



面向多链路故障的生存性虚拟网络映射算法

朱国晖, 刘秀霞, 张 茵

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

摘 要: 针对物理网络发生多链路故障情况下的虚拟网络映射问题, 提出一种生存性虚拟网络映射算法。该算法为物理链路提供备份资源, 并采用多路径选择算法创建备份路由集合。根据目标函数求解整数线性规划, 从故障链路备份路由集中选择带宽资源平衡度最大的路径, 为受链路故障影响的虚拟链路进行重映射。仿真结果表明, 该算法可有效缩短故障恢复时延, 提高长期平均收益开销比与平均故障恢复率。

关键词: 生存性虚拟网络映射; 多链路故障; 链路重映射; 平均故障恢复率; 故障恢复时延

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 朱国晖, 刘秀霞, 张茵. 面向多链路故障的生存性虚拟网络映射算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(10): 182-187, 192.

英文引用格式: ZHU Guohui, LIU Xiuxia, ZHANG Yin. Survivable virtual network embedding algorithm for multiple link failures[J]. Computer Engineering, 2020, 46(10): 182-187, 192.

Survivable Virtual Network Embedding Algorithm for Multiple Link Failures

ZHU Guohui, LIU Xiuxia, ZHANG Yin

(School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

[Abstract] To address the Virtual Network Embedding (VNE) problem in the case of multiple link failures in physical networks, this paper proposes a Survivable Virtual Network Embedding (SVNE) algorithm. This algorithm provides backup resources for physical links and uses a multiple path selection algorithm to create a backup route set. According to the objective function, the integer linear programming is solved. The path with the largest bandwidth resource balance is selected from the backup route set of the failed link to implement re-embedding for the virtual links that are affected by the link failure. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively shorten the failure recovery delay, and improve the long-term average revenue-to-expense ratio and average failure recovery rate.

[Key words] Survivable Virtual Network Embedding (SVNE); multiple link failure; link re-embedding; average failure recovery rate; failure recovery delay

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055914

0 概述

随着互联网的快速发展, 网络僵化成为限制互联网架构创新与发展的关键因素, 而网络虚拟化的出现为解决网络僵化问题提供了有效途径^[1-2]。网络虚拟化解耦了网络服务提供与基础设施提供 2 个功能, 并允许多个异构虚拟网络 (Virtual Network, VN) 在同一个物理网络上共享资源^[3], 其核心问题是虚拟网络映射 (Virtual Network Embedding, VNE)^[4], 而 VNE 被证明是 NP-Hard^[5-6] 问题。多数 VNE 算法都是假设在不出现物理故障的情况下^[7] 提出的,

它们通过优化网络模型来提高资源利用率并增加收益。然而, 如果在 VNE 过程中出现设备故障、大规模灾害或恶意攻击等情况, 将会导致 VN 请求服务失败, 降低服务性能和可用性, 若服务中断, 则基础设施提供商 (Infrastructure Provider, InP) 必须支付服务等级协议 (Service Level Agreement, SLA) 中指定的罚款。因此, 需要对生存性虚拟网络映射 (Survivable Virtual Network Embedding, SVNE) 算法进行研究, 从而保证网络的正常运行。

学者们针对现有 SVNE 算法进行了研究, 如文献[8]提出数据中心链路发生故障的概率是节点发

基金项目: 国家自然科学基金 (61371087)。

作者简介: 朱国晖 (1969—), 男, 副教授、博士, 主研方向为移动互联网、对等网络、复杂网络路由算法; 刘秀霞、张茵, 硕士研究生。

收稿日期: 2019-09-04 **修回日期:** 2019-11-04 **E-mail:** 850897652@qq.com

生故障概率的10倍。对于物理链路故障,文献[9]提出一种主动链路备份生存性算法,该算法提前为虚拟链路分配好备份链路,当物理链路发生故障时将其切换至备份链路,该方法虽然提高了故障恢复率,但是过多的冗余备份会造成资源浪费。文献[10-12]提出一种被动恢复的生存性算法,该算法不预留备份资源,当链路发生故障时,利用剩余物理资源将受影响的虚拟链路进行链路重映射,该方法虽然避免了冗余备份资源的浪费,但是增加了故障恢复时延,且不能保证具有良好的故障恢复率。文献[13-15]研究了当发生单个故障时,采用链路重映射和路径分割的链路重映射方法进行故障恢复。文献[16]是在位置约束的条件下,对发生的链路故障进行重映射处理。因此,上述提出的SVNE算法均是在仅发生单一链路故障的情况下提出的。对于多链路故障,文献[17]从QoS角度提出了主动保护和被动恢复2种算法,但是这2种算法都没有考虑映射开销和物理资源碎片化问题。

