馈的CSI估计方法在NTN中容易产生较大时延，从而导致CSI迟滞[27]。此外，在设计波束赋形时对CSI进行处理也会进一步增加时延，而系统同时又必须满足服务质量（QoS）要求并控制干扰。传统方法，如连续凸近似（SCA）[28–29]和加权最小均方误差（WMMSE）算法[30]，虽然能够解决部分问题，但计算复杂度较高且对初始化敏感，导致进一步的处理延迟。这些相互交织的问题表明，NTN中的无线资源管理极为复杂，需要更加自适应且高效的CSI估计与波束赋形技术。

1.2.2. NTN中的移动性管理

由于卫星的高速运动特性，传统TN中的链路切换（HO）方案难以满足NTN的移动性管理需求[7]。与固定地面BS不同，卫星因为高速运动导致HO频繁且信号强度波动明显，这些变化进一步受到仰角约束及额外大气损耗的影响。与TN相比，NTN还会产生更严重的多普勒频移。单颗LEO卫星对某一用户的覆盖时间可能只有几十秒，因此需要快速完成HO处理，包括信令交换与同步过程。此外，随着TN与NTN的融合发展，汽车、无人机（UAV）等移动终端可能从TN密集区域移动到TN覆盖的稀疏区域，如图1所示。在统一频谱管理下，UE可以从TN切换到NTN以获得更好的数据性能。因此，既需要解决NTN内部的切换问题，也需要解决TN与NTN之间的移动性管理问题，以确保服务连续性。由此可见，NTN移动性管理的持续发展带来了独特挑战。

1.2.3. NTN流量调度

当前由多星座组成的NTN系统在灵活性和适应性方面仍存在明显局限，因为这些星座通常是为特定任务（如地球观测或广播）定制设计的。这会导致星载资源利用率

不足，因为在空闲期间难以将这些卫星进行重新配置以执行其他任务[31–39]。为解决这一问题，引入了网络功能虚拟化（NFV）和软件定义网络（SDN）等技术，形成了软件定义NTN（SD-NTN），从而实现集中式星间网络管理和高效资源调度[40–43]。SD-NTN的一项重要特性是网络切片，它允许在共享的物理基础设施上构建多个虚拟网络[44–46]。每个网络切片可以根据不同业务需求进行定制，如增强型移动宽带（eMBB）、超可靠低时延通信（URLLC）或大规模机器通信（mMTC）[45–48]。这种机制能够显著提升NTN的运行效率、响应能力和资源利用率。然而，由于卫星高速运动、资源受限以及业务需求多样，SD-NTN中的网络切片仍面临诸多挑战[49–52]。高效的资源分配，以及业务冲突的解决，对于优化NTN网络、提升资源效率并支持多样化应用至关重要。

在下一节，本文将重点从无线资源管理、卫星移动性以及星上流量调度三个方面总结NTN的最新研究进展，全面回顾NTN技术在卫星接入、切换机制以及星间传输方面的演进，同时提出新的研究视角。最后，本文将探讨一些未来研究与开放性问题，以推动NTN组网技术的持续演进。

2. 相关研究进展

2.1. 无线资源管理

2.1.1. CSI估计

在高动态移动系统中，实时且准确的CSI估计正成为无线资源管理面临的最大挑战之一。为解决CSI过时问题，许多研究集中于长期CSI估计或预测。CSI预测主要分为两类方法：随机建模方法和基于人工智能（AI）的方法。传统随机方法通过对无线信道进行统计建模来预测CSI。其中最常用的是自回归（AR）模型，该模型利用历史CSI数据的加权线性组合来预测未来CSI，并将信道近似为AR过程[53–54]。然而，AR模型通常只能实现一步预测，并且计算复杂度较高。为解决这一问题，神经网络正凭借其捕捉时间依赖关系的能力，逐渐成为实现精确自适应信道预测的重要方法。例如，Turan和Coleri [55]基于多层感知器（MLP）提出了一种用于车联网通信的信道建模框架。文献[56]中提出基于卷积神经网络（CNN）的预测器，以提高移动场景中的预测精度。Ding和Hirose [57]首次将循环神经网络（RNN）用于衰落信道环境下的信道预测；由于其记忆机制，长短期记忆网络（LSTM）在序列数据预测方面表现出更优性能。Peng等[58]提出基于LSTM的框架，用于在不完美CSI条件下预测大规模多输入多输出（MIMO）通信中的信道状态。近年来，Transformer [一种基于注意力机制的深度学习（DL）方法]被用于处理序列数据，研究表明它的结构能够显著提升信道预测精度[59]。

2.1.2. 波束赋形设计

预编码技术在提升传输信号质量、抑制干扰以及提高频谱效率方面发挥着关键作用。其中一种传统的预编码技术是迫零（ZF）预编码，其目标是在接收端降低干扰[60]。然而，ZF预编码的性能对CSI质量高度敏感。为解决这一问题，研究者提出了迭代算法，如SCA [28–29]和WMMSE [30]，以在不完美CSI条件下优化预编码器。然而，由于NTN系统中用户和天线数量庞大，这些方法的计算复杂度往往过高。因此，研究者提出了基于激励机制的方法，以更高效地解决预编码设计与干扰管理问题[13]。受DL在解决非凸优化问题方面优势的启发，研究者进一步提出了基于DL的预编码设计方法。例如，Liu等[23]提出了一种用于车联网（V2I）通信的DL预编码框架，并将其扩展到无人机通信场景[61]。此外，研究者还提出了基于LSTM的预编码框架[62]，并将其应用于车联网通信[63]。这些基于深度学习的方法为高动态移动系统中的预编码优化提供了新的解决方案，也表明基于人工智能的方法在NTN无线资源管理中具有巨大潜力，可在降低复杂度的同时提升系统性能。

2.2. NTN移动性管理

2.2.1. 从TNs到NTNs

在NTN移动性管理方面，LEO星座会形成相互重叠的覆盖区域，使每个UE面临多个HO候选节点，因此需要更加高效的HO策略[64]。基于无线链路质量的传统HO策略已被引入NTN场景[65–66]。但由于信号质量变化较小，这类策略会导致较高的HO频率。已有研究分析了NTN的容量和吞吐量如何随卫星与UE之间的距离变化而变化，并提出通过设置新的阈值触发机制来提高HO成功率[67–68]。此外，一些研究基于卫星与UE的位置提出了面向NTN的HO判据，该方法利用了卫星轨道运动的可预测性，达到了减少HO开销的目的[69–70]。

2.2.2. 基于网络优化的移动性管理

为了实现高效的NTN移动性管理，相关研究将卫星HO策略纳入多指标网络优化框架，以改进无线资源分配[71–73]，或促进业务卸载能力[74–75]。例如，Ji等[8]提出了一种用于全球信息获取的动态NTN管理架构，该架

构的卫星HO方案旨在最小化信令开销和传输时延。此外，HO决策也被建模为多目标优化问题，以降低HO失败率[76]。网络流量管理模型同样被用于优化卫星HO，从而确保资源的高效利用，并减少HO冲突[74,77]。进一步，为了满足不同UE的多样化需求，研究人员还提出了定制化HO策略，例如，利用博弈论方法推导HO决策，以最大化不同UE的满意度[78]。

2.2.3. NTN服务连续性方面的进展

研究人员还致力于通过优化HO来延长卫星的驻留时间，以实现稳定的数据服务。Al-Hourani [79]构建了一种分析模型，用于估计连续HO之间的会话持续时间，进一步映射成LEO星座的优化部署[80]。此外，一些研究提出了预测型HO决策，以延长服务持续时间并减少服务中断[81–83]。近年来机器学习被证明对优化NTN的HO决策产生重要作用，可提升系统整体的响应能力和可靠性[84–86]。同时，研究人员还在探索TN-NTN HO策略，以支持汽车、高速列车和UAV等移动UE的无缝切换，从而在星地协同系统中确保可持续且高质量的数据服务[87–88]。

表1 [65–88]总结了与NTN移动性管理相关的研究进展。现有研究的主要关注点是针对特定网络性能进行移动性管理优化，但通常将整个服务持续时间划分为若干离散的时间快照，并依次为每一次HO决策选择目标节点。这种方法往往忽略了连续HO之间的相互依赖关系。换言之，每一次HO决策之间都是相互关联的，这可能会形成不同的卫星HO序列，并进一步影响整个系统的服务连续性。此外，在设计有效的TN-NTN HO策略时，还必须考虑TN与NTN在覆盖范围以及信号变化方面的显著差异。

2.3. SD-NTN与流量调度

近年来，SD-NTN架构受到了广泛关注[34,37,43,89–90]。文献[34]提出了一种面向多层空间-地面一体化网络的跨域SDN架构，以提升不同网络域管理的灵活性和效率，并改进网络配置更新与决策过程。文献[7]研究了一种软件定义宽带卫星网络架构，以实现灵活且可扩展的资源管理，并提出了一种最优资源分配策略，以提升不同网络资源之间的共享与协同能力。文献[43]提出了一种软件定义天地一体化网络架构，以提升网络管理能力、系统灵活性以及服务质量。文献[89]提出了一种软件定义的空天地一体化车联网架构，用于支持多样化的车联网服务。该架构利用网络切片和分层控制器对动态资源池进行管理，同时保证不同网络段之间的服务隔离。文献[90]提出了一种软件定义天地一体化网络架构。该架构旨在实现灵活的网络管理和高效的内容检索，并通过协同缓存机制降低网络流量负载。

