

## 一种基于拓扑势的虚拟网络映射算法

刘新波\* 王布宏 杨智显 刘帅琦  
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

**摘要:** 该文针对现有的虚拟网络映射算法对网络中节点的拓扑属性考虑不够周到, 导致其请求接受率和收益开销比较低的问题, 将物理学里的场论思想引入了虚拟网络映射, 并提出一种基于拓扑势的虚拟网络映射算法。该算法在节点映射阶段, 通过计算节点的拓扑势、节点的资源能力、待映射节点与已映射节点之间的距离, 将虚拟节点映射至最佳的物理节点。在链路映射阶段, 通过计算物理路径的可用带宽和路径跳数, 将虚拟链路映射至最佳的物理路径。仿真实验表明, 该算法在多种虚拟网络到达强度下的请求接受率和收益开销比均优于当前的虚拟网络映射算法。

**关键词:** 网络虚拟化; 虚拟网络映射; 拓扑势

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)07-1684-07

**DOI:** 10.11999/JEIT170981

## A Virtual Network Embedding Algorithm Based on Topology Potential

LIU Xinbo WANG Buhong YANG Zhixian LIU Shuaiqi

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

**Abstract:** To improve the low acceptance ratio and revenue-cost ratio caused by the negligence of the topology attribute of the nodes in the existing virtual network embedding algorithm, the theory of fields in physics is introduced into the virtual network embedding, and a Virtual Network Embedding algorithm based on Topology Potential (TP-VNE) is proposed. In the node embedding stage, the virtual node is embedded onto the optimal physical node by calculating the topology potential of the node, the resource capacity of the node, and the distance between the embedded nodes and the node to embed. In the link embedding stage, the virtual link is embedded onto the best physical path by calculating the available bandwidth of the path and the hops of the path. Experimental results show that the proposed algorithm has the higher acceptance ratio and revenue-cost ratio compared with the existing virtual network embedding algorithm in all simulation conditions.

**Key words:** Network virtualization; Virtual network embedding; Topology potential

### 1 引言

作为计算机科学的重要研究内容之一, 近年来, 网络虚拟化得到了学术界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。该技术可以使多个异构的虚拟网络共享运行于同一个物理网络之上, 从而可以有效地解决当前互联网面临的“僵化”问题和安全性问题等<sup>[4,5]</sup>。虚拟网络映射作为网络虚拟化过程中的资源分配问题, 是网络虚拟化面临的主要挑战之一。由于虚拟网络映射受节点资源约束、链路资源约束、虚拟网络请求随机到达

及接入控制<sup>[6]</sup>等条件限制, 使得对虚拟网络映射问题的求解异常复杂, 目前已证明该问题是NP难问题<sup>[7]</sup>。

为了提高虚拟网络映射算法的运算速度, 并尽量不降低所求解的质量, 大部分学者将虚拟网络映射问题分解为节点映射和链路映射两个阶段, 并采用元启发式算法<sup>[8,9]</sup>或启发式算法<sup>[10-16]</sup>进行求解。早期的研究者<sup>[10-12]</sup>在节点映射过程中仅考虑了节点自身的资源能力, 没有考虑网络的拓扑属性, 导致虚拟网络映射效果不够理想。为了进一步改善虚拟网络映射算法的性能, 在节点映射阶段, 文献[13]引入了马尔科夫随机游走模型, 文献[14]引入了图论中的介数中心性, 文献[15]引入了度中心性和接近中心性, 文献[16]引入了马尔科夫奖励模型, 将节点的拓扑重要性融入了节点的资源能力当中, 使得对节点的排序结果更加合理, 改善了虚拟网络的映射性能。然而, 上述算法仅是简单地将图论中的概念或

收稿日期: 2017-10-20; 改回日期: 2018-02-27; 网络出版: 2018-04-08

\*通信作者: 刘新波 zhongxing83@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401499), 陕西省自然科学基金(2015JM6340)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401499), Shanxi Provincial Natural Science Foundation (2015JM6340)

马尔科夫模型应用于虚拟网络映射，对节点的拓扑属性考虑不够全面。

在物理学里，场表示某一物理量在空间的分布情况，可以用来描述非接触物体间的相互作用。本文将类似的思想应用于网络中，通过模拟网络中节点间的相互作用来确定各个节点的拓扑重要性，并提出了一种基于拓扑势的虚拟网络映射算法 (Virtual Network Embedding algorithm based on Topology Potential, TP-VNE)。与现有算法不同，TP-VNE算法从拓扑和资源两个方面来综合考虑节点的重要程度。仿真实验结果表明，TP-VNE算法在虚拟网络请求接受率和收益开销比等方面优于现有的算法。