针对以上问题,本文重点研究物理链路故障问题,并从多链路故障场景出发,提出一种面向多链路故障的生存性虚拟网络映射算法。利用多路径选择算法创建物理链路备份路由集,并根据目标函数求解整数线性规划,从故障链路备份路由集中选择带宽资源平衡度大的路径,为受链路故障影响的虚拟链路逐个进行重映射,从而减少物理资源碎片化概率,提高物理资源利用率。

1 网络模型建立

1.1 物理网络和虚拟网络模型

物理网络模型抽象为加权无向图,记为 $G_s = (N_s, L_s)$,其中, N_s 为物理节点集合, L_s 为物理链路集合,对物理节点 $n_s \in N_s$ 的节点需求用 $c(n_s)$ 表示,对物理链路 $l_s \in L_s$ 的带宽需求用 $b(l_s)$ 表示。在物理网络中,将物理资源分为主、备用资源,其中,主链路带宽资源为 $b_p(l_s) = \alpha b(l_s)$,备用链路带宽资源为 $b_b(l_s) = (1 - \alpha) b(l_s)$, α 为调节系数,用来调节主、备用带宽资源比例^[18]。

虚拟网络模型抽象为加权无向图,记为 $G_v = (N_v, L_v)$,其中, N_v 为虚拟节点集合, L_v 为虚拟链路集合,对虚拟节点 $n_v \in N_v$ 的节点需求用 $c(n_v)$ 表示,对虚拟链路 $l_v \in L_v$ 的带宽需求用 $b(l_v)$ 表示。

虚拟网络映射可分为2个阶段^[19]:

- 1) 节点映射, $M^N: (N_v, C_v^N) \rightarrow (N'_s, R_{Nsub}^S)$ 。
- 2) 链路映射, $M^L: (L_v, C_v^L) \rightarrow (L'_s, R_{Lsub}^L)$ 。

其中, $N'_s \in N_s$, $L'_s \in L_s$, C_v^N 和 C_v^L 分别表示虚拟节点 n_v

($n_v \in N_v$) 和虚拟链路 l_v ($l_v \in L_v$) 的约束条件, R_{Nsub}^S 和 R_{Lsub}^L 分别表示分配给虚拟网络的节点资源和链路资源。

虚拟网络映射示意图如图1所示。

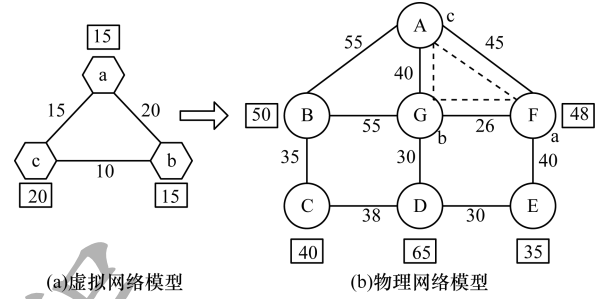


图1 虚拟网络映射示意图

Fig.1 Schematic diagram of virtual network embedding

1.2 评价指标

本文采用VN请求接受率、长期平均收益开销比与平均故障恢复率对实验结果进行评价。

1) VN请求接受率的计算方法如式(1)所示:

$$\text{Rec}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T N_m(t)}{\sum_{t=0}^T N(t) + \delta} \quad (1)$$

其中, $N_m(t)$ 是 t 从 $0 \sim T$ 时刻映射成功的集合, $N(t)$ 是所有到达VN请求的集合, δ 是趋于0的正数,用来保证分母不为0。

