



综述

面向 6G 的卫星通信网络架构展望

吴晓文^{1,2}, 焦侦丰³, 凌翔¹, 刘冰³, 朱立东¹, 韩磊⁴

(1. 电子科技大学, 四川 成都 611731; 2. 电子科技大学(深圳)高等研究院, 广东 深圳 518110;
3. 深圳市星网荣耀科技有限公司, 广东 深圳 518052;
4. 星展测控科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 分析和研究了未来 6G 卫星网络架构并提出了设想。首先介绍国内外星地融合的研究现状, 结合 6G 网络的愿景、需求和 6G 网络架构的当前研究成果, 总结了 6G 网络架构的技术特征; 然后通过对人工智能(AI)在通信领域的研究和应用分析, 以及 AI 在 6G 网络中关键作用的深入挖掘, 提出了 AI 赋能的 6G 卫星通信网络总体架构、接入网架构及核心网架构的设想, 同时提出了分阶段演进和分步骤实现的建设思路, 最后对基于区块链的 6G 卫星通信网络韧性鲁棒机制进行了技术探讨。

关键词: 人工智能; 6G; 卫星通信; 网络架构; 区块链; 韧性鲁棒

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021147

Outlook on satellite communications network architecture for 6G

WU Xiaowen^{1,2}, JIAO Zhenfeng³, LING Xiang¹, LIU Bing³, ZHU Lidong¹, HAN Lei⁴

1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

2. Shenzhen Institute for Advanced Study, UESTC, Shenzhen 518110, China

3. Starnetworks Technology Co., Ltd., Shenzhen 518052, China

4. Satpro M&C Tech Co., Ltd., Xi'an 710018, China

Abstract: The future satellite communications network architecture for 6G was analyzed, studied and imagined. Through introducing the current trends of satellite and ground communications integration, with the current research results of 6G network architecture with its vision and requirements, the technical characteristics of 6G network architecture were summarized. The key role of artificial intelligent (AI) in 6G network was deeply explored based on the research and application analysis of AI in the field of communications. Therefore, the idea of AI enabled 6G satellite communications network overall architecture, RAN architecture, core network architecture were proposed, also with step-by-step evolution and implementation. Finally, the enhanced robust mechanism of 6G satellite communication network based on block-chain was also discussed.

Key words: artificial intelligent, 6G, satellite communication, network architecture, block-chain, resilience and robust

收稿日期: 2020-11-14; 修回日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61871422)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61871422)



1 引言

“4G 改变生活, 5G 改变社会”。5G 移动通信以增强型移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB)、大连接物联网 (massive machine-type communication, mMTC) 和低时延高可靠通信 (ultra-reliable & low-latency communication, uRLLC) 三大应用场景为人们提供宽带化、海量连接和低时延类型业务, 有力推动社会 and 经济发展。目前, 5G 网络覆盖仍然以基站为中心, 在基站所未覆盖的沙漠、无人区、海洋等区域内依然存在大量通信盲区, 预计 5G 时代仍将有 80% 以上的陆地区域和 95% 以上的海洋区域无移动网络信号。同时, 5G 的通信对象集中在陆地地表 10 km 以内高度的有限空间范围, 无法实现“空天海地”无缝覆盖的通信愿景^[1]。因此, 5G 并不能真正实现“全球全域”和“万物互联”。

6G 总体愿景是 5G 愿景的进一步扩展和升级^[1], 其特征是全覆盖、全频谱和全应用。网络和服务更加智能化, 人工智能 (AI) 技术将全方位赋能 6G 网络 and 用户, 满足人类精神和物质的全方位需求^[1]。

目前全球 6G 技术研究处于探索与起步阶段, 技术路线尚不明确, 关键指标和应用场景还没有统一的定义, 正处于“场景挖掘”和“技术寻找”阶段。尽管如此, 6G 核心技术已列入多国创新战略, 成为大国科技博弈高精尖领域 and 全球抢占的战略制高点^[2]。中国、美国、韩国、日本 and 芬兰等国已启动 6G 研究。美国已发布第一份 6G 报告, 欲将美国确立为 6G 理念、开发、采用 and 快速商业化的全球领导者^[3]。我国于 2019 年 11 月 3 日成立

了国家 6G 技术研发推进工作组 and 总体专家组, 标志着我国 6G 技术研发工作正式启动。

国际标准化组织已经启动了 6G 网络研究, 国际电信联盟 (ITU) 提出的 6G 3 个目标之一为融合卫星通信在内的多类网络 (ManyNets)^[4], 充分说明卫星通信将是 6G 网络的重要组成部分。本文首先分析卫星通信与 5G 融合组网研究基础, 总结 6G 网络架构及其技术特征, 尤其是 AI 在 6G 网络中应发挥的关键作用, 通过分析 AI 在通信领域的研究为基础, 对 AI 在 6G 卫星通信网络中的应用进行更加深入的研究, 提出了 AI 赋能的 6G 卫星通信网络总体架构及演进思路。

2 国内外星地融合研究现状

基于卫星通信的广覆盖优势和广播及多播特性, 国际标准化组织或机构启动了卫星和地面网络的融合研究, 并取得有关研究成果。根据研究目的不同, 国内外针对星地融合的研究主要分为卫星通信与 5G 的融合组网 and 天地一体化研究两大类。

2.1 卫星通信与 5G 的融合组网

2.1.1 国际方面

国际上, ITU、3GPP、SaT5G 等主要标准化组织或研究机构已经启动卫星通信与 5G 的融合组网研究。ITU 提出了星地 5G 融合的 4 种应用场景, 见表 1, 包括中继到站、小区回传、动中通及混合多播场景, 并提出支持这些场景必须考虑的关键因素, 包括多播支持、智能路由支持、动态缓存管理及自适应流支持、时延、一致的服务质量 (QoS)、网络功能虚拟化 (NFV) / 软件定义网络 (SDN) 兼容、商业模式的灵活性等^[5]。

表 1 ITU 提出的 4 种星地融合场景

应用场景	中继到站	小区回传	动中通	混合多播
场景说明	卫星高速直接远端/难到达地点	卫星向无线塔、接入点和云应用提供高速连接 (含多播)	卫星向移动平台用户提供直接通信和/或补充通信手段 (如飞机、火车、汽车和船舶)	卫星内容分发, 与地面互补

2020年7月,3GPP系的5G标准正式被接收为ITU 5G技术标准。而SaT5G输出的研究成果将作为3GPP标准的输入,驱动3GPP和ETSI关于卫星和5G融合标准化^[6]。因此,有关卫星通信与5G融合组网的标准化输出,将主要由3GPP完成。3GPP关于卫星通信与5G的融合研究,主要体现在TR38.811、TR38.821以及TR22.822的3个技术报告中。上述3个报告的主要研究内容见表2。

虽然上述研究成果还局限于技术报告类,没有形成标准规范,但是这些研究成果对于将来卫星通信与5G/6G的融合组网奠定了一定的研究基础,具有积极的参考意义。

2.1.2 国内方面

2019年8月,工信部发布了《3 000–5 000 MHz频段第五代移动通信基站与卫星地球站等无线电台(站)干扰协调管理办法》,为规范我国5G网络建设及卫星通信的健康发展指明了方向。

