

## 可重构服务中心网络的服务路径构建机制

赵丹<sup>1</sup>, 文锋<sup>2</sup>, 徐鑫<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 陈博<sup>1</sup>

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 江南计算机研究所, 江苏 无锡 214000)

**摘 要:** 针对如何增强网络灵活智能的服务能力的问题, 提出了可重构服务中心网络 Re-SCNet 模型, 把传统的网络功能和服务分解为细粒度的网络功能单元, 并设计服务路由矩阵算法对元服务编排定制和灵活部署以构建最优服务路径。最后基于 NetFPGA-10G 平台评估算法的性能, 仿真实验结果证明算法在网络代价、端到端时延、节点负载、可靠性及网络资源消耗等方面有良好的性能, 在满足特定的功能、性能约束下可以为用户定制化一条最优的服务路径。

**关键词:** 可重构服务中心网络; 元服务; 编排定制; 服务路径

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Construction mechanism for service path over reconfigurable service-centric network

ZHAO Dan<sup>1</sup>, WEN Feng<sup>2</sup>, XU Xin<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

(1. China National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China;

2. Jiangnan Institute of Computing Technology, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** In order to enhance the flexible and intelligent network's service ability, a novel architecture called reconfigurable service-centric network (ReSCNet) was proposed which decomposed traditional network capabilities and services into fine-grained network functional unit. Then based on service routing matrix algorithm to orchestrate and deploy atomic service flexibly, a service path was built which possess smaller cost, lower time delay, higher degree of load balance and higher reliability. Finally, the performance of service routing matrix algorithm was evaluated on the innovation experiment platform NetFPGA-10G. The simulation results show that the algorithm has a better performance and can customize an optimal service path for users while meet the specific functions and performance constraints.

**Key words:** reconfigurable service-centric network, atomic service, orchestrate, service path

### 1 引言

当前, 互联网基于端到端的设计使网络的智能几乎都放在端主机上, 但核心网络提供的存储转发服务比较简单, 网络体系结构的简单性<sup>[1]</sup>和“僵化”<sup>[2]</sup>致使在核心网络中增加新功能以及新服务变得十分困难。商业化的互联网具有无所不在性, 但面临着管理和安全的挑战, 这要求网络可以为用户提供多

样的可定制化服务, 现有网络大多把新功能添加到交换机、端主机、路由器以及中间设备<sup>[3]</sup> (MB, middlebox) 等以满足上层业务的服务需求。但是随着数据中心、云端应用等网络服务的迅速发展, 传统的网络服务部署方式越来越难以满足多样化服务需求<sup>[4]</sup>, 因此, 以服务为中心的网络成为了未来网络体系结构一个重要研究方向。

大多以服务为中心网络的宏观网络架构侧重于

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (No.2012CB315901, No.2013CB329104); 国家自然科学基金资助项目 (No.61309019, No.61372121); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2013AA013505)

**Foundation Items:** The National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2012CB315901, No.2013CB329104), The National Natural Science Foundation of China (No.61309019, No.61372121), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2013AA013505)

应用前景、架构和概念<sup>[5,6]</sup>、应用协议原型<sup>[5~10]</sup>等,如 SCN<sup>[6]</sup>、SOA<sup>[11]</sup>、SILO<sup>[12]</sup>网络服务模型,但很少涉及架构的具体实现、服务组合和路径选择等关键问题。Gu 等<sup>[13]</sup>提出了一种解决服务共享问题的 P2P 框架 SpiderNet, SpiderNet 设计了一种基于节点故障和 QoS 的路由选择及服务组合机制,但在搜索多条路径时会发生链路冲突。Raman 等<sup>[14]</sup>采用最短路径优先算法可以有效地完成对服务路径的计算,并给出了服务路径代价的度量指标。Xiao 等<sup>[15]</sup>将选择服务路径的问题建模为多约束最优化路径 MCOP 问题,构建了一个满足 QoS 的服务路径的自动服务组合框架。Paik 等<sup>[16]</sup>和 Han 等<sup>[17]</sup>分别基于人工智能、组合规则提出了功能组合及路径选择机制,但设计时只针对单一功能的需求,无法同时满足多种服务需求。Klein 等<sup>[18]</sup>通过嵌入多层的功能组合构建一种工作流编排方法,具有较好的可扩展性能,但没有涉及服务路径选择的具体算法。Mogul 等<sup>[19]</sup>设计了控制平面 Corybantic,支持模块在独立控制器中进行组合,避免不同模块间不可视的调用关系,但是 Corybantic 运行于独立的调试控制台中,只对上层控制面的模块进行组合。在服务路径构建算法方面, Lee 等<sup>[20]</sup>为构建确保 QoS 要求的服务路由路径,提出了一种基于自适应遗传算法的网络感知方法,以实现时延和 QoS 指标间的平衡。Choi 等<sup>[21]</sup>提出一种集中式控制的分层服务图算法,但忽略了节点出现过载的情况。

综上,如何支持未来不断涌现的新兴服务需求,增强网络灵活智能的服务能力,从而支持多样化网络服务定制是一个亟待解决的问题。本文基于可重构网络的元能力<sup>[23]</sup>思想,使用元服务模型对网络服务进行统一资源描述,提出了可重构服务中心网络模型(Re-SCNet, reconfigurable service-centric network model),此模型对元服务动态组合形成服务路径,并基于服务路由矩阵算法(SeRM, service routing matrix algorithm)求解服务路径选择问题,最后基于 NetFPGA-10G<sup>[24]</sup>创新实验平台实现 Re-SCNet 模型以及对 SeRM 算法的性能进行评估与验证,仿真实验结果证明此算法具有良好的性能,能够在满足特定的功能、性能约束下为用户服务请求定制化一条最优的服务路径。

