

虚拟网映射竞争算法设计与分析

余建军^{1,2} 吴春明¹

(浙江大学人工智能研究所 杭州 310027)¹ (衢州职业技术学院 衢州 324000)²

摘 要 对网络虚拟化技术中的虚拟网映射问题及其研究现状进行了介绍,针对虚拟节点映射已知且物理网不支持路径分割的虚拟网映射问题,提出以物理网提供商收益最大化为目标的虚拟网映射竞争算法,并给出了算法的竞争比分析。实验表明,所提出的算法能提高物理网资源的负载均衡度和利用率,从而提高了虚拟网构建请求的接受率和物理网提供商的收益。

关键词 虚拟网映射,链路映射,原始对偶方法,竞争算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.007

Design and Analysis of Virtual Network Mapping Competitive Algorithms

YU Jian-jun^{1,2} WU Chun-ming¹

(AI Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)¹ (Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China)²

Abstract This paper reviewed the virtual network mapping problem in network visualization area and the current research progress for this problem. For the virtual network mapping problem with known virtual node mapping but no support of path splitting by physical network, this paper proposed a virtual network mapping competitive algorithm aiming at maximizing the profit of physical network provider. This paper also provided the competitive analysis of the algorithm and the experiment result shows that the proposed algorithm increases the load balancing metric and utilization of physical network resource, and hence can improve the acceptance ratio of virtual network construction request and profit of physical network provider.

Keywords Virtual network mapping, Link mapping, Primal dual approach, Competitive algorithms

1 概述

网络虚拟化技术是构建新一代互联网架构的重要技术,该技术通过在底层物理网上构建多个独立的虚拟网,从而实现支持多种服务和网络体系结构的目的^[1]。虚拟网映射^[2]是实现网络虚拟化的关键环节,其任务是在满足虚拟网构建约束的前提下,把虚拟网的虚拟节点和虚拟链路分别映射到底层物理网的节点和路径上,虚拟网映射问题的求解目标主要有 4 类^[3],即资源代价最小、映射数量最多、负载均衡和收益最大。

单个虚拟网映射问题是 NP 难问题^[4],这意味着离线和在线虚拟网映射问题是 NP 难问题;其实即使预先确定虚拟节点映射,在物理网不支持路径分割的情况下,单个虚拟网映射问题仍是 NP 难问题^[5]。故目前提出的算法集中在求可行解或次优解上,主要分为 4 类:(1)假设虚拟节点映射已知^[6-8],把虚拟网映射问题简化为虚拟链路映射问题;(2)两阶段映射算法^[5,9-14]:将虚拟网映射分为节点映射和链路映射两个阶段,首先使用贪婪方法完成虚拟节点映射,然后基于最优路径、K 则最优路径、多商品流^[5]和分布式约束优化^[14]等方

法完成虚拟链路映射;(3)一阶段映射算法^[15-18]:将虚拟网作为一个整体,同步完成虚拟节点和虚拟链路映射;(4)基于迭代法求解^[19-22](包括采用粒子群优化、蚁群优化等元启发式算法):该类算法基于两阶段算法完成虚拟网映射,然后采用迭代的方法求更优解^[20-22]或可行解^[19]。

除文献^[8]外,目前还没有提出其他的虚拟网映射问题的竞争算法^[23],对虚拟网映射问题的解的质量不能提供保证,对虚拟网映射算法的性能分析仅通过实验手段而没有理论分析。

由于竞争算法设计的困难性,文献^[8]假设虚拟节点映射已知且物理网支持路径分割^[5],即把单虚拟网映射问题转换成 P 问题(多项式时间可解问题),然后基于原始对偶方法设计在线虚拟链路映射问题(针对 Pipe 流量模型和多路径路由模型的 GIPO 算法)的竞争算法,并给出映射算法的竞争比分析^[23]。

文献^[8]提出的 GIPO 算法要求单个虚拟网映射问题必须是 P 问题或可近似的 NP 难问题,但由于虚拟节点映射已知但物理网不支持路径分割情况下的单虚拟网映射问题是 NP 难问题^[5]且不可近似(见定理 1),故 GIPO 算法并不适用

到稿日期:2014-03-06 返修日期:2014-05-08 本文受国家自然科学基金(61070157,61070213),国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315900),浙江省自然科学基金资助项目(LY14F020010),浙江省教育厅科研项目(Y201225106)资助。

余建军(1969—),男,硕士,教授,主要研究方向为网络虚拟化技术、算法设计与分析,E-mail:yjj691121@126.com;吴春明(1967—),男,博士,教授,主要研究方向为大规模可重构柔性网络构建技术、三网融合体系结构等。

于虚拟节点映射已知但物理网不支持路径分割情况下的虚拟网映射问题的求解。

本文针对虚拟节点映射已知但物理网不支持路径分割的在线虚拟网映射问题,基于文献[8]的原始对偶方法的思想,提出确定的竞争算法(即非随机竞争算法),并给出算法的竞争比分析和实验分析。

定理 1 虚拟节点映射已知但物理网不支持路径分割的单虚拟网映射问题是 NP 难问题且不可近似。

证明:如虚拟节点映射已知但物理网不支持路径分割,则:(1)单虚拟网映射问题是 NP 难问题^[5]; (2)单虚拟网映射可行问题(指不考虑优化目标的单个虚拟网映射问题)是 NPC 问题,因为不相交路径判定问题是 NPC 问题^[24],且可规约到物理网的链路带宽为 1、虚拟链路带宽为 1 的单虚拟网映射可行问题。所以,单虚拟网映射问题是不可近似的,否则意味着单虚拟网映射可行问题在多项式时间可解,得证。

