

# 天地融合网络切片技术方案研究

## Research on Network Slicing Technology of Space-ground Intergration

朱斌<sup>1</sup>, 林琳<sup>1</sup>, 胡悦<sup>1</sup>, 邢楷初<sup>1</sup>, 王光全<sup>1</sup>, 姚海鹏<sup>2</sup> (1. 中国联通研究院, 北京 100048; 2. 北京邮电大学, 北京 100876)  
Zhu Bin<sup>1</sup>, Lin Lin<sup>1</sup>, Hu Yue<sup>1</sup>, Xing Kaichu<sup>1</sup>, Wang Guangquan<sup>1</sup>, Yao Haipeng<sup>2</sup> (1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China; 2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

### 摘要:

天地融合网络是一种将地面网络和空间网络融合在一起的新型网络架构,能够实现全球无缝覆盖和高效通信。然而,天地融合网络的复杂性和多样性给网络切片技术带来了巨大的挑战。为了解决天地融合网络切片面临的问题,主要研究了天地融合网络多尺度网络切片与智能适配技术,提出了资源需求表征方法及实现、网络切片模型设计和策略、多要素灵活切片与智能适配等关键技术问题的技术解决方案建议,从而加速推进两个行业深度融合,发挥空天地海一体化网络的优势。

### Abstract:

The space-ground integrated network is a novel network architecture that integrates terrestrial networks and space networks, enabling global seamless coverage and efficient communication. However, the complexity and diversity of the space-ground integrated network pose significant challenges to network slicing technology. It aims to address the issues faced by slicing in the space-ground integrated network, mainly focuses on the research on multi-scale network slicing and intelligent adaptation technology of the space-ground integrated network, and puts forward technical solution suggestions to key issues such as resource demand characterization method and implementation, network slicing model design and strategy, multi-element flexible slicing and intelligent adaptation, so as to accelerate the in-depth integration of the two industries and realize the advantages of air-space-ground-sea integrated network.

### Keywords:

Network slice; Network intergration; 5G/6G; Satellite

引用格式: 朱斌, 林琳, 胡悦, 等. 天地融合网络切片技术方案研究[J]. 邮电设计技术, 2023(11): 7-13.

## 0 前言

2020年,国家将5G网络和卫星互联网共同纳入“新基建”范畴,天地网络融合成为新型信息基础设施的未来趋势,如何高效利用空、天、地信息技术资源并充分发挥广覆盖、高带宽和低时延等各自优势,解决网络拓扑结构高动态、服务自成体系、混合业务差异化、平台异构互操作难等关键问题,提升地面和卫星

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900602)

收稿日期: 2023-09-28

### 关键词:

网络切片; 融合网络; 5G/6G; 卫星

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.11.002

文章编号: 1007-3043(2023)11-0007-07

中图分类号: TN927

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



网络运营商覆盖范围以及全时全域服务能力,开展天地融合网络多尺度网络切片与智能适配技术研究,从而打通通信服务边界拓展需求以及航天新业务应用诉求,加速推进两个行业深度融合,衍生多样态融合应用场景,真正发挥空天地海一体化网络优势。

## 1 融合网络切片关键问题

面向天地融合网络切片的关键技术问题,主要是传统地面网络切片技术无法适应天地融合网络的“时空尺度差异大和场景需求多样化”所导致的融合网络整体拓扑结构时变、天地混合业务难以高效承载的问

题。因此需要从“资源供给、业务需求以及供需平衡”角度来解决时变情况融合网络切片的技术落地应用问题,针对性开展“资源需求表征、资源虚拟化与智能编排、多尺度多要素切片模型与策略、业务需求驱动的智能适配与自动化网络配置”研究,提出3类关键技术方

技术方案1:针对天地融合网络资源异质的特性,构建由天地物理资源共同构成的多维多域聚合资源池模型,形成天地融合资源统一全局视图,保证基础信息网络服务资源的统筹供给。

技术方案2:针对天基节点时变拓扑特性和高差异性业务需求,分别构建大时空尺度下高动态网络拓扑时变模型和切片策略,实现对天基资源可用性的度量以及切片性能指标的确定。

技术方案3:针对资源供给侧天地资源的动态拓扑特性和资源需求侧切片需求灵活、要素可调的特点,研究资源供需平衡的动态跨域智能适配机制,实现全场景混合业务的资源按需灵活分配的目标。

