



专题：数据网与算力网络

全维可定义网络能力

范琮珊, 周旭, 覃毅芳, 李泰新

(中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100190)

摘要: 针对现有网络能力提供形式单一、动态性差、效能低、运维僵化以及难以适应未来复杂场景下专业化、个性化业务需求的问题, 提出了全维可定义网络能力。基于“以网络为核心”的设计理念, 开放网络各层能力, 实现通信主体、网络功能、网络资源、安全等全维度网络能力可定义, 支持动态加载和演进发展。通过业务需求自映射和网络能力自组织灵活适配业务发展需求, 以多种接口形式主动向终端业务输出多样化网络内生能力, 自然适应未来业务的复杂不确定演进。

关键词: 全维可定义; 以网络为核心; 网络能力; 业务需求

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021235

Full-dimensional definable network capabilities

FAN Congshan, ZHOU Xu, QIN Yifang, LI Taixin

Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: To solve the problems of single form of existing network capabilities, poor dynamics, low efficiency, and difficulty in adapting to the needs of specialized and personalized services in complex scenarios in the future, a full-dimensional definable network capability model was proposed. Based on the design concept of “network centric”, each layer of the network is opened up to realize the definition of full-dimensional network capabilities such as communication subjects, network functions, network resources, and security, and supports dynamic loading and evolutionary development. Through self-mapping of service requirements and self-organization of network capabilities, it can flexibly adapt to service development needs, and actively output diversified network endogenous capabilities to terminal services in a variety of interface forms, which will naturally adapt to the complex and uncertain evolution of future services.

Key words: full-dimensional definable, network centric, network capability, service requirement

1 引言

网络技术的不断变革与创新推动了数据网络

的演进。以明确的技术边界为基础, 数据网络经历了 5 个阶段的发展^[1], 如图 1 所示。网络 1.0 时代是基于电路交换的模拟信号通信, 是网络的最

收稿日期: 2021-09-10; 修回日期: 2021-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFB1800100)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1800100)



初形态。网络 2.0 时代引入具备划时代意义的同步时分复用 (synchronous time-division multiplexing, TDM), 采用数字信号完成信息传输。为了支撑语音、图像、视频等多媒体业务在网络中的高速传输, 网络 3.0 时代采用异步传送模式 (asynchronous transfer mode, ATM), 极大地提高了网络资源利用率。随后, 电子邮件、在线购物、电子银行、社交网络、视频直播等业务不断涌现, 网络 4.0 时代开启 IP 网络时代。区别于面向连接的 ATM 分组交换技术, IP 网络采用面向无连接的数据包交换技术, 独特的开放性、中立性和简洁高效设计使其成为现代通信网络的核心。网络技术持续发展, 新兴技术如云计算、大数据、人工智能的出现加速了网络的新一代革命。远程医疗、无人驾驶、AR/VR、全息通信、智慧家庭等业务为人们带来全新的沟通与生活方式, 也对网络提出了极大的挑战。网络 5.0 时代需要满足网络与社会深度融合发展带来的专业化服务承载需求^[2]。

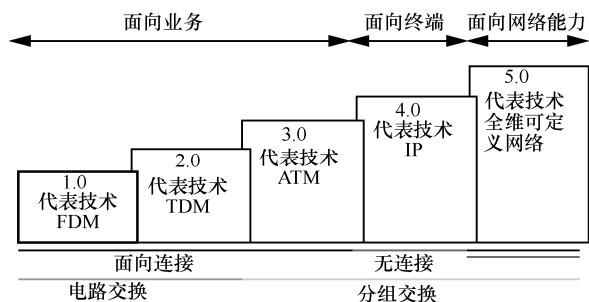


图1 网络与能力发展

在数据网络跨代发展过程中, 网络 1.0~3.0 时代设计思路是面向业务的, 即网络与业务高度耦合, 这种设计适合数据网络发展刚起步时业务种类单一的特点, 终端具备简单的能力, 网络仅提供最基本的连接能力, 结合业务设计网络可以提供高效的服务。其中, 为更好地支持多媒体业务, 网络 3.0 时代的网络能力有所增强, 但受限于有限数量的业务类型, 网络能力提升程度较小。当网络上承载的主要业务发生变化时, 面向业务设计网络形态会发生质的变化。随着业务多样化

