

网络功能虚拟化环境下安全服务链故障的备份恢复机制

黄 睿 张红旗 常德显
(解放军信息工程大学 郑州 450001)
(河南省信息安全重点实验室 郑州 450001)
(xjhr1009@163.com)

A Backup and Recovery Mechanism for Security Service Chain Fault in Network Function Virtualization Environment

Huang Rui, Zhang Hongqi, and Chang Dexian
(PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001)
(Henan Key Laboratory of Information Security, Zhengzhou 450001)

Abstract Considering the fault problem of security service chain (SSC) in a network function virtualization (NFV) environment, this paper proposes a backup and recovery mechanism for SSC based on proportional resource reservation. According to the proactive processing idea, it divides the resource proportionally in a substrate network and constructs a candidate set for each substrate node/link beforehand. When the node fault suddenly occurs, it chooses the fault recovery targets in the candidate set and allocates the reserved backup resources. It solves the node fault remapping problem immediately by using the improved discrete particle swarm optimization (DPSO) algorithm, decreasing the occupancy of resources while increasing the repair rate. When the link fault suddenly occurs, it redirects the affected traffic to the available links in the candidate set by changing the traffic splitting-rate of the substrate path. We design the dynamical path splitting algorithm to solve the link fault redirect problem effectively, maximizing the residual value of the underlying substrate network resources. The simulation experiment verifies the proposed algorithm from two aspects: one is the adaptability under different substrate network environments and the other is the validity under different fault models. In addition, we also make a preliminary explore to the appropriate value of the main proportion for the impact of our proposed backup and recovery mechanism.

Key words network function virtualization (NFV); security service chain (SSC); fault; backup and recovery; discrete particle swarm optimization (DPSO)

摘 要 针对网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)环境下安全服务链(security service chain, SSC)故障问题,提出一种基于比例资源预留的备份恢复机制.该方法采用前瞻性处理思想,预先在物理网络中按比例划分主备用资源并构造节点/链路候选集合;当发生节点故障时,从候选集合中选取重映射目标并为其分配预留的备用资源,利用改进的离散粒子群(discrete particle swarm optimization, DPSO)算法及时地解决节点故障重映射问题,在降低资源占用的同时提高故障修复率;

当发生链路故障时,通过改变底层物理路径流量分割比例,将受影响流量迁移到候选集合的可用链路中,设计动态路径分割算法有效解决了链路故障重定向问题,实现底层物理网络资源剩余价值最大化。仿真实验验证了算法在不同物理网络环境下的适应性和不同故障模型下的有效性,此外,还初步探索了主用比例的取值对所提备份恢复机制的影响。

关键词 网络功能虚拟化;安全服务链;故障;备份恢复;离散粒子群

中图法分类号 TP393.08

随着多样化网络业务的迅猛发展,传统网络安全服务模式在动态性、灵活性、可扩展性等方面的弊端愈发突显^[1]。具体表现为^[2]:1)安全功能实现方式的耦合性。现有安全功能,如防火墙、IDS 等大都基于硬件中间盒子实现,其在功能上具有专属私有性,建设所需成本较高、可扩展性差、灵活性不足、运用中难以统一管理。2)安全功能部署位置的静态性。现有安全功能大都以静态方式部署在网络的关键位置,拓扑依赖严重,这种僵化的部署方式使其难以根据业务请求的服务构成进行重复使用或者动态重构。为此,探索新型网络安全服务模式成为当下研究的热点^[3]。

当前,软件定义网络^[4](software defined networking, SDN)的发展和网络功能虚拟化^[5](network function virtualization, NFV)技术的兴起为探寻新型网络安全服务模式提供了支撑。SDN 通过逻辑平面和物理平面的分离,将控制功能从传统的分布式网络设备迁移到集中化的控制平台,进而实现网络的集中管控和开放可编程。NFV 将以专有硬件形式部署的网络功能转变为在通用服务器上运行的虚拟网络功能(virtual network function, VNF),将传统网络设备的软件功能和硬件载体解耦开来,减少了在网络特定位置部署专用中间盒子的开销,增加了网络设备部署的灵活性。二者结合,使得网络架构和网络设备更加敏捷^[6]。由此,借助 SDN/NFV 的安全服务链(security service chain, SSC)技术^[7]应运而生。SSC 在利用 NFV 技术将传统安全服务功能虚拟化并部署在通用服务器(也称服务节点)的基础上,借助 SDN 的流量集中管控功能,根据用户或业务的安全请求引导流量按序经过服务节点上的安全功能实例(也称 VNF 实例),从而为用户或业务提供可配置的安全服务。

目前,SSC 的研究尚处于起步阶段。文献[8]提出一种 FRESCO 架构,通过安全模块组合的方式生成安全服务,但仅进行了功能上的验证而并未给出具体的实现方案。为此,文献[7]基于 SDN/NFV 提

出一种 SSC 的理论架构,但囿于网络资源的限制,未对逻辑安全服务请求如何向具体的、优化的 VNF 实例和 VNF 路径映射做出说明。虽然文献[9]在文献[7]的基础上进一步将 SSC 映射问题抽象为整数线性规划(integer linear programming, ILP)问题,根据物理节点的服务能力和物理链路的容量约束选择可映射的 VNF 实例和 VNF 路径并设计高效的启发式算法求解此问题,但未考虑到 SSC 模式下可能面临的故障性问题。实际网络中,受自然或人为因素影响,承载安全服务功能的物理网络资源(物理节点/物理链路)可能发生故障或性能劣化^[10],这将影响 SSC 的可靠性,严重时还可能导致无法对后续安全服务请求做出及时有效的响应。因此,SDN/NFV 下 SSC 故障的备份恢复问题亟待解决。SSC 故障的备份恢复旨在,当承载 VNF 实例/VNF 链路的服务节点/物理链路发生故障时,采用一定方法及时有效地完成 VNF 实例的更替和流量路由路径的切换,以最小化故障对用户/业务带来的影响。

为此,本文提出一种 SSC 故障的备份恢复机制以应对 SSC 模式下难以避免的故障性问题。该机制能够有效提高 SSC 在发生物理节点或物理链路故障时的故障修复率,在用户/业务容忍时间内保证服务的连续性。本文贡献主要包含 3 个方面:

1) 基于前摄性处理思想,预先将物理节点/链路资源按比例划分为主用和备用 2 部分,减少了用于故障恢复资源对安全服务请求映射资源的制约,提高了 SSC 的故障恢复能力。实验部分还对主用比例的取值进行了初步探索,结果表明其值的选取与故障发生强度存在一定的线性相关性。

2) 针对节点故障重映射问题,提出改进的离散粒子群(discrete particle swarm optimization, DPSO)算法求解该多目标优化问题(multi-objective optimizing problem, MOP),在最大化成功恢复安全服务请求数目的同时最小化 VNF 实例和 VNF 路径占用其重映射目标上备用资源的比例。

3) 针对链路故障重定向问题,设计动态路径分割算法求解该混合整数规划(mixed integer programming, MIP)问题,最大化底层物理网络资源剩余价值。

1 相关工作

近年来,SDN/NFV 所倡导的开放化、虚拟化、智能化和融合化理念得到了业界的广泛认同。作为其中的核心组份,NFV 逐渐成为未来网络的重要特征和演进方向。随着 NetVM^[11],ClickOS^[12]和 Open-NetVM^[13]等在通用服务器上实现 VNF 的平台陆续出现,服务从静态固定的硬件中间盒子中解放出来,成为一种可被灵活调度的资源,同时也为研究网络安全服务新模式提供了有益的参考。现有关于 SSC 生存周期的研究主要包含 3 个阶段:SSC 优化构建、SSC 执行调度及 SSC 故障的备份恢复。

1) SSC 优化构建。首先,需要依据用户或业务的安全请求,在满足网络资源约束的条件下,确定 VNF 实例的部署数量、位置,并规划流量路由路径,达到最小化安全服务时延等优化目标。现有研究大都从资源约束角度出发,提出满足约束条件的 SSC 优化构建策略。Dwaraki 等人^[14]将网络拓扑转换为分层图,采用 Dijkstra 算法逐层选择网络功能实例和路由路径,但未考虑对大规模物理网络而言,分层图可能带来的存储开销。Xiong 等人^[15]采用两阶段映射方案,分别基于网络功能的服务能力和网络链路的容量约束选择可映射的服务节点和路由路径,但可能因为服务节点间距离过大而影响服务时延。为适应更大规模的网络基础设施,Luizelli 等人^[16]将 SSC 优化构建问题抽象为 ILP 问题,并设计启发式算法高效求解此问题。