针对多尺度网络切片及智能适配技术要求,从以下几个方面进行相对应的研究(见图1)。

a) 资源表征方法及实现。通过虚拟化与智能编

排将物理资源分类解析,结合图论的方法,抽象出天地融合物理资源整体供给情况。

b) 多尺度多要素网络切片模型与策略。以应用场景指标化为约束,采用业务功能链和数组构建模型方式,体现混合业务整体需求情况。

c) 业务需求驱动的智能适配与自动化网络配置。采用与人工智能相结合的方法,将需求与供给灵活匹配,最终实现融合网络切片场景应用。

## 2 融合网络切片技术方案

### 2.1 资源表征方法及实现

#### 2.1.1 资源抽象、度量和统一标准

针对天地融合网络差异化服务保障需求,解决融合网络物理资源因异构异质难以归类抽象、统一度量和聚合表征,难以有效聚合以及不适应时空多变条件下对全量资源提供高频度周期性编排能力等问题,实现资源的有效聚合及统一表征,虚拟化资源、网元容量及功能高效编排管控能力。

天地融合物理网络资源的抽象、度量和统一表征技术方案如图2所示。针对天地网络异质物理资源难以统一描述的问题,在网络资源具备虚拟化基础条件

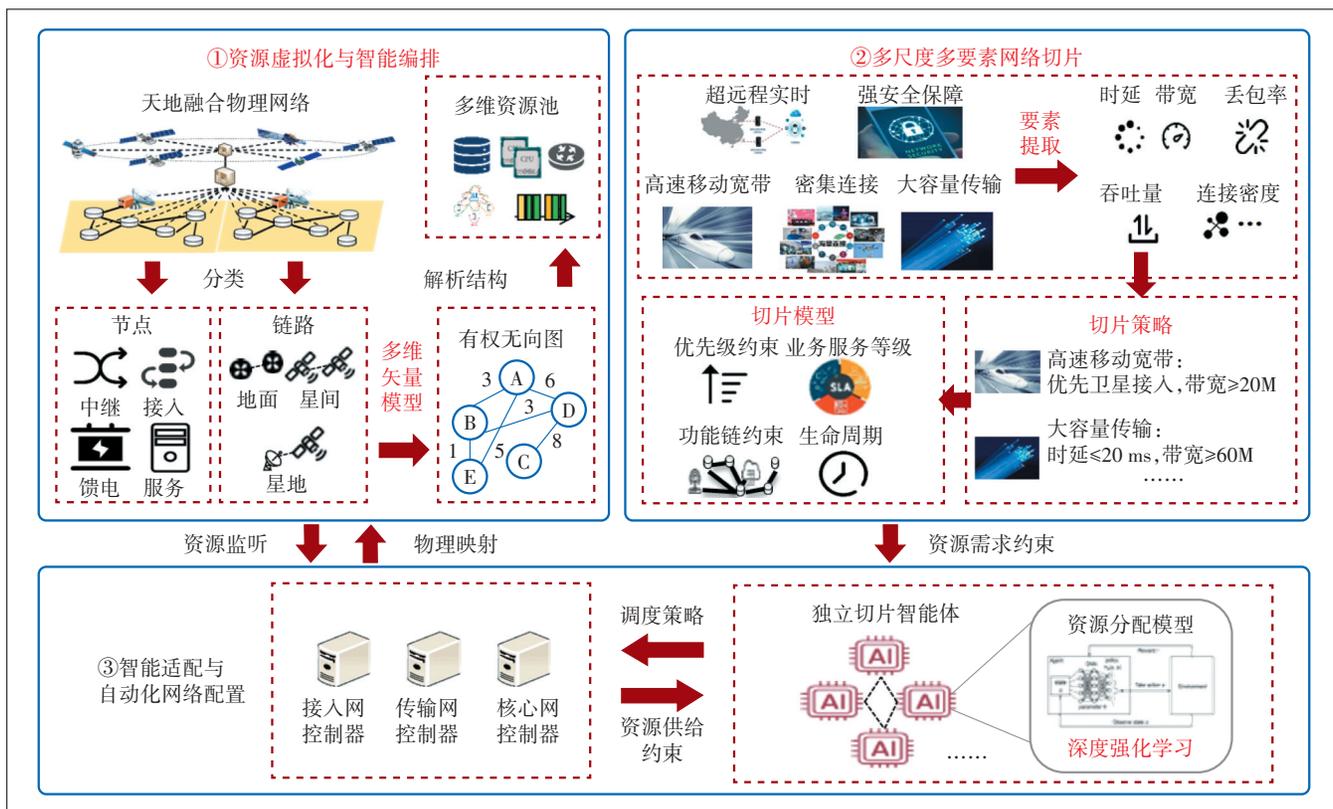


图1 多尺度多要素天地融合网络切片技术方案示意

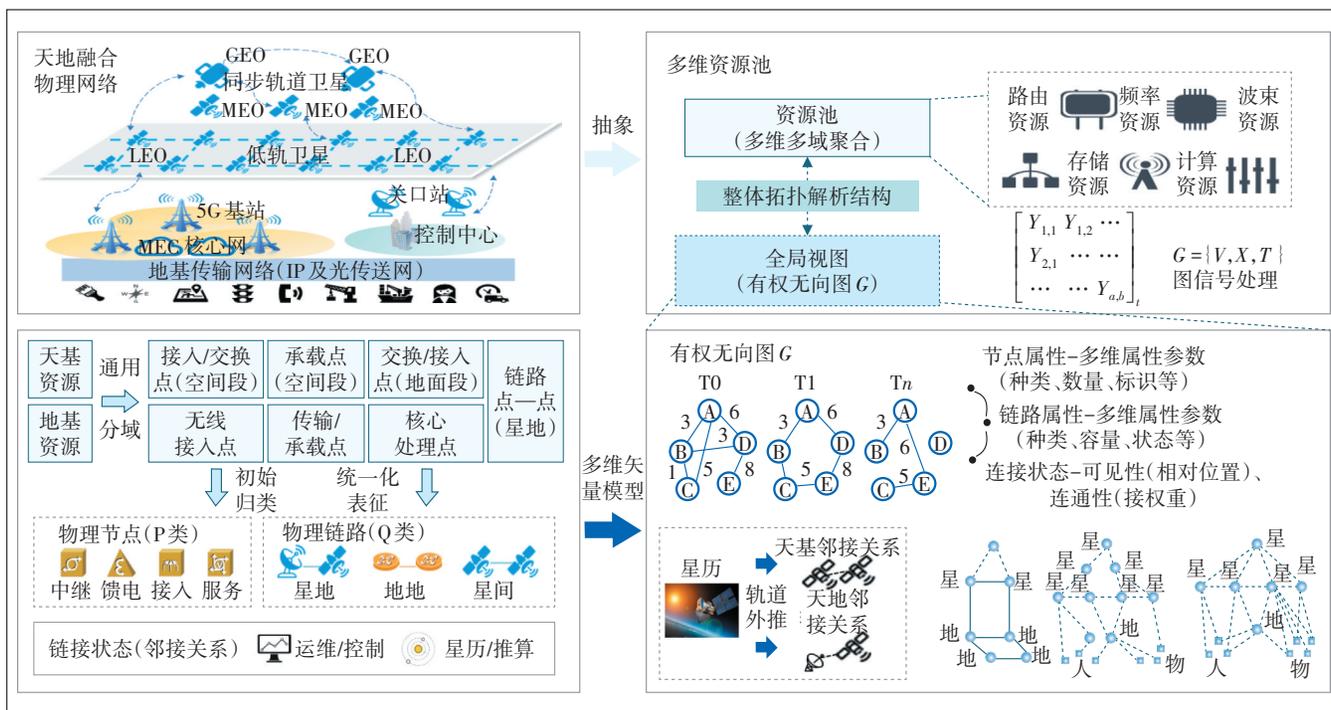


图2 资源抽象、度量和统一表征技术路线

