



基于二分图 K 优完美匹配的虚拟网映射算法设计 *

余建军¹, 吴春明²

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

摘要: 为提高虚拟节点映射的可行性, 基于可行性检验定理和用于衡量节点可用性的节点等级指标, 设计了基于二分图 K 优完美匹配的以降低映射代价为目标的虚拟网映射迭代算法。实验表明, 所提出的算法能提高虚拟网构建请求接受率和虚拟网构建收益代价比, 从而提高物理网提供商的收益。

关键词: 虚拟网节点映射; 节点等级; 可行性检验定理; 二分图 K 优完美匹配

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.02.009

Design of Virtual Network Mapping Algorithm Based on K -Best Perfect Matchings of Bipartite Graph

Yu Jianjun¹, Wu Chunming²

(1. Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China;

2. AI Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To improve the feasibility of virtual node mapping, grounded on feasibility test theorem and node rank indicators used to measure node availability, the virtual network mapping iterative algorithm based on K -best perfect matchings of bipartite graph was proposed, aiming at reducing mapping cost. Experiment shows that the proposed algorithm increases virtual network construction request acceptance ratio and benefit cost ratio, and hence can improve profit of physical network service provider.

Key words: virtual node mapping, node rank, feasibility test theorem, K -best perfect matchings of bipartite graph

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, 从而实现同时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。为提高物理网资源利用率和物理网提供商的收益, 必须设

计有效的虚拟网映射算法, 以处理动态到达的虚拟网构建请求。

虚拟网映射是一个极具挑战性的问题, 单个虚拟网映射问题是 NP 难问题^[3]。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, 虚拟链路映射问题仍是 NP 难问题^[4]; 另外可行虚拟节点映射问题是 NP 难问题^[5]。

因虚拟网映射问题是 NP 难问题, 故目前提出的算法集中在求可行解或次优解上, 具体可以分为 3 类。

* 国家自然科学基金资助项目 (No.61070157, No.61070213), 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 基金资助项目 (No.2012CB315900), 浙江省教育厅科研项目 (No.Y201225106)

第一类为两阶段映射算法^[4-9]:将虚拟网映射分为节点映射和链路映射两个阶段,首先使用贪婪算法完成虚拟节点映射,然后使用最优路径、 K 最优路径和多商品流^[4]等算法完成虚拟链路映射。

第二类为一阶段映射算法^[10-12]:将虚拟网作为一个整体,同时完成虚拟节点和虚拟链路映射。参考文献[10]提出基于子图同构检测和回溯的方法,将虚拟节点和虚拟链路映射交叉进行,在节点映射时综合考虑节点和链路的资源需求;参考文献[11]通过马尔可夫随机游走模型,对虚拟网络和物理网络的节点进行评分,通过广度优先搜索算法建立映射顺序树,并在节点可映射集合中进行遍历,回溯式寻找可行映射方案,其实也是将虚拟节点和虚拟链路映射交叉进行;参考文献[12]通过建立虚拟网映射问题的 0-1 整数线性规划模型,直接使用 0-1 整数线性规划求解的常用算法(如分枝一切割法等)进行求解,但该算法计算量太大,不适合问题规模较大的情况。

第三类为基于迭代法求解^[13-16](包括采用粒子群优化和人工鱼群等元启发式算法):该类算法都是先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^[14-16]或可行解^[13]。

参考文献[14~16]的两阶段映射策略都基于随机方法或前述的两阶段映射算法,但由于单虚拟网映射问题是 NP 难问题,从而影响了算法的实用性;参考文献[13]是在两阶段算法没有完成虚拟网映射时,迭代求解可行解,其两阶段映射策略是,通过最速下降(也叫梯度下降)的方法求解尽量紧凑的、满足虚拟节点映射约束的虚拟节点映射方案,然后用多商品流算法完成虚拟链路映射。