2) 对于虚拟请求 $G_v = (N_v, L_v)$, 定义在 t 时刻 G_v 的映射收益 $R(G_v, t)$ 为:

$$R(G_v, t) = \beta \sum_{n_v \in N_v} c(n_v) + \sum_{l_v \in L_v} b(l_v) \quad (2)$$

其中, β 是节点和链路的收益均衡因子,在本文中设置为1。

定义在 t 时刻 G_v 的映射开销 $C(G_v, t)$ 为:

$$C(G_v, t) = \gamma \sum_{n_v \in N_v} c(n_v) + \sum_{l_v \in L_v} \text{hop}(l_v) b(l_v) \quad (3)$$

其中, γ 是节点和链路的开销均衡因子,在本文中设置为1, $\text{hop}(l_v)$ 表示虚拟链路 l_v 映射到物理路径中的跳数。

定义长期平均收益开销比为:

$$R/C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{G_v \in N_m(t)} R(G_v, t)}{\sum_{t=0}^T \sum_{G_v \in N_m(t)} C(G_v, t)} \quad (4)$$

在VNE过程中,如果一条物理链路发生故障,并且故障恢复失败,则InP需要承担SLA中指定的罚款 $S(G_v)$ ^[20]:

$$S(G_v) = \omega R(G_v, t) \quad (5)$$

其中, ω 是惩罚因子,在本文中设置为2。

因此,将本文中的长期平均收益开销比重新定义为:

$$R'/C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{G_v \in N_m(t)} (R(G_v, t) - S(G_v))}{\sum_{t=0}^T \sum_{G_v \in N_m(t)} C(G_v, t)} \quad (6)$$

3) 平均故障恢复率的计算方法见式(7):

$$r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{l_v \in \text{Re}(l_v)} l_v}{\sum_{l_v \in F(l_v)} l_v} \quad (7)$$

其中, $F(l_v)$ 表示受物理链路故障影响而失效的虚拟链路总数, $\text{Re}(l_v)$ 表示受物理链路故障影响而失效, 但采用故障恢复算法恢复成功的虚拟链路数量。

2 多链路故障的生存性虚拟网络映射算法

2.1 备份路由集合构建

在虚拟请求到达之前, 采用路径选择算法为每个物理链路构建备份路由集, 缩短链路重映射时延。本文在最短路径算法^[20]的基础上, 提出一种多路径选择算法。它是在物理网络中构建多条可用路径集合的算法, 相比于最短路径算法, 该算法考虑了在规定路径跳数和链路映射过程中多种资源约束的问题, 通过搜索每条物理链路, 找到满足约束条件的多条路径并构成备份路由集合。

定义一个函数 $J(G_s, l, h') = \{m_x | \text{hop}(x) = h', h' \geq 2\}$, 则该函数表示与物理链路 l 具有相同的源、目的节点, 且与链路 l 不相交, 从源节点经过 h' 跳到目的节点的路径集合 m_x , 如图 2 所示, $J(G_s, AB, 2) = \{AFB, ACB\}$ 。定义一个函数 $\text{Cov}(G_s, l, h) = \bigcup_{h'=2}^h J(G_s, l, h')$, 该函数表示与链路 l 具有相同的源、目的节点, 且与链路 l 不相交, 在规定的 h 跳以内可以从源节点到达目的节点的所有路径集合, 如图 2 所示, $\text{Cov}(G_s, AB, 3) = \{AFB, ACF, AFEB\}$ 。

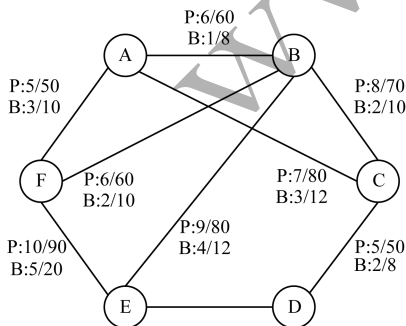


图 2 备份链路图

Fig. 2 Backup link diagram

对物理链路定义 2 个变量:

$$U(l) = \sum_{l_v \rightarrow l} [b_p(l_v) + b_b(l_v)], \forall l_v \in L_v, \forall l \in L_s \quad (8)$$

$$Q(x) = \min [b_b(l_s) - \sum_{l_v \rightarrow l_s} b_b(l_v)],$$

$$l_s \in x, x \in \text{Cov}(G_s, l, h) \quad (9)$$

其中, $l_v \rightarrow l$ 表示虚拟链路 l_v 映射到物理链路 l 上, $b_p(l_v)$ 和 $b_b(l_v)$ 分别表示在物理链路 l 上承载虚拟链路所需主用带宽和用于链路重映射的备用带宽, $U(l)$ 是两者之和, $Q(x)$ 表示在路径集合中每条路径可用于链路重映射的最小瓶颈带宽。