2 网络模型和问题描述

定义 1(物理网) 物理网表示为无向图 $G = (N^p, E^p)$,其中 N^p 和 E^p 分别表示物理节点和物理链路的集合,同大多数先前研究一样^[16],物理链路 e^p 的属性是链路带宽 $b(e^p)$,第 i 条物理链路记为 e_i^p 。

定义 2(虚拟网) 虚拟网表示为无向图 $G^v = (N^v, E^v)$,其中 N^v 和 E^v 分别表示虚拟节点和虚拟链路的集合,且 $N^v \subseteq N^p$,即虚拟节点所映射的物理节点已经给定。每条虚拟链路 e^v 的属性是链路带宽 $b(e^v)$ 。虚拟网映射收益是 ρ ,即物理网提供商完成虚拟网映射后获得的收益是 ρ 。

定义 3(虚拟网映射) 对动态到达的第 j 个虚拟网构建请求 VN_j ,要么完成该虚拟网的映射,要么拒绝。对 VN_j 的映射是指把虚拟网 $G_j^v = (N_j^v, E_j^v)$ 的每条虚拟链路映射到 G 的一条无圈的物理路径上,且物理路径的两个端点分别是虚拟链路的两个虚拟节点所指定的物理节点。虚拟网映射时,必须保证映射到物理链路 e^p 上的所有虚拟链路的带宽之和小于等于 $b(e^p)$ (以下简称容量约束条件)。如映射成功,则物理网提供商获得收益 ρ_j 。记 $e_{i,j}^v$ 为第 j 个虚拟网的第 i 条虚拟链路。

定义 4(虚拟网映射目标) 物理网提供商所获收益的最大化。

3 在线虚拟网映射竞争算法设计

3.1 离线虚拟网映射问题的线性规划模型

离线虚拟网映射问题(假设所有动态到达的虚拟网构建请求已知)的线性规划模型由两部分组成:(1)目标函数:最大化物理网提供商所获收益;(2)约束条件:①对虚拟网构建请求要么拒绝要么接受;②容量约束条件;③每条虚拟链路映射到 G 的一条无圈的物理路径上,且物理路径的两个端点分别是虚拟链路的两个虚拟节点所指定的物理节点。

假设已知动态到达的虚拟网构建请求序列是 $\sigma = \{VN_1, VN_2, \dots, VN_j\}$,记第 i 个虚拟网 $VN_i (1 \leq i \leq j)$ 的所有有效映射方案为 Δ_i , Δ_i 中的第 $m (1 \leq m \leq |\Delta_i|)$ 个映射方案 $\Delta_{i,m}$ 包含 $|E_i^v|$ 条物理路径, $\Delta_{i,m}$ 中第 a 条物理路径 $\Delta_{i,m,a}$ 是该方案中虚拟链路 $e_{i,m}^v$ 的映射路径,所谓有效的映射方案是指方案所包含的任意物理路径 $\Delta_{i,m,a} (1 \leq a \leq |E_i^v|)$ 的两个端点必须是虚

拟链路 $e_{i,m}^v$ 的两个虚拟节点所指定的物理节点。对第 i 个虚拟网的所有映射方案 $\Delta_i (1 \leq m \leq |\Delta_i|)$ 定义变量 $y_{i,m} \in \{0, 1\}$,如 $y_{i,m}$ 取 1 表示虚拟网 VN_i 的映射方案是 $\Delta_{i,m}$,取 0 表示虚拟网 VN_i 的映射不采用方案 $\Delta_{i,m}$,显然 $\sum_{m \in [1, |\Delta_i|]} y_{i,m} \leq 1$,即对虚拟网 VN_i 要么拒绝,要么采用 Δ_i 中的某一映射方案。

记虚拟网映射收益列向量 $P = \{\rho_{1,1}, \dots, \rho_{1,|\Delta_1|}, \dots, \rho_{j,1}, \dots, \rho_{j,|\Delta_j|}\}^T$,其中 $\rho_{i,m} = \rho_i (1 \leq m \leq |\Delta_i|)$ 。记列向量 $Y = \{y_{1,1}, \dots, y_{1,|\Delta_1|}, \dots, y_{j,1}, \dots, y_{j,|\Delta_j|}\}^T$ 。则离线虚拟网映射问题的目标函数为: $\max P^T \cdot Y$ 。

记物理链路带宽列向量 $B = \{b(e_1^p), \dots, b(e_{|E^p|}^p)\}^T$; 矩阵 A 给出了所有映射方案 $\Delta_{i,m}$ 对物理链路的带宽需求,共 $|E^p|$ 行, $\sum_{i \in [1, j]} |\Delta_i|$ 列,矩阵中元素 $A_{a, \Delta_{i,m}}$ 表示第 i 个虚拟网的第 m 个映射方案需要使用第 a 条物理链路 e_a^p 带宽的总量(如映射方案 $\Delta_{i,m}$ 第 a 条物理路径 $\Delta_{i,m,a}$ 经过物理链路 e_a^p ,则该路径使用 e_a^p 的带宽为 $b(e_{i,m,a}^v)$)。则离线虚拟网映射问题的物理链路的容量约束条件是: $A \cdot Y \leq B$ 。

矩阵 D 有 j 行, $\sum_{i \in [1, j]} |\Delta_i|$ 列,当 $a = b$ 时矩阵中元素 $D_{a, \Delta_{i,m}}$ 取 1,否则取 0。矩阵 D 包含了所有虚拟网与其映射方案的对应关系。对虚拟网构建请求,要么拒绝,要么接受,如接受则只能采用一种映射方案,对应离线虚拟网映射问题的约束条件是: $D \cdot Y \leq \vec{1}$,且 Y 中任意变量 $y_{i,m} \in \{0, 1\}$ 。

