

面向卫星互联网的层级化智能部署架构

纪 哲, 吴 胜, 王文博

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘 要: 为了满足立体化通信服务接入需求, 卫星网络逐渐由各系统孤立、专网服务部署向通信网络基础设施方向发展, 而万物互联下爆炸式流量增长、低时延业务传输给空间大尺度下的卫星互联网带来挑战。面向快速响应、协同处理等要求, 在分析卫星互联网网络架构设计需求基础上, 提出层级化智能部署架构, 探索在该架构中可部署的智能技术, 并讨论面临的技术挑战。

关键词: 卫星互联网; 网络架构; 层级化智能部署

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022008

Hierarchical Intelligence Deployment Architecture for Satellite Internet

JI Zhe, WU Sheng, WANG Wenbo

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: To support the extensive traffic anytime and anywhere, satellite networks have become a communication network infrastructure. It is challenging for the large-scale satellite internet to satisfy the requirements of the explosive increasing data traffic and the delay-sensitive service delivery. The architecture characteristics of the satellite internet were discussed. Then, a hierarchical intelligence deployment architecture was proposed, and several intelligent training techniques that were highly possible for application in the architecture were given. Finally, some technical challenges for the proposed architecture were discussed from different perspectives.

Keywords: satellite internet, network architecture, hierarchical intelligence deployment

0 引言

卫星网络具有覆盖范围广、资源调配灵活等优势, 能够为空域、海域、地面提供立体化通信服务, 并可为受地质或气象灾害地区等提供应急通信保障^[1]。为满足广域通信接入需求, 卫星网络由各系统孤立、专网部署逐步向通信网络基础设施方向发展^[2-3], 与地面网络、移动通信网融合组成空天地一体化网络, 提供全球、全时、统一、连续的服务能力, 能够为低空飞行、远洋航行、应急救援、战场指挥、泛在物联等业务应用提供弹性、智能、精准的信息服务^[4]。

国内外对卫星互联网已开展大量研究及实践, SpaceX

的Starlink计划已发射近1 800颗卫星, 旨在打造低轨宽带卫星互联网巨型星座。与此同时, ITU、3GPP、Sat5G 等国际标准组织启动5G与卫星网络的融合组网研究^[5]。2020年卫星互联网被纳入我国“新基建”信息基础设施建设范畴, “十四五”规划和2035年远景目标明确提出要打造全球覆盖、高效运行的空间基础设施体系, 抢占卫星互联网发展的制高点对我国至关重要。

为实现未来网络主要特点之一的“泛在连接”, 卫星互联网将通过与地面的移动通信网络及互联网, 空基网络(飞艇、无人机等各类飞行器), 海基网络(海面及海洋通信设备、岛屿网络设施等)等网络的立体化异构互联^[6],

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62071063)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 62071063)

在实现各异构网络之间互联互通的同时，满足太空、空中、陆地、海洋等全要素的业务接入需求。而空、天、地、海等各类业务所提出的差异化服务要求给大时空尺度的卫星互联网带来快速响应、大规模接入等挑战^[7]。

现有卫星网络完全依赖于地面中心的管控，相关数据均传输至地面中心进行处理决策^[8]，这种传统管控的“中心式”在大规模业务流量请求下，中心式决策的通信流量会带来额外的网络交互压力，造成网络拥塞，无法高效处理多样化任务需求。因此，单一中心式管控无法适应卫星互联网大规模业务接入及快速响应需求。随着嵌入式硬件技术、传感器技术的发展，卫星计算能力、存储能力、感知能力不断提升，将赋予卫星更多的智能^[9]，卫星网络的数据处理及决策可由卫星自身部分执行。算力和存储能力的提升为卫星网络的局部自治创造条件，而万物互联下位于信息网络边缘的设备数量和其产生的数据快速增长促进卫星网络算力的下沉，也为卫星互联网满足差异化业务需求提供解决方案。

