

智慧协同网络体系基础研究

张宏科, 罗洪斌

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 现有互联网具有“三重绑定”特征,即:服务的“资源和位置绑定”、网络的“控制和数据绑定”及“身份与位置绑定”。这种网络体系与机制是相对“静态”和“僵化”的,在此基础上的演进与发展无法从根本上满足信息网络“高速”、“高效”、“海量”、“泛在”等通信需求,难以解决网络可扩展性、移动性、安全性等问题,更难以实现网络资源的高效利用、节能等。本文创造性提出了以“三层”、“两域”为典型特征的智慧协同网络体系结构模型。“三层”即:智慧服务层、资源适配层和网络组件层;“两域”即实体域和行为域。在“三层”、“两域”体系模型的基础上,分别建立了智慧服务层、资源适配层和网络组件层的基本理论,以在有效解决网络可扩展性、移动性、安全性等问题的基础上,大幅度提高网络资源利用率,降低网络能耗等,显著提升用户体验。

关键词: 未来互联网体系; 智慧协同; 资源适配

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 07-1249-06

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.07.001

Fundamental Research on Theories of Smart and Cooperative Networks

ZHANG Hong-ke, LUO Hong-bin

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

Abstract: The current Internet has three types of bindings, namely the binding between resource and locators, the binding between control and data, and the binding between identity and locator. The resulting network architecture makes the network being relatively static and rigid. This makes it difficult for the Internet to satisfy the current demands including high-speed, high efficiency, high throughput, and pervasiveness. In addition, this also makes it hard for the network to be scalable and secure, support efficient host mobility, being efficient resource utilization and energy saving. In order to address these issues once and for all, we propose a novel network architecture called smart and cooperative network architecture. The network architecture has three layers, called the smart service layer, the resource adaption layer, and the network component layer. It also has two realms, called the entity realm and the behavior realm. Based on this architecture, we outlined the basic theories of the three layers, respectively, in order to make a future Internet being able to support efficient host mobility, be scalable and secure, being efficient resource utilization and energy saving, and to offer improved user experience.

Key words: future internet architecture; smart and cooperation; adaptive resource allocation

1 引言

现有互联网自发明以来取得了巨大的成功。然而随着其用户规模和网络应用的不断增加,各种弊端逐步显现。比如在资源利用率方面,美国普林斯顿大学研究人员在2010年ACM SIGCOMM国际会议上指出,现有网络的骨干网链路利用率仅在30%~40%^[1];西班牙电信的研究人员在2011年ACM SIGCOMM国际会议上指出,现有网络的接入网链路利用率不到10%^[2],网络资源利用率很低。又如在网络安全性方面,互联网当初是面向

数据业务传输设计的,是具有幂律结构的无标度网络,正是这种无标度的幂律结构拓扑,导致互联网对恶意攻击的抵御能力十分脆弱。

导致这些弊端的根源在于现有互联网的原始设计思想存在不足。具体来说,现有互联网具有“三重绑定”的特征,即:服务的“资源和位置绑定”、网络的“控制和数据绑定”及“身份与位置绑定”。这种网络体系和机制是相对“静态”和“僵化”的,在此基础上的演进与发展难以突破原始设计思想的局限,无法从根本上满足信息网络“高速”、“高效”、“海量”、“泛在”等通信需求,难以解

决网络可扩展性、移动性、安全性等问题,更难以实现网络资源的高效利用、节能等。

因此,近年来世界各国都积极开展了未来互联网体系的研究工作.如美国自然科学基金委于2005年和2006年先后启动了 GENI(Global Environment for Networking Innovations)计划^[3]和 FIND(Future Internet Network Design)^[4]计划.日本于2006年启动了 AKARI(a small light in the dark pointing to the future)计划^[5],目标是在2015年之前研究出一个全新的网络架构.欧盟于2008年启动了 FIRE(Future Internet Research and Experimentation)计划^[6],拟对未来互联网络架构和服务机制进行研究,并建立相应的测试平台.在 GENI 和 FIND 计划的基础上,美国自然科学基金委于2010年发布了 FIA(Future Internet Architecture)计划,先后资助了 NDN(Named Data Networking)^[7]、MobilityFirst^[8]、NEBULA^[9]、XIA(eXpressive Internet Architecture)^[10]、ChoiceNet^[23]等五个重大项目,分别从不同侧面研究未来互联网的体系架构.2012年6月,美国总统奥巴马签署行政命令并启动“US IGNITE”计划^[11],进一步加强美国在未来互联网体系与应用方面的基础研究,以图巩固美国在信息网络领域的领导地位.