## 2 网络模型和问题描述

### 2.1 物理网络

本文使用带权无向图  $G^p = (N^p, E^p)$  来表示物理网络，其中  $N^p$  和  $E^p$  分别为物理节点和物理链路的集合。任一物理节点  $n^p \in N^p$  的属性包括剩余 CPU 资源和位置信息，分别表示为  $\text{cpu}(n^p)$  和  $\text{loc}(n^p)$ 。任一物理链链路  $e^p \in E^p$  的属性取剩余带宽  $b(e^p)$ 。

### 2.2 虚拟网络请求

同样地，我们使用带权无向图  $G^v = (N^v, E^v)$  来表示虚拟网络，其中  $N^v$  和  $E^v$  分别表示虚拟节点和虚拟链路的集合。任一虚拟节点  $n^v \in N^v$  的属性包括 CPU 资源需求和位置信息，分别表示为  $\text{cpu}(n^v)$  和  $\text{loc}(n^v)$ 。任一虚拟链链路  $e^v \in E^v$  的属性取链路带宽需求  $b(e^v)$ 。定义第  $i$  个到达的虚拟网络请求为  $\text{VNR}(i) = (G^v, t_a, t_d)$ ，其中  $G^v$  表示虚拟网络拓扑， $t_a$  表示虚拟网络请求到达时间， $t_d$  表示虚拟网络请求结束时间。

### 2.3 优化目标

虚拟网络映射的优化目标是在整个虚拟网络映射请求随机到达和离开的过程中，高效、合理地利用物理网络资源。本文以虚拟网络请求接受率和物理网络收益开销比作为优化目标。

定义虚拟网络请求接受率为一段时间内映射成功的虚拟网络数量与到达的虚拟网络数量之比，如式(1)：

$$\eta(T) = \frac{\sum_{t=0}^T \text{VNR}_s}{\sum_{t=0}^T \text{VNR}_a} \quad (1)$$

式中， $\text{VNR}_s$  表示虚拟网络映射请求映射成功， $\text{VNR}_a$  表示虚拟网络映射请求到达。

定义  $t$  时刻  $\text{VNR}(i) = (G^v, t_a, t_d)$  的映射收益为

$$R(G^v, t) = \sum_{n^s \in N^v} \text{cpu}(n^s) + \sum_{e^{\text{st}} \in E^v} b(e^{\text{st}}) \quad (2)$$

定义  $t$  时刻  $\text{VNR}(i) = (G^v, t_a, t_d)$  的映射开销为

$$C(G^v, t) = \sum_{n^s \in N^v} \sum_{n^i \in N^p} x_i^s \cdot \text{cpu}(n^s) + \sum_{e^{\text{st}} \in E^v} \sum_{e^{\text{ij}} \in E^p} y_{ij}^{\text{st}} \cdot b(e^{\text{st}}) \quad (3)$$

式中， $x_i^s$  和  $y_{ij}^{\text{st}}$  的定义如式(4)和式(5)：

$$x_i^s = \begin{cases} 1, & \text{虚拟节点 } n^s \text{ 映射至物理节点 } n^i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{ij}^{\text{st}} = \begin{cases} 1, & \text{虚拟链路 } e^{\text{st}} \text{ 映射至物理链路 } e^{\text{ij}} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

物理网络收益开销比定义为一定时间内虚拟网络映射请求的映射收益与映射开销的比值，如式(6)：

$$\kappa(T) = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{G^v \in \text{VNR}_s} R(G^v, t)}{\sum_{t=0}^T \sum_{G^v \in \text{VNR}_a} C(G^v, t)} \quad (6)$$

## 3 多目标虚拟网络映射数学模型

对于在线虚拟网络映射，虚拟网络请求的规模和到达时间都是随机的，若仅以提高虚拟网络请求接受率为映射目标，则有可能拒绝掉规模较大的虚拟网络；若仅以提高物理网络收益开销比为映射目标，则有可能导致虚拟网络请求接受率过低。因此，本文以最大化虚拟网络请求接受率和最大化物理网络收益开销比为映射目标，构建式(7)~式(16)的多目标虚拟网络映射数学模型。