本文分析卫星互联网的架构能力需求，提出层级化智能部署架构，探索在该架构中可部署的智能技术，并从网络分层、管控协作、集群协同等多个方面讨论面临的挑战。

1 卫星互联网架构能力需求分析

在卫星互联网中，处理能力较强的中高轨卫星网络作为天基骨干网可部署轻量化天基核心网^[9]，与地面核心网构成天地双核心网架构。随着器件处理能力的提升，更多的网络设备（低轨卫星、无人平台等）具备更强的计算和决策能力，为了满足空、天、地、海差异化服务接入及传输需求，卫星互联网架构需要具备云边协同、局部协作自治、统一网络管控、在轨智能升级等能力。

1.1 云边协同

随着边缘计算技术的成熟，算力下沉到位于网络边缘的低轨卫星，结合低轨卫星的近地优势，提供快速响应天基边缘计算服务；同时，天基核心网的高轨卫星利用其强算力和广覆盖特点，提供天基云计算服务。由于低轨卫星过顶时间短、链路时延小，适合处理局部、时间敏感型、短周期业务数据，而覆盖稳定、链路时延大的高轨卫星适合执行全局决策处理非实时、长周期数据^[10]。通过高低轨卫星网络的云边协同计算，可实现不同规模、不同需求（带宽、时延、安全等）的数据处理及分析。

1.2 局部协作自治

由于单一节点计算、存储、传输资源受限，万物互

联下的区域性爆炸式流量需要邻近多个网络节点的协作处理，而网络传输压力的加剧和空间大尺度使得卫星互联网进行单一中心式决策时会产生大量流量开销及难以忍受的传输时延。此时，节点间通过局部自治生成协作决策更适合大尺度网络的区域性业务接入及资源配置，可以实现快速响应及就近转发，减少网络中大尺度流量交互。

1.3 统一网络管控

卫星互联网节点数量众多、拓扑复杂多变、时空尺度大，传输、计算、存储等资源复杂交错，难以进行全面的分析、控制及优化。而网络节点算力的提升、AI技术的引入，赋予分散式节点更多的自由度，在局部协作自治下如何高效地进行网络管控，给大尺度网络管控带来新的问题和挑战。跨大尺度时空下的大规模节点智能协同难以收敛，卫星互联网依然需要统一的网络管控。

1.4 在轨智能升级

受限于卫星研制、生产、发射成本及长时间周期，卫星硬件升级难度大、代价高，将严重影响新兴业务的接入及新型技术的部署。人工智能技术的进步将有助于卫星硬件与功能解耦，结合卫星算力的提升，AI赋能卫星互联网已成共识，将改变物理实体与节点功能、支持业务的紧耦合关系，实现卫星在轨智能升级，面向业务需求及技术更迭快速更新网络功能，高效提升网络性能。

2 层级化智能部署架构

2.1 架构概述

面向卫星互联网的云边协同、局部协作自治、统一网络管控、在轨智能升级需求，本文提出一个层级化智能部署架构。如图1所示，综合考虑卫星互联网中不同节点的轨道高度、计算能力、移动性、业务定位等属性，将网络节点进行层级划分。例如，可将地面指挥中心作为顶层架构；覆盖广、处理能力较强的中高轨卫星网络作为天基骨干网，为次顶层架构；移动性较强、算力较弱的低轨卫星为三层架构；浮空平台、航母平台、无人机集群等具有接入层属性的节点为四层架构；直升机等类似空中平台、舰船、地面偏远域移动用户等用户侧节点为底层架构。不同网络节点的层次划分可根据网络需求进行灵活的初始化定义。需要注意的是，该分层架构并不改变原有星间、星地、不同平台间的通信及控制链路，而且相邻两层间存在业务关系，即存在数据传输链路，否则不能划分到相邻两层架构中。

