

5G 融合卫星网络研究综述

杨力¹, 潘成胜², 孔相广³, 黄琦龙¹, 戚耀文¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;
3. 大连大学通信与网络重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要: 在总结 5G 融合卫星网络 (5GSIN) 的标准化工作和国内外研究现状的基础上, 对 5GSIN 的关键技术、应用和网络架构几个重点方向的研究进展进行了阐述与分析。针对融合网络异构性强、时空尺度大而导致的关键问题, 提出了对 5GSIN 架构的思考, 并设计了多层分布式异构融合网络架构和架构管理方法。最后, 从智能化网络角度分析 5GSIN 未来发展的几个重点方向, 以期对相关领域的研究提供一定的参考。

关键词: 一体化网络; 异构网络; 体系结构; 多接入边缘计算; 网络功能虚拟化; 智能化网络

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022066

Review on 5G-satellite integrated network

YANG Li¹, PAN Chengsheng², KONG Xiangguang³, HUANG Qilong¹, QI Yaowen¹

1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3. Key Laboratory of Communication Network and Information Processing, Dalian University, Dalian 116622, China

Abstract: Based on the reviews of standardizations and many other works of 5G-satellite integrated network (5GSIN), the research progress of 5GSIN key technologies, applications and network architectures were expounded and analyzed. Aiming at the key problems caused by the strong heterogeneity and large spatio-temporal scale of 5GSIN, the multi-layer distributed network architecture was proposed, and the architecture management method was designed. Finally, several key directions of the future development of 5GSIN were analyzed from the perspective of intelligence, in order to provide some references for research in related fields.

Keywords: integrated network, heterogeneous network, architecture, MEC, NFV, intelligent network

0 引言

从 1986 年 1G 诞生至今, 以 5G 为代表的移动互联网正渗透到现代生活的每一个角落。对比 4G, 5G 的速率得到了大幅提升, 并且涵盖了增强型移动宽带 (eMBB, enhanced mobile broadband)、大连接物联网 (mMTC, massive machine type communication) 和超高可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable and low-latency communication) 三大应

用场景。5G 网络的最终目标是 10 Gbit/s 的数据率、1 ms 的端到端时延、每平方米 100 万台的设备数量和 100% 的覆盖范围^[1], 需要根据特定应用场景和应用需求, 结合 5G 的最新技术, 构建这些需求共存的生态体系, 进而推动垂直行业发展, 实现数字化生态网络环境。

在全球通信覆盖方面, 目前主要以城市覆盖为主, 对于一些恶劣的环境, 如沙漠、森林、山脉和海洋, 陆地 5G 网络仍不能完全覆盖。预计

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-03-07

通信作者: 孔相广, kxglight@foxmail.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U21B2003, No. 61931004)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U21B2003, No.61931004)

有 80% 以上的陆地地区和 95% 以上的海洋区域没有网络服务^[2-3]。同时, 根据国际电信联盟的报告, 在互联网高度发达的今天, 全球仍然有近一半的人口无法接入网络服务。虽然一些国家的网络整体覆盖率接近饱和, 但是有的国家的互联网接入率仅有 20% 左右。以 5G 为代表的地面通信网络由于灵活性差、易受地域影响、部署成本昂贵等特点难以为偏僻场景提供有效的通信手段。因此, 探寻并开发 5G 的替代网络或者补充网络, 为世界各地提供无处不在的覆盖和连续的网络服务势在必行。

卫星在现代通信中扮演重要角色。卫星通信具有通信距离远、覆盖区域广、不受地形和地质灾害影响等优势, 有望作为 5G 网络的有力补充, 扩大 5G 的覆盖范围和应用场景^[4], 为实现 5G 大容量多设备接入提供有力支撑^[5], 实现真正意义上的全球万物互联。并且短期来看, 卫星将是地面网络实现无处不在的通信覆盖的唯一方式, 也是实现空地海一体化未来网络的有效途径^[6-8]。第三代合作伙伴计划 (3GPP, the 3rd generation partnership project) 报告^[9]中阐明了用卫星结合 5G 可以实现的服务: 1) 为没有地面网络服务的偏远地区和可以更高效地得到卫星系统支持的地区提供服务; 2) 为大规模连接场景的城市提供 mMTC 服务; 3) 为用户密度低的大面积地区, 如低每用户平均收入 (ARPU, average revenue per user) 区域、荒野等提供服务。卫星无处不在的可用性和连接性有助于加速 5G 网络向地面、海上和空中提供广泛的连接和全球部署。全球移动通信系统协会估计, 到 2025 年, 连接到 5G 网络的终端数量将超过 18 亿^[10], 迫切需求网络实现无处不在的连接, 构建“任何人和任何事物都可以随时随地连接”的世界, 这促使网络与通信系统追求新一轮的发展。因此, 将卫星接入网集成到 5G 实现天地一体化, 更好地利用卫星潜力来满足 5G 需求, 是下一步发展和前进的方向。

基于上述原因, 通信与网络领域一直致力于地面网络和卫星网络集成的研究, 对融合网络的架构设计^[11-20]、关键技术^[8,11,20-26]和应用场景^[27-41]等方向进行了广泛的研究, 并取得了有效的进展。

1 研究进展

本节对 5G 融合卫星网络 (5GSIN, 5G-satellite integrated network) 的研究进展进行阐述。首先,

总结相关国家、组织、机构的整体研究工作; 然后从关键技术、应用方向、网络架构三方面分析国内外的研究成果。

1.1 整体研究工作

随着 5G 的建设并面向 6G 网络的发展需求, 世界各国、地区及组织对星地融合网络进行了广泛研究, 归纳总结如表 1 所示。同时, 3GPP 从 R14 开始研究卫星通信在 5G 中的作用和优势, 使 5G 系统能够支持包括卫星通信在内的非地面网络 (NTN, non-terrestrial network) 是其一直在探索的方向^[42], 并持续致力于 5GSIN 的标准化工作。报告^[43]中对 5G 的性能目标和基本功能做出要求, 指出 5G 应支持固定、移动、无线和卫星接入技术。R15 说明了 5G 与卫星融合下 eMBB 和 mMTC 场景的使用案例^[44], 同时在报告中定义了非地面网络的可能角色以及星地集成的技术细节。R16 提出了卫星结合到 5G 中的具体用例^[45-46], 包括卫星覆盖下的广播和多播、使用卫星网络的物联网等场景。R17 研究了卫星接入 5G 的网络架构、管理和编排方案等关键问题, 并研究了相关解决方案^[47]。图 1 给出了从 2016 年的 R14 到当前的 R17, 3GPP 对于 5G 网络及 5G+卫星融合网络的标准化研究。

1.2 关键技术

本节将分析推动 5GSIN 发展的创新技术手段, 包括软件定义网络 (SDN, software defined network)^[48]和网络功能虚拟化 (NFV, network function virtualization)^[49]、多接入边缘计算 (MEC, multiaccess edge computing) 和数字孪生 (DT, digital twin)。这些技术将是解决融合网络关键问题和实现融合网络高效且低时延传输的重要因素, 对融合网络的设计、优化、应用有重要的推动作用。

1) SDN 和 NFV

SDN 和 NFV 被认为是能够满足 5G 需求和应用的重要技术, 是实现星地融合的关键要素。SDN 是一种网络管理方法, 通过网络底层资源抽象、网络编程和自动化部署来简化网络操作和维护, 实现动态、高效的网络配置, 提高网络性能。NFV 是一种网络架构技术, 它不局限于硬件结构, 将传统的由专有硬件实现的功能 (防火墙、域名服务器等) 通过网络虚拟化和计算虚拟化技术转变为标准的硬件实现的虚拟化网络功能 (VNF, virtualized network function)。NFV 能够将单个物理网络虚拟化为多个虚拟网络, 共享网络资源, 可提高网络资源的利用率。

