

文章编号:1001-9081(2014)06-1537-04

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.06.1537

考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法

王博*, 陈庶樵, 王志明, 王文钊

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002)

(*通信作者电子邮箱 wangbo8990@163.com)

摘要:网络虚拟化的关键问题是虚拟网映射, 能耗开销的快速增长使得节能成为底层设施供应商关注的目标。针对虚拟网映射中的节能问题, 提出一种集中使用网络拓扑的节能虚拟网映射算法。该算法引入接近度中心度概念和节点能力共同表征节点的重要程度, 优先使用已工作节点进行资源整合使用, 同时通过检验保证底层链路距离不会过长, 有利于减少能耗和开销。实验仿真结果表明该算法在接受率达到 70%、长期收益开销比达到 75% 的同时, 使收益能耗比提高 20% 以上, 与之前算法相比具有优势。

关键词:网络虚拟化; 虚拟网映射; 拓扑聚合; 接近度中心度; 节能

中图分类号: TP393.0 **文献标志码:**A

Energy-aware virtual network embedding algorithm based on topology aggregation

WANG Bo*, CHEN Shuqiao, WANG Zhiming, WANG Wenzhao

(National Digital Switching System Engineering and Technology Research Center, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: The key issue of network virtualization is Virtual Network Embedding (VNE), and the rapid growth of energy cost makes infrastructure providers concern energy conservation. An energy conservation VNE algorithm that centrally used network topology for saving energy on VNE problem was presented. The importance of the nodes was characterized by the conception of closeness centrality and the capabilities of the nodes, and the working nodes were preferentially used for resources integration to reduce energy consumption and calculation cost, that ensured the distance of the substrate links won't be too long. The simulation results show that the proposed algorithm improves revenue-energy ratio more than 20% when accept ratio reaches 70% and revenue cost ratio reaches 75%, and has advantages compared with the previous algorithms.

Key words: network virtualization; Virtual Network Embedding (VNE); topology aggregation; closeness centrality; energy conservation

0 引言

当前互联网存在“僵化”问题^[1]: 网络各运营商间存在竞争关系, 使得互联网不能进行激进性的技术革新^[2]。网络虚拟化能够解决这一问题: 它将互联网服务供应商分为两部分^[3], 底层设施供应商和服务供应商, 使不同虚拟网络能够同时运行在一个底层网络上。网络虚拟化实现的关键问题是虚拟网映射^[4]——如何将虚拟网请求 (Virtual Network Requirement, VNR) 映射到底层网络上。底层设施供应商的首要问题是怎样在降低成本的同时提高收益, 而随着能耗日益增高, 能耗成本已接近总成本的 50%。网络虚拟化能够将网络请求整合于少数设备, 关闭其他设备以减少能耗^[5], 这使底层设施供应商开始关注映射的节能效果。

以最小化成本为目标的虚拟网映射研究已经取得一些成果: 文献[6]给出节点和链路上资源强度的表示方法, 并根据节点和链路的情况选择不同算法以达到负载均衡; 同时提出划分的启发式算法提高映射效率。文献[7]以贪婪策略优先选择整体能力最高的底层节点进行映射, 并提出链路分离与链路迁移的方法将单路径链路映射问题转化为多商品流问

题, 降低因链路映射失败而拒绝虚拟网请求的可能, 从而提高接受率。文献[8]以贪婪策略利用马尔可夫随机游走模型对节点排序, 考虑网络的拓扑结构, 提高了长期收益和映射接受率。文献[9]给出增广图方法将两阶段映射改为单阶段协同映射, 并将最小化成本的目标函数加入负载均衡参数, 提高了映射接受率。

一些考虑节能的虚拟网映射算法也已被提出。Botero 等^[10]给出一个混合整数规划 (Mixed Integer Programming, MIP) 模型, 在保证映射正常进行的同时尽可能多地关闭节点和链路; 之后, 文献[11]改进了文献[9]模型, 结合考虑负载均衡的最小开销, 给出改进的 MIP 模型并提出节能的重构算法; Su 等^[12]给出 MIP 模型并提出一种两阶段算法, 在降低能耗的同时提高收益; Wang 等^[13]给出虚拟网映射的通用能耗模型, 并提出两阶段的协同映射算法。

