



专题：星地融合移动通信及卫星互联网

基于SDN和NFV的空天地一体化网络 任务部署与恢复综述

曹怡璐, 贾子晔, 尤嘉豪, 张磊, 吴启晖
(南京航空航天大学, 江苏 南京 211106)

摘要: 空天地一体化网络作为6G技术的关键组成, 在整合天基、空基和地基网络时, 面临节点异构性、业务多样性等挑战, 进而引发资源分配、竞争及故障风险等问题。基于此, 聚焦基于软件定义网络 (software defined network, SDN) 与网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 的空天地一体化网络任务部署与恢复, 首先阐述了空天地一体化网络系统架构, 介绍了各层网络构成、SDN和NFV原理及其相关应用, 然后, 针对上述挑战, 以服务功能链技术为抓手, 提出了面向任务的服务功能链优化部署、利用智能算法实现动态调度、通过匹配博弈算法完成失效恢复等策略, 最后, 构建了一个用例, 设定节点部署、服务功能链建模等, 验证了所提策略在提升服务功能链完成效率以及应对资源故障方面的有效性, 旨在为空天地一体化网络资源管理提供理论基础。

关键词: 空天地一体化网络; SDN; NFV; 服务功能链; 资源分配

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025138

A survey of task deployment and recovery in space-air-ground integrated networks based on SDN and NFV

CAO Yilu, JIA Ziye, YOU Jiahao, ZHANG Lei, WU Qihui
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: The space-air-ground integrated network, as a key technology in 6G, faces challenges such as node heterogeneity and service diversity when integrating the space-based, air-based, and ground-based networks. These challenges subsequently lead to issues such as the resource allocation, competition, and failure risks. Based on this, the task deployment and recovery of the space-air-ground integrated network focusing on software defined network (SDN) and network functions virtualization (NFV) were addressed. Firstly, the space-air-ground integrated network

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-04-16

通信作者: 贾子晔, jiaziye@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62301251); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20220883); 航空科学基金资助项目 (No.2023Z071052007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62301251), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20220883), The Aeronautical Science Foundation of China (No.2023Z071052007)



system architecture was elaborated, introducing the composition of each layer of the network, the principles of SDN and NFV, as well as their related applications. Subsequently, in response to the above-mentioned challenges, based on the service function chain technology, corresponding strategies including the task-oriented service function chain optimized deployment, dynamic scheduling achieved through intelligent algorithms, and failure recovery accomplished via a matching game algorithm were proposed. Finally, a use case was constructed, setting node deployment and service function chain modeling. The effectiveness of the proposed strategies in improving the completion efficiency of service function chains and dealing with resource failures was verified, providing a theoretical basis for the resource allocation for the space-air-ground integrated network.

Key words: space-air-ground integrated network, SDN, NFV, service function chain, resource allocation

0 引言

在6G通信技术的蓝图里,空天地一体化网络(space-air-ground integrated network, SAGIN)被列为信息基础设施的重点建设项目。SAGIN的核心目标是整合天基、空基和地基网络,打造一个全球覆盖、协同高效的信息体系,为“一带一路”等国家倡议提供全面支持。同时,SAGIN突破了传统网络结构的限制,将天基、空基、地基的通信进行无缝融合,为新一代信息网络的构建开创了全新的范式。作为全球通信发展历程中的新里程碑,SAGIN不仅推动了通信、存储和计算技术的全面革新,还为应对复杂多变的国际环境提供了坚实的技术保障,成为现代科技与国家战略协同发展的典范^[1]。

SAGIN主要由3层网络构成,每一层在整个系统中承担着独特的作用。天基网络通过低地球轨道(low earth orbit, LEO)、中地球轨道(medium earth orbit, MEO)和地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星系统构建全球宽带接入网络,填补了偏远地区的通信盲区,广泛应用于国家安全、交通管理、环境监测、紧急救援等多个领域,为现代化战略的实施和科技发展提供了重要的支撑^[2];空基网络依托无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)、高空飞艇、高空平台(high-altitude platform, HAP)等,适用于灾害救援等需要快速响应和高扩展性的场

景^[3-4];地基网络主要由地面基站、物联网设备、边缘计算节点和云数据中心等组成,能够支撑高密度人口区域的超低时延通信需求,同时与天基、空基网络协同工作,提供稳定的数据存储与处理能力。通过跨域融合,SAGIN提升了通信效率和可靠性,为技术创新注入了强大的动力^[5]。

与传统通信网络相比,SAGIN拥有广阔的覆盖范围,能突破地域限制;具备高度的灵活性,能够适应各种复杂环境;拥有强大的资源协同能力,能够根据多样化的应用场景提供智能化、定制化的信息服务^[6]。这一创新体系成功填补了传统地面网络在偏远地区的通信空白,通过跨域融合,实现了资源的优化配置和信息的高效传输。SAGIN是一个资源丰富多样、结构复杂的多层异构系统,在该网络中,卫星因其周期性运动呈现高动态性,而UAV节点则具有灵活性的特点,且各节点的资源能力存在差异,这进一步加剧了系统的复杂性^[6]。传统的卫星和空中UAV往往针对单一任务设计,不同网络层之间缺乏有效的资源共享机制,造成资源利用率低下、成本增加以及服务效率受限^[7-8]。因此,如何高效协同SAGIN的多层资源,以满足快速增长的地面用户需求和复杂多样的任务场景需求,成为亟待解决的关键问题。

为了提升资源管理效率,本文构建了基于软件定义网络(software defined network, SDN)与

网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 技术的 SAGIN 架构。SDN 的核心思想是将网络的控制平面与数据平面分离, 通过集中式的控制器实现网络流量的灵活管理和调度^[9]。NFV 则通过将网络功能从硬件设备中解耦, 使其能够在通用设备上以软件形式运行, 解决了网络节点间的隔离问题, 并支持任务之间的相互连接和资源共享^[10]。基于 NFV 的资源分配可以看作服务功能链 (service function chain, SFC) 的部署过程, 即按照特定顺序执行虚拟网络功能 (virtual network function, VNF), 从而提供特定的网络服务^[11-12]。通过 SDN 控制器, SAGIN 可以实时感知网络拓扑和流量状况, 根据实际需求动态调整网络策略, 从而实现对 SFC 的智能部署和管理。在 SAGIN 中, SDN 与 NFV 的结合进一步优化了网络资源的分配和利用^[13]。

SDN 和 NFV 技术在 SAGIN 中的应用主要面临以下挑战。

- 多维动态资源表征困难: 在 SAGIN 中, 卫星和 UAV 等节点的高度动态性导致网络拓扑结构不断变化, 使得准确描述跨时间的多层资源特性变得极为复杂, 这增加了 SFC 部署模型构建的难度。
- 突发任务需求冲突: 随着任务种类和数量的增多, 紧急需求的出现可能引发资源竞争和部署冲突, 进而导致任务调度失衡, 甚至任务失败。在此情形下, 如何快速响应并合理分配资源以满足突发任务的需求, 是一个亟待解决的问题。
- 网络资源意外故障: 高动态网络中容易出现节点故障或资源中断的情况, 这会对 SFC 部署产生影响, 导致业务中断和性能下降。因此, 设计有效的恢复机制来应对资源故障, 并确保 SFC 能够重新成功部署, 是当前迫切需要解决的问题。

针对以上这些挑战, 本文研究了基于 SDN 与

NFV 的 SAGIN 资源管理技术与应用。首先, 本文阐述 SAGIN 系统架构, 介绍了该网络的各层构成与作用、SDN 的控制机制、NFV 如何打破网络功能与硬件捆绑、SFC 如何串联 VNF 实现复杂服务的原理, 以及 SDN 与 NFV 在 SAGIN 中的广泛应用; 其次, 分析了当前面临的资源分配、竞争和故障风险等挑战, 并提出 SFC 部署优化、动态调度与失效恢复等应对策略; 最后, 通过对用例进行分析, 设置节点部署、SFC 建模等, 分析不同因素对 SFC 完成时间和总耗时的影响, 并验证了相关策略的有效性。

