

## 基于滑动区域的粒子群虚拟网节能映射算法

庄雷\* 田帅魁 和孟佯 宋玉 王国卿 刘文覃 马岭

(郑州大学信息工程学院 郑州 450000)

**摘要:** 针对传统虚拟网节能映射中存在的节点映射分散、链路映射跳数多等问题, 利用虚拟网请求的最小生成树拓扑将节点和链路同时映射, 该文提出了基于滑动区域的粒子群虚拟网节能映射算法(EVNE\_SRPS)。当一个虚拟网请求到达时, 生成其最小生成树拓扑, 根节点为路径和最短的节点; 在底层网络随机选取多个区域作为粒子对象, 并在区域中心映射虚拟网请求的最小生成树拓扑; 计算粒子的适应度, 求出群体和个体最优解, 并在最优解的指导下确定滑动方向、更新区域位置, 经过迭代后得到虚拟网的映射方案。实验结果表明, 与现有算法相比, 该算法降低了网络能耗, 提高了运营商的收益成本比。

**关键词:** 虚拟网; 节能映射; 最小生成树; 粒子群优化; 滑动区域

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-3029-07

DOI: 10.11999/JEIT190168

## Energy-saving Virtual Network Embedding Algorithm Based on Sliding Region Particle Swarm

ZHUANG Lei TIAN Shuaikui HE Mengyang SONG Yu

WANG Guoqing LIU Wentan MA Ling

(School of Information and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Considering the problem of scattered node mapping and more hops of link mapping in the traditional virtual network energy-saving embedding, the node and link are mapped simultaneously by using the minimum spanning tree topology of the virtual network request, and Energy-saving Virtual Network Embedding algorithm based on Sliding Region Particle Swarm (EVNE\_SRPS) is proposed. When a virtual network request arrives, the minimum spanning tree topology is generated, the root node is the node with the shortest path length; Multiple regions are randomly selected as the particle object in the substrate network, and the minimum spanning tree topology of the virtual network request is mapped in the regional center; The fitness of the particles is calculated. The optimal solution of the group and the individual is found, and the sliding direction and the location of the update region under the guidance of the optimal solution are determined. After the iteration, the mapping scheme of the virtual network is obtained. The experimental results show that compared with the existing algorithms, the network energy consumption is reduced, and the internet service providers revenue to cost ratio is improved.

**Key words:** Virtual network; Energy saving embedding; Minimum spanning tree; Particle swarm optimization; Sliding region

### 1 引言

在过去的十年里, 基于传统架构的网络通信取

得了巨大成功, 但这种僵化结构<sup>[1]</sup>给新的协议和服务的动态部署与管理带来了困难。因此, 网络虚拟化技术应运而生, 并在5G通信<sup>[2]</sup>中被采用。网络设计的初衷是满足繁忙时段的流量负载, 但在非繁忙时段的资源利用率较低, 伴随着不必要的能量消耗<sup>[3]</sup>。由于能源成本的增加和生态意识的提高, 网络的能源效率变得尤为重要<sup>[4]</sup>。预计到2020年, 将会有超过500亿的设备接入互联网<sup>[5]</sup>, 网络能耗占总能耗的比重越来越大。此外, 80%的信息和通信技术碳排放来自设备使用<sup>[6]</sup>。因此, 网络节能问题(如数据

收稿日期: 2019-03-21; 改回日期: 2019-05-25; 网络出版: 2019-06-03

\*通信作者: 庄雷 ielzhuang@zzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(U1604262), 河南省科技攻关计划基金(172102210478), 河南省高等教育重点科研项目(17A520057)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (U1604262), The Science and Technology Key Project of Henan Province (172102210478), The Key Scientific Research Project of Higher Education of Henan Province (17A520057)

中心网络<sup>[7]</sup>、无线网络<sup>[8]</sup>、车联网<sup>[9]</sup>和内容中心网络<sup>[10]</sup>等)引起了广泛研究人员和制造商的注意。

在大多虚拟网映射算法中主要根据节点的拓扑属性和资源属性对节点排序。如基于ELECTRE的排序算法<sup>[11]</sup>,将局部资源较大的节点映射到已映射的底层节点的邻近位置,以减少映射成本。基于google的PageRank的排序算法<sup>[12]</sup>,通过节点及其邻居节点的贡献对底层节点评价,以提高节点的嵌入能力。而虚拟网节能映射算法中,主要通过减少底层节点的开启量以降低底层网络能耗。例如将映射的虚拟节点与其邻居节点映射到同一个底层节点上<sup>[13]</sup>,优先复用当前映射的节点。如基于贝叶斯理论评价节点的开启状态和是否延长资源占用时间等因素<sup>[14]</sup>,优先利用开启且不延缓资源释放的节点。在解决异构网络节能问题上<sup>[15]</sup>,考虑优先映射到能耗较低的节点,减少高功耗节点的负载。如通过反馈环的设置<sup>[16]</sup>,主动控制底层网络的可映射区域,将节点映射控制在开启的底层节点范围内,进而最小化底层网络能量消耗。

