

文章编号:1007-5321(2024)01-0072-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2022-283

# 多域网络中单节点失效的虚拟网络恢复策略

凌 申, 武穆清, 赵 敏  
(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 目前针对节点失效的虚拟网络恢复问题研究都是针对单域物理网络,而现实网络都是多域分布的。因此,提出了针对多域网络中的单节点失效(SNFMDN)问题的虚拟网络恢复策略。以最大化恢复率和最小化恢复成本为目标,建立了 SNFMDN 问题的整数规划模型;为快速求解该问题,提出了 2 种基于带宽消耗的虚拟网络恢复算法。实验结果表明,所提出的恢复策略可以有效地恢复受影响的虚拟网络,且恢复成本也相对较低。

**关键词:** 网络虚拟化; 多域网络; 虚拟网络恢复; 节点失效; 虚拟网络映射

中图分类号: TP393

文献标志码: A

## Virtual Network Recovery Strategy for Single Node Failure in Multi-Domain Networks

LING Shen, WU Muqing, ZHAO Min

(School of Information and Communications Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Most existing research on virtual network recovery for node failure is focused on single-domain underlying network, while the real network is multi-domain distributed. Therefore, a virtual network recovery strategy is proposed for single node failure in multi-domain networks (SNFMDN). In order to maximize the recovery rate and minimize the recovery cost, an integer programming model of the SNFMDN problem is established. This optimization problem cannot be solved quickly. Besides, two virtual network recovery algorithms based on bandwidth consumption are proposed to solve the SNFMDN problem. The experimental results show that the proposed recovery strategy can effectively recover the affected virtual network, and the recovery cost is relatively low.

**Key words:** network virtualization; multi-domain network; virtual network recovery; node failure; virtual network embedding

黑客攻击或者硬件故障,可能会导致物理网络链路或者节点失效。由于网络虚拟化的共享性质<sup>[1]</sup>,即使单个节点或链路失效也会影响多个虚拟网络服务,从而破坏服务供应商与用户之间签署的服务保证协议。如果没有采取相应的补救措施,电信服务提供商将不得不赔偿相应的经济损失<sup>[2]</sup>。

为了应对物理节点失效问题,研究人员提出了 2 种应对策略。

第一种策略是可生存性虚拟网络映射策略,该策略在虚拟网络映射(VNE, virtual network embedding)阶段主动预留备份资源,当物理网络出现失效问题,系统立即启用备份资源来快速恢复虚

收稿日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61872401)

作者简介: 凌 申(1987—),男,博士生。

通信作者: 武穆清(1963—),男,教授,博士生导师,邮箱: wumuqing@bupt.edu.cn。

拟网络服务。Chowdhury 等<sup>[2]</sup>提出了 1 + 1 备份保护的可靠生存虚拟网络映射算法,该算法给虚拟网络同时分配主份和备份资源。为了防止主份和备份资源同时损坏,该算法保证主份和备份资源不相交。Liu 等<sup>[3]</sup>提出了一种备用虚拟路由器进行优化选择策略,以便恢复受影响的虚拟网络。He 等<sup>[4]</sup>提出了一个虚拟网络备份资源分配模型,该模型针对多个节点失效提供概率保护,以最小化所需的备份资源。Shahriar 等<sup>[5]</sup>研究了多个物理链路失效下的可靠生存虚拟网络映射,该策略使用备份方法来应对多个物理链路的失效。此外,Shahriar 等<sup>[6]</sup>还讨论了连接感知虚拟网络映射方法,该方法可以确保虚拟网络连接免受多个物理链路失效的影响。Ayoubi 等<sup>[7]</sup>通过备份共享来取代专门的备份方案,在保证虚拟网络生存性的同时,有效地减少了备份资源。Xiao 等<sup>[8]</sup>提出了一种拓扑感知的可靠生存虚拟网络映射方法,来应对多个物理节点失效的问题。

