

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220823003

# 特征关联的服务功能链可靠性优化算法\*

张顺利<sup>1</sup>, 邵苏杰<sup>2</sup>

(1. 晋中学院 信息技术与工程系, 山西 晋中 030619; 2. 北京邮电大学 计算机学院, 北京 100876)

**摘要:**针对优化服务功能链(Service Function Chain, SFC)可靠性时资源利用率低的问题,提出了特征关联的服务功能链可靠性优化算法。首先,从底层节点的资源可用率、周边资源密集度、全网中心性评价其作为虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF)实例备选节点的优势,从 VNF 实例的节点度数与带宽流量评价其作为备选对象的优势。其次,逐个对优越性最高的 VNF 实例选择备份底层节点,直到所有 SFC 的可靠性满足客户要求。在为 VNF 实例选择备份底层节点时,提出了基于资源特征关联感知的备份节点选择算法,将当前 VNF 实例所映射的底层节点与其他待备份 VNF 实例的底层节点的邻接节点进行关联,为当前 VNF 实例选择最优备份底层节点的同时,减少为其他待备份 VNF 实例选择备份底层节点时链路的开销。仿真结果表明,相比于已有算法,该 SFC 可靠性优化算法下备份实例数降低了约 29%,备份带宽资源消耗降低了约 42%,SFC 接受率提升了约 12%。

**关键词:**网络功能虚拟化(VNF);服务功能链(SFC);服务可靠性;资源备份;特征关联

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码  
听独家语音释文  
与作者在线交流  
享本刊专属服务

中图分类号:TN929 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)01-0083-08

## Reliability Optimization Algorithm of Service Function Chain Based on Feature Association

ZHANG Shunli<sup>1</sup>, SHAO Sujie<sup>2</sup>

(1. Department of Information Technology and Engineering, Jinzhong University, Jinzhong 030619, China;  
2. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** For the problem of low resource utilization when optimizing the reliability of service function chain(SFC), a reliability optimization algorithm for SFC based on feature association is proposed. First, the advantages of the underlying node as a candidate node for virtual network function(VNF) instances are evaluated from the resource availability rate, the density of surrounding resources, and the centrality of the entire network, and the advantages of VNF instance as an alternative object are evaluated from the node degree and bandwidth traffic of VNF instance. Second, backup underlying nodes for the VNF instance with the highest superiority are selected one by one until the reliability of all SFCs meets customer requirements. When selecting backup underlying nodes for VNF instances, a backup node selection algorithm based on resource feature association awareness is proposed. The algorithm associates the underlying node mapped by the current VNF instance with the adjacent nodes of the underlying node of other VNF instances to be backed up. While selecting the optimal backup underlying node for the current VNF instance, it reduces the link overhead when selecting the backup underlying node for other VNF instances to be backed up. The simulation results show that compared with that of the existing algorithms, the number of backup instances is reduced by about 29%, the backup bandwidth resource consumption is reduced by about 42%, and the SFC acceptance rate is improved by about 12%.

**Key words:** network function virtualization(NFV); service function chain(SFC); service reliability; resource backup; feature association

\* 收稿日期:2022-08-23;修回日期:2022-11-02

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1402704);信息网络安全公安部重点实验室开放课题(C20612)

通信作者:张顺利 Email:544891117@qq.com

## 0 引言

随着 5G 技术的快速发展和应用,网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)被提出并得到快速发展<sup>[1]</sup>。在 NFV 环境下,网络功能可以与硬件环境进行解耦,显著提升网络功能部署的效率和灵活性,降低了网络的建设和部署成本<sup>[2]</sup>。网络功能采用虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF)的方式部署在底层网络节点上,服务请求采用服务功能链(Service Function Chain, SFC)的方式进行部署<sup>[3-4]</sup>。文献[5]研究了 NFV 可靠性的相关问题,并指出 VNF 自身的软件故障和承载其的底层网络节点硬件故障都会导致 VNF 不可用。如何提升 VNF 的可用性对于服务连续性是一项重要的研究内容,研究方法可以分为提前估计节点可用性、故障 VNF 恢复机制、资源备份机制三种类型。

在提前估计节点可用性研究方面,文献[6-8]估计节点的可用性并设计优化放置模型来抵消不可用的影响,文献[9]设计了 SFC 可靠性最大化的资源部署算法。但是,当底层节点发生故障时,SFC 仍然会发生中断。为解决此问题,已有研究提出了故障 VNF 恢复机制:文献[10]采用虚拟链路重映射策略为受故障影响的 SFC 部署可用的新底层路径,文献[11]提出动态迁移机制为故障 VNF 实例创建新的可靠底层网络资源。但是,故障恢复不可避免导致 SFC 出现中断,降低服务质量。文献[12]提出虚拟机状态监控策略,当虚拟机状态为不可用时为其提供备份资源,文献[13]选择可靠性不能满足要求的 SFC 并为其在线备份资源,虽然都提升了 SFC 的可用性,但是备份资源的开销也快速增加。为降低备份资源开销,文献[14]将备份资源的启动时间进行推迟,文献[15-16]采用网络特征分别对虚拟网功能和物理节点进行聚合,文献[17]采取关键和非关键服务备份策略,文献[18]采用整数线性规划求解最优的备份策略。虽然文献[15-18]降低了备份资源的开销,但是这些研究采取对 SFC 逐条进行分析并求解最小化开销的备份策略,没有挖掘 SFC 之间的资源共享关系。为解决此问题,文献[19-20]将多个 SFC 聚合成一个服务函数图(Service Function Diagram, SFG),并对 SFG 进行可靠性筛选。但是,资源备份时没有考虑底层网络资源特征,没有考虑待备份 SFC 及 VNF 实例间的关联关系进行资源备份,备份资源的共享性还需进一步提升。

