

## 运营商网络中面向资源碎片优化的网络服务链构建策略

陈卓<sup>\*①②</sup> 冯钢<sup>②</sup> 刘蓓<sup>②</sup> 周杨<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(重庆理工大学计算机科学与工程学院 重庆 200433)

<sup>②</sup>(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 710077)

<sup>③</sup>(奥本大学计算机科学与软件工程学院 美国阿拉巴马州 奥本市 36849)

**摘要:** 网络功能虚拟化(NFV)的引入使得运营商网络的网络功能不再依赖于专用硬件设备且服务能力更具弹性。为更有效地使用基于 NFV 的运营商网络中的资源, 该文提出一种网络服务链(NSC)的优化构建策略。和已有研究工作不同, 该文从减少因计算资源和网络资源这两类资源的不合理使用产生的资源碎片角度出发, 以最大化运营商网络能容纳的业务流数量为目标, 建立 NSC 构建的数学模型, 且提出一种新的贪心 NSC 构建策略, 该策略融合了路径选择和 NSC 的多个 VNF 部署。数值仿真实验表明, 在相同资源总量的情况下与典型策略相比, 所提策略能够容纳更多的业务流, 实现更低的端到端的数据延迟, 有效提高了运营商网络中通用服务器和交换机的资源利用率。

**关键词:** 网络功能虚拟化; 网络服务链; 运营商网络

**中图分类号:** TP393.0

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)04-0763-07

**DOI:** 10.11999/JEIT170641

## Construction Policy of Network Service Chain Oriented to Resource Fragmentation Optimization in Operator Network

CHEN Zhuo<sup>①②</sup> FENG Gang<sup>②</sup> LIU Bei<sup>②</sup> ZHOU Yang<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 200433, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 710077, China)

<sup>③</sup>(Department of Computer Science and Software Engineering, Auburn University, Auburn 36849, United States of America)

**Abstract:** With the introduction of Network Function Virtualization (NFV), the network functions of operator networks are no longer dependent on dedicated hardware devices, and service capabilities of carrier network are more resilient than ever. For more efficient use of resources in NFV-based operator networks, this paper proposes a construction policy of Network Service Chain (NSC). This paper aims to maximize the number of flows that the carrier network can accommodate, a mathematical model is established for NSC construction from the point of view of reducing resource fragmentation due to the unreasonable use of computing resources and network resources. A new greedy NSC construction strategy is designed, which combines the path selection and multiple VNFs deployment of NSC. Numerical simulation result shows that the proposed policy can accommodate more flows and achieve lower end-to-end data latency than the typical policies in the case of the same amount of resources, which improves effectively resource utilization of the general server and switch in operator network.

**Key words:** Network Function Visualization (NFV); Network Service Chain (NSC); Operator network

### 1 引言

近年来, 网络功能虚拟化(Network Function

Visualization, NFV)技术越来越多地运用部署到运营商网络中<sup>[1,2]</sup>。一方面, 通过 NFV 技术的使用, 运营商网络的各种网元功能可以软件虚拟化为虚拟网络功能(Virtualized Network Function, VNF)<sup>[3]</sup>。使得各个网元功能的容量调配周期极大缩短, 业务部署的弹性大幅提升。另一方面, 能够使用价格更低但更新换代周期却更短的通用计算平台来构建电信基础设施, 这进一步降低了运营商的设备投入成本。但 NFV 运用于运营商网络也面临诸多技术挑战, 其关键问题已成为当前产学研研究关注的热

收稿日期: 2017-07-04; 改回日期: 2017-12-21; 网络出版: 2018-01-23

\*通信作者: 陈卓 chenzhuo@cqut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61631004, 61471089), 重庆基础与前沿研究计划项目(cstc2013jcyjA40024), 中央高校基本科研业务费项目(ZYGX2015Z005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61631004, 61471089), The Basic and Frontier Research Project of Chongqing (cstc2013jcyjA40024), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2015Z005)

点<sup>[4-6]</sup>。在基于NFV构建的运营商网络中,不同类型的业务流需要由不同类型的VNF加以服务,这些VNF以某种次序组成集合,构成了网络服务链(Network Service Chaining, NSC)<sup>[6,7]</sup>。我们可以将每条NSC视作是由一个或多个VNF按照预定的次序串联形成的一条虚拟路径。当NSC为业务流提供服务的时候会同时占用运营商网络中的网络资源(如:交换机的交换能力)和相关通用服务器的计算资源。因此,如何设计合理的NSC的构建策略变得尤其重要,这关系到运营商网络中计算和网络两类资源的使用效率。