多路径选择算法的实现伪代码为:

输入 $G_s, h, h' = 2, 3, \dots, h$

输出 可用备份路径集合 $\text{pathlist}(l)$

1. 初始化, 最大跳数 $h = \text{max_hops}$, 跳数 $h' = 2$
2. for 每条物理链路 $l \in L_s$ do
3. 使用最短路径算法计算 $J(G_s, l, h')$, 将其结果存入集合 $\text{Cov}(G_s, l, h)$ 中
4. 跳数增加一跳, $h'++$
5. if 当前跳数大于规定跳数, 即 $h' > h$ then
6. return 得到 h 跳之内的所有链路集合 $\text{Cov}(G_s, l, h)$
7. else 转到步骤 2
8. end if
9. end for
10. for $\text{Cov}(G_s, l, h)$ do
11. 根据式(8)计算 $U(l)$
12. 根据式(9)计算 $\text{Cov}(G_s, l, h)$ 中每条路径的最小瓶颈带宽 $Q(x)$
13. if $U(l) \leq Q(x)$ then
14. 将该路径存入可用路径集合 $\text{pathlist}(l)$ 中
15. else $\text{pathlist}(l)$ 集合为空
16. end if
17. end for
18. return $\text{pathlist}(l)$

2.2 虚拟网络映射模型构建

本文将虚拟网络映射分为 2 个阶段进行, 重点关注链路映射, 将多链路故障建模为多条单一链路故障并进行逐一优化。在节点映射时, 采用文献[12]中的贪婪映射算法为虚拟节点选择资源最大的物理节点, 包括节点资源、链路带宽和节点映射中相邻链路的数量。虚拟链路映射采用整数线性规划模型, 具体过程如下:

1) 目标函数为最大化长期平均收益开销比, 表示为:

$$\max(R'/C) \quad (10)$$

2) 变量定义为:

$$y(l_{ab}, l_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{虚拟链路 } l_{ab} \in L_v \text{ 映射到物理链路 } l_{ij} \in L_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

3) 约束条件为:

$$\sum_{l_{ij} \in L_s} y(l_{ab}, l_{ij}) \geq 1, \forall l_{ab} \in L_v \quad (12)$$

$$\sum_{l_{ab} \in L_v} y(l_{ab}, l_{ij}) b(l_{ab}) \leq b'_p(l_{ij}), \forall l_{ij} \in L_s \quad (13)$$

其中,式(12)表示每条虚拟链路都映射到一个非零长度的物理路径上,式(13)表示映射虚拟链路的带宽需求要小于或等于物理链路的实时剩余主带宽, $b'_p(l_{ij})$ 表示链路 l_{ij} 的实时剩余主带宽资源。

当物理链路发生故障时,采用链路重映射算法,将受影响的虚拟链路重映射到故障链路的备份物理路径上。由于一条物理链路发生故障会造成多条虚拟链路失效,若虚拟链路恢复失败,VN 请求服务中断,InP 会承担 SLA 中规定的罚款。因此,优先重映射产生罚款较多的虚拟链路,减少 InP 的罚款,增加收益。

1) 目标函数为:

$$\min \sum_{t=0}^T \sum_{G_v \in N_m(t)} S(G_v) \quad (14)$$

2) 约束条件为:

$$\sum_{l_{ab} \in L_v} y(l_{ab}, l_{i'j'}) b(l_{ab}) \leq b'_b(l_{i'j'}), l_{i'j'} \in \text{pathlist}(l) \quad (15)$$

式(15)表示重映射虚拟链路的带宽需求小于或等于物理链路的实时剩余备份带宽,其中, $b'_b(l_{i'j'})$ 表示链路 $l_{i'j'}$ 的实时剩余备份带宽资源。

