

## 面向 6G 的网络架构建模、评估及优化

王晓云<sup>1</sup>, 陆璐<sup>2</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 施南翔<sup>2</sup>, 张童<sup>2</sup>, 潘筱涵<sup>2</sup>

(1. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100053; 2. 中国移动通信集团有限公司研究院, 北京 100053)

**摘要:** 针对未来 6G 网络场景多样化、网络要素多元化等带来的网络架构设计和部署复杂度升高的难题, 提出了一种基于数字孪生的 6G 网络架构建模、评估及优化方法。首先, 对网络架构中的复杂要素进行系统分类, 据此在数字孪生空间内建立包含业务域、逻辑域和物理域的三域模型; 其次, 利用超图理论对模型中的各域及其之间的复杂关系进行详细建模; 再次, 提出了网络架构熵的概念, 并将其用于量化评估 6G 网络架构设计和部署方案的合理性; 最后, 提出了一种 6G 网络架构熵的构建方法, 推导并形成了 6G 网络架构熵减的设计思路。仿真结果表明, 所提架构熵减理论能够在不同场景下针对 6G 网络架构的设计和部署方案优劣进行量化评估, 并给出优化设计的方向。

**关键词:** 6G 网络架构; 数字孪生网络; 超图理论; 网络架构熵

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024124

## Modeling, evaluation, and optimization for 6G network architecture

WANG Xiaoyun<sup>1</sup>, LU Lu<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, SHI Nanxiang<sup>2</sup>, ZHANG Tong<sup>2</sup>, PAN Xiaohan<sup>2</sup>

1. China Mobile Communications Group Corporation Limited, Beijing 100053, China

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

**Abstract:** Facing the challenges of increased complexity in 6G network architecture design and deployment due to diverse network scenarios and the pluralization of network elements, a digital twin-based method for modeling, evaluating, and optimizing the 6G network architecture was proposed. Initially, the intricate elements in the network architecture were systematically categorized, leading to the establishment of a three-domain model comprising service, logical, and physical domains in the digital twin space. Subsequently, the three domains and their intricate relationships were modeled in detail using hypergraph theory. Furthermore, the concept of network architectural entropy was introduced to quantitatively assess the rationality of the design and deployment scheme of the 6G network architecture. Finally, a method for constructing 6G network architectural entropy was proposed, and the design idea of 6G network architecture entropy reduction was developed and formulated. Simulation results demonstrate that the proposed architecture entropy reduction theory can quantitatively evaluate the pros and cons of 6G network architecture design and deployment schemes in various scenarios and offer optimal design guidance.

**Keywords:** 6G network architecture, digital twin network, hypergraph theory, network architectural entropy

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-06-14

通信作者: 陆璐, lulu@chinamobile.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2020YFB1806800)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806800)

## 0 引言

面向2030年及未来,人类社会将进入智能化时代,数字世界与物理世界将无缝融合。下一代移动通信技术将实现物理世界中人与人、人与物以及物与物的高效智能互联,并进一步打造泛在精细、实时可信与有机整合的数字世界,实时精确地反映和预测物理世界的真实状态,最终实现“万物智联、数字孪生”的美好愿景<sup>[1-3]</sup>。随着5G在全球范围的逐渐普及和规模部署,一些国家开始聚焦于6G的研究探索。例如:芬兰政府于2018年率先启动6G旗舰项目,并发布了系列6G白皮书;2019年6月,中国IMT-2030(6G)推进组由工业和信息化部牵头成立,标志着我国6G研发正式启动;2020年10月,美国成立了Next G联盟,以全力研究6G网络。

然而移动通信网络是一个复杂的系统,随着沉浸式云扩展、全息通信、智慧交互和通信感知融合等新业务、新场景的出现,预计到2040年,6G网络各类终端连接数量将呈现千亿级爆发式增长,同时网络复杂性将呈现指数级增长<sup>[4]</sup>,这将导致6G网络成为一个更加庞大的复杂异构系统。其中,网络架构作为基础支撑,决定了整个系统的效率和性能,其可行性会直接影响6G网络的发展路径和应用成效。因此,必须对6G网络架构进行前瞻性、创新性和全面性的设计,并在设计过程中寻求新业务、新需求和设计原则的根本性转变,同时考虑与现有网络的兼容性以及业务的继承性。

目前,国内外的运营商、设备商等均各自提出了对6G网络架构的不同设想。例如:芬兰奥卢大学启动6G Bridge计划,定义以服务为中心的6G网络架构;欧洲6G旗舰项目Hexa-X提出了柔性6G网络的研究方向,认为6G系统的“网络之网络”架构应能够有效集成每种类型的子网络;中国移动提出了以“三体四层五面”的总体架构为基础的全服务化架构(HSBA, holistic service-based architecture),从空间、逻辑与功能组成3个角度,设计了一个跨域、跨层、多维的6G网络架构<sup>[5]</sup>。虽然产业界和学术界对6G网络架构开展了多方面的研究<sup>[6-12]</sup>,但是6G网络架构的设计仍然面临严峻的挑战。首先,当前国内外缺乏统一的、科学的和系统性的理论和方法指引6G网络架构的设计。现有1G到5G的网络架构设计大多依赖于专家工程的经验和统计特性,有关移动通信网络架构设计理论的

研究尚属空白。其次,未来6G网络发展面临物联网、大数据、云计算等多样化场景需求,业务时空分布特征及其性能需求的跨度越来越大。这些都将导致6G网络架构的设计变得更加困难,如果不突破传统依赖经验式网络架构设计的局限,将很难满足6G复杂多样化场景下的网络架构设计需求。因此,本文当前需要考虑的问题之一是如何找到一种更为合适的网络描述和分析方法,针对移动通信网络建立一个可推导和可验证的数学模型,作为大规模复杂网络预测、控制、优化和演进的系统级理论依据。

此外,6G网络在给人们的生产与生活带来智能化、沉浸化与全域化体验的同时,本身也会产生极大的不确定性。因此,需要一种方法能对各种自然或人工的复杂网络结构的行为特性进行定量或定性描述,从而控制并优化各类网络行为,以保障6G网络顺畅运行。然而,目前缺乏对网络架构整体优劣的评估指标,难以像传统研究那样精准地找出影响网络性能和复杂度的因素并给出数学解析。因此,本文需要考虑的另一个问题是能否找到一个合适的评估指标对网络架构整体的复杂度和优劣程度进行合理评估,并依据此评估指标对网络架构进行简化设计。

因此,本文基于数字孪生网络从超图角度对6G网络架构进行建模,多层次、多维度地抽象出6G网络各种要素的核心特征,并对各种要素间的复杂关系进行提炼、建模并量化,形成系统化的理论方法,为6G网络架构的设计提供支撑。进一步地,将熵的概念应用于移动通信网络架构中,从熵减理论角度对基于超图的6G网络架构的内在不确定性进行评估,在抓取6G网络域内、域间各种要素的设计态和运行态特征的基础上,评估6G网络架构的行为特征,优化6G网络架构设计和部署。

本文具体贡献介绍如下。

1) 基于网络功能虚拟化(NFV, network function virtualization)三层架构,在数字孪生空间内提出了包含业务域、逻辑域和物理域的6G网业协同三域模型。通过建立域内超图和跨域超图来表征业务类型、虚拟网络功能、各类型功能实体之间以及跨域不同组合之间的复杂多元关系。

2) 为了评估6G网络架构设计和部署运营的优劣,从域内、域间多维度定义了移动通信网络架构

熵。具体地,根据各域的需求和实际部署之间的匹配度构建设计态熵;根据各域超图节点的时空分布、超边条数和长度的动态变化构建运行态熵;根据跨域超边交叠程度的动态变化构建跨域熵,最终将上述 3 个熵加权求和形成移动通信网络架构熵。

3) 本文提出了基于超图和网络架构熵的 6G 网络架构优化方法。综合考虑业务需求、虚拟网络功能部署和物理实体逻辑组合关系等约束条件,解决了以最小化 6G 网络架构熵为目标的优化问题,并对不同粒度的原子化设计和不同部署分布状态下的 6G 网络架构熵进行仿真评估。

## 1 系统模型

### 1.1 虚实结合的 6G 网络架构

未来 6G 应用场景将在 5G 三大典型场景基础上进行深化,实现网络性能和服务能力的跃升<sup>[13]</sup>。因此,6G 网络架构应继承 5G NFV 三层架构,并在此基础上进一步发展。

如图 1 所示,本文提出的基于数字孪生的 6G 网络架构虚实映射模型包括物理空间和孪生空间两部分。物理空间包含真实网络的所有元素,孪生空间是物理空间的数字映射。在孪生空间中建立 6G 网业协同三域模型,并对该模型进行建模描述、演化预测、仿真诊断和决策控制操作,之后将结果通过反馈控制配置到物理空间,最终完成对整个 6G 网络架构的优化。

1) 业务域。在孪生空间中对多样化场景产生的各种业务抽象建模。除了面向 5G 增强的移动互联网、物联网、车联网、工业互联网等垂直行业应用场景,6G 将出现更多差异化应用,实现应用场景的升级和拓展,赋能更多下游垂直行业。业务域中的业务类型、业务时空分布以及业务时延带宽等各项性能指标决定了网络的实际部署情况和升级改造频度,因此这些性能指标是业务域的核心指标参数。

