

面向底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射算法

刘光远* 苏森

(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: 网络可靠性是虚拟网络设计的一个重要指标,目前得到了越来越多的关注。该文对轻量级可靠的虚拟网络映射问题进行研究。目标是不预留底层网络保护资源,当底层物理网络单节点失效时,虚拟网络拓扑除失效虚拟节点外仍保持连通,将损失降到最小。文章首先给出了存在轻量级可靠虚拟网络映射可能的必要条件并加以证明,然后基于此条件对面向底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射问题进行整数线性规划建模,最后设计了一种新的启发式算法对其进行求解。该算法包括拓扑感知的虚拟节点映射策略和一种基于禁忌搜索(tabu search)算法的虚拟链路映射策略。模拟实验结果表明,该文提出的算法在得到轻量级可靠虚拟网络映射的同时,仍能获得较高的底层网络长期运行平均收益和底层网络资源利用率。

关键词: 虚拟网络映射; 轻量级可靠; 单节点失效; 整数线性规划; 启发式算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2644-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00254

Less Stringent Reliable Virtual Network Mapping Algorithm for Substrate Single Node Failure

Liu Guang-yuan Su Sen

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

Abstract: Network reliability is one of the most important performance in the design of Virtual Network (VN) and gaining more and more attention currently. This paper focuses on the issue of less stringent reliable virtual network mapping. The VN topology remains connected except failed virtual node in the event of single substrate node failure without reserving backup resources. The necessary conditions for mapping VN to be reliable are researched at first, and then the issue is formulated as an Integer Linear Program (ILP) based on it. Finally a novel heuristic algorithm is proposed to solve it. The policy consists of a topology-aware node mapping strategy and a link mapping strategy based on tabu search. Evaluation results show that the proposed heuristic algorithm can obtain the reliable VN mapping with higher substrate long-term average revenue and efficient resource utilization.

Key words: Virtual Network (VN) mapping; Less stringent reliable; Single node failure; Integer Linear Program (ILP); Heuristic algorithm

1 引言

网络虚拟化技术的出现和快速发展,有效地缓解了互联网的“僵化”问题。在网络虚拟化环境下,传统的互联网服务运营商被分为了两个角色,一个是底层基础设施运营商,负责部署和维护底层网络资源;一个是服务提供商,它租用一个或多个底层基础设施提供商提供的底层网络资源,提供定制的,

可扩展的虚拟网络服务^[1]。虚拟网络映射是网络虚拟化技术的核心内容之一,其研究成果得到了国内外的广泛关注。每个虚拟网络可被看作一个底层物理网络的切片,包含虚拟节点和虚拟链路。按节点和链路需求约束进行底层资源匹配被称为虚拟网络映射^[2],该问题已被证明为 NP-Hard。所以早期研究主要集中在设计启发式算法,文献[3-7]以增加底层网络资源收益为目标对该问题进行求解。

由于黑客攻击或硬软件错误,底层物理网络中的节点和链路可能会失效。而一个节点或链路失效可能会引起多个虚拟网络服务不可用,直接导致服务提供商的经济损失。因此近年来对虚拟网络可靠性问题的研究逐渐增多,文献[8-10]主要基于先验

2013-03-04 收到, 2013-06-14 改回

国家自然科学基金(61170274), 国家 973 计划项目(2011CB302506), 工业和信息化部国家科技重大专项(2011ZX03002-001-01), 国家自然科学基金委创新研究群体项目(60821001)和河北省自然科学基金(F2011402028)资助课题

*通信作者: 刘光远 gyuanliu@163.com

式恢复机制，在底层节点和链路失效时将其替换为预留保护资源，该方法实现简单，但需要消耗额外的底层物理计算资源和网络带宽资源，底层资源利用效用不高。

本文不同于现有研究，针对无底层网络保护资源时，设计一种新的面向底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射算法，目标是不预留底层保护资源，在底层物理单节点失效后，虚拟网络拓扑除失效节点外仍保持连通，从而尽可能降低服务运营商的损失。算法包括拓扑感知的虚拟节点映射策略和基于禁忌搜索算法的虚拟链路映射策略。该研究可为服务运营商节约成本，满足服务轻量级可靠需求。