离线虚拟网映射问题的 0-1 线性整数规划模型如图 1 所示。为了应用原始对偶方法,需要建立离线虚拟网映射问题的线性规划模型,故把整数约束 $y_{i,m} \in \{0, 1\}$ 进行松弛(因 $D \cdot Y \leq \vec{1}$,把 $y_{i,m} \in \{0, 1\}$ 松弛为 $y_{i,m} \geq 0$),得到离线虚拟网映射问题的线性规划模型,如图 2 所示。根据线性规划理论,构造离线虚拟网映射问题的对偶问题的线性规划模型,如图 3 所示,变向量 $Z = \{z_1, \dots, z_j\}^T$,每个虚拟网对应向量 Z 的一个元素;变向量 $X = \{x_1, \dots, x_{|E^p|}\}^T$,可解释为物理链路的影子价格向量,向量元素 x_a 表示物理链路 e_a^p 的影子价格。

$$\begin{aligned} \max P^T \cdot Y \text{ s. t.} \\ A \cdot Y \leq B \\ D \cdot Y \leq \vec{1} \\ y_{i,m} \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq j, 1 \leq m \leq |\Delta_i| \end{aligned}$$

图 1 0-1 线性整数规划模型

$$\begin{aligned} \max P^T \cdot Y \text{ s. t.} \\ A \cdot Y \leq B \\ D \cdot Y \leq \vec{1} \\ Y \geq 0 \end{aligned}$$

图 2 线性规划模型

$$\begin{aligned} \min Z^T \cdot \vec{1} + X^T \cdot B \text{ s. t.} \\ Z^T \cdot D + X^T \cdot A \geq P^T \\ X, Z \geq 0 \end{aligned}$$

图 3 对偶线性规划模型

3.2 在线虚拟网映射问题的竞争算法 VNMCA

竞争算法 VNMCA (Virtual Network Mapping Competitive Algorithms) 的流程如图 4 所示。全局变向量 X 初始化为 $\vec{0}$ 。记 $\gamma(i, l) = X^T \cdot \text{col}_{i,l}(A)$, X^T 取第 $i-1$ 个虚拟网处理

完成后变向量 X 的值, $col_{i,l}(A)$ 指矩阵 A 中映射方案 $\Delta_{i,l}$ 所对应的列, $\gamma(i,l)$ 是第 i 个虚拟网的第 l 个映射方案的映射代价。记 $MB_i = \max_a b(e_{i,a}^v)$, 是第 i 个虚拟网的最大虚拟链路带宽。设 MP 是物理网的最长路径所包含的物理链路数, $M\rho$ 是最大虚拟网映射收益, MB 是最大虚拟网带宽, ME 是虚拟网的最多虚拟链路数, 则记 $\beta = \log_2^{1+3 \cdot M\rho \cdot MB \cdot MP \cdot ME}$ 。

输入: 第 i 个虚拟网请求 $G_i^v = (N_i^v, E_i^v)$

输出: 第 i 个虚拟网请求的映射方案

1. for ($a=1$; $a \leq |E_i^v|$; $a++$) {在物理网 G^s (G^s 边 e_b^s 的权重设为 x_b) 上, 用 Dijkstra 算法, 求出虚拟链路 e_a^v 的两个虚拟节点 (即物理节点) 间的最短路径, 即映射代价最小的物理路径;}

//所求出的物理路径集合即第 i 个虚拟网的有效映射方案之一, 设该方案为第 1 个有效映射方案 $\Delta_{i,1}$

2. if ($\gamma(i,1) \geq \rho_i$) { $z_i = 0$; 拒绝第 i 个虚拟网请求; 退出;}

3. if ($\gamma(i,1) < \rho_i$) {

4. //修改物理网 G^s 的所有物理链路 e_m^s ($1 \leq m \leq |E^s|$) 的//影子价格:

5. for ($m=1$; $m \leq |E^s|$; $m++$)

$$x_m = x_m \cdot 2^{(A_{m,(i,1)} \cdot \beta) / b(e_m^s)} + \frac{1}{MB_i \cdot MP \cdot |E_i^v|} \cdot (2^{(A_{m,(i,1)} \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1);$$

6. $z_i = \rho_i - \gamma(i,1)$;

7. 输出第 i 个虚拟网的映射方案 $\Delta_{i,1}$ (物理网提供商获取收益为 ρ_i); //if

图 4 VNMCA 算法流程

算法中用到的数据 $col_{i,l}(A)$ 和 $A_{m,(i,l)}$ ($1 \leq m \leq |E^s|$), 由算法步骤 1 所求出的第一个有效映射方案给出, 故算法中并不需要保存矩阵 A 。显然 $\gamma(i,1)$ 小于等于第 i 个虚拟网的任意映射方案 $\Delta_{i,m}$ 的 $\gamma(i,m)$ 值。

3.3 VNMCA 算法的正确性和竞争比分析

对 VNMCA 算法的分析分成两部分。首先证明该算法不会违反物理链路的带宽约束; 然后采用竞争分析法, 分析 VNMCA 算法在最坏情况下的性能, 即证明 VNMCA 算法的竞争比, 该方法将以离线的虚拟网映射问题的最优解作为比较对象。

假设 1: 虚拟网 VN_i 的任意虚拟链路的带宽不大于最小的物理链路带宽的 $1/(\beta \cdot |E_i^v|)$;

假设 2: 任意虚拟网的收益大于等于 1;