SD-NTN中的网络切片问题也得到了广泛研究[35,38–39,42,91–94]。文献[35]研究了软件定义空天地一体化网络中的网络切片问题，以在通信资源与计算资源消耗之间实现兼顾。文献[94]探讨了软件定义天地一体化网络中的网络切片问题，目标是最小化链路资源利用率以及所使用服务器的数量。然而，文献[35,94]提出的网络切片策略并未考虑SD-NTN的时变特性。相比之下，一些研究已经将SD-NTN的动态特性纳入考虑[38–39,42,91–93]。具体而言，Yang等[38]研究了软件定义空间信息网络中的网络切片问题，通过联合利用通信、存储和计算资源，在满足端到端时延要求的同时最大化已完成任务数量。Jia等[39]分析了软件定义LEO卫星网络中的网络切片问题，其目标是在高效执行地面任务的同时最小化星间资源消耗。文献[42]研究了SD-NTN的网络切片问题，以优化虚拟网络功能（VNF）的部署与路由，并以最小化服务时延为目标。Yang等[91]研究了SD-NTN在服务功能链（SFC）约束下优化路由，以最大化网络流量。文献[92]研究了SD-NTN

表1 卫星移动性管理相关工作的总结

HO scenario	Refs.	Advantages	Limitations
Inter-satellite HO	[65–66]	Applying TN HO strategies to NTNs	Insignificant signal quality variation in satellite cells is overlooked
	[67–70]	Applying conditional HO mechanism to NTNs to reduce signaling overhead	HO condition is not customized for NTN service
	[71–78]	Combining HO decision with specific UE demands for NTN optimization	Predictable satellite movement is not fully utilized to improve HO efficiency
	[79–83]	Applying predictable HOs based on satellite orbital motion	Insufficient consideration of non-independence between HOs to achieve global optimization
	[84–86]	Using an efficient AI-based satellite HO strategy	Model training, generalizability, and updating are not sufficiently considered
Heterogeneous HO	[87–88]	Considering HO between TNs and NTNs to improve service continuity	Under-considered TN-NTN switching architecture and mechanisms

中的组稀疏网络切片问题，其目标是在网络最大流与开销间实现权衡。文献[93]提出了一种基于势博弈的网络切片方法，用于软件定义卫星边缘计算系统，以最小化部署成本并最大化网络收益。

现有研究在很大程度上忽视了在大规模、高度动态环境中对NTN组网的高效管理。一个有前景的研究方向是利用卫星轨道运动来设计可预测或预配置卫星组网策略，从而在一定程度上抵消卫星运动带来的影响。无线资源管理、卫星移动性以及星上流量调度最终都将影响NTN网络运维，其影响范围从UE接入一直延伸到星间传输。在此基础上，本文结合NTN发展的最新趋势，在后文中针对这些关键要素提出新的研究视角，以推动卫星互联网管理技术继续发展。

3. 生成式人工智能赋能的卫星无线资源管理

3.1. NTN中的生成式人工智能

近年来，生成式人工智能（GenAI）在无线通信领域受到广泛关注，为智能网络优化开辟了新的研究方向[95]。最初，GenAI主要应用于自然语言处理、图像生成和创意设计等领域，而如今其技术正在对无线通信系统产生重要影响，使资源管理、干扰抑制以及网络规划能够更加高效和自适应[21]。这些进展主要得益于生成模型在学习复杂模式、生成新数据样本以及预测网络行为方面的能力，这些能力对于应对通信系统日益增长的复杂性至关重要。随着无线通信技术的快速发展，尤其是向6G和NTN的演进，GenAI在行业中的应用进一步加速，使无线资源分配能够通过数据驱动的方式实现更灵活的决策。

具体而言，传统的DL方法在解决资源分配问题方面发挥了重要作用，它们通过学习历史数据来预测最优的资源使用模式。然而，在面对高度复杂且不断变化的网络环境时，这些方法仍存在局限。尤其是在NTN中，由于卫星高速运动、信道状态不断变化以及业务需求动态变化，系统需要具备实时适应能力[16]。尽管DL在分类和预测任务方面表现优异，但在面对未知场景时生成新的解决方案的能力较弱，而这种情况在NTN中非常常见。相比之下，GenAI代表了人工智能在无线资源分配领域的一次重要演进。它能够在实时运行过程中生成新的、优化的资源分配策略。与通常依赖预定义数据集和监督学习的DL不同，GenAI可以自主生成新的数据样本、模拟网络行为，并在缺乏完整或最新信息的情况下预测最优资源分配方案。这种生成能力对于NTN尤为关键，因为其运行环境变化非常迅速。通过利用GenAI，NTN能够实现更加主动且灵活的资源管理，从而降低时延并实时提升网络效率。

例如，面向NTN的CSI估计和波束赋形设计中，GenAI可以用于预测并生成动态环境下的实时CSI。由于卫星高速运动，传统方法往往面临CSI过时的问题，而GenAI模型可以动态生成预测CSI，从而确保资源分配决策基于最新信息。此外，该能力还可应用于波束赋形设计，GenAI能够自动生成优化的波束赋形向量，在满足QoS要求的同时减少多层NTN之间的干扰。下面将进一步讨论这些应用场景，并说明GenAI在推动NTN运行方面的重要作用。

3.2. 信道估计

发射端信道状态信息（CSIT）的不精准主要源于卫星的移动以及由于传播距离较长而导致的反馈延迟。卫星可以通过预测长期CSIT，避免使用过时的CSI，从而解决这一问题。具体来说，就是可以根据历史CSI样本预测未来的CSIT。鉴于CSI数据具有高度非线性特征，GenAI模型被认为是实现卫星CSI预测最有前景的方法之一。

图2展示了一个GenAI赋能的NTN CSI估计总体框架。该框架在训练阶段前引入数据采集过程，通常包括从历史通信场景中收集轨迹数据和CSI数据。这些数据为模型预训练提供基础。GenAI能够自主生成新的数据样本，通过模拟多种网络环境条件构建更加丰富的训练数据集，以覆盖NTN通信系统中可能出现的各种场景。通过生成具有代表性的合成数据，GenAI能够缓解标注数据不足的问题，尤其是在高度动态的NTN环境中。当数据集构建完成后，GenAI模型会进行微调。该过程通过调整模型参数，能够更好地适应具体的NTN通信场景，进一步提高CSI估计精度。

常见的GenAI架构（如Transformer模型或扩散模型）通常包含三个基本组成部分：输入层、编码器层和解码器层。这些组件共同完成数据生成和预测任务。输入层接收原始输入数据，如历史轨迹信息、历史CSI数据或随机噪声（具体取决于GenAI模型类型）。随后，编码器对输入数据进行处理，以生成包含丰富特征信息的紧凑表示。在Transformer模型中，编码器利用自注意力机制捕获输入序列中的复杂关系，从而理解长距离依赖关系和上下文信息，这对于准确预测卫星CSI非常关键。在扩散模型中，编码器则逐步优化带噪输入，学习在每一阶段去噪并重建有意义的特征表示。随后，解码器层将编码后的数据转换为最终输出，即卫星CSI数据。在Transformer模型中，这一过程通过基于编码信息和模型内部学习到的生成数据序列来实现[17]。而在扩散模型中，解码器逐步优化去噪，

最终得到预测CSI。最后，需要评估GenAI模型，以验证其在不同NTN场景中的准确性和泛化能力。为减小信令开销和计算负担并实现实时CSI估计，GenAI模块部署在各卫星节点上，而模型的预训练和微调则部署在区域地面控制中心。地面控制中心负责收集区域内所有NTN节点的历史数据并进行统一管理。模型更新过程包括将最新模型上传至每条轨道中的一颗卫星，然后分发至该轨道上的所有节点，因为同一轨道内的卫星之间具有稳定的连接，并按顺序共享覆盖状态和流量需求信息。

通过自动化数据生成以及先进GenAI架构提升预测能力，该框架展示了GenAI在复杂动态NTN环境中实现实时、自适应卫星CSI估计的巨大潜力。

3.3. 预测波束赋形

然而，即使获得预测CSI，其处理过程仍然存在挑战，因为额外的信号处理可能带来额外时延，从而影响NTN性能。为解决这一问题，研究者提出了基于GenAI的预测波束赋形方法。预测波束赋形通过利用GenAI模型直接根据历史CSIT生成波束赋形参数，从而避免传统流程中独立进行CSI预测和预编码设计的两个步骤。在这种方法中，GenAI凭借其在时间序列预测和非线性关系建模方面的优势[95]，能够减少信号处理开销并提高波束赋形精度[63]。

图3展示了所提出的预测卫星波束赋形协议的整体概览，该协议针对频分双工（FDD）系统，假设在每个通信时隙内的信道条件（包括用户分布和信道系数）保持不变。对于传统FDD协议，每个通信时隙t被划分为三个阶段：数据阶段A_t、控制阶段B_t和处理阶段C_t。具体而言，在上一通信时隙(t–1)中，接收端从接收到的导频信号估计CSI，并在控制阶段B_{t-1}向发送端上报估计的CSI。在接收到上一时隙上报的CSI后，BS通过CSI预测方法预测下一时隙的CSIT，并据此生成波束赋形设计。这一过程涉及不同模块之间的额外读写操作，导致额外的处理延迟，在动态NTN环境下，这种延迟问题更加突出。

