

位置限制的企业级虚拟网络映射能源优化策略

丛 鑫, 訾玲玲, 杨东旭

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁葫芦岛 125105)

摘 要: 建立在物理设备集中且以云平台收益为目标的虚拟网络映射技术在企业级网络中存在不适应性, 本文提出了有位置限制的企业级虚拟网络映射能源优化策略(EL-VNE). 首先, 采用复数理论将计算能力和带宽能力归一到单个节点处, 减少了映射次数. 其次, 提出了 EL-VNE 模型, 包括能源消耗, 资源消耗, 位置限制等数学描述, 并证明其属于 NP 完全问题. 最后, 提出了启发式算法求解 EL-VNE 的最佳解空间, 确定虚拟映射方案, 达到优化能耗的目的. 相比于 EAD 和 GLC 等算法, EL-VNE 在映射和运行过程中能进一步降低能源消耗且有更好的性能表现.

关键词: 虚拟网络映射; 企业级网络; 能源消耗优化; 位置限制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)08-1654-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.08.007

A Strategy of Energy Optimization in Enterprise Networks with Location-Constraint

CONG Xin, ZI Ling-ling, YANG Dong-xu

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China)

Abstract: The studied technologies which were based on centralized physical devices and targeted on benefit optimization could not be applied in the enterprise network. To solve this problem, a cost optimization strategy based on location constrain(EL-VNE) was proposed for virtual network embedding in the enterprise network. Firstly, the computing and bandwidth capabilities were unified to a single node by using the complex theory, which decreased embedding times. Secondly, the EL-VNE model was presented and composed by mathematical descriptions about energy consumption, resource consumption and location constrain, which was proved to be NP-completed. Finally, heuristic algorithms were designed to find the solution of EL-VNE and then the embedding scheme with energy optimization was obtained. Compared with algorithms such as EAD and GLC, EL-VNE saves energy consumption in the process of embedding and running, and has better performance.

Key words: virtual network embedding; enterprise network; energy costs optimization; location constrain

1 引言

利用已有的服务器和计算机资源构建私有数据中心以满足企业分析和处理大规模数据的需求是一条可行途径, 但如何有效利用和共享资源是关键的问题. 虚拟网络映射是解决此类问题有效途径, 其允许在物理网络上存在多个异构虚拟网络^[1,2]且可以以资源共享的方式运行多个不同拓扑需求的任务. 已有的运行于云平台的研究以充分利用计算资源和带宽资源能力^[3,4]、最大化收益^[5]、最小化物理资源数^[6]等为目标. 也有学者以降低虚拟网络映射过程中的能源开销^[7]作为研究课题. 文献[8]提出虚拟机分配模型来最小化能

源消耗, 但忽视了物理链路上的能源消耗. 文献[9]提出虚拟网络映射能源预留方案, 但将 CPU 和带宽请求设置为固定值. 为了描述虚拟网络映射的动态特征, 文献[10]利用高斯过程模拟带宽请求并建立滑动窗口方案以最大化收益, 但是未考虑节点计算能力动态特征. 为了满足虚拟请求的位置需求, 文献[11]设计了多商品流算法, 文献[12]提出了 IPL 模型及启发式算法, 文献[13]提出了兼容图和启发式算法但均有各种限制条件.

相比于已有的应用于云平台的虚拟网络映射机制, 在企业级网络中有一些独特的特征: (1) 计算机节点只能提供有限数量的资源; (2) 虚拟请求数是动态到

达的;(3)虚拟请求需要指定映射的候选节点以获取较高的服务质量;(4)数据中心不会产生收益.因此,本文提出了企业级网络环境下的有位置限制的虚拟网络映射最小化能源消耗策略(EL-VNE),将复数理论引入到虚拟网络映射问题中,减少了映射次数;引入高斯分布函数模拟了虚拟请求的动态特征;构造了 EL-VNE 模型,设计了启发式算法以优化能耗开销.

2 EL-VNE 模型

2.1 EL-VNE 节点定义

定义 1 物理节点.用复数代表物理节点提供的资源,实部是提供计算资源的数目,虚部是提供带宽的数目.

定义 2 虚拟节点.以复数代表虚拟节点请求的资源,实部是请求计算资源的数目,虚部是请求带宽的数目.

为了归一化实部和虚部的数据,设立规则如下:(1)实部数值计算为提供/请求的计算资源数除以单位计算资源数;(2)虚部数值计算为提供/请求的带宽资源数除以单位带宽资源数.其中,单位计算资源数和带宽资源数是指事先约定的某个节点能提供的计算资源数和带宽资源数.举例来说,将单位计算资源数约定为

CPU 频率 1.0GHz,持续运行 1h,将单位带宽资源数约定为 10Mbps,总计运行 1h.当节点需要 CPU 为 2.0GHZ,计划执行 3h,需要带宽 20Mbps,总计运行 0.5h 时,其复数表示为 $6 + 1i$,即实部值为 $(2.0/1.0) * (3/1)$,虚部值为 $(20/10) * (0.5/1)$.