我国也非常重视对未来信息网络体系结构和关键理论及技术的研究.国家973计划^[12]先后启动了“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”^[13]、“可测可控可管的IP网的基础研究”、“新一代互联网体系结构和协议基础研究”、“面向服务的未来互联网体系结构与机制研究”和“可重构信息通信基础网络体系研究”等项目.国家863计划^[14]先后启动了“身份与位置分离的新型路由关键技术与实验系统”、“三网融合演进技术与系统研究”等项目.国家自然科学基金委^[15]先后启动了“未来互联网体系理论及关键技术研究”、“后IP网络体系结构及其机理探索”、“未来网络体系结构与关键技术”等重点项目.

学术界近年来也纷纷撰写论文阐述发展未来互联网体系理论的重要性.比较典型的,如2007年Koponen等人重新设计了Internet的服务命名和解析方法,提出一种数据导向的网络架构思想,保障服务和数据接入的持续性、可用性和真实性^[16];2009年Van Jacobson等人提出以内容为中心的网络架构,通过对网络中的内容直接进行命名和路由寻址,使网络实现了从关注内容的位置到内容本身的转移^[17];2011年,Wei Koong Chai等人设计了支持服务泛在解析和传输的未来互联网架构,旨在解决网络多媒体数据的有效散播问题^[18];Jianli Pan等人指出在现有网络架构基础上进行改进难以彻底解决网络安全性、移动性和内容分发等问题,建议重新设计全新的未来互联网架构^[19];John Chuang等人则

提出在网络架构设计之初就应充分考虑“竞争性”,如允许不同的消费者按照自身意愿选择不同的服务提供商,支持用户导向型路由机制等^[20];Sasitharan Balasubramaniam等人提出利用生物学中的生态系统理论来指导未来网络架构设计,以改善网络的鲁棒性、自适应性和可进化性等^[21];Bengt Ahlgren等人则提出未来网络架构将必然包含三个方面:以信息为中心的网络、云计算网络和开放连通性的服务,认为以上三者的集成将最终形成未来网络的架构^[22].

然而,当前关于未来信息网络体系的研究仍处于起步阶段,尚未见一个体系架构能够满足未来网络“高速”、“高效”、“海量”、“泛在”等重大通信需求.因此,本文依托国家973项目“智慧协同网络理论基础研究”,创造性提出了资源动态适配的智慧协同网络的“三层”、“两域”体系结构模型,以在有效解决网络可扩展性、移动性、安全性等问题的基础上,大幅度提高网络资源利用率,降低网络能耗等,显著提升用户体验.

2 智慧协同网络体系结构模型

在深入研究传统信息网络分层体系结构理论及国内外新一代信息网络体系架构理论的基础上,本项目创造性地提出资源动态适配的智慧协同网络“三层”、“两域”总体系架构模型(如图1所示).“三层”即:智慧服务层、资源适配层和网络组件层;“两域”即实体域和行为域.

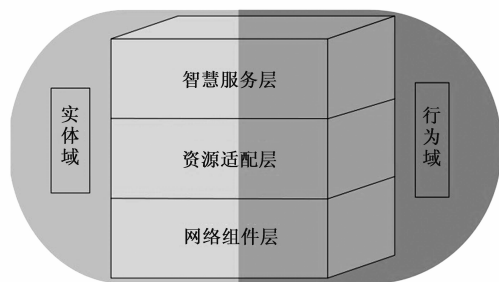


图1 智慧协同网络的“三层”、“两域”总体结构模型

“三层”、“两域”新体系结构模型中,“智慧服务层”主要负责服务的标识和描述,以及服务的智慧查找与动态匹配等;“资源适配层”通过感知服务需求与网络状态,动态地适配网络资源并构建网络族群,以充分满足服务需求进而提升用户体验,并提高网络资源利用率;“网络组件层”主要负责数据的存储与传输,以及网络组件的行为感知与聚类等.