背景下,首先,按照通信节点功能实现方式划分,抽象天基和地基网络设施中计算、存储、频率、波束、路由等通用物理基础设施能力以及接入、中继、交换服务等虚拟化网络通用功能属性;其次,进行初始归类、聚合统一和矢量化表征,提供“节点(多维矢量量化)+链路(多维矢量量化)+状态(邻接关系的可见性与连通性)+时间”聚合资源池(多维多域)模型;最后,考虑采用图信号处理的表征方法,将整个天地融合物理网络抽象为有权无向图,图谱节点表示网元,节点属性表示实现特定网元功能所提供的物理设施资源量,图谱的边则表示连接2个网元的虚拟链路,其权重表示实现该虚拟链路所提供的物理链路资源量。由此提供并构成了底层基础设施资源池的全局视图。

进一步,全局视图可为资源池提供整体拓扑解析结构,其中节点和链路资源属性由多维矢量量化表示,并结合节点间的邻接关系共同构建出时空尺度下的多维多域聚合资源池模型,实现对天地融合网络高度异质资源的统一表征。节点和链路携带可度量的多维属性参数,节点由资源种类、资源数量以及节点标识等参数构成,链路由带宽种类、带宽容量、连接端点、连通状态和链路种类等参数构成。此外,为解决天基链路和天地馈电链路等时空约束问题,提出采用结合星历外推的邻接矩阵表示方法,利用星历外推天

基节点位置,依据天基节点间以及天地节点(与信关站等)相对位置关系判定节点的可见性和连通性,通过邻接矩阵表示节点间的拓扑关系和传输能力,在邻接矩阵中用权重表示2类链路的连通性和带宽容量,进一步刻画天地融合网络中连接关系的时空约束。

