

基于节点邻近感知与路径综合评估的虚拟网络映射算法

赵志远* 孟相如 苏玉泽 李振涛
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 该文针对虚拟网络映射过程中节点与链路映射关联性差、虚拟邻接节点映射距离远和相邻节点链路资源消耗不均衡的问题,提出一种两阶段的基于节点邻近感知与路径综合评估的虚拟网络映射算法(NA-PVNM)。在节点映射阶段,首先对虚拟节点按照资源请求和广度优先搜索算法排序,然后对每个虚拟节点的候选物理节点考虑资源丰富度和拓扑邻近性,建立了节点适应值函数计算最佳映射节点。在链路映射阶段,采用 k 最短路径算法,对每条候选路径考虑可用带宽、途经物理节点资源最大值和路径跳数,通过路径适应值函数计算最佳路径。仿真结果表明算法降低了链路映射长度,提高了虚拟网络请求接受率和收益开销比。实验分析了位置约束和物理网络拓扑性质对算法性能的影响以及映射过程中物理网络资源占用情况。实验结果表明,在物理资源分布和虚拟网络请求的条件约束下,提高虚拟网络映射成功率的关键在于减少映射时的资源消耗。

关键词: 虚拟网络映射; 节点邻近感知; 路径综合评估; 性能分析

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-1979-07

DOI: 10.11999/JEIT161252

Virtual Network Mapping Algorithm Based on Node Adjacent-awareness and Path Comprehensive Evaluation

ZHAO Zhiyuan MENG Xiangru SU Yuze LI Zhentao

(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To solve the problems of poor correlation in node mapping and link mapping, wide apart of adjacent virtual node during mapping and imbalance resource consumption of nodes with their adjacent links, a two-stage Virtual Network Mapping algorithm is proposed based on Node Adjacent-awareness and Path comprehensive evaluation (NA-PVNM). In the stage of node mapping, firstly, virtual nodes are ranked according to resources request and breadth-first search, secondly, a node fitness function is set to find the best node in candidates of a virtual node, which takes resource richness and topology connection feature into account. In the stage of link mapping, a path fitness function is set to find the best path in candidates, which takes available bandwidth, node resource and hops of path into account. Simulation results show that the path distances of virtual links are reduced, the acceptance ratio and revenue/cost ratio of virtual networks are improved using the proposed NA-PVNM algorithm. The influence of location constraint and substrate topology feature on algorithm performance, and the resource occupancy of substrate network during mapping are analyzed by experiments. Experimental results show that, under the constraint of physical resource distribution and virtual network requests, the critical factor of improving success rate is to reduce resource consumption during mapping.

Key words: Virtual network mapping; Node adjacent-awareness; Path comprehensive evaluation; Performance analysis

1 引言

网络虚拟化技术被视为下一代互联网的关键技术^[1,2],它通过资源抽象、隔离等机制,支持多个虚拟网络并行且互不干扰的运行在共享的底层物理网

络上,每个虚拟网络可以独立运行自己特定的网络架构、协议和服务。虚拟网络映射是网络虚拟化研究的关键问题,引起了学术界的广泛关注。该问题被证明是 NP 难问题,目前研究主要以提高虚拟网络请求接受率和物理网络收益等为目标,设计启发式算法^[3-15]或采用元启发式算法^[16,17]获得近似最优解。

虚拟网络映射问题^[18]可以分解为节点映射和链路映射问题。文献[3]提出贪婪映射算法,将资源请

收稿日期: 2016-11-17; 改回日期: 2017-03-20; 网络出版: 2017-05-02

*通信作者: 赵志远 zhaozhiyuan_0815@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401499)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61401499)

求多的虚拟节点映射到资源充裕的物理节点上, 以 k 最短路径算法进行链路映射。在此基础上, 文献[4]在物理节点排序过程中考虑节点连接度, 缩短映射过程中节点距离。文献[6]提出拓扑感知的映射算法, 考虑节点度数、邻边带宽和、接近中心性和介数等指标对节点综合排序, 文献[7]采用 TOPSIS 方法实现对节点的多指标排序, 可以有效缩短算法求解时间和提高映射成功率。文献[8]采用图的广度优先搜索遍历方法和节点同步遍历策略, 协调完成虚拟节点和链路的映射, 降低了虚拟链路的映射路径长度。为均衡映射效果和算法效率, 近年来启发式算法多考虑拓扑属性和节点邻近性。在某些应用场景, 虚拟网络映射需要考虑位置约束, 表现为物理节点和虚拟节点的位置坐标及虚拟节点映射的距离约束。位置约束限制了虚拟网络映射的解空间, 对映射性能产生重要影响。文献[7]和文献[15]设置节点映射的距离约束为物理节点区域范围的 $1/2$, 文献[16]距离约束为 $1/10$, 上述研究将位置约束作为一个限制条件, 但没有分析其对算法性能的影响。此外, 绝大多数文献研究映射问题使用的底层网络拓扑是随机拓扑, 具有一定的局限性。