上述节能映射算法存在一些不足: 1) 大多将 MIP 松弛条件转化为线性规划 (Linear Programming, LP) 模型, 时间复杂度较高; 2) 没有考虑节点在拓扑中的重要度对映射的影响。针对这种情况, 本文提出一种两阶段协同映射的节能虚拟网映射算法。首先引入接近度中心度的概念和节点能力共同来

收稿日期:2013-12-02; 修回日期:2014-01-13。 基金项目: 国家 973 计划项目(2012CB315901); 国家 863 计划项目(2013AA013505)。

作者简介: 王博(1989-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 下一代互联网、网络虚拟化; 陈庶樵(1973-), 男, 黑龙江肇县人, 教授, 博士, 主要研究方向: 宽带信息网络; 王志明(1986-), 男, 辽宁大连人, 博士研究生, 主要研究方向: 下一代互联网、网络虚拟化; 王文钊(1989-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要研究方向: 下一代互联网、网络虚拟化。

表示节点在网络中的重要程度;然后尽量将节点整合映射到已工作节点上,缩小映射节点在底层网络上的距离来减少中间节点能耗。

1 问题描述

1.1 虚拟网映射

1.1.1 网络模型

底层网络用加权无向图 $G^S = (N^S, L^S, A_N^S, A_L^S)$ 表示, N^S 和 L^S 分别是底层网络上的节点集合和链路集合:每一个底层节点 $n^S \in N^S$ 都有能力 $a_N^S \in A_N^S$, 本文指 CPU 处理能力 $c(n^S)$; 每一条底层链路 $l_i^S = (n_i^S, n_j^S) \in L^S$ 都有能力 $a_L^S \in A_L^S$, 本文指带宽能力 $b(l_i^S)$ 。底层网络上路径集合用 P^S 表示, 如源节点 s 到目的节点 t 之间的所有路径为 $P^S(s, t)$ 。图 1(a) 为一个底层网络例子, 节点附近方框内数字表示 CPU 资源, 链路上的数字表示带宽资源。类似地, 虚拟网请求用加权无向图 $G^V = (N^V, L^V, D_N^V, D_L^V)$ 表示, N^V 和 L^V 分别表示虚拟网请求上的节点集合和链路集合:每一个虚拟节点 $n^V \in N^V$ 都有要求 $d_N^V \in D_N^V$, 每一条虚拟链路 $l_i^V = (n_i^V, n_j^V) \in L^V$ 都有要求 $d_L^V \in D_L^V$ 。此外每一个虚拟网请求都有自身生命时间 $T(G^V)$ 。图 1(b)、(c) 给出两个虚拟网请求例子, 节点附近方框内数字表示 CPU 资源要求, 链路上的数字表示带宽资源要求。

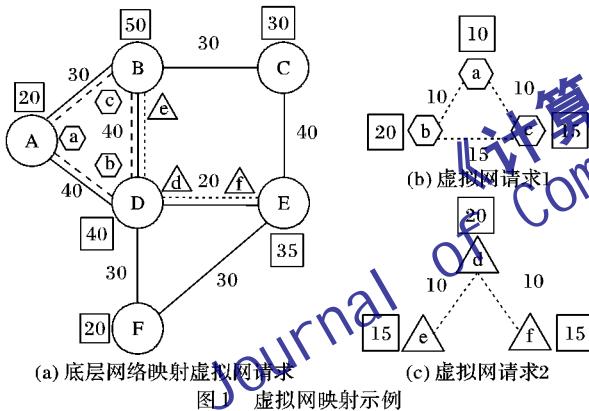


图 1 虚拟网映射示例

1.1.2 虚拟网映射

虚拟网映射本质是从 G^V 到 G^S 某子集的映射: $M: G^V(N^V, L^V) \rightarrow G^S(N^S, P^S)$, 其中 $N^S \in N^S, P^S \in P^S$; 可分为节点映射和链路映射两部分。节点映射 $M_N: N^V \rightarrow N^S$ 时, 一个虚拟网请求的不同节点被分配到底层网络上不同的节点上, 底层节点上映射的虚拟节点 CPU 处理要求之和不能超过该节点的 CPU 处理能力。链路映射 $M_L: L^V \rightarrow P^S$ 时, 一条虚拟链路可分配在底层网络上的单一链路(不支持路径分离)或多条链路(支持路径分离)上, 底层链路上映射的虚拟链路带宽要求之和不可超过该链路的带宽能力。图 1(a) 给出了一种虚拟网映射的选择。