本文的结构如下：第 2 节对轻量级可靠虚拟网络映射问题进行描述；第 3 节对图割集理论进行深入研究，给出应对底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射存在的必要条件并予以证明；第 4 节对该虚拟网络映射问题建立了整数线性规划模型；第 5 节基于该模型，设计一种新的启发式算法对该问题进行求解，该算法包含拓扑感知的节点映射策略和禁忌搜索寻优的链路映射策略；第 6 节通过模拟实验评估所提出的映射算法；第 7 节对全文进行了总结。

2 网络模型与问题描述

虚拟网络映射模型包含底层物理网络和虚拟网络请求两个方面，本节首先给出底层物理网络和虚拟网络请求的网络模型和形式化描述，然后给出轻量级可靠虚拟网络映射的问题描述。

2.1 底层网络

本文采用文献[2]给出的虚拟网络映射模型描述。物理网络拓扑标记为带权无向图 $G_s = (N_s, E_s, C_s^n, C_s^l)$ ，其中 N_s 表示物理网络节点的集合， E_s 表示物理网络链路的集合， C_s^n 表示物理网络节点的计算能力， C_s^l 表示物理网络链路带宽。图 1(b)描绘了一个底层物理网络实例，其中矩形框里的数字分别表示各个节点的可用计算资源，链路附近的数字表示该链路的可用带宽资源。

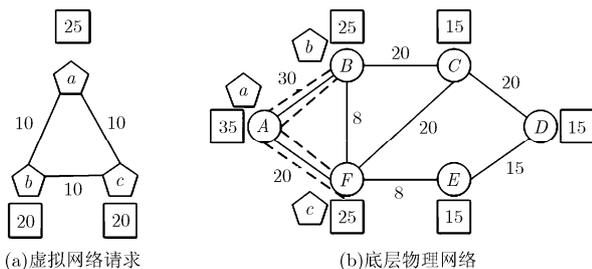


图 1 虚拟网络映射实例

2.2 虚拟网络请求

与底层物理网络类似，虚拟网络拓扑也可被标记为带权无向图 $G_v = (N_v, E_v, R_v^n, R_v^l)$ ，其中 N_v 为虚拟网络节点的集合， E_v 为虚拟网络链路的集合。 R_v^n 表示虚拟节点能力需求， R_v^l 表示虚拟链路带宽资源需求。当第 i 个虚拟网络请求到达后，物理网络需要为其分配满足其节点与链路资源需求的相应资源。当物理网络资源不足时，应该拒绝或延迟映射该虚拟网络请求。图 1(a)描绘了一个带有节点与链路资源约束的虚拟网络请求实例。

2.3 轻量级可靠的虚拟网络映射问题描述

虚拟网络映射问题被定义为映射： $M : G_v(N_v, E_v) \rightarrow G_s(N_s, E_s)$ ，包括节点和链路映射两个方面。图 1(b)给出了虚拟网络请求的一种可行映射方案。如图所示，节点映射方案为 $\{a \rightarrow A, b \rightarrow B, c \rightarrow F\}$ ，链路映射方案为 $\{(a, b) \rightarrow (A, B), (a, c) \rightarrow (A, F), (b, c) \rightarrow (B, A, F)\}$ 。

因为每个底层链路的带宽资源可被多条虚拟链路所共享，所以两个或更多的虚拟链路可能被映射到同一条底层链路上。当一个底层单节点失效时，其周围相连的链路也随即失效，这会导致映射到这些底层链路上的虚拟网络中的多条虚拟链路同时失效，从而导致已经映射的虚拟网络不再连通。如图 1 所示，底层节点 A 失效，与其相连的底层链路 (A, B) 和 (A, F) 随即失效，则映射在其上的虚拟链路 $(a, b), (a, c), (b, c)$ 均失效，导致虚拟网络拓扑不再连通。结果表明该映射方案在底层节点失效时不能维持虚拟网络的连通，因此不是可靠虚拟网络映射问题的可行解。如果换一种方案，如果虚拟网络链路 (b, c) 被映射到 (B, C, F) ，在底层节点 A 失效时，除映射在其上的失效虚拟节点 a 外，虚拟网络拓扑 b 和 c 之间仍保持连通，我们称其为轻量级可靠的虚拟网络映射的可行解。

