

广义确定性标识网络

杨冬¹, 程宗荣^{1*}, 田伟康¹, 王洪超¹, 张宏科¹, 谭斌², 赵志勇³

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 中兴通讯股份有限公司, 上海 201203;
3. 中兴通讯股份有限公司, 北京 100020)

摘要: 随着智能制造、智能交通等重大国家战略实施, 确定性成为信息网络尤其是行业专网的新焦点。现有确定性网络技术始终关注网络传输要素(带宽、时隙等)来保障数据流的确定性传输。然而, 仅靠保障传输要素无法支撑新兴行业应用的多样化需求。例如, 在算网融合场景, 智算任务要求同时保障传输与计算要素的确定性来实现高性能通信; 在绿色通信场景, 需要考虑节点能量要素的确定性以维持网络稳定运行。针对上述需求, 本文基于前期提出的标识网络技术, 研究面向传输、计算、存储、能量等多要素的广义确定性网络。首先提出广义确定性标识网络架构, 包括差异化服务层、异构融合网络层和智慧化适配层。差异化服务层和异构融合网络层, 分别实现差异化确定性应用需求和异构化确定性网络要素的统一标识和描述, 并通过标识解析映射实现确定性信息向智慧化适配层的统一封装和传递; 智慧化适配层完成差异化确定性应用需求和异构化确定性网络要素的适配。现有确定性资源适配方法, 即使仅考虑单一网络内的基本确定性要素, 仍面临计算时间长、求解复杂性高、灵活度低等问题, 为了支持更加复杂的多确定性要素、多种异构网络的协同适配, 设计了基于深度强化学习的端到端的确定性调度(End-to-end Deterministic resource scheduling, E2eDet)算法, 该算法可统一化、端到端地为混合数据流协同分配多种确定性网络资源, 满足不同应用的差异化确定性需求。实验表明, E2eDet比DeepCQF和Random算法分别提升了28.4%和6.38倍数据流调度数量, 同时E2eDet可以较好地权衡计算时间和调度能力。

关键词: 广义确定性网络; 完备标识空间; 网络体系架构; 深度强化学习; 网络资源调度

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFB2901302)

中图分类号: TN913.21

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)01-0001-18

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230603

Generalized Deterministic Identification Networks

YANG Dong¹, CHENG Zong-rong^{1*}, TIAN Wei-kang¹, WANG Hong-chao¹,
ZHANG Hong-ke¹, TAN Bin², ZHAO Zhi-yong³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. ZTE Corporation, Shanghai 201203, China;

3. ZTE Corporation, Beijing 100020, China)

Abstract: With the implementation of major national strategies in industries such as intelligent manufacturing and transportation, determinism has become a new focus of information networks, especially industry-specific networks. Existing deterministic network technologies provide deterministic guarantees based on network transmission elements (e.g., bandwidth or time slots). However, relying solely on network transmission elements does not support the diverse needs of emerging industry applications. For example, in computing network integration scenarios, intelligent computing tasks require the determinism of transmission and computing elements to achieve high-performance communication. In green communication scenarios, the determinism of node energy elements needs to be considered to maintain network operation stability. In response to the above requirements, this paper studies generalized deterministic identification networks with respect to multiple elements such as transmission, computing, storage, and energy based on a previously proposed network identification technology. First, a generalized deterministic identification network architecture is proposed that includes a differentiated service layer, a heterogeneous network layer, and an intelligent adaptation layer. The differentiated service and heteroge-

neous network layers uniformly identify the deterministic applications and networks. The intelligent adaptation layer schedules the network resources in units of flow. Existing deterministic resource scheduling methods, even if they only consider the basic deterministic elements in a single network, still face problems such as long computational time, high complexity, and low flexibility. To support a more complex collaborative adaptation of multiple deterministic elements, the end-to-end deterministic resource scheduling (E2eDet) algorithm, which is based on deep reinforcement learning, is designed. To meet the various deterministic requirements of different applications, E2eDet uniformly and collaboratively allocates multiple deterministic network resources for mixed data streams from end to end. Experimental results show that E2eDet increases the amount of data flow scheduling by 28.4% and 6.38 \times when compared with the DeepCQF and Random algorithms, respectively. Moreover, E2eDet can better balance the computational time and scheduling ability.

Key words: generalized deterministic networks; complete identification space; network architecture; deep reinforcement learning; network resource scheduling

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2901302)

1 引言

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出打造数字经济新优势的总体目标“促进数字技术与实体经济深度融合,赋能传统产业转型升级”,强调重点发展智能制造、智能交通等十个行业数字化融合应用场景。不同于传统网络技术创新所关注的更高传输速率和更广泛互联能力,赋能智能制造和智能交通所需的远程控制、自动驾驶等新型行业应用对网络技术提出了更多新需求,其中最为关键的是网络能否提供确定性保障^[1-3]。现有的确定性技术仅专注于时隙、带宽等网络传输相关要素^[4],然而,随着行业应用多样化发展的需要,网络需要协同考虑更多要素来满足新兴业务的确定性保障要求。例如,对于算网融合、在网计算等场景,还需要考虑计算、存储等影响应用完成时间的要素^[5];对于绿色通信、能量受限的场景,还需要考虑节点能量分配等影响网络确定可靠运行的要素^[6]。针对上述发展需要,本文提出广义确定性网络的概念及架构。“广义确定性”的内涵和研究范畴为:第一,不是面向传统确定性网络关注的传输要素,而是面向传输、计算、存储、能量等多种确定性要素,全面优化复杂场景中的多种不确定因素;第二,不是面向时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)、确定性网络(Deterministic Networking, DetNet)等单一网络视角的确定性,而是面向网络之上的应用视角,全局协同应用数据流跨越多个异构网络的广域端到端确定性;第三,不是面向单一特定应用数据流的确定性,而是面向多种类型或有语义逻辑关联的数据流融合共网传输时确定性联合保障。

标识是网络运行的基本要素,现有网络的标识空间及解析不完备,导致应用与网络适配松散,使底层网络只能为上层应用提供“尽力而为”的服务^[7]。然而,实现广义确定性保障的关键是多样化应用与网络资源的

协同适配,需要能够对上层应用和底层网络资源等不同维度进行统一的标识和描述。本文从系统性完善网络标识空间出发,针对行业应用多确定性要素需求,提出完备标识空间的三层广义确定性网络体系架构,包括差异化服务层、异构融合网络层、智慧化适配层。差异化服务层通过服务标识、服务描述及其解析映射统一标识和描述不同应用差异化的确定性需求,包括端到端时延、抖动、丢包率、带宽利用率、流量负载均衡、吞吐量等;异构融合网络层通过网络组件标识、组件描述及其解析映射统一抽象和描述异构网络侧的多种确定性要素,包括路由、频率、时隙、能耗、计算、存储等;智慧化适配层通过连接标识、描述及映射适配,实现差异化的确定性应用需求到网络资源的协同适配。

智慧化适配层保障多确定性要素与应用的协同适配,本质上是以数据流为单位的多种网络资源的调度^[8]。在数据流方面,现有IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)和IETF(Internet Engineering Task Force)确定性技术主要针对周期性数据流进行资源分配,这类数据流的流量特征明确,可以通过预留资源保障确定性^[9]。然而在实际系统中,通常需要支持多样化数据流的融合共网传输,例如周期流、实时流、控制流、音视频流等^[10],导致不同数据流的差异化确定性需求难以保障。在资源调度方面,现有的确定性资源调度局限于特定网络架构以及单一确定性相关资源的分配,例如,Yuan等人^[11]基于对TSN响应时间的分析提出优先级自适应调整方法,有效优化了业务流调度成功率及端到端传输时延。Jiang等人^[12]研究了确定性卫星网络传输方法,用来预测通信几率并指导确定性路由。然而,实际网络构成复杂,通常需要跨越多种异构网络联合调度各类确定性相关资源来满足应用需求,在特定的网络架构下难以支持灵活动态地跨多种网络保障多要素的确定性^[13]。因此,需要在智慧化适配层设计多

确定性相关资源联合调度算法来保障网络端到端的确定性。

然而,现有确定性资源调度算法(如可满足性模理论、线性规划、启发式算法等),即使仅考虑单一网络内的基本确定性要素,仍面临计算时间长、求解复杂性高、灵活度低等问题,成为网络规模化部署的主要瓶颈。针对这一难题,我们在智慧化适配层设计了基于深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)的端到端的确定性相关资源调度(End-to-end Deterministic resource scheduling, E2eDet)算法,该算法旨在统一协同保障多种确定性要素(包括流量、时隙、频率、功率、能耗、计算、存储资源等)的同时,优化全网可调度的数据流数量和算力负载均衡。不同于传统的DRL确定性资源调度算法仅关注在特定网络架构中分配单一确定性相关资源^[14,15],E2eDet算法可以统一地从端到端为跨异构网络传输的混合数据流协同分配多种确定性网络资源,满足不同应用的差异化确定性需求。通过与主流的不确定性网络调度算法DeepCQF^[15]和Random^[16]对比,我们提出的E2eDet算法在广义确定性标识网络中比DeepCQF和Random分别提升了28.4%和6.38倍数据流调度数量能力,同时E2eDet得到的算力负载均衡值相较于DeepCQF和Random分别

提高了2.46倍和7.58倍。在计算时间方面,E2eDet可以很好地权衡算法运行时间和资源调度能力,最多比DeepCQF的推理时间减少了77.38%。本文的主要贡献如下。

(1)提出了广义确定性网络的概念,与现有确定性网络研究相比,所研究的确定性支持要素增加、确定性网络范围扩大、确定性应用构成复杂,为智能制造、智能交通等行业应用提供全要素全区域确定性通信保障。

(2)提出了完备标识空间广义确定性网络体系架构,实现差异化确定性应用需求和异构化确定性网络要素的统一标识、描述、封装和传递等,为实现行业应用差异化确定性需求与底层异构化网络资源之间协同适配提供架构支持。

(3)设计了面向复杂多确定性要素的端到端确定性智能资源调度算法E2eDet,它是广义确定性标识网络必要的组成成分,调度算法支持在线快速适配以及动态增量流的灵活调度,满足工业柔性生产等行业发展新需求。与主流的不确定性网络调度算法相比,E2eDet在同等条件下可显著提升数据流可调度数量,同时可较好地权衡计算时间和调度能力。

本文所有符号描述如表1所示。

表1 符号描述

符号	含义
SID	服务标识;一个应用下面的一个服务,例如一个自动驾驶应用下的刹车服务。 SID _k :第k个服务。
SBD	服务描述;一个服务的确定性资源需求的描述。 SBD _k :第k个服务的总的确定性资源需求。
DID	设备描述;一个网络设备。 DID _τ :第τ个网络设备。
NID	网络组件标识;物理网络接口,例如一个网卡。 NID _ρ :第ρ个网络接口。 NID _ρ ^(CID_n) :数据流CID _n 与网络接口NID _ρ 的匹配结果,即数据流CID _n 在传输过程中是否经过接口NID _ρ ,如果不经,则NID _ρ ^(CID_n) =0。 NID _j ^(DID_i) :第i个网络设备的第j个接口。
NBD	网络组件描述;网络接口上多种确定性相关资源所提供的传输能力。 NBD _x :接口的第x类确定性资源能力上限,例如[NBD ₁ ,NBD ₂ ,NBD ₃ ,...,NBD _x]表示网络流量、时隙、频率、功率、算力和存储。 NBD _x ^(NID_ρ) :第ρ个网络接口的第x类确定性资源能力。 NBD _x ^(CID_n) :服务的第n条数据流在网络接口上的第x类确定性资源约束。
CID	连接标识;服务的多条数据流中的一条数据流,例如一条视频流。 CID _n :服务的第n条数据流。 CID _n ^(SID_k) :第k个服务的第n条数据流。
CBD	连接描述;数据流的确定性资源需求描述。 CBD _m :第m类确定性资源需求,第1~6类:时延,抖动,可靠性,吞吐量,链路利用率,负载均衡度。 CBD _m ^(SBD_k) :第k个服务的第m类确定性资源需求(该服务下所有数据流的第m类资源需求之和)。 CBD _m ^(CID_n) :某服务下第n条数据流的第m类确定性资源需求。
M _{ID}	服务与数据流之间的映射矩阵,描述了运行的服务及其包含了哪些数据流。