两阶段映射算法执行效率高。但由于目前提出的算法在求解虚拟节点映射时,没有考虑或仅部分考虑虚拟链路映射的约束,会导致虚拟节点映射的可行性的降低,从而降低虚拟网构建请求接受率和虚拟网映射收益。一阶段映射算法^[10,11]采用回溯技术,实现虚拟节点和虚拟链路映射的交叉进行,由于回溯技术会导致算法有指数级别时间复杂度,故都采用限制回溯次数的方法,但由于在虚拟节点映射时仅考虑与已经完成映射节点之间虚拟链路映射的可行性,并没有考虑尚未完成映射节点的映射可行性,导致某些虚拟节点映射不可行,从而增加了无效的回溯次数,降低了映射算法的性能。参考文献[13]提出的迭代算法,因虚拟节点映射采用

紧凑节点映射,所以能降低虚拟链路映射代价,但也正因为采用紧凑节点映射,必然会限制虚拟节点映射问题的解空间,导致拒绝了一些本来能完成映射的虚拟网构建请求。

为了提高虚拟节点映射的可行性,本文基于参考文献[5]提出的可行性检验定理和参考文献[11]提出的节点等级指标,设计了基于二分图 K 优完美匹配的以降低映射代价为目标的虚拟网映射迭代算法,以提高虚拟节点映射的可行性并降低虚拟网映射成本,最终达到提高虚拟网构建请求接受率和物理网提供商收益的目的。

2 虚拟网映射问题模型

定义 1 (物理网)物理网表示为无向图 $G^s=(N^s, E^s)$,其中 N^s 和 E^s 分别表示物理节点和物理链路的集合。物理节点 n^s 的属性是 CPU 容量 $c(n^s)$,物理链路 e^s 的属性是链路带宽 $b(e^s)$,且物理网支持路径分割^[4]。

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。每个虚拟节点 n^v 的属性是 CPU 容量 $c(n^v)$,每条虚拟链路 e^v 的属性是链路带宽 $b(e^v)$ 。每个虚拟网都有一个开始时间和结束时间。

定义 3 (虚拟网映射)虚拟网映射是指把虚拟网 G^v 映射到物理网 G^s 的一个子图上,要求每个虚拟节点必须且只能映射到一个物理节点,每个物理节点只能被一个虚拟节点映射;每条虚拟链路必须映射到 G^s 的 1 条或多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映射的物理节点。虚拟网映射时必须满足由 $c(n^v)$ 与 $b(e^v)$ 给出的约束条件^[4]。

定义 4 (可行虚拟节点映射^[5])把满足节点约束条件且至少存在一个可行的虚拟链路映射方案的虚拟节点映射称为可行虚拟节点映射,可行的虚拟节点映射问题是 NP 难问题^[5]。节点约束条件是指每个虚拟节点必须且只能映射到一个物理节点,每个物理节点只能被一个虚拟节点映射,虚拟节点所映射的物理节点的 CPU 剩余容量大于或等于虚拟节点的 CPU 容量。

定义 5 (虚拟网映射收益)同先前研究一样^[4,8,11],虚拟网映射收益定义为虚拟网的虚拟节点 CPU 容量与虚拟链路带宽之和,如 100 时间单位内完成两个虚拟网映射,并且两个虚拟网的虚拟节点 CPU 容量与虚拟链路带宽之和等于 100,则平均收益等于 1。



定义 6 (虚拟网映射代价) 虚拟网映射代价定义为分配给虚拟网的物理网资源(CPU 容量和物理链路带宽)之和。

定义 7 (剩余网络) 把物理网络 G^s 的节点的 CPU 容量减去映射到该物理节点的虚拟节点的 CPU 容量, 虚拟链路所映射的物理路径上的物理链路的带宽减去虚拟链路带宽后的网络称为 G^s 的剩余网络 G_{res}^s 。物理节点 n^s 的 CPU 剩余容量记为 $R_N(n^s)$, 物理链路 e^s 的剩余带宽记为 $R_L(e^s)$ 。

另外虚拟网映射的目标是物理网提供商的长期收益的最大化。

3 基于二分图 K 优完美匹配的虚拟网映射(VNM-KBPM)算法

对动态到达的虚拟网构建请求, 把虚拟网构建分成虚拟节点映射和虚拟链路映射两个阶段来完成。在虚拟节点映射阶段, 综合运用参考文献[5]和参考文献[11]的研究成果以提高虚拟节点映射的可行性; 在虚拟链路阶段采用基于多商品流的线性规划算法^[8]。然后基于迭代的方法来解决映射代价小的虚拟网映射方案。