映射目标：

$$\max \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T \text{VNR}_s}{\sum_{t=0}^T \text{VNR}_a} \quad (7)$$

$$\max \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{G^v \in \text{VNR}_s} R(G^v, t)}{\sum_{t=0}^T \sum_{G^v \in \text{VNR}_a} C(G^v, t)} \quad (8)$$

节点和链路约束条件：

$$\forall n^s \in N^v, \forall n^i \in N^p, x_i^s \cdot \text{cpu}(n^s) \leq \text{cpu}(n^i) \quad (9)$$

$$\forall n^s \in N^v, \forall n^i \in N^p, x_i^s \cdot \text{dis}(\text{loc}(n^s), \text{loc}(n^i)) \leq D(n^s) \quad (10)$$

$$\forall n^i \in N^p, \sum_{n^s \in N^v} x_i^s \leq 1 \quad (11)$$

$$\forall n^s \in N^v, \sum_{n^t \in N^p} x_i^s = 1 \quad (12)$$

$$\forall e^{ij} \in E^p, \sum_{e^{st} \in E^v} y_{ij}^{st} \cdot b(e^{st}) \leq b(e^{ij}) \quad (13)$$

$$\forall n^i \in N^p, \forall e^{st} \in E^v, \sum_{n^j \in N^p} y_{ij}^{st} - \sum_{n^j \in N^p} y_{ji}^{st} = x_i^s - x_i^t \quad (14)$$

$$\forall n^s \in N^v, \forall n^i \in N^p, x_i^s \in \{0,1\} \quad (15)$$

$$\forall e^{st} \in E^v, \forall e^{ij} \in E^p, y_{ij}^{st} \in \{0,1\} \quad (16)$$

式(9)表示物理节点的剩余 CPU 资源应不小于其承载的虚拟节点的 CPU 资源需求。式(10)表示物理节点与其承载的虚拟节点之间的欧氏距离应满足虚拟节点对距离的要求。式(11)表示每个物理节点最多只能承载同一虚拟网络映射请求中的一个虚拟节点。式(12)表示任一虚拟节点只能映射到一个物理节点。式(13)表示物理链路的剩余带宽应不小于其承载的虚拟链路的带宽和。式(14)表示任一虚拟链路应该被映射到一条没有环路的物理路径上。式(15), 式(16)表示变量的取值范围约束。

## 4 TP-VNE 算法设计

### 4.1 节点拓扑势

当前, 典型的评估节点拓扑重要性的指标有节点介数、节点度和节点中心接近度, 然而, 这些指标要么具有较强的片面性, 要么过于强调单个节点所起的作用。在物理学中, 常用场来描述两个非接触物体间的相互作用。受该思想启发, 文献[17]将场的思想引入了抽象的数域空间, 并提出了拓扑势的概念, 文献[18]使用拓扑势来评估复杂网络中节点的重要性, 取得了较好的评估效果。在现有研究基础上, 为了评估网络中每个节点的拓扑重要性, 我们假设网络中每个节点都在其周围空间产生一个虚拟的场, 这些场相互叠加, 使每个节点处具有不同的拓扑势。考虑到每个节点的拓扑重要性更容易受其邻近节点性能的影响, 我们使用能够很好表示短程场的高斯函数来表示每个节点在其周围空间产生的拓扑势。节点  $n_i$  处的拓扑势为

$$TP(n_i) = \sum_{k=1}^{|N|} c(n_k) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\text{dis}(n_i, n_k)}{\sigma}\right)^2\right] \quad (17)$$

式中,  $|N|$  表示网络中节点的数量;  $c(n_k)$  表示节点  $n_k$  的拓扑权重, 本文假定所有节点的拓扑权重相同, 均为 1;  $\text{dis}(n_i, n_k)$  表示节点  $n_i$  与  $n_k$  之间的最短距离;  $\sigma$  为距离参数, 表示节点  $n_k$  的影响范围。

从式(17)可以看出, 如果  $\sigma$  取值过大或者过小, 网络中所有节点的拓扑势就会趋于相同, 很难通过拓扑势来区分节点的拓扑重要性。为了选取合适的