运营商方面,为充分提升资源利用率,共享5G基础设施,国内四大运营商先后启动了5G共享共建的战略合作。其中,2019年9月9日,中国联通和中国电信签署《5G网络共建共享框架合作协议书》,2020年5月20日,中国移动和中国广电签署5G共建共享之合作框架协议。因此,从这个层面上看,中国联通与中国移动在卫星通信与5G的融合组网方面取得进展,代表着国内四大运营的理论研究和实践。2020年4月,中国移动

(上海移动)与合作伙伴共建的5G+卫星通信融合创新实验室,研究5G与卫星通信网络的融合架构,实现融合场景的演示验证试验。

设备商方面,2020年6月华为与长光卫星已签署了合作协议,将大数据、AI、5G等高新技术与产品融合,携手开拓更大的科技市场。

2.2 天地一体化研究

卫星通信业界对天地一体融合的探索已接近20年。比较有代表性的天地一体化项目主要有美国提出的转型通信体系(transformational communications architecture, TCA)、欧洲提出的ISICOM(integrated space infrastructure for global communication)、美国的SkyTerra以及由中国提出的天地一体化信息网络^[7]。我国的天地一体化信息网络以地面网络为依托、天基网络为拓展,采用统一的技术架构、统一的技术体制、统一的标准规范,由天基信息网、互联网和移动通信网互联互通而成^[8],为深入研究卫星与地面融合奠定了基础。

3 AI赋能的6G卫星通信网络架构

全球各国及业界已经开始推进对6G的研究,6G愿景、场景、功能和性能基本指标也有了新的进展。本文以研究文献提出的6G陆地移动通信网络性能指标^[9]为基础,综合考虑AI和卫星通信在6G网络中的建设性作用,提出了AI赋能的6G

表2 3GPP关于卫星通信和5G融合组网研究报告主要内容

技术报告	TR38.811	TR38.821	TR22.822
研究内容	明确了卫星在5G中的3类应用情形,包括如下内容。 - 业务连续性:为高速移动平台(如飞机、导弹)提供支持。 - 业务泛在性:补盲、补热。 - 业务扩展性:充分利用卫星多播、广播提供数据分发业务。 提出了适用于非地面网络的信道模型、传播模型和移动性管理等内容	在TR38.811基础上重点关注5G中使用卫星接入的研究。 - 针对典型应用场景性能仿真验证,包括链路级和系统级。 - 研究NTN对5G物理层的影响。 - 研究和定义2层和3层可选解决方案	列出卫星融入5G的12个具体用例,包括星地网络间漫游、卫星广播和多播、卫星IoT、卫星组件的临时应用、最优路由控制、卫星跨境业务连续性、全球卫星覆盖、通过5G卫星的非直接连接(通过支持卫星5G空口的中继单元)、NR和5G核心网间的5G固定回程链路、5G移动平台回传、远端业务中心和离岸风场间的卫星连接



卫星通信网络业务需求及性能指标。图 1 给出了 6G 预期应用场景及需求。根据图 1, 未来 6G 卫星通信网络将由 5G 时代的 eMBB、uRLLC 和 mMTC 三大应用场景扩展为未来增强移动宽带 (FeMBB)、极可靠低时延通信 (ERLLC 或 eUURLC)、广覆盖高时延高移动性通信 (LDHMC)、超大规模机器类通信 (umMTC) 和 极低功率通信 (ELPC) 五大应用场景。其中, FeMBB 主要针对全息应用、宽带互联网、超高清视频等宽带通信业务, 这类业务的重心在于要求极高的通信速率, 地面类业务通信速率为 $0.1 \sim 1$ Tbit/s, 卫星业务通信速率设定为 1 Gbit/s; ERLLC (eUURLC) 主要针对全自动驾驶和工业互联网等要求极低通信时延需求, 地面业务具有 $10 \sim 100$ μ s 时延, 而卫星业务时延则根据终端所连接卫星的轨位不同, 具有 10 ms 或以上的通信时延;

LDHMC 则主要针对于深空覆盖等超高速超远距离通信场景而设计, 允许的移动速度 $\geq 1\,000$ km/h, 远高于 5G 时代的 500 km/h; umMTC 则主要针对卫星物联网等海量终端的应用场景, 每平方千米具有 1 亿个终端设备, 每平方米的通信速率总量约为 1 Gbit/s; ELPC 则主要针对人体纳米类传感器等具有极低功耗的物联网终端设备的应用场景, 与 5G 相比, 网络能效具有 100 倍的提升, 频谱效率也具有 5~10 倍的提升。这些业务和性能指标的达成, 有赖于 AI、云计算、分布式计算、区块链等使能, 而 AI 则是对星地全网进行赋能的必备技术。