在已有的相关研究工作中,文献[6-8]以提高虚拟机的使用效率为目标讨论NSC的部署问题,文献[9]以全局的虚拟机资源使用量为优化目标部署VNF。在移动云环境下,文献[10]利用贪心算法解决了VNF最优化部署的问题。文献[11]研究了运营商网络中实例化VNF的问题,在保证用户体验的情况下降低网络运营商的开销。在特定的运营商网络场景下,文献[12]针对移动用户不同的服务类型和移动性要求,研究了特定网元的虚拟化部署问题。Basta等人<sup>[13]</sup>以最小化网络传输的负载为目标建立优化模型,给出了有时延约束条件下VNF的部署方案。文献[14,15]聚焦在引入NFV后VNF的弹性部署和链接问题,分别提出了启发式的算法和以最小化操作开销为目标的优化算法。文献[16]在数据中心网络中就VNF的部署问题展开讨论,认为VNF的实例化分配和移除类似于虚拟机的放置和迁移。作者以最少VNF实例化为优化目标,建立了整数线性规划模型并给出解决方案。和前述研究工作不同的是本文从减少资源碎片的角度去研究NSC构建问题,将计算和网络资源两个因素纳入考虑,以最大化运营商网络能容纳的业务流数量为目标,提出NSC构建新策略。最后通过实验表明该策略能更有效地提高运营商网络的服务能力,优化资源的使用效率。

## 2 模型建立

以一个无向图 $G = (S \cup H, E)$ 描述运营商网络。其中, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 为运营商网络中的交换机集合。且对于某台交换机 $s_i (s_i \in S)$ 的最大交换能力为 $B_i$ ,剩余交换能力为 $B'_i$ 。另外, $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ 为运营商网络中的通用服务器集合,对于某台通用服务器 $h_i (h_i \in H)$ 的最大计算资源为 $C_i$ ,剩余资源为 $C'_i$ 。 $E$ 为运营商网络的链路集合,用 $y(u, v) (u, v \in S \cup H)$ 表示运营商网络中的某两台物理设备 $u$ 和 $v$ 是否属于链路集合 $E$ 。若两台物理设备直接相连,

则 $y(u, v) = 1$ ,否则 $y(u, v) = 0$ 。用 $l_{u,v}$ 表示链路 $(u, v)$ 的时延。对某个业务流 $i$ 的服务请求,用一个5元组 $(I_i, E_i, T_i, V_i, D_i)$ 加以描述,其中 $I_i, E_i \in S$ 分别表示业务流 $i$ 的流入/流出交换机(即:入口/出口网元), $T_i$ 表示 $i$ 的流量需占用的带宽资源, $V_i$ 表示业务流 $i$ 需要经过处理的虚拟网络功能组成的集合, $V_i$ 可进一步表示为 $\{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,k}\}$ ,其中 $v_{i,r}$ 表示 $V_i$ 的第 $r$ 个虚拟网络功能。当运营商网络能够为业务流 $i$ 提供服务,则需要按照 $V_i$ 中虚拟网络功能的排列顺序构建起一条网络服务链(NFC)。另外,运行 $v_{i,r}$ 所需要占用的计算资源为 $c \cdot v_{i,r}$ 。 $D_i$ 为该业务流的最大容忍时延。为了便于统计业务流数量,我们假设所有的业务流均为同种类型业务,则每个服务请求的最大时延要求 $D_i$ 为 $D$ 。本文最终目标是希望通过优化部署资源使得运营商网络能服务尽可能多的业务流,假设业务流请求数量为 $N$ ,则优化目标函数是 $\max N$ 。

当业务流 $i$ 的服务请求进入到运营商网络中时,网络控制器根据 $i$ 的请求和当前运营商的可用资源构建起网络服务链,并将 $V_i$ 集合中的每一个虚拟网络功能实例化。定义决策变量 $\beta$ 表示虚拟网络功能的部署:

$$\beta_{v_{i,r}}^{h_p} = \begin{cases} 1, & \text{业务流 } i \text{ 的 } v_{i,r} \text{ 部署于通用服务器 } h_p \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

