

## 面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法

肖蔼玲, 王颖, 孟洛明, 邱雪松, 李文璟

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 针对网络虚拟化环境中虚拟网络的生存性问题, 提出一种面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法。该方法预先在物理网络中按比例留出备份资源并根据拓扑属性构造节点的候选集合, 在发生节点故障后从故障节点的候选集合中选取重映射目标并动态分配预留的备用资源来恢复受到影响的虚拟网络, 提高长期运营利润。仿真实验在多节点故障模型下从适用性、稳定性及性能方面验证了该方法的有效性。

**关键词:** 网络虚拟化; 生存性虚拟网络映射; 多节点故障; 故障恢复; 虚拟网络重映射

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Virtual network embedding approach to survive multiple node failures

XIAO Ai-ling, WANG Ying, MENG Luo-ming, QIU Xue-song, LI Wen-jing

(State Key Laboratory of Networking and Switching, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Considering the survivability of virtual networks in a network virtualization environment, a virtual network embedding approach was proposed to survive multiple node failures. It de backups proportionally in the substrate network and constructed a candidate set for each substrate node beforehand. To increase the long term business profit, it chosen the failover targets in the candidate set and dynamically allocates backups to recover the affected virtual networks after substrate node failures. The validity of this method is assessed by simulation experiments in terms of applicability, stability and performance under a multiple node failures model.

**Key words:** network virtualization; survivable virtual network embedding; multiple node failures; failure recovery; virtual network remapping

### 1 引言

网络虚拟化是未来网络的重要特征和演进方向。通过对物理资源的抽象、分配和隔离, 该技术支持多个虚拟网络(VN, virtual network)动态地共存于同一物理网络, 实现了网络管控与数据平面转发交换间的分离<sup>[1,2]</sup>。在网络虚拟化环境中, 为了向VN用户提供可靠的服务, 服务提供商(SP, service provider)负责按用户需求生成VN请求, 并在VN上部署用户化的协议和应用; 基础设施提供商(InP,

infrastructure provider)负责提供及维护物理网络, 并对SP发来的VN请求进行映射。

虚拟网络映射是网络虚拟化的关键, 其目标是为VN请求中的虚拟节点和链路分配满足其映射需求的物理节点和路径资源<sup>[3-6]</sup>。因此, 物理网络的正常运行是VN为用户提供可靠服务的根本保障。然而, 在自然或人为因素影响下, 物理网络中的资源(物理节点/链路)可能发生故障或性能劣化<sup>[7,8]</sup>。由于网络虚拟化中资源共享的特点, 任何物理资源的故障都会严重影响所有使用该资源的VN, InP将

收稿日期: 2014-06-26; 修回日期: 2014-10-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013AA013502); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(BUPT-2013RC1103); 国家科技支撑计划课题基金资助项目(2012BAH35F02)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA013502); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (BUPT-2013RC1103); The National Key Technology R&D Program (2012BAH35F02)

因 VN 失效而必须承担服务等级协议 (SLA, service level agreement) 中指定的赔偿金。因此,除了为 VN 提供有效的映射方案之外,保障 VN 在受到物理故障影响时的生存性也至关重要。

虽然目前对于 MPLS (multi-protocol label switched)网络<sup>[9]</sup>和光网络<sup>[10]</sup>中的生存性问题已经有较为成熟的解决方案,但在这 2 种网络环境中, VN 的生存性是静态的,且在发生故障后无需保持 VN 拓扑的完整性。因此,光网络和 MPLS 网络的生存性方法不适用于网络虚拟化环境。网络虚拟化环境中的生存性虚拟网络映射 (SVNE, survivable virtual network embedding) 在完成 VN 映射的基础上,还提供用于故障恢复的 VN 重映射机制<sup>[11-16]</sup>。该机制可以在发生物理故障后及时地将受到影响的虚拟节点和链路动态地重映射到预先分配或临时选择的备份资源上,使 VN 恢复正常工作,从而最大限度地减少物理故障给 InP 造成的经济损失。

物理故障一般分为物理节点故障和物理链路故障。为了应对物理链路故障,Guo 等<sup>[11]</sup>提出了一种在 VN 的初始映射中主动为虚拟链路分配备份资源的 SVNE 方法。Rahman 等<sup>[12]</sup>设计了一种被动分配备份资源的 SVNE 方法,其本质上是一种故障发生后的虚拟链路重映射方法。然而,由于节点故障必然导致其邻接链路失效,在恢复时既要重映射受其影响的虚拟节点,也要重映射受其影响的虚拟链路,故节点故障的恢复相对复杂。为了保障 VN 在受到物理节点故障影响时的生存性,Yu 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于设计可靠 VN 的两阶段 SVNE 方法,先通过向原始 VN 中添加冗余节点和相应的冗余链路将 VN 扩展为备份了重要虚拟节点的可靠网络,再以最大限度共享备份链路资源为目标将可靠 VN 映射到物理网络上。Qiao 等<sup>[14]</sup>提供了另一种两阶段 SVNE 方法,进一步减小了备份开销,但发生节点故障后,该方法除了迁移受到影响的虚拟节点外,还可能需迁移大量正常工作的虚拟节点。Hu 等<sup>[15]</sup>定义并解决了约束位置的 SVNE 问题,强调用于重映射的备份节点必须满足 VN 指定的位置约束。Yeow 等<sup>[16]</sup>基于共享冗余资源池 (ORP, opportunistic redundancy pooling) 的 SVNE 方法可以动态地创建和池化备份虚拟节点,且不同 VN 可共享备份虚拟节点以取得更好的容错效果和性价比。现有研究成果在单一节点故障假设下(任意时刻,物理网络中