资源备份机制是提升 SFC 可靠性的关键技术

之一,但是,现有研究为 VNF 选择底层备份资源时,仅探讨单个 VNF 备份需求场景,缺乏对多个 VNF 备份资源共享的考虑,导致底层网络资源利用率较低的问题。为解决此问题,本文提出了特征关联的服务功能链可靠性优化算法(Reliability Optimization Algorithm of Service Function Chain Based on Feature Association, FASFCROA)。为分析多个 SFC 和 VNF 备份资源的共享关系,从底层节点的网络特征判断其作为 VNF 实例备选节点的优势,从 VNF 实例的网络特征判断其作为备选对象的优势;基于网络资源特征和关联感知的方法为 VNF 实例寻找备份节点,减少为其他待备份 VNF 实例选择备份底层节点时的链路开销。本文算法与经典算法进行的对比分析表明,本文算法节约了备份实例和备份带宽资源消耗,提升了 SFC 的接受率。

## 1 问题描述

### 1.1 网络模型

在 NFV 环境下,底层网络为 SFC 的 VNF 实例分配资源。底层网络是一个无向图,使用  $G_s = (N_s, L_s)$  表示。其中,  $N_s$  表示底层节点  $n_s^i \in N_s$  构成的集合;  $L_s$  表示底层链路  $l_s^j \in L_s$  构成的集合。底层节点  $n_s^i \in N_s$  的属性包括资源量  $c_{n_s^i}$ 、可部署的 VNF 类型  $t_{n_s^i}$ 、硬件可靠性  $r_{n_s^i}$ 。底层链路  $l_s^j \in L_s$  的属性主要是链路带宽资源  $b_{l_s^j}$ 。SFC 由按照指定顺序连接的多个 VNF 实例构成,是一个有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG),使用  $G_{sfc} = (VNF_{sfc}, DL_{sfc}, R_{sfc})$  表示。  $VNF_{sfc}$  表示 VNF 实例的集合,  $DL_{sfc}$  表示 SFC 中 VNF 实例之间的依赖关系,  $R_{sfc}$  表示 SFC 的可靠性要求,是 SFC 正常工作概率的最小值。VNF 实例  $vnf_k$  的资源由底层节点分配,其属性包括 VNF 的类型  $t_{vnf_k}$ 、资源需求量  $c_{vnf_k}$ 、流出带宽需求量  $b_{vnf_k}$ 、可靠性  $r_{vnf_k}$ 。使用  $DL_{vnf_k}$  表示 VNF 实例间的连接顺序构成的依赖性约束。将 VNF 实例部署到底层节点之后,需要判断 SFC 的可靠性是否满足要求。SFC 的真实可靠性  $R_{sfc}^{real}$  使用其包含的所有 VNF 实例可靠性  $r_{vnf_k}$  的乘积表示,如公式(1)所示:

$$R_{sfc}^{real} = \prod_{k=1}^n r_{vnf_k} \quad (1)$$

式中:  $n$  表示 SFC 中包含的 VNF 实例的数量。

当  $R_{sfc}^{real} < R_{sfc}$  时,表明 SFC 的真实可靠性  $R_{sfc}^{real}$  低于要求的可靠性  $R_{sfc}$ 。此时,需要对 VNF 实例可靠性进行优化,才能保证 SFC 的真实可靠性满足要

求,从而保证 SFC 上业务的正常运行。使用  $G_v(N_v, E_v)$  表示  $K$  条 SFC 构成的 SFG,其中,  $N_v$  表示 VNF 实例节点的集合,  $E_v$  表示 VNF 实例节点间的虚拟链路。当底层节点出现故障或外部事件导致底层节点不可用时,承载在底层节点上的 VNF 的可靠性降低,导致 SFC 的可靠性不能满足客户要求。因此,在 SFC 为客户提供服务前,需要通过资源备份策略快速提升 SFC 的可靠性,直到满足客户的要求。

## 1.2 资源备份策略

当 VNF 实例发生故障时,对 VNF 实例资源提供的备份资源必须与其采用并联方式连接。假设需要备份的 VNF 实例  $\text{vnf}_k$  的可靠性使用  $r_{\text{vnf}_k}$  表示,备份底层节点部署的新实例  $\text{vnf}'_k$  的可靠性使用  $r'_{\text{vnf}_k}$  表示。此时,备份后 VNF 实例  $\text{vnf}_k$  的可靠性  $r_{\text{vnf}_k}^b$  使用公式(2)计算:

$$r_{\text{vnf}_k}^b = 1 - (1 - r_{\text{vnf}_k})(1 - r'_{\text{vnf}_k}) \quad (2)$$

