

多样化业务需求与全维网络能力的映射



Mapping Between Diversified Service Requirements and Full-Dimensional Network Capabilities

范琮珊/FAN Congshan, 周旭/ZHOU Xu,
任勇毛/REN Yongmao

(中国科学院计算机网络信息中心, 中国 北京 100083)
(Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202201009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220218.0922.002.html>

网络出版日期: 2022-02-18

收稿日期: 2021-12-26

摘要: 提出一种通用的业务需求与网络能力映射方法, 通过网络能力自组织和业务需求自映射灵活适配业务发展需求。构建全维可定义网络能力模型, 抽象和分解网络各层能力, 并从通信主体、网络功能、网络资源、网络安全 4 个维度以及 30 多种具体元素实现网络能力开放可定义和动态演进发展。针对复杂的综合性业务需求, “动态地” 选择和组合网络能力, 对比业务需求与网络能力间匹配度, 采用最优能力组合重构复合型网络服务, 设计直观的 0-1 映射矩阵形式, 支撑映射实现。

关键词: 业务需求; 全维可定义网络能力; 映射; 网络能力组合

Abstract: A general mapping method between service requirements and network capabilities is proposed, which can flexibly adapt to service developing requirements through network capability self-organization and service requirement self-mapping. By abstracting and decomposing the capabilities of each layer of the network, a full-dimensional definable network capability model is constructed to realize the opening definition and dynamic evolutionary development of network capabilities from four dimensions, including communication subjects, network functions, network resources, and network security, with more than 30 specific elements. The proposed mapping method "dynamically" selects and combines network capabilities for complex and comprehensive service requirements. Based on the matching degree calculated between service requirements and network capabilities, the optimal combination of network capabilities is selected to reconstruct composite network functions. An intuitive 0-1 mapping matrix form is designed to support mapping realization.

Keywords: service requirement; full-dimensional definable network capability; mapping; network capabilities combination

近年来, 电子、计算机和人工智能等技术的飞速发展催生了大量新型的网络业务, 远程医疗、车联网、全息通信、虚拟现实 (VR)/增强现实 (AR)、智慧家庭等业务不断涌现。全新业务随着技术的成熟和升级将逐渐普及, 并将改变社会形态与人们的生活方式。与传统网络业务大不相同, 新型业务对未来网络提出更高的要求, 是网络发展的一项重要挑战。以远程手术为例, 医师在远程操作多个协同的医疗设备对患者进行治疗时, 需要与用户的身体直接交互。这对安全性提出极高的要求。治疗过程需要手、眼、耳、鼻等多个器官同时参与控制与反馈。不同类型的信息传输及传输性能也要求精准同步。医疗影像视频传输和手术现场画面的实时观察要求分辨率在 4K 以上, 这对网络的时延及可

靠性要求也很高。未来业务包含的信息维度逐步增加, 协同性逐渐增强, 性能要求也越来越高。因此, 只有实现多种网络能力的编排组合, 才能够有效支撑更精、更尖、更高的网络业务, 提升用户体验质量 (QoE)。

与此同时, 网络的能力也随着技术的进步和硬件的升级不断完善。在传统互联网协议 (IP) 网络的尽力而为转发能力基础上, 源路由、多标识寻址、智能路由、确定性转发、内生安全等全新网络能力先后出现, 打破已有网络能力的单一架构, 不断扩展网络的能力维度, 丰富网络能力的实现形式, 提高网络能力支撑业务的力度。

面向多样化业务需求和差异化网络的能力, 如何实现两者之间的匹配, 并通过组合优化选择合适的网络能力为业务需求提供高效的支撑是一个关键的问题。运营商通过端到端服务质量 (QoS) 管理完成对业务关键质量指标 (KQI) 的

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1800100)

监测和控制,将上层的用户感受折射到业务质量模型,再映射到反映特定网络能力属性的网络关键性能指标(KPI),调整和优化各项指标,满足业务需求,提升QoE^[1]。文献[2]定义视频流和长期演进(LTE)语音服务影响QoS和QoE的KPI与KQI,并分析QoS和QoE之间的数学关系,通过QoS和QoE的关联关系预测达到规定QoE级别的概率,以衡量用户的业务体验。文献[3]利用机器学习的方法分析KQI与KPI之间的关系,得到影响KQI的KPI,以及KPI劣化导致KQI劣化的概率,完成KPI劣化小区感知,实现问题定位,提升网络优化的主动化、事先化、自动化。在大型网络中构建业务需求与网络能力映射关系时,我们可以采用数学建模的方式,即通过系统抽象和数学推导得出映射函数,解决实际问题。文献[4]以网络效用最大化为目标构建从服务到连接和从连接到路径的多对多映射数学模型,将路径带宽合理分配给各个服务,使得所有服务的效用之和达到最优。