本文的工作主要集中在设计在线的虚拟网络映射算法，在给定虚拟网络请求和底层网络资源的情况下找到满足轻量级可靠需求的虚拟网络映射方案。算法的目标是在不预留底层网络保护资源的情况下，尽可能减少服务运营商的损失。

3 可靠虚拟网络映射存在必要条件

3.1 割集理论

在给出可靠虚拟网络映射必要条件之前，先介绍一些有关的图论知识^[11]。任意给定一个无向连接图 $G = (N, E)$ ，其中 N 是节点的集合， E 代表边的集合， (i, j) 代表节点 i 和 j 的一条边。一个割 $\langle S, N \setminus S \rangle$ 将顶点集合 N 分为两个子集 S 和 $N \setminus S$ ，对应

的边的集合称为割集。 $G_S = (N_S, E_S)$ 代表底层物理网络。 $G_{s,i} = (N_{s,i}, E_{s,i})$ 代表被引入的 G_S 的子图, 其中 $N_{s,i} = N_S - \{i\}$, $i \in N_S$, $E_{s,i} = \{(m, n) | (m, n) \in E_S \wedge ((m \neq i) \wedge (n \neq i))\}$

根据顶点集构成的子图是否连通, 我们将割分为主割和副割。在上例中一个割将图 G 分为两个顶点集 S 和 $N \setminus S$, 如果这两个顶点集构成的子图均连通, 则称该割为主割; 若两个顶点集各自对应的子图有一个不连通, 则称该割为副割。主割、副割对应边的集合分别称为主割集和副割集。有关主割集和副割集的一个重要性质为: 每个副割集是不相交主割集的并。因此我们在实际计算中只需考虑主割集, 从而大大减少计算时间, 这个性质被用于可靠的虚拟网络映射必要条件和第 4 节的数学模型描述中。

3.2 应对底层单节点失效轻量级可靠虚拟网络映射存在的必要条件

给定无向底层网络拓扑图 G_S 和一个连通度大于等于 2 的虚拟拓扑图 G_V 。当底层单节点失效时, 虚拟网络拓扑除失效节点外仍保持连通的必要条件是当且仅当除去失效虚拟节点的虚拟网络子图 $G_{v,i}$, 它的主割集 $\text{PCS}_{G_{v,i}} < S, N_{v,i} - S >$ 包含的所有边, 至少有一条边没有映射到底层失效节点相连的物理链路上。

证明 假设必要条件不成立。则主割集 $\text{PCS}_{G_{v,i}} < S, N_{v,i} - S >$ 所包含的边均映射到底层失效节点相连的链路上。当该底层节点失效时, 相连的底层链路也失效, 则映射在其上的所有虚拟链路均失效。根据割集与拓扑连通性的判定性质, 如果割集中的边均去掉, 则拓扑不再连通, 即虚拟网络拓扑 $G_{v,i}$ 不再连通。因此假设不成立。证毕

4 面向底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射问题的数学模型

基于 3.2 节中的可靠虚拟网络映射的必要条件, 我们给出了该问题的整数线性规划模型。

变量说明:

$$M_{ij}^{mn} = \begin{cases} 1, & \text{虚拟链路}(m, n)\text{映射到底层物理链路}(i, j)\text{上;} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$x_i^m = \begin{cases} 1, & \text{虚拟节点 } m \text{ 映射到底层物理节点 } i \text{ 上;} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

目标函数:

$$\text{Min} \sum_{(m,n) \in E_v} \sum_{(i,j) \in E_s} M_{ij}^{mn} \times B(e_{mn}) \quad (1)$$

节点能力约束:

$$\forall m \in N_v, \forall i \in N_s, x_i^m \times \text{CPU}(m) \leq \text{CPU}(i) \quad (2)$$