$\sigma$  值, 定义如式(18)所示的拓扑势熵, 并通过使拓扑势熵取得最小值来选取  $\sigma$  值。

$$H_{TP} = -\sum_{i=1}^{|N|} \frac{TP(n_i)}{\sum_{k=1}^{|N|} TP(n_k)} \ln \left( \frac{TP(n_i)}{\sum_{k=1}^{|N|} TP(n_k)} \right) \quad (18)$$

### 4.2 节点映射

在该阶段, 首先根据虚拟节点的拓扑势、资源能力和度构造虚拟节点的映射序列, 然后将虚拟节点按顺序映射到综合能力最优的物理节点上。具体的算法步骤如下:

步骤 1 计算虚拟节点的映射权值。考虑到拓扑势高的节点更难映射成功, 资源需求大的节点更难映射成功; 同时考虑到优先映射度大的节点, 可以使后续待映射节点有较多的已映射邻居节点, 有利于实现节点的临近映射, 定义如式(19)所示的虚拟节点映射权值:

$$EV(n^v) = TP(n^v) \cdot R(n^v) \cdot \sqrt{\text{De}(n^v)} \quad (19)$$

式中,  $R(n^v)$  为  $n^v$  的资源能力,  $\text{De}(n^v)$  为  $n^v$  的度。 $R(n^v)$  的定义如式(20):

$$R(n^v) = \text{cpu}(n^v) \cdot \sum_{e^v \in E(n^v)} b(e^v) \quad (20)$$

式中,  $E(n^v)$  表示  $n^v$  的邻边集合;

步骤 2 构造虚拟节点的映射序列。为了降低虚拟网络映射开销, 使映射后的虚拟节点保持较好的临近特性, 本文运用广度优先搜索算法来构造虚拟节点的映射序列, 即以映射权值  $EV(n^v)$  最大的节点为根节点, 对虚拟网络中其余节点进行广度优先搜索, 并将搜索结果按以距根节点的距离升序为主、以  $EV(n^v)$  值降序为辅的原则进行排序;

步骤 3 计算待映射虚拟节点的候选物理节点集合。对于第  $i$  个待映射虚拟节点  $n_i^v$ , 根据节点 CPU 资源约束条件式(9)、节点位置约束条件式(10)、一对一映射约束条件式(11)和式(12)选出其候选物理节点集合  $\Omega(n_i^v)$ , 即

$$\Omega(n_i^v) = \{n^p \mid \text{cpu}(n_i^v) \leq \text{cpu}(n^p) \cap \text{dis}(\text{loc}(n_i^v), \text{loc}(n^p)) \leq D(n_i^v), n^p \in \bar{N}^p\} \quad (21)$$

式中,  $\bar{N}^p$  表示未承载同一虚拟网络映射请求中其余虚拟节点的物理节点集合;

步骤 4 完成对第  $i$  个虚拟节点  $n_i^v$  的映射。考虑到虚拟节点映射应有利于虚拟链路映射, 有利于使物理网络保持负载平衡, 有利于降低虚拟网络的映射开销, 本文定义节点映射函数(Node Embedding Function, NEF), 并将  $n_i^v$  映射至 NEF 值最大的候选物理节点上。NEF 的定义为

$$\text{NEF}(n^p) = \frac{\text{TP}(n^p) \cdot R(n^p)}{\text{DS}(n^p)} \quad (22)$$

式中,  $R(n^p)$  表示  $n^p$  的资源能力,  $\text{DS}(n^p)$  表示候选物理节点到已承载虚拟节点的物理节点的距离和。 $R(n^p)$  的定义为

$$R(n^p) = \text{cpu}(n^p) \cdot \sum_{e^p \in E(n^p)} b(e^p) \quad (23)$$

式中  $E(n^p)$  表示  $n^p$  的临边集合。

步骤 5 如果未完成对所有虚拟节点的映射, 则跳转到步骤 3 继续执行。

TP-VNE 的节点映射算法伪代码程序如表 1 所示。

### 4.3 链路映射

在链路映射阶段, 首先根据虚拟链路的带宽需求大小构造虚拟链路的映射序列, 然后将虚拟链路映射至综合能力最优的物理路径。具体的算法步骤如下:

步骤 1 构造虚拟链路映射序列。将虚拟链路按带宽需求由高到低的顺序构造虚拟链路映射序列, 从而可以优先映射较难映射的带宽需求高的链路;