为提升备份资源的利用率,备份资源可以采用分时隙为 VNF 实例提供服务。为保证 VNF 实例的可靠性,规定每个备份实例最多由 3 个 VNF 实例共享。当为 VNF 实例部署备份资源时,备份实例所在的底层节点需要与原实例所在的底层节点的周边节点进行连接,实现 SFC 的连通性。此时,SFC 可靠性优化问题的目标函数如公式(3)所示。其中,  $L_{\text{vnf}_i}^{\text{pre}}$  和  $L_{\text{vnf}_i}^{\text{post}}$  分别表示备份实例的底层节点需要与 VNF 实例的前一个和下一个 VNF 实例的底层节点之间创建新的底层路径的长度,  $b_{\text{pre}}$  和  $b_{\text{vnf}_i}$  分别表示 VNF 实例的前一个和 VNF 实例流出带宽。公式(3)的约束条件为公式(4)~(6)。公式(4)中,  $x_{\text{vnf}_i}^{n_s^j} \in \{0, 1\}$  表示 VNF 实例是否映射到底层节点  $n_s^j$  上,  $b_{\text{vnf}_i}^{n_s^j} \in \{0, 1\}$  表示 VNF 实例的备份节点是否映射到底层节点  $n_s^j$  上。所以,公式(4)的约束表示 VNF 实例已映射的底层节点与待映射的备份底层节点不能是同一底层节点。该约束可以避免 VNF 实例的两个底层节点同时不可用。公式(5)表示 VNF 实例备份后 SFC 的可靠性要满足 SFC 的可靠性要求。公式(6)表示备份实例使用底层节点  $n_s^j$  上的资源量不能大于底层节点  $n_s^j$  可用的资源量,  $\alpha_{\text{vnf}_i}$  表示  $\text{vnf}_i$  需求的资源量。

$$\min \sum_{\text{vnf}_i} (L_{\text{vnf}_i}^{\text{pre}} \cdot b_{\text{pre}} + L_{\text{vnf}_i}^{\text{post}} \cdot b_{\text{vnf}_i}) \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{\text{vnf}_i}^{n_s^j} + b_{\text{vnf}_i}^{n_s^j} \leq 1 \quad (4)$$

$$R_{\text{sfc}}^{\text{real}} \geq R_{\text{sfc}} \quad (5)$$

$$\sum_{\text{vnf}_i} \alpha_{\text{vnf}_i} \cdot b_{\text{vnf}_i}^{n_s^j} \leq c_{n_s^j} \quad (6)$$

## 2 网络特征分析

### 2.1 底层节点的网络特征

从底层节点的资源可用率、周边资源密集度、全网中心性三个方面评价底层节点的网络特征。

底层节点的资源可用率是指底层节点的可用资源在其总资源中的占比。根据运维经验可知,底层节点的资源可用率越低时,当前节点越容易发生故障。使用  $\text{AVA}(n_s^i)$  表示底层节点  $n_s^i \in N_s$  的资源可用率。

底层节点的周边资源密集度用来评价底层节点周边节点数量的多少,其决定了底层节点选择备份资源的可行性。当底层节点周边节点数量较多时,底层节点比较容易选择备份节点,且占用的链路资源较少。底层节点  $n_s^i \in N_s$  的周边资源密集度使用  $\text{INT}(n_s^i)$  表示:

$$\text{INT}(n_s^i) = |\{n_s \in N_s \mid \text{dis}(\text{loc}(n_s^i), \text{loc}(n_s)) \leq \delta\}| \quad (7)$$

式中:  $\text{dis}(\text{loc}(n_s^i), \text{loc}(n_s)) \leq \delta$  表示与底层节点  $n_s^i \in N_s$  的距离在  $\delta$  范围的底层节点;  $|\{*\}|$  表示集合  $\{*\}$  中元素的数量。

底层节点的全网中心性是指底层节点到网络其他节点的距离。当底层节点处于网络中心位置时,该底层节点与其他节点的距离越小,越容易节约底层链路的资源。底层节点  $n_s^i \in N_s$  的全网中心性使用  $\text{Cor}(n_s^i)$  表示:

$$\text{Cor}(n_s^i) = \frac{1}{\sum_{n_s^j \in N_s} \text{hop}_{n_s^i, n_s^j}} \quad (8)$$

式中:  $\text{hop}_{n_s^i, n_s^j}$  表示底层节点  $n_s^i$  和底层节点  $n_s^j$  的跳数。

底层节点的 3 个属性采用最大最小归一化方法处理:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (9)$$

式中:  $x$  表示底层节点的某个属性数据取值;  $x_{\max}$  表示该类属性数据的最大值;  $x_{\min}$  表示该类属性数据的最小值;  $x'$  表示底层节点的某个属性归一化后的数据取值。

将每个底层节点的 3 个属性值线性化转换到  $[0, 1]$  的范围后进行求和,得到每个底层节点作为备选底层节点的优越性,简称底层节点的备份优越

性,使用  $ADV(n_s^i)$  表示。

## 2.2 VNF 实例的网络特征

VNF 实例的网络特征主要用于判断其作为备选对象的优势。在 SFG 网络模型中,被选择的 VNF 备份实例如果具有较高的度数和带宽资源,该 VNF 备份实例在 SFG 中相关联的 VNF 实例较多,而且其选择的备份底层节点将具有较多的资源可以与其他 VNF 实例共享。VNF 实例作为备选对象的优越性使用  $ADV(vnf_k)$  表示:

$$ADV(vnf_k) = \lambda dg_{vnf_k}^{in} \cdot \eta bw_{vnf_k}^{in} + \lambda dg_{vnf_k}^{out} \cdot \eta bw_{vnf_k}^{out} \quad (10)$$