续表

符号	含义
M_{BD}	服务需求与数据流需求之间的映射矩阵,描述各个服务的各类确定性资源需求.
M_w	服务标识解析映射矩阵,描述每个服务下所有数据流的确定性需求.
$\vartheta(\cdot)$	从服务到数据流需求的解析映射函数.
$\text{delay}^{(j)}$	为数据流 CID_j 实际传输的端到端时延.
$S_d^{(j)}$	端到端时延的确定性需求,即最大时延不能超过此值.
$\text{jitter}^{(j)}$	时延抖动,是指端到端时延的最大变化量.
$S_j^{(j)}$	抖动的期望上限值,即最大时延抖动不能超过此值.
$\text{floss}^{(j)}$	丢包率.
$f_{\text{attr}}^{(j)}$	数据流 CID_j 的基本属性 $f_{\text{attr}}^{(j)} = \{CID_j, \text{pkt}^{(j)}, \text{src}^{(j)}, \text{dst}^{(j)}, \text{pid}^{(j)}, \text{size}^{(j)}, \dots\}$, 包括流标识、数据包个数、源地址、目的地址、流周期和数据包大小.
T_p	用户 u 的吞吐量.
$T^{(u)}$	用户 u 发包的时长.
$S_u^{\text{low}}, S_u^{\text{up}}$	吞吐量下限,吞吐量上限.
$q_l^{(d)}$	第 l 条链路上,发送到目的节点 d 的数据率.
$S_{lq}^{\text{low}}, S_{lq}^{\text{up}}$	链路利用率下限,链路利用率上限.
S_r	在网元上数据流的负载均衡度确定性需求上限.
R_{ID}	设备与网络接口映射矩阵,表示各网络设备所拥有的网络接口.
R_w	网络标识解析映射矩阵,表示各网络设备下各网络接口能提供的各确定性资源能力上限的映射矩阵.
$\varphi(\cdot)$	所有数据流在每一个网络接口上对应各确定性要素描述的解析映射函数.
$\tilde{h}_n^{(d)}$	节点 n 注入到网络中的流量(以节点 d 为目的节点的流量).
I_{nl}	第 l 条链路与节点 n 的关系.如果该链路是节点 n 的输入链路,则 $I_{nl} = -1$,如果是输出链路,则 $I_{nl} = 1$,如果链路与节点无关,那么 $I_{nl} = 0$.
$q_l^{(d)}$	在链路 l 上发送到目的节点 d 的数据量. $q_{lk}^{(d)}$ 表示第 k 个子载波所承载的发送至目的节点 d 的流量.
$\tilde{h}_d^{(d)}$	所有输入到目的节点 d 的总数据量.
T_{le}	在第 l 条链路上第 e 个时隙的长度.
Q_{le}	在第 l 条链路上第 e 个时隙的容量. Q_{lke} 表示在链路 l 的第 k 个子载波上开辟的第 e 个时隙的最大容量.
f_j	增量式加入的数据流.
C_{lk}	链路 l 在第 k 个子载波上的最大数据率.
$\chi_{l'l}^{(k)}, \chi_l^{(k)}$	$\chi_{l'l}^{(k)}$: 链路 l 与 l' 的频分复用时长占比. $\chi_l^{(k)}$: 链路 l 传输数据的时长占比.
$g_l^{(k)}, g_{l'l}^{(k)}$	$g_l^{(k)}$: 链路 l 在第 k 个子载波上的信道增益. $g_{l'l}^{(k)}$: 链路 l' 对 l 的干扰增益.
C'_{lk}, C''_{lk}	使用链路 l 单独传输数据的最大数据率;表示链路 l 与 l' 的频分复用时的最大数据率.
$p_{lk}, p_{l'k}$	链路 l 在子载波 k 上所具有的功率;表示链路 l' 在子载波 k 上所具有的功率.
p_l^{max}	链路 l 的功率上限.
γ	信干噪比.
ε	传输数据流所需要消耗的能量.
c	处理 1 比特的数据所需要的 CPU 循环周期的次数.
Ξ	需要处理的 f_j 数据流的比特数.
η^c	效用系数.
Δ	服务器 CPU 运行频率.
T	CPU 计算时长.
v	数据流在服务器上所需要的数据存储空间.
η^v	服务器存储资源的效用系数.
V	服务器存储空间的总容量.
M_{port}	接口适配矩阵,描述各服务的各数据流经过的网络接口,指示路由信息.

续表

符号	含义
M_r	资源适配矩阵,描述确定性资源在每个接口与数据流的适配结果.
F_{BD}	配置反馈矩阵,描述服务层需求在适配层被满足的情况,用以反馈给服务层.
(\cdot)	多目标优化函数,函数的自变量是网络侧分配的多种确定性资源,优化目标包括最大化可调度的流数量、链路负载均衡等.
o_i	整体状态,表示各个变量状态的集合, $o_i, o_h, o_b, o_p, o_c, o_s, o_u$ 分别表示时隙要素、网络流量、频率、功率、计算、存储和其他用户自定义的要素描述状态,即已占用的各确定性要素变量所占其阈值上限的比例.
a_i	动作空间,包含资源调度模型的优化目标中待决策的各个变量,包括流量、时隙、频率、功率、算力和存储分配等.
r_{num}^{t+1}	调度业务流数量奖励,设计为前后连续两步调度业务流数量的差值,即 $r_{num}^{t+1} = F_{num}^{t+1} - F_{num}^t$.
r_{t+1}^{com}	负载均衡度奖励,设计为前后连续两步算力负载均衡度的差值,即 $r_{com}^{t+1} = A^{t+1} - A^t$.
r_{t+1}	总体奖励,设计为 $r_{t+1} = \alpha r_{num}^{t+1} + \beta r_{com}^{t+1}$.
$\zeta(o_i; \omega)$	调度算法中的计算函数,计算动作 a_i .
l_o	基于 Q 值的损失函数,被用于估计评判网络.

2 完备标识空间广义确定性网络体系架构

广义确定性网络需要全面协同多种要素,包括链路带宽、时隙等网络传输要素以及计算、能量、存储等非传输要素,来保障数据流的确定性传输.从工程实现的角度分析,广义确定性网络对多要素的协同,关键在于多样化应用与异构化网络资源的协同适配,需要能够对上层应用和底层网络资源进行统一的标识、描述、封装和

传递等.因此,我们提出了完备标识空间广义确定性网络体系架构,有效地统一了上层服务和底层网络资源的标识及描述,实现多样化应用的确定性传输保障且不局限于具体的底层网络架构和某种特定的网络资源.

2.1 网络体系架构

完备标识空间广义确定性网络体系架构包含三层,分别是差异化服务层、异构融合网络层、智慧化适配层.三层之间的关系如图 1 所示.

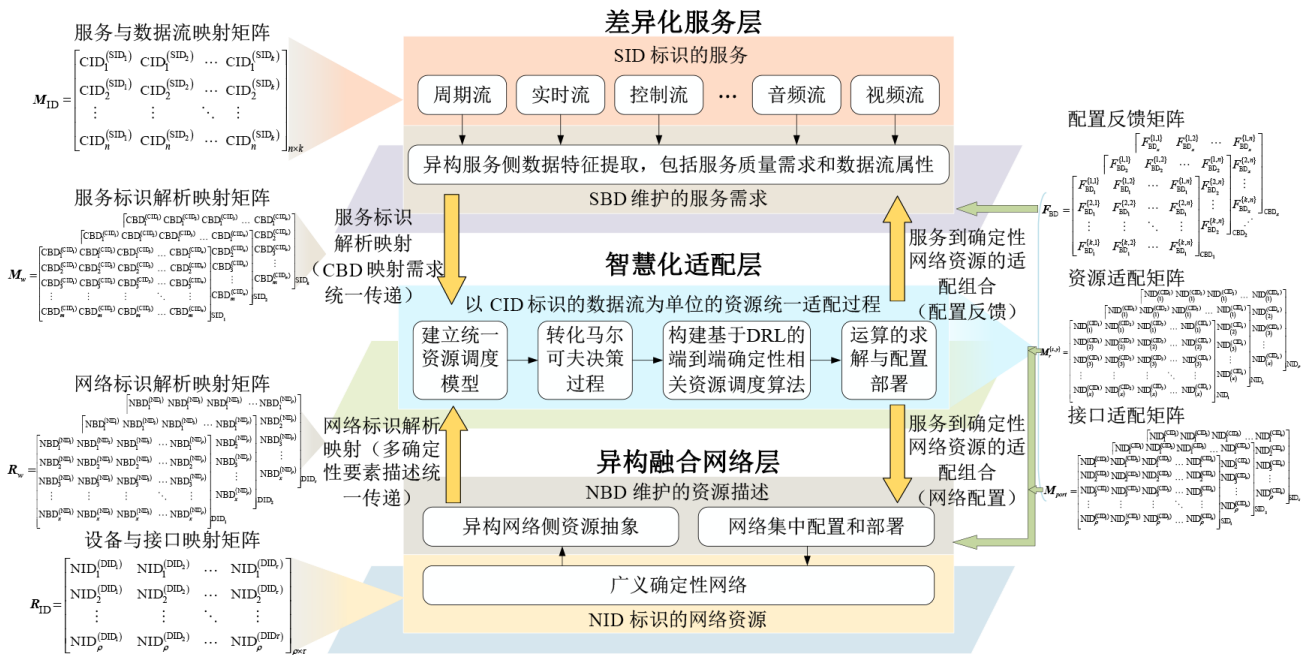


图1 完备标识空间广义确定性网络体系架构

差异化服务层负责与应用交互,收集应用的确定性需求信息,每个应用会被编排解析成多个服务,服务又由多个流组成.每个服务由服务标识(Service Identifier, SID)来描述,具体的确定性需求由服务描述(Service Behavior Description, SBD)来维护.差异化服务层

首先通过服务与数据流映射矩阵 M_{ID} 来表示服务与数据流的承载关系,然后为了满足周期流、实时流、控制流、音频流、视频流等数据流的差异化确定性需求,差异化服务层通过构建服务标识解析映射矩阵 M_W 实现服务到数据流确定性需求之间的映射,并将映射后的

标识信息统一传递到智慧化适配层.

异构融合网络层对异构物理网络进行确定性相关资源抽象,确定性相关资源包括流量、时隙、频率、功率、能耗、计算、存储资源等.设备标识(Device IDentifie, DID)用于描述每个实体网络设备,网络组件标识(Network IDentifier, NID)用于描述网络设备上的物理网络接口,接口上多种确定性相关资源所提供的传输能力由网络组件描述(Network Behavior Description, NBD)来维护.异构融合网络层首先通过设备与接口映射矩阵 \mathbf{R}_{ID} 来表示设备与接口的从属关系,然后通过建立网络标识解析映射矩阵 \mathbf{R}_w 实现网络设备到物理网络接口再到多确定性要素的逻辑描述,并将标识的多确定性要素描述统一传递到智慧化适配层.

智慧化适配层融合感知服务侧和网络侧的标识化确定性信息,构建服务到确定性资源的适配方法.为了承载基于标识的资源适配方法,我们提出了E2eDet智能算法以融合标识信息并计算网络资源的适配结果.具体地,E2eDet利用感知到的服务侧 \mathbf{M}_{ID} 和 \mathbf{M}_w 标识的确定性需求,以及网络侧 \mathbf{R}_{ID} 和 \mathbf{R}_w 标识的确定性要素,为连接标识(Connection IDentifier, CID)表示的数据流适配网络资源,满足连接描述(Connection Behavior Description, CBD)维护的数据流需求.最终通过E2eDet算法计算得到接口适配矩阵 \mathbf{M}_{port} 、资源适配矩阵 \mathbf{M}_r 和配置反馈矩阵 \mathbf{F}_{BD} ,将 \mathbf{M}_{port} 和 \mathbf{M}_r 通过相关协议下发部署到网络侧,同时向服务侧反馈 \mathbf{F}_{BD} 提供需求满足情况信息,方便上层决策优化.