至多有一个节点处于故障状态),通过备份资源共享来减少备份开销。然而在实际网络中,该假设并不合理。因为一个物理故障可能导致一个区域的物理节点在相对集中的时间内发生故障,并且恢复一个物理节点故障要花费一定时间<sup>[17]</sup>,在这段时间里其他物理节点也可能故障,即发生多节点故障(多个节点同时处于故障状态)。此时,如果先后受到影响的虚拟网络 A 和 B 共享了同一备份资源,则备份资源会用于恢复 A, B 将因备份资源失效而无法恢复。

为了克服已有方法的局限性,本文提出一种面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法(单一节点故障视为多节点故障的特殊情况)。该方法预先将每个物理节点和链路的能力按比例分为主用和备用两部分,使备用资源也能组成完整的网络,以提高物理网络在面对多节点故障时的重映射能力;同时,还预先为每个物理节点构造候选集合,使不同节点故障的恢复工作相对独立,从而减小备用资源对故障恢复的约束,增加 VN 重映射的成功率。仿真实验表明,该方法有利于提高 VN 在受到多节点故障影响后的生存性,与已有方法相比,具有更好的性能。

## 2 问题建模

### 2.1 物理网络和虚拟网络请求

本文将物理网络表示为一个有权无向图,记为  $G^S=(N^S, E^S)$ ,其中,  $N^S$  为物理节点集合,  $E^S$  为物理链路集合。物理节点  $n^s \in N^S$  的节点能力用  $c(n^s)$  表示。对连接物理节点  $u, w$  的物理链路  $l^s(u, w) \in E^S$ , 其带宽能力用  $bw(l^s)$  表示。在物理网络的初始配置阶段,将每个物理节点和物理链路的能力按比例分为主用和备用两部分。对物理节点  $n^s \in N^S$ , 主用能力为  $c_p(n^s) = \mu c(n^s)$ , 备用能力为  $c_b(n^s) = (1-\mu)c(n^s)$ ,  $\mu$  为主用比例。因此,  $n^s$  的实时剩余能力也分为主用和备用两部分,分别记为  $c_p'(n^s)$  和  $c_b'(n^s)$ 。类似地,将物理链路  $l^s \in E^S$  的带宽分为  $bw_p(l^s)$  和  $bw_b(l^s)$ , 实时剩余带宽分为  $bw_p'(l^s)$  和  $bw_b'(l^s)$ 。

同样地,将虚拟网络请求表示为一个有权无向图,记为  $G^V=(N^V, E^V)$ ,其中,  $N^V$  为虚拟节点集合,  $E^V$  为虚拟链路集合。虚拟节点  $n^v \in N^V$  的节点能力需求用  $c(n^v)$  表示。虚拟链路  $l^v \in E^V$  的带宽需求用  $bw(l^v)$  表示。对于虚拟网络  $vn_i$ , 承载其虚拟节点的物理节点组成的集合记为  $N_i^S$ 。

### 2.2 物理节点故障

将物理节点故障建模为一系列的单一节点故障，按时间顺序记为： $F_1, F_2, F_3, \dots$ 。对节点故障  $F_i$ ，将其发生时刻和结束时刻分别用  $s(F_i)$  和  $e(F_i)$  表示，且  $s(F_i) < e(F_i)$ ，即  $F_i$  会持续一定时间。若  $\exists i > j$ ，使  $s(F_i) < s(F_j) < e(F_j)$ ，即在  $F_i$  故障期间有其他物理节点发生故障，则会出现多个物理节点同时处于故障状态，本文称之为多节点故障。发生多节点故障的概率随单一节点故障发生频率及平均持续时间的增加而增加。

当物理节点  $x$  发生故障时，受其影响的 VN 有 2 种：1) VN 的某个虚拟节点映射在  $x$  上；2) VN 的某条虚拟链路映射在包含  $x$  的路径上。第二种 VN 可视为受到物理链路故障影响，采用 Guo<sup>[11]</sup>、Rahman<sup>[12]</sup> 等应对链路故障的 SVNE 方法即可解决。本文主要研究对第一种 VN 的生存性映射方法。

### 2.3 InP 的长期运营利润

为了提高长期运营利润，InP 需要在 SVNE 中权衡 2 个方面：映射 VN 获得的收益和 VN 因受到故障影响而失效时必须支付的赔偿金。

映射一个虚拟网络  $G^V$  获得的收益  $R(G^V)$  取决于  $G^V$  的生命周期  $t_{G^V}$  及  $G^V$  请求的虚拟节点和虚拟链路能力。故  $R(G^V)$  可表示为

$$R(G^V) = t_{G^V} (\xi \sum_{n^v \in N^V} c(n^v) + \eta \sum_{l^v \in E^V} bw(l^v)) \quad (1)$$

