

# 可重构信息通信基础网络端到端模型的研究与探索

马 丁<sup>1,2</sup> 庄 雷<sup>1</sup> 兰巨龙<sup>3</sup>

(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)<sup>1</sup> (河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)<sup>2</sup>  
(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)<sup>3</sup>

**摘 要** 作为一种革命式的未来互联网体系结构,可重构信息通信基础网络通过构建并存的虚拟网支持不同的业务类型,通过多态路由机制支持按需配置的寻址方式。为了适应多样性的端系统以及持续变化的底层网络环境,需要以柔性、可扩展的方式有效地管理资源,提供端到端服务。针对这一需求,提出了一种数据面水平分层、管理面垂直分层的二维端到端模型。该模型利用 agent 的环境感知、自主决策和交互协作能力,实现域内和域间资源、服务、虚拟网、服务路径的自治管理。为了将端系统纳入自治管理框架,设计了新型的端系统体系结构,并提出了端系统到虚拟网的接入机制,实现了自动的通信连接和服务提供。

**关键词** 可重构网络,端到端模型,多 agent 系统,自治管理,接入机制

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.020

## Research on End-to-End Model of Reconfigurable Information Communication Basal Network

MA Ding<sup>1,2</sup> ZHUANG Lei<sup>1</sup> LAN Ju-long<sup>3</sup>

(School of Information and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)<sup>1</sup>

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)<sup>2</sup>

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)<sup>3</sup>

**Abstract** As a clean-slate future Internet architecture, the reconfigurable information communication basal network supports various business types via constructing co-existing virtual networks and implements on-demand addressing by polymorphic addressing and routing mechanism. To serve the diversified end systems and to respond to the continuous changes of the underlying network environment, resources and end-to-end services need to be managed and provided respectively in a flexible and scalable way. To this end, a two-dimensional end-to-end model was proposed with the horizontal dimension corresponding to the data plane and the vertical dimension corresponding to the management plane. It achieves intra-domain and inter-domain autonomic management of resources, services, virtual networks and service paths based on the agents' capabilities of awareness, self-decision making and interacting with each other. To incorporate end systems in this autonomic management framework, a novel end system architecture was designed and an end system access scheme was proposed, which eventually enables automatic connections to virtual networks and automatic service provisioning.

**Keywords** Reconfigurable network, End-to-end model, Multi-agent system, Autonomic management, Access scheme

## 1 引言

作为信息通信的基本载体,互联网的成功之处在于能够为分布在全球各个角落的主机之间提供端到端的数据通信连接,实现信息的获取和交换,满足业务需求。但随着互联网规模的不断增长和应用范围的逐渐扩大,互联网体系结构本身在支持移动性、可信性、可扩展性以及服务质量保障等方面存在的缺陷使其难以适应端系统的多样化趋势,难以满足日益复杂的新兴通信业务需求,互联网亟需革新。作为一种革命

式的网络体系结构,可重构信息通信基础网络(Reconfigurable Information Communication Basal Network),简称可重构网络(Reconfigurable Network)<sup>[1-2]</sup>,以增强网络的基础互联传输能力为出发点,通过网络结构与功能的自适应重构、网络体系结构与模型以及协议的重新设计、网络内嵌的安全与管控机制,来支持当前和未来业务的多样化需求以及现有互联网的兼容演进,实现基础网络在可扩展性、移动性、服务质量保证、安全性等方面的功能扩展,满足泛在互联、融合异构的需求。

到稿日期:2016-03-22 返修日期:2016-05-29 本文受国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315901),国家自然科学基金资助项目(61379079),河南省国际合作项目(152102410021)资助。

马 丁(1978—),男,博士生,讲师,主要研究方向为网络虚拟化、服务路由,E-mail: martindingzz@163.com;庄 雷(1963—),女,博士,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;兰巨龙(1962—),男,博士,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。

为实现上述目标,可重构网络针对以下科学问题展开了研究并提出了相应的解决方法。

1)为解决业务的多样化、多变性需求与网络固有能力之间的差距,提出“可重构网络”的思想,建立可重构网络的基础体系结构。创立元能力理论,建立“业务-元能力”模型,通过认知机制,从业务需求中提炼出所需的基本网络功能元素(即元能力);通过元能力感知、聚类与组合实现业务的多样化服务定制。

2)为增强信息网络的基础互联传输能力,提出“可重构网络功能参考模型”,将传统OSI模型中的网络层与传输层进行有机融合后形成“可重构多态网络层”。通过基态子层支持基础的路由和交换功能,通过宏电路<sup>[3]</sup>传输模式,为拥有相同传输通道的同类业务流构建自适应虚电路,实现基础传输能力的增强;通过多态寻址路由机制<sup>[4]</sup>,根据业务需求特征和网络状态建立满足各类业务自身特性的数据传输路径,从而在多态子层中实现多模多态共存。

3)为实现对普适业务的支持,重点研究网络重构机理和业务自适应承载机理。基于可重构路由器平台<sup>[5]</sup>,可重构网络首先在其体系结构中引入了网络虚拟化技术<sup>[6]</sup>的相关思想,经过网络流量的精细化测量与智能分析,以构建服务承载网<sup>[3]</sup>(即虚拟网,下文中均使用服务承载网代替虚拟网)的方式实现对业务的自适应承载。其次,基于元能力理论对部署在网络核心节点上的元能力进行组合<sup>[7]</sup>,通过网络资源与元能力的感知、调配与重构,实现网络结构与功能的动态调整与按需提供,支持普适业务。