随着智能算法的广泛应用,增强学习和群智能算法<sup>[17]</sup>也被引入到虚拟网映射领域中。例如,通过对虚拟网映射模型建立马尔科夫过程,并使用Q-learning算法求解该过程,以达到节能的效果<sup>[18]</sup>。如多目标增强粒子群方法<sup>[19]</sup>,通过随机更新产生新解,将虚拟网的能耗和成本优化目标进行权重相加。以EALS策略约束粒子群可行解的节能映射算法<sup>[20]</sup>,将网络拓扑节点分为路由器和主机,分别考虑了路由器线卡和端口的能耗,选取能耗低的设备进行节点映射,从而降低底层能耗。由于粒子群的优越性,该算法也被应用到网络功能虚拟化的服务路径构建过程<sup>[21]</sup>。

以上文献为虚拟网节能映射问题提供了一定的理论基础,但仍存在如下不足:(1)在映射节点阶段中没有考虑虚拟网和底层网络拓扑结构信息,导致节点映射分散,链路跳数增多,增加了带宽消耗,以及链路的开启量;(2)在粒子群优化的虚拟网映射算法中,通过以概率方式相互独立的调节虚拟节点的映射位置,未结合节点之间的链路约束关系,导致映射方案不能有效地趋向目标映射方案;(3)未考虑不同区域资源分布状况对虚拟网映射的节能效果的影响。

因此,本文提出基于滑动区域的粒子群虚拟网节能映射算法(Energy-saving Virtual Network Embedding algorithm based on Sliding Region Particle Swarm, EVNE\_SRPS),以区域滑动为更新方式,自适应调整滑动区域的更新方向,在底层

网络寻找更加节能的映射区域,并将虚拟网映射到该区域,减少节点开启量。对于每个虚拟网,构建其最小生成树拓扑,本拓扑包含了主干链路资源需求,在映射节点的同时,通过主干链路映射指导节点映射,使映射的底层节点分布比较集中,减少了链路开启量,以达到节能目标。

## 2 分析与建模

本文分别考虑虚拟网拓扑,底层网络的资源分布以及节能特征。对于虚拟网拓扑,采用最小生成树算法提取虚拟网主要拓扑,通过最小生成树中包含的少量且带宽需求较大的链路对节点映射进行指导,使其分布较集中,减少了链路跳数。由于底层网络的不同区域的剩余资源分布、承载能力、节能潜力不同,采用粒子群协同优化思想,在底层网络选择多个区域,并视为优化的个体,以区域滑动为更新方式,根据群体指导,自适应调整滑动区域的更新方向,在底层网络寻找更加节能的映射区域,并将虚拟网映射到该区域,以达到节能目标。该过程如图1所示。

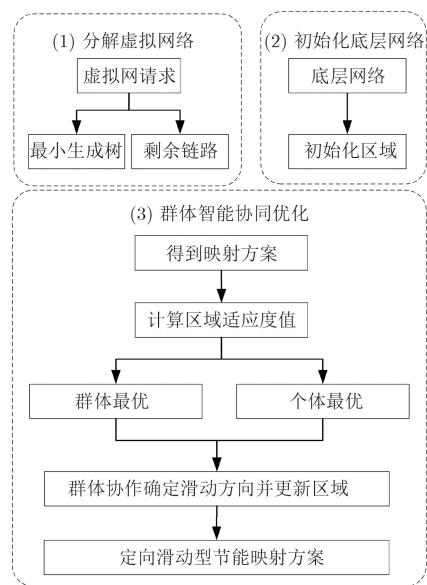


图1 定向滑动型虚拟网节能映射过程图

定向滑动型节能映射方案分为分解虚拟网、初始化底层网络及群体智能协同优化3个部分,以下将逐一介绍。

### (1) 分解虚拟网

虚拟网拓扑分解过程如图2所示,其中链路粗细代表链路带宽大小。图2(a)是一个虚拟网拓扑,用最小生成树算法提取虚拟网的主要信息,将链路 $l_0$ 的传输带宽取倒数,使生成的最小生成树 $G_{mst}$ 包含带宽需求比较大的链路,如图2(b)所示。这些链