2.2 差异化服务层

差异化服务层负责与应用交互信息,它通过应用程序编程接口收集用户创建的SID所标识的不同服务,而不同的服务则需要解析映射出差异化的确定性需求,包括有界端到端时延、抖动、可靠性、吞吐量、链路利用率、负载均衡等需求.这些服务的确定性需求则由SBD维护.在实际网络系统中,一个服务是在网传输的多条数据流的集合,每条数据流由CID标识,数据流的确定性需求由CBD维护,因此多个CID应能够映射到同一个SID,多个CBD也应能够映射到同一个SBD.基于服务和数据流的映射关系,保障服务确定性的本质是满足该服务下每条数据流的确定性需求,因此需要建立服务解析映射实现服务到其对应的数据流需求的映射.服务标识解析映射过程包含两个步骤.

第一步是解析SID标识的服务与CID标识的数据流之间的映射关系,以及SBD标识的服务需求和CBD标识的数据流需求之间的映射关系.令服务池 $[\text{SID}_1, \text{SID}_2, \text{SID}_3, \dots, \text{SID}_k]$ 表示所有服务的集合,数据流池 $[\text{CID}_1, \text{CID}_2, \text{CID}_3, \dots, \text{CID}_n]^T$ 表示所有数据流的集合,则服务与数据流之间的映射矩阵 \mathbf{M}_{ID} 可以通过数据流池与服务池相乘得到,即

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{ID} &= \begin{bmatrix} \text{CID}_1 \\ \text{CID}_2 \\ \text{CID}_3 \\ \vdots \\ \text{CID}_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \cdot [\text{SID}_1, \text{SID}_2, \text{SID}_3, \dots, \text{SID}_k]_{1 \times k} \\ &= \begin{bmatrix} \text{CID}_1^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_1^{(\text{SID}_2)} & \text{CID}_1^{(\text{SID}_3)} & \dots & \text{CID}_1^{(\text{SID}_k)} \\ \text{CID}_2^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_2^{(\text{SID}_2)} & \text{CID}_2^{(\text{SID}_3)} & \dots & \text{CID}_2^{(\text{SID}_k)} \\ \text{CID}_3^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_3^{(\text{SID}_2)} & \text{CID}_3^{(\text{SID}_3)} & \dots & \text{CID}_3^{(\text{SID}_k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CID}_n^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_n^{(\text{SID}_2)} & \text{CID}_n^{(\text{SID}_3)} & \dots & \text{CID}_n^{(\text{SID}_k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\text{CID}_i^{(\text{SID}_j)}$ 表示第 j 个服务的第 i 条数据流,如果 CID_i 标识的数据流不属于 SID_j 标识的服务,则 $\text{CID}_i^{(\text{SID}_j)}=0$.同理,服务需求与数据流需求之间的映射矩阵 \mathbf{M}_{BD} 是数据流需求池 $[\text{CBD}_1, \text{CBD}_2, \text{CBD}_3, \dots, \text{CBD}_m]^T$ 与服务需求池 $[\text{SBD}_1, \text{SBD}_2, \text{SBD}_3, \dots, \text{SBD}_k]$ 的乘积,即

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{BD} &= \begin{bmatrix} \text{CBD}_1 \\ \text{CBD}_2 \\ \text{CBD}_3 \\ \vdots \\ \text{CBD}_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \cdot [\text{SBD}_1, \text{SBD}_2, \text{SBD}_3, \dots, \text{SBD}_k]_{1 \times k} \\ &= \begin{bmatrix} \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_2)} & \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_3)} & \dots & \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_k)} \\ \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_2)} & \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_3)} & \dots & \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_k)} \\ \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_2)} & \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_3)} & \dots & \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_2)} & \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_3)} & \dots & \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\text{CBD}_i^{(\text{SBD}_j)}$ 表示第 j 个服务的第 i 个确定性需求,如果 SBD_j 服务需求中不包含 CBD_i 标识的数据流需求,那么 $\text{CBD}_i^{(\text{SBD}_j)}=0$.

第二步是根据映射矩阵 \mathbf{M}_{ID} 和 \mathbf{M}_{BD} 得到每条数据流的确定性需求描述.观察到矩阵 \mathbf{M}_{BD} 的每一列是每个服务所具有的确定性需求集合,矩阵 \mathbf{M}_{ID} 的每一列表示这个服务包含的数据流集合,可以分别取 \mathbf{M}_{BD} 和 \mathbf{M}_{ID} 的每一列计算每类服务下数据流各自的确定性需求.例如取 \mathbf{M}_{BD} 和 \mathbf{M}_{ID} 的第一列,分别记为 $\mathbf{M}_{BD}^{(1)}$ 和 $(\mathbf{M}_{ID}^{(1)})^T$,其中,

$$\mathbf{M}_{BD}^{(1)} = [\text{CBD}_1^{(\text{SBD}_1)}, \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_1)}, \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_1)}, \dots, \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_1)}]^T \quad (3)$$

$$(\mathbf{M}_{ID}^{(1)})^T = [\text{CID}_1^{(\text{SID}_1)}, \text{CID}_2^{(\text{SID}_1)}, \text{CID}_3^{(\text{SID}_1)}, \dots, \text{CID}_n^{(\text{SID}_1)}] \quad (4)$$

通过矩阵乘法运算 $\mathbf{M}_w^{(1)} = \mathbf{M}_{BD}^{(1)} \cdot (\mathbf{M}_{ID}^{(1)})^T$,有

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_w^{\{1\}} &= \begin{bmatrix} \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_1)} \\ \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_1)} \\ \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_1)} \\ \vdots \\ \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{CID}_1^{(\text{SID}_1)}, \text{CID}_2^{(\text{SID}_1)}, \dots, \text{CID}_n^{(\text{SID}_1)} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \text{CBD}_1^{\text{CID}_1} & \text{CBD}_1^{\text{CID}_2} & \text{CBD}_1^{\text{CID}_3} & \dots & \text{CBD}_1^{\text{CID}_n} \\ \text{CBD}_2^{\text{CID}_1} & \text{CBD}_2^{\text{CID}_2} & \text{CBD}_2^{\text{CID}_3} & \dots & \text{CBD}_2^{\text{CID}_n} \\ \text{CBD}_3^{\text{CID}_1} & \text{CBD}_3^{\text{CID}_2} & \text{CBD}_3^{\text{CID}_3} & \dots & \text{CBD}_3^{\text{CID}_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CBD}_m^{\text{CID}_1} & \text{CBD}_m^{\text{CID}_2} & \text{CBD}_m^{\text{CID}_3} & \dots & \text{CBD}_m^{\text{CID}_n} \end{bmatrix}_{\text{SID}_1}
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_w = \mathbf{M}_{\text{BD}} \odot \mathbf{M}_{\text{ID}} &= \begin{bmatrix} \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_2)} & \dots & \text{CBD}_1^{(\text{SBD}_k)} \\ \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_2)} & \dots & \text{CBD}_2^{(\text{SBD}_k)} \\ \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_2)} & \dots & \text{CBD}_3^{(\text{SBD}_k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_1)} & \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_2)} & \dots & \text{CBD}_m^{(\text{SBD}_k)} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} \text{CID}_1^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_1^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_1^{(\text{SID}_k)} \\ \text{CID}_2^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_2^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_2^{(\text{SID}_k)} \\ \text{CID}_3^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_3^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_3^{(\text{SID}_k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CID}_n^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_n^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_n^{(\text{SID}_k)} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \text{CBD}_1^{(\text{CID}_1)} & \text{CBD}_1^{(\text{CID}_2)} & \text{CBD}_1^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{CBD}_1^{(\text{CID}_n)} \\ \text{CBD}_2^{(\text{CID}_1)} & \text{CBD}_2^{(\text{CID}_2)} & \text{CBD}_2^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{CBD}_2^{(\text{CID}_n)} \\ \text{CBD}_3^{(\text{CID}_1)} & \text{CBD}_3^{(\text{CID}_2)} & \text{CBD}_3^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{CBD}_3^{(\text{CID}_n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CBD}_m^{(\text{CID}_1)} & \text{CBD}_m^{(\text{CID}_2)} & \text{CBD}_m^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{CBD}_m^{(\text{CID}_n)} \end{bmatrix}_{\text{SID}_1} \begin{bmatrix} \text{CBD}_2^{(\text{CID}_n)} \\ \text{CBD}_3^{(\text{CID}_n)} \\ \vdots \\ \text{CBD}_m^{(\text{CID}_n)} \end{bmatrix}_{\text{SID}_k}
\end{aligned} \quad (6)$$

\mathbf{M}_w 包含 k 维 SID 标识的服务矩阵, 服务矩阵中的每一列是该服务下每条数据流的多种确定性需求. 通过以上两个步骤, 实现了服务需求到数据流网络特征的解析映射, 为后续数据流需求与网络确定性要素之间的协同适配提供技术支撑.

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}(\text{SID}_k, \text{CID}_j, \text{CBD}_{1-m}) &= \mathbf{M}_{w, \text{CID}_j}^{\{k\}} \\
&= \left[\text{CBD}_1^{(\text{CID}_j)}, \text{CBD}_2^{(\text{CID}_j)}, \text{CBD}_3^{(\text{CID}_j)}, \text{CBD}_4^{(\text{CID}_j)}, \text{CBD}_5^{(\text{CID}_j)}, \text{CBD}_6^{(\text{CID}_j)}, \dots \right]^T \\
&= \left[\text{delay}, \text{jitter}, \text{reliability}, \text{throughput}, \text{link utilization}, \text{load balance}, \dots \right]^T
\end{aligned} \quad (7)$$

具体地, 令 $\text{delay}^{(j)}$ 为数据流实际传输的端到端时延, $\text{delay}_n^{(j)}$ 和 $\text{delay}_l^{(j)}$ 分别表示数据流在第 n 个节点和第 l 条链路上所经过的时延, δ 表示在数据流传播过程中产生的其他时延, 那么端到端时延等于沿着数据流传输的路径中各部分时延的总和, 即

$$\text{delay}^{(j)} = \sum_{n=1}^N \text{delay}_n^{(j)} + \sum_{l=1}^L \text{delay}_l^{(j)} + \delta \quad (8)$$

得到 SID_1 服务下每条数据流各自的确定性需求, 这些需求的集合记为 $\mathbf{M}_w^{\{1\}}$, $\mathbf{M}_w^{\{1\}}$ 中的每个元素记为 $\text{CBD}_i^{(\text{CID}_j)}$, 表示第 j 条数据流的第 i 个确定性要素需求. 以此类推, 可以得到每个服务下所有数据流的确定性需求, 公式描述为 $\mathbf{M}_w = \mathbf{M}_{\text{BD}} \odot \mathbf{M}_{\text{ID}}$, 其中 $\mathbf{M}_w = \left[\mathbf{M}_w^{\{1\}}, \mathbf{M}_w^{\{2\}}, \mathbf{M}_w^{\{3\}}, \dots, \mathbf{M}_w^{\{k\}} \right]_{k \times m \times n}$ 是不同服务下数据流确定性需求的三维矩阵, 其完整形式如式 (6) 所示. 符号 \odot 是定义新运算, 运算规则是 \mathbf{M}_w 中的每个元素需满足 $\mathbf{M}_w^{(r)} = \mathbf{M}_{\text{BD}}^{\{i\}} \cdot \left(\mathbf{M}_{\text{ID}}^{\{j\}} \right)^T$, 考虑到矩阵 \mathbf{M}_{BD} 与 \mathbf{M}_{ID} 每一列的对应关系, 此处需满足 $i=j=r$ 且 $i, j, r = 1, 2, 3, \dots, k$.

