联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射方法

刘焕淋[1],胡 浩[1],陈 勇[2],杜君丹[1],向 敏[2]
(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆 400065;2. 重庆邮电大学自动化学院,重庆 400065)

摘 要: 为解决弹性光网络中虚拟网络映射时能耗严重、资源分配不均的问题,该文提出一种联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射(PC-LB-VONE)方法. 在虚拟节点映射时,选择相邻链路长度短、光节点计算资源多与相邻链路带宽资源多的光节点映射. 在虚拟链路映射时,提出一种基于极大团的候选光路资源匹配度单路径映射策略. 当单路径映射失败时,设计基于链路负载均值的多路径映射策略. 仿真结果表明,所提方法能在减少弹性光网络能耗的同时均衡网络负载.

关键词: 弹性光网络; 虚拟网络; 极大团; 资源匹配度; 能耗; 负载均衡
中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)12-2488-07
电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.12.006

Joint Power Consumption and Load Balancing Algorithm for Virtual Optical Network Embedding

LIU Huan-lin[1], HU