### 2.1.2 资源虚拟化及智能编排

针对统一资源池的全局视图,构建多维多域聚合虚拟化资源池和资源智能编排架构,分别实现底层物理设施资源虚拟化和资源池功能实例及容量管控。对于多尺度网络切片对融合网络资源池的节点资源虚拟化需求,底层提供硬件资源抽象与共享机制,将物理设备转化成虚拟化基础设施,便于达到地基及天基受约束物理资源共享性下的最大化利用率,利用“SDN的集中控制与协同”和“NFV的软硬件解耦与网元功能虚拟化”的互补特点。一方面,SDN专注网络控制与转发面的分离,重点应用于链路资源,并考虑顶层采用集中控制器与单域SDN控制器结合联动,分别通过南北向、东西向接口实现多级控制和跨域协同管理,屏蔽天上控制器和地面网络控制器协议栈的差异性,进而实现传输层面链路资源的统一管控调配;另一方面,NFV实现天地融合物理节点异构硬件资源的软硬件解耦,同时提供网元功能虚拟化,为切片的业务链服务提供共享基础。此外,考虑采用基于多维

物理资源受限条件下的轻量化虚拟架构的抽象方法, 提供聚合多类别虚拟技术要素支撑的聚合资源池。

## 2.2 融合网络切片策略及模型

### 2.2.1 融合网络切片策略

针对天地融合网络拓扑的时变特性和差异化业务的服务需求, 构建大时空尺度下的高动态网络拓扑时变模型和切片策略, 实现对天基资源可用性的度量以及对切片性能指标的确定, 其技术路线如图3所示。

针对高差异性业务需求, 围绕天地融合网络中超远程实时类、密集连接类、高速移动宽带类、大容量传输类、强安全保障类等典型切片应用场景, 提供一种指标要素映射粗细可调的切片需求指标方法。针对具体业务应用特点, 进行关键要素提取, 形成业务指标参数需求(如时延、带宽、吞吐量、连接密度、频谱效率、网络效率、流量容量、安全性等), 可调技术可实现对关键参数及可选参数的灵活配置, 并制定对应参数下的SLA性能指标。进一步, 针对网络能力供给情况, 按照多域划分域内颗粒度, 通过全域统一匹配、单域分解执行的方式实现切片策略, 具备按需动态分配资源并同时满足性能需求的能力。此外, 针对多要素灵活切片的指标需求, 构建时空要素约束的天地融合网络端到端切片策略。在多要素匹配上, 将切片策略与“网络能力指标供给方式+切片需求性能指标+资源节点及链路能力”对应, 作为后续资源适配的优化约束条件, 在系统容量的约束条件下, 满足切片策略的性能需求, 实现差异化服务。

### 2.2.2 融合网络切片模型

切片模型的技术路线如图4所示。针对可调颗粒

度、可灵活适配的切片需求, 在切片策略和大尺度时空拓扑模型的基础上, 构建网络切片模型, 在资源需求侧度量资源需求和性能指标。

针对可调颗粒度、可灵活适配的网络切片需求, 考虑采用基于多元组数学表征构建面向天地融合网络全要素资源的切片模型的方法, 用于描述切片资源需求, 多元组数学表达的要素包括业务功能链、用户身份标识、业务优先级、生命周期以及业务服务等级。其中, 核心要素业务服务等级由切片策略指定, 不同业务服务等级依照映射表将对应于不同切片策略, 有相应的业务时延、时延抖动、业务可靠性等SLA性能指标。进一步, 通过灵活调整映射表, 匹配不同的切片策略, 可实现切片性能颗粒度调整, 灵活适配业务特性的能力, 满足高差异性业务需求。

## 2.3 智能适配及自动化配置

### 2.3.1 混合业务跨域智能适配

针对资源供给侧天地资源的动态拓扑特性和资源需求侧切片需求灵活、要素可调的特点, 研究资源供需平衡的动态跨域智能适配机制, 实现全场景混合业务的资源按需灵活分配的目标。资源智能适配编排技术路线如图5所示。基于网络资源监听的智能化网络检测监视系统, 考虑虚拟化网络资源池与切片需求之间的自适应动态适配编排方法, 实现实时适配的天地动态跨域切片。