在现有研究基础上, 本文工作包括两部分。一是在考虑位置约束前提下提出一种两阶段的基于节点邻近感知与路径综合评估的虚拟网络映射算法 (NA-PVNM)。二是设计仿真实验, 分别验证了本文算法性能, 讨论了位置约束对算法性能的影响, 初步探讨了物理网络拓扑性质对算法性能的影响, 分析提高虚拟网络请求接受率的关键要素。

2 虚拟网络映射问题描述

2.1 网络模型

(1) 物理网络: 物理网络表示为带权无向图 $G_s = (N_s, L_s, A_s^N, A_s^L)$, 其中, N_s 为物理节点集合, 其数量为 $|N_s|$, L_s 为物理链路集合, 其数量为 $|L_s|$, A_s^N 为物理节点属性集合, 对节点 $n_s \in N_s$, 属性包括剩余节点 CPU 资源 $c(n_s)$ 和节点位置 $lc(n_s)$, 其中 $lc(n_s) = (x_s, y_s)$, 为节点的 2 维坐标, A_s^L 为物理链路属性集合, 对链路 $l_s \in L_s$, 属性为剩余链路带宽资源 $bw(l_s)$ 。

(2) 虚拟网络请求: 虚拟网络请求表示为带权无向图 $G_v = (N_v, L_v, A_v^N, A_v^L, T_v)$, 其中, N_v 为虚拟节点集合, 其数量为 $|N_v|$, L_v 为虚拟链路集合, 其数量为 $|L_v|$, A_v^N 为虚拟节点属性集合, 对节点 $n_v \in N_v$, 属性包括节点 CPU 资源需求 $c(n_v)$, 节点位置 $lc(n_v)$ 和映射位置约束 $D(n_v)$, A_v^L 为虚拟链路属性集合, 对链路 $l_v \in L_v$, 属性为链路带宽资源需求 $bw(l_v)$, T_v 为

虚拟网络生存时间。

(3) 虚拟网络映射: 虚拟网络映射定义为满足虚拟网络资源需求与位置约束的从 G_v 到 G_s 子集的映射关系, $M: G_v \rightarrow (N_s^z, L_s^z, R_N, R_L)$, 其中, $N_s^z \in N_s$, $L_s^z \in L_s$, R_N 和 R_L 是分配给虚拟网请求的节点 CPU 资源和带宽资源。

2.2 评价指标

虚拟网络映射问题是节点和链路资源约束下的一个多目标优化问题, 主要目标是在虚拟网络请求到达和生存期持续过程中, 充分利用物理网络资源, 提高收益, 减小开销。本文以物理网络的请求接受率、收益开销比和链路映射平均跳数评价算法性能。

(1) 请求接受率: 定义为一定时间内成功映射的虚拟网络数量与全部到达的虚拟网络请求数量之比

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T \text{VN}_m(t)}{\sum_{t=0}^T \text{VN}(t)} \quad (1)$$

式中, $\text{VN}(t)$ 是 t 时刻虚拟网络请求集合, $\text{VN}_m(t)$ 为 t 时刻物理网络中运行的虚拟网络集合。

(2) 物理网络收益开销比: 定义时刻 t 虚拟网络请求 G_v 的收益为

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

式中, α 是节点收益与链路收益的均衡权重, 本文 $\alpha = 1$ 。

定义时刻 t 虚拟网络请求 G_v 的开销为

$$C(G_v, t) = \sum_{n_v \in N_v} c(n_v) + \beta \sum_{l_v \in L_v} h(l_v) \cdot bw(l_v) \quad (3)$$