路是虚拟网的主干链路，反映了主要的拓扑结构信息，且优先映射带宽需求较大的链路，利于请求接收率的提高。

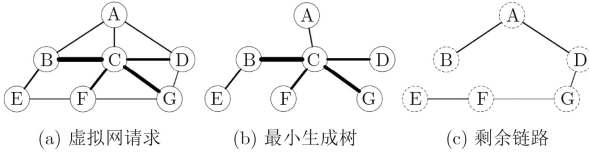


图2 虚拟网拓扑分解过程

根节点选取路径和最小的节点，使 $G_{mst}$ 的深度小且广度大，保证了节点分布的集中性，有助于减少带宽资源的消耗、冗余链路的开启以及“孤岛”节点的形成。图2(c)为虚拟网的剩余拓扑，由剩余链路组成。这些虚拟链路具有较小的带宽需求，属于次要信息，将这些次要信息从虚拟网中分离出来，进行单独映射，带宽需求小的链路映射优先级较低，利于提高链路映射成功率。

### (2) 初始化底层网络

随着虚拟网不断被映射到底层网络，不同的底层网络区域会承载不同数量的虚拟网请求，在业务量比较平稳时，将虚拟网按照集中方式映射到某一区域时，一定程度上可以充分利用已开启的节点和链路提供业务服务。但是随着业务量的激增，会导致局部热点问题，影响新的虚拟网服务的部署，进而降低运营商的总体收益。因此，如何将区域定向滑动，以快速寻找资源充足且节能的区域成为关键问题。

为了更好地对区域进行评价描述，引入节能区域定义。节能区域 $E$ 是由底层网络区域中心节点与其周围的节点和链路组成的区域， $E$ 的大小以容纳当前的虚拟网为准。节能区域的评价可以通过式(1)描述

$$VE(E) = a \times \left( \frac{NO^S(E)}{N^S(E)} + \frac{LO^S(E)}{L^S(E)} \right) + b \times \left( \frac{C_N^S(E)}{CT_N^S(E)} + \frac{C_L^S(E)}{CT_L^S(E)} \right) \quad (1)$$

其中， $a$ 是 $E$ 的节点和链路开启率的权重因子， $b$ 是 $E$ 的节点和链路剩余资源的权重因子， $NO^S(E)/N^S(E)$ 表示 $E$ 的节点开启量与节点总数的比率， $LO^S(E)/L^S(E)$ 表示 $E$ 的链路开启量和链路总量的比率。 $C_N^S(E)/CT_N^S(E)$ 表示 $E$ 的节点可用资源与节点资源总量的比率， $C_L^S(E)/CT_L^S(E)$ 表示 $E$ 的链路可用资源与链路资源总量的比率。在不同的区域位置，其 $VE(E)$ 不同， $VE(E)$ 的值越高，代表节能潜

力和虚拟网承载能力越好。当底层资源总量相对充足时，滑动区域的移动倾向于节能区域；当资源不充足时，即大部分节点处于开启状态，则倾向于承载虚拟网的能力好的区域。

### (3) 群体智能协同优化

为了寻找节能区域，EVNE\_SRPS算法将虚拟网映射的区域作为滑动区域，并将滑动区域作为粒子对象，计算适应度，确定区域更新方向，经过迭代，从而找到较节能的可映射区域。

虚拟网按照最小生成树的广度优先搜索顺序进行映射。 $D(\text{node})$ 代表节点 $\text{node}$ 的度， $v_i$ 代表虚拟节点， $s_i$ 代表承载虚拟节点 $v_i$ 的底层节点， $VL(l(s_i, s_k))$ 代表底层链路 $l(s_i, s_k)$ 的评价值。映射链路决定了后续节点的映射成功率和节能效果，因此在链路的评价值 $VL(l(s_i, s_k))$ 中，综合考虑带宽资源、链路开启状态、链路所连接的节点开启状态。如式(2)所示

$$VL(l(s_i, s_k)) = C_L^S(l(s_i, s_k)) + P_k + P_l \quad (2)$$

其中， $C_L^S(l(s_i, s_k))$ 表示 $l(s_i, s_k)$ 带宽需求， $P_l$ 和 $P_k$ 分别表示链路和节点能耗，当 $l(s_i, s_k)$ 和节点 $s_k$ 未开启的时候， $P_l$ 和 $P_k$ 为0。将当前映射的节点 $v_i$ 作为父节点，映射 $v_i$ 的邻接链路 $l(v_i, v_k)$ 及其子节点 $v_k$ ，其中 $k = 1, 2, \dots, D(v_i)$ 。将 $v_i$ 的邻接链路 $l(v_i, v_k)$ 按照带宽需求降序排列，将 $s_i$ 的邻接链路 $l(s_i, s_k)$ 按照链路评价值降序排列。根据 $D(v_i)$ 与 $D(s_i)$ 的关系，将链路映射过程分为两种情况：

当 $D(s_i) \geq D(v_i)$ ，且 $s_i$ 降序排列的邻接链路带宽分别大于 $v_i$ 降序排列的邻接链路带宽时，根据L2S2(Large-to-Large and Small to Small)原则<sup>[6]</sup>一对一进行链路映射，再映射 $v_k$ 到 $s_k$ ，如果节点不满足约束，则将 $l(s_i, s_k)$ 延伸到 $s_k$ 的邻居节点。