2.2 EL-VNE 网络定义

用无向权重图描述物理网络 $G_s(V_s, E_s)$, V_s 代表物理节点集合, E_s 代表链路集合.物理节点 $\forall v_s^i \in V_s$ 的计算资源数对应复数实部值,链路 $\forall l_s^i \in E_s$ 的带宽资源数对应复数虚部值,两值随虚拟节点映射过程动态变化.节点属性包括计算资源数和位置信息,链路属性为带宽数^[14].

用无向权重图描述虚拟网络 $G_v(V_v, E_v, LC_v)$, LC_v 代表位置限制,虚拟节点 v_v^i 有预期映射节点位置信息 $\forall lc_v^i \in LC_v$. v_v^i 仅能被映射到一组候选物理节点集 $\Psi_{v_v^i}^r \in V_s$, r 是候选半径,且 $\Psi_{v_v^i}^r = \{v_s^k \in V_s \mid \|v_s^k - v_v^i\| \leq r\}$, $\|v_s^k - v_v^i\|$ 是两个位置距离.

在企业网中,缺少高带宽消耗类型的应用(如视频点播等),带宽的动态特征可以忽略. CPU 请求符合高斯分布^[14],即 $CPU_v \sim N(\mu_v, \sigma_v)$, μ_v 代表均值, σ_v 代表标准差.

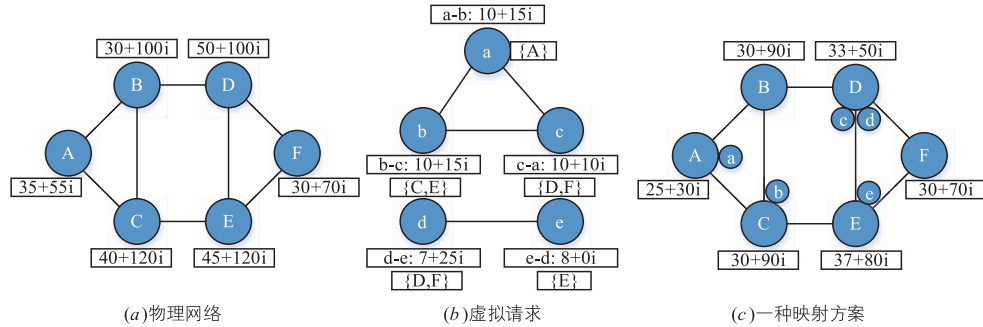


图1 一个EL-VNE例子

图 1(a),节点 A 的带宽资源能分配给 B 和 C. (b) 中,虚拟请求 a 的位置候选集为 $\{A\}$. (c) 中, A 容纳 a, C 容纳 b, D 容纳 c. 此时, A 当前可用计算资源为 25, 带宽资源为 30. A 的当前计算资源值计算为 35 减去 a 请求的计算资源 10; A 的当前带宽资源值计算为 55 减去 a 与 b 传输数据请求带宽数 15, 再减去 c 与 a 传输数据请求带宽数 10.

2.3 EL-VNE 问题描述

节点能耗模型. 企业级网络的计算机节点既要运行满足日常工作需要的软件,也要参与运行数据分析和处理任务,后者能耗是本文关注的焦点.参考[14],节点能耗线性模型定义为:

$$P = \begin{cases} P_b + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot CPU, & \text{if the node is active} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

P_b 是基线能耗, P_{\max} 是满载能耗, P_{\min} 是空载能耗, CPU 是当前负载. P_{\min} 可用公式 $P_b + (P_{\max} - P_b) \cdot CPU'$ 计算, CPU' 是指运行满足日常工作需要的软件时的 CPU 负载.

物理节点包括宿主节点和转发节点.当物理节点既是宿主节点又是转发节点时,其能耗以宿主节点计算.依据企业网络虚拟请求的动态性特征,在 T 时间段内能源消耗为:

$$E_1(T) = \int_0^T [P_b(H(t) + F(t)) + (P_{\max} - P_{\min}) \sum_{i=1}^{V_s(t)} CPU_i(t)] dt \quad (2)$$

$H(t)$ 和 $F(t)$ 分别为 t 时刻宿主节点和转发节点的数目. $V_v(t)$ 是 t 时刻虚拟节点的数目, $CPU_i(t)$ 是满足虚拟请求 i 的节点在 t 时刻的 CPU 负载.

链路能耗模型. 链路带宽值是随着物理节点的带宽属性值(虚部值)发生变化的. 参考[14], 设单位带宽的能源消耗值是定值 P_{fix} , 则:

$$E_2(T) = P_{fix} \cdot \int_0^T \sum_{i=1}^{V_v(t)} \sum_{v'_i \in \varphi(v_i)} \sum_{v''_i \in \varphi(v'_i)} |v_s| \cdot b(t) dt \quad (3)$$

v_v^{ij} 表示两个虚拟节点有连接关系 $v_v^{ij} = \{v'_i | v''_i = \varphi(v'_i)\}$, v'_i 是链路起点, v''_i 是链路终点, $\varphi(\cdot)$ 是转发节点. $|v_s|$ 代表 v'_i 和 v''_i 传输数据时的跳数. $b(t)$ 是在 t 时刻 v'_i 和 v''_i 需求的带宽数.