针对资源供给侧时变网络拓扑及链路条件, 根据资源时变情况自适应动态调整智能适配的编排策略, 按需分配资源。

首先, 将典型业务场景初设的切片模型和基于有

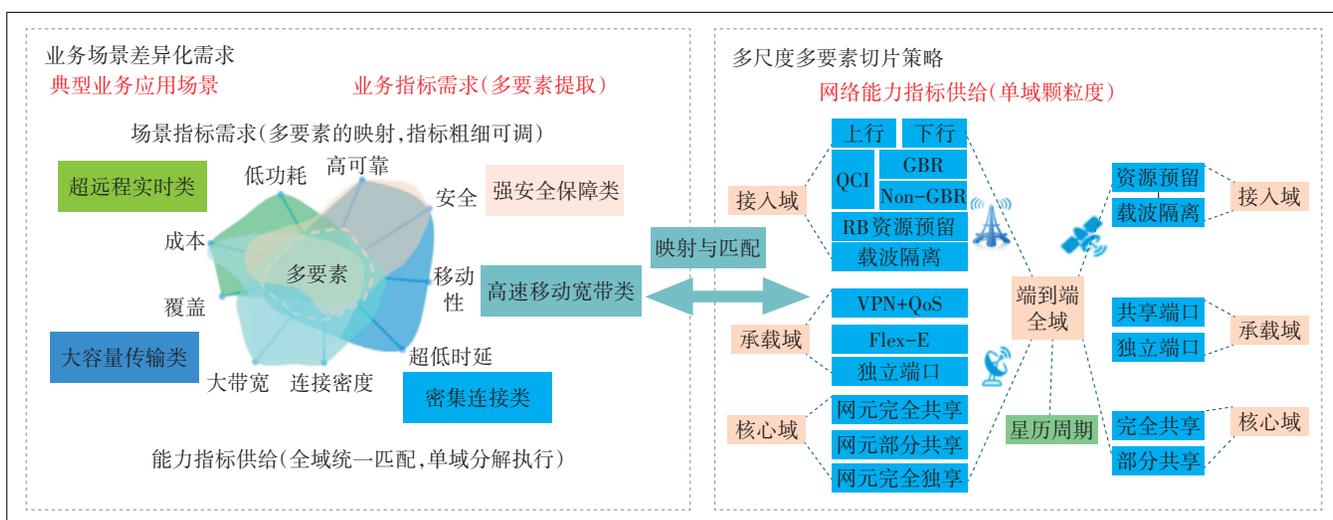


图3 切片策略技术路线

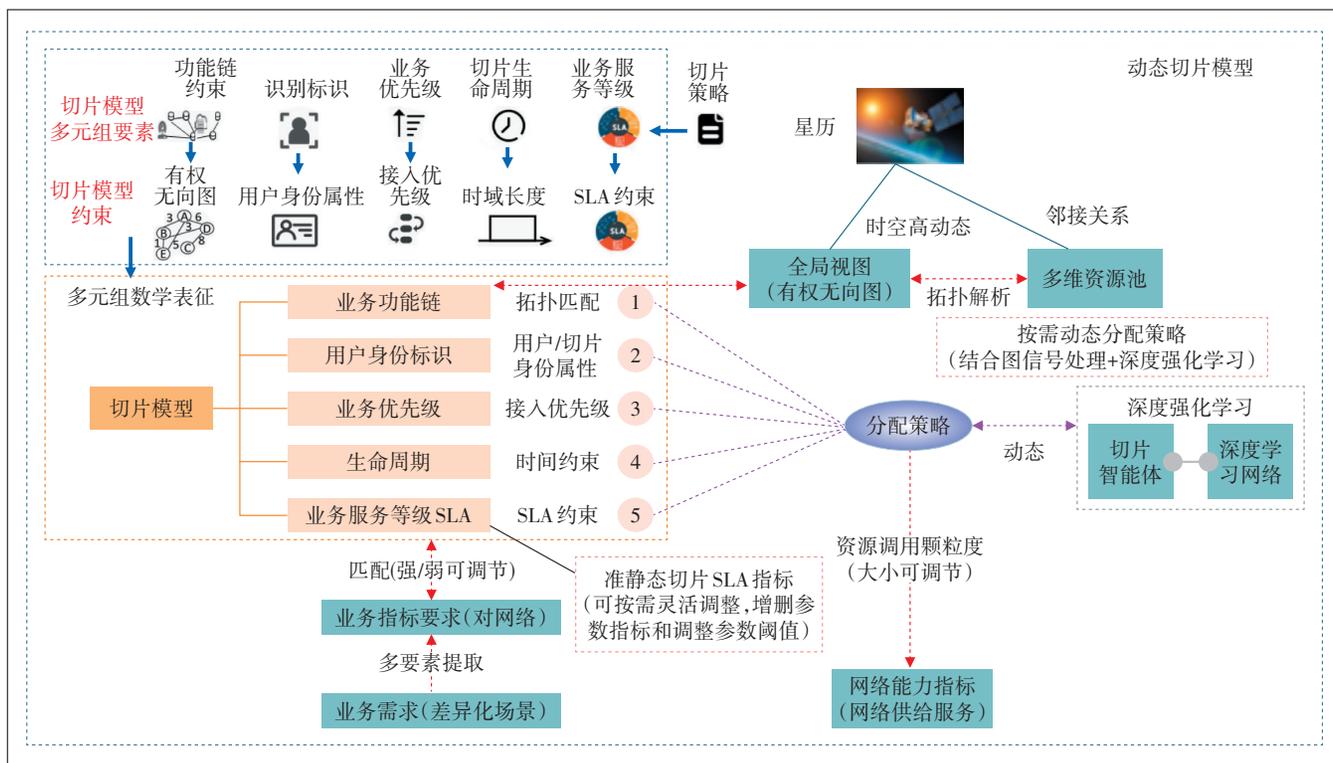


图4 切片模型技术路线

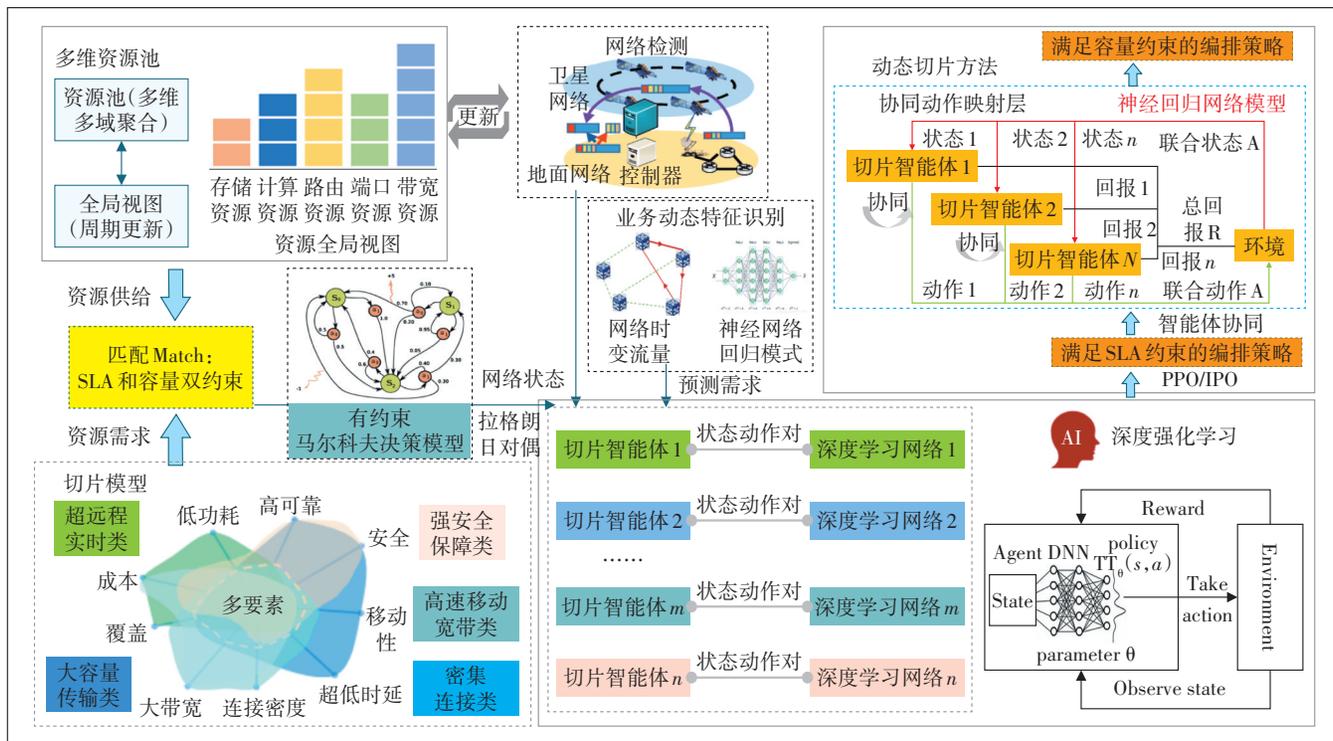


图5 智能适配技术路线

权无向图的多维资源池作为资源需求和资源供给,以特定时刻的物理资源池容量和切片模型SLA服务性能

指标分别作为优化、约束条件,将业务功能链匹配映射至资源池物理节点和链路,为资源分配目标。

进一步,提出基于在线深度强化学习方法来实现动态自适应的资源分配,具体过程如下。

步骤1:建立有约束的马尔科夫决策模型,该模型主要包括2个约束条件,一是系统容量瞬时约束条件,使用物理资源池容量代表;二是服务性能指标约束条件,使用累计随机统计量形式的切片模型SLA指标要求代表。