2) SSC 执行调度。构建阶段完成后,需考虑到 SSC 的执行调度问题,即当网络中存在多条 SSC 时,需要优化服务节点中提供某一特定功能的虚拟节点上多个 VNF 实例请求的执行顺序,根据需要对 VNF 实例进行实时调度,以实现最小化安全服务请求的平均等待时间等目标。Riera 等人^[17]首次提出服务节点上 VNF 实例的执行调度问题,并对其进行了形式化的定义。文献^[18]在文献^[17]基础上,将最小化完成时间作为可行方案的优化目标,但并未给出具体的解决方案。Mijumbi 等人^[19]在解决了 VNF 实例资源分配问题的基础上,基于禁忌搜索算法解决 VNF 实例的执行调度问题。

3) SSC 故障的备份恢复。SSC 优化构建和 SSC 执行调度问题侧重于 SSC 正常运行时的问题讨论,而涉及到可靠性保证的 SSC 故障的备份恢复问题也不容忽视。作为本文研究的重点,SSC 故障的备份恢复问题是指,当承载 VNF 实例/VNF 链路的服务节点/物理链路出现故障时,需要在不影响 SSC 初始构建资源的条件下,采用预留备用资源重建 VNF 实例和 VNF 链路,及时完成 VNF 实例的更替和流量路由路径的切换,以保证安全服务的可靠性和连续性。在此问题中,物理平面的正常运行是为用户提供安全服务的根本保障。然而,在可控或不可控因素影响下,物理网络资源(物理节点/物理链路)都可能发生一定程度的故障。鉴于 SDN/NFV 下资源共享的特性,任何单一物理资源故障都会影响使用该资源的多条 SSC,进而影响为用户提供的安全服务。因此,除了为 SSC 提供有效的优化构建和执行调度方案外,保证 SSC 故障发生时的生存性也至关重要。

为了增强 SSC 的生存抗毁性,Nguyen 等人^[20]提出了一种服务功能链的故障转移机制,通过在线替换故障 VNF 实例并动态迁移受故障影响流量以减少故障恢复时延,但并未考虑替换 VNF 实例和迁移流量路径对新到达 SSC 构建请求的资源制约。Suh 等人^[21]提出的分布式故障恢复机制,在不介入控制平面的条件下利用寄存在每一个服务节点中的故障恢复代理快速检测和恢复受影响的 VNF 实例,从而进行即时地故障恢复,但未考虑故障恢复代理带来的额外资源开销和性能损耗。Lee 等人^[22]提出了一种服务链的故障自恢复方案,通过数据平面的信令方式将受故障影响的服务节点自动地转移到其他正常节点上,但未考虑转移对象可能存在的潜在性故障可能。综上,现有研究成果较少且着重关注于故障发生时受影响 VNF 实例的即时故障恢复和流量路由路径变换,并未综合考虑其可能带来的资源约束、时延损耗和故障转移目标的可靠性。此外,现有成果未对故障发生对象(节点/链路)的类型进行分类讨论,对 SSC 中的故障问题一概而论,具有一定的局限性。

通过梳理现有相关工作不难发现,针对 SSC 故障的备份恢复问题,目前尚没有一种机制能够在既保证服务可靠性又不制约接受新请求资源的基础上,为 SSC 中 2 类故障问题提供高效的备份恢复解决方案。因此,本文借助 SDN/NFV 架构,提出一种 SSC 故障的备份恢复机制,综合考虑节点故障重映射和链路故障重定向 2 个方面,为 SSC 的进一步推广应用提供支撑。

2 问题概述

2.1 物理平面和安全服务请求

1) 物理平面. 图 1 是 NFV 环境下的 SSC 映射拓扑图: 给定一个底层物理网络拓扑, 可将其抽象为一个有权无向图, 记为 $G^S = (N^S, E^S)$. 其中, N^S 是物理节点集合, E^S 是物理链路集合. 物理节点 $n^s \in N^S$, 其资源容量可表示为 $rc(n^s) = (c(n^s), m(n^s), b(n^s))$. 其中, $c(n^s)$, $m(n^s)$ 和 $b(n^s)$ 分别表示节点计算、存储和带宽资源容量. 对于物理链路 $l^s \in E^S$, 其带宽能力用 $bw(l^s)$ 表示. 在物理平面初始化阶段, 将每个物理节点和物理链路的资源容量按比例分为主用和备用 2 部分. 对物理节点 $n^s \in N^S$, 主用资源容量为 $rc_p(n^s) = \lambda[rc(n^s)]$, 备用资源容量为 $rc_b(n^s) = (1-\lambda)[rc(n^s)]$, λ 为主用比例. 随着安全服务请求的陆续到达, 节点 n^s 上搭载的 VNF 实例个数不断增加, 资源消耗也不断增加. 因此, 需考虑节点 n^s 的实时剩余资源容量. 同样, 将 n^s 的实时剩余资源容量分为主用和备用 2 部分, 分别记为 $rc'_p(n^s)$ 和 $rc'_b(n^s)$. 物理链路 $l^s \in E^S$, 将其带宽分为 $bw_p(l^s)$ 和 $bw_b(l^s)$, 实时剩余带宽分为 $bw'_p(l^s)$ 和 $bw'_b(l^s)$.

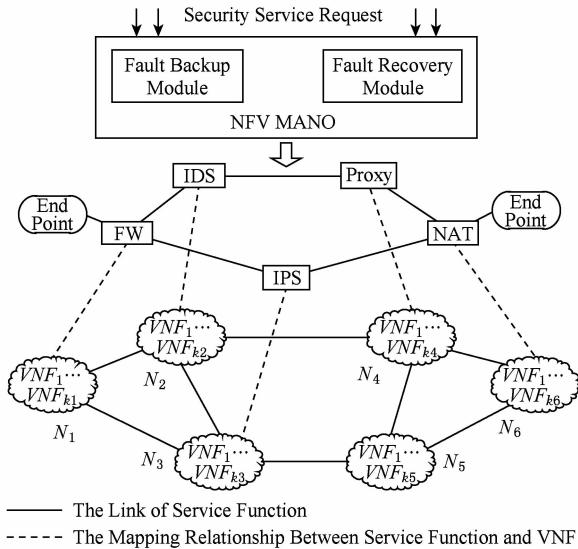


Fig. 1 The mapping topology of SSC

图 1 SSC 映射拓扑图

2) 安全服务请求. 对于包含 k 个安全服务功能的安全服务请求 $SSR_i = (f_n^1, f_n^2, \dots, f_n^k)$, 可将其抽象为一个有权无向图, 记为 $G^R = (N^R, E^R)$. 其中, N^R 为服务链中 VNF 实例节点构成的集合, E^R 为 VNF 实例链路构成的集合. 某一 VNF 实例节点

$n^r \in N^R$ 的节点资源需求用 $rc(n^r)$ 表示, 某一 VNF 实例链路 $l^r \in E^R$ 的带宽需求用 $bw(l^r)$ 表示. 对于安全服务请求 SSR_i , 承载其中 VNF 实例的物理节点组成的集合记为 $N_{SSR_i}^S$.

2.2 安全服务链故障

SSC 故障一般分为物理节点故障和物理链路故障. 实际网络中, 一个物理节点发生故障通常会导致一个区域的物理节点在相对集中的时间内发生故障, 即发生多节点故障. 因此, 将 SSC 中物理节点故障按时间顺序建模为一系列单节点故障集合 $PNF = \{pnf_1, pnf_2, \dots\}$, 对于某单节点故障 pnf_i , 用 $t_s(pnf_i)$ 和 $t_e(pnf_i)$ 分别定义故障发生和结束的时刻, 且 $t_s(pnf_i) < t_e(pnf_i)$. 若 $\exists j > i$, 使得 $t_s(pnf_i) < t_s(pnf_j) < t_e(pnf_i)$, 则说明在 pnf_i 故障期间有其他物理节点发生故障, 即此时处于多节点故障状态. 研究表明, 物理平面发生多节点故障的概率会随单一节点故障发生频率及平均持续时间的增加而增加.

同样地, 将 SSC 中物理链路故障建模为 $PLF = \{plf_1, plf_2, \dots\}$. 由于 Gill 等人^[10]在分析链路故障相关性时发现, 超过 50% 的链路故障是由单链路故障引起的, 并且超过 90% 的链路故障涉及不超过 5 条链路. 因此, 本文侧重考虑物理链路故障中最常见的单链路故障问题. 即在某时刻 t , $\forall i, j$, 物理链路故障 plf_i 和 plf_j 不同时发生.

2.3 节点故障重映射

节点故障重映射 (node failure remapping, NFRM) 是指, 在发生物理节点故障后, 依据当前物理平面状态, 及时地为受影响的 VNF 实例节点和其关联的 VNF 实例链路重新分配资源, 使 SSC 恢复正常工作.