图2对“三层”、“两域”新体系结构模型做了进一步的描述.“实体域”使用服务标识 SID(Service ID)来标记一次智慧服务,实现服务的“资源和位置分离”;使用族群标识 FID(Family ID)来标记一个族群功能模块,使用组件标识 NID(Node ID)来标记一个网络组件设备,实现

网络的“控制和数据分离”及“身份与位置分离”;“行为域”使用服务行为描述 SBD(Service Behavior Description)、族群行为描述 FBD(Family Behavior Description)和组件行为描述 NBD(Node Behavior Description)来分别描述实体域中服务标识、族群标识和组件标识的行为特征. 该体系三层结构之间的智慧映射函数分别为 F_1 、 F_2 和 F_3 (如图 2 所示), 对应后文中的式(3)、式(6)和式(9), 分别完成服务需求到族群的选择、族群内网络组件与服务需求的匹配以及网络组件的行为聚类功能.

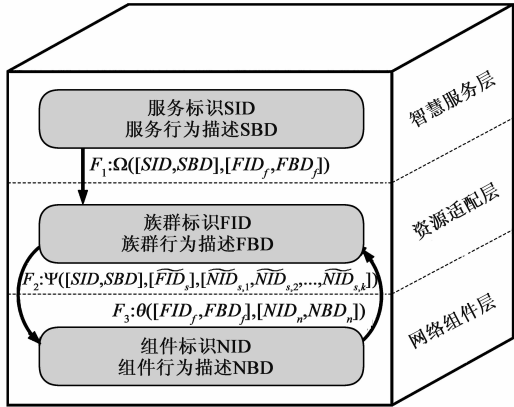


图2 智慧协同网络的映射模型

资源动态适配的智慧协同网络的基本工作原理如图 3 所示:在智慧服务层和资源适配层之间,使用行为匹配机制:在行为域中根据服务需求行为描述和族群功能行为描述形成一次映射,为智慧服务寻求最佳的族群功能模块搭配组合,然后根据实体域的族群间协作机制,控制指定的族群功能模块进行协同工作,从而实现服务标识到族群标识的映射过程;在资源适配层和网络组件层之间,使用行为聚类机制:在行为域中根据族群行为描述和组件行为描述形成另一次映射,为族群功能模块判定最合理的网络组件构成,然后根据实体域的族群内联动机制,在族群功能模块内的网络组件之间建立相互联动关系,以完成族群功能模块的

整体功能,实现由族群标识到组件标识的映射过程;通过这两次映射,网络资源可以依据服务需求动态适配,从而实现智慧服务.

智慧协同网络体系的工作流程如图 4 所示:首先,服务提供者注册所提供服务的标识和服务行为描述信息;服务获取者提交所需服务的标识和服务行为描述信息,进行服务查询,得到具体服务的标识和服务行为描述信息;该服务行为描述信息将与族群的族群行为描述信息进行匹配,实现服务标识到族群标识的映射,从而得到被选取网络族群的族群标识和族群行为描述信息;网络组件按照组件行为描述信息聚类到不同的网络族群中;将服务获取者所需服务的标识和服务行为描述信息与被选定网络族群中组件的组件行为描述信息进行匹配决策,选出最终提供本次服务的网络组件. 最后,服务获取者通过被选取的网络组件完成服务的获取.

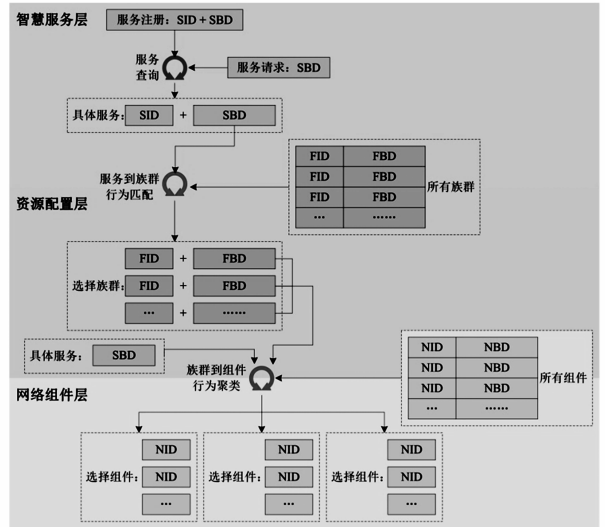


图4 未来智慧协同网络体系工作流程

总之,智慧协同网络的“三层”、“两域”体系通过动态感知网络状态并智能匹配服务需求,进而选择合理的网络族群及其内部组件来提供智慧化的服务,并通过引入行为匹配、行为聚类、网络复杂行为博弈决策等机制来实现资源的动态适配和协同调度,大幅度提高网络资源利用率,降低网络能耗等,并显著提升用户体验.