3) 定义带宽资源平衡度为^[11]:

$$D(p_k) = \frac{\min_{l_s \in p_k} b'_b(l_s)}{\max_{l_s \in p_k} b'_b(l_s)}, p_k \in \text{pathlist}(l) \quad (16)$$

其中, $\min_{l_s \in p_k} b'_b(l_s)$ 和 $\max_{l_s \in p_k} b'_b(l_s)$ 分别表示在物理路径 p_k 中,实时剩余备份带宽资源链路的最小值和最大值, p_k 是故障链路 l 的备份路由集中的任意一条路径。带宽资源平衡度是用来平衡物理链路中的带宽资源消耗,降低资源碎片化的可能性,且带宽资源平衡度越大,造成资源碎片化的可能性就越小,进而提高物理资源的利用率。

面向多链路故障恢复的虚拟网络映射算法伪代码为:

```

输入  输入  $G_s, G$ 
输出  Embedding( $G_v$ )
1. for  每个虚拟请求 do

```

```

2. for  虚拟请求的虚拟节点 do

```

```

3. 采用文献[12]中的贪婪算法进行节点映射

```

```

4. end for

```

```

5. if  在进行虚拟链路映射时,物理链路未发生故障
then

```

```

6. 根据本文虚拟链路映射算法,求解线性规划

```

```

7. end if

```

```

8. if  物理链路  $l$  发生故障 then

```

```

9. 统计受链路  $l$  影响的虚拟链路的集合,并将虚拟链路
带宽值进行降序排列,结果存入集合 VL 中

```

```

10. for  故障物理链路  $l$  do

```

```

11. 根据多路径选择算法计算链路  $l$  的备份路由集
pathlist( $l$ )

```

```

12. for pathlist( $l$ ) 集合中所有路径 do

```

```

13. 根据式(16)计算带宽资源平衡度

```

```

14. 根据式(14)求解线性规划,将 VL 集合中虚拟链路在
带宽资源平衡度最大的路径上,依次进行链路重映射

```

```

15. end for

```

```

16. end for

```

```

17. end if

```

```

18. end for

```

```

19. return

```

3 实验仿真

3.1 实验环境配置

本文通过 MATLAB 进行仿真实验评估。使用 GT-ITM^[21] 拓扑生成工具创建实验所需的虚拟网络和物理网络拓扑,具体参数如表 1 所示。物理链路故障的到达服从参数为 0.05 的泊松分布,候选集合跳数 h 为 4。每次实验运行 50 000 个时间单元,约有 5 000 个 VN 请求到达,每 2 000 个时间单元进行一次数据统计,取 10 次实验的平均值为最终结果。

表 1 实验参数配置
Table 1 Experimental parameters configuration

| 网络 拓扑 | 节点 个数 | 连通率 /% | 节点 容量 | 链路 带宽 | 到达 时间 | 生存 周期 |
|----------|--------------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 物理网络 | 100 | 50 | 50 ~ 100 | 50 ~ 100 | — | — |
| 虚拟 网络 | 3 ~ 10 均匀 分布 | 50 | 10 ~ 30 均匀 分布 | 30 ~ 50 均匀 分布 | 参数为 10 的泊松 分布 | 参数为 1 000 的 数分布 |

3.2 对比方案与性能选取

将本文提出的 M-SVNE 算法与文献[17]中的 P-SVNE 算法、文献[22]中的 N-SVNE 算法进行对比,从 VN 请求接受率、长期平均收益开销比、平均故障恢复率和平均故障恢复时延 4 个方面验证本文算法的性能,上述 3 种算法的具体描述如表 2 所示。

表 2 3 种 SVNE 算法描述
Table 2 Description of three SVNE algorithms

| 算法名称 | 算法描述 |
|--------|--|
| M-SVNE | 通过对物理网络剩余资源感知,灵活地为物理链路设置备份资源,使用多路径选择算法创建备份路由集,当链路发生故障时,从备份路由集中选择带宽资源平衡度较大的备份路径,优先重映射罚款较高的虚拟链路。 |
| P-SVNE | 该算法为每条物理链路创建备份路由集,当链路发生故障时,使用最短路径选择算法从备份路由集中任选一条路径,用于重映射受影响的虚拟链路。 |
| N-SVNE | 该算法无任何资源备份,当物理链路发生故障时,利用剩余物理资源重映射受影响的虚拟链路。 |

