

# 服务链联合多元化及动态冗余备份方法研究

刘昊<sup>†</sup>, 崔昊杨, 刘舒真

(上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对电力云环境下 VNF(Virtual Network Function, 虚拟网络函数)单一集偶发系统故障致使 SFC(Service Function Chain, 服务链)进程开环的难题, 在 MATLAB 仿真实验平台开展了分布式多集和定制冗余解决方法的研究。通过分析异构 VNF 服务可靠性需求, 明确单一集解构微服务部署架构, 利用异地部署实现 VNF 轻型分布, 并采用定制冗余策略, 进一步提升 VNF 弹性。结合轻型多集和冗余定制方法的优势, 提出了混合整数线性模型的服务链配置新策略。以资源消耗率、服务中断率、服务链可用性为对象参数的实验结果表明: 改进后的算法可有效避免系统故障导致的服务链完全中断, 在满足目标服务链可用性水平和提升服务链弹性能力的同时, 降低了平台系统多元化及冗余备份成本。

**关键词:** 电力云; SFC; VNF 放置; 冗余备份; 可用性

**中图分类号:** TP393.0      **doi:** 10.19734/j.issn.1001-3695.2020.09.0248

## Research on joint diversified and dynamic redundancy backup method for service chain

Liu Hao<sup>†</sup>, Cui Haoyang, Liu Shuzhen

(School of Electronics & Information Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the Service Function Chain (SFC) process opening loop caused by the failure of VNF (Virtual Network Function) single cluster system in the power cloud environment, this paper carried out the research on the distributed multi-set and customized redundancy solution on the MATLAB simulation experiment platform. By analyzing the reliability requirements of heterogeneous VNF services, clarifying the single-set deconstruction microservice deployment architecture, using remote deployment to achieve VNF light distribution, and adopting customized redundancy strategies to further improve VNF flexibility. Combining the advantages of lightweight multiple sets and redundant customization methods, this paper proposed a new service chain configuration strategy based on mixed integer linear model. The experimental results with resource consumption rate, service interruption rate, and service chain availability as the object parameters show that the improved algorithm can effectively avoid the complete interruption of the service chain caused by system failures, and meet the target service chain availability level and improve the service chain flexibility. At the same time, it reduces the cost of platform system diversification and redundancy backup.

**Key words:** power cloud; SFC; VNF placement; redundant backup; availability

## 0 引言

国家电网建设“具有中国特色国际领先的能源互联网企业”战略引领下<sup>[1]</sup>, 融合“大云物移智链”等现代信息技术的电力物联网, 旨在实现电力系统各环节间万物互联、人机交互、需求响应等目标成为行业发展趋势。然而, 以硬件设备耦合为特点的垂直集成网络结构<sup>[1,2]</sup>, 在资源共享和服务灵活部署方面尚不具备全方位立体化支撑能力, 特别是在 5G 技术驱动下高通量电力云服务中计算资源、存储需求和交互功能上, 充分利用网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)技术<sup>[3-5]</sup>承载软件网络功能(Network Functions, NF), 降低服务部署复杂性。

NFV(Network Function Virtualization)技术中, 由于承载网物理主机(PM)硬件、虚拟机(VM)或软件等的失效, 虚拟网络功能(Virtual Network Feature, VNF)故障是多发性系统问题<sup>[3,4]</sup>, 影响服务链正常运行, 造成资源数据丢失及浪费。Cohen 等人<sup>[8-11]</sup>对 VNF 放置及链接问题进行研究, 一定程度上减小 VNF 实例化数量及端到端延时, 但上述工作假定 NFV 基础结构完全可靠, 未考虑由硬件/软件故障引起的服务中断。基于此, Cotroneo 等人<sup>[15]</sup>对 NFV 基础设施可靠性挑战进行研究, 并评

估了各类故障情况下, 服务链(Service Function Chain, SFC)相关可靠性。

Carpio 等人<sup>[14]</sup>基于复制和迁移技术提出一种 N-N 配置策略, 通过加快服务器故障后的恢复速度, 进而提升服务可靠性, 其结果表明, 在可靠性保持前提下, 复制与迁移相结合可提升资源利用率。但该方案仅提供隐式冗余备份嵌入, 多 VNF 故障情况下, 系统无冗余备份实例进行数据迁移, 将引起服务链中断, 严重降低服务部署质量。