在该架构中，自顶向下地进行跨层智能化部署，同

时,局部区域内网络节点协同自治,从上层部署、自身演进两个方向实现轨智能升级;通过跨层在轨功能部署打破物理实体的不可替代性,并且上层网络节点在整合更大尺度网络状态信息下有序地实现统一网络管理与控制。该架构核心能力具体体现在以下几个层面。

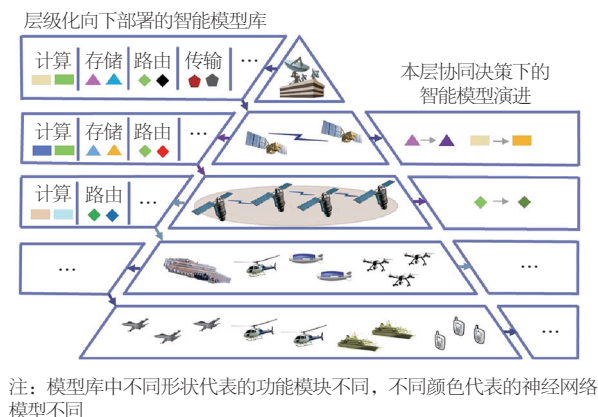


图1 层级化智能部署架构

(1) 层级化智能部署

在图1所示层级化架构基础上,本文提出一个自顶向下的跨层智能化部署初步方案。首先,层级化向下部署的智能模型库:除底层外,各层网络均维护相邻下一层网络节点的智能模型升级库,涉及计算、存储、路由、传输等不同功能,上层(如A层)节点可对其相邻的下层(如B层)节点进行功能部署,其中包含但不限于已有功能的智能模型升级、节点新功能模块部署、控制决策部署等。其次,模型库中部署模型的形成或更新:智能模型可能由A层在采集比B层节点或集群所能采集的更大空间、时间尺度的网络及业务状态信息后形成或更新,也可能由再高层节点(如指挥中心)发布。最后,模型的向下发布:A层与B层节点没有一一对应关系,部署模型或决策的发布与A层管控协作策略有关,并不固定由某个节点发布。

(2) 节点自治下的集群分布式协同

随着计算和处理能力的提升,未来卫星互联网节点基本具备自主决策能力,但由于各类资源受限且难以实时获取大尺度网络及业务状态信息,邻近多个节点的有效协同可以高效提升资源利用效率及业务保障能力。在图1所示架构中,多个低轨卫星、多个空基平台等可各自形成协同集群,进行多智能体决策及信息、资源共享,在本架构中,同层多节点协同采用分布式协作模式,避免中心式协作带来的时延、拥塞及鲁棒性等方面的问题。如图2所示,一方面,智能模型的部署是云边协同的结果,每个网络节点在接收上层智能模型部署的同时,