EL-VNE 能耗模型. 存在正整数 EQ , 总的能源消耗不大于 EQ .

$$E = E_1 + E_2 \leq EQ \quad (4)$$

有如下限制条件:

(1) 节点映射限制. 在一次虚拟网络映射过程中, 相同的物理节点只能容纳一个虚拟节点. 设映射函数为 $g(\cdot)$, 则:

$$v_s = g(v_v) \quad (5)$$

$$g(v_v^1) = g(v_v^2) \text{ iff } v_v^1 = v_v^2 \quad (6)$$

(2) 位置限制. 虚拟节点依据过往服务记录, 选择多个物理节点作为候选映射节点集, 以提升服务的质量.

$$v_s = \{v_s^k | v_s^k \in \Psi_{v_v^k} \& v_s^k = g(v_v^i)\} \quad (7)$$

(3) 节点资源限制. 物理节点的资源数应大于虚拟请求的资源数.

$$c_v^i < c_v^k, \text{ if } v_s^k = g(v_v^i) \quad (8)$$

$$b_v^i < \min(b_v^k), \text{ if } v_s^k \in \varphi(v_v^i) \quad (9)$$

2.4 EL-VNE 复杂性

二分图问题是 NP 完全问题^[15]. 给定图 $G(V, E)$ 和正整数 K , 是否存在两个顶点集合 V_1 和 V_2 , 满足 $V = V_1 \cup V_2$, $V_1 \cap V_2 = \varphi$, $|V_1| = \lceil |V|/2 \rceil$, $|V_2| = \lfloor |V|/2 \rfloor$, 且 V_1 和 V_2 之间的连接数不大于 K . 基于此, 有:

定理: EL-VNE 问题是 NP 完全问题.

证明: 首先, 证明 EL-VNE 问题属于 NP 问题. 如果公式(4)有解决方案, 则可在多项式时间内检验公式(5)~(9)是否满足.

其次, 证明 EL-VNE 有预期解决方案的条件是当且仅当存在一个二分图 $G(V, E)$. 对于虚拟网络 G_v 和正整数 EQ , EL-VNE 存在图 $G_v(V_v, E_v)$, 满足 $V_v = V$ 及 $E_v = E$. 节点 $V_v^i = \{\alpha_v^i\}$ ($i \in [1, |V_v|]$), 图 G 中与 α_v^i 对应的节点为 α^i . 类似的, 完成链路 E_v^i 的构造. 假设以 V_v^i 和 E_v^i 构造的子图为 α , 另一个子图 β 为 $V_v^k = \{\beta_v^k\}$, 其中 $k \in [1, |V_v|]$, $E_v^k = \phi$, 需要注意的是 α_v^i 和 β_v^i 是一一对

应的.

对于物理网络 G_s , 有两个完全子图 α', β' . α' 满足条件:

$$V_s^1 = \cup \{\alpha_s^i\}, E_s^1 = \{(\alpha_s^i, \alpha_s^j) \in V_s^1 \times V_s^1, i \neq j, i, j \in [1, |V_s^1|]\} \quad (10)$$

β' 满足条件:

$$V_s^2 = \cup \{\beta_s^k\}, E_s^2 = \{(\beta_s^k, \beta_s^h) \in V_s^2 \times V_s^2, k \neq h, k, h \in [1, |V_s^2|]\} \quad (11)$$

数据从 α' 流出标记为 o_s^{in} , 流入 β' 为 o_s^{out} , α' 和 β' 中的节点分别连接在 o_s^{in} 和 o_s^{out} 处, 有:

$V_s' = \cup \{v_s^i\} \cup \{o_s^{in}, o_s^{out}\}$, $i \in [1, \Delta + 1]$ 是 Δ 跳拓扑节点集;

$E_s^{1'} = \{(\alpha_s^i, o_s^{in}) | \alpha_s^i \in V_s^1\} \cup \{(\beta_s^i, o_s^{out}) | \beta_s^i \in V_s^2\}$ 是 Δ 跳拓扑链路集;

$E_s^{2'} = \{(o_s^{in}, o_s^{out})\}$ 是直接连接路径集;

$E_s^{3'} = \{(o_s^{in}, v_s^i)\} \cup \{(v_s^k, o_s^{out})\} \cup (\cup \{(v_s^i, v_s^k) | |v_s^i \rightarrow v_s^k| = \Delta\})$ 是通过 Δ 跳拓扑连接的路径集, $|v_s^i \rightarrow v_s^k|$ 是位于连接路径上的转发节点集.