前述工作集中于以统一方式应用于 VNF 保护, 考虑到实际运行中 VNF 的异构性, 提出了一种基于多元化技术和定制冗余的 VNF 放置和链接方法, 该方法可以最大程度地减少资源消耗, 同时增强服务弹性, 通过保护 SFC 中最为敏感(即最易故障)VNF 提供多元化实例重构, 并提供定制冗余备份来涵盖最易发生故障的实例。

## 1 VNF 多元化冗余备份模型(N+P 模型)

在本节中, 为确保服务链的灵活性, 提出多元化冗余分配模型。与传统模型中所有实例都具有相同的资源需求不同, 将多元化技术应用于 VNF 实例构建中, 创建各类资源需求异构(或同构)的 VNF 实例以提升 SFC 应对各类故障的灵活性。

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-11-06

**作者简介:** 刘昊(1995-), 男(通信作者), 江西抚州人, 硕士, 主要研究方向为电力云计算技术、NFV 虚拟化技术(liu1340704@163.com); 崔昊杨(1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统设备状态监测; 刘舒真(1996-), 女, 湖南衡阳人, 硕士, 主要研究方向为新能源并网规划与优化控制。

### 1.1 VNF 多元化(N)

软件应用多元化技术是提供弹性服务的必要手段之一。欧洲电信标准协会(ETSI)已将软件应用多元化技术纳入其科研轨道中, 并就该方面进行深入研究<sup>[20]</sup>。本文通过一组轻量化 TVNFs 实例替换单个 VNF, 以分布式方式执行相同网络功能, 并可以共同处理最初分配给单个 VNF 相同数量的任务。

VNF 多元化可以提供高可用性的弹性服务链。但轻量化 TVNFs 替代不可避免的提升了开销, 这是由于负载均衡器(Load Balance)在虚拟池分配/重定向 N 个轻量化 TVNF 造成的。以性能保持为前提, 引入估计开销  $H(v, N)$  以确保轻量化 VNFs 与目标 VNF 有效性相同(参见式(1))。轻量化 VNFs 的资源总量(包括负载均衡器实例  $\Psi^{LB}$ )表示为  $\pi(v)$  diversity, 如式(2)所示, 其中  $\Psi^v$  表示轻量化 VNFs 所需资源。

$$H(v, N) = \Psi^v \cdot \frac{N-1}{2(N+1)} \quad (1)$$

$$\pi(v)_{diversity} = \Psi^v + \Psi^{LB} + H(v, N) \quad (2)$$

图 1 表示 VNF 分集的概念。为简单起见, 仅显示 CPU 要求, 实际资源处理可能包括处理器、内存、存储设备等。在此示例中, 由{VNF1, VNF2, VNF3}所组成的 SFC 在 VNF2 上应用了分级, 实例化 TVNFs{VNF2.1, VNF2.2, VNF2.3}, 并保证每个 TVNF 资源请求量不大于原始 VNF。轻量化池内的相关开销则需要 1 个 CPU。若  $\Psi^{LB}$  设为 1 个 CPU, 此示例下, TVNFs 所需资源总量为 6 个 CPU, 而非 4CPU。

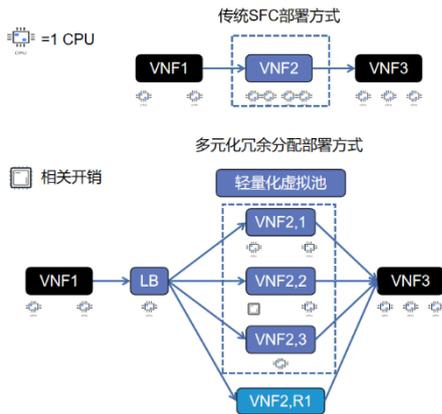


图 1 单 VNF 多元化冗余备份部署模型

Fig. 1 Single VNF diversified redundant backup deployment model

### 1.2 冗余备份模型(P)

为提高服务水平的可用性, 确保 VNF 故障下服务的连续性, 在 NFV 网络中不可避免的需要集成冗余机制, 但也应注意到, 创建冗余 VNF 将增加 SFC 的长度, 将消耗额外的资源<sup>[20]</sup>。为解决该问题, 提出一种冗余备份方案, 该方案在满足 SFC 高可用性的同时, 同时优化资源消耗。对目标 VNF 而言, 在备份模式下设置 P 个备份实例以确定其可定制资源量, 因此对于需要资源单位  $\Psi^v$  的目标 VNF 而言, 其备份实例资源可表示为