式中, $h(l_v)$ 是虚拟链路 l_v 映射到物理路径的跳数, β 是物理节点与链路开销的均衡权重, 本文 $\beta = 1$ 。

物理网络的收益开销比定义为

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

(3) 链路映射平均跳数: 定义为虚拟网请求中所有虚拟链路映射的物理路径跳数的平均值

$$\bar{h}(G_v) = \sum_{l_v \in L_v} h(M^L(l_v)) / |L_v| \quad (5)$$

式中, $M^L(l_v)$ 是虚拟链路 l_v 映射到的物理路径。

3 基于节点邻近感知与路径综合评估的虚拟网络映射算法

3.1 节点映射

由于底层物理网络节点资源有限, 资源需求量

大的虚拟节点更难映射成功，所以优先映射这类节点。同时，为保证虚拟网络中相邻节点在映射到物理网络后仍然保持邻近性，引入广度优先搜索算法。定义虚拟节点请求资源丰富度函数：

$$R(n_v) = c(n_v) \sum_{l_v \in L(n_v)} bw(l_v) \quad (6)$$

式中， $L(n_v)$ 是虚拟节点 n_v 在虚拟网络中的邻边集合。

虚拟节点排序过程中，以 $R(n_v)$ 最大的虚拟节点为根节点，运行广度优先搜索算法(Breadth First Search, BFS)，将剩余虚拟节点按照与根节点的距离划分为集合 $\Omega_{n_v}^1, \Omega_{n_v}^2, \dots, \Omega_{n_v}^n$ ，其中 $\Omega_{n_v}^i$ 代表距离根节点 i 跳的虚拟节点集合，并对每一个 $\Omega_{n_v}^i$ 中的虚拟节点按 $R(n_v)$ 值从大到小排序，最后得到虚拟节点的映射顺序。

物理节点排序过程考虑物理节点的资源丰富度和邻近性原则，定义物理节点适应值函数

$$NF(n_s) = \frac{R(n_s)}{D(n_s) + \varepsilon} \quad (7)$$

式中， $R(n_s)$ 采用式(6)计算， ε 是一个非常小的正数，避免分母为零。 $D(n_s)$ 为物理节点的距离参数，计算该参数时，首先取待映射虚拟节点 n_{vi} 满足位置约束和 CPU 约束的候选物理节点集合 $Ca(n_{vi}) = \{n_s | d(lc(n_{vi}), lc(n_s)) \leq D(n_{vi}), c(n_{vi}) \leq c(n_s)\}$ ，然后取 n_{vi} 在虚拟网络的邻居节点中已映射成功的虚拟节点所对应的物理节点集合 $Em(n_{vi}) = \{n_s | n_v \uparrow n_s, h(n_v, n_{vi}) = 1\}$ ，其中， $n_v \uparrow n_s$ 代表 n_v 映射到 n_s ， $h(n_v, n_{vi}) = 1$ 代表虚拟网络中 n_v 到 n_{vi} 距离为 1 跳。最后，定义每一个候选物理节点的距离参数为

$$D(n_s) = \sum_{n_k \in Em(n_{vi})} h(n_s, n_k), n_s \in Ca(n_{vi}) \quad (8)$$

节点映射算法的主流程如表 1 所示。

3.2 链路映射

计算源、目的物理节点间的 k 条最短路径，对每一条路径 $p_k = (N_k, P_k)$ ，其中， N_k 为路径经过节点集合， P_k 为路径经过链路集合，定义路径适应值函数：

$$PF(p_k) = \frac{\min_{l_s \in P_k} bw(l_s)}{\max_{n_s \in N_k} c(n_s)} \frac{1}{h(p_k)} \quad (9)$$

其中， $\min_{l_s \in P_k} bw(l_s)$ 为路径可用带宽， $\max_{n_s \in N_k} c(n_s)$ 为路径经过物理节点可用节点资源的最大值， $\min_{l_s \in P_k} bw(l_s) / \max_{n_s \in N_k} c(n_s)$ 用于均衡物理网络中节点资源与链路资源消耗，减小资源碎片产生的可能， $h(p_k)$ 为路径 p_k 的跳数。链路映射算法的主流程如表 2 所示。

表 1 节点映射算法

| 输入: | G_s, G_v |
|------|---|
| 输出: | NodeMappingList |
| (1) | for 每一个虚拟节点 $n_v \in N_v$ do |
| (2) | 计算 n_v 的资源需求 $R(n_v)$ |
| (3) | end for |
| (4) | 以 R 最大的虚拟节点 n_{vi} 为根节点运行 BFS 算法，将剩余虚拟节点划分为集合 $\Omega_{n_v}^1, \Omega_{n_v}^2, \dots, \Omega_{n_v}^n$ |
| (5) | 对 $\Omega_{n_v}^i$ 中的虚拟节点，根据 $R(n_v)$ 从大到小重新排序，结果存入 VirtualNodeList |
| (6) | for VirtualNodeList 中的每一个虚拟节点 n_v do |
| (7) | 取满足位置约束和节点资源约束的候选节点集合 $Ca(n_{vi})$ |
| (8) | If $Ca(n_{vi})$ 为空 then |
| (9) | Return NODE_MAPPING_FAILED |
| (10) | else |
| (11) | 取 n_{vi} 已映射邻居节点对应的物理节点集合 $Em(n_{vi})$ |
| (12) | for $Ca(n_{vi})$ 中每一个候选节点 n_s |
| (13) | 计算 $NF(n_s)$ |
| (14) | end for |
| (15) | 将 n_v 映射至 NF 最高的候选节点上，并将映射结果存入 NodeMappingList 中 |
| (16) | end if |
| (17) | end for |
| (18) | return NODE_MAPPING_SUCCESS |