位置限制为 $\Psi_{\alpha_v^i} = \{\alpha_s^i, \beta_s^i\}$, $\Psi_{\beta_v^i} = V_s^1$ if $i \leq \lceil |V|/2 \rceil$ 及 $\Psi_{\beta_v^i} = V_s^2$ if $i > \lfloor |V|/2 \rfloor$. 假设所有物理节点均是单位计算资源和带宽资源, 正整数 EQ 为 $EQ = 2(|V| + EQ + \lfloor |V|/2 \rfloor^2 + \lceil |V|/2 \rceil^2) + |E| + |V|^2$.

最后, 构建 G_v 到 G_s 的映射函数. 节点映射函数为

$$\Theta(\alpha_v^i) = \begin{cases} \alpha_s^i, & \alpha_v^i \in V_1 \\ \beta_s^i, & \alpha_v^i \in V_2 \end{cases} \text{ 和 } \Theta(\beta_v^i) =$$

$$\begin{cases} \alpha_s^i, & \alpha_v^i \in V_1, i \leq \lceil |V|/2 \rceil, \alpha_v^i \cap \alpha_v^i = \phi, \alpha_v^i \cup \alpha_v^i = V_1 \\ \beta_s^i, & \alpha_v^i \in V_2, i > \lfloor |V|/2 \rfloor, \beta_v^i \cap \beta_v^i = \phi, \beta_v^i \cup \beta_v^i = V_2 \end{cases}$$

链路映射函数在节点映射完毕后即可确定. 通过上述过程, EL-VNE 转换为二分图且可以求得解空间. 因此, EL-VNE 是 NP 完全问题.

2.5 EL-VNE 求解算法

为了得到 EL-VNE 的解空间, 设计了启发式的最大匹配最小能耗 (MEMS) 算法. 通常情况下, 虚拟请求的候选节点集满足相交非空, 不能构成二分图, 因此, 需要预处理来保证候选节点集是不相交的. 有三种方案可选: (1) 找到集合中有最小候选节点数的虚拟节点, 随机选择其中的节点, 而后从其它虚拟节点的候选集合中将此节点删除; (2) 记录每个候选节点的被虚拟节点选择的次数, 找到次数最少的候选节点, 随机选择包含此候选节点的虚拟节点, 将此候选节点从其它虚拟节点的候选集中删除; (3) 将(2)中的找到次数最少的候选节点改为找到次数最大的候选节点.

构建适合 MEMS 节点属性和二分图的匹配图, 构造规则如下: (1) 匹配图中的节点代表候选的物理路

径。(2) 两条物理路径应满足它们是拥有共同节点的相邻物理链路的候选路径,或者它们能容纳两条不相邻的候选物理路径,见算法 1。

算法 1 预处理方案和匹配图构建

输入:物理节点和虚拟节点的资源复数形式,每个虚拟节点的原始候选集

输出:匹配图 MG

```

For (each  $v_v^i \in V_v$ ) {
  For (each  $v_s \in \Psi_{v_v^i}$ ) {
    If ( $c_s^v < c_v^v \parallel b_s^v < b_v^v$ ) {
      将  $v_s$  从  $\Psi_{v_v^i}$  移除;
    }
  }
}
选择预处理方案之一构建新的关于每个虚拟节点  $v_v^i$  的候选集  $v_s \in \Psi_{v_v^i}$ ;
For (each  $v_v^i$  和  $v_v^j$  连接) {
  For (each  $v_s^i$  属于  $v_v^i$  的候选集) {
    For (each  $v_s^j$  属于  $v_v^j$  候选集) {
      If ( $v_s^i$  是  $v_s^j$  的邻居节点) {
        在匹配图中建立一个节点并标记为 " $v_s^i - v_s^j$ "; // 直接连接
      } else {
        找到连接  $v_s^i$  和  $v_s^j$  的最短路径并标记为 " $v_s^i - \dots - v_s^j$ "; // 间接连接
      }
    }
  }
}
标记同一组内与  $v_s^i$  和  $v_s^j$  有相同候选路径的节点;
For (each 匹配图节点  $v_{MG}^m$ ) { // 构造匹配图的链路, 标记匹配图中的节点为  $v_{MG}^m$ 
  For (each  $v_{MG}^n$  &&  $n \neq m$  && 非同分组内的  $v_{MG}^m$  和  $v_{MG}^n$ ) { // 与  $v_{MG}^m$  相异的且不在同一组内的匹配图中的节点  $v_{MG}^n$ 
    If (两个相邻的候选路径能容纳相同的节点 " $v_s^i$ " || 两个相邻的候选路径容纳两条虚拟链路) {
      建立  $v_{MG}^m$  之间  $v_{MG}^n$  的连接;
    }
  }
}
Return  $MG$ ;

```

需要注意的是,算法 1 在构建虚拟节点的候选集时有三种方案可用于参考,方案(1)倾向于候选节点少的虚拟请求的候选集不变;方案(2)倾向于可用资源数少的物理节点也能得到运行任务,以充分利用物理网络资源;方案(3)倾向于可用资源数多的物理节点在一次映射过程中放置一个虚拟请求,以均衡物理网络资源. 从两个方面对该三种方案进行了分析和实验,一方面是选择不同的方案,对比本文算法和其它主流算法,另一方面是选择不同的方案,运行本文算法,在实验结

果上基本无差异. 因此,三种方案的选取对本文算法无影响. 建议当虚拟请求类型是偏计算型时,选取的候选节点尽量包含服务器节点,以减少运行计算任务中断的可能.