2) 逻辑域。在孪生空间中对各种微服务构成

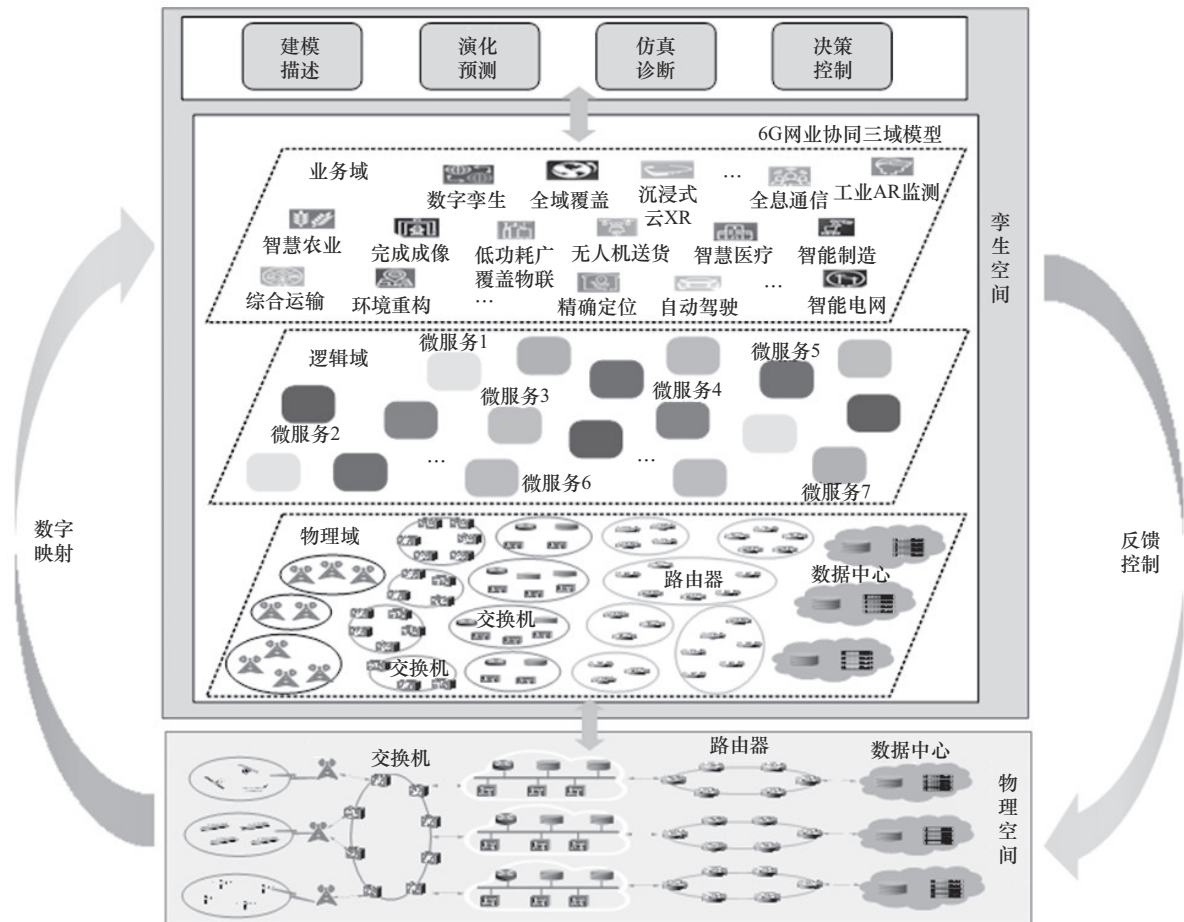


图 1 基于数字孪生的 6G 网络架构虚实映射模型

的服务化架构 (SBA, service-based architecture) 抽象建模。多个交互紧密的微服务聚合成网络功能 (NF, network function), 并通过若干个 NF 的时序化交互, 最终实现接入控制、移动性管理、会话管理等端到端的移动网络信令流程, 不同 NF 的组合构成了不同的网络切片和专网<sup>[14]</sup>。逻辑域中 NF 的个数、微服务的总数以及微服务在各个 NF 中的分布情况等核心指标参数, 将在很大程度上决定网络的整体性能和灵活性。

3) 物理域。在孪生空间中对提供基础资源和运行网络功能的接入网、承载网、核心网等物理设备抽象建模。当通过数字孪生映射到物理域时, 这些物理设备将按照设备类型、部署位置、具备的能力、设备性能等因素被划分到一起。这些核心指标参数将决定各个逻辑功能如何部署到真实的网络中, 即决定了网络的最终形态。

4) 域间关联关系。三域之间并不是彼此完全独立的关系, 而是相互关联、共同作用, 并影响网络的最终形态。上层的业务性能和网络资源需求影响下层的网络功能、微服务的组合和物理设备的部署策略, 而下层的物理资源供给能力决定上层所能提供的网络功能和业务类型。

## 1.2 基于超图的 6G 网业协同三域模型

### 1.2.1 三域模型

随着 6G 的发展, 业务需求越来越多样化, 网络要素越来越多元化, 网络内的关系也越来越复杂。超图作为一种广义的图, 它的一条超边可以连接任意数量的节点, 也可捕捉并表述网络中各要素高阶交互和网络高阶群关系。超边仅描述成对关系的能力, 这是超图与传统图论模型最本质的区别<sup>[15-17]</sup>。因此, 超图理论对信息多维、节点多级和网络多层的 6G 复杂异构网络表征问题具有很好的适应性, 可以高度匹配 6G 复杂异构网络特征。

针对上述提出的 6G 网业协同三域模型及各域跨域所考虑的核心参考指标, 本文建立了一种基于超图的 6G 网业协同三域模型, 如图 2 所示。构成超图的具体要素表述如下。①在业务域内, 在不同的业务时空分布、不同的应用场景以及不同的业务服务质量 (QoS, quality of service) 需求下的业务的分类和数量; ②在逻辑域内, 为了实现不同粒度的功能而划分的微服务的种类和数量; ③在物理域内, 不同类型、属性和行为的网络组件的分类和数

量; ④在三域域间, 业务种类、虚拟网络功能 (VNF, virtualized network function) 和特定网络组件等的不同组合方式和数量。事实上, 本文主要的目的是围绕网络资源随用户行为的变化产生的微服务的灵活组合、物理实体切片等问题提出一种有效的网络评估和优化方案, 基于超图建模 1.1 节所提的网络核心要素, 网络根据用户需求和业务部署所带来的变化都可以进行表征。这将有利于本文建立合理的网络架构和组网设计方案并研究网络资源优化策略。接下来, 详细描述具体的超图构建方法。

### 1.2.2 域内超图构建

如图 2(a)所示, 业务域、逻辑域和物理域三域依据不同要素形成域内超图。

1) 业务域域内超图。运营商在部署网络前需按照合理的业务分类标准建模并制定业务策略, 以减少为了满足业务需求反复改造网络的次数<sup>[18]</sup>。因此, 需要对业务按场景进行分类, 对业务关键特征进行建模, 以合理的性能指标实现业务分类。

特别地, 本文假设在业务域中已基于多样化业务的场景特征、QoS 需求等对业务分类进行了预定义。假设  $S$  表示业务域所有业务集合, 定义为

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_K\} \quad (1)$$

其中,  $s_k$  表示第  $k$  个业务用集合  $AT_k = \{da_k, lm_k, td_k, rp_k, tr_k, \dots\}$  描述业务  $s_k$  的固有属性、限制条件和性能需求等<sup>[19]</sup>, 其中,  $da_k$  表示业务  $s_k$  的大小 (单位为 Mbit),  $lm_k$  表示业务  $s_k$  的限制条件,  $td_k$  表示业务  $s_k$  的时延要求,  $rp_k$  表示业务  $s_k$  的可靠性要求,  $tr_k$  表示业务  $s_k$  的最低传输速率要求。值得注意的是, 可根据具体场景合理添加集合  $AT_k$  中的元素。

业务域超图模型为  $\mathcal{H}_{intra}^1(\mathcal{V}_{intra}^1, \mathcal{E}_{intra}^1)$ , 每个业务  $s_k$  是业务域超图中的节点, 则业务域节点集  $\mathcal{V}_{intra}^1 = S$ 。根据每个业务的固有属性、限制条件和性能需求等进行分类, 属于同一类别  $\xi_k$  的业务可以构成业务域内的一条超边, 将每个业务类别看作一条超边, 则业务域超边集合  $\mathcal{E}_{intra}^1 = \{\xi_1, \dots, \xi_N\}$ , 其中,  $N$  表示业务域内超边数量。

2) 逻辑域域内超图。随着网络能力扩展, 不同粒度逻辑功能以及功能间的信息交互过程愈加复杂, 需要对不同网络功能和关系进行精确的数学建模, 实现网络功能的实时分解和重构<sup>[20]</sup>。

假设  $MS$  表示逻辑域所有微服务集合, 定义为

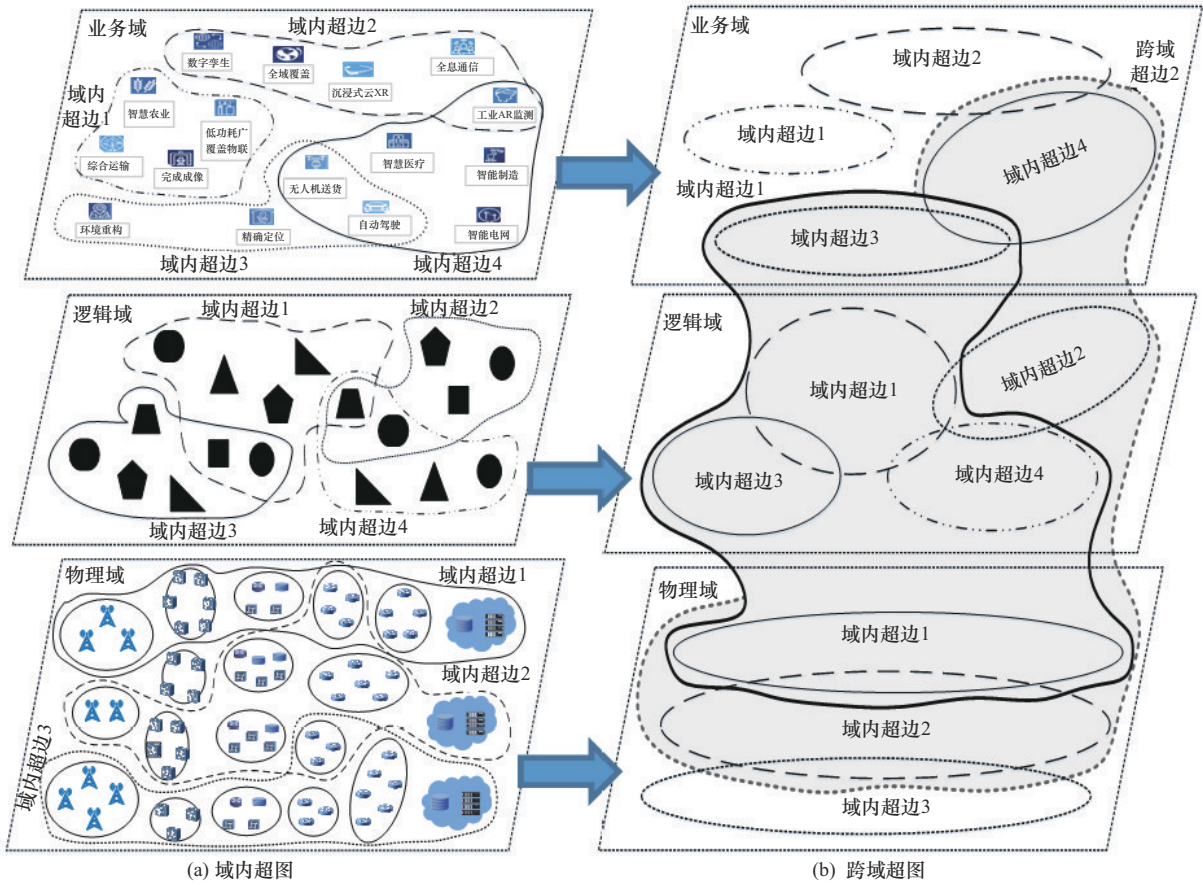


图2 基于超图的6G网业协同三域模型

$$MS = \{ms_1, ms_2, \dots, ms_H\} \quad (2)$$

令  $\text{vnf}_g$  表示某种 VNF 类型  $g$ , 则虚拟网络功能集合表示为  $VNF = \{\text{vnf}_g | g = 1, 2, \dots, G\}$ . 对于特定类型的虚拟网络功能  $\text{vnf}_g$ , 定义为

$$\text{vnf}_g = \theta(ms_{g_1}, ms_{g_2}, \dots, ms_{g_D}) \quad (3)$$

其中,  $\theta(\cdot)$  表示针对 VNF 的功能函数. 选择  $g_D$  个相应的微服务并组合起来就可实现特定网络功能  $\text{vnf}_g$ .

