

智融标识网络基础研究

张宏科,冯博昊,权 伟

(北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044)

摘 要: 现有互联网因其原始设计不足已在服务质量、资源利用率、管控能力等诸多方面暴露出严重弊端,难以支撑起“互联网+”新业态高速发展对通信网络与服务日趋复杂化、多元化的需求. 因此,如何设计全新的互联网已成为信息领域最为迫切与核心的研究内容之一,受到学术界与产业界的高度重视. 本文基于前期“标识网络”与“智慧标识网络”研究,创造性提出“智融标识网络”体系及其关键机制,通过全网多空间、多维度资源的智慧融合,实现个性化服务的按需供给与灵活化组网的有效支撑,为不同行业与用户提供高效的差异化、定制化通信网络服务,以普遍适用于高铁网络、工业互联网、车联网等各类迥异应用情景.

关键词: 标识网络; 智慧融合网络; 新型互联网

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)05-0977-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.05.001

Fundamental Research on Smart Integration Identifier Networking

ZHANG Hong-ke, FENG Bo-hao, QUAN Wei

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Due to deficiencies stemmed from its original design, the current Internet has exposed many serious drawbacks in service quality, resource utilization, and management/control capabilities, which cannot satisfy increasingly complex and diversified requirements from "Internet + " businesses on communication networks and services. Therefore, how to design a clean-slate Internet has become one of the most urgent and core research contents in the information field, and it has received great attention from both academics and industries. Hence, in this paper, we propose a novel network architecture with its associated key mechanisms, namely Smart Integration Identifier Networking (SINET-I), based on our previous works of Identifier Networking and Smart Identifier Networking. By smart integration of network-wide multi-space and multi-dimensional resources, SINET-I is able to achieve on-demand provision of individualized services and effective support for flexible networking, thus, it can provide differentiated and customized communication network services efficiently for various industries and users, thereby applicable to many different application scenarios such as high-speed rail networks, industrial Internet and vehicular networks.

Key words: identifier networks; smart integration networks; future Internet

1 引言

随着用户规模的不断扩大以及应用领域的不断延伸,现有互联网已呈现出“静态”、“僵化”态势^[1],在服务质量、传输效率、资源利用率、管控能力等诸多方面暴露出严重弊端,难以支撑起“互联网+”新业态高速发展对通信网络与服务日趋复杂化、多元化的迫切需求. 业内普遍认为,以传统“打补丁”、“增量式”的方法对现有互联网进行改良和演进已无法从根本上维持其可持

续发展,设计全新的下一代互联网势在必行^[2]. 为此,欧美等国先后投入大量资金用以启动一系列重大项目,如 GENI 计划^[3]、FIA 计划^[4]、FIRE 项目^[5]、H2020 项目^[6]等,旨在从不同角度和需求出发,重新设计网络体系、机制及系统,以占领信息网络领域这一新的制高点. 同时,我国也极为重视该方面的研究,相继通过“973 计划”、“863 计划”、“国家重大研发计划”等予以大力支持,以构建新型自主网络与系统,摆脱互联网核心技术长期受制于人的被动局面.

得益于政府的有力支持、行业巨头的大力推进以及用户需求的实际驱动,近年来,下一代信息网络的研究得到了前所未有的发展,新理念、新思想、新技术不断涌现,旨在从服务提供和网络传输两个层面对现有互联网体系架构与机制进行重新设计和优化.其中,典型的代表方案有网络功能虚拟化(NFV, Network Functions Virtualization)^[7]、以信息为中心网络(ICN, Information-Centric Networking)^[8]、身份位置分离网络(LISN, Loc/ID Split Networking)^[9]、以及软件定义网络(SDN, Software-Defined Networking)^[10]. 概括来说,在服务层面, NFV 利用虚拟化技术将网络功能以软件的形式与所处硬件服务器进行分离,借助管控平面的编排器完成虚拟功能的按需组合与基层网络映射,为用户提供动态、高效和多元化的功能服务供给,显著地提高了网络资源利用率和体验质量. ICN 则直接对数据进行基于内容且解耦于位置信息的命名,通过引入网络缓存以及基于状态的逐跳转发,实现网络对流经数据的选择性存储与用户对所需数据的就近获取,降低网络重复流量的同时提升了用户体验. 在网络层面, LISN 通过解耦 IP

地址的身份与位置语义、分离核心网与接入网地址空间、以及在控制平面引入身份-位置标识映射系统,重新设计了终端与网络的互联互通机制,全面提升网络的安全性、移动性和可扩展性. SDN 则将现有互联网路由器控制与转发层面进行解耦、通过控制器的有效适配实现底层交换机按照上层应用策略传输流量,大幅增强网络弹性与管控能力.