式中: $\lambda$  和  $\eta$  是节点度数与节点带宽流量的平衡调整因子(节点度数特征可降低节点资源消耗,节点带宽流量特征可降低链路资源消耗。实验中  $\lambda$  和  $\eta$  的取值都是 0.5,表示该算法优化的目标是同时降低节点和链路资源消耗); $dg_{vnf_k}^{in}$  和  $dg_{vnf_k}^{out}$  分别表示 VNF 实例  $vnf_k$  的入度、出度归一化后的数值; $bw_{vnf_k}^{in}$  和  $bw_{vnf_k}^{out}$  分别表示 VNF 实例  $vnf_k$  的流入、流出带宽归一化后的数值。

## 3 算法与复杂度分析

### 3.1 特征关联的服务功能链可靠性优化算法

本文提出的特征关联的服务功能链可靠性优化算法具体步骤如下:

**步骤 1** 计算底层网络  $G_s = (N_s, L_s)$  中底层节点的备份优越性。

1) 使用公式(7)和(8)分别计算  $G_s = (N_s, L_s)$  中底层节点的周边资源密集度和全网中心性;

2) 使用公式(9)对底层节点的资源可用率、周边资源密集度、全网中心性 3 个属性进行归一化处理;

3) 将归一化后的 3 个属性值求和,得到每个底层节点  $n_s^i \in N_s$  的备份优越性  $ADV(n_s^i)$ 。

**步骤 2** 获得  $G_v(N_v, E_v)$  中所有真实可靠性不能满足其可靠性要求的 SFC。

1) 使用公式(2)计算每个  $sfc_j \in SFC$  的可靠性  $rel_{sfc_j}$ ;

2) 选择未达到可靠性要求的  $sfc_k \in SFC$ , 构成集合  $SFC_{rel}^{not}$ 。

**步骤 3** 获得所有优越性较高的待备份的 VNF 实例的集合。

1) 使用公式(10)计算  $SFC_{rel}^{not}$  中每个 SFC 的所

有 VNF 实例的优越性  $ADV(vnf_k)$ ;

2) 将每个 SFC 中  $ADV(vnf_k)$  最大的 VNF 实例放入待备份实例集合  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}^{\circ}$ 。

**步骤 4** 为优越性最大的待备份 VNF 实例提供备份底层节点。

1) 选择待备份实例集合  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}$  中  $ADV(vnf_k)$  最大的实例  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$ ;

2) 使用基于资源特征关联感知的备份节点选择算法为  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$  增加备份底层节点;

3) 从  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}$  集合中删除  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$ 。

**步骤 5** 处理实例  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$  所属的 SFC 的可靠性。

1) 更新实例  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$  所属的 SFC 的可靠性;

2) 如果 SFC 可靠性更新后满足其要求,将其从  $SFC_{rel}^{not}$  中删除;否则,将当前 SFC 中未分配备份资源的  $ADV(vnf_k)$  最大的实例放入实例集合  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}^{\circ}$ 。

**步骤 6** 处理  $SFC_{rel}^{not}$  中相关 SFC 的可靠性。

1) 更新  $SFC_{rel}^{not}$  中所有使用  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$  的 SFC 的可靠性;

2) 从  $SFC_{rel}^{not}$  中删除可靠性更新后满足其要求的 SFC。

**步骤 7** 判断集合  $SFC_{rel}^{not}$  是否为空;如为空,算法结束;否则,转步骤 4。

### 3.2 基于资源特征关联感知的备份节点选择算法

为了能够获得最优的底层节点成为当前 VNF 实例  $VNF_{ADV(vnf_k)}^{max}$  的备份节点,本文设计了基于资源特征关联感知的备份节点选择算法。其中,关联感知是将当前 VNF 实例  $VNF_{ADV(vnf_k)}^{max}$  所映射的底层节点  $n_s^i \in N_s$ , 与其他待备份 VNF 实例  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}$  的底层节点的邻接节点进行关联,从而为当前 VNF 实例选择最优的备份底层节点的同时,减少为其他待备份的 VNF 实例选择备份底层节点时的链路开销。算法具体描述如下:

输入:  $G_s = (N_s, L_s)$ ,  $G_v = (N_v, E_v)$ ,  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$ ,  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}^K$

输出: 备份底层节点  $n_s^b \in N_s$

**步骤 1** 根据映射关系定位需要备份 VNF 实例的底层节点。

1) 根据 VNF 实例与底层节点的映射关系,定位  $vnf_{ADV(vnf_k)}^{max}$  所在的底层节点  $n_s^i \in N_s$ ;

2) 对需要备份 VNF 实例集合  $VNF_{SFC_{rel}^{not}}$  中的每

个实例  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^i$ , 根据映射关系定位每个需备份实例的底层节点  $n_s^j \in N_s$ 。

**步骤 2** 使用广度优先搜索算法构造  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^{\text{max}}$  的备选节点集合  $\text{Backup}_{N_s^i}$ 。

1) 使用广度优先搜索算法为  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^{\text{max}}$  选择  $q$  个满足资源需求(容量、服务类型)的底层节点;