其中， $\xi$  和  $\eta$  分别为虚拟节点和链路能力的单价。

对于失效的虚拟网络  $G^V$ ，InP 需要承担 SLA 中指定的赔偿金  $p(G^V)$ 。故 InP 因物理节点  $x$  发生故障而必须支付的赔偿金  $P(x)$  可表示为

$$P(x) = \sum_{G^V \in D(x)} p(G^V) \quad (2)$$

其中， $D(x) \subseteq F(x)$  是受  $x$  影响而失效的 VN 组成的集合， $F(x)$  是受  $x$  影响的 VN 组成的集合。

InP 在时间  $T$  内的长期运营利润  $Profit(T)$ ，等于这段时间内映射 VN 获得的收益减去失效 VN 引起的赔偿金，即

$$Profit(T) = \sum_{G^V \in M(T)} R(G^V) - \sum_{x \in B(T)} P(x) \quad (3)$$

其中， $M(T)$  是时间  $T$  内成功映射的 VN 组成的集合， $B(T)$  是时间  $T$  内发生故障的物理节点组成的集合。

### 2.4 虚拟网络重映射

应对节点故障的 VN 重映射是指，在发生物理

节点故障后，为 VN 中受到影响的虚拟节点和链路重新分配资源，使 VN 恢复正常工作。

给定物理网络  $G^S$ 、物理节点  $x \in G^S$ 、 $x$  承载的  $k(k=|F(x)|)$  个虚拟节点  $n_1, n_2, \dots, n_k$  及其分别所属的虚拟网络  $vn_1, vn_2, \dots, vn_k$ 。在  $x$  发生故障后，虚拟网络  $vn_i$  中需要重映射的部分包括虚拟节点  $n_i$  以及与  $n_i$  相连的虚拟链路。将  $vn_i$  中与  $n_i$  相连的虚拟链路组成的集合记为  $L^V(n_i)$ ，与  $n_i$  相邻的虚拟节点组成的集合记为  $N^V(n_i)$ ， $N^V(n_i)$  映射到的物理节点集合记为  $N^S(n_i)$ 。令  $l_{ij}^v$ 、 $n_{ij}^v$ 、 $n_{ij}^s$  分别表示集合  $L^V(n_i)$ 、 $N^V(n_i)$ 、 $N^S(n_i)$  中的第  $j$  个元素，且  $l_{ij}^v$  连接  $n_i$  和  $n_{ij}^v$ ， $n_{ij}^v$  映射在  $n_{ij}^s$  上。如图 1 所示，当  $G^S$  中的物理节点  $X$  发生故障时， $vn_i$  中需要重映射的部分为虚拟节点  $a$  以及虚拟链路  $(a,b)$ ， $(a,c)$ ， $L^V(a) = \{(a,b), (a,c)\}$ ， $N^V(a) = \{b, c\}$ ， $N^S(a) = \{B, A\}$ 。

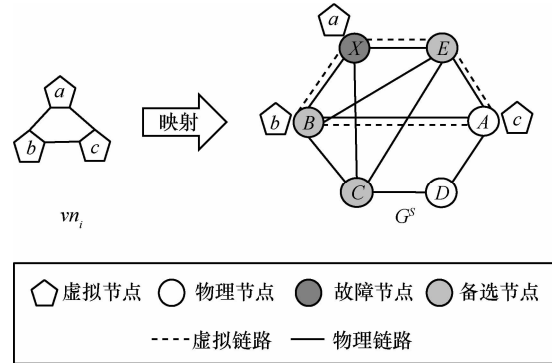


图 1 一个物理节点故障的实例

因此，应对物理节点故障的 VN 重映射可抽象为以最大化  $Profit(T)$  为目标，找到以下 2 个映射

$$\begin{aligned} f: n_i &\rightarrow y, y \in N^S \setminus N_i^S, y \neq x \\ g: l_{ij}^v &\rightarrow p, p \in Path(y, n_{ij}^s) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $N^S \setminus N_i^S$  表示从底层物理节点中去掉承载  $vn_i$  中虚拟节点的物理节点，可保证  $vn_i$  中的不同虚拟节点映射在不同的物理节点上； $Path(y, n_{ij}^s)$  表示  $y$  和  $n_{ij}^s$  之间的无环路径组成的集合， $i=1,2,\dots,k, j \geq 1$ 。 $f$  表示虚拟节点重映射，即把虚拟节点迁移到正常工作的物理节点上； $g$  表示虚拟链路重映射，即当虚拟节点  $n_i$  迁移到物理节点  $y$  上时，还必须把相关的虚拟链路  $l_{ij}^v$  迁移到  $y$  和  $n_{ij}^s$  之间的路径上，以完成虚拟网络的恢复。