已有网络映射的研究主要针对特定场景下局部业务需求与网络能力映射,缺乏普遍适用的业务需求与网络能力映射方法。局部业务需求与网络能力映射的方式操作简单,但适用性差,且只考虑单一的业务需求。随着业务形态的丰富和多样化,业务需求迅速增长且不断复杂化。当前有限数量的网络能力形式单一、动态性差、效能低、运维僵化,直接导致业务需求与网络能力之间的差距日益扩大,难以采用灵活的网络能力组合匹配未来多元化业务的需求。因此,人们急需一种普遍适用的映射机制,以全面覆盖单一化和复杂化业务需求的映射。本文提出一种通用的业务需求与网络能力映射模型,通过网络能力自组织和业务需求自映射灵活适配业务发展需求,基于“以网络为核心”的设计理念,抽象和分解网络各层能力,从通信主体、网络功能、网络资源、网络安全4个维度进行细粒度划分,获得30多种网络能力元素,实现全维度网络能力可定义。灵活地扩展网络能力类型能够支持全维度可定义网络能力模型的动态加载和演进发展。根据不同的业务需求“动态地”选择网络能力,灵活地组合网络能力,分析对比业务需求与网络能力之间的匹配度,采用最优能力组合重构复合型网络服务,可以有效支撑未来网络专业化、多样化业务需求,实现业务需求到网络能力的映射。

1 多样化业务需求

随着网络规模的不断扩张以及经济、政治、教育、医疗等专业领域的发展,新型的业务场景开始涌现。新业务场景可以分为消费类业务场景和生产类业务场景,如图1所示。消费类业务场景目标是为用户提供极致的服务体验,满足人

类社会智慧化需求,包括AR/VR、远程医疗、智慧家庭、全息通信等;生产类业务场景是传统产业与网络基础设施融合的产物,该场景的目标是促进生产力的大力发展,包括车联网、工业互联网、智能电网等。业务类型的丰富对网络提出了多样化功能性需求和性能性需求,具体反映为不同维度、类型的网络能力。新型的业务需求推动技术发展,促进了网络能力的动态演进。

新型业务对网络的功能性需求不断增加,不仅体现在已有功能的全面增强,同时也体现在新的功能性需求。大量的人、手机、传感器、医疗设备,甚至数据、计算作为通信主体接入网络进行通信,网络需要支持数目巨大且类型各异的连接。不同的业务对网络传输质量有不同的需求。例如,安全可靠的远程医疗需要确定性的时延和传输抖动保证,全息通信要求网络支持高通量传输。网络需要根据业务的特性提供定制化、可预测的接入和传输服务,以保证服务质量的确性和差异化。处于动态变化的业务场景,例如车联网,对移动性支持有超高的要求。网络的发展融入了存储和计算,需要实时感知业务需求和网络状态,进行高效全局的资源管控和编排,优化网络利用率,提升QoE。未来业务场景的复杂化导致更多的安全漏洞,无法通过IP网络“补丁式”的安全方案保障,需要设计内生安全机制,使网络具备内在自免疫、可进化的安全能力,提供高可靠性和隐私性服务。

业务的专业化、智能化使得业务的性能需求更加精准和高效。典型的性能需求包括带宽、时延、抖动及丢包率等。业务超高通量传输需要超大带宽的支持。4K视频的传输需要12 Gbit/s的带宽。大规模科学实验数据传输对带宽的需求已达到100 Gbit/s。抖动是与时延密切相关的业务需求。降低时延、保证有界抖动有助于提供高准确性和高可靠性服务。远程医疗、车联网、工业互联网等业务有明确的端到端时延、抖动的需求:远程手术要求网络传输的基础时延控制在200 ms以内;车联网自动驾驶要求端到端时延小于5 ms;工业互联网的控制业务要求微秒级的时延抖动。精细化控制类业务,比如工业控制、智能电网继电保护等,对丢包率敏感。关键指令的丢失将导致严重后果。因此,精细化控制类业务要求丢包率控制在 10^{-3} 以下^[5]。

2 全维可定义网络能力

网络技术的发展带来丰富的网络能力。网络维度不断扩展,能力逐步增强。然而,当前网络能力结构僵化、提供方式单一、协调性差,导致网络对新型业务的支持能力低下。为此,本文打破传统面向终端设计网络能力的方式,以网络为中心,构建全维可定义网络能力模型,抽象分解网络各层