3.1 虚拟节点映射的可行性检验定理^[5]

定义 8 (割) 对网络 $G=(N, E)$ 的节点集合 N 的一个划分称为 G 的一个割。割 $(S, N-S)$ 表示将 N 分成 S 和 $N-S$ 两个部分, 称为网络 G 的 $|S|$ -割。若链路 $e(u, v)$ 满足 $u \in S, v \in N-S$, 则称链路 e 通过割 $(S, N-S)$, 所有通过割 $(S, N-S)$ 的链路的带宽之和称为割 $(S, N-S)$ 的容量, 记为 $\varphi(G, S)$ 。

定义 9 (K -割检验) 记 $M_n: N^v \rightarrow N^s$ 是虚拟网 G^v 到物理网 G^s 的节点映射, 常数 $K \in [1, |N^v|]$ 。如 $\forall S \subseteq N^v, |S|=K, M_n$ 满足式(1), 则称 M_n 通过 K -割检验。

$$\varphi(G^v, S) \leq \varphi(G^s, M_n(S)) \quad (1)$$

其中, $M_n(S) = \{n^s | n^s = M_n(n^v), n^v \in S\}$ 。

定理 1 (可行性检验定理) M_n 有可行的虚拟链路映射与之对应, 当且仅当 M_n 通过所有的 K -割检验, 其中 $K \in [1, |N^v|/2]$ 。证明见参考文献[5]。

根据可行性检验定理, 只有通过所有 K -割检验的虚拟节点映射才是可行的, 但由于完成所有 K -割检验复杂度过高, 在计算上是不可行的^[5]。另外, 虽然参考文献[5]通过实验表明, 通过 1-割检验, 可以以 93.9% 的概率发现不可行虚拟节点映射, 但该结论是在物理网络规模小的情况下得出的实验结论, 并不适合大中型物理网络。

3.2 节点等级指标^[11]

参考文献[11]通过马尔可夫随机游走模型, 根据节点自身的资源可及性以及与其相连节点的资源可及性计算节点的节点级别(node rank), 以衡量节点的可用性。节点等级的具体计算方法见参考文献[11], 在此不再赘述。

3.3 二分图 K 优完美匹配问题^[17]

设 $G=(V, E)$ 是一个无向图, 如果顶点 V 可分割为两个互不相交的子集 A 和 B , 且任意边 $e \in E$ 的两个端点分别在 A 和 B 中, 则称图 G 为一个二分图。 M 为 E 的一个子集, 且 M 中的任意两条边都不依附于同一个顶点, 则称 M 是二分图 G 的一个匹配, 所有匹配当中边数最多的匹配称为最大匹配。如匹配 M 符合 $|M|=|A|=|B|$, 则称 M 是完美匹配。记二分图边 e 的权重为 $w(e)$, 则匹配 M 的权重

$w(M)$ 为 $\sum_{e \in M} w(e)$ 。二分图 G 的 K 优完美匹配问题是求二分图的 K 个完美匹配 $M_1, M_2, \dots, M_k$, 并满足 $w(M_1) \geq w(M_2) \geq \dots \geq w(M_k) \geq w(M)$, M 是指 $M_1, M_2, \dots, M_k$ 之外的二分图 G 的其他完美匹配。二分图的最大匹配和完美匹配问题都在多项式时间内可解。

3.4 算法设计

构建二分图 $G(N^v \cup N^s, E)$, $E = \{(n^v, n^s) | n^v \in N^v, n^s \in N^s, R_N(n^s) \geq c(n^v), \varphi(G^v, n^v) \leq \varphi(G^s, n^s)\}$, 然后通过求二分图最大匹配 M , 就可以求出满足节点约束条件并通过 1-割检验的虚拟节点映射方案(如 $|M|=|N^v|$)。为进一步提高虚拟节点映射可行性, 对所求虚拟节点映射方案进行 K -割随机检验。