$$\pi(v, \alpha) = \alpha \cdot \Psi^v \cdot P \quad (3)$$

其中冗余参数  $\alpha \in [0, 1]$  表示分配给每个备份实例的资源与原始 VNF 的比例。例如, 在图 2 中, 当  $P=2$  且  $\alpha=0.5$  时, 需要 4 个 CPU 的 VNF2 将被 2 个备份实例覆盖。每个备份实例(VNF.R1 和 VNF.R2)将获得  $0.5 \times 4 \text{ CPU} = 2 \text{ CPU}$ , 分配给冗余的资源总量为  $2 \times 2 \text{ CPU} = 4 \text{ CPU}$ 。且对于给定数量的备份实例 P, 分配给冗余的资源量取决于冗余参数  $\alpha$ 。当  $\alpha=1$  (完全冗余) 表示每个备份实例将使用与目标 VNF 一样多的资源。通过在轻量化虚拟池中为每个备份实例分配与目标一样多的资源, 可以实现一种定制冗余的方法。因此, 对于需要资源单位  $\Psi^v$  的任何目标 VNF, 分配给备份实例的资源量表示为

$$\pi(v, \alpha)_{Redundancy} = \text{Max}\{\Psi_i^v\}_{i \in \text{Pool}(v)} \cdot P \quad (4)$$

上述方法之间的主要区别在于分配给冗余实例的资源量。很明显, 完全冗余( $\alpha=1$ )提供了系统的保护, 通过定制冗余策略可为目标 VNF 提供全方位立体化保护, 以涵盖最坏的故障情况(如 VNF2.1, VNF 2.2 和 VNF 2.3 映射同时失效)。并且, 由于异地映射策略, VNF 多元化同样可以降低同一池中的多故障风险。

## 2 问题描述和解决方案

在本节中, 在应用不同的配置场景中(串行和并行表示), 分析 SFC 的可用性, 然后, 提出用于弹性服务链供应的联合多元化特性和冗余特性的问题表述。

### 2.1 服务链可用性问题

传统网络下的硬件和软件是分离的, 但在 NFV 网络中, 需将其共同考虑并整合成一个整体系统, 因此, 需通过软/硬件可用性来表示每个 VNF 的可用性<sup>[16]</sup>, 如式(5)所示。

$$A_k = A_{vnf}^{software} \cdot A_k^{Hardware} \quad (5)$$

其中, 软件可用性  $A_{vnf}^{software}$  与软件错误, 配置错误等相关。硬件通用性  $A_{vnf}^{Hardware}$  取决于设备质量及其他物理因素。此外, SFC 是有 VNFs 组成的复杂系统, 其可用性取决于 VNF 可用性, 下面将考虑三种应用多元化方法来研究 SFC 的可用性, 分别为: 无多元化、完全多元化和选择多元化。

第一种情况为 VNF 无多元化实例, SFC 建模为串联系统(S), 任意 VNF 故障会导致整个 SFC 的故障。在完全分集的情况下, SFC 中的所有 VNF 都与分集有关, 任一 VNF 被 N 个 TVNFs 替代, 在此情况下, 某 VNF(或某部分节点)的故障不会立即导致整个 SFC 的故障, 目标 VNF 建模为并行系统(P)。与前述情况不同的是, 在 SFC 上应用选择性多元化, 将敏感 VNF 重构为多个 TVNFs 进行保护。因此, 这种情况可以建模为串联-并联系统, 该系统由如图 2 所示串联连接的一组子系统(并联 P 和串联 S)组成。

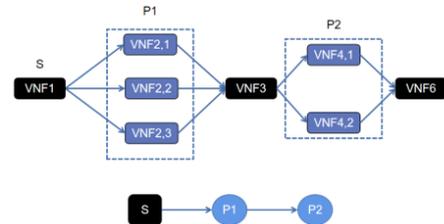


图 2 串-并联系统

Fig. 2 Series-parallel system

考虑以  $N+P$  模型为目标的 VNF 集, 其中部分 VNF 被建模为并行子系统(P)。S 是一组无多元化的 VNF, 并被建模为单个串联子系统(图 2 中的 S)并链接到对应于 P 的一个或多个子系统。因此, 将任何 SFC 的等式(2)中的可用性  $A_{(SFC)}$  写为组成该 SFC 的每个 VNF 可用性  $A_{vnf}$  的乘积。此外,  $A_{vnf}$  将取决于是否多元化是否应用(并行或串联系统)。式(6)的第一项为不受多样性影响的 VNF 的可用性, 而第二项代表目标 VNF 的可用性。

$$A(SFC) = \prod_{vnf \in SFC} A_{vnf} = \prod_{i \in N_S} A_i \cdot \prod_{P \in SFC} (1 - \prod_{j \in N_P} (1 - A_j)) \quad (6)$$