4)为实现网络内嵌的安全与管控,提出基于安全基片<sup>[8]</sup>的理论与机制。通过构建基于安全基片的服务承载网,在满足业务承载需求的同时合理适配安全需求;通过安全元能力的感知与组合,动态构建满足多级安全需求的服务路径,实现业务流的安全传输。

在解决上述4个问题的过程中,可重构网络逐步建立了体系结构、功能参考模型和基础理论体系,并提出了相应的解决方案和优化算法。但是,为适应动态变化的网络环境,实现网络资源、元能力、服务承载网、服务路径与宏电路的有效管理、分配和提供,满足业务自适应承载和端到端服务多样化提供的需求,同时为支持多样化的网络终端设备,使其能够接入可重构网络并使用其提供的功能特性,需要将视角从宏观架构聚焦到“端系统-核心网络-端系统”模型的内部细节,设计柔性、可扩展的端到端模型,并解决以下关键技术问题:

1)端到端自治管理机制,支持业务需求解析、环境感知、自主决策和交互协作,实现域内和域间网络功能与服务承载能力的认知、适配与管理;

2)端系统体系结构设计,使运行于端系统上的应用程序能够充分利用可重构网络的功能与技术特性;

3)端系统的接入机制,使端系统能够自动接入按需定制的服务承载网,匹配网络体系结构和协议。

## 2 相关工作

在未来互联网的热门研究领域中,国内外研究团队对端到端模型的研究主要集中在体系结构设计、资源管理、服务提供等方面。在网络虚拟化的环境中,文献[9]分别从服务提供

商(Service Provider, SP)和网络提供商(Network Provider, NP)的角度考虑虚拟网资源的管理。其中,NPs负责域内网络资源的管理并以低价而高效的方式分配资源给SPs;SPs负责绑定从异构NP租用的虚拟网络资源,并构建一致性的端到端服务投递平台。文献[10]通过将基础设施供应商(Infrastructure Provider, InP)提供的物理网络资源虚拟化为服务组件,从而将SP提供的端到端服务转化为多个服务组件的级联,实现了端到端服务投递系统的构建,并采用网络微积分理论进行数学建模和性能分析。文献[11]提出了一种基于多智能体(multi-agent)系统的自治管理框架,通过对虚拟资源的自主管理与配置,实现业务所需QoS(Quality of Service)的自动适配。

在以服务为中心的网络环境中,SILO(Service Integration Control and Optimization)<sup>[12]</sup>和NSA(Network Service Architecture)<sup>[13]</sup>将网络协议栈的功能元素分解为细粒度的服务,通过数据处理与控制的分离实现跨层的交互,通过服务组合支持高度可配置的端到端的复杂通信业务。在云计算环境中,文献[14-15]最早提出云服务组合机制,通过从服务池中选择适合和最优的原子服务组成复杂的组合服务,从而满足端用户的功能需求和QoS需求。在文献[16]的服务供应模型中,对可组合服务的范围进行了扩展,通过所提出的Network-as-a-Service(NaaS)机制,聚合云计算服务与网络服务从而形成复杂的组合服务提供给用户。为了适应多样、多变的应用需求和动态变化的云环境,文献[17]提出利用多agent技术对云服务进行自治管理,进而提高云服务查找、选择、匹配和提供的效率。

在软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)的环境中,文献[18]提出了一种动态资源调整体系结构,其根据系统流量需求的变化,动态调整虚拟软件定义网络(Virtual Software Defined Network, VSDN)的资源,在保证端系统QoS需求和端用户QoE(Quality of Experience)的同时,提高网络资源的利用率,增加互联网运营商(Internet Service Providers, ISP)的收益并减少端系统的支出。文献[19]从服务质量保证的角度,提出了一种基于SDN的层次化自治管理模型,其将数据平面划分为多个虚拟网切片,将控制平面细分为资源控制层和服务控制层,每个虚拟网切片拥有独立的控制平面与管理平面。在管理平面,通过为“虚拟网层-资源控制层-服务控制层”建立各自对应且交互协作的自治控制循环,实现具有QoS动态保证的服务提供。文献[20]提出了NFV的体系结构框架,通过将部署在NFVI-POP(NFV Infrastructure Point of Presence)上的虚拟化网络功能(Virtual Network Function, VNF)链接起来形成服务功能链,提供端到端的网络服务。文献[21]从运营商的需求出发,提出了第一个符合NFV端到端体系结构及最新NFV管理与编排规范的通用管理方案,重点解决端到端虚拟网络服务的自动供应以及端到端资源与服务的监控与管理问题。

上述研究成果为端到端资源管理、服务多样化供应提供了技术基础,对端到端的体系结构、模型设计提供了重要的参考依据,但是他们大多只关注网络宏观的体系结构和管理机制,并未从端到端的角度考虑其范畴内的组成部件、自治管理