上述经过服务解析映射得到的矩阵 \mathbf{M}_w 中每个元素 $\text{CBD}_i^{(\text{CID}_j)}$ 标识的数据流的确定性需求描述包括有界端到端时延、抖动、可靠性、吞吐量、链路利用率、负载均衡度等多维需求. 以服务 SID_k 到数据流 CID_j 的需求的解析映射举例, 可以描述如下:

其中, N 为端到端经过的总节点数, L 为总链路数. 考虑到用户对端到端时延的确定性需求是 $S_d^{(j)}$, 那么需要满足最坏的端到端时延不能超过其确定性需求, 因此有 $\text{CBD}_i^{(\text{CID}_j)}$ 标识的时延确定性描述, 即

$$\text{delay}^{(j)} \leq S_d^{(j)} \quad (9)$$

抖动 $\text{jitter}^{(j)}$ 是指端到端时延的最大变化量. 令

$\text{delay}_{\max}^{(j)}$ 表示最大的端到端时延, $\text{delay}_{\min}^{(j)}$ 表示最小的端到端时延, 那么抖动的大小可以表示为

$$\text{jitter}^{(j)} = \left| \text{delay}_{\max}^{(j)} - \text{delay}_{\min}^{(j)} \right| \quad (10)$$

抖动最坏不能超过用户期望的抖动上限值 $S_j^{(j)}$, 因此 $\text{CBD}_2^{(\text{CID})}$ 标识的抖动确定性描述为

$$\text{jitter}^{(j)} \leq S_j^{(j)} \quad (11)$$

可靠性可以由丢包率来体现, 令 $\text{pkt}_{\text{out}}^{(j)}$ 表示节点发出的数据包个数, $\text{pkt}_{\text{in}}^{(j)}$ 表示输入该节点的数据包个数, 那么该节点丢包率 $\text{floss}_n^{(j)}$ 应为

$$\text{floss}_n^{(j)} = \left(1 - \frac{\text{pkt}_{\text{out}}^{(j)}}{\text{pkt}_{\text{in}}^{(j)}} \right) \times 100\% \quad (12)$$

其中, $\text{floss}_n^{(j)}$ 为数据流 j 的路径上的第 n 个节点的丢包率, 同理令 $\text{floss}_l^{(j)}$ 为数据流 j 的路径上的第 l 条链路上的丢包率, 则端到端总丢包率为

$$\text{floss}^{(j)} = \left\{ 1 - \left[\prod_{n=1}^N (1 - \text{floss}_n^{(j)}) \prod_{l=1}^L (1 - \text{floss}_l^{(j)}) \right] \right\} \quad (13)$$

根据用户的丢包率容忍度 $S_l^{(j)}$, 数据流在实际传输过程中的丢包率不应大于 $S_l^{(j)}$, 所以 $\text{CBD}_3^{(\text{CID})}$ 标识的丢包率确定性需求为

$$\text{floss}^{(j)} \leq S_l^{(j)} \quad (14)$$

终端用户还需要关注每条数据流的基本属性 $f_{\text{attr}}^{(j)}$, 包括流标识、数据包个数、源地址、目的地址、流周期和数据包大小等, 记作 $f_{\text{attr}}^{(j)} = \{\text{CID}_j, \text{pkt}^{(j)}, \text{src}^{(j)}, \text{dst}^{(j)}, \text{pid}^{(j)}, \text{size}^{(j)}, \dots\}$. 网络管理员主要关注网络整体的数据流传输性能, 例如用户吞吐量、链路利用率和负载均衡要素等. 令 $\text{pkt}^{(u)}$ 表示用户 u 发送的数据包个数, $T^{(u)}$ 表示用户 u 发包的时长. 那么用户 u 的吞吐量可以表示为

$$\text{Tp} = \frac{\text{pkt}^{(u)} \times \text{size}}{T^{(u)}} \quad (15)$$

由于需要保障用户 u 的吞吐量确定性需求, 使其吞吐量下限不小于 S_u^{low} 且不超过上限需求 S_u^{up} , 所以 $\text{CBD}_4^{(\text{CID}_i)}$ 标识的吞吐量确定性需求为

$$S_u^{\text{low}} \leq \text{Tp} \leq S_u^{\text{up}} \quad (16)$$

链路利用率反映发送的数据流对链路带宽的利用程度, 令第 l 条链路上发送到目的节点 d 的数据率为 $q_l^{(d)}$, 为保证链路带宽能够被最大限度地利用, 一般需要使用链路利用率不低于 S_{lq}^{low} 且不超过上限 S_{lq}^{up} , 因此 $\text{CBD}_5^{(\text{CID})}$ 标识的链路利用率的确定性需求可以描述为

$$S_{lq}^{\text{low}} \leq \sum_{d=1}^D q_l^{(d)} \leq S_{lq}^{\text{up}} \quad (17)$$

其中, d 表示目的节点, D 表示在第 l 条链路上所有数据流的目的地址总数. 对于负载均衡的确定性, 需要保证在网元 v 上数据流的负载均衡度不超过确定性需求 S_r , 可以使用标准差来评估负载均衡度, 因此 $\text{CBD}_6^{(\text{CID})}$ 标识的负载均衡度确定性描述为

$$\sqrt{\frac{1}{\zeta} \sum_{i=1}^{\zeta} (v_i - \bar{v})^2} \leq S_r \quad (18)$$

其中, v_i 和 \bar{v} 分别表示每个网元资源占用率和平均资源占用率, ζ 是指网元 v 的总数. 用户还可以为不同数据流灵活自定义 $\text{CBD}_i^{(\text{CID})}$ 标识的其他确定性需求描述. 差异化服务层会将标识后的确定性需求描述 M_w 统一传递给智慧化适配层, 便于智慧化适配层感知差异化的服务需求.

2.3 异构融合网络层

异构融合网络层负责统一抽象异构网络侧资源, 建立多种确定性要素描述来保障数据流的确定性传输. 在实际网络中, 不同网络设备的接口用于承载多种确定性要素, 包括网络流量、时隙容量、频率、功率、能耗、计算、存储要素等. 其中每个网络设备通过 DID 来标识, 而每个网络设备又拥有多个网络接口, 每个网络接口则通过 NID 来标识, 网络中每种确定性要素具有的资源约束由 NBD 维护. 为了实现物理网络到确定性要素描述的网络标识逻辑映射, 需要构建网络设备标识到网络接口标识的映射关系, 以及各网络接口所能承载的最大确定性要素约束上限. 网络标识解析映射过程包含两个步骤.

第一步是解析 DID 与 NID 之间的映射关系. 令网络设备池 $[\text{DID}_1, \text{DID}_2, \text{DID}_3, \dots, \text{DID}_\tau]$ 表示所有网络设备的集合, 网络中每个网络设备的物理接口使用接口池 $[\text{NID}_1, \text{NID}_2, \text{NID}_3, \dots, \text{NID}_\rho]^T$ 来标记, 则网络设备与网络接口之间的映射矩阵 \mathbf{R}_{ID} 可以通过接口池与网络设备池相乘得到, 即

$$\mathbf{R}_{\text{ID}} = \begin{bmatrix} \text{NID}_1 \\ \text{NID}_2 \\ \text{NID}_3 \\ \vdots \\ \text{NID}_\rho \end{bmatrix} \cdot [\text{DID}_1, \text{DID}_2, \text{DID}_3, \dots, \text{DID}_\tau]_{1 \times \tau}$$

$$= \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_1^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_1^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_1^{(\text{DID}_\tau)} \\ \text{NID}_2^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_2^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_2^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_2^{(\text{DID}_\tau)} \\ \text{NID}_3^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_3^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_3^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_3^{(\text{DID}_\tau)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_\tau)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $\text{NID}_j^{(\text{DID}_i)}$ 表示第 i 个网络设备的第 j 个接口, 如果接口 NID_j 不属于设备 DID_i , 则 $\text{NID}_j^{(\text{DID}_i)} = 0$. 然后将确定性要素池记为 $[\text{NBD}_1, \text{NBD}_2, \text{NBD}_3, \dots, \text{NBD}_x]^T$, 再

$$\mathbf{R}_W^{(l)} = \begin{bmatrix} \text{NBD}_1 \\ \text{NBD}_2 \\ \text{NBD}_3 \\ \vdots \\ \text{NBD}_x \end{bmatrix} \cdot [\text{NID}_1^{(\text{DID}_i)}, \text{NID}_2^{(\text{DID}_i)}, \dots, \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_i)}] = \begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_i} \quad (20)$$

其中, $\text{NBD}_j^{(\text{NID}_i)}$ 表示第 i 个网络接口上第 j 种网络确定性要素所能提供的资源能力上限, 由矩阵内容可以得到在网络设备 DID_i 下每个网口所能提供的确定性资源能力上限. 如果该确定性要素与接口不匹配, 则 $\text{NBD}_j^{(\text{NID}_i)} = 0$.

以此类推, 可以得到所有的网络设备的映射矩阵,

$$\mathbf{R}_W = \begin{bmatrix} \text{NBD}_1 \\ \text{NBD}_2 \\ \text{NBD}_3 \\ \vdots \\ \text{NBD}_x \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_1^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_1^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_1^{(\text{DID}_\rho)} \\ \text{NID}_2^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_2^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_2^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_2^{(\text{DID}_\rho)} \\ \text{NID}_3^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_3^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_3^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_3^{(\text{DID}_\rho)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_1)} & \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_2)} & \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_\rho)} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_1} \begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_2} \dots \begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_\rho} \quad (21)$$

\mathbf{R}_W 包含 τ 维 DID 标识的网络设备矩阵, 网络设备矩阵中的每一列表示该设备下每个网络接口的多种确定性要素资源能力上限. 矩阵中的每个元素 $\text{NBD}_i^{(\text{NID}_j)}$ 表示在第 j 个网络接口上第 i 种确定性要素所能提供的资源能力上限. 如果该确定性要素与接口不匹配, 则

$$\begin{aligned} \varphi(\text{DID}_\tau, \text{NID}_\rho, \text{NBD}_{1-x}) &= \mathbf{R}_{W, \text{DID}_\tau}^{(\rho)} \\ &= [\text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)}, \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)}, \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)}, \text{NBD}_4^{(\text{NID}_\rho)}, \text{NBD}_5^{(\text{NID}_\rho)}, \text{NBD}_6^{(\text{NID}_\rho)}, \dots]^T \\ &= [\text{network traffic, slot, frequency, power, computing power, storage, } \dots]^T \end{aligned} \quad (22)$$

对于网络流量要素, 令 $\kappa_n^{(d)}$ 表示节点 n 注入到网络中的流量, I_{nl} 指示第 l 条链路与与节点 n 的关系. 如果该链路是节点 n 的输入链路, 则 $I_{nl} = -1$; 如果是输出链路,

取 \mathbf{R}_{ID} 的第 l 列记为 $\mathbf{R}_{\text{ID}}^{(l)}$, 则由确定性要素池与 $(\mathbf{R}_{\text{ID}}^{(l)})^T$ 做矩阵乘法运算, 可以得到多确定性要素与第 l 个网元的网络接口的映射矩阵 $\mathbf{R}_W^{(l)}$, 计算公式为 $\mathbf{R}_W^{(l)} = [\text{NBD}_1, \text{NBD}_2, \text{NBD}_3, \dots, \text{NBD}_x]^T \cdot (\mathbf{R}_{\text{ID}}^{(l)})^T$, 即

$$\begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_i}$$

则多确定性要素与所有网络设备的网络接口的映射矩阵 $\mathbf{R}_W = [\mathbf{R}_W^{(1)}, \mathbf{R}_W^{(2)}, \mathbf{R}_W^{(3)}, \dots, \mathbf{R}_W^{(\tau)}]_{\tau \times x \times \rho}$, 公式描述为 $\mathbf{R}_W = [\text{NBD}_1, \text{NBD}_2, \text{NBD}_3, \dots, \text{NBD}_x]^T \otimes \mathbf{R}_{\text{ID}}$, 符号 \otimes 是定义的新运算, 运算规则为 \mathbf{R}_W 和 $\mathbf{R}_{\text{ID}}^{(l)}$ 计算式即式(20)的联立, 即

$$\begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_1)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_2)} & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_1} \begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_2} \dots \begin{bmatrix} \text{NBD}_1^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_2^{(\text{NID}_\rho)} \\ \text{NBD}_3^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots \\ \text{NBD}_x^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_\rho} \quad (21)$$

$\text{NBD}_i^{(\text{NID}_j)} = 0$.