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 VN 请求接受率

3 种算法的 VN 请求接受率随时间的变化情况如图 3 所示。从图 3 可以看出,3 种算法的 VN 请求接受率均随着时间的推移呈现逐渐降低的趋势,当 VN 的到达与离开达到平衡时,VN 请求接受率趋于稳定。N-SVNE 算法的 VN 请求接受率最高,这是因为它使用被动恢复策略,无任何资源备份,具有充足的物理资源用于虚拟网络映射。而 M-SVNE 算法和 P-SVNE 算法虽然也使用了被动恢复策略,但是这 2 种算法都为物理链路预留了备份资源,VN 请求接受率相对 N-SVNE 算法较低。其中,M-SVNE 算法能够动态感知物理网络剩余资源,并根据链路发生故障的数量动态调整链路的主、备份资源比例,使得更多的物理资源用于 VNE,与 P-SVNE 算法相比,M-SVNE 算法的 VN 请求接受率较高。

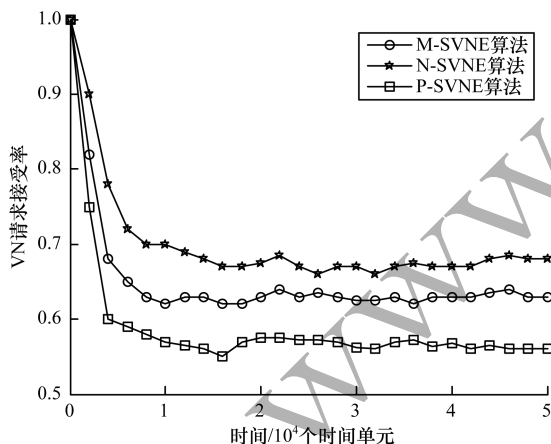


图 3 VN 请求接受率变化曲线

Fig. 3 Curves of VN request acceptance rate change

3.3.2 长期平均收益开销比

3 种算法在长期平均收益开销比方面的性能比较如图 4 所示。从图 4 可以看出,M-SVNE 算法的长期平均收益比最终稳定在 0.59 左右,高于其他 2 种算法。这是因为当物理链路发生故障时,

M-SVNE 算法优先使用带宽资源平衡度大的备份路径,重映射罚款高的虚拟链路,在减少资源碎片化,优化剩余备份资源的同时,减少了因故障恢复失败而导致的罚款,提高了长期平均收益开销比。

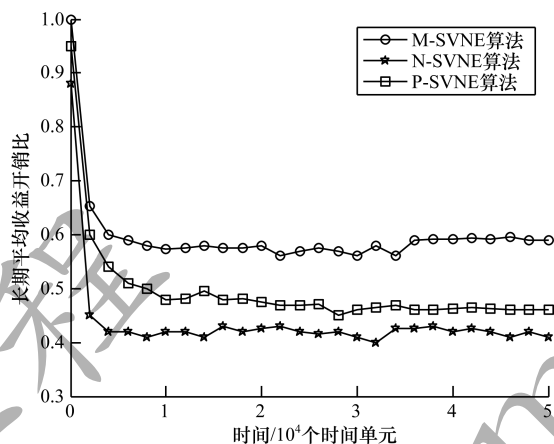


图 4 长期平均收益开销比变化曲线

Fig. 4 Curves of long-term average revenue-to-expense ratio change

3.3.3 平均故障恢复率

图 5 是 3 种算法的平均故障恢复率的性能比较。从图 5 可以看出,N-SVNE 算法的平均故障恢复率最低,因为它无任何备份资源,当发生链路故障时,使用剩余物理资源进行链路重映射,而当 VN 请求数量逐渐增多,导致没有足够的物理资源用于链路重映射,平均故障恢复率会较低。而其他 2 种算法为物理链路预留了备份资源,有更多的资源用于链路重映射,其中,M-SVNE 算法使用多路径选择算法创建备份路由集合,集合中的备份路径均满足资源约束条件,并且优先使用带宽资源平衡度大的备份路径,在减少资源碎片化,优化剩余备份资源的同时,提高了平均故障恢复率。