## 2 可重构服务中心网络模型

### 2.1 元服务

本文借鉴可重构网络<sup>[23]</sup>中细粒度功能元服务(AS,

atomic service)的思想,为开发者提供统一的服务描述,并为网络服务组合编排提供基础。元服务 AS 是一个五元组结构<Type, ID, Attributes, Action, Provider>,其中,Type 是元能力的类型;标识 ID 唯一地标识一个 AS;属性集 Attributes 包括性能指标以及处理对象;Action 是处理对象所执行的动作;提供者 Provider 是 AS 的提供商。AS 可用 XML 语义化描述,假设某开发者开发一个 AS,监控的流量模式为<dst\_port:80, dst\_IP:192.168.0.0/16>,则描述如图 1 所示。

```

<capacity>
  <type>monitor</type>
  <ID> 2 </ID>
  <attrs>
    <property name="dst_port">
      80
    </property>
    <property name="dst_IP">
      192.168.0.0/16
    </property>
    <property name="lagency">
      5
    </property>
  </attrs>
  <action>discard</action>
  <provider>NDSC</provider>
</capacity>

```

图 1 元服务 XML 实例

### 2.2 Re-SCNet 框架及构建流程

本文使用元服务模型对网络服务进行统一资源描述,提出了可重构服务中心网络模型,其框架如图 2 所示。传统网络协议栈的不同网络功能部署在不同的协议层,如 NAT、Multicast、差错控制、QoS 调度等,而 Re-SCNet 模型在网络层之上构建可重构服务层,将网络功能和网络服务分解为细粒度的网络功能单元即 AS,根据服务需求对 AS 进行编排定制和灵活部署构成具有一定顺序的元服务序列即服务路径(service path),然后从所有可能的服务路径中选取代价最小、时延最小、负载均衡度最大、可靠性高的服务路径,从而满足业务的服务需求。

## 3 Re-SCNet 中服务路径问题建模

### 3.1 问题描述

现有对选择服务路径的研究侧重于寻找一条最优化某项 QoS 指标的路径,但没有把元服务间的负载均衡问题考虑在内。Re-SCNet 中的可重构管理服务器动态组合路由元服务,根据多样化业务的服务需求构建最优服务路径,称此问题为多目标约束下最优化服务路径问题(Mo-COSP, multiple objective constrained optimal service path problem),文

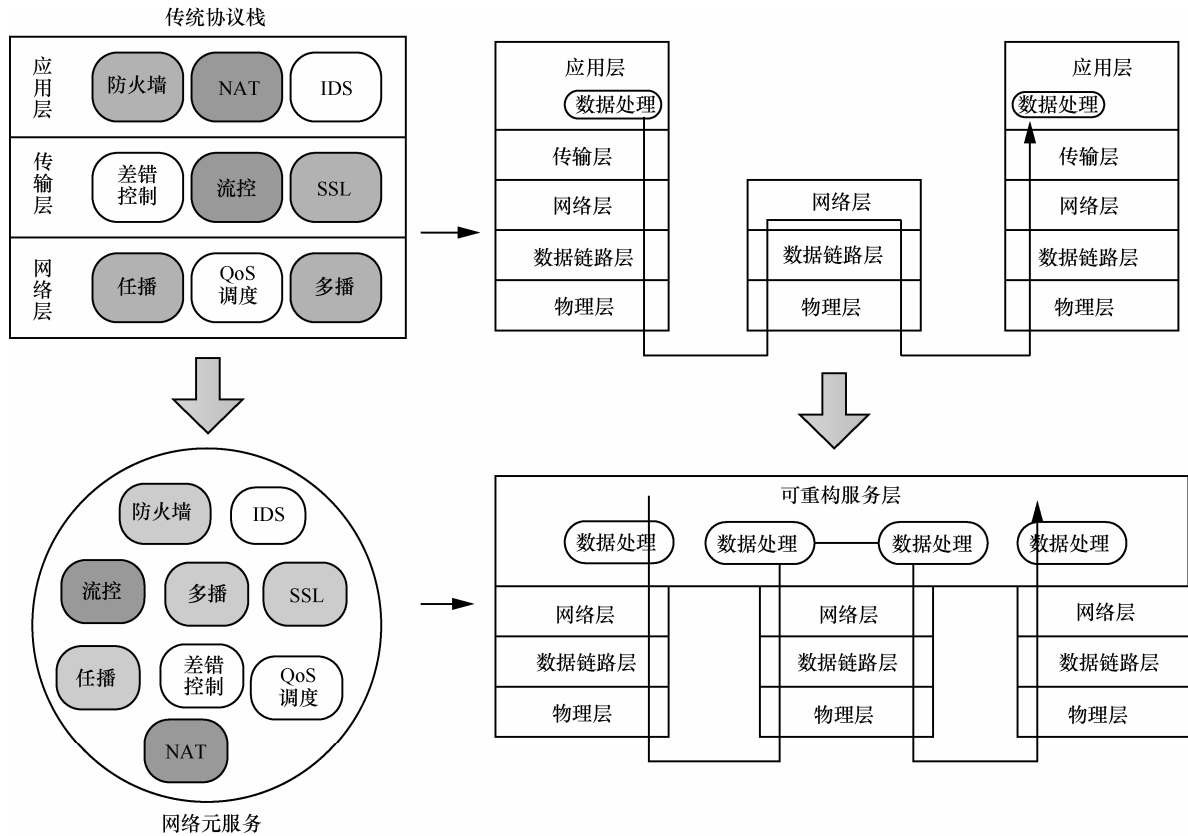


图 2 Re-SCNet 模型框架

文献[25]证明这是一个 NP 难问题，为此，本文提出了服务路由矩阵算法（SeRM, service routing matrix algorithm），在满足特定的功能、性能约束下为用户定制化一条最优服务路径。