上式表明两个(或多个)串联的 VNF 的可用性始终低于其各自的可用性, 并行组合的两个(或多个)VNF 的可用性始终高于其各自的可用性。图 3 表示了当 SFC 的组件数量增加时, 串联配置的 SFC(即无分集情况)的可用性逐渐降低, 其可用性低于初始单个可用性(使用初始可用性为 0.7 的组件, 随组件数增加时, 其可用性趋于 0)。另一方面, 以并行方式连接这些组件(具有相同的单个可用性)的提高了整个 SFC 的最终可用性(使用可靠性为 0.7 的组件时, 全分集情况倾向于为 1)。

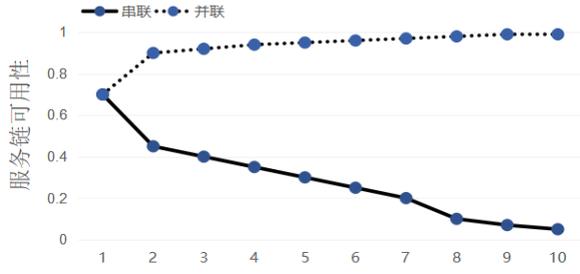


图 3 不同系统 SFC 可用性对比

Fig. 3 SFC availability comparison of different systems

## 2.2 问题表述

在本节中, 提出一种用于弹性服务链配置的放置解决方法, 基于多元化技术和冗余放置策略, 建立混合整数线性模型, 其输入为网络特征(如资源容量和硬件可用性)SFC 要求(VNF 资源可用性), 输出为 VNF 最佳放置策略。

用  $\Gamma$  来表示 SFC 请求集合, SFC 请求  $s \in \Gamma$  用无向图  $G_s^v(N_s^v, E_s^v)$  表示, 其中  $N_s^v$  表示组成  $s$  的一组 VNF,  $E_s^v$  表示 VNF 虚拟链接的有向边。此外, 每个 SFC 都定义了与资源消耗有关的指标合集(如 vCPU 数量或网络性能、延时或比特率等)。VNF 实例中需预定义资源量  $\Psi_v$ , VNF 间的虚拟链接带宽需求表示为  $\Omega(k, l)$ 。

多元化技术中, 目标 VNF( $v \in N_s^v$ ) 可以由一组 TVNFs( $v_r \in D_i^v$ ) 代替。表 1 总结所使用的符号, 优化目标定制如下:

$$\text{Min} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{n \in N_p} \sum_{v \in N_s^v} \psi_n^{D_i^v} \cdot M_n^{D_i^v} + \sum_{i=1}^N \sum_{n \in N_p} \sum_{v \in N_s^v} \psi_n^{R_i^v} \cdot M_n^{R_i^v} + \sum_{n \in N_p} \sum_{v \in N_s^v} \psi_n^{LB} \cdot M_n^{LB(v)} \right) \quad (7)$$

表 1 部分参数释义

Tab. 1 Interpretation of some parameters

| 变量                           | 值   |
|------------------------------|---|
| $N_v$                        | VNF 数量集群  |
| $E_p$                        | 物理节点之间的物理链接集  |
| $N_p$                        | 物理节点集   |
| $E_v$                        | VNF 之间的虚拟链接集  |
| $\delta^{(n,m)}$             | 物理链接 $(n,m) \in E_p$ 的可用容量                                |
| $\psi_n^{D_i^v}$             | 第 $i$ 个 TVNF 所需资源   |
| $M_n^{D_i^v}$                | 二进制变量, 表示 TVNF 是否被映射到物理节点 $n$ 上                           |
| $M_n^{LB(v)}$                | 二进制变量, 表示负载均衡实例是否被映射到物理节点 $n$ 上                           |
| $\psi^v$                     | VNF $v$ 所需资源容量  |
| $\psi^{LB}$                  | 负载均衡实例所需容量  |
| $\Omega^{(D_i^v, D_j^v)}$    | 链接 VNF $k$ 中的第 $i$ 个实例与 VNF $l$ 中的第 $j$ 个多元化实例的虚拟链路所需资源容量 |
| $M_{(n,m)}^{(D_i^v, D_j^v)}$ | 二进制变量, 表征两个 TVNF 间的虚拟链接 $(l,k)$ 是否映射到物理链接 $(n,m)$ 上       |
| $\Omega^{(k,l)}$             | 链接 VNF $(k, l)$ 之间虚拟链路所需容量                                |
| $M_n^{D_i^v}$                | 二进制变量, 表示 TVNF 是否被映射到物理节点 $n$ 上                           |
| $M_n^{R_i^v}$                | 二进制变量, 表示备份 VNF 是否被映射到物理节点 $n$ 上                          |
| $\psi_n^{D_i^v}$             | 第 $i$ 个 TVNF 所需资源   |
| $\psi_n^{R_i^v}$             | 第 $i$ 个备份所需资源   |
| $M_n^{LB(v)}$                | 二进制变量, 表示负载均衡实例是否被映射到物理节点 $n$ 上                           |