能力，细粒度划分网络能力的维度和类别，支持网络能力的灵活扩展，实现多元化网络能力的开放可定义和动态演进发展，为业务需求与网络能力的映射奠定基础^[6]。

全维可定义网络能力模型构建网络能力空间，如图2所示。整体空间划分通信主体、网络功能、网络资源、网络安全4个维度。每个维度包括不同网络能力类型，一种能力类型支持多种实现形式的网络能力，一种能力类型支持多种实现形式的网络能力，并能及时删除旧网络能力，以保持网络能力模型的动态可扩展性。下面我们对每个维度做具体说明。

(1) 通信主体

通信主体是指网络中参与数据传输行为的主体，包括数据发送方、转发方和接收方。不同的通信主体采用不同的身份标识 (ID) 进行数据传输。当前网络采用IP地址作为寻址标识。随着工业互联网、卫星网络、车联网等多元化网络

融合与互联需求的发展，通信主体的种类不断丰富，支持人 (身份)、位置 (经纬度、速度、方向)、服务 (应用)、物 (物联网标签)、内容 (视频、文件、图片) 等多样化标识并存，实现了大规模网络设备和元素的互通。

(2) 网络功能

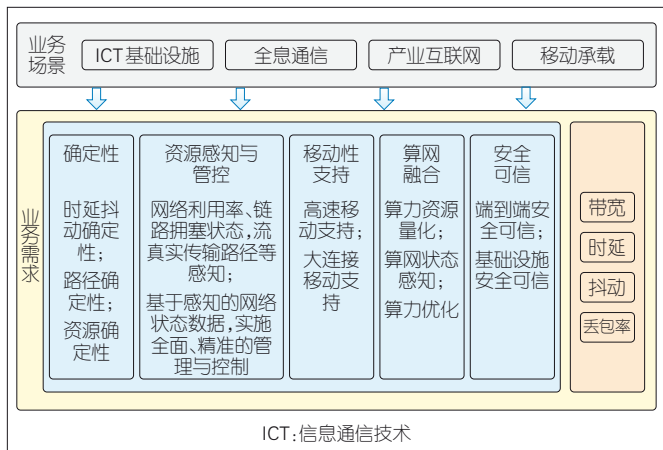
网络功能是指数据在通信主体间完成传递转发设备所承载的功能，包括寻址 (定长寻址、变长寻址)、路由 (距离矢量路由、链路状态路由)、转发 (尽力而为转发、约束路径转发)、QoS队列 (先进先出、优先级队列、加权公平队列)、拥塞控制 (基于显示拥塞反馈、量化拥塞通知) 等能力。随着技术的发展，网络功能不断优化和完善。面对海量的异构通信主体，网络支持多模式接入和连接。为满足专业化、精细化及差异化的业务需求，网络提供可规划、可预期和可定制的数据传输，以保障时延、吞吐量、抖动、丢包率等性能指标，提升用户体验。

(3) 网络资源

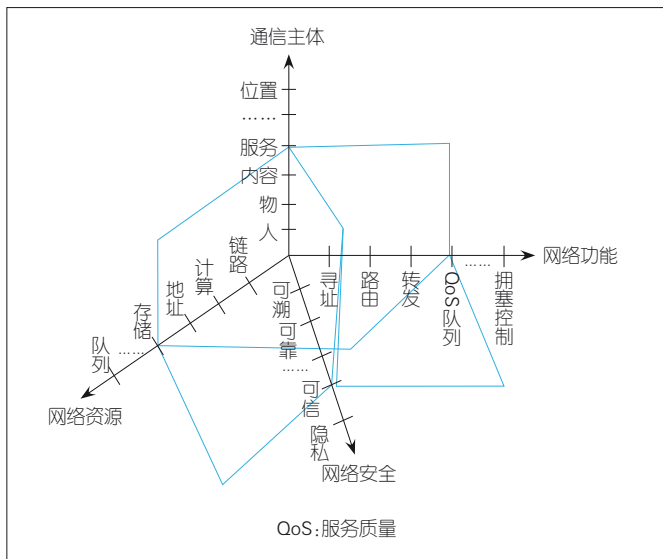
网络资源是指数据传输依赖的资源，包括链路 (无线、光纤、电缆)、计算 (边缘计算、云计算)、存储 (内存、硬盘)、地址 (互联网协议第4版、互联网协议第6版) 等。报文中分配的地址占用地址空间资源，数据在通信主体间传输时占用带宽形式的链路资源。转发设备采用网络处理器及片上内存的计算和存储资源处理报文。硬件升级与软件优化导致网络资源发生了巨大的变化：资源类型不断丰富，多种异构资源并存。资源在网络中的部署位置比较灵活，适合协同调度。资源容量得到提升，体积变小，便于处理。