1 国内外研究现状

在 SAGIN 的资源管理和优化方面, 国内外学者已经展开了研究。文献[14]系统综述了 SAGIN 资源分配策略, 探讨数学优化、博弈论及人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术在优化资源利用、降低时延中的作用, 指出未来需要融合智能算法与动态管理以提升网络性能与稳定性。文献[15]针对 SAGIN 提出协同联邦学习架构, 以解决流量回传安全与时效性问题, 通过改进深度学习算法并结合半监督方法, 实现了不需要人工标注和特征工程的端到端异常流量检测。文献[16]针对 6G SAGIN 部署自动化需求, 提出联邦学习辅助的深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 框架, 通过本地与全局协同优化部署策略, 在数据管理和资源分配中验证了其对关键性能指标的提升效果, 并探讨了 AI 技术面临的挑战。文献[17]提出一种在 SAGIN 中融合多接入边缘计算与区块链的架构, 通过物联网任务分割、UAV 带宽分配及深度确定性策略梯度算法, 实现动态环境下的网络能耗优化。文献[18]针对 SAGIN 中负载均衡效率受限问题, 构建自由空间光/射频融合架构, 并提出基于生成对抗网络的 DRL 路由策略, 以执行动态路由, 同时确保网络负载均衡。为应对 SAGIN 中物联网数据收集的动



态资源分配挑战，文献[19]提出基于李雅普诺夫(Lyapunov)优化的在线算法，通过实时调整数据准入、子信道分配与功率控制，在保证队列稳定性的前提下，最大化网络的长期效用。上述研究利用多种先进技术和算法，对SAGIN中的资源管理与优化进行了讨论和研究，但这些研究未考虑与SDN和NFV技术的结合。

在地面网络中，SDN、NFV和SFC面临诸多挑战，众多学者针对这些问题开展了研究。文献[20]提出一种网络边缘在线SFC部署方案，运用DRL方法，综合考虑资源分配与部署位置对服务请求平均时延的影响，权衡SFC多样性与可用性，并针对用户需求变化或服务器崩溃等场景，考虑性能降级策略与迁移成本，以实现SFC的重新部署。文献[21]针对NFV环境下高维度SFC部署的高可靠、低成本问题，提出基于近端策略优化的SFC部署算法，将部署建模为马尔可夫决策过程，设置奖励函数，用近端策略优化方法进行求解。文献[22]提出基于博弈论的方法来降低边缘SFC服务时延，将资源分配问题分解为VNF放置与路由、VNF调度两个子问题，分别采用平均场博弈结合强化学习、匹配博弈结合改进的多对一时延接受算法进行求解。文献[23]针对SFC部署问题，提出基于图注意力网络与模仿学习的部署方法，该方法利用图注意力网络评估物理服务器的放置潜力，借助蒙特卡洛树搜索算法，通过模仿学习训练，并结合集束搜索策略来优化解空间。文献[24]在工业物联网中构建动态网络虚拟化技术支持的SFC编排框架，将联合优化问题公式化，以最大化总效用，并分解为SFC选择与动态SFC编排两个子问题，设计了由资源感知匹配算法和平均多步双深度Q网络算法组成的动态SFC编排方案。文献[25]聚焦支持NFV的车联网，针对网络元素故障导致虚拟网络服务性能下降问题，提出动态虚拟资源分配机制，涵盖业务模型建模、各模块详细设计，并通过仿真测试验证了

该机制在保障服务生存性方面的优势。文献[26]引入SDN和NFV，提出基于图神经网络的深度学习模型来预测VNF实例的资源需求，采用整数非线性规划方法解决SFC部署问题，并提出新算法以克服其扩展性难题。文献[27]提出基于SDN的框架，利用深度学习进行检测，并结合强化学习来缓解慢速分布式拒绝服务攻击，融入NFV辅助的移动目标防御机制，以增强防御效果与灵活性。文献[28]提出基于机器学习的SDN/NFV网络流量管理方法，通过预测控制器数量并结合K-Medoid算法进行优化部署，该方法结合SDN、NFV与机器学习技术，实现了网络自动化管理。

虽然在地面网络中已进行了大量相关研究，但在非地面网络(如低空物联网、星地网络、SAGIN)中，关于SDN、NFV和SFC的研究仍处于起步阶段。文献[29]为解决SAGIN中SFC的部署问题，提出基于联邦学习的算法，该算法考虑节点不同特性和资源负载以平衡资源消耗，并提出SFC调度机制，允许SFC重新配置以降低服务阻塞率。文献[30]采用NFV技术构建SFC，提出可重构时间扩展图，将最大化任务完成数的优化问题转化为双边匹配博弈问题，并设计了基于Gale-Shapley的算法。文献[31]研究SAGIN中VNF放置与多播路由联合优化问题，开发低复杂度启发式算法，以在多项式时间内找到有效解。文献[32]将边缘智能(edge intelligence, EI)应用于SAGIN，形成EI驱动架构，增强其通信等能力，从而解决资源受限用户的管理问题，并进一步探讨基于SDN、NFV及DRL等的关键技术，并提出基于DRL的微服务算法。文献[33]考虑将SAGIN用于支持车联网的多样化服务，研究其在线动态VNF映射与调度，对相关成本和时延进行建模，构建混合整数线性规划问题，并提出两种基于禁忌搜索的算法进行求解。文献[34]针对SAGIN资源编排的高能耗问题，提出基于DRL

与图卷积网络的能源感知虚拟网络嵌入算法,通过图卷积网络聚合邻接信息优化节点映射,结合切比雪夫多项式降低计算复杂度,并在链路映射中采用能源优先 K 最短路径策略。文献[35]研究了低空智能网络中UAV网络的自适应SFC编排方案,借助模糊层次分析法量化用户体验质量,引入马尔可夫决策过程模型捕捉网络动态,设计带正则化的竞争双深度 Q 网络算法用于在线部署。在超远程实时服务需求的6G超密集低地球轨道卫星-地面融合网络场景下,面对资源编排难题,文献[36]将多服务交付的SFC部署问题建模为加权势博弈,设计了收敛快的最佳响应算法、易获最优解的自适应策略算法,以及能够适应动态网络且减少信息交换的随机学习算法。文献[37]研究SFC编排与无线资源管理,引入VNF间虚拟链路速率自适应,以提升资源利用率,建模VNF嵌入、虚拟链路速率自适应及无线资源分配问题,以最大化网络收益,先通过逐次凸近似转化为连续优化问题,再在目标函数中引入惩罚项,提出迭代交替算法来求近似最优解。文献[38]通过在软件定义时间演化图上进行VNF编排,探索软件定义低轨卫星网络的服务提供,设计分支定价算法来求最优解,并设计近似算法,结合集束搜索技术来加速求解过程。文献[39]提出卫星边缘计算网络架构,通过联合优化VNF在低轨卫星的部署及用户请求流量的路由,设计近似算法与在线算法,以最小化服务链平均时延,为6G卫星-地面融合网络提供低时延服务保障。

上述研究从不同角度为地面网络和SAGIN的资源分配提供了思路与方法,但考虑的场景与内容较为单一,且在基于SDN与NFV的SAGIN架构的系统研究与资源管理的全面优化方面还有待加强。因此,本文聚焦于基于SDN与NFV的SAGIN资源管理技术与应用,解决资源分配、竞争和故障的挑战,提出基于多种算法的SFC部署优化、动态调度与失效恢复的应对策略。

2 基于SDN与NFV的SAGIN架构

SAGIN以其独特的多层架构,为多样化应用场景提供了全覆盖与高效能的通信基础设施。该架构不仅包含地基、空基和天基网络,还通过引入SDN和NFV技术增强了资源管理能力,实现了网络功能的灵活部署和协同优化。

2.1 SAGIN简介

SAGIN场景如图1所示,其中,地基网络作为SAGIN的基础支撑层,主要由地面移动用户、基站、卫星地面站和分布式数据处理中心共同构成。在整个SAGIN架构里,地基网络有着独特的优势,其高带宽、低时延和较高的稳定性使其承担了高密度用户区域连接、数据存储和任务处理的重要职责。地基网络以传统的蜂窝通信网络为主体,通过基站全面覆盖地面用户,从而实现低时延的数据交互。卫星地面站负责接收卫星数据并进行解码,再将处理后的信息传递到地面数据中心进行后续的处理与存储。分布式数据处理中心提供了强大的计算资源,能够快速分配任务并执行,为整个网络实现智能化调度和高效运行提供了坚实保障。