框架和关键技术。总的来说,他们缺少对以下问题全面且深入的研究:1)元能力机制下的业务自适应承载与端到端服务自动供应;2)虚拟网与服务路径的自治管理与维护;3)端系统体系结构的设计;4)端系统接入机制与协议匹配等。本文将研究基于多 agent 技术的端到端模型,建立水平服务供应、垂直资源管理的二维结构,实现资源、元能力、服务承载网、服务路径和宏电路的自治管理以及端系统到服务承载网的自动接入。

### 3 二维端到端模型的研究

可重构网络引入了元能力、服务承载网、服务路径和宏电路等概念,本文将它们与传统的网络元素(网络设备、链路)一起列为需要被管理的网络对象。在可重构网络环境中,网络对象的数量和类型在逐渐增加,或分布在不同的网络域中(如元能力),或跨越多个网络域(如服务承载网、服务路径)。同时,一些网络对象(如元能力、服务路径)还呈现出功能相似的特性,但是具有不同的性能参数。在业务需求呈现多样化和多变性的前提下,为了能够满足业务承载需求和功能、安全性需求,实现业务的自适应承载与端到端服务的多样化提供,需要感知网络结构、资源与元能力的状态,动态且智能地分配资源来构建服务承载网,动态且智能地组合元能力来构建服务路径与宏电路。而现有的信息网络缺少感知与智能处理的能力,资源管理能力弱,网络能力与业务匹配效率低。网络自身环境的动态性和持续变化特征使得以人工方式进行管理会变得相当困难与复杂,会大幅增加管理与维护的开销。因此,需要一种具有环境感知和智能处理能力,同时兼具灵活、自治特征的方式,来对所有网络对象进行有效的管理。

Agent 是一个软件单元,具有感知环境和自主决策其行为的能力,通过与其他 agent 协作而形成的多 agent 系统(MAS, multi-agent system)<sup>[22]</sup>能够动态且自治地完成全局的管理目标。在可重构网络环境中,利用多 agent 系统建立多维认知体系,能够有效地实现业务需求与网络能力之间的双向认知,包括网络资源与元能力的感知与适配,服务承载能力、服务定制能力与业务流传输能力的认知与适配,进而在动态、复杂的网络环境中实现所有网络对象的有效管理。

本节首先介绍基于多 agent 系统的二维端到端模型,然后依次介绍 agent 与端系统的体系结构设计,最后介绍端系统的接入机制。

#### 3.1 二维端到端模型

基于可重构信息通信基础网络提出的网络元能力理论、多态寻址路由机制、网络重构机理,利用多 agent 技术,提出一种数据平面水平分层、管理平面垂直分层的二维端到端模型,如图 1 所示。

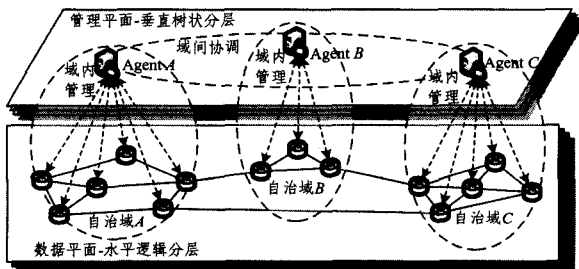


图 1 可重构网络二维端到端模型

在新构建的可重构多态网络层中<sup>[1-2]</sup>,数据平面的网元功能相对单一,采取分域管理方式,并且逻辑分层和多态重构可以高效地完成数据包的转发,并支持业务普适;管理平面主要由负责管理转发网元的 agent 组成,agent 位于可重构域管理服务器中,与本域的网络结点构成了垂直分层的结构。agent 一方面负责本域内转发网元的多维感知、资源管理、网络可重构,以及多态网络的生成;另一方面负责域间的智能协调,完成域间寻路、标识映射、资源调度、知识提炼与支撑、构造、维护等工作。

数据平面和管理平面形成了水平分层与垂直分层相结合的网络端到端拓扑结构。数据平面由核心网络的可重构路由器构成,是多模、多态的。多模是指数据平面可以基于业务需求通过网络重构实现多种服务承载平面的并存;多态是指每个服务承载平面中的寻址路由方式可以基于多态寻址路由机制按需进行动态配置,实现服务承载平面网络形态的灵活配置。

利用网络虚拟化技术,agent 可以在底层网络之上构建多个并行的服务承载网(即服务承载平面)来承载不同的业务需求。不同的服务承载网所运行的网络协议可以不同,甚至不同服务承载网中的网络体系结构也可以截然不同,如图 2 所示,域 A 的服务承载网 A<sub>1</sub> 和域 B 的服务承载网 B<sub>1</sub> 分别是 IP 和 ATM,分别为端系统 1 和 3 以及端系统 2 提供服务。在端系统 1 与端系统 3 之间的转发路径需要经过服务承载网 A<sub>1</sub>,管理平面中的 Agent A 负责域内的寻址路由和资源调度等工作;在端系统 1 与端系统 2 之间的转发路径需要经过域 A 的服务承载网 A<sub>1</sub> 和域 B 的服务承载网 B<sub>1</sub>,则管理平面中的 Agent A 和 Agent B 负责两个服务承载网的对接,包括寻址路由、资源调度、QoS 匹配等工作。

