

节点拓扑感知的高效节能虚拟网络映射算法



朱国晖 张 茵 刘秀霞 孙天骢

西安邮电大学通信与信息工程学院 西安 710121

(21032358@qq.com)

摘 要 针对现有网络资源过度饱和的问题,提出一种节点拓扑感知的高效节能的虚拟网络映射算法。该算法在节点映射阶段,量化节点映射成本的同时考虑拓扑属性,通过改进后的节点排序方法对每个虚拟节点的候选物理节点进行资源评估,计算最佳映射节点。在链路映射阶段,采用 Dijkstra 算法,对于每条候选物理链路,综合考虑链路剩余带宽资源、途经节点剩余资源以及跳数,重新计算链路排序值,从而获得高效节能的最佳映射链路。仿真实验数据表明,该算法能有效降低能量成本,节省物理网络资源,在虚拟网络请求接受率和收益开销比等参数指标上具有显著提升。

关键词: 虚拟网络映射;网络虚拟化;拓扑感知;节点排序;高效节能

中图法分类号 TP393

Energy Efficient Virtual Network Mapping Algorithms Based on Node Topology Awareness

ZHU Guo-hui, ZHANG Yin, LIU Xiu-xia and SUN Tian-ao

School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract Aiming at the problem of over-saturation of existing network resources, this paper proposes an efficient and energy-saving virtual network mapping algorithm based on node topology awareness. In the node mapping stage, the proposed algorithm quantifies the cost of node mapping and considers the topological attributes. It evaluates the candidate physical nodes of each virtual node through the improved node sorting algorithm, and calculates the best mapping nodes. In the link mapping stage, the Dijkstra algorithm is used to redefine the link by considering the maximum link residual bandwidth resources, the maximum path node residual resources and hops. In order to achieve the goal of energy-saving and high efficiency, the ranking value is used to obtain the effective link with the lowest energy cost. The simulation results show that the proposed sorting method can effectively reduce the energy cost and significantly improve the parameters such as request acceptance rate and revenue-cost ratio of virtual networks.

Keywords Virtual network embedding, Network virtualization, Topology-aware, Node ranking, Energy efficient

1 引言

能源成本的上升和大众生态意识的增强使人们已经注意到网络和服务基础设施节能的重要性,因此,降低能耗已成为互联网服务提供商的首要任务之一。当前的网络是为峰值负载而设计的,大量的过度供应以应对高需求运行,必然导致过低的资源利用率以及不必要的能量消耗。例如,大型 ISP 骨干网的平均链路利用率大约为 30%~40%^[1],这造成了电力成本的巨大浪费。基础设施提供商已经将绿色节能作为关注的重点,这也是学者们近年来的研究热点。

基于资源整合技术的网络虚拟化(Network Virtual, NV)将成为未来云计算、软件定义网络方面的节能推动者^[2-4]。网络虚拟化技术的应用导致了将网络资源按需分配给虚拟网络请求的问题,称为虚拟网络映射^[5](Virtual Network Embed-

ding, VNE)。作为网络虚拟化最主要的挑战,虚拟网络映射由于受拓扑多样性、节点和链路资源约束、在线请求的随机到达以及准时控制^[6]等条件限制,求解过程异常复杂。目前已证明虚拟网络映射问题是 NP-Hard 问题^[7]。为了在降低复杂度的同时保证最优解,大多数学者采用节点映射和链路映射的两阶段映射算法,取得了较多成果。

文献[8]提出一种基于贪婪算法的虚拟网络映射算法,在节点映射阶段,仅考虑节点自身 CPU 资源与邻接链路的带宽,未考虑拓扑属性。为了进一步提高映射效率,学者们对节点映射算法的性能进行了改善。Jia 等^[9]提出了能量消耗的优化模型,并将其应用于虚拟网络映射问题。Gong 等^[10]在节点映射阶段采用 TOPSIS 方法将节点资源属性纳入节点排序中,以降低能量成本。文献[11]应用马尔可夫随机游走模型,根据网络节点的资源和拓扑属性重新对网络节点进行排

到稿日期:2019-07-23 返修日期:2019-10-31

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61371087)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61371087).