假设 3: 任意虚拟链路的带宽大于等于 1。

同文献[8]类似, 通过假设 1 对虚拟链路的带宽容量的上限进行限定。如不限定, 则任意确定 (非随机) 的在线算法的竞争比会趋向无穷大 (见定理 2)。

定理 2 如对虚拟链路的带宽容量的上限不限定, 则虚拟网在线映射问题的任意确定的映射算法的竞争比会趋向无穷大。

证明: 根据竞争比的定义, 只需找到一个实例, 其离线最优算法所获收益是在线算法所获收益的无穷倍即可。具体构造如下: 设物理网和虚拟网都只有两个节点和一条链路, 物理链路带宽为 1; 虚拟网 B1 的链路带宽为 ϵ ($\epsilon \rightarrow 0$); 虚拟网 A1 的链路带宽为 1。当 B1 请求到达后, 如在线算法拒绝 B1, 则把 B1 作为唯一的虚拟网构建请求, 此时离线最优算法必然接受 B1, 则此实例下在线算法的竞争比为 $\epsilon/0 \rightarrow +\infty$; 如在线算法接受 B1, 则 A1 作为第二个虚拟网构建请求, 因在线算法必然拒绝 A1, 而离线最优算法是拒绝 B1 接受 A1, 则此实例

下的在线算法的竞争比为 $1/\epsilon \rightarrow +\infty$ 。得证。

引理 1 对任意 $i \geq 0$, 当 VNMCA 算法完成 VN_i 构建请求处理后, 任意物理链路 e_m^s ($1 \leq m \leq |E^s|$) 的影子价格符合:

$$x_m^i \geq \frac{1}{MB_{\max}^i \cdot MP \cdot ME_i^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^i) \cdot Y^i) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1)$$

其中, x_m^i 为 VNMCA 算法完成 VN_i 构建请求处理后的 x_m 的值; 矩阵 A^i 是针对虚拟网请求序列 $\{VN_1, VN_2, \dots, VN_i\}$ 的离线虚拟网映射问题的线性规划模型中的矩阵 A ; $MB_{\max}^i = \max\{MB_1, \dots, MB_i\}$; $ME_i^v = \max\{|E_1^v|, \dots, |E_i^v|\}$; 矩阵 $Y^i = \{y_{1,1}, \dots, y_{1,|\Delta_1|}, \dots, y_{i,1}, \dots, y_{i,|\Delta_i|}\}^T$; 如 VNMCA 算法接受虚拟网 VN_a ($1 \leq a \leq i$), 则 $y_{a,1}$ 取 1, 否则 $y_{a,1}$ 取 0, 另外 $y_{a,b} = 0$ ($2 \leq b \leq |\Delta_a|$)。

证明: 用数学归纳法证明。

(1) 当 $i=0$ 时, 不等式两边都为 0, 显然成立。(2) 设 $i=k-1$ 时成立。(3) 则当 $i=k$ 时:

(a) 如 VNMCA 算法拒绝 VN_k , 构建请求, 则 X 的取值不变且 $\{y_{k,1}, \dots, y_{k,|\Delta_k|}\} = \bar{0}$, 则:

$$\begin{aligned} x_m^k &= x_m^{k-1} \\ &\geq \frac{1}{MB_{\max}^{k-1} \cdot MP \cdot ME_{k-1}^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^{k-1}) \cdot Y^{k-1}) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \\ &= \frac{1}{MB_{\max}^{k-1} \cdot MP \cdot ME_{k-1}^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^k) \cdot Y^k) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \\ &\geq \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^k) \cdot Y^k) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \end{aligned}$$

得证。

(b) 如 VNMCA 算法接受 VN_k , 构建请求, 则

$$\begin{aligned} x_m^k &= x_m^{k-1} \cdot 2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^s)} + \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^v|} \cdot (2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \\ &\geq \frac{1}{MB_{\max}^{k-1} \cdot MP \cdot ME_{k-1}^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^{k-1}) \cdot Y^{k-1}) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \cdot 2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^s)} \\ &\quad + \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^v|} \cdot (2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \\ &\geq \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^{k-1}) \cdot Y^{k-1}) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \cdot 2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^s)} + \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^v} \cdot (2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \\ &= \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^{k-1}) \cdot Y^{k-1} + A_{m,(k,1)}^k) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \\ &= \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^v} \cdot (2^{((\text{row}_m(A^k) \cdot Y^k) \cdot \beta) / b(e_m^s)} - 1) \end{aligned}$$

得证。

引理 2 任意 $i \geq 1$, 当 VNMCA 算法完成 VN_i 构建请求处理后, VNMCA 算法所构成的向量 $\{x_1^i, \dots, x_{|E^s|}^i\}^T$ 和 $\{z_1, \dots, z_i\}^T$, 是针对虚拟网构建请求序列 $\{VN_1, \dots, VN_i\}$ 的离线虚拟网映射问题的对偶线性规划模型 (见图 3) 的可行解。

证明: 用数学归纳法证明。

(1) 当 $i=1$ 时, 因全局变向量 X 初始化为 0, 则 $\gamma(1,1) = 0 < \rho_1$, 故 $z_1 = \rho_1$ 。因 VNMCA 算法完成 VN_1 构建请求处理

后,所有物理链路的影子价格要么等于0要么大于0,则对于第1个虚拟网的任意有效映射方案 $\Delta_{1,m}$ 满足 $z_1 + X^T \cdot \text{col}_{1,m}(A) \geq \rho_1$, 故 VNMCA 算法所构成的向量 $\{x_1^1, \dots, x_{|E^*|}^1\}^T$ 和向量 $\{z_1\}^T$ 是针对虚拟网构建请求序列 $\{VN_1\}$ 的离线虚拟网映射问题的对偶线性规划模型的可行解。