可以看到,新型网络体系的研究已受到学术界和产业界的高度关注,但上述方案仅针对服务供给和网络传输某单一层面进行重新构思和探索,难以全面实现服务与网络资源的有机融合与高效协作,更加难以满足于不同行业通信网络需要与各类用户迥异需求. 为此,基于前期“标识网络”^[11,12]、“智慧标识网络”^[1,13]研究,提出“智融标识网络”体系及其关键机制,通过全网多空间、多维度资源的智慧融合,实现个性化服务的按需供给与灵活化组网的有效支撑,为不同行业与用户按需提供差异化、定制化的通信网络服务,以普遍适用于高铁、工业互联网、车联网等各类迥异应用场景^[14-16].

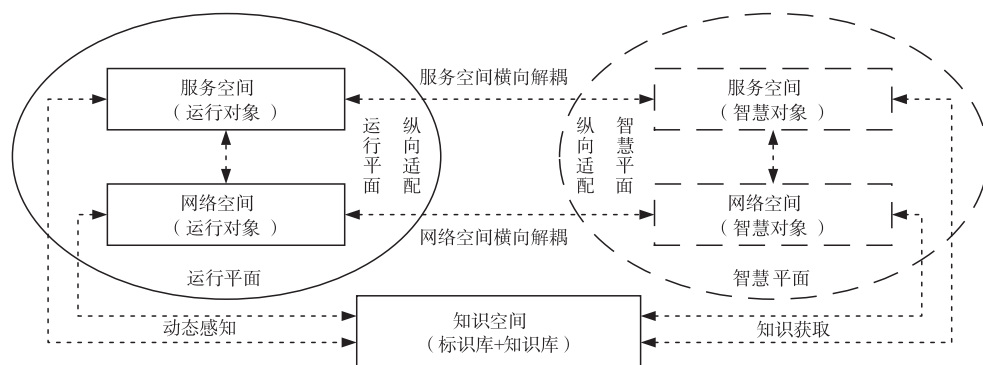


图1 “智融标识网络”体系模型

2 智融标识网络体系模型

“智融标识网络”体系模型如图1所示. 首先,“智融标识网络”将现有互联网的服务层面与网络层面进行纵向关联,以便于服务与网络空间对其所属资源进行协同调动与智慧融合,一方面有助于为用户提供多样、可定制服务,另一方面也利于为用户构建虚拟专网来满足这些服务在安全性、可靠性、可扩展性等方面的迥异需求. 进一步地,“智融标识网络”将“服务空间”与“网络空间”进行横向解耦,包括由服务智慧对象和网络智慧对象构成的“智慧平面”,以及包括由服务运行对象和网络运行对象构成的“运行平面”,以实现“控制管理”与“功能执行”的分离,便于服务与网络的动态按需调整.

具体地,智慧平面用于管控和调动运行平面服务/网络运行对象,并对后者进行状态查询、决策制定和指

令下发等;运行平面则用于接收服务/网络智慧对象下发的指令集,进行本地初始化,完成服务/网络层面的相关配置及功能执行,如路由转发、数据缓存、报文检测等.“智融标识网络”服务/网络对象由实体对象与虚拟对象两部分组成,其中实体对象由服务器、路由器、交换机等物理资源构成,虚拟对象则由运行某种服务/网络功能的虚拟机、某种服务/网络功能的软件镜像等虚拟资源构成.

