

# 面向时延与可靠性优化的服务功能链部署方法

翟东<sup>\*①</sup> 孟相如<sup>②</sup> 康巧燕<sup>②</sup> 胡航<sup>②</sup> 韩晓阳<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学研究生院 西安 710077)

<sup>②</sup>(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

**摘要:** 针对5G网络高可靠性、低时延的服务需求, 该文提出一种面向时延与可靠性优化的服务功能链(SFC)部署(DROSD)方法。在不预留冗余资源的情况下, 首先通过功能互斥约束来确定SFC中相邻虚拟网络功能(VNF)是否可聚合; 其次通过功能性约束、资源约束选择可聚物理节点集合, 实现负载均衡, 提高SFC可靠性; 然后通过跳数约束进行优化, 进一步筛选可聚物理节点集合以降低SFC的端到端时延; 最后通过节点可用资源、节点度以及与原节点跳数指标进行降序排列, 取最大值物理节点部署VNF。SFC的路由选择, 采用K-最短路径算法。仿真实验表明, 该文所提算法提高了请求接受率、长期平均收益开销比, 增强了SFC可靠性, 降低了端到端时延, 减小了平均带宽开销。

**关键词:** 网络功能虚拟化; 服务功能链; 虚拟网络功能部署; 可靠性; 时延

中图分类号: TN915; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)10-2386-08

DOI: 10.11999/JEIT200023

## Service Function Chain Deployment Method for Delay and Reliability Optimization

ZHAI Dong<sup>①</sup> MENG Xiangru<sup>②</sup> KANG Qiaoyan<sup>②</sup> HU Hang<sup>②</sup> HAN Xiaoyang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

<sup>②</sup>(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** For the high reliability and low delay service requirements of 5G network, a Delay and Reliability Optimization of Service Function Chain (SFC) Deployment (DROSD) method is proposed. Without reservation of redundant resources, firstly, the function mutually exclusive constraints are used to determine whether the adjacent Virtual Network Function (VNF) in SFC can be combined; Secondly, functional constraints and resource constraints are used to select combinatorial physical node set to achieve load balancing and improve the reliability of SFC; Thirdly, the end-to-end delay of SFC is reduced by hop number constraints, and finally the VNF is deployed by the physical node with the maximum value, which is arranged in descending order through the available resources, node degree and hops from the original node. The routing of SFC adopts K-shortest path algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm improves the request acceptance rate and the long-term average ratio of revenue to cost, enhances the reliability of SFC, reduces the end-to-end delay, and reduces the average bandwidth cost.

**Key words:** Network function virtualization; Service Function Chain (SFC); Virtual Network Function (VNF) deployment; Reliability; Delay

### 1 引言

近10年, 网络流量经历了爆炸性增长, 传统网

络软硬件紧耦合已无法满足用户需求, 网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术在此网络需求下孕育而生<sup>[1,2]</sup>。传统的网络功能与硬件设备紧耦合, 部署大量的网络功能设备才能满足日益增长的用户服务需求, 但会极大增加网络建设成本及运营成本<sup>[3]</sup>。NFV通过将软硬件解耦, 并将网络功能抽象为基于软件的虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF), 网络功能不再依赖于硬件设备, 资源可以灵活共享, 降低了建设成本和

收稿日期: 2020-01-06; 改回日期: 2020-08-23; 网络出版: 2020-09-03

\*通信作者: 翟东 zhaidongwzwdl@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61871313, 61901509), 陕西省自然科学基金青年项目(2018JQ6042)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61871313, 61901509), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JQ6042)

运营成本<sup>[4,5]</sup>。特定的VNFs通过特定的顺序连接起来形成服务功能链(Service Function Chain, SFC), NFV环境下的业务通过SFC实现<sup>[6,7]</sup>。作为5G的关键技术之一, NFV的研究已经引起了广大专家学者的注意。大部分研究主要考虑最小化网络资源消耗, 最大化网络收益<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>提出采用反馈机制部署VNF、选择路由, 从而实现负载均衡, 提高请求接受率。文献<sup>[10]</sup>提出了一种整数线性规划模型来部署VNF以及路由选择以最小化能量开销。

目前大多数研究假设NFV的基础设施绝对可靠, 即理想状态。任何物理故障或软件故障均会导致SFC的中断, 因此提高SFC的可靠性对于业务的稳定性至关重要。5G移动通信系统对通信服务的时延要求较高, 低时延场景的端到端时延甚至需要达到毫秒级<sup>[11]</sup>。因此, 如何有效部署VNF以提高SFC的可靠性, 降低端到端时延已经成为了一个热点问题。

VNF的高效部署已经被证明是NP-hard问题。现有文献大部分通过增加冗余来提高SFC的可靠性, 文献<sup>[12]</sup>为整条SFC进行备份, 增加了资源开销。文献<sup>[13]</sup>提出了联合VNF部署与路由优化的可靠性感知方法, 采用备份共享的方式, 降低了资源消耗。采用备份机制提高可靠性的同时, 增加了SFC的链路长度, 一定程度增加了SFC的端到端时延。文献<sup>[11]</sup>未采用备份机制, 部署VNF时采用PageRank思想, 同时考虑了可靠性与时延, 但其部署VNF时, 未考虑源节点与目的节点, 因而增大了时延。文献<sup>[14]</sup>未采用备份机制, 提出了基于队列感知的SFC映射算法来提高网络稳定性与可靠性, 其考虑了源节点与目的节点。文献<sup>[11,14]</sup>未对VNF类型进行约束, 其假设每一个物理节点均可承载任何类型的VNF。文献<sup>[15]</sup>指出了同一SFC中相邻VNF可以聚合, 即部署在同一物理节点上, 但其并未给出具体的聚合方法。