表 1 5GSIN 研究现状

国家和地区	项目	支持机构	总体目标	应用场景	时间
美国	Omnispace	Omnispace	重新定义 21 世纪的移动连接, 探寻从太空整合 5G 的能力	加速和扩大 5G 移动宽带在全球的覆盖范围	2016 年
	AST SpaceMobile	AST & Science	填补全球 50 多亿人的网络覆盖空白	在危机或自然灾害中的连接; 连接未连接	2019 年
欧洲	5G-VINNI		建立端到端的设施验证 5G 技术性能, 探索垂直行业解决方案	公共安全、媒体等垂直行业解决方案	2018 年
	SANSA	Horizon 2020	提高回程能力, 卫星与地面无缝集成、共享频谱和拓扑重建	应用于农村和城市地区网络服务	2016 年
	Sat5G		为 5G 开发一个经济高效的“即插即用”卫星通信解决方案。	5G 固定/移动回程, 边缘内容交付等	2017 年
	SATis5	ESA	构建一个大型实时端到端的 5G 卫星地面网络概念验证平台	5G 应用场景演示, 实时空中通信现场演示	2017 年
	EdgeSAT		为 SatCom 带来边缘网络概念和能力的优势	应用于从卫星角度处理边缘网络计算问题	2019 年
韩国/欧洲	5GALLSTAR	Horizon 2020、EU-Korea	开发一套技术和验证系统, 促进卫星网络与 5G 的集成	提供支持欧洲和韩国地区的关键应用	2018 年
加拿大	Telesat	Telesat	提供高容量、高安全性、高可靠性和低时延的高速网络	提供农村网络服务和全加拿大网络连接	2022 年
卢森堡	SES	SES	构建全球内容连接解决方案, 连接更多地方的更多人	赋能于高价值的 5G 应用和使用案例	2016 年
中国	银河航天	银河航天	让 5G+卫星连接地球每个角落, 建立覆盖全球的天地融合网络	陆地/海洋通信网, 工业服务	2018 年
	鸿雁星座	中国航天	沟通连接万物、全球永不失联	全球无缝覆盖的通信保障和互联网接入	2018 年

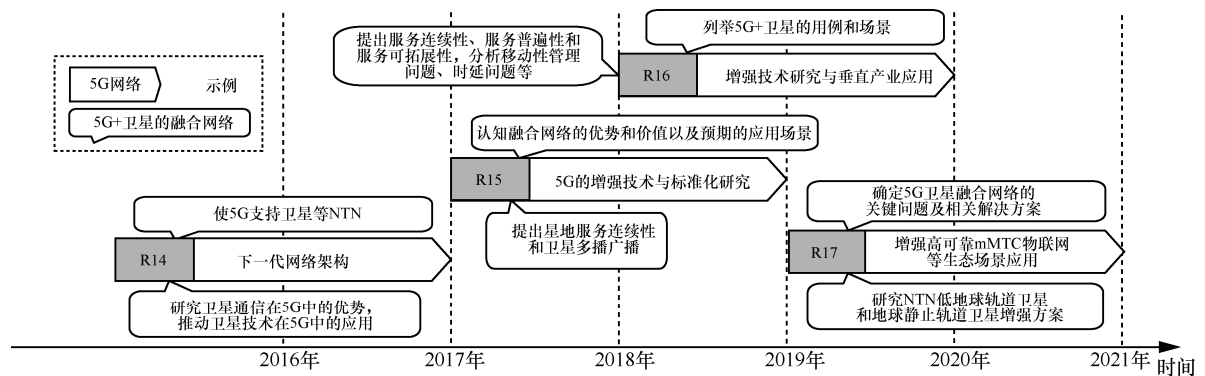


图 1 3GPP 对于 5G 网络及 5G+卫星融合网络的标准化研究

在 5GSIN 中, 由于资源异质而导致的端到端资源管理和调度困难、异构网段连接高动态性高复杂性、网络间接口不统一等现状以及移动性管理、资源分配和回收、服务质量管理困难等问题, 亟须进行统一的管理和控制以及实现动态资源分配。SDN 和 NFV 可以支持不同技术的共存和统一, 能够增强异构网络灵活性, 降低网络复杂性^[26,50]。通过 SDN 和 NFV 使能, 使卫星地面网络脱离专有硬件限制, 实现卫星地面网络融合相关组件更加灵活的集成、灵活动态的网络切片、异构网络之间多种接

入技术的高效互联和网络基础设施及资源的动态共享、异构网络间的按需服务保障和异构链路及边缘节点资源的集中化管理等功能^[8,11,21-22]。

2) MEC

传统的云计算与用户设备之间的距离很远, 难以满足 5G 网络对速率的更高要求。因此, 为了减少网络时延, 力图使计算资源更接近用户, 文献[51-52]提出了多接入边缘计算的概念。MEC 是网络架构上的一种技术, 它将网络的数据处理中心下沉到用户设备边缘, 目的是缓解核心网压力和应对用户对低

时延应用场景日渐增长的需求, 为用户提供更快的服务和达到更好的网络性能^[53-54]。

在 5GSIN 中, 通过提供协同缓存^[55]、协同卸载^[23]、内容广播多播^[20]等服务, 用户可以随时随地获得多层次的计算与存储服务, 从而降低网络时延, 保证了网络任务处理的性能; 同时, 利用卫星的计算能力和存储能力, 考虑在卫星上部署 MEC 以提供低时延和更泛在的网络应用服务^[25]。为此, 文献[24]考虑用边缘计算技术提高高速地面卫星网络的服务质量 (QoS, quality of service), 并讨论了 MEC 部署在不同位置不同场景下可能提供的服务。文献[2]建立了卫星边缘计算卸载的系统模型。考虑了由于卫星移动引起的通信中断情况下的任务执行情况, 具体分为计算任务被本地设备执行或被卸载到卫星执行 2 种情况。文献[56]在物联网系统中应用边缘计算为邻近设备提供存储和计算资源, 以满足物联网的实时和低能耗通信需求。

边缘计算技术为 5G 网络在时延和网络负载等指标的优化上发挥了巨大作用, 在 5GSIN 中有着巨大的潜力。它实现了数据存储和网络管理的去中心化并促使网络向分布式发展, 这契合具有全球性特征的一体化融合网络的发展。在融合网络的设计中, 应该从边缘计算的基本架构出发, 利用边缘平台属性, 丰富边缘平台功能, 进而提升网络 QoS 和用户体验质量 (QoE, quality of experience)。

3) DT

数字孪生技术萌芽于 20 世纪 60 年代美国宇航局, 并于 21 世纪初正式提出。人工智能技术的蓬勃发展和 5G 应用的大面积落地为 DT 带来了新的发展契机。将 DT 应用于 5G 卫星融合网络设计、规划和建设中, 可以实现网络快速升级演进和提前布局, 为新技术的应用和新架构的实验提供更广阔的空间^[57-58]。

DT 将在 5GSIN 的设计、开发、测试、验证、运行、维护的全生命周期发挥重要作用。通过深度学习、数字建模等手段, 构建 5GSIN 的时空数字孪生体, 数字孪生体将根据实体网络的数据分析、数据感知和数据处理结果, 实时地对数据进行分析、对网络行为进行预测和决策; 通过分析网络流量、资源余量、节点属性等因素之间的相互作用, 预测网络未来状态, 计算并匹配合适的业务传输路径和资源分配方法, 并适时调整网络节点的规划和部署策略。对 5GSIN 用数字孪生进行规划与建设, 将从

时空整体视角, 反映网络全局运行和演化趋势, 形成从数据建模、行动决策到反馈优化的网络闭环仿真范式, 具有更强的交互性和科学性。

当前, 5G 网络仍处在建设阶段, 5GSIN 的具体方案仍在实验当中, 发射多少卫星、卫星载荷如何确定、地面边缘节点部署密度多大、网络服务区域如何划分等一系列问题亟待解决。5G 融合卫星网络的研发及部署昂贵, 错误的决策将导致网络建设成本难以控制, 并阻碍研发工作的及时高效施行。应用 DT 技术, 设计异构融合网络架构模型, 建立虚拟数据模型, 形成现实网络、虚拟网络和二者间双向实时的交互方法, 可以为网络流量预测、网络资源分配、网络拓扑生成、网络安全评估、网络效能分析等建立前瞻性模型, 提高开发效率, 降低开发成本。