在此基础之上,“智融标识网络”引入包含服务/网络对象标识库以及服务/网络对象知识库的“知识空间”,以标识各类实体与虚拟对象,并对其静态与动态属性特征、需求描述进行细粒度说明,为全网多空间、多维度资源的智慧融合提供基础. 概括地,服务/网络对象标识库含 ID (Identifier) 和 SA (Static Attribute) 两类信息,其中, ID 为服务/网络对象的全网唯一身份符号; SA 为服务/网络对象静态多维属性量化信息,如

CPU 性能、内存容量、链路带宽、所需安全等级、所需服务质量等级等. 服务/网络对象知识库则用于收集服务/网络对象的动态多维属性量化信息,进一步划分为网络连接子库、服务质量子库、资源状态子库. 网络连接子库用于记录当前物理和虚拟网络连接情况,包括物理网络连接信息子库和虚拟网络连接信息子库. 服务质量子库用于记录服务/网络对象所需基础资源开销和服务质量满足情况. 资源状态子库则用于记录服务/网络对象的运行状态,并记录其在网络中所处的位置信息.

“智融标识网络”旨在智慧融合全网各类资源,以按需提供个性化服务供给与组网支撑,其处理逻辑为:

(1) 用户向服务/网络智慧对象发送服务请求.

(2) 服务/网络智慧对象对服务请求进行纵向解析,即调取服务/网络对象标识库以及服务/网络对象知识库,根据当前系统状态按需选择出对应数据或功能服务、按需规划出虚拟网络服务专用路径,并生成配置相关服务/网络运行对象的指令集.

(3) 服务/网络智慧对象进行网络服务的横向映射,即向相关服务/网络运行对象下发指令集,并由后者进行本地初始化,实现所需数据挂载或功能开启以及报文流的按需转发.

(4) 服务/网络运行对象配置完毕后通过服务/网络智慧对象向用户反馈,以将用户报文流引入配置完成的虚拟网络服务专用路径,此外,服务/网络运行对象需向服务/网络对象知识库进行必要的信息更新,以便进行后续服务质量改善的学习优化.

3 智融标识网络知识空间

“智融标识网络”知识空间用于对全网资源进行统一标识、有效整合与状态感知,是服务空间与网络空间、智慧平面与运行平面智慧融合的枢纽,为服务/网络智慧对象按需调度服务/网络运行对象、实现差异化、定制化通信网络服务提供分析与适配基础,其组成结构如图 2 所示.

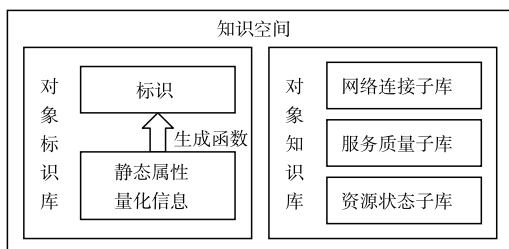


图2 “智融标识网络”知识空间

具体地,服务/网络对象标识库定义如式(1)的标识生成规则,其中, x 代表用户 U 、应用 A 、实体对象 E 、虚拟对象 V 、网络域 Net , m 为其属性特征维度, φ 为生

成函数, xSA_{ij} 为标识 xID_i 所对应对象第 j 维属性量化信息. 需要说明的是, xID 与网络域中用于路由转发的位置符 LOC 解耦.

$$\begin{pmatrix} xID_1 \\ \vdots \\ xID_i \\ \vdots \\ xID_n \end{pmatrix} \triangleq \varphi \begin{pmatrix} xSA_{i1}, \dots, xSA_{ij}, \dots, xSA_{im} \\ \vdots \\ xSA_{i1}, \dots, xSA_{ij}, \dots, xSA_{im} \\ \vdots \\ xSA_{n1}, \dots, xSA_{nj}, \dots, xSA_{nm} \end{pmatrix}, \quad x \in \{U, A, E, V, Net\} \quad (1)$$

$$PNC_{KD} \triangleq \Theta(\mathcal{V}, \mathcal{E}),$$

$$\mathcal{V} = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1j} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ v_{i1} & \dots & v_{ij} & \dots & v_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ v_{n1} & \dots & v_{nj} & \dots & v_{nn} \end{pmatrix}_{n \times n}, \quad v_{ij} \in \mathbb{R},$$

$$\mathcal{E} = \begin{pmatrix} e_{11} & \dots & e_{1l} & \dots & e_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ e_{i1} & \dots & e_{il} & \dots & e_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ e_{n1} & \dots & e_{nl} & \dots & e_{nm} \end{pmatrix}_{n \times m}, \quad e_{il} \in \{-1, 0, 1\} \quad (2)$$

$$VNC_{KD} \triangleq \Omega(N, L, \tilde{\mathcal{V}}, \tilde{\mathcal{E}}),$$

$$N = \begin{pmatrix} n_{11} & \dots & n_{1v} & \dots & n_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ n_{u1} & \dots & n_{uv} & \dots & n_{un} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ n_{p1} & \dots & n_{pv} & \dots & n_{pn} \end{pmatrix}_{p \times n}, \quad n_{uv} \in \{0, 1\},$$