同时,控制器也将为 $V_i$ 集合选择一条路径连接各个虚拟网络功能。定义决策变量 $\alpha$ 为

$$\alpha_i^{u,v} = \begin{cases} 1, & \text{业务流 } i \text{ 的各VNF经过链路 } (u, v) \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$V_i$ 的路径决策包括了两个部分,一是由变量 $\alpha_i^{u,v}$ 确定的由交换机相连构成的主路径部分,另一部分路径则是由决策变量 $\beta_{v_{i,r}}^{h_p}$ 确定的通用服务器及与其相连的交换机构成。由决策变量 $\alpha$ 可知对于为业务流 $i$ 构建的NSC而言,所映射的路径必须属于运营商网络拓扑中实际存在的链路,故有约束式(1)成立:

$$\alpha_i^{u,v} \leq y(u, v), \quad \forall u, v \in S \cup H \quad (1)$$

为了避免TCP流在分离的时候可能产生的性能退化,本文规定一条流不允许分离为两条以上的路径。将NSC映射到物理链路后,除了流入和流出交换机以外的中间物理节点,都必须满足流量守恒的条件,故有式(2)成立:

$$\sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{w,u} - \sum_{v \in S \cup H} \alpha_i^{v,w} = 0, \quad \forall w \in S \cup H, \quad w \notin \{I_i, E_i\} \quad (2)$$

特别地,对该业务流  $i$  的流入交换机  $I_i$  而言,满足式(3)约束:

$$\sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{I_i, u} - \sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{u, I_i} = 1 \quad (3)$$

类似地,对于业务流  $i$  的流出交换机  $E_i$  而言,则必须满足:

$$\sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{u, E_i} - \sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{E_i, u} = 1 \quad (4)$$

为了保证用户的服务质量,网络服务链的链路映射到运营商网络实际物理链路之后,数据传输的总时延必须小于等于端到端时延要求:

$$\sum_{u \in S \cup H} \sum_{v \in S \cup H} \alpha_i^{u, v} \cdot l_{u, v} \leq D_i \quad (5)$$

上文已说明将网络服务链的实际路径划分为两部分,而其中的交换机和通用服务器之间采用高速光纤连接,链路时延忽略不计,因此式(5)转换为

$$\sum_{u \in S} \sum_{v \in S} \alpha_i^{u, v} \cdot l_{u, v} \leq D_i \quad (6)$$

同时对任意一台交换机而言,必须保证从其所连接的通用服务器和从其它交换机流入的总流量小于等于该交换机的最大数据交换能力:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{u, s_j} \cdot T_i \leq B_j, \quad \forall s_j \in S \quad (7)$$

对运营商网络中任意一台通用服务器而言,部署在其上的 VNF 所需要的计算资源总和必须小于等于该通用服务器能够提供的资源总量:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^K \beta_{v_{i,r}}^{h_p} \cdot c v_{i,r} \leq C_{h_p}, \quad \forall h_p \in H \quad (8)$$

业务流  $i$  所需虚拟网络功能  $V_i$  中的每一个 VNF  $v_{i,r}$  都能且只能映射到一台通用服务器上,因此有式(9)约束成立:

$$\sum_{h_p \in H} \beta_{v_{i,r}}^{h_p} = 1 \quad (9)$$

同时,一条 NSC 的 VNF 需有序部署于通用服务器,我们将 NSC 的流入交换机  $I_i$  到流出交换机  $E_i$  所经过的所有交换机,按交换机在路径中的顺序进行编号,记为  $I_i(s_j)$ 。用  $\varphi(h_p)$  表示和物理主机  $h_p$  直接相连的交换机集合,而用  $\varphi(s_j)$  来表示和交换机  $s_j$  直接相连的通用服务器集合。分别表示为:  $\varphi(h_p) = \{s_j | y(s_j, h_p) = 1\}, \forall h_p \in H, s_j \in S$  和  $\varphi(s_j) = \{h_p | y(s_j, h_p) = 1\}, \forall h_p \in H, s_j \in S$ 。对任意一条业务流  $i$  的 VNF  $v_{i,r}$  而言,必须保证部署该 VNF 的物理主机其直连的交换机索引值不大于部署下一个 VNF  $v_{i,r+1}$  的物理主机其直连的交换机索引值,即有式(10)成立:

$$I_i(\varphi(h_p)) \leq I_i(\varphi(h_q)), \quad \beta_{v_{i,r}}^{h_p} = \beta_{v_{i,r+1}}^{h_q} = 1 \quad (10)$$

另外,与部署了 VNF 的通用服务器直接相连的交换机则必须在运营商网络实际链路之上,因此有

$$\sum_{v \in S} \sum_{u \in S} \sum_{h_p \in H} \beta_{v_{i,r}}^{h_p} \cdot \alpha_i^{h_p, u} \cdot (\alpha_i^{u, v} + \alpha_i^{v, u}) \geq 1 \quad (11)$$