给定物理网络 G^S , 物理节点 $x \in G^S$, x 所承载的 k 个 VNF 实例节点 $n_1, n_2, \dots, n_k$ 及其分别所属的安全服务请求为 $SSR_1, SSR_2, \dots, SSR_k$. 由于节点故障必然会导致其邻接链路失效, 因此在故障恢复时需要重映射 VNF 实例节点及其相邻链路. 节点 x 发生故障后, 安全服务请求 SSR_i 中需要重映射的部分包括 VNF 实例节点 n_i 以及与 n_i 相连的 VNF 实例链路组成的集合 $L^R(n_i)$, 将与 n_i 相邻的 VNF 实例节点组成的集合记为 $N^R(n_i)$, 其映射的物理节点集合记为 $N^S(n_i)$. 令 $l'_{n_i,j}$, $n'_{n_i,j}$ 和 $n''_{n_i,j}$ 分别表示集合 $L^R(n_i)$, $N^R(n_i)$ 和 $N^S(n_i)$ 中的第 j 个元素, $l'_{n_i,j}$ 连接 n_i 和 $n'_{n_i,j}$, $n'_{n_i,j}$ 映射在 $n''_{n_i,j}$ 上.

如图 2 所示, 当 G^S 中的物理节点 X 发生故障

时, SSR_i 中需要重映射的部分包含 VNF 实例节点 b 以及与之相连的 VNF 实例链路 (b, a) , (b, c) 和 (b, d) .

d). 因此, $L^R(b) = \{(b, a), (b, c), (b, d)\}$, $N^R(b) = \{a, c, d\}$, $N^S(b) = \{A, D, E\}$.

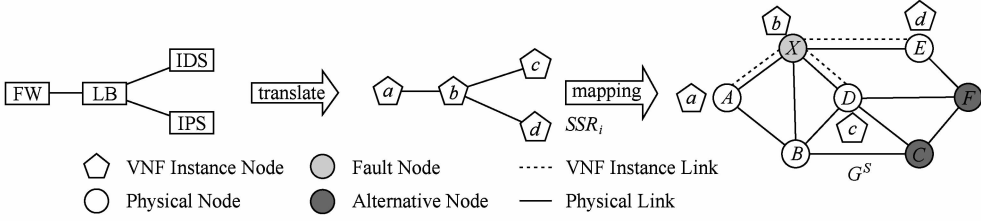


Fig. 2 The instance of single-point fault

图2 单节点故障实例

对于 NFRM 问题, 可抽象为以 $Max\{Obj_1, Obj_2\}$ (3.2.1 节中详细描述) 为目标, 满足以下映射条件的优化问题:

$$f_{node}: n_i \rightarrow x', x' \in N^S \setminus N_{SSR_i}^S, x' \neq x'. \quad (1)$$

$$f_{link}: l'_{n_i, j} \rightarrow l', l' \in Link(x', n'_{n_i, j}). \quad (2)$$

式(1)中 f_{node} 表示 VNF 实例节点重映射, $N^S \setminus N_{SSR_i}^S$ 表示从物理平面中去掉已承载 SSR_i 中 VNF 实例节点的物理节点, 确保 SSR_i 中的 VNF 实例节点不重复映射在具有潜在性故障可能的节点上, 即把 VNF 实例节点迁移到正常工作的物理节点上. 式(2)中 f_{link} 表示 VNF 实例链路重映射, $Link(x', n'_{n_i, j})$ 表示 x' 和 $n'_{n_i, j}$ 之间可用路径构成的集合, 即当把 VNF 实例节点 n_i 迁移到物理节点 x' 上的同时, 还需把相关 VNF 实例链路 $l'_{n_i, j}$ 迁移到可用路径 l' 上, 以完成 SSC 物理节点的故障恢复.

2.4 链路故障重定向

链路故障重定向(link failure redirect, LFRD)

是指, 在发生物理链路故障时, 动态调整底层物理路径流量分割比例, 将受影响流量从故障物理链路迁移到正常物理链路当中, 从而避免重映射方法带来的服务中断时间较长的影响, 使得 SSC 在最短时间内恢复正常工作.

给定物理网络 G^S , 连接物理节点 A, B 的物理链路 $l(A, B) \in E^S$, $l(A, B)$ 所承载的 z 条 VNF 实例链路以及其分别所属的安全服务请求为 $SSR_1, SSR_2, \dots, SSR_z$. 物理链路 $l(A, B)$ 发生故障时, 需要在满足底层物理平面负载均衡的条件下, 对受故障影响的 VNF 实例链路 l_i 进行重定向. 故障物理链路 $l(A, B)$ 承载 VNF 实例链路的集合为 $L^R(l_i)$, 令 $l'_{i, j}$ 表示集合 $L^R(l_i)$ 中的第 j 个元素.

如图 3 所示, 当 G^S 中的物理链路 $l(B, E)$ 发生故障时, 映射在之上的 VNF 实例链路 $l(a, c)$ 需要重定向.

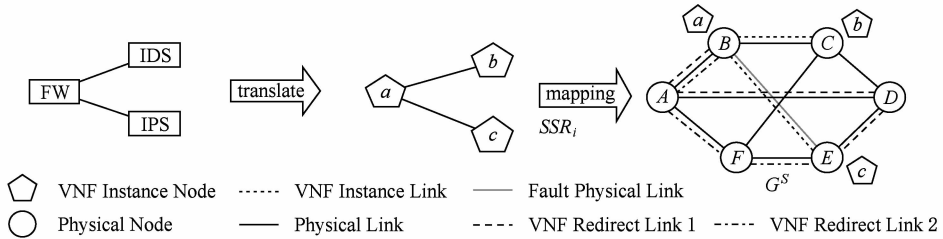


Fig. 3 The instance of single-link fault

图3 单链路故障实例

对于 LFRD 方法, 可以抽象为以 $Max\{S(G^S)\}$ 为目标 (3.3.1 节中详细描述), 满足以下映射条件的优化问题:

$$f_{redirect}: l_i \rightarrow l'(A, \mathbb{S}, B), l'(A, \mathbb{S}, B) \in Path(A, B), \\ l(A, B) \neq l'(A, \mathbb{S}, B), \quad (3)$$

其中 $f_{redirect}$ 表示 VNF 实例链路重定向, $Path(A, B)$ 表示物理节点 A, B 间物理链路穷举集合; $l'(A, \mathbb{S}, B)$ 表示集合中的某一条可用物理链路, 即把 VNF

实例链路上的流量重定向到正常的物理链路上, 以完成 SSC 物理链路故障恢复.

3 方法描述

本文提出的 NFV 环境下 SSC 故障的备份恢复机制包含 3 个阶段: 1) 物理平面初始化阶段, 即为每个物理资源(节点、链路)都按比例预留备份资源. 对

于物理节点,采用图的连通性理论构造可用节点候选集合;对于物理链路,采用路径遍历穷举法构造可用链路候选集合,尽可能多得为受故障影响对象提供重映射/重定向目标。2)当有安全服务请求 SSR 到达时,采用已有的服务功能链构建方法^[7,9,10]为其分配物理资源并提供安全服务。3)当发生节点故障时,基于改进的 DPSO 算法求解 NFRM,实现 VNF 实例节点的即时迁移;当发生链路故障时,基于动态路径分割算法求解 LFRD,实现 VNF 实例链路上流量的动态转移。

3.1 物理平面初始化

物理平面初始化包括物理节点初始化和物理链路初始化 2 个方面,通过在初始化阶段构建候选集合,有利于减小故障发生时主备用资源间的制约,缩小重映射/重定向问题的搜索空间,在提高故障恢复成功率的同时提升算法效率。

1) 物理节点初始化

在物理节点 x 发生故障后,其承载的 VNF 实例节点及与这些 VNF 实例节点相连的 VNF 实例链路都需要重新映射。文献[23]中指出,一个物理节点故障可能会导致与它相邻区域内的物理节点故障发生率增加。因此,为了保证节点故障重映射方法的成功率, x 的候选节点应该在一定范围内保持与故障节点 x 的不连通性。同时,为了降低地理范围导致的资源开销和传输时延,应限定候选节点与故障节点 x 间的相对距离。

首先,基于图的连通性理论,构造物理网络 G^S 的邻接矩阵:

$$AM(G^S) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

抽选出矩阵中故障节点 x 所对应的行/列,判断行/列中元素的值,值为 1 则说明二者连通,为 0 不连通。选取值为 0 的节点构成初始候选节点集合 $IBN(G^S, x) = \{n_1^s, n_2^s, \dots\}$ 。