通信作者:张茵(1362712449@qq.com)

序。文献[12]建立了拓扑一致性的虚拟网络映射模型,同时考虑网络拓朴属性以及网络设备的能耗特性,尽可能保持映射前后的拓朴结构一致。文献[13]利用遗传算法进行虚拟网络的迁移,从能量消耗的角度优化了虚拟网络映射问题。文献[14]提出了一种拓朴感知节点融合算法,并允许多个虚拟节点映射至同一物理节点,以节省物理资源。

目前大多数的虚拟网络映射算法的主要目的是降低虚拟网络映射的资源代价,而忽略了虚拟网络映射的能耗开销问题;并且现有的基于拓朴属性的算法主要是考虑引入马尔可夫随机游走模型^[11]或新的映射算法,未能对拓朴属性以及能量成本进行综合考虑。针对以上文献的不足,本文提出了基于拓朴感知的优化模型的两阶段映射算法(TR-VNE)。在节点映射阶段,量化能量成本的同时,考虑节点的资源丰富度和局部拓朴属性,重新定义节点的排序方式;在链路映射阶段,重新定义链路权重并使用 Dijkstra 算法,从而得到权重最小、路径最短、能耗最低的链路,在减小资源碎片化的同时节省能量。

2 系统模型和问题描述

2.1 网络模型

(1)物理网络:采用带权无向图 $G_s = (N_s, L_s, A_s^n, A_s^l)$ 表示物理网络。其中, N_s 为物理节点 n_s 的集合; L_s 为物理链路 l_s 的集合; A_s^n 表示物理节点的属性集合,对于节点 $n_s \in N_s$,其属性包括剩余节点计算资源 $CP(n_s)$ 和节点位置 $Dis(n_s)$; A_s^l 表示物理链路的属性集合,对于链路 $l_s \in L_s$,其属性为链路剩余带宽资源 $BW(l_s)$ 。

(2)虚拟网络请求:采用带权无向图 $G_v = (N_v, L_v, A_v^n, A_v^l, t_a, t_d)$ 表示虚拟网络。其中, N_v 为虚拟节点 n_v 的集合; L_v 为虚拟链路 l_v 的集合; A_v^n 表示虚拟节点的属性集合,包括节点 CPU 资源需求 $CP(n_v)$ 和节点位置 $Dis(n_v)$ 约束; A_v^l 表示物理链路的属性集合,用 $BW(l_v)$ 表示带宽资源需求。定义第 i 个虚拟网络请求为 $VNR(i) = (G_v, t_a, t_d)$, t_a 表示虚拟网络请求的到达时间, t_d 表示虚拟网络请求的停留时间。

2.2 能量消耗模型

物理节点能耗: $util_i$ 为物理节点的 CPU 利用率,是服务器能耗的主要贡献者;此外,节点的平均能耗几乎与 CPU 利用率呈线性关系^[15]。因此,第 i 个节点的能耗为:

$$PN_i = \begin{cases} P_b + P_t \cdot util_i, & \text{if } i \text{ is active} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_b 代表物理节点的基础能耗, P_m 代表物理节点满载时的最大能耗, $P_t = P_m - P_b$ 为与 CPU 利用率有关的能耗比例因子。

物理链路能耗:由于网络设备对流量负载不敏感,无论接口处于空闲状态还是满载状态, P_n 几乎都为一个常数^[15]。因此,第 j 条链路的能耗 PL_j 为:

$$PL_j = \begin{cases} P_n, & \text{if } j \text{ is active} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