## 3 方法描述

本文面向多节点故障的生存性虚拟网络映射

方法包括3个阶段：1) 物理网络的初始配置阶段，在每个物理资源上都按比例预留备用资源，并构造每个物理节点的候选集合，为可能受到影响的虚拟节点提供多个潜在的重映射目标；2) 当有VN请求到达时，用传统的VN映射方法<sup>[3-6]</sup>为其分配工作资源；3) 当发生多节点故障时，基于故障节点的候选集合，将其视为多个独立的单一节点故障，并动态分配预留的备用资源完成VN重映射，逐一实现虚拟资源迁移。

本节首先提出一种基于网络拓扑的候选集合构造方法，再利用混合整数规划(MIP, mixed integer programming)求解VN重映射。

### 3.1 候选集合

物理节点的候选集合可以减小故障恢复时备份资源之间的制约，有利于在发生多节点故障后提高VN重映射的成功率，同时还能缩小重映射问题的搜索空间，提高方法效率。

由2.4节可知，在物理节点 $x$ 发生故障后，其承载的虚拟节点及与这些虚拟节点相连的虚拟链路都需要重映射。为了保证虚拟链路的重映射， $x$ 的候选节点应该在一定的地理范围内与 $x$ 保持连通。由于路由中的每一跳都会产生相应的资源开销和传输时延，本文用跳数衡量地理范围并定义以下2个集合

$$H(G^S, x, h) = \{n | \text{Min}_h(x, n) = h, n \in G^S\} \quad (5)$$

该集合由物理网络 $G^S$ 中与 $x$ 之间最短路径长度为 $h$ 的物理节点组成。

$$C(G^S, x, h) = \{n | \text{Min}_h(x, n) \leq h, n \in G^S\} \quad (6)$$

该集合由 $G^S$ 中与 $x$ 之间最短路径长度不超过 $h$ 的物理节点组成。称 $C(G^S, x, h)$ 为 $x$ 的覆盖集，且 $C(G^S, x, h) = \bigcup_{i=0}^h H(G^S, x, h)$ 。

图1中， $H(G^S, X, 0) = \{X\}$ ， $H(G^S, X, 1) = \{B, C, E\}$ ， $C(G^S, X, 1) = \{X, B, C, E\}$ 。

综上， $x$ 与其候选节点的关系可描述为：对于给定的跳数 $h$ ，候选节点的覆盖集应该包含 $x$ 的覆盖集中除 $x$ 以外的所有元素。故 $x$ 的 $h$ 跳候选集合可定义为

$$CS(x, h) = \{y | C(G^S \setminus x, y, h) \supseteq (C(G^S, x, h) \setminus x), y \in G^S\} \quad (7)$$

其中， $G^S \setminus x$ 表示去掉 $x$ 后的剩余物理网络。图1中， $CS(X, 1) = \{B, C, E\}$ 。

### 3.2 虚拟网络重映射的混合整数规划

由于物理节点故障是随机发生的，在恢复当前节点故障时，不能预知未来可能发生的节点故障。因此，在VN重映射中无法综合考虑多个物理节点故障来提高InP的长期运营利润，只能逐一优化各节点故障的恢复方案。

#### 1) 变量定义

$r_{iy}$ ：若虚拟节点 $n_i (1 \leq i \leq |F(x)|)$ 重映射到物理节点 $y$ 上， $r_{iy} = 1$ ；否则 $r_{iy} = 0$ 。令 $z_i = \sum_{y \in CS(x, h)} r_{iy}$ ，表示虚拟网络 $vn_i$ 的重映射结果。

$f_{uw}^{ij}$ ：重映射虚拟链路 $l_{ij}^v (1 \leq j \leq |L^v(n_i)|)$ 时在物理链路 $(u, w)$ 上占用的流量。令 $f_{uw} = \sum_i \sum_j f_{uw}^{ij}$ ，表示重映射受 $x$ 影响的虚拟链路时在 $(u, w)$ 上占用的总流量。

#### 2) 约束条件

##### ① 资源能力约束

$$\sum_i r_{iy} c(n_i) \leq c_b^l(y), \forall y \in CS(x, h) \quad (8)$$

$$f_{uw} + f_{wu} \leq bw_b^l(u, w), \forall (u, w) \in E^S \quad (9)$$

式(8)和式(9)表示对任意候选节点或物理链路，用于重映射的节点能力或链路带宽不能超过该节点或链路的剩余备用能力。

##### ② 节点映射约束

$$z_i \leq 1, \forall i \quad (10)$$

式(10)表示最多有一个候选节点承载 $n_i$ 。

##### ③ 流量守恒约束

$$\sum_{n \in A(x)} (f_{xn}^{ij} + f_{nx}^{ij}) = 0, \forall i, j \quad (11)$$

$$\sum_{n \in A(n_i^v)} (f_{nn'}^{i'j'} - f_{n'n}^{i'j'}) = \varphi bw(l_{ij}^v), \forall i, i', j, j' \quad (12)$$

$$\sum_{n \in A(y)} (f_{yn}^{ij} - f_{ny}^{ij}) = r_{iy} bw(l_{ij}^v), \forall i, j, \forall y \notin N^s(n_i) \quad (13)$$