步骤 2 计算待映射虚拟链路的候选物理路径集合。对第  $i$  条待映射虚拟链路  $e_i^{\text{st}}$ , 先根据  $e_i^{\text{st}}$  的带

宽删除物理网络中不满足带宽约束的物理链路, 然后采用  $k$  最短路径算法, 计算出  $k$  条满足带宽约束的最短路径, 记为  $\Omega(e_i^{\text{st}})$ ;

步骤 3 完成对第  $i$  条待映射虚拟链路  $e_i^{\text{st}}$  的映射。考虑到虚拟链路映射应有利于协调物理链路资源消耗、有利于降低映射开销, 本文定义路径映射函数(Path Embedding Function, PEF), 并将  $e_i^{\text{st}}$  映射至 PEF 值最大的物理路径。PEF 的定义如式(24)所示:

$$\text{PEF}(p) = \frac{b(p)}{\text{hop}(p)^2} \quad (24)$$

式中,  $b(p)$  为路径  $p$  的可用带宽,  $\text{hop}(p)$  为路径  $p$  的跳数;

步骤 4 如果未完成对所有虚拟链路的映射, 则跳转到步骤 2 继续执行。

TP-VNE 的链路映射算法伪代码程序如表 2 所示。

## 5 实验环境设置与结果分析

### 5.1 实验环境设置

本文使用常用的 GT-ITM 网络拓扑生成器来生成物理网络和虚拟网络的网络拓扑。物理网络和虚拟网络的详细参数如表 3 所示。

本文设定位置约束  $D(n^s) = 40$ , 并对比了 3 种算法的性能, 分别为本文提出的基于拓扑势的 TP-VNE 算法, 文献[15]提出的基于 TOPSIS 多属

表 1 TP-VNE 的节点映射算法伪代码

---

```

输入:  $G^p, G^v$ 
输出: Node_Embedding_List
(1)for  $i = 1: |N^v|$  do
(2) 根据式(19)计算  $n_i^v$  的映射权值  $\text{EV}(n_i^v)$ 
(3)end for
(4)以  $\text{EV}(n^v)$  值最大的虚拟节点为根节点, 运行广度优先搜索算法, 构造虚拟节点映射序列
(5)for  $i = 1: |N^v|$  do
(6) 根据式(21)计算虚拟节点映射序列中第  $i$  个待映射节点  $n_i^v$  的候选物理节点集合  $\Omega(n_i^v)$ 
(7) if  $\Omega(n_i^v) \subseteq \emptyset$  then
(8)   Return 节点映射失败
(9) else
(10)  for  $j = 1: |\Omega(n_i^v)|$  do
(11)   根据式(22)计算  $\Omega(n_i^v)$  中第  $j$  个物理节点的 NEF 值, 并标记 NEF 值最大的节点为  $n_{\max}^p$ 
(12)  end for
(13)  将  $n_i^v$  映射至  $n_{\max}^p$ , 并将结果存入 Node_Embedding_List
(14) end if
(15)end for
(16)return 节点映射成功

```

---

表 2 TP-VNE 的链路映射算法伪代码

---

```

输入:  $G^p, G^v, \text{Node\_Embedding\_List}$ 
输出: Link_Embedding_List
(1)将  $e^{\text{st}} \in E^v$  按带宽需求由高到低的顺序构造虚拟链路映射序列
(2)for  $i = 1: |E^v|$  do
(3) 运行  $k$  最短路径算法, 计算出第  $i$  条虚拟链路  $e_i^{\text{st}}$  的候选物理路径集合  $\Omega(e_i^{\text{st}})$ 
(4) if  $\Omega(e_i^{\text{st}}) \subseteq \emptyset$  then
(5)   return 节点映射失败
(6) else
(7)   for  $j = 1: |\Omega(e_i^{\text{st}})|$  do
(8)    根据式(24)计算  $\Omega(e_i^{\text{st}})$  中第  $j$  条物理路径的 PEF 值, 并标记 PEF 值最大的物理路径为  $p_{\max}$ 
(9)   end for
(10)  将  $e_i^{\text{st}}$  映射至  $p_{\max}$ , 并将映射结果存入 Link_Embedding_List
(11) end if
(12)end for
(13)return 节点映射成功