第二种策略是物理网络发生失效后,系统重新映射受影响的虚拟网络,即虚拟网络恢复策略。Bao等<sup>[9]</sup>提出了一种基于预警时间的虚拟网络实时疏散策略,应对大规模自然灾害(如地震、海啸、飓风等)期间一些物理节点可能会受到影响或破坏的场景,该策略可以在预警时间内疏散尽可能多的虚拟网络,以此减小自然灾害对服务的影响。Shahriar等<sup>[10]</sup>设计了一种虚拟网络恢复策略用于应对物理网络的单节点失效问题,该策略目的是最大化恢复率和最小化恢复成本;基于该策略,Shahriar等<sup>[11]</sup>还提出了2种恢复模型,即基于公平恢复模型和基于优先级的恢复模型。

备份策略的资源大部分时间处于闲置状态,只有在节点失效后才会启用,而恢复策略则更加灵活。但目前针对节点失效的虚拟网络恢复问题研究都是针对单域物理网络,而真实的物理网络是多地域分布的<sup>[1]</sup>。基于此,提出了针对多域网络中的单节点失效(SNFMDN, single node failure in multi-domain network)问题的虚拟网络恢复策略。

## 1 网络模型

物理网络可以使用加权无向图的形式表示为  $G_s = (N_s, L_s)$ , 其中  $N_s$  为物理节点集合,  $L_s$  为物理链路集合; 节点属性考虑计算和存储能力, 链路属性考虑带宽。多域网络  $G_s$  由多个不同电信运营商管理的自治域组成, 各域之间通过域间链路连接。域间

链路也称为骨干链路,其带宽资源比域内链路大很多<sup>[1]</sup>。第  $h$  个域的网络表示为  $G_{s,h} = (N_{s,h}, L_{s,h})$ ;其中  $N_{s,h}$  为第  $h$  个域的节点集合,  $L_{s,h}$  为第  $h$  个域的链路集合。将虚拟网络请求建模为加权无向图  $G_v = (N_v, L_v)$ ;其中,  $N_v$  为虚拟节点集合,  $L_v$  为虚拟链路集合。虚拟节点属性包括计算能力需求,虚拟链路考虑带宽需求。图 1 所示为多域虚拟网络请求的可行解,其中下半部分为一个多域物理网络,上半部分为 2 个虚拟网络请求;虚拟网络 1 中节点  $a, b$  和  $c$  分别映射至物理节点  $H, L$  和  $I$ , 链路  $l_{ac}$  和  $l_{cb}$  分别映射至物理链路  $l_{HI}$  和  $l_{LI}$ ;虚拟网络 2 中节点  $d$  和  $e$  分别映射至物理节点  $I$  和  $A$ , 链路  $l_{de}$  映射至物理链路  $l_{ILKA}$ 。

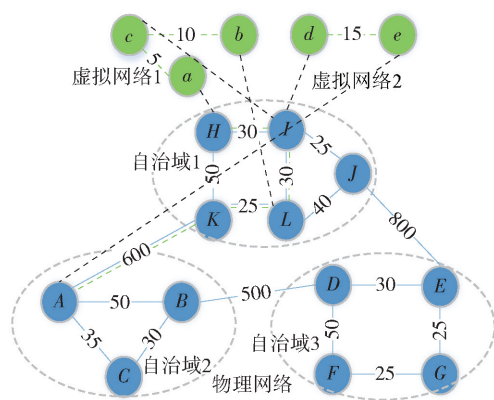


图 1 多域映射

当一个物理节点发生失效,则连接该节点的所有链路也会失效,使用扩展图  $G'_s = (N'_s, L'_s)$  来表示节点失效后的物理网络。假设图 1 中物理节点  $L$  失效,失效后的多域物理网络如图 2 所示。节点失效会导致多个虚拟网络受影响;使用  $G'_v = (N'_v, L'_v)$  表示所有受影响虚拟网络集合,其中  $N'_v$  为受影响的虚拟节点集合,  $L'_v$  为受影响的虚拟链路集合;将第  $k$  个受影响虚拟网络的损坏部分表示为  $G'_{v,k} = (N'_{v,k}, L'_{v,k})$ ;其中,  $N'_{v,k}$  为受影响的虚拟节点,值得注意的是,在单节点失效问题中,  $N'_{v,k}$  最多包含一个虚拟节