本文采用视频点播（VOD, video-on-demand）服务对 Mo-COSP 问题进行分析。假设  $S_{vod}$  表示 VOD 服务请求，其子服务为 TCS（transcoding service）、MCS（multicast service）、CAS（caching service）和 DPS（display service），即  $S_{vod} = \{TCS, MCS, CAS, DPS\}$ 。Re-SCNet 中一个子服务可能会对多个元服务，通过选择资源库中满足用户服务请求的元服务，对其动态组合以形成最优服务路径，从而为用户提供最优的 VOD 服务。

### 3.2 问题分析

服务请求  $S_{request} = \{s, t, (AS_1, AS_2, \dots, AS_N)\}$  中  $s$  是源节点， $t$  是目的节点， $N$  是子服务数量， $AS_i$  是  $S_{request}$  所需的第  $i$  个 AS， $i=1, 2, \dots, N$ 。假设每一个元服务  $AS_i$  中有  $M_i$  个候选元能力实例集  $AC$ ，表示为  $AS_i = \{AC_1^i, AC_2^i, \dots, AC_{M_i}^i\}$ ，其中， $AC_j^i$  是  $AS_i$  对应的第  $j_i$  个元能力实例。因此，Re-SCNet 模型需要

为每一个子服务选择合适的  $AC_j^i$ ，生成满足服务请求  $S_{request}$  的组合服务，理论上每一个服务请求  $S_{request}$  可有  $\prod_{i=1}^N M_i$  条服务路径，如图 3 所示，图中虚线代表组合服务为  $S_{request} = \{s, t, (AS_1^1, AS_1^2, AS_1^3, \dots, AS_1^{N-1})\}$ ，实线为  $S_{request} = \{s, t, (AS_1^1, AS_2^2, AS_2^{N-1})\}$ 。

解决 Mo-COSP 需要从 AS 资源库中选择并动态组合 AS 形成服务路径，然后构建一条满足多约束的多目标最优服务路径。本文所提的多目标包括代价最小、时延最小、负载均衡度最大和可靠性最大。

### 3.3 构建服务路径的运行场景

本文通过配合控制平面以及数据平面实现服务路径的构建，运行场景如图 4 所示。逻辑推理过程中，控制平面核心模块为服务路径引擎，主要负责网络资源视图的存储和更新，并下发服务路径构建策略；网络资源视图包括 AS 数据库、AS 配置以及网络拓扑等。数据平面为网络数据报文传输和处理提供一个通道，由标准化的硬件设备组成，根据从控制平面得到的服务路径构建策略，对数据报文执行具体的处理操作，实现服务路径的构建。