为了解决这一问题，我们提出了一种新型的预测波束赋形协议，如图3所示。该协议与传统协议的主要区别在于处理阶段C_t。在传统波束赋形中，波束形成器主要基于上一通信时隙的CSIT生成。而在预测波束赋形协议中，会保留过去T_0个通信时隙上报的CSIT†，并由GenAI模型利用这些累积的历史CSIT来生成波束赋形器。这种增强的上下文感知能力能够更好地预测信道变化，从而为卫星移动和NTNs中波动的信道条件提供更稳健的解决方案。因此，GenAI模型可以在NTNs中高效地进行时间序列数据预测，即卫星CSI序列，从而减少卫星移动对实时无线资源管理的影响，并提升NTN网络的准确性。

4. 移动性管理优化

在TN中，当UE移动至当前小区边缘并进入小区重叠区域时，HO机制允许链路切换至下一个BS，而BS本身保持固定的区域覆盖[65,67,96]。而在NTN系统中，不同轨道上的多颗卫星快速飞过目标区域，每颗卫星只在有限时间内提供信号覆盖[83,97]。当前服务卫星只能在其覆盖窗口内维持通信链路，直到UE进入多覆盖并触发切换。因此，由于NTN的动态特性，传统TN的HO策略无法直接应用，需要专门的移动性管理方案。

4.1. NTN中的链路切换

4.1.1. NTN信号变化特征

如图4所示，当UE（如UAV）从BS小区中心移动到

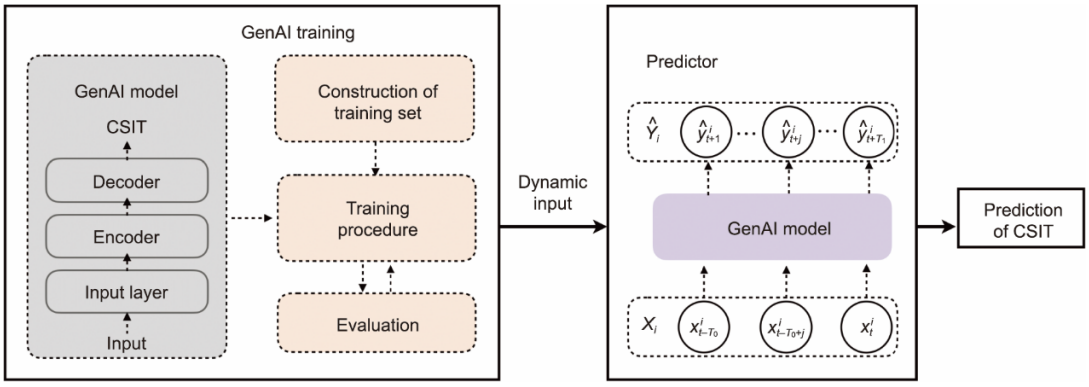

图2. GenAI赋能的CSI预测结构。X：历史CSI输入；$\hat{Y}$：预测CSI输出；x：历史CSI数据；$\hat{y}$：预测CSI值；i：CSI样本索引；j：时隙索引；t：通信轮次；T_0：最大历史CSIT条目数；T_1：最大预测CSI输出数。

† T_0表示单个用户可存储的CSIT（发射端）历史数据最大条数。这一约束条件用于控制预测式波束赋形方案的存储开销与计算复杂度。本文所提方案可调用任意数量的信道状态信息历史数据生成波束赋形器，前提是数据条数不超过T_0。

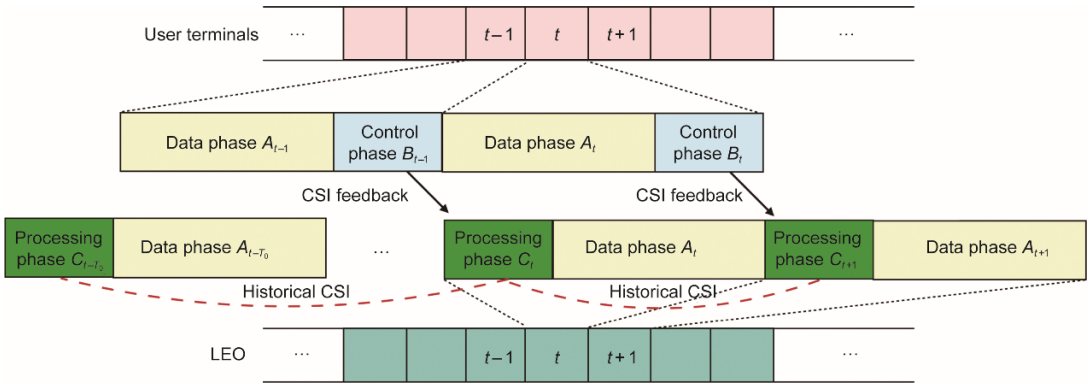

图3. 预测波束赋形协议。

边缘时，信号强度会明显下降，这主要是由于传播距离增加造成的[3,10]。然而，由于卫星均保持较高高度，其信号强度变化相对较小[98–99]。从时间维度看，LEO卫星的服务时间通常只有几十秒到几分钟。在考虑HO信令延迟以及卫星有限的星载处理能力后，可用于执行HO的时间被进一步压缩。这些因素使得在快速变化的NTN环境中为UE选择最佳切换目标更加复杂，因此NTN需要采用不同的链路测量方式和HO触发条件。

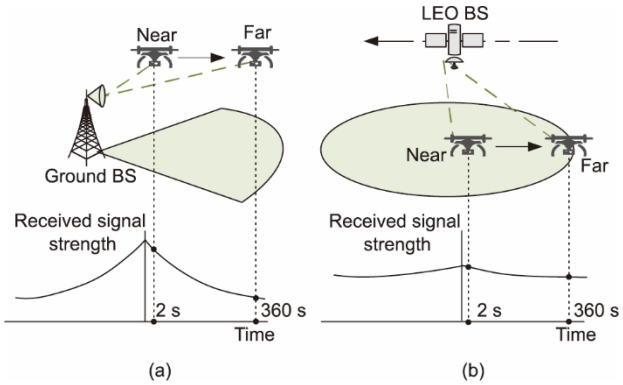

图4. TN（a）与NTN（b）的时空信号变化差异。

4.1.2. NTN中的HO预先配置

NTN的移动性管理不能仅依赖于参考信号接收功率（RSRP）等信号质量指标，因为卫星的快速移动和长传播时延会影响实时信号测量。每颗卫星都沿固有轨道运行，使其在目标区域的覆盖具有可预测性。这种可预测性使得提前计算多颗卫星的覆盖范围及相应的持续时间成为可能。此外，同一轨道上的卫星会依次经过目标区域，其信号质量变化呈现相似趋势。这些因素使得在NTN中可以提前进行HO准备。因此，3GPP Rel-16引入了条件切换（CHO）技术，该技术预先执行HO准备阶段，并监控所有候选基站的条件[10]。一旦某个候选基站满足HO条件，仅需与基站完成最终的断开和同步步骤[10]。CHO的设计旨在降低动态场景下的HO失败率，从而实现系统移动性的增强[96,100]。在NTN中，UE可以利用卫星运动信息（如星历数据）作为基于位置的CHO策略的测量条件。然而，仅依赖这一条件可能导致UE切换到低质量小区。对于快速移动的卫星，服务时间也是确保NTN服务稳定性和减少HO次数的关键指标。同样，由于卫星经过目标区域时会形成先升高后下降的信号质量模式，信号质量的变化也是重要的HO评估条件，因此测量条件应结合多种指标，且所有指标均基于可预测的卫星运动。

4.1.3. NTN切换优化

卫星的轨道运动不仅有助于CHO，还可以预测潜在的HO序列，从而建立预配置的卫星服务序列，这在文献[87,101]中已有研究。对于LEO星座而言，在特定时间段内目标区域的覆盖状态是可预测的。因此该区域内UE在一段时间所连接的卫星保持时间顺序排列。由于NTN的动态性，管理HO率至关重要，否则频繁的HO往往会引发信令风暴。预配置HO序列可以减少卫星与UE之间及卫星之间的信令交互，从而提高HO成功率。此外，预配置的HO序列还能确保更好的服务连续性。传统HO策略在多重覆盖下通常是逐一选择最佳目标，但可能忽略连续HO之间的依赖关系，从而影响服务的连续性。通过配置HO序列可以缓解这一问题，并可与无线资源分配和网络切片等技术结合，以扩展NTN的服务能力。

4.2. TN与NTN之间的移动性支持

4.2.1. TN-NTN一体化架构

面向5G及后续移动通信系统，TN与NTN的融合在系统演进中成为一个重要突破[5,8,88]。如图5所示，卫星现在可以作为空间基站，在与地面基站统一的频谱管理框架下运行，并能够与地面基站进行控制信令交互，同时由运营商进行协同回传管理[102]。在前传层面，UE能够感知同时存在的TN小区和NTN小区，并根据当前信号条件

和自身需求选择接入其中任一网络段。这就要求TN-NTN需具备统一的移动性管理机制[12,103]。

考虑具有共享频谱的TN-NTN系统。地面BS与卫星S共享控制单元，每个地面控制单元站点部署一个卫星网关，从而实现TN与NTN之间高效的HO信令交互。在这种一体化系统中，NTN不仅仅是为TN覆盖不到的区域提供连接，同时被用于补强网络容量，尤其是在TN分布稀疏或UE移动至BS小区边缘时，从而达到提升整体服务能力的目的[2]。TN-NTN融合对于跨区域移动的UE增益显著。例如，在日益受到重视的低空经济中，从城市向郊区移动的UAV需要与移动网络保持持续连接，以实时接收任务特定的载荷和控制指令。目前的TN可能仅能保证城市区域的网络覆盖。融合的TN-NTN系统能够沿整个UAV通道提供完整的连通性覆盖，服务模式可能经历从单一TN、TN-NTN融合，再完全过渡到NTN。从协同的角度看，统一的TN-NTN控制器能够获取TN和NTN的覆盖分布，从而判断在何处、以何种方式灵活利用NTN来扩展TN的服务。这种融合也带来了TN与NTN之间高效移动性管理的挑战，以确保数据服务的可靠性和连续性。