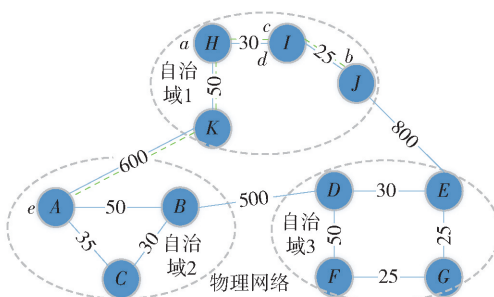


图2 单节点失效的多域物理网络及虚拟网络恢复

点;  $L'_{v,k}$  为受影响的虚拟链路集合。图 1 中的物理节点  $L$  失效后, 虚拟网络 1 的受影响部分包括虚拟节点  $b$  和虚拟链路  $l_{cb}$ ; 虚拟网络 2 中只有虚拟链路  $l_{de}$  受到影响。图 2 还显示了虚拟网络恢复方案, 虚拟网络 1 中的节点  $b$  重新映射至物理节点  $J$ , 虚拟链路  $l_{cb}$  重新映射至物理链路  $l_{IJ}$ ; 虚拟网络 2 的虚拟链路  $l_{de}$  重新映射至物理链路  $l_{IHKA}$ 。

## 2 SNFMDN 问题的整数规划模型

本节建立了 SNFMDN 问题的整数规划模型, 为了表达方便, 定义了 2 个二进制变量:

$f_{IJ}^{uw}$ : 当物理链路  $l_{IJ}$  容纳了虚拟链路  $l_{uw}$  时,  $f_{IJ}^{uw}$  取值为 1; 否则,  $f_{IJ}^{uw}$  取值为 0。

$x_I^u$ : 当  $N'_{v,k}$  为空集, 即虚拟网络受影响部分不包含节点  $u$  时,  $x_I^u$  取值为 1。当  $N'_{v,k}$  不为空集, 若虚拟节点  $u$  重新映射至物理节点  $I$  中, 则  $x_I^u$  取值为 1; 否则,  $x_I^u$  取值为 0。

优化主要目标为最大化虚拟网络恢复数量, 恢复成功的虚拟网络数量为

$$S_{\text{num}} = \sum_k \prod_{(I,J) \in G'_s, l_{uw} \in L'_{v,k}, u \in N'_{v,k}} f_{IJ}^{uw} x_I^u \quad (1)$$

次要目标为最小化恢复成本。第  $k$  个受影响虚拟网络的恢复成本为

$$R_{\text{vn}}(G'_{v,k}) = \sum_{u \in N'_{v,k}, M(u)=I} R_c(I)(C(u) + S(u)) + \sum_{l_v \in L'_{v,k}, M(l_v)=l_s} R_c(l_s)B(l_v) \quad (2)$$

其中:  $C(u)$  和  $S(u)$  分别为虚拟节点  $u$  计算和存储资源需求,  $B(l_v)$  为虚拟链路  $l_v$  的带宽资源需求,  $M(u)=I$  表示虚拟节点  $u$  映射至物理节点  $I$ ,  $M(l_v)=l_s$  表示虚拟链路  $l_v$  映射至物理链路  $l_s$ ,  $R_c(I)$  为节点  $I$  的资源单价,  $R_c(l_s)$  为链路  $l_s$  的资源单价。

综合主要目标和次要目标, 目标函数可定义为

$$\max \left( S_{\text{num}} - \alpha \sum_k R_{\text{vn}}(G'_{v,k}) \right) \quad (3)$$

受影响的网络切片之间相互独立, 恢复  $\forall G'_{v,k} \in G'_v$  需要遵循以下约束条件。

$$x_I^u C(u) \leq C(I), \forall I \in N'_s, \forall u \in N'_{v,k} \quad (4)$$

$$x_I^u S(u) \leq S(I), \forall I \in N'_s, \forall u \in N'_{v,k} \quad (5)$$

$$f_{IJ}^{uw} B(l_{uw}) \leq B(l_{IJ}), \forall l_{IJ} \in L'_s, \forall l_{u,w} \in L'_{v,k} \quad (6)$$

$$\sum_{(I,J) \in L'_s} f_{IJ}^{uw} - \sum_{(J,I) \in L'_s} f_{JI}^{uw} =$$

$$\begin{cases} 1, & x_I^u = 1 \\ -1, & x_I^u = 1, \forall I \in N'_s, \forall l_{u,w} \in L'_{v,k} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{u \in N'_{v,k}} x_I^u \leq 1, \forall I \in N'_s \quad (8)$$

$$\sum_{I \in N'_s} x_I^u = 1, \forall u \in N'_{v,k} \quad (9)$$

$$x_I^u \in \{0, 1\}, \forall I \in N'_s, \forall u \in N'_{v,k} \quad (10)$$

$$f_{IJ}^{uw} \in \{0, 1\}, \forall l_{IJ} \in L'_s, \forall l_{u,w} \in L'_{v,k} \quad (11)$$