2) 从  $q$  个可选备份节点中选择  $p$  个备份优越性最大的底层节点, 构成备选节点集合  $\text{Backup}_{N_s^i}$ 。

**步骤 3** 计算  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^{\text{max}}$  的可选备份节点集合  $\text{Backup}_{N_s^i}$  中每个备份节点  $\text{backup}_{n_s^k} \in \text{Backup}_{N_s^i}$  的链路代价  $\text{LinkCost}_{\text{backup}_{n_s^k}}$ 。

1) 使用公式(12)计算  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^{\text{max}}$  所在的底层节点  $n_s^i \in N_s$  与  $\text{backup}_{n_s^k} \in \text{Backup}_{N_s^i}$  的链路代价  $\text{LinkCost}_{ik}$ ;

2) 使用公式(13)计算集合  $\text{VNF}_{\text{SFC}_{\text{rel}}^{\text{not}}}$  中每个实例  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^i$  的底层节点  $n_s^j \in N_s$  与  $\text{backup}_{n_s^k} \in \text{Backup}_{N_s^i}$  的链路代价  $\text{LinkCost}_{kj}$ ;

3) 使用公式(14)计算当前备选节点  $\text{backup}_{n_s^k}$  的链路代价  $\text{LinkCost}_{\text{backup}_{n_s^k}}$ 。

**步骤 4** 选择可选备份节点集合  $\text{Backup}_{N_s^i}$  中链路代价最小的节点, 作为最终的备份节点  $n_s^b \in N_s$ 。

在步骤 3 中, 使用公式(12)计算

$$\text{LinkCost}_{ik} = \sum_{k=1}^{A(n_s^i)} \text{hop}_{ik} \quad (12)$$

式中:  $A(n_s^i)$  表示  $n_s^i$  的邻接节点的数量;  $\text{hop}_{ik}$  表示底层节点  $n_s^i$  和底层节点  $n_s^k$  之间的链路数量。

$$\text{LinkCost}_{kj} = \sum_{K=1}^{|\text{VNF}_{\text{SFC}_{\text{rel}}^{\text{not}}}|} \sum_{k=1}^{A(n_s^j)} \text{hop}_{kj} \quad (13)$$

$$\text{LinkCost}_{\text{backup}_{n_s^k}} = \text{LinkCost}_{ik} + \text{LinkCost}_{kj} \quad (14)$$

式(13)中:  $A(n_s^j)$  表示  $n_s^j$  的邻接节点的数量;  $|\text{VNF}_{\text{SFC}_{\text{rel}}^{\text{not}}}|$  表示集合  $\text{VNF}_{\text{SFC}_{\text{rel}}^{\text{not}}}$  中元素数量。

### 3.3 算法复杂度分析

本文算法时间复杂度主要包括计算底层网络  $G_s = (N_s, L_s)$  中底层节点的备份优越性、获得  $G_v(N_v, E_v)$  中所有真实可靠性不能满足其可靠性要求的 SFC、为优越性最大的待备份 VNF 实例选择备份底层节点 3 个步骤。计算底层网络  $G_s = (N_s, L_s)$  中底层节点的备份优越性的时间复杂度为  $O(|M|)$ ,  $|M|$  表示底层节点的数量。获得  $G_v(N_v, E_v)$  中所有真实可靠性不能满足其可靠性要求的 SFC 的时间复杂度为  $O(|N| \cdot |K|)$ ,  $|N|$  表示 SFC 的数量,

$|K|$  表示每个 SFC 中 VNF 实例的数量。为优越性最大的待备份 VNF 实例选择备份底层节点的时间复杂度为  $O(|Q| \cdot |V| + |W| \cdot |L| \cdot |V|)$ , 其中,  $|Q|$  表示优越性最大的待备份 VNF 实例  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^{\text{max}}$  的邻接节点的数量,  $|V|$  表示备选节点集合  $\text{Backup}_{N_s^i}$  中底层节点的数量,  $|W|$  表示集合  $\text{VNF}_{\text{SFC}_{\text{rel}}^{\text{not}}}$  中包含的元素  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^i$  的数量,  $|L|$  表示每个元素  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^i$  的底层节点  $n_s^j \in N_s$  的邻接节点的数量。所以, 算法的时间复杂度为  $O(|M| + |N| \cdot |K| + |Q| \cdot |V| + |W| \cdot |L| \cdot |V|)$ 。由于底层网络节点数量固定, 且每个底层节点上可同时承载多个 VNF 实例, 所以算法的时间复杂度为  $O(|N| \cdot |K| + |Q| \cdot |V| + |W| \cdot |L| \cdot |V|)$ 。其次, 由于集合  $\text{VNF}_{\text{SFC}_{\text{rel}}^{\text{not}}}$  中底层节点  $n_s^j \in N_s$  的邻接节点数量远大于优越性最大的待备份 VNF 实例  $\text{vnf}_{\text{ADV}(\text{vnf}_k)}^{\text{max}}$  的邻接节点的数量, 所以算法的时间复杂度为  $O(|N| \cdot |K| + |W| \cdot |L| \cdot |V|)$ 。

性能分析时选取的对比算法是基于节点中心性和可靠性排名的备份算法(Node-Ranking Algorithm with Centrality and Reliability, NRCR)<sup>[20]</sup>。该算法根据中心性和可靠性对 VNF 实例的资源进行备份, 但是不考虑底层节点备份优越性以及资源特征关联关系的属性特征。对比算法 NRCR 是一种递归算法, 时间复杂度处于  $O(|I_j^q|! + |S| \cdot (|I_j^q| + |N|))$  级别, 采用所有的底层节点、SFC 以及 VNF 进行性能分析, 其中,  $|S|$  是 SFC 的数量,  $|I_j^q|$  是 SFC 中包含的 VNF 数量,  $|N|$  是物理节点数量。所以, 本文算法采用网络特征分析方法, 降低了算法参数的维度和算法的复杂度。