逻辑域超图模型为  $\mathcal{H}_{\text{intra}}^2(\mathcal{V}_{\text{intra}}^2, \mathcal{E}_{\text{intra}}^2)$ , 每个微服务  $ms_h$  构成逻辑域超图中的节点, 则  $\mathcal{V}_{\text{intra}}^2 = MS$ . 每个虚拟网络功能构成一个逻辑域域内超边, 将每个虚拟网络功能看作一条超边, 因此逻辑域域内超边集合可表示为  $\mathcal{E}_{\text{intra}}^2 = VNF$ .

3) 物理域域内超图. 物理域的目的是将逻辑域中 NF 按照最优的方式部署在物理设备上. 不同的物理实体依据部署位置、类型、行为和所提供的能力等被分为不同的物理组件. 假设  $NT$  表示物理域所有实体集合, 定义为

$$NT = \{nt_1, nt_2, \dots, nt_j, \dots, nt_J\} \quad (4)$$

其中,  $nt_j$  表示第  $j$  个物理实体. 假设物理域实体  $nt_j$

的标识定义为

$$IC_j = \{nt_{\text{type}}^j, nt_{\text{device}}^j, nt_{\text{behaviour}}^j\} \quad (5)$$

其中,  $nt_{\text{type}}^j$  表示实体  $j$  的类型 (核心网组件、承载网组件、接入网组件等),  $nt_{\text{device}}^j$  表示实体  $j$  自身的设备信息,  $nt_{\text{behaviour}}^j$  表示实体  $j$  的行为,  $1 \leq |NT| \leq J$ .

值得注意的是,  $nt_{\text{type}}^j$  和  $nt_{\text{device}}^j$  在实际网络中可以由实体  $j$  的标签唯一确定. 实体  $j$  的行为  $nt_{\text{behaviour}}^j$  定义为

$$nt_{\text{behaviour}}^j = \begin{bmatrix} \{b_{\text{loc}}^j, b_{\text{sub}}^j, b_{\text{adj}}^j, b_{\text{con}}^j, \dots\}_{\text{top}} \\ \{b_{\text{tra}}^j, b_{\text{del}}^j, b_{\text{plr}}^j, b_{\text{sta}}^j, \dots\}_{\text{per}} \\ \{b_{\text{typ}}^j, b_{\text{com}}^j, b_{\text{ope}}^j, b_{\text{sec}}^j, \dots\}_{\text{fun}} \\ \{b_{\text{cot}}^j, b_{\text{sto}}^j, b_{\text{coc}}^j, b_{\text{sen}}^j, \dots\}_{\text{res}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\{\}_{\text{top}}$ 、 $\{\}_{\text{per}}$ 、 $\{\}_{\text{fun}}$  和  $\{\}_{\text{res}}$  分别对应着拓扑行为、性能行为、功能行为和资源行为. 对于  $nt_{\text{behaviour}}^j$ , 拓扑行为包括实体  $j$  的位置  $b_{\text{loc}}^j$ 、从属关系  $b_{\text{sub}}^j$ 、邻接关系  $b_{\text{adj}}^j$  和连通度  $b_{\text{con}}^j$  等; 性能行为包括实体  $j$  的传输速率  $b_{\text{tra}}^j$ 、时延  $b_{\text{del}}^j$ 、丢包率  $b_{\text{plr}}^j$  和稳定性  $b_{\text{sta}}^j$  等; 功能行为包括实体  $j$  的类型  $b_{\text{typ}}^j$ 、组件功能  $b_{\text{com}}^j$ 、运营商  $b_{\text{ope}}^j$  和安全级别  $b_{\text{sec}}^j$  等; 资源行为

包括实体  $j$  的计算资源  $b_{\text{cot}}^j$ 、存储资源  $b_{\text{sto}}^j$ 、通信资源  $b_{\text{coc}}^j$  和感知资源  $b_{\text{sen}}^j$  等。

令  $\text{pct}_y$  表示某种物理组件类型  $y$ ，则该物理组件集合表示为  $\text{PCT} = \{\text{pct}_y | y = 1, 2, \dots, Y\}$ 。特定类型的物理组件  $\text{pct}_y$  定义为

$$\text{pct}_y = \Psi(\text{nt}_{y_1}, \text{nt}_{y_2}, \dots, \text{nt}_{y_R}) \quad (7)$$

其中， $\Psi(\cdot)$  表示针对 VNF 的功能函数。选择  $y_R$  个相应的物理实体并组合起来就可形成某类物理组件  $\text{pct}_y$ 。

假设物理域网络切片集合用 NS 表示，定义为

$$\text{NS} = \{\text{ns}_1, \text{ns}_2, \dots, \text{ns}_c, \dots, \text{ns}_L\} \quad (8)$$

其中， $\text{ns}_l = \{\text{pct}_{l_1}, \text{pct}_{l_2}, \dots, \text{pct}_{l_Q}\}$  表示物理域  $l_Q$  个物理组件形成某一网络切片  $\text{ns}_l$ ， $1 \leq l \leq |\text{NS}|$ 。

物理域超图模型为  $\mathcal{H}_{\text{intra}}^3(\mathcal{V}_{\text{intra}}^3, \mathcal{E}_{\text{intra}}^3)$ ，物理域中所有物理组件形成物理域超图中的节点，则  $\mathcal{V}_{\text{intra}}^3 = \text{PCT}$ 。多个节点可实现物理域特定的网络切片，每个网络切片构成一个域内超边，将每个网络切片看作一条超边，因此物理域超边集  $\mathcal{E}_{\text{intra}}^3 = \text{NS}$ ，其中， $|\text{NS}|$  表示物理域内超边数量。

### 1.2.3 跨域超图构建

实际上，三域并不相互独立，而是存在一定程度的关联关系，有必要设计跨域超图来表征三域域间各要素存在的复杂多元关系。如图 2(b) 所示，三域域内划分的超边构成跨域超图的节点，一个完整的网络服务构成一条跨域超边，即业务域中的业务类别、逻辑域中的网络功能以及物理域中的网络切片的组合，不同的网络服务构成跨域超边集合。

三域跨域超图模型为  $\mathcal{H}_{\text{inter}}(\mathcal{V}_{\text{inter}}, \mathcal{E}_{\text{inter}})$ ，将三域中划分的超边  $\mathcal{E}_{\text{intra}}^1$ 、 $\mathcal{E}_{\text{intra}}^2$  和  $\mathcal{E}_{\text{intra}}^3$  视作跨域超图的节点，则节点集  $\mathcal{V}_{\text{inter}} = \mathcal{E}_{\text{intra}}^1 \cup \mathcal{E}_{\text{intra}}^2 \cup \mathcal{E}_{\text{intra}}^3$ 。实现一次完整的网络服务要实现三域协同，将每个完整的网络服务看作三域跨域超边，跨域超边包括各个域内的节点，因此第  $m$  个跨域超边  $\mathcal{E}_{\text{inter}}^m$  表示为  $\mathcal{E}_{\text{inter}}^m = \{\xi_{m_1}, \xi_{m_2}, \dots, \text{VNF}_{m_1}, \text{VNF}_{m_2}, \dots, \text{ns}_{m_1}, \text{ns}_{m_2}, \dots\}$ ，三域跨域超边集  $\mathcal{E}_{\text{inter}} = \{\mathcal{E}_{\text{inter}}^1, \mathcal{E}_{\text{inter}}^2, \dots, \mathcal{E}_{\text{inter}}^M\}$ ，其中， $M$  表示跨域超边数量。这里网络服务定义为用户在网络中的实际请求，在所提三域模型中分别被映射为业务域中的业务类别、逻辑域中的网络功能以及物理域中的网络切片。

## 2 架构评估

本节首先从熵的概念和理论出发，结合移动通

信网络架构的特点，提出基于熵减理论的网络架构优劣的评估指标——网络架构熵。然后以 6G 网业协同三域模型为例，提出了一种面向 6G 的网络架构熵的计算方法，用以综合评估 6G 网络架构设计及部署的优劣。

### 2.1 架构熵的提出

#### 2.1.1 熵的概念与数学表示

熵的概念最早由物理学家克劳修斯在经典热力学第二定律熵增原理中提出，后来由玻尔兹曼发展为统计物理学的玻尔兹曼熵，即通过描述微观粒子的分布情况，从宏观的统计特性来描述系统的无序或混乱程度<sup>[21-23]</sup>。熵的热力学定义后来在信息论、天体物理等领域均有重要应用。

香农在 1948 年发表的一篇题为《通信的数学理论》的文章中指出信息是用来消除随机不确定性的东西，并借鉴热力学熵的定义第一次提出了信息论的基本概念——信息熵，以解决信息的度量问题。例如，考虑一个离散无记忆信源  $X$  包含  $N$  个消息符号取值，即  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ ，对应出现的概率为  $P = \{p_1, \dots, p_N\}$ ，则单符号信源  $X$  的信息熵为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (9)$$