由于二分图最大匹配可能有多个且二分图的最大匹配枚举问题是 NP 难问题^[18], 为进一步提高虚拟节点映射的可行性并降低虚拟网映射代价, 采取以下方法。

(1) 定义二分图 G 的边权重为该边对应物理节点级别与虚拟节点级别之乘积。

(2) 通过迭代求二分图 K 优最大匹配(求二分图的 K 个最大匹配 $M_1, M_2, \dots, M_k$, 满足 $|M_i|=|N^v|, w(M_1) \geq w(M_2) \geq \dots \geq w(M_k) \geq w(M)$, M 是指 $M_1, M_2, \dots, M_k$ 之外的二分图 G 的其他最大匹配), 具体方法是先增加二分图 G 的顶点和相应权重为 0 的边, 把二分图 K 优最大匹配问题转换成二分图 K 优完美匹配问题, 然后用参考文献[17]所提出的求解二分图 K 优完美匹配的多项式时间算法来实现。求 K 优的原因是匹配的权重越大, 说明所映射的物理节点可用性越高, 那么虚拟节点映射的可行性越高。二分图 G 边的权重用物

理节点级别与虚拟节点级别之乘积的目的是使节点级别高的虚拟节点映射到级别相对高的物理节点上,级别低的虚拟节点映射到级别相对低的物理节点上。具体算法流程如下。

输入: 虚拟网 $G^v=(N^v,E^v)$, 物理网的剩余网络 $G_{rs}^s=(N^s,E^s)$ 。

输出: 虚拟网映射方案。

步骤 1 用指定的 ε 采用参考文献[11]中的算法 1, 计算物理节点 n^s 和虚拟节点 n^v 的节点级别 $r(n^s)$ 和 $r(n^v)$ 。

步骤 2 构建带权无向二分图 $G(N^v \cup N^s \cup N^a, E \cup E^a)$, N^a 包含 $|N^s|-|N^v|$ 个顶点, $E=\{(n^v, n^s) | n^v \in N^v, n^s \in N^s, R_N(n^s) \geq c(n^v), \varphi(G^v, n^v) \leq \varphi(G^s, n^s)\}$, $E^a=\{(n^a, n^s) | n^a \in N^a, n^s \in N^s\}$, 属于 E 的边 (n^v, n^s) 的权重等于 $r(n^s) \times r(n^v)$, 属于 E^a 的边 (n^a, n^s) 的权重等于 0。

步骤 3 $I_1=O_1=\Phi; k=2; C_j=+\infty, j \in [1, K]$ 。

步骤 4 求出带权无向二分图 G 的权重最大的完美匹配 M_1 (用 Kuhn-Munkres 算法^[19]求解, 如找不到则设 $w(M_1)=-\infty$) 和权重第二大完美匹配 N_1 (用参考文献[17]提出的 ALCLS 算法, 如找不到则设 $w(N_1)=-\infty$)。

步骤 5 如 $w(M_1)=-\infty$, 则拒绝虚拟网请求, 算法结束。

步骤 6 对匹配 M_1 进行随机 K -割检验 (随机生成虚拟网的割 $(S_i, N^v-S_i), i \in [2, |N^v|/2]$, $|S_i|=i$; 然后针对这 $|N^v|/2-1$ 个割, 检验式(1)是否都成立)。如检验不通过, 转步骤 7; 否则依据匹配 M_1 完成虚拟节点映射 (匹配的每条权重不为 0 的边, 都连接了一个虚拟节点和其所映射的物理节点), 然后用基于多商品流的线性规划算法进行虚拟链路映射, 如成功, 则计算虚拟网映射代价 C_1 。

步骤 7 求出 p 值, 使 $w(N_p)=\min\{w(N_i) | i=1, \dots, k-1\}$ 。

步骤 8 如 $w(N_p)=-\infty$, 则 { 求出 s 值, 使 $C_s=\min\{C_j | j \in [1, K]\}$; 如 C_s 等于 $+\infty$, 则拒绝该虚拟网请求, 否则输出 M_s 匹配对应的虚拟网映射方案; 算法结束 }; 否则 $\{M_k=N_p$, 对匹配 M_k 进行随机 K -割检验, 如检验不通过, 转步骤 9; 否则依据匹配 M_k 完成虚拟节点映射, 然后用基于多商品流的线性规划算法进行虚拟链路映射, 如成功, 则计算虚拟网映射代价 C_k }。