物理网络的总能耗:由于物理网络由节点和链路构成,因此物理网络总能耗为物理节点总能耗与物理链路总能耗之和。

$$Energy = \sum_{i \in N_s} PN_i + \sum_{j \in L_s} PL_j \quad (3)$$

2.3 能量消耗的优化模型

虚拟节点映射的能量成本最小化和资源整合技术都能有效降低网络能耗,本文采用基于最小元素 C_j^i 的优化模型^[16],可以将能量成本最小化问题转化为解决每个 CPU 能耗成本和从虚拟节点映射到物理节点所分配的 CPU 最小乘积问题,其计算如下:

$$C_j^i = \begin{cases} \inf, & \text{if } (CPS_j < CPV_i \parallel BWS_j < BWV_i) \\ \frac{1}{CP_j - MC(1 - A_j)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $CPS_j < CPV_i$ 和 $BWS_j < BWV_i$ 表示物理节点 j 不能容纳虚拟节点 i ,此时, $C_j^i = \inf$, $\inf = 99999$;否则,节点 j 处于活跃状态时 $C_j^i = 1/CP_j$,节点 j 处于休眠状态时 $C_j^i = 1/(CP_j - MC)$ 。 A_j 为一个二进制变量,节点处于活动状态时其为 1,节点处于休眠状态时其为 0。 C_j^i 表示将 i 映射至 j 的每个 CPU 的能量消耗,活动节点具有较低的 C_j^i ,意味着将节点 i 映射至节点 j 的能量成本较低,在 VNE 中就具有较高的优先级。

SN 的能耗与分配的 CPU 资源和每个 CPU 能量成本密切相关,以降低整体能量成本为目标,将其能量成本的计算简化如下:

$$Energy = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_j^i y_j^i \quad (5)$$

其中, y_j^i 为一个变量,表示将节点 i 映射至 j 的 CPU 资源。

2.4 评价指标

定义 1(请求接受率) 在物理网络中,成功接受的虚拟网络请求数量与总到达请求数量之比,记为 η 。 η 越大, VNR 在一个时间周期 T 内被成功接受的数目就越大,基础设施提供商 (Infrastructure Provider, InP) 亦将获得更大的收益。

$$\eta = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T VNR_{suc}}{\sum_{t=0}^T VNR_{sum}} \quad (6)$$

定义 2(长期平均收益) 虚拟网络请求 $G_v = (N_v, L_v)$ 在 t 时刻的收益 $R(VNR, t)$ 定义为它所需的资源,在 t 时刻接受此虚拟网络请求的成本 $C(VNR, t)$ 定义为其总物理资源消耗,即:

$$R(VNR, t) = \sum_{n_v \in N_v} CP(n_v) + \alpha \sum_{l_v \in L_v} BW(l_v) \quad (7)$$

$$C(VNR, t) = \sum_{n_v \in N_v} CP(n_v) + \beta \sum_{l_v \in L_v} BW(l_v) \cdot Hop(l_v) \quad (8)$$

其中, α, β 分别是平衡 CPU 和带宽之间收益和成本的相对权重,本文均取值为 1; $Hop(l_v)$ 是虚拟链路 l_v 映射至物理路径上所经过的跳数。因此,长期平均收益 R 和长期平均成本 C 为:

$$R = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T R(VNR, t) \quad (9)$$

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T C(VNR, t) \quad (10)$$

定义 3(收益开销比) 长期平均收益与长期平均成本之比。

$$\frac{R}{C} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T R(VNR, t)}{\sum_{t=0}^T C(VNR, t)} \quad (11)$$

其中, R/C 为资源利用率。 R/C 越大,资源利用率越高, VNE 算法越高效。

3 算法设计

本文采用两阶段映射算法。在节点映射阶段,首先考虑节点的资源丰富度和局部拓扑属性,得到节点的资源重要度;其次对能量成本和节点的资源重要度进行权重后,定义一种新的节点映射的排序方式,以在保证能量成本较低的同时提高 VNR 接受率,从而获得更高的收益。在链路映射阶段,本文采用 Dijkstra 算法并重新定义权重值,以寻找节点间能耗最低的最短路径。同时,为保证虚拟网络中相邻节点映射至物理网络上仍满足距离约束,引入跳数作为距离参数。

3.1 节点映射

3.1.1 拓扑属性

首先重新定义节点映射顺序。传统的节点排序算法只考虑单个节点所具有的 CPU 剩余资源以及网络中剩余链路带宽资源,并未考虑拓扑属性,而拓扑属性可以从不同方面度量节点的重要性或者相对影响,对 VNE 性能有着至关重要的影响。因此,本文引入拓扑属性。