其中:  $\alpha$  为权重系数, 其取值应保证式 (3) 中  $\alpha \sum_k R_{\text{vn}}(G'_{v,k})$  的值不超过 1, 从而不影响优化目标的主次性;  $C(I)$  和  $S(I)$  分别为物理节点  $I$  的计算和存储资源能力;  $B(l_s)$  为物理链路  $l_s$  的带宽资源能力。式 (4) ~ 式 (6) 为资源约束条件, 式 (7) 为连接性约束条件, 式 (8) 为一个物理节点最多承载一个虚拟网络中的一个虚拟节点, 式 (9) 为一个虚拟节点只能映射一次, 式 (10) ~ 式 (11) 为二进制变量的适用范围。

## 3 启发式算法

由于无法快速地求解式 (3), 所以提出了 2 种基于节点排序的启发式算法来求解该 SNFMDN 问题。

### 3.1 排序策略

#### 1) 虚拟网络排序策略

物理网络带宽资源有限, 可能无法恢复所有虚拟网络。由于大多数映射失败是由带宽资源不足引起的<sup>[12]</sup>, 优先恢复低带宽消耗的虚拟网络, 可以恢复更多的虚拟网络。恢复虚拟网络的带宽消耗为

$$B(G'_{v,k}) = \sum_{l_v \in L'_{v,k}} B(l_v) \quad (12)$$

#### 2) 物理节点排序策略

恢复虚拟节点  $u$  时, 将节点预映射至物理节点  $I$ , 估算的带宽资源消耗量为

$$B_{\text{bcb}}(I) = \sum_{v \in N_v} D_{\text{hop}}(I, J) B(l_{uv}), M(v) = J \quad (13)$$

其中:  $D_{\text{hop}}(I, J)$  为节点  $I$  和  $J$  之间最短路径的跳数,  $w$  为与  $u$  属于同一虚拟网络的其他虚拟节点,  $M(v)=J$  表示虚拟节点  $v$  映射至物理节点  $J$ 。

带宽消耗相等的情况下, 优先选择成本较低的节点和链路。因此, 定义了物理节点  $I$  预映射第  $k$  个虚拟网络的总成本为

$$R_{\text{PC}}(I) = B_{\text{bcb}}(I) + \alpha R_{\text{vn}}(G'_{v,k}) \quad (14)$$

### 3.2 带宽消耗估算虚拟网络恢复算法

为了求解 SNFMDN 问题, 提出了带宽消耗估算虚拟网络恢复 (BCEVNR, bandwidth consumption

estimation virtual network recovery) 算法, 伪代码如下。

### 算法 1 BCEVNR 算法

输入:  $G_s, G_v$ , 失效节点

输出: 虚拟节点恢复结果

```

1 获得扩展图  $G'_s$ ;
2 根据  $B(G'_{v,k})$  的值, 升序排列虚拟网络;
3 for all 受影响的虚拟网络 do
4   if  $\exists u \in N_v$  then
5     根据  $R_{PC}$  值对物理节点排序;
6     for all 符合条件的物理节点 do
7       选择合适的物理节点作为目标节点;
8     end for
9   end if
10 恢复不含节点的虚拟网络;
11 end for

```

该算法提前计算所有扩展图的  $D_{hop}$ , 失效发生后系统直接调用失效节点对应扩展图的  $D_{hop}$ 。系统首先根据失效节点获得相应的扩展图  $G'_s$ , 然后根据式(12)计算出虚拟网络的带宽资源  $B(G'_{v,k})$  值, 并根据  $B(G'_{v,k})$  升序排列受影响的虚拟网络。如果受影响的虚拟网络包含虚拟节点, 则首先进行虚拟节点恢复, 算法的步骤 4 ~ 9 是虚拟节点恢复阶段; 若虚拟节点恢复成功, 则执行虚拟链路恢复。如果受影响的虚拟网络不包含虚拟节点, 则直接恢复受影响的虚拟链路。虚拟网络所有受影响部分均恢复成功, 则认为该虚拟网络恢复成功。