其中， $A(x)$ 表示物理节点 $x$ 的相邻节点组成的集合。当 $i=i'$ 且 $j=j'$ 时， $\varphi=1$ ；否则 $\varphi=0$ 。式(11)表示与故障节点 $x$ 相连的物理链路不参与重映射。式(12)表示 $n_{ij}^s$ 作为承载 $l_{ij}^v$ 的物理路径的终点，其流入流量应等于 $l_{ij}^v$ 请求的带宽；同时，作为承载其他虚拟链路的物理路径的中继节点或无关节点，其流入流量应等于流出流量。式(13)表示若 $n_i$ 重映射到 $y$ 上，则 $y$ 作为承载 $l_{ij}^v$ 的物理路径的起点，其流出流量应等于 $l_{ij}^v$ 请求的带宽；否则，其流入流量应等于流出

流量。

④ 变量取值约束

$$\begin{aligned} r_{iy} &\in \{0,1\} \\ \forall y \notin CS(x,h), r_{iy} &= 0 \\ \forall y \in N_i^S, r_{iy} &= 0 \\ f_{uw}^{ij} &\geq 0 \end{aligned}$$

3) 目标函数

本文分别从失效 VN 的赔偿金、候选节点的连通性和物理资源的负载均衡 3 个角度出发, 设计重映射的目标函数。

①目标函数 1: 优先映射失效赔偿金高的 VN

基于贪婪思想, 在物理节点  $x$  发生故障后, 优先重映射受其影响的 VN 中失效赔偿金较高的, 以减少 InP 必须支付的赔偿金。同时, 还要尽量减少重映射时的链路开销。式(14)中目标函数  $f_1$  的第一项表示最大化 VN 恢复可避免的赔偿金; 第二项表示最小化虚拟链路重映射占用的网络流量。 $\alpha$ 、 $\beta$  为权重因子。

$$f_1: \text{Max}\{\alpha \sum_{vn_i \in F(x)} z_i p(vn_i) - \beta \sum_{(u,w) \in E^S} f_{uw}\} \quad (14)$$

②目标函数 2: 优化剩余备份资源的连通性

如果故障节点  $x$  的候选集中有多于一个候选节点, 则在重映射时优先使用连通性弱的候选节点, 以优化剩余备份资源的连通性。同时, 还要尽量减少重映射时的链路开销。

Jaccard<sup>[18]</sup>相似系数用 2 个集合的交集与并集的基数之比来刻画它们的相似程度。参照该系数, 本文用  $x$  的覆盖集与其候选节点  $y$  的覆盖集的相似程度来定义  $x$  与  $y$  的相似度  $Sim(x,y,h)$ , 并用  $Sim(x,y,h)$  衡量  $y$  的连通性, 其计算式为

$$Sim(x,y,h) = J(C(G^S, x, h), C(G^S, y, h)) = \frac{|C(G^S, x, h) \cap C(G^S, y, h)|}{|C(G^S, x, h) \cup C(G^S, y, h)|} \quad (15)$$

对于  $x$  的候选节点  $y_1$  和  $y_2$ , 如果  $Sim(x,y_1,h) < Sim(x,y_2,h)$ , 则表明与  $y_2$  相比,  $y_1$  的覆盖集规模更大、连通性更强。显然, 连通性强的物理节点会属于许多其他物理节点的候选集合。因此, 在重映射时, 如果优先使用与  $x$  的相似度较大(连通性弱)的候选节点, 就可以将连通性强的物理节点用于恢复更需要它们或者更重要的(如赔偿金更高的)虚拟节点。式(16)中目标函数  $f_2$  的第一项表示最大化

重映射使用的物理节点与故障节点  $x$  的相似度, 使剩余备份资源的连通性最优; 第二项表示最小化虚拟链路重映射占用的网络流量。 $\alpha$ 、 $\beta$  为权重因子。

$$f_2: \text{Max}\{\alpha \sum_i \sum_y r_{iy} Sim(x,y,h) - \beta \sum_{(u,w) \in E^S} f_{uw}\} \quad (16)$$

③目标函数 3: 备份资源负载均衡

在重映射时, 优先使用剩余备用能力大的物理节点和链路, 有利于备份资源的负载均衡, 可以有效减少因关键物理节点或链路资源的过度占用而导致物理网络重映射能力降低的现象。从长远来看, 这种策略可以让物理网络中始终有较多可用的备份资源, 以应对更多可能发生的物理节点故障。同时, 还要尽可能多地重映射受到影响的 VN。式(17)中目标函数  $f_3$  的前两项表示最小化虚拟节点和虚拟链路占用其重映射目标上备用资源的比例; 第三项表示最大化恢复 VN 的数目。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为权重因子。

$$f_3: \text{Min}\{\alpha \sum_y \sum_i \frac{r_{iy} c(n_i)}{c'_b(y)} + \beta \sum_{(u,w) \in E^S} \frac{f_{uw}}{bw'_b(u,w)} - \gamma \sum_i z_i\} \quad (17)$$