(1)度:节点的度是其相邻节点与本节点直连链路的数量。度越大,代表节点在网络中局部越重要。

$$D(n_i)=Dgr(n_i) \tag{12}$$

(2)紧密度:传统意义上的紧密度被定义为网络中从一个节点到其他所有节点的最短距离之和的倒数,仅考虑网络拓扑而忽略了后续链路映射。本文通过考虑可用带宽资源,将紧密度重新定义为:

$$CL(n_i)=\sum_{n_j \in N} \frac{BW(n_i,n_j)}{D(n_i,n_j)} \tag{13}$$

其中, N 代表节点集合; $BW(n_i,n_j)$ 代表在 n_i 和 n_j 中最短路径的可用带宽; $D(n_i,n_j)$ 代表在 n_i 和 n_j 中最短路径的距离,通过沿路径的跳数来描述。 CL 值越大,节点越重要,其所需的映射优先级越高。

3.1.2 节点排序

基于拓扑属性和节点资源丰富度的考虑,虚拟节点的资源重要度越高,节点在网络中越重要,映射时所需的优先级越高。定义节点的资源重要度为:

$$R(n)=CP(n) \cdot Dgr(n) \cdot \frac{BW(n_i,n_j)}{D(n_i,n_j)} \tag{14}$$

节点排序值:鉴于底层物理资源是有限的,能量成本低且在网络中资源重要度高定义节点需要更高的优先级,因此定义节点排序值为:

$$RK(n_v)=\lambda \cdot R(n_v)+\gamma \cdot C_j^i \tag{15}$$

其中, λ 为节点资源的权重值, γ 为能量成本的权重值且 $\lambda+\gamma=1$ 。

算法 1 节点映射算法

Input: G_s, G_v

Output: Node Mapping List

- 1. for 每一个虚拟节点 $n_v \in N_v$ do
- 2. 用实时资源计算 $C_j^i, R(n_v), RK(n_v)$;
- 3. end for
- 4. 将 VNR 中的虚拟节点按非递增顺序排列;
- 5. for 当前 VNR 中的所有未映射的虚拟节点 do
- 6. 选择排序最高虚拟节点 n_v ;

- 7. 根据资源约束和位置约束构建其候选物理节点集合 $\Omega(n_v)$;
- 8. If $\Omega(n_v)=\emptyset$ then
- 9. Return Node_Mapping_Failed
- 10. else
- 11. for 每一个物理节点 $n_s \in \Omega(n_v)$ do
- 12. 用实时资源计算 $C_j^i, R(n_s), RK(n_s)$;
- 13. end for
- 14. 对物理节点按非递增顺序排序,将排序最高的虚拟节点 n_v 映射至排序最高的候选物理节点 $n_s, M_n(n_v)=n_s$,并将结果放入 Node Mapping List 中;
- 15. end if
- 16. end for
- 17. Return Node_Mapping_Success

3.2 链路映射

传统的链路映射都是采用 Dijkstra 算法寻求节点之间的最短路径,但无法区分有效路由和非有效路由,因此通过在链路映射阶段增加权重的方法寻找有效最短路径,可以节省能量成本以及资源代价。本文基于文献[17],重新定义物理链路的排序值为:

$$PW(P_s)=\frac{\min Re(l_s)}{Hop(P_s) \cdot \max Re(n_s)} \tag{16}$$

其中, $\min Re(l_s)$ 代表链路的最小剩余带宽资源, $\max Re(n_s)$ 代表链路所经过节点的最大剩余资源, $Hop(P_s)$ 代表链路之间所经过的跳数。将最小剩余带宽资源和节点最大剩余资源相除,可以有效减小资源碎片。