1.3 应用方向

1.3.1 重塑传统应用领域

5GSIN 将极大增加单一 5G 网络和单一卫星网络的应用场景, 拓宽 2 种独立网络的应用范围, 重塑网络传统应用领域。在星地融合网络中, 卫星的主要角色以及主要的应用场景将表现在以下方面。

1) 网络服务增益性。卫星服务于地面网络, 使地面网络实现更好的服务, 具体体现如下。

① 地面连接作为终端用户接入互联网的主要连接方式; 卫星作为辅助连接方式, 即地面链路无法提供服务时, 作为备用链路提供服务, 从而提高服务可用性和可靠性。此时, 虽然服务质量可能下降, 但在极端场景仍然可能发挥重要作用^[59]。在自然灾害事件中, 卫星连接或许是终端用户连入互联网的唯一选择^[60]。

② 卫星用来卸载地面网络的数据。即地面网络流量达到峰值时, 通过卫星来建立额外的连接, 以解决网络拥塞, 保证地面网络高流量状态下的业务性能和用户的体验质量。

③ 卫星作为与地面网络对等地位的并行独立网络^[61]同时提供服务, 提高网络可用性和弹性。用户侧路由器可以收集所有本地流量信息, 并根据不同服务请求标准, 实现多链路聚合。

2) 泛在连接性。为实现网络无处不在的连接, 具体体现如下。

① 扩大 5G 网络覆盖范围, 为地面网络难以到达的地点 (山区、偏远地区等) 提供连接^[62]。

② 为工业/农业物联网提供连接服务^[41,47]。如森

林火灾预警^[63]、海洋环境监测与资源勘探^[64]等。通过卫星、传感器、无人机等连接设备实现便捷的服务。

3) 服务连续性。为网络终端设备的跨域迁移提供服务保障,具体体现如下^[65]。

从终端角度看,为移动设备(如船舶、车辆、火车、飞机等持续移动终端)提供直接连接或补充服务。这些场景下的终端移动性较强,在不同区域内频繁切换。同时,地面信号站难以为这些设备提供大范围的连接服务。由于卫星的广域连接特性,可以保存切换设备的上下文信息,在大区域的切换中保证终端服务的连续性。

从卫星角度看,由于卫星在不断运动中,地面节点与卫星绑定的 IP 地址也在持续改变。此时需要保证在卫星运动过程中地面与卫星直连节点的服务连续性。

基于上述分析,本文定义 5GSIN 五大场景,分别是城市网络服务、乡村网络服务、智能工业/制造业网络服务、无人区(野外/海洋)网络服务和移动交通网络服务,如图 2 所示。

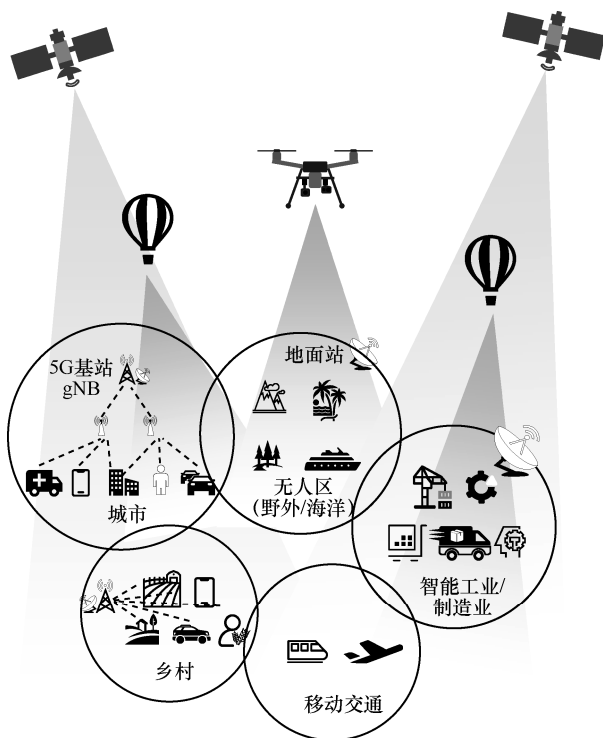


图 2 5GSIN 的应用场景

1.3.2 赋能全新应用场景

5GSIN 将赋能 5G 应用前景,国内外的研究者对其进行了广泛探索,对面临的问题也进行了充分研究,研究主要集中在面向物联网的 mMTC 服务

和面向终端用户的 eMBB 服务。高时延敏感性需求的 URLLC 服务是当前卫星通信网络很难满足的,所以不是当下 5GSIN 所考虑的应用场景。

1) mMTC 场景

5G 将为物联网赋予更大的能量,但地面物联网由于其局限性无法实现全球覆盖,卫星通信可以拓展地面物联网的业务范围^[37-39]。预计在未来,构成物联网的互联物体将在全球领域达到千亿量级,利用低地球轨道卫星技术^[27-31]的广域连接性来补充地面网络,以实现偏远地区的密集覆盖是一个有吸引力的发展方向^[32]。在车联网领域,路基通信单元、5G 基站和卫星网络的融合,结合 MEC 技术和 SDN 平台,可实现路况感知和高精度地图定位,为车辆规划路径和危险预警,对驾驶员进行驾驶状态监测并及时回传驾驶员状态信息。5G+MEC 可以提供低时延、高可靠的车辆行驶信息,结合高精度卫星定位系统,建立安全可用的车联网系统。在工业或农业领域,得益于低地球轨道卫星的低时延优势,为人口稀少地区的应用带来了新的机遇。利用低地球轨道卫星作为 5G 的补充,避免了部署地面光缆和基站带来的高昂成本,同时为不适合人工直接操作的工序提供了解决方案,例如,可以实现远程目标的精准定位;可以通过卫星远程发送机器操作指令,进行农药喷洒、机器运作、码头货物运输、能源开采等,节约人力成本,实现生产智能化,大大提高工业/农业生产力,促进经济社会数字化转型。

2) eMBB 场景

eMBB 是 5G 中直接面向用户的应用场景,面对区域性爆发的设备连接数量和全球更广泛的网络覆盖需求等问题。同时,对于融合网络支持航空飞行服务的需求也正在广泛的进行。这些服务需要更高的数据速率、更大的连接范围来支持更多用户数据的传输^[33],在满足大量设备接入的同时保证 QoS 是关键目标之一^[34]。在媒体资源的传送中,卫星将在 5G 回传中发挥关键作用,它将高效且高性能地向大规模分散地区提供大面积多播及广播视频内容^[35]。作为 4G 网络中最成功的服务之一,流媒体将成为卫星技术的关键用例。借助 5G,支撑 4K/8K 视频和在线 VR/AR 游戏等大带宽流媒体应用的实现,在卫星网络的使能下,这些沉浸式应用可以在全球范围内以较高的速率和较低的时延进行传输,实现向移动设备的确定性交付。

1.4 网络架构

架构是网络的基础, 由于技术的发展和应用的驱动, 国内外对融合网络架构设计进行了诸多的研究。文献[19-20]提出了利用卫星地面网络实现双边计算卸载的体系架构, 充分发挥了卫星广覆盖的优势, 解决地面网络服务覆盖范围受限的问题。但这种架构适用于偏远地区, 不适用于流量热点地区。文献[11]提出了一个为 eMBB 场景设计的卫星接入地面网络体系结构, 卫星回程网络通过地面网关连接到 5G 核心网, 实现卫星与 5G 的融合。用户终端可以直接与卫星通信(仅卫星终端)或者通过地面卫星中继连接到卫星; 同时, 利用网络编码算法实现链路流量聚合, 提高了系统可靠性和数据交付的成功率。以该架构为基础的融合网络通信演示系统已经在 2019 年的世界移动通信大会上成功进行展示^[12]。