### 3 问题的求解

#### 3.1 NP 性讨论

多商品流问题(multi-commodity flow problem)主要讨论  $k$  种不同的商品在网络中从某个源点到汇点的运输问题。在一个有向图  $G = (V, E)$  中,其中的每条边  $(u, v) \in E$  都有一个非负的容量  $c(u, v) \geq 0$ 。对于  $(u, v) \notin E$  有  $c(u, v) = 0$ , 另外,对  $k$  种不同的商品  $C_1, C_2, \dots, C_k$ , 其中用 3 元组  $C_i = (s_i, t_i, d_i)$  来详细描述商品  $i$ 。这里顶点  $s_i$  是商品  $i$  的源点,顶点  $t_i$  是商品  $i$  的汇点。 $d_i$  是运输商品  $i$  需占用的容量值。流  $f_{uv}$  即商品  $i$  从顶点  $u$  到顶点  $v$  的流,所有商品在边  $(u, v)$  上的汇聚流不能超过该边的容量  $c(u, v)$ 。多商品流问题是一个典型的 NP-hard 问题<sup>[17]</sup>。本文所研究的问题是对任意一交换机而言,从与之关联的通用服务器节点流入的流量以及从与之相连的其它若干条网络链路流入流量之和的限制,若将这个限制放宽到每条链路的容量限制则所研究的问题就归结为一个多商品流问题。

#### 3.2 启发式的 NSC 构建策略

鉴于 VNF 的优化部署问题是一个 NP-hard 问题,不存在 1 个多项式时间算法能够求解 NSC 的构建问题。从本文的优化目标是让运营商网络能够满足服务尽可能多的业务流来看,最直观的解决方法就是为每一条业务流找到一条合适的路径并尽可能利用最少的资源。基于此分析,本文提出了一种包括两个阶段的启发式的 NSC 构建策略。第 1 个阶段运行路径选择算法,找到一条满足业务流需求的合理的 NSC 路径。第 2 阶段运行 VNF 优化部署算法,在第 1 阶段基础上完成 VNF 的合理部署。下面分别加以描述。

第 1 个阶段的路径选择算法主要目标是找到从流入交换机到流出交换机的合适的路径。本文希望当前的运营商网络能为更多业务流服务,应尽量减少每条业务流所需要占用的资源。例如:如果路径越短,业务流经过的交换机越少,则占用的数据交换资源也就越少。我们采用启发式的搜索算法  $A^*$  求取从源点到目的节点的第  $k$  最短路。 $A^*$  算法<sup>[18,19]</sup>在人工智能中是一种典型的启发式搜索算法,算法中的估价是用估价函数表示的:  $f(n) = g(n) + h(n)$ , 其中  $f(n)$  是从初始节点经由节点  $n$  到目的节点  $t$  的

估价函数,  $g(n)$  是在状态空间中从初始节点到节点  $n$  的实际代价,  $h(n, t)$  是从中间节点  $n$  到目的节点  $t$  最佳路径的估计代价。在设计中, 要保证  $h(n)$  小于等于  $n$  到  $t$  的实际代价, 我们采用节点  $n$  到目的节点  $t$  的最短距离作为 A\* 算法的估计代价, 得到路径选择算法如表 1 所示。

表 1 路径选择算法伪码

---

**路径选择算法**  
 输入: 业务流  $i$  的流入/流出交换机  $I_i$  和  $E_i$ , 运营商网络拓扑  $G$ , 第  $E$  短路径的  $K$  值  
 输出: 为业务流  $i$  建立的 NSC 路径和该路径长度  
     求解流出交换机  $E_i$  到任意交换机  $s_j$  的最短距离  $h(s_j)$   
     创建优先队列  $Q$  记录节点  $s_j$  及估值信息  $h(n)$ ,  $cont$  记录出队列次数  
 初始化: 将流入交换机  $I_i$  入队列  $Q$   
 while( $Q$  不为空)  
 {  
   选择  $Q$  中  $h(s_j)$  值最小的节点  $s_j$ , 并从  $Q$  出队列;  
   if ( $s_j$  等于  $E_i$ )  
      $cont=cont+1$ ;  
   end  
   if ( $cont$  等于  $K$ )  
     记录  $E_i \rightarrow s_j \rightarrow I_i$  的路径及路径长度;  
     break  
   end  
   for  $i=1$  to  $n-1$   
     if ( $y(s_j, s_i)$  等于 1)  
       计算并添加  $s_i$  以及估值信息进优先队列  $Q$ ;  
     end  
   end  
 }  
 输出结果: 第  $K$  短路的路径以及长度  $L_{i,K}$