不同于上述文献, 本文在不采用冗余备份的情况下, 提出了一种面向时延与可靠性优化的SFC部署方法(Delay and Reliability Optimization of SFC Deployment, DROSD)。实现两个目标: (1)利用深度优先方法, 首先判断SFC中的相邻VNF是否可聚合, 即功能互斥约束; 其次选择可同时承载相邻VNF类型的物理节点, 即满足功能性约束; 最后确保物理节点资源消耗不超过其总资源的90%, 即资源约束, 实现负载均衡, 通过选择可聚合物理节点集合来提高SFC的可靠性。(2)通过跳数约束进行优化, 进一步筛选可聚合物理节点集合以降低SFC的端到端时延。

## 2 网络模型与问题描述

### 2.1 网络场景

本文考虑5G核心网络中的NFV部署问题来实现低时延高可靠性需求。NFV编排与控制架构如图1所示。

图1中左方系统的管理编排器包括编排器、VNF管理器和基础设施管理器3部分, 分别负责图右方SFC服务请求、VNF连接和基础设施全局资源的管理。

### 2.2 网络模型

#### 2.2.1 物理网络

物理网络表示为无向图 $G^s=(N^s, L^s)$ , 其中 $N^s$ 表示物理节点集合, 每个物理节点可以承载特定类型的VNF,  $L^s$ 表示物理链路集合。对于任意物理节点 $n \in N^s$ ,  $C_n^s$ ,  $C_{n,use}^s$ 和 $C_{n,ava}^s$ 分别表示其总CPU资源、已占用CPU资源和可用CPU资源,  $F_n^s$ ,  $F_{n,use}^s$ 和 $F_{n,ava}^s$ 分别表示其总转发资源、已占用转发资源和可用转发资源。 $h_{n,m}$ 表示物理节点 $n$ 和 $m$ 之间的跳数。 $r_n$ 表示其可靠性, 任意物理链路 $l_{n,m}^s$ , 其带宽资源为 $B_{n,m}^s$ 。为实现负载均衡, 确保每个节点资源消耗不超过其总资源的90%, 即资源约束。

#### 2.2.2 SFC请求

SFC请求表示为有向图 $G^g=(S_g, D_g, N_v^g, L_v^g, T_g)$ , 其中 $S_g$ 和 $D_g$ 分别表示第 $g$ 条SFC的源节点和目的节点, 对于任意一条SFC $g$ , 部署 $S_g$ 和 $D_g$ 的物理节点是确定的,  $N_v^g=\{f_i | i=1, 2, \dots, |N_v^g|\}$ 表示SFC $g$ 所有VNF的集合, 对于任意一个 $f_i \in N_v^g$ ,  $C_{v,i}^g$ 和 $F_{v,i}^g$ 分别表示其CPU资源需求、转发资源需求。 $L_v^g$ 和 $N_l^g$ 分别表示SFC $g$ 的路由集合及路由数目, SFC $g$ 中 $f_i$ 与 $f_j$ 之间的路由、带宽需求分别表示为 $l_{i,j}^g$ 和 $B_{i,j}^g$ , 本文假设任何一条SFC $g$ 中的所有路由具有相同的带宽需求 $b_g$ 。 $T_g$ 表示SFC $g$ 的生存时间。

定义SFCs的集合为 $S=\{SFC_g | g=1, 2, \dots, Q\}$ , 若SFC $g$ 的第 $i$ 个VNF部署在第 $k$ 个物理节点上,  $\alpha_{k,i}^g=1$ ; 否则 $\alpha_{k,i}^g=0$ 。若路由 $l_{i,j}^g$ 选择物理链路 $l_{n,m}^s$ ,

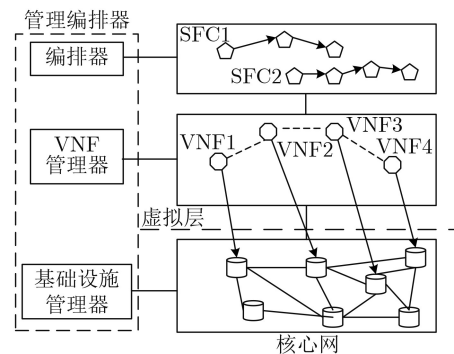


图1 系统场景

$A_{n,m}^{i,j} = 1$ , 否则  $A_{n,m}^{i,j} = 0$ 。对于任意SFC $_g$ , 部署的物理节点集合为  $N_g = \{n_{g,i} | i = 1, 2, \dots, k, n_{g,i} \in N^s\}$ , SFC $_g$ 可靠性为  $R_g = \prod_{i=1}^k r_{n_{g,i}}$ 。物理链路经过的所有节点集合为  $N_p^g = \{n_{g,p} | p = 1, 2, \dots, K\}$ 。为分析方便, 本文假设每跳时延均相等, 且为  $\text{Del}_0$ , 任意一条SFC $_g$ 的总跳数为  $h_g$ , 则  $\text{Del}_{s_g} = h_g \text{Del}_0$ 。