利用匹配图 MG , 可将 EL-VNE 转换为 MEMS, 而最小化能耗的 EL-VNE 映射方案等价于求出 MG 的最大匹配集合, 见算法 2.

算法 2 近似优化的 MEMS 解空间求解算法

输入: G_s, G_v, MG

输出: 最大匹配集 M

$M = \phi$;

```

For (each  $v_v^i, v_v^j \in G_v$ ) {
  If ( $v_v^i$  与  $v_v^j$  连接 &&  $v_s^i = g(v_v^i)$  &&  $v_s^j = g(v_v^j)$  && 匹配图中节点  $v_{MG}^m$  有
  标记 (" $v_s^i - \dots - v_s^j$ " || " $v_s^j - \dots - v_s^i$ ") {
    计算带宽请求  $b_{v_v^i, v_v^j}^m$ ;
  }
}
按降序排序  $b_{v_v^i, v_v^j}^m$  形成序列  $DS$ ;
For (each  $b_{v_v^i, v_v^j}^m \in DS$ ) {
   $M' = \phi$ ; //  $M'$  为临时匹配集
  If ( $\min(b_{v_v^i, v_v^j}^m) \geq b_{v_v^i, v_v^j}^m, v_s^i \in \{v_s^i, \dots, v_s^j\}$  &&  $c_s^i < c_v^i$  &&  $c_s^j < c_v^j$ ) {
     $M' \leftarrow v_{MG}^m$ ; //  $\leftarrow$  表示将  $v_{MG}^m$  加入到  $M'$  中
  } else {
    Return "求解最大匹配失败!";
  }
}
选择  $M'$  中拥有最小跳数的节点并将其加入到  $M$  中;
更新计算资源和带宽资源数(重标记物理节点的复数值);
}
Return  $M$ ;

```

3 实验及评估

利用 GT-ITM^[16] 生成实验环境为:物理网络有 50 台计算机,4 台服务器,设置 $100 * 100$ 的网格^[13,14],计算机节点随机映射到网格中,服务器放置到同一个网格处,虚拟网络请求数随机为 1 - 10. 两个虚拟节点相连接的概率为 0.5, v_v^i 的候选集节点数随机为 1 - 10, 选择范围以 v_v^i 为圆心,以随机数 15 - 30 为半径 r 的圆. 虚拟请求到达率服从泊松分布,每单位时间平均到达率为 λ , 平均保持时间为 $1/\mu$. CPU 请求服从高斯分布 $N(\mu, \sigma)$, $\mu \in [0, 20]$, $\sigma \in [0, 10]$, p_b 为 165W, $P_{\max} - P_{\min}$ 为每 CPU 单位 15W.

以 MILP 算法为基准, 求出最优化的及 EL-VNE 的解决方案 E^* 和 E , 之间的距离 $\omega = (E^* - E)/E$. 用阻塞概率 ω 表示虚拟网络请求不能满足的概率, $\omega = \lim_{t \rightarrow T}$

$\frac{|\Gamma_{blocked}(t)|}{|\Gamma_{blocked}(t)| + |\Gamma_{accepted}(t)|}$, t 是当前时刻, T 是运行时间. $\Gamma_{blocked}(t)$ 和 $\Gamma_{accepted}(t)$ 分别为阻塞的和接受的虚拟

请求数。

图2是EL-VNE(简称为EL)和DVINELB^[11]及GLC^[13]在 ω 上的比较结果. EL的求解过程用时较少,原因有(1)EL中的物理节点在一次虚拟网络映射过程中仅能获取到一个虚拟节点,这会使得网络中盈余资源较为平衡;(2)复数理论的引入使得EL仅需要关注节点映射,相比于GLC和DVINELB的两次映射,节省了计算的时间.值得注意的是,当启发式算法没有考虑负载均衡因素时, ω 值偏小,原因是负载均衡因素会致使算法选择有较高资源消耗的请求从而保证网络中有充足的盈余资源.图3展示了算法1的评估结果,不同虚拟节点的候选集相交的概率随着虚拟网络请求数和半径的增加而增大,从而增大 ω 值.虽然,当虚拟网络请求数是10, r 是30时, ω 接近15%,但相比于其它算法,该值仍相对较小.