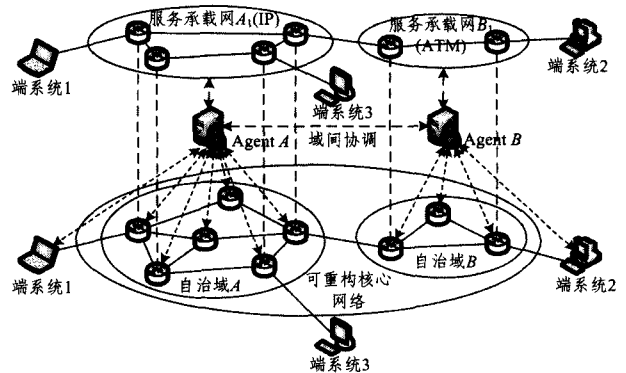


图 2 服务承载、转发路径示例

为了增强网络的可扩展性,提高业务承载和寻址路由的效率,agent 间采用层次化的管理结构,高层 agent 负责底层 agent 间的控制、协调与管理。如图 3 所示,自治域 1、自治域 2、自治域 3、自治域 4 和自治域 5 分别由 Agent A<sub>1</sub>, Agent A<sub>2</sub>, Agent A<sub>3</sub>, Agent B<sub>1</sub> 和 Agent B<sub>2</sub> 直接管理;而 Agent A<sub>1</sub>, Agent A<sub>2</sub>, Agent A<sub>3</sub> 由 Agent A 直接管理,Agent B<sub>1</sub> 和 Agent B<sub>2</sub> 由 Agent B 直接管理。自治域 1 内的转发路径由 Agent A<sub>1</sub> 确定,经过自治域 1 与自治域 2 的转发路径由 Agent A 确定,经过自治域 1 与自治域 5 的转发路径由 Agent A 与 Agent B 协作确定。

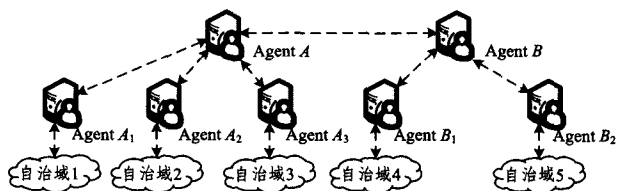


图 3 层次化管理结构

### 3.2 Agent 体系结构设计

结合端到端模型中 agent 的功能职责,为适应动态变化的可重构网络环境和多样性的应用需求,设计一个 agent 的内部体系结构,如图 4 所示。

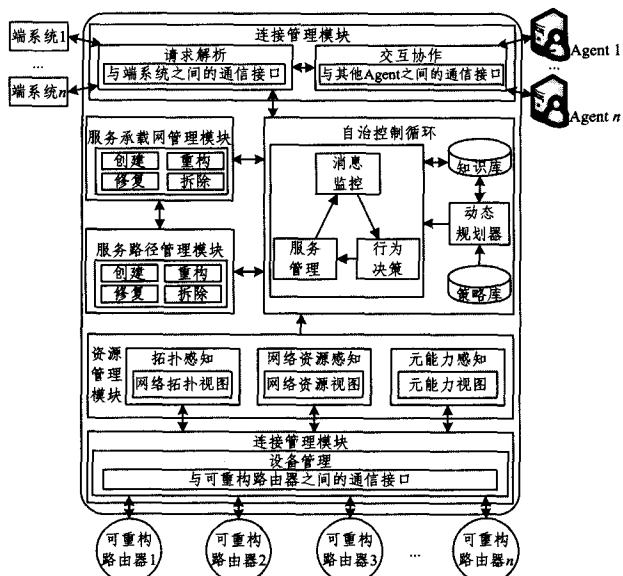


图 4 Agent 内部实现结构

具体包括如下主要功能模块。

1)连接管理模块,包括请求解析组件、交互协作组件和设备管理组件。请求解析组件通过与端系统之间的通信接口,建立与端系统的通信连接,接收端系统的服务请求,通过解析请求描述触发行为决策组件,并将行为执行结果返回给端系统;交互协作组件通过与其他 agent 之间的通信接口,建立与邻域 agent 或上级 agent 的通信连接,实现跨域或分层信息的交换及协作;设备管理组件通过与可重构路由器之间的通信接口,为基础设施资源的感知提供数据传输通道。

2)资源管理模块,包括物理资源感知组件、元能力感知组件和网络拓扑感知组件。物理资源感知组件负责监控可重构路由器及其链路的资源状态,并生成网络资源视图;元能力感知组件负责监控可重构路由器中所部署元能力实例的状态信息,并生成元能力视图;网络拓扑感知组件负责监控网络节点与链路的位置信息,并生成网络拓扑视图。资源管理模块周期性向自治控制循环提交视图数据,同时发送视图提交消息,并存储在知识库中;当底层网络资源状态发生变化时,向自治控制循环提交更新后的视图数据,同时发送视图更新消息。

3)服务承载网管理模块根据行为决策组件的命令执行相应的行为,如创建、重构、修复、拆除等。创建行为负责构建新的服务承载网、部署网络协议并将其状态信息存储至知识库中;重构行为根据应用需求和可重构网络环境的动态变化,在运行期间对服务承载网进行重新配置,并更新知识库中的信