算法 2 链路映射算法

Input: G_s, G_v , Node Mapping List

Output: Link Mapping List

- 1. for 每条未映射虚拟链路 $l_{uv} \in L_v$ do
- 2. 运行 Dijkstra 算法,得到节点 u, v 间 k 条满足带宽约束的路径集合 Pathlist
- 3. if Pathlist 为空 then
- 4. Return Link_Mapping_Failed
- 5. else
- 6. for each $p_i \in$ Pathlist
- 7. 计算 $PW(p_i)$;
- 8. end for
- 9. 将 l_{uv} 映射至 PW 值最大的物理路径上,并将结果放入 Link Mapping List 中;
- 10. end if
- 11. end for
- 12. Return Link_Mapping_Success

4 算法性能评估与分析

为验证 TR-VNE 算法的优越性,通过 MATLAB 将其与 TR-CL^[15], EE-VNE^[18], RW-SP^[19] 以及 ET-VNE^[20] 中的虚拟网络映射算法进行仿真实验对比以及理论分析。其中,TR-CL 算法在优化能量消耗的模型上,使用一阶段和两阶段混合映射的方法来降低能耗;EE-VNE 算法使用整数线性规划的方法,提供最优的映射方法来节省能耗;RW-SP 和 ET-VNE 算法都是通过考虑网络节点的资源 and 拓扑属性对节点进行排序,利用拓扑感知的节点排序方法可优先映射网络中相对重要的节点,其中 RW-SP 算法应用马尔可夫随机游走

模型,ET-VNE 使用启发式算法。

4.1 实验环境

本文使用常用的 GI-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,其具体参数如下。

底层物理网络拓扑:底层物理网络的 100 个节点、500 余条链路都均匀分布在 1000×1000 的底层网络平面上,节点的计算资源和链路的带宽资源均服从 $[50,100]$ 的均匀分布。

虚拟网络请求拓扑:虚拟网络节点均匀分布在 1000×1000 范围内,节点个数服从 $[5,15]$ 的均匀分布,各节点间相连的概率为 50%,节点的计算资源与链路带宽资源需求都均匀分布在 $[15,30]$ 之间。虚拟网络请求到达时间服从参数为 0.125 的 Poisson 分布,平均 100 个时间单位有 8 个请求到达。虚拟网络的生存时间 T 服从参数为 500 个时间单位的指数分布。

本次实验在相同的参数下对 4 种算法进行对比。根据已有工作,设置 P_b , P_m 和 P_n 分别为 150 W, 300 W 和 15 W^[21-22]。其中,虚拟网络到达时间、生存周期以及最长等待时间都是以时间窗为单位,每个时间窗中有 1000 个时间单位,每次运行 52000 个时间单位,即 52 个时间窗。为避免随机噪声、人为误差等不利因素对仿真的影响,每组仿真进行 10 次,取平均值作为最后的结果。

4.2 仿真结果与分析

图 1 给出了 5 种算法的能量消耗对比情况。当仿真时间为 52000 个时间单元时,TR-VNE 算法的能量消耗为 128.63,分别较 EE-VNE, TR-CL, RW-SP, ET-VNE 算法减少了 44.34%, 28.44%, 16.66%, 23.01%。这是由于 TR-VNE 算法在节点映射阶段量化了能量成本,同时考虑了节点的资源丰富度和局部拓扑属性,不仅在每次映射时可有效节能,而且由于考虑了物理节点直连链路的带宽资源,在链路映射阶段区分有效路由和非有效路由,在后续的映射过程中可有效缩短链路映射的长度,减少了物理网络的活动节点和链路,在资源分配和回收过程中可有效减小能量消耗。

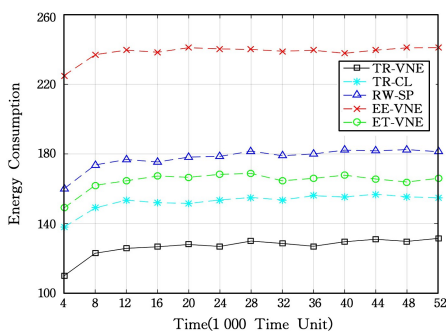


图 1 能量消耗

Fig. 1 Energy consumption

从图 2 可以看出,5 种算法的请求接受率在仿真时间小于 12000 个时间单位时均出现不同程度的下降。这是由于虚拟网络请求数量的增加导致物理可用剩余资源减少,当仿真时间大于 12000 个时间单位时,虚拟网络请求的到达速率与离开速率趋于平衡状态,物理可用剩余资源基本稳定,因此虚拟网络请求接受率也趋于稳定状态。在此过程中,本文提出的 TR-VNE 算法的请求接受率为 84.8%,分别较 EE-VNE,