步骤 9 如果 $k=K$, 则 { 求出 s 值, 使 $C_s=\min\{C_j | j \in [1, K]\}$; 如 C_s 等于 $+\infty$, 则拒绝虚拟网请求, 否则输出 M_s 匹配对应的虚拟网映射方案; 算法结束 }; 否则任选 $e_{k-1} \in M_p - N_p$ 。

步骤 10 更新集合 I 和 $O: I_k=I_p, I_p=I_p \cup \{e_{k-1}\}, O_k=O_p \cup$

$\{e_{k-1}\}$ 。

步骤 11 在 $\Omega_{(I_k, O_k)}$ 和 $\Omega_{(I_p, O_p)}$ 中求出权重第二大完美匹配 N_k 和 N_p 。

步骤 12 $k=k+1$, 转步骤 7。

在 $\Omega_{(I_k, O_k)}$ 中求权重第二大完美匹配的方法如下^[17]: 在二分图 $G(N^v \cup N^s \cup N^a, E \cup E^a)$ 中删除所有属于 I_k 的边 e 及边 e 所连接的两个顶点, 并把所有属于 O_k 的边 e 的 $w(e)$ 设置成 $-\infty$, 构建新的带权无向图 $G_{(I_k, O_k)}$, 然后在 $G_{(I_k, O_k)}$ 中, 基于参考文献[17]提出的 ALCLS 算法求出权重第二大完美匹配 M' , 则 $N_k=M' \cup I_k$ 。在 $\Omega_{(I_p, O_p)}$ 中求权重第二大完美匹配的方法相同。

4 算法性能实验

采用实验的方法对算法的性能进行分析, 把 VNM-KBPM 算法与参考文献[11]提出的基于节点等级贪婪匹配的 RW-MM-MCF 算法以及参考文献[13]提出的保持节点紧凑的 CNM_LS_SDM 算法进行比较分析。

4.1 仿真环境及性能评估指标

对 VNM-KBPM 算法性能的评估, 通过 MATLAB 模拟仿真进行。算法性能的评估指标, 同大多数先前研究一样^[8,10,11,13], 主要使用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)、物理网提供商的平均收益 (单位时间虚拟网映射收益) 和虚拟网构建的收益代价比 (在时刻 t 及之前所有映射成功的虚拟网收益之和与虚拟网映射代价之和的比值, 就是时刻 t 的虚拟网构建收益代价比)。

VNM-KBPM 算法步骤 1 中 ε 和 RW-MM-MCF 算法中 ε 的取值都是 0.000 1。根据参考文献[13]的实验结论, CNM_LS_SDM 算法中迭代次数参数 T_{try} 取 5。

4.2 实验数据的设定

同参考文献[11]一样, 采用工具 GT-ITM^[4]随机产生物理网络, 物理网络有 100 个物理节点和 500 条虚拟链路, 物理节点的 CPU 容量和物理链路的带宽在 50~100 整数间均匀分布。虚拟网请求的到达是一个泊松过程, 平均每 100 时间单位有 5 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 500 时间单位。对于每个虚拟网请求, 虚拟节点数在 (2, 20) 等概率随机产生, 虚拟网平均连通度是 50%, 虚拟节点的 CPU 容量和虚拟链路的带宽在 1~50 整数间均匀分布。



4.3 实验结果

(1) 迭代次数 K 对 VNM-KBPM 算法性能的影响

迭代次数 K 对 VNM-KBPM 算法性能影响的分析,是通过在实验中变动 K ,观察虚拟网络请求接受率的变化情况(此处接受率指达到稳态时的虚拟网构建请求接受率的均值),实验结果如图 1 所示,随着 K 的提高,接受率也在提高,但当 K 超过一定数值之后,接受率就没有显著的提升。从图 1 中可以看出, $K=|N^v|$ 是一个临界值,因此在下面的实验中,设定迭代次数 K 为 $|N^v|$ 。