通过式(9)计算得到的信息熵越大，表示整个信源的不确定性和随机性就越大，而一个消息符号被确定下来时所给出的平均信息量也就越大，反之亦然。

如果系统一次输出多个符号，则可以通过统计多符号联合分布来计算多符号信源的联合熵。例如，考虑多符号离散平稳信源发出的消息由 2 个符号  $X$  和  $Y$  组成，样本空间分别为  $\{x_1, \dots, x_M\}$  和  $\{y_1, \dots, y_N\}$ ，则对应出现的联合概率为  $P_{XY} = \{p(x_1, y_1), \dots, p(x_M, y_N)\}$ ，联合熵为

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p(x_i, y_j) \log p(x_i, y_j) = H(X) + H(X|Y) \quad (10)$$

在现代移动通信网络中，存在着多种随机因素共同影响整个网络的优劣，因此可以参考联合熵的定义来衡量网络的性能。对于网络架构而言，影响因素对其影响大小各不相同。对这些因素乘以不同的权重因子，再通过类似信息熵的定义方式，可以定义对网络架构优劣的影响大小。

$$H(X) = - \sum_{x \in \mathcal{X}} p(x) \varphi(x) \log p(x) \quad (11)$$

其中,  $\varphi(x)$  表示权重函数。

### 2.1.2 网络架构熵

综合考虑网络架构特点, 影响网络架构优劣的因素很多, 对于影响较小的因素可以忽略不计。因此, 本文仅选取有限个数的影响因素, 提出评估网络架构整体优劣的网络架构熵  $H_{\text{Arch}}$ , 并将其定义为

$$H_{\text{Arch}}(X_1, \dots, X_N) = - \sum_{x_1 \in \mathcal{X}_1} \dots \sum_{x_N \in \mathcal{X}_N} p(x_1, \dots, x_N) \varphi(x_1, \dots, x_N) \log p(x_1, \dots, x_N) \quad (12)$$

其中,  $X_1, \dots, X_N$  为随机变量, 表示影响网络架构优劣的关键微观因素,  $\varphi(x_1, \dots, x_N)$  表示权重函数。

随后, 通过分析  $N$  个随机变量的相关系数, 对这  $N$  个随机变量进行分类, 将相关性较大的变量划分为一类 (称为域), 进一步解耦加权架构熵, 可以有效减少分析复杂度。加权架构熵公式可简化为

$$\begin{aligned} H_{\text{Arch}}(X_1, \dots, X_N) = & - \sum_{x_1 \in \mathcal{X}_1} \dots \sum_{x_M \in \mathcal{X}_M} p(x_1, \dots, x_M) \cdot \\ & \varphi_{\text{Arch}_1}(x_1, \dots, x_M) \log(x_1, \dots, x_M) \\ & - \sum_{x_{M+1} \in \mathcal{X}_{M+1}} \dots \sum_{x_B \in \mathcal{X}_B} p(x_{M+1}, \dots, x_B) \cdot \\ & \varphi_{\text{Arch}_2}(x_{M+1}, \dots, x_B) \log(x_{M+1}, \dots, x_B) \\ & \dots \\ & - \sum_{x_{B+1} \in \mathcal{X}_{B+1}} \dots \sum_{x_N \in \mathcal{X}_N} p(x_{B+1}, \dots, x_N) \cdot \\ & \varphi_{\text{Arch}_E}(x_{B+1}, \dots, x_N) \log(x_{B+1}, \dots, x_N) = \\ & \hat{H}_{\text{Arch}_1}(X_1, \dots, X_M) + \hat{H}_{\text{Arch}_2}(X_{M+1}, \dots, X_B) \\ & + \dots + \hat{H}_{\text{Arch}_E}(X_{B+1}, \dots, X_N) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $\varphi_{\text{Arch}_i}$  表示解耦之后第  $i$  个子域的权重函数,  $\hat{H}_{\text{Arch}_i}$  表示解耦之后独立的加权子域熵。另外, 值得注意的是, 当所有随机变量的相关系数相同或相近时, 只能将所有的变量归为一类 (一个域), 并基于未解耦的公式进行计算。如果要进一步降低复杂度, 可以按场景需求减少部分随机变量, 从而实现数据降维的简化计算。

进一步, 从全局考虑加权系数并进行归一化处理, 则每个子域的权重函数  $\varphi_{\text{Arch}_i}$  可以近似为一个恒正的常值函数, 其值为原函数在对应域内的统计平均  $\gamma_i$ 。加权架构熵公式最终近似为

$$\begin{aligned} H_{\text{Arch}}(X_1, \dots, X_N) \approx & -\gamma_1 \sum_{x_1 \in \mathcal{X}_1} \dots \sum_{x_M \in \mathcal{X}_M} p(x_1, \dots, x_M) \cdot \\ & \log(x_1, \dots, x_M) \\ & -\gamma_2 \sum_{x_{M+1} \in \mathcal{X}_{M+1}} \dots \sum_{x_B \in \mathcal{X}_B} p(x_{M+1}, \dots, x_B) \cdot \\ & \log(x_{M+1}, \dots, x_B) \\ & \dots \\ & -\gamma_E \sum_{x_{B+1} \in \mathcal{X}_{B+1}} \dots \sum_{x_N \in \mathcal{X}_N} p(x_{B+1}, \dots, x_N) \cdot \\ & \log(x_{B+1}, \dots, x_N) = \\ & \gamma_1 H_{\text{Arch}_1}(X_1, \dots, X_M) + \gamma_2 H_{\text{Arch}_2}(X_{M+1}, \dots, X_B) \\ & + \dots + \gamma_E H_{\text{Arch}_E}(X_{B+1}, \dots, X_N) \end{aligned} \quad (14)$$

## 2.2 基于架构熵的6G网业协同三域模型评估实例

### 2.2.1 域内架构熵

对于域内影响网络架构优劣的多种复杂要素, 可分为设计态和运行态对域内架构熵进行评估。

在网络初始部署时, 网络业务加载后的节点分布情况之间的差值可以反映网络架构设计部署的合理性。对于业务域, 根据话务模型的预估将各种应用程序 (APP, application) 服务器进行预放置并预置相应的容量等。当业务大规模加载后, 用户对 APP 服务器资源的实际需求与预估之间的差异较大, 会增加网络资源调度开销, 降低网络运行效率。将某区域单元的某时隙内所有用户对业务  $s_k$  的数据需求视为随机变量  $R_{s_k}^{\Delta t, \Delta s}$ , 其概率分布可以通过网络中的历史数据统计得到, 记为  $p(R_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x)$ 。业务  $s_k$  的数据预部署同样视为随机变量  $\text{PI}_{s_k}^{\Delta t, \Delta s}$ , 因该随机变量为所需要设计的网络中的业务数据分布, 则其概率密度函数先验已知, 记为  $p(\text{PI}_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x)$ 。因此, 利用交叉熵的形式, 定义业务  $s_k$  在  $\Delta s$  区域、 $\Delta t$  时隙内的设计态熵为

$$\begin{aligned} L_{s_k} \left[ p(R_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x), p(\text{PI}_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x) \right] = & - \sum_{x_i \in \phi(s_k)} p(R_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x_i) \ln \left[ p(\text{PI}_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x_i) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $\phi(s_k)$  表示业务域中业务  $s_k$  的数据需求与预部署的状态空间。该熵能够对业务  $s_k$  的资源部署与用户需求之间的差异性进行度量。因此, 定义业务域内设计态熵  $H_{\text{设计态}}^s$  为所有业务的部署熵之和关于时空范围与业务数量的统计平均, 即

$$H_{\text{设计态}}^s = \frac{\sum_{\Delta t \in T_0} \sum_{\Delta s \in S_0} \sum_{s_k \in S} L_{s_k} \left[ p\left(R_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) p\left(\text{PI}_{s_k}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) \right]}{|S_0| |T_0| K} \quad (16)$$

其中,  $S_0$  与  $T_0$  表示所研究的时空范围;  $S$  表示业务数量集合, 该值越大则表明业务域域内资源设计和部署越不合理, 利用熵减理论可以降低业务域中设计态的不合理性。

同样地, 考虑各网络功能对微服务的实际需求与设计/预部署之间的差异以及各网络切片对物理组件的实际需求与设计/预部署之间的差异, 定义逻辑域和物理域中设计态熵的设计态部分。逻辑域的设计态熵可以写为

$$H_{\text{设计态}}^l = \frac{\sum_{\Delta t \in T_0} \sum_{\Delta s \in S_0} \sum_{\text{ms}_h \in \text{MS}} L_{\text{vnf}_g} \left[ p\left(R_{\text{ms}_h}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) p\left(\text{PI}_{\text{ms}_h}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) \right]}{|S_0| |T_0| H} \quad (17)$$

其中,  $L_{\text{vnf}_g} \left[ p\left(R_{\text{ms}_h}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) p\left(\text{PI}_{\text{ms}_h}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) \right]$  表示逻辑域内  $\text{vnf}_g$  在  $\Delta s$  区域、 $\Delta t$  时隙内的设计态熵,  $p\left(R_{\text{ms}_h}^{\Delta t, \Delta s} = x\right)$  表示在  $\Delta s$  区域、 $\Delta t$  时隙内网络功能对微服务  $\text{ms}_h$  需求的概率分布,  $p\left(\text{PI}_{\text{ms}_h}^{\Delta t, \Delta s} = x\right)$  表示在该时空下部署的微服务  $\text{ms}_h$  的概率分布。物理域的设计态架构熵可以写为

$$H_{\text{设计态}}^w = \frac{\sum_{\Delta t \in T_0} \sum_{\Delta s \in S_0} \sum_{\text{pct}_y \in \text{PCT}} L_{\text{ns}_l} \left[ p\left(R_{\text{pct}_y}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) p\left(\text{PI}_{\text{pct}_y}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) \right]}{|S_0| |T_0| Y} \quad (18)$$

其中,  $L_{\text{ns}_l} \left[ p\left(R_{\text{pct}_y}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) p\left(\text{PI}_{\text{pct}_y}^{\Delta t, \Delta s} = x\right) \right]$  表示物理域内网络切片  $\text{ns}_l$  在  $\Delta s$  区域、 $\Delta t$  时隙内的设计态熵,  $p\left(R_{\text{pct}_y}^{\Delta t, \Delta s} = x\right)$  表示在  $\Delta s$  区域、 $\Delta t$  时隙内网络切片对物理组件  $\text{pct}_y$  需求的概率分布,  $p\left(\text{PI}_{\text{pct}_y}^{\Delta t, \Delta s} = x\right)$  表示在该时空下部署的物理组件  $\text{pct}_y$  的概率分布。