二进制变量  $M_n^{D_i^v}$  (resp.  $M_n^{R_i^v}$ ) 表示 TVNFs 实例(或者备份实例  $D_i^v$ ) 是否映射到物理节点  $PN$  上。  $M_n^{LB(v)}$  表示与轻量化虚拟池中负载均衡实例是否映射到节点  $n \in E_p$  上。优化目标受如下约束:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{(k,l) \in E_v} (\Omega^{(D_i^v, D_j^v)} \cdot M_{(n,m)}^{(D_i^v, D_j^v)}) \leq \delta^{(n,m)}, \forall (n,m) \in E_p \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{v \in N_s^v} (\psi_n^{D_i^v} \cdot M_n^{D_i^v}) + \sum_{v \in N_s^v} (\psi_n^{LB} \cdot M_n^{LB(v)}) \geq \psi^v + H(v, N), \forall v \in N_v \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{(k,l) \in E_v} (\Omega^{(D_i^v, D_j^v)} \cdot M_{(n,m)}^{(D_i^v, D_j^v)}) \geq \Omega^{(k,l)}, \forall (k,l) \in E_v \quad (10)$$

$$\sum_{m \in N_p} M_{(n,m)}^{(D_i^v, D_j^v)} - \sum_{m \in N_p} M_{(m,n)}^{(D_i^v, D_j^v)} = M_n^{D_i^v} - M_n^{D_j^v} \quad (11)$$

$\forall n \in N_p, \forall (D_i^v, D_j^v) \in E_v$

$$\sum_{i=1}^N M_n^{D_i^v} + \sum_{i=1}^p M_n^{R_i^v} \leq 1 \quad \forall v \in N_v, \forall n \in N_p \quad (12)$$

$$\sum_{n \in N_p} M_n^{D_i^v} \leq 1 \quad \forall k \in N_v \quad (13)$$

$$\frac{\psi^{D_j^v}}{\psi^{D_i^v}} \geq \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k \in N_v} \Omega^{(D_i^v, D_j^v)} \cdot M_{(n,m)}^{(D_i^v, D_j^v)}}{\sum_{k \in N_v} \Omega^{(k,l)}} \quad (14)$$

$\forall k, l \in N_v, \forall n, m \in N_p$

$$\psi^{R_i^v} \geq \alpha \cdot \psi^k \quad \forall k \in N_v, \forall n \in N_p \quad (15)$$

$$\Omega^{(R_i^v, R_j^v)} \geq \beta \cdot \Omega^{(k,l)} \quad \forall R_i^v, R_j^v \in N_v, \forall n \in N_p \quad (16)$$

$$M_n^{D_i^v} \cdot (1 - \varepsilon_k) \varepsilon_l = M_n^{LB(v)} \quad \forall n \in N_p, \forall (k,l) \in E_v \quad (17)$$

$$\sum_{n \in N_p} A_n^{\text{software}} \cdot A_n^{\text{hardware}} \cdot M_n^{D_i^v} \geq 1 - (1 - A^{Th}(s))^{|N_s^v|}, \forall s \in \Gamma, \forall v \in N_s^v \quad (18)$$

式(8)确保 VNF 实例总资源不超过 PN 节点的可用资源, 式(9)保证虚拟链路不超过其可用容量  $capacity\delta^{(n,m)}$ 。式(10)表示轻量化目标 VNF 时, 在保证性能的前提下, 提供给 TVNFs 最优资源量。式(11)表示 TVNFs 实例的所有虚拟链接将保留两个目标 VNF(k,l)间虚拟链接最初所需的容量。式(12)为流量守恒约束。