然后,计算初始候选节点集合 IBN 中元素 n_i^s 和故障节点 x 之间的相对距离 $dis(n_i^s, x)$,定义候选节点集合 BN 如下:

$$BN(G^S, x, D) =$$

$$\{n^s \mid dis(n_i^s, x) \leq D, n^s \in G^S, n^s \neq x\}, \quad (5)$$

该集合是由物理网络 G^S 中,初始候选节点集合 IBN 和故障节点 x 之间相对距离小于阈值 D 的节

点元素构成的集合,也是初始化阶段构造的最终物理节点候选集合。

图 2 实例中,给定 $D=2$,则初始候选节点集合为 $IBN(G^S, x) = \{X, F, C\}$,最终候选节点集合为 $BN(G^S, x, 2) = \{F, C\}$ 。

2) 物理链路初始化

当物理链路 $l(A, B)$ 发生故障时,需要对其所承载的 VNF 实例链路 l_i 进行重定向。此处,采用路径遍历穷举法构造候选链路集合 BL ,集合中的元素需在保证 VNF 实例节点映射状态不变的条件下,限定物理节点间跳数不超过阈值 J 。

首先,遍历计算端节点 A, B 间的通路,构造可达路径集合 $RL_{A,B} = \{l(node_1), l(node_2), \dots\}$ 。

然后,计算可达路径集合 $RL_{A,B}$ 中候选路径节点 $node_i$ 的个数 $count(node_i)$,定义候选路径集合 BL 如下:

$$BL(G^S, l(A, B), J) =$$

$$\{l(node_i) \mid count(node_i) - 1 \leq J,$$

$$l(node_i) \in E^S \notin E^R, l(node_i) \neq l(A, B)\}, \quad (6)$$

该集合是物理网络 G^S 的可达路径集合 $RL_{A,B}$ 中,物理节点间跳数不超过阈值 J 且与原映射路径不重叠的元素构成的集合,即初始化阶段构造的物理链路候选集合。

图 3 实例中,设定 $J=3$,可达路径集合为 $RL_{B,E} = \{l(B, E), l(B, C, D, E), l(B, A, D, E), l(B, A, F, E)\}$,候选链路集合为 $BL(G^S, l(B, E), 3) = \{l(B, A, D, E), l(B, A, F, E)\}$ 。

3.2 基于改进的离散粒子群算法求解 NFRM

3.2.1 节点故障重映射的多目标优化模型

物理平面节点故障问题可分为单节点故障和多节点故障问题,由于物理节点故障的发生具有一定的随机性,无法预知未来可能发生故障的节点^[24]。因此,在节点故障重映射问题中,无法同时解决多节点故障问题,只能将其划分为单节点故障问题逐一优化。NFRM 旨在最大化成功恢复安全服务请求数目的同时最小化 VNF 实例节点和 VNF 实例链路占用其重映射目标上备用资源的比例,而成功恢复数目的提高势必会带来资源消耗的增多,这 2 个目标函数相互冲突,不存在唯一的全局最优解使得二者都达到最优。但是,存在一些解使得某个目标函数较优,同时其他目标函数不至于劣化,这样的解称为非劣有效解,又称 Pareto 最优解^[25]。为此,我们基于改进的 DPSO 算法来求解该 MOP。首先,建立 NFRM 的 MOP 模型:

1) 变量定义

① $\gamma_{i,x'}$. 若 VNF 实例节点 $n_i (1 \leq i \leq k)$ 重映射到物理节点 x' 上, $\gamma_{i,x'} = 1$; 否则 $\gamma_{i,x'} = 0$, 令 $\mathcal{R}_{SSR_i} = \sum_{x' \in BN(G^S, x, D)} \gamma_{i,x'}$ 表示安全服务请求 SSR_i 的故障节点整体重映射结果.

② $f_{u,w}^{n_i,j}$. 重映射 VNF 实例链路 $l_{n_i,j}^r (1 \leq j \leq |L^R(n_i)|)$ 时, 在物理链路 $l_{u,w}^s$ 上占用的流量, 令 $\Gamma_{u,w} = \sum_i \sum_j f_{u,w}^{n_i,j}$ 表示受故障节点影响的重映射 VNF 实例链路占物理链路 $l_{u,w}^s$ 的总流量.

2) 约束条件

① 资源容量约束

$$\sum_i \gamma_{i,x'} [rc(n_i)] \leq rc_b^t(x'), \quad \forall x' \in BN(G^S, x, D). \quad (7)$$

$$\Gamma_{u,w} + \Gamma_{w,u} \leq bw_b^t(l_{u,w}^s), \quad \forall l_{u,w}^s \in E^S. \quad (8)$$

式(7)和式(8)分别表示对任意候选节点或物理链路, 用于重映射的节点资源容量和链路带宽容量不得超过该节点或链路的实时剩余备用容量.

② 流量守恒约束

$$\begin{aligned} \sum_{a \in A(x)} (f_{x,a}^{n_i,j} + f_{a,x}^{n_i,j}) &= 0, \quad \forall i (1 \leq i \leq k), \\ \forall j (1 \leq j \leq |L^R(n_i)|), \\ \sum_{b \in A(x')} (f_{x',b}^{n_i,j} - f_{b,x'}^{n_i,j}) &= \gamma_{i,x'} bw(l_{n_i,j}^r), \quad \forall i (1 \leq i \leq k), \end{aligned} \quad (9)$$

(10)

$$\forall j (1 \leq j \leq |L^R(n_i)|), \quad \forall x' \in BN(G^S, x, D),$$

其中, $A(x)$ 表示与故障物理节点 x 相邻的节点组成的集合. 式(9)表示与故障节点 x 相连的物理链路不参与重映射. 式(10)表示, 若 n_i 重映射到 x' 上, 以 x' 为起点的物理路径上的流出流量应等于 $l_{n_i,j}^r$ 请求的带宽; 否则, 其应遵守流量守恒定律, 即输入流量等于输出流量.

③ 变量取值约束

$$\begin{aligned} \gamma_{i,x'} &\in \{0, 1\}, \\ f_{u,w}^{n_i,j} &\geq 0, \\ \forall x' \notin BN(G^S, x, D), \\ \gamma_{i,x'} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

3) 目标函数

$$Obj_1 = \sum_i R_{SSR_i}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Obj_2 = & - \left(\alpha \sum_{x'} \sum_i \frac{\gamma_{i,x'} [rc(n_i)]}{rc_b^t(x')} + \beta \sum_{l_{u,w}^s \in E^S} \frac{\Gamma_{u,w}}{bw_b^t(l_{u,w}^s)} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\max(Obj_1, Obj_2). \quad (14)$$

NFRM 进行故障节点重映射时, 有 2 方面的优化目标需重点考虑. 一方面应尽可能最大化成功恢复安全服务请求的数目(式(12)), 以确保用户安全服务不受影响; 另一方面应最小化 VNF 实例节点和 VNF 实例链路占用其重映射目标上备用资源的比例(式(13)中 α, β 为权重因子), 优先使用剩余备用资源容量大的物理节点和链路, 有利于备用物理资源的负载均衡和物理平面整体抗毁能力的提升. 式(14)为 NFRM 方法的 Pareto 目标函数.

3.2.2 改进的离散粒子群算法

DPSO 算法适合于对离散优化问题的解空间进行多点随机性搜索, 其具有形式简洁、收敛迅速、参数调节机制灵活等特点, 目前已成功应用于 MOP 的求解当中.

DPSO 算法中, 每个粒子可以看作解空间中的一个点, 如果粒子的群体规模为 N , 则第 $num = 1, 2, \dots, N$ 个粒子可以用速度向量 $\mathbf{v}_{num}$ 和位置向量 $\mathbf{x}_{num}$ 表示, 种群中的粒子 num 通过式(15)来更新自己进化过程中的速度和位置:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{num} = \omega \mathbf{v}_{num} + c_1 r_1 (\mathbf{pBest}[num] - \mathbf{x}_{num}) + c_2 r_2 (\mathbf{gBest} - \mathbf{x}_{num}), \\ s(\mathbf{v}_{num}) = 1 / [1 + \exp(-\mathbf{v}_{num})], \\ \mathbf{x}_{num} = \begin{cases} 1, & r < s(\mathbf{v}_{num}), \\ 0, & \text{others}, \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\omega \geq 0$ 代表惯性压缩因子; $c_1, c_2 \geq 0$ 代表加速因子; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数; $\mathbf{x}_{num}$ 是粒子的当前位置; $\mathbf{pBest}[num]$ 代表第 num 个粒子的个体最优解; $\mathbf{gBest}$ 代表整个群体的全局最优解. 式(15)中第 1 条为粒子速度更新公式, 其中, 第 1 部分为粒子依据自身速度进行惯性运动, 表示粒子对当前自身运动的信任; 第 2 部分为粒子的自我认知部分, 表示粒子对自身历史的思考; 第 3 部分为粒子的社会认知部分, 表示粒子在群体中的信息共享和相互协作. 第 2 条采用 sigmoid 函数将粒子速度映射到 $[0, 1]$ 区间, 作为下一步取值的概率. 第 3 条为粒子的位置更新公式.