此外, 域内超边数量和长度随着新类型网络服务的加载而动态变化。其中, 超边长度表示要素的数量, 超边数量表示类别的数量。超边动态变化范围可以明确反映网络的稳定性, 其值越小意味着较小的网络改造便能支持更多新业务的引入而不影响网络的稳定运行。在业务域中, 将某条超边的长度

记为  $A_{\zeta_k}$ , 表示某类业务  $\zeta_k$  内的业务数量; 业务域超边数量为  $N$ , 表示在某种业务分类方案下, 业务类别的数量为  $N$ 。将  $A_{\zeta_k}$  与  $N$  视为随机变量, 其概率分布分别记为  $p\left(A_{\zeta_k} = x\right)$  和  $p\left(N = x\right)$ , 可以根据业务的历史数据统计得到。参考香农信息熵的形式, 定义业务域中某超边长度  $A_{\zeta_k}$  的不确定性为该超边的长度熵

$$H_{\zeta_k} = - \sum_{x_i \in \phi(A_{\zeta_k})} p\left(A_{\zeta_k} = x_i\right) \log \left[ p\left(A_{\zeta_k} = x_i\right) \right] \quad (19)$$

其中,  $\phi\left(A_{\zeta_k}\right)$  表示随机变量  $A_{\zeta_k}$  的状态空间。该熵值越高表明该类业务越不稳定。将业务域内架构熵的运行态部分定义为业务域所有超边的长度熵之和关于超边数量的数学期望, 即

$$H_{\text{运行态}}^s = \text{E} \left[ \frac{\sum_{k=1}^N H_{\zeta_k}}{N} \right] \stackrel{(a)}{=} \sum_{k=1}^N H_{\zeta_k} \sum_{x_i \in \phi(N)} \frac{1}{x_i} p\left(N = x_i\right) \quad (20)$$

其中,  $\phi(N)$  表示随机变量  $N$  的状态空间, (a) 表示利用复合函数的数学期望得到。该熵表示业务域中业务数量与种类变化的混乱程度, 与业务分类的方式和各类别内业务数量的变化程度有关, 越合理的业务分类方式对应越低的超边长度熵。

同样地, 可以定义逻辑域和物理域中架构熵的运行态部分。逻辑域中超边的数量代表网络中网络功能的个数  $G$ , 超边长度  $A_{\text{vnf}_g}$  是指虚拟网络功能  $\text{vnf}_g$  内微服务的数量, 物理域中超边数量表示切片的数量  $L$ , 超边长度  $A_{\text{ns}_l}$  是指网络切片  $\text{ns}_l$  内包含的物理组件的数量。逻辑域和物理域超边长度的概率分布分别为  $p\left(A_{\text{vnf}_g} = x\right)$  和  $p\left(A_{\text{ns}_l} = x\right)$ , 相应的超边长度熵分别为

$$H_{\text{vnf}_g} = - \sum_{x_i \in \phi(A_{\text{vnf}_g})} p\left(A_{\text{vnf}_g} = x_i\right) \log \left[ p\left(A_{\text{vnf}_g} = x_i\right) \right] \quad (21)$$

$$H_{\text{ns}_l} = - \sum_{x_i \in \phi(A_{\text{ns}_l})} p\left(A_{\text{ns}_l} = x_i\right) \log \left[ p\left(A_{\text{ns}_l} = x_i\right) \right] \quad (22)$$

其中,  $\phi\left(A_{\text{vnf}_g}\right)$  表示随机变量  $A_{\text{vnf}_g}$  的状态空间,  $\phi\left(A_{\text{ns}_l}\right)$  表示随机变量  $A_{\text{ns}_l}$  的状态空间。通过将各域内所有超边的长度熵求和, 并针对超边数量求数学期望, 可以得到各域架构熵的运行态部分分别为

$$H_{\text{运行态}}^l = \mathbb{E} \left[ \frac{\sum_{g=1}^G H_{\text{vnf}_g}}{G} \right] \stackrel{(a)}{=} \sum_{g=1}^G H_{\text{vnf}_g} \sum_{x_i \in \phi(G)} \frac{1}{x_i} p(G = x_i) \quad (23)$$

$$H_{\text{运行态}}^w = \mathbb{E} \left[ \frac{\sum_{l=1}^L H_{\text{ns}_l}}{L} \right] \stackrel{(a)}{=} \sum_{l=1}^L H_{\text{ns}_l} \sum_{x_i \in \phi(L)} \frac{1}{x_i} p(L = x_i) \quad (24)$$

综合考虑域内架构熵的设计态与运行态部分,通过加权的方式形成域内架构熵,分别为

$$H_{\text{设计态}}^{\text{intra}} = \theta_1 H_{\text{设计态}}^s + \theta_2 H_{\text{设计态}}^l + \theta_3 H_{\text{设计态}}^w \quad (25)$$

$$H_{\text{运行态}}^{\text{intra}} = \theta_4 H_{\text{运行态}}^s + \theta_5 H_{\text{运行态}}^l + \theta_6 H_{\text{运行态}}^w \quad (26)$$

其中,  $\theta_1 \sim \theta_6$  为加权系数。该架构熵能够对域内的复杂性与混乱程度进行评估。

### 2.2.2 跨域熵

一次网络服务的执行需要三域的共同协作来完成,标识为跨域超边。由于多个网络服务之间的要素存在交叠,新的网络服务的加入或退出会产生服务间影响,这种影响会降低网络的稳定性,因此定义跨域熵来衡量网络服务间的交叠程度。

对于一个完整的端到端网络服务  $M_n \in \mathcal{M}$ ,  $\mathcal{M}$  为网络服务的集合,在三域模型中分别被映射为不同域内的要素组合。2个网络服务在各域中可能存在资源复用。这些复用虽带来了一定的网络灵活性,但同时也降低了网络稳定性。因此,定义2个网络服务  $M_{n_1}$  与  $M_{n_2}$  之间的耦合性  $U_{n_1, n_2}$  为网络服务间交集元素权重之和与网络服务并集元素权重之和的比值,权重指的是跨域超边连接节点的资源提供/需求能力,如物理域中某物理实体的资源提供能力。

$$U_{n_1, n_2} = \frac{\langle \mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_2} \rangle}{\langle \mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_2} \rangle} \quad (27)$$

其中,  $\mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_2}$  与  $\mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{n_2}$  分别为跨域超边之间相交与相并的元素集合,  $\langle \cdot \rangle$  为跨域超边集合内所有元素的权重之和。因此,将  $U_{n_1, n_2}$  视为随机变量,该随机变量的概率分布  $p(U_{n_1, n_2} = x)$  可以通过对网络中网络服务的要素统计得到。利用网络服务间耦合性的概率分布能够对其不确定性进行评估,即网络服务间耦合熵为

$$H_{U_{n_1, n_2}} = - \sum_{x_i \in \phi(U_{n_1, n_2})} p(U_{n_1, n_2} = x_i) \log [p(U_{n_1, n_2} = x_i)] \quad (28)$$

其中,  $\phi(U_{n_1, n_2})$  为网络服务  $M_{n_1}$  与  $M_{n_2}$  之间耦合性的状态空间。因此,定义跨域熵为所有网络服务间耦合熵之和,再计算网络服务数量的统计平均。

$$H_{\text{inter}} = \frac{\sum_{M_{n_1}, M_{n_2} \in \mathcal{M}} H_{U_{n_1, n_2}}}{|\mathcal{M}|(|\mathcal{M}| - 1)} \quad (29)$$

跨域熵值越高,意味着多个网络服务之间耦合程度的不确定性越高,网络服务之间资源的耦合关系越复杂,网络架构内部复杂性越高。

### 2.2.3 6G 网络架构熵

将各域域内设计态熵、运行态熵与跨域熵进行加权求和,构建6G网络架构熵,对网络架构的总体设计和部署优化提供指导,具体计算式为

$$\hat{H}_{\text{Arch}}^{6G} = \gamma_1 H_{\text{设计态}}^{\text{intra}} + \gamma_2 H_{\text{运行态}}^{\text{intra}} + \gamma_3 H_{\text{inter}} \quad (30)$$

其中,  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  和  $\gamma_3$  为各子熵所占权重,子熵权重由网络引入的变量对熵的影响决定。例如,当网络新建、升级改造时,网络的整体稳定性变化较大,即设计态熵将占比较大,  $\gamma_1$  将随之增加;在网络运行过程中,用户数突增或春运时用户规模移动,可能导致网络的稳定性受到较大影响,即运行态熵将占比较大,  $\gamma_2$  将随之增加;与此同时,随着网络中的共享切片被大量使用,不同切片之间的相互影响会使得网络的整体稳定性受到较大影响,从而导致跨域熵的权重  $\gamma_3$  增加。具体将根据实际情况进行设置。

## 3 基于超图和跨域熵的6G网络部署优化实例

对于移动通信网络来说,通过网络架构的设计和部署来实现系统的熵减,可以降低网络的不确定性,提升网络性能。熵值越低,系统就越有序。基于2.1.2节所提出的网络架构熵,该优化问题可以表述为

$$\begin{aligned} & \min H_{\text{Arch}}(X_1, \dots, X_N) = \\ & \min \left[ - \sum_{x_1 \in \mathcal{X}_1} \dots \sum_{x_N \in \mathcal{X}_N} p(x_1, \dots, x_N) \cdot \right. \\ & \left. \varphi(x_1, \dots, x_N) \log p(x_1, \dots, x_N) \right] \end{aligned} \quad (31)$$

以6G网络部署为例,本文提出了一种基于超

图和跨域熵的 6G 虚拟网络功能部署优化算法。基于 2.2.3 节的分析，6G 网络架构熵的部署优化问题可以表述为

$$\min \hat{H}_{Arch}^{6G} \xrightarrow{\text{最优化部署}} \min H^{inter} \quad (32)$$

具体地，基于跨域超图将 6G 虚拟网络功能部署优化问题建模为 0~1 整数线性规划的形式，在满足业务 QoS 需求、虚拟网络功能部署和逻辑组合关系等约束条件下最小化跨域熵。为了求解该优化问题，本节提出了一种 6G 虚拟网络功能部署启发式算法。该算法侧重从用户角度出发，使大量的数据分组在数据平面快速转发，提高用户体验。