发展, 面向业务的网络设计思路限制了业务的发展。因此, 网络 4.0 时代解耦了网络和业务, 采用了“简单网络+复杂终端”的设计思路。一方面, 网络提供基本的“尽力而为”传输能力, 协议设计简单, 设备成本低, 容易标准化, 便于 IP 网络快速部署及互联互通。另一方面, 由于网络能力简单, 为了支持复杂多样的业务类型, 终端能力需要不断增强。终端的发展直接推动网络发展 (技术、规模)、PC 互联网、移动互联网; 从端侧/应用来看, 获取一个 IP, 接入网络, 可以在端侧 (传输层、应用层) 进行极致优化。IP 网络解耦网络和业务的设计思路, 使得业务类型挣脱网络束缚, 得到了极大的丰富和发展。

然而, 随着网络阶段的演进, 网络环境更加复杂多变, 应用的端到端连接面临的网络越来越复杂, 仅靠端侧“猜”不可能适应所有网络条件。业务要求不断提升, “尽力而为”的转发方式难以满足业务复杂需求, 应用层需要单方面承担大量的优化与升级工作, 为网络带来沉重的负担。与此同时, 终端接入的多样化导致终端能力两级分化, 更多的弱终端 (物联网)、专有终端 (工业互联网) 受限于处理能力、供电等因素, 只能高度专用化设计, 处理专用化业务, 无法胜任复杂的连接管理、性能优化等任务。网络 4.0 时代“单一 IP+带宽”形式的网络能力供给形式不再适用。

业务的发展和技术的革新推进了网络 5.0 的进程。分段路由 (segment routing, SR)、差异化传输、边缘计算、源地址验证等技术的创新逐步丰富与完善网络能力, 一种网络能力具有多种实现形式, 网络能力得到极大的扩展。针对当前网络能力提供形式单一、动态性差、效能低、运维僵化以及难以适应未来复杂场景下不同类型、层次用户对智慧化、个性化及多元化业务的差异化需求, 本文提出了全维可定义网络能力架构, 以网络为主体, 主动向终端业务进行全方位网络能力的开放, 支持多样化网络能力全维度的定义。

允许能力多样化呈现,支持弱终端与强终端并存,适配不同的终端类型。支持网络技术创新推动网络能力的演进。通过灵活网络能力选择与组合,满足动态的复杂化业务需求,极大地提升用户满意度,同时实现网络整体优化,提高网络运营效益。

2 全维可定义网络能力

随着网络业务形态的不断丰富,业务对网络的需求越来越多样和多变。而传统网络基础结构僵化、网元形式简单、资源配置单一,网络能力对业务需求的适应性差,导致网络对融合、泛在、质量、安全、扩展、移动等的支持能力低下,业务需求与网络能力之间的差距更加显著。

如图 2 所示,全维可定义网络能力提出“以网络为核心”的设计理念,强调以网络为能力和责任主体,通过打破传统网络刚性架构,建立网络各层能力开放、灵活、通用架构,实现通信主体、网络功能、网络资源、安全等全维度可定义,支持各种能力在架构中动态加载和演进发展。通过业务需求自映射和网络能力自组织灵活适配业务发展需求,以多种形式主动向终端业务输出多样化网络内生能力,自然适应未来业务的复杂不确定演进,降低端侧复杂度及能耗开销,提升服务质量、网络效率,保障可信安全,端网协同构建全新的网络空间秩序^[3]。

(1) 全维可定义网络能力呈现

为详细刻画网络能力,形成统一的评价体系,

构建通用的全维可定义网络能力模型,实现网络各层能力开放,支持通信主体、网络功能、网络资源、安全等全维度可定义,每个维度的网络能力实现多样化呈现^[4]。通过不同维度网络能力的互联互通与协作组合为用户提供多元化服务,有效支撑未来网络专业化、差异化业务需求。

(2) 多层次网络能力接口调用

全维可定义网络能力在网络为核心的思想指导下,解耦业务和网络,以边缘为入口,增加网络能力调用方式。网络开放多维能力给业务,更加主动地参与到业务构建中,端网协同满足应用需求。网络提供不同层次的能力封装接口,允许业务以更加友好的方式向网络表达需求。