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & \dots & l_{1y} & \dots & l_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ l_{x1} & \dots & l_{xy} & \dots & l_{xm} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ l_{q1} & \dots & l_{qy} & \dots & l_{qm} \end{pmatrix}_{q \times m}, \quad l_{xy} \in \{0, 1\} \quad (3)$$

$$\tilde{\mathcal{V}} = \begin{pmatrix} \tilde{v}_{11} & \dots & \tilde{v}_{1h} & \dots & \tilde{v}_{1p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{v}_{g1} & \dots & \tilde{v}_{gh} & \dots & \tilde{v}_{gp} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{v}_{p1} & \dots & \tilde{v}_{ph} & \dots & \tilde{v}_{pp} \end{pmatrix}_{p \times p}, \quad \tilde{v}_{gh} \in \mathbb{R},$$

$$\tilde{\mathcal{E}} = \begin{pmatrix} \tilde{e}_{11} & \dots & \tilde{e}_{1s} & \dots & \tilde{e}_{1q} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{e}_{r1} & \dots & \tilde{e}_{rs} & \dots & \tilde{e}_{rq} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{e}_{p1} & \dots & \tilde{e}_{ps} & \dots & \tilde{e}_{pq} \end{pmatrix}_{p \times q}, \quad \tilde{e}_{rs} \in \{-1, 0, 1\}$$

在服务/网络对象知识库中,定义如式(2)与式(3)所示的物理与虚拟网络连接信息子库 PNC_{KD} 和 VNC_{KD} . 其中, Θ 与 Ω 为 PNC_{KD} 与 VNC_{KD} 的映射函数, \mathcal{V} 为网络物理节点连接关系, \mathcal{E} 为网络物理节点与物理边连接关系, \mathcal{N} 为网络虚拟节点与物理节点映射关系, \mathcal{L} 为网络虚拟边与物理边映射关系, $\widehat{\mathcal{V}}$ 为网络虚拟节点连接关系, $\widehat{\mathcal{E}}$ 为网络虚拟节点与虚拟边连接关系, n 为网络物理节点数, m 为网络物理边数, v_{ij} 为物理节点 i 与物理节点 j 的当前连接代价; e_{il} 为物理节点 i 与物理边 l 的有向连接情况, n_{uv} 为虚拟节点 u 与物理节点 v 的映射关系; l_{xy} 为虚拟边 x 与物理边 y 的映射关系; \widehat{v}_{gh} 为虚拟节点 g 与虚拟节点 h 的当前连接代价; \widehat{e}_{rs} 为虚拟节点 r 与虚拟边 s 的有向连接情况.

$$\begin{aligned} QoS_{KD} &= \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_f\} \\ S_i &= \Psi(xID_i, D_i, Q_i), x \in \{E, V\} \\ D_i &= (d_1^i, \dots, d_j^i, \dots, d_g^i) \\ Q_i &= (q_1^i, \dots, q_k^i, \dots, q_h^i) \end{aligned} \quad (4)$$

在服务/网络对象知识库中,定义如式(4)所示的服务质量子库,用来记录服务/网络对象所需基础资源开销(如 CPU、内存、带宽等)、服务质量满足等级(时延处理等级、容量支持等级等)等. 其中, S_i 为第 i 个服务/网络对象服务质量信息集合, Ψ 为服务质量信息映射函数, xID_i 为第 i 个服务/网络对象标识, D_i 为第 i 个服务/网络对象资源消耗向量, Q_i 为第 i 个服务/网络对象的服务质量满足等级向量, d_j^i 为第 i 个服务/网络对象消耗 j 型资源规模, q_k^i 为第 i 个服务/网络对象可以满足 k 型服务质量等级.