```

---

表3 物理网络和虚拟网络的参数

	物理网络	虚拟网络
节点数量	100	服从[4,10]整数均匀分布
节点CPU资源	服从[50,100]均匀分布	服从[0,50]均匀分布
节点位置	在100×100区域内随机分布	在100×100区域内随机分布
链路数量	500	每对节点间以0.5的概率相互连接
链路带宽资源	服从[50,100]均匀分布	服从[0,50]均匀分布
虚拟网络到达强度	-	服从均值为0.05的泊松分布
虚拟网络生存时间	-	服从均值为500的指数分布

性节点重要性排序的TOPSIS-VNE算法,文献[16]提出的基于马尔科夫奖励模型的MCRR-VNE算法。

## 5.2 实验结果分析

**5.2.1 不同算法性能比较** 本文所比较的3种算法的性能如图1所示。

从图1(a)可知,在整个仿真时间内TP-VNE算法的请求接受率最高。在仿真时间为25000个时间单元时TP-VNE算法的请求接受率为73.6%,分别较分别较MCRR-VNE算法和TOPSIS-VNE算法提高了约5.3%和11.2%。当仿真时间小于5000个时间单元时,3种算法的请求接受率随仿真时间的增加而减小,这主要是由于在这段时间内,随时仿真时间的增加,虚拟网络请求数量逐渐增加,物理网络的可用资源逐渐减少,从而导致请求接受率逐渐下降。当仿真时间大于5000个时间单元时,3种算法的请求接受率基本趋于稳定,这主要是由于当仿真时间大于5000个时间单元时,虚拟网络请求的到达速率与离开速率基本趋于平衡,物理网络的可用资源基本趋于稳定。

从图1(b)可知,TP-VNE算法的收益开销比优于MCRR-VNE算法和TOPSIS-VNE算法。在仿真时间为25000个时间单元时TP-VNE算法的收益开销比为38.6%,分别较MCRR-VNE算法和TOPSIS-VNE算法提高了约14.9%和11.9%。当仿真时间小于5000个时间单元时,3种算法的收益开销比均随仿真时间增加而降低,这主要是由于在这段时间内物理网络的可用资源随仿真时间的增加而减小,导致虚拟链路映射的物理路径长度增加,从而增加了映射开销。当仿真时间大于5000个时间单元时,3种算法的收益开销比趋于稳定,这主要是由于在这段时间内物理网络的可用资源趋于稳定。

**5.2.2 虚拟网络到达强度对算法性能影响** 为了进一步检验本文所提算法的性能,本文研究了虚拟网络到达强度对算法性能的影响。当虚拟网络到达强度分别服从均值为0.02, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11和0.13的泊松分布时,本文所比较的3种算法的性能如图2所示。

从图2(a)知,在所有虚拟网络到达强度条件下,TP-VNE算法的请求接受率均最高。例如,当虚拟网络到达强度为0.13时,TP-VNE算法的请求接受率为41.99%,分别较MCRR-VNE算法和TOPSIS-VNE算法提高了11.9%和17.5%。所有算法的请求接受率均随虚拟网络到达强度的增加而减小,这是由于当虚拟网络到达强度增加时,相同时间内到达的虚拟网络数量较多,而物理网络的可用资源有限,从而导致映射失败的虚拟网络数量较多。

从图2(b)知,在所有虚拟网络到达强度条件下,TP-VNE算法的收益开销比均最高。例如,当虚拟网络到达强度为0.13时,TP-VNE算法的收益开销比为37.45%,分别较MCRR-VNE算法和TOPSIS-VNE算法提高了12.4%和14.0%。当虚拟网络到达强度小于0.07时,3种算法的收益开销比随虚拟网络到达强度增加而减小;当虚拟网络到达强度大于0.07时,3种算法的收益开销比趋于稳定。

**5.2.3 接入控制条件对算法性能影响** 在虚拟网络映射过程中,TP-VNE算法会接受所有满足约束条件的虚拟网络请求。如果某个虚拟网络请求的收益开销比过低,则会占用较多的物理资源,从而影响后续虚拟网络请求的接受率和收益开销比。因此,本文以收益开销比门限值为接入控制条件(即主动拒绝收益开销比低于门限值的虚拟网络请求),研究了接入控制条件对TP-VNE算法性能的影响,结果如图3所示。