(3) 灵活网络能力映射

针对未来工业互联网、AR/VR、全息通信、智能家居等个性化业务需求,对网络能力的维度、要素和形式进行全方位的分解和定义,开发网络能力间的互联互通,实现无缝切换。选择最优网络能力,通过各种网络能力的灵活组合映射适配差异化业务需求,实现高效率、大容量、低时延、高可靠的全业务承载。

3 全维可定义网络能力模型

随着网络技术的发展,软件与硬件快速升级进步,网络具备的能力不断丰富。面向网络多样化网络能力,构建全维可定义网络能力模型,支持多元化网络能力的开放可定义,维护能力动态演进发展,有助于实现智慧网络管理与运维,灵

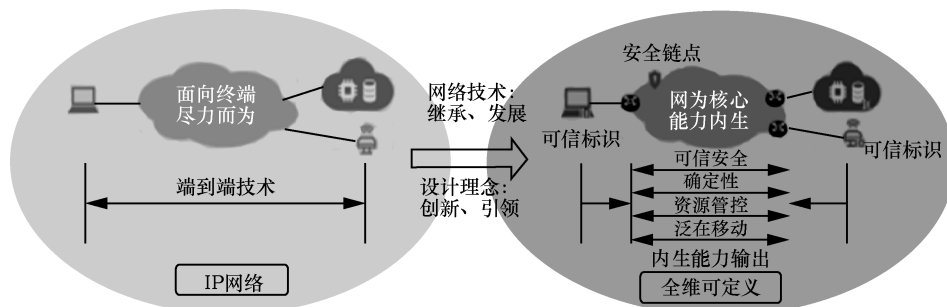


图2 全维可定义网络能力



活适配复杂多样的业务发展需求,提升用户体验。

全维可定义网络能力模型采用层次模型的方式定义,构建网络能力空间,如图3所示,从通信主体、网络能力、网络资源、网络安全等多个维度刻画网络可提供的能力,每个维度划分不同的能力类型,一种能力类型包括多个具体的能力元素。全维可定义网络能力模型利用向量集合标识网络能力空间 $\text{spa} = \{\text{ID}; \text{net}; \text{res}; \text{sec}; \dots\}$, spa 表示能力空间, $|\text{spa}|$ 表示能力空间的维度值,分为通信主体 (ID)、网络能力 (net)、网络资源 (res)、网络安全 (sec) 等多个维度。

每个维度网络能力由不同网络能力类型组成,为差异化业务需求提供相应的功能支撑。利用向量集合标识不同维度的网络能力类型,通信实体 $\text{ID} = \{\text{user}, \text{loc}, \text{dev}, \text{con}, \text{ser}, \dots\}$, 网络功能 $\text{net} = \{\text{addressing}, \text{routing}, \text{forwarding}, \text{QoS}, \dots\}$, 资源 $\text{res} = \{\text{stor}, \text{comp}, \text{link}, \text{addr}, \dots\}$, 安全 $\text{sec} = \{\text{rel}, \text{trust}, \text{privacy}, \text{trace}, \dots\}$ 。如集合 ID 表示通信实体维度包含的网络能力类型,分别为人 (user)、物 (devID)、内容 (conID)、服务 (serID)、位置 (loc), $|\text{ID}|$ 表示通信实体维度支持的通信主

体类型数量。一种网络能力类型包括多种的网络能力元素,形成多样化网络能力实现形式。利用集合标识具体的网络能力元素,如网络采用内容 (conID) 作为通信主体时,针对文件、视频、图片等不同主体实现形式,具有不同的标识、解析、通信等方式, $\text{conID} = \{\text{conID}(1), \text{conID}(2), \dots\}$ 。

全维可定义网络能力模型也可以采用统一的矩阵形式表示:

$$C = \begin{bmatrix} \text{user} & \text{loc} & \text{devID} & \text{conID} & \dots \\ \text{addressing} & \text{routing} & \text{forwarding} & \text{QoS} & \dots \\ \text{stor} & \text{comp} & \text{link} & \text{addr} & \dots \\ \text{rel} & \text{trust} & \text{privacy} & \text{trace} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,矩阵的行表示网络能力空间的维度,列表示网络能力的类型,矩阵中的每个值都是一个集合,包括不同的网络能力元素。具体的网络能力有以下4个方面。