步骤2:提供由业务功能链至资源池映射配置动作智能适配的动态编排策略,该策略以满足最优目标函数(如以最小资源利用率或最小队列长度)为条件,业务功能链在状态空间(特性时刻资源池)的瞬时可用信息由采用资源侦听技术的网络监视器进行反馈。

步骤3:提供了深度学习拟合后的动态编排策略,该基于参数化形式的策略涉及有约束的马尔科夫决策模型,其求解过程通过分解转化为分布式多智能体协同的方式进一步实施。

步骤4:分布式智能体借助拉格朗日对偶法。将切片策略约束条件通过拉格朗日乘子引入目标函数,将原匹配问题转化为对偶问题,使独立切片在资源分配时满足服务性能指标约束。

步骤5:多智能体协同问题通过构建第2层深度学习网络予以解决,提供了一种将原始调度策略映射至物理资源池容量约束域内的方法,该深度学习目标函

数设置为KL散度,用以度量潜在动作和编排动作间的差异,并借助拉格朗日对偶法同时将系统容量约束条件引入该目标函数。

步骤6:深度学习网络依据整合后的目标函数进行训练,在同时满足系统容量和服务性能指标约束的条件下,实现智能适配的编排动作目标要求,有效解决强化学习在动作探索阶段可能出现的背离物理资源池容量约束或服务性能指标的问题。