带宽能力约束:

$$\forall (i, j) \in E_s, \forall (m, n) \in E_v, M_{ij}^{mn} \times B(e_{uv}) \leq B(e_{ij}) \quad (3)$$

连通性约束:

$$\forall i \in N_s, \forall (m, n) \in E_v,$$

$$\sum_{(i,j) \in E_s} M_{ij}^{mn} - \sum_{(j,i) \in E_s} M_{ji}^{mn} = \begin{cases} 1, & x_i^m = 1 \\ -1, & x_i^n = 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

节点可靠性约束:

$$\forall G_{v,i}, i \in N_s, \forall \text{PCS}_{G_{v,i}}(S, N_{v,i} - S),$$

$$\sum_{\substack{(m,n) \in \text{PCS}(S, N_{v,i} - S) \\ (i,j) \in E_S - E_{S,I}}} M_{ij}^{mn} + M_{ji}^{mn} < |\text{PCS}(S, N_{v,i} - S)| \quad (5)$$

节点映射约束:

$$\left. \begin{aligned} \forall i \in N_s, \sum_{m \in N_v} x_i^m &\leq 1 \\ \forall m \in N_v, \sum_{i \in N_s} x_i^m &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

说明: 通常虚拟网络节点映射开销是固定的, 所以不同虚拟网络映射方案映射开销的不同主要取决于链路映射开销的不同, 因此我们以式(1)作为该模型的目标函数。式(2), 式(3), 式(4)分别是节点和链路的资源约束以及连通性约束条件。式(5)给出了单节点失效时存在轻量级可靠虚拟网络的映射约束, 应用 3.1 节主割集、副割集的性质, 公式中只考虑虚拟拓扑的主割集而非所有割集, 这个结果大大减少了约束的数量, 降低了计算复杂度。式(6)表示对于同一个虚拟网络请求的虚拟节点必须映射到不同的底层网络节点上。

5 启发式算法

5.1 基于拥塞的启发式算法

整数线性规划(ILP)对于小规模的网络可以快速找到最优解, 但是随着问题规模的增大, 计算时间变得让人难以接受^[12]。本节设计了一种基于拥塞感知的启发式算法来处理可靠的虚拟网络映射问题。目标是当物理网络单条链路失效时最小化映射在该物理链路上的虚拟链路的失效数量。注意该启发式算法不能保证虚拟拓扑在底层链路失效时一定是可靠的, 但是给了快速简单的近似解。下一节将利用这个结果作为求解单节点失效的禁忌搜索算法的初始解。

给定一个带权无向物理拓扑图 $G_S = (N_S, E_S)$ 和一个连通度大于等于 2 的带权无向虚拟拓扑图 $G_V = (N_V, E_V)$ 。虚拟节点的映射方法采用文献[6]的研究成果, 分别将虚拟节点和物理节点按照拓扑

资源值进行排序，然后进行映射。对于映射好的一对虚拟节点采用 K 条最短路径法进行边的映射，具体策略有许多种，我们根据所研究问题的特点选择了最小拥塞路径(LCP)和平均最小拥塞路径策略(LCAP)。一条拥塞路径被定义为路径中包含网络中拥塞的链路，拥塞链路被定义为链路带宽的已有消耗最大，平均拥塞路径被定义为该路径上的所有链路的平均拥塞值，LCAP 被用于多条最小拥塞路径同时存在的情况。

5.2 基于禁忌搜索的轻量级可靠虚拟网络链路映射算法(Tabu-RVNM)

禁忌搜索是目前较好解决 NP 问题的一种元启发式算法^[13]。本节首先给出了该算法的描述，然后将该算法用于解决轻量级可靠虚拟网络链路映射问题。给定问题描述 P ，初始解 S_{ini} 和目标函数 $Obj(S)$ ，禁忌搜索空间 SS ，最优或次优解 S_{opt} ， S 代表问题的解，表示虚拟网络在物理拓扑上的可靠映射。在 SS 中从一个解 S_i 到另一个解 S_j 的移动被视为映射方案的改变。移动的条件是新的解对应的目标函数值大于当前的值。本文所设计的禁忌搜索算法的基本描述如表 1 的算法 1 所示，计算目标函数 $Obj(S)$ 如表 2 的算法 2 所示。