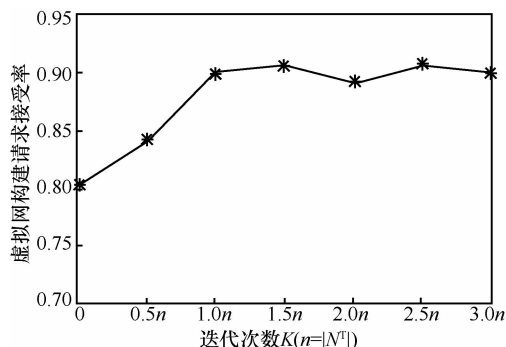


图 1 迭代次数 K 对算法性能的影响

(2) 虚拟网构建请求接受率、映射收益和节点映射可行性

从图 2 和图 3 的数据中明显观察到,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。但当请求数到达一定数量之后,随着请求数的进一步增加,由于原来存在的虚拟网到达生存时间而不断释放网络资源,虚拟网构建接受率和平均收益会逐渐达到稳态。从实验结果可以看出,算法 VNM-KBPM 有利于提高虚拟网构建请求接受率和物理网提供商的平均收益,原因是 VNM-KBPM 算法在考虑节点映射可行性的基础上,通过迭代选择映射代价小的虚

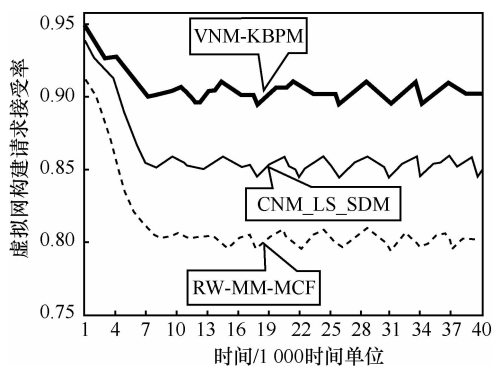


图 2 虚拟网构建请求接受率

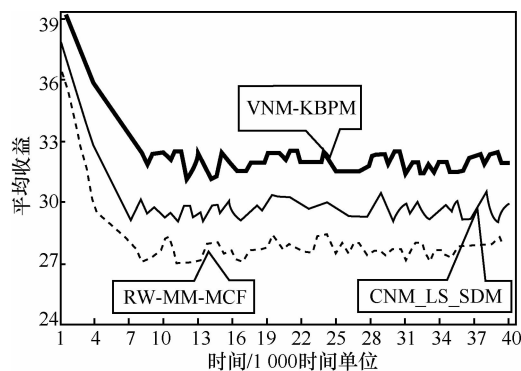


图 3 虚拟网构建平均收益

拟网映射方案。而 RW-MM-MCF 算法采用马尔可夫随机游走模型,使得原本资源可及性较低的节点由于与高等级的节点相邻,也获得了较高的节点等级,从而容易导致虚拟链路映射的失败;而 CNM_LS_SDM 算法虽然将相邻的虚拟节点映射到邻近的物理节点之上,减少虚拟链路对网络资源的占用,但却限制了解空间,一定程度上降低了虚拟网构建请求接受率,进而影响物理网提供商的平均收益。

因物理网支持路径分割,物理链路映射采用多商品流算法,故可行的虚拟节点映射意味着可行的虚拟网络映射,即虚拟网构建请求接受率,能直接反映出映射算法所求出可行虚拟节点映射的比例。从图 2 可以看出,VNM-KBPM 算法的虚拟节点映射的可行性是最高的。

(3) 虚拟网构建的收益代价比

从图 4 明显观察到,VNM-KBPM 算法的收益代价比是最高的,这说明了 VNM-KBPM 算法的有效性。RW-MM-MCF 算法采用马尔可夫随机游走模型,也能较好地控制映射节点之间的距离,减少虚拟网络的映射开销。CNM_LS_SDM 算法收益代价比也较高,其原因是 CNM_LS_SDM 算法将相邻的虚拟节点映射到邻近的物理

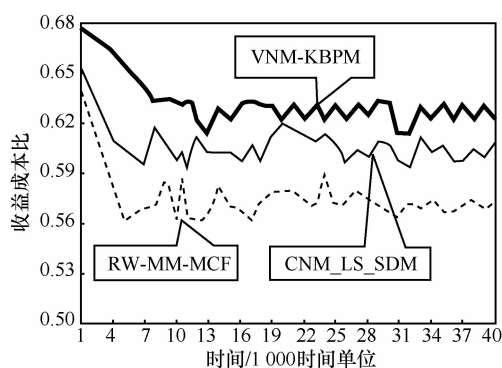


图 4 成本收益比

节点之上,而通常情况下,虚拟节点分布越紧凑,按照多商品流算法完成链路映射后,其平均路径长度也会越小,从而减少虚拟链路对网络资源的占用,提高了收益代价比。VNM-KBPM 算法综合运用马尔可夫随机游走模型和以降低映射代价为目标的迭代策略,其收益代价比更加突出。