物理节点之间由于存在功能性的差异, 每个物理节点只能承载特定类型的VNF, 即功能性约束。设第 $g$ 条SFC的VNF类型共有 $T$ 种, 定义其集合为  $W_g = \{w_i | i = 1, 2, \dots, T\}$ 。若物理节点 $n$ 可以承载第 $i$ 种类型VNF, 则  $F_n^{w_i} = 1$ , 否则,  $F_n^{w_i} = 0$ 。

由于物理节点可靠性均小于1, 若将部署到两个物理节点的VNF聚合, 部署到满足其资源约束、功能约束的同一物理节点上, 则可极大提高SFC的可靠性。但同时需要考虑VNF之间的互斥约束, 由于功能之间的冲突或者限制导致其不能聚合。若SFC $_g$ 中的 $f_i$ 与 $f_{i+1}$ 满足功能互斥约束, 则  $P_{i,i+1}^g = 1$ , 否则  $P_{i,i+1}^g = 0$ 。如图2所示: 假设VNF1与VNF2满足功能互斥约束, 物理节点2满足VNF1与VNF2的功能性约束, 并且满足VNF1与VNF2的资源需求。图2中物理节点旁边的数字分别表示序号和可靠性, 图2(a)表示未聚合状态,  $R_g=0.68$ ,  $h_g=5$ ; 图2(b)表示聚合状态,  $R_g=0.74$ ,  $h_g=4$ 。

### 2.3 优化目标

本文要解决的问题: 通过合理部署VNF, 最大化SFC可靠性。目标函数为

$$\max R_g \quad (1)$$

约束条件为

$$C1: \sum_{n \in N^s} \alpha_n^j = 1, \quad \forall f_j \in N_v^g \quad (2)$$

$$C2: \sum_{f_j \in N_v^g} \alpha_n^j \leq 2, \quad \forall n \in N^s \quad (3)$$

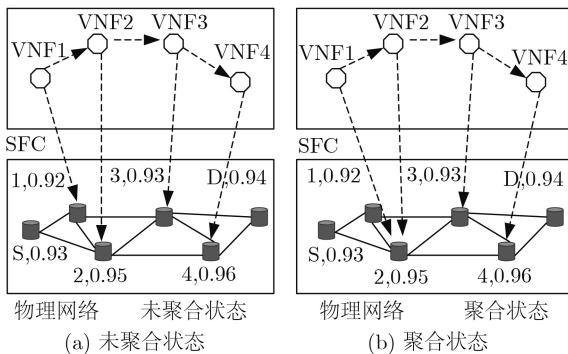


图2 聚合与未聚合状态对比

$$C3: \text{若 } \alpha_n^j=1, \alpha_m^{j+1}=1, f_j, f_{j+1} \in N_v^g, n, m \in N^s \text{ 则: } F_n^{f_j, w_i} = 1, F_m^{f_j, w_j} = 1, h_{n,m} \leq h_0, h_{m,D} \leq h_{n,D} \quad (4)$$

$$C4: \text{若 } P_{j,j+1}^g = 1, \alpha_n^{j-1}=1, \alpha_m^j=1, \alpha_m^{j+1}=1, f_{j-1}, f_j, f_{j+1} \in N_v^g, n, m \in N^s \text{ 则: } F_n^{f_{j-1}, w_i} = 1, F_m^{f_j, w_i} = 1, F_m^{f_{j+1}, w_j} = 1, h_{n,m} \leq h_1, h_{m,D} \leq h_{n,D} \quad (5)$$

$$C5: h_1 > h_0 \quad (6)$$

$$C6: \sum_{g=1}^Q \sum_{l_{j,u}^g \in L_v^g} (A_{n,m}^{j,u} + A_{m,n}^{j,u}) B_{j,u}^g \leq B_{n,m}^s, \quad \forall l_{n,m} \in L^s \quad (7)$$

$$C7: \sum_{g=1}^Q \sum_{j \in N_v^g} \alpha_m^j C_{g,j}^v \leq C_m^s, \quad \forall m \in N^s \quad (8)$$

$$C8: \begin{cases} C_m^{s,ava} = C_m^s \times 90\% - C_m^{s,use} \\ F_n^{s,ava} = F_n^s \times 90\% - F_n^{s,use} \end{cases}, \quad \forall m \in N^s \quad (9)$$

$$C9: \alpha_m^j = \{0, 1\}, \quad \forall m \in N^s, \forall f_j \in N_v^g \quad (10)$$

$$C10: A_{n,m}^{j,u} = \{0, 1\}, \quad \forall l_{j,u}^g \in L_v^g, \forall l_{n,m} \in L^s \quad (11)$$

$$C11: P_{k,k+1}^g = \{0, 1\}, \quad \forall f_k, \forall f_{k+1} \in N_v^g \quad (12)$$

$$C12: F_m^{f_k, w_i} = \{0, 1\}, \quad \forall m \in N^s, \forall \text{VNF } w_i \in W \quad (13)$$