---

在一条部署 NSC 的路径以及路径长度  $L_{i,K}$ , 本文研究的问题则可进一步转化为在该路径下如何合理部署 VNF, 这要求将一条 NSC 的各 VNF 按给定顺序部署在若干通用服务器上。如果选择的通用服务器数量越多, 需要与之连接的交换机就越多, 则需要更多的占用网络资源, 这不利于运营商网络为更多业务流提供服务。另外, 对单独的通用服务器资源占用过多容易产生资源碎片, 使得通用服务器的资源难以充分利用, 因此我们以产生最少的资源碎片为目标求解 VNF 的合理部署问题。本文中的资源碎片指运营商网络的通用服务器和交换机中细分得很小的资源块, 虽然存在但无法有效再利用和再分配用于有效部署 VNF。有两种情况会产生资源碎片, 一种是通用服务器的剩余资源  $C'$  小于任意一条业务流  $i$  所需最小 VNF 资源, 即:  $\min\{cv_{i,1}, cv_{i,2}, \dots, cv_{i,k}\}$ , 另一种情况是交换机的剩余交换能力  $B'$  不足

以提供部署 VNF 在与其直连的通用服务器足够的数据交换能力, 即  $B' < 2T$  (符号定义见第 2 节)。在通过路径选择算法得到合理路径的基础上, 本文提出了一种建立在经典遗传算法之上的 VNF 部署算法。特别说明的是, 考虑到通用服务器和 VNF 之间存在映射关系, 本文采用一种 0-1 矩阵编码方式, 将矩阵作为群体个体进行后续的选择、交叉、变异等遗传运算。矩阵的行数为 NSC 中包含的 VNF 的个数, 矩阵的列数与运营商网络中通用服务器的数目相等。这样的编码方式将矩阵整体作为遗传子代个体, 而无需将矩阵展开成一串元素, 能确保子代个体基因的完整性。VNF 部署算法描述如表 2 所示。

整个 NSC 的构建策略包括了路径选择算法和 VNF 的优化部署算法, 因此通过对这两个算法复杂度的分析可以得到整个策略的算法复杂度。这里主要通过时间复杂度评估 NSC 的构建策略。通过表 1

表 2 VNF 部署算法伪码

---

**VNF 部署算法**  
 输入: 物理网络拓扑  $G = (S \cup H, E), V = \{v_1, v_2, \dots, v_K\}$   
 输出: VNF 映射策略  $M_b$   
 初始化: 令  $fit_{max} = fit'_{max} = 0, M_{best} = \emptyset$   
     产生初始种群  $P(0)$ , 大小为  $N$ , 种群连续迭代  $T$  次最优解仍相同, 交叉概率  $P_c$ , 变异概率  $P_m$   
 while( $t < T$ )  
 {  
   for  $p_i \in P(m)$  do  
     求解得到适应度  $fit(p_i)$   
     if ( $fit(p_i) > fit'_{max}$ )  
        $fit'_{max} = fit(p_i)$   
       记录 VNF 部署方案  $M_b$ , 执行  $M_b \leftarrow$  染色体  $p_i$   
     end  
   end  
   根据 RWS 选择合适的染色体构成父代群体  $P(m+1)$   
   for  $i \in N/2$  do  
      $P_{2i}$  以概率  $P_c$  与  $P_{2i+1}$  交叉  
   end  
   for  $p_i \in p(m+1)$  do  
     以概率  $P_m$  变异  
   end  
   for  $p_i \in p(m+1)$  do  
     进行可行性检查  
   end  
   if ( $fit_{max}$  等于  $fit'_{max}$ ) do  
      $t = t + 1$   
   else  
      $t = 0$   
   end  
 }  
 输出 VNF 映射策略  $M_b$

---

和表2的伪代码可分析得到路径选择算法的时间复杂度和 VNF 部署算法的时间复杂度均为  $O(N \cdot \lg N)$ ，因此整个 NSC 的构建策略的时间复杂度为  $O(N \cdot \lg N)$ 。