### 3.1 基于跨域超图的 VNF 部署框架

每一个网络服务都将涉及多个来自  $\mathcal{E}_{intra}^2$  中的 VNF 和  $\mathcal{E}_{intra}^3$  中的网络切片，这是引入超图的主要原因。服务功能链 (SFC, service function chain) 是通过组合或处理多个 VNF 来实现的，每个 VNF 都是从不同的物理实体中提取的。每到达一个业务请求，网络服务提供商会生成相应的服务功能链，并按需部署到物理域的物理实体中。

图 3 给出了基于跨域超图的 VNF 部署框架，其中有 2 种顶点：物理组件（方形）和 VNF（圆形），还有一种跨域超边：业务超边（不同阴影深度）。另外，VNF 间的虚线箭头表示预定义的排列顺序，VNF 与网络切片间的实线箭头表示 VNF 部署位置。示例网络包含 3 种业务请求构成的 SFC、7 种不同类型的 VNF 和多个物理实体。在本文方案中，用逻辑域中所有类型的 VNF 和物理域中所有类型的网络切片建立跨域超图顶点集  $V$ ，即  $V = \mathcal{E}_{intra}^2 \cup \mathcal{E}_{intra}^3$ 。跨域超边集  $E$  由业务集合组成，定义为

$$E = \{ s_k | s_k \in S, k \in K \} \quad (33)$$

### 3.2 问题形成

用  $VNF_k = \{ vnf_{k_1}, vnf_{k_2}, \dots, vnf_{k_j} | vnf_{k_j} \in VNF \}$  表示业务  $s_k$  请求的服务功能链中的逻辑节点集合，包含一系列预定义顺序的 VNF。VNF 由具有一定资源的物理节点承载，假设  $vnf_g$  对应的计算、通信和存储资源需求为  $(\mathcal{R}_{vnf_g}^1, \mathcal{R}_{vnf_g}^2, \mathcal{R}_{vnf_g}^3)$ 。另外，为了将业务  $s_k$  服务功能链中的  $VNF_k$  序列下标与 VNF 集合中的类型一一对应，引入参数  $z_{f_g}^k \in \{0,1\}$ ，若  $z_{f_g}^k = 1$ ，则表示虚拟网络功能  $vnf_f$  类型为  $vnf_g$ ，其对应的计算、通信和存储资源需求

为  $\sum_{g \in G} z_{f_g}^k \mathcal{R}_{vnf_g}^n, n \in \{1,2,3\}$ 。本文考虑物理组件  $y$  对计算、通信和存储资源的需求为  $R$  个相应的物理实体资源的总和，即  $b_1^y = \sum_{r=1}^R b_{y,cot}^r$ 、 $b_2^y = \sum_{r=1}^R b_{y,coc}^r$  和  $b_3^y = \sum_{r=1}^R b_{y,sto}^r$ 。

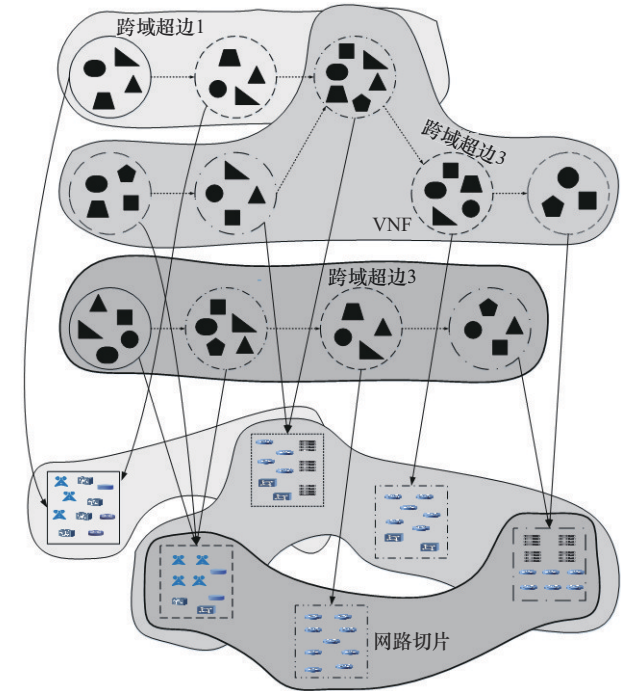


图 3 基于跨域超图的 VNF 部署框架

为了表示在服务功能链中 2 个相邻的 VNF 实例之间的路由路径 Route，首先在物理域中计算任意 2 个物理节点间的最短路径，并将这些最短路径的集合表示为  $Path \subseteq Route$ 。本文假设相邻的 2 个 VNF 在进行通信时均通过最短路径进行路由，避免虚拟链路直接映射到实际物理域链路带来的复杂化。为表示 VNF 与物理节点间的放置关系，定义决策变量  $\alpha_{k_f}(y) \in \{0,1\}$ ，若  $\alpha_{k_f}(y) = 1$ ，则表示服务功能链  $s_k$  的  $vnf_{k_f}$  放置在节点  $y$  处， $y \in Route$ 。引入变量  $\mu_{\chi_1, \delta_1} = \{0,1\}$ ，其中  $\chi_1 \in \{1,2, \dots, |VNF_{k_1}|\}$ ， $\delta_1 \in \{1,2, \dots, |VNF_{k_2}|\}$ ，若  $\mu_{\chi_1, \delta_1} = 1$ ，则表示业务  $s_{k_1}$  的第  $\chi_1$  个  $vnf$  与业务  $s_{k_2}$  的第  $\delta_1$  个  $vnf$  类型相同。另外，定义决策变量  $\beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) \in \{0,1\}$ ， $\beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) = 1$  表示服务功能链中  $s_k$  相邻的  $vnf_{k_{f_1}}$  和  $vnf_{k_{f_2}}$  经由物理域路径

$w_k, w_k \in \text{Path}(y_1, y_2)$  从节点  $y_1$  到达节点  $y_2$ 。同时,  $\beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) = 1$  还表示相邻的  $\text{vnf}_{k, f_1}$  和  $\text{vnf}_{k, f_2}$  由物理组件  $y_1$  和  $y_2$  承载。令  $|\cdot|$  表示某条候选路径的跳数, 则  $|w_k|$  表示服务功能链中  $s_k$  的逻辑链路  $(\text{vnf}_{k, f_1}, \text{vnf}_{k, f_2})$  映射到底层网络节点  $y_1$  和  $y_2$  间的路径  $w_k$  的跳数。引入变量  $\mu_{\chi_2, \delta_2} = \{0, 1\}$ , 其中  $\chi_2 \in \{1, 2, \dots, |\text{ns}_{k_1}|\}$ ,  $\delta_2 \in \{1, 2, \dots, |\text{ns}_{k_2}|\}$ , 若  $\mu_{\chi_2, \delta_2} = 1$ , 则表示业务  $s_{k_1}$  映射到网络切片  $\text{ns}_{k_1}$  的第  $\chi_2$  个物理组件与业务  $s_{k_2}$  映射到网络切片  $\text{ns}_{k_2}$  的第  $\delta_2$  个物理组件类型相同。业务  $s_{k_1}$  与业务  $s_{k_2}$  中所有虚拟网络功能对各种资源的需求为

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{1, n} &= \sum_{f_1 \in \text{VNF}_{k_1}} \sum_{n=1}^3 z_{f_1, g}^{k_1} \mathcal{R}_{\text{vnf}_{f_1}}^n + \\ &\sum_{f_2 \in \text{VNF}_{k_2}} \sum_{n=1}^3 z_{f_2, g}^{k_2} \mathcal{R}_{\text{vnf}_{f_2}}^n \end{aligned} \quad (34)$$

业务  $s_{k_1}$  和业务  $s_{k_2}$  中虚拟网络功能需映射到物理域的各物理组件上, 这些物理组件能提供各种资源的能力为

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{2, n} &= \\ &\sum_{y_{k_1} \in \text{ns}_{k_1}} \sum_{f_1 \in \text{VNF}_{k_1}} \sum_{n=1}^3 a_{k_1, f_1} b_n^{y_{k_1}} + \\ &\sum_{y_{k_2} \in \text{ns}_{k_2}} \sum_{f_2 \in \text{VNF}_{k_2}} \sum_{n=1}^3 a_{k_2, f_2} b_n^{y_{k_2}} \end{aligned} \quad (35)$$

业务  $s_{k_1}$  与业务  $s_{k_2}$  中类型相同的虚拟网络功能对各种资源的需求为

$$\mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{1, n} = \sum_{\chi_1 \in |\text{VNF}_{k_1}|} \sum_{\delta_1 \in |\text{VNF}_{k_2}|} \sum_{n=1}^3 \mu_{\chi_1, \delta_1} \mathcal{R}_{\text{vnf}_{\chi_1}}^n \quad (36)$$

业务  $s_{k_1}$  与业务  $s_{k_2}$  中类型相同的物理组件可提供各种资源的能力为

$$\mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{2, n} = \sum_{\chi_2 \in |\text{ns}_{k_1}|} \sum_{\delta_2 \in |\text{ns}_{k_2}|} \sum_{n=1}^3 \mu_{\chi_2, \delta_2} b_n \quad (37)$$

由式(35)~式(37)可得, 业务  $s_{k_1}$  与业务  $s_{k_2}$  所形成的跨物理域和跨逻辑域超边集间的耦合程度为

$$U_{s_{k_1}, s_{k_2}} = \frac{\langle \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2} \rangle}{\langle \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2} \rangle} = \frac{\mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{1, n} + \mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cap \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{2, n}}{\mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{1, n} + \mathcal{R}_{\mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_1} \cup \mathcal{E}_{\text{inter}}^{k_2}}^{2, n}} \quad (38)$$

由式(28)、式(29)和式(38)可得跨域熵为

$$H_{U_{s_{k_1}, s_{k_2}}} = - \sum_{x_i \in \phi(U_{s_{k_1}, s_{k_2}})} p_{U_{s_{k_1}, s_{k_2}}}(x_i) \log(p_{U_{s_{k_1}, s_{k_2}}}(x_i)) \quad (39)$$

$$\hat{H}_{\text{inter}} = \frac{\sum_{s_{k_1}, s_{k_2} \in S} H_{U_{s_{k_1}, s_{k_2}}}}{|S| \frac{(|S| - 1)}{2}} \quad (40)$$