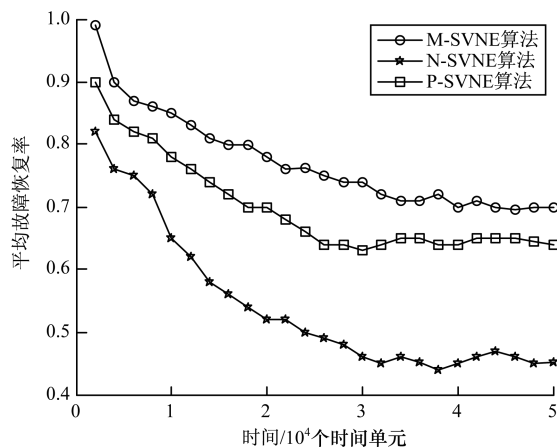


图 5 平均故障恢复率变化曲线

Fig. 5 Curves of average failure recovery rate change

3.3.4 平均故障恢复时延

图6是3种算法的平均故障恢复时延性能比较。从图6可以看出,N-SVNE算法的平均故障恢复时延最长,这是因为N-SVNE算法无任何备份,当链路发生故障时,根据剩余物理资源进行路由选择,实现链路重映射,花费时间较长。而M-SVNE算法和P-SVNE算法都为物理链路创建了备份路由集合,为链路重映射节省了时间。其中,M-SVNE算法使用带宽资源平衡度大的备份路径用于虚拟链路重映射,进一步缩短了路径选择的时间。因此,M-SVNE算法的平均故障恢复时延最短。