TR-CL, RW-SP, ET-VNE 算法提高了 31.61%, 13.80%, 9.34%, 4.77%。这是由于 TR-VNE 算法综合考虑了节点资源、链路资源、度、紧密度、物理节点对之间的距离等因素,尤其是在考虑紧密度时,同时考虑了节点 CPU 容量、直连链路的带宽以及后续链路映射的长度等,为后续链路映射节省了大量的带宽资源。

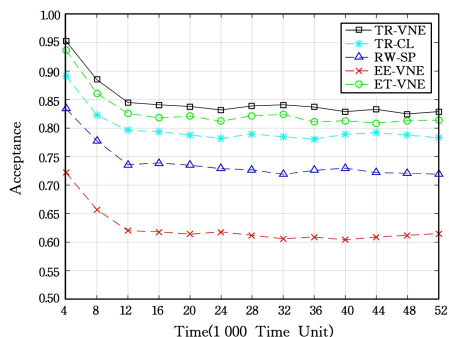


图 2 请求接受率

Fig. 2 Long-term acceptance ratio

图 3、图 4 分别对比了 5 种算法的长期平均收益和长期收益开销比。

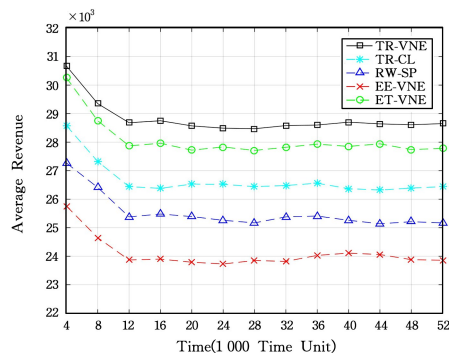


图 3 长期平均收益

Fig. 3 Long term average revenue

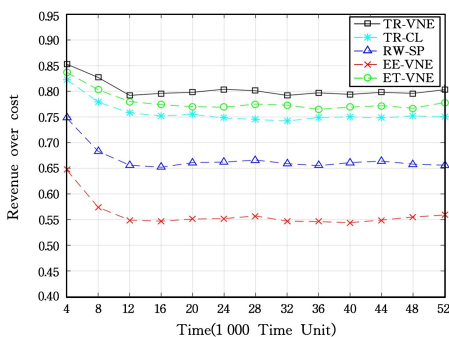


图 4 收益开销比

Fig. 4 Long-term revenue cost/ratio

可以看出,随着请求接受率的下降,长期平均收益和长期收益开销比降低。在仿真时间为 52000 个时间单位内,TR-VNE 算法的长期平均收益分别较 EE-VNE, TR-CL, RW-SP, ET-VNE 算法提高了 19.6%, 12.93%, 8.09%, 2.85%; 而 TR-VNE 算法的长期平均收益开销比为 79.74%, 分别较 EE-VNE, TR-CL, RW-SP 和 ET-VNE 算法提高了 24.69%, 13.83%, 4.75% 和 2.57%。这是由于 TR-VNE 算法采用改

进后的节点度量资源的方式,对映射时节点的优先级进行全面综合的划分,使得高优先级的虚拟节点映射至高优先级的物理节点;同时考虑后续链路映射的长度,其长度越短,映射成本越低,因此可在相同资源的情况下提高请求接受率,同时有效降低网络映射的成本,使算法在长期平均收益和长期收益开销比上占据一定优势。