$$\begin{aligned} State_{KD} &= \{INFO_1, \dots, INFO_i, \dots, INFO_n\} \\ INFO_i &= \Phi(\widehat{ID}_i, U_i, \widetilde{S}_i) \\ \widehat{ID}_i &= (EID_i, NetID_i, LOC_i) \\ U_i &= (u_1^i, \dots, u_j^i, \dots, u_r^i) \\ \widetilde{S}_i &= (\widetilde{s}_1^i, \dots, \widetilde{s}_k^i, \dots, \widetilde{s}_s^i) \\ \widetilde{s}_k^i &= \mathcal{K}(VID_k^i, W_k^i, O_k^i) \\ W_k^i &= (w_1^{ik}, \dots, w_l^{ik}, \dots, w_m^{ik}) \\ O_k^i &= (q_1^{ik}, \dots, q_m^{ik}, \dots, q_w^{ik}) \end{aligned} \quad (5)$$

在服务/网络对象知识库中,定义如式(5)所示的资源状态子库,用来描述各服务/网络对象的运行状态(如运行位

置、物理资源使用率、实体对象所运行虚拟对象、虚拟对象资源使用率、服务占用率)等,其中, $INFO_i$ 为第 i 个物理服务/网络对象资源状态信息集合, Φ 为物理资源状态信息映射函数, \widehat{ID}_i 为第 i 个物理服务/网络对象当前标识集合, U_i 为第 i 个物理服务/网络对象物理资源利用率向量, \widetilde{S}_i 为第 i 个物理服务/网络对象虚拟资源利用率向量, u_j^i 为第 i 个物理服务/网络对象对 j 型物理资源的使用率, \widetilde{s}_k^i 为第 i 个物理服务/网络对象运行虚拟对象 k 的资源利用率信息集合, \mathcal{K} 为虚拟对象资源利用率信息映射函数, VID_k^i 为运行在第 i 个物理服务/网络对象的虚拟对象 k 的标识, W_k^i 为运行在第 i 个物理服务/网络对象的虚拟对象 k 的虚拟资源消耗向量, O_k^i 为运行在第 i 个物理服务/网络对象的虚拟对象 k 的虚拟服务占用参数使用率向量, w_l^{ik} 为运行在第 i 个物理服务/网络对象的虚拟对象 k 的 l 型虚拟资源使用率, q_m^{ik} 为运行在第 i 个物理服务/网络对象的虚拟对象 k 的 m 型服务占用参数使用率.

4 智融标识网络标识解析映射机制

“智融标识网络”以标识库与知识库为核心进行基于“知识空间”的“纵向解析”与“横向映射”,以实现服务空间与网络空间、智慧平面与运行平面之间的智慧融合与按需适配. 其中,纵向解析是指服务/网络智慧平面对象根据服务/网络对象标识库与服务/网络对象知识库的相关信息,测算出可以满足用户需求的虚拟网络服务专用路径;横向映射则是指服务/网络智慧平面对象向服务/网络运行平面对象发送相关指令集信息,以完成服务和网络层面初始化配置、构建出纵向解析对应的虚拟网络服务专用路径、引导报文按需转发.

定义如式(6)和(7)的纵向解析与横向映射,其中, TID_i 为第 i 组用户与应用根据服务/网络对象标识库和服务/网络对象知识库生成的可以满足其需求的虚拟网络服务传输路径, CID_i 为相应智慧平面对象向运行平面对象下发的第 i 组指令集标识, $SCID_{ij}$ 为第 i 组指令集中第 j 个指令标识, SCD_{ij} 为 $SCID_{ij}$ 对应作用于运行平面对象 \overline{v}_{ij} 的指令集信息, θ 和 Γ 分别为纵向解析函数与横向映射函数.