(4) 网络安全

网络安全维度的网络能力能够保障网络设施、信息和传输的安全，包括可信性 (源地址验证、身份验证)、隐私性 (加密)、可靠性 (完整性校验) 和可溯源性 (概率包标记法、日志记录)。可信性保证网络信息能够被授权实体访问并合法使用；隐私性保护能够防止信息泄露及非法利用；可靠性通过实时监测，解决网络异常，保证高效正常运行；可溯源性在面对网络攻击时能够快速定位和追踪攻击的源头。随着业务场景的复杂化，外挂式安全技术无法应对网络协议不统一、终端多样化带来的安全隐患，亟须采用内生安全机制^[7]。



▲图1 多样化业务需求



▲图2 全维可定义网络能力

3 业务需求到网络能力的映射

业务需求与网络能力映射是映射概念在网络服务业务中的具体化。在互联网中，不同业务面临差异化需求。单个业务实现需要满足的所有条件形成业务需求集合，集合中的每个元素代表一项具体的业务需求。相应地，网络的快速演

进不断丰富网络能力，聚集网络具备的全部能力并构成全维网络能力集合。集合中的每个元素代表一项网络支持能力。业务需求与网络能力映射是为了利用特定网络能力支持业务实现，需要在业务需求集合和网络能力集合两者的元素之间建立对应关系。这种对应关系体现在：一项业务需求需要通过一系列网络能力才能得到满足，同时一种网络能力能够支持多种业务需求。通过选择和组合适当的网络能力，依据合理的顺序执行网络能力，可满足业务需求，实现业务需求到网络能力的映射。

从业务使用者（用户）的角度看，多样化业务需求需要选择合适的网络能力。通过业务需求和网络能力映射，用户从网络运营商提供的可选网络能力方案中选择一种，并为相应的网络能力付费，支持业务实现。从网络运营商的角度，网络具备全维能力。不同的网络能力对业务需求的支持度不同。通过业务需求和网络能力映射，网络运营商为用户提供满足业务需求的网络能力方案和定价，以实现网络能力商品化。

3.1 映射要素

业务需求与网络能力映射的3个要素是原象、象和映射法则。其中，原象是业务实现应该满足的需求元素，象是网络具备的能力元素，映射法则是指原象和象之间对应关系的生成原则。映射法则的产生包括映射形式和映射机制两部分。映射形式包括原象与象一对一、多对一、一对多和多对多4种映射关系。相较于原始的映射定义，映射形式扩展了一对多、多对多两种。映射机制可解决如何将原象和象代表的业务需求元素与网络能力元素进行合理对应的问题。

3.2 映射形式

假设业务实现 D 具备 M 项业务需求，采用集合表示为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 。网络具备 N 项能力，采用集合表示为 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。定义矩阵 $A = (A_{dr}, d \in D, r \in R)$ 为业务需求和网络能力的映射矩阵。 $A_{dr} = 1$ 表示网络能力 r 能够支持业务需求 d ； $A_{dr} = 0$ 表示网络能力 r 不能支持业务需求 d 。业务需求与网络能力间对应关系也可以描述为： $D = A \times R^T$ 。

图3表示业务需求 $D = \{D_1, D_2, D_3\}$ 与网络能力 $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ 映射关系的示例。对应的0-1映射矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

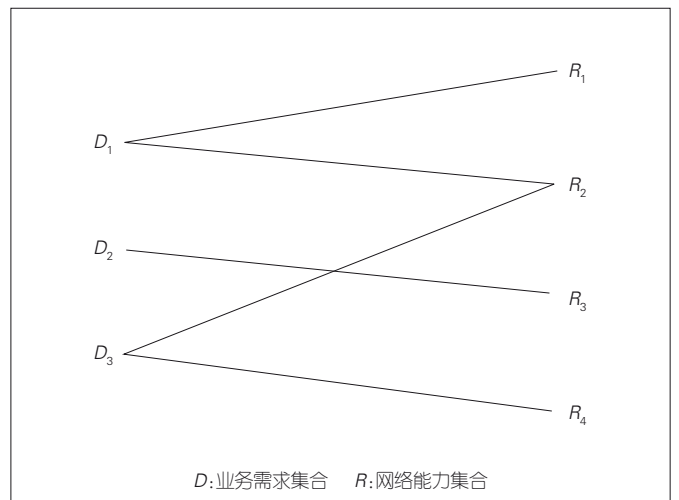
0-1矩阵形式能够直观地表示业务需求和网络能力之间

的复杂映射关系，为灵活的网络能力组合满足业务需求提供有效支撑。矩阵的行代表映射的原象，矩阵的列代表映射的象。矩阵中“1”在行向量和列向量的位置（由下标决定）决定了映射函数的原象和象的对应关系。0-1映射矩阵行向量或列向量中“1”的总数量反映了不同的映射形式。当映射矩阵列向量中“1”的总数量多于一个时，映射形式为多对一，表示一项业务需求需要多种网络能力才能够满足；当映射矩阵行向量中“1”的总数量多于一个时，映射形式为一对多，表示一种网络能力能够支撑多项业务需求；当映射矩阵中所有列向量和行向量的“1”总量都为一个时，映射形式为一对一，表示业务需求与网络能力是一一对应的；当映射矩阵列向量和行向量中的“1”的总数量均多于一个时，映射形式为多对多，表示多项业务需求需要多种网络能力才能够满足。