C1确保SFC中的任一VNF只能部署到一个物理节点上, C2确保每个物理节点最多部署同一条SFC中两个VNF。C3确保VNF部署的物理节点满足功能性约束, 为减小链路跳数, 确保部署的相邻物理节点满足跳数约束 $h_0$ , 同时确保与目的节点之间的跳数不会增大。C4确保聚合的两个VNF满足功能互斥约束, 同时确保部署的物理节点满足聚合的VNF功能性约束。为减小链路跳数, 确保部署的相邻物理节点满足跳数约束 $h_1$ , 同时确保与目的节点之间的跳数不会增大。C5提高了聚合的成功率。C6和C7确保SFC的资源需求不能超过其部署的物理节点和链路的可用资源。C8为实现负载均衡, 确保每个物理节点的资源消耗不超过其总资源的90%。C9, C10, C11和C12分别表示VNF部署、路由选择、功能互斥以及功能承载的二进制约束。

为分析方便, 本文只考虑传输时延, 且每跳时延均相等, 端到端时延通过链路的每跳时延叠加计算。

### 3 面向时延与可靠性优化的SFC部署算法设计

VNF部署阶段, 提出了一种面向时延与可靠性优化的VNF部署算法。路由选择阶段, 采用K-最短路径算法。



### 3.1 评价指标

对节点重要度进行评价, 根据节点度、节点可用资源以及跳数约束进行评价。节点度 $G(n)$ 为与其相连节点的个数 $s(n)$ , 即

$$G(n) = s(n) \quad (14)$$

为实现负载均衡, 确保物理节点的资源消耗不超过其总资源的90%, 物理节点可用CPU资源 $C_{n,ava}^s$ 、可用转发资源 $F_{n,ava}^s$ 表达式如式(9)所示。

### 3.2 VNF部署方法

VNF部署阶段, 为提高SFC $g$ 可靠性, 利用深度优先, 首先判断SFC $g$ 中的相邻 $f_k$ 和 $f_{k+1}$ 是否满足功能互斥约束。若 $P_{k,k+1}^g = 0$ , 则选择满足 $f_k$ 功能性约束、资源约束的物理节点。为降低端到端时延, 在跳数约束下部署 $f_k$ , 以原点 $S_1$ (部署 $f_1$ 时,  $S_1=S_g$ )为圆心, 在跳数约束 $h_0$ 下, 选择可部署物理节点集合 $M_1 = \{m_i | i = 1, 2, \dots, k_1, m_i \in N^s\}$ , 同时为了避免 $m_i$ 与目的节点 $D_g$ 之间的跳数过大, 增加SFC的时延, 需在 $M_1$ 中选择满足跳数约束 $h_{n,m_i} \leq h_{n,D}$ 的节点, 集合为 $M_2 = \{m_j | j = 1, 2, \dots, k_2, m_j \in N^s\}$ , 若 $M_2$ 为空集, 则部署失败, 否则通过式(21)计算 $M_2$ 中各个物理节点的重要度, 选择值最大的物理节点部署 $f_k$ 。并以此物理节点为 $S_1$ , 根据跳数约束进行搜索, 部署下一个 $f_{k+1}$ , 依次类推。若 $P_{k,k+1}^g = 1$ , 选择同时满足 $f_k$ 和 $f_{k+1}$ 功能性约束、资源约束的物理节点。为降低时延, 在跳数约束下部署 $f_k$ 和 $f_{k+1}$ 。为提高聚合成功率, 在跳数约束 $h_1$ 下, 选择可聚物理节点集合 $M'_1 = \{m_i | i = 1, 2, \dots, k_1, m_i \in N^s\}$ , 同时为减小与目的节点之间的跳数, 需满足跳数约束 $h_{n,m_i} \leq h_{n,D}$ , 集合为 $M'_2 = \{m_j | j = 1, 2, \dots, k_2, m_j \in N^s\}$ 。若 $M'_2$ 为空集, 聚合失败, 按 $P_{k,k+1}^g = 0$ 的方法部署 $f_k$ 。若 $M'_2$ 不为空集, 聚合成功, 通过式(21)计算 $M'_2$ 中各个物理节点的重要度, 选择值最大的物理节点部署 $f_k$ 和 $f_{k+1}$ , 并以此物理节点为 $S_1$ , 部署下一个VNF。依次类推, 直到所有VNF部署完成。

当 $M_2$ 或 $M'_2$ 不为空集时, 集合内所有节点可用CPU资源为 $\{C_{j,ava}^s | j = 1, 2, \dots, k_2\}$ , 如式(15)、式(16)所示, 对其进行归一化。集合内所有节点可用转发资源为 $\{F_{j,ava}^s | j = 1, 2, \dots, k_2\}$ , 如式(17)、式(18)所示, 对其进行归一化。集合内所有节点度为 $\{G_j^s | j = 1, 2, \dots, k_2\}$ , 如式(19)、式(20)所示, 对其进行归一化。集合内所有节点与原点之间的跳数为 $\{H_j^s | j = 1, 2, \dots, k_2\}$ 。

$$C_{total}^s = \sum_{j=1}^{k_2} C_{j,ava}^s \quad (15)$$

$$C_{j,nor}^s = C_j^s / C_{total}^s \quad (16)$$

$$F_{total}^s = \sum_{j=1}^{k_2} F_{j,ava}^s \quad (17)$$

$$F_{j,nor}^s = F_j^s / F_{total}^s \quad (18)$$

$$G_{total}^s = \sum_{j=1}^{k_2} G_j^s \quad (19)$$

$$G_{j,nor}^s = G_j^s / G_{total}^s \quad (20)$$

节点重要性评价指标按式(21)所示

$$Im_j = \frac{e_1 \times C_{j,nor}^s + e_2 \times F_{j,nor}^s + e_3 \times G_{j,nor}^s}{H_j^s} \quad (21)$$