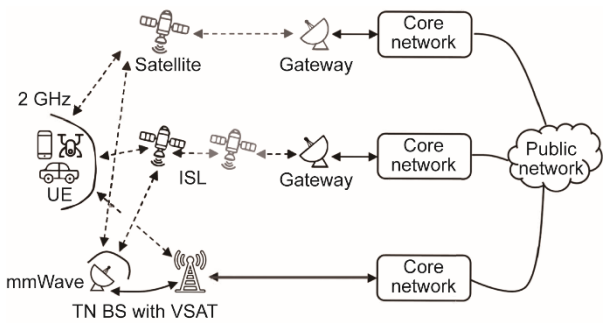

图5. TN-NTN融合系统中UE的连接模式及BS信令。mmWave：毫米波；VSAT：超小口径终端；ISL：星间链路。

4.2.2. TN-NTN的统一HO评估机制

在TN-NTN融合系统中，UE可通过TN与NTN之间的HO获得连续的数据服务[3,99]。然而，如图4所示，TN与NTN的信号强度在时空上存在显著差异。空间上，TN信号的变化主要取决于从小区中心到小区边缘的传播距离；而NTN信号主要受仰角影响，仰角会影响视距（LoS）条件及阴影衰落，较低的仰角会抑制卫星链路质量。时间上，卫星的高速移动可能导致在单个TN小区服务周期内需要执行多次NTN的HO。上述预配置NTN HO序列有助于应对这些挑战，因为它可与TN的服务持续时间对齐，从而统一评估TN与NTN之间的HO候选目标。系统期望提供可靠的服务速率，同时降低HO开销。因此，HO触发条件应综合考虑TN与NTN候选目标的信号干扰噪声比（SINR）、服务时间以及信令开销。同时还应考虑TN与NTN服务能力的差异，其中NTN不仅作为TN的补充，还可能与TN竞争，以确保切换区段时数据服务的持续性。更具体地说，当在TN与NTN协同覆盖下发起HO请求时，UE将评估TN和NTN的潜在服务能力，然后选择最优网段，确保数据服务的连续性与可靠性。

4.2.3. TN与NTN之间的HO

当UE处于异构覆盖时，将触发TN-NTN网段HO机制[99]。当前BS会向TN与NTN候选目标发送HO请求。候选卫星则根据可预测的卫星运动为UE计算NTN HO序列，以便与候选基站时空对齐。随后，UE在统一条件下评估TN与NTN的HO效益，并选择最合适的下一个服务网段。预配置HO序列方法会将HO准备信令扩展至按时间顺序经过UE的卫星，从而设计卫星服务链。需要注意的是，预配置卫星服务链涉及在后续卫星中预留资源，这一过程包含星座管理技术。在管理大规模LEO星座时，这一点尤为关键，以便在满足多样化UE需求的同时计算出最优NTN服务链，并保持网络资源的高效分配。因此，TN-NTN融合系统中的移动性管理不仅需要考虑UE与节点之间的动态接入，还必须与异构网络的资源管理同步，以实现TN-NTN协同资源优化。这一技术符合6G愿景，以及未来网络发展中TN与NTN一体化的目标。

5. SD-NTN的网络切片

5.1. SD-NTN架构

SD-NTN架构利用虚拟化技术，将太空、空中和地面层中的物理网络资源（如通信、存储和计算资源）转换为虚拟资源[89]，如图6所示。这些资源被汇聚到统一的资源池中，以支持跨不同网络段的组网[37,89]。这种统一化使得网络资源能够被动态分配和优化，以满足不同服务的多样化需求。这一架构的关键在于两项核心技术：SDN和NFV，它们共同支持高效的资源管理与灵活的网络编排[35–36,89]。

（1）**软件定义网络。**SDN将控制平面与数据平面解耦，从而实现对整个网络的集中化和可编程控制[41,104]。在SD-NTN架构中，SDN能够对太空、空中和地面各网络段中的物理资源和虚拟资源提供集中视图，使网络运营者能够实时动态地管理和优化资源分配[34,37,52]。这种集中控制对于管理NTN高度动态和分布式的特性至关重要。在该环境中，卫星星座、HAP、UAV以及地面节点间需要实现无缝协同。利用空中和太空节点的广域覆盖能

力，SD-NTN可以在控制器覆盖范围内的节点之间实现资源状态的直接传递。对于无法直接到达控制器的节点，资源更新和控制信息则通过最少跳数传输方式进行转发。此外，SDN控制器能够监控网络状态，如链路可用性、带宽使用情况以及节点运行状态[34,89]。通过可编程控制机制，SDN提高了网络灵活性，使网络能够动态调整流量路由，并有效适应不断变化的业务需求和频繁变化的网络拓扑[34,43]。SDN还能够简化QoS管理、增强网络安全性，并支持快速故障恢复，从而进一步提高整体网络的可扩展性与灵活性[34,43,52]。

（2）**网络功能虚拟化。**NFV将网络功能从专用物理硬件中解耦，使其能够以软件实例的形式部署，这些实例被称为VNF，可运行在NTN的各种物理节点上[40,105]。在SD-NTN架构中，这种解耦使得VNF可以根据服务需求和资源可用性灵活部署在卫星、HAP、UAV或地面站上[46]。这种灵活性使网络运营者能够在无需升级专用硬件的情况下扩展和优化网络功能，从而降低运营成本并简化网络维护[106–107]。此外，NFV通过允许多个VNF共享同一物理节点来提高资源利用效率，从而增强网络对不同服务需求变化的适应能力[38]。NFV还通过支持VNF在NTN不同节点之间快速部署和迁移，提高网络敏捷性[107]。这种VNF的动态分配与重新部署使SD-NTN即使在网络条件变化时也能够保持较高的服务可用性和可靠性[107]。

通过集成NFV和SDN技术，SD-NTN能够在整个网络中实现灵活、可扩展且高效的资源管理[34,37,43–44]，从而提升NTN在处理多样化和复杂任务时的适应性与可扩展性。

5.2. 网络切片

SD-NTN中，网络切片在提供灵活、可扩展且高效服务方面发挥着关键作用，使网络能够依托共享物理基础设施满足多样化的服务需求[44–46]。具体而言，网络切片是指在同一物理基础设施上创建多个相互隔离的虚拟网络（即切片），并使其能够同时运行[44–46]，如图7所示。每个网络切片都根据不同服务的具体需求进行定制。通过创建独立的虚拟网络，SD-NTN能够确保每个切片都拥有针对特定服务需求优化的专用资源和配置。

在SD-NTN中，VNF可以灵活地部署在不同的物理节点上，使每个切片都能满足特定的业务需求[35,38,46]。每项请求的业务都可以由一条SFC来表示，SFC由一系列按预定义顺序排列的VNF组成[35,38,108–109]。为了完成所请求的服务，任务流必须按照SFC定义的特定顺序遍历每个VNF。因此，在SD-NTN中，有两项关键技术对网络切片至关重要：第一是VNF部署，涉及将虚拟功能策略性地放置在合适的物理节点上，以最大化业务性能[35]；第二是流量路由，这要求SD-NTN中的网络方案既能满足SFC约束，又能满足多维资源约束[35,38]。