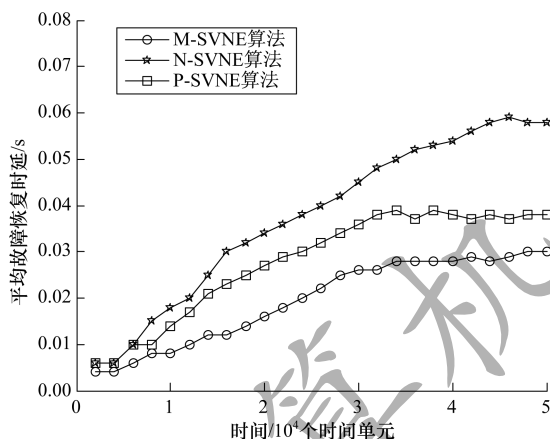


图6 平均故障恢复时延变化曲线

Fig.6 Curves of average failure recovery delay change

4 结束语

本文对在多链路故障场景下的生存性虚拟网络映射问题进行研究,提出一种面向多链路故障的生存性虚拟网络映射算法。通过使用多路径选择算法为物理链路创建备份路由集,并优先选择带宽资源平衡度大的路径用于链路重映射,降低了物理资源碎片化的可能性,且提升了物理资源利用率。仿真结果表明,该算法提高了长期平均收益开销比和平均故障恢复率,缩短了故障恢复时延。此外,本文仅涉及的是单域VNE,而当涉及多域VNE时将会产生域内和域间的链路故障问题。因此,探索多域链路故障的SVNE算法将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] SONG Xue. Research on resource allocation mechanism of network function virtualization [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
宋雪. 网络功能虚拟化的资源分配机制研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
- [2] GUO Kailing. Virtual network resource allocation method based on application layer demand [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
郭凯玲. 基于应用层需求的虚拟网络资源分配方法[D]. 北京:北京邮电大学, 2016.
- [3] GONG Shuiqing, CHEN Jing, WANG Wei. Energy-aware virtual network embedding algorithm for heterogeneous nodes [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(8): 2021-2027. (in Chinese)
龚水清, 陈靖, 王巍. 面向节点异构的能耗感知虚拟网络映射算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 2021-2027.
- [4] ZHOU Zibo. Research on virtual network mapping algorithm for Google cloud dataset [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
周子博. 面向谷歌云数据集的虚拟网络映射算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [5] ZHU Qiang, WANG Huiqiang, MA Chunguang, et al. Reliable heuristic mapping method for survivable virtual network [J]. Journal on Communications, 2015, 36(7): 109-119. (in Chinese)
朱强, 王慧强, 马春光, 等. 虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法[J]. 通信学报, 2015, 36(7): 109-119.
- [6] HUANG Liping, YANG Longxiang. A survey on survivable virtual network embedding algorithm [J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(7): 144-148. (in Chinese)
黄丽萍, 杨龙祥. 可生存性虚拟网络映射算法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(7): 144-148.
- [7] CHEN Zhenhua. Research on virtual network mapping model and optimization algorithm based on energy perception [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2016. (in Chinese)
陈振华. 基于能耗感知的虚拟网络映射模型与优化算法研究[D]. 济南:山东师范大学, 2016.
- [8] RAHMAN M R, AIB I, BOUTABA R. Survivable virtual network embedding [M]. Berlin, Germany: Springer, 2010: 40-52.
- [9] RAHMAN M R, BOUTABA R. SVNE: survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2): 105-118.
- [10] GUO Bingli, QIAO Chunming, WANG Jianping, et al. Survivable virtual network design and embedding to survive a facility node failure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 483-493.
- [11] SU Yuze, MENG Xiangru, KANG Qiaoyan, et al. Survivable virtual network link protection method based on network coding and protection circuit [J]. IEEE Access, 2018, 6: 67477-67493.
- [12] AI Jianjian, CHEN Hongchang, GUO Zehua, et al. Defending against link failure in virtual network embedding using a hybrid scheme [J]. China Communications, 2019, 16(1): 135-144.
- [13] XIAO Xiancui. Research on mapping model and algorithm of survivability virtual network [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2017. (in Chinese)
肖宪翠. 可生存性虚拟网络映射模型及算法研究[D]. 济南:山东师范大学, 2017.

(上接第 187 页)

- [14] WANG Zhiming, WU Jiangxing, WANG Yu, et al. Survivable virtual network mapping using optimal backup topology in virtualized SDN [J]. China Communications, 2014, 11(2): 26-37.
- [15] QIANG Zhu, QIANG Wanghui, SHENG Fengguang, et al. Heuristic survivable virtual network embedding based on node migration and link remapping [C]// Proceedings of the 7th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 181-185.
- [16] ZHANG S M, SANGAIAH A K. Reliable design for virtual network requests with location constraints in edge-of-things computing [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018: 1-10.
- [17] LIU Xiangru. Research on virtual network mapping strategy based on survivability [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
刘祥如. 基于可生存性的虚拟网络映射策略的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [18] LIU Xinbo, WANG Buhong, LIU Shuaiqi, et al. Heuristic algorithm for secure virtual network embedding [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(3): 676-681. (in Chinese)
刘新波, 王布宏, 刘帅琦, 等. 安全虚拟网络映射的启发式算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3): 676-681.
- [19] ZHU Guohui, KANG Xiaoxuan, LEI Lanjie. Virtual network mapping algorithm based on optimal subnet [J]. Computer Engineering, 2019, 45(10): 8-12. (in Chinese)
朱国晖, 康潇轩, 雷兰洁. 基于最优子网的虚拟网络映射算法 [J]. 计算机工程, 2019, 45(10): 8-12.
- [20] GAO Fei, CHEN Deli, HONG Jiajun, et al. Virtual network mapping mechanism based on k shortest path algorithm optimization and load balance [J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 146-154. (in Chinese)
高斐, 陈德礼, 洪家军, 等. 基于 k 最短路径算法优化与负载均衡的虚拟网络映射机制 [J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 146-154.
- [21] LU Meilian, GU Yun, LIU Tong. SDN-ScaSVNE: scalable survivable virtual network embedding algorithm in SDN [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(3): 75-80. (in Chinese)
卢美莲, 顾云, 刘通. SDN-ScaSVNE: 可伸缩的 SDN 生存性虚拟网络映射算法 [J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(3): 75-80.
- [22] LU Bo, HUANG Tao, SUN Xiaochuan, et al. Dynamic recovery for survivable virtual network embedding [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2014, 21(3): 77-84.

编辑 刘继娟