当 $D(s_i) < D(v_i)$ ，或不满足链路带宽约束时，将节点 $v_i$ 的邻接链路按照带宽需求，由大到小依次叠加映射到节点 $s_i$ 连接的具有较大传输带宽的链路上，当该链路不能承载 $v_i$ 的全部邻接链路时，将剩余链路映射到 $s_i$ 的其它邻接链路上。针对链路叠加出现的多个虚拟节点映射到同一底层节点的情况，按照链路延伸策略，将重叠映射的节点延伸至 $s_k$ 的邻居节点。

在节能区域内，开启节点之间的链路处于开启的可能性较大，在选择邻居节点时，优先选择资源最大的开启节点，可以更好地复用资源。

区域更新过程如图3所示，水平和垂直数值为区域坐标， $VNR_i$ 为某个粒子的区域位置， $VNR_{pbest}$ 和 $VNR_{gbest}$ 分别为 $VNR_i$ 的自身历史最优区域位置和

群体最优区域位置,具有很好的节能潜力。 $VNR_{p\_best}$ 和 $VNR_{g\_best}$ 区域含有较多开启的底层节点,因此在 $VNR_{p\_best}$ 和 $VNR_{g\_best}$ 附近存在更好节能区域的概率较大。 $VNR_i$ 将沿着区域间的最短路径,向自身最优位置 $VNR_{p\_best}$ 和组内最优位置 $VNR_{g\_best}$ 逐跳滑动更新,寻找节能效果较好的区域。如遇到比个体或群体最优解对应的节能区域更好的区域时,更新个体或群体最优解并调整其他粒子更新方向。因此,在基于滑动区域的粒子群虚拟网节能映射算法中,大量粒子向自身最优位置 $VNR_{p\_best}$ 和群体最优位置 $VNR_{g\_best}$ 滑动,将会找到更好的节能区域。

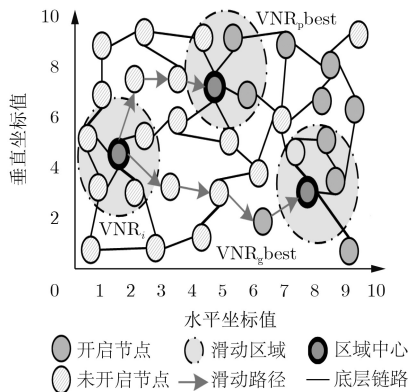


图3 粒子群协同指导区域定向滑动过程

### 3 算法描述

EVNE\_SRPS由两部分组成:第1部分为基于滑动区域的粒子群优化算法,该过程以网络能耗和成本最小化为优化目标,寻找节能的区域;第2部分为最小生成树映射算法。

#### 3.1 基于滑动区域的粒子群优化算法

基于滑动区域的粒子群模型构建如下

##### (1) 适应度

$$op = r \times ER + (1-r) \times ARC^{-1} \quad (3)$$

其中, $r$ 为权重系数, $ARC$ 为收益成本比<sup>[4]</sup>, $ER = EG/EG_{max}$ , $EG$ 为网络能耗<sup>[14,15]</sup>, $EG_{max}$ 为底层网络最大能耗, $ER$ 越小,底层能耗越小。由于在不同的区域映射虚拟网请求,路径的延伸跳数不同,跳数越大, $ARC^{-1}$ 越大。为了减少运营商的开销,因此在适应度中加入 $ARC^{-1}$ ,即适应度数值越小,表示底层网络以最少的能耗和资源代价获得更多的收益。

##### (2) 粒子的位置

粒子的位置即节能区域的中心位置,由于底层网络由节点和链路组成,因此节能区域中心位置 $P_i$ 是一些离散的状态,为底层节点的序号。

$$P_i = n, n \in N^S \quad (4)$$

##### (3) 粒子的速度

在该模型中,粒子的速度用2维向量表示,定义为

$$V = \begin{cases} [1, 0], \text{更新方向指向 } p_{best} \\ [0, 1], \text{更新方向指向 } g_{best} \\ [*, *], \text{随机更新到邻居节点位置} \end{cases} \quad (5)$$

速度的大小为1,更新步长为1跳链路长度。

##### (4) 粒子状态更新

运算符说明:

乘法 $\otimes$ :如 $w_0 \otimes v_t$ 表达式,表示以概率 $w_0$ 的可能性向 $v_t$ 的方向更新。

加法 $\oplus$ :如 $(w_0 \otimes v_t) \oplus (w_1 \otimes v_{t+1})$ 表达式,表示以概率 $w_0$ 和 $w_1$ 选择方向 $v_t$ 和 $v_{t+1}$ 。