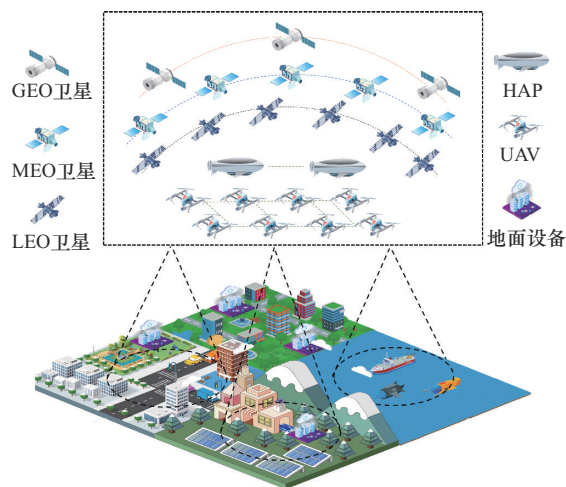


图1 SAGIN场景

空基网络作为SAGIN的中间层,由UAV、高空飞艇和HAP等构成,具备高灵活性、快速部署能力以及中继功能。UAV凭借低成本和强大机



动性的特点，能够迅速部署到灾害现场、偏远地区和其他通信盲区。高空飞艇能长时间悬浮在特定区域，为大范围地区提供稳定的通信服务，尤其适用于需要长时间通信覆盖但不适合 UAV 频繁更换的场景。HAP 承载能力较大，能够部署更复杂的通信设备，为大规模临时任务提供强有力的通信支持。空基网络通过灵活调度和快速响应，有效填补了地基和天基网络之间的覆盖空白，为整个网络的高效协同提供了有力支撑。

天基网络是 SAGIN 实现全球覆盖的关键部分，由 LEO、MEO 和 GEO 卫星系统共同组成，能够为极端环境和偏远地区提供持续且可靠的通信服务。LEO 卫星由于距离地面较近，具备低通信时延和高数据传输速率，尤其适合大数据传输和实时监控等任务。MEO 卫星适用于如海洋运输、远程监控等区域性通信需求场景，并在卫星导航领域发挥着关键作用。GEO 卫星覆盖范围极其广泛，适用于广播通信和全球性服务，通常为边远地区、航海和航空领域提供重要的通信支持。通过这 3 类卫星系统的协同作业，天基网络实现了从城市到极地的无缝覆盖，使全球用户能够随时随地享受到通信服务。

在 SAGIN 架构中，本文构建了可重构时间扩展图（reconfigurable time-extended graph, RTEG），助力资源跨域协同调度。RTEG 通过动态融合时间与空间维度，将地基网络的稳定资源、空基网络的灵活节点以及天基网络的广域覆盖节点统一建模为时变拓扑结构。该模型将连续时间段切分为多个小时隙，在每个时隙内，可以认为网络是准静态的，节点是静止的，节点属性也是不变的。这个时间切片机制能够描述卫星轨道周期、UAV 灵活运动、地面流量波动等动态特性，并通过链路状态、节点负载等实时调整资源分配策略。RTEG 能够突破传统静态网络的局限性，支持 SAGIN 的高效协同。

2.2 SDN 及 NFV 技术简介

SDN 通过解耦控制平面与数据平面，采用集中式控制器实现网络流量的全局管控。其核心架构包含标准化的南向接口（如 OpenFlow 协议），该接口负责底层设备通信；北向接口则面向应用层，提供可编程能力，使网络配置可通过软件进行动态调整，有效解决了传统网络设备控制功能固化、管理复杂的问题。在 SAGIN 架构中，SDN 的全局拓扑感知能力为多域资源协同提供了基础支撑。

NFV 通过将 VNF 部署于通用硬件上，实现了硬件资源与网络功能的解耦。SAGIN 支持根据任务需求在卫星、UAV 等异构节点动态部署 VNF 实例，结合资源编排器实现跨域资源的弹性伸缩。面对不断变化的网络拓扑结构与不稳定的任务负载，NFV 还能实时调整 VNF 的部署位置和配置参数，确保网络服务的连续性和高质量。

SFC 是 NFV 技术中的一个关键概念，SFC 如同一条精心编排的生产线，将一系列 VNF 按照特定的顺序串联，以实现复杂的网络服务。例如，通信任务中的数据类似生产线上的原材料，需要依次经过防火墙、流量优化器和负载均衡器这些加工环节，才能满足任务需求。SFC 将这些功能模块巧妙地组织成链式结构，然后根据实际情况，动态地将它们映射到 SAGIN 的各个资源节点上，确保网络服务既灵活又高效。

SDN 和 NFV 相互关联、相辅相成，共同推动网络架构向更加灵活、高效和可扩展的方向发展。一方面，SDN 为 NFV 提供灵活连接，SDN 集中式控制器能根据 NFV 需求，动态配置网络拓扑，调整流量路径，保障 VNF 间通信的高效稳定；另一方面，NFV 为 SDN 提供多样灵活的网络功能，便于 SDN 控制器调用组合，二者协同实现网络资源分配和管理优化。SDN 与 NFV 的关系示意图如图 2 所示。

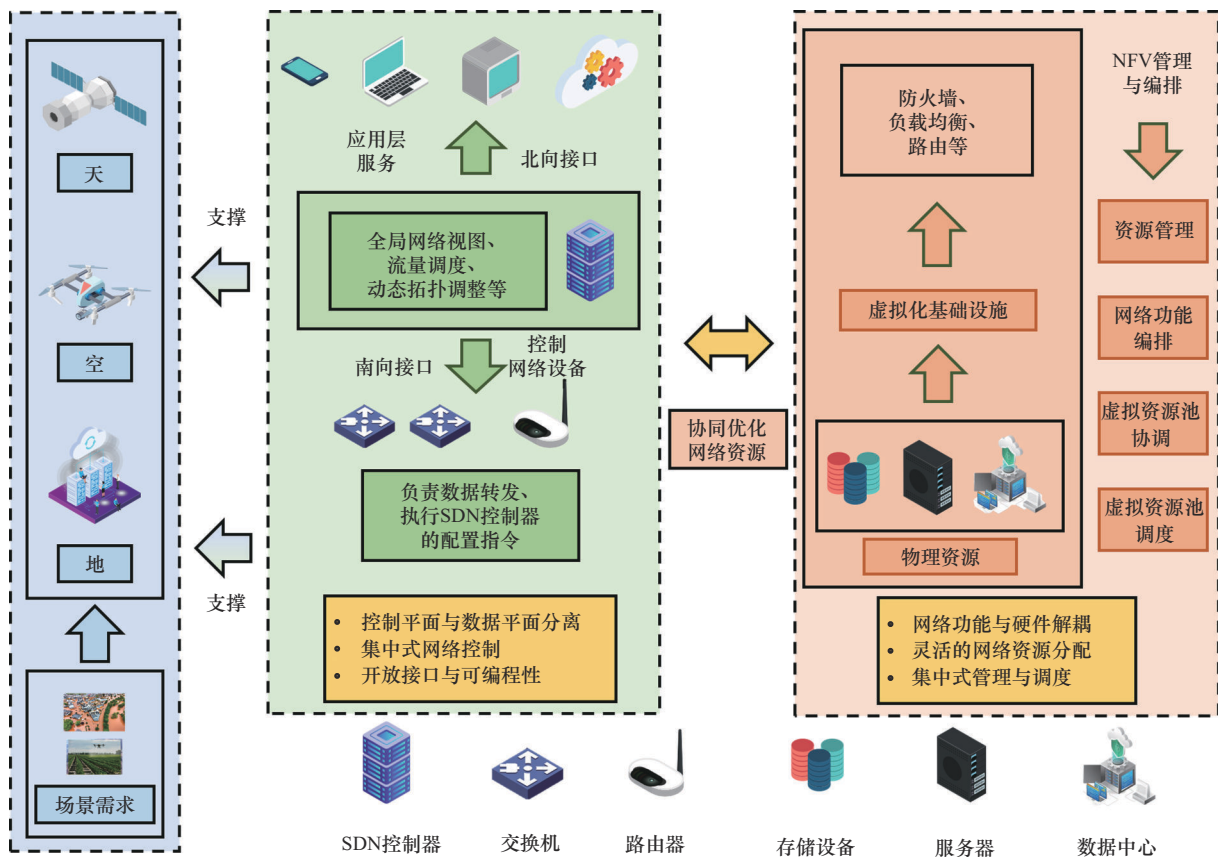


图2 SDN与NFV的关系示意图

2.3 主要应用

在SAGIN架构中，SDN与NFV技术在地基、空基和天基三层网络及跨层协同中发挥关键作用，极大提升了网络的高效性与灵活性。基于SDN和NFV的SAGIN架构与主要应用如图3所示，其主要应用可归纳为以下几个方面。