息;修复行为负责自动诊断、修复网络故障,并同步知识库中的信息;拆除行为负责将运行时间到期的服务承载网从数据平面删除,并删除知识库中的相应信息。

4)服务路径管理模块根据行为决策组件的命令执行相应的寻址路由行为,包括基于位置、基于身份、基于内容、基于服务的 4 种寻址方式。然后执行相应的路由算法创建服务路径,并将其状态信息存储至知识库中。与服务承载网管理模块的行为类似,服务路径也支持创建、重构、修复、拆除 4 种行为。

5)自治控制循环,由行为、知识库、策略库、动态规划器构成。

知识库存储 agent 管理的所有元素的状态信息,包括物理资源、网络拓扑、元能力、服务承载网、服务路径等,支持行为决策和交互协作单元的查询和访问。策略库包含一系列条件规则,可根据当前网络状态和语义环境控制行为的触发。策略由服务供应商制定,以满足用户的资源需求和 QoS 需求,符合 SLA 的约定,可随网络功能和用户需求的改变实时更新。动态规划器根据策略文件配置 agent,定义执行过程中的行为特征,如参数、阈值、自治控制循环的频率等,减少人工管理带来的额外开销。

行为包括消息监听、行为决策和服务管理。消息监听组件负责收集来自请求解析组件、资源管理模块、服务承载网管理模块以及服务路径管理模块的消息,实现知识库信息的更新,与其他 agent 知识库信息进行同步,并实时地将消息告知决策行为。决策组件根据请求解析的结果,结合知识库中的资源状态信息,实现服务承载和多态寻址路由的决策过程。服务管理组件根据行为决策的命令,负责执行服务承载网管理和服务路径管理中的相应操作,并将结果返回给请求解析模块,同时更新知识库。

### 3.3 端系统体系结构设计

为了使端系统的应用程序能够充分利用可重构网络多模、多态的技术特性,需要根据可重构网络的功能参考模型对端系统的体系结构进行重新设计。如图 5 所示,本文将可重构网络端系统的体系结构划分为 4 层:应用层、可重构多态网络层、数据链路层、物理层,其兼容传统应用程序,但与 Internet 的 TCP/IP 参考模型并不完全对应。

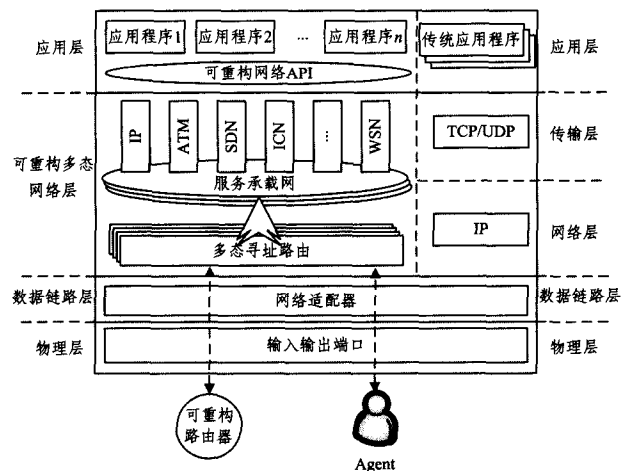


图 5 端系统体系结构

1)应用层

端系统上运行的所有应用程序均位于这一层,在使用可重构网络提供的服务之前,应用程序通过可重构网络 API 向所在域管理服务器发送服务请求,域服务器中的 agent 解析请求,为端系统选择或构建满足需求的服务承载网,部署适合的网络体系结构和寻址路由协议,建立端到端的通信连接。

2)可重构多态网络层

可重构多态网络层管理端系统上所有的服务承载网连接和网络协议,包括应用程序与服务承载网之间虚拟链路的建立以及网络协议的实例化。

可重构网络通过并存的服务承载网实现对异构网络体系结构的支持,如 IP, ATM, SDN(Software Defined Network), ICN(Information-centric Networking), WSN(Wireless Sensor Network)等。为了使端系统的多个应用能够使用不同承载网提供的服务,可重构多态网络层根据应用程序的需求建立与服务承载网的虚拟连接,然后根据服务承载网的状态信息安装、实例化相应的协议,确定寻址路由方式,建立服务路径,实现服务的按需供应。为实现底层数据的传输,可重构多态网络层负责将应用程序与服务承载网的虚拟链路映射到端系统与可重构网络的物理路径上,确定与可重构网络的通信接口。

3)链路层与物理层

链路层与物理层包含了网络适配器与物理输入、输出口,实现端系统与可重构边缘路由器的数据传输以及端系统与 agent 之间通信连接的建立。

3.4 端系统接入机制

为了使端系统能够正确接入满足其需求的服务承载网,匹配服务承载网部署的网络体系结构和协议,本文提出了一种端系统到服务承载网的接入机制,如图 6 所示,该机制包括 6 个步骤。