(1) 通信主体

全维可定义网络能力模型的通信主体维度涵盖网络中数据传输的主体参与者,包括数据的

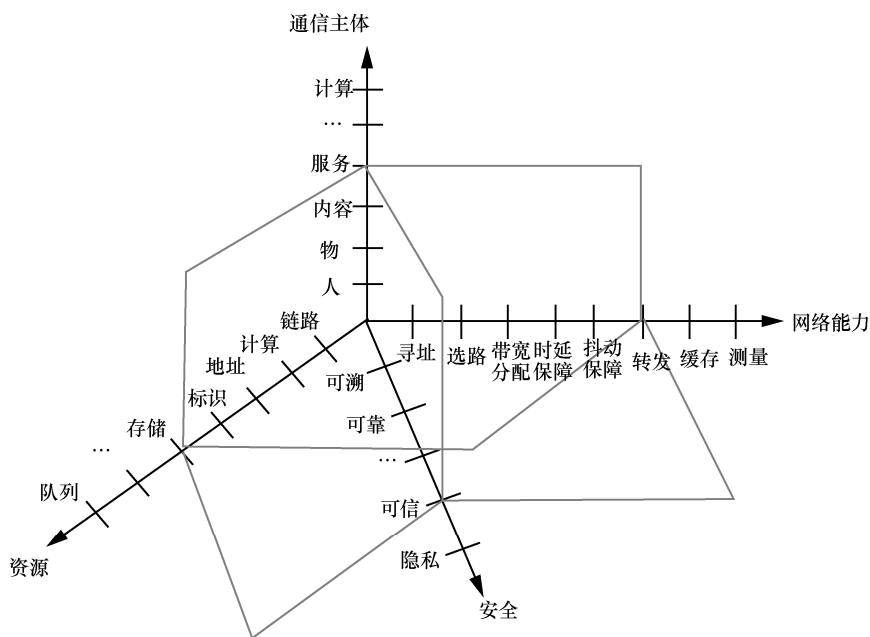


图3 全维网络能力模型

发起方、中转方、接收方。未来网络向着万物互联的方向发展,通信主体不再局限于传统的主机,将接入更多的网络设备、网络元素,构建连接未来卫星数据网络、传感器网络、工业互联网、存储、计算、内容资源网络的连通性,通信主体的种类将会多种多样。不同的通信主体在参与网络行为时,会使用不同的 ID。标识针对通信主体设计,具有相应的地址空间、语义、解析方。IP 地址是当前数据网络中唯一的寻址标识,随着通信主体的丰富,网络需要具备支持不同种类标识的能力,包括人 (user)、位置 (loc)、物 (dev)、内容 (con) 等,并实现不同种类通信主体的互联互通。

(2) 网络能力

全维度可定义网络能力模型的网络功能维度涵盖完成网络传输任务需要采用的网络功能,包括寻址 (addressing)、路由 (routing)、转发 (forwarding)、服务质量 (QoS) 等能力。支持海量差异化主体的接入和连接,针对不同业务的特征及需求,提供可规划、可预期、可定制、差别化的接入与传输,保障时延、吞吐量、抖动、丢包率等性能指标,提升用户体验,同时完成网络管理,实现整体网络功能、资源的优化。随着技术的发展不断复杂化、多样化,网络功能维度的网络能力由网络中的转发设备承载。

(3) 网络资源

全维度可定义网络能力模型的网络资源维度涵盖基本网络数据传输以及特定场景需要的链路 (link)、计算 (comp)、存储 (stor)、地址 (addr) 等资源。对于基本的网络传输,数据在链路上传输时需要占用带宽资源,报文在转发设备上处理时需要占用 NP 计算能力以及片上内存,报文的地址占用了地址空间的一个部分。对于特定场景,比如信息中心网络、算力网络、超高清视频传输分别对存储资源、计算资源、链路带宽资源有特定的需要。硬件升级与软件优化导致网络资源的