(1) 流量与路由管理

在流量与路由管理方面，NFV利用虚拟化负载均衡技术，实时收集并深入分析网络流量数据，基于链路性能预估流量高峰，为流量合理分配提供数据基础。SDN控制器凭借其全局视角，利用NFV提供的流量信息，能够更加精准地控制流量在不同网络层次和节点之间的分配。

在动态路由优化方面，NFV动态加载路由优化模块，通过监测节点间链路状态和分析全球通信需求，实时调整数据转发路径，优化带宽资源

分配。SDN依据网络拓扑的实时变化，快速更新路由策略，并与NFV的路由优化模块紧密配合。

(2) 资源管理与调度

在资源管理与调度方面，NFV将分布式数据中心的计算、存储和网络资源抽象为虚拟资源，构建统一资源池，并根据任务的资源需求和优先级，通过相关算法实现资源的动态分配与回收。SDN与NFV的资源管理机制深度融合，根据网络流量和资源使用情况，动态调整资源的分配策略。

在多节点资源协同调度方面，NFV根据各天基和空基节点的位置、剩余电量、通信能力等状态信息，通过分布式协同算法动态分配任务。SDN负责对节点间通信链路的优化管理，通过集中式控制确保各个节点间的通信顺畅，从而提高资源协同调度的效率。

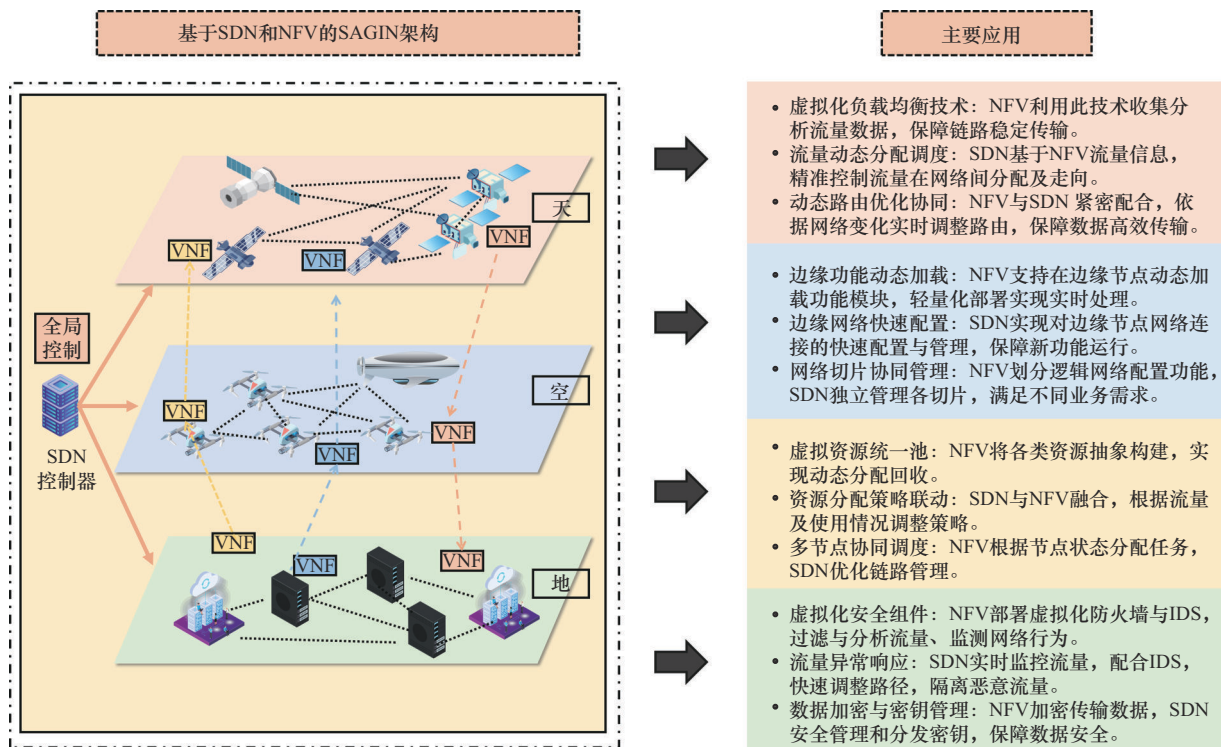


图3 基于SDN和NFV的SAGIN架构与主要应用

(3) 功能灵活部署与扩展

在边缘计算与临时功能加载方面，NFV支持多种移动节点动态加载功能模块和VNF，采用轻量化部署方式，利用实时操作系统确保任务快速响应，在边缘节点实现数据实时处理，减小数据传输压力。SDN在这一过程中，实现对边缘节点网络连接的快速配置和管理。当节点加载新的功能模块时，SDN控制器迅速为其分配网络资源并与其他节点建立通信连接，确保新功能的正常运行。

借助网络切片技术，NFV依据不同业务需求划分逻辑网络，灵活配置流量控制、传输优化和数据压缩等功能。SDN对不同切片独立管理和控制，根据不同业务需求，为每个切片分配不同的网络带宽、时延等参数。

(4) 安全与防护保障

在安全与防护保障领域，NFV在地基网络部署虚拟化防火墙和入侵检测系统（intrusion detection system, IDS），虚拟化防火墙依靠专门技术对网络流量进行过滤与分析，识别并拦截恶意流

量，而IDS运用特定检测技术持续监测网络行为。一旦IDS检测到异常流量，SDN控制器将迅速调整网络流量的路径，将恶意流量引导到安全的隔离区域，同时通知NFV系统加强对相关区域的防护。

NFV引入先进的数据加密算法，对网络中传输的数据进行加密处理。SDN对加密密钥进行安全管理和分发，通过SDN控制器的安全机制，确保加密密钥在网络中的安全传输和存储，进一步提升数据加密保护的安全性，从而使重要数据在SAGIN中的传输能够得到有效保障，确保了完整性和保密性。

3 基于SDN与NFV的SAGIN任务部署、调度与恢复

SDN和NFV的有机结合，突破了传统网络架构的束缚，为SAGIN应对多样化业务需求、实现高效稳定运行提供了坚实的技术支撑，但同时 also 面临如下挑战。

(1) 资源分配难题

SAGIN 涵盖卫星、UAV、HAP、地面基站等多种异构节点，这些节点具有不同的资源特性，这使得资源分配变得极为复杂。由于各类业务对资源的需求不同，如何在有限的资源条件下合理分配计算、存储和网络资源，以满足多样化业务的服务质量要求，成为一个亟待解决的难题。如果资源分配不合理，将导致部分业务资源不足，服务质量下降，而某些资源却处于闲置状态，造成资源浪费。

(2) 资源竞争激烈

随着 SAGIN 中业务量的不断增长，多个 SFC 可能同时竞争相同的资源，尤其在高需求时段或突发事件中，资源的争夺可能会加剧，导致出现网络瓶颈，进而影响不同业务的优先级和服务质量。这种无序的资源竞争不仅可能引发网络拥堵，还可能降低整个网络的性能，影响用户的体验和任务执行的效率。