3.3 映射机制

本文基于业务需求与网络能力间的匹配度设计映射机制。当业务实现规定需求指标时，业务需求与网络能力间的匹配度被定义为：在当前网络状态下，给定网络能力所获得的业务需求指标与规定需求指标间的差值。针对功能性业务需求，当网络执行业务需求规定的网络能力时，定义指标的差值为0，否则差值为1；针对性能性业务需求，定义指标的差值为可达性能指标值与规定性能指标值间的差值。

假设业务 D 规定的需求指标为 $Ind = [Ind_1, Ind_2, Ind_3, \dots, Ind_M]$ 。支持业务实现的网络能力集合共有 K 种，表示为 $R_k, 1 \leq k \leq K$ 。采用 R_k 获得的业务需求指标为 $Ind(R_k) = [Ind_1(R_k), Ind_2(R_k), Ind_3(R_k), \dots, Ind_M(R_k)]$ 。闵可夫斯基距离可用来衡量两个需求指标向量间的相似度，即业务



▲图3 业务需求与网络能力映射关系示例

需求与网络能力的匹配度:

$G_k = \sqrt[p]{\sum_{l=1}^M \alpha_l (Ind_l(R_k) - Ind_l)^p}$, 其中 $W = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\}$ 是业务需求集合 D 对应的优先级权重系数集合。 α_l 数值越大, 优先级越高, 且满足 $\sum_{l=1}^M \alpha_l = 1$ 。对比 K 个闵可夫斯基距离值, 最小值 $k^* = \min_k G_k$ 对应的网络能力为与业务需求匹配度最高的网络能力 R_{k^*} 。利用业务需求集合 D 和网络能力集合 R_k 生成映射矩阵。

3.4 映射步骤

基于映射三要素, 业务需求与网络能力的映射步骤包括原象生成、象生成和映射法则生成3个步骤, 如图4所示。

第1步: 原象生成

针对用户侧提交的业务需求, 拆分复合型业务需求, 聚类相似的业务需求, 形成业务需求集合 D ; 根据业务的特性, 生成业务需求指标集合 Ind 以及需求权重因子集合 W 。

第2步: 象生成

网络能力随着业务执行而动态变化, 为了更加准确地匹配业务需求, 需要提供实时的网络能力状态。利用场景感知等方式, 获得动态的网络能力空间 Spa ; 利用集合标识网络能力 $C = \{C_1; C_2; \dots; C_l\}$, 其中 C_i 表示第 i 种维度的网络能力, 包括通信主体、网络功能、网络资源、网络安全等多个维度。每个维度的网络能力具体包括多种网络能力元素。

第3步: 映射法则生成

映射法则的生成主要包括网络能力组合、业务需求与网络能力匹配度计算和映射矩阵的生成。

(1) 网络能力编排

网络能力组合过程包括: 依次分析业务需求 d_m , 从网

络能力空间的各维度中选择支持业务需求的单个或多个网络能力, 形成网络能力组合 $R^m = \{r_j, r_j \in Spa\}$; 遍历业务需求集合, 将 M 项网络能力组合合并, 保留具有关联关系的网络能力, 删除具有互斥关系的网络能力, 形成全新的网络能力集合 $R_k = \bigcup_{m=1}^M R^m$ 。由于存在不同类型的网络能力均支持同一业务需求的情况, 因此网络能力组合 R^m 的数量可能大于1。通过灵活编排, 可最终获得 K 个网络能力组合 R_k , $1 \leq k \leq K$ 。

(2) 业务需求与网络能力匹配度计算

假设业务 D 规定的的需求指标为 $Ind = [Ind_1, Ind_2, \dots, Ind_M]$, 网络能力组合 R_k 获得的业务需求指标为 $Ind(R_k)$, 我们利用闵可夫斯基距离 G_k 来衡量需求指标向量 $Ind(R_k)$ 和 Ind 间的距离。