减号 $\ominus$ :如 $p_{best} \ominus p_t$ ,如果 $p_{best}$ 与 $p_t$ 相等,则为0,反之为1。

点号 $\odot$ :如 $p_t \odot v_{t+1}$ ,表示 $p_t$ 的更新方向为 $v_{t+1}$ 。

粒子速度和位置更新为

$$\left. \begin{aligned} V_{t+1} &= (w_0 \otimes V_t) \oplus (w_1 \otimes V_{g_{best}} (P_{best} \ominus P_t)) \\ &\quad \oplus (w_2 \otimes V_{g_{best}} (g_{best} \ominus P_t)) \\ &\cdot w_0 + w_1 + w_2 = 1 \\ &\cdot V_{g_{best}} = [1, 0], V_{p_{best}} = [0, 1] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$V_{g_{best}}$ 和 $V_{p_{best}}$ 是方向常量,分别指向群内最优和粒子本身最优的映射方案所在的位置。更新的路径为两节点位置的最短跳数路径,如果路径不存在,则按照邻居节点资源大小作为概率随机更新位置,在一定程度上避免算法陷入局部最优。位置更新重新定义为

$$P_{t+1} = P_t \odot V_{t+1} \quad (7)$$

该算法如下:

**算法1** 基于滑动区域的粒子群优化算法:

输入:虚拟网请求拓扑 $G^V$ 和底层网络拓扑 $G^S$

输出:映射方案

- (1) 求出虚拟网 $G^V$ 的最小生成树 $G_{mst}$ ;
- (2) 选取 $G_{mst}$ 根节点 $v_0$ ;
- (3) 根据节点邻接链路带宽降序确定 $G_{mst}$ 的广度优先搜索的节点映射顺序;
- (4) 初始化 $n$ ,迭代次数 $f$ ;
- (5) 随机产生 $n$ 个不同的区域位置初始化粒子;
- (6) while 迭代次数 $< f$ ;
- (7) foreach 粒子 $i$  from 1 to  $n$ ;
- (8) 根据式(6)计算粒子 $i$ 的速度;
- (9) 根据式(7)计算粒子 $i$ 的位置;
- (10) 根据算法2得出的映射方案计算粒子 $i$ 的适应度;
- (11) 更新个体最优位置;
- (12) end foreach

- (13) 更新群体最优位置;
- (14) end while
- (15) if 群体最优适应度为无穷大: return 映射失败;
- (16) else: return 群体最优映射方案;

步骤(3)确定节点的映射顺序, 即具有较大带宽需求的链路所连接的端节点优先映射, 利于提高映射成功率。步骤(5)通过随机初始化粒子的位置, 让粒子群分布广泛, 从而在一定程度上避免算法陷入局部最优。

### 3.2 最小生成树映射算法

**算法2** 最小生成树映射算法:

输入:  $G^V$ ,  $G^V$  对应的  $G_{mst}$  和根节点  $v_0$ ,  $G^S$  和区域中心节点  $s_0$

输出: 区域映射方案

- (1) 将  $v_0$  映射到区域中心  $s_0$ ,  $i=0$ ;
- (2) while  $G_{mst}$  存在未映射的节点和边 do:
- (3) 将节点  $v_i$  作为父节点, 对应的邻接链路有序集合为  $vlink$ ,  $v_i$  映射的底层节点为  $s_i$ , 根据式(2)降序排列  $s_i$  的邻接链路集合  $slink$ ;
- (4) 根据L2S2规则将  $vlink$  与  $slink$  进行比较;
- (5) if  $D(v_i) < D(s_i)$  and  $slink$  带宽满足  $vlink$  的资源约束:
- (6) 根据L2S2规则映射  $vlink \rightarrow slink$ ;
- (7) 映射  $vlink$  所连接的节点到  $slink$  连接的节点上, 若不满足节点资源约束, 将链路延伸邻居节点;
- (8) else:
- (9) 将  $vlink$  叠加映射到  $slink$  上;
- (10) 将  $vlink$  的端节点映射到  $slink$  的端节点上, 若出现多个节点映射到同个底层节点上, 则将链路延伸至邻居节点;
- (11) 用最短路径算法映射剩余的虚拟链路;
- (12) if 节点和链路映射满足资源约束: return 区域映射方案;
- (13) else: return 无穷大数值;

在算法2步骤(7)和步骤(10)中, 在链路延伸至邻居节点时, 如果不存在满足约束的节点, 可再次进行延伸, 本文设置3跳延伸。步骤(11)无跳数限制。

算法2的时间复杂度:  $|N^S|$  和  $|N^V|$  分别表示底层和虚拟节点个数,  $k$  表示剩余链路条数, 最短路径算法复杂度为  $O(|N^S|^2)$ , 当链路需要延伸时, 在  $D(s_i)$  个邻居节点中找到最优, 算法2的总时间复杂度为  $O(|N^V|D(v_i)D(s_i) + k|N^S|^2)$ 。