然而, 上述架构没有充分考虑到边缘计算技术和网络切片技术在融合网络中的应用。例如, 没有考虑到基站间的信息数据共享, 也没有考虑到地面网络之间或地面与卫星网络之间的信息共享。在演进的 5GSIN 中, 由于考虑卫星的计算能力和存储能力, 卫星的角色将从传统的单纯提供转发功能的弯管模式向支持信息存储和处理的智能节点转变。在此基础上, 5GSIN 架构产生了多种方案, 终端可通过多种方式接入 5G 核心网(5GC, 5G core network), 并根据不同场景适时选择不同的接入策略。表 2 总结了不同 5GSIN 架构下地面站及卫星承担的角色。表 2 中, 地面站分为源站和宿站, 其中源站指接入卫星的地面站, 宿站指卫星回程接入的地面站。AAU 是有源天线单元, gNB 是 5G 基站, gNB-DU 是 5G 基站的分布单元, gNB-CU 是 5G 基站的集中单元。NR 空口是 5G 空中接口, F1 接口是 gNB-CU 与 gNB-DU 之间的通信接口, NG 接口是无线接入网和 5G 核心网之间的逻辑接口。

表 2 不同 5GSIN 架构下地面站及卫星承担的角色

源站	基站位置	卫星	宿站	回程方式
终端接入点	宿站	AAU	gNB	NR 空口
终端接入点	卫星/宿站	gNB-DU	gNB-CU	F1 接口
终端接入点	卫星	gNB	终端汇聚点	NG 接口
基站接入点	源站	转发	终端汇聚点	卫星

在 SDN/NFV 以及 MEC 技术的支持下, 文献[64]设计了一种空天地海一体化的海上网络体系结构。为了有效管理异构通信和计算资源, 采用了基于

SDN 的架构, 使融合网络更适合未来海洋的应用场景。文献[66]考虑直接在卫星上处理任务的场景以消除任务从卫星转移到地面云计算服务器所带来的传播时延, 提出了一个新的 MEC 网络架构并探索卫星的任务处理能力, 并为偏远地区或灾区的物联网移动设备提供 MEC 服务。为了满足物联网可靠稳定的连接, 保证数据采集和数据缓存过程的进行, 文献[56]设计了一种由卫星和无人机组成的空天地一体化移动边缘缓存物联网系统架构, 其中, 低地球轨道卫星广播数据, 无人机从分散的地面传感器收集数据。文献[24]提出了一种以低地球轨道卫星星座作为计算载体, 地球静止轨道卫星作为卫星主干网中继载体, 以及地面站和地面主干网支撑的融合网络体系架构, 该架构能够同时支持地面稀疏用户区域和高密度用户区域的应用场景。文献[23]设计了一种由卫星网络、地面网络、边缘计算集群和用户设备组成的卫星地面边缘计算网络架构, 并设计了计算存储资源虚拟化层、融合边缘计算网络层、服务和应用层三层体系架构。

尽管研究者通过最新的技术手段对卫星地面网络进行了广泛的研究并取得了一定成果, 但是对于影响融合网络运行的很多特征考虑的并不够全面。5GSIN 具有网络结构复杂, 资源异质、业务种类多、时空尺度大, 拓扑频繁切换、节点设备繁多等特点, 基于此, 本文对架构设计过程中需要考虑的问题总结如下。

1) 设备异构性

5G 将具备千亿级的连接能力, 拥有种类繁多的网络设备类型, 例如车联网、用户设备终端、物联网终端、高速移动的高铁或飞机终端等。这些设备的计算与存储能力千差万别, 网络接入协议不统一, 所承载的任务类型对于网络节点的计算及存储能力也存在差异性需求。这些异构的设备、数据、资源使设备接入、平台迁移面临较大阻碍。5GSIN 应确保这些异构设备的有效接入和其承载业务的高效执行。

2) 服务连续性

服务迁移性体现在接收服务终端的迁移性和提供服务节点的迁移性。由于卫星和用户设备都处于高速运动状态, 如果用户设备频繁地切换与其通信的网络节点, 将极大地影响任务的高效执行, 融合网络要满足迁移过程中的服务连续执行。在服务迁移过程中, 要保证异质节点资源的可用, 异构网络的异质资

源管理是重要的问题。优秀的资源管理方法将改善资源冗余或资源不足导致的服务低效执行。5GSIN 需要为异构网络的异质资源提供统一的管理方法,对于资源分配及调度提供有效的手段。

3) 节点有效性

大量的 MEC 服务器、网络服务节点极易造成资源管理与调度困难、资源不足与资源冗余问题同时出现,使网络域间沟通困难,网络资源利用率低,边缘节点能力失效。同时,面对新接入的网络边缘节点,网络应做到对节点功能和属性的有效识别,对节点的资源进行有效的池化。所以,面对大量、广域分布的网络计算与缓存节点,亟须采取适当的管理策略。5GSIN 应该优化节点部署方法和保障策略,简化网络维护成本。

4) 信息时效性

信息时效性指同一节点收到同一类型信息的时间间隔,例如,工业生产中,试制设备连续收到同一操作指令的时间间隔。在 5GSIN 中,由于时空尺度大、网络环境复杂、信息传播路径长,极易使关键信息的更新滞后,导致信息时效性降低,信息失去价值。5GSIN 应为数据的信息时效性定义合适的衡量尺度和标准,满足大范围跨域数据传输的有效性。

5) 资源有限性

资源有限性体现在两方面。其一,区域计算和存储资源配置不均衡,难以满足区域应用需求;其二,需要适当的调度策略,为不同业务分配不同的资源,保证服务的确定性。因此,需要明确区域流量特性,根据流量特点确定计算和存储资源。5GSIN 应该在流量突发时,结合资源管理方法与网络节点管理方法,及时调度附近其他区域的闲置资源以应对任务的正常处理流程,满足网络需求。

通过关键技术使能以及应用场景的驱动,结合 5GSIN 的上述重点特征,网络架构将发生新的变化。为此,本文将从理论、技术和方法入手,对上述问题的拟解决方案提出思考,进一步提出 5GSIN 的架构设计方案。

2 网络架构设计

基于 SDN/NFV、MEC 等关键技术,本节首先提出 5GSIN 的架构设计思路,包括关于设备异构性、服务连续性、节点有效性、信息时效性和资源有限性五方面的解决方法构想;然后给出网络架构

的设计方案,方案集成了 1.2 节的几项关键技术并力图满足 1.3 节的应用场景;最后,设计网络架构管理方法以管理和维护网络架构。

2.1 设计思路

针对设备异构性问题,拟以设备功能为主要使能因素,抽象设备的潜在关键特点,确定设备功能类型,从而做到同类型设备的无差别接入。基于 5G 物联网物模型的概念^[67],将异构异质的物理设备抽象为“设备是什么、设备能做什么、设备能提供哪些服务”3 个特性,完成对设备形态、设备功能的结构化定义,实现不同设备能够以统一的标准对接平台,不同应用之间能够以统一标准进行数据互通。在 5G 卫星融合网络中,边缘节点除了承担边缘计算和存储的作用之外,考虑其边缘特性,同时将其作为设备区域自治管理的接入平台。为此,考虑将设备抽象功能集成到 MEC 平台。将设备抽象功能和应用处理功能放在 MEC 主机层,使设备按功能接入,脱离硬件约束,提升设备联动性与服务兼容性,实现设备间数据共享,使数据价值得到充分利用。

针对服务连续性和节点有效性问题,可基于 SDN 和 MEC 思想,让网络中的区域汇聚节点成为区域的数据中心和控制中心,承载 NFV 云化技术及 IT 系统,设置区域自治、集中管控的分层次网络体系。支持域内网络资源统一管理,域间多中心节点灵活高效数据共享,满足用户的跨域移动性与数据的跨域迁移需求。三层边缘节点管理方案如图 3 所示,三层边缘节点分别是地面层 L_1 、 L_2 和卫星层 L_3 。区域自治的网络节点部署与管理模式中,上层 MEC 节点承载动态 NFV 技术,域内子节点屏蔽域间可能发生的资源、内容、信令的交互操作,将资源管理与信息通信功能统一配置在上层 MEC 节点中。 L_1 子节点可配置在基站侧, L_2 可配置在城域网侧,满足城际的资源共享。 L_2 边缘节点覆盖范围更大,能够掌握更全面的区域网络信息,实现高效的服务迁移和节点有效性管理。 L_3 具有更大的全局视角,然而卫星的计算能力、存储能力以及通信距离存在限制,其掌握的全局信息可能不具有网络区域属性,所以负责具有跨区域大时空尺度的服务连续性管理。 L_2 与 L_3 联合部署,使网络管理更加灵活,资源利用更加充分,网络时延得到进一步降低。当发生服务迁移时,上级 MEC 节点进行资源的动态管理和任务的动态调度。承载动态 NFV 功能的高级 MEC 节点将保存切换终端任务处理的状态和