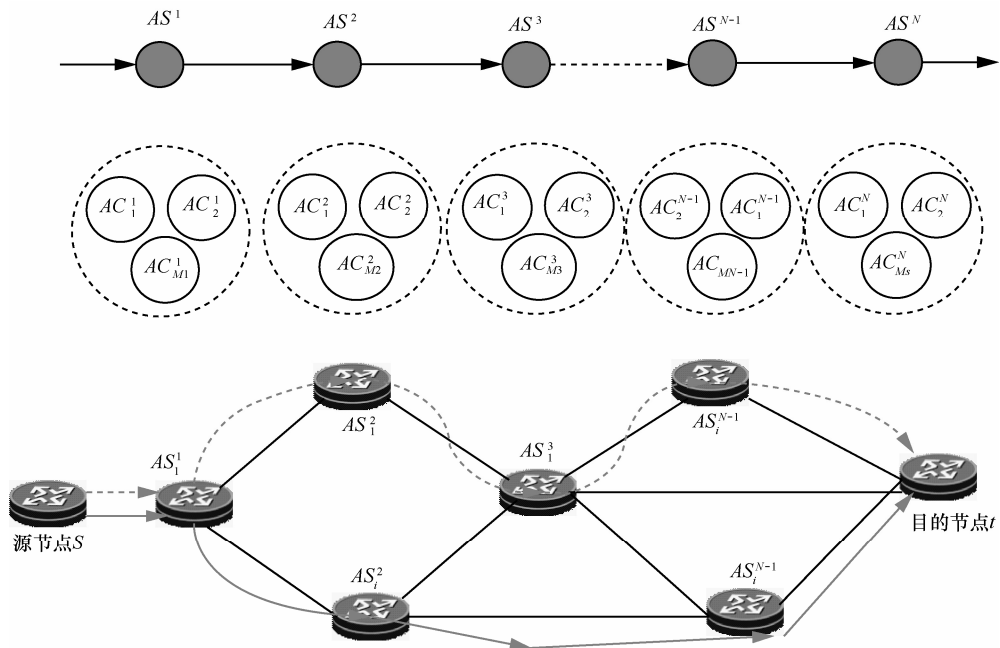


图 3 Mo-COSP 问题过程

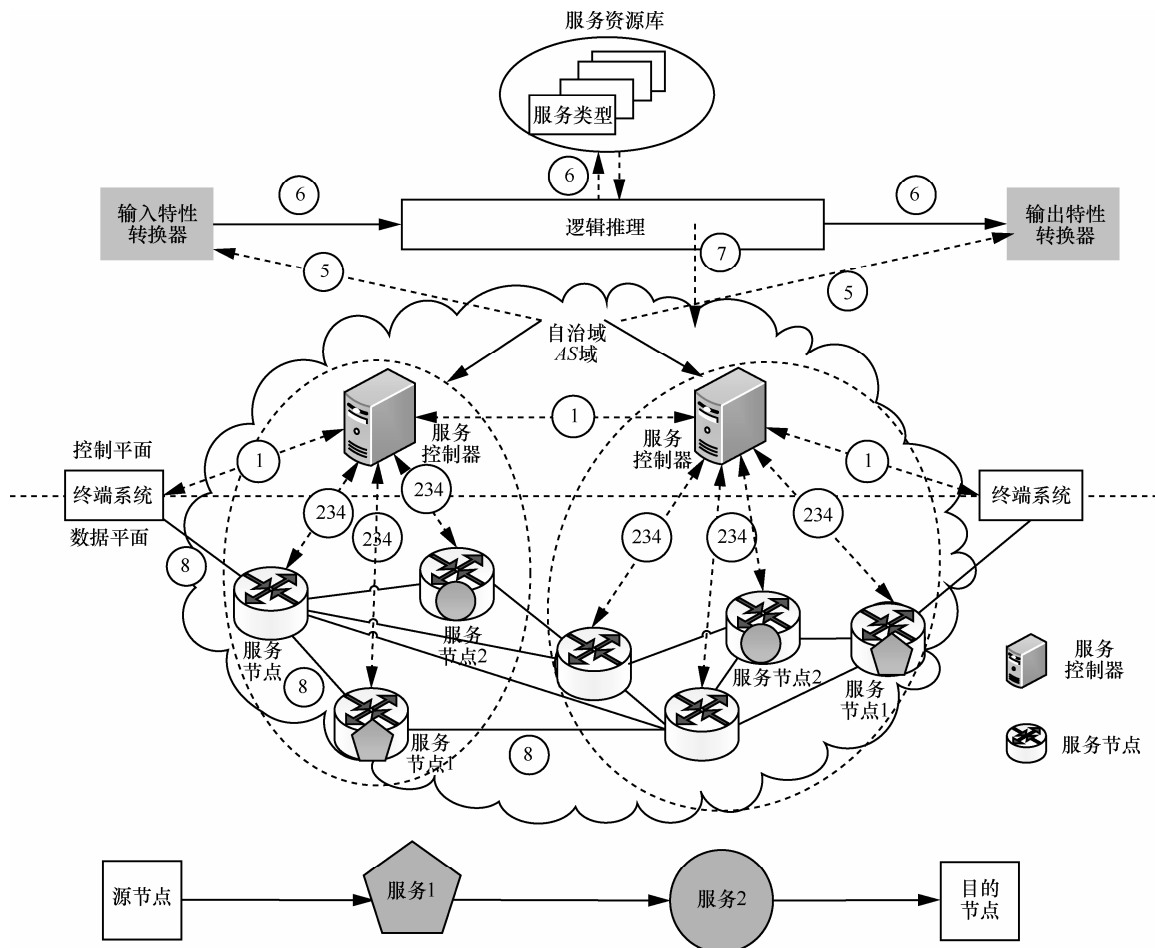


图 4 Re-SCNet 中服务路径构建的运行场景

## 4 服务路由矩阵算法

### 4.1 基于 SeRM 算法构建服务路径

本文采用 SeRM 算法建立二维结构的矩阵构建最优服务路径以求解 Mo-COSP 问题。首先将网络构建为一个加权图  $G=(V,E)$ ，其中， $V$  代表网络节点， $E$  代表网络节点的边，用  $e_{ij}$  表示， $w_{ij}$  为边的权重代表通信代价  $cost$ ，如链路时延。定义  $U_m$  为网络节点的一系列服务表示为  $U_m = \{AS_j | AS_j \rightarrow V_m, j=1,2,\dots,n\}$ 。对本文多目标约束下的最优服务路由路径构建问题形式化定义如下。

**定义 1** 功能相似度 (FS, function simily) 表示在某一节点中组合元能力形成  $AS$  时，所选的元能力被其他元能力代替的可能性。用  $AC_a^i$  和  $AC_b^i$  表示同一类元服务  $AS_i$  的 2 种元能力， $k$  为用户请求的  $AS$  数量， $\bigcup_{i=1}^{k_b} function(AC_b^i)$  是  $AC_a^i$  功能的总数， $\bigcup_{i=1}^{k_a} function(AC_a^i)$  是  $AC_b^i$  功能的总数，假设式(1)成立。

$$\bigcup_{i=1}^{k_a} function(AC_a^i) \subseteq \bigcup_{i=1}^{k_b} function(AC_b^i) \quad (1)$$

$$k_a, k_b = 1, 2, 3, \dots, k_b \geq k_a$$

则代表元能力  $AC_b^i$  可以代替  $AC_a^i$ ，假设  $C_{AC_j^i}$  代表节点中可以组合形成  $AS_i$  的路由元能力  $AC_j^i$  的数量， $k_i$  代表  $AS_i$  中元能力的总数，那么  $AC_j^i$  ( $AC_j^i \in AS_i$ ) 的功能相似度可定义为

$$FS(P) = \frac{C_{AC_j^i}}{k_i} \quad (2)$$

**定义 2** 执行时延 (D, delay) 为从发送服务请求到获取服务结果所需的时间。 $D_1$  为执行服务所需的时间， $D_2$  为状态感知、网络资源等消耗的时间， $D_3$  为服务的传输时延，则  $AS$  的执行时延可表示为

$$D(P) = D_1 + D_2 + D_3 \quad (3)$$

**定义 3** 服务路由路径  $P = \{E^P, M^P\}$ ，其中， $e_{ij} \in E^P$ ， $E^P = (e_{s,n_1}, e_{n_1, n_2}, \dots, e_{n_j, t})$  为一序列的边；服务被映射为处理节点  $M^P$ ，且  $M^P = (AS_{j_1} \rightarrow v_{m_i},$