## 4 实验仿真与分析

### 4.1 实验环境设置

同文献[11-21], 采用GT-ITM工具生成底层网

络和虚拟请求网络拓扑图。底层网络包含100个底层节点, 链路连接概率为0.5, 节点和链路资源均为[50, 100]的均匀分布。虚拟网拓扑的节点个数为[2, 10]的均匀分布, 链路连接率为0.5, 节点和链路带宽资源需求为[0, 25]的均匀分布。虚拟网的请求到达时间服从泊松过程, 平均100个时间单元到达5个, 请求的服务停留时间为1000的指数分布。虚拟请求总计2000个, 共进行40000多个时间单元。4000个时间单元为1个数据采集点, 实验数据在500个时间单元之后采集。功耗参数同文献[13],  $p_{max}=300$  W,  $p_b=150$  W,  $p_n=15$  W。其余参数  $r=0.7$ ,  $w_0=0.2$ ,  $w_1=0.3$ ,  $w_2=0.5$ , 种群个数  $n=15$ , 迭代次数  $f=7$ 。

EVNE\_SRPS算法是基于粒子群, 不支持将同一个虚拟网的多个节点映射到一个底层节点, 且对同构的底层节点不进行分类, 为了验证EVNE\_SRPS的有效性, 选取节能的粒子群算法MO\_NPSO<sup>[19]</sup>和基于反馈环控制的动态扩展映射区的EA\_FB<sup>[16]</sup>算法作为对比。

### 4.2 仿真实验结果分析

实验结果表明, 所测试的算法请求接收率均为100%, 在同一时刻底层网络承载了同样的虚拟网请求。图4为各个评价指标随着时间变化的实验结果。

图4(a)和图4(b)展示了节点开启量和资源利用率随时间的变化曲线。结果表明, EVNE\_SRPS比MO\_NPSO算法和EA\_FB算法, 减少了节点开启量, 提高了节点利用率。EVNE\_SRPS首先是寻找可映射的节能区域, 在节能区域内, 由于开启的节点数量高于非节能区域, 将虚拟网映射在该区域内可以利用已开启的节点, 从而降低了节点的开启量, 增加节点资源利用率。MO\_NPSO以最小底层网络能耗和开销成本为优化目标, 以更新节点映射方案为寻优方式, 在更新的过程中, 未利用节点的开启状态信息, 不能很好地复用开启的节点。EA\_FB算法通过反馈环控制, 将度数较小的节点及邻接链路设置为不可映射范围, 当虚拟节点映射失败时, 将增加映射范围。优先选取局部资源较大的节点, 但该节点未必是开启节点, 仅仅通过控制映射范围, 以最大化利用历史映射的节点。

图4(c)和图4(d)展示了链路开启量和利用率随时间的变化曲线。结果表明, EVNE\_SRPS比MO\_NPSO算法和EA\_FB算法, 显著减少了链路开启量, 提高了链路利用率。EVNE\_SRPS在映射主干链路时, 开启链路的被选择的机会较大, 且通过主干链路引导节点映射, 使得节点分布集中, 相邻