## 4 算法性能分析

### 4.1 实验环境

实验环境中网络拓扑使用 GT-ITM 拓扑生成器生成<sup>[21]</sup>。底层网络拓扑从边等于 100 的正方形区域中随机提取。底层节点的数量为 100 个, 底层链路采用底层节点之间以 0.5 的概率随机连接获得。底层节点的 CPU 资源和底层链路的带宽遵循 50~100 个单位的均匀分布。底层节点的可靠性采用一个 0.9~0.999 的随机值进行描述。在 SFC 请求的网络拓扑生成方面, NFV 实例节点的数量在 2~6 之间均匀分布。NFV 实例节点上 CPU 资源和链路带宽遵循 1~15 的均匀分布。在 VNF 实例的类型和

承载方面,每个底层节点可以支持 3 种 VNF 类型,并且当一个底层节点承载了一种类型的 VNF 实例之后,将不能承载其他类型的 VNF 实例。

为了评估提出的备份方法的性能和资源效率,选择当前研究中的经典算法 NR CR<sup>[20]</sup> 和基于最短路径的服务功能链资源备份算法(Resource Backup Algorithm for Service Function Chain Based on Shortest Path, RBASP) 进行比较。RBASP 在找到急需备份的 NFV 实例对应的底层节点后,选择距离该底层节点最近的满足资源需求的底层节点作为备份节点<sup>[15-16]</sup>。

## 4.2 备份资源消耗

从备份实例数、备份带宽资源消耗两个方面进行比较,实验结果如图 1 和图 2 所示。图中横坐标表示 SFC 的可靠性需求从 0.95 增加到 0.999,用于模拟不同用户需求的环境。

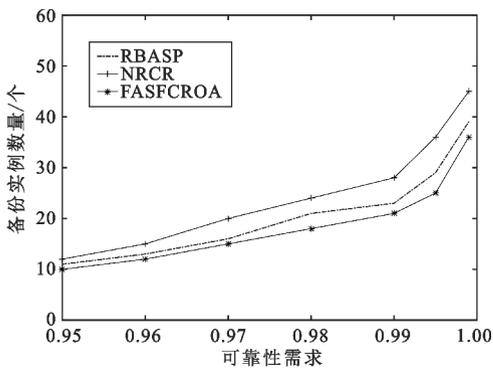


图 1 备份实例数比较

Fig. 1 Comparison of backup instances

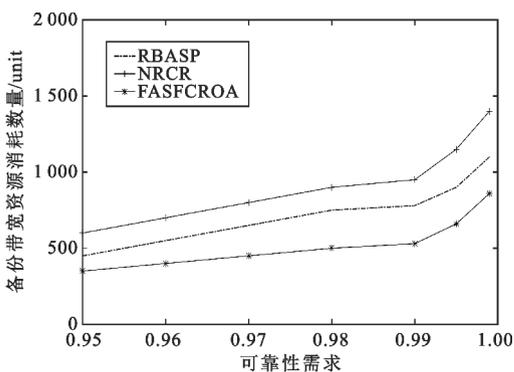


图 2 备份带宽资源消耗比较

Fig. 2 Comparison of backup bandwidth resource consumption

从图 1 中备份实例数比较结果可知,随着可靠性要求提升,3 种算法下备份实例数量都在增加。尤其当 SFC 的可靠性要求大于 0.99 时,备份实例数量快速增加。NR CR 消耗的备份实例数最多,

RBASP 次之,是因为 RBASP 选择底层节点时,优先选择备份优越性高的底层节点资源,从而快速提升其他 SFC 的可靠性。FASFCROA 的备份实例数比 NR CR 降低了约 29%,是因为 FASFCROA 考虑关联关系可以选择同时满足多个 VNF 实例的资源,从而需要更少的备份实例。

从图 2 中备份带宽资源消耗比较结果可知,随着可靠性要求的增加,3 种算法需要消耗的带宽资源都逐步增加。尤其是可靠性要求大于 0.99 时,3 种算法的带宽需求都快速增加。RBASP 的备份带宽资源消耗较少,NR CR 的备份带宽资源消耗最多。算法 RBASP 选择底层节点时,优先选择备份优越性高的底层节点资源,这些节点具有较多的邻接节点和连接链路,比较容易找到与待备份底层节点的邻接节点相连的链路,减少了链路资源的消耗。FASFCROA 的备份带宽资源消耗比 NR CR 降低了约 42%,这是因为 FASFCROA 选择与其他待备份 VNF 底层节点的链路代价最小的底层节点作为备份节点资源,所以需要更少的备份链路资源。

## 4.3 SFC 的可用率

SFC 的可用率是指底层节点发生故障后,正常可用的 SFC 数量在总的 SFC 数量中的占比。该指标可以分析备份策略对 SFC 可靠性的提升水平。在模拟底层网络节点的故障方面,采用随机模拟故障和资源特征模拟故障两种策略。随机模拟故障是指在底层节点中随机选择[2%,3%]的底层节点作为故障节点。根据资源特征模拟故障是指按照底层节点资源利用率降序排列,将资源利用率较高的[2%,3%]的底层节点作为故障节点。