DPSO 算法的参数中, 惯性压缩因子 ω 对粒子的搜索能力有很大的影响, 它决定搜索步伐的大小, 较大的 ω 有利于全局搜索, 较小的 ω 有利于局部搜索. 通常在开始时搜索步伐大些, 随着迭代次数的增加, 减小 ω 值以防止错过最优解. 本文所提故障恢复问题具有较高的时效性要求, 因此, 需要选择一个合适的 ω 值, 在平衡全局和局部搜索能力的同时加快算法的收敛速度. 式(16)为我们提出的一种惯性

压缩因子 ω 的非线性自适应策略,使其值在每一轮迭代过程中动态变化。

$$\omega = f(t) = \frac{(t_{\max} - t)^\sigma}{(t_{\max} - \bar{t})^\sigma} \times (\omega_{\text{initial}} - \bar{\omega}) + \omega_{\text{final}}, \quad (16)$$

其中, $t_{\max}$ 表示最大迭代次数, t 表示当前迭代次数, $\bar{t}$ 表示平均迭代次数, ω_{initial} 表示初始权重, ω_{final} 表示最终权重, $\bar{\omega}$ 表示平均权重, 参数 σ 的值可以参考文献[26]选取。

本文参考文献[27], 提出改进的 DPSO 算法求解 NFRM 问题, 伪代码如算法 1 所示:

算法 1. 节点故障重映射算法。

输入: 物理网络拓扑 G^S 、故障物理节点 n_i ;

输出: Pareto 最优解。

Step1. 初始化, 设定种群规模 N 、当前迭代次数 $t=0$ 、随机产生每个粒子的初始位置 $\mathbf{x}_0$ 、初始速度 $\mathbf{v}_0$;

Step2. 用目标函数 Obj_1, Obj_2 分别计算每个粒子的适应度值:

For $num=1$ to N

$Fitness1[num] = Obj_1(\mathbf{x}_{num});$

$Fitness2[num] = Obj_2(\mathbf{x}_{num});$

End For

Step3. 在 2 个目标函数 Obj_1 和 Obj_2 下分别对每个粒子求得个体极值:

For $num=1$ to N

$pBest[1, num] \leftarrow Obj_1;$

$pBest[2, num] \leftarrow Obj_2;$

End For

Step4. 对 2 个目标函数 Obj_1 和 Obj_2 , 分别求 2 个全局极值:

$gBest[1] \leftarrow Obj_1;$

$gBest[2] \leftarrow Obj_2;$

Step5. 分别计算个体极值的均值和全局极值的均值:

$pBest[num] = Average(pBest[1, num],$

$pBest[2, num]);$

$gBest = Average(gBest[1], gBest[2]);$

Step6. 用 Step5 计算所得的 $gBest$ 和 $pBest[num]$ 依据式(15)更新每个粒子的速度 $\mathbf{v}_i$ 和位置 $\mathbf{x}_i$, 并依据式(16)更新惯性压缩因子 ω 的值;

Step7. 如满足条件, 则输出最优解, 否则 $t++$, 转 Step2. 结束条件为 $t_{\max} > t$ 或当前解已稳定。

3.3 基于动态路径分割算法求解 LFRD

3.3.1 链路故障重定向的混合整数规划模型

单链路故障问题在物理平面链路故障问题中最为常见, 其发生具有瞬时性、不确定性, 并且往往会给用户安全服务请求造成较长时间的中断。因此, 本文将建模为 MIP 问题并提出动态路径分割算法, 在发生物理链路故障时, 动态调整底层物理路径流量分割比例, 重定向受影响流量至正常物理路径。LFRD 的目标在于最大化底层物理网络资源剩余价值, 使有限物理资源承载尽量多的安全服务请求。首先, 进行算法条件准备:

1) 变量定义

① $\delta_{i;\varphi}^{l'(A, \mathbb{S}, B)}$. 若故障物理链路 $l(A, B)$ 承载的 VNF 实例链路 $l_i (1 \leq i \leq k)$ 中的 $\varphi (0 < \varphi < 1)$ 份流量 $l_{i;\varphi}$ 重定向在物理链路 $l'(A, \mathbb{S}, B)$ 上, $\delta_{i;\varphi}^{l'(A, \mathbb{S}, B)} = 1$; 否则, $\delta_{i;\varphi}^{l'(A, \mathbb{S}, B)} = 0$ 。

② $f_{l'(A, \mathbb{S}, B)}^{l_i;\varphi}$. 重定向 VNF 实例链路 $l_i (1 \leq i \leq k)$ 中的 $\varphi (0 < \varphi < 1)$ 份流量 $l_{i;\varphi}$ 在物理链路 $l'(A, \mathbb{S}, B)$ 上占用流量大小, 令 $\mathfrak{S}_{A,B} = \sum_{l'(A, \mathbb{S}, B)} \sum_i \sum_{\varphi} f_{l'(A, \mathbb{S}, B)}^{l_i;\varphi}$ 表示重定向 VNF 实例链路 l_i 在不同物理链路路上的带宽之合。

2) 约束条件

① 链路带宽约束

$$\sum_i (\delta_{i;\varphi}^{l'(A, \mathbb{S}, B)} \times \varphi \times [bw(l_i)]) \leq bw_b(l'(A, \mathbb{S}, B)), \forall \varphi (0 < \varphi < 1), \quad (17)$$

$$\forall l'(A, \mathbb{S}, B) \in BL(G^S, l(A, B), J),$$

式(17)表示重定向 VNF 实例链路 l_i 中的 φ 份流量不能超过其宿主物理链路实时剩余带宽容量。

② 流量守恒约束

$$\sum_{l'(A, \mathbb{S}, B)} (f_{l'(A, \mathbb{S}, B)}^{l_i;\varphi} - f_{l'(B, \mathbb{S}, A)}^{l_i;\varphi}) = \delta_{i;\varphi}^{l'(A, \mathbb{S}, B)} \times \varphi \times [bw(l_i)], \forall \varphi (0 < \varphi < 1), \quad (18)$$

$$\forall l'(A, \mathbb{S}, B) \in BL(G^S, l(A, B), J),$$

式(18)表示当 VNF 实例链路 l_i 中的 φ 份流量重定向到物理链路 $l'(A, \mathbb{S}, B)$ 上时, 物理链路路上的净流量应该等于链路请求带宽; 否则, 应满足流量守恒定律。

③ 负载均衡约束

$$q^i = \frac{\mathfrak{S}_{A,B}}{|BL(G^S, l(A, B), J)|}, \quad (19)$$

$$p^i = \sqrt{\frac{\sum_{l'(A, \mathbb{S}, B)} (f_{l'(A, \mathbb{S}, B)}^{l_i: \varphi} - \bar{q}^i)^2}{|BL(G^S, l(A, B), J)|}} \leq \bar{B}, \quad (20)$$

式(19)表示重定向 VNF 实例链路 l_i 占物理链路带宽资源的均值;式(20)表示各物理链路带宽的综合考量,其取值不应超过阈值 $\bar{B}$,从而确保重定向后网络链路负载均衡。

④ 变量取值约束

$$\begin{aligned} \delta_{i: \varphi}'^{(A, \mathbb{S}, B)} &\in \{0, 1\}, \\ f_{l'(A, \mathbb{S}, B)}^{l_i: \varphi} &\geq 0, \\ \forall l'(A, \mathbb{S}, B) &\notin BL(G^S, l(A, B), J), \\ \delta_{i: \varphi}'^{(A, \mathbb{S}, B)} &= 0. \end{aligned} \quad (21)$$

3) 目标函数

$$\max\{S(G^S) = \rho \sum_{l'(A, \mathbb{S}, B)} \sum_i \sum_{\varphi} [bw_b'(l'(A, \mathbb{S}, B)) - \delta_{i: \varphi}'^{(A, \mathbb{S}, B)} \times f_{l'(A, \mathbb{S}, B)}^{l_i: \varphi}]\}, \quad (22)$$

式(22)表示最大化底层物理资源剩余价值,是求解 LFRD 方法的目标函数,其中 ρ 代表链路价值转换权重。

3.3.2 动态路径分割算法

动态路径分割算法是指,在不改变 VNF 实例节点映射关系的前提下,将安全服务请求中 VNF 实例链路上的流量按比例分割并重定向在多条可用物理链路上。本文设计动态路径分割算法用于求解 LFRD 问题的最优解,伪代码如算法 2 所示:

算法 2. 链路故障重定向算法。

输入:物理网络拓扑 G^S 、故障物理链路 $l(A, B)$ 、路径分割率 $\varphi = (1 + \epsilon) / |BL(G^S, l(A, B), J)|$;