(3) 资源故障与服务失效风险

SAGIN 中的节点分布广泛，且运行环境复

杂，可能遭遇卫星辐射干扰、UAV 断电偏航，以及地面基站遭遇自然灾害破坏等，这些都可能引发节点及链路故障或服务功能失效。一个环节出现故障，可能引发连锁反应，导致整个 SFC 中断，影响众多用户的业务体验。因此，如何快速准确地检测故障，实现故障隔离和快速恢复，保障网络的可靠性和稳定性，是该融合技术在实际应用中必须克服的重大难题。

3.1 SFC 部署：优化资源分配

在 SAGIN 中，SFC 的部署面临多重挑战，特别是在资源和网络拓扑不断变化的背景下。SAGIN 场景下的 SFC 部署如图 4 所示。不同层次的网络，其资源能力、负载情况以及拓扑结构的变化都可能影响 SFC 的部署效率与质量，因此，SFC 的部署必须考虑多层网络的异构性和资源的动态变化。在任务分配时，必须根据网络当前的负载情况、各节点的资源状况以及任务类型，动态调整 SFC 的配置。这种动态调整不仅能够优化资源利用率，还能够在突发的网络负载增加时避免资源过度消耗，确保网络的平稳运行。

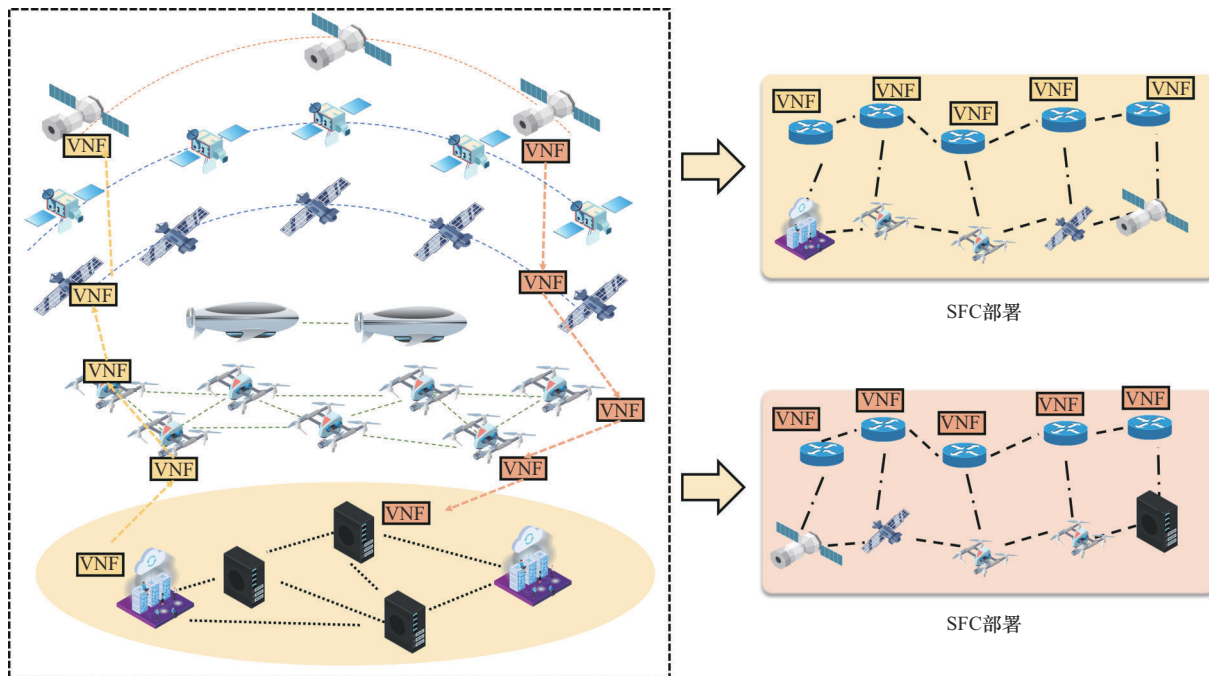


图4 SAGIN 场景下的 SFC 部署



在SFC部署中，各类启发式算法在初始部署中都发挥了重要作用。贪婪算法的每一步决策都选择当前最优解，即局部最优解。在选择SFC部署节点时，贪婪算法会优先选择资源利用率较低且距离任务发起地最近的节点，这样操作可以在一定程度上降低传输时延和资源消耗。尽管贪婪算法不能够保证全局最优解，但在实际应用中，通常能够在较短的时间内找到满足需求的可行方案，并且这种方案的性能往往足以满足实际需求。模拟退火算法源于对固体退火过程的模拟，根据当前解生成新解，新解优则接受，新解差则根据概率接受，概率随温度降低而减小，旨在避免过早陷入局部最优，从而平衡搜索广度与深度，助力找到更优的部署方案。遗传算法借鉴生物进化的遗传、变异和自然选择原理，将不同部署方案视为个体并编码，通过选择、交叉、变异操作，从当前种群产生新个体，那些在满足资源利用、任务完成等要求方面表现更好的个体，被保留下来的概率更高。经多代进化，遗传算法能够优化部署方案，在解空间中搜索到较优方式，从而应对复杂部署问题。禁忌搜索算法引入禁忌表避免重复搜索，扩大搜索空间，以提高找到更优解的概率。禁忌搜索算法基于当前资源分配方案，调整部分节点以找到更优部署，同时利用禁忌表防止算法陷入局部最优。这种动态部署方式能够优化资源利用率，避免节点资源过度消耗。此外，部署的关键因素还包括冗余机制和负载均衡，确保节点故障或过载时，系统能自动切换备用资源。如此，SAGIN可在资源有限时保证关键任务优先完成，提升整体网络效率与稳定性。通过引入智能化部署策略，SAGIN能快速响应不同任务，提高任务完成效率，显著降低任务时延。

3.2 SFC动态调度：灵活应对突发任务

SAGIN的应用场景多样，包括灾难救援、环境监测等，其中许多任务具有突发性和高度的不确定性。在紧急响应和灾害救援等场景下，突

任务的出现常常给网络资源带来巨大的压力。传统的静态网络配置方法往往无法进行及时调整，导致任务无法在规定的时间内完成。SFC的动态调度技术能够灵活应对这种突发任务，通过实时监控网络状态和任务需求，动态调整资源分配和任务调度。例如，在灾难发生时，通常会有大量的紧急任务需要处理，此时，动态调度机制首先需要识别任务的优先级，根据紧急程度进行排序，通过智能调度算法动态调整任务执行顺序，选择合适的网络资源进行任务分配，确保关键任务得到优先处理。同时，考虑SAGIN中的资源动态变化，动态调度机制还必须具备高度的适应性，能够根据不同节点和链路的实时负载情况，灵活地分配计算、存储和带宽资源，实时检测资源的使用情况，避免资源不足导致任务失败。通过采用DRL等智能调度方法，SAGIN能够在面临突发任务时做出快速响应，优化任务调度策略，确保任务在最短时间内完成。SAGIN场景下的SFC动态调度如图5所示。图5中， s 表示状态， a^* 表示动作， R 表示奖励， s' 表示转移后的状态。

DRL是强化学习与深度学习的结合，它能够处理高维、复杂的状态空间。双深度Q网络(double deep Q network, DDQN)便是其中一种应用广泛的算法。传统的深度Q网络(deep Q network, DQN)在学习过程中可能会高估Q值，导致学习的策略并非最优。DDQN通过解耦动作选择和动作评估，有效解决了这一问题。在SAGIN的动态调度中，本文采用DDQN算法，该算法利用了在线网络和目标网络这两个神经网络。随着时间的推移，目标网络会定期更新其参数以匹配在线网络的参数，从而避免对Q值的过度估计。在面对突发任务时，DDQN算法能够根据当前的网络负载、任务优先级以及资源的可用性等信息，快速计算出每个可能调度方案的Q值，进而选择最优的调度策略，实现任务在不同节点上的合理分配以及网络带宽等资源的有效利