表 2 链路映射算法

| 输入: | $G_s, G_v, NodeMappingList$ |
|------|---|
| 输出: | LinkMappingList |
| (1) | for 每条待映射的虚拟链路 $l_{uv} \in L_v$ do |
| (2) | 运行 k 最短路径算法，得到节点 u, v 间 k 条满足带宽需求的路径集 Pathlist |
| (3) | if Pathlist 为空 then |
| (4) | return LINK_MAPPING_FAILED |
| (5) | else |
| (6) | for each $p_i \in Pathlist$ |
| (7) | 计算 $PF(p_i)$ |
| (8) | end for |
| (9) | 将 l_{uv} 映射到 PF 最大的路径上，并将映射结果存入 LinkMappingList 中 |
| (10) | end if |
| (11) | end for |
| (12) | return LINK_MAPPING_SUCCESS |

算法时间复杂度包括，节点映射算法计算底层节点间最短路径，时间复杂度为 $O(|N_s|^2)$ ，对每一个虚拟节点计算每一个候选节点的 NF ，复杂度为 $O(|N_v| |N_s|^2)$ 。链路映射算法采用 k 最短路径法求解，采用 Yen 算法时间复杂度为 $O(k|N_s|(|L_s| + |N_s| \cdot \lg |N_s|))$ 。算法总时间复杂度为 $O(|N_v| |N_s|^2 +$

$k|N_s|(|L_s|+|N_s|\lg|N_s|)$ ，是多项式时间内可解的启发式算法。

4 性能评估与分析

实验通过 Matlab 进行仿真评估。采用改进的 Salam 网络拓扑随机生成算法生成底层物理网络和虚拟网络请求。底层物理网络在 $L \times L = 1000 \times 1000$ 范围内生成均匀分布的 100 个节点，生成 500 余条链路，物理网络节点资源和链路带宽资源服从 [50, 100] 的均匀分布。节点间连接概率为 $P = \beta_1 e^{\left(\frac{-d^5}{\alpha_1 L}\right)}$ ，

其中 α_1, β_1 为网络特征参数，分别控制网络中短链路相对长链路的比例和链路数量， d 为节点距离。虚拟网络节点在 $L \times L = 1000 \times 1000$ 的范围内均匀分布，节点个数服从 [5,15] 均匀分布，平均度值 $\langle k \rangle = 2|L_v|/|N_v| \approx 5$ ，节点资源和链路带宽资源服从 [10, 30] 均匀分布，设置所有节点位置约束 $D(n_{vi}) = 150$ 。设置虚拟网络请求到达服从泊松分布，每 100 时间单位到达数量为 10，生存期服从均值为 200 的指数分布。仿真运行时间为 3000 个时间单位，包含大约 300 个虚拟网络请求。为避免随机因素对实验结果产生扰动，仿真实验共进行 10 次，并取实验结果的平均值作为最终仿真结果。

实验分为 4 个部分，一是验证所提算法的性能，二是实验分析位置约束对算法性能的影响，三是实验分析物理网络拓扑性质对算法性能的影响，四是实验分析不同条件下映射过程中的物理网络资源占用情况。

4.1 算法性能比较

将本文提出 NA-PVNM 算法与贪婪算法 G-SVNM^[3]、文献[4]中 TC-KVNM 算法和文献[7]中 TA-KVNM 算法，从虚拟网络请求接受率和收益开销比两个方面进行比较。

图 1 所示为 4 种算法的性能比较。图 1(a)为请求接受率的变化情况，NA-PVNM 算法最高，约为 66%，贪婪算法最低，约为 61%。图 1(b)为收益开

销比的变化情况，NA-PVNM 算法最高，约为 0.4，贪婪算法最低，约为 0.37。仿真结果说明 NA-PVNM 算法性能较好。

仿真结果显示 4 种算法性能很接近。分析认为当位置约束较小时，节点映射的选择有限，同时由于底层物理网络拓扑比较均匀，使距离约束范围内路径跳数差距不大，导致链路映射差距小。这两个因素共同限制了映射算法的解空间。对此，本文设计实验研究并分析位置约束和物理网络性质对算法性能的影响，分析能够提高虚拟网络映射成功率的因素。