输出:底层物理资源剩余价值 $S(G^S)$ 。

Step1. 判断 VNF 实例链路 l_i 是否具有路径可分割性。如有,依据 3.3.1 节中算法条件准备 2) 中约束条件为其建立线性约束并初始化控制变量 $\epsilon = 0$; $S(G^S) = 0$; 否则,退出;

Step2. 针对 VNF 实例链路 l_i ,按照路径分割比例 φ 将其分别重定向在 $l'(A, \mathbb{S}, B) \notin BL(G^S, l(A, B), J)$, 并依据式(22)计算当前底层物理资源剩余价值 $T_S(G^S)$;

Step3. 比较 $T_S(G^S)$ 和 $S(G^S)$ 。若 $T_S(G^S) > S(G^S)$, 则 $S(G^S) = T_S(G^S)$;

Step4. 控制变量 $\epsilon++$;

Step5. 当 $\epsilon < |BL(G^S, l(A, B), J)| - 1$ 时,返回 Step2; 否则,退出;

实际中,对于安全服务请求中一些特殊的服务

功能,路径分割往往会导致其服务的中断或者破坏其服务的连续性。因此,算法 Step1 阶段,首先判断 VNF 实例链路 l_i 是否可进行路径分割。对于可分割的 VNF 实例链路,在满足约束条件的情况下,依据“打捆”思想求解底层物理资源剩余价值的最大值;而对于不可分割的 VNF 实例链路,无法采用本文所提动态路径分割算法求解,只能采用传统方法对故障物理链路及相关节点重新进行资源映射或对物理平面数据包进行标记改造,这超出了本文的研究范围。

4 仿真实验

本文开展仿真实验的目的有 3 个方面:

1) 在不同物理网络环境下,评估本文方法的适应性;通过设置不同资源容量载荷的物理网络拓扑,比较本文方法性能差异。

2) 在不同故障模型下,评估本文方法的有效性;由于传统服务链映射方法暂未考虑物理网络故障问题, Lee 等人也仅在文献[22]中提出一种服务链的故障自恢复方案,故都不便与本文方法直接进行比较。因此,本文将经典的服务链映射方法^[16]和服务链故障自恢复方案^[22]分别扩展为未采用故障恢复方法的 NFRM/LFRD 算法(N_NFRM/N_LFRD)和采用故障自恢复方法的 NFRM/LFRD 算法(S_NFRM/S_LFRD)与本文所提(P_NFRM/P_LFRD)方法进行比较。

3) 在不同故障发生频率下,测试资源主用比例 λ 对本文方法性能的影响;针对不同故障发生率,探索资源主用比例的最佳取值。

4.1 实验设定

仿真实验在配置 Intel Core i7-6300HQ @3.40 GHz, 8 GB 内存的 PC 机上进行,借助 GT-ITM^[28] 工具生成底层物理网络拓扑并利用 Matlab 工具对实验结果进行分析。每次实验运行 50 000 个时间单位。

实验设置 3 种不同资源容量载荷的物理网络拓扑对本文方法进行评估,拓扑中的每对节点以 0.5 概率相连,节点类型及个数如表 1 所示。假设物理网络中的每个服务节点都能提供计算、存储和带宽 3 种资源,为了便于实验分析,重点关注服务节点的存储资源(限定每个服务节点的最大存储容量为 16 GB),而节点间的物理链路,重点关注其带宽资源(限定每条物理链路的最大负载量为 2 Gbps)。针对在物理

网络 $Phy1$ 中,节点资源总量(单位:M)和链路带宽(单位:Mbps)分别服从 $[0,50]$ 和 $[50,100]$ 的均匀分布.物理网络 $Phy2$ 中,节点资源总量和链路带宽分别服从 $[50,100]$ 和 $[100,200]$ 的均匀分布.物理网络 $Phy3$ 中,节点资源总量和链路带宽分别服从 $[0,200]$ 和 $[0,400]$ 的均匀分布.物理节点故障的到达服从时间单位为 100、强度为 p_n 的泊松过程,故障持续时间服从均值为 d_n 个时间单位的指数分布,物理节点候选集合相对距离 $D=3$;物理链路故障的到达服从时间单位为 100、强度为 p_l 的泊松过程,故障持续时间服从均值为 d_l 个时间单位的指数分布,物理链路候选集合跳数 $J=4$.

Table 1 Number of Nodes in the Experimental Topology

表 1 实验拓扑节点个数信息

Type	$Phy1$	$Phy2$	$Phy3$
Forwarding Node	8	16	25
Service Node	4	12	14

假设网络中有 6 种安全功能,每种安全功能有 3 种 VNF 实例.安全服务请求 SSR 中 VNF 实例节点的数目服从 $[3,5]$ 的均匀分布,VNF 实例节点间以 0.5 的概率相连.VNF 实例节点资源需求和 VNF 实例链路带宽需求分别服从 $[1,10]$ 和 $[1,15]$ 的均匀分布.安全服务请求 SSR 的到达服从时间单位为 100、强度为 4 的泊松过程,请求的生命周期服从均值为 40 个时间单位的指数分布.

对于 3.2 节提出的基于改进的 DPSO 算法求解 NFRM,将目标函数中节点资源权重 α 和链路资源权重 β 都设为 1. DPSO 算法中,设种群规模 $N=100$,最大迭代次数 $t_{\max}=50$,初始权重 $w_{\text{initial}}=1$,最终权重 $w_{\text{final}}=0.1$,加速因子 c_1, c_2 均取 2;对于 3.3 节提出的基于动态路径分割算法求解 LFRD,设链路价值转换权重 $\rho=1$.

安全服务请求故障修复率是指使用故障恢复方法后,能够正常运行的安全服务请求数目与故障发生前正常运行的安全服务请求数目的比值,反映了故障修复算法的有效性.本文通过模拟物理节点故障和物理链路故障,从安全服务请求故障修复率角度对 3.2 和 3.3 节所提方法进行验证,仿真结果如图 4~11 所示.

4.2 算法适应性

图 4 和图 5 展现了在 3 种不同资源容量载荷的物理网络上,NFRM 和 LFRD 方法的故障修复率和

故障修复时间.为便于比较,物理节点故障强度 p_n 和物理链路故障强度 p_l 均取 3,故障持续时间 d_n 和 d_l 均取 25,主用比例 λ 均取 75%.

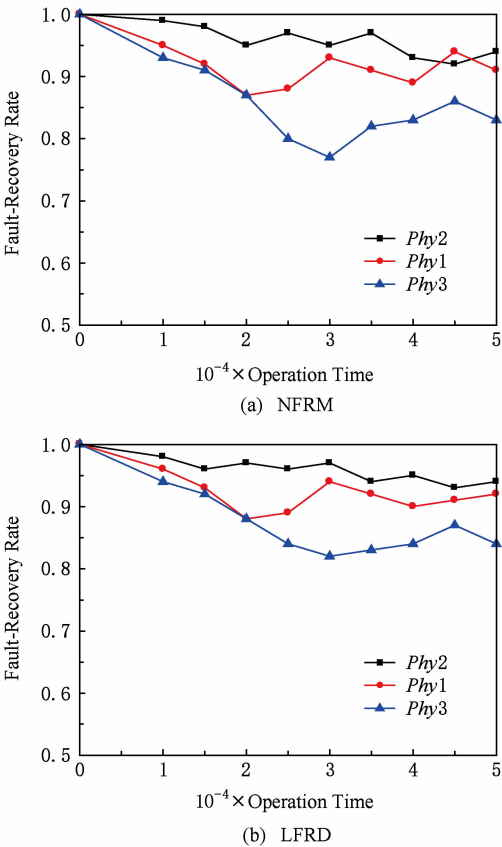


Fig. 4 The fault-recovery rate of NFRM/LFRD in different substrate networks

图 4 不同物理网络下 NFRM/LFRD 的故障修复率

由图 4(a)可知,NFRM 方法在 3 种不同资源容量载荷的物理网络上,故障修复率较为接近.其中,物理网络 $Phy1$ 和 $Phy3$ 下故障修复率分别为 92% 和 86%;而在物理网络 $Phy2$ 下,安全服务请求故障修复率大概在 96%,高于其他 2 种类型物理网络,这主要是因为 $Phy2$ 提供的节点资源总量和链路带宽分别服从 $[50,100]$ 和 $[100,200]$ 的均匀分布,而 VNF 实例节点资源需求和 VNF 实例链路带宽需求分别服从 $[1,10]$ 和 $[1,15]$ 的均匀分布,从资源配置角度来看, $Phy2$ 能够在满足请求资源的同时保证较高的故障修复率.观察图 4(b)可知,LFRD 方法在 3 种物理网络上的故障修复率相差不大,但相比图 4(a)而言,物理网络 $Phy1$ 和 $Phy3$ 下的故障修复率分别提高了 1% 和 2%,可见 LFRD 方法即使在资源配置不合理的物理网络环境下,仍能保证较高的故障修复率,对于多样化物理网络配置具有更好的适应性.