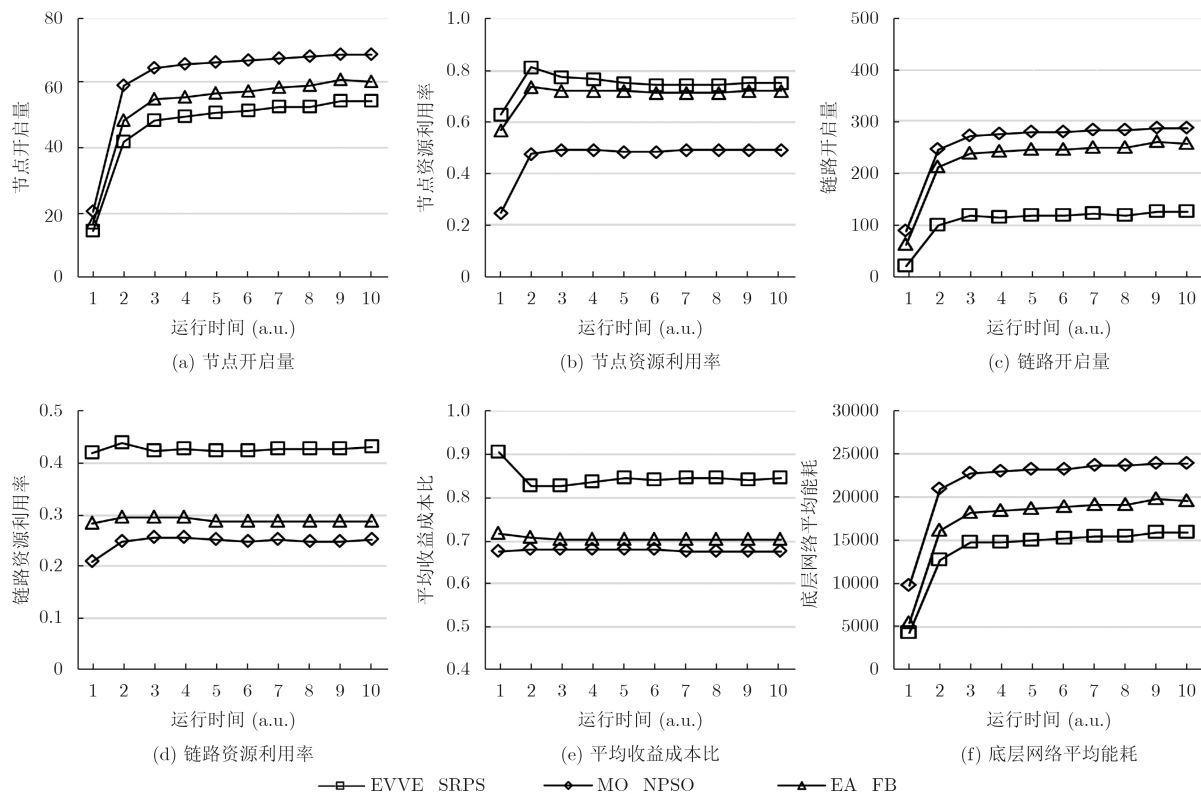


图4 实验结果

的虚拟节点映射的底层节点也是拓扑相邻的。因此路径跳数减少，从而降低链路开启量，提高利用率。由于MO\_NPSO选择节能的节点未必是拓扑相邻，使得跳数增加，因此链路利用率下降。EA\_FB算法所控制的可映射区域内的节点，但这些节点分布并不集中，导致跳数增加，进而开启冗余链路。

图4(e)为收益成本比随时间变化的曲线，EVNE\_SRPS将带宽需求大的链路按照最小生成树算法映射，减少底层路径跳数，降低了映射成本，因此提高了收益成本比。而MO\_NPSO未利用拓扑连接信息作为启发指导节点映射，当利用分散的底层节点承载虚拟网请求时，路径跳数增加，当跳数较短时，将不能很好地利用已开启的节点，因此MO\_NPSO很难趋向低成本和低能耗的最优方案。EA\_FB算法同样因开启节点的分散而导致较低收益成本比。

图4(f)为底层网络平均能耗随时间的变化曲线。EVNE\_SRPS算法，寻找节能的映射区域，在该区域，结合虚拟网的逻辑拓扑结构执行映射算法，降低了节点和链路的开启量，因此相比MO\_NPSO和EA\_FB算法，有较低的底层网络能耗。

## 5 结束语

通过分析底层区域资源不同的状态分布对虚拟网节能效果的影响，以及节点之间的拓扑关系对链

路映射的影响，提出EVNE\_SRPS算法。通过在节能区域执行最小生成树映射算法，从而提高运营商的收益成本比，降低了网络能耗。

EVNE\_SRPS为集中映射等算法的映射区域提供了优化方案，而不局限于最小生成树映射的节能区域，以下是本文有待进一步研究的方向；(1)针对其它集中映射方法(如深度优先搜索、广度优先搜索和子图同构等)；(2)针对映射区域的其它评价指标，采用EVNE\_SRPS对虚拟网映射进行优化。

## 参考文献

- [1] CHOWDHURY N M M K and BOUTABA R. Network virtualization: State of the art and research challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(7): 20–26. doi: 10.1109/MCOM.2009.5183468.
- [2] HALABIAN H. Distributed resource allocation optimization in 5G virtualized networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(3): 627–642. doi: 10.1109/JSAC.2019.2894305.
- [3] BOLLA R, DAVOLI F, BRUSCHI R, et al. The potential impact of green technologies in next-generation wireline networks: Is there room for energy saving optimization?[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(8): 80–86. doi: 10.1109/mcom.2011.5978419.
- [4] BOTERO J F, HESSELBACH X, DUELLI M, et al. Energy efficient virtual network embedding[J]. *IEEE*