(3) 映射矩阵生成

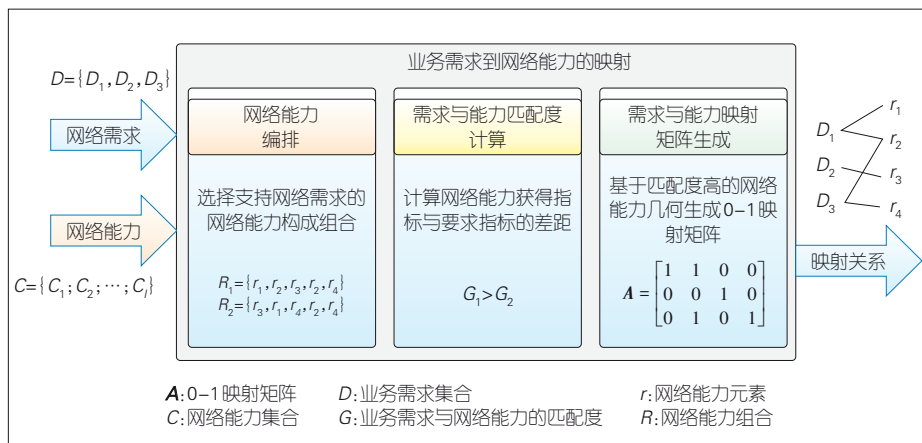
对比 K 个闵可夫斯基距离值, 选择最小值 $k^* = \min_k G_k$ 对应的网络能力为与业务需求匹配度最高的网络能力 $R_{k^*} = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ 。利用业务需求集合 D 和网络能力集合 R_k 生成 M 行、 N 列的映射矩阵 A 。矩阵元素 $A_{m,n} = 1$ 表示网络能力 r_n 支持业务需求 d_m , $A_{m,n} = 0$ 表示网络能力 r_n 不支持业务需求 d_m 。

4 映射实例

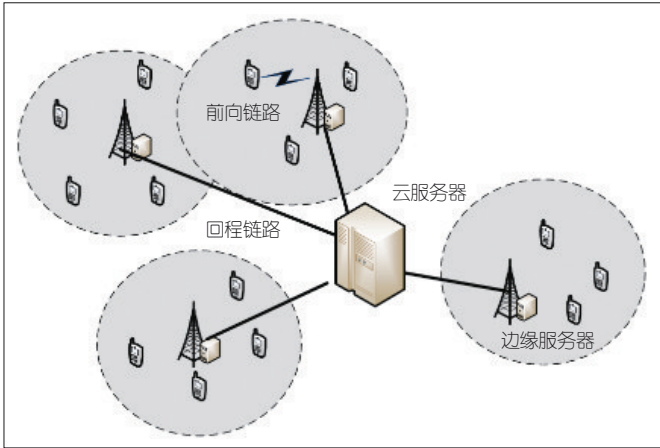
本节以边缘计算场景下任务卸载调用网络资源维度的网络能力来分析业务需求与网络能力映射。任务卸载主要涉及计算资源和链路资源。其中, 计算资源支持边缘计算、云计算和云边协同计算3种网络能力元素, 链路资源包括无线前向链路和光纤回程链路2种网络能力元素。

如图5所示, 部署区域中共有1个云服务中心和4个基站。基站通过光纤回程链路连接到云中心, 并且回程容量为 $R_{um} = 10 \text{ Mbit/s}$ 。基站具备边缘计算能力, 用户均匀地分布在基站覆盖范围中。由于用户侧计算容量有限, 任务将被卸载至边缘服务器或者云中心执行。规定数据包的产生传输均以时隙 $T_s = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$ 为单位。用户在时隙 T_s 以概率 δ 产生数据包, 数据包大小为 $F = 20 \text{ kbit}$ 。任务到达边缘服务器或云服务器的过程服从泊松分布, 到达率为 λ_{mec} 和 λ_C 。

边缘服务器和云服务器具备不同



▲图4 业务需求与网络能力的映射步骤



▲图5 边缘计算任务卸载场景

的计算容量。数据包在服务器中的服务时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布，其中 μ 表示服务速率，并满足 $\mu_C = 2\mu_{mec} = 3 \text{ packet/slot}$ 。服务时间的概率密度函数 (PDF) 表示为： $f_{T_{\text{服}}}(t) = \mu_x \exp(-\mu_x t), x \in \{mec, C\}$ 。

任务卸载的开销与数据包到达率有关。设置边缘服务器与云服务器的单位开销系数为 $\varepsilon_x, x \in \{mec, C\}$ ，并且满足 $\varepsilon_C = \varepsilon_{mec} = 2 \text{ unit/packet}$ 。用户侧提出业务需求：以最小化时延和最小化开销为目标实现数据包处理，并且业务需求以最小时延为主，规定优先级权重系数 $\alpha = 0.7$ 。

网络运营商为用户的业务需求提供了3种网络能力组合。

(1) 边缘计算：用户通过无线链路将数据包传输至边缘服务器，完成数据包处理；

(2) 云计算：用户通过无线链路将数据包传输至基站，基站通过回程链路将数据包上传至云服务器，完成数据包处理；

(3) 云边协同计算：用户通过无线链路将数据包传输至基站，同时数据包以协同概率 θ 选择边缘服务器进行处理，并以概率 $(1 - \theta)$ 选择通过回程链路上传至云服务器进行处理^[8]。