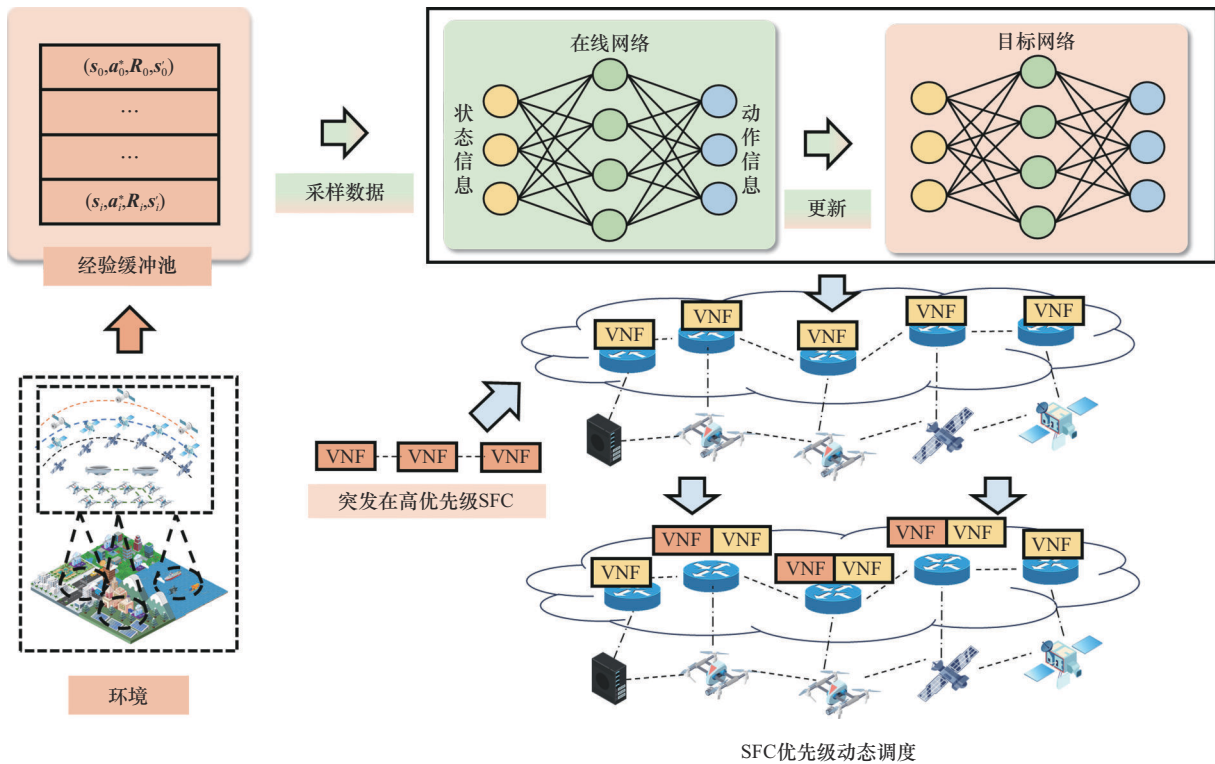


图5 SAGIN场景下的SFC动态调度

用。此外，本文提出结合基于优先级队列的调度算法，根据任务的紧急程度和重要性对任务进行优先级排序，优先调度高优先级任务，确保紧急任务能够得到及时处理。这种动态调度机制使SAGIN能够高效利用有限资源，在突发情况下维持高服务质量，并且提高系统的灵活性和适应性。它不仅能够处理突发任务，还能在多个任务的竞争中进行合理的资源分配，保证整个网络的平稳运行和任务的高效完成。

3.3 SFC失效恢复：保障网络鲁棒性

由于SAGIN的高度动态性和环境的不确定性，节点和链路的失效是不可避免的。卫星的轨道变化、UAV的飞行路径变化，甚至恶劣环境下的自然因素等都可能某些网络资源出现故障或暂时不可用。因此，在SAGIN中，如何在资源失效的情况下快速恢复SFC，以保证任务的连续性和网络的高可靠性，成为系统设计中的一个重要挑战。

失效恢复机制的核心是能够在资源失效的情

况下迅速检测并选择备用资源，重新部署SFC。这一过程要求系统不仅要具备实时监测能力，还需要具有足够的智能化处理能力，以确保在发生故障时能够快速做出反应。例如，当一个卫星节点由于某些原因失效时，系统要能够迅速识别问题，并自动将任务调度到其他可用的节点上，尽量避免任务中断。为了确保服务的可靠性，SAGIN还需要为关键任务设置冗余资源，以便在主资源失效时能够迅速切换到备用资源。SAGIN场景下的SFC失效恢复如图6所示，在资源失效恢复中，可以使用匹配博弈算法来获得有效的解决方案。匹配博弈是一种博弈论方法，用于研究如何在多方玩家之间进行合理匹配，以实现各自的利益最大化。在SAGIN的失效恢复场景中，玩家分为任务和节点，建立任务与节点之间的最优匹配关系，需要充分考虑任务的优先级、资源需求以及节点的性能、可用性等因素。

对于任务而言，不同任务具有不同的优先级

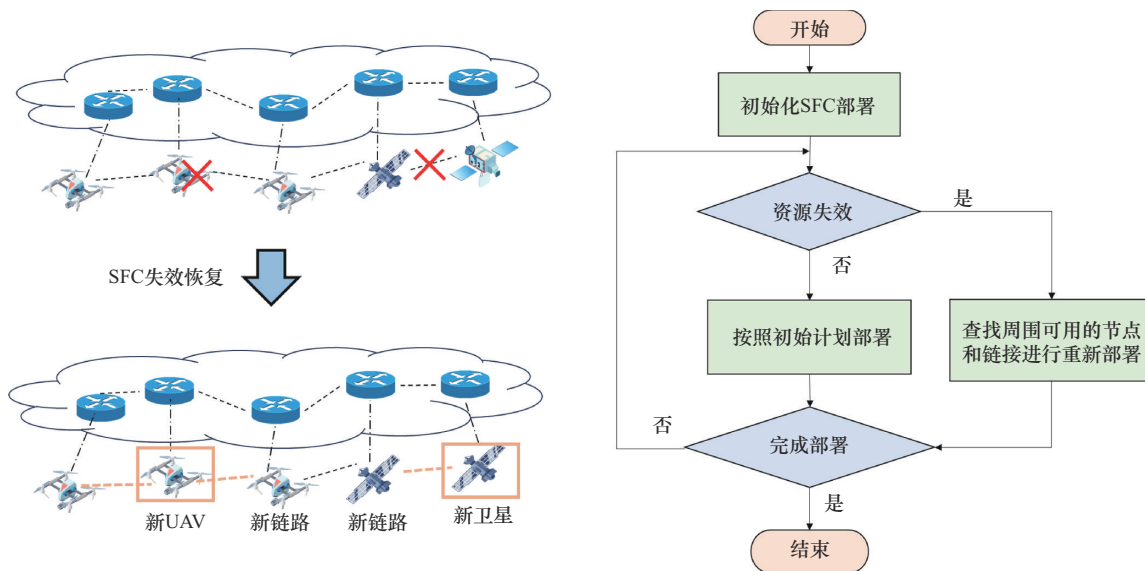


图6 SAGIN场景下的SFC失效恢复

和资源需求。高优先级任务对时效性要求极高，需要尽快恢复执行，因此，在匹配过程中需要优先为其分配性能较好且可用性高的节点。同时，任务对计算资源、存储资源和带宽资源的需求也各不相同，需要与节点所能提供的资源进行精准匹配。对于节点而言，其性能参数如计算能力、存储容量、带宽等是影响匹配结果的重要因素。可用性则涉及节点当前的负载情况以及是否处于正常工作状态。负载较低且工作正常的节点，自然更适合承接任务。

匹配博弈算法通过融合博弈论与优化技术，为任务资源分配问题提供了兼顾公平、效率和动态适应性的解决方案。稳定匹配算法（如 Gale-Shapley 算法）能够找到一种稳定的匹配状态，即不存在两个参与者都更倾向于彼此匹配而不是当前匹配的情况。在 SAGIN 的失效恢复场景中，本文设计了基于稳定匹配的相关算法。其中，任务根据自身的优先级和资源需求对节点进行偏好排序，节点则根据自身的性能和负载情况对任务进行偏好排序，通过算法的迭代计算，最终达成任务与节点的稳定匹配。例如，先由任务向其偏好列表中排名靠前的节点发起匹配请求，节点根