$$\begin{pmatrix} TID_1 \\ \vdots \\ TID_i \\ \vdots \\ TID_z \end{pmatrix} \triangleq \theta \begin{pmatrix} (UID_1, AID_1), \{XNC_{KD}\}_1, \{QoS_{KD}\}_1, \{State_{KD}\}_1 \\ \vdots \\ (UID_i, AID_i), \{XNC_{KD}\}_i, \{QoS_{KD}\}_i, \{State_{KD}\}_i \\ \vdots \\ (UID_z, AID_z), \{XNC_{KD}\}_z, \{QoS_{KD}\}_z, \{State_{KD}\}_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} CID_1 \\ \vdots \\ CID_i \\ \vdots \\ CID_h \end{pmatrix} \triangle \Gamma \left\{ \begin{array}{l} \{ (UID_1, AID_1), [(SCID_{11}, SCID_{11}(v_{11})), \dots, (SCID_{1k}, SCID_{1k}(v_{1k})), \dots, (SCID_{1m}, SCID_{1m}(v_{1m}))] \} \\ \vdots \\ \{ (UID_i, AID_i), [(SCID_{i1}, SCID_{i1}(v_{i1})), \dots, (SCID_{ij}, SCID_{ij}(v_{ij})), \dots, (SCID_{in}, SCID_{in}(v_{in}))] \} \\ \vdots \\ \{ (UID_h, AID_h), [(SCID_{h1}, SCID_{h1}(v_{h1})), \dots, (SCID_{hl}, SCID_{hl}(v_{hl})), \dots, (SCID_{hu}, SCID_{hu}(v_{hu}))] \} \end{array} \right\} \quad (7)$$

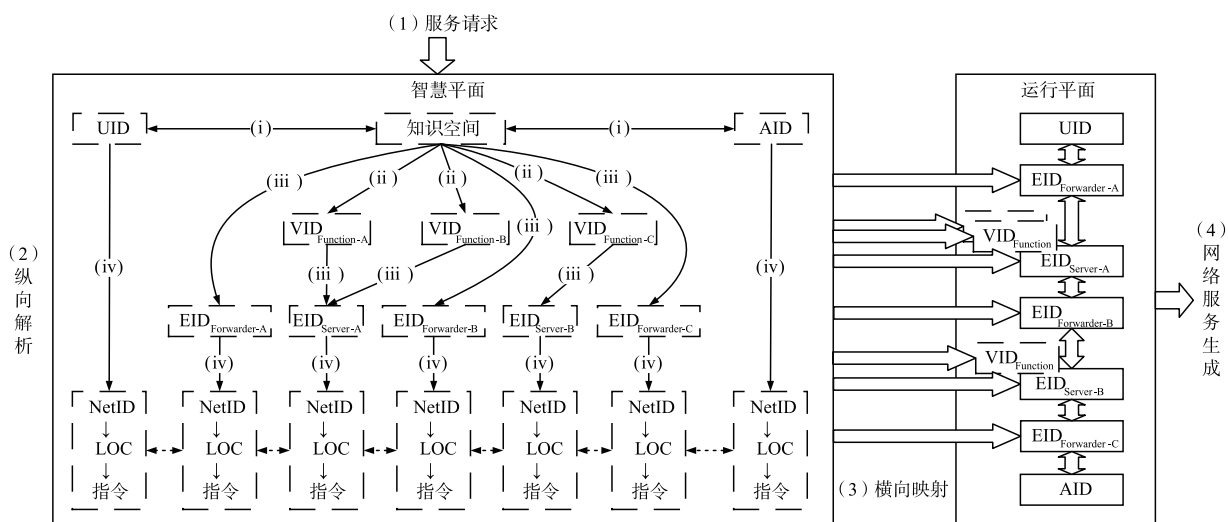


图3 “智融标识网络”解析映射示例

图3给出了“智融标识网络”纵向解析与横向映射的示例,其中,纵向解析步骤如下:

(i)智慧平面服务/网络智慧对象在收到用户请求后,以 UID 和所请求 AID 为索引,在服务/网络对象标识库中分别查询其 SA 以明确相应属性特征及其所需安全等级、所需服务质量等。

(ii)假设该应用需要网络为其提供安全增强业务,即用户报文在到达应用服务器前需经过一系列不同的服务功能(如防火墙、深度报文检测、地址转换等)以对用户报文进行必要的处理。服务/网络智慧对象继续在服务/网络对象标识库中查询相应服务功能的 VID ,并生成包含用户、网络服务功能、应用连接关系的虚拟网络服务抽象图。本例中,假设需要网络服务功能 A、B 和 C。