(2) 设 $i=k-1$ 时成立。

(3) 则当 $i=k$ 时:

(a) 如 VNMCA 算法拒绝 VN_k 构建请求, 则说明 $\gamma(k, 1) \geq \rho_k, z_k = 0, X$ 的取值不变。因 X 的取值不变, 故对 $VN_a (1 \leq a \leq k-1)$ 的任意有效映射方案 $\Delta_{a,m} (1 \leq m \leq |\Delta_a|)$ 满足 $z_a + X^T \cdot \text{col}_{a,m}(A) \geq \rho_a$; 因对第 k 个虚拟网的任意有效映射方案 $\Delta_{k,m}$ 满足 $\gamma(k, 1) \leq \gamma(k, m)$, 即:

$$z_k + X^T \cdot \text{col}_{k,m}(A) = z_k + \gamma(k, m) \geq z_k + \gamma(k, 1) \geq \rho_k$$

得证。

(b) 如 VNMCA 算法接受 VN_k 构建请求, 则 $z_k = \rho_k - \gamma(k, 1)$, 即 $z_k + \gamma(k, 1) = \rho_k$ 。因 VNMCA 算法接受 VN_k 构建后, 所有物理链路的影子价格要么不变要么增大, 故对 $VN_a (1 \leq a \leq k-1)$ 的任意有效的映射方案 $\Delta_{a,m} (1 \leq m \leq |\Delta_a|)$, 满足 $z_a + X^T \cdot \text{col}_{a,m}(A) \geq \rho_a$; 对第 k 个虚拟网的任意有效映射方案 $\Delta_{k,m}$, 因 VNMCA 算法接受 VN_k , 构建后, 所有物理链路的影子价格要么不变要么增大, 故:

$$z_k + X^T \cdot \text{col}_{k,m}(A) \geq z_k + \gamma(k, m) \geq z_k + \gamma(k, 1) \geq \rho_k$$

得证。

引理 3 对任意 $i \geq 0$, 当 VNMCA 算法完成 VN_i 构建请求处理后:

$$(Z^i)^T \cdot \vec{1} + (X^i)^T \cdot B \leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, i]} \rho_a \cdot y_a$$

其中, $Z^i = \{z_1, \dots, z_i\}, X^i = \{x_1^1, \dots, x_{|E^*|}^i\}$, 当拒绝 $VN_a (1 \leq a \leq i)$ 时 y_a 取 0, 否则取 1, 即 $\sum_{a \in [1, i]} \rho_a \cdot y_a$ 是针对虚拟网请求序列 $\{VN_1, \dots, VN_i\}$ 采用 VNMCA 算法时, 物理网提供商所获得的总收益。

证明: 用数学归纳法证明。

(1) 当 $i=0$ 时, 不等式两边都等于 0, 显然成立; (2) 设 $i=k-1$ 时成立。 (3) 则当 $i=k$ 时:

(a) 如 VNMCA 算法拒绝 VN_k 构建请求, 则说明 $z_k = 0, X$ 的取值不变, $y_k = 0$, 则:

$$(Z^k)^T \cdot \vec{1} + (X^k)^T \cdot B = (Z^{k-1})^T \cdot \vec{1} + (X^{k-1})^T \cdot B \leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a = 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k]} \rho_a \cdot y_a$$

得证。

(b) 如 VNMCA 算法接受 VN_k 构建请求: 则 $y_k = 1, z_k = \rho_k - \gamma(k, 1)$, 根据假设 1, $(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k) \leq b(e_m^k) / (\beta \cdot |E_k^*|) \cdot |E_k^*| \cdot \beta = 1$, 又因为 $2^x - 1 \leq x$ (当 $0 \leq x \leq 1$ 时), 所以: $2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} - 1 \leq A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta / b(e_m^k)$ 。则

$$\begin{aligned} (Z^k)^T \cdot \vec{1} + (X^k)^T \cdot B &= (Z^{k-1})^T \cdot \vec{1} + (X^{k-1})^T \cdot B + z_k + \sum_{m \in [1, |E^*|]} (x_m^{k-1} \cdot b(e_m^k)) \\ &\leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + z_k + \sum_{m \in [1, |E^*|]} ((x_m^{k-1} \cdot b(e_m^k)) \\ &\quad 2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} - 1) + \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^*|} \cdot \\ &\quad (2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} - 1) \cdot b(e_m^k)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + z_k + \sum_{m \in [1, |E^*|]} ((x_m^{k-1} + \\ &\quad \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^*|}) \cdot (2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} - 1) \cdot \\ &\quad b(e_m^k)) \\ &\leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + z_k + \sum_{m \in [1, |E^*|]} ((x_m^{k-1} + \\ &\quad \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^*|}) \cdot A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) \\ &= 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + z_k + \beta \cdot \sum_{m \in [1, |E^*|]} (x_m^{k-1} \cdot \\ &\quad A_{m,(k,1)}^k) + \beta \cdot \sum_{m \in [1, |E^*|]} \frac{A_{m,(k,1)}^k}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^*|} \\ &\leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + \rho_k - \gamma(k, 1) + \beta \cdot \sum_{m \in [1, |E^*|]} (x_m^{k-1} \\ &\quad \cdot A_{m,(k,1)}^k) + \beta \\ &= 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + \rho_k - \gamma(k, 1) + \beta \cdot \gamma(k, 1) + \beta \\ &< 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + \rho_k + (\beta - 1) \cdot \rho_k + \beta \\ &\text{(因为 } \gamma(k, 1) < \rho_k \text{, 且根据假设 2 和假设 3 可知 } \beta > 1) \\ &= 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + \beta \cdot \rho_k + \beta \leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + \\ &\quad \beta \cdot \rho_k + \beta \rho_k \text{(根据假设 2)} \\ &= 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k-1]} \rho_a \cdot y_a + 2\beta \cdot \rho_k \cdot y_k = 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, k]} \rho_a \cdot y_a \end{aligned}$$