其中 $e_1$ ,  $e_2$ 和 $e_3$ 为影响因子, 且满足 $e_1 + e_2 + e_3 = 1$ , 表征节点可用CPU资源、节点可用转发资源与节点中心度的重要程度。本文设 $e_1 = e_2 = e_3 = 1/3$ 。

DROSD算法中VNF的部署流程如表1所示。

选取可部署物理节点集合( $M_1, M_2$ ), 可聚物理节点集合( $M'_1, M'_2$ )的算法分别如表2、表3所示。

### 3.3 路由选择

对于SFC $g$ , 其VNF部署成功后, 进行路由选择。采用K-最短路径算法, 选择 $k$ 条最短路径 $\{l_i^s | i = 1, 2, \dots, k\}$ , 判断是否满足路由带宽需求, 满足路由带宽需求的同时, 选择跳数最小的物理链路。

在VNF部署阶段, 计算候选物理节点的复杂度为 $O(|N^s|^2)$ ; 在路由选择阶段, 采用K-最短路径算法选择路由的复杂度为 $O(k|N^s|(|L^s| + |N^s| \lg |N^s|))$ 。DROSD的复杂度为 $O(|N^s|^2 + k|N^s|(|L^s| + |N^s| \lg |N^s|))$ 。

## 4 算法性能评估与分析

为验证本文算法的有效性, 本节定义了评价指标, 并与基于节点位置、可靠性的VNF部署算法(NLRE)<sup>[11]</sup>、队列信息感知的可靠SFC部署算法(QARE)<sup>[14]</sup>进行了对比。为描述方便, 本文使用NLRE, QARE分别表示基于节点位置、可靠性的VNF部署算法和队列信息感知的可靠SFC部署算法。

### 4.1 评价指标

本文通过SFC可靠性、端到端时延、平均带宽开销、请求接受率、长期平均收益开销比来表征算法的有效性。

(1) SFC( $g$ )可靠性定义为

$$R_g = \prod_{i=1}^k r_{n_{g,i}} \quad (22)$$

任意一条SFC $g$ , 其部署的物理节点集合为

表1 算法1: DROSD算法VNF部署流程

---

输入:  $G^s, G_v^g$   
 输出: VNF\_Embedding\_List

对于  $G_v^g$  中的 SFC $_g$ ,

(1) 获取 SFC $_g$  的 VNF 数目  $K$

for  $k=1:K-1$   
 利用深度优先, 对可靠性进行优化, 判断相邻 VNF 是否满足功能互斥约束  
 if  $P_{k,k+1}^g = 0$   
 对时延进行优化, 利用算法2选取可部署物理节点集合  $M_1, M_2$

(2) if  $M_1 = \emptyset$   
 部署失败  
 else  
 if  $M_2 = \emptyset$   
 部署失败  
 else  
 计算节点  $Im$  值, 取最大值节点部署  $f_k$   
 end  
 end  
 end  
 else  
 对可靠性和时延进行优化, 利用算法3选取可聚物理节点集合  $M'_1, M'_2$   
 if  $M'_1 = \emptyset$   
 聚合失败  
 返回步骤(2)  
 else  
 if  $M'_2 = \emptyset$   
 聚合失败  
 返回步骤(2)  
 else  
 计算节点  $Im$  值, 取最大值节点部署  $f_k, f_{k+1}$   
 end  
 end  
 end  
 end

---

$N_g = \{n_{g,i} | i = 1, 2, \dots, k, n_{g,i} \in N^s\}$ ,  $r_{n_{g,i}}$  表示部署物理节点的可靠性。

平均可靠性定义为

$$R\_ave = \sum_{g=1}^{NUM_{suc}} R_g / NUM_{suc} \quad (23)$$

其中  $NUM_{suc}$  为部署成功的 SFC 数量。

(2) 端到端时延定义为

$$Del_{s_g} = h_g \times Del_0 \quad (24)$$

其中  $h_g$  为 SFC $_g$  部署的物理链路总跳数。

平均端到端时延定义为

表2 算法2: 可部署物理节点选取流程

---

任意  $f_k, w_i$

for 未部署 SFC $_g$  中 VNF 的所有物理节点  $N_1^s$   
 选择满足功能性约束的物理节点  
 if  $F_n^{f_k, w_i} = 1$   
 选择满足资源约束的物理节点, 实现负载均衡。  
 if  $C_{n,ava}^s \geq C_{g,k}^v \&\& F_{n,ava}^s \geq F_{g,k}^v \&\& h_{S_1,n} \leq h_0$   
 $n \in M_1$

利用与目的节点的跳数约束进一步优化时延  
 if  $h_{S_1,D_g} \geq h_{n,D_g}$   
 $n \in M_2$   
 end  
 end  
 end  
 end