4.2 位置约束对算法性能影响

从请求接受率、收益开销比、链路映射平均跳数 3 方面研究位置约束对算法性能的影响。

其他参数不变，分别设置所有节点位置约束 $D(n_{vi}) = 400, D(n_{vi}) = 1000$ ，仿真 4 种算法的性能变化如图 2 所示。可以看出，NA-PVNM 算法性能最好，同时位置约束对算法性能差异影响较大。放宽节点位置约束后，NA-PVNM 算法和 TC-KVNM 算法的请求接受率和收益开销比均有较大提高，而 TA-KVNM 算法和 G-SVNM 算法的性能变化不大。

计算不同 $D(n_{vi})$ 下 4 种算法 \bar{h} 如表 3 所示。可以看出，随着 $D(n_{vi})$ 增大，NA-PVNM 算法和 TC-KVNM 算法的 \bar{h} 减少，TA-KVNM 算法和 G-SVNM 算法的 \bar{h} 变化不大。由于前两者使虚拟节点映射更邻近，链路映射的路径长度减少，使链路带宽资源消耗减少，有利于后续虚拟网请求的映射成功，消耗减少也使收益开销比提高，而后两者算法的节点映射没有考虑距离因素，位置约束对算法性能的影响很小。

实验表明，放宽位置约束，虚拟链路映射跳数减少，有利于提高虚拟网络请求接受率和收益开销比。

4.3 物理网络对算法性能影响

从请求接受率、收益开销比和链路映射平均跳数 3 个方面研究物理网络拓扑性质对算法性能的影响。

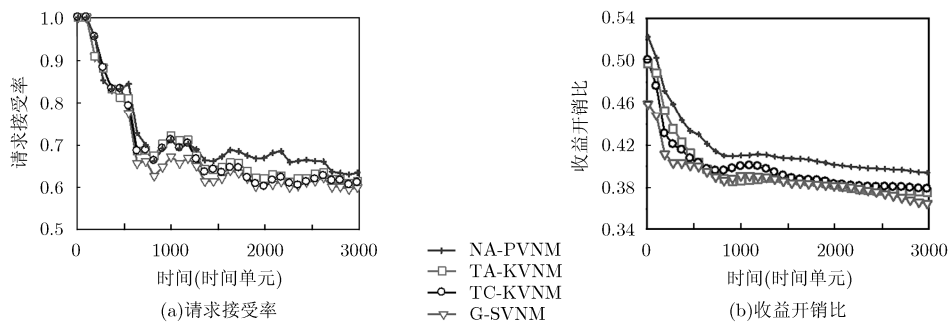


图 1 4 种算法性能比较

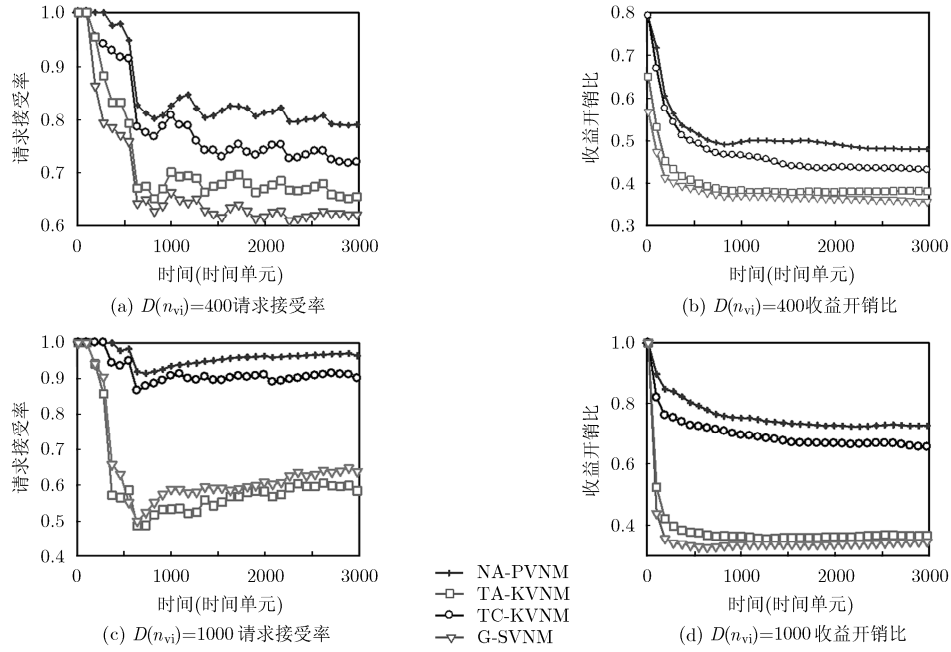


图 2 不同位置约束条件下 4 种算法性能比较

表 3 不同位置约束条件下 4 种算法的链路映射平均跳数

| | NA-PVNM | TA-KVNM | TC-KVNM | G-SVNM |
|--------------------|---------|---------|---------|--------|
| $D(n_{vi}) = 150$ | 3.2735 | 3.3690 | 3.3287 | 3.4565 |
| $D(n_{vi}) = 400$ | 2.5617 | 3.2963 | 2.7699 | 3.5741 |
| $D(n_{vi}) = 1000$ | 1.3590 | 3.4730 | 1.5060 | 3.9085 |

响。4.1 节中物理网络短链路相对长链路比例大，导致两个节点距离越远，其最短路径的跳数越大。对此，通过调整 α, β 改变物理拓扑结构，并引入网络直径和平均最短路径两个指标描述物理网络拓扑性质。分别定义网络直径 ND 和平均最短路径 NL 为

$$ND = \max_{i,j} d_{ij} \quad (10)$$