得证。

定理 3 对物理网的所有物理链路, VNMCA 算法不会违反物理链路的带宽容量约束条件, 即: $\forall i \geq 0, \forall m \in [1, |E^*|], \text{row}_m(A^i) \cdot Y^i \leq b(e_m^i)$ 。

证明: 用数学归纳法证明。

(1) 当 $i=0$ 时, 不等式左边为 0, 显然成立。 (2) 设当 $i=k-1$ 成立。 (3) 当 $i=k$ 时:

(a) 如 VNMCA 算法拒绝虚拟网 VN_k , 则显然成立。

(b) 如 VNMCA 算法接受虚拟网 VN_k , 则对虚拟网 VN_k 没有使用的物理链路显然成立; 对 VN_k 使用的任意物理链路 e_m^k , 则有 $x_m^k = x_m^{k-1} \cdot 2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} + \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^*|} \cdot$

$(2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} - 1)$, 根据假设 3 和 VNMCA 算法接受 VN_k 构建请求的条件 $\gamma(k, 1) < \rho_k (\gamma(k, 1) = (X^{k-1})^T \cdot \text{col}_{k,1}(A^k))$, 可知 $x_m^{k-1} \leq \rho_k$, 故根据假设 1 和假设 2 有: $x_m^k \leq \rho_k \cdot 2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} + \frac{1}{MB_k \cdot MP \cdot |E_k^*|} \cdot (2^{(A_{m,(k,1)}^k \cdot \beta) / b(e_m^k)} - 1) \leq 2 \cdot \rho_k + 1 \leq 3 \cdot \rho_k$; 根据引理 1, 有 $x_m^k \geq \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^k} \cdot (2^{(\text{row}_m(A^k) \cdot Y^k) \cdot \beta / b(e_m^k)} - 1)$; 故 $3 \cdot \rho_k \geq \frac{1}{MB_{\max}^k \cdot MP \cdot |ME_k^k|} \cdot (2^{(\text{row}_m(A^k) \cdot Y^k) \cdot \beta / b(e_m^k)} - 1)$, 即 $\text{row}_m(A^k) \cdot Y^k \leq \log_2(1 + 3 \cdot \rho_k \cdot MB_{\max}^k \cdot MP \cdot ME_k^k) \cdot b(e_m^k) / \beta \leq \beta \cdot b(e_m^k) / \beta = b(e_m^k)$, 得证。

定理 4 对任意 $i \geq 1$, 针对虚拟网构建请求序列 $\{VN_1, \dots, VN_i\}$, VNMCA 算法的竞争比是 2β 。

证明: 针对虚拟网构建请求序列 $\{VN_1, \dots, VN_i\}$, 设 VNMCA 算法所获得的收益是 ρ_{op} ; 其离线虚拟网映射问题(对应图 1 的 0-1 线性整数规划模型)的最优解所产生的最大收益是 ρ_{off} ; 其离线虚拟网映射问题的线性规划模型(见图 2)的最优解为 Y^i , 对应最大收益是 ρ_{off} 。记 $P^i = \{\rho_{1,1}, \dots, \rho_{1,|\Delta_1|}, \dots, \rho_{i,1}, \dots, \rho_{i,|\Delta_i|}\}^T$, 则:

$$\rho_{off} \leq \rho_{offr} = (P^i)^T \cdot Y^{i*}$$

$\leq (Z^i)^T \cdot \vec{1} + (X^i)^T \cdot B$ (根据对偶理论的弱对偶定理)

$$\leq 2\beta \cdot \sum_{a \in [1, i]} \rho_a \cdot y_a = 2\beta \times \rho_{cp} \quad (\text{根据引理 3})$$

即 VNMCP 算法的竞争比是 2β 。

定理 5 如虚拟网指定一个开始时间 T^s 和结束时间 T^f , 那么对任意 $i \geq 1$, 针对虚拟网构建请求序列 $\{VN_1, \dots, VN_i\}$, VNMCA 算法的竞争比是 $2 \cdot \log_2^{(1+3 \cdot M_p \cdot M_B \cdot M_P \cdot M_E \cdot T^{\max})}$, 其中 T^{\max} 是虚拟网最长持续时间。

证明: 证明过程与文献[8]类似, 略。

4 VNMCA 算法的时间复杂度和平均性能分析

4.1 时间复杂度分析

由于 $|E^v| < |N^v|^2$, 故 VNMCA 算法的时间复杂度由图 4 步骤 1 决定。因 Dijkstra 算法的时间复杂度是 $O(|N^v|^2)$, 故 VNMCA 算法的时间复杂度为 $O(|E^v| \times |N^v|^2)$ 。

4.2 算法平均性能实验分析

对 VNMCA 算法平均性能的分析将通过实验方法来完成。目前, 对虚拟节点映射已知的在线虚拟网映射问题, 已开展的研究[6-8]较少, 其中文献[7, 8]研究的是虚拟节点映射已知且物理网支持路径分割的虚拟网映射问题, 故把 VNMCA 算法同基于多商品流的 MCF-CA 算法[6]、基于最短路径的贪婪算法 SPF-CA[6] (即将虚拟链路映射到路径最短的物理路径上) 进行对比分析。