矩阵 \mathbf{R}_W 中 $\text{NBD}_i^{(\text{NID}_j)}$ 标识的多确定性要素描述包括网络流量、时隙、频率、功率、算力和存储等网络侧要素描述. 以 NID_ρ 接口为例, 经过连接标识解析映射抽象出的多确定性要素描述如下:

则 $I_{nl} = 1$. 如果链路与节点无关, 那么 $I_{nl} = 0$. 在链路 l 上发送到目的节点 d 的数据量记为 $q_l^{(d)}$, 那么 $\kappa_n^{(d)}$, I_{nl} 和 $q_l^{(d)}$ 三者之间的关系为

$$\tilde{h}_n^{(d)} = \sum_{l=1}^L I_{nl} q_l^{(d)} \quad (23)$$

对于无线确定性网络,考虑到每条无线链路上有多个子载波,每条链路上的流量等于该链路上各个子载波所承载流量的总和,因此节点 n 注入到网络中的流量可以由上式进一步扩展为

$$\tilde{h}_n^{(d)} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K I_{nl} q_{lk}^{(d)} \quad (24)$$

其中, K 表示链路 l 上子载波的总数, $q_{lk}^{(d)}$ 表示第 k 个子载波所承载的发送至目的节点 d 的流量. 根据网络流量守恒定律,输入到目的节点 d 的流量应等于除目的节点以外的所有节点发送到 d 的流量总和,即 $\text{NBD}_1^{(\text{NID}_d)}$ 标识的网络流量确定性需求描述为

$$|\tilde{h}_d^{(d)}| = \left| \sum_{n=1}^N \tilde{h}_n^{(d)} \right|, \quad n \neq d \quad (25)$$

其中, $\tilde{h}_n^{(d)} \geq 0$, $\tilde{h}_d^{(d)}$ 表示输入到目的节点 d 的数据量. 对于时隙容量要素,需要保证在每段时隙上传输的数据量最大不超过该时隙的容量,令链路 l 上传输的数据率为 $q_l^{(d)}$,其中每条数据流以节点 d 作为目的地址, T_{le} 是在第 l 条链路上第 e 个时隙的长度, Q_{le} 是在第 l 条链路上第 e 个时隙的容量,该容量大小与链路带宽有关,对于增量式加入的数据流 f_j , $\text{NBD}_2^{(\text{NID}_d)}$ 标识的时隙要素确定性描述为

$$f_j \cdot T_{le} \sum_{d=1}^D (\bar{q}_l^{(d)} + f_j \cdot q_l^{(d)}) \leq Q_{le} \quad (26)$$

其中, $\bar{q}_l^{(d)}$ 是数据流到达前链路的数据率. 进一步拓展到无线网络,需要保证在每个子载波上传输的数据量不超过确定性时隙容量需求,因此 $\text{NBD}_2^{(\text{NID}_d)}$ 标识的时隙要素描述为

$$f_j \cdot T_{le} \sum_{d=1}^D (\bar{q}_{lk}^{(d)} + f_j \cdot q_{lk}^{(d)}) \leq Q_{lke} \quad (27)$$

其中, Q_{lke} 表示在链路 l 的第 k 个子载波上开辟的第 e 个时隙的最大容量. Q_{lke} 可以借助香农公式得到理论上限,即 $Q_{lke} = W_{lk} T_{le} \log_2(1 + \text{SINR})$,其中 W_{lk} 是链路 l 的第 k 个子载波上具有的带宽, SINR 是信干噪比. 对于频率要素,一般需要保障在每个子载波上传输的数据率不超过最大值,因此 $\text{NBD}_3^{(\text{NID}_d)}$ 标识的频率要素确定性描述为

$$\sum_{d=1}^D (\bar{q}_{lk}^{(d)} + f_j \cdot q_{lk}^{(d)}) \leq C_{lk} \quad (28)$$

其中, C_{lk} 是链路 l 在第 k 个子载波上的最大数据率,且 C_{lk} 与频分复用的时长、发射功率、链路增益有关,例如考虑如图 2 所示的两条链路 l 和 l' ,令链路 l 与 l' 的频分复用时长占比为 $\chi_{l'l}^{(k)}$,链路 l 传输数据的时长占比为

$\chi_l^{(k)}$,链路 l 在第 k 个子载波上的信道增益为 $g_l^{(k)}$,链路 l' 对 l 的干扰增益为 $g_{l'l}^{(k)}$. 则 C_{lk} 与这些变量之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} C_{lk} = \chi_l^{(k)} C'_{lk} + \chi_{l'l}^{(k)} C''_{lk} \\ \chi_l^{(k)} + \chi_{l'l}^{(k)} = 100\% \end{cases} \quad (29)$$

其中, C'_{lk} 和 C''_{lk} 分别表示使用链路 l 单独传输数据的最大数据率,以及链路 l 与 l' 频分复用时的最大数据率,可以利用香农公式计算其理论上限,即

$$\begin{cases} C'_{lk} = W_{lk} \log_2(1 + p_{lk} g_l^{(k)}) \\ C''_{lk} = W_{lk} \log_2\left(1 + \frac{p_{lk} g_l^{(k)}}{1 + p_{l'l} g_{l'l}^{(k)}}\right) \end{cases} \quad (30)$$

其中, p_{lk} 和 $p_{l'l}$ 分别表示链路 l 和 l' 在子载波 k 上所具有的功率.



图2 无线链路中数据传输时长占比

考虑到功率要素的确定性保障,一方面需要使链路具有的最大功率不超过功率上限 p_l^{\max} ,即 $\text{NBD}_4^{(\text{NID}_d)}$ 标识的功率要素确定性描述为

$$0 \leq \sum_{k=1}^K (\bar{p}_{lk} + f_j \cdot p_{lk}) \leq p_l^{\max} \quad (31)$$

另一方面,功率的大小会决定信干噪比 γ 和能量 ε 的确定性,因此功率的取值需要全面考虑 γ 和 ε 的确定性约束,即 $\text{NBD}_4^{(\text{NID}_d)}$ 标识的功率要素确定性描述还包括

$$\begin{cases} \gamma = \frac{f_j p_{lk} \times g_l^{(k)}}{1 + \sum_{l', l' \in L} (f_j \cdot p_{l'k} \times g_{l'l}^{(k)})} \\ \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \\ \varepsilon = \sum_{k=1}^K (f_j \cdot p_{lk} \times T_{l'}) \\ 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \end{cases} \quad (32)$$

计算和存储要素的确定性通常是联合考虑的,以 CPU 的计算资源为例, CPU 的周期 c 表示处理 1 比特的数据所需要的 CPU 循环个数,那么处理 f_j 数据流 Ξ 比特的数据量需要保证总 CPU 循环个数不超过最大值,则 $\text{NBD}_5^{(\text{NID}_d)}$ 标识的算力要素确定性描述为

$$0 \leq c \Xi \leq \eta^c \Delta T, \quad \eta^c \in [0, 1] \quad (33)$$

其中, η^c 是效用系数, Δ 表示服务器频率, T 是计算时长. 同时,在服务器上存储的数据量 v 不能超过服务器所能分配给 f_j 的最大容量,即 $\text{NBD}_6^{(\text{NID}_d)}$ 标识的存储要

素确定性描述为

$$0 \leq v \leq \eta^v V, \eta^v \in [0, 1] \quad (34)$$

其中, η^v 是服务器存储资源的效用系数, V 是服务器存储空间总容量. 其他 $NBD_i^{(NID_\rho)}$ 标识的确定性要素描述可以灵活加入到异构融合网络层. 异构融合网络层再将解析映射得到的多确定性要素描述 N_{BD} 统一传递给智慧化适配层, 便于智慧化适配层对异构网络确定性相关资源进行感知.

2.4 智慧化适配层

智慧化适配层收集和感知差异化服务层和异构融

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{port}}^{(\tau)} &= \mathbf{R}_{\text{ID}}^{(\tau)} \otimes \mathbf{M}_{\text{ID}} = \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(\text{DID}_\tau)} \\ \text{NID}_2^{(\text{DID}_\tau)} \\ \text{NID}_3^{(\text{DID}_\tau)} \\ \vdots \\ \text{NID}_\rho^{(\text{DID}_\tau)} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \text{CID}_1^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_1^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_1^{(\text{SID}_n)} \\ \text{CID}_2^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_2^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_2^{(\text{SID}_n)} \\ \text{CID}_3^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_3^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_3^{(\text{SID}_n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{CID}_n^{(\text{SID}_1)} & \text{CID}_n^{(\text{SID}_2)} & \dots & \text{CID}_n^{(\text{SID}_n)} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_1^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_1^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_1^{(\text{CID}_n)} \\ \text{NID}_2^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_2^{(\text{CID}_n)} \\ \text{NID}_3^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_3^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_3^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_3^{(\text{CID}_n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_1^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_1^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_1^{(\text{CID}_n)} \\ \text{NID}_2^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_2^{(\text{CID}_n)} \\ \text{NID}_3^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_3^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_3^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_3^{(\text{CID}_n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SID}_1 \\ \text{SID}_2 \\ \text{SID}_3 \\ \vdots \\ \text{SID}_\rho \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (35)$$

其中, $\mathbf{R}_{\text{ID}}^{(\tau)}$ 表示 \mathbf{R}_{ID} 的第 τ 列, 计算得到的 DID_τ 的接口适配矩阵 $\mathbf{M}_{\text{port}}^{(\tau)}$ 中的每个元素 $\text{NID}_i^{(\text{CID}_j)}$ 标识不同服务下每条数据流与网络接口的匹配结果, 即数据流 CID_j 在传输过程中是否经过接口 NID_i , 如果不经 NID_i , 则 $\text{NID}_i^{(\text{CID}_j)} = 0$. 同理, 对于全局网络计算所有 DID 的接口适配矩阵, 可得到表示全局路由配置的接口适配矩阵 $\mathbf{M}_{\text{port}} = \{\mathbf{M}_{\text{port}}^{(1)}, \mathbf{M}_{\text{port}}^{(2)}, \mathbf{M}_{\text{port}}^{(3)}, \dots, \mathbf{M}_{\text{port}}^{(\tau)}\}$.

第二步, 将各网络接口上的多种资源分配给不同数据流, 同时需要满足服务侧应用的差异化需求和网络侧多确定性要素约束. 将从网络层获取到的 \mathbf{R}_W 中的每个元素 $\text{NBD}_j^{(\text{NID}_i)}$ 置零并表示为 $\text{NID}_i^{(j)}$, 得到新矩阵 \mathbf{R}_M 用以描述当前已分配资源量, 则网络中所有接口维护的资源矩阵表示为

$$\mathbf{M}_r^{\{z,y\}} = \mathbf{R}_M^{\{\text{DID}_y\}} \odot \left(\mathbf{M}_{\text{port}}^{\{\text{SID}_z, \text{DID}_y\}} \right)^T = \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(1)} & \text{NID}_2^{(1)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(1)} \\ \text{NID}_1^{(2)} & \text{NID}_2^{(2)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(2)} \\ \text{NID}_1^{(3)} & \text{NID}_2^{(3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(3)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_1^{(x)} & \text{NID}_2^{(x)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(x)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_y} \odot \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_1)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_1)} \\ \text{NID}_1^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_2)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_2)} \\ \text{NID}_1^{(\text{CID}_3)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_3)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_1^{(\text{CID}_n)} & \text{NID}_2^{(\text{CID}_n)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(\text{CID}_n)} \end{bmatrix}_{\text{SID}_z, \text{DID}_y} \quad (36)$$

合网络层解析映射后的确定性相关信息, 并构建统一的端到端智能资源调度算法, 该算法以数据流作为资源分配的对象, 通过 DRL 模型自适应地为每条数据流合理适配网络资源, 从而保障数据流端到端传输的确定性. 这一过程在智慧化适配层表现为各标识的融合与计算, 主要包含两个步骤.

第一步, 利用感知到的服务和网络信息为每条数据流匹配相应的网络接口以完成全局路由适配, 以 DID_τ 为例, 符号 \otimes 计算规则与式 (21) 相同, 其标识的计算过程描述为

$$\mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} \text{NID}_1^{(1)} & \text{NID}_2^{(1)} & \text{NID}_3^{(1)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(1)} \\ \text{NID}_1^{(2)} & \text{NID}_2^{(2)} & \text{NID}_3^{(2)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(2)} \\ \text{NID}_1^{(3)} & \text{NID}_2^{(3)} & \text{NID}_3^{(3)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NID}_1^{(x)} & \text{NID}_2^{(x)} & \text{NID}_3^{(x)} & \dots & \text{NID}_\rho^{(x)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_\tau} \quad (36)$$

其中, $\text{NID}_i^{(j)}$ 表示第 i 个网络接口上的第 j 种确定性资源一共被分配使用的量, 初始化时默认资源还没有被分配, 故矩阵先置零以等待进一步调用和配置.