$$NL = \frac{1}{|N_s|(|N_s|-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (11)$$

式中， d_{ij} 为节点 i 和 j 间最短路径长度。

记 4.1 节物理网络为 SN1，生成两个新的物理网络，3 个物理网络的节点数、链路数、节点资源和链路资源总数相近，差别在于 ND 和 NL。SN1 短链路多，长链路少，ND 和 NL 最大，SN3 长链路

多，短链路少，ND 和 NL 最小，如表 4。

其他参数不变，设置 $D(n_{vi}) = 150$ ，仿真 NA-PVNM 算法和 G-SVNM 算法在 3 种物理网络中的性能，结果如图 3 所示。从图中可以看出，物理网络的 NL 越小，两种算法的请求接受率和收益开销比越高。图 3(a)中，请求接受率 SN2 比 SN1 提高约 10%，SN3 比 SN2 提高约 10%，图 3(b)中，收益开销比 SN2 比 SN1 提高约 0.1，SN3 比 SN2 提高约 0.1。可以看出在位置约束下，物理网络平均最短路径长度缩小对两种算法性能差异影响不大。

相同位置约束下，对比 3 种网络的平均最短路径长度、两种算法的 \bar{h} 如表 5 所示。可以看出，物理网络的平均最短路径长度对算法的 \bar{h} 影响很大，两者呈正相关。物理网络平均最短路径长度越小，

表 4 物理网络拓扑属性

| 物理拓扑 | $ N_s $ | $\sum_{n_s \in N_s} c(n_s)$ | $ L_s $ | $\sum_{l_s \in L_s} bw(l_s)$ | ND | NL |
|------|---------|-----------------------------|---------|------------------------------|----|--------|
| SN1 | 100 | 7581 | 501 | 37155 | 8 | 3.4844 |
| SN2 | 100 | 7481 | 510 | 38470 | 6 | 2.9293 |
| SN3 | 100 | 7563 | 509 | 38005 | 4 | 2.2149 |

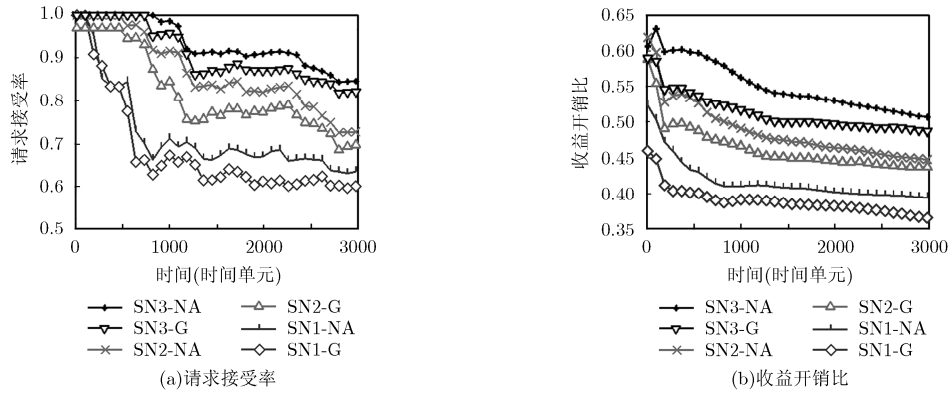


图 3 不同物理拓扑性质下两种算法性能比较

表 5 物理网络的平均最短路径长度与算法链路映射平均跳数

| | NL | NA-PVNM 算法 \bar{h} | G-SVNM 算法 \bar{h} |
|-----|--------|----------------------|---------------------|
| SN1 | 3.4844 | 3.2735 | 3.4565 |
| SN2 | 2.9293 | 2.8149 | 2.9770 |
| SN3 | 2.2149 | 2.2293 | 2.4951 |