也在根据集群协作状态、网络及业务状态不断更新其智能模型;另一方面,即使上层网络由于不可控因素不再进行功能更新部署,各层网络节点亦能完善其模型以更好地适应环境。

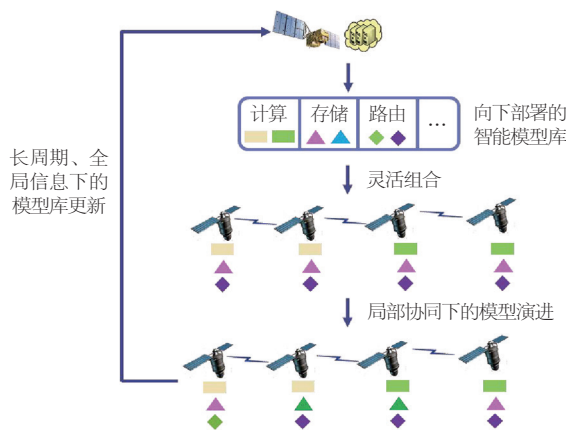


图2 跨层智能部署下集群协同的模型更新

(3) 松耦合的统一化网络管控

通过跨层在轨功能的更新部署将控制功能与物理实体解耦,网络节点通过同层协作或上层部署均可成为下层网络的控制单元,实现松耦合的网络管理与控制。与此同时,自顶向下的决策部署满足统一化网络管控的要求,主要实现包括网络标识与编址、接入与移动性管理、路由控制与会话管理、资源管理与切片、组网认证与鉴权、安全管控等功能。其核心控制功能部署在地面核心网及天基骨干网中,接入网及用户侧网络节点动态部署本地控制单元模块,按照统一控制、分布实施、星地协同、跨星协作机制组网实现,形成保障卫星互联网高效运行的神经系统。

2.2 AI赋能的跨层智能部署技术

在卫星互联网跨层智能部署过程中,网络节点的功能模块、节点间的协作模式及网络性能会发生变化,基于深度学习的决策与调度框架大多需要决策对象维持一个相对稳定的结构以保持较好的决策性能,而跨层在轨智能部署需要采用能够适应在线模型更新的训练技术,如深度强化学习、迁移学习及联邦学习等技术。

(1) 基于深度强化学习的智能部署技术

由于卫星互联网的拓扑高动态及业务随遇接入特性,网络管控及调度决策需要适应不断变化的网络及业务状态,相比深度学习的离线固定模型,深度强化学习技术可以根据环境状态及激励在线更新网络模型,快速适应网络及业务变化。面向多智能体的集群协作需求,如图3所

示,各个卫星智能体根据其自身需求及协作状态进行基于深度强化学习的模型演进,自主生成调度及协作决策,提升网络弹性和扩展性。另外,在跨层部署新的功能模型之后,采用新模型的网络节点需要借助深度强化学习进一步更新功能模型,以更好地适应网络及业务状态。

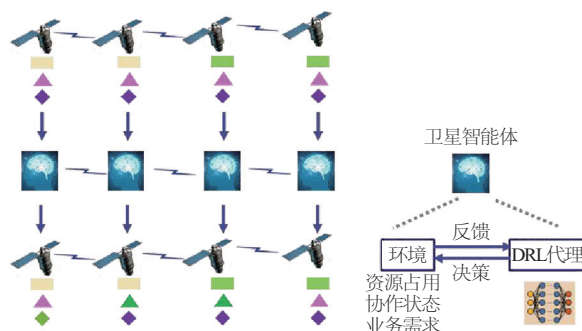


图3 基于深度强化学习的多智能体协作

(2) 基于迁移学习的智能部署技术

考虑到卫星互联网存在很多类似节点及共性任务,诸如低轨卫星星群的目标业务及节点功能均类似,不同实体的空中无人平台即使结构不同,其功能及目标也多有交叉,这些存在共性的网络实体或业务属性类似、或者节点功能类似。因此,可利用迁移学习的方式进行功能模型的迁移,进行轻量化的在线增量训练,达到预期任务模型。如图4所示,不同无人机集群之间可以基于某一方成熟的协作模型进行迁移学习,生成适应其集群协作与调度的模型,使其在先验信息缺乏的条件下可快速达到较为优化的性能。跨层智能部署为迁移学习提供良好的模型交互渠道,即使对于远距离无交互的两节点或两集群间,亦可通过上层网络进行迁移学习的模型调度决策,增加网络的扩展性及灵活性。