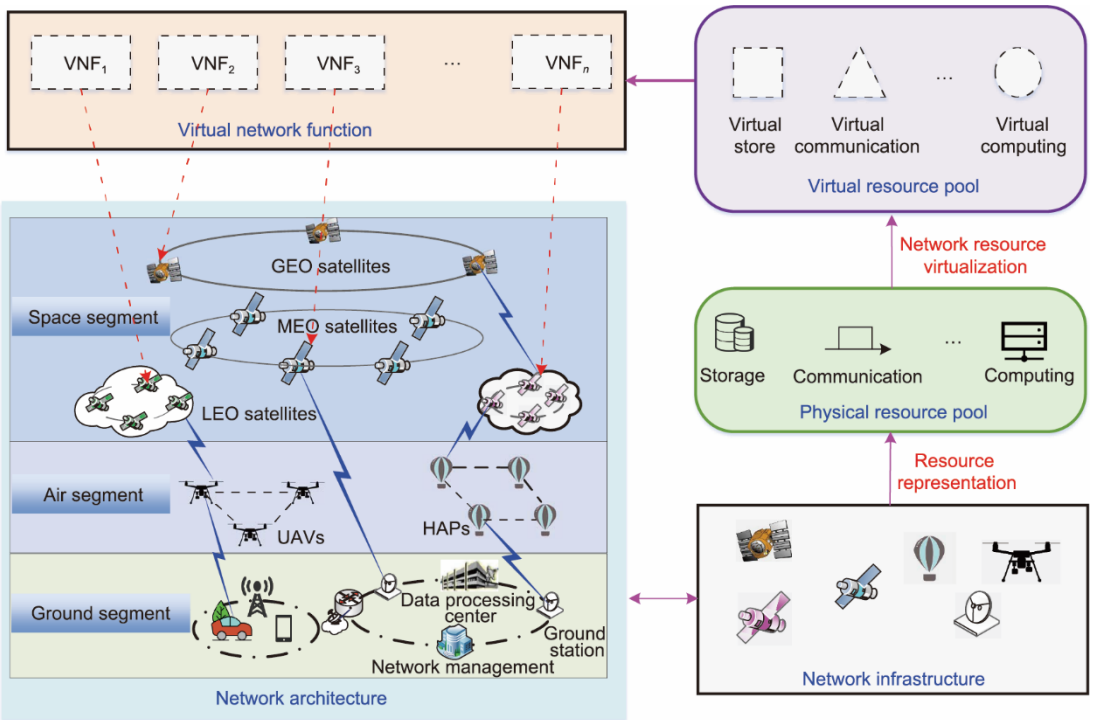

图6. SD-NTN架构。n：部署的VNF数量。

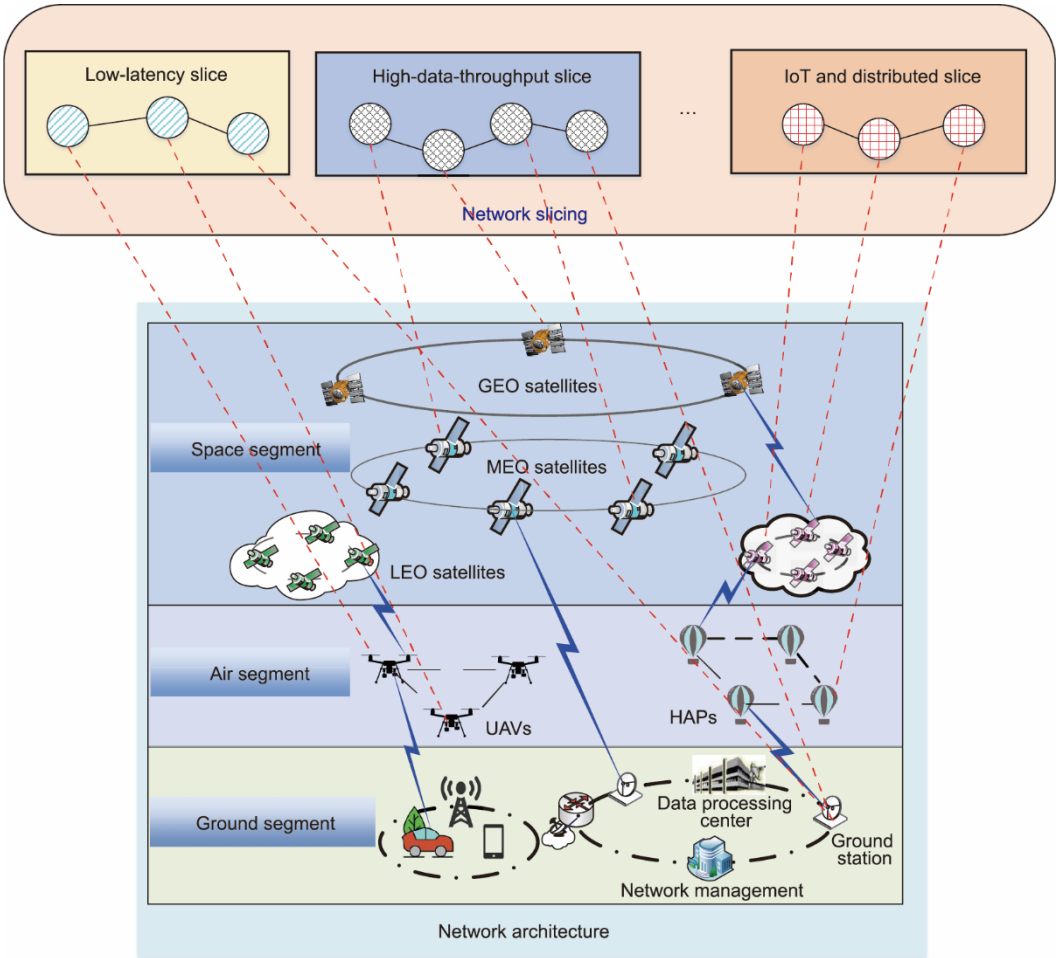

图7. SD-NTN中网络切片的示意图。

5.2.1. 高效VNF部署

VNF部署策略对于优化SD-NTN网络性能至关重要[35,38,92]。这些策略必须与各类服务的具体需求相匹配，如低时延、高数据吞吐量以及IoT与分布式服务等。下面根据服务特性介绍几种VNF部署场景。

（1）**低时延服务。**对于具有严格低时延要求的网络切片，如支持URLLC服务的切片，VNF应尽可能部署在靠近终端用户的位置。在SD-NTN中，可以将VNF部署在靠近用户的HAP、UAV或地面节点上，从而显著缩短传输距离，并降低传播时延。该部署策略能够保证对时延敏感的服务（如自动驾驶和远程医疗操作），维持实时数据处理和决策所需的超低时延[91]。

（2）**高数据吞吐服务。**对于需要高数据吞吐量的服务（如eMBB服务），VNF应部署在具有较强处理能力、存储能力和带宽能力的物理节点上。在SD-NTN中，可以通过将VNF部署在通信能力更强的节点上实现，如MEO或GEO卫星。这些节点能够在大范围区域内更高效地传输大量数据[92]。此外，将VNF部署在具有丰富计算资源的数据中心或地面站，也能够支持数据密集型服务，从而确保大规模数据传输不会出现拥塞或瓶颈。这种策略能够支持视频流、增强现实以及云服务等高吞吐应用，同时减少网络拥塞并维持较高的性能水平。

（3）**IoT与分布式服务。**对于支持IoT和分布式服务（如mMTC服务）的网络切片，VNF应部署在具有良好可扩展性和能效优势的节点上[38]。在SD-NTN中，可以将VNF部署在LEO卫星、无人机或边缘节点上，以支持大量低数据速率的IoT设备。这些节点能够将处理能力分布到更靠近设备的位置，从而减少时延并减轻核心网络的拥塞。通过在多个节点上部署VNF，网络能够有效管理IoT设备所需的高密度连接，同时优化资源分配并降低能耗。这种策略能够支持智慧城市基础设施、工业自动化以及环境监测等应用在大规模分布式网络中的无缝运行。

5.2.2. SD-NTN流量路由

在SD-NTN中，任务流必须按照SFC定义的特定顺序

遍历每个VNF [35,38,108–109]。然而，由于卫星、UAV和HAP的高速运动，SD-NTN中节点之间的连接是间歇性的，从而导致网络拓扑随时间变化[44–45,49–51]。因此，为静态网络拓扑设计的流量路由策略，无法直接应用于时变的SD-NTN [38,42,91]。此外，由于卫星、UAV和HAP在尺寸、重量和成本方面的限制，它们所能搭载的有效载荷受到严格限制[45,51–52]。进一步而言，在SD-NTN中，完成复杂的业务请求通常需要不同节点之间多维异构资源（包括通信、存储和计算资源）的协同合作。因此，在时变的SD-NTN中，必须优化流量路由策略，该策略不仅要满足SFC约束，还要确保对有限的通信、存储和计算资源进行高效分配。这些策略必须考虑节点之间动态且间歇性的连接，以最大化资源利用率并提升网络性能。一种方法是利用多功能时间扩展图（MF-TEG）来对包含通信、存储和计算资源的时变SD-NTN拓扑进行建模[110]。MF-TEG还可进一步用于设计VNF部署与流量路由策略，以确保网络资源的高效利用并提升整体网络性能。

6. 未来研究与开放性问题

6.1. 未来研究

6.1.1. NTN中的干扰管理

尽管上述研究已经解决了NTN的系统内干扰问题，但管理系统间干扰这一更广泛的挑战仍未解决。在6G系统中，LEO卫星与UAV在同一频段内的共存使得系统间干扰成为一项重大挑战。一些早期工作依赖认知无线电方法来进行系统间干扰抑制，通常将一个系统指定为主系统，将另一个指定为次系统[111–113]。这些方法旨在最大化主系统的吞吐量，同时保证次系统的QoS。然而，这些工作存在固有的局限性。简单地将非正交多址接入（NOMA）和单层速率分割多址接入（RSMA）等系统内干扰管理策略应用于系统间场景，NTN的潜力难以得到充分发挥。因此它们往往只能获得次优的性能，要么因为优先考虑主系统而忽视了次系统的潜力，要么为了最小化干扰而限制了次系统的能力。这种二元方法最终阻碍了两个系统发挥其真正的潜力，无法解决NTN中系统间干扰的复杂性。为了解决这一问题，未来的研究需要制定一种高效的干扰管理策略。例如，在卫星多重覆盖环境中，干扰管理首先需要捕获节点的不同物理特征，如信号强度和覆盖持续时间；也要关注UE需求，这同样有助于设计出更加精细且准确的干扰管理策略。

6.1.2. 细粒度TN-NTN融合

TN与NTN的融合不仅包括架构整合和连接管理，还包括应用与服务层面的细粒度编排。由于NTN具有广域覆盖能力，UE通常会同时处于TN与NTN的覆盖范围内。在这种情况下，NTN可以作为服务可靠性的增强层，这一点在高速公路车联网等应用场景中尤为重要。此外，当BS支持多播广播服务（MBS）时，NTN可以利用其天然的广域覆盖优势，与TN协同提供高效的数据MBS，从而提升服务可扩展性[114–115]。因此，NTN与TN不仅能够互补连接能力，还可以通过策略性的服务编排，利用各自优势提升整体系统性能。