据自身的偏好情况决定是否接受。若节点当前无任务或新任务优先级更高，则接受匹配；反之则拒绝。被拒绝的任务继续向其偏好列表中的下一个节点发起请求，如此循环，直至所有任务都找到匹配的节点或者无法再进行匹配。此外，在匹配过程中引入激励机制，对于能够快速响应并且有效恢复任务的节点给予一定的奖励，如在后续的资源分配中给予其更多的资源配额或者降低其任务执行成本等。这不仅能激励节点积极参与任务恢复，还能进一步优化匹配结果，使任务和节点的分配达到一种相对平衡，既保证了任务能够快速找到合适的备用节点进行恢复，又使得节点资源能够得到合理利用。这种恢复机制不仅提升了系统的可靠性，还使 SAGIN 在面临复杂环境和不确定性的挑战时，仍能够保持高水平的服务质量。

在基于 SDN 和 NFV 的 SAGIN 场景中，虽面临资源分配、动态调度与资源失效等挑战，但通过实施动态部署策略优化资源利用、智能调度机制提升突发任务响应能力，以及高效恢复策略保障网络鲁棒性等，共同推动网络向高弹性、高智能方向演进。这些技术的协同不仅解决了资源利

用率低、动态适应性弱和可靠性不足的问题，更支撑了SAGIN全域无缝连接与多样化业务的高效稳定运行，为未来的通信需求提供更加智能、可靠的解决方案。

4 用例分析

基于上文所提出的基于SDN与NFV的SAGIN架构，本节构建了一个SFC失效恢复和重新部署调度用例。本文构建了基于RTEG的SAGIN模型，该模型包含了地基节点、UAV节点和LEO卫星节点，各节点在通信有效距离内相互连接，以供多任务在链路中进行传输。每个任务被转化为一条SFC，SFC中的多个VNF可部署在各节点上，以完成相应的网络功能。只有当一条SFC中的所有VNF部署并处理完成后，该任务才算结束。为了模拟实际情况，本文建立了多类型的信道模型，并考虑了部署、流量、资源等约束条件，提出最小化完成所有SFC处理和重新部署总时长的优化目标。为了实现该目标，本文采用前文提到的基于匹配博弈的算法进行问题的求解。在此过程中，SDN控制器根据NFV需求，动态配置网络拓扑，并对SFC的部署和调度进行控制。

整个仿真周期被划分为多个长度为5 s的时隙，在每个时隙中，所有UAV与LEO卫星节点保持相对静止。在2 km×2 km的二维空域内随机部署30架UAV节点，节点空间分布需要满足任意节点间距不得小于20 m，以避免碰撞风险，节点间距超过500 m时则判定为通信中断。本文选取2024年6月27日21:40前后过境坐标32°N 119°E的两颗Starlink G8-8组网卫星作为卫星节点。SFC建模采用差异化需求配置，每个SFC包含2~3个VNF，数据吞吐量在200~800 Mbit区间随机生成。每间隔3个时隙，触发一次节点失效事件，失效节点是由遵循 λ 参数的泊松概率模型随机生成的。

本文针对不同失效节点数量情形下的SFC最大完成时间展开研究。最大完成时间指的是从首个SFC启动传输，直至所有SFC完成部署所历经的时长。不同泊松分布参数下单个SFC的最大完成时间如图7所示，从图7能够看出，在UAV数量保持恒定的情况下，若仅增大泊松分布参数 λ ，单个SFC的最大完成时间会逐步上升。这是因为随着该参数的增大，故障节点的数量增多，SFC更易受到多种资源故障的干扰，进而对最大完成时间产生影响。此外，当泊松分布参数 λ 固定，即失效节点数量的分布概率不变而改变UAV数量时，时间消耗会随着UAV数量的增加而降低。当泊松分布参数较大时，随着UAV数量增多，时间消耗减少得更为明显，原因在于UAV数量增多，意味着SFC可选的可用节点数量随之增加，SFC的等待时间也就相应缩短了。

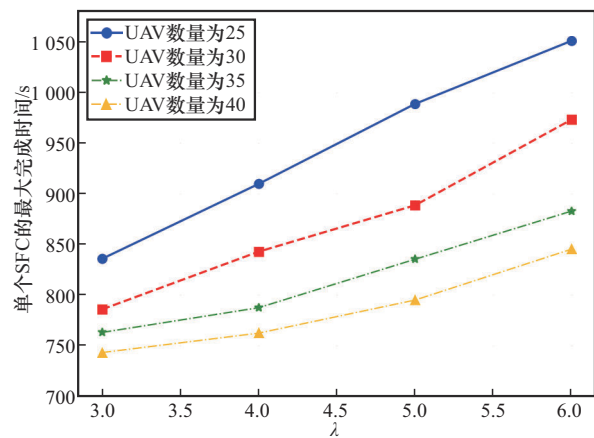


图7 不同泊松分布参数下单个SFC的最大完成时间

不同的失效节点更新间隔下的时间消耗如图8所示。图8(a)展示了总时间消耗与失效间隔的关系，当更新间隔较短时，其对时间消耗总和的影响较为明显，随着UAV数量的增多，总时间消耗会快速下降，但当将节点故障情况设定为每5个时隙更新一次时，随着UAV数量增加，时间消耗总和仅有轻微变动，这一现象与网络稳定性的表现相契合。图8(b)展示了SFC最大完成



时间与UAV数量的关系,当更新间隔较短时,对SFC最大完成时间的影响较大,特别是当UAV数量较小时,最大完成时间则较长。随着更新间隔增加,网络的稳定性随之增加,对于SFC的最大完成时间的影响则随之减小。

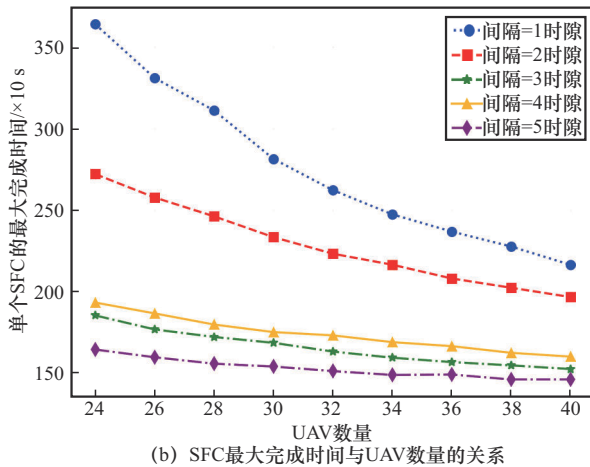
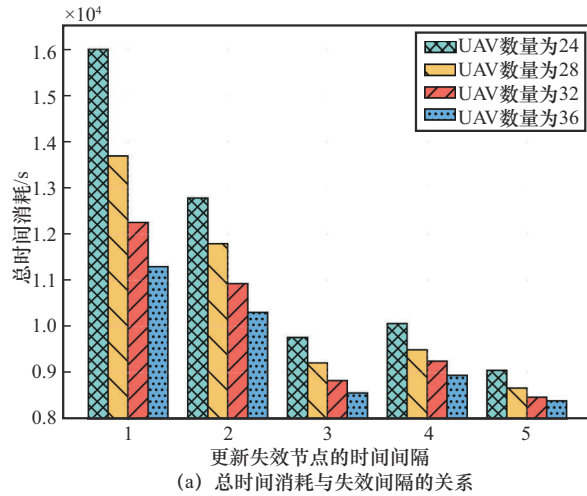


图8 不同的失效节点更新间隔下的时间消耗

5 结束语

本文聚焦基于SDN和NFV的SAGIN资源管理,阐释SAGIN系统架构,涵盖天基、空基和地基网络各自的构成与作用,探讨SDN控制网络、NFV软硬件解耦、SFC串联VNF满足复杂服务需求的原理,分析SDN和NFV在流量管理、资源调度等方面的应用。此外,剖析SAGIN当前面临