图 3 中展示了随机模拟故障时 SFC 的可用率比较结果,横坐标表示底层节点的数量从 50 个增加到 100 个,用于模拟不同规模的网络环境。在不同网络规模下,3 种算法下 SFC 的可用率波动不大,说明不同网络规模环境对算法 SFC 的可用率影响较小。3 种算法下 SFC 的可用率结果区别不大,说明 3 种算法都有较好的收敛结果。RBASP 的 SFC 的可用率比 NR CR 结果略好,因为虽然故障是随机的,但是 RBASP 选择底层节点时,优先选择备份资源优势高的资源,保证 SFC 的路由可靠性较高。FASFCROA 的 SFC 的可用率比 RBASP 略好,因为 FASFCROA 考虑备份资源的关联关系,可以进一步

提升任意两个虚拟节点的连通性, 从而提升可用率。

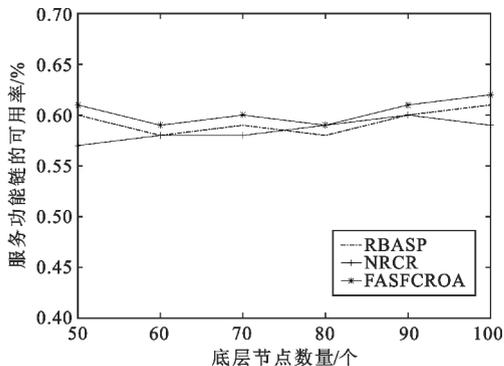


图 3 随机模拟故障时 SFC 的可用率比较  
Fig. 3 Comparison of SFC availability during random simulation of faults

图 4 展示了根据资源特征模拟故障时 SFC 的可用率比较结果。由图可知, 随着底层节点数量增加, 3 种算法下 SFC 的可用率都趋于收敛, 说明底层网络规模对 SFC 的可用率影响较小。NRCR 的 SFC 的可用率明显低于 RBASP 和 FASFCROA, 因为 RBASP 和 FASFCROA 选择备份底层节点时, 选择的底层节点都是备份优越性较大的底层节点, 这些节点的利用率较低, 所以可靠性较高。当利用率高的资源发生故障时, 对本文算法选择的 SFC 的可靠性影响较小。

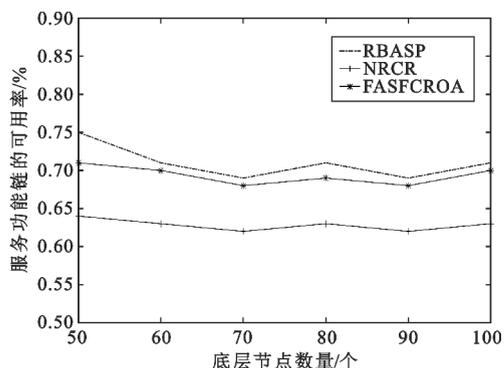


图 4 根据资源特征模拟故障时 SFC 的可用率比较  
Fig. 4 Comparison of SFC availability when simulating faults based on resource characteristics

#### 4.4 SFC 的接受率

SFC 的接受率是指资源备份后可以继续为 SFC 分配资源的成功率。该指标可以分析备份策略对于底层网络资源利用率的影响。

图 5 展示了 SFC 的接受率比较结果, 横坐标表示服务请求的数量从 20 个增加到 100 个。由图可知, 随着服务请求数量的增加, 3 种算法下 SFC 的接

受率都在降低。尤其是当服务请求大于 60 个时, SFC 的接受率快速降低。这说明 SFC 数量大于 60 后, SFC 需要的资源已经不能被底层网络资源满足。RBASP 的 SFC 接受率比 NRCR 略高, 因为其选择的备份节点具有较大的中心性, 可以通过较少的链路数量实现备份节点与待备份节点的邻接节点连接, 节约较多的底层链路资源。此时, 更多的链路资源可以被用于为其他 SFC 分配资源, 而 NRCR 为了选择可靠性较高的资源, 可能需要更多的链路资源。FASFCROA 下 SFC 接受率比 NRCR 提升了约 12%, 因为 FASFCROA 在 RBASP 基础上考虑备份资源的关联关系, 使用了更少的备份资源, 为接受 SFC 提供了更多的可用资源。

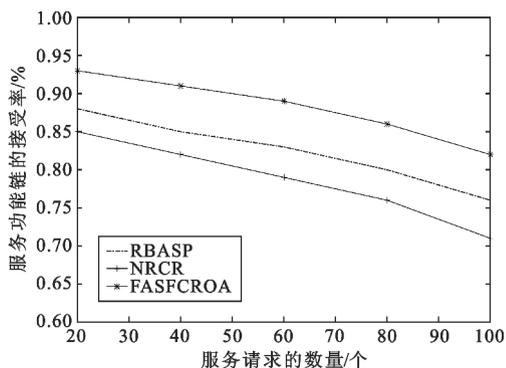


图 5 SFC 的接受率比较  
Fig. 5 Comparison of acceptance rates of SFC

对算法性能结果比较可知, 本文提出的 FASFCROA 采用网络特征和资源关联关系优化 SFC 的可靠性, 节约了备份实例和备份带宽的资源消耗, 提升了 SFC 的可用率和接受率, 所以具有较为优越的性能。SFC 的可用率与故障类型相关, 当故障原因是资源利用率过高时, 本文算法性能较好; 如果是突发事件导致故障, 本文算法性能与已有算法的性能结果相似。