1.1.3 资源能力表示

底层网络的剩余资源有以下几种: 节点 n^S 上的剩余资源 $R_N(n^S)$ 为其 CPU 处理能力减去该节点上映射的虚拟节点 CPU 要求之和, 即:

$$R_N(n^S) = c(n^S) - \sum_{n^V \in N^V} c(n^V) \quad (1)$$

链路 l^S 上的剩余资源 $R_L(l^S)$ 为其带宽能力减去该链路上映射的虚拟链路带宽要求之和, 即:

$$R_L(l^S) = b(l^S) - \sum_{l^V \in l^S} b(l^V) \quad (2)$$

底层网络上路径 P 的剩余资源 $R_L(P)$ 为该路径上底层链路剩余资源的最小值, 即:

$$R_L(P) = \min_{l^S \in P} R_L(l^S) \quad (3)$$

节点 n^S 整体能力 $H(n^S)$ 能够表示其 CPU 处理能力和所连接链路的带宽能力, 一般表征为其 CPU 处理能力与其所连接链路的带宽和之积^[7], 虚拟节点的整体要求也可以此表示, 即:

$$H(n^S) = c(n^S) \cdot \sum_{l \in adj(n^S)} b(l^S) \quad (4)$$

1.2 虚拟网能耗模型

在文献[13]的通用能耗模型中, 底层网络在成功映射一个虚拟网请求 G^V 后, 该请求单位时间内能耗为:

$$E_u(G^V) = \sum_{p \in N^S} \delta_p (\eta_p - \lambda_p) + \sum_{(p, q) \in L^S} \beta_{pq} (y_{pq} - x_{pq}) + \sum_{p \in N^S} u_p^{pp} c(p) \quad (5)$$

其中: λ_p 和 η_p 分别表示底层节点 p 在映射 G^V 前、后的工作状态, 若节点处于工作状态则值为 1, 否则为 0; x_{pq} 和 y_{pq} 分别表示底层链路 pq 在映射 G^V 前、后的工作状态, 若链路处于工作状态则值为 1, 否则为 0; δ_p 表示节点 p 开启状态下单位时间内的基本能耗, β_{pq} 表示链路 pq 工作时单位时间内的基本能耗; u_p^{pp} 表示节点 p 单位时间内使用 CPU 处理能力的单位能耗。参考文献[13], 本文实验中取 $\delta_p = 150$, $\beta_{pq} = 4$, $u_p^{pp} = 1$ 。

虚拟网请求 G^V 的总能耗为:

$$E(G^V) = E_u(G^V) \cdot T(G^V) \quad (6)$$

1.3 映射评价指标

1) 映射接受率。

底层网络能够成功映射虚拟网请求的可能性, 表示为当前成功映射的虚拟网数目与虚拟网请求总数目之比:

$$\frac{\text{number}_{\text{accepted VNR}}}{\text{number}_{\text{all VNR}}} \quad (7)$$

2) 收益开销比。

底层网络供应商通过分配资源获得收益, 单位时间内映射一个虚拟网请求 $G^V(t)$ 可以获得的收益定义为:

$$R_{\text{embed}}(G^V(t)) = \sum_{l^V \in L^V} b(l^V) + \rho_{cb} \sum_{n^V \in N^V} c(n^V) \quad (8)$$

底层网络供应商在映射虚拟网请求时需要付出映射开销, 单位时间内映射一个虚拟网请求 $G^V(t)$ 的开销定义为:

$$C_{\text{embed}}(G^V(t)) = \sum_{l^V \in L^V} \sum_{l^S \in L^S} b_{ls}^V + \rho_{cb} \sum_{n^V \in N^V} c(n^V) \quad (9)$$

其中: ρ_{cb} 是计算收益与开销时带宽和 CPU 之间的平衡参数, 参考文献[6], 本文实验中取 $\rho_{cb} = 1$ 。

定义长期收益开销比为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T [R_{\text{embed}}(G^V(t)) \cdot T(G^V(t))] }{\sum_{t=0}^T [C_{\text{embed}}(G^V(t)) \cdot T(G^V(t))]} \quad (10)$$

3) 收益能耗比。

收益能耗比表示此时刻底层网络单位能耗产生的收益, 定义为单位时间内收益与能耗之比:

$$\frac{\sum_{G^V \in \text{accepted VNR}} R_{\text{embed}}(G^V(t))}{\sum_{G^V \in \text{accepted VNR}} E(G^V(t))} \quad (11)$$