### 3.3 带宽消耗精算虚拟网络恢复算法

根据  $D_{hop}$  的获取方式不同, 提出了带宽消耗精算虚拟网络恢复 (BCAVNR, bandwidth consumption actuarial virtual network recovery) 算法, 伪代码如下。

### 算法 2 BCAVNR 算法

输入:  $G_s, G_v$ , 失效节点

输出: 虚拟节点恢复结果

```

1 获得扩展图  $G'_s$ ;
2 根据式(12)计算  $B(G'_{v,k})$  值, 升序排列虚拟网络;
3 for all 受影响的虚拟网络 do
4   if  $\exists u \in N_v$  then
5     删除所有不满足条件的物理节点;
6     for all 符合条件的物理节点  $I$  do
7        $B'(l_s) \leftarrow B(l_s), l_s \in L'_s$ ;
8       for all 承载其他节点  $v$  的物理节点  $J$  do
9         使用最短路径算法计算  $D_{hop}(I, J)$ , 更新

```

```

 $B'(l_s)$ ;
10    end for
11    记录预映射信息;
12    得到  $B_{beb}(I)$ ;
13  end for
14  计算  $R_{PC}$ , 并选择  $R_{PC}$  最小节点为目的节点;
15 end if
16 恢复不含节点的虚拟网络;
17 end for

```

该算法首先根据失效的节点, 获得相应的扩展图  $G'_s$ , 然后, 根据式(12)升序排列虚拟网络, 逐个恢复虚拟网络。为了降低运行时间, 删除不符合资源约束条件的物理节点和链路。程序将虚拟节点预映射至所有物理节点上, 计算带宽消耗以及记录预映射相关信息(步骤 6 ~ 14); 其中步骤 8 ~ 12 精确计算带宽消耗, 计算所有节点对应的  $B_{beb}(I)$ , 选择带宽消耗最小的物理节点作为目的节点。当虚拟节点恢复成功, 程序会根据之前记录的预映射信息, 完成虚拟链路恢复。如果受影响的虚拟网络不包含虚拟节点, 则该算法直接执行虚拟链路恢复。

### 3.4 复杂度分析

BCEVNR 算法中, 节点恢复的时间复杂度为  $O(|N_s|)$ , 链路恢复的时间复杂度为  $O(|N_s|^2 |L'_v|)$ ; 因此, BCEVNR 算法总时间复杂度为  $O(|N_s|^2 |G'_v| |L'_v|)$ , 其中,  $|N_s|$  为物理节点数量,  $|L'_v|$  为一个受影响虚拟网络中需要恢复的虚拟链路数量,  $|G'_v|$  为因节点故障而受到影响的虚拟网络数量。BCAVNR 算法中, 节点恢复的时间复杂度为  $O(|N_s|^3 |N_v|)$ ,  $|N_v|$  为一个虚拟网络请求中的虚拟节点数量, 链路恢复时间复杂度为  $O(|N_s|^2 |L'_v|)$ ; 因此, BCAVNR 算法总时间复杂度为  $O(|N_s|^3 |N_v| |G'_v| + |N_s|^2 |L'_v| |G'_v|)$ 。

## 4 仿真实验与结果分析

### 4.1 参数设置

与文献[13]一样, 使用 Salam 网络拓扑随机生成算法生成网络拓扑, 并使用 Matlab2022b 运行各算法。在文献[1]的基础上对多域物理网络参数进行了改动, 如表 1 所示, 虚拟网络拓扑参数如表 2 所示。此外, 设置权重系数  $\alpha$  的值为 0.000 01。

采用文献[14]贪婪虚拟网络映射 (G-VNE, greedy virtual network embedding) 算法运行程序一段时间后, 随机产生一个失效的节点, 由此产生多域网络环境中单个节点失效场景。系统运行虚拟网络恢