---

表3 算法3: 可聚物理节点选取流程

---

任意  $f_k, w_i$  和  $f_{k+1}, w_j$

for 未部署 SFC $_g$  中 VNF 的所有物理节点  $N_1^s$   
 对可靠性进行优化, 选择满足  $f_k, f_{k+1}$  功能性约束的物理节点  
 if  $F_n^{f_k, w_i} = 1 \&\& F_n^{f_{k+1}, w_j} = 1$   
 选择满足资源约束的物理节点, 实现负载均衡。  
 if  $C_{n,ava}^s \geq (C_{g,k}^v + C_{g,k+1}^v) \&\& F_{n,ava}^s \geq (F_{g,k}^v + F_{g,k+1}^v) \&\& h_{S_1,n} \leq h_1$   
 $n \in M'_1$

利用与目的节点的跳数约束进一步优化时延  
 if  $h_{S_1,D} \geq h_{n,D}$   
 $n \in M'_2$   
 end  
 end  
 end  
 end

---

$$Del\_ave = \sum_{g=1}^{NUM_{suc}} Del_{s_g} / NUM_{suc} \quad (25)$$

(3) 平均带宽开销定义为

$$Bcost\_ave = \sum_{g=1}^{NUM_{suc}} Bcost_{s_g} / NUM_{suc} \quad (26)$$

其中  $Bcost_{s_g}$  为成功部署 SFC $_g$  消耗的带宽。

(4) 请求接受率定义为

$$\omega_{accept} = \lim_{T \rightarrow \infty} NUM_{suc}(T) / (NUM_v(T) + \delta) \quad (27)$$

其中  $NUM_{suc}(T)$  为  $T$  时间内成功部署的 SFC 数目,  $NUM_v(T)$  为  $T$  时间内到达的 SFC 请求数目,  $\delta$  为无穷小量。

(5) 平均收益开销比

在 $t$ 时刻，定义成功部署一个SFC $g$ 的收益为

$$\text{Re}(G_v^g, t) = \alpha \sum_{f_k \in N_v^g} C_{g,k}^v + \beta \sum_{f_k \in N_v^g} F_{g,k}^v + \lambda N_l^g b_g \quad (28)$$

在 $t$ 时刻，定义成功部署一个SFC $g$ ，物理网络的资源开销为

$$\text{Co}(G_v^g, t) = \alpha \sum_{f_k \in N_v} C_{g,k}^v + \beta \sum_{n_p \in N_p^g} F_p^v + \lambda \sum_{l^g \in L^g} h(l^g) b_g \quad (29)$$

其中 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\lambda$ 分别表示收益与开销中节点CPU资源、转发资源以及链路带宽资源的比重，本文均设为1。 $F_p^v$ 表示底层链路节点所消耗的转发资源。

长期平均收益开销比定义为

$$\eta = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T \text{Re}(G_v^g, t)}{\sum_{t=0}^T \text{Co}(G_v^g, t)} \quad (30)$$

4.2 仿真设置

本文在Matlab仿真环境下对所提算法进行分析与评估。物理网络的设置为：坐标1000×1000，节点数目100个，链路500条，节点之间连通概率为0.5，节点CPU、转发资源、带宽资源以及可靠性分别服从[60, 100], [160, 200], [40, 60]和[0.92, 0.96]的均匀分布，每个节点随机承载任意两种类型VNF，对于同一个SFC $g$ ，每个节点最多部署两个相邻VNF。

SFC设置为：SFC $g$ 的VNF数目服从[4, 5]的随机分布，本文假设共有5种类型VNF，并且第3、第4种类型的VNF不能聚合。VNF的CPU、转发资源以及路由带宽需求分别服从[8, 12], [21, 24]和[21, 24]的均匀分布。SFC请求到达率服从 $\lambda=1/20$ 的泊松分布。SFC生存周期 $T_g$ 服从 $\mu=1000$ 的指数分布。

仿真实验时间为10000个时间单位，设 $h_0=2$ ， $h_1=4$ ， $\text{Del}_0=1$  ms。为避免随机因素的影响，仿真实验共进行10次，取实验结果的平均值作为最终结果。

4.3 算法性能分析

本文在相同的物理网络环境以及SFC请求下，从SFC可靠性、端到端时延、平均带宽开销、请求接受率、长期平均收益开销比5个方面对本文所提算法进行分析，并与NLRE算法、QARE算法进行对比，表4为3种算法的描述。

为更好地与本文算法进行对比，对NLRE算法、QARE算法进行相应的改进，物理节点只能部署满足其功能性约束的VNF，源节点与目的节点部署的物理节点是确定的。为便于分析，本文假设物理链路的可靠性即为该链路经过的所有物理节点的可靠性乘积。

图3为3种不同SFC部署算法的请求接受率随时间变化关系。NLRE算法没有考虑节点负载均衡，请求接受率为0.51。QARE部署VNF时，考虑了节点的队列信息，提高了网络的稳定性，路由选择时，考虑了源节点与目的节点，降低了带宽开销，请求接受率为0.71。本文算法部署VNF时，利用资源约束实现负载均衡，利用深度优先将其聚合，同时考虑了跳数约束，减小了带宽开销，因此，请求接受率高于其他两种算法，为0.77。