则链路映射时路径长度变短, 消耗物理链路带宽资源减少, 从而提高后续虚拟网请求映射成功率, 虚拟网络收益不变, 开销减少, 从而提高了收益开销比。

实验表明物理网络中有更丰富的长链路时, 虚拟链路映射跳数减少, 有利于提高虚拟网络请求接受率和收益开销比。

4.4 物理网络资源占用情况

4.2 节和 4.3 节的实验结果表明放宽节点映射位置约束和提高物理网络中长链路的比例, 有利于提高虚拟网络请求接受率和收益开销比, 这两种方法的共同特征是, 减小了链路映射跳数, 从而减小物理网络资源的消耗, 进而提高了映射性能。在此基础上, 研究不同参数设置条件下, 映射过程中物理网络资源占用情况, 分析影响算法性能的因素。

对照不同参数对应的请求接受率, 从负载超过

90%的链路数量占物理链路总数量的比例和各时刻物理链路占用带宽占总体链路带宽的比例的时间平均值两方面进行比较。前一指标是考虑到参数设置中虚拟链路最小带宽需求为 10, 物理链路带宽最大为 100, 物理网络中负载超过 90%的链路为瓶颈链路。后一指标反映了物理网络资源的整体占用情况。

以 SN1, $D(n_{vi}) = 150$ 条件下 G-SVNM 算法的性能为基准, 比较了 NA-PVNM 算法在 3 种物理网络和 $D(n_{vi}) = 150$, SN1 和 3 种 $D(n_{vi})$ 条件下的请求接受率如图 4(a), 负载超过 90%的链路数量占比如图 4(b), 物理链路占用带宽占比的时间平均值如图 4(c)。对比图 4(a), 4(b), 请求接受率与负载超过 90%的链路数量占比的相关性较大, 两者到达稳态的时间相近, 同时, 负载超过 90%的链路数量占比越大, 虚拟网络映射请求接受率越低。

对比图 4(a), 4(c), 请求接受率比较低的几种情况, 其物理链路占用带宽占比的时间平均值非常接近, 说明请求接受率达到稳态后, 实际占用物理网络资源比较接近, 请求接受率高的算法是因为映射同样的虚拟网络, 占用物理网络资源更少, 所以相同资源可以映射更多虚拟网络。综上得出结论, 在物理资源分布和虚拟网络请求位置约束的条件约束下, 物理网络资源利用率达到一定水平后, 由于资

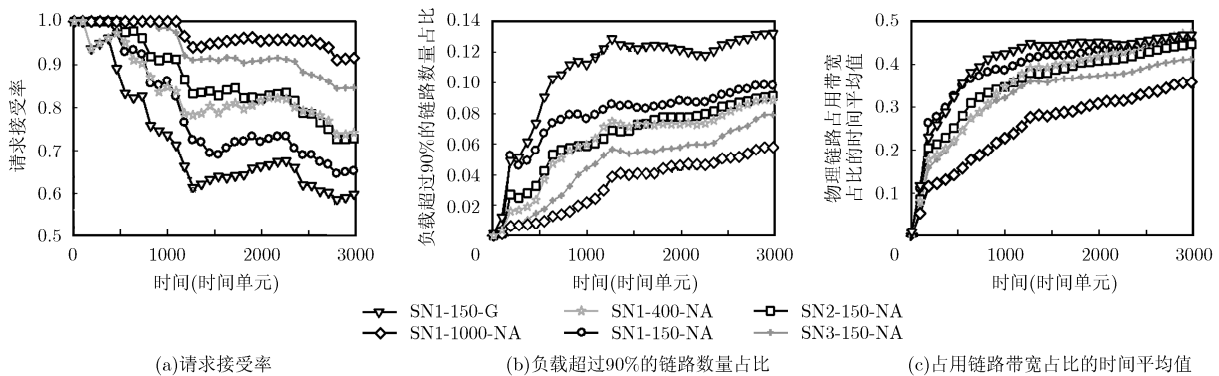


图 4 算法性能比较

源瓶颈导致虚拟网络映射成功率下降或达到稳态, 此时, 提高虚拟网络映射请求接受率的关键在于减少映射时的资源消耗。

5 结束语

本文提出一种两阶段虚拟网络映射算法, 实验表明该算法减少了虚拟链路的映射长度, 提高了请求接受率和开销收益比。实验分析了位置约束和物理网络拓扑性质对算法性能的影响以及映射过程中物理网络资源占用情况。由实验得出结论, 在物理资源分布和虚拟网络请求位置约束的条件下, 物理网络资源利用率达到一定水平后, 由于资源瓶颈导致虚拟网络映射成功率下降或达到稳态, 此时, 提高虚拟网络映射请求成功率的关键在于减少映射时的资源消耗。本文下一步的研究内容是分析其他类型复杂网络和网络的其他统计参量对算法的影响, 以及虚拟网络重配置算法及其对虚拟网络映射性能的影响。