针对同时运行多类切片的业务需求,将每种切片的业务设计构建成相应的切片智能体并作为资源编排器,采用上文所述的基于智能体联动的“单类型切片隔离、多切片间资源协同”分配优化策略,在资源适配过程中按照切片模型服务SLA和资源系统容量等约束条件,将各类切片的业务功能链配置在资源池图节点和链路中,采用“单智能体独立、多智能体协同”的两级深度优化学习方法在线动态编排资源,保证独立切片的性能隔离,使各类切片性能的调整互不影响。支持多切片同时在线运行,实现性能可达、性能隔离的目标。

### 2.3.2 自动化配置方法

自动化网络配置方法的技术路线如图6所示。针对业务需求生成的资源动态适配的网络编排与切片控制策略,通过多层级的网络编排器与各域子网切片

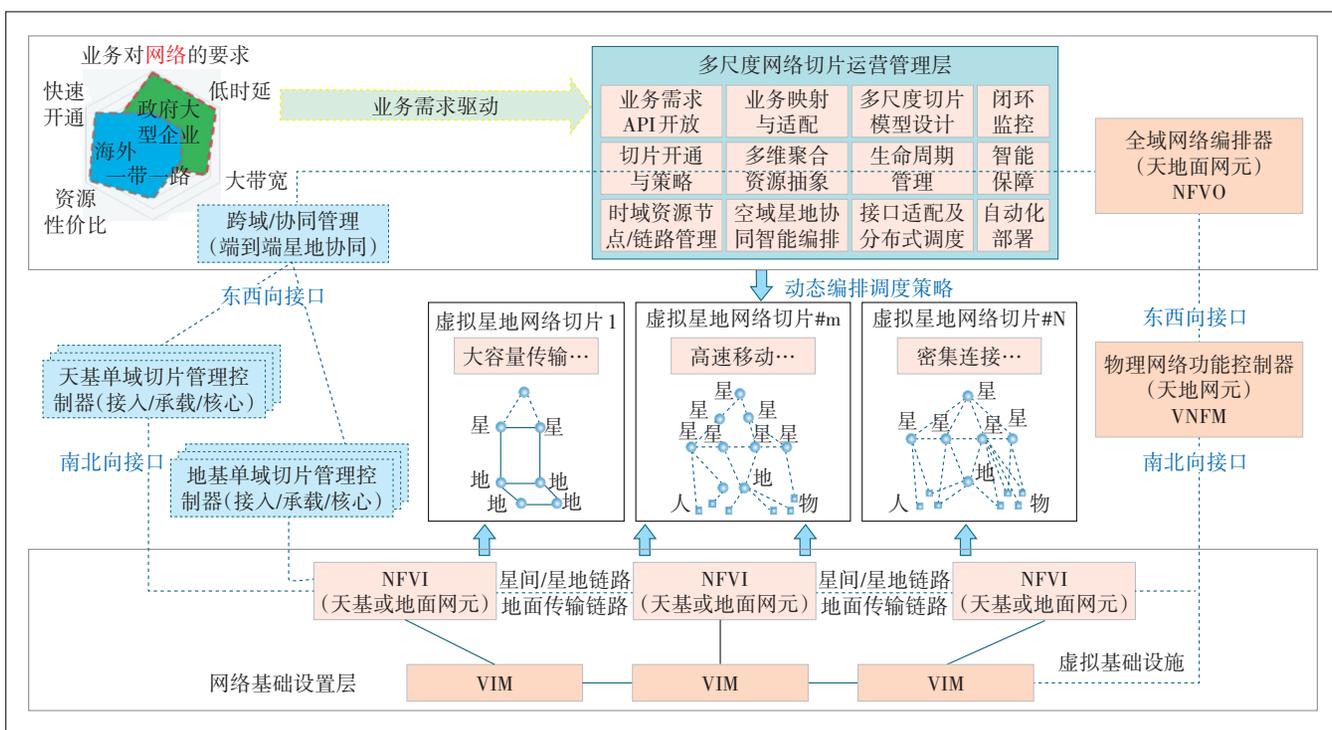


图6 自动化网络配置技术路线

管理控制器的联合跨域协同配合执行策略, 下达网络编排和切片配置动作指令, 实现资源端到端的实时协同调度。

针对多尺度网络资源与网络切片服务模型的映射, 构建面向高差异性服务的网络配置最优分割模型。面向切片编排和管理等功能的自动化网络配置需求, 通过多层级的网络编排器与各域子网切片管理控制器的联合跨域协同配合执行策略, 首先, 为天基和地基各域子网分别设置切片管理控制器, 其次, 为天基和地基设置独立的网络编排器, 并设置融合网络的集中切片管理和网络资源编排器。通过多域多层级的设置, 跨域协同配合执行策略, 可调度各域内资源执行端到端的资源编排动作, 便于智能体在线学习时评估配置动作效果, 下达网络编排和切片配置动作指令, 从而实现资源端到端的实时协同调度。进一步, 可在某个已执行的切片内, 根据业务智能感知和识别到的切片内业务需求(如语音, 视频等), 在其所在的切片模型框架内调度可调的业务保障, 并在业务发起后执行端到端的QoS等保障机制。