类型、供给方式、容量等都发生了巨大的变化。资源类型不断丰富、多样化,多种资源共存于同一场景中,能够适应差异化业务需求。资源灵活部署在网络各个位置,核心、边缘和本地,距离用户越来越近,通过统一协同与调度快速响应业务需求,提升用户体验。资源容量不断增加,但体积逐渐变小,方便易处理。虚拟化技术实现了资源池化,屏蔽硬件差异性,进一步扩充了资源的可用容量。

(4) 网络安全

全维度可定义网络能力模型的网络安全维度涵盖保护网络实体、信息和传输等安全需要的能力,包括可信性、可溯源性、可靠性和隐私性^[5]。控制网络接入,实施身份验证,保障网络可信性。开展隐私保护,防止信息非法利用。抵御偶然或者恶意的破坏,保证网络可靠、正常地运行。面对网络攻击,追踪定位攻击的源头。IP 网络的开放特性带来了安全隐患,而外挂的补丁式安全技术无法为网络通信提供完善的保障。与此同时,未来网络场景越来越复杂,终端能力差异化、网络接入方式不同、标识多样化及协议的不统一将导致更多的安全漏洞问题,阻碍网络技术的广泛应用。内生的安全技术能够提升未来网络的安全可靠性^[6]。

4 全维可定义网络能力接口

传统 IP 网络在网络能力类型以及提供网络能力的方式这两个方面都比较单一。业务需求通过应用层、传输层传递至网络层实现,且逐层传递中只有少量需求能够在网络层获得能力支持。网络层以“IP 地址+带宽”的形式提供“尽力而为”转发能力。从应用来看,网络能力的提供形式如果不变,则网络提供的价值没有本质变化,网络能力增强无法有效使用。网络能力越来越强,受限于单一的网络层 IP 协议能力提供形式,能力无法有效传递。随着多样化的网络能力发展,除逐



层传递业务需求到网络的接口形态基础上, 增加更丰富的接口形态, 如图 4 所示。在网络 5.0 的设计中, 应用使用网络的多种模式进行抽象, 形成独立的层次接口, 包括网络层、传输层和应用层, 允许应用表述自身需求, 由网络智能完成应用需求到多维网络能力的映射。

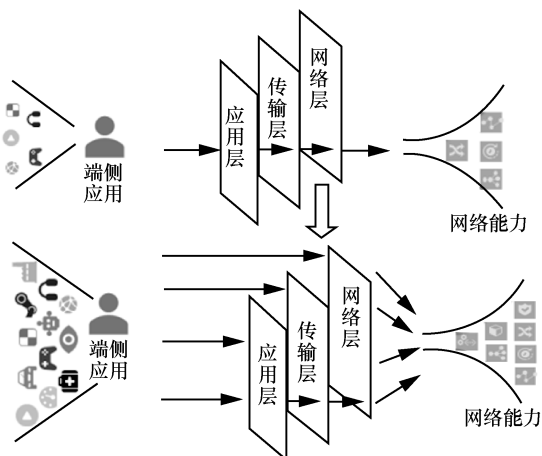


图 4 多层面网络能力提供方式

在网络层, 可以按需提供传统 IP 和 newIP 能力^[7]。对于只有基本转发需求的业务, 提供传统 IP 能力; 对于有增值需求的业务, 提供 newIP 能力, 即赋予报文更加灵活的扩展能力, 将多通信主体支持、应用语义表达、确定性传输、安全可靠等作为内生机制嵌入通信协议的数据平面中, 实现资源的智能调度管理。在边缘节点, 需要对数据包重新封装, 此时需要将用户需求映射为网络中提供的原子能力, 相当于在网络层调用网络能力。

在传输层, 可以根据业务需求, 提供与网络协同的新传输层能力。打破端到端设计思路, 由网络提供传输保障。一种方法可以是, 将接入侧和网络侧的传输性能保障机制分开, 网络段可提供差异化传输、分块传输、网络感知的多路径传输等能力。针对用户需求, 在网络边缘进行需求到能力的映射, 这时候需要使用网络中提供的传输能力, 相当于在传输层调用网络能力。