网络设备 DID_y 上的服务 SID_z 对应的数据流到网络资源的适配结果可以描述为

$$= \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_n)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_n)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_n)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_n)} \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(1)}^{(\text{CID}_n)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_n)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_n)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_n)} \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_n)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_n)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_n)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_n)} \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_n)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_n)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_n)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_1)} & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_2)} & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_n)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{CID}_n)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{CID}_n)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{CID}_n)} \end{bmatrix}_{\text{NID}_p} \quad (37)$$

其中,符号 \odot 计算规则与式(6)相同,资源适配矩阵 $\mathbf{M}_r^{\{z,y\}}$ 的每个元素 $\text{NID}_{(i)}^{(\text{CID}_j)}$ 标识一个网络接口上第 i 种确定性资源与数据流 CID_j 的适配结果, $\mathbf{R}_M^{\{\text{DID}_y\}}$ 表示 \mathbf{R}_M 中代表设备 DID_y 的矩阵, $\mathbf{M}_{\text{port}}^{\{\text{SID}_z, \text{DID}_y\}}$ 表示 $\mathbf{M}_{\text{port}}^{\{y\}}$ 中代表服务 SID_z 的矩阵.进一步地,所有服务到每个网络设备的接口上多种确定性网络资源的适配矩阵可以描述为以下五维矩阵:

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} M_r^{\{1,1\}} & M_r^{\{2,1\}} & M_r^{\{3,1\}} & \dots & M_r^{\{k,1\}} \\ M_r^{\{1,2\}} & M_r^{\{2,2\}} & M_r^{\{3,2\}} & \dots & M_r^{\{k,2\}} \\ M_r^{\{1,3\}} & M_r^{\{2,3\}} & M_r^{\{3,3\}} & \dots & M_r^{\{k,3\}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_r^{\{1,\tau\}} & M_r^{\{2,\tau\}} & M_r^{\{3,\tau\}} & \dots & M_r^{\{k,\tau\}} \end{bmatrix}_{\tau \times k \times \rho \times x \times n} \quad (38)$$

具体地,矩阵 \mathbf{M}_r 的第一维度表示网络中共有 τ 台

$$\mathbf{M}_r^{\{\text{SID}_z, \text{CID}_u\}} = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_1)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_2)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_\rho)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_\rho)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_\rho)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_\rho)} \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_1)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_2)} & \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(1)}^{(\text{NID}_\rho)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_\rho)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_\rho)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_\rho)} \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_1)} & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_2)} & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_\rho)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_\rho)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_\rho)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_\rho)} \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_1)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_2)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_\rho)} \end{array} \right] & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_\rho)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_\rho)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_\rho)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\begin{array}{cccc} \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_1)} & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_2)} & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_3)} & \dots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_\rho)} \end{array} \right]_{\text{DID}_1} & \text{NID}_{(2)}^{(\text{NID}_\rho)} & \text{NID}_{(3)}^{(\text{NID}_\rho)} & \vdots & \text{NID}_{(x)}^{(\text{NID}_\rho)} \end{bmatrix}_{\text{DID}_2 \dots \text{DID}_x} \quad (39)$$

$\mathbf{M}_r^{\{\text{SID}_z, \text{CID}_u\}}$ 描述了服务 SID_z 的数据流 CID_u 在所有网络设备的各网口分配到的每种确定性资源.对于不同的确定性资源,有对应的函数可以计算 $\text{CBD}_i^{(\text{CID}_u)}$ 的资源适配情况: $\mathbf{F}_{\text{BD}_i}^{\{z,u\}} = f_{\text{CBD}_i}(\mathbf{M}_W^{\{z,u\}}, \mathbf{M}_r^{\{\text{SID}_z, \text{CID}_u\}})$.例如 $i=1$ 时, CBD_1 代表时延,则

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{BD}_1}^{\{z,u\}} &= f_{\text{CBD}_1}(\mathbf{M}_W^{\{z,u\}}, \mathbf{M}_r^{\{\text{SID}_z, \text{CID}_u\}}) \\ &= \text{CBD}_1^{\text{CID}_u} - \sum_{j=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\rho} \left[\text{NID}_{(\text{delay})}^{(\text{NID}_i)} \right]_{\text{DID}_j} \end{aligned} \quad (40)$$

网络设备,第二维度表示一台设备上的 k 个服务,第三维度表示每个服务涉及到网络设备的 ρ 个接口,第四维度表示一个接口上的 x 种资源,第五维度表示每种资源分配到的 n 条具体数据流.通过基于深度强化学习的端到端确定性调度算法,根据服务层 \mathbf{M}_W 资源需求信息和对 \mathbf{M}_r 进行资源适配,并根据服务层的实时需求和状态信息动态调度网络层确定性资源,最后将调度反馈信息 \mathbf{F}_{BD} 提供给服务层.这里 \mathbf{F}_{BD} 由 \mathbf{M}_W 和 \mathbf{M}_r 计算得到.首先以服务 SID_z 下数据流 CID_u 的调度反馈信息 $\mathbf{F}_{\text{BD}}^{\{z,u\}}$ 为例,取矩阵 \mathbf{M}_W 的第 z 层第 u 行 $\mathbf{M}_W^{\{z,u\}} = [\text{CBD}_1^{\text{CID}_u}, \text{CBD}_2^{\text{CID}_u}, \text{CBD}_3^{\text{CID}_u}, \dots, \text{CBD}_x^{\text{CID}_u}]_{\text{SID}_z}^T$ 表示具体数据流 CID_u 的资源需求.然后,资源适配五维矩阵 \mathbf{M}_r 在选定服务 SID_z 和数据流 CID_u 后得到三维矩阵 $\mathbf{M}_r^{\{\text{SID}_z, \text{CID}_u\}}$,即

其中, delay 表示网络接口 NID 中提供时延保障的确定性资源, $\mathbf{F}_{\text{BD}_i}^{\{z,u\}}$ 表示时延确定性需求和实际网口时延资源适配结果的差值.将 $\mathbf{F}_{\text{BD}_i}^{\{z,u\}}$ 反馈给服务层以告知是否满足确定性需求,以及还差多少确定性资源,使服务层能够启动重传或者补偿足够的资源.

以此类推,可得到所有确定性资源的适配结果对应确定性需求的满足情况,即 $\mathbf{F}_{\text{BD}}^{\{z,u\}} = [\mathbf{F}_{\text{BD}_1}^{\{z,u\}}, \mathbf{F}_{\text{BD}_2}^{\{z,u\}}, \mathbf{F}_{\text{BD}_3}^{\{z,u\}}, \dots, \mathbf{F}_{\text{BD}_x}^{\{z,u\}}]$,再细化到所有服务的每条数据流,展开得到

$$F_{BD} = \begin{bmatrix} F_{BD_1}^{\{1,1\}} & F_{BD_1}^{\{1,2\}} & F_{BD_1}^{\{1,3\}} & \cdots & F_{BD_1}^{\{1,n\}} \\ F_{BD_1}^{\{2,1\}} & F_{BD_1}^{\{2,2\}} & F_{BD_1}^{\{2,3\}} & \cdots & F_{BD_1}^{\{2,n\}} \\ F_{BD_1}^{\{3,1\}} & F_{BD_1}^{\{3,2\}} & F_{BD_1}^{\{3,3\}} & \cdots & F_{BD_1}^{\{3,n\}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{BD_1}^{\{k,1\}} & F_{BD_1}^{\{k,2\}} & F_{BD_1}^{\{k,3\}} & \cdots & F_{BD_1}^{\{k,n\}} \end{bmatrix}_{CBD_1} \begin{bmatrix} F_{BD_x}^{\{1,1\}} & F_{BD_x}^{\{1,2\}} & F_{BD_x}^{\{1,3\}} & \cdots & F_{BD_x}^{\{1,n\}} \\ F_{BD_x}^{\{2,1\}} & F_{BD_x}^{\{2,2\}} & F_{BD_x}^{\{2,3\}} & \cdots & F_{BD_x}^{\{2,n\}} \\ F_{BD_x}^{\{3,1\}} & F_{BD_x}^{\{3,2\}} & F_{BD_x}^{\{3,3\}} & \cdots & F_{BD_x}^{\{3,n\}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{BD_x}^{\{k,1\}} & F_{BD_x}^{\{k,2\}} & F_{BD_x}^{\{k,3\}} & \cdots & F_{BD_x}^{\{k,n\}} \end{bmatrix}_{CBD_x} \quad (41)$$

F_{BD} 描述了确定性资源的需求满足情况,用以反馈给服务层提供上层决策判决条件,其中元素 $F_{BD_x}^{\{i,j\}}$ 代表服务 SID_i 的数据流 CID_j 的确定性资源 CBD_x 需求满足情况。

在实际网络中,确定性资源的适配需要凭借上述标识的运算原理和相应的资源调度算法来实现,因此我们进一步建立了基于深度强化学习的端到端确定性调度算法来求解和优化确定性网络资源分配模型。根据上述

$$o_i = \phi_i \left(\frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \left[\text{NID}_{(2)}^{\{CID_i\}} \right]_{SID_j}}{\left[\text{NBD}_2^{\{NID_i\}} \right]_{DID_j}} \right), \text{domain} \left\{ (\text{NID}, \text{NBD}) \left| \left[\text{NID}_{(2)}^{\{CID_i\}} \right]_{SID_j} \in \mathbf{M}_r^{\{DID_j, NID_i\}}, \left[\text{NBD}_2^{\{NID_i\}} \right]_{DID_j} \in \mathbf{R}_w \right. \right\} \quad (43)$$

其中, $\phi_i(\cdot)$ 是对时隙状态的预处理函数, $\text{NID}_{(2)}^{\{CID_i\}}$ 取自服务层资源适配五维矩阵 \mathbf{M}_r 中标识设备 DID_j 和网络接口 NID_v 的部分, $\text{NBD}_2^{\{NID_i\}}$ 取自网络层的确定性资源与网络接口映射矩阵 \mathbf{R}_w 。同理,令 $o_h, o_b, o_p, o_c, o_s, o_u$ 分别表示网络流量、频率、功率、计算、存储和其他用户自定义的要素描述状态。为了将网络资源适配到具体的每个数据流,以服务 SID_s 下数据流 CID_u 为例,状态空间还应包含 $\text{CBD}_i^{\{CID_u\}}$ 标识的每条数据流的特征信息 o_f ,数据流特征信息包括流周期、源地址、目的地址、路由路径、大小、数据包个数、时延需求和抖动需求等,即

$$o_f = \left\{ \left[\text{CBD}_i^{\{CID_u\}} \right]_{SID_j} \mid i \in \mathbb{N}: m-s \leq i \leq m, \text{CBD}_i^{\{CID_u\}} \in \mathbf{M}_w \right\} = \{\text{pid, src, dst, path, size, pkt, } L, J\} \quad (44)$$

其中, m 为服务层资源需求映射矩阵 \mathbf{M}_w 中确定性资源需求数, s 代表数据流特征信息个数, \mathbb{N} 代表自然数集。那么在每一步的整体状态 o_i 可以表示为各个变量状态的集合,即 $o_i = \{o_h, o_r, o_b, o_p, o_c, o_s, o_u, o_f\}$ 。

动作空间包含资源调度模型的优化目标中待决策的各个变量,包括流量、时隙、频率、功率、算力和存储分配等。因此,与式(43)同理,每一步动作应表示为 $a_i =$

标识原理,确定性网络资源分配模型可以公式化为

$$\begin{aligned} & \max(\min)(\mathbf{M}_r, \mathbf{M}_w, \mathbf{R}_w) \\ & \text{s. t. } \text{CBD}_i^{\{CID_j\}} \text{标识的数据流确定性需求约束,即式} \\ & (7) \sim (18) \\ & \text{NBD}_i^{\{NID_j\}} \text{标识的多确定性要素上限约束,即} \\ & \text{式}(22) \sim (34) \end{aligned} \quad (42)$$