参考文献

- [1] WANG A, IYEN M, DUTTA R, *et al.* Network virtualization: Technologies, perspectives, and frontiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 523-537.
 - [2] ANDERSON T, PETERSON L, SHENKER S, *et al.* Overcoming the Internet impasse through virtualization[J]. *Computer*, 2005, 38(4): 34-41.
 - [3] YU M L, 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] CUI H Y, GAO W J, LIU J, *et al.* A virtual network embedding algorithm based on virtual topology connection feature[C]. IEEE 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Atlantic City, 2013: 1-5.
 - [5] HOUDA J and DJAMAL Z. An adaptive load balancing scheme for evolving virtual networks[C]. 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas City, 2015: 492-498.
 - [6] FENG M, LIAO J X, WANG J Y, *et al.* Topology-aware virtual network embedding based on multiple characteristics [C]. IEEE ICC 2014-Next-Generation Networking Symposium, Sydney City, 2014: 2956-2962.
 - [7] 龚水清, 陈靖, 黄聪会, 等. 信任感知的安全虚拟网络映射算法[J]. 通信学报, 2015, 36(11): 180-189. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015272.
GONG Shuiqing, CHEN Jing, HUANG Conghui, *et al.* Trust-aware secure virtual network embedding algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(11): 180-189. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015272.
 - [8] 刘光远, 苏森. 可靠的虚拟网络映射算法研究[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1820-1825. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.08.007.
LIU Guangyuan and SU Sen. The research of reliable virtual network mapping algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(8): 1820-1825. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.08.007.
 - [9] DING J, HUANG T, LIU J, *et al.* Virtual network embedding based on real-time topological attributes[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2015, 16(2): 109-118. doi: 10.1631/FITEE.1400147.
 - [10] GONG L, WEN Y, ZHU Z, *et al.* Toward profit-seeking virtual network embedding algorithm via global resource capacity[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, Toronto, 2014: 1-9.
 - [11] NASHIKD S, REAZ A, SHIHABUR R C, *et al.* Connectivity-aware virtual network embedding[C]. IEEE 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, Cyprus City, 2016: 46-54.
 - [12] BECK M T, LINNHOFF P C, FISCHER A, *et al.* A simulation framework for virtual network embedding algorithms[C]. Proceedings of the IEEE Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks), Madeira Island, Portugal, 2014: 1-6.
 - [13] DING J, HUANG T, WANG J, *et al.* Virtual network embedding through node connectivity[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2015, 22(1): 17-23. doi: 10.1016/S1005-8885(15)60620-3.
 - [14] 龚水清, 陈靖, 王威. 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. doi: 10.11999/JEIT141527.
GONG Shuiqing, CHEN Jing, and WANG Wei. Energy-aware virtual network embedding algorithm for heterogeneous nodes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 2021-2027. doi: 10.11999/JEIT141527.
 - [15] 余建军, 吴春明. 基于负载均衡的虚拟网映射随机算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 69-74.
YU Jianjun and WU Chunming. Randomized algorithm for virtual network mapping problem based on load balancing[J]. *Computer Science*, 2014, 41(6): 69-74.
 - [16] 贾伟, 夏靖波. 跨域虚拟网络映射问题研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 728-734. doi: 10.11999/JEIT150656.
JIA Wei and XIA Jingbo. Research on virtual network embedding across multiple domains[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 728-734. doi: 10.11999/JEIT150656.
 - [17] ZHANG Z B, SU S, LIN Y, *et al.* Adaptive multi-objective artificial immune system based virtual network embedding[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 53(1): 140-155. doi: 10.1016/j.jnca.2015.03.007.
 - [18] FISCHER A, BOTERO J F, BECK M T, *et al.* Virtual network embedding: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1888-1906.
- 赵志远: 男, 1989年生, 博士, 研究方向为虚拟网络映射、网络优化。
孟相如: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为下一代网络、网络安全。
苏玉泽: 男, 1990年生, 博士, 研究方向为虚拟网络映射、认知网络。
李振涛: 男, 1990年生, 硕士, 研究方向为网络虚拟化、网络故障恢复。