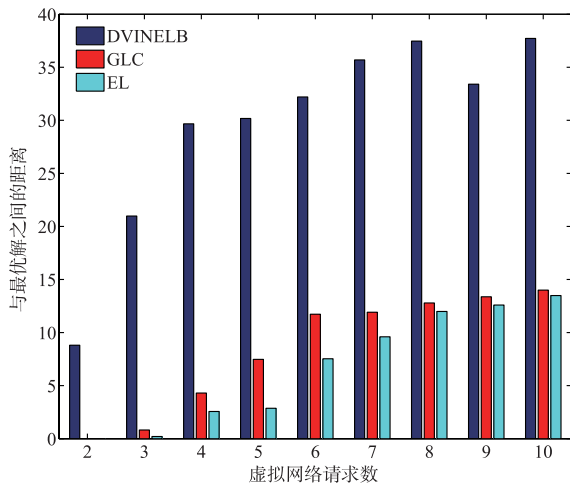


图2 随时间变化的与最优解间距离

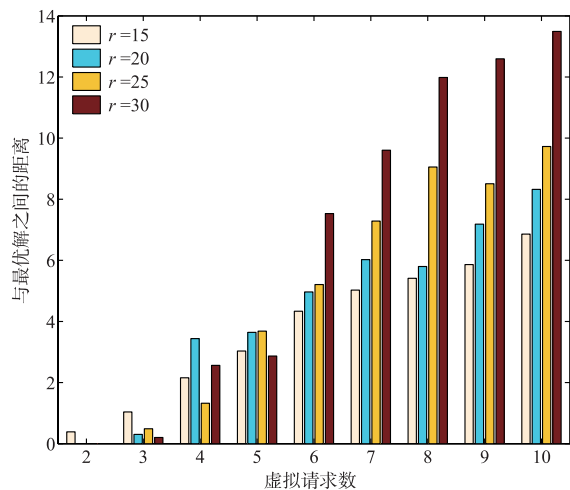


图3 随虚拟请求数变化的与最优解间距离

图4显示了不同启发式算法的可以求解到的解空间数,其中,最大的解决方案数是30个.需要注意的是,

EL的解决方案数相比于DVINELB是偏低的,原因在于在DVINELB算法中,允许多路径链路映射,但EL只存在单路径映射.

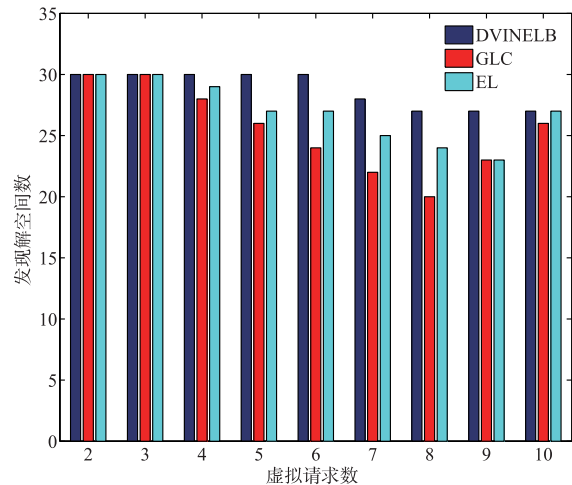


图4 随虚拟请求数变化的解空间数

图5显示了参数 ω 的评估结果,可以看到EL的阻塞率在GLC和DVINELB之间.原因是GLC是基于云平台的算法,物理资源充足,在企业网络中,盈余的资源不能保证EL总是得到最优的解空间,故EL阻塞率要高于GLC.

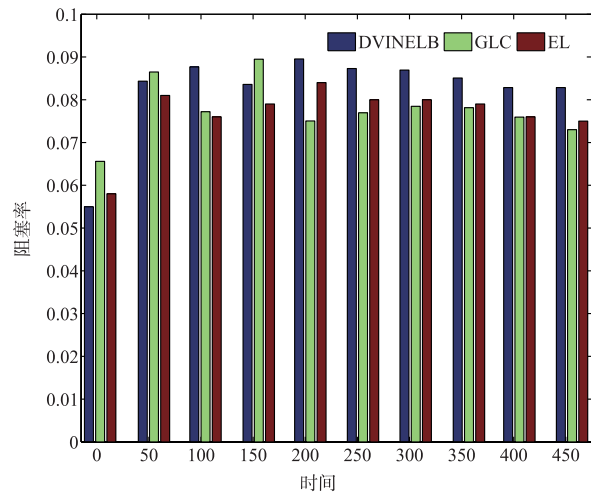


图5 虚拟请求阻塞率

算法1中,虚拟请求候选集的交集随半径 r 增大,将导致EL性能变坏,因此评估了阻塞率随着 r 增大的变化情况,如图6. EL算法能够得到更低的阻塞率.需要注意的是,随着半径的增加,候选集中的节点会增加,导致会得到更多的解空间,但算法的性能随着节点映射遭遇瓶颈时,会急剧变坏.