## 4 实验与性能评估

### 4.1 实验场景建立

本文使用 Matlab 完成数值仿真，重点评估基于本文提出的部署方案在容纳业务流的请求数量、交换机资源利用率以及通用服务器资源利用率方面的性能。这里采用被广泛地作为对比对象的 First-Fit 和 Random 部署策略<sup>[3,20]</sup>作为评估参考。当一个业务流  $i$  的请求到达的时，Random 部署策略随机选择有足够剩余资源和交换能力的通用服务器进行节点映射和链路映射，而 First-Fit 部署则优选第 1 个能满足业务流对资源和交换能力需求的通用服务器进行节点和链路映射。为充分评估本文提出策略在不同网络规模和参数下的表现，我们选取了规模较大的运营商网络场景进行分析比较。该网络及网络服务链的实验参数设置为：运营商网络的物理节点数(通用服务器数量)为 90 个。链路数量为 110。通用服务器的计算资源在  $\{6, 8, 10\}$  内随机选择，单位以 IPS 进行衡量，表示每秒能够执行的指令数量。交换机的交换能力在  $\{100, 150, 200\}$  之间随机选取。运营商网络的链路时延在  $\{1, 2, 3, 4\}$  随机选择，单位是 ms。网络服务链(NSC)的参数，业务流的流入交换机在编号为 1~5 的交换机之间随机选择。业务流的流出交换机在编号为 40~45 的交换机之间随机选择。端到端延迟要求为 20 ms。带宽流量占用服从  $[20, 100]$  之间的均匀分布，单位为 kbps。可以用于建立 NSC 的网络功能(VNF)共有 5 种类型：vNF1~vNF5。运行各种网络功能所需占用的计算资源分别为 2~6，单位仍以 IPS 进行衡量。

### 4.2 评价指标

本文基于如下 4 个指标，评估提出算法的性能，进行评估。

(1) 运营商网络中能够容纳的业务流数量  $N$ ;

(2) 运营商网络中通用服务器的资源利用率  $\phi_1$ ，表示为

$$\phi_1 = \frac{\sum_{h_p \in H} \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^K \beta_{v_{i,r}}^{h_p} \times cv_{i,r}}{\sum_{h_p \in H} C_{h_p}}$$

其中， $\sum_{h_p \in H} \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^K \beta_{v_{i,r}}^{h_p} \times cv_{i,r}$  是网络中实际用到的通用服务器的资源总量， $\sum_{h_p \in H} C_{h_p}$  是网络中

总的通用服务器资源总量;

(3) 运营商网络中交换机的资源利用率  $\phi_2$ ，表示为

$$\phi_2 = \frac{\sum_{s_j \in S} \sum_{i=1}^N \sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{u, s_j} \times T_i}{\sum_{s_j \in S} B_{s_j}}$$

其中， $\sum_{s_j \in S} \sum_{i=1}^N \sum_{u \in S \cup H} \alpha_i^{u, s_j} \times T_i$  是网络中实际使用的交换机资源， $\sum_{s_j \in S} B_{s_j}$  是网络中总的交换机交换能力。

### 4.3 实验结果与分析

首先，比较当运营商网络采用不同 VNF 的部署策略建立 NSC，运营商网络能够容纳的业务流数量。从图 1 中，可以看到当业务流的业务请求数较少的时候，无论是本文的部署策略还是基于 First-Fit 算法和 Random 算法的部署策略能够容纳的服务请求数是相等的，但随着网络中服务请求数目的增多，本文策略能够容纳更多的业务流。图 2 显示了通用服务器的资源利用率的对比结果，由于仿真环境中的 NSC 所需的 VNF 都是相同的，因此通用服务器的资源利用情况与网络中容纳业务流的数目具有相同趋势，通用服务器的资源利用率随着接收的业务流的数量增加而增加。图 3 和图 4 从两个角度展示了网络中交换机的资源利用率。从图 3 可以观察到随着网络容纳的业务流数量的增加，本文策略下的交换机资源利用率逐渐高于另外两种对比算法，这主要是由于本文策略下接受的业务流数量逐渐增加为最多而导致。

接下来改变 NSC 中 VNF 的个数，对比不同 VNF 数量下 3 种策略对资源利用率的影响。我们用一个 3 元组表示 NSC: {NSC 类型, VNF 的数量, VNF 所需的资源}。一共定义了 6 种类型 NSC，分别为: {类型 1, 1, 4}, {类型 2, 2, (4, 2)}, {类型 3, 3, (4, 2, 3)}, {类型 4, 4, (4, 2, 3, 3)}, {类型 5, 5, (4, 2, 3, 3, 2)}, {类型 6, 6, (4, 2, 3, 3, 2, 2)}。从图 5 可以看到两个趋势，一是随着 VNF 个数的增多，每个服务请求所需要的物理资源越多，则网络中容纳的服务请求个数会减少。二是在运营商网络资源相同的情况下，无论业务流需要哪一类的 NSC 提供服务，本文部署策略都能够容纳更多的服务请求。由图 6 可知，由于每条业务流所需要的物理资源随着 VNF 个数的增多而增多，受到物理交换机资源的限制网络中容纳的服务请求数减少，但整体上，物理主机的资源利用率呈现升高的趋势。