所需要的接入资源; 当系统中接入新的边缘节点后, 由当前节点层的上层对其进行配置, 读取节点计算存储能力, 平衡全域节点能力, 安排任务处理与调度优先级, 使节点有效配置, 任务高效处理。

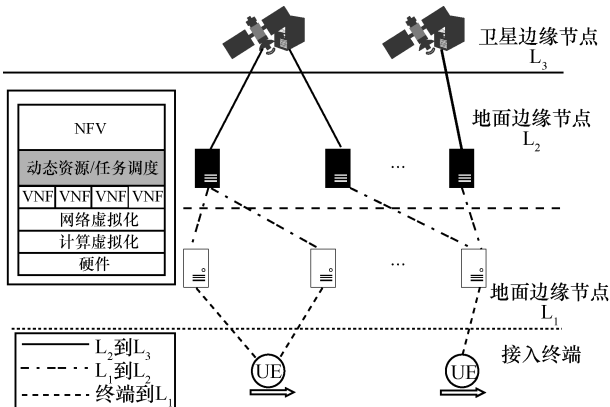


图3 三层边缘节点管理方案

针对信息时效性问题, 文献[68]引入信息年龄 (AoI, age of information) 理论来刻画信息时效性。信息年龄是用来量化信息新鲜度并改善网络性能的理论, 定义为系统当前时刻可用信息与该信息生成时刻的时间差。对于融合网络业务的处理, 如果信息年龄的值大于业务预先设定值, 则认为网络对该业务的传输为无效传输。有效性指标 AoI 用于刻画业务对链路的需求, 对于历史业务的 AoI 进行分析, 确定满足传输条件的最小 AoI 值用来调度链路资源, 保证高质量的业务需求。

针对资源有限性问题, 可设计一体化动态网络切片模式。由于 5GSIN 资源的有限性和任务的突发性, 静态网络切片模式将导致低资源利用率切片闲置, 高资源需求任务被服务能力低, 致使资源得不到充分利用, 任务也得不到及时处理。创建动态网络切片模式, 在任务启动时创建端到端切片, 在任务完成后删除切片, 回收资源, 实现切片与资源的动态调配, 灵活绑定, 从而达到优化网络频谱、充分利用网络资源、提高任务处理效率、降低网络时延的目的。同时, 动态网络切片实时感知业务对资源需求的优先级, 动态调整资源分配方案, 使用户 QoE 和网络 QoS 最大化。

2.2 设计方案

未来 5G 卫星融合网络应该充分利用 5G 网络现有技术的优势, 并深入挖掘这些技术融入卫星网络的潜在优势。因此, 本文提出了基于 MEC 的 5GSIN 架构, 如图 4 所示。

网络整体架构主要由地面网络、卫星网络和网络管理终端组成。首先, 泛在融合网络终端接入 gNB 或地面网关, gNB 之间通过 Xn 接口共享基站侧 MEC 资源, 实现边缘内容交付或计算能力卸载, 这是 5GSIN 的第一级边缘节点。在基站以上, 由于 5GSIN 的异构性, 在第二层边缘计算平台中需要进行动态业务链选择, 从而匹配最佳的业务传输链路; 同时, 受益于 SDN 和 NFV 技术的支持, 为不同终端、不同类型的网络业务划分不同的虚拟网络传输通道, 即网络切片, 通过定制化的网络环境, 保证不同业务的 QoS 需求。终端设备可以直接与卫星通信 (仅具有卫星通信能力的终端) 或者通过任何一级边缘平台侧的地面网关中继连接到卫星, 卫星回程网络通过地面网关连接到 5G 核心网, 实现 5G 与卫星的融合。

卫星节点同时也是边缘计算和存储节点。由于卫星具有计算能力, 可以在卸载远程任务的同时对其进行处理或预处理, 将处理结果交付给目的终端或将预处理结果传递给远程计算节点进行继续处理。卫星的计算能力将大幅减少网络中流量, 实现网络资源的高效利用。由于卫星具有存储能力, 一方面, 实现网络数据及内容的缓存并进行广播, 这对网络热点内容的大规模推送具有良好效果。另一方面, 由于星间节点的移动性, 对于无法一次性交付的内容, 可以选择分批传送, 这样卫星可以灵活地根据内容的优先级在不同时间片传送不同内容或内容的不同部分, 而不需要在某一个长时间片统一进行传送, 提高了网络的灵活性。网络管理终端负责实现 5GSIN 中的异质资源统一调度与管理、链路选择与拓扑重建、一体化全域任务调度等功能。通过这种架构充分利用星上计算资源和存储资源以及卫星广覆盖的优势, 考虑了地面资源覆盖不充分的问题, 并缓解了地面链路负载、减少远端资源响应时延的问题。同时, 多级 MEC 服务器协同为用户提供服务, 形成了具有多级计算及存储能力的卫星地面网络, 增加网络的灵活性和稳健性。

利用数字孪生技术可建立真实网络环境的虚拟镜像, 虚实网络之间进行双向联通。具体而言, 真实网络向虚拟网络提供数据采集、数据感知、数据处理等功能, 根据真实网络数据, 虚拟网络向真实网络提供数据分析结果, 对网络进行行为预测并对网络进行最终的行为决策。