6.1.3. 可靠性增强的网络切片

在SD-NTN中，由于网络由卫星、UAV、HAP和地面站等多种节点组成，因此网络可靠性面临显著挑战。这些节点可能因多种因素受到制约，如硬件故障、链路中断、环境条件变化或移动导致的连接中断。例如，卫星可能发生故障或轨道调整，无人机和高空平台可能出现电力故障或天气影响。因此，确保网络切片具备较强的韧性并能够在故障发生后快速恢复，对于维持SD-NTN服务的连续性至关重要。未来研究应重点开发稳健的容错机制，以实现实时故障检测和响应，从而最大限度地减少服务中断的情况发生。这些策略包括VNF的动态重配置，使服务能够在可用节点之间（如卫星、UAV和HAP）无缝迁移。此外，实时故障检测机制对于提升SD-NTN的整体可靠性也十分关键。这些机制需要持续监控网络状态，并在故障发生前预测潜在问题。通过结合预测模型和机器学习技术，网络可以提前识别硬件故障、链路不稳定或资源耗尽的早期迹象，从而采取预防措施，例如，重新配置网络切片或调整资源分配，以提高网络可靠性。

6.2. 开放性问题

6.2.1. NTN中的通信感知一体化

在NTN中实现通信感知一体化（ISAC）是一个极具前景的方向，它可以彻底改变星载和机载平台的通信感知能力。通过优化频谱、功率和硬件以实现双重功能，ISAC使得NTN能够在统一的框架内支持环境监测、目标检测和监视等任务[95,116]。此外，ISAC还能推动NTN在自主导航、灾害管理和实时态势感知方面的进步，从而显著提升运行效率。然而，由于动态的传播环境，ISAC也给NTN带来了重大挑战。频繁的HO和长距离传输增加了时延并使同步变得复杂，而有限的功率进一步制约ISAC的运行。要在NTN中实现有效的ISAC，需要先进的信号处理和自适应波束赋形技术来应对这些复杂性。

6.2.2. TN-NTN竞争性融合

TN和NTN的部署与服务在时空层面存在显著差异，包括分布模式、固定与动态射频、覆盖状态以及小区服务持续时间[8,85]。在统筹TN和NTN时，运营商必须迅速为这种异构系统设计传输方案并管理其移动性。一个关键挑战是针对TN和NTN策略性地分配传输任务。理论上讲，鉴于NTN的全球覆盖特性，任何可以通过TN传输的任务也可以卸载到NTN。当TN和NTN交替具备传输优势时，必须制定一种具有前瞻性的策略来实现任务划分与联合传输。在这方面，联邦学习和数字孪生等先进的计算与分析技术可能会提供帮助，以确保高效的数据交付。

6.2.3. NTN切片中的安全与隐私

在SD-NTN中，分布式架构固有的多样化网络威胁，使得提高跨网络切片的安全性与隐私性成为一项重大挑战。这些网络特别容易受到窃听、数据篡改和拒绝服务攻击等安全风险的影响，而共享基础设施增加了跨切片攻击和数据泄露的风险，进一步加剧了这些问题。此外，SD-NTN随时间变化的拓扑结构进一步使实时安全措施变得复杂。必须开发安全的隔离机制，以确保即使在共享资源上，数据流和控制流也能保持隔离；同时，还需要针对网络动态特性开发高级加密方法、身份验证协议以及安全的资源管理策略。此外，也需要动态应用针对特定切片的安全策略，确保安全措施能够适应每个切片的独特需求。例如，处理URLLC业务的切片可能比专为低延迟娱乐业务设计的切片需要更严格的安全协议。

7. 结论

本文探讨了NTN组网技术在6G移动系统演进中的关键作用。鉴于卫星具有广域覆盖和快速动态特性，本文回顾了NTN部署面临的独特挑战，包括无线接入技术、卫星切换机制以及星座切片技术的相关问题。此外，本文引入新的视角介绍了NTN无线资源管理、系统移动性管理以及星上流量调度的方法，旨在实现高效、高质量和可靠的NTN组网与数据服务。最后，文中给出了若干开放问题，讨论了推动卫星互联网部署的重要技术和研究方向。希望本研究能够为NTN的设计、运行和优化提供有价值的参考。

CRediT authorship contribution statement

Feng Wang: Writing-original draft, Methodology, Investigation, Conceptualization. **Shengyu Zhang:** Writing-original draft, Methodology. **Huiting Yang:** Writing-original draft, Methodology. **Tony Q.S. Quek:** Supervision.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relations hips that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation, Singapore and Infocomm Media Development Authority under its Future Communications Research & Development Programme.

References

[1] Du J, Lin T, Jiang C, Yang Q, Bader CF, Han Z. Distributed foundation models for multi-modal learning in 6G wireless networks. IEEE Wirel Commun 2024; 31(3):20–30.
[2] Chen Q, Guo Z, Meng W, Han S, Li C, Quek TQS. A survey on resource management in joint communication and computing-embedded SAGIN. 2024. arXiv:2403.17400.
[3] Geraci G, Garcia-Rodriguez A, Azari MM, Lozano A, Mezzavilla M, Chatzinotas S, et al. What will the future of UAV cellular communications be? A flight from 5G to 6G. IEEE Commun Surv Tutor 2022;24(3):1304–35.
[4] Giordani M, Zorzi M. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities. IEEE Netw 2021;35(2):244–51.
[5] Geraci G, López-Pérez D, Benzaghta M, Chatzinotas S. Integrating terrestrial and non-terrestrial networks: 3D opportunities and challenges. IEEE Commun Mag 2023;61(4):42–8.
[6] Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, Sharma SK, Shankar B, Montoya JFM, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges. IEEE Commun Surv Tutor 2021;23(1):70–109.
[7] Wang F, Jiang D, Wang Z, Lv Z, Mumtaz S. Fuzzy-CNN based multi-task routing for integrated satellite – terrestrial networks. IEEE Trans Veh Technol 2022;71(2):1913–26.
[8] Ji S, Sheng M, Zhou D, Bai W, Cao Q, Li J. Flexible and distributed mobility management for integrated terrestrial – satellite networks: challenges, architectures, and approaches. IEEE Netw 2021;35(4):73–81.
[9] TR 38.811: Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15). 3GPP standard. Valbonne: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); 2020.
[10] TR 38.821: Solutions for NR to support nonterrestrial networks (NTN) (Release 16). 3GPP standard. Valbonne: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); 2019.
[11] TR 38.741: Non-terrestrial networks (NTN) L-/S band for NR (Release 18). 3GPP standard. Valbonne: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); 2023.
[12] TR 38.863: Non-terrestrial networks (NTN) related RF and co-existence aspects (Release 18). 3GPP standard. Valbonne: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); 2023.
[13] Zhang S, Zhang S, Yuan W, Quek TQ. Rate-splitting multiple ac cess-based satellite – vehicular communication system: a noncooperative game theoretical approach. IEEE Open J Commun Soc 2023;4:430–41.
[14] Cho Y, Yang W, Oh D, Jo HS. Multi-agent deep reinforcement learning for interference–aware channel allocation in non-terrestrial networks. IEEE Commun