图4为3种不同SFC部署算法的长期平均收益开销比随时间变化关系。NLRE部署时没有考虑源节点与目的节点，选择的物理链路跳数增大，消耗更多带宽资源以及转发资源，长期平均收益开销比为0.38。QARE算法部署时考虑了源节点与目的节点位置，长期平均收益开销比高于NLRE算法，为0.49。本文算法部署VNF时，根据功能性约束、功能互斥约束、资源约束将VNF聚合，减小了占用的物理节点，同时考虑跳数约束，减小了物理链路跳数，降低了消耗的带宽资源、转发资源，长期平均收益开销比高于其他两种算法，为0.89。

图5为3种不同SFC部署算法的平均SFC可靠性随成功部署SFC数目变化关系。NLRE算法考虑时延，选择时延最短路径，平均可靠性为0.75。QARE算法路由选择时，选择可靠性最高路径，平均可靠性高于NLRE算法，为0.77。本文算法部署VNF时，将VNF聚合，减小了占用的物理节点，降低了物理链路的跳数，平均可靠性高于其他两种算法，为0.83。

图6为3种不同SFC部署算法的平均SFC时延随成功部署SFC数目变化关系。NLRE算法部署时未考虑源节点与目的节点，导致物理链路跳数增大，时延增大，平均时延为11.2 ms。QARE算法部署时考虑了源节点与目的节点，选择的物理链路跳数减小，平均时延低于NLRE算法，为8.9 ms。本文

表4 算法描述

算法名称	部署准则
DROSD	本文所提算法，VNF部署：依据功能互斥约束、功能性约束、跳数约束、资源约束，聚合VNF；路由选择： $k$ -最短路径。
NLRE	文献[11]所提算法，VNF部署：根据节点位置、可靠性采用PageRank思想排序，进行相应部署；路由选择： $k$ -最短路径。
QARE	文献[14]所提算法，VNF部署：根据节点队列信息排序，部署VNF；路由选择：选择可靠性最高链路。

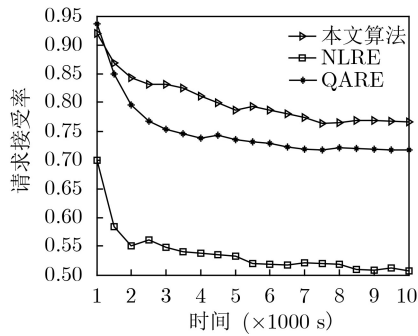


图3 请求接受率

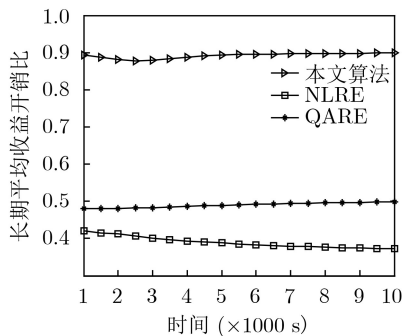


图4 长期平均收益开销比

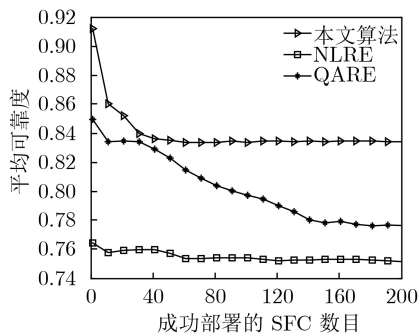


图5 平均可靠性

算法部署VNF时, 考虑了源节点与目的节点, 通过聚合VNF, 小了占用的物理节点, 通过跳数约束, 降低了物理链路的跳数; 路由选择时, 选择跳数最小路径部署, 平均时延低于其他两种算法, 为4 ms。

图7为3种不同SFC部署算法的平均带宽开销随成功部署SFC数目变化关系。NLRE算法未考虑源节点与目的节点, 增加了物理链路跳数, 增大了带宽开销, 带宽开销为250。QARE算法考虑了源节点与目的节点, 减小了物理链路跳数, 带宽开销低于NLRE算法, 为201。本文所提算法部署VNF时根据约束条件, 将VNF聚合, 降低了带宽开销, 并且考虑了源节点与目的节点位置, 通过跳数约束, 减小了物理链路跳数, 降低了带宽开销, 平均带宽开销低于其他两种算法, 为94。

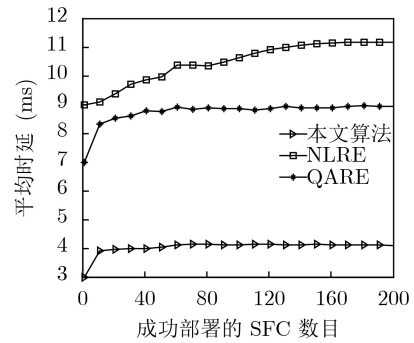


图6 平均时延

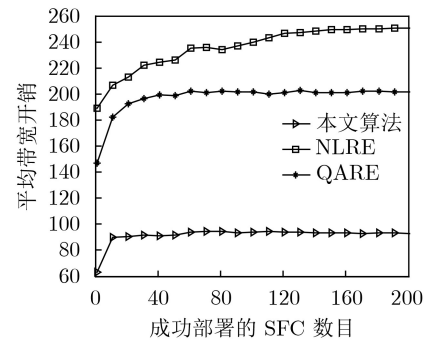


图7 平均带宽开销

通过上述分析可知, 本文所提算法在请求接受率、长期平均收益开销比、平均可靠性、平均时延、平均带宽开销方面均优于NLRE算法、QARE算法。

## 5 结束语

针对5G网络的高可靠性、低时延需求, 本文提出一种面向时延与可靠性优化的SFC部署方法。VNF部署阶段, 通过功能性互斥约束、功能性约束聚合VNF, 在不采用冗余备份机制的条件下, 提高SFC的可靠性, 通过资源约束实现负载均衡, 通过跳数约束降低端到端时延。仿真结果表明, 本文算法提高了请求接受率、长期平均收益开销比, 增强了SFC可靠性, 减小了端到端时延, 降低了带宽开销。