6G 通信网络与云计算、大数据和人工智能集成深度进一步增强, 基于上述愿景和业务需求, 下面将对 6G 网络架构进行深入分析和探讨。

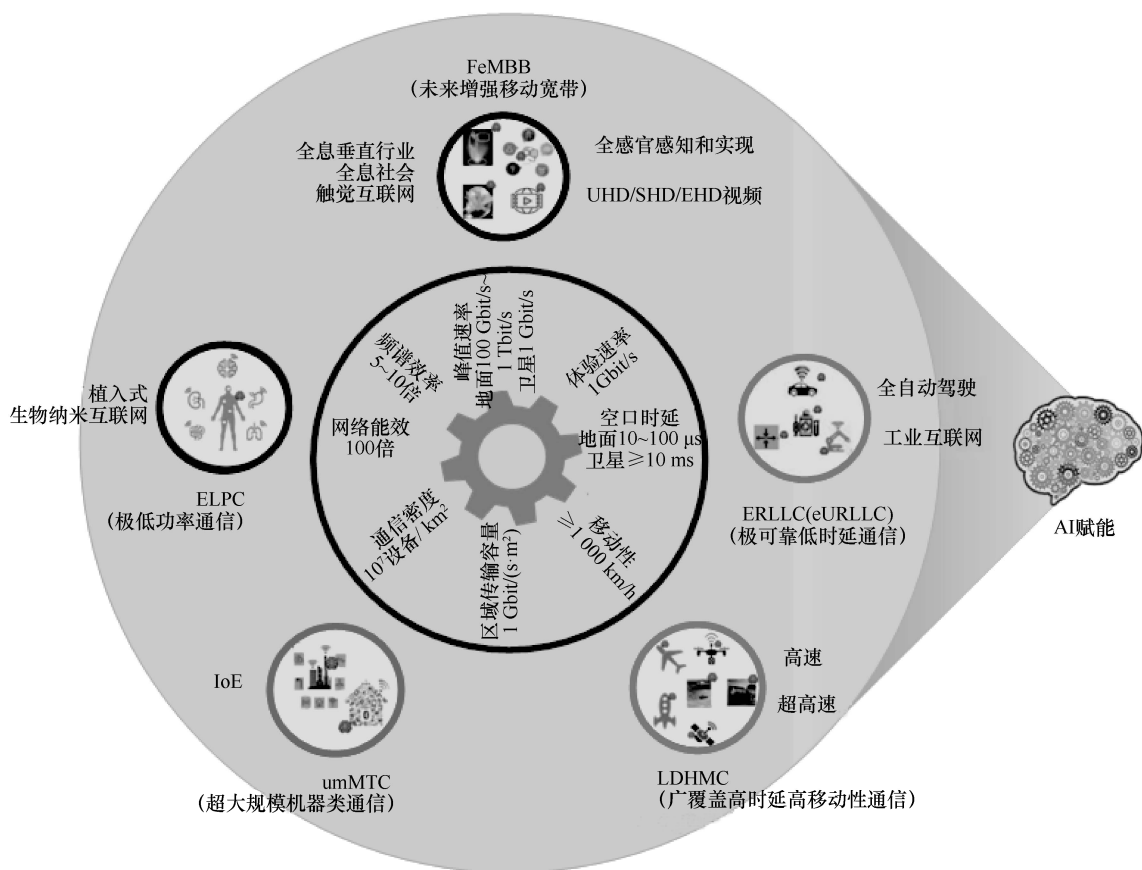


图 1 6G 预期应用场景及需求

3.1 6G 网络总体架构研究现状及技术特征

6G 将为人类和万物提供情景感知的智能服务。6G 的服务对象将从人类、机器、物体扩展至虚拟世界,实现实际物理世界与虚拟世界的连接与协作,利用 AI 技术感知用户需求,提升用户体验,形成认知增强与决策演进的智能网络,满足人类精神与物质的全方位需求^[10]。

6G 时代,用户业务种类和业务颗粒度比 5G 网络要求更高,同样需要支持按需确定性服务。另一方面,6G 网络需要提供网元功能可编程及网络可编排能力,从而实现快速的业务升级和网络敏捷化管理,能够实现网络虚拟化及功能对外开放,以满足虚拟运营商等多租户运营需求。与 5G 网络的 NSA 和 SA 阶段化演进思路技术路线类似,未来的 6G 网络将采用分阶段演进和分步骤建设的思路,前期兼容 5G,甚至也兼容 4G 网络,后期实现 6G 独立组网。

6G 网络架构与其所采用的技术路线密切相关。国外较具代表性的技术路线有:韩国 SK 集团信息通信技术中心曾在 2018 年提出了“太赫兹+去蜂窝化结构+高空无线平台(如卫星等)”的 6G 技术方案,不仅应用太赫兹通信技术,还要彻底变革现有的移动通信蜂窝架构,并建立空天地一体的通信网络。三星研究院新设了一个“下一代通信研究中心”,配合 5G 商用化服务的扩张,加强移动通信先导技术和标准方面研究组织的功能和作用。美国贝尔实验室也提出了“太赫兹+网络切片”的技术路线^[11]。

国内关于 6G 卫星通信技术路线及网络架构的研究主要包括中国联通空天地一体化网络架构、中国移动“3 层+4 面”网络以及国内校企联合提出的“空一天一陆一海”全维度网络架构等。目前国际通信技术研发机构相继提出的多种实现 6G 的技术路线都处于概念阶段,如何落实还需长时间的研究和实践,以下对业界关于 6G 网络架构的主要共性技术特征进行了总结。

- 全球全域:卫星通信和高空浮台将在 6G 卫星通信中承担重要角色,并发挥重要作用,通过卫星通信与地面网络的融合,达到全球全域的移动网络覆盖目标,实现用户随遇接入和业务的连续性。
- 极简网络:地面通信协议往往需要多次交互,与卫星链路的长时延不相匹配,不可以直接移植到卫星通信网络,需要针对海量物联网业务等场景进行适应性改造。
- 极智网络:为了实现全面应用,AI 与 6G 无线通信网络紧密结合,以实现更好的网络管理和自动化。
- 独立 AI 面:通过独立的 AI 平面/智能面,实现全网的智能化赋能。
- 星上处理:6G 时代卫星以超算平台为基础,具备星上处理能力和星上缓存能力,支持星载 DU、完整星载基站、星载 MEC、星载 CDN,甚至星载轻量化核心网的部署。
- 天基计算:利用星上处理和计算能力,能够实现网络架构的智能自主动态演进和智能化管控。

3.2 AI 在通信中的研究和应用

综合业界当前对 6G 网络的愿景和概念化指标不难发现,在未来的 6G 移动通信网络中,为了实现网络的全面智能化应用,AI 技术将与 6G 无线通信网络紧密结合以实现更好的网络管理和自动化。因此,对 AI 在通信中应用的发展潜力进行深入探索和挖掘,具有积极意义。

事实上,自 AI 技术诞生以来,人们从未停止 AI 技术在各行各业的应用研究,通信行业也不例外。以 AI 在 5G 中的应用为例,根据 ITU 的研究报告,5G 将支持智慧城市和家庭、3D 视频、增强现实、在云中工作和娱乐、行业自动化和无人驾驶汽车,它还将为人工智能提供必要的连接。这将使 5G 更加智能化,增强 5G 网络切片、云网络、虚拟化和自组织网络的能力^[12]。在国内,部



分学者给出了 AI 在 5G 领域的研究和应用分析,例如,有学者对 AI 在 5G 系统设计和优化过程的各个环节所起到的作用进行了分析和研究,大体上可以归纳为 3 类技术问题:组合优化问题、检测问题及估计问题^[13]。在 5G 网络中的很多高复杂度问题,通过 AI 和机器学习可有效降低求解复杂度,将复杂问题简单化处理,实现网络的智能化或服务智能化。还有研究将 5G 网络中需要通过 AI 解决的问题划分为 4 种类型:用传统方法无法建模问题、难以求解问题、统一模式高效实现问题及最优检测与估计问题^[13]。

自 5G 商用的一年多时间以来,我国的 5G 网络建设规模全球领先, AI 在 5G 中的应用实践也取得积极成效。其中,广东联通 2018 年年底启动的“5G+AI 项目组”提出了基于 AI 的基站及回传网故障定因解决方案^[14],并先后在广东联通多个地(市)进行测试验证,效果显著。

不仅在地面网络,人们对 AI 在卫星通信领域的应用研究也在进行。目前有关 AI 在卫星通信中的应用研究,主要集中在卫星生态^[12]、卫星路由^[15]、卫星干扰规避^[16]以及频谱感知^[17]等方面。

6G 是对 5G 网络的全方位升级与扩展,具有按需服务、简单网络、灵活网络、智慧内生、安全内生等技术特征。人们对 AI 在 6G 发挥的建设性作用寄予厚望,并陆续展开相应的技术研究。AI 在 6G 中应用可分为频谱智能和自适应资源分配、传输智能和自适应基带处理,以及网络智能和自适应网络优化 3 个部分,分别从频谱、传输和网络 3 个级别展开 AI 在未来移动通信中的应用研究^[18]。

3.3 6G 卫星通信网络架构

6G 与云计算、大数据及 AI 的深度融合已在业界达成共识, AI 将成为 6G 移动通信网络的“大脑”。本文将结合 6G 移动通信的需求及现有研究基础,提出可演进的 AI 赋能 6G 卫星通信网络总体架构。

3.3.1 总体网络架构

6G 卫星通信接入组网时代,网络拓扑将从二维空间扩展到三维空间,构建覆盖全球地表及空域广域无缝通信网络,满足人类业务连续性需要。与此同时,在 6G 天基与地基深度融合,网络连接涵盖星间通信、星地通信和地地通信,在 AI 赋能技术的智能协作下,保障了系统容量弹性伸/缩、星地资源按需动态分配、天地异构网络智能自愈和灵活重构。