## 4 仿真实验

本文通过设置故障发生频率及平均持续时间来模拟多节点故障, 仿真实验的目的有以下 3 个方面。

1) 在不同的物理网络环境下, 讨论本文 3 种 VN 重映射方法的适用性。

2) 在多节点故障模型下评估本文方法的性能。由于传统 VN 映射方法没有考虑物理网络故障, 已有 SVNE 方法仅考虑单一节点故障, 故都不便直接与本文方法比较。本文将 Chowdhury 等<sup>[4]</sup>经典的同阶段 VN 映射方法及 Yu 等<sup>[13]</sup>有代表性的单一节点故障 SVNE 方法分别扩展为应用于多节点故障模型的 Blind-SVNE 和 k-Rdt-SVNE (如表 1 所示), 并与这 2 种方法进行比较。

3) 在不同的故障发生频率下, 观察主用比例  $\mu$  对本文方法性能的影响。

表 1 给出了仿真实验中涉及的 5 种 SVNE 方法及其在 2 个阶段的算法思路。

### 4.1 实验环境设置

仿真实验中采用 GT-ITM 工具<sup>[19]</sup>生成虚拟网络及物理网络拓扑, 使用 GLPK 工具<sup>[20]</sup>求解线性规划, 并利用 Matlab 工具对实验结果进行分析。每次

表 1 5 种 SVNE 方法

方法	VN 映射方法	VN 重映射方法
Pen-SVNE	采用文献[4]中同步虚拟节点与链路映射的 VN 映射方法	采用本文基于目标函数 1 的 VN 重映射方法
Con-SVNE		采用本文基于目标函数 2 的 VN 重映射方法
LB-SVNE		采用本文基于目标函数 3 的 VN 重映射方法
Blind-SVNE	采用文献[4]的 VN 映射方法	采用文献[4]的 VN 映射方法重新映射整个 VN
k-Rdt-SVNE	采用文献[13]中基于构造可靠虚拟网络的 VN 映射方法	将失效虚拟节点和链路直接迁移到预留备份资源上, 若备份失效, 则采用 Blind-SVNE 的 VN 重映射方法

实验运行 50 000 个时间单位。

VN 中虚拟节点的数目服从[3,10]的均匀分布。虚拟节点间以 0.5 的概率连接。虚拟节点的节点能力需求和虚拟链路的带宽需求分别服从[1,10]和[1,15]的均匀分布。VN 请求的到达服从泊松过程, 每 100 个时间单位平均到达 4 个 VN 请求。VN 请求的生命周期服从指数分布, 均值为 40 个时间单位。虚拟节点和虚拟链路的单价分别取 2 和 1。InP 必须为一个失效 VN 支付的赔偿金为映射该 VN 获得收益的 3 倍。

实验在 3 种不同的物理网络上对本文方法进行评估。每个物理网络都包含 50 个物理节点。在物理网络 1 中, 节点间的连接概率为 0.5, 节点能力和链路带宽分别服从[50,100]和[100,200]的均匀分布。物理网络 2 是一个 BA 模型网络<sup>[21]</sup>, 其节点能力和链路带宽能力设置与物理网络 1 相同。在物理网络 3 中, 节点间的连接概率为 0.5, 节点能力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泊松过程, 每 100 个时间单位平均出现  $p$  个故障。故障持续时间服从指数分布, 均值为  $d$  个时间单位。候选集合跳数  $h$  取 3。

## 4.2 算法的适用性

图 2 展示了在 3 种不同的物理网络上, 采用 Pen-SVNE、Con-SVNE 和 LB-SVNE 时 InP 的长期运营利润。 $p$  取 3,  $d$  取 25,  $\mu$  取 70%。

由图 2 可知, 在物理网络 1 上, 3 种重映射方法的长期运营利润较为接近, 基于贪婪思想的 Pen-SVNE 略优于其他 2 种方法; 在物理网络 2 上, Con-SVNE 性能最好, 其原因在于, Con-SVNE 在重映射时优先使用连通性弱的物理节点, 故在无尺度网络(各节点连通性差异较大)中, 该方法可以降低连通性强的物理节点的重映射负载, 使剩余的备份资源能应对更多的节点故障; 相比于前 2 种物理网络, 在物理网络 3 中, 各物理资源能力资源负载均衡为目标, 有效提高了物理网络的重映射能力, 故在物理网络 3 上其性能最好; 在 3 种不同的物理网络上, Pen-SVNE 都有较好的性能, 其稳定性最好。因此, 如果物理网络不具有明显特征, 则出于对稳定性的考虑, 可以使用 Pen-SVNE; 如果物理网络是无尺度网络, 则应该使用 Con-SVNE; 如果物理网络中资源能力的差异性较大, 则优先使用 LB-SVNE 来恢复节点故障, 以提高 InP 的长期