3 智慧服务层基本理论模型

为了实现服务普适化与智慧化,智慧协同网络体系采用服务标识对服务进行统一命名. 服务标识 SID 定义如下:

$$SID \triangleq \Phi(S_{type}, S_{data}) \quad (1)$$

上式中, S_{type} 和 S_{data} 分别代表服务的类型和服务内容本

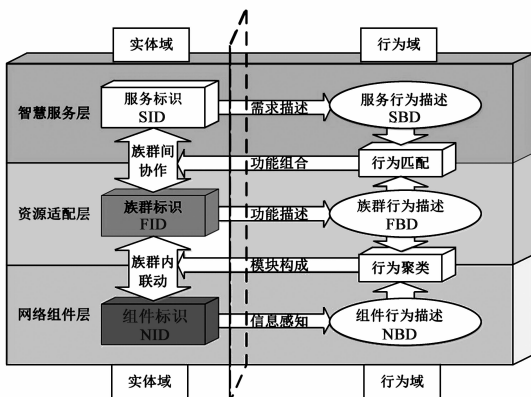


图3 智慧协同网络体系基本工作原理

身, $\Phi()$ 代表服务标识生成函数(如 SHA1 等)。

在智慧服务层,为了对服务行为进行表征,引入服务行为描述 SBD 的概念。服务行为描述是在服务命名基础上对服务的进一步描述,分为拓扑描述、性能描述和功能描述等。网络实体服务的行为描述 SBD 可以定义成如下形式:

$$SBD \triangleq \begin{bmatrix} \{b_L^{ST}, b_C^{ST}, \dots\}_T \\ \{b_Q^{SP}, b_B^{SP}, b_D^{SP}, b_L^{SP}, b_M^{SP}, \dots\}_P \\ \{b_T^{SF}, b_N^{SF}, b_S^{SF}, b_P^{SF}, \dots\}_F \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式中, T 、 P 、 F 分别对应着拓扑行为、性能行为和功能行为。对于 SBD, 拓扑信息包括服务位置 b_L^{ST} 和服务缓存位置 b_C^{ST} 等; 性能信息包括质量要求 b_Q^{SP} 、带宽要求 b_B^{SP} 、延时要求 b_D^{SP} 、丢包要求 b_L^{SP} 和最佳通信方式 b_M^{SP} 等; 功能信息包括服务类型 b_T^{SF} 、版本号 b_N^{SF} 、信誉属性 b_S^{SF} 和提供者签名 b_P^{SF} 等。其中, 服务位置和服务缓存位置代表服务所在网络组件的 NID 信息, 用于标记可获取服务的网络位置信息; 服务类型是指服务的业务类型, 如语音, 视频, 图片, 文件等; 服务的信誉属性包括用户对这个服务的感知评估和其他服务的反馈信息; 版本信息用于在服务提供商发布新版本时, 维持其服务标识不变的情况下更新其版本号; 提供者签名则是出于安全性的考虑, 用于保证信息的真实性和可靠性。

在智慧服务层引入服务标识到族群标识的映射, 通过匹配所需服务的行为描述和网络中全部族群模块的族群行为描述, 为智慧服务寻求最佳的族群功能模块, 以协同调度网络资源, 提高服务获取的灵活性, 实现资源的动态适配。服务标识到族群标识的智慧映射定义如下:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{FID}_1 \\ \widetilde{FID}_2 \\ \dots \\ \widetilde{FID}_s \end{bmatrix} \triangleq \Omega \left([SID, SBD], \begin{bmatrix} FID_1, FBD_1 \\ FID_2, FBD_2 \\ \dots \\ FID_f, FBD_f \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

式(3)中, $\widetilde{FID}_1 \sim \widetilde{FID}_s$ 为被选出的 s 个族群功能模块的族群标识; $[SID, SBD]$ 表示指定服务的标识和服务需求行为描述; FID_i, FBD_i 为预先生成的第 i 个族群模块的族群标识、族群行为描述; 网络中一共拥有 f 个待选族群模块; $\Omega()$ 是行为匹配映射函数。

总之, 智慧服务层利用服务标识和服务行为描述对各种服务进行统一的命名、注册、查找与匹配, 实现服务的普适化和智能化; 利用服务标识到族群标识的智慧映射, 为合理分配网络资源提供依据, 从而显著提升用户体验。