在 6G 时代,卫星载荷功能与性能均得到大幅提升,数字再生和柔性转发已发展成为卫星的基本配置,软件定义卫星、SDN/NFV 和 AI 智能超算平台等成为赋能卫星通信的必备技术手段,在 6G 网络架构中将承担接入、中继、传输及核心网等角色或功能。本文把在 6G 中的卫星统称为天基资源,把地面 6G 网络基础设施称为地基资源,天基资源和地基资源在 6G 中分别发挥不同的建设性作用,需充分发挥天基和地基资源的特点和优势,展开 AI 赋能的 6G 卫星通信高动态组网技术研究,形成极简极智全球全域随遇接入方案。

基于 6G 星地一张网业务需求与愿景,创新性地引入 AI 赋能工具,实现网络及服务智能化。为满足 AI 赋能对资源需求,将地面数据中心和天基资源按需融合为统一的资源池,以云计算架构为底层框架,构建更加灵活、智能、高效和开放的网络系统,支撑 AI 赋能。

从网络拓扑上看,6G 卫星通信网络逻辑上增加 AI 赋能平面, AI 赋能技术始终贯穿终端至核心网络的整个网络平面,图 2 给出了 6G 卫星通信网络 AI 平面、控制平面和数据平面分离的参考架构。

AI 平面能够实现 6G 网络中控制平面及数据平面的学习、训练和决策,是实现 6G 网络智能化和服务智能化的根本源动力。有研究文献提出了陆地 6G 网络的架构和 AI 在 6G 网络中的实施方式^[19]。

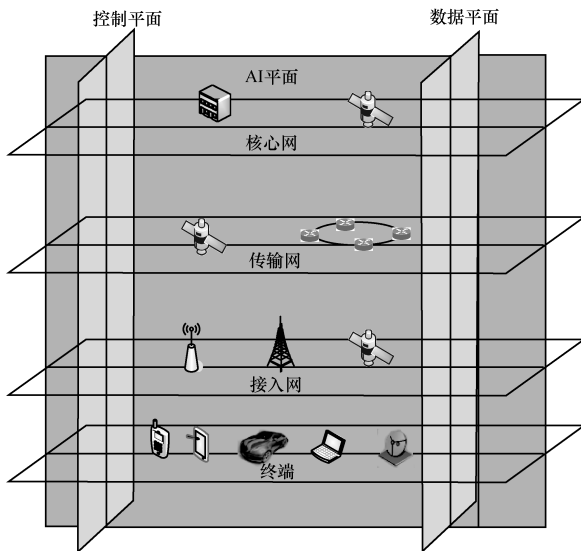


图2 AI平面、控制平面和数据平面分离的6G卫星通信网络

图3给出了AI在6G卫星通信网络中赋能应用。为解决6G卫星通信网络卫星数量多、星上载荷能力受限、星间链路交互量大等问题，引入卫星

星座动态分簇和分层管理机制。利用地球同步轨道（geostationary earth orbit, GEO）卫星广覆盖和大载荷优势，作为天基AI控制节点，对非地球同步轨道（non geostationary earth orbit, N GEO）星座进行动态分簇控制；NGEO同轨道数颗卫星形成簇，分别承担通信、计算、训练和内容分发等领域的AI赋能功能，相互间通过星间链路进行数据交换。

AI赋能创新应用主要在通信干扰消除、计算效率提升、训练最佳行动及内容智能分发等方面。通过编码、调制、信道传输、解调及解码全过程AI赋能，消除通信干扰。通过软/硬件分离及协同设计，提升计算效率。针对非独立同分布用户场景终端侧分布式学习、上云，获得服务器更新的共享全局模型。通过DRL（深度强化学习）、Agent（代理/智能体）与环境不断交互，学习最佳行动。通过强化学习，缓存热点内容，实现内容分发。

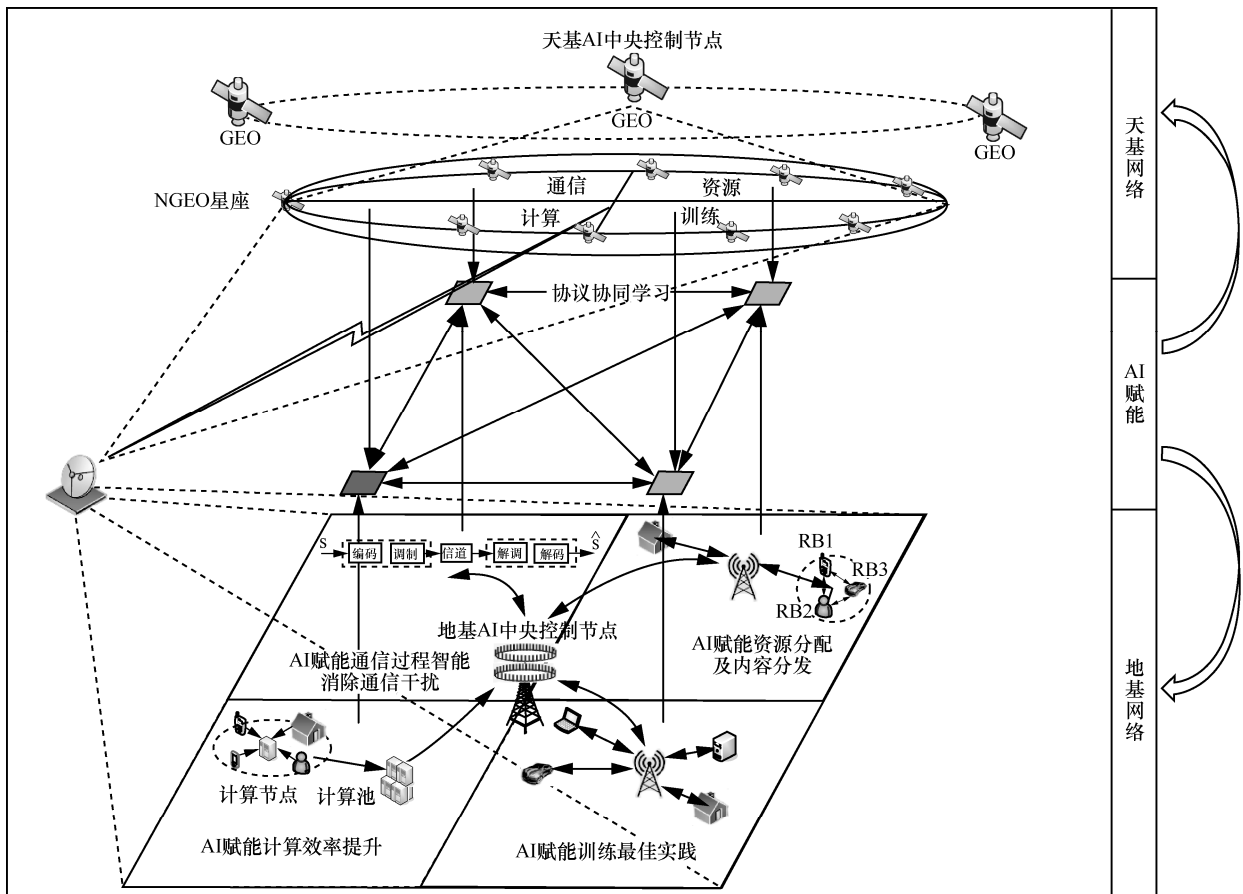


图3 AI在6G卫星通信网络中赋能应用



通过终端缓存及 D2D（设备到设备）通信，提高资源利用率。

根据卫星载荷能力的发展过程，图 4 给出了 6G 卫星通信网络三阶段演进路线。

- 阶段一：卫星以弯管为主要工作方式，支持地面基站通过卫星回传接入 6G CN。
- 阶段二：虽然采用卫星弯管技术，但车载、船载、机载、CPE 等多种类型的 UE 可以连接卫星接入地面基站再接入 6G CN。
- 阶段三：低轨卫星具有星载基站能力，在高级阶段，GEO 可搭载轻量化的 6G 核心网网元（6G CN Lite）。