算法 1 的初始值为上节中设计的基于拥塞算法的解。算法的最终目标有两个，一个是保证虚拟网络映射单节点失效时的轻量级可靠，另一个目标是 minimized 底层网络链路带宽的映射消耗，本文设置的第 1 个目标的优先级较高。目标函数被定义为 $Obj(S) = F_S \times TBL + BL_S$ 。 F_S 表示底层网络单节点失效时虚拟网络拓扑除失效节点外仍不连通的数量， TBL 表示底层物理链路带宽值的总和，该值要远大于 BL_S ，目的是保证第 1 个目标的优先级， BL_S 表示可行解 S 中，实际链路映射消耗的带宽值。算法的终止条件是到达预设的移动次数或没有可继续提高目标函数值的移动。

表 1 禁忌搜索算法

算法 1 禁忌搜索算法主程序

- (1) $S_{opt} = S_{ini}; S_i = S_{ini}$
- (2) while (算法终止条件) do
- (3) 在 S_i 的邻域解中搜索当前最优的个体 S_{next} ;
- (4) $S_i = S_{next}$
- (5) If ($Obj(S_{next}) > Obj(S_{opt})$) then
- (6) $S_{opt} = S_{next}$
- (7) end if
- (8) end while

表 2 计算目标函数 $Obj(S)$

算法 2 计算目标函数 $Obj(S)$

- (1) $F_S = 0;$
- (2) For 每个底层节点 N_i do
- (3) 计算假设其失效(与其相连的边也失效)后的虚拟网络连通性;
- (4) If 虚拟拓扑除失效节点外仍不连通 then
- (5) $F_S = F_S + 1;$
- (6) end if
- (7) end for
- (8) 计算当前映射方案所使用的链路带宽值;
- (9) $Obj(S) = F_S \times TBL + BL_S$

6 性能评估与分析

为了验证算法的有效性，我们在先前工作成果^[6,7,14]虚拟网络映射模拟平台上进行了算法实现。在以下小节中，首先对实验相关设置进行描述，然后给出实验结果并进行分析。

6.1 实验设置

底层物理网络拓扑由 GT-ITM 工具随机产生^[15]，其中包含 120 个节点和 600 条链路，与一个中型规模的 ISP 运营商类似。物理网络节点计算资源与链路带宽资源服从 30~80 的均匀分布。虚拟网络节点的度为 2~5，节点个数随机产生且服从 3~10 的均匀分布，每一对虚拟网络节点以 0.5 的概率相连。虚拟网络节点计算资源需求服从 0~15 的均匀分布，链路带宽资源需求服从 0~30 的均匀分布。我们假设在每 100 个时间单元内虚拟网络请求的到达服从均值为 5 的泊松分布，每一个虚拟网络的生存时间服从指数分布，其平均生存时间为 600 个时间单元。实验中设置节点失效的间隔时间为 20000 个时间单位，并假设在下一失效到来前上一次的失效节点已被修复。每次模拟实验运行 50000 个时间单元，大约包含 2500 个虚拟网络请求。

我们的模拟实验对以下 3 种虚拟网络映射算法(表 3)进行了比较和评估，所有被评估的算法均采用相同的底层网络资源与虚拟网络请求作为输入。

6.2 模拟实验结果与分析

从虚拟网络可靠性来看，Tabu-RVNM 和 DP-VNE 算法能保证同一个割集的虚拟链路不会共享同一个底层物理链路，而 Hybrid-SVNE 则通过冗余的方式保护失效链路，因此当底层网络单节点失效时，3 个算法都能保证虚拟拓扑除失效虚拟节点外仍保持连通，从而降低服务运营商的损失。除此以外，对于实际的虚拟网络映射算法，在满足虚拟网络可靠性需求的同时，应该尽可能地高效利用底