$AS_{j_2} \rightarrow v_{m(i+1)}, \dots, AS_{j_k} \rightarrow v_{m(i+k-1)})$  表示  $(AS_{j_1}, AS_{j_2}, \dots, AS_{j_k})$  依次部署于在节点  $(v_{m_i}, v_{m(i+1)}, \dots, v_{m(i+k-1)})$  上，节点  $v_m \in M^P$ 。

**定义 4** 负载均衡度 (LB, load balancing) 表示节点的负载情况。假设  $w_{cpu}$  为 CPU 的权重， $w_{bandwidth}$  为带宽， $CPU_{N_i}$  为 CPU 利用率， $BD_{N_i}$  为带宽利用率， $CPU_{N_i}$ 、 $BD_{N_i}$  的计算式分别为

$$CPU_{N_i} = \frac{CPU_{N_i}^{used}}{CPU_{N_i}^{total}} \quad (4)$$

$$BD_{N_i} = \frac{BD_{N_i}^{used}}{BD_{N_i}^{total}} \quad (5)$$

构建服务路径时，节点负载均衡度  $LB_{N_i}$  的计算式为

$$LB_{N_i} = w_{cpu} CPU_{N_i} + w_{bandwidth} BD_{N_i} \quad (6)$$

服务路径的负载均衡度  $LB_p$  为

$$LB_p = \frac{\left( \sum_{i=1}^n LB_{N_i} \right)^2}{n \sum_{i=1}^n LB_{N_i}^2} \quad (7)$$

**定义 5** 构建最优服务路径时用户请求调用  $AS$  的总代价  $C_p$ ，包含链路代价和处理代价等。

$$C_p = \left( \sum_{\{(i,j)|e_{i,j} \in E^P\}} w_{i,j} \right) + \left( \sum_{\{(j,m)|AS_{j_d} \rightarrow v_{m_i} \in M^P\}} C_{m_i, j_i} \right) \quad (8)$$

用  $c_v^{j_1, j_2, \dots, j_k}(m)$  表示从服务节点  $n$  到节点  $m$  间最短路径的代价，没有执行  $AS$  时代价为  $c_v^-(m)$ ，邻居节点为  $n_v$  ( $n_v \in \{j \in V | e_{v,j} \in E\}$ )， $i(0 \leq i \leq k)$  代表节点执行的  $AS$  个数，则 DP 问题中节点代价的转移函数为

$$c_v^{j_1, j_2, \dots, j_k}(m) = \min_{0 \leq i \leq k} \left( \sum_{l=1}^i c_{v, j_l} + \min_{n_v} (w_{v, n_v} + c_{n_v}^{j_{i+1}, j_{i+2}, \dots, j_k}(m)) \right) \quad (9)$$

当  $i=0$  时，表示节点  $n$  上没有  $AS$  被执行，此时  $\sum_{l=1}^i c_{v, j_l} = 0$ ；当  $i=k$  时，表示所有的  $AS$  都在节点  $n$  上执行，此时， $c_{n_v}^{j_{i+1}, j_{i+2}, \dots, j_k}(m) = c_{n_v}^-(m)$ 。

通过对图  $G$  的搜索，找到一条满足下列条件的最优服务路径：1) 每个节点资源不发生超载；2) 每

条链路不发生拥塞；3) 路径上节点所提供  $AS$  满足服务请求中的  $AS$  要求；4) 功能相似度不低于用户对功能相似度的最低要求  $FS_0$ 。那么 Mo-COSP 问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{object} \quad & \min Z(P_i) = \alpha C(P) + \beta LB(P) + \delta D(P) + \gamma FS(P) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} path = (E^P, M^P) \\ \forall N_m \in M^P \\ \forall e_{ij} \in E^P \\ U_m = \{AS_j \mid AS_j \rightarrow v_m, j = 1, \dots, n\} \\ FS(P) \geq FS_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

SeRM 算法可以有效避免计算所有的  $AS$  组合，通过增加服务控制器的计算量减小了矩阵表的规模，增加了路由转发表的收敛速度，维持了路由转发表的规模。相较于分层图和 Bellman 算法，SeRM 算法的时间、空间复杂度有很大改进，复杂度对比如表 1 所示。

算法	空间复杂度	时间复杂度
分层图算法	$O(k( E  +  V ))$	$O(k E  +  V ) \log(k V )$
Bellman 算法	$O( S ^k  V )$	$O(l)$
SeMR 算法	$O( AS  V )$	$O(k)$