4.2.1 仿真环境及性能评估指标

VNMCA 算法平均性能的评估, 通过 Matlab 模拟仿真来进行。对算法性能的评估指标, 除了虚拟网构建请求接受率 (虚拟网构建成功的个数占构建请求数的百分比) 和物理网提供商的平均收益 (单位时间物理网提供商的收益, 类似文献[4, 12, 16], 虚拟网映射收益 ρ 定义为虚拟网的所有虚拟链路带宽之和) 外, 另外再使用物理链路利用率、物理链路利用率方差和物理链路最高负载等指标来衡量物理网资源的利用情况。

4.2.2 实验数据的设定

目前物理网和虚拟网请求的实际特征尚未很清楚[12], 故用虚拟网映射问题研究中通用的方法[4, 10, 12, 14-16, 19-22]来设定实验数据。物理网是用工具 GT-ITM 随机产生的连通网络, 物理网有 30 个物理节点, 节点之间用 0.2 的概率随机连接, 物理链路的带宽在 480 到 580 整数间均匀分布。虚拟网构建请求的到达是一个泊松过程, 每 100 时间单位平均有 130 个虚拟网构建请求, 每个虚拟网的生存期符合指数分布, 平均每个虚拟网生存期为 1000 个时间单位。每个虚拟网的虚拟节点数在 2 和 5 之间随机产生 (从 30 个物理节点中随机选择), 虚拟网连通度是 50%, 虚拟链路的带宽在 1 到 6 整数间均匀分布, 仿真实验的时间是 3000 个时间单位, 共 3900 个虚拟网请求。

4.2.3 实验结果及分析

(1) 物理网资源利用情况分析

表 1 统计了实验结束后物理链路的各项指标。表 1 结果表明: ①采用 VNMCA 算法, 链路的平均利用率更高。结合图 5 可知, 利用率高的原因是采用 VNMCA 算法有更高的虚拟网构建请求接受率; 同时 VNMCA 算法在映射虚拟链路时, 使用的是物理链路的影子价格之和最小的物理路径, 而非

最短路径; ②由于 VNMCA 算法在映射虚拟链路时, 使用的是物理链路的影子价格之和最小的物理路径, 而物理链路的影子价格取决于其累积的负载, 故采用 VNMCA 算法, 物理网链路的使用更加均衡。

表 1 资源利用情况

算法	物理链路 平均利用率	物理链路 利用率方差	物理链路 最高负载
SPF-CA	0.55	0.327	0.96
MCF-CA	0.61	0.306	0.93
VNMCA	0.68	0.265	0.90

(2) 虚拟网构建请求接受率和映射收益分析

从图 5 和图 6 可观察到: ①当虚拟网构建请求数不断增多时, 随着物理网负载逐渐加重, 虚拟网构建请求接受率和平均收益接近线性下降。但随着请求数的增加, 虚拟网构建请求接受率和平均收益会逐渐达到稳态; ②当物理网上运行的虚拟网个数达到一定规模后, 采用 VNMCA 算法的虚拟网构建请求接受率和平均收益逐渐稳定在 0.73 和 9.6 左右, 比 MCF-CA 和 SPF-CA 算法分别提高 10% 和 19% 左右。

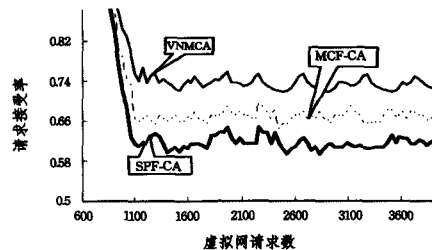


图 5 虚拟网构建请求接受率

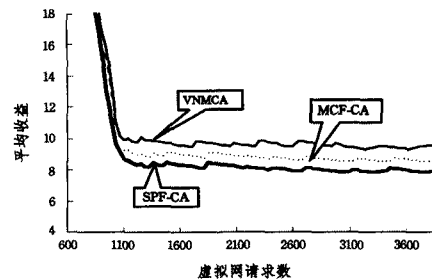


图 6 物理网提供商平均收益

结束语 本文介绍了虚拟网映射算法的研究现状, 针对虚拟节点映射已知且物理网不支持路径分割的虚拟网映射问题, 提出了以物理网提供商收益最大化为目标的虚拟网映射竞争算法。最后对 ACA 算法进行了竞争比分析和实验验证, 以说明所设计算法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] Chowdhury N, Boutaba R. A survey of network virtualization [J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862-876
- [2] Fischer A, Botero J F, Beck M T, et al. Virtual Network Embedding: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(4): 1888-1906
- [3] 李小玲, 王怀民, 丁博, 等. 虚拟网络映射问题研究及其进展 [J]. 软件学报, 2012, 23(11): 3009-3028
- [4] Andersen D. Theoretical approaches to node assignment [OL]. <http://www.cs.cmu.edu/~dga/papers/andersen-assign.ps>, 2002
- [5] Yu M, Yi Y, Rexford J, et al. Rethinking virtual network embed-