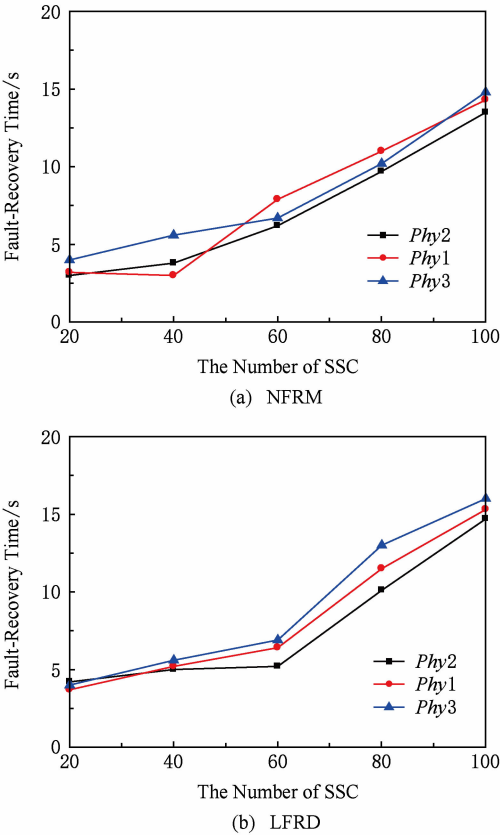


Fig. 5 The fault-recovery time of NFRM/LFRD in different substrate networks

图 5 不同物理网络下 NFRM/LFRD 的故障修复时间

图 5(a)表示 NFRM 方法在 3 种不同资源容量载荷的物理网络上的故障修复时间. 可以看出,随着 SSC 个数的增多,不同物理网络下的 NFRM 故障修复时间不断增长. 这是因为随着 SSC 个数的增多,可能发生故障的物理节点/链路比例也随之增大. 其中,物理网络 $Phy1$ 和 $Phy3$ 下故障修复时间波动性较大;而在物理网络 $Phy2$ 下,故障修复时间均匀增大并趋向于稳定,这主要是因为 $Phy2$ 提供的节点资源总量和链路带宽总量能更好地满足物理网络资源配置需求. 观察图 5(b)可知,LFRD 方法在 3 种物理网络上的故障修复时间较为接近,但相比图 5(a)而言,在资源配置不尽合理的物理网络环境下, $Phy1$ 和 $Phy3$ 下的故障修复时间分别延长了 0.9 s 和 0.5 s,即使在资源配置较为合理的 $Phy2$ 下,仍存在近 1 s 的延迟,可见对于未采用启发式算法求解的 LFRD 方法,虽然能够保证较高的故障修复率,但是当 SSC 个数增多时,存在故障修复时间较长的弊端.

4.3 算法有效性

图 6~9 展现了不同故障持续时间下,采用 S_

NFRM/S_LFRD,N_NFRM/N_LFRD 以及本文 P_NFRM/P_LFRD 方法的故障修复率. 实验在物理网络 $Phy2$ 上进行,物理节点故障强度 p_n 和物理链路故障强度 p_l 均取 3,主用比例 λ 均取 75%,故障持续时间 d_n 和 d_l 分别取 25 和 50.

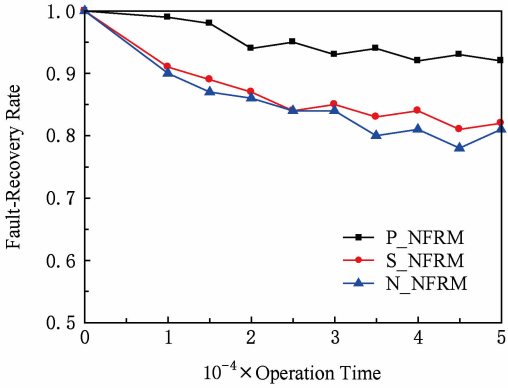


Fig. 6 The fault-recovery rate of different NFRMs when $d_n=25$

图 6 $d_n=25$ 时各 NFRM 的故障修复率

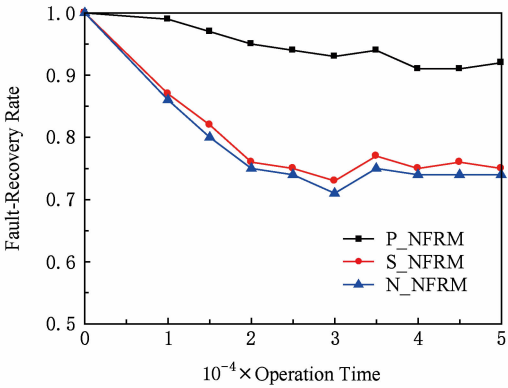


Fig. 7 The fault-recovery rate of different NFRMs when $d_n=50$

图 7 $d_n=50$ 下各 NFRM 的故障修复率

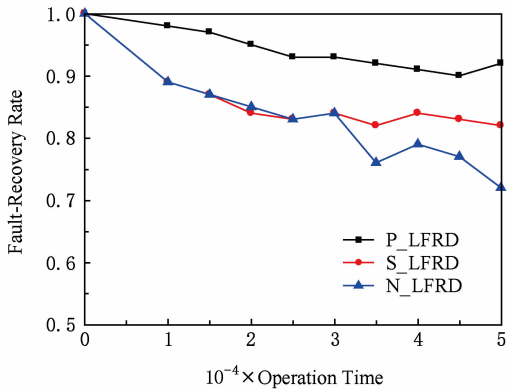


Fig. 8 The fault-recovery rate of different LFRDs when $d_l=25$

图 8 $d_l=25$ 下各 LFRD 的故障修复率

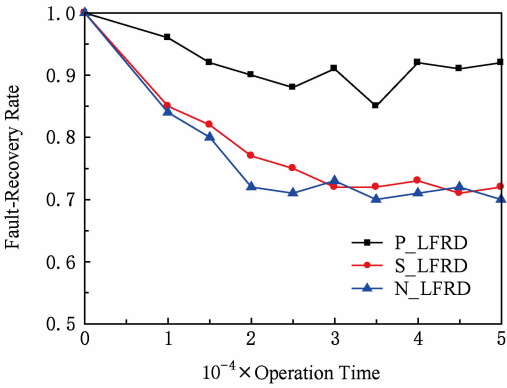


Fig. 9 The fault-recovery rate of different LFRDs when $d_l=50$

图9 $d_l=50$ 下各 LFRD 故障修复率

如图 6 所示,当 d_n 一定时,P_NFRM 的平均故障修复率可达 95%,分别高出 S_NFRM 和 N_NFRM 五个百分点和十个百分点.对比图 7 还可看出,当 d_n 增加时,P_NFRM 性能受影响不大,而其他 2 种方法性能明显下降.由此可见,当发生多节点故障概率增加时,本文方法具有更好的稳定性,这是因为本文方法对可能发生的故障问题进行了前摄性的准备.此外,当 d_n 较大时,S_NFRM 和 N_NFRM 的曲线较为接近,主要是因为当节点故障概率增加时,2 种方法恢复故障链的效率明显降低.观察图 8 可知,当 d_l 较小时,P_LFRD 的平均故障修复率远高于其他 2 种方法且性能发挥较为稳定.对比图 9 可以看出,当 d_l 较大时,P_LFRD 的曲线波动较为明显,呈现出一定的不稳定性,这是因为随着链路故障持续时间的增长,物理网络中发生区域性链路故障的概率增加,为链路故障修复带来了一定的困难.

4.4 主用比例取值探索

资源主用比例 λ 的取值直接影响本文方法的有效性,增大 λ 的取值,一方面可以提高 SSC 构建的成功率;另一方面却会减少故障备份的可用资源,为 SSC 的故障恢复增加难度.因此,本文通过仿真实验探索不同故障发生频率下最优的 λ 取值.实验在物理网络 Phy2 上进行,故障持续时间 d_n 和 d_l 均取 25.

由图 10(a)可知,NFRM 在 p_n 取 1,2,3,4 时的最优节点资源主用比例分别为 80%,70%,67%和 60%,可见, λ 的取值与故障发生强度 p_n 呈现出一定的线性相关性,在故障强度增大时,主用比例逐渐减小,并且减小的趋势逐渐平缓.观察图 10(b)具有类似的曲线特性.可见,曲线结果与前述分析具有一致性.