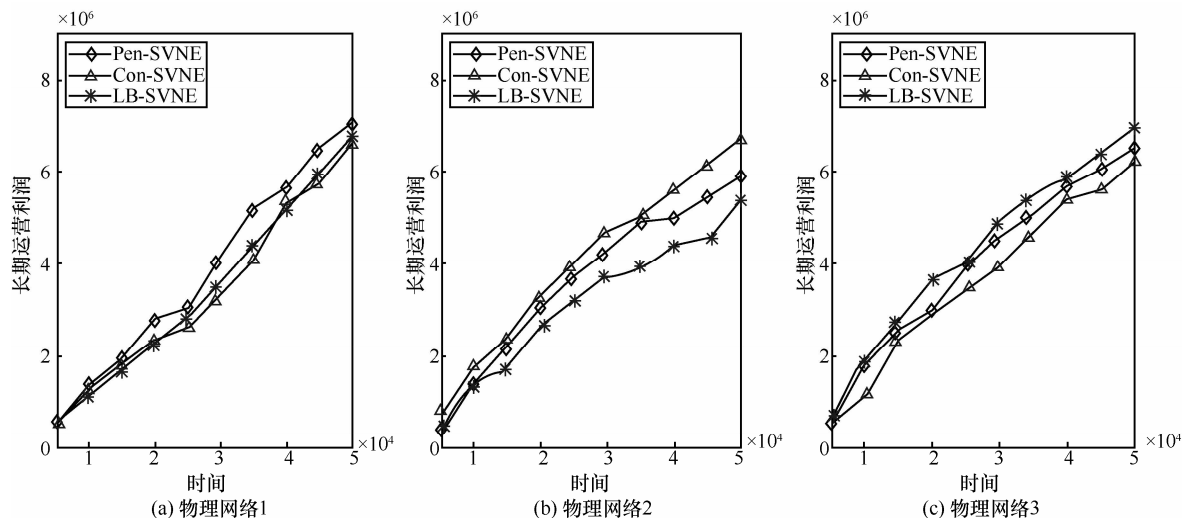


图 2 不同物理网络上本文 3 种重映射方法的性能比较

运营利润。

### 4.3 算法的性能

本文用 InP 的长期运营利润衡量 SVNE 方法的性能。图 3 给出了在多节点故障模型下,采用 Blind-SVNE、k-Rdt-SVNE 以及本文 Pen-SVNE 时 InP 的长期运营利润。实验在物理网络 1 上进行,节点故障发生频率  $p$  取 3,主用比例  $\mu$  取 70%,节点故障平均持续时间  $d$  分别取 25 和 50。

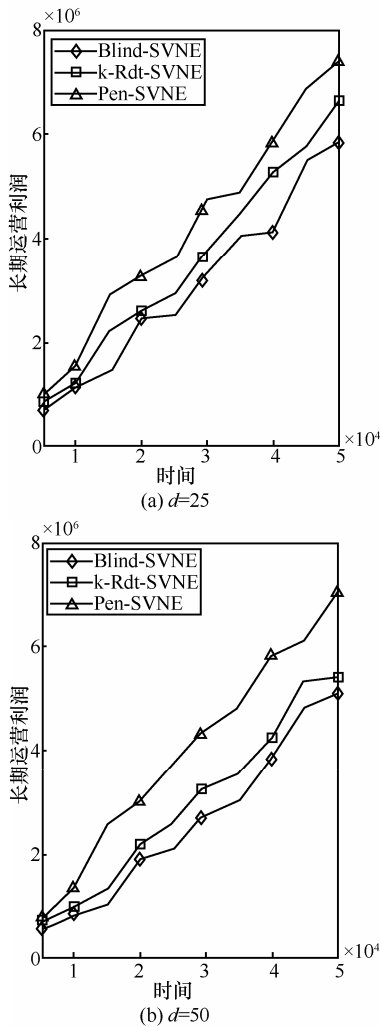


图 3 多节点故障模型下 3 种 SVNE 方法的性能比较

如图 3 所示,与 Blind-SVNE 和 k-Rdt-SVNE 相比, Pen-SVNE 大幅提高了 InP 的长期运营利润。对比图 3 还可以看出,  $d$  的增加对 Pen-SVNE 的性能影响不大,而其他 2 种方法的性能则明显下降。由此证明,当发生多节点故障的概率增加时,本文方法具有更好的稳定性。此外,  $d$  较大时, k-Rdt-SVNE 的性能接近 Blind-SVNE,其原因在于,当发生多节点故障时, k-Rdt-SVNE 将采用 Blind-

SVNE 的方法重映射受到影响的 VN。

### 4.4 主用比例对性能的影响

增大主用比例  $\mu$ ,一方面可以增加用于 VN 映射的资源,提高 InP 映射 VN 获得的收益;另一方面则会减少用于 VN 重映射的资源,增加 InP 为失效 VN 支付的赔偿金。因此,  $\mu$  的设置直接影响 InP 的长期运营利润,当故障发生频率较大时,应适当减小  $\mu$  以保证有足够的备份资源用于故障恢复。

本文通过仿真实验观察在不同的故障发生频率下  $\mu$  对 Pen-SVNE 的影响。实验在物理网络 1 上进行,  $d$  取 25。从图 4 可以看出, Pen-SVNE 在  $p$  取 1、3、4 时的最优主用比例分别为 80%、70%、60%;  $p$  取 2 时,  $\mu$  的最优取值在 70%和 80%之间。可以看出,  $\mu$  的最优取值随  $p$  的增大而减小,与前述分析一致。