2 考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法

社交网络中,目标的中心度可用来评价其重要程度,目标中心度越高则其越接近社交网络的中心位置。参考文献[14],本文选取节点的接近度中心度定义来表示节点在网络拓扑中靠近中心的程度。

定义1 接近度中心度。节点的接近度中心度是其与所有可达节点最短路径距离之和的倒数,如式(12)所示:

$$K_c(n_i) = \frac{1}{\sum_{n_j \neq n_i} d(n_i, n_j)} \quad (12)$$

其中 $d(n_i, n_j)$ 为节点 n_i 与 n_j 间最短路径的距离。节点 n_i 的接近度中心度 $K_c(n_i)$ 越大表示该节点越接近网络拓扑的中心位置;否则表示此节点远离中心。

通过计算节点的接近度中心度,可以发现网络拓扑中更靠近中心位置的节点。无论是在虚拟网络请求中还是底层网络中,根据接近度中心度排序优先映射,可以使映射不会较快到底层网络的边缘,更好地利用网络中的资源,实现提高映射成功率的目的。

2.1 修正接近度中心度

为实现集中使用拓扑资源,在节点映射时优先使用满足要求的已工作节点,因而需要对接近度中心度用工作状态进行修正。

定义2 工作状态修正的接近度中心度。引入工作状态系数修正后的节点接近度中心度,如式(13)所示:

$$K'_c(n_i) = [K_c(n_i)]^{\alpha_{n_i}} \quad (13)$$

其中 α_{n_i} 为节点 n_i 工作状态系数。若节点 n_i 未处于工作状态,则 α_{n_i} 值为 1;若节点 n_i 处于工作状态,则 α_{n_i} 值为 0.5。由于节点的接近度中心度小于 1,如此修正后使已工作节点的接近度中心度增大。

为减少中间节点能耗,本文优先使用虚拟网络请求中排序首位节点所映射底层节点的邻居节点作为之后的候选节点,再次修正节点 n_i 的接近度中心度。

定义3 距离二次修正的接近度中心度。对工作状态修正的接近度中心度,根据与首映射节点最短路径距离进行二次修正的接近度中心度,如式(14)所示:

$$K''_c(n_i) = \frac{K'_c(n_i)}{1 + d(n_f, n_i)} \quad (14)$$

其中: n_f 表示首映射节点,正数 1 用以修正距离, $d(n_f, n_i)$ 为节点 n_f 与 n_i 间最短路径的距离。当底层网络中存在多个接近度中心度相近的节点时,二次修正考虑后续节点与首节点的距离对能耗的影响,避免选取远离首节点的底层节点。

为确保后续节点之间距离较小,引入节点选择距离判定参数进行检验。

定义4 节点选择距离判定值。在确定核心节点后,将要映射的虚拟节点与已映射虚拟节点在虚拟网请求中的距离和与底层网络中映射的底层节点距离和之比,如式(15)所示:

$$\theta(n_i^v, n_p^s) = \frac{\sum_{n_j^v \in I^0} d(n_i^v, n_j^v)}{\sum_{n_q^s \in A^0} d(n_p^s, n_q^s)} \quad (15)$$

其中: n_i^v 为正在映射的虚拟节点, n_p^s 为此时选择的底层节点,

n_j^v 表示已经映射的虚拟节点, I^0 为其集合, n_q^s 表示已被选择的底层节点, A^0 为其集合。在选定首节点映射位置之后,每次节点映射后求出节点选择距离判定值,如果大于给出的距离判定参数 Θ ,则确定该点符合距离要求,进行节点映射。

2.2 考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法

虚拟网请求到达后,由带宽要求给出距离矩阵,根据式(12)计算虚拟节点的接近度中心度。在虚拟网络规模不大于 10 个节点时,常常会出现不同节点有相同的接近度中心度,因此为了更好地表征节点重要程度,首先对节点根据接近度中心度降序排列,若其相同则按资源要求 H 降序排列。该排序过程如下所示:

输入 虚拟网请求 $G^V(N^V, L^V, D_N^V, D_L^V)$ 。

输出 节点序列 S 。

根据网络信息给出距离矩阵,求出网络的最短路径矩阵;

for 所有虚拟网请求 N^V 中的节点 n_i

 用式(4)计算节点整体能力 $H(n_i)$

 用式(12)计算节点接近度中心度 $K_c(n_i)$

end for

根据 $K_c(n_i)$ 降序排列,相同则按 $H(n_i)$ 降序排列,排序存储在 S 内;

return S

底层网络与之类似,区别在于要根据式(13)计算工作状态修正的接近度中心度 $K''_c(n_i)$ 并降序排列。

每个虚拟节点映射成功后,根据底层网络距离矩阵求出每个节点距离一次修正的接近度中心度并降序排列;对于尚未映射的虚拟节点,选择排序靠前的满足虚拟节点要求的底层节点;根据判定参数检验是否满足节点距离要求,符合则选择该节点映射;若所有节点的资源要求得到满足则进入链路映射阶段,否则拒绝此虚拟网请求;对每条虚拟链路在底层网络中用 K 最短路径算法找出合适的链路;若所有链路的资源要求得到满足,则成功映射,否则拒绝此虚拟网请求。该算法的伪代码如下所示。

输入 底层网络 $G^S(N^S, L^S, A_N^S, A_L^S)$, 虚拟网请求 $G^V(N^V, L^V, D_N^V, D_L^V)$ 。

输出 映射结果 $M: G^V \rightarrow G^S$ 。

初始化 $I^0 = \emptyset, I^1 = N^V, A^0 = \emptyset, A^1 = N^S$ 。

分别对虚拟节点集合 I^1 和底层节点集合 A^1 进行排序;

找出 A^1 中满足 I^1 中首节点 γ^1 要求的首个节点 n_f^S 作为此次映射所用底层网络子集的中心节点,更新节点集合,否则拒绝该请求; for $n_j^S \in A^1, n_j^S \neq n_f^S$

 根据式(14)计算二次修正中心度 $K''_c(n_j^S)$

end for

对 A^1 根据二次修正中心度 $K''_c(n_j^S)$ 再次降序排列;

while $I^1 \neq \emptyset$

 if 遍历 A^1 ,找到首个满足 γ^1 要求及距离判定的节点 n_j^S

$n_j^S = M_N(\gamma^1), I^0 = I^0 \cup \gamma^1, I^1 = I^1 \setminus \gamma^1, A^0 = A^0 \cup n_j^S, A^1 = A^1 \setminus n_j^S$

 else 拒绝此请求

 end if

end while

根据 M_N 用 K 最短路径(K -Shortest Path, KSP)算法找出链路映射解 M_L ;

if 所有虚拟链路要求被满足

 return $M(M_N, M_L)$

else 拒绝此请求

end if

2.3 算法复杂度分析

考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法首先需要求出所有节点之间的最短路径,疏松图网络采用 Floyd-Warshall 算法的时间复杂度为 $O(N^2 \log N + NE)$, N 、 E 分别为网络节点和链路数目;在随后寻找满足节点需求、距离判定的最坏情况时间复杂度为 $O(n^2 N)$, n 为虚拟网节点数目;链路映射时使用 K 最短路径算法时间复杂度为 $O(K + E + N \log N)$ 。该算法复杂度为 $O(n^3 N + NE + N^2 \log N)$ 。

3 仿真实验分析

本文用映射接受率、长期的收益开销比、收益能耗比 3 个指标来比较贪心算法 (Baseline)^[7]、接近度算法 (Closeness)^[14] 和本文中考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法 (EAVNE-TA) 3 种算法的性能。本文算法距离判定参数 Θ 取 0.5。

3.1 环境设置

实验环境为配置 Intel Core i7 3.40 GHz CPU、4 GB 内存的 PC。使用 BRITE 工具产生由 100 个节点、500 条链路组成的底层网络,其节点 CPU 能力和链路带宽能力在 50~100 均匀分布;虚拟网请求的到达过程服从时间单位 100,强度 4 的泊松过程,每个虚拟网请求的生存时间服从 1000 的指数分布;虚拟网请求的节点个数在 2~10 均匀分布,任意节点间连接概率为 0.5,节点 CPU 和链路带宽需求在 0~50 均匀分布;每组实验中生成约 2000 个虚拟网请求,进行 10 次实验结果取平均值。

3.2 考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法评价

1) 映射接受率。

图 2 给出了不同算法底层网络映射接受率随时间变化的过程,不同算法在 15000 个时间单位后都开始稳定。Baseline 算法映射接受率约为 70%;Closeness 算法由于仅仅考虑了网络拓扑的连接关系,没有考虑节点和链路的能力,接受率降至 30% 以下;考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法 (EAVNE-TA) 在节点映射阶段同时考虑了节点的拓扑位置和整体能力,在节点映射时考虑了节点距离对链路映射成功率的影响,使接受率相比 Baseline 算法略有提高。