从网络接入来看，第一个阶段 UE 接入地面基站、卫星作为链路回传；第二阶段 UE 接入透明转发的卫星连接地面基站与核心网；而第三个阶段，则主要实现 UE 通过星载基站接入核心网。上述 3 个演进阶段接入技术的更新和迭代，所采用的技术将长期共存，也可视为不同的接入方式。

3.3.2 核心网络架构

如同 5G 网络分为 SA、NSA 两个主要阶段一

样，未来的 6G 移动通信网络也应分阶段演进，分步骤建设。既能够与现有 5G 网络的兼容，又能够面向未来发展。6G 卫星通信核心网可分别部署于地面及天基资源。其中，对于天基资源，只部署轻量化的核心网（例如只部署与鉴权及时敏性服务有关的功能），以适应天基资源的存储和算力特征；对于地面资源，视为具备充足的存储和算力资源，可部署全功能的核心网。因此，虽然天基和地基均可部署 6G 卫星通信网络核心网，但从总体上讲，仍然为地面为主。

同时，云化的 6G 卫星通信网络部署更加便捷和灵活。通过构建面向 6G 的分布式云架构，用户面下沉至边缘节点，并结合 MEC 平台的部署，有效实现将云的算力从中心延伸到边缘，实现业务快速处理和就近转发，满足多样化的应用场景。因此，6G 卫星通信网络天基和地基核心网还应采用多级部署方式。对于天基核心网，以 GEO 部署轻量化核心网，而非 GEO 星座，则主要部署 MEC 和内容分发等网络边缘功能；相应地，地基核心网也分为多级数据中心进行部署，即以中心、区

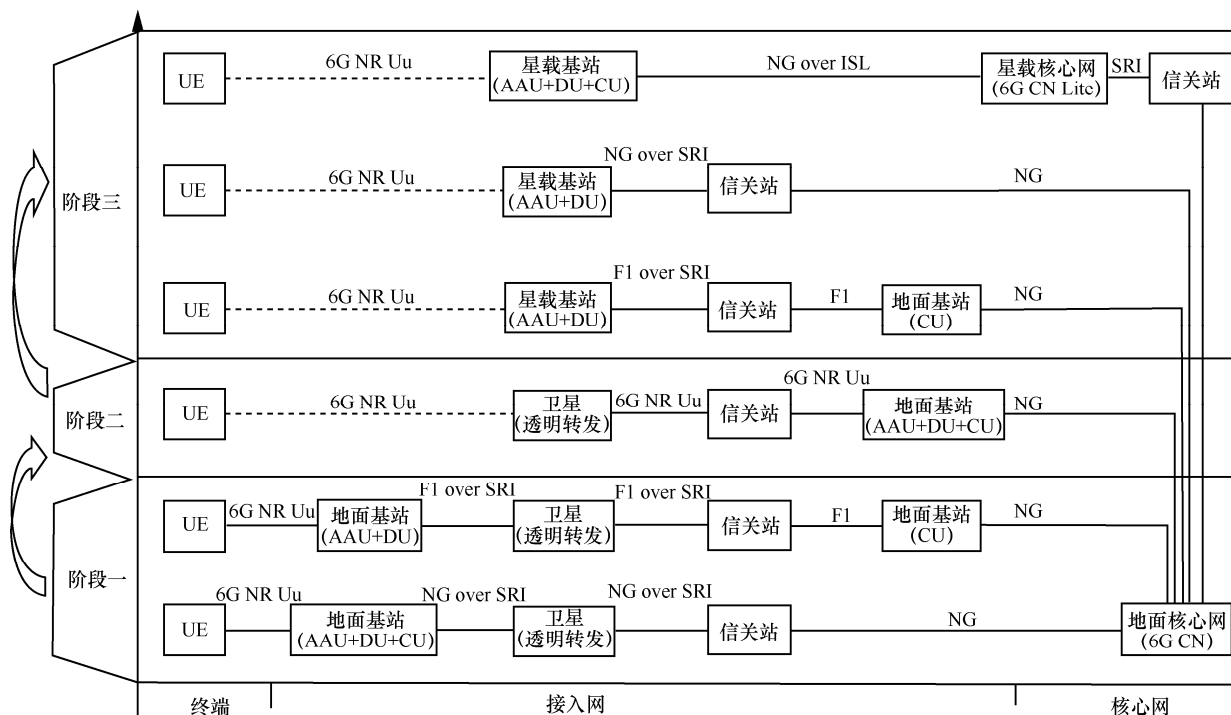


图 4 6G 卫星通信网络三阶段演进路线

域、边缘三级数据中心+基站机房为基础架构,网元可按照场景需求部署在网络相应的位置。

6G 卫星通信核心网可沿续 5G 云原生^[20]设计思路,基于微服务架构和功能设计,提供更泛在的接入,更加智能和灵活的控制与转发功能,以及更强大的开放能力。核心网与 NFV 基础设施相结合,为用户、业务/应用提供商、企业/垂直行业需求方提供网络切片、边缘计算、精准授时、6G

LAN 等新型业务能力。

相对于前几代移动通信网络,6G 时代的业务类型更加丰富,对服务颗粒度需求更加精细化。通过微服务架构的核心网,每个网元解耦为一组独立网络功能(NF),每个 NF 也解耦为多个 NF 服务。因此,为更好地契合不同业务场景和垂直行业,基于云原生技术和微服务化 NF 构建 SBA+架构的核心网成为主要考虑的方案。图 5 给出了