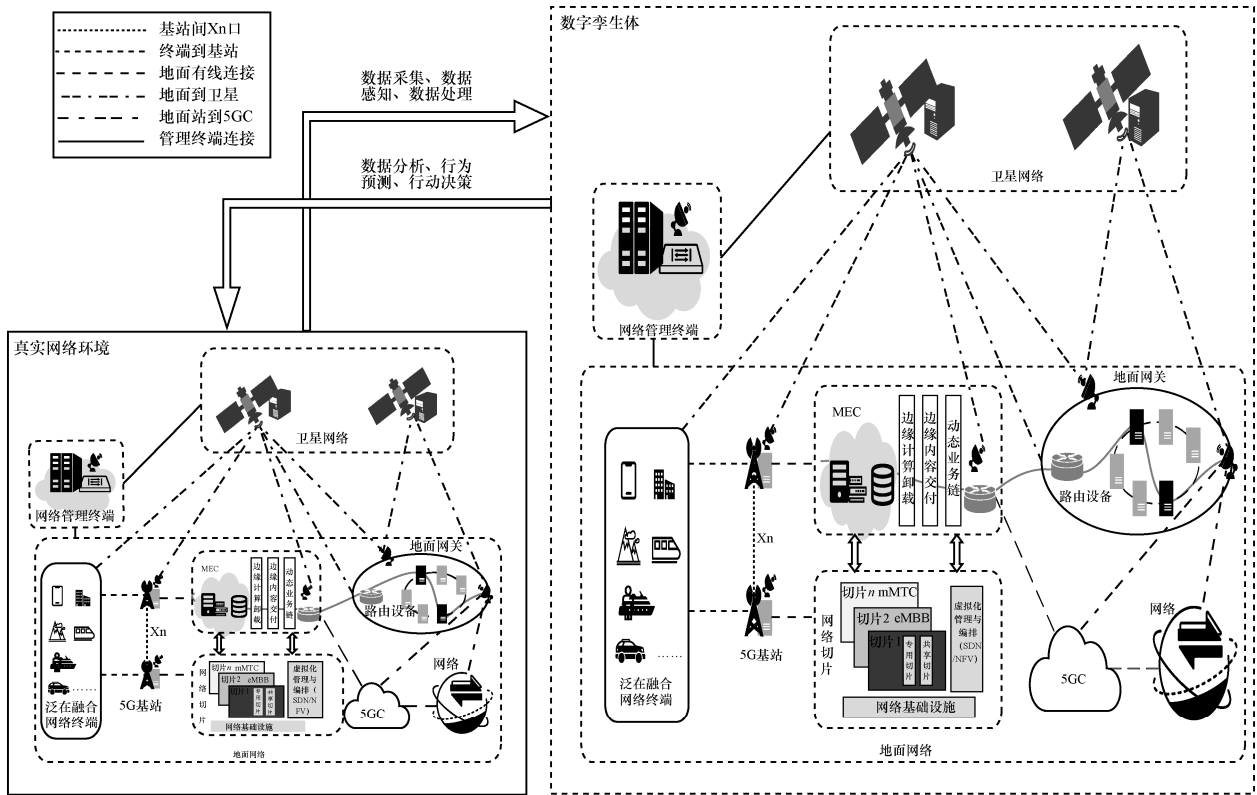


图 4 基于 MEC 的 5GSIN 架构

2.3 架构管理方法

新的架构将面临新的问题，5GSIN 是异构、多接入的网络，需要对无线传输参数、网络资源、应用等方面进行统一的管理和控制。3GPP 也正在为 5G 网络中集成卫星组件的管理和协调定义标准。它确定了与业务角色、服务、网络管理以及集成卫星组件的 5G 网络的协调相关的关键问题^[18]。其中，为了解决融合网络中较大的传播时延、路径损耗以及卫星移动中较大的多普勒偏移^[69-70]等信道损伤问题^[7,71]，3GPP 在 R16 中规定了基于 32 个停止-等待的混合自动重传请求 (HARQ, hybrid automatic repeat request) 进程的连续传输，即在收到前一个传输的反馈之前，一个 HARQ 进程不能在新的传输中重用，当所有的 HARQ 进程都在等待反馈时，传输会停止。同时，3GPP 提出在完整的往返时延 (RTT, round-trip time) 通过之前重用同一 HARQ 进程的方案，以避免停止运行^[47]，此时，HARQ 反馈过程将被禁用。对于上行链路，当没有 HARQ 反馈时，5G 基站可以通过发送新数据的授权或重传授权，动态地决定是否在 RTT 通过之前重用 HARQ 过程。

在 R17 中，3GPP 提出了一种网络时间同步方

法，具体如下。gNB 首先为终端提供一个公共的定时提前 (TA, timing advance) 值，随后在卫星和 gNB 之间发送 RTT 信号，终端将获得的 RTT 添加到公共 TA 值中，得到全 TA 值。全 TA 值作为终端的下行接收定时和上行传播定时的偏移量，即下行时隙 n 从 t_1 开始，则上行时隙 n 从 $t_1 - \text{全 TA 值}$ 开始。这使 UE 可以在 gNB 上发送准确的上行传输，用于随机接入和数据传播。

基于以上分析，结合网络架构设计方案，本文提出如图 5 所示的架构管理方法，共分为 6 层。其中，无线传输层旨在对 5GSIN 无线传输的相关参数进行设计，包括 TA 值和 HARQ 的管理等；SDN 和 NFV 技术使能层对网络资源及设备进行池化管理，提供设备的统一调用接口，为资源的全局调度提供基础，实现灵活动态组网；资源层负责管理并分配网络的计算和存储等资源，包括边缘设备资源、云服务中心资源等；地面和卫星控制层主要对分布式 MEC 设备、卫星大尺度移动性等进行管控；集中控制层对应网络管理终端实现的功能，提供 5GSIN 状态全局监控、网络拓扑弹性管理等服务；应用层为 5GSIN 支持的应用和服务提供协议接口和服务保

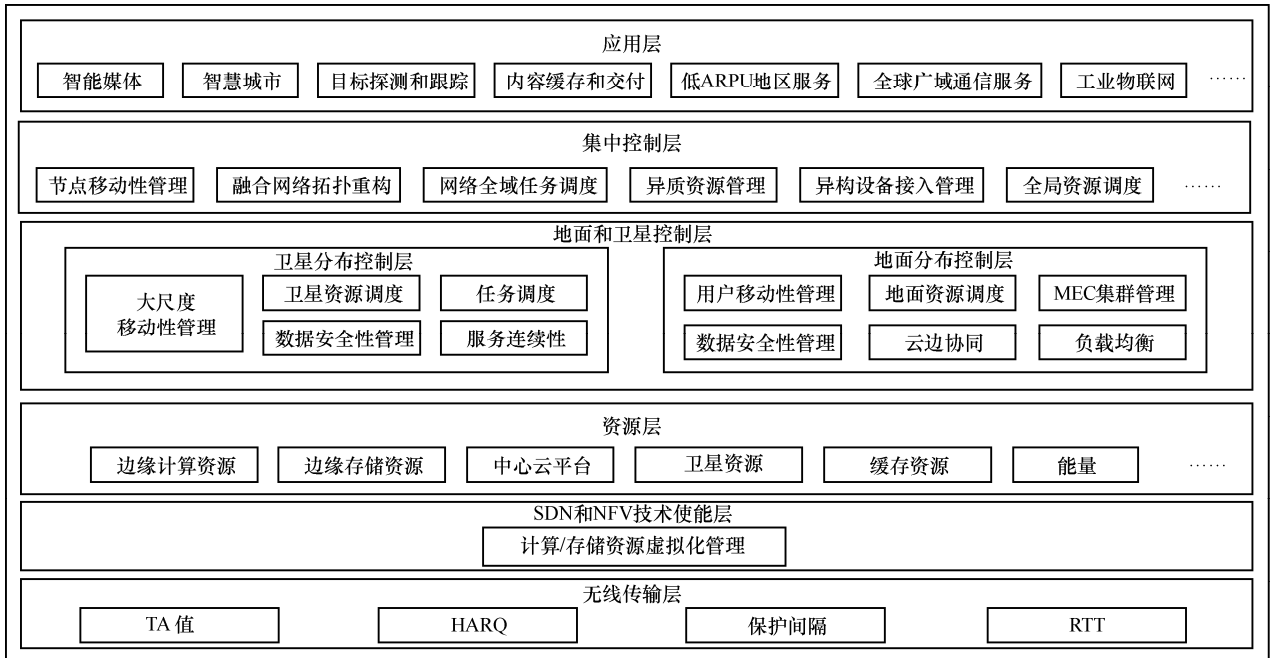


图 5 5GSIN 架构管理方法

障，具体包括目标探测和跟踪、内容缓存和交付、全球广域通信服务等。各层之间通过个性化参数相互协调处理多样化网络业务，通过虚拟化网络服务平台，提供 5GSIN 端到端服务的自动化管理。

3 未来展望

5G 网络正处于商用阶段并仍在向前发展，5GSIN 是 5G 网络的升级，是向未来网络演进的方向和过程。未来网络需要继续寻找新突破，以进一步实现多网络融合、多层次覆盖的目标，向着推动社会智能化发展的目标，提供全时、全域、全连接的智能网络。因此，针对上述对于 5GSIN 发展的论述，向未来网络智能化方向迈进，本文对融合网络的发展提出如下展望。

3.1 服务智能化

随着网络规模的扩大和应用场景的丰富，业务数量急剧扩张，向网络中注入了大量的流量。同时，一体化异构网络面临业务类型多样、需求多样且业务特征具有时空属性等特点，极易导致网络服务效能低、业务完成质量低、用户需求满意度难以保证等问题。盲目地增加计算与存储设备会使网络规模难以控制，同时，由于卫星的固有属性，其计算和存储能力存在上界。因此，保障网络服务需要寻求新的方法，使网络服务智能化，使边缘云、卫星云实现深度融合与协作。在边缘层面，边缘网络设备

能够感知业务流信息，认知业务流属性，判断业务的网络资源需求。同时，能够根据先进的预测方法对后续业务流特征进行预测，提前指导网络资源分配和调度。用户也能够根据需求配置网络环境，以应用驱动资源，实现网络即服务。在卫星层面，卫星应该最大化发挥广域大连接属性，掌握网络宏观视角，构建动态的、具有时空属性的端到端全域网络切片。同时，卫星应能够判断业务特点，快速选择目的节点，及时卸载远程地面业务，保证服务确定性。