采用随机几何理论和排队论分析任务卸载的时延和开销性能，通过仿真对比3种网络能力组合的匹配度，可实现不同应用场景下业务需求与网络能力的映射。

边缘服务器和云服务器的数据包处理符合 $M/M/1$ 的队列系统。数据包处理时延包括排队时延和服务时延。根据排队论理论^[9]，平均处理时延为 $1/(\mu - \lambda)$ ，其中 λ 和 μ 分别表示数据包到达率和服务速率。

相应地，第1种网络能力方式的总时延等于边缘计算的平均处理时延：

$$T_1 = T_{mec} = \frac{1}{\mu_{mec} - \lambda_{mec}} \quad (1)$$

第2种网络能力方式的总时延等于云计算的平均处理时延与回程链路传输时延之和。任务到达云服务器的速率服从泊松过程，满足 $\lambda_C = 4\lambda_{mec}$ 。总时延表示为：

$$T_2 = T_C + T_{back} = \frac{1}{\mu_C - \lambda_C} + \frac{F}{R_{back}} \quad (2)$$

第3种网络能力方式的总时延包括边缘计算时延和云计算时延两种情况，具体可表示为：

$$T_3 = \theta \left(\frac{1}{\mu_{mec} - \lambda_{mec}} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{1}{\mu_C - \lambda_C} + \frac{F}{R_{back}} \right) \quad (3)$$

计算卸载的开销与服务器的数据包到达率有关，第1种网络能力方式的开销等于边缘计算的开销：

$$C_1 = C_{mec} = \varepsilon_{mec} \lambda_{mec} \quad (4)$$

第2种网络能力方式的开销等于云计算的开销：

$$C_2 = C_C = \varepsilon_C \lambda_C \quad (5)$$

第3种网络能力方式的开销等于边缘计算开销和云计算开销之和：

$$C_3 = \theta \varepsilon_{mec} \lambda_{mec} + (1 - \theta) \varepsilon_C \lambda_C \quad (6)$$

用户的业务需求是保证最小化时延和开销。以时延和开销为指标，基于两者的优先级关系设计业务需求与网络能力的匹配函数 $G(z) = \alpha T(z) + (1 - \alpha)C(z)$ 。将公式 (1) 和 (4)、(2) 和 (5)，以及 (3) 和 (6) 分别代入匹配函数，以仿真分析3种网络能力方式在不同数据包到达率设置下的匹配函数。

图6对比了时延指标需求优先级权重系数分别为 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 0.7$ 的匹配函数。 $\alpha = 1$ 是传统网络能力满足单一业务需求的方法，只关注时延指标。从图6中可以看出，只有在数据包到达率极低的情况下，选择边缘计算获得的匹配函数最小，即 $\lambda_{mec} \leq 0.2 \text{ packet/slot}$ 。当增加数据包到达率时， $\lambda_{mec} > 0.2 \text{ packet/slot}$ ，选择云计算获得的匹配函数最小；由于大量数据包卸载到中心云服务器会增加服务开销，同时导致数据包堆积，因此云计算网络能力组合不适用于业务密集和负载均衡的场景。

综合考虑时延和开销的需求指标，在 $\alpha = 0.7$ 的情况下，当数据包到达率增加时，匹配度值会随着时延和开销的增加而不断增加。当数据包到达率较小时， $\lambda_{mec} < 0.5 \text{ packet/slot}$ ，选择边缘计算获得的匹配函数最小。原因在于边缘服务器距离用户近，服务器计算容量足够支撑少量的计算任务，并且边缘服务器的开销远小于云中心服务器。在稀疏业务场景下，用户可以选择第1种网络能力方式，就

近采用边缘服务器卸载计算任务。

当数据包到达率逐渐增大时，即 $\lambda_{mec} \geq 0.5 \text{ packet/slot}$ ，将数据包卸载到计算容量较小的边缘服务器会导致数据包处理堆积，排队等待时长增加，从而导致总时延增加。当选择将数据包卸载到云服务器时，虽然回程链路传输会带来额外的时延，并且中心云服务器的开销大，但是云服务器的大计算容量能够补偿回程链路带来的时延，减轻开销的影响。在密集业务场景下，用户可以选择第2种网络能力方式，采用中心云服务器卸载计算任务。