## 参考文献

- [1] QI Dandan, SHEN Subin, WANG Guanghui, *et al.* Towards an efficient VNF placement in network function virtualization[J]. *Computer Communications*, 2019, 138: 81-89. doi: [10.1016/j.comcom.2019.03.005](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.03.005).
- [2] YI Bo, WANG Xingwei, LI Keqin, *et al.* A comprehensive survey of network function virtualization[J]. *Computer Networks*, 2018, 133: 212-262. doi: [10.1016/j.comnet.2018.01.021](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.021).
- [3] MIAO Wang, MIN Geyong, WU Yulei, *et al.* Stochastic performance analysis of network function virtualization in future internet[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in*

- Communications*, 2019, 37(3): 613–626. doi: [10.1109/JSAC.2019.2894304](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2894304).
- [4] SUN Gang, LIAO Dan, ZHAO Dongcheng, *et al.* Towards provisioning hybrid virtual networks in federated cloud data centers[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 87: 457–469. doi: [10.1016/j.future.2017.09.065](https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.065).
- [5] 汤红波, 邱航, 游伟, 等. 基于联合备份的服务功能链可靠性保障的部署方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(12): 3006–3013. doi: [10.11999/JEIT190013](https://doi.org/10.11999/JEIT190013).
- TANG Hongbo, QIU Hang, YOU Wei, *et al.* A reliability-guarantee method for service function chain deployment based on joint backup[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 3006–3013. doi: [10.11999/JEIT190013](https://doi.org/10.11999/JEIT190013).
- [6] SUN Gang, CHEN Zhenrong, YU Hongfang, *et al.* Online parallelized service function chain orchestration in data center networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 100147–100161. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2930295](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930295).
- [7] 唐伦, 杨恒, 马润琳, 等. 基于5G接入网络的多优先级虚拟网络功能迁移开销与网络能耗联合优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(9): 2079–2086. doi: [10.11999/JEIT180906](https://doi.org/10.11999/JEIT180906).
- TANG Lun, YANG Heng, MA Runlin, *et al.* Multi-priority based joint optimization algorithm of virtual network function migration cost and network energy consumption[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2079–2086. doi: [10.11999/JEIT180906](https://doi.org/10.11999/JEIT180906).
- [8] CHENG Xiangle, WU Yulei, Min Geyong, *et al.* Network function virtualization in dynamic networks: A stochastic perspective[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(10): 2218–2232. doi: [10.1109/JSAC.2018.2869958](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2869958).
- [9] ERAMO V, MIUCCI E, AMMAR M, *et al.* An approach for service function chain routing and virtual function network instance migration in network function virtualization architectures[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(4): 2008–2025. doi: [10.1109/TNET.2017.2668470](https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2668470).
- [10] RAAYATPANAH M A and WEISE T. Virtual network function placement for service function chaining with minimum energy consumption[C]. 2018 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET), Beijing, China, 2018: 198–202.
- [11] 唐伦, 赵培培, 赵国繁, 等. 基于QoS保障的服务功能链动态部署算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2018, 41(6): 90–96. doi: [10.13190/j.jbupt.2018-013](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2018-013).
- TANG Lun, ZHAO Peipei, ZHAO Guofan, *et al.* Dynamic deployment algorithm for service function chaining with QoS guarantee[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2018, 41(6): 90–96. doi: [10.13190/j.jbupt.2018-013](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2018-013).
- [12] HERKER S, AN Xueli, KIESS W, *et al.* Data-center architecture impacts on virtualized network functions service chain embedding with high availability requirements[C]. 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), San Diego, USA, 2015: 1–7.
- [13] QU Long, KHABBAZ M, and ASSI C. Reliability-aware service chaining in carrier-grade softwarized networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 558–573. doi: [10.1109/JSAC.2018.2815338](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2815338).
- [14] TANG Lun, ZHAO Guofan, WANG Chenmeng, *et al.* Queue-aware reliable embedding algorithm for 5G network slicing[J]. *Computer Networks*, 2018, 146: 138–150. doi: [10.1016/j.comnet.2018.09.014](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.014).
- [15] ZHAO Dongcheng, REN Jing, LIN Rongping, *et al.* On orchestrating service function Chains in 5G mobile network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 39402–39416. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2895316](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2895316).
- 翟东: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为网络功能虚拟化。  
孟相如: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代网络、网络安全。  
康巧燕: 女, 1980年生, 副教授, 研究方向为下一代网络。  
胡航: 男, 1989年生, 讲师, 研究方向为认知无线电、网络安全。  
韩晓阳: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为下一代网络、网络功能虚拟化。

责任编辑: 马秀强