实现上述要求，网络数据至关重要。要从数据的采集、传输、存储、处理、分析、销毁全生命周期入手，充分挖掘数据特点，通过数据特征了解网络运行情况、诊断网络故障、预测行为模式、指导资源调配等，这是实现网络服务智能化的基石。

3.2 模型智能化

随着 5G 网络的持续演进，研究者在不断开发边缘计算技术新的应用手段。例如，将边缘计算技术与人工智能技术结合，利用边缘节点的分布性和边缘及时性，快速访问海量终端数据，通过分布式边缘节点快速训练人工智能（AI, artificial intelligence）子模型，并将子模型数据向上传递，通过联邦学习快速智能生成网络模型。人工智能技术将使边缘计算发展成边缘智能，使网络能够局部自学习和自演化，增强网络的灵活性和自主性。已有研究

分析了 5G 网络中用于联邦学习的数据特征及联邦学习的可能场景,分析联邦学习框架下底层节点的优先级选择方法并建立激励机制促进网络节点加入联邦学习过程^[72-74]。在 5GSIN 中,由于卫星的计算与存储能力以及卫星和地面分层和分布式的边缘计算能力,后续研究可以考虑将联邦学习策略用于 5GSIN 的多层分布-集中的节点部署场景中。通过采集跨区域边缘设备中的数据特征,通过卫星训练大范围通用网络模型是有前景的研究方向。但是,卫星的计算能力毕竟有限,过重的模型训练过程可能使卫星其他方面的服务质量得不到保证,可以通过地面边缘节点训练好区域网络子模型,卫星仅负责模型的整合和发布,而不关注具体的参数层面。通过这种手段,可以大幅降低数据传输量,减少网络负载,同时加快模型生成速度。然而,在跨区域子模型采集中,由于可能存在语言差异、内容偏好差异等因素,数据特征差异较大,数据分布不均衡,这给数据处理带来挑战,数据处理程度将直接影响网络模型的精确度。同时,对于终端的数据采集涉及隐私问题,数据采集到什么程度、数据对边缘设备开放到什么程度是值得思考的问题。当网络模型数据与用户待传输数据发生冲突时如何决定传输优先级,如何分配稀缺的卫星资源等,同样是值得研究的方向。

另一方面,5GSIN 将向超异构和超大规模演进,网络结构升级演化将面临较大困难。将机器学习智能算法及网络模型分布在网络节点及网络控制中心,通过丰富的网络数据构建更加智能化个性化的区域网络,使区域网络能够根据内部流量特征实现智能自演化,最终,实现网络会学习、能进化,在区域内进化、在区域间协同的目标。

3.3 路由智能化

5GSIN 是一个多连接的网络系统,在终端选择传输路径时,会面临与 5G 基站连接、直接与卫星连接、与卫星地面终端连接等不同的连接场景,如何判断用户的连接场景,如何选择最佳的传输路径至关重要。应该综合考虑用户的时延敏感度、链路的负载情况、天气状况等因素生成链路选择算法,判断最佳连接链路。然而,在不同的网络域中,最佳的算法可能也会不同,需要在进一步研究中进行深入的模拟和验证。另一方面,5GSIN 将产生海量的数据,对网络的负载能力提出巨大考验,网络传输过程中难免发生拥塞,导致数据包丢失。所

以,应该构建动态的网络拓扑。首先,可以利用卫星动态改变地面数据流向,卸载地面拥塞节点的数据,使网络适应流量需求并克服潜在链路故障,构建动态的网络路由方案^[75],提高网络的性能。其次,根据网络模型,智能动态地预测拓扑变化,进行资源分配与调度,平衡网络负载,及时改变业务路由。

在 5GSIN 中,业务重路由是一个复杂的判断过程。如果节点任务量过载,需要权衡继续等待或者重路由的代价。智能路由算法需要考虑节点任务的突发性、卫星的周期运动性,根据网络和节点的历史状态计算未来状态,规避下一跳节点选择失败的风险,避免重复重路由过程。在规划好新的传输路径后,需要能够预测新路径的传输成功率,计算业务传输质量,将结果与继续等待在当前节点的传输质量进行对比。传输质量应综合考虑生成新路由的计算代价、节点转发丢包率、业务处理时延与等待时延等多个因素。智能化路由是一个复杂的过程,也是 5GSIN 必须解决的问题。

4 结束语

本文综合介绍了 5G 与卫星融合网络的研究现状、关键技术、网络架构、应用等方面的相关内容,对融合网络的架构设计提出了新的理解与看法。随着 5G 网络与 6G 网络研究的展开,卫星通信被认为是满足移动网络发展趋势的重要技术。利用卫星潜力能够更好地满足移动网络需求,卫星与移动网络的融合是大势所趋。未来工作应从网络智能化发展角度更加深入地研究融合网络的解决方案,探求未来空地海一体化网络的发展与建设方向。

参考文献:

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [2] WANG Y X, YANG J, GUO X Y, et al. A game-theoretic approach to computation offloading in satellite edge computing[J]. IEEE Access, 2019, 8: 12510-12520.
- [3] LIAO H J, ZHOU Z Y, ZHAO X W, et al. Learning-based queue-aware task offloading and resource allocation for space-air-ground-integrated power IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5250-5263.
- [4] BIYOGHE J S, BALYAN V. A comprehensive survey of existing researches on NOMA-based integrated satellite-terrestrial networks for 5G[C]//Information and Communication Technology for Competitive Strategies. Berlin: Springer, 2021: 369-377.

- [5] SADOUNI S, BENSLAMA M, BEYLOT A L, et al. New convergence architecture between 5G mobile telecommunication networks and satellite networks to enhance their capacities and improve their performance[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications. Berlin: Springer, 2019: 1247-1257.
- [6] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for Internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18391-18401.
- [7] KODHELI O, GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A. Integration of satellites in 5G through LEO constellations[C]//Proceedings of 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [8] BOERO L, BRUSCHI R, DAVOLI F, et al. Satellite networking integration in the 5G ecosystem: research trends and open challenges[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 9-15.
- [9] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies[R]. 2017.
- [10] MATTHEW I. Global 5G landscape, Q1 2021[R]. 2021.
- [11] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.
- [12] LIOLIS K, CAHILL J, HIGGINS E, et al. Over-the-air demonstration of satellite integration with 5G core network and multi-access edge computing use case[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [13] 3GPP. Study on management and orchestration aspects of integrated satellite components in a 5G network[R]. 2019.
- [14] MAMUSHIANE L, LYSKO A A, MUKUTE T, et al. Overview of 9 open-source resource orchestrating ETSI MANO compliant implementations: a brief survey[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd Wireless Africa Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [15] KHALILI H, SAYYAD K P, FERNANDEZ C, et al. Benefits and challenges of software defined satellite-5G communication[C]//Proceedings of 2019 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [16] KHODASHENAS P S, KHALILI H, GUIJA D, et al. TALENT: towards integration of satellite and terrestrial networks[C]//Proceedings of 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 167-171.
- [17] ARTIGA X, NUNEZ-MARTINEZ J, PEREZ-NEIRA A, et al. Terrestrial-satellite integration in dynamic 5G backhaul networks[C]//Proceedings of 2016 8th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [18] CHOI T, WON S H, GIUSEPPI A, et al. Management and orchestration architecture for integrated access of satellite and terrestrial in 5G[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2020: 40-45.
- [19] WANG Y J, ZHANG J X, ZHANG X, et al. A computation offloading strategy in satellite terrestrial networks with double edge computing[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2018: 450-455.
- [20] LIU L, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Design and analysis of cooperative multicast-unicast transmission scheme in hybrid satellite-terrestrial networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2018: 309-314.
- [21] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 101-109.
- [22] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 29-35.
- [23] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [24] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 70-76.
- [25] WEI J Y, HAN J R, CAO S Z. Satellite IoT edge intelligent computing: a research on architecture[J]. Electronics, 2019, 8(11): 1247.
- [26] TORKZABAN N, BARAS J S. Joint satellite gateway deployment & controller placement in software-defined 5G-satellite integrated networks[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2103.08735, 2021.
- [27] JIN C, HE X, DING X J. Traffic analysis of LEO satellite Internet of things[C]//Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 67-71.
- [28] DORÉ J B, BERG V. Turbo-FSK: a 5G NB-IoT evolution for LEO satellite networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1040-1044.
- [29] CIONI S, GAUDENZI R D, HERRERO O D R, et al. On the satellite role in the era of 5G massive machine type communications[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 54-61.
- [30] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 62-69.
- [31] KODHELI O, ANDRENACCI S, MATURO N, et al. An uplink UE group-based scheduling technique for 5G mMTC systems over LEO satellite[J]. IEEE Access, 2019, 7: 67413-67427.
- [32] GINESTE M, DELEU T, COHEN M, et al. Narrowband IoT service provision to 5G user equipment via a satellite component[C]//Proceedings of 2017 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [33] LIOLIS K, GEURTZ A, SPERBER R, et al. Satellite use cases and scenarios for 5G eMBB[J]. Satellite Communications in the 5G Era, 2018: 25-60.
- [34] WANG N, NOUWELL N, GE C, et al. Satellite support for enhanced mobile broadband content delivery in 5G[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [35] GE C, WANG N, SELINIS I, et al. QoE-assured live streaming via satellite backhaul in 5G networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2019, 65(2): 381-391.
- [36] LUGLIO M, ROMANO S P, ROSETI C, et al. Service delivery models for converged satellite-terrestrial 5G network deployment: a satellite-assisted CDN use-case[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 142-150.
- [37] XUE K P, MENG W, LI S H, et al. A secure and efficient access and handover authentication protocol for Internet of things in space information networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5485-5499.