Lett 2023;27(3):936–40.
[15] Elmahallawy M, Luo T, Ramadan K. Communication-efficient federated learning for LEO constellations integrated with HAPs using hybrid NOMA-OFDM. IEEE J Sel Areas Commun 2024;42(5):1097–114.
[16] Zhang S, Mao Y, Clerckx B, Quek TQ. Interference management in space–air-ground integrated networks with fully distributed rate-splitting multiple access. IEEE Trans Wirel Commun 2025;24(1):149–64.
[17] Zhang S, Zhang S, Yuan W, Quek TQ. Transformer-empowered predictive beamforming for rate-splitting multiple access in non-terrestrial networks. IEEE Trans Wirel Commun 2024;23(12):19776–88.
[18] Ouyang Q, Ye N, Gao J, Wang A, Zhao L. Joint in-orbit computation and communication for minimizing download time from LEO satellites. IEEE Trans Mob Comput 2023;23(5):3950–63.
[19] Guo H, Li J, Liu J, Tian N, Kato N. A survey on space – air – ground – sea integrated network security in 6G. IEEE Commun Surv Tutor 2022; 24(1): 53–87.
[20] Centenaro M, Costa CE, Granelli F, Sacchi C, Vangelista L. A survey on technologies, standards, and open challenges in satellite IoT. IEEE Commun Surv Tutor 2021;23(3):1693–720.
[21] Zhang S, Zhang S, Mao Y, Yeung LK, Clerckx B, Quek TQ. Transformer-based channel prediction for rate-splitting multiple access-enabled vehicle-to-everything communication. IEEE Trans Wirel Commun 2024;23(10):12717–30.
[22] Meng X, Zhang N, Jian M, Kadoch M, Yang D. Channel modeling and estimation for reconfigurable-intelligent-surface-based 6G SAGIN IoT. IEEE Internet Things J 2023;10(11):9273–82.
[23] Liu C, Yuan W, Li S, Liu X, Li H, Ng DWK, et al. Learning-based predictive beamforming for integrated sensing and communication in vehicular networks. IEEE J Sel Areas Commun 2022;40(8):2317–34.
[24] Pan J, Shan H, Li R, Wu Y, Wu W, Quek TQ. Channel estimation based on deep learning in vehicle-to-everything environments. IEEE Commun Lett 2021; 25(6):1891–2185.
[25] Li S, Yuan W, Liu C, Wei Z, Yuan J, Bai B, et al. A novel ISAC transmission framework based on spatially-spread orthogonal time frequency space modulation. IEEE J Sel Areas Commun 2022;40(6):1854–72.
[26] Wen H, Yuan W, Liu Z, Li S. OTFS-SCMA: a downlink NOMA scheme for massive connectivity in high mobility channels. IEEE Trans Wirel Commun 2023;22(9):5770–84.
[27] Jiang W, Schotten HD. Neural network-based fading channel prediction: a comprehensive overview. IEEE Access 2019;7:118112–24.
[28] Mao Y, Clerckx B, Li VOK. Rate-splitting for multi-antenna non-orthogonal unicast and multicast transmission: spectral and energy efficiency analysis. IEEE Trans Commun 2019;67(12):8754–70.
[29] Zhang S, Zhang S, Yuan W, Li Y, Hanzo L. Efficient rate-splitting multiple access for the Internet of Vehicles: federated edge learning and latency minimization. IEEE J Sel Areas Commun 2023;41(5):1468–83.
[30] Mao Y, Clerckx B, Li VOK. Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA. EURASIP J Wirel Commun Netw 2018;2018:133.
[31] Huang X, Qi W, Xia X, Sun Y, Sun Z, Peng M. IoT NTN for voice services: architectures, protocols, and challenges. IEEE Netw 2024;38(4):40–7.
[32] Dureppagari HK, Saha C, Dhillon HS, Buehrer RM. NTN-based 6G localization: vision, role of LEOs, and open problems. IEEE Wirel Commun 2023;30(6):44–51.
[33] Rong B, Rutagemwa H. Leveraging large language models for intelligent control of 6G integrated TN–NTN with IoT service. IEEE Netw 2024;38(4):136–42.
[34] Shi Y, Cao Y, Liu J, Kato N. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space–terrestrial integrated networks. IEEE Netw 2019;33(1):29–35.
[35] Wang G, Zhou S, Zhang S, Niu Z, Shen X. SFC-based service provisioning for reconfigurable space–air–ground integrated networks. IEEE J Sel Areas Commun 2020;38(7):1478–89.
[36] Zhou S, Wang G, Zhang S, Niu Z, Shen XS. Bidirectional mission offloading for agile space – air – ground integrated networks. IEEE Wirel Commun 2019; 26(2):38–45.
[37] Sheng M, Wang Y, Li J, Liu R, Zhou D, He L. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: resource management architecture and strategies. IEEE Wirel Commun 2017;24(4):127–33.
[38] Yang H, Liu W, Li J, Quek TQS. Space information network with joint virtual network function deployment and flow routing strategy with QoS constraints. IEEE J Sel Areas Commun 2023;41(6):1737–56.
[39] Jia Z, Sheng M, Li J, Zhou D, Han Z. VNF-based service provision in software defined LEO satellite networks. IEEE Trans Wirel Commun 2021;20(9):6139–53.
[40] Han B, Gopalakrishnan V, Ji L, Lee S. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations. IEEE Commun Mag 2015; 53(2): 90–7.
[41] Kim H, Feamster N. Improving network management with software defined networking. IEEE Commun Mag 2013;51(2):114–9.
[42] Yuan S, Sun Y, Peng M. Joint network function placement and routing optimization in dynamic software-defined satellite – terrestrial integrated networks. IEEE Trans Wirel Commun 2024;23(5):5172–86.
[43] Bi Y, Han G, Xu S, Wang X, Lin C,YuZ,etal. Software defined space–terrestrial integrated networks: architecture, challenges, and solutions. IEEE Netw 2019; 33(1):22–8.
[44] Wu W, Zhou C, Li M, Wu H, Zhou H, Zhang N, et al. AI-native network slicing for 6G networks. IEEE Wirel Commun 2022;29(1):96–103.
[45] Lei L, Yuan Y, Vu TX, Chatzinotas S, Minardi M, Montoya JFM. Dynamic-adaptive AI solutions for network slicing management in satellite-integrated B5G systems. IEEE Netw 2021;35(6):91–7.
[46] Rodrigues TK, Kato N. Network slicing with centralized and distributed reinforcement learning for combined satellite/ground networks in a 6G environment. IEEE Wirel Commun 2022;29(1):104–10.
[47] Bega D, Gramaglia M, Garcia-Saavedra A, Fiore M, Banchs A, Costa-Perez X. Network slicing meets artificial intelligence: an AI-based framework for slice management. IEEE Commun Mag 2020;58(6):32–8.
[48] Shu Z, Taleb T. A novel QoS framework for network slicing in 5G and beyond networks based on SDN and NFV. IEEE Netw 2020;34(3):256–63.
[49] Pan H, Yao H, Mai T, Zhang N, Liu Y. Scalable traffic control using programmable data planes in a space information network. IEEE Netw 2021; 35(4):35–41.
[50] Zhang T, Li J, Li H, Zhang S, Wang P, Shen H. Application of time-varying graph theory over the space information networks. IEEE Netw 2020; 34(2): 179–85.
[51] Sheng M, Zhou D, Liu R, Wang Y, Li J. Resource mobility in space information networks: opportunities, challenges, and approaches. IEEE Netw 2019; 33(1): 128–35.
[52] Wu H, Chen J, Zhou C, Shi W, Cheng N, Xu W, et al. Resource management in space–air–ground integrated vehicular networks: SDN control and AI algorithm design. IEEE Wirel Commun 2020;27(6):52–60.
[53] Dong L, Xu G, Ling H. Predictive downlink beamforming for wideband CDMA over Rayleigh-fading channels. IEEE Trans Wirel Commun 2005; 4(2): 410–21.
[54] Baddour K, Beaulieu N. Autoregressive modeling for fading channel simulation. IEEE Trans Wirel Commun 2005;4(4):1650–62.
[55] Turan B, Coleri S. Machine learning based channel modeling for vehicular visible light communication. IEEE Trans Veh Technol 2021;70(10):9659–72.
[56] Yuan J, Ngo HQ, Matthaiou M. Machine learning-based channel prediction in massive MIMO with channel aging. IEEE Trans Wirel Commun 2020; 19(5): 2960–73.
[57] Ding T, Hirose A. Fading channel prediction based on combination of complex-valued neural networks and chirp Z-transform. IEEE Trans Neural Netw Learn Syst 2014;25(9):1686–95.
[58] Peng T, Zhang R, Cheng X, Yang L. LSTM-based channel prediction for secure massive MIMO communications under imperfect CSI. In: Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communications; 2020 Jun 7 – 11; online. New York City: IEEE; 2020. p. 1–6.
[59] Jiang H, Cui M, Ng DWK, Dai L. Accurate channel prediction based on transformer: making mobility negligible. IEEE J Sel Areas Commun 2022; 40(9):2717–32.
[60] Clerckx B, Mao Y, Schober R, Poor HV. Rate-splitting unifying SDMA, OMA, NOMA, and multicasting in MISO broadcast channel: a simple two-user rate analysis. IEEE Wirel Commun Lett 2020;9(3):349–53.
[61] Liu C, Yuan W, Wei Z, Liu X, Ng DWK. Location – aware predictive beamforming for UAV communications: a deep learning approach. IEEE Wirel Commun Lett 2021;10(3):668–72.
[62] Yuan W, Zou J, Cui Y, Li X, Mu J, Han K. Orthogonal time frequency space and predictive beamforming-enabled URLLC in vehicular networks. IEEE Wirel Commun 2023;30(2):56–62.
[63] Yuan W, Liu F, Masouros C, Yuan J, Ng DWK, Gonzalez-Prelcic N. Bayesian predictive beamforming for vehicular networks: a low-overhead joint radar-communication approach. IEEE Trans Wirel Commun 2021;20(3):1442–56.
[64] Li J, Xue K, Wei DSL, Liu J, Zhang Y. Energy efficiency and traffic offloading optimization in integrated satellite/terrestrial radio access networks. IEEE Trans Wirel Commun 2020;19(4):2367–81.
[65] Juan E, Lauridsen M, Wigard J, Mogensen P. Handover solutions for 5G low-Earth orbit satellite networks. IEEE Access 2022;10:93309–25.

[66] Juan E, Lauridsen M, Wigard J, Mogensen PE. 5G new radio mobility performance in LEO-based non-terrestrial networks. In: Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops; 2020 Dec 7 – 11; Taipei, China. New York City: IEEE; 2020.

[67] Wang F, Jiang D, Wang Z, Chen J, Quek TQS. Seamless handover in LEO based non-terrestrial networks: service continuity and optimization. IEEE Trans Commun 2023;71(2):1008–23.

[68] Ye J, Pan G, Alouini MS. Earth rotation-aware non-stationary satellite communication systems: modeling and analysis. IEEE Trans Wirel Commun 2021;20(9):5942–56.

[69] Lee J, Lee W, Kim JH. Performance evaluation of location-based conditional handover scheme using LEO satellites. In: Proceedings of the 2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence; 2023 Oct 11 – 13; Jeju Island, Republic of Korea. New York City: IEEE; 2023. p. 1642–4.

[70] Stanczak J, Karabulut U, Awada A. Conditional handover in 5G—principles, future use cases and FR2 performance. In: Proceedings of the 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing; 2022 May 30 – Jun 3; Dubrovnik, Croatia. Red Hook: Curran Associates, Inc.; 2022. p. 660–5.

[71] Yang J, Xiao Z, Cui H, Zhao J, Jiang G, Han Z. DQN-ALrM-based intelligent handover method for satellite – ground integrated network. IEEE Trans Cogn Commun Netw 2023;9(4):977–90.

[72] Kang Y, Zhu Y, Wang D, Han Z, Bas¸ar T. Joint server selection and ha ndover design for satellite-based federated learning using mean-field evolu tionary approach. IEEE Trans Netw Sci Eng 2024;11(2):1655–67.