式(13)指出, TVNFs 以及备份实例必须映射到不同的 PN 中, 实现异地放置, 此约束放置将保护相同目标 VNF 的 TVNFs 部署在不同物理机上。式(14)指出, 每个 TVNF 只能映射到物理基础架构一次, 即表示其资源(内存、存储等)分配由同一 PN 提供。式(16)(17)用于确定分配给备份实例计算和网络资源, 通过修改  $\alpha$  和  $\beta$  值来定制覆盖目标 VNF 实例的备份资源量, 实现定制冗余备份。

$A^{Th}(v)$ (服务链可用性)被视为解决方案的阈值参数, 但若使用式 6 约束将模型非线性化, 因此, 选择式(19)代替定义, 式(19)保证在 PN 中部署 TVNFs 实例时, 其结果可用性取决于可用性阈值  $A^{Th}(v)$ , 可用性由下式给出:

$$A^{Th}(v) = A^{Th}(s)^{|N_s^v|} \quad (19)$$

例如, 由 3 个 VNF(串联)组成的 SFC 的可用性为  $A^{Th}(s) = 0.900$ , 则其 VNF 的单个可用性应至少为  $A^{Th}(v) = 0.91/3 = 0.965$ 。综上, 本节所提出的多元化冗余备份方法基于 MILP 模型, 以解决弹性服务供应的放置和链接问题。并根据保护的应用方式, 得出建议解决方案的不同变体, 针对每个 SFC 的 VNF 的位置, 数量和大小(包括 TVNF 和备份实例), 实现弹性的 SFC 部署。

## 3 实验分析

本节介绍了所提出的多元化冗余备份方案的系统实施和评估结果, 通过将三种解决方案 ALLDIV、RANDIV、SELEDIV(见表 2)与文献 14 所提出的 N-N 模型进行比较, 对于资源消耗率、平均可用性以及服务中断请求率进行比较, 分析其优越性。

表 2 三种轻量化 VNF 重构策略

Tab. 2 Three lightweight VNF reconstruction strategies

| VNF 重构策略 | 说明  |
|----------|---|
| ALLDIV   | 在 SFC 的每个 VNF 上重构轻量级 VNFs, 而无须区分可用性       |
| RNDIV    | 以随机方式将多元化技术应用于 SFC 中的一组 VNF               |
| SELEDIV  | 根据要单个可用性来选择最敏感(容易发生故障)的 VNF 进行轻量级 VNFs 重构 |

仿真环境为 MATLAB2018b, 并装载 Gurobi 优化器用于解决配备 Intel3.2GHz 处理器和 16GB RAM 的机器上的 MILP 模型。设定网络节点数为 28、双向链路为 44。同时, 假定所有的物理节点(PN)具有相同容量且都可承载 VNF, 其可靠性

随机设定为 0.9~0.999<sup>[6]</sup>。此外,假定每个 SFC 包含 6 个 VNF, 将其可靠性随机设置在 0.7~0.8 之间<sup>[6,7]</sup>, 并设定所有的服务请求为同时部署。仿真参数总结如表 3 所示。

表 3 仿真参数总结

Tab. 3 Summary of simulation parameters

| 参数                         | 值         |
|----------------------------|-----------|
| 每个 SFC 下的 VNF 数量           | 6         |
| VNF v 所需资源容量               | 5%        |
| 物理节点承载 VNF 可能性             | 100%      |
| 虚拟链接 $\Omega^{(k,l)}$ 所需容量 | 5%        |
| 物理链接可靠性                    | 100%      |
| VNF 软件可用性                  | 0.9-0.999 |
| VNF 硬件可用性                  | 0.9-0.999 |
| SFC 可用性阈值                  | 0.7-0.8   |

图 4 显示了部署不同数量 SFC 服务时, 各模型资源消耗率。RNDIV 比 ALLDIV 和 N-N 资源消耗率低, 因其重构 TVNFs 数量较少。并且, 与 N-N 相比, ALLDIV 消耗更少的资源, 因其可以调整冗余而不是使用隐式冗余方案。而对比 SELEDIV 和 N-N 时, 资源消耗降低约 10% (对于 48 SFC 请求), 这对实际环境处理 SFC 请求时尤为重要。与其他模型相比, SELEDIV 表现出最佳性能, 这是因为该方案针对敏感 VNF (最容易发生故障) 应用保护, 应用低资源部署实现 TVNFs 重构和冗余备份, 降低了资源开销的增加。但资源消耗并不是所提解决方案的唯一指标, 在可用性和服务中断指标也尤为重要。