- [38] QIAN Y B, MA L, LIANG X W. The performance of chirp signal used in LEO satellite Internet of things[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(8): 1319-1322.
- [39] YANG D M, ZHOU Y H, HUANG W T, et al. 5G mobile communication convergence protocol architecture and key technologies in satellite Internet of things system[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 465-476.
- [40] WANG B, CHEN C Q, ZHANG T C. Commercial vehicle road collaborative system based on 5G-V2X and satellite navigation technologies[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings. Berlin: Springer, 2021: 274-282.
- [41] LIU S C, GAO Z, WU Y P, et al. LEO satellite constellations for 5G and beyond: how will they reshape vertical domains?[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(7): 30-36.
- [42] LIN X Q, HOFSTRÖM B, WANG Y P E, et al. 5G new radio evolution meets satellite communications: opportunities, challenges, and solutions[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [43] 3GPP. 5G service requirements for next generation new services and markets (release 15): TS 22.261[S]. 2018.
- [44] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (release 15): TS 38.811[S]. 2019.
- [45] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks[R]. 2019.
- [46] 3GPP. Study on using satellite access in 5G[R]. 2018.
- [47] 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.
- [48] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERÍSSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(1): 14-76.
- [49] 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.
- [50] FERRÚS R, KOUMARAS H, SALLENTO, et al. SDN/NFV-enabled satellite communications networks: opportunities, scenarios and challenges[J]. *Physical Communication*, 2016, 18: 95-112.
- [51] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646.
- [52] HU Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing—a key technology towards 5G[J]. *ETSI White Paper*, 2015, 11(11): 1-16.
- [53] 谢人超, 廉晓飞, 贾庆民, 等. 移动边缘计算卸载技术综述[J]. *通信学报*, 2018, 39(11): 138-155.
XIE R C, LIAN X F, JIA Q M, et al. Survey on computation offloading in mobile edge computing[J]. *Journal on Communications*, 2018, 39(11): 138-155.
- [54] 李子姝, 谢人超, 孙礼, 等. 移动边缘计算综述[J]. *电信科学*, 2018, 34(1): 87-101.
LI Z S, XIE R C, SUN L, et al. A survey of mobile edge computing[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(1): 87-101.
- [55] YANG L, KONG X G, QI Y W, et al. A collaborative cache strategy in satellite-ground integrated network based on multiaccess edge computing[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021: 8121509.
- [56] GU S S, WANG Y, WANG N N, et al. Intelligent optimization of availability and communication cost in satellite-UAV mobile edge caching system with fault-tolerant codes[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(4): 1230-1241.
- [57] NGUYEN H X, TRESTIAN R, TO D, et al. Digital twin for 5G and beyond[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(2): 10-15.
- [58] 中国电子信息产业发展研究院. 数字孪生白皮书[R]. 2021. China Center for Information Industry Development. White paper on digital twin[R]. 2021.
- [59] Nokia. 5G from space - the role of satellites in 5G[EB]. 2021.
- [60] NETWORLD2020. NetWorld2020's - SatCom WG the role of satellites in 5G[R]. 2014.
- [61] MENDOZA F, FERRUS R, SALLENTO O. Experimental proof of concept of an SDN-based traffic engineering solution for hybrid satellite-terrestrial mobile backhauling[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2019, 37(6): 630-645.
- [62] ZANGAR N, HENDAOU S. Leveraging multiuser diversity for adaptive hybrid satellite-LTE downlink scheduler (H-MUDoS) in emerging 5G-satellite network[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2019, 37(2): 113-125.
- [63] MUHAMMAD K, KHAN S, ELHOSENY M, et al. Efficient fire detection for uncertain surveillance environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(5): 3113-3122.
- [64] XU F M, YANG F, ZHAO C L, et al. Deep reinforcement learning based joint edge resource management in maritime network[J]. *China Communications*, 2020, 17(5): 211-222.
- [65] KIM J, CASATI G, CASSIAU N, et al. Design of cellular, satellite, and integrated systems for 5G and beyond[J]. *ETRI Journal*, 2020, 42(5): 669-685.
- [66] SONG Z Y, HAO Y Y, LIU Y W, et al. Energy-efficient multiaccess edge computing for terrestrial-satellite Internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(18): 14202-14218.
- [67] 中国移动通信集团公司. 中国移动物模型标准白皮书[R]. 2020. China Mobile Communications Corporation. White paper on thing model standard[R]. 2020.
- [68] 胡诚. 基于信息年龄的双向数据交换系统的时效性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
HU C. Research on timeliness of two-way data exchange systems under the age of information measure[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.
- [69] TIAN D, ZHAO Y, TONG J F, et al. Frequency offset estimation for 5G based LEO satellite communication systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE Press, 2019: 647-652.
- [70] SAARNISAARI H, DE LIMA C M. 5G NR over satellite links: evaluation of synchronization and random access processes[C]//Proceedings of 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [71] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [72] MALANDRINO F, CHIASSERINI C F. Federated learning at the network edge: when not all nodes are created equal[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(7): 68-73.
- [73] KHAN L U, PANDEY S R, TRAN N H, et al. Federated learning for edge networks: resource optimization and incentive mechanism[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(10): 88-93.

[74] NIKNAM S, DHILLON H S, REED J H. Federated learning for wireless communications: motivation, opportunities, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(6): 46-51.

[75] KHALILI H, KHODASHENAS P S, GUIJA D, et al. Introducing terrestrial satellite resource orchestration layer[C]//Proceedings of 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.

[作者简介]



杨力 (1982-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 南京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为指挥与控制网络系统理论与技术、一体化通信网络协议理论与方法等。



孔相广 (1995-), 男, 辽宁大连人, 大连大学硕士生, 主要研究方向为边缘计算技术和 5G 融合卫星网络等。



黄琦龙 (1988-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 南京理工大学讲师, 主要研究方向为复杂系统建模与优化、天地一体化网络、智能电网等。



潘成胜 (1962-), 男, 江苏宜兴人, 博士, 南京信息工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为一体化网络系统和网络协议、一体化控制系统网络理论和技术等。



戚耀文 (1994-), 男, 山东威海人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为空间信息网络路由技术和网络可靠性等。