(iii)服务/网络智慧对象继续查询服务/网络对象知识库,找出能够提供所需网络服务功能的实体对象集合,并根据分配策略选取承载该网络服务功能的服务/网络运行实体。在本例中,假设网络服务功能 A 与网络服务功能 B 由服务器 A 承载、网络服务功能 C 由服务器 B 承载,转发器 A 负责连接用户与服务器 A、转发器 B 负责连接服务器 A 与 B、转发器 C 负责连接服务器 B 与应用服务器。

(iv)服务/网络智慧对象继续查询服务/网络对象知识库以获得相关用户、服务器、转发器、应用的网络标识与位置符,并生成配置相应服务/网络运行对象的

指令集。

之后,“智融标识网络”进行横向映射,即服务/网络智慧对象向服务器发送相关指令集以完成虚拟网络服务功能的开启和配置、向转发器发送相关指令集以完成报文的按需转发。在本例中,用户与应用之间的报文经过服务器 A 和 B,通过转发器 A、B 与 C。相关服务器、转发器收到指令集后进行本地配置,最终按照需求形成一条虚拟网络服务专用路径。

5 结束语

本文创造性提出“智融标识网络”体系及其关键机制,以“知识空间”为枢纽对“服务空间”与“网络空间”、“智慧平面”与“运行平面”进行智慧融合,旨在为不同行业与用户按需提多元化的服务供给与高效的组网支撑,满足其对通信网络的迥异需求、普遍适用于各类应用情景。在未来工作中,将依据“智融标识网络”模型与关键机制搭建原型系统,对其设计理念进行验证,并根据相关结果进行持续的优化与改进。

参考文献

[1] 张宏科,罗洪斌.智慧协同网络体系基础研究[J].电子学报,2013,41(7):1249-1254.
ZHANG H, LUO H. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249-1254. (in Chinese)

- [2] Feldmann A. Internet clean-slate design: what and why? [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 59–64.
- [3] GENI Project. [EB/OL]. <http://www.geni.net>.
- [4] FIA Project. [EB/OL]. <http://www.nets-fia.net/>.
- [5] FIRE Project. [EB/OL]. <https://www.ict-fire.eu/>.
- [6] H2020-LEIT-ICT-Future-Internet Project. [EB/OL]. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/future-internet>.
- [7] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(1): 236–262.
- [8] Xylomenos G, Ververidis C N, Siris V A, et al. A survey of information-centric networking research [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(2): 1024–1049.
- [9] Feng B, Zhang H, Zhou H, et al. Locator/identifier split networking: a promising future internet architecture [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(4): 2927–2948.
- [10] Kreutz D, Ramos F M V, Verissimo P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14–76.
- [11] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务 [J]. 电子学报, 2007, 35(4): 594–598. ZHANG H K, SU W. Fundamental research on the architecture of new network ——universal network and pervasive services [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 594–598. (in Chinese)
- [12] Feng B, Zhou H, Zhang H, et al. HetNet: a flexible architecture for heterogeneous satellite-terrestrial networks [J]. IEEE Network, 2017, 31(6): 86–92.
- [13] Zhang H, Quan W, Chao H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future internet [J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46–51.
- [14] Dong P, Zheng T, Yu S, et al. Enhancing vehicular communication using 5G-enabled smart collaborative networking [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(6): 72–79.
- [15] Yang D, Xu Y, Wang H, et al. Assignment of segmented slots enabling reliable real-time transmission in industrial wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3966–3977.
- [16] Quan W, Liu Y, Zhang H, et al. Enhancing crowd collaborations for software defined vehicular networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8): 80–86.

作者简介



张宏科 男, 1957 年 9 月生于山西大同, 现为北京交通大学教授, 博士生导师, 下一代互联网网络互联设备国家工程实验室主任. 目前主要从事下一代信息网络关键理论与技术的研究工作. 国家 973 项目“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”与“智慧协同网络理论基础研究”首席科学家.

E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn



冯博昊 (通信作者) 男, 1988 年 9 月生于北京, 现为北京交通大学讲师. 主要研究方向为未来互联网、软件定义网络、网络功能虚拟化、信息为中心网络、卫星网络等.

E-mail: bhfeng@bjtu.edu.cn



权伟 男, 1987 年 7 月生于山西运城, 现为北京交通大学副教授, 主要研究方向为未来互联网体系架构、车联网、能源互联网及网络分析等.

E-mail: weiquan@bjtu.edu.cn