- Communications Letters*, 2012, 16(5): 756–759. doi: [10.1109/lcomm.2012.030912.120082](https://doi.org/10.1109/lcomm.2012.030912.120082).
- [5] ELMIRGHANI J M H, KLEIN T, HINTON K, *et al.* GreenTouch GreenMeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(2): A250–A269. doi: [10.1364/JOCN.10.00A250](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00A250).
- [6] CHIARAVIGLIO L, MELLIA M, and NERI F. Minimizing ISP network energy cost: Formulation and solutions[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(2): 463–476. doi: [10.1109/TNET.2011.2161487](https://doi.org/10.1109/TNET.2011.2161487).
- [7] AJMERA S, DESAI T, and MORRISON F. Reigning in on data center energy efficiency[J]. *Energy Engineering*, 2018, 115(2): 23–60. doi: [10.1080/01998595.2018.11969275](https://doi.org/10.1080/01998595.2018.11969275).
- [8] SHI Qiong, ZHAO Liqiang, ZHANG Yaoyuan, *et al.* Energy-efficiency versus delay tradeoff in wireless networks virtualization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(1): 837–841. doi: [10.1109/TVT.2017.2738024](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2738024).
- [9] ZHENG Canjian, FENG Daquan, ZHANG Shengli, *et al.* Energy efficient V2X-enabled communications in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 554–564. doi: [10.1109/TVT.2018.2882127](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2882127).
- [10] 伊鹏, 李根, 张震. 内容中心网络中能耗优化的隐式协作缓存机制[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(4): 770–777. doi: [10.11999/JEIT170635](https://doi.org/10.11999/JEIT170635).
- YI Peng, LI Gen, and ZHANG Zhen. Energy optimized implicit collaborative caching scheme for content centric networking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 770–777. doi: [10.11999/JEIT170635](https://doi.org/10.11999/JEIT170635).
- [11] ZHANG Peiying, YAO Haipeng, QIU Chao, *et al.* Virtual network embedding using node multiple metrics based on simplified ELECTRE method[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 37314–37327. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2847910](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2847910).
- [12] CAO Haotong and YANG Longxiang. Topology attribute and global resource-driven virtual network embedding algorithm via novel node-ranking approach[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2017: 1–7. doi: [10.1109/WCSP.2017.8170959](https://doi.org/10.1109/WCSP.2017.8170959).
- [13] JIA Shuxian, JIANG Guiyuan, HE Peilan, *et al.* Efficient algorithm for energy-aware virtual network embedding[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2016, 21(4): 407–414. doi: [10.1109/TST.2016.7536718](https://doi.org/10.1109/TST.2016.7536718).
- [14] 胡颖, 庄雷, 陈鸿昶, 等. 时间和能量感知的贝叶斯虚拟网映射[J]. *通信学报*, 2016, 37(6): 106–118. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016105](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016105).
- HU Ying, ZHUANG Lei, CHEN Hongchang, *et al.* Time and energy aware virtual network embedding using Bayesian theory analysis[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(6): 106–118. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016105](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016105).
- [15] GONG Shuiqing, CHEN Jing, YIN Xiaochuan, *et al.* Energy-efficient virtual network embedding for heterogeneous networks[C]. The 1st IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet, Wuhan, China, 2016: 85–90. doi: [10.1109/CCI.2016.7778883](https://doi.org/10.1109/CCI.2016.7778883).
- [16] CHEN Xiaohua, LI Chunzhi, and JIANG Yunliang. A feedback control approach for energy efficient virtual network embedding[J]. *Computer Communications*, 2016, 80: 16–32. doi: [10.1016/j.comcom.2015.10.010](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.10.010).
- [17] CAO Haotong, HU Han, QU Zhicheng, *et al.* Heuristic solutions of virtual network embedding: A survey[J]. *China Communications*, 2018, 15(3): 186–219. doi: [10.1109/CC.2018.8332001](https://doi.org/10.1109/CC.2018.8332001).
- [18] HE Mengyang, ZHUANG Lei, TIAN Shuaikui, *et al.* Multi-objective virtual network embedding algorithm based on Q-learning and curiosity-driven[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 2018: 150. doi: [10.1186/s13638-018-1170-x](https://doi.org/10.1186/s13638-018-1170-x).
- [19] ZHANG Peiying, YAO Haipeng, FANG Chao, *et al.* Multi-objective enhanced particle swarm optimization in virtual network embedding[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016: 167. doi: [10.1186/s13638-016-0669-2](https://doi.org/10.1186/s13638-016-0669-2).
- [20] SU Sen, ZHANG Zhongbao, LIU A X, *et al.* Energy-aware virtual network embedding[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(5): 1607–1620. doi: [10.1109/TNET.2013.2286156](https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2286156).
- [21] 马丁, 庄雷, 兰巨龙. 基于离散粒子群优化的多目标服务路径构建算法[J]. *通信学报*, 2017, 38(2): 94–105. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017032](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017032).
- MA Ding, ZHUANG Lei, and LAN Julong. Discrete particle swarm optimization based multi-objective service path constructing algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(2): 94–105. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017032](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017032).
- 庄雷: 女, 1963年生, 教授, 研究方向为下一代互联网、网络虚拟化、自动机理论。
- 田帅魁: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为下一代互联网、网络虚拟化。
- 和孟佺: 女, 1994年生, 博士生, 研究方向为下一代互联网、网络虚拟化。
- 宋玉: 男, 1969年生, 副教授, 研究方向为数据挖掘、物联网架构。
- 王国卿: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为自动机理论。
- 刘文章: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为下一代互联网、网络虚拟化。
- 马岭: 男, 1963年生, 副教授, 研究方向为机器视觉, 图像处理。