其中, (\cdot) 是多目标优化函数,函数的自变量 \mathbf{M}_r 是网络侧分配的多种确定性资源, \mathbf{M}_w 指定服务侧数据流确定性资源需求值, \mathbf{R}_w 描述了网络侧确定性资源上限。优化目标例如最大化可调度的流数量、链路负载均衡等。约束条件由智慧化适配层感知到的标识信息组成,包括每条数据流的确定性需求和多确定性要素描述。为了便于算法的求解,需要将确定性资源分配模型转化为马尔可夫决策过程。马尔可夫决策过程主要包括状态、动作和奖励的设计。状态空间包含资源调度模型的约束条件中所有变量占其确定性阈值上限的比例,例如对于 $\text{NBD}_2^{\{NID_i\}}$ 标识的时隙要素描述,其状态 o_i 可以表示为

$$\{a_h, a_r, a_b, a_p, a_c, a_s, a_u\}, \text{算法计算出的资源调度的动作结果作用于资源适配矩阵} \mathbf{M}_r. \text{奖励与优化目标呈正相关,对于最大化可调度数据流数量这一目标,奖励} r_{t+1}^{\text{num}} \text{设计为前后连续两步调度业务流数量的差值,即} \\ r_{t+1}^{\text{num}} = F_{t+1}^{\text{num}} - F_t^{\text{num}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n u_{\text{step}}(F_{BD,t+1}^{\{i,j\}}) - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n u_{\text{step}}(F_{BD,t}^{\{i,j\}}) \quad (45)$$

其中, $u_{\text{step}}(\cdot)$ 表示单位阶跃函数, $F_{BD,t}^{\{i,j\}}$ 为式(41)中 t 时刻的反馈值,当反馈值中所有确定性资源调度结果为真,则 $u_{\text{step}}(\cdot) = 1$,否则为0。如果在当前步调度的业务流数量大于上一步的数量,那么 $r_{t+1}^{\text{num}} > 0$,反之 $r_{t+1}^{\text{num}} \leq 0$ 。对于算力负载均衡目标,奖励 r_{t+1}^{com} 设计为前后连续两步算力负载均衡度的差值,即 $r_{t+1}^{\text{com}} = A^{t+1} - A^t$,与式(44)同理, A^t 可由矩阵 \mathbf{M}_r 和 F_{BD} 计算得到,因此,得到的总体奖励为 $r_{t+1} = \alpha r_{t+1}^{\text{num}} + \beta r_{t+1}^{\text{com}}$ 。

根据马尔可夫决策过程,可以构建基于DRL的端到端确定性相关资源调度算法E2eDet,伪代码见算法1。E2eDet维护两类神经网络,即生成网络和评判网络,分别用于生成资源分配策略和评判策略的好坏。生成网络和评判网络各自都包含估计和目标两个网络,估计网络实时输出资源适配结果,目标网络用于更新估计网络参数。算法的输入是各神经网络以及训练所需

要的参数,输出是确定性相关资源的最优联合调度策略.伪代码中,1~8行是数据的收集过程.首先随机初始化高斯噪声和状态,再依据标识计算的步骤,经估计生成网络为每一步到达的CID标识的数据流分配NID和 $\text{NID}_{(i)}^{(\text{CID})}$ 分别标识的网络接口及接口上的确定性资源.特别地,如果动作空间是离散的,则需要在计算函数 $\zeta(o_i; \omega)$ 中加入Softmax激活函数筛选出最优动作.然后,智能体将资源分配结果作用到当前CID标识的数据流上并迭代一次资源适配矩阵 \mathbf{M}_r ,根据 \mathbf{M}_w 需求和 \mathbf{R}_w 约束得到实时奖励以及 $\text{CBD}_i^{(\text{CID})}$ 和 $\text{NBD}_i^{(\text{NID})}$ 共同标识的状态转移,并将该步的轨迹存入经验池.9~18行是算法的训练过程,智能体从经验池中随机采集 D_b 个轨迹样本,使用梯度下降法更新各估计网络的参数.对于估计评判网络,使用基于 Q 值的损失函数 l_o ,即

$$l_o = \frac{1}{D_b} \sum_{i=1}^{D_b} (y_i - Q(o_i, a_i; v))^2 \quad (46)$$

对于估计生成网络,使用策略梯度更新,梯度计算式为

$$\nabla_{\omega} J \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{D_b} \nabla_a Q(o, a; v)|_{o=o_i, a=\zeta(o_i; \omega)} \nabla_{\omega} \zeta(o; \omega)|_{o_i} \quad (47)$$

在每一步使用仿射组合来更新目标网络的参数.如果当前轮次已训练完,则进行下一轮次迭代.具体如算法1所示.

算法实际部署在集中控制器中,智能体需要观察的网络状态可以通过链路层发现等协议来收集维护 \mathbf{R}_w ,智能体需要的数据流确定性资源需求信息可以通过服务层资源请求等协议来维护 \mathbf{M}_w ,资源分配的结果 \mathbf{M}_r 可以通过网络配置等协议来实现数据面的配置部署.

3 性能分析

本节基于前期工作实现的验证系统^[10]搭建了广义确定性标识网络的仿真环境,在此基础上对比和分析了E2eDet算法在端到端确定性相关资源调度过程中的性能.特别地,为了体现广义确定性标识网络能够协同考虑网络传输和计算等确定性要素,在网络的接入侧引入了算力服务器,提供对任务的高性能计算能力,E2eDet算法不仅需要调度传输路径、传输时隙、频率等网络资源,还需要根据不同任务在服务器上的计算时延、可靠性等需求来规划数据流与算力服务器节点之间的匹配关系,提升业务流的调度成功率,同时优化网络和设备的负载.整个调度过程中的性能瓶颈在于多种确定性要素的能力约束.例如多条数据流在交换机的同一接口处冲突于相同时隙中,会严重影响数据流的调度成功率;算力服务器CPU过载也是影响网络性

算法1 E2eDet确定性相关资源调度算法

输入:生成网络初始化参数 ω 和 ω' ,评判网络初始化参数 v 和 v' ,经验池 U ,样本大小 D_b

输出:确定性相关网络资源的最优适配策略 $\pi: O \rightarrow A$

1. **FOR** 训练轮次小于 ε **DO**
2. 随机初始化高斯噪声 σ
3. 初始化状态 o
4. **FOR** 训练步数小于 s **DO**
5. 估计生成网络计算 $a_i = \zeta(o_i; \omega) + \sigma$,输出 NID_i 和 $\text{NID}_{(i)}^{(\text{CID})}$ 标识的接口及资源适配结果
6. 智能体为当前CID标识的数据流分配相应的网络资源,并迭代一次资源适配矩阵 \mathbf{M}_r
7. 根据 \mathbf{M}_w 和 \mathbf{R}_w 约束得到即时奖励 r_{t+1} ,状态转移到 $\text{CBD}_i^{(\text{CID})}$ 和 $\text{NBD}_i^{(\text{NID})}$ 标识的下一状态 o_{t+1}
8. 将得到的轨迹 $\{o_t, a_t, r_{t+1}, o_{t+1}, \text{done}\}$ 存入经验池 U
9. 从经验池中采集 D_b 个轨迹样本
10. 利用目标网络计算目标值 $y_i = \begin{cases} r_i, & \text{if done,} \\ r_i + \lambda Q'(o'_i, \zeta'(o'_i; \omega'); v'), & \text{otherwise} \end{cases}$
11. 基于 Q 值更新估计评判网络的损失 $l_o = \frac{1}{D_b} \sum_{i=1}^{D_b} (y_i - Q(o_i, a_i; v))^2$
12. 计算梯度更新估计生成网络 $\nabla_{\omega} J \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{D_b} \nabla_a Q(o, a; \omega)|_{o=o_i, a=\zeta(o_i; \omega)} \nabla_{\omega} \zeta(o; \omega)|_{o_i}$
13. 更新目标网络参数 $v' \leftarrow \zeta v + (1 - \zeta)v', \omega' \leftarrow \zeta \omega + (1 - \zeta)\omega'$
14. **IF** done **THEN**
15. **BREAK**
16. **END**
17. **END**
18. **END**

能的重要因素.因此需要调度算法合理分配多种确定性相关资源来提升整体网络性能.

3.1 网络参数配置

实验搭建如图3所示的广义确定性标识网络拓扑,网络融合了5G接入网、基于循环队列转发模型的时间敏感网络TSN和Wi-Fi-6网络,采用集中式架构部署.5G网络中广泛分布着传感器节点,周期性地采集工业应用数据,经过TSN网络保证数据的确定性传输.这些工业应用数据编排到对应的每个服务后由SID标识,SBD维护该服务的确定性传输时延等需求,经过服务标识解析映射后, $\text{CBD}_i^{(\text{CID})}$ 标识的确定性需求包括每条数据流的端到端时延最大不超过循环队列转发模型规定的理论上限值,且每条数据流的丢包率须小于 10^{-6} .在网络侧NID标识的网络设备接口上,具

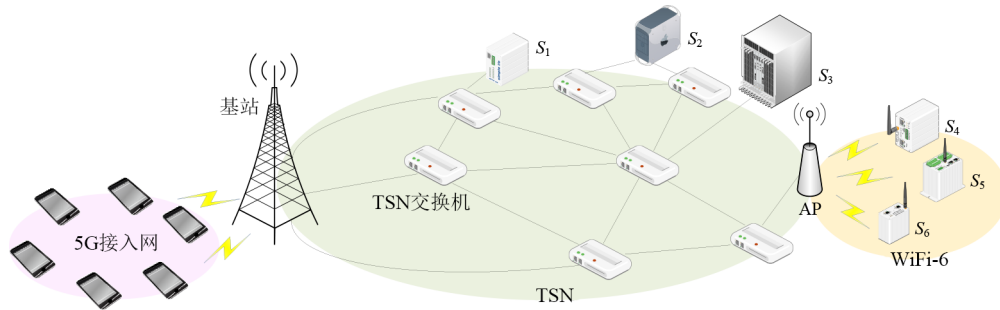


图3 广义确定性标识网络环境示例

有NBD维护的多确定性要素能力约束,经过网络标识解析映射后, $NBD_i^{(NID)}$ 标识的确定性要素描述包括数据流沿路经过的每个TSN交换机接口的数据率不超过1 000 Mbps,无线接入侧网络为每条数据流分配的频率带宽不超过40 MHz.网络中提供算力资源的设备是算力服务器 $S_1 \sim S_6$,其中 $S_1 \sim S_3$ 是有线算力服务器, $S_4 \sim S_6$ 是无线算力服务器.我们通过CPU的处理频率来衡量不同服务器的算力大小,算力服务器为每条数据流分配的计算资源不超过处理器的最大频率.5G接入网中共有1 000条CID标识的待

传输的周期性时间敏感流,共包含105个数据包,数据包的大小分布在50 B和1 KB之间^[10],数据流周期设置为 $\{4, 8, 16\}$ ms,根据室内热点LOS场景^[17],5G网络信道增益为 $PL_1(\text{dB}) = 32.4 + 17.3 \lg(l_{5G}) + 20 \lg(f_c)$ 其中 $l_{5G} = 100$ m表示传感器到基站的距离, f_c 是中心频率.Wi-Fi-6网络使用了IEEE 802.11ax的标准要求,依据室内工业场景^[18],Wi-Fi-6网络的信道增益为 $PL_2(\text{dB}) = 40.05 + 20 \lg(f_c/2.4) + 20 \lg(\min(l_w, 10)) + (l_w > 10) \times 35 \lg(l_w/10)$,其中 $l_w = 10$ m表示Wi-Fi设备到接入点AP的距离.其他参数的具体设置如表2所示.

表2 实验参数

5G接入网		TSN传输网		Wi-Fi-6接入网		E2eDet算法	
TTI	1 ms	链路带宽	1 000 Mbps	系统带宽	40 MHz	经验池大小	10^5
频率带宽	40 MHz	时隙大小	4 ms	AP功率	20 dBm	采样批次	32
基站功率	40 dBm	流周期	$\{4, 8, 16\}$ ms	噪声功率	-110 dBm	学习率	10^{-4}
传感器功率	20 dBm	S_1 处理器频率	1.5 GHz	S_4 处理器频率	4.5 GHz	折扣因子 λ	0.95
噪声功率	-104 dBm	S_2 处理器频率	2.4 GHz	S_5 处理器频率	3.4 GHz	权重 α	1
业务流数量	1 000	S_3 处理器频率	2.8 GHz	S_6 处理器频率	1.0 GHz	权重 β	0.8

3.2 E2eDet算法参数配置

算法中的估计生成网络和目标生成网络采用结构一致的卷积神经网络,包含两个卷积层,每个卷积层的卷积核大小为 3×3 ,窗口滑动步长为1,生成网络输入层和输出层的神经元数目分别等于状态空间和动作空间的维度.估计评判网络和目标评判网络采用结构一致的全连接神经网络,以便于合并状态和动作作为神经网络的输入,神经网络包含两个隐层,每个隐层具有1 000个神经元,输入层神经元数目等于状态加动作空间的维度,输出层只有1个神经元,指示 Q 值大小.算法的优化目标包括最大化可调度的流数量和算力负载均衡.其他相关的网络参数设置如表2所示.