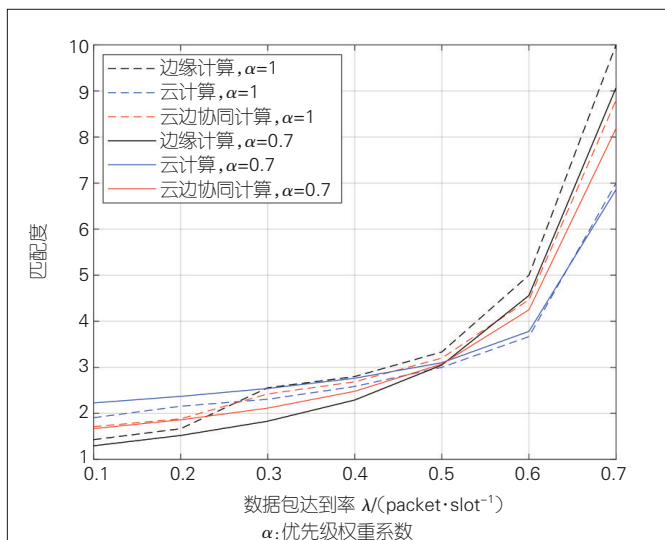
网络中数据包的生成和处理都处于动态变化中，服务器的负载也随之变化。图6中，云边协同计算方式的匹配度位于边缘计算和云计算两者中间。当网络中云中心服务器负载较大，并且数据包的到达率高时，可以选择云边协同计算的方式，满足用户最小化时延和开销的要求，同时通过调节协同概率 θ ，实现网络的负载均衡。

以负载均衡场景下的任务卸载为例，业务需求集合表示为 $D=\{\text{时延最小化, 开销最小化}\}$ ，网络能力组合表示为 $R=\{\text{边缘计算, 云计算, 前向链路, 回程链路}\}$ ，业务需求与网络能力的映射矩阵表示为：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

5 结束语

本文提出一种普遍适用的业务需求与网络能力的映射方法。该方法可构建全维可定义网络能力模型，从通信主体、网络功能、网络资源、网络安全等多个维度细粒度划分和定



▲图6 匹配度随数据包到达率的变化趋势

义网络能力，支持网络能力的扩展演进；针对多样化业务需求，通过动态网络能力组合、业务需求与网络能力匹配度计算和映射矩阵生成3个具体步骤形成业务需求到网络能力的映射，以灵活适配业务发展需求。

参考文献

- [1] 倪萍, 廖建新, 王纯, 等. 一种KPI映射到KQI的通用算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10): 2503-2506
- [2] VASER M, FORCONI S. QoS KPI and QoE KQI Relationship for LTE Video Streaming and VoLTE Services[C]/2015 IEEE 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. IEEE, 2015: 318-323. DOI: 10.1109/NGMAST.2015.34
- [3] 杨磊. 基于FPgrowth 机器学习的影响用户感知无线根因问题的快速定位方法研究 [J]. 江苏通信, 2019, 35(2): 56-62. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9513.2019.02.017
- [4] 李世勇, 秦雅娟, 张宏科. 基于网络效用最大化的一体化网络服务层映射模型 [J]. 电子学报, 2010, 38(2): 282-289
- [5] 蒋林涛. 数据网的现状及发展方向 [J]. 电信科学, 2019, 35(8): 1-15. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019202
- [6] 范琼珊, 周旭, 覃毅芳, 等. 全维可定义网络能力 [J]. 电信科学, 2021, 37(10): 31-38. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021235
- [7] 郭少勇, 齐苑苑, 代美玲, 等. 面向智能共享的内生可信网络体系架构 [J]. 通信学报, 2020, 41(11): 86-98. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020193
- [8] MUKHERJEE S, LEE J. Edge computing-enabled cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(4): 2884-2899. DOI: 10.1109/TWC.2020.2968897
- [9] KLEINROCK L. Queueing systems: theory, vol. 1 [M]. New York: Wiley, 1975

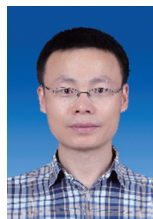
作者简介



范琼珊，中国科学院计算机网络信息中心助理研究员；主要研究领域为未来网络和边缘计算；已发表论文10余篇。



周旭，中国科学院计算机网络信息中心研究员、先进网络与技术发展部主任；主要研究领域为未来网络架构、5G、边缘计算等；主持科技部、工信部、发改委、中科院等重大项目10余项；获得部级科学技术奖一等奖1次、二等奖1次；发表论文60余篇，申请专利50余项，主持或参与制定国际标准和行业标准5项。



任勇毛，中国科学院计算机网络信息中心研究员、先进网络部网络体系结构与系统实验室主任；主要研究领域为计算机网络协议及体系结构；主持国家自然科学基金2项、北京市自然科学基金2项，国家重点研发计划子课题、国家科技重大专项子课题等10余项科研项目；发表论文70余篇，申请发明专利10余项，提交ITU-T国际标准提案2项。