4 资源适配层基本理论模型

资源适配层使用族群标识来标记一个网络族群功能模块。网络族群的划分是基于特定的行为, 不同类的行为可以拥有不同的族群划分方式, 因此分类方式是族群最重要的属性之一。在网络族群形成后, 每个族群内将拥有一定的行为相似性, 从而形成网络族群资源模块特有的行为特征。根据上述的族群分类方式和行为特征, 可以唯一确定一个网络族群, 并生成族群标识 FID, 其定义如下:

$$FID \triangleq \psi(F_T, F_P, F_F) \quad (4)$$

上式中, F_T 代表族群的拓扑行为, F_P 代表族群的性能行为, F_F 代表族群的功能行为, $\psi()$ 代表族群标识生成函数。

为了对族群行为进行表征, 资源适配层引入族群行为描述 FBD 的概念。族群行为描述是在族群标识命名基础上对族群行为的进一步描述, 主要包含拓扑、性能、功能等。如依据拓扑性质可将网络族群划分为两类: 核心族群和接入族群, 这两类族群可以根据具体位置再细分为若干区域子族群; 依据性能可划分为: 高性能族群、中性能族群和低性能族群, 这几类族群可以再根据具体参数进一步划分子族群, 如高带宽子族群、低延时子族群等; 依据功能可划分为: 服务器族群、传输设备族群、传感器族群、网络存储族群、智慧管理族群、服务注册查询族群、输入输出适配族群等, 这些族群也可再根据具体信息划分子族群, 并且随着网络设备功能的增加而不断添加新的族群。根据上述的族群分类方式和行为特征, 可以唯一地确定一个网络族群。网络族群的行为描述 FBD 定义如下:

$$FBD \triangleq \begin{bmatrix} \{b_L^{FT}, b_N^{FT}, b_D^{FT}, b_R^{FT}, \dots\}_T \\ \{b_B^{FP}, b_D^{FP}, b_L^{FP}, b_S^{FP}, \dots\}_P \\ \{b_T^{FF}, b_F^{FF}, b_S^{FF}, b_M^{FF}, \dots\}_F \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式中, T 、 P 、 F 分别对应着拓扑行为、性能行为和功能行为。对于 FBD, 拓扑行为信息包括族群位置 b_L^{FT} 、族群内组件数量 b_N^{FT} 、族群内组件分布 b_D^{FT} 和邻接族群关系 b_R^{FT} 等; 性能行为信息包括带宽性能 b_B^{FP} 、延时性能 b_D^{FP} 、丢包性能 b_L^{FP} 和稳定性能 b_S^{FP} 等; 功能行为信息包括族群类型 b_T^{FF} 、族群功能 b_F^{FF} 、安全级别 b_S^{FF} 和移动性 b_M^{FF} 等。

资源适配层合理匹配上层的服务需求和下层的网络资源, 通过适当的网络博弈算法完成科学决策, 为服务选出合适的网络族群及其内部相应的网络组件, 完成服务的智慧获取, 提供良好的用户体验, 实现网络资源的高效利用。博弈决策的原理如式(6)所示。

$$\triangleq \Psi \left([SID, SBD], \left[\begin{array}{c} \widetilde{FID}_1 \\ \widetilde{FID}_2 \\ \dots \\ \widetilde{FID}_s \end{array} \right], \left\{ \begin{array}{l} [\widetilde{NID}_{1,1}, \widetilde{NID}_{1,2}, \dots, \widetilde{NID}_{1,a}]^{FID_1} \\ [\widetilde{NID}_{2,1}, \widetilde{NID}_{2,2}, \dots, \widetilde{NID}_{2,b}]^{FID_2} \\ \dots \\ [\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,c}]^{FID_s} \end{array} \right\} \right) \quad (6)$$

式(6)中, $[\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,k}]^{FID_s}$ 代表通过网络组件层的组件聚类后,生成的第 s 个族群 FID_s 中的所有网络组件; $\widetilde{FID}_1 \sim \widetilde{FID}_s$ 为式(3)中被选出的 s 个族群功能模块的族群标识; $[SID, SBD]$ 表示用户所需服务的标识和服务行为描述; $[\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,c}]^{FID_s}$ 表示博弈决策出的第 s 个族群 \widetilde{FID}_s 中提供所需服务的网络组件集合; $\Psi[\cdot]$ 则为博弈决策函数. 本式的主要功能为,通过对服务需求匹配出的族群、族群内部组件行为、所需服务的具体需求进行博弈决策,选定合适的网络族群及其内部网络组件,以实现资源的协同调度,使网络更高效、更节能等.