3.3 实验结果分析

E2eDet在广义确定性标识网络中的性能分析主要包括对数据流调度数量、算力负载均衡、算法调度时

间、确定性传输时延等的测量,实验结果如图4所示.实验对比了确定性网络中的主流算法,包括DeepCQF^[15]和Random^[16]算法.其中,DeepCQF算法使用两层全连接神经网络对确定性网络中离散的时隙资源进行调度,在此基础上引入交换迭代方法进一步搜索最优解.Random算法随机调度网络中的确定性相关资源.调度数据流的训练过程如图4(a)所示,经过收敛后E2eDet平均可以调度959条数据流,相比DeepCQF和Random调度数量分别提升了28.4%和6.38倍.这是由于E2eDet可以为每条数据流联合分配网络中的确定性相关资源,包括时隙、频率、功率、算力等,而基于值迭代的DeepCQF局限于离散的时隙资源调度,导致调度数据流的数量下降.同理,如图4(b)所示,E2eDet通过训练可以更快地取得最优的算力均衡值,其算力负载的标准差相较于DeepCQF和Random分别减少了

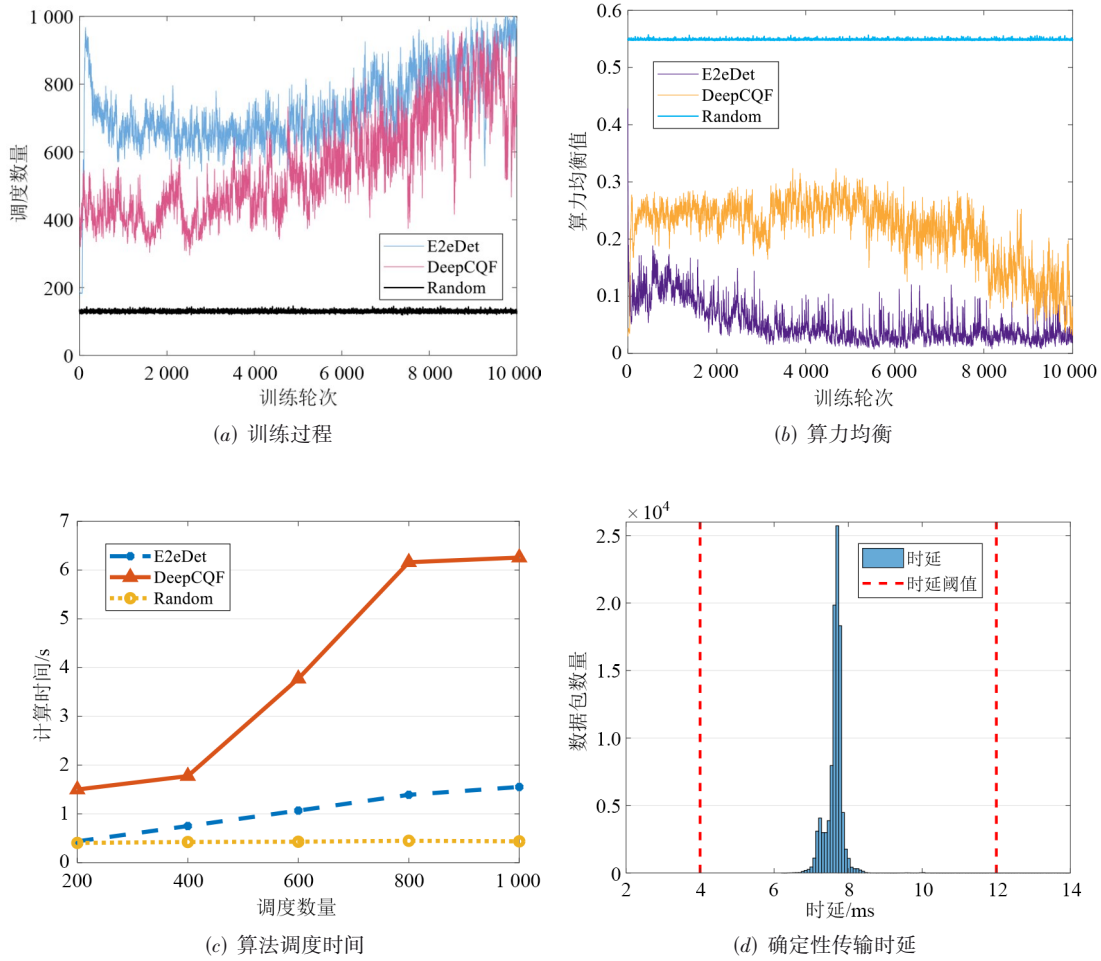


图4 数据流调度结果

71.10% 和 88.34%。

从计算时间来看,图4(c)表明 Random 算法具有最快的计算速度,因为该算法不需要计算复杂的张量参数。相比于 DeepCQF,我们提出的 E2eDet 算法最多可以减少 77.38% 的推理时间,这是因为 DeepCQF 在神经网络推理出初始结果之后,需要再次迭代更新搜寻更优解,增加了其推理时间。另外,随着调度数据流数量的增加,总体计算时间也呈增大的趋势,且 DeepCQF 的计算时间增大得更快。

经过 E2eDet 在广义确定性标识网络中对流量和时隙资源的调度,图4(d)展示了在 TSN 传输网中,数据流经过两跳 TSN 交换机的端到端确定性传输时延。理论上,基于循环队列转发模型的 TSN 网络,经过两跳交换机后,最小和最大的端到端时延分别是 $(N-1) \times T = 4$ ms 和 $(N+1) \times T = 12$ ms,其中 $N=2$ 是跳数, $T=4$ ms 是时隙大小。经调度后,所有数据包的传输时延都不会超过理论阈值,说明 E2eDet 有效利用多确定性要素协同保障了

数据流传输时延的确定性。

4 总结

本文研究基于标识网络的广义确定性技术,其中“广义”的内涵是确定性支持要素增加、确定性网络范围扩大、确定性应用构成复杂。我们首先提出了广义确定性网络的概念和支持资源统一适配的网络架构,架构中定义了各层的功能以及完备标识空间,标识空间的完备性有效克服现有应用与网络适配松散的问题。为了协同调度多种确定性相关资源,我们在智慧化适配层设计了 E2eDet 调度算法。不同于传统的确定性资源调度算法局限于特定的网络架构和单一的确定性资源,E2eDet 可以统一地、端到端地跨越多种异构网络为混合数据流协同分配多种确定性网络资源,从而满足不同服务的差异化确定性需求。实验结果表明,基于所提出的网络架构,E2eDet 算法可以合理分配多种确定性相关资源来提升整体网络性能,并能很好地权衡计

算时间和调度能力. 未来我们将进一步研究和验证广义确定性标识网络在更多复杂异构网络场景下的可行性和有效性.

参考文献

- [1] BELLO L LO, STEINER W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1094-1120.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业互联网时间敏感网络需求及场景: YD/T 4134—2022[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2022: 2-3.
Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. Industrial Internet Time Sensitive Network Requirements and Scenarios: YD/T 4134—2022[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2022: 2-3. (in Chinese)
- [3] 杨明亮, 吴春明, 沈丛麒, 等. 基于 IEEE 802.1 的 TSN 交换机队列调度技术研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(9): 2090-2095.
YANG M L, WU C M, SHEN C Q, et al. Research on queue scheduling strategy on IEEE 802.1 based TSN switch[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(9): 2090-2095. (in Chinese)
- [4] FINN N. Introduction to time-sensitive networking[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 22-28.
- [5] YANG D, ZHANG W T, YE Q, et al. DetFed: Dynamic resource scheduling for deterministic federated learning over time-sensitive networks[J/OL]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10210522>.
- [6] YANG D, CUI E F, WANG H C, et al. EH-Edge: An energy harvesting-driven edge IoT platform for online failure prediction of rail transit vehicles: A case study of a cloud, edge, and end device collaborative computing paradigm[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021, 16(2): 95-103.
- [7] 张宏科, 冯博昊, 权伟. 智融标识网络基础研究[J]. *电子学报*, 2019, 47(5): 977-982.
ZHANG H K, FENG B H, QUAN W. Fundamental research on smart integration identifier networking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(5): 977-982. (in Chinese)
- [8] YANG D, GONG K, REN J, et al. TC-flow: Chain flow scheduling for advanced industrial applications in time-sensitive networks[J]. *IEEE Network*, 2022, 36(2): 16-24.
- [9] 聂宏蕊, 李绍胜, 刘勇. 时间敏感网络中基于 IEEE 802.1Qch 标准的优化调度机制[J]. *通信学报*, 2022, 43(9): 12-26.
NIE H R, LI S S, LIU Y. Optimized scheduling mechanism based on IEEE 802.1Qch standard in time-sensitive networking[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(9): 12-26. (in Chinese)
- [10] YANG D, CHENG Z R, ZHANG W T, et al. Burst-aware time-triggered flow scheduling with enhanced multi-CQF in time-sensitive networks[J/OL]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10101832>.
- [11] YUAN Y Z, CAO X, LIU Z X, et al. Adaptive priority adjustment scheduling approach with response-time analysis in time-sensitive networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(12): 8714-8723.
- [12] JIANG X F, HUANG Y H, LI J J, et al. Spatio-temporal routing, redundant coding and multipath scheduling for deterministic satellite network transmission[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(5): 2860-2875.
- [13] ROST P M, KOLDING T. Performance of integrated 3GPP 5G and IEEE TSN networks[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2022, 6(2): 51-56.
- [14] YANG L, WEI Y F, YU F R, et al. Joint routing and scheduling optimization in time-sensitive networks using graph-convolutional-network-based deep reinforcement learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(23): 23981-23994.
- [15] CHENG Z R, YANG D, ZHANG W T, et al. DeepCQF: Making CQF scheduling more intelligent and practicable [C]//ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2022: 1-6.
- [16] 姜旭艳, 严锦立, 全巍, 等. SSA: 一种面向 CQF 模型的 TSN 资源调度算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 784-791.
JIANG X Y, YAN J L, QUAN W, et al. SSA: CQF-oriented scheduling algorithm in time-sensitive networking [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(6): 784-791. (in Chinese)
- [17] Report ITU. Guidelines for Evaluation of Radio Interface

Technologies for IMT-2020[R]. Geneva: ITU Press, 2017.

- [18] ADAME T, CARRASCOSA M, BELLALTA B. The TMB path loss model for 5 GHz indoor WiFi scenarios: On the empirical relationship between RSSI, MCS, and spatial streams[C]//2019 Wireless Days (WD). Piscataway: IEEE, 2019: 1-8.

作者简介



杨冬 男,1980年出生. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术以及工业互联网、网络智能化技术等. 中国电子学会会员编号: E190035787M.

E-mail: dyang@bjtu.edu.cn



程宗荣 男,1997年2月出生. 北京交通大学博士研究生. 主要研究方向为确定性网络架构及智能化网络资源调度技术.

E-mail: zrcheng@bjtu.edu.cn



田伟康 男,1999年3月出生. 北京交通大学博士研究生. 主要研究方向为未来确定性网络统一资源调度技术以及异构网络人工智能优化算法.

E-mail: weikangtian@bjtu.edu.cn



王洪超 男,1982年出生. 北京交通大学电子信息工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术以及工业互联网、空天地信息网络技术等.

E-mail: hcwang@bjtu.edu.cn



张宏科 男,1957年9月出生. 中国工程院院士. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 移动专用网络国家工程研究中心主任. 主要研究方向为新一代信息网络理论与关键技术. 中国电子学会会员编号: E190004689S.

E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn



谭斌 男,1976年出生. 中兴通讯股份有限公司有线产品架构总工,未来网络技术研究项目经理. 主要研究方向为IP网络、SDN系统架构与技术.

E-mail: klinzmann@hotmail.com



赵志勇 男,1971年出生. 中兴通讯股份有限公司副总裁,技术规划总经理. 主要研究方向为产品研发管理、标准研究和规划工作.

E-mail: zhao.zhiyong@zte.com.cn