## 5 结束语

在网络功能虚拟化环境下, 本文主要研究了如何解决 SFC 部署时可靠性低的问题。为了实现在保障网络服务可靠性需求的同时最小化资源开销, 本文设计了一种特征关联的服务功能链可靠性优化算法, 优先为备选对象优越性较高的 VNF 实例选择备份底层节点。在为 VNF 实例选择备份底层节点时, 提出了基于资源特征关联感知的备份节点选择算法。仿真结果表明, 本文所提方法节约了备份实例和备份带宽的资源消耗, 提升了 SFC 的接受率。

下一步将基于本文成果,进一步提升突发事件环境下 SFC 的可靠性。

### 参考文献:

- [ 1 ] 赵文,田永春,曾浩洋. 5G 安全架构分析[J]. 电讯技术,2020,60(8):876-882.
- [ 2 ] ZHU Y, YAO H, MAI T, et al. Multi-agent reinforcement learning aided service function chain deployment for Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022,9(17):15674-15684.
- [ 3 ] LIU H, DING S, WANG S, et al. Multi-objective optimization service function chain placement algorithm based on reinforcement learning[J]. Journal of Network and Systems Management,2022,30(4):1-25.
- [ 4 ] 李悦,任春莉,章国安. 车联网中网络切片资源分配方案[J]. 电讯技,2023,63(1):85-92.
- [ 5 ] COTRONEO D, DE S L, IANNILLO A K, et al. Network function virtualization: challenges and directions for reliability assurance [ C ]//Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops. Naples:IEEE,2014:37-42.
- [ 6 ] HE F, SATO T, OKI E. Backup resource allocation model for virtual networks with probabilistic protection against multiple facility node failures[ C ]//Proceedings of 2019 15th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks. Coimbra: IEEE, 2019:37-42.
- [ 7 ] ZHU M, HE F, OKI E. Multiple backup resource allocation with workload-dependent failure probability [ C ]//Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference. Taipei, China:IEEE,2020:1-6.
- [ 8 ] WEN R, FENG G, TANG J, et al. On robustness of network slicing for next-generation mobile networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 67 ( 1 ) : 430-444.
- [ 9 ] SUN J, ZHU G, SUN G, et al. A reliability-aware approach for resource efficient virtual network function deployment[J]. IEEE Access,2018,6:18238-18250.
- [ 10 ] SOUALAH O, MECHTRI M, GHRIBI C, et al. A link failure recovery algorithm for virtual network function chaining [ C ]//Proceedings of 2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management. Lisbon:IEEE,2017:213-221.
- [ 11 ] GEMBER J A, VISWANATHAN R, PRAKASH C, et al. OpenNF:enabling innovation in network function control [ J ]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review,2014,44(4):163-174.
- [ 12 ] SATO T, HE F, OKI E, et al. Implementation and testing of failure recovery based on backup resource sharing model for distributed cloud computing system [ C ]//Proceedings of 2018 IEEE 7th International Conference on Cloud Networking. Tokyo:IEEE,2018:1-3.
- [ 13 ] FAN J, YE Z, GUAN C, et al. GREP: guaranteeing reliability with enhanced protection in NFV [ C ]//Proceedings of 2015 ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Middleboxes and Network Function Virtualization. London:ACM,2015:13-18.
- [ 14 ] KANG R, HE F, OKI E. Virtual network function allocation in service function chains using backups with availability schedule[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2021,18(4):4294-4310.
- [ 15 ] 阳勇,孟相如,康巧燕,等. 基于流量优化的可靠服务功能链部署方法[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(10):3017-3025.
- [ 16 ] 翟东,孟相如,康巧燕,等. 面向时延与可靠性优化的服务功能链部署方法[J]. 电子与信息学报,2020,42(10):2386-2393.
- [ 17 ] KARRA K, SIVALINGAM K M. Providing resiliency for service function chaining in NFV systems using a SDN-based approach [ C ]//Proceedings of 2018 Twenty Fourth National Conference on Communications. Hyderabad:IEEE,2018:1-6.
- [ 18 ] QU L, ASSI C, SHABAN K, et al. A reliability-aware network service chain provisioning with delay guarantees in NFV-enabled enterprise datacenter networks [ J ]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2017,14(3):554-568.
- [ 19 ] ZHANG L, WANG Y, QIU X, et al. Redundancy mechanism of service function chain with node-ranking algorithm [ C ]//Proceedings of 2019 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management. Washington DC:IEEE,2019:586-589.
- [ 20 ] WANG Y, ZHANG L, YU P, et al. Reliability-oriented and resource-efficient service function chain construction and backup [ J ]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2021,18(1):240-257.
- [ 21 ] ZEGURA E W, CALVERT K L, BHATTACHARJEE S. How to model an internetwork[ C ]//Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Computer Communications. San Francisco:IEEE,1996:594-602.

### 作者简介:

张顺利 男,1981 年生于山西运城,2012 年获博士学位,现为高级工程师,主要从事网络虚拟化、边缘计算技术研究。

邵苏杰 男,1985 年生于陕西汉中,2015 年获博士学位,现为讲师,主要从事能源互联网、边缘计算与物联网研究。