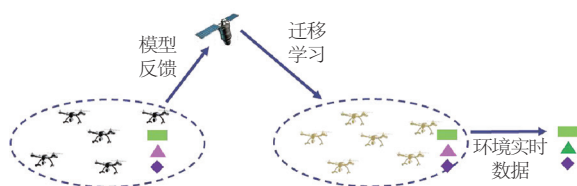


图4 基于迁移学习的模型部署及更新

(3) 基于联邦学习的智能部署技术

考虑到卫星互联网中同类节点的共性运行特征及单个节点不完全状态信息下的模型局限性,上层网络可采用联邦学习技术,对下层较大范围内的多节点进行模型

聚合,在融合全局或大尺度网络状态信息后生成可泛化的统一管控模型,通过跨层智能部署进行分发更新。在联邦学习过程中,如图5所示,上层网络将当前的全局模型发送到下层节点,各个节点根据本地数据训练全局模型,并将得到的更新模型返回上层网络;上层网络根据收到的所有更新模型对全局模型进行更新,而节点无须共享其实体设备中的数据,保障数据安全和隐私性。也就是说,上层网络并不需要获取下层网络的具体数据,一方面避免数据泄露,另一方面减少大流量数据交互及其带来的网络拥塞。可以看出,基于联邦学习的模型更新依赖全局信息的获取,其优势不在于短周期下的模型更新,可借助联邦学习在不影响网络正常运行的情况下,进行长周期下融合全局信息模型更新。

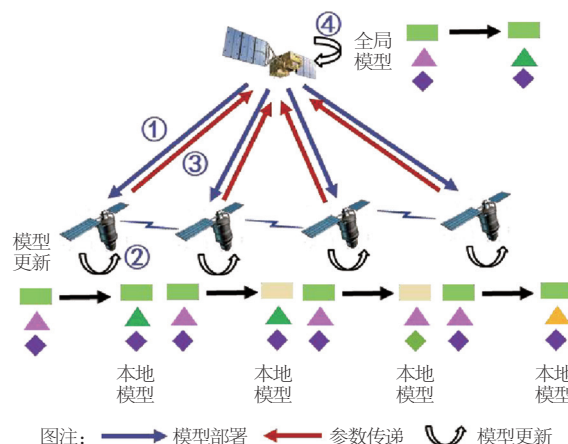


图5 基于联邦学习的模型部署及更新

基于深度强化学习、迁移学习、联邦学习的不同智能部署技术是相互关联与协作的,模型的融合需要联邦学习,模型的借鉴需要迁移学习,模型的演进需要深度强化学习,多种技术相互融合,在集群协作下完成模型的快速部署和动态自适应地演进。

3 层次化智能部署面临的挑战

本文提出的卫星互联网跨层智能部署方案属于初步探索阶段,在网络分层、管控协作、集群协同、在轨模型轻量化等方面面临很多技术问题及挑战。

(1) 如何进行灵活的网络分层

在图1所示层次化智能部署架构中,如何对大规模天地融合网络进行分层是提升智能部署效率的关键,不仅与网络节点功能定位(如骨干网、接入网、用户侧等)有关,也与自顶向下的管控架构有关。随着天-地-空-海新兴业务的不断涌现,可在轨升级的节点功能与网络拓扑结

构可能会发生不可预测的变化,长周期内固定的网络分层并不能适应这种变化,因此,智能灵活的分层能够更有效地支撑跨层部署架构。由于网络分层与诸多因素有关,难以给出统一的准则,也引出一些开放讨论的问题。例如:同类节点是否都在同一分层,与该类节点间采取的合作模式有关,如同类节点在分布式协作下均在同一分层;网络分层是否可能通过长周期相关的智能模型训练得到,还是通过传统的方式由地面指挥中心统一部署等问题。

(2) 松耦合网络管控下如何高效协商

本文架构采用松耦合的网络管控,打破控制功能与物理实体的一一对应关系,符合硬件要求的节点实体通过上层在线跨层控制功能部署均可具备管控能力,由此也会带来一些问题与挑战。不同于提前部署的固定控制单元,灵活的控制单元带来两个层面的问题。首先,同层已有控制单元与新增控制单元之间如何协作并高效协商管控范围,尤其在覆盖或业务有交叉情况下,并且在轨协商需要集中式决策还是分布式决策,能不能做到快速响应及部署;其次,新增控制单元是否需要通过迁移学习获得下层网络的状态信息及决策经验,并且与下层被控制集群或节点之间的握手协议如何定义等。这两个层面的多个问题需要相关协议进行协调或通过在线学习实现快速灵活的配置。