图7评估了EL的时间复杂度.以EL的运行时间为基准,其它算法的运行时间转换为归一化的计算时间.结果显示,EL算法的运行时间较少,这是由于

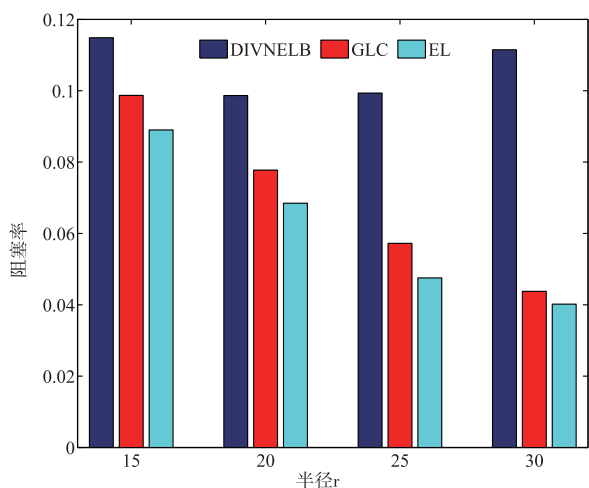


图6 随半径变化的虚拟请求阻塞率

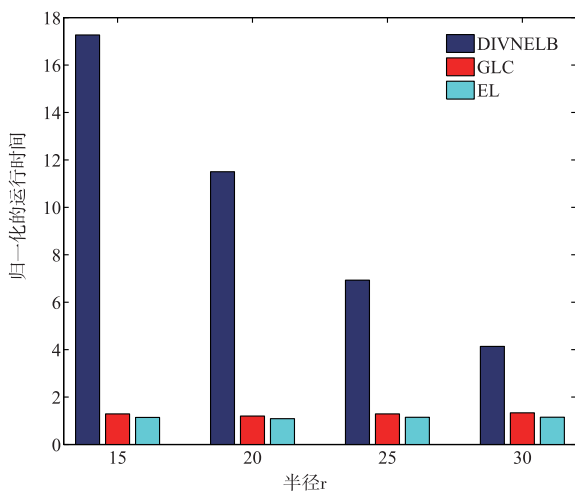


图7 不同算法的时间复杂度

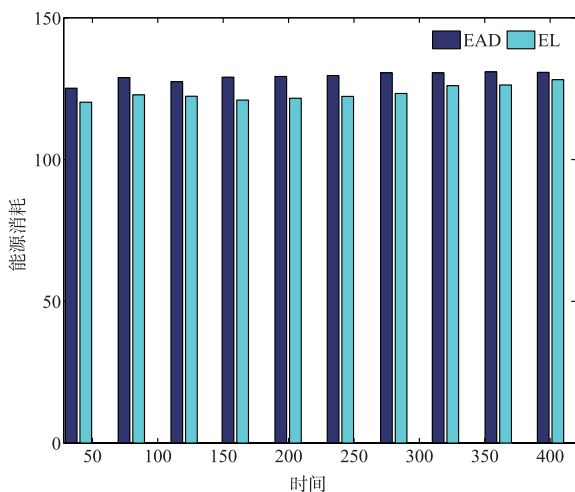


图8 小数量虚拟请求的能源消耗

DIVNELB 需求解 2 次线性规划。

图 8 和图 9 评估了 EL 和 EAD 能耗值。图 8 中,当小规模的虚拟请求到来时,EL 的能源消耗要低于

EDA。原因在映射过程中只有节点映射存在,节省了用于链路映射的能源消耗。此外,当虚拟请求数较低时,企业网中盈余带宽很大,物理节点相对集中,减少了转发节点的数目。但在图 9 中,当中等规模虚拟请求到来时,EAD 和 EL 的距离彼此接近。原因是随着虚拟请求的增大,当前物理节点的盈余带宽变少,空闲节点参与到虚拟网络映射过程,导致更多的能源消耗。此外,与 BSVF^[17] 算法的对比显示在图 10 中,EL 的运算时间少且避免了 BSVF 节点间频繁的虚拟请求转移,能源节省率要高于 BSVF。