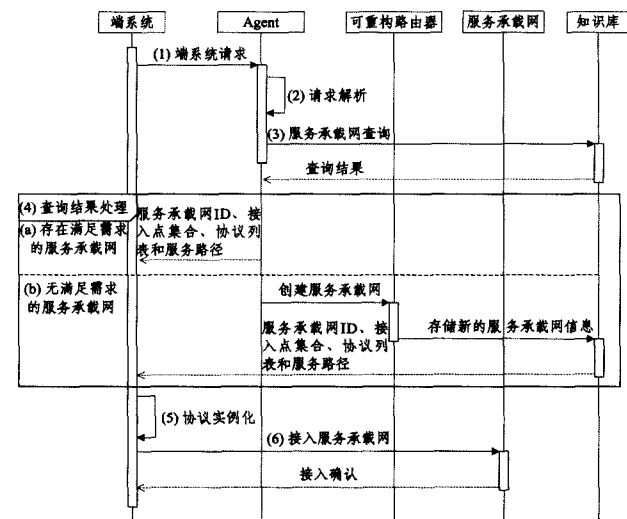


图 6 端系统到服务承载网的接入机制

1)端系统请求描述与发送

端系统请求描述中包含功能需求和 QoS 需求,经可重构网络的边缘路由器转发给域服务器的 agent。

2)请求解析

Agent 的请求解析单元接收端系统请求的数据包,提取数据中对需求的描述,对数据格式的正确性和完整性进行校验,对需求的有效性及其合理性进行检查。若数据合法且需求合理有效,则向自治控制循环发送请求消息。

3)服务承载网查询

Agent 自治控制循环的消息监听组件接收到请求解析组件的请求消息后,在知识库中查询是否存在满足需求的服务承载网。

4)查询结果处理

根据服务承载网的查询结果,分以下两种情况。

①若存在满足需求的服务承载网,则行为决策组件将从知识库中获取此服务承载网的服务路径信息。若存在满足需求的服务路径,则直接将该服务承载网的 ID、接入点集合、网络协议和服务路径信息提供给端系统;否则,行为决策组件将向知识库查询此服务承载网的资源和状态信息,如果存在满足需求的资源和元能力实例,则生成决策命令,由服务管理组件根据寻址路由方式在此服务承载网上构建服务路径并存入知识库,同时把服务承载网与服务路径的信息提供给端系统。

②若不存在满足需求的服务承载网,则行为决策组件将向知识库查询相关的资源,并感知其状态信息。如果通信在域内进行且资源满足需求,则生成决策命令,由服务管理组件创建新的服务承载网,分配全网唯一 ID,部署网络协议,确定寻址路由方式,获取接入点集合信息,并将上述信息存入知识库;否则,决策组件将通过交互协作单元与邻域 agent 协作完成跨域服务承载网构建与信息的存储。服务路径的构建过程与①中相同,最后将得到的服务承载网与服务路径的信息提供给端系统。

5)协议实例化

端系统需要根据服务承载网的体系结构和协议列表,安装、实例化所需的网络协议,否则将无法使用服务承载网提供的服务。

6)接入服务承载网

端系统根据 ID 选择接入的服务承载网,根据接入点选择具体的虚拟接口。如果接入点个数为 1,则端系统直接选择该接入点;如果接入点集合中的接入点个数多于 1,则端系统选择与其通信时延最短的接入点。接入点确定之后,端系统向服务承载网发送请求服务的数据包,服务承载网收到该数据包之后发回确认消息,端系统收到确认消息之后,建立与服务承载网的通信连接,使用预先分配的服务路径传输数据。

至此,端系统接入服务承载网的过程完成,agents 实现了端系统的自动接入和按需定制的服务提供。

4 试验验证平台与应用场景实例

项目组已经搭建了可重构网络试验平台<sup>[1,5,7,23]</sup>,能够对基于网络虚拟化的业务承载与基于元能力的功能组合进行评估与验证。试验平台是由 NetFPGA-10G<sup>[24]</sup>板卡搭建的具有 5 个节点的 10G 线速转发试验网,其拓扑结构和实物如图 7 所示。

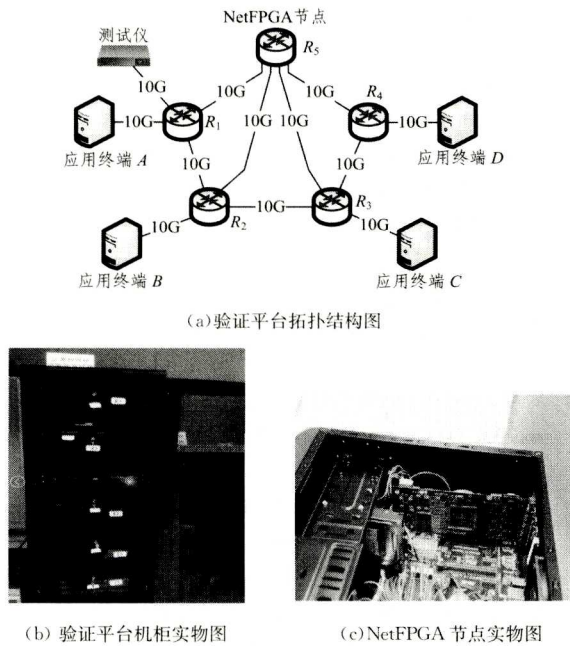


图 7 可重构网络试验验证平台

针对本文所提出的二维端到端自治管理模型,设计应用场景实例,如图 8 所示。agent 实现在管理服务器中,控制器基于 NOX 平台实现,假设试验平台已经部署两个服务承载网:服务承载网 1 和服务承载网 2。根据业务需求 1: {A, (Firewall,IDS),C},源节点和目的节点分别为应用终端 A 和应用终端 C,agent 通过 NOX 控制器在节点  $R_1$  和节点  $R_5$  上分别部署 Firewall 和 IDS 功能为 A 与 C 之间的数据流提供安全防护,A 与 C 均接入服务承载网 1,建立服务路径: $A \rightarrow R_1 \rightarrow R_5 \rightarrow R_3 \rightarrow C$ 。根据业务需求 2: {B, (Monitor, Load Balancer),D},源节点和目的节点分别为应用终端 B 和应用终端 D,agent 通过 NOX 控制器在节点  $R_2$  和  $R_3$  分别部署 Monitor 与 Load Balancer 功能,监控 B 发出的数据流,均衡  $R_3$  的负载,B 与 D 均接入服务承载网 2,建立服务路径: $B \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4 \rightarrow D$ 。