本文提出的NFV部署模型如  $\mathbb{P}_1$  所示。

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_1: \min_{\alpha, \beta, \mu, z} & \hat{H}_{\text{inter}} \\ \text{s.t. } & C_1: \sum_{y \in \text{ns}_{k_f}} \sum_{f \in \text{VNF}_k} \alpha_{k, f}(y) \leq 1, \forall s_k \in S, \forall f \in \text{VNF}_k \\ & C_2: \sum_{y \in \text{ns}_k} \alpha_{k, f}(y) = |\text{VNF}_k|, \forall f \in \text{VNF}_k \\ & C_3: \sum_{f \in \text{VNF}_{k, g}} \sum_{n \in G} [\alpha_{k, f}(y) z_{f, g}^k \mathcal{R}_{\text{vnf}_f}^n] \leq b_n^y, \\ & \quad \forall s_k \in S, n \in \{1, 2, 3\} \\ & C_4: \sum_{y_1, y_2 \in w_k} \sum_{w_k \in P_k} \beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) = \alpha_{k, f_1}(y_1) \alpha_{k, f_2}(y_2), \\ & \quad \forall s_k \in S, \forall f_1, f_2 \in \text{VNF}_k \\ & C_5: \beta_{f_1, f_2}^{k, w_1}(y_1, y_2) + \beta_{f_1, f_2}^{k, w_2}(y_2, y_1) \leq 1, \\ & \quad \forall s_k \in S, w_1, w_2 \in P, \forall y_1, y_2 \in w_1, w_2 \\ & C_6: \sum_{y_1, y_2 \in w_k} \sum_{w_k \in P_k} [\beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) b_{\text{del}}^{w_k}] \leq \text{td}_k, \\ & \quad \forall f_1, f_2 \in \text{VNF}_k, \forall s_k \in S \\ & C_7: \prod_{y_1, y_2 \in w_k} \prod_{w_k \in P_k} [\beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) b_{\text{plr}}^{w_k}] \geq \text{rp}_k, \\ & \quad \forall f_1, f_2 \in \text{VNF}_k, \forall s_k \in S \\ & C_8: \min_{w_k \in P_k} b_{\text{tra}}^j \geq \text{tr}_k, \beta_{f_1, f_2}^{k, w_k}(y_1, y_2) = 1, \\ & \quad \forall s_k \in S, \forall y_1, y_2 \in w_k, \forall f_1, f_2 \in \text{VNF}_k \end{aligned} \quad (41)$$

其中, 约束  $C_1$  表示服务功能链  $s_k$  中任一  $\text{vnf}_{k, f}$  至多选择一个物理节点承载; 约束  $C_2$  表示服务功能链  $s_k$  的每个  $\text{vnf}_{k, f}$  都放置在物理组件上; 约束  $C_3$  表示  $\text{vnf}_f$  所需计算、存储和通信资源不能超过物理组件资源; 约束  $C_4$  表示需要依据当前链路信息从候选路径集合中选择一条从物理组件  $y_1$  指向  $y_2$  的路径; 约束  $C_5$  表示 SFC 中每一个逻辑链路不能映射到双向物理链路; 约束  $C_6 \sim C_8$  分别表示对服务功能链  $s_k$  进行部署和规划路径时需保证其时延、可靠性和最低传输速率需求。

本文形成的 VNF 部署问题属于非确定性多项式困难 (NP-Hard, non-deterministic polynomial hard) 问题<sup>[24]</sup>。如果保证所有节点的可用资源均相等, 可以把节点当成固定容量的包, 组成 SFC 的 VNF 可看作大小不同的物品, 那么 VNF 部署问题

可转化为一般情况下的二值背包问题,该问题是已经被证明的NP-Hard问题<sup>[25]</sup>。

### 3.3 算法描述

本文根据VNF的放置与业务流选路的顺序提出了一种启发式算法求解6G虚拟网络功能部署和优化模型。首先对SFC进行灵活的路由决策,然后在该路径上顺序地放置所需的VNF,这一过程称为基于超图与跨域熵的6G启发式部署算法(HEHDA, hypergraph-and-entropy-based 6G heuristic deployment algorithm)。算法具体步骤如下。

**步骤1** 根据该阶段所有服务功能链的速率需求降序排序,标注优先级,更新所有节点的可用资源和网络链路的剩余带宽。

**步骤2** 判断速率需求是否超出阈值 $\lambda$ ,如果超出阈值,则将请求视为高带宽服务请求,然后执行步骤3;否则,转向步骤4。

**步骤3** 为该条服务功能链选择从源节点至目的节点的最短路径,并将其作为最佳路径。

**步骤4** 为该条服务功能链选择从源节点至目的节点的前 $K$ 条最短路径中剩余带宽最大的一条,并将其作为最佳路径。

**步骤5** 判断该最佳路径的最小链路剩余带宽是否大于速率需求,若是,转向步骤6;否则,转向步骤8。

**步骤6** 判断该最佳路径经过的节点可用资源总量是否超出该条服务功能链的需求量,若是,转向步骤7;否则,转向步骤8。业务 $s_{k_2}$ 对资源类型 $n$ 的总需求量为

$$\mathcal{R}_{s_k}^n = \sum_{f \in \text{VNF}_k} z_{f_g}^k \mathcal{R}_{\text{vnf}_f}^n \quad (42)$$

**步骤7** 对选择的路径依次经过的节点顺序放置VNF,直至放置完成,结束。

**步骤8** 继续搜索从源节点到目的节点的次优路径,重复步骤5~步骤7,若均不满足,则结束,即拒绝该条服务功能链。

**步骤9** 重复步骤2~步骤8,直至所有的服务功能链均被部署或拒绝。

## 4 仿真分析

本节对所提6G网业协同三域模型进行仿真分析,从资源部署熵与超边长度熵2个角度对各域内部熵进行仿真分析,对随机的网络服务部署与基于

HEHDA的网络服务部署下的网络服务耦合熵进行仿真分析。

### 4.1 各域内部熵

在业务域中,本文在某种确知的业务需求概率分布函数下评估了不同分布的业务数据预部署对6G网络域内静态熵的影响。在实际的网络部署中,业务部署模型的状态空间是有限的,难以将业务部署的概率分布无限地接近需求的概率分布。因此,本文选取不同均值与方差下的正态分布与对数正态分布作为业务部署的概率分布,计算在业务需求的概率分布参数为 $(\mu_1, \sigma_1^2) = (8, 0.2)$ 时的网络架构熵,仿真结果如图4所示。服从正态分布的业务预部署存在最优的均值与方差的概率分布,业务预部署均值与需求均值差距越小熵值越低,方差越大熵值越低,部署的概率分布与需求的概率分布越相似。服从对数正态分布的业务预部署,域内静态熵随着业务预部署分布与实际需求分布之间的差异增大而增大,随着方差增大而减小。这是因为随着业务预部署的方差增大,用户需求分布与服务部署分布之间的交集也会增大,这就意味着业务预部署可以满足更多的用户需求,从而使网络架构熵值降低。服从正态分布和对数正态分布的业务预部署在相同方差条件下,对数正态分布下的熵值整体小于正态分布。这是因为相比于正态分布,对数正态分布的概率有更大向上波动的可能,因此用户需求分布与服务部署分布之间的交集就会更大,业务预部署可以满足更多的用户需求,从而使网络架构熵值降低。由于域内静态熵衡量了域内需求与预部署之间概率分布的差异,因此在最优情况下的业务预部署分布与所仿真业务需求的概率分布最吻合。在实际网络中,业务的需求通常会在小时空尺度上发生随机波动,而在大时空尺度上产生规律性的起伏。

因此,将本文所提6G网业协同三域模型与网络服务需求的预测相结合,能够预先决策出最低网络架构熵的网络部署方案,以便网络中业务需求发生变化时能够及时部署使网络架构熵最低的部署方案。同样地,逻辑域与物理域中可以分别对不同的网络功能和微服务的需求与部署概率分布的交叉熵进行仿真分析,研究在不同的部署概率分布下域内资源部署熵的变化。

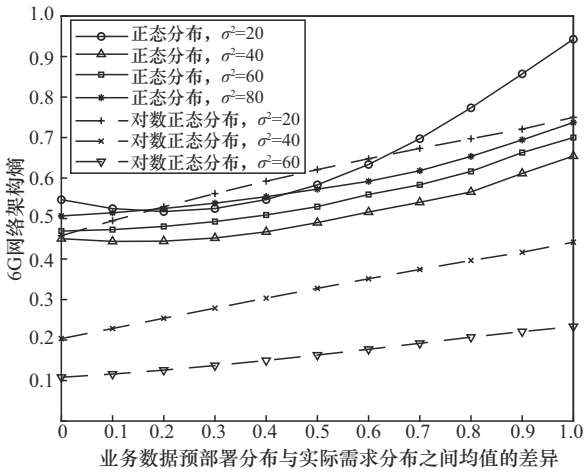


图 4 6G 网络架构熵与业务预部署分布和实际需求分布均值差异的关系

从业务域的域内超边长度熵的角度进行仿真分析, 研究超边长度服从正态分布、对数正态分布以及泊松分布的不同均值、方差下的超边长度熵, 仿真结果如图 5 所示。仿真结果显示, 当超边长度服从正态分布时, 存在最优的超边长度使熵值最小, 熵值随方差的增大而增大。对数正态分布下的超边长度熵随超边长度的增加不断减小, 熵值随方差的增大而增大。这是由于随着方差增大, 超边长度的分布更加发散, 网络的不确定性更大, 熵值则越高。泊松分布下超边长度的均值与熵值呈现正相关的变化关系。由于泊松分布的均值与方差是相等的, 均值增大方差也随之增大, 网络的不确定性更大, 熵值则越高。这就给网络设计带来启发, 当某种业务分类中业务的数量呈现泊松分布时, 为了降低业务域复杂度, 应适当减少该业务分类中业务的数量。当某种业务分类中业务的数量呈现对数正态分布时, 应适当增加该业务分类中业务的数量来降低业务域复杂度。当某种业务分类中业务的数量呈现正态分布时, 则需要找到最优的业务数量使网络复杂度降低。逻辑域与物理域仿真结果相同。

### 4.2 跨域熵

本节从随机的网络服务耦合关系与本文所提基于超图与耦合熵的部署算法形成的耦合熵 2 个角度出发, 仿真跨域熵对整体 6G 网络架构熵的影响。

首先对随机网络服务中跨域耦合熵进行仿真。网络服务的数量、三域中总的节点数目以及单个网络服务内节点数目均会影响跨域耦合熵。如图 6 所示, 随着单个网络服务内节点数目的增加, 跨域耦