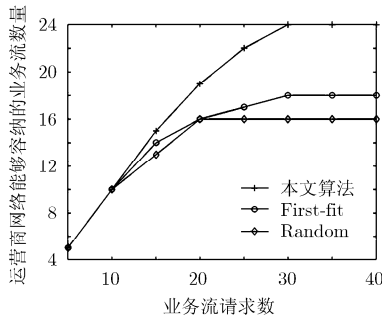


图1 网络能够容纳的业务流数量对比

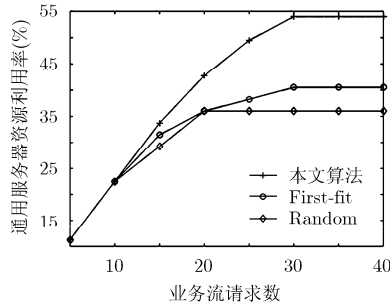


图2 通用服务器的资源利用率对比

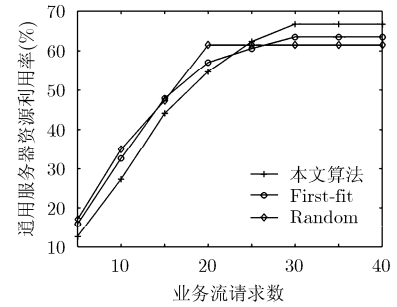


图3 交换机的资源利用率对比

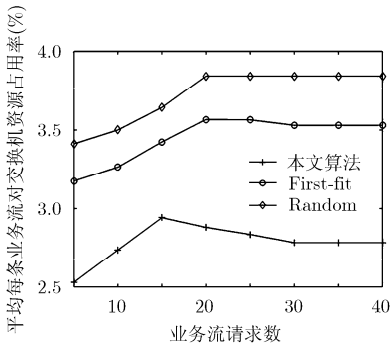


图4 平均每条业务流对交换机资源占用对比

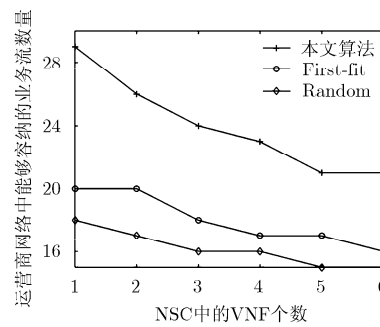


图5 不同 NSC 类型下网络容纳的业务流数量对比

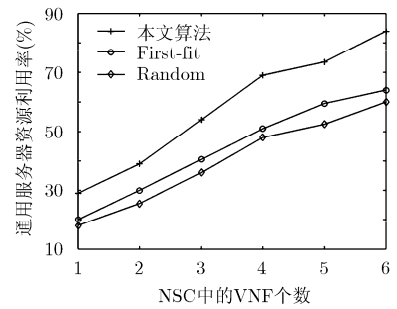


图6 不同 NSC 类型下通用服务器资源利用率对比

## 5 结束语

本文研究了运营商网络中,引入NFV技术后网络服务链(NSC)的优化构建问题,首先针对NSC的建立进行了形式化描述,建立数学优化模型,并证明了该问题是NP-hard问题。为使运营商网络能够容纳更多的业务流,需要在系统资源不变的情况下同时减少计算资源碎片和网络资源碎片的产生。基于此,本文提出了一种启发式NSC构建策略。在满足网络服务请求端到端性能要求的前提下,最大化运营商网络能够容纳的NSC数目。通过与典型策略的实验对比,本文提出的部署策略能更充分和合理地利用网络中通用服务器和交换机的资源,有效地提高运营商网络中能够服务的业务流数目,改善运营商网络的服务能力。