5 网络组件层基本理论模型

在网络组件层中,定义网络组件为一种完成数据的采集、生成、存储、转发、接收、计算等一种或多种功能的网络设备;使用组件标识 NID 来标记一个网络组件,定义如下:

$$NID \triangleq \Omega \rightarrow \omega(N_{\text{type}}, N_{\text{device}}) \quad (7)$$

上式中, N_{type} 代表网络组件的类型(传输组件、存储组件等), N_{device} 代表网络组件自身设备信息, $\omega(\cdot)$ 代表组件标识生成函数.

引入网络组件的信息感知机理,收集网络组件的特征信息;并在此基础上,提出组件行为描述 NBD 的概念,对网络组件的功能、拓扑或者性能特性等进一步描述,以对组件行为进行表征. 网络组件的行为描述 NBD 定义如下:

$$NBD \triangleq \left[\begin{array}{l} \{b_L^{NT}, b_P^{NT}, b_R^{NT}, b_C^{NT}, \dots\}_T \\ \{b_B^{NP}, b_D^{NP}, b_L^{NP}, b_S^{NP}, \dots\}_P \\ \{b_T^{NF}, b_F^{NF}, b_C^{NF}, b_S^{NF}, \dots\}_F \end{array} \right] \quad (8)$$

上式中, T、P、F 分别对应着拓扑行为、性能行为和功能行为. 对于 NBD, 拓扑信息包括组件位置 b_L^{NT} 、组件

从属关系 b_P^{NT} 、组件邻接关系 b_R^{NT} 和连通度 b_C^{NT} 等;性能信息包括带宽性能 b_B^{NP} 、延时性能 b_D^{NP} 、丢包性能 b_L^{NP} 和稳定性能 b_S^{NP} 等;功能信息包括组件类型 b_T^{NF} 、组件功能 b_F^{NF} 、运营商 b_C^{NF} 和安全级别 b_S^{NF} 等.

提出行为聚类机制,在行为域中根据族群行为描述和组件行为描述进行映射,为族群功能模块判定最合理的网络组件构成;然后在实体域中引入族群内联动机制,在族群功能模块内的网络组件之间建立相互联动关系,以完成族群功能模块的整体功能,实现由族群标识到组件标识的映射过程. 族群标识到组件标识的智慧映射原理如式(9)所示.

$$\triangleq \theta \left(\left[\begin{array}{l} [\widetilde{NID}_{1,1}, \widetilde{NID}_{1,2}, \dots, \widetilde{NID}_{1,i}]^{FID_1} \\ [\widetilde{NID}_{2,1}, \widetilde{NID}_{2,2}, \dots, \widetilde{NID}_{2,j}]^{FID_2} \\ \dots \\ [\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,k}]^{FID_s} \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} [FID_1, FBD_1] \\ [FID_2, FBD_2] \\ \dots \\ [FID_f, FBD_f] \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} [NID_1, NBD_1] \\ [NID_2, NBD_2] \\ \dots \\ [NID_n, NBD_n] \end{array} \right] \right) \quad (9)$$

式(9)中, FID_f, FBD_f 为第 f 个网络族群的族群标识和族群行为描述; NID_n, NBD_n 为第 n 个网络组件的组件标识和组件行为描述; $[\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,i}]^{FID_s}$ 代表网络组件聚类后,生成的第 s 个族群 FID_s 中的网络组件; $[SID, SBD]$ 表示所需服务的标识和服务行为描述; $\theta(\cdot)$ 是行为聚类函数. 本式的主要功能为,通过感知网络组件的信息进行行为聚类,为网络族群选择出相应的网络组件,完成族群标识到组件标识的智慧映射.

6 结论

本文创造性地提出了智慧协同网络的“三层”、“两域”总体系理论与框架;创建了智慧服务层的基本理论模型,提出服务标识、服务行为描述和服务标识与族群标识的智慧映射机理;建立了资源适配层基本理论模型,提出族群标识、族群行为描述和网络资源与服务需求的博弈决策模型;创建了网络组件层基本理论模型,提出组件标识、组件行为描述和组件标识到族群标识的智慧聚类机制. 这种全新的网络体系与机制的设计,能够在有效解决网络可扩展性、移动性、安全性等问题的基础上,大幅度提高网络资源利用率,降低网络能耗等,显著提升用户体验.