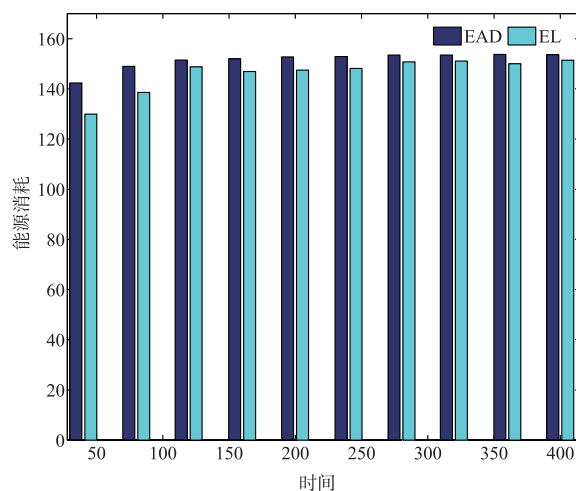


图9 中等数量虚拟请求的能源消耗

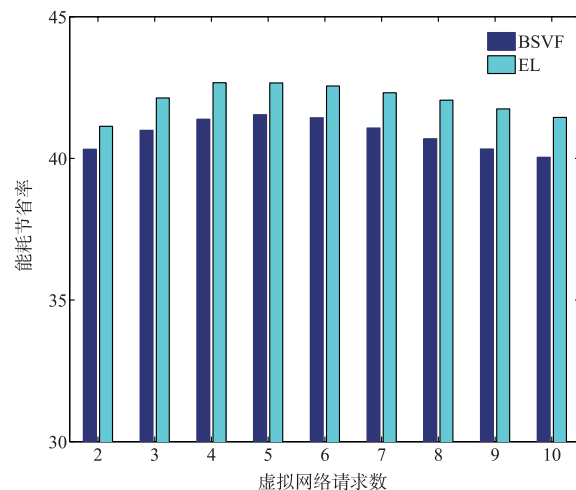


图10 与BSVF相比的能源节省率

4 结论和未来工作

本文提出了适用于企业网的位置限制条件下的虚拟网络能耗优化策略。首先介绍了用复数理论来表示物理节点和虚拟节点的计算资源和带宽资源表示方法。其次,建立有位置限制的 EL-VNE 模型。再次,介绍了将 EL-VNE 转换为二分图的方法,并由此证明 EL-

VNE 是属于 NP 完全问题的. 同时, 设计了启发式算法来得到最佳解空间. 最后, 与 DVINELB、GLC、EAD 等算法进行了模拟实验的对比, 结果显示提出的算法在与最优解的距离、请求阻塞率、解空间数、能源消耗值等方面均有较佳的表现. 下一步, 需改进提出的启发式算法以提升在虚拟请求规模较大时的 EL-VNE 性能, 降低算法的各项性能波动.

参考文献

- [1] Gong X X, et al. Virtual network embedding for collaborative edge computing in optical-wireless networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 3980 – 3990.
- [2] Ogino, et al. Virtual network embedding with multiple priority classes sharing substrate resources[J]. Computer Networks, 2017, 11(2): 52 – 66.
- [3] Papagianni C, et al. On the optimal allocation of virtual resources in cloud computing networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62(6): 1060 – 1071.
- [4] Hong H J, et al. Placing virtual machines to optimize cloud gaming experience[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015, 3(1): 42 – 53.
- [5] Fard S Y Z, et al. A dynamic VM consolidation technique for QoS and energy consumption in cloud environment[J]. The Journal of Supercomputing, 2017, 73(10): 4347 – 4368.
- [6] Zhang S, et al. Virtual network embedding with opportunistic resource sharing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(3): 816 – 827.
- [7] 陈晓华, 等. 虚拟网络映射高效节能运输模型及算法[J]. 电子学报, 2016, 44(3): 725 – 731.
Chen X H, et al. Transportation model and algorithms for energy efficient virtual network embedding[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3): 725 – 731. (in Chinese)
- [8] Elijorde F, et al. Attaining reliability and energy efficiency in cloud data centers through workload profiling and SLA-aware VM assignment[J]. International Journal of Soft Computing and Its Applications, 2015, 7(1): 41 – 58.
- [9] Zhang Z, et al. Energy-aware virtual network embedding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(5): 1607 – 1620.
- [10] Sun G, et al. Exploring online virtual networks mapping with stochastic bandwidth demand in multi-datacenter[J]. Photonic Network Communications, 2012, 23(2): 109 – 122.
- [11] Chowdhury M, et al. Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206 – 219.
- [12] Zhao J, et al. Virtual topology mapping in elastic optical networks[A]. 2013 IEEE International Conference on Communications[C]. Budapest, Hungary: IEEE, 2013. 3904 – 3908.
- [13] Gong L, et al. Novel location-constrained virtual network embedding LC-VNE algorithms towards integrated node and link mapping[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(6): 3648 – 3661.
- [14] 张忠宝. 高效用低电能开销的虚拟网络映射算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013. 37 – 42.
Zhang Z B. Research on key technologies for virtual network embedding with high utility and low energy cost[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. 37 – 42. (in Chinese)
- [15] M. R. Garey, et al. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-Completeness[D]. San Francisco, CA, USA: Freeman. 1990. 210, problem ND17.
- [16] Zegura E W, et al. How to model an internetwork[A]. 1996 International Conference on Computer Communications[C]. San Francisco, USA: IEEE, 1996. 594 – 602.
- [17] Zhang H, et al. Self-organized virtual small networking for energy saving and load balancing in cellular networks[A]. 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop[C]. London, UK: IEEE, 2015. 2874 – 2879.

作者简介



丛 鑫 男, 1982 年生于辽宁阜新, 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院副教授, 北京邮电大学计算机科学与技术专业博士, 研究方向为 P2P, 云计算, 虚拟网络映射.
E-mail: chongzi610@163.com



警玲玲(通信作者) 女, 1981 年生于辽宁阜新, 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院副教授, 北京邮电大学计算机科学与技术专业博士, 研究方向为多媒体处理, 最优化方法.
E-mail: lingling19812004@126.com