## 参考文献

- [1] CHATRAS B and OZOG F F. Network functions virtualization: The portability challenge[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 4-8. doi: 10.1109/MNET.2016.7513857.
- [2] ABDELWAHAB S, HAMDAOUI B, GUIZANI M, et al. Network function virtualization in 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(4): 84-91. doi: 10.1109/MCOM.2016.7452271.
- [3] ERAMO V, AMMAR M, and LACACCA F G. Migration energy aware reconfigurations of virtual network function instances in NFV architectures[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 4927-4938. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2685437.
- [4] SUN Songlin, KADOCH M, GONG Liang, et al. Integrating network function virtualization with SDR and SDN for 4G/5G networks[J]. *IEEE Network*, 2015, 29(3): 54-59. doi: 10.1109/MNET.2015.7113226.
- [5] BLENK A, BASTA A, REISSLEIN M, et al. Survey on network virtualization hypervisors for software defined networking[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 655-685. doi: 10.1109/COMST.2015.2489183.
- [6] PHAN C, TRAN N H, REN Shaolei, et al. Traffic-aware and energy-efficient vNF placement for service chaining: Joint sampling and matching approach[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2017. doi: 10.1109/TSC.2017.2671867.
- [7] HERRERA J G and BOTERO J F. Resource allocation in NFV: A comprehensive survey[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2016, 13(3): 518-532. doi: 10.1109/TNSM.2016.2598420.
- [8] COHAN R, LIANE L E, NAOR J S, et al. Near optimal placement of virtual network functions[C]. 2015 IEEE Conference on Computer Communications, Hong Kong, China, 2015: 1346-1354. doi: 10.1109/INFOCOM.2015.7218511.
- [9] MOENS H and TURCK F D. VNF-P: A model for efficient placement of virtualized network functions[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Network and Service

- Management (CNSM) and Workshop, Rio de Janeiro, Brazil, 2014: 418–423. doi: 10.1109/CNSM.2014.7014205.
- [10] TALAB T and KSENTINI A. Gateway relocation avoidance-aware network function placement in carrier cloud[C]. Proceedings of ACM MSWIM, Barcelona, Spain, 2013: 341–346. doi: 10.1145/2507924.2508000.
- [11] BAGAA M, TALEB T, and KSENTINI A. Service-aware network function placement for efficient traffic handling in carrier cloud[C]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Istanbul, Turkey, 2014: 2402–2407. doi: 10.1109/WCNC.2014.6952725.
- [12] TALEB T, BAGAA M, and KSENTINI A. User mobility-aware virtual network function placement for virtual 5G network infrastructure[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), London, UK, 2015: 3879–3884. doi: 10.1109/ICC.2015.7248929.
- [13] BASTA A, KELLERER W, HOFFMANN M, *et al.* Applying NFV and SDN to LTE mobile core gateways: The functions placement problem[C]. Proceedings of ACM the 4th Workshop on All Things Cellular, Chicago, USA, 2014: 321–326. doi: 10.1145/2627585.2627592.
- [14] LUIZELLI M C, BAYS L R, BURIOL L S, *et al.* Piecing together the NFV provisioning puzzle: Efficient placement and chaining of virtual network functions[C]. Proceedings of IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), Dublin, Ireland, 2015: 98–106. doi: 10.1109/INM.2015.7140281.
- [15] GHAZNAVI M, KHAN A, SHAHRIAR N, *et al.* Elastic virtual network function placement[C]. Proceedings of IEEE 4th International Conference on Cloud Networking (CloudNet), Prague, Czech Republic, 2015: 255–260. doi: 10.1109/CloudNet.2015.7335318.
- [16] LI Xin and QIAN Chen. The virtual network function placement problem[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Hong Kong, China, 2015: 69–70. doi: 10.1109/INFOCOMW.2015.7179347.
- [17] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, *et al.* Introduction to Algorithms[M]. 3rd Ed, Massachusetts, US, The MIT Press, 2009: 233–237.
- [18] 王殿君. 基于改进 A\*算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1085–1089. doi: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2012.08.009.
- [19] SAIAN P and PRANOWO S. Optimized A-Star algorithm in hexagon-based environment using parallel bidirectional search[C]. Proceedings of IEEE Information Technology and Electrical Engineering, Ningbo, China, 2016: 1–5. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863246.
- [20] XIA M, SHIRAZIPOUR M, ZHANG Y, *et al.* Network function placement for NFV chaining in packet/optical datacenters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(8): 1565–1570. doi: 10.1109/JLT.2015.2388585.
- 陈卓：男，1980年生，副教授，博士，研究方向为网络虚拟化和软件定义网络。
- 冯钢：男，1964年生，教授，博士生导师，研究方向为计算机网络和无线接入网技术。
- 刘蓓：女，1988年生，硕士生，研究方向为网络虚拟化技术。