结束语 本文在优化虚拟网络模型的基础上,量化能量成本,并充分考虑网络中节点的资源丰富度和拓扑属性,从而对节点重新进行排序,将排序最高的虚拟节点映射至排序最高的物理节点;在链路映射时增加链路权重,减少资源碎片化的同时降低能耗。仿真实验结果表明:相比于 EE-VNE, TR-CL, RW-SP 和 ET-VNE 算法,本算法在保证较低能耗的情况下,虚拟网络接受率和收益开销比等性能均有所提升。但是,TR-VNE 算法在设计中并未考虑节点或者链路故障问题,下一步将深入研究节点和链路重映射,在保证较低计算复杂度的基础上提高算法性能。

参 考 文 献

[1] FISHER W, SUCHARA M, REXFORD J. Greening Backbone Networks: Reducing Energy Consumption by Shutting Off Cables in Bundled Links[C]// Acm Sigcomm Workshop on Green Networking. DBLP, 2010: 29-34.

[2] ABU SHARKH M, JAMMAL M, SHAMI A, et al. Resource allocation in a network-based cloud computing environment: design challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(11): 46-52.

[3] DRUTSKOY D, KELLER E, REXFORD J. Scalable network virtualization in software-defined networks [J]. IEEE Internet Computing, 2013, 17(2): 20-27.

[4] 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.

[5] LIRA V, TAVARES E, OLIVEIRA M, et al. Virtual network mapping considering energy consumption and availability [J]. Computing, 2018(2): 1-31.

[6] HAERI S, TRAJKOVIC L. Virtual Network Embedding via Monte Carlo Tree Search [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 28(2): 1-12.

[7] AMALDI E, CONIGLIO S, et al. On the computational complexity of the virtual network embedding problem [J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2016, 52: 213-220.

[8] 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.

[9] JIA S, JIANG G, HE P, et al. Efficient algorithm for energy-aware virtual network embedding [J]. Tsinghua Science & Technology, 2016, 21(4): 407-414.

[10] GONG S, CHEN J, YIN X, et al. Energy-efficient virtual network embedding for heterogeneous networks [C]// IEEE International Conference on Computer Communication & the Internet, 2016: 85-90.

[11] 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.

[12] PENG L M. Virtual network mapping algorithm based on breadth-first search [J]. Journal of Sichuan University, 2015, 47(2): 117-122.

[13] XU P, LIU X, CAO H, et al. An efficient energy aware virtual network migration based on genetic algorithm [J]. Frontiers of Computer Science, 2019(2): 440-442.

[14] WANG D, ZHANG W, HE H, et al. Node-Fusion: Topology-aware virtual network embedding algorithm for repeatable virtual network mapping over substrate nodes [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2018, 10: 102-113.

[15] ZHANG Z, SU S, ZHANG J, et al. Energy aware virtual network embedding with dynamic demands: online and offline [J]. Computer Networks, 2015, 93(24): 448-459.

[16] CHEN X, LI C, JIANG Y. Optimization Model and Algorithm for Energy Efficient Virtual Node Embedding [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1327-1330.

[17] ZHAO Z Y, MENG X R, SU Y Z, et al. Virtual Network Mapping Algorithms Based on Node Proximity Perception and Route Comprehensive Evaluation [J]. Journal of Electronic and Information Science, 2017, 39(8): 1979-1985.

[18] BOTERO J F, HESSELBACH X, DUELLI M, et al. Energy Efficient Virtual Network Embedding [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5): 756-759.

[19] XIANG C, 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.

[20] CAO H, YANG L, ZHU H. Embedding virtual networks using a novel node-ranking approach via exploiting topology attributes and global network resources [C]// 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2017: 1-6.

[21] BARROSO L A, CLIDARAS J, HOLZLE U. The Data center as A Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-scale Machines [M]. San Rafael, CA, USA, Morgan & Claypool Publishers, 2013: 1-154.

[22] JIA S, JIANG G, HE P, et al. Efficient algorithm for energy-aware virtual network embedding [J]. Tsinghua Science & Technology, 2016, 21(4): 407-414.



ZHU Guo-hui, born in 1969, Ph.D, associate professor, postgraduate supervisor. His main research interests include the next generation mobile Internet, network survivability, and complex network routing algorithm.



ZHANG Yin, born in 1995, postgraduate. Her main research interests include energy-efficient virtual network mapping, and network virtualization.