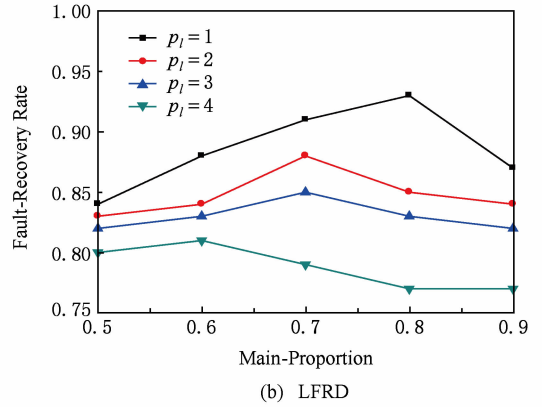
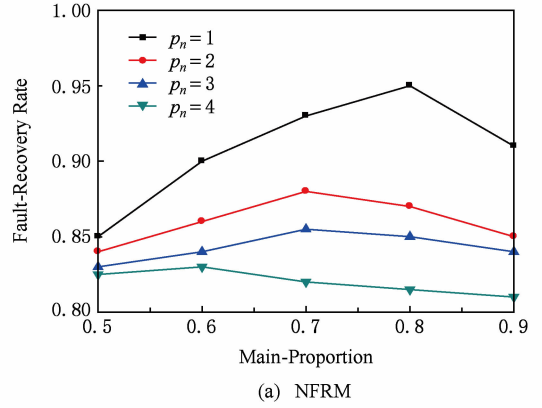


Fig. 10 The impact of different link resource main-proportion on NFRM/LFRD

图 10 不同链路资源主用比例对 NFRM/LFRD 的影响

5 结束语

本文主要围绕 NFV 环境下 SSC 故障恢复问题展开讨论,在已有无故障恢复服务链构建方法基础之上,创新性地提出了一种 SSC 故障的备份恢复机制.针对物理节点故障和物理链路故障 2 种不同的情形,通过预留备用资源和构造初始化候选集合来提高故障发生时 SSC 的恢复能力,分别设计改进的 DPSO 算法和动态路径分割算法求解此问题.实验表明,本文方法可在不同物理网络环境下和不同故障模型下有效提高安全服务请求的故障修复率,增强 SSC 的生存抗毁性.

未来工作主要从以下 3 个方面展开:1)求解 MIP 的动态路径分割算法只适用于中小规模物理网络,当面临大规模物理网络时,为保证故障恢复的时效性,应设计高效的启发式算法近似求解;2)收集 SSC 故障历史数据并进行统计分析,设计更具有针对性的故障恢复方案;3)进一步试验探索主用比例对本文方法的影响,形式化定义并寻求最优解.

参 考 文 献

- [1] Paul S, Pan J L, Jain R. Architectures for the future networks and next generation Internet: A survey [J]. *Computer Communications*, 2011, 34(1): 2-42
- [2] Quinn P, Guichard J, Yadav N. Network Service Chaining Problem Statement, RFC 7498 [S]. Fremont, CA: IETF, 2015
- [3] Huang Tao, Liu Jiang, Huo Ru, et al. Survey of research on future network architectures [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(8): 184-197 (in Chinese)
(黄韬, 刘江, 霍如, 等. 未来网络体系架构研究综述[J]. *通信学报*, 2014, 35(8): 184-197)
- [4] Lantz B, Heller B, Mckeown N. A network in a laptop: Rapid prototyping for software-defined networks [C] //Proc of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics. New York: ACM, 2010: 1-6
- [5] Chiosi M, Clarke D, Willis P, et al. Network functions virtualization-introductory white paper [OL]. [2017-06-22]. <https://portal.etsi.org/nfv/nfv-whitepaper.pdf>
- [6] Jeff W. Delivering Security Virtually Everywhere with SDN and NFV: IHS INFONETICS White Paper [OL]. [2017-04-28]. <http://www.juniper.net/assets/fr/fr/local/pdf/analyst-reports/2000602-en.pdf>
- [7] Lee W, Choi Y H, Kim N. Study on virtual service chain for secure software-defined networking [OL]. [2017-11-12]. http://onlinepresent.org/proceedings/vol29_2013/36.pdf
- [8] Shin S, Porras P, Yegneswaran V, et al. FRESCO: Modular composable security services for software-defined networks [C] //Proc of the 20th Annual Network and Distributed System Security Symp. San Diego: Internet Society, 2013: 32-48
- [9] Ocampo A F, Gil-Herrera J, Isolani P H, et al. Optimal service function chain composition in network functions virtualization [C] //Proc of the 11th Int Conf on Autonomous Infrastructure, Management and Security. Berlin: Springer, 2017: 62-76
- [10] Gill P, Jain N, Nagappan N. Understanding network failures in data centers: Measurement, analysis, and implications [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(4): 350-361
- [11] Hwang J, Ramakrishnan K K, Wood T. NetVM: High performance and flexible networking using virtualization on commodity platforms [J]. *IEEE Trans on Network and Service Management*, 2015, 12(1): 34-47
- [12] Martins J, Ahmed M, Raiciu C, et al. Enabling fast, dynamic network processing with clickOS [C] //Proc of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. New York: ACM, 2013: 67-72
- [13] Zhang Wei, Liu Guyue, Zhang Wenhui, et al. OpenNetVM: A platform for high performance network service chains [C] //Proc of the 2016 Workshop on Hot Topics in Middleboxes and Network Function Virtualization. New York: ACM, 2016: 26-31
- [14] Dwaraki A, Wolf T. Adaptive service-chain routing for virtual network functions in software-defined networks [C] //Proc of the 2016 Workshop on Hot Topics in Middleboxes and Network Function Virtualization. New York: ACM, 2016: 32-37
- [15] Xiong Gang, Hu Yuxiang, Lan Julong, et al. A mechanism for configurable network service chaining and its implementation [J]. *KSII Trans on Internet & Information Systems*, 2016, 10(8): 3701-3727
- [16] 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] //Proc of the 12th Int Symp on Integrated Network Management. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 98-106
- [17] Riera J F, Hesselbach X, Escalona E, et al. On the complex scheduling formulation of virtual network functions over optical networks [C] //Proc of Int Conf on Transparent Optical Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-5
- [18] Jordi F R, Eduard E, Josep B, et al. Virtual network function scheduling: Concept and challenges [C] //Proc of the 2nd Int Conf on Smart Communications in Network Technologies. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-5
- [19] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, et al. Design and evaluation of algorithms for mapping and scheduling of virtual network functions [C] //Proc of the 2015 Int Conf on Network Softwarization. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1-9
- [20] Nguyen V C, Kim Y H. A failover mechanism for service function chain [C] //Proc of the 2017 Symp of the Korean Institute of Communications and Information Sciences. Seoul, Korean: SoongSil University Press, 2017: 1145-1146
- [21] Suh D, Baek H, Jang S, et al. Distributed service function failover mechanism in service function chaining [C] //Proc of the 2017 Int Conf on Information Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 148-150
- [22] Lee S I, Shin M K. A self-recovery scheme for service function chaining [C] //Proc of the 2015 Int Conf on Information and Communication Technology Convergence. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 108-112
- [23] Sato Y. IEC/JIS standard-functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems [C] //Proc of the 1999 General Conf on Electronics, Information and Communication Engineers. London: Oxford University Press, 1999: 567-568
- [24] Xiao Ailing, Wang Ying, Meng Luoming, et al. Virtual network embedding approach to survive multiple node failures [J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(4): 81-88 (in Chinese)
(肖蔼玲, 王颖, 孟洛明, 等. 面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法[J]. *通信学报*, 2015, 36(4): 81-88)

[25] Zheng Jinhua, Jiang Hao, Kuang Da, et al. An approach of constructing multi-objective Pareto optimal solutions using arena's principle [J]. Journal of Software, 2007, 18(6): 1287-1297 (in Chinese)
(郑金华, 蒋浩, 邝达, 等. 用擂台赛法则构造多目标 Pareto 最优解集的方法[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1287-1297)

[26] Zhang Changsheng, Sun Jigui, OuYang Dantong. A self-adaptive discrete particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 299-304 (in Chinese)
(张长胜, 孙吉贵, 欧阳丹彤. 一种自适应离散粒子群算法及其应用研究[J]. 电子学报, 2009, 37(2): 299-304)

[27] Hu Wang, Yen G G, Zhang Xin. Multi-objective particle swarm optimization based on Pareto entropy [J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1025-1050 (in Chinese)
(胡旺, Yen G G, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1025-1050)

[28] Calvert K L, Doar M B, Zegura E W. Modeling Internet topology [J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(6): 160-163



Huang Rui, born in 1993. Master candidate. Her main research interests include software defined network and network function virtualization.



Zhang Hongqi, born in 1962. PhD, professor. His main research interests include network security and classification protection (zhq37922@126.com).



Chang Dexian, born in 1977. PhD, associate professor. His main research interests include SDN security and trusted computing (changdexian@126.com).