从图3(a)知,TP-VNE算法的虚拟网络请求接受率随收益开销比门限值增加先增加后快速减小。当收益开销比门限值为0.25时,TP-VNE算法的请求接受率最高,为76.08%,较不考虑接入控制条件下的TP-VNE算法提高了约3.4%。

从图3(b)知,TP-VNE算法的收益开销比随收益开销比门限值增加而增加。当收益开销比门限值为0.25时,TP-VNE算法的收益开销比为40.30%,较不考虑接入控制条件下的TP-VNE算法提高了约4.5%。

## 6 结束语

本文优化了虚拟网络映射数学模型,引入了物理学中的场论思想,提出了一种启发式虚拟网络映

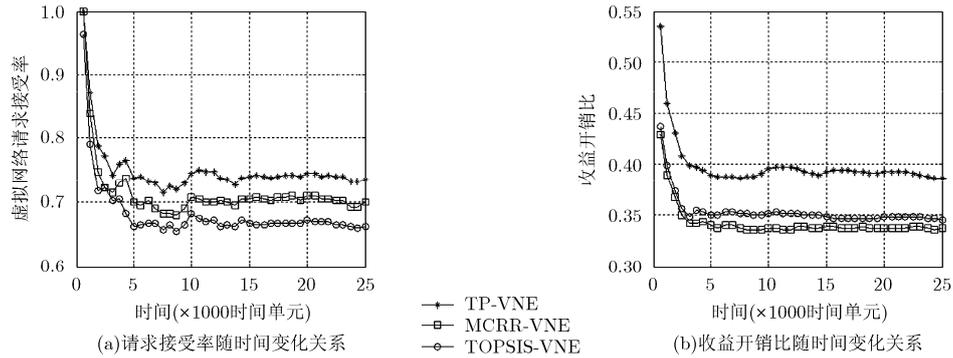


图 1 不同算法性能比较

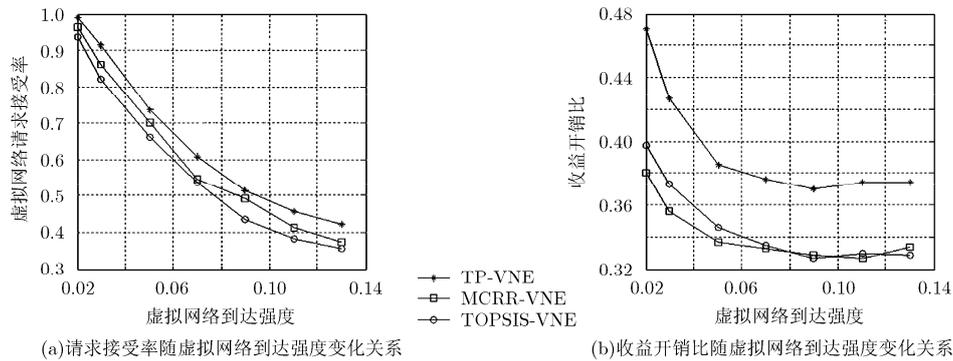


图 2 算法性能与虚拟网络到达强度之间的关系

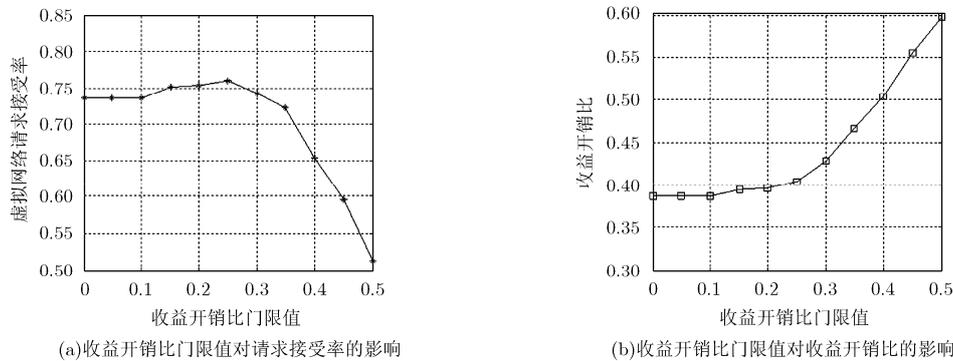


图 3 接入控制条件对 TP-VNE 算法性能影响

射算法 TP-VNE。仿真实验结果表明，TP-VNE 算法在多种虚拟网络到达强度条件下的请求接受率和收益开销比均较当前算法提高了 10%左右。实验分析了接入控制条件对 TP-VNE 算法性能的影响，得出通过选择合适的收益开销比门限值，可以进一步提高 TP-VNE 算法的请求接受率和收益开销比。然而，该算法没有考虑网络虚拟化给网络架构带来的安全威胁，下一步需将安全约束引入 TP-VNE 算法，研究基于拓扑势的安全虚拟网络映射算法。