表 3 比较算法

算法名称	算法描述
Tabu-RVNM	本文所提出的基于拓扑感知节点映射和禁忌搜索寻优链路映射的轻量级可靠虚拟网络映射算法。
Hybrid-SVNE	文献[8]中所提出的可靠虚拟网络映射算法, 底层预先分配保护路径。
DP-VNE	简单地将每个虚拟链路映射到不交叉的底层物理链路上, 以保证虚拟网络的可靠性, 其它设置同 Tabu-RVNM。

层网络资源以映射更多的虚拟网络请求, 为底层网络运营商带来更多的收益。因此实验选取了以下 4 个常用指标对 3 个算法进行了比较, 分别是底层网络长期运行平均收益(一段时间内底层网络承载虚拟网络所获收益的平均值), 虚拟网络请求接受率(成功映射的虚拟网络个数/所有虚拟网络请求个数), 底层网络长期收益开销比(一段时间内底层网络承载虚拟网络所获收益/承载虚拟网络资源开销)和虚拟请求平均完成时间。下面是通过模拟实验得出的结果:

(1)Tabu-RVNM 算法的长期运行平均收益和虚拟网络请求接受率高于 Hybrid-SVNE 和 DP-VNE 算法。如图 2 和图 3 所示, 算法 Tabu-RVNM 的底层网络长期运行平均收益相比于 Hybrid-SVNE 平均高出 7.7%, 相比于 DP-VNE 平均高出 15.6%。这是因为 Tabu-RVNM 的拓扑感知节点映射策略在虚拟网络映射成功率方面优于 Hybrid-SVNE 中采用的映射策略, 且 Tabu-RVNM 不用预留底层保护资源, 使底层网络资源能用来映射更多的虚拟网络, 提高了虚拟网络的接受率, 从而获得了较高的收益。而 DP-VNE 算法在链路映射阶段很难为所有的虚拟网络链路找到底层不相交的路径, 从而导致较低

的虚拟网络接受率和长期平均收益。

(2)Tabu-RVNM 算法的长期收益开销比低于 Hybrid-SVNE 和 DP-VNE 算法。如图 4 所示, 从长期收益开销比来看, Tabu-RVNM 高于其它两种算法, 主要是因为 Hybrid-SVNE 预先分配了保护资源, 使底层可用于映射虚拟链路的资源减少, 从而降低了资源利用率。而 DP-VNE 算法为了找到不相交的两条路径, 可能不得不映射到较长的底层物理链路上, 从而增加了映射开销。

(3)Tabu-RVNM 算法所用的执行时间略高于其它两个算法。如图 5 所示, 由于 DP-VNE 采用了简单链路映射策略, 所以其执行时间最短, 大约为 0.9 s, 而 Hybrid-SVNE 由于备用链路的计算和工作链路的重建, 使执行时间变长, 平均为 1.6 s, 而 Tabu-RVNM 使用了元启发式算法一定程度上增长了计算时间, 平均为 1.9 s。但是与其它两个算法相比, 该算法提高了长期平均收益和虚拟请求接受率, 并获得了更小的映射代价。需要强调的是 Tabu-RVNM 算法在处理虚拟网络请求依然是秒级的, 我们相信这样的时间能够满足在线虚拟网络映射的需求。

7 结束语

本文对轻量级可靠虚拟网络映射问题进行研究, 在不预留保护资源的情况下, 当底层物理网络单节点失效时虚拟网络拓扑除失效节点外仍保持连通, 将服务运营商的损失降到最低。文章对该问题构建了整数线性规划模型, 并设计了一种新的启发式算法对其进行求解。模拟实验结果表明, 本文提出的算法在满足虚拟网络轻量级可靠需求的同时, 仍能达到较高的长期收益和底层网络资源利用率。