图 5 描述了在增加部署的服务数量时, 不同模型间 SFC 平均可用性方面的比较。当 SFC 数量上升时, 不同模型间平均可用性保持稳定。但与 SELEDIV 和 N-to-N 相比, ALLDIV 和 RNDIV 实现了更好的性能 (ALLDIV 模型几乎达到了全可用性 $\approx 1$ )。ALLDIV 在每个 VNF 上应用多元化技术, 使整个 SFC 可用性增加。SELEDIV 和 N-to-N 都以最敏感的 VNF 为目标, 以增强其各自的可用性, 从而提升 SFC 整体可用性。且 SELEDIV 使用备份实例, 相较于仅提供隐式备份嵌入的 N-N 模型, 可用性提升更为明显。因此, 即便 ALLDIV 在可用性方面提供了最大的收益, 但其是通过牺牲可用资源来实现不必要的高可用性, 因此, SELEDIV 模型在精准定位 SFC 可用性上更具实际意义。

图 6 显示不同的故障率下, 不同模型的服务中断率。SELEDIV 在不同故障率下的服务中断率最低, 因其选择了最为敏感的 VNF, 使用 N+P 备份机制来提高其各自的可用性, 将其映射具有高可用性的 PN 中。

在 ALLDIV 的情况下, 保护所有 SFC 须使用大量的 PN (以满足异地映射约束)。当故障率提升时, SFC 服务中断风险也将提升, 而 N-N 使用隐式冗余方案 (没有备份实例仅提供嵌入式备用接口), 使故障更易发生。若不使用多元化技术, 承载给定服务的 VNF 的物理节点的故障将导致该服务立即完全中断。但在多元化情况下, 物理节点的故障虽会导致目标 VNF 的一部分丢失, 但映射到其他位置的 TVNFs (由于异地映射策略) 可保证了服务的连续性。

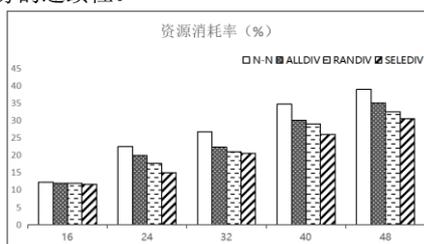


图 4 SFC 请求数量增加时不同模型资源消耗率

Fig. 4 Resource consumption rate of different models when the number of SFC requests increases

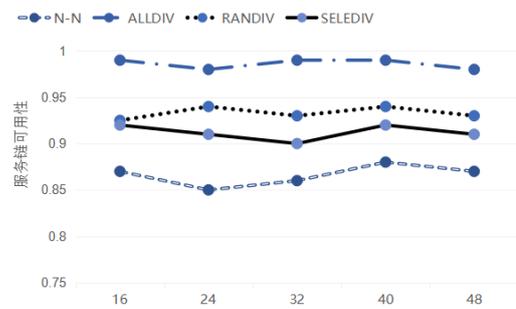


图 5 不同服务数量下服务链可用性对比

Fig. 5 Comparison of service chain availability under different number of services

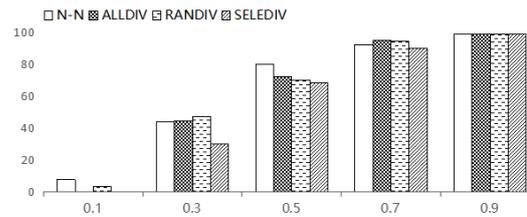


图 6 不同故障率下模型服务中断率对比

Fig. 6 Comparison of model service interruption rates under different failure rates

## 4 结束语

本文提出了一种 VNF 放置解决方案, 该解决方案利用 TVNFs 重构和冗余备份来实现弹性服务功能链。所提方法的原创性在于使用选择性多样性来通过针对易于发生故障的 VNF 来提高服务可用性, 并且依赖于量身定制的冗余来优化资源利用, 并开发了解决方案的几种变体, 即 ALLDIV, RNDIV 和 SELEDIV, 并在数值和实验上对其进行了评估。分析结果证明了解决方案在资源消耗和服务可用性方面的效率, 但该研究对于算法的性能较为局限, 仅暂用于模拟环境中, 算法应用于真实环境中的效果有待研究。作为未来工作的一部分, 计划将所提出 VNFs 的联合多元化及冗余备份方法在现实电力云环境中进行实现和测试, 在实现视频流服务基础之上, 进一步研究其服务安置及可伸缩性。