复算法,恢复受影响的虚拟网络。选择 G-VNE 算法和资源消耗率虚拟网络映射 (RCR-VNE, resource consumption ratio virtual network embedding) 算法<sup>[15]</sup>作为对比算法,与所提的 BCEVNR 和 BCAVNR 算法进行虚拟网络恢复的对比。为了适用于上述实验环境,对对比算法进行了部分改动。

表 1 物理网络参数设置	
物理网络参数	取值
区域边长(域内)	1 000
短边比长边(域内)	$10^{10}$
边密度(域内)	1.5
域数量	3
每个域中节点数量	30
节点计算能力/Hz	$U[100,200]$
域内链路带宽/(kbit·s <sup>-1</sup> )	$U[100,200]$
域间链路带宽/(kbit·s <sup>-1</sup> )	$U[500,1\,000]$
节点资源单价/元	$U[1,10]$
域内带宽资源单价/元	$U[1,10]$
域间带宽资源单价/元	$U[10,20]$
连接每个域的域间链路数量	5
每个域节点的域间链路数量	1
每个域的域节点数	5

表 2 虚拟网络参数设置	
虚拟网络参数	取值
区域边长	$10^3$
短边比长边	$10^{10}$
边密度	20
100 个时间单位虚拟网络到达数	20
节点数量	$U[5,8]$
节点计算能力要求/Hz	$U[5,15]$
链路带宽资源/(kbit·s <sup>-1</sup> )	$U[5,15]$

4.2 仿真结果

基于上述设置的实验环境运行各恢复算法,以恢复率、恢复成本和恢复时间为指标评判实验结果。恢复率为成功恢复虚拟网络数量与受影响虚拟网络总数的比值。图 3 所示为各算法的虚拟网络恢复率。可见,所有算法的曲线随着初始带宽利用率的增加而降低,这种降低说明随着网络剩余带宽资源的减少,没有足够的带宽资源来恢复更多的虚拟网络。所提的 2 种算法性能优于另外 2 种算法,这是由于所提的 2 种算法将虚拟节点映射至跳数更小

的物理节点,节省了带宽资源。BCAVNR 算法比 BCEVNR 算法的恢复率更高,是因为 BCAVNR 算法采用遍历策略计算带宽消耗,而 BCEVNR 算法采用预先计算的  $D_{hop}$ ,精度相对较低。

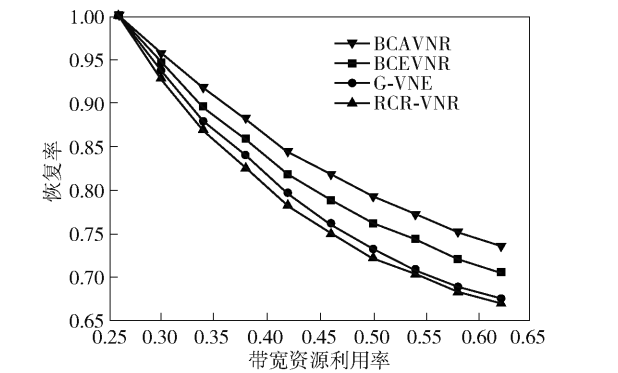


图 3 各算法的虚拟网络恢复率

图 4 所示为 4 种算法恢复一个虚拟网络所需成本。可见,恢复成本随着带宽利用率的增加而降低,这是由于所提算法根据恢复带宽资源需求,升序排列虚拟网络,当带宽利用率较高时,剩余资源只能恢复排在序列靠前带宽资源要求较少的虚拟网络,从而使平均恢复成本较低。所提的 2 种算法恢复成本低于另外 2 种算法,这是由于所提算法选择跳数更少且成本更低的路径。BCAVNR 算法比 BCEVNR 算法的成本更低,是因其选择了跳数更小的带宽资源恢复虚拟链路。