参考文献

[1] KHOT A S, GAWAS J, and WAMAN S. Network virtualization on optical networks[C]. International

Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, Chennai, India, 2016: 568-573.  
 [2] FENG Jianyuan, ZHANG Qixun, DONG Guangzhe, et al. An approach to 5G wireless network virtualization: Architecture and trial environment[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, San Francisco, USA, 2017: 1-6.  
 [3] GHODA G, MERULIYA N, PAREKH D H, et al. A survey on data center network virtualization[C]. International Conference on Computing for Sustainable Global Development, New Delhi, India, 2016: 3464-3470.  
 [4] ALCOBER J, HESSELBACH X, OLIVA A, et al. Internet future architectures for network and media independent

- services and protocols[C]. International Conference on Transparent Optical Networks, Cartagena, Spain, 2013: 1-4.
- [5] ANDERSON T, PETERSON L, SHENKER S, *et al.* Overcoming the Internet impasse through virtualization[J]. *Computer*, 2005, 38(4): 34-41. doi: 10.1109/MC.2005.136.
- [6] 余建军, 吴春明. 支持接入控制的虚拟网映射近似算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(5): 1235-1241. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00965.
- YU Jianjun and WU Chunming. Virtual network mapping approximation algorithm with admission control[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1235-1241. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00965.
- [7] AMALDI E, CONIGLIO S, KOSTER A M C A, *et al.* On the computational complexity of the virtual network embedding problem[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2016, 52(6): 213-220. doi: 10.1016/j.endm.2016.03.028.
- [8] WANG Li, QU Hua, ZHAO Jihong, *et al.* Virtual network embedding with discrete particle swarm optimization[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(4): 285-286. doi: 10.1049/el.2013.3202.
- [9] GUAN Xinjie, WAN Xili, CHOI B Y, *et al.* Ant colony optimization based energy efficient virtual network embedding[C]. IEEE 4th International Conference on Cloud Networking, Niagara Falls, Canada, 2015: 273-278.
- [10] RICCI R, ALFELD C, and LEPREAU J. A solver for the network testbed mapping problem[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2003, 33(2): 65-81. doi: 10.1145/956981.956988.
- [11] ZHU Yong and AMMAR M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components [C]. IEEE International Conference on Computer Communications, Barcelona, Spain, 2006: 1-12.
- [12] 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. doi: 10.1145/1355734.1355737.
- [13] CHENG Xiang, SU Sen, ZHANG Zhongbao, *et al.* Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(2): 39-47. doi: 10.1145/1971162.1971168.
- [14] DING Jian, HUANG Tao, LIU Jiang, *et al.* Virtual network embedding based on real-time topological attributes[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2015, 16(2): 109-118.
- [15] GONG Shuiqing, CHEN Jing, ZHAO Siyi, *et al.* Virtual network embedding with multi-attribute node ranking based on TOPSIS[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2016, 10(2): 522-541. doi: 10.3837/tiis.2016.02.005.
- [16] BIANCHI F and PRESTI FL. A markov reward model based greedy heuristic for the virtual network embedding problem[C]. IEEE 24th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, London, UK, 2016: 373-378.
- [17] 淦文燕, 李德毅, 王建民. 一种基于数据场的层次聚类方法[J]. *电子学报*, 2006, 34(2): 258-262.
- GAN Wenyan, LI Deyi, and WANG Jianmin. An hierarchical clustering method based on data fields[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(2): 258-262.
- [18] HE Nan, GAN Wenyan, and LI Deyi. Evaluate nodes importance in the network using data field theory[C]. International Conference on Convergence Information Technology, Gyeongju, South Korea, 2007: 1225-1230.
- 刘新波: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为虚拟网络映射、网络优化.
- 王布宏: 男, 1975年生, 教授, 博士, 主要研究方向为网络安全、阵列信号处理.
- 杨智显: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为网络安全、网络虚拟化.
- 刘帅琦: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理、网络安全.