在应用层, 可以根据业务需求, 以类似于云计算 SaaS 层的方式使用网络。对于用户而言, 网络能力被封装为不同的服务 (传输服务、算力服务、内容服务等), 提供 OpenAPI, 业务可以按需调用打包好的网络服务, 无须关心细节。

5 全维可定义网络能力映射

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。通过灵活的网络能力选择与组合, 能够提高差异化业务需求与多维度网络能力间的匹配度, 在保证用户满意度的同时降低网络开销。映射的原象、象和映射法则三要素分别对应业务需求、网络能力、需求与能力映射法则。映射的步骤包括原象生成、象生成和映射法则生成 3 步, 如图 5 所示。

(1) 原象生成

通过业务感知确定需求, 以网络能力维度为基础, 拆分复合型业务需求, 聚类相似的业务需求。利用有限集合标识业务需求 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ 。业务需求设置对应的需求指标, $\text{index} = [\text{ind1}, \text{ind2}, \dots,$

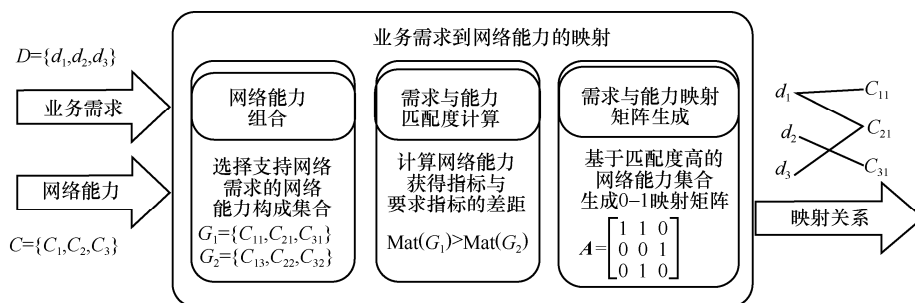


图 5 业务需求到网络能力映射

indM], 包括时延、能耗、开销等。为区分业务需求的重要性, 采用需求权重因子标识业务需求优先级 $W = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M]$, 如果权重因子满足 $\alpha_1 > \alpha_2$, 表示业务需求 d_1 的重要性高于 d_2 , 需要优先保证满足。

(2) 象的生成

网络能力随着业务执行的变化而动态变化, 如计算资源处于不断的消耗和释放中。为了更加精确地满足业务需求, 实现定制化网络能力提供, 需要实时更新网络能力状态, 形成全维网络能力矩阵 C 。

(3) 映射法则生成

业务需求与网络能力的映射法是构建两者之间的关联关系, 保证网络能力支持业务实现, 满足业务需求。在获得业务需求和网络能力的基础上, 映射法则生成主要包括以下具体步骤。

步骤 1 网络能力组合。分析每一项业务需求, 从网络能力空间中选择对应的一项或者多项网络能力支持。遍历业务需求集合, 合并支持各项业务需求的网络能力, 形成网络能力组合, $G_i = \{C_{m1,n1}, C_{m2,n2}, C_{m3,n3}, \dots\}$, 其中, C_{m_j,n_j} 是网络能力矩阵 C 的第 m_j 行、第 n_j 列元素。网络能力的组合需要考虑不同能力之间的互斥和关联关系, 保证一致性。由于一种业务需求可能存在多种不同方式网络能力的支持, 因此网络能力组合 $G_i, i = 1, 2, \dots, I$ 不是单一的。

步骤 2 业务需求与网络能力匹配度计算。针对 I 种网络能力组合, 分别计算当前网络状态下采用网络能力组合 G_i 可获得的业务需求指标 $\text{index}(G_i) = [\text{ind}_1(G_i), \text{ind}_2(G_i), \dots, \text{ind}_M(G_i)]$ 。计算业务需求与网络能力的匹配度 $\text{Mat}(G_i)$, 即获取的业务需求指标与要求的业务需求指标之间的欧几里得距离 $\text{Mat}(G_i) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \alpha_m (\text{ind}_m(G_i) - \text{ind}_m)^2}$, 其中, α_m 表示业务需求的权重因子, 且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_M = 1$ 。 $\text{Mat}(G_i)$ 越小, 表示采用网络能力获得的业务需求指标与要求指标之间的差