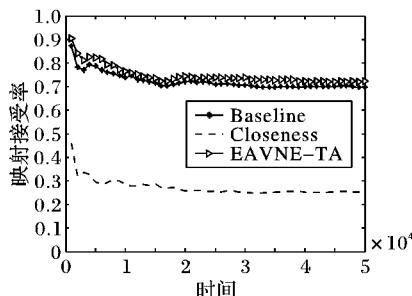


图 2 映射接受率随时间变化的过程

2) 长期收益开销比。

图 3 给出了不同算法底层网络长期收益开销比随时间变化的过程,算法在 25000 个时间单位后都开始稳定。Baseline 算法收益开销比约为 60%,其余算法均高于 Baseline 算法。考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法 (EAVNE-TA) 对链路映射作出尽量缩短长度的考虑,通过检验确保底层所使用网络的聚合度较高,从而将收益开销比提高至 75%。

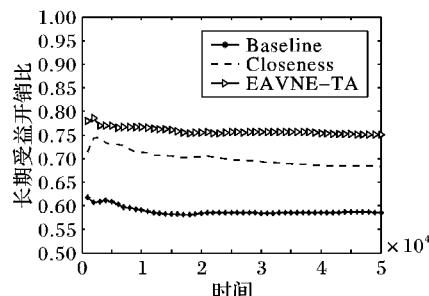


图 3 收益开销比随时间变化的过程

3) 收益能耗比。

图 4 给出了不同算法底层网络收益能耗比随时间变化的过程,为使对比效果更为明显,除首尾取值点外对三个取样间隔时间内的结果取平均值。可看出由于优先使用已工作节点,聚合使用网络拓扑上的资源,考虑节能的拓扑聚合虚拟网映射算法 (EAVNE-TA) 大多时刻的优势相对于其他两种算法在 20% 以上。

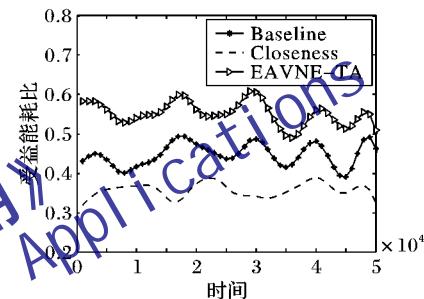


图 4 收益能耗比随时间变化的过程

4 结语

本文针对虚拟网映射问题中的节能问题,提出用接近度中心度来表征节点的拓扑位置,同时结合节点整体能力作为节点映射阶段的排序依据,在选择节点时缩小链路距离并进行检验,给出了一种聚合使用网络拓扑的两阶段协同映射节能映射算法。仿真结果表明算法在提升映射接受率、改善长期收益开销比和提高收益能耗比方面具有优势。

本文算法对映射成功率的提升并不十分明显,主要原因在于协同映射过程仅仅考虑节点间链路长度对映射的影响,而没有考虑节点间所剩带宽对链路映射的影响,下一步工作需要解决这一问题;本文忽略了虚拟网映射时节点的物理位置约束,下一步工作应对此进行考虑;本文仅在单域环境进行研究,下一步工作应放在多域环境中解决虚拟网映射节能问题。

参考文献:

- [1] ANDERSON T, PETERSON L, SHENKER S, et al. Overcoming the Internet impasse through virtualization [J]. Computer, 2005, 38(4): 34~41.
- [2] CHOWDHURY N M, BOUTABA R. A survey of network virtualization [J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862~876.
- [3] CHOWDHURY N M M K, BOUTABA R. Network virtualization: state of the art and research challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(7): 20~26.
- [4] HAIDER A, POTTER R, NAKAO A. Challenges in resource allocation in network virtualization [C]// Proceedings of the 20th ITC Specialist Seminar. Hoi An, Vietnam: [s. n.], 2009, 18: 20.