### 4.2 服务路由矩阵

在路由信息交换的过程中，服务节点与邻居节点不断交换路由信息  $c_v^{AS'}(*)$  ( $AS'$  为用户需要的  $AS$  序列， $*$  为目的节点)，为此本文在控制平面定义一个二维的数据结构即服务路由矩阵对  $c_v^{AS'}(*)$  进行描述，如图 5 所示，矩阵行向量为节点执行的  $AS$ ，列向量为终端节点， $c^{AS_1}(v_1)$  表示该节点执行  $AS_1$  后转发至节点  $v_1$  的代价，当节点执行的序列为  $\{AS_2, AS_1\}$  时，代价为  $c^{AS_2, AS_1}(v_1) = c^{AS_2}(v_1) + c^{AS_1}(v_1)$ 。

	-	$AS_1$	$AS_2$	...
$v_1$	$c^-(v_1)$	$c^{AS_1}(v_1)$	$c^{AS_2}(v_1)$	$\vdots$
$v_2$	$c^-(v_2)$	$c^{AS_2}(v_2)$	$c^{AS_2}(v_2)$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$

图 5 服务路由矩阵

SeRM 算法的具体步骤描述如下所示。

**步骤 1** 服务节点根据自身可以执行的  $AS$ 、处

理性能、与邻居节点之间的链路时延等，构建本节点的服务路由矩阵。

**步骤 2** 节点与邻居节点间交换含有代价信息的路由矩阵，直到路由收敛。

**步骤 3** 当网络收到用户服务请求  $R = \{s, t, (AS_{j_1}, AS_{j_2}, \dots, AS_{j_k})\}$  时，根据服务路由矩阵执行第一个元服务  $AS_{j_1}$ 。

**步骤 4** 当服务节点执行元服务  $AS_{j_i}$  之后，若节点存在  $AS_{j_{i+1}}$ ，算法进入步骤 5；若此节点不包含  $AS_{j_{i+1}}$ ，则执行代价函数迭代方程： $c_v^{j_1, j_2, \dots, j_k}(m) = \min_{0 \leq i \leq k} (\sum_{l=1}^i c_{v, j_l} + \min_{n_v} (w_{v, n_v} + c_{n_v}^{j_{i+1}, j_{i+2}, \dots, j_k}(m)))$ ，将更新后的代价信息转发给邻居节点， $i = i + 1$ ，结束算法。

**步骤 5** 执行  $AS_{j_i}$  后如果  $c_{v, j_i} < w_{v, n_v} + c_{n_v, j_i}$ ，即此服务节点执行下一项  $AS_{j_{i+1}}$  具有较小的代价，算法返回步骤 3，反之转发数据分组，结束算法。

## 5 实验结果与分析

本文依托可重构网络创新实验平台 NetFPGA-10G 对 Re-SCNet 模型进行验证并评估 SeRM 算法的性能。本文采用 96 个网络节点构成 8 个自治域进行实验，每个自治域有 8 个节点，每个节点具有 4 种元服务  $AS$ ，自治域内链路时延设置为 10 ms，自治域间链路时延设置为 2 ms，网络场景共有 10 000 个连接请求进行实验，每一个请求的带宽均设置在 10 Mbit/s 到 100 Mbit/s 之间，用户请求的源节点与目的节点在网络节点中任意选取。

### 5.1 代价累积分布

Re-SCNet 中采用 SeRM 算法构建最优服务路径，如图 6 所示， $X$  轴为连接成功建立的百分比， $Y$  轴为代价比  $\frac{C(P^{opt})}{C(P^+)}$ ，其中， $C(P^{opt})$  为最优服务路径的代价， $C(P^+)$  为 SeRM 算法构建服务路径的代价。当  $\frac{C(P^{opt})}{C(P^+)} = 1$  时，表示此算法构建的服务路由路径与最优路径的代价相同。当用户请求 2 项  $AS$  时，大约 69% 的请求构建服务路径时的代价与最优路径一致，约 93% 的请求满足  $\frac{C(P^{opt})}{C(P^+)} = \frac{2}{3}$ 。当用户请求 4 项  $AS$  时，约 95% 的

请求满足  $\frac{C(P^{opt})}{C(P^+)} = \frac{1}{2}$ 。用户的服务请求中包含越

多的 AS，相应的组合也越多，构建的路径与最优路径存在一定的偏差，但在大规模网络环境下这种偏差是可以接受的。

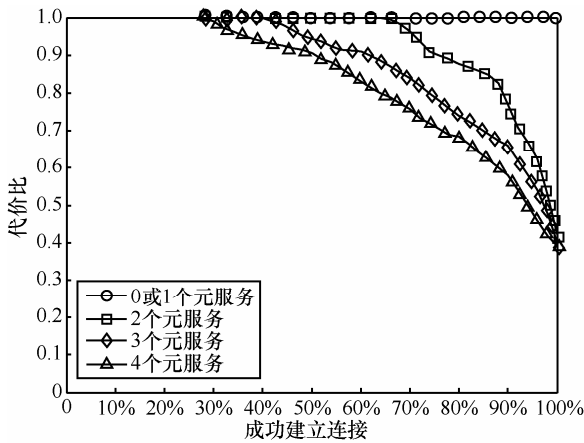


图 6 SeRM 算法代价与最优服务路径代价比

### 5.2 时延累积分布

将 SeRM 算法与分步搜索服务算法(service step search)、分层图算法 (layered graph)、随机部署服务算法(randomized placement service algorithm)的端到端时延进行对比，如图 7 所示，X 轴为端到端时延，Y 轴为时延累积。结果表明，沿一条路径部署元服务的时延均不断增加，这是由于带宽资源受到路径最大需求的限制，随机部署服务算法最终只能成功部署 40%的元服务，分层图算法与分步搜索服务算法可以成功部署约 70%的元服务，SeRM 算法可以成功部署 99%的元服务。由图 7 可知 SeRM 算法具有较大的时延累积值，端到端时延较小，能够更快地完成服务路径的构建。