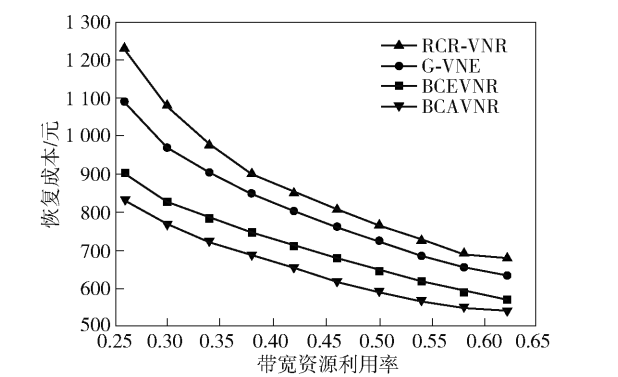


图 4 各算法的虚拟网络恢复成本

图 5 所示为各算法恢复一个虚拟网络的平均时间。可见,BCEVNR 算法与另外 2 种对比算法的执行时间差距不大,而 BCAVNR 算法的执行时间比其他算法长很多,这是由于 BCAVNR 算法需要更长的时间来遍历所有物理节点的最短路径。综上所述,BCAVNR 算法在恢复率和恢复成本方面优于 BCEVNR 算法,但 BCAVNR 算法需要更长

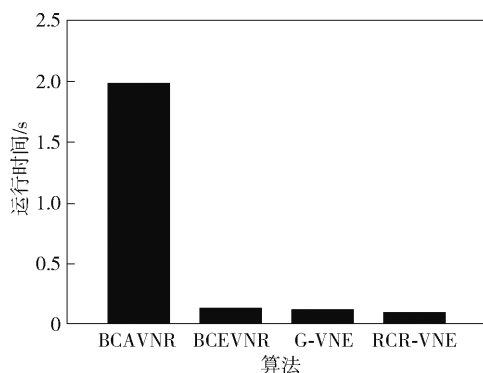


图 5 各算法的执行时间

的执行时间。综上,所提出的 2 种算法各有优劣。

## 5 结束语

针对 SNFMDN 问题,提出了一种虚拟网络恢复策略。以最大化虚拟网络恢复数量和最小化恢复成本为主要和次要目标,建立了 SNFMDN 问题的整数线性规划模型;为了快速求解该问题,提出了 2 种启发式算法。实验结果表明,所提出的恢复策略可以有效地恢复受影响的虚拟网络,且恢复成本也相对较低。

## 参考文献:

- [1] CAO H T, WU S C, HU Y, et al. An efficient energy cost and mapping revenue strategy for interdomain NFV-enabled networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 5723-5736.
- [2] CHOWDHURY S R, AHMED R, KHAN M M A, et al. Dedicated protection for survivable virtual network embedding[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(4): 913-926.
- [3] LIU X, MEDHI D. Optimally selecting standby virtual routers for node failures in a virtual network environment[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2017, 14(2): 275-288.
- [4] HE F J, OKI E. Backup allocation model with probabilistic protection for virtual networks against multiple facility node failures[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(3): 2943-2959.
- [5] SHAHRIAR N, CHOWDHURY S R, AHMED R, et al. Virtual network survivability through joint spare capacity

allocation and embedding[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(3): 502-518.

- [6] SHAHRIAR N, AHMED R, CHOWDHURY S R, et al. Virtual network embedding with guaranteed connectivity under multiple substrate link failures[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 1025-1043.
- [7] AYOUBI S, CHEN Y H, ASSI C. Towards promoting backup-sharing in survivable virtual network design[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(5): 3218-3231.
- [8] XIAO A L, WANG Y, MENG L M, et al. Topology-aware virtual network embedding to survive multiple node failures[C]//2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 1823-1828.
- [9] BAO N H, KUANG M, SAHOO S, et al. Early-warning-time-based virtual network live evacuation against disaster threats[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 2869-2876.
- [10] SHAHRIAR N, AHMED R, KHAN A, et al. ReNo-VatE: recovery from node failure in virtual network embedding[C]//2016 12th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 19-27.
- [11] SHAHRIAR N, AHMED R, CHOWDHURY S R, et al. Generalized recovery from node failure in virtual network embedding[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2017, 14(2): 261-274.
- [12] FAJJARI I, AITSAADI N, PUJOLLE G, et al. VNR algorithm: a greedy approach for virtual networks reconfigurations[C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [13] LING S, WU M Q, HOU X L. VNE-SDN algorithms for different physical network environments[J]. IEEE Access, 2020, 8: 178258-178268.
- [14] CHENG X, SU S, ZHANG Z B, et al. Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 38-47.
- [15] ZHANG P Y, YAO H P, LIU Y J. Virtual network embedding based on computing, network, and storage resource constraints[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(5): 3298-3304.