距越小, 匹配度越高。

步骤 3 映射矩阵生成。采用 0-1 映射矩阵表示业务需求与网络能力间的映射关系。映射的原象与象的对应关系体现在 0-1 映射矩阵中 “1” 的位置, 矩阵的行代表映射的原象, 矩阵的列代表映射的象。对比 I 个匹配度, 选择匹配度最高的网络能力组合 $i^* = \max_i \text{Mat}(G_i)$ 。假设网络能力集合 G_{i^*} 包括 L 个具体的网络能力元素, 则基于 M 项业务需求和 L 种网络能力生成 M 行、 L 列的映射矩阵 A , 其中第 m 行、 l 列的矩阵元素 $A_{m,l}$ 表示业务需求 d_m 和网络能力 $G_{i^*}(l)$ 的映射关系, $A_{m,l} = 1$ 表示网络能力 $G_{i^*}(l)$ 支持业务需求 d_m , 反之, $A_{m,l} = 0$ 表示网络能力 $G_{i^*}(l)$ 不支持业务需求 d_m 行表示业务需求。

6 结束语

随着未来网络工业互联网、AR/VR、全息通信、智慧城市等全新业务的涌现, 业务需求不断个性化、差异化及专业化。网络 4.0 时代 “IP+带宽” 的能力提供形式单一、动态性差、效能低, 导致业务需求与网络能力的差距加剧。本文基于 “以网络为核心” 的设计理念, 提出全维可定义网络能力, 支持通信主体、网络功能、网络资源、安全等全维度可定义, 实现多样化网络能力呈现, 并支持动态演进发展。通过业务需求自映射和网络能力自组织灵活适配业务发展需求, 以多种接口形式主动向终端业务输出多样化网络内生能力, 自然适应未来业务的复杂不确定演进。网络开放多维能力给业务, 提供不同层次的能力封装接口, 允许业务以更加友好的方式向网络表达需求。选择最优网络能力, 通过各维度网络能力的灵活组合映射适配差异化业务需求, 实现高效率、大容量、低时延、高可靠的全业务承载。

参考文献:

- [1] 蒋林涛. 数据网的现状及发展方向[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 2-15.



- JIANG L T. Current situation and development trend of data network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 2-15.
- [2] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯, 等. 对网络技术跨越发展的思考: 网络 5.0[J]. 信息通信技术, 2017, 11(6): 37-44.
- ZHENG X L, JIANG S, WANG C, et al. A potential direction of next generation data communication network—network 5.0[J]. Information and Communications Technologies, 2017, 11(6): 37-44.
- [3] 邬江兴, 兰巨龙, 程东年. 新型网络体系结构[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- WU J X, LAN J L, CHENG D N. New network architecture [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014.
- [4] 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 1-12.
- HU Y X, YI P, SUN P H, et al. Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 1-12.
- [5] 王宇, 王飞, 吴忠望. 网络可信与可信网络[J]. 保密科学技术, 2015(10): 25-33.
- WANG Y, WANG F, WU Z W. Network trust and trusted networks[J]. Secrecy Science and Technology, 2015(10): 25-33.
- [6] 江伟玉, 刘冰洋, 王闯. 内生安全网络架构[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 20-28.
- JIANG W Y, LIU B Y, WANG C. Network architecture with intrinsic security[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 20-28.
- [7] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯. NewIP: 开拓未来数据网络的新连接和新能力[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 2-11.
- ZHENG X L, JIANG S, WANG C. NewIP: new connectivity and capabilities of upgrading future data network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 2-11.

[作者简介]



范琮珊 (1987-), 女, 中国科学院计算机网络信息中心助理研究员, 主要研究方向为未来网络、边缘计算、云边端协同、资源分配等。



周旭 (1976-), 男, 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, 主要研究方向为未来网络架构、5G、边缘计算等。



覃毅芳 (1987-), 男, 中国科学院计算机网络信息中心高级工程师, 主要研究方向为边缘计算、网络体系结构、移动互联网及网络传输协议优化等。



李泰新 (1990-), 男, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心助理研究员, 主要研究方向为网络协议、机器学习、资源调度等。