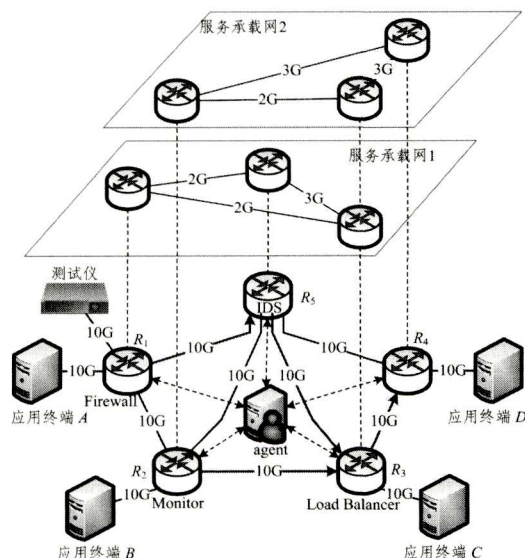


图 8 应用场景实例

结束语 在可重构网络环境中,为了支持多样化的网络

终端设备,适应动态变化的网络环境,并能够管理新增的网络对象(如元能力、服务承载网、服务路径等),需要以一种柔性、可扩展的方式有效地管理资源,设计端系统,提供服务。针对上述需求,本文基于网络元能力理论、多态寻址路由机制、网络重构机理,利用多 agent 系统提出了一种数据平面水平分层、管理平面垂直分层的二维端到端模型。在该模型中,agent 位于可重构网络的域管理服务器中,利用 agent 感知环境、自主决策的能力完成域内的多维感知、资源管理、网络重构;利用交互协作的能力,通过层次管理结构形成多 agent 系统,实现了全局的自治管理,如寻址、标识映射、资源调度等,减少了人工管理的额外开销。

为了将端系统纳入自治管理框架,使端系统上的应用程序能够充分利用可重构网络自适应承载、重构、服务定制等特性,本文基于可重构功能参考模型设计了一种新型的四层端系统体系结构,并提出了一种端系统到服务承载网的接入机制,实现了自动接入和协议匹配。基于可重构网络试验验证平台,建立了端到端模型的一个应用场景实例,通过对实现方法与业务流程的分析,论述了该模型的可行性。

整个端到端模型还仍有改进的空间,如宏电路管理、访问控制等,是有待进一步研究的问题。

### 参 考 文 献

- [1] LAN J L, CHENG D N, HU Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 128-139. (in Chinese)  
兰巨龙,程东年,胡宇翔.可重构信息通信基础网络体系研究[J].通信学报,2014,35(1):128-139.
- [2] LAN J L, XIONG G, HU Y X, et al. Research on the Architecture of Reconfigurable Fundamental Information Communication Network [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 57-65. (in Chinese)  
兰巨龙,熊钢,胡宇翔,等.可重构基础网络体系研究与探索[J].电信科学,2015,31(4):57-65.
- [3] JIANG Y M, LAN J L, CHENG D N, et al. Mapping algorithm for service aggregation in network virtualization [J]. Journal of Software, 2014, 25(6): 1328-1338. (in Chinese)  
江逸茗,兰巨龙,程东年,等.网络虚拟化环境中面向服务聚合的映射算法[J].软件学报,2014,25(6):1328-1338.
- [4] HU Y X, DONG F, WANG P, et al. Research on polymorphic routing mechanism for customized diversified services [J]. Journal on Communications, 2015, 36(7): 48-59. (in Chinese)  
胡宇翔,董芳,王鹏,等.面向多样化服务定制的多态路由机制研究[J].通信学报,2015,36(7):48-59.
- [5] HU Y X, LAN J L, WU J X. Providing personalized converged services based on flexible network reconfiguration [J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(2): 334-347.
- [6] CHOWDHURY N M M K, BOUTABA R. A survey of network virtualization [J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862-876.
- [7] DUAN T, LAN J L, CHENG G Z, et al. Functional composition in software-defined network based on atomic capacity [J]. Journal on Communications, 2015, 36(5): 156-166. (in Chinese)  
段通,兰巨龙,程国振,等.基于元能力的 SDN 功能组合机制[J].通信学报,2015,36(5):156-166.
- [8] CHEN J, LIU J W, WANG M M, et al. Security Substrate Based Security Management and Control Mechanism of Reconfigurable