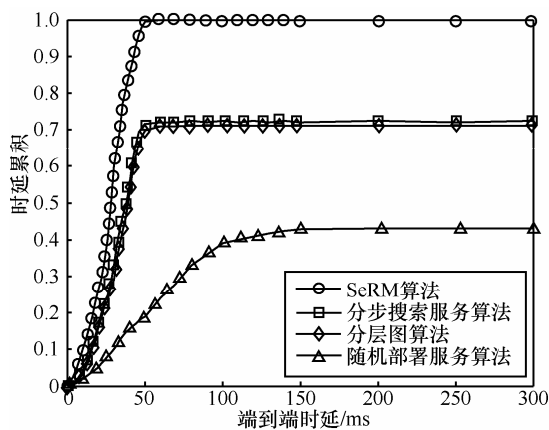


图 7 端到端时延累积分布

### 5.3 链路连接的丢弃数量

从图 8 可以得出，分层图算法的链路连接丢弃数目与连接的请求数目成线性关系，刚开始就具有较高的连接丢弃率，随机部署算法、分布搜索服务算法在网络资源消耗过多时，连接的丢弃数目开始增加，相比之下，SeRM 算法在网络资源接近耗尽时连接丢弃率才开始增加，且连接丢弃率最低，具有更优的性能。

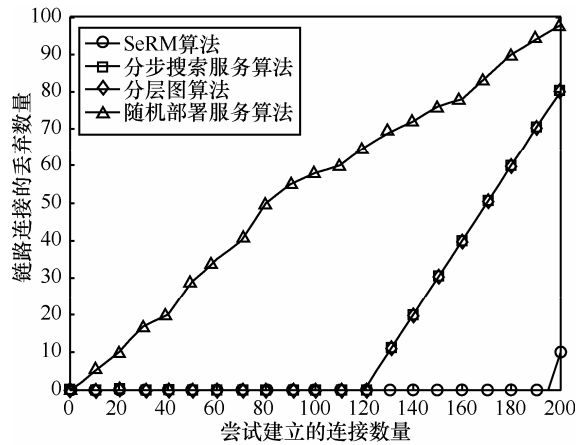


图 8 链路连接的丢弃数量

### 5.4 链路资源消耗

在图 9 中，X 轴为网络中的连接数量，Y 轴为所消耗的数据链路资源，可得出建立网络连接消耗的网络链路资源会随建立连接数量的增加而增加，随机部署服务算法消耗较多的网络链路资源，这是由于此算法在选择服务节点时不考虑链路状况，相比之下分层图及分步搜索服务算法在建立相同数目的网络连接时消耗较少的链路资源，SeRM 算法消耗的链路资源最少。

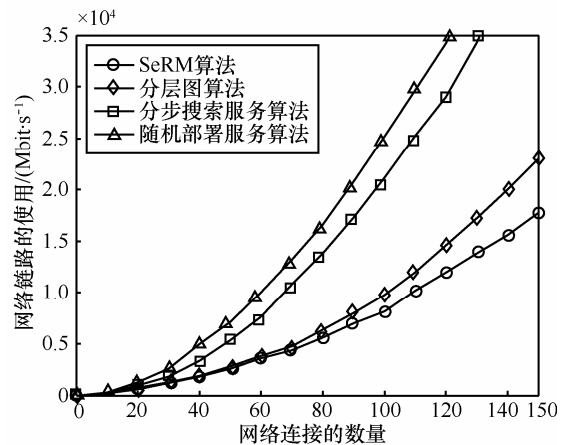


图 9 网络链路资源的消耗

## 5.5 链路连接的丢弃数量

服务节点负载情况如图 10 所示, 随机部署算法最能有效地平衡网络中服务节点的负载, 分层图算法以及分步搜索服务算法致使网络服务节点负载不平衡, 是由于这 2 种算法会优先选择最短路径上的节点, SeRM 算法集中使用具有特定服务功能的服务节点为用户服务请求定制化服务路径致使相应的节点负载不平衡。从仿真结果可以得知, SeRM 算法中大约 83% 的节点处于空闲状态, 服务分步搜索算法、分层图算法、随机部署服务算法分别约 80%、63%、45% 的节点处于空闲状态, SeRM 算法更能集中选择具有特定服务功能的节点。

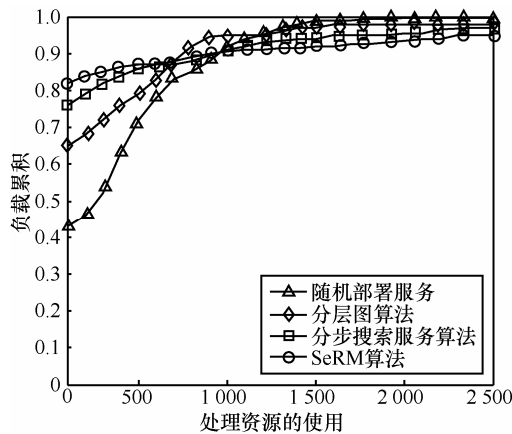


图 10 节点的负载累积分布

## 6 结束语

针对现有网络中间件服务部署僵化单一, 难以支持未来多样化网络服务需求的问题, 本文在可重构服务中心网络 Re-SCNet 中把传统的网络功能和网络服务分解为细粒度的元服务 AS, 在传统网络层之上构建可重构服务层, 根据用户的服务需求对 AS 进行编排定制和灵活部署, 并将对服务路径的选择建模为多目标约束下最优化服务路径 Mo-COSP 问题, 提出服务路由矩阵算法 SeRM 求解 Mo-COSP 问题, 构建一个满足特定的功能、性能约束下为用户服务请求定制化一条最优的服务路径。仿真实验结果证明 SeRM 算法在网络代价、端到端时延、链路连接的丢弃率、建立链路连接网络消耗的数据链路资源以及服务节点的负载等方面相较于分层图算法及服务分步搜索算法具有较好的性能。