[73] Liu Q, Li X, Ji H, Zhang H. User grouping-based beam handover scheme with load-balancing for LEO satellite networks. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference; 2023 Dec 4 – 8; Kuala Lumpur, Malaysia. New York City: IEEE; 2023. p. 3965–70.

[74] Zhang S, Liu A, Han C, Ding X, Liang X. A network-flows-based satellite handover strategy for LEO satellite networks. IEEE Wirel Commun Lett 2021; 10(12):2669–73.

[75] Song Y, Cao Y, Hou Y, Cai B, Wu C, Sun Z. A channel perceiving-based handover management in space – ground integrated information network. IEEE Trans Netw Serv Manag 2024;21(1):882–96.

[76] Zhang S, Liu A, Liang X. A multi-objective satellite handover strategy based on entropy in LEO satellite communications. In: Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Computer and Communications; 2020 Dec 11 – 14; Chengdu, China. New York City: IEEE; 2020.

[77] Li Y, Zhou W, Zhou S. Forecast based handover in an extensible multi-layer LEO mobile satellite system. IEEE Access 2020;8:42768–83.

[78] Wu Y, Hu G, Jin F, Zu J. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks. IEEE Access 2019;7:133641–52.

[79] Al-Hourani A. Session duration between handovers in dense LEO satellite networks. IEEE Wirel Commun Lett 2021;10(12):2810–3284.

[80] Al-Hourani A. A tractable approach for predicting pass duration in dense satellite networks. IEEE Commun Lett 2021;25(8):2698–702.

[81] Li Y, Wang S, Zhou W. A novel dynamic resource optimization method in LEO-MSS downlink with multi-service based on handover forecasting. In: Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Computer and Communications; 2019 Dec 6–9; Chengdu, China. New York City: IEEE; 2019. p. 809–14.

[82] Marchese M, Moheddine A, Patrone F, TdCola, Mongelli M. QoS – aware handover strategies for Q/V feeder links in VHTS systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications; 2020 Jun 7–11; online. New York City: IEEE; 2020. p. 1–7.

[83] Miao J, Wang P, Yin H, Chen N, Wang X. A multi-attribute decision handover scheme for LEO mobile satellite networks. In: Proceedings of the Smart Computing and Communication: 6th International Conference, SmartCom 2021; 2021 Dec 29–31; NewYorkCity, NY, USA.NewYorkCity: IEEE.p.938–42.

[84] Zhang C, Zhang N, Cao W, Tian K, Yang Z. An AI-based optimization of handover strategy in non-terrestrial networks. In: Proceedings of the 2020 ITU Kaleidoscope: Industry-Driven Digital Transformation; 2020 Dec 7–11; online. New York City: IEEE; 2020. p. 1–6.

[85] Zhou D, Sheng M, Wang Y, Li J, Han Z. Machine learning based resource allocation in satellite networks supporting Internet of Remote Things. IEEE Trans Wirel Commun 2021;20(10):6606.

[86] Wang J, Mu W, Liu Y, Guo L, Zhang S, Gui G. Deep reinforcement learning-based satellite handover scheme for satellite communications. In: Proceedings of the 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing; 2021Oct 20–22;Changsha,China.NewYorkCity:IEEE;2021.p.1–6.

[87] Zhao Y, Xiao A, Wu S, Jia H. Link quality–aware handover planning for space–aerial – terrestrial integrated networks. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference; 2023 Dec 4 – 8; Kuala Lumpur, Malaysia. New York City: IEEE; 2023. p. 6603–8.

[88] Zhou Y, Meng R, Xiong H, Han S, Xu X. Evolutionary game-based vertical handover strategy for space – air – ground integrated network. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference; 2023 Mar 26–29; Glasgow, UK. New York City: IEEE; 2023. p. 1–6.

[89] Zhang N, Zhang S, Yang P, Alhussein O, Zhuang W, Shen XS. Software defined space – air – ground integrated vehicular networks: challenges and solutions. IEEE Commun Mag 2017;55(7):101–9.

[90] Li J, Xue K, Liu J, Zhang Y, Fang Y. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite–terrestrial integrated networks. IEEE Netw 2020;34(1):188–95.

[91] Yang H, Liu W, Li H, Li J. Maximum flow routing strategy for space information network with service function constraints. IEEE Trans Wirel Commun 2022;21(5):2909–23.

[92] Yang H, Liu W, Wang X, Li J. Group sparse space information network with joint virtual network function deployment and maximum flow routing strategy. IEEE Trans Wirel Commun 2023;22(8):5291–305.

[93] Gao X, Liu R, Kaushik A. Virtual network function placement in satellite edge computing with a potential game approach. IEEE Trans Netw Serv Manag 2022;19(2):1243–59.

[94] Gao X, Liu R, Kaushik A. Service chaining placement based on satellite mission planning in ground station networks. IEEE Trans Netw Serv Manag 2021;18(3):3049–63.

[95] Zhang R, Xiong K, Du H, Niyato D, Kang J, Shen X, et al. Generative AI-enabled vehicular networks: fundamentals, framework, and case study. IEEE Netw 2024;38(4):259–67.

[96] Alraih S, Nordin R, Abu-Samah A, Shayea I, Abdullah NF. A survey on handover optimization in beyond 5G mobile networks: challenges and solutions. IEEE Access 2023;11:59317–45.

[97] Chen Q, Meng W, Han S, Li C, Quek TQS. Coverage analysis of SAGIN with sectorized beam pattern under shadowed-rician fading channels. IEEE Trans Commun 2023;71(8):4988–5004.

[98] Li J, Kang H, Sun G, Liang S, Liu Y, Zhang Y. Physical layer secure communications based on collaborative beamforming for UAV networks: a multi-objective optimization approach. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications; 2021 May 10 – 13; Vancouver, BC, Canada. New York City: IEEE; 2021. p. 1–10.

[99] Wang F, Zhang S, Shi J, Li Z, Quek TQS. Sustainable UAV mobility support in integrated terrestrial and non-terrestrial networks. IEEE Trans Wirel Commun 2024;23(11):17115.

[100] Yang L, Yang X, Bu Z. A conditional handover strategy based on trajectory prediction for high-speed terminals in LEO satellite networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops; 2024 Jun 9–13; Denver, CO, USA. New York City: IEEE; 2024. p. 1697–701.

[101] R2-2210353: Further view on idle- and connected-mode NTN mobility (Release 18). 3GPP standard. Valbonne: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); 2022.

[102] Li J, Wang M, Xue K, Li R, Yu N, Sun Q, et al. Fidelity-guaranteed entanglement routing in quantum networks. IEEE Trans Commun 2022;70(10): 6748–63.

[103] Du J, Jiang C, Benslimane A, Guo S, Ren Y. SDN-based resource allocation in edge and cloud computing systems: an evolutionary Stackelberg differential game approach. IEEE/ACM Trans Netw 2022;30(4):1613–28.

[104] Wood T, Ramakrishnan KK, Hwang J, Liu G, Zhang W. Toward a software-based network: integrating software defined networking and network function virtualization. IEEE Netw 2015;29(3):36–41.

[105] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho JL, Bouten N, De Turck F, Boutaba R. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges. IEEE Commun Surv Tutor 2016;18(1):236–62.

[106] Bertaux L, Medjiah S, Berthou P, Abdellatif S, Hakiri A, Gelard P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks. IEEE Commun Mag 2015;53(3):54–60.

[107] Ammar S, Pong Lau C, Shihada B. An in-depth survey on virtualization technologies in 6G integrated terrestrial and non-terrestrial networks. IEEE Open J Commun Soc 2024;5:3690–734.

[108] Zhang N, Liu YF, Farmanbar H, Chang TH, HongM, LuoZQ. Networkslicing for service-oriented networks under resource constraints. IEEE J Sel Areas Commun 2017;35(11):2512–21.

[109] Chen WK, Liu YF, Liu F, Dai YH, Luo ZQ. Towards efficient large-scale network slicing: an LP dynamic rounding-and-refinement approach. IEEE Trans Signal Process 2023;71:615–30.

[110] Liu W, Yang H, Li J. Multi-functional time expanded graph: a unified graph model for communication, storage, and computation for dynamic networks over time. IEEE J Sel Areas Commun 2023;41(2):418–31.

[111] Gu P, Li R, Hua C, Tafazolli R. Dynamic cooperative spectrum sharing in a multi-beam LEO–GEO co-existing satellite system. IEEE Trans Wirel Commun 2022;21(2):1170–82.

[112] Ge R, Bian D, An K, Cheng J, Zhu H. Performance analysis of cooperative non-orthogonal multiple access scheme in two-layer GEO/LEO satellite network. IEEE Syst J 2022;16(2):2300–10.

[113] Khan WU, Ali Z, Lagunas E, Mahmood A, Asif M, Ihsan A, et al. Rate splitting multiple access for next generation cognitive radio enabled LEO satellite networks. IEEE Trans Wirel Commun 2023;22(11):8423–35.

[114] TR 23.700-47: Study on architectural enhancements for 5G multicast-broadcast services; phase 2 (Release 18). 3GPP standard. Valbonne: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); 2022.

[115] Wang F, Geraci G, Quek TQS. Optimizing cache content placement in integrated terrestrial and non-terrestrial networks. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference; 2023 Dec 4–8; Kuala Lumpur, Malaysia. New York City: IEEE; 2023. p. 6609–14.

[116] Li X, Feng G, Sun Y, Qin S, Liu Y. A unified framework for j oint sensing and communication in resource-constrained mobile edge networks. IEE E Trans Mobile Comput 2023;22(10):5643– 56.