合熵值也随之增大。这是因为当网络服务使用的节点数目越多时, 节点耦合的概率越高, 且节点之间耦合的概率值越分散, 增加了节点之间耦合的不确定性。当其他数值不变时, 节点总数的增加可以降低跨域的耦合熵。而节点总数的增加意味着网络资源的增加, 因此在较高网络资源量下网络服务之间耦合性会变低, 同时也消减了网络服务间耦合性的不确定性, 降低了跨域耦合熵。

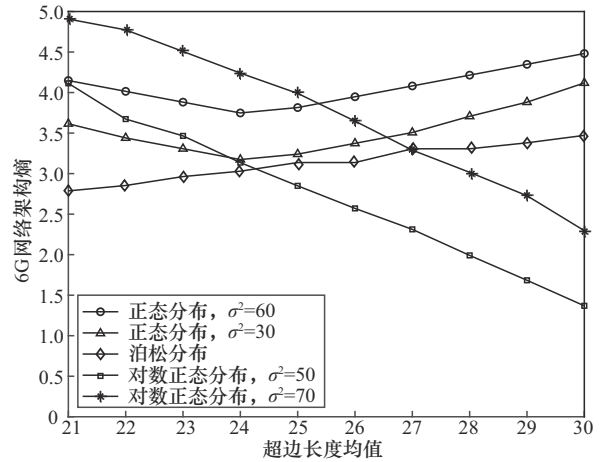


图 5 6G 网络架构熵与业务域超边长度均值的关系

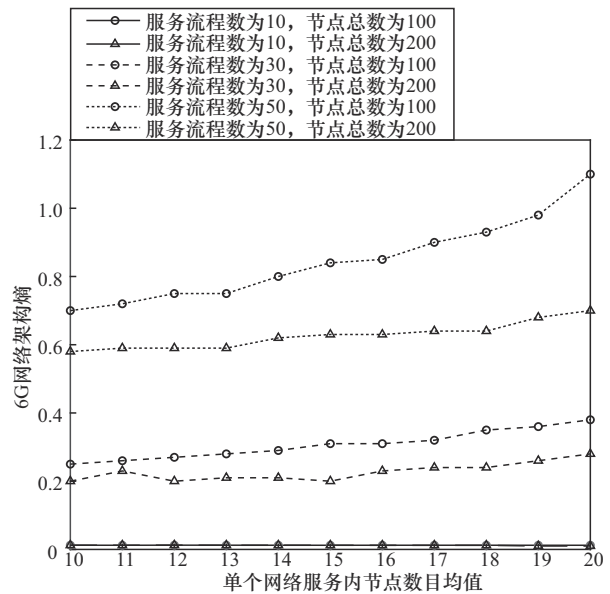


图 6 6G 网络架构熵与单个网络服务内节点数目均值的关系

此外, 本文还仿真评估了逻辑域中不同原子服务划分数目对 6G 网络架构熵的影响, 并与随机网络服务下的架构熵进行对比。如图 7 所示, 随着原子服务划分数目增加, 6G 网络架构熵随之减少, 这是因为原子服务划分数目越多, 对资源的划分就

越精细,相应资源的匹配则越准确。但随着原子服务划分数目继续增加,网络整体的复杂度也在上升,导致网络的负担和混乱程度也在增加,因此6G网络架构熵增大。本文所提算法因引入超图对网络服务各元素之间的关系进行描述与建模,因此表现出了更低的网络复杂度。

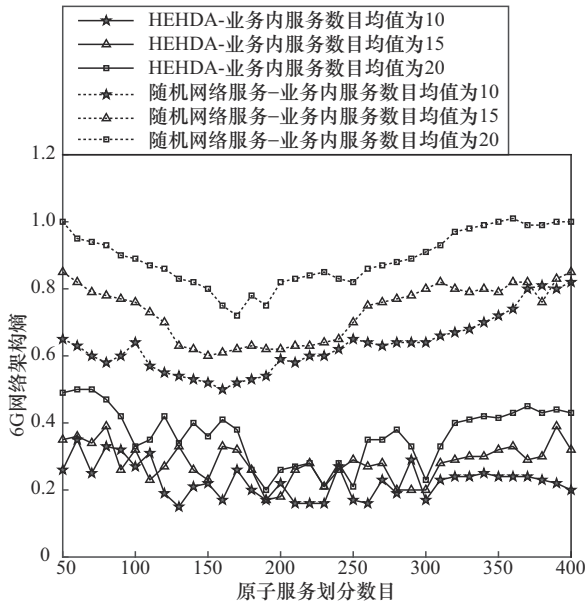


图7 6G网络架构熵与原子服务划分数目的关系

### 5 结束语

本文研究了基于数字孪生的6G网络架构建模、评估及优化方法。在提出将6G复杂异构网络架构分为业务域、逻辑域和物理域三域的基础上,利用超图理论构建了三域域内超图和跨域超图。进一步地,为了全面评估6G网络架构整体的优劣,定义了6G网络架构熵。最后,提出了基于超图和跨域熵的6G网络架构优化设计方法。以速率要求为优先考虑的增强移动宽带场景的仿真结果表明,业务域业务分布越贴近实际需求,逻辑域不同粒度的原子划分越精细,网络架构内部的混乱程度就越低,网络架构熵越小,网络性能越优。在未来,随着6G网络的应用场景和需求的不断演进,可以进行更加具有针对性的超图建模,并设计相应的熵指标,以评估和引导网络优化与资源调度。

### 参考文献:

[1] ZHANG P, SHEN X M, ZHANG J H. Editorial for the special issue on 6G requirements, vision, and enabling technologies[J]. Engineering,

2022, 8: 1-2.  
 [2] GEHRMANN C, GUNNARSSON M. A digital twin based industrial automation and control system security architecture[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(1): 669-680.  
 [3] LU Y L, HUANG X H, ZHANG K, et al. Communication-efficient federated learning for digital twin edge networks in industrial IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(8): 5709-5718.  
 [4] SERGIU C, LESTAS M, ANTONIOU P, et al. Complex systems: a communication networks perspective towards 6G[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89007-89030.  
 [5] DUAN X D, WANG X Y, LU L, et al. 6G architecture design: from overall, logical and networking perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(7): 158-164.  
 [6] LATVA-AHO M, LEPPÄNEN K. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[R]. 2019.  
 [7] 中国移动. 6G网络架构技术白皮书[R]. 2022. CMCC. 6G network architecture technologies white paper[R]. 2022.  
 [8] 孙滔, 周铨, 段晓东, 等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术[J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 569-582. SUN T, ZHOU C, DUAN X D, et al. Digital twin network(DTN): concepts, architecture, and key technologies[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(3): 569-582.  
 [9] 王晓云, 段晓东, 孙滔. 平台化服务网络: 新型移动通信系统架构研究[J]. 电信科学, 2023, 39(1): 20-29. WANG X Y, DUAN X D, SUN T. Service-based network as a platform: research on a new information communication network architecture[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(1): 20-29.  
 [10] WANG S, SUN T, YANG H W, et al. 6G network: towards a distributed and autonomous system[C]//Proceedings of the 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.  
 [11] DUAN X D, SUN T, LIU C, et al. Cognitive intelligence based 6G distributed network architecture[J]. China Communications, 2022, 19(6): 137-153.  
 [12] LU L, LIU C, ZHANG C H, et al. Architecture for self-evolution of 6G core network based on intelligent decision making[J]. Electronics, 2023, 12(15): 3255.  
 [13] IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond: ITU-R M.2083[S]. ITU-R, 2015.  
 [14] WANG X Y, SUN T, DUAN X D, et al. Holistic service-based architecture for space-air-ground integrated network for 5G-advanced and beyond[J]. China Communications, 2022, 19(1): 14-28.  
 [15] BERGE C. Graphs and hypergraphs[M]. Amsterdam: Elsevier, 1973.  
 [16] HAO Q, SHENG M, ZHOU D, et al. A multi-aspect expanded hypergraph enabled cross-domain resource management in satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(7): 4687-4701.  
 [17] FANG T, WU D, CHEN J X, et al. Content delivery in edge caching networks: a hypergraph game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(11): 12248-12252.  
 [18] TAKASAKI C, KORIKAWA T, HATTORI K, et al. Traffic behavior-based device type classification[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 353-357.  
 [19] 林德平, 彭涛, 刘春平. 6G愿景需求、网络架构和关键技术展望[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(1): 82-89. LIN D P, PENG T, LIU C P. Prospect of 6G vision requirements, network architecture and key technology[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47(1): 82-89.

- [20] CHUA F C, WARD J, ZHANG Y, et al. Stringer: balancing latency and resource usage in service function chain provisioning[J]. IEEE Internet Computing, 2016, 20(6): 22-31.
- [21] CLAUSIUS R. The mechanical theory of heat[M]. London: Macmillan, 1879.
- [22] MINELLO G, ROSSI L, TORSELLO A. On the von Neumann entropy of graphs[J]. Journal of Complex Networks, 2019, 7(4): 491-514.
- [23] LI A S, PAN Y C. Structural information and dynamical complexity of networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(6): 3290-3339.
- [24] RIGGIO R, BRADAI A, HARUTYUNYAN D, et al. Scheduling wireless virtual networks functions[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(2): 240-252.
- [25] GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1979.

## [作者简介]



王晓云(1968-),女,北京人,博士,中国移动通信集团有限公司教授级高级工程师,主要研究方向为超大规模移动通信系统架构与组网等。



陆璐(1979-),女,重庆人,中国移动通信集团有限公司研究院高级工程师,主要研究方向为5G/6G网络架构及关键技术等。



刘超(1982-),男,湖北恩施人,中国移动通信集团有限公司研究院主任研究员,主要研究方向为5G/6G网络架构及关键技术等。



施南翔(1987-),男,北京人,中国移动通信集团有限公司研究院主任研究员,主要研究方向为5G/6G网络架构、空天地一体化网络等。



张童(1992-),男,天津人,博士,中国移动通信集团有限公司研究院中级研究员,主要研究方向为5G/6G网络架构及关键技术等。



潘筱涵(1993-),女,辽宁沈阳人,博士,中国移动通信集团有限公司研究院中级研究员,主要研究方向为5G/6G网络架构、空天地一体化网络等。