的资源分配、竞争、故障风险等挑战,提出面向任务的SFC优化部署、使用智能算法实现动态调度、采用匹配博弈算法完成失效恢复等策略,最后构建用例,设定节点部署、SFC建模等,分析不同因素对SFC完成时间和总耗时的影响,验证相关策略的有效性,旨在为SAGIN的发展提供理论与实践支撑。

参考文献:

- [1] ZHANG P Y, CHEN N, SHEN S G, et al. AI-enabled space-air-ground integrated networks: management and optimization[J]. IEEE Network, 2024, 38(2): 186-192.
- [2] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述[J]. 软件学报, 2024, 35(1): 266-287.
JIANG C L, LI Q, WANG Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network[J]. Journal of Software, 2024, 35(1): 266-287.
- [3] LU Y X, WEN W, IGOREVICH K K, et al. UAV ad hoc network routing algorithms in space-air-ground integrated networks: challenges and directions[J]. Drones, 2023, 7(7): 448.
- [4] JIA Z Y, YOU J H, DONG C, et al. Cooperative cognitive dynamic system in UAV swarms: reconfigurable mechanism and framework[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2024, 19(3): 90-101.
- [5] ZHANG R C, DU H Y, NIYATO D, et al. Generative AI for space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 31(6): 10-20.
- [6] JIA Z Y, CAO Y L, HE L J, et al. Service function chain dynamic scheduling in space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025(99): 1-15.
- [7] YIN Z S, CHENG N, LUAN T H, et al. DT-assisted multi-point symbiotic security in space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2023, 18: 5721-5734.
- [8] CAO Y L, JIA Z Y, ZHANG Y, et al. Task-oriented service provision and scheduling for non-terrestrial networks: a deep reinforcement learning based approach[C]//Proceedings of the 2024 16th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1037-1042.
- [9] 肖警续, 郭渊博, 常朝稳, 等. 基于SDN的物联网边缘节点间数据流零信任管理[J]. 通信学报, 2024, 45(7): 101-116.

- XIAO J X, GUO Y B, CHANG C W, et al. Zero trust management of data flow between IoT edge nodes based on SDN[J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(7): 101-116.
- [10] JIA Z Y, CAO Y L, HE L J, et al. NFV-enabled service recovery in space-air-ground integrated networks: a matching game-based approach[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2025, 12(3): 1732-1744.
- [11] NGUYEN D H P, LIEN Y H, LIU B H, et al. Virtual network function placement for serving weighted services in NFV-enabled networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 5648-5659.
- [12] CHIN W L, KO H A, CHEN N W, et al. Securing NFV/SDN IoT using VNFs over a compute-intensive hardware resource in NFVI[J]. *IEEE Network*, 2023, 37(6): 248-254.
- [13] MAITY I, GIAMBENE G, VU T X, et al. Traffic-aware resource management in SDN/NFV-based satellite networks for remote and urban areas[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(11): 17400-17415.
- [14] LIANG H, YANG Z Q, ZHANG G B, et al. Resource allocation for space-air-ground integrated networks: a comprehensive review[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2024, 9(1): 1-23.
- [15] XU H T, HAN S Y, LI X H, et al. Anomaly traffic detection based on communication-efficient federated learning in space-air-ground integration network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9346-9360.
- [16] WU S, CHEN N, XIAO A L, et al. AI-enabled deployment automation for 6G space-air-ground integrated networks: challenges, design, and outlook[J]. *IEEE Network*, 2024, 38(6): 219-226.
- [17] DU J B, WANG J X, SUN A J, et al. Joint optimization in blockchain- and MEC-enabled space-air-ground integrated networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(19): 31862-31877.
- [18] GUO Q, TANG F X, KATO N. Routing for space-air-ground integrated network with GAN-powered deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(2): 914-922.
- [19] JIA H Q, WANG Y, WU W. Dynamic resource allocation for remote IoT data collection in SAGIN[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(11): 20575-20589.
- [20] YUAN Z Y, LUO L L, GUO D K, et al. To deploy new or to deploy more? An online SFC deployment scheme at network edge[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(2): 2336-2350.
- [21] 颜志, 禹怀龙, 欧阳博, 等. 一种基于近端策略优化的服务功能链部署算法[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(7): 2869-2878.
- YAN Z, YU H L, OUYANG B, et al. A service function chain deployment algorithm based on proximal policy optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(7): 2869-2878.
- [22] ABOUAOMAR A, CHERKAoui S, MLIKA Z, et al. Service function chaining in MEC: a mean-field game and reinforcement learning approach[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(4): 5357-5368.
- [23] 范琪琳, 牛岳, 尹浩, 等. GAT-IL: 一种基于图注意力网络与模仿学习的服务功能链部署方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(8): 2811-2823.
- FAN Q L, NIU Y, YIN H, et al. GAT-IL: a service function chain deployment method based on graph attention network and imitation learning[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(8): 2811-2823.
- [24] CHEN H D, WANG S P, LI G J, et al. Distributed orchestration of service function chains for edge intelligence in the industrial Internet of Things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(9): 6244-6254.
- [25] CAO H T, ZHAO H T, LUO D X, et al. Dynamic virtual resource allocation mechanism for survivable services in emerging NFV-enabled vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 22492-22504.
- [26] ZHANG J N, LIU Y C, LI Z W, et al. Forecast-assisted service function chain dynamic deployment for SDN/NFV-enabled cloud management systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(3): 4371-4382.
- [27] YUNGAICELA-NAULA N M, VARGAS-ROSALES C, PÉREZ-DÍAZ J A. SDN/NFV-based framework for autonomous defense against slow-rate DDoS attacks by using reinforcement learning[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2023, 149: 637-649.
- [28] RAMYA G, MANOHARAN R. Traffic-aware dynamic controller placement in SDN using NFV[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2023, 79(2): 2082-2107.
- [29] ZHANG P Y, ZHANG Y, KUMAR N, et al. Dynamic SFC embedding algorithm assisted by federated learning in space-air-ground-integrated network resource allocation scenario[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(11): 9308-9318.
- [30] CAO Y L, JIA Z Y, DONG C, et al. SFC deployment in space-air-ground integrated networks based on matching game[C]// *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference*



on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.

- [31] SUN D Y, LI H, KONG Z X, et al. Multicast SFC embedding in software-defined SAGIN with heterogeneous network resources[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [32] JIA M, WU J, GUO Q, et al. Service-oriented SAGIN with pervasive intelligence for resource-constrained users[J]. IEEE Network, 2024, 38(2): 79-86.
- [33] LI J L, SHI W S, WU H Q, et al. Cost-aware dynamic SFC mapping and scheduling in SDN/NFV-enabled space-air-ground-integrated networks for Internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5824-5838.
- [34] ZHANG P Y, LI Z Q, GUIZANI M, et al. Energy aware space-air-ground integrated network resource orchestration algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(12): 18950-18960.
- [35] WU Y, JIA Z Y, WU Q H, et al. Adaptive QoE-aware SFC orchestration in UAV networks: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(6): 6052-6065.
- [36] QIN X H, MA T, TANG Z X, et al. Service-aware resource orchestration in ultra-dense LEO satellite-terrestrial integrated 6G: a service function chain approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(9): 6003-6017.
- [37] HE J C, CHENG N, YIN Z S, et al. Service-oriented network resource orchestration in space-air-ground integrated network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 1162-1174.
- [38] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. VNF-based service provision in software defined LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 6139-6153.
- [39] XIA Q F, WANG G J, XU Z C, et al. Efficient algorithms for service chaining in NFV-enabled satellite edge networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(5): 5677-5694.

[作者简介]



曹怡璐 (1999-), 女, 南京航空航天大学硕士生, 主要研究方向为空地一体化网络、网络功能虚拟化等。



贾子晔 (1990-), 女, 博士, 南京航空航天大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为空地一体化网络、低空物联网、卫星网络等。



尤嘉豪 (1998-), 男, 南京航空航天大学博士生, 主要研究方向为低空物联网中的计算卸载、资源分配、轨迹规划等。



张磊 (1972-), 男, 博士, 南京航空航天大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为嵌入式系统与边缘计算、人工智能与无线自组网等。



吴启晖 (1970-), 男, 博士, 南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络、无人机集群智能通信等。