5 结束语

虚拟网映射问题包含虚拟节点映射和虚拟链路映射两个子问题,不管是一阶段还是两阶段映射算法,求出可行的虚拟节点映射才是关键。本文分析了当前虚拟节点映射方法所存在的问题,综合应用参考文献[5]和参考文献[11]的研究成果,基于可行性检验定理和用于衡量节点可用性的节点等级指标,设计了基于二分图 K 优匹配的以降低映射代价为目标的虚拟网映射迭代算法,最后通过实验验证,说明所设计算法的有效性和实用性。

参考文献

- 1 Chowdhury N M M K, Boutaba R. A survey of network virtualization. *Computer Networks*, 2010, 54(5): 862~876
- 2 Fischer A, Botero J F, Beck M T, *et al.* Virtual network embedding: a survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2013, 15(4): 1888~1906
- 3 Andersen D G. Theoretical approaches to node assignment. <http://www.cs.cmu.edu/~dga/papers/andersen-assign.ps>, 2002
- 4 Yu M, Yi Y, Rexford J, *et al.* Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration. *ACM SIGCOMM on Computer Communication Review*, 2008, 38(2): 17~29
- 5 Hou Y, Zafer M, Lee K, *et al.* On the mapping between logical and physical topologies. *Proceedings of the 1st International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS'09)*, Bangalore, India, 2009: 483~492
- 6 Zhu Y, Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components. *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Barcelona, Spain, 2006: 1~12
- 7 Botero J F, Hesselbach X, Fischer A, *et al.* Optimal mapping of virtual networks with hidden hops. *Telecommunication Systems*, 2012, 51(4): 273~282
- 8 Chowdhury N M M K, Rahman M R, Boutaba R. ViNEYard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(1): 206~219
- 9 Zhang S, Qian Z Z, Wu J, *et al.* An opportunistic resource sharing and topology-aware mapping framework for virtual networks. *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Orlando, Florida, USA, 2012: 2408~2416
- 10 Jens L, Holger K. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection. *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures*, Barcelona, Spain, 2009: 81~88
- 11 Cheng X, Su S, Zhang Z B. Virtual network embedding through topology-aware node ranking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(2): 39~47
- 12 Alkmin G P, Batista D M, Fonseca N L S. Optimal mapping of virtual networks. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'11)*, Houston, Texas, USA, 2011: 1~6
- 13 刘新刚, 怀进鹏, 高庆一等. 一种保持节点紧凑的虚拟网络映射方法. *计算机学报*, 2012, 35(12): 2492~2504
- 14 Zhang Z B, Cheng X, Su S, *et al.* A unified enhanced particle swarm optimization- based virtual network embedding algorithm. *International Journal of Communication Systems*, 2012(2)
- 15 朱强, 王慧强, 吕宏武等. VNE-AFS: 基于人工鱼群的网络虚拟化映射算法. *通信学报*, 2012, 33(Z1): 170~177
- 16 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. *电子与信息学报*, 2013, 35(7): 1753~1759
- 17 Chegiredy C R, Hamacher H W. Algorithms for finding K -best perfect matchings. *Discrete Applied Mathematics*, 1987, 18(2): 155~165
- 18 Lovász L, Plummer M D. *Matching Theory*. North Holland: Elsevier Science Publishers, 1985
- 19 王海英. *图论算法及其 MATLAB 实现*. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010

[作者简介]



余建军,男,衢州职业技术学院副教授、信息工程学院副院长,主要研究方向为网络虚拟化技术、光网络技术和算法设计与分析等。



吴春明,男,博士,浙江大学教授、博士生导师,主要研究方向为面向服务提供的大规模可重构柔性网络构建技术、计算机网络 QoS、三网融合体系结构和网络虚拟化等。

(收稿日期:2013-09-30)