(3) 如何确定集群协同的节点规模

由于集中式决策带来的时延及拥塞问题,本文架构通过分布式多智能体协同进行自主决策及资源共享,无人机集群协同也是研究热点之一,仍有很多问题亟待探究。结合本文的跨层智能部署架构,虽然集群协同进行自主决策,但上层控制单元会根据全局、长周期的状态信息对集群协同进行模型干预及更新。在这个过程中存在一些问题,控制单元如何确定集群的空间尺度,即决策模型的观测及训练对象,对于集群中可能存在的功能不同个体如何处理,以及控制单元如何确定模型更新的对象及范围等。另外,基于深度强化学习的分布式多智能体模型演进对网络规模比较敏感,其协同复杂度随着智能体数量的增加大幅增加,上层控制单元是否能够根据协同状态灵活调整节点协同的规模。

(4) 如何实现在轨模型的轻量化

跨层智能部署的关键在于智能模型的传递和在轨部署,其中,智能模型可以精简为参数传递,而受限于卫星等空中节点的计算能力,轻量化在轨模型的部署可有效减少计算能力的消耗,也可以大幅提高后期基于深度强化学习的模型演进效率。如何提取轻量化的智能模型,同时又不过多损耗模型性能;轻量化模型能否在轨生成,由哪个层次的网络节点生成,这些随之而来的问题及挑战仍待探索。

4 结束语

本文首先讨论面向卫星互联网的云边协同、局部协作自治、统一网络管控、在轨智能升级等架构设计需求,继而提出一个层级化智能部署架构,自顶向下地进行跨层智能化功能及决策部署,在松耦合的网络管控下,实现融合大尺度、长周期状态信息的智能模型在局部集群协同网络中的灵活部署。然后,讨论在跨层在轨智能部署中可能应用的训练技术,包括深度强化学习、迁移学习及联邦学习等,给出跨层智能部署架构在网络分层、管控协作、集群协同、模型轻量化等方面面临的技术挑战。

参考文献:

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.
- [3] 张更新, 丁晓进, 曲至诚. 天地一体化物联网体系架构及干扰分析研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 22-33.
ZHANG G X, DING X J, QU Z C. Research on space-based integrated internet of things architecture and interference analysis[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 22-33.
- [4] 赛迪智库无线电所. 6G 概念及愿景白皮书[R]. 2020.
CCID Radio Institute. 6G concept and vision white paper[R]. 2020.
- [5] LI R. 5th ITU-T workshop on network 2030 concluding remarks[EB]. 2019.
- [6] 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.
- [7] 中国联合网络通信集团有限公司. 中国联通空地一体化通信网络白皮书[R]. 2020.
China United Network Communications Group Co., Ltd. White paper on China Unicom air-space-ground integrated communication network[R]. 2020.
- [8] GOPAL R, BENAMMAR N. Framework for unifying 5G and next generation satellite communications[J]. IEEE Network, 2018,

32(5): 16-24.

- [9] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔. 6G中的卫星通信高效天基计算技术[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 50-53, 78.

WU X W, JIAO Z F, LING X. High-efficiency space-based computing for satellite communications in 6G[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 50-53, 78.

- [10] 舒红平, 唐旺, 罗飞, 等. 云边端协同的天空地一体气象信息处理及智能服务研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 87-92.

SHU H P, TANG W, LUO F, et al. Research on cloud-side collaborative meteorological information processing and intelligent services[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 87-92.

- [11] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[作者简介]



纪哲（1989-），女，北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生，主要研究方向为卫星通信、空间信息网络等。



吴胜（1982-），男，北京邮电大学信息与通信工程学院副教授，主要研究方向为空间信息网络等。



王文博（1965-），男，北京邮电大学副校长，教授，主要研究方向为无线移动通信、卫星互联网等。