- ding: Substrate Support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM on Computer Communication Review, 2008, 38(2):17-29
- [6] Szeto W, Iraqi Y, Boutaba R. A multi-Commodity flow based approach to virtual network resource allocation[C]// Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, USA, 2003; 3004-3008
- [7] 姜明, 王保进, 吴春明. 网络虚拟化与虚拟网映射算法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1315-1320
- [8] Even G, Medina M, Schaffrath G, et al. Competitive and Deterministic Embeddings of Virtual Networks[J]. Theoretical Computer Science, 2013, 496: 184-194
- [9] Hou Y, Zafer M, Lee K, et al. On the mapping between logical and physical topologies[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS'09), Bangalore India, 2009; 483-492
- [10] Zhu Y, Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]// IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Barcelona, Spain, 2006; 1-12
- [11] Botero J F, Hesselbach X, Fischer A, et al. Optimal mapping of virtual networks with hidden hops[J]. Telecommunications Systems, 2012, 51(4): 273-282
- [12] Mosharaf Kabir Chowdhury N M, Muntasir Raihan R, Raouf B. ViNEYard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206-219
- [13] Zhang S, Qian Z Z, Wu J, et al. An Opportunistic Resource Sharing and Topology-Aware Mapping Framework for Virtual Networks[C]// IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Orlando, USA, 2012; 2408-2416
- [14] 李小玲, 郭长国, 李小勇, 等. 一种基于约束优化的虚拟网络映射方法[J]. 计算机研究与发展, 2012, 48(9): 1601-1610
- [15] Jens L, Holger K. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[C]// Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures, Barcelona, Spain, 2009; 81-88
- [16] Cheng X, Su S, Zhang Z B. Virtual Network Embedding Through Topology-Aware Node Ranking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 39-47
- [17] Alkminm G P, Batista D M, Fonseca N L S. Optimal mapping of virtual networks[C]// Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '11), Houston, USA, 2011; 1-6
- [18] Hu Q, Wang Y, Cao X J. Resolve the virtual network embedding problem: A column generation approach[C]// Proceedings IEEE INFOCOM, Turin, Italy, 2013; 410-41488
- [19] 刘新刚, 怀进鹏, 高庆一, 等. 一种保持结点紧凑的虚拟网络映射方法[J]. 计算机学报, 2012, 35(12): 2492-2504
- [20] Zhang Z B, Cheng X, Su S, et al. A unified enhanced particle swarm optimization-based virtual network embedding algorithm[J]. International Journal of Communication Systems, 2013, 26(8): 1054-1073
- [21] 黄彬彬, 林荣恒, 彭凯, 等. 基于粒子群优化的负载均衡的虚拟网络映射[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1753-1759
- [22] Chang X L, Mi X M, Muppala J K. Performance evaluation of artificial intelligence algorithms for virtual network embedding[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(10): 2540-2550
- [23] Borodin A, El Yaniv R. Online Computation and Competitive Analysis[M], New York: Cambridge University Press, 1998; 1-19
- [24] Jon Michael Kleinberg. Approximation algorithms for disjoint paths problems[OL]. <http://www.citeulike.org/user/djlin/article/271384>

(上接第 17 页)

- [9] Liu Xiao-hua, Zhang Shao-dian, et al. Recognizing Named Entities in Tweets[C]// ACL, 2011; 359-367
- [10] Finin T, Murnane W. Annotating Named Entities in Twitter Data with Crowdsourcing[C]// ACL, 2010
- [11] Ritter A, Clark S, Etzioni M O. Named Entity Recognition in Tweets: An Experimental Study[OL]. <http://aclweb.org/anthology/D/D11/D11-D1141.pdf>
- [12] 俞鸿魁, 张华平, 等. 基于层叠隐马尔可夫模型的中文命名实体识别[J]. 通信学报, 2006(02): 87-93
- [13] 李渝勤, 孙丽华. 面向互联网舆情的热词分析技术[J]. 中文信息学报, 2011(1): 48-54
- [14] 鞠久朋, 张伟伟, 等. CRF 与规则相结合的地理空间命名实体识别[J]. 计算机工程, 2011(7): 2010-214
- [15] 孔芳, 周国栋. 指代消解综述[J]. 计算机工程, 2010(8): 33-36
- [16] Silberer C, Frank A. Casting Implicit Role Linking as Anaphora Resolution Task[C]// ACL, 2012
- [17] Charniak E, Elsnar M. EM Works for Pronoun Anaphora Resolution[C]// ACL, 2009; 148-156
- [18] Broscheit S, Poesio M. BART: A Multilingual Anaphora Resolution System[C]// ACL, 2010; 104-107
- [19] 王厚峰. 指代消解的基本方法和实现技术[J]. 中文信息学报, 2002(06): 9-17
- [20] 郎君, 忻舟, 刘挺, 等. 集成多种背景语义知识的共指消解[J]. 中文信息学报, 2009(3): 3-9
- [21] Kong Fang, Zhou Guo-dong. A Tree Kernel-based Unified Framework for Chinese Zero Anaphora Resolution[C]// Proceedings of the 2010 Conference on Empirical in Natural Language Processing, 2010; 882-891
- [22] Mintz M, Bills S, Snow R, et al. Distant supervision for relation extraction with out labeled data[C]// IJCNLP, 2009; 1003-1011
- [23] Thomas P, Neves M, Solt I. Relation Extraction for Drug-Drug Interactions using Ensemble Learning[OL]. <http://ceur-ws.org/vol-761/paper1.pdf>
- [24] Surdeanu M, Tibshirani J, Nallapati R, et al. Multi-instance-Multi-label Learning for Relation Extraction[C]// Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning, 2012; 455-465
- [25] 赵妍妍, 秦兵, 车万翔, 等. 中文事件抽取技术研究[J]. 中文信息学报, 2008, 22(1): 3-8
- [26] Ahn D. The stages of event extraction[C]// ACL, 2006; 1-8
- [27] Rattenbury T, Good N, Naaman M. Towards Automatic Extraction of Event and Place Semantics from Flickr Tags[J]. SIGIR, 2007
- [28] Björne J, Salakoski T. Generalizing Biomedical Event Extraction[C]// ACL, 2011; 183-191
- [29] 徐凡, 朱巧明, 周国栋. 篇章分析技术综述[J]. 中文信息学报, 2013(3): 20-32