针对自动化配置业务需求, 通过动态跨域智能资源编排器生成编排策略, 进而通过多层级的管理控制器实现后续端到端的自动化网络配置, 快速执行由资源编排器给出的资源调度动作, 可将不同层级的管理控制器布置于半实物试验系统平台的基础物理设施侧, 通过监视资源管理器的实际资源调度执行情况, 验证自动化网络配置结果。

### 3 总结及展望

本文主要针对天地融合网络中面临的问题, 从资源供给、业务需求以及供需关系智能匹配角度, 提出天地融合网络切片技术的初步解决思路和方案, 采用了图论、多元数组及深度强化学习等方法, 但目前仅初步分析融合切片可实现的方案, 后续还需要持续深入研究。天地网络融合作为新型信息基础设施未来趋势, 除了本文提及的网络切片之外, 还有其他领域的系列问题待解决, 例如目前卫星与通信仍然存在2套标准体系以及对融合发展路线的研究, 包括业务融合、系统融合、体制融合等演进过程, 从对应的技术角度来看, 还包括星上/地面技术、多模融合终端、业务及应用等待攻关的技术点。因此, 后续需积极布局空间网络研究及建设方案, 实现空间与地面设施互联互通; 探索运营商5G/6G网络与卫星互联网一体化, 推动

相关产业发展, 从而为运营商的标准推进及网络发展规划提出策略建议, 真正实现全球用户无缝通信连接的愿景目标。

### 参考文献:

- [1] 3GPP. Service requirements for the 5G system: 3GPP TS 22.261 [S/OL]. [2023-01-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [2] 3GPP. Study on using satellite access in 5G: 3GPP TR 22.822 [S/OL]. [2023-06-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [3] ITU-R. Key elements for integration of satellite systems into next generation access technologies: ITU-R M. 2460-0 [R]. Geneva: ITU, 2019.
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景及潜在关键技术白皮书[EB/OL]. [2023-08-09]. <https://www.cet-china.com/news/202106090412.html>.
- [5] 中国联通. 中国联通空天地一体化通信网络白皮书[EB/OL]. [2023-08-09]. <https://www.ambchina.com/data/upload/image/20211124/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E8%81%94%E9%80%9A%E7%A9%BA%E5%A4%A9%E5%9C%B0%E4%B8%80%E4%BD%93%E5%8C%96%E9%80%9A%E4%BF%A1%E7%BD%91%E7%BB%9C%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A6.pdf>.
- [6] 王光全, 朱斌, 李红五, 等. 5G网络能力开放关键技术与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
- [7] LIN L, ZHU B, WANG A N, et al. A novel 5G core network capability exposure method for telecom operator [C]//2020 IEEE Intl Conf on Parallel&Distributed Processing with Applications, Big Data&Cloud Computing, Sustainable Computing&Communications, Social Computing&Networking (ISPA/BDCloud/SocialCom/Sustain-Com). Exeter, United Kingdom: IEEE, 2020: 1450-1454.
- [8] 朱斌, 胡悦, 王光全. 空天地海协同应用综述[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 47-52.
- [9] 郑重, 缪中宇, 郑寒雨, 等. 卫星通信与地面5G融合发展路线探讨[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 115-124.
- [10] 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.
- [11] 王柏岩, 韩笑冬, 刘治军, 等. 低轨卫星接入网与5G系统融合网络架构及关键技术分析[C]//第十六届卫星通信学术年会论文集. 北京: 中国通信学会卫星通信委员会, 2020: 5-12.

### 作者简介:

朱斌, 毕业于北京邮电大学, 教授级高级工程师, 主要从事5G网络能力开放、天地一体化新技术及创新业务的研究工作; 林琳, 高级工程师, 毕业于北京邮电大学, 主要从事5G网络能力开放、天地一体化新技术及创新业务产品的研究工作; 胡悦, 毕业于西安电子科技大学, 工程师, 主要从事核心网及星地网络融合、5G消息相关领域的研究工作; 邢楷初, 毕业于中国科学院空天信息创新研究院, 主要从事天地一体化网络切片及创新业务产品的研究工作; 王光全, 教授级高级工程师, 主要从事网络技术、光通信、量子加密通信等领域的研究及管理工作; 姚海鹏, 北京邮电大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向包括网络人工智能、机器学习、未来网络体系架构、卫星互联网等。