需要指出的是,虽然本文的工作已取得了一些可喜的成果,但仅仅是初步的设计和构思,对新网络体系

理论与关键技术的深入细致研究、完善及推广应用还有待于进一步的工作。

参考文献

- [1] W Fisher, M Suchara, J Rexford. Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking [C]. New Delhi, India, August 2010. 29 – 34.
- [2] E Goma, M Canini, A L Toledo, et al. Insomnia in the access [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'2011 [C]. Toronto, ON, Canada, August 2011. 338 – 349.
- [3] GENI: global environment for network innovations [OL]. <http://www.geni.net>.
- [4] FIND: Future Internet Network Design [OL]. <http://find.isi.edu>.
- [5] AKARI [OL]. <http://akari-project.nict.go.jp/eng/index2.htm>.
- [6] FIRE [OL]. <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fire/>.
- [7] Named Data Networking [OL]. <http://www.named-data.net/>.
- [8] MobilityFirst [OL]. <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/>.
- [9] Nebula [OL]. <http://nebula.cis.upenn.edu/>.
- [10] XIA-eXpressive Internet Architecture [OL]. <http://www.cs.cmu.edu/xia/>.
- [11] US IGNITE [OL]. <http://us-ignite.org/>.
- [12] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——体化网络与普适服务 [J]. 电子学报, 2007, 35(4): 593 – 598.
Zhang Hongke, Su Wei. Fundamental research on the architecture of new network-universal network and pervasive services [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 593 – 598. (in Chinese)
- [13] 973 Program [OL]. <http://www.973.gov.cn>.
- [14] 863 Program [OL]. <http://www.863.gov.cn>.
- [15] NSFC Program [OL]. <http://www.nsf.gov.cn>.
- [16] T Koponen, M Chawla, B Chun, et al. A data-oriented (and beyond) network architecture [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'07 [C]. Kyoto, Japan, 2007. 181 – 192.
- [17] V Jacobson, D K Smetters, J D Thornton, et al. Networking named content [A]. Proceedings of ACM CoNEXT'09 [C].

Rome, Italy, 2009. 1 – 12.

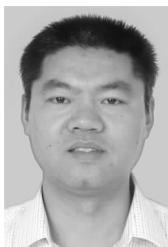
- [18] W K Chai, N Wang, I Psaras, et al. Curling: Content-ubiquitous resolution and delivery infrastructure for next-generation services [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 112 – 120.
- [19] J L Pan, S Paul, R Jain. A survey of the research on future internet architectures [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 26 – 36.
- [20] J Chuang. Loci of competition for future internet architectures [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 38 – 43.
- [21] S Balasubramaniam, K Leibnitz, P Lio, et al. Biological principles for future internet architecture design [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 44 – 52.
- [22] B Ahlgren, P A Aranda, P Chemouil, et al. Content, connectivity, and cloud: ingredients for the network of the future [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 62 – 70.
- [23] ChoiceNet: Network Innovation through Choice [OL]. <https://code.renci.org/gf/project/choicenet>.

作者简介



张宏科 男, 1957 年 9 月出生, 山西大同人, 北京交通大学教授, 博士生导师. 现任北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室主任、中国通信学会理事、北京通信学会第八届理事会副理事长. 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, 作为首席科学家主持国家 973 项目“智慧协同网络理论基础研究”的研究工作. 近年来在 IEEE Transactions on Mobile

Computing, IEEE Network 等本领域高水平期刊与国际会议发表论文百余篇. E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn



罗洪斌 男, 1977 年 1 月出生, 重庆忠县人, 北京交通大学教授、博士生导师. 现任北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室副主任、中国通信学会第四届青年工作委员会委员、北京通信学会第八届理事会理事, 入选教育部新世纪优秀人才支持计划. 目前主要从事未来互联网体系架构、理论与关键技术的研究, 正主持和参与多项国家 973、863、国家自然科学基金

项目. 近年来在 IEEE/ACM Transactions on Networking, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, IEEE Network 等本领域高水平期刊与国际会议发表论文 50 余篇. E-mail: hbluo@bjtu.edu.cn