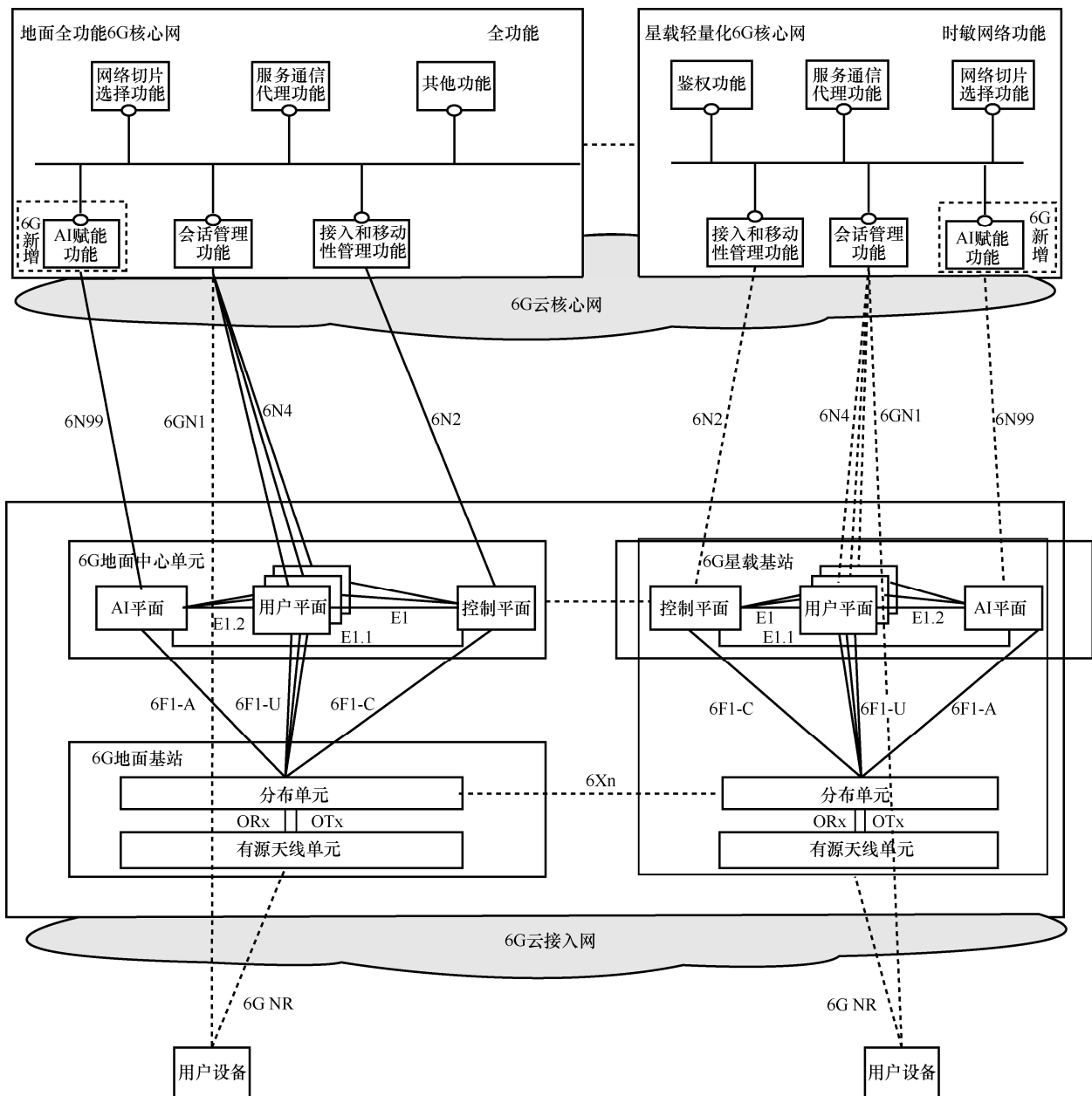


图 5 6G 卫星通信网络的总体架构及接口体系

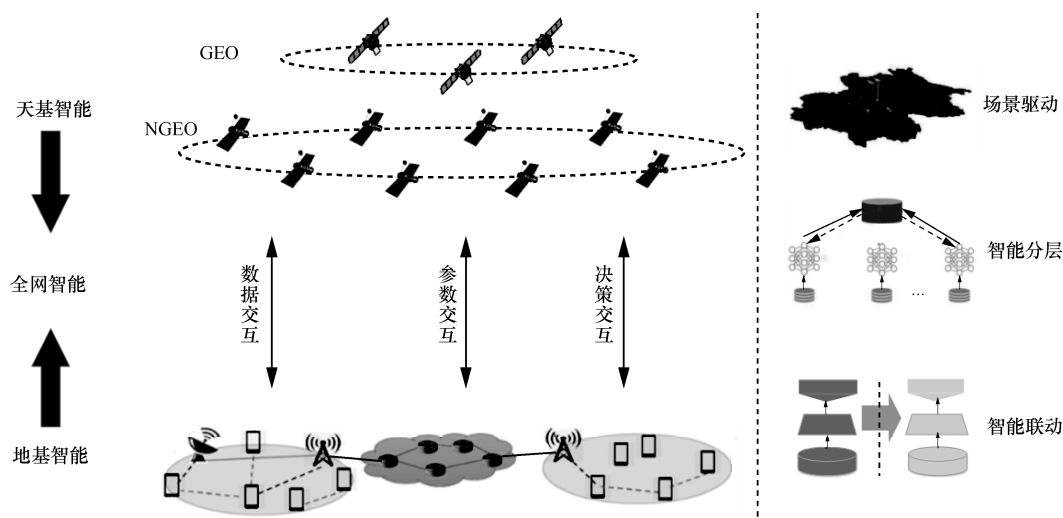


图6 6G星地协同AI框架

6G 卫星通信网络的总体架构及接口体系。

另一方面，随着智能化应用的不断普及，数据、算力和算法将成为实现业务智能的“铁三角”^[10]，图6给出了6G星地协同AI框架。结合天基计算能力，需要设计面向分布式学习的星地协同AI算法框架，同时还需要研究适配星地计算能力的多主体、多目标、多级协同AI机制，结合星上资源和处理能力设计星上轻量级AI学习模型以及地面站的大容量和强算力优势，设计基于海量数据的深度学习模型。

总之，AI是6G卫星通信网络的“大脑”，能够完成学习和进化的神经网络，赋能6G卫星通信网络，将使6G卫星通信网络实现高度的弹性、灵活和智能。

3.3.3 接入网络架构

对于用户设备UE而言，具备同时接入卫星和地面基站开展业务的能力，并且能够在卫星和地面基站之间、卫星与卫星之间以及地面基站之间实现无缝无感切换，业务的连续性得到充分保障。

基于6G时延及通信带宽需求，集中部署有源天线单元(AAU)和分布单元(DU)，以极简设备形态消除AAU和DU间传输压力。图7给出了6G卫星通信接入网架构，为满足广域时敏需求，星载基站可集中部署CU与AAU和DU。

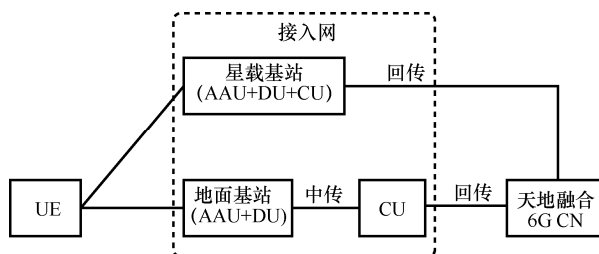


图7 6G卫星通信接入网架构

图8给出了6G卫星通信网络支持的7种主要接入模式，具体介绍如下。

模式一：标准6G空口用户接入。在该场景下，可根据用户业务或位置区域等条件而自动直接接入地面基站或者星载基站，且在必要的情况下，可将用户同时拉入地面基站和天基基站，以满足其业务需求。

模式二：标准6G空口用户中继接入。在这种模式下，不在网络覆盖范围内的用户（如在隧道中），可通过标准6G用户的中继，接入地面基站或天基基站，是D2D应用的一种，也是达到全域网络覆盖的一种技术手段。