(下转第 1545 页)

消度远远大于其他2个数据。因此得出结论,在冗余度较大时,PFRTE算法比文献[6]算法CPU消耗更少,同时保证了算法的冗余消除度,证明了算法的有效性。

表4 运行冗余消除算法后字节节省百分比 %

跟踪数据	文献[5]算法	文献[6]算法	PFRTE 算法
A	33.73	40.43	39.78
B	21.23	25.51	23.47
C	5.69	7.84	6.65

4 结语

针对当前协议无关的冗余流量消除算法未充分考虑网络流量特性和冗余分布特性的问题,提出了PFRTE算法。该算法以对冗余消除贡献大的数据包载荷大小为阈值,利用弱哈希计算数据块的边界点。实验结果表明,PFRTE算法在CPU运行时间上优于文献[6]算法,同时在数据集冗余度高的时候,和文献[6]算法相当,即PFRTE算法在不改变冗余消除效果的基础上提高了冗余消除的效率,有效地提高了传输效率。

参考文献:

- [1] MARTYNOV M. Challenges for high-speed protocol-independent redundancy eliminating systems[C]// ICCCN 2009: Proceedings of the 18th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1–6.
- [2] TANG H, LIN X, HAN C. Duplicate elimination algorithm for data streams with SKIP Bloom filter[J]. Journal on Communications, 2012, 33(2): 7–14. (唐海娜,林小拉,韩春静. 基于移动滑窗的数据流冗余消除算法[J]. 通信学报, 2012, 33(2): 7–14.)
- [3] WOLMAN A, VOELKER G, SHARMA N, et al. Organization-based analysis of Web-object sharing and caching [C]// USITS 1999: Proceedings of the 2nd Conference on USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems. Berkeley: USENIX Association, 1999, 2:3.
- [4] SPRING N T, WETHERALL D. A protocol-independent technique for eliminating redundant network traffic[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2000, 30(4): 87–95.
- [5] ANAND A, SEKAR V, AKELLA A. SmartRE: an architecture for coordinated network-wide redundancy elimination [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(4): 87–98.
- [6] AGARWAL B, AKELLA A, ANAND A, et al. EndRE: an end-system redundancy elimination service for enterprises[C]// NSDI 2010: Proceedings of the 7th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley: USENIX Association, 2010: 419–432.
- [7] THOMPSON K, MILLER G J, WILDER R. Wide-area Internet traffic patterns and characteristics[J]. IEEE Network, 1997, 11(6): 10–23.
- [8] HALEPOVIC E, WILLIAMSON C, GHADERI M. Enhancing redundant network traffic elimination[J]. Computer Networks, 2012, 56(2): 795–809.
- [9] LU G, JIN Y, DU D H C. Frequency based chunking for data deduplication[C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2010: 287–296.
- [10] WILLIAMSON C. Internet traffic measurement[J]. IEEE Internet Computing, 2001, 5(6): 70–74.
- [11] YAMAMOTO S, NAKAO Y. P2P packet cache router for network-wide traffic redundancy elimination[C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 830–834.
- [12] BRESLAU L, CAO P, FAN L, et al. Web caching and Zipf-like distributions: evidence and implications[C]// INFOCOM 1999: Proceedings of the 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press, 1999, 1: 126–134.
- [13] COCERES R, DANZIG P B, JAMIN S, et al. Characteristics of wide-area TCP/IP conversations[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1991, 21(4): 101–112.

(上接第1540页)

- [5] GUPTA M, SINGH S. Greening of the Internet[C]// Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2003: 19–26.
- [6] ZHU Y, AMMAR M H. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]// INFOCOM 2006: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1–12.
- [7] 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.
- [8] 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): 38–47.
- [9] CHOWDHURY M, RAHMAN M R, BOUTABA R. ViNEYard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206–219.
- [10] BOTERO J F, HESSELBACH X, DUELLI M, et al. Energy effi-
- [11] FELIPE BOTERO J, HESSELBACH X. Greener networking in a network virtualization environment [J]. Computer Networks, 2013, 57(9): 2021–2039.
- [12] SU S, ZHANG Z, CHENG X, et al. Energy-aware virtual network embedding through consolidation[C]// Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2012: 127–132.
- [13] WANG B, CHANG X, LIU J, et al. Reducing power consumption in embedding virtual infrastructures[C]// Proceedings of the 2012 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2012: 714–718.
- [14] WANG Z, HAN Y, LIN T, et al. Resource allocation algorithms in the reconfigurable network based on network centrality and topology potential [J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 10–20. (王子厚, 韩言妮, 林涛, 等. 可重构网络中基于中心度与拓扑势排序的资源分配算法[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 10–20.)