- Network [J]. Telecommunications Science, 2014, 30(7): 19-25. (in Chinese)
- 陈杰, 刘建伟, 王蒙蒙, 等. 基于安全基片的可重构网络安全管控机制[J]. 电信科学, 2014, 30(7): 19-25.
- [9] WANG N, ZHANG Y, SERRAT J, et al. A two-dimensional architecture for end-to-end resource management in virtual network environments [J]. Network, IEEE, 2012, 26(5): 8-14.
- [10] DUAN Q. End-to-end modelling and performance analysis for network virtualisation in the next generation internet [J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2012, 8(1): 53-69.
- [11] FAJJARI I, AYARI M, BRAHAM O, et al. Towards an Autonomous Piloting Virtual Network Architecture [C]// International Conference on New Technologies, Mobility & Security. Paris: IEEE, 2011: 1-5.
- [12] DUTTA R, ROUSKAS G N, BALDINE I, et al. The SILO architecture for services integration, control, and optimization for the future internet [C]// Proc of the IEEE International Conference on Communications 2007 (ICC'07). Glasgow: IEEE, 2007: 1899-1904.
- [13] WOLF T. In-network services for customization in next-generation networks [J]. IEEE Network, 2010, 24(4): 6-12.
- [14] KOFLER K, HAQ I U, SCHIKUTA E. User-Centric, Heuristic Optimization of Service Composition in Clouds [C]// Proceedings of the 16th international Euro-Par conference on Parallel processing: Part I. ISChina: Springer-Verlag, 2010: 405-417.
- [15] ZENG C, GUO X, OU W J, et al. Cloud Computing Service Composition and Search Based on Semantic [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Cloud Computing. Beijing: Springer-Verlag, 2009: 290-300.
- [16] HUANG J, LIU G Q, DUAN Q. On modeling and optimization for composite network-Cloud service provisioning [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 45(10): 35-43.
- [17] HOU F, MAO X J, WU W. Self-Organizing management approach for cloud services based on multi-agent system [J]. Journal of Software, 2015, 26(4): 835-848. (in Chinese)
- 侯富, 毛新军, 吴伟. 一种基于多 Agent 系统的云服务自组织管理方法 [J]. 软件学报, 2015, 26(4): 835-848.
- [18] GOMES R L, BITTENCOUR L F, MADEIRA E R M, et al. An architecture for dynamic resource adjustment in VSDNs based on traffic demand [C]// 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'14). Austin: IEEE, 2014: 2005-2010.
- [19] WANG W D, TIAN Y, GONG X Y, et al. Software defined autonomous QoS model for future Internet [J]. Journal of Systems & Software, 2015, 110(C): 122-135.
- [20] CHIOSI M, CLARKE D, WILLIS P, et al. Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges and Call for Action [C]// Proceedings of SDN and OpenFlow World Congress 2012, Darmstadt: E-STI, 2012: 22-24.
- [21] SHEN W Y, YOSHIDA M, KAWABATA T, et al. vConductor: An NFV management solution for realizing end-to-end virtual network services [C]// 2014 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). Xinzhu: IEEE, 2014: 1-6.
- [22] WOOLDRIDGE M. An Introduction to Multi-Agent Systems [J]. Wiley & Sons, 2011, 4(2): 125-128.
- [23] ZHANG J H, DUAN T, ZHANG X H, et al. A reconfigurable and evolvable platform for network function innovation [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 18-25. (in Chinese)
- 张建辉, 段通, 张校辉, 等. 可重构可演进的网络功能创新平台 [J]. 电信科学, 2015, 31(12): 18-25.
- [24] NetFPGA-10G project [EB/OL]. <https://github.com/NetFPGA/NetFP-GA/NetFP-GA-public/wiki>.
- (上接第 93 页)
- [8] BECK M T, FISCHER A, BOTERO J F, et al. Distributed and scalable embedding of virtual networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 56: 124-136.
- [9] KHAN M M A, SHAHRIAR N, AHMED R, et al. SIMPLE: Survivability in multi-path link embedding [C]// 2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM). IEEE, 2015: 210-218.
- [10] NAKIBLY G, COHEN R, KATZIR L. Optimizing data plane resources for multipath flows [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2015, 23(1): 138-147.
- [11] YU M, YI Y, REXFORD J, et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17-29.
- [12] HOUIDI I, LOUATI W, ZEGHLACHE D. A distributed virtual network mapping algorithm [C]// IEEE ICC Proceedings. Beijing, China, 2008: 5634-5640.
- [13] LISCHA J, KARL H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection [C]// 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures Proceedings. Barcelona, Spain, 2009: 81-88.
- [14] CHOWDHURY N, RAHMAN M, BOUTABA R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping [C]// IEEE INFOCOM Proceedings. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 783-791.
- [15] JIAN W, KWAME-LANTE W, KARTIK G. XenLoop: A transparent high performance inter-VN network loopback [J]. Cluster Computing, 2009, 12(2): 141-152.
- [16] CHEN L W W C, LING-DI J P. Virtual Network Mapping Algorithm with Repeatable Mapping over Substrate Nodes [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(4): 908-914.
- [17] LIU X D, LIU K, WANG C. A node reusable virtual network embedding algorithm based on discrete particle swarm optimization [J]. Computer Engineering and Science, 2015, 37(2): 276-280. (in Chinese)
- 刘向东, 刘奎, 王聪. 基于离散粒子群的节点可重用虚拟网络映射算法 [J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(2): 276-280.
- [18] ZHANG Z B, CHENG X, SU S, et al. Virtual Network Embedding Based on Particle Swarm Optimization [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10): 2240-2244.