模式三：基于星间链路中继的标准6G空口用户接入。该模式下，用户接入低轨卫星星载基站，再经其他卫星中继链路进行回传。

模式四：基于卫星链路回传的标准6G空口用户接入。该模式下，卫星起到透明传输作用，用

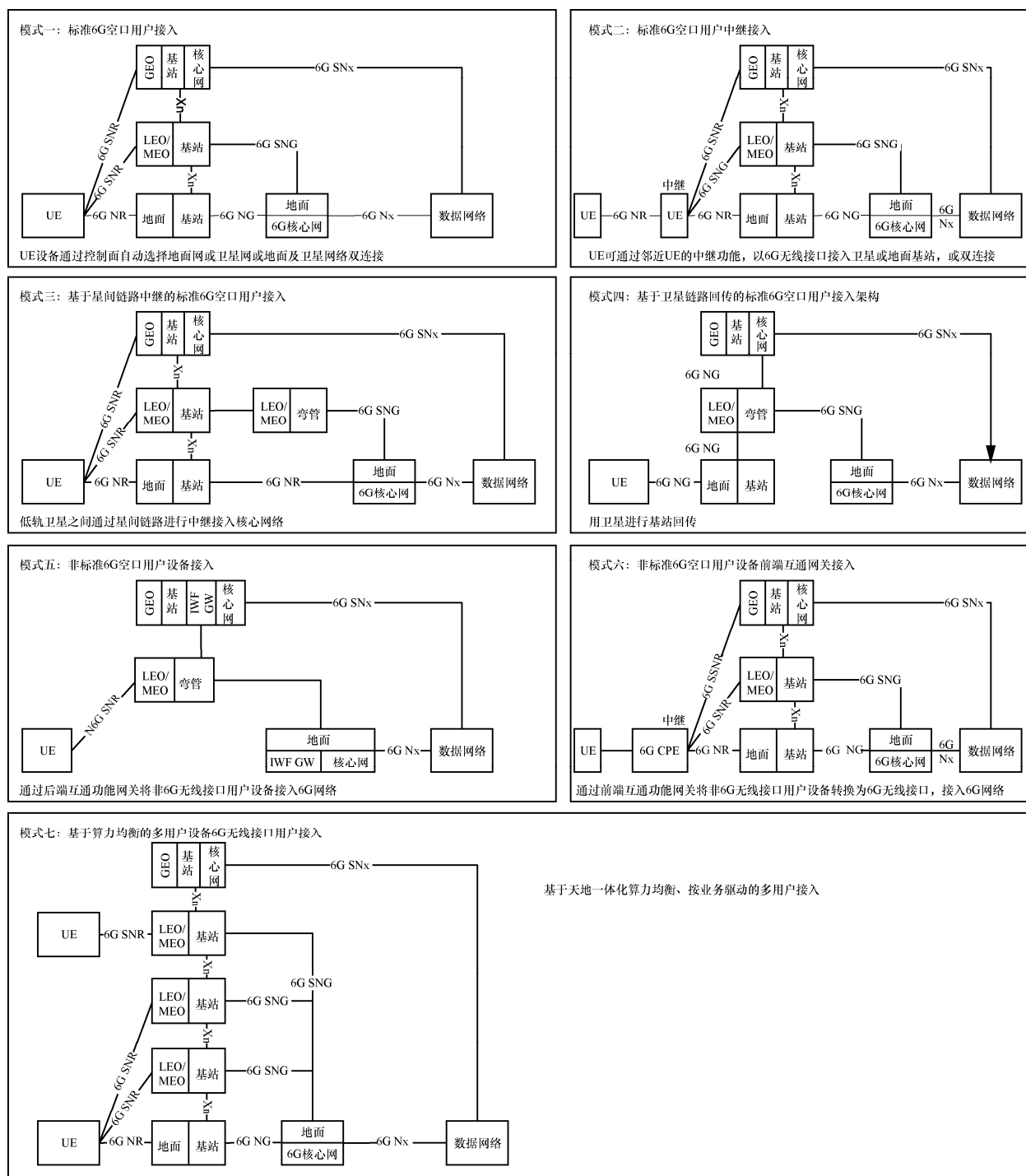


图8 主要接入模式

户接入地面基站后，通过卫星链路进行基站回传至天基核心网或地基核心网络。

模式五：非标准 6G 空口用户设备接入。非标准 6G 空口用户通过后端互通网关接入 6G 核心网，

后端网关承担到核心网的核协议转换及通信安全。

模式六：非标准 6G 空口用户设备前端互通网关接入。非标准 6G 空口用户 UE 通过标准的 6G 空口用户中继，接入 6G 网络。



模式七:基于算力均衡的多用户设备 6G 无线接口用户接入。根据天地一体化的算力均衡与网络切片等有关技术提供按需确定性服务。

3.3.4 6G 卫星通信网络韧性鲁棒机制

韧性鲁棒是表征网络稳健性的一项重要指标,部分学者对于网络韧性的定义为一个组织通过预测和适应网络威胁和环境中的其他相关变化,以及通过承受、控制和迅速从网络事件中恢复继续执行其任务的能力^[21]。亦有学者将韧性定义为系统在可接受的退化范围内能抵抗变动并重新恢复稳定的物理能力,使系统达到甚至超越原有的性能水平。而鲁棒性指系统的特性,旨在系统环境或系统内部发生变化时为一系列要求提供可靠的性能,这是一种将不确定性和模糊性带入系统过程的策略^[22]。简单来讲,鲁棒性用来表示系统在被打扰情况下保持其功能或性质的能力,而网络结构鲁棒性已经成为复杂网络研究的重要特征之一^[14]。

对于 6G 卫星通信网络,应支持通过各种技术实现网络的韧性鲁棒,提供以用户为中心的智能化服务。区块链是目前及未来一段时间内新兴代表性技术机制之一,业界对区块链在软件定义光网络、电子政务网及物联网等方面已经有了一定的研究成果,在 6G 卫星通信接入网络也将具有较好的应用潜力。鉴于有限的天基计算能力,本文提出通过轻量化、弱中心的空间区块链等技术,将区块链的智能合约和数据一致性优势引入

6G 天地一张网络的 SDN 聚合控制系统,设计天地协同的容错机制和智能重构机制,实现高效的容错控制和网络智能自愈,提升系统的整体韧性鲁棒指标。图 9 给出了适配卫星算力的方法。基于天地资源虚拟化,SDN 控制器分布于天基和地基物理载体,以适配卫星计算能力。

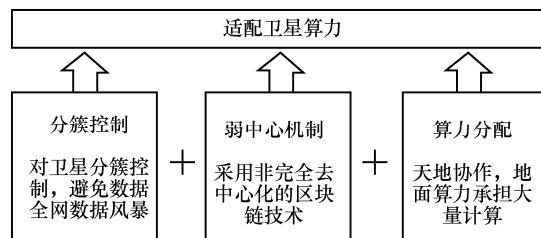


图 9 适配卫星算力的方法

有研究文献提出了基于区块链账本的高效恢复策略^[23]。基于区块链分布账本的高效自愈恢复策略链智能合约规定, n 个业务处理结果生成一个块,数据一致性核验过程中发现故障控制器时立即将其从共识组中隔离。因此,初始主控制器失效或故障时,可快速恢复到最优主控制器,实现控制节点容错和网络层面智能重构。图 10 给出了故障恢复策略,提出 6G 卫星通信网络的韧性鲁棒机制,采用基于 SDN 技术实现卫星动态分簇、分层管理,引入智能合约和数据一致性区块链技术和弱中心的区块链架构,能够提升天地 SDN 控制器节点容错处理、故障恢复与网络智能重构性能,是值得深入研究的一种提升系统韧性鲁棒方案。