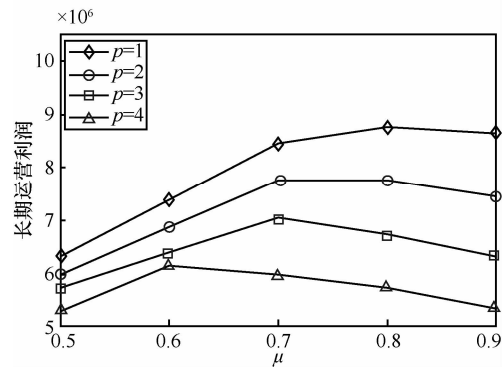


图 4 主用比例对 Pen-SVNE 的影响

## 5 结束语

本文主要围绕网络虚拟化环境中虚拟网络的生存性映射问题展开讨论,总结已有方法存在的局限性,并提出了一种面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法。该方法主要通过预留备份资源和构造候选集合来提高多节点故障发生时虚拟网络的恢复能力,同时还设计了 3 种重映射目标函数以适应不同的物理网络环境。实验表明,本文方法在多节点故障模型下可以有效提高虚拟网络的生存性,增加 InP 的长期运营利润。未来工作主要从以下 3 个方面进行: 1) 基于混合整数规划的求解方法只适用于中小规模的物理网络,对于较大规模的运营商网络,可以设计高效的启发式方法来近似求解重映射方案; 2) 采集并分析历史故障数据,设计有针对性的虚拟网络映射方法及故障重映射方法; 3) 对于跨域映射的虚拟网络,域间链路故障或域内和域间

同时发生物理故障都会给故障恢复带来新的挑战，可以对跨域生存性虚拟网络映射进行研究。

### 参考文献:

- [1] ANDERSON T, PETERSON L, SHENKER S. Overcoming the Internet impasse through virtualization[J]. Computer, 2005, 38(4): 34-41.
- [2] FEAMSTER N, GAO L, REXFORD J. How to lease the Internet in your spare time[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1): 61-64.
- [3] YU M, YI Y, REXFORD J. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17-29.
- [4] CHOWDHURY N, RAHMAN M, BOUTABA R. Vineyard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206-219.
- [5] LISCHKA J, KARL H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[A]. Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures[C]. 2009. 81-88.
- [6] CHENG X, SU S, ZHANG Z. Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 38-47.
- [7] MARKOPOULOU A, IANNACCONE G, BHATTACHARYYA S. Characterization of failures in an IP backbone[A]. Proceedings of INFOCOM 2004, the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. 2004.2307-2317.
- [8] GILL P, JAIN N, NAGAPPAN N. Understanding network failures in data centers: measurement, analysis, and implications[J]. Proc ACM SIGCOMM CCR, 2011, 41(4):350-361.
- [9] LIU Y, TIPPER D, SIRIPONGWUTIKORN P. Approximating optimal spare capacity allocation by successive survivable routing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(1): 198-211.
- [10] RAMAMURTHY S, SAHASRABUDDHE L, MUKHERJEE. B. Survivable WDM mesh networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(4): 870-883.
- [11] GUO T, WANG N, MOESSNER K. Shared backup network provision for virtual network embedding[A]. Proceedings of IEEE ICC 2011[C]. 2011. 1-5.
- [12] RAHMAN M, AIB I, BOUTABA R. Survivable virtual network embedding[A]. Proceedings of 9th IFIP TC 6 International Conference on Networking 2010[C]. 2010.40-52.
- [13] YU H, ANAND V, QIAO C. Cost efficient design of survivable virtual infrastructure to recover from facility node failures[A]. Proc IEEE ICC 2011[C]. 2011. 1-6.
- [14] QIAO C, GUO B, HUANG S. A novel two-step approach to surviving facility failures[A]. Proceedings of in 2011 OFC/NFOEC[C]. 2011.1-3.
- [15] HU Q, WANG Y, CAO X. Location-constrained survivable network virtualization[A]. Proceedings of 35th IEEE SARNOFF[C]. 2012.1-5.
- [16] YEOW W, WESTPHAL C, KOZAT U. Designing and embedding reliable virtual infrastructures[A]. Proceedings of 2nd ACM SIGCOMM Workshop on VISA[C]. 2010.33-40.
- [17] Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems[S]. IEC 61508, 2005.
- [18] CROSS V, SUDKAMP T. Similarity and Compatibility in Fuzzy Set Theory: Assessment and Application[M]. New York: Physica-Verlag, 2002.
- [19] Medeling topology of large Internetworks[EB/OL]. <http://www.cc.gatech.edu/projects/gtitm/>.
- [20] GNU linear programming kit[EB/OL]. <http://www.gnu.org/software/glpk/>.
- [21] BARABASIAND A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439):509-520.

### 作者简介:



**肖蔼玲** (1987-), 女, 山东烟台人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为云计算、未来网络管理、数据仓库与数据挖掘。



**王颖** (1976-), 女, 辽宁昌图人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为云计算、未来网络管理、IT 服务管理。



**孟洛明** (1955-), 男, 河南洛阳人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络管理、通信软件。



**邱雪松** (1973-), 男, 江西上饶人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络与业务管理。



**李文璟** (1973-), 女, 山西太古人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为未来网络管理、无线网络管理、自主管理。