## 参考文献:

- [1] 国家电网公司. 国家电网有限公司关于印发公司 2020 年重点工作的通知 [EB/OL]. (2020) [2020-8-25] <https://power.in-en.com/html/power-2354453.shtml> (State Grid Corporation of China. Notice of State Grid Corporation of China on Issuing the Company's Key Tasks in 2020 [EB/OL].)
- [2] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望 [J]. 电网技术, 2019 (5): 1575-1585. (Wang Yi, Chen Qixin, Zhang Ning, et al. The integration of 5G communication and ubiquitous power Internet of Things: application analysis and research prospects [J]. Power System Technology, 2019 (5): 1575-1585.)
- [3] Fatima A, Javaid N, Waheed M, et al. Efficient Resource Allocation Model for Residential Buildings in Smart Grid Using Fog and Cloud Computing [C]// Proc of the 12th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS). Switzerland: SPRINGER INTERNATIONAL Press, 2019: 289-98.
- [4] Fu X, Yu F R, Wang J, et al. Service Function Chain Embedding for NFV-Enabled IoT Based on Deep Reinforcement Learning [J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57 (11): 102-8.
- [5] Huang H, Guo S, Wu J, et al. Service Chaining for Hybrid Network Function [J]. IEEE Trans on Cloud Computing, 2019, 7 (4): 1082-94.

- [6] Huang Y, Lu Y, Wang F, *et al.* An Edge Computing Framework for Real-Time Monitoring in Smart Grid [C]// Proc of IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII) . USA: IEEE COMPUTER SOC Press, 2018: 99-108.
- [7] Li D, Hong P, Xue K, *et al.* Availability Aware VNF Deployment in Datacenter Through Shared Redundancy and Multi-Tenancy [J]. IEEE Trans on Network and Service Management, 2019, 16 (4): 1651-64.
- [8] R. Cohen, L. Lewin-Eytan, J. S. Naor, and D. Raz. Near optimal placement of virtual network functions [C]// Proc of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM) . NEW YORK: IEEE Press, 2015: 1346–1354.
- [9] M. C. Luizelli, L. R. Bays, L. S. Buriol, *et al.* Piecing together the NFV provisioning puzzle: Efficient placement and chaining of virtual network functions [C]// Proc of the IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM) . NEW YORK: IEEE Press, 2015: 98–106.
- [10] H. Moens, F. De Turck. VNF-P: A model for efficient placement of virtualized network functions [C]// Proc of the 10th International Conference on Network and Service Management (CNSM) NEW YORK: IEEE Press, 2014: 418–423.
- [11] A. Takacs, H. Green, M. Shirazipour, *et al.* Network Function Placement for NFV Chaining in Packet/Optical Datacenters [J]. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2015, 33 (8): 1565-1570.
- [12] M. Scholler, M. Stiemerling, A. Ripke, *et al.* Resilient deployment of virtual network functions [C]// Proc of the 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) . NEW YORK: IEEE Press, 2013: 208-214.
- [13] A. Hmaity, M. Savi, F. Musumeci, M. Tornatore, *et al.* Virtual Network Function placement for resilient Service Chain provisioning [C]// Proc of the 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM) . NEW YORK: IEEE Press, 2016: 245–252.
- [14] L. Qu, C. Assi, K. Shaban, and M. J. Khabbaz. 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.
- [15] D. Cotroneo *et al.* Network function virtualization: Challenges and directions for reliability assurance [C]// Proc of the 25th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSREW) . NEW YORK: IEEE Press: 37-42.
- [16] S. Herker, X. An, W. Kiess, S. Beker, *et al.* Data-Center Architecture Impacts on Virtualized Network Functions Service Chain Embedding with High Availability Requirements [C]// Proc of the IEEE Globecom Workshops. NEW YORK: IEEE Press, 2015: 1–7.
- [17] P. Vizarrata, M. Condoluci, C. M. Machuca, *et al.* QoS-driven function placement reducing expenditures in NFV deployments [C]// Proc of the IEEE International Conference on Communications (ICC) , NEW YORK: IEEE Press, 2017: 1–7.
- [18] Cho, D, Taheri, J, Zomaya, AY, *et al.* Real-Time Virtual Network Function (VNF) Migration Toward Low Network Latency in Cloud Environments [C]// Proc of the 10th IEEE International Conference on Cloud Computing. NEW YORK: IEEE, 2017: 798-801.
- [19] P. Gill, N. Jain, N. Nagappan, P. Gill, *et al.* Understanding network failures in data centers [J]. ACM SIGCOMM COMPUTER COMMUNICATION REVIEW, 2011, 41 (4): 350-361.