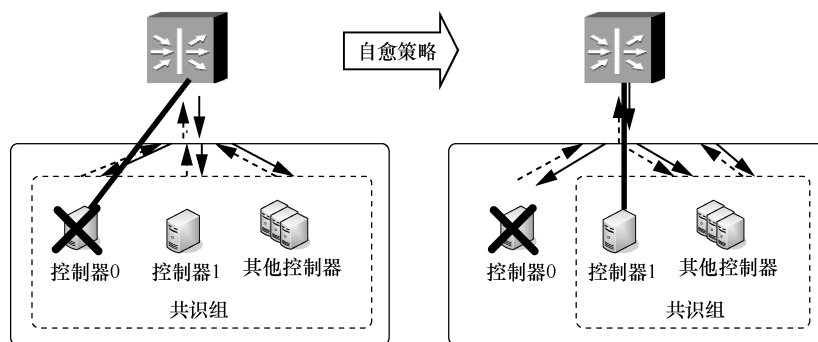


图 10 故障恢复策略

4 结束语

在ITU提出的6G网络3个目标中,明确了卫星网络将是其中重要的一部分。通过卫星通信,可在未来的6G时代真正实现“全球全域”的覆盖。业界目前针对6G的研究还处于初期阶段,对于6G中的卫星通信网络架构研究还很少,本文在综合分析6G愿景和需求基础上,提出了AI赋能的6G卫星通信网络架构及演进思路,同时提出了基于区块链的网络韧性鲁棒机制,希望能促进对6G卫星通信的进一步研究和探索。

参考文献:

- [1] 赛迪智库无线电所. 6G 概念及愿景白皮书[R]. 2020.
Radio Management Research Institute of CCIDWISE. 6G white paper on concept and vision[R]. 2020.
- [2] 吴勇毅. 6G: 未来国之重器 全球抢占的战略制高点[J]. 通信世界, 2019(31): 39-40.
WU Y Y. 6G: The key to future, strategic commanding height of global[J]. Telecom World, 2019(31): 39-40.
- [3] ATIS. Promoting u.s. leadership on the path to 6G[EB]. 2020.
- [4] LI R. 5th ITU-T workshop on network 2030 concluding remarks[EB]. 2019.
- [5] 汪春霆, 翟立君, 卢宁宁, 等. 卫星通信与 5G 融合关键技术与应用[J]. 国际太空, 2018(6): 11-16.
WANG C T, ZHAI L J, LU N N, et al. Key technologies and application of satellite communications and 5G integration[J]. Space International, 2018(6): 11-16.
- [6] SaT5G. Satellite and terrestrial network for 5G[EB]. 2019.
- [7] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [8] WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020(5): 493-504.
- [9] ZHANG Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019(99): 1-1.
- [10] 中国联合网络通信集团有限公司. 中国联通空天地一体化通信网络白皮书[R]. 2020.
China United Network Communications Group Co., Ltd. White paper on air-space-ground integrated network[R]. 2020.
- [11] 广东省新一代通信与网络创新研究院, 清华大学, 北京邮电大学, 等. 6G 无线热点技术研究白皮书[R]. 2020.
Guangdong Communications and Networks Institute, Tsinghua University, Beijing University of Posts and Telecommunications, et al. 6G White paper on wireless hot point technology study[R]. 2020.
- [12] ITU. 人工智能让无线电通信更加智能 无线电通信将使人工智能发挥作用并实现连通来源[EB]. 2020.
ITU. AI will make radio communications smarter Radio communications will enable AI functioning and connectivity[EB]. 2020.
- [13] 尤肖虎, 张川, 谈晓思, 等. 基于 AI 的 5G 技术: 研究方向与范例[J]. 中国科学(信息科学), 2018, 48(12): 1589-1602.
YOU X H, ZHANG C, TAN X S, et al. AI for 5G: research directions and paradigms[J]. Science China (Information Sciences), 2018, 48(12): 1589-1602.
- [14] 杜巍, 蔡萌, 杜海峰. 网络结构鲁棒性指标及应用研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 93-97.
DU W, CAI M, DU H F. Study on indices of network structure robustness and their application[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4): 93-97.
- [15] 刘贺语, 孙富春, 李洪波, 等. 一种基于机器学习的卫星网络 QoS 路由机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S2): 263-267.
LIU H Y, SUN F C, LI H B, et al. A satellite network QoS routing scheme based on machine learning[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(S2): 263-267.
- [16] 朱重儒, 朱立东. 一种基于机器学习的卫星干扰信号 DOA 估计算法[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 586-590.
ZHU Z R, ZHU L D. A machine learning based DOA estimation algorithm for satellite interference signals[J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(6): 586-590.
- [17] 王智. 基于机器学习的卫星认知网络频谱感知技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
WANG Z. Research on spectrum sensing technology of cognitive satellite networks based on machine learning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [18] LUO F L. Machine learning for future wireless communications[M]. Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [19] LETAIEFKB, CHENW, SHI Y M, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(8): 84-90.
- [20] ZTE. Cloud native 5G core network Solution[EB]. 2020.
- [21] FSB. Cyber Lexicon[Z]. 2018.
- [22] Hans Rudolf Heinemann. Robustness and reconfigurability – key concepts to build resilience[EB]. 2018.
- [23] YANG H, LIANG Y S, YAO Q Y, et al. Blockchain-based secure distributed control for software defined optical networking[J]. China Communications, 2019, 16(6): 42-54.



[作者简介]



吴晓文（1967—），男，博士，电子科技大学教授，中国宇航学会卫星应用专业委员会委员，主要研究方向为高通量卫星通信、低轨卫星星座系统、卫星物联网、天地一体化融合通信网络、移动通信系统、6G 和专网通信系统等。



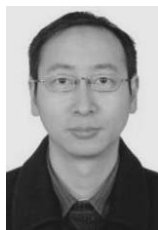
刘冰（1973—），男，深圳市星网荣耀科技有限公司总经理，主要研究方向为卫星通信、天地一体化融合通信网络、卫星通信中的移动性管理、专网移动通信等。



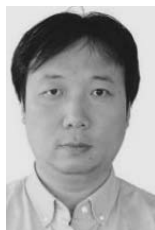
焦侦丰（1977—），男，深圳市星网荣耀科技有限公司系统方案总工程师，主要研究方向为卫星通信、天地一体化融合通信网络、移动通信、专网通信等。



朱立东（1968—），男，博士，电子科技大学教授，中国通信学会卫星通信委员会委员，中国电子学会通信分会卫星通信与专网通信专业技术委员会委员，国际宇航联合会（IAF）会员，中国宇航学会会员，主要研究方向为卫星通信传输与组网、天地一体化网络、通信信号处理。



凌翔（1972—），男，博士，电子科技大学教授，信息与通信工程学院副院长，主要研究方向为天地一体化通用处理平台、异构计算与并行信号处理、移动通信信号处理等。



韩磊（1978—），男，星展测控科技股份有限公司董事长，主要研究方向为卫星通信、多传感器信息融合等。