现有可靠虚拟网映射研究主要集中于底层物理网络的单域映射, 而多域映射的研究还很少, 今后我们将在现有工作的基础上进一步研究多底层物理网络映射的可靠性问题。

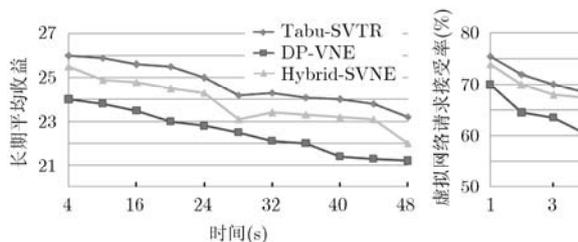


图 2 底层网络长期运行平均收益

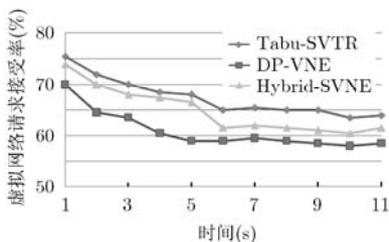


图 3 虚拟网络请求接受率

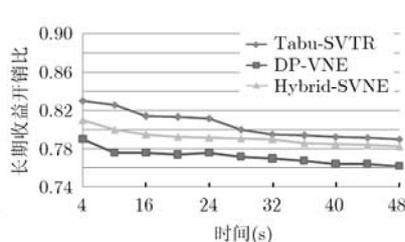


图 4 底层网络长期收益开销比 R/C

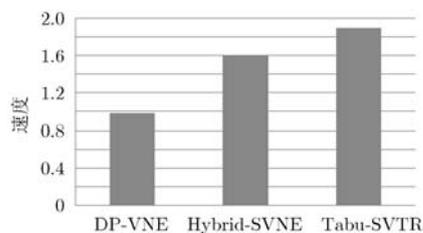


图 5 一个虚拟请求的平均完成时间

参 考 文 献

- [1] Feamster N, Gao L, and Rexford J. How to lease the Internet in your spare time[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007, 37(1): 61-64.
 - [2] 程祥, 张忠宝, 苏森, 等. 虚拟网络映射问题研究综述[J]. *通信学报*, 2011, 32(10): 143-151.
Cheng Xiang, Zhang Zhong-bao, Su Sen, et al.. Survey of virtual network embedding problem[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(10): 143-151.
 - [3] Yu M, Yi Y, Rexford J, et al.. 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, and 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 and Karl H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[C]. Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures, ACM, 2009: 81-88.
 - [6] Cheng X, Su S, Zhang Z, et al.. Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(2): 39-47.
 - [7] 程祥, 张忠宝, 苏森, 等. 基于粒子群优化的虚拟网络映射算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(10): 2240-2244.
Cheng Xiang, Zhang Zhong-bao, Su Sen, et al.. Virtual network embedding based on particle swarm optimization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(10): 2240-2244.
 - [8] Rahman M, Aib I, and Boutaba R. Survivable virtual network embedding[C]. Proceedings of the 9th International Networking Conference, Chennai, India, 2010: 40-52.
 - [9] Chen Y, Li J, Wo T, et al.. Resilient virtual network service Provision in Network Virtualization environments[C]. Proceedings of IEEE ICPADS, Shanghai, Dec. 8-10, 2010: 51-58.
 - [10] Yeow W L, Westphal C, and Kozat U. Designing and embedding reliable virtual infrastructures[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(2): 51-64.
 - [11] West D B. Introduction to Graph Theory[M]. Fourth Edition, New Jersey, Prentice hall, 2006: 123-125.
 - [12] Karp R M. On the computational complexity of combinatorial problems[J]. *Networks*, 2004, 5(175): 45-68.
 - [13] Glover F and Laguna M. Tabu Search[M]. <http://www.books.google.com>, 2000.
 - [14] Cheng X, Su S, Zhang Z, et al.. Virtual network embedding through topology awareness and optimization[J]. *Computer Networks*, 2012, 56(6): 1797-1813.
 - [15] Zegura E W, Calvert K L, and Bhattacharjee S. How to model an Internetwork[C]. Proceedings IEEE INFOCOM, San Francisco, Mar. 24-28, 1996, 2: 594-602.
- 刘光远：男，1981年生，博士生，研究方向为下一代网络与网络虚拟化。
- 苏森：男，1971年生，教授，主要研究方向为云计算与网络虚拟化。