## 参考文献:

- [1] GEMBER A, KRISHNAMURTHY S, JOHN S S, et al. Stratos: a network-aware orchestration layer for middleboxes in the cloud[J]. Technical Report arXiv:1305.0209, 2013.
- [2] DOYLE J C, ALDERSON D L, LI L, et al. The “robust yet fragile” nature of the Internet[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(41): 14497-14502.
- [3] ANWER B, BENSON T, FEAMATER N, et al. A slick control plane for network middleboxes[J]. ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, 2013, 39(9): 227-236.
- [4] GIBB G, ZENG H, MCKEOWN N. Outsourcing network functionality[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. 2012:73-78.
- [5] WOLF T. Service-centric end-to-end abstractions in next-generation networks[C]//15th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. 2006: 79-86.
- [6] BRAUN T, HILT V, HOFMANN M, et al. Service-centric networking[C]//2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). 2011: 1-6.
- [7] YU T, ZHANG Y, LIN K J. Efficient algorithms for Web services selection with end-to-end QoS constraints[J]. ACM Transactions on the Web, 2007, 1(1): 6.
- [8] MOGHADDAM M, DAVIS J G. Service selection in Web service composition: a comparative review of existing approaches[M]. Web Services Foundations, 2014: 321-346.
- [9] GRIFFIN D, RIO M, SIMOENS P, et al. Service oriented networking[C]//2014 European IEEE Conference on Networks and Communications. 2014: 1-5.
- [10] WU Q, LI Z, ZHOU J, et al. SOFIA: toward service-oriented information centric networking[J]. IEEE Network, 2014, 28(3): 12-18.
- [11] THOMAS E. Service-oriented architecture (SOA): concepts, technology, and design[J]. Prentice Hall PTR, 2005, 118(2): 33-37.
- [12] DUTTA R, ROUSKAS G N, BALDINE I, et al. The SILO architecture for services integration, control, and optimization for the future Internet[J]. Proc IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2000, 2(2): 1899-1904.
- [13] GU X, NAHRSTEDT K. On composing stream applications in peer-to-peer environments[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(8): 824-837.
- [14] RAMAN B, KATZ R H. Load balancing and stability issues in algorithms for service composition[C]//IEEE INFOCOM 2003, 2003, 2(2): 1477-1487.
- [15] XIAO J, BOUTABA R. QoS-aware service composition and adaptation in autonomic communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 23(12): 2344-2360.
- [16] PAIK I, CHEN W, HUHNA M N. A scalable architecture for automatic service composition[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2014, 7(1): 311-318.
- [17] HAN S W, KIM N, KIM J W. An experimental service composition tool for media-centric networked applications[J]. Computer Networks, 2014, 63(3): 188-204.
- [18] KLEIN A, FUYUKI I, HONIDEN S. SanGA: a self-adaptive network-aware approach to service composition[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2013, 7(3):452-464

- [19] MOGUL J C, AUYYOUNG A, BANERJEE S, et al. Corybantic: towards the modular composition of SDN control programs[C]//Twelfth ACM Workshop on Hot Topics in Networks. 2013: 1-7.
- [20] LEE K, YOON H, PARK S. A service path selection and adaptation algorithm in service-oriented network virtualization architecture[C]//2013 IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). 2013: 516-521.
- [21] CHOI S Y, TURNER J S. Configuring sessions in programmable networks[J]. Computer Networks, 2010, 41(2): 269-284.
- [22] 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): 187-198.  
LAN J L, CHENG D N, HU Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 187-198.
- [23] 段通, 兰巨龙, 程国振. 基于元能力的 SDN 功能组合机制[J]. 通信学报, 2015, 43(5): 1-11.  
DUAN T, LAN J L, CHENG G Z. Functional composition in soft-nme-defined network based on atomic capacity[J]. Journal on Communications, 2015, 43(5): 1-11.
- [24] NetFPGA-10G project[EB/OL].[https://github.com/NetFPGA/NetFPGA-public/wiki/Home\\_NetFPGA-10G](https://github.com/NetFPGA/NetFPGA-public/wiki/Home_NetFPGA-10G), 2016.
- [25] CHOI S Y, TURNER J S, WOLF T. Configuring sessions in programmable networks[J]. Computer Networks, 2003, 41(2): 269-284.

#### 作者简介:



**赵丹** (1992-), 女, 安徽宿州人, 国家数字交换系统工程技术研究中心硕士生, 主要研究方向为新一代信息通信网、路由交换技术等。

**文锋** (1976-), 男, 江苏无锡人, 江南计算技术研究所高级工程师, 主要研究方向为计算机应用。

**徐鑫** (1993-), 男, 四川成都人, 国家数字交换系统工程技术研究中心硕士生, 主要研究方向为无线通信安全。

**王鹏** (1985-), 男, 河南周口人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为新一代信息通信网络、路由交换技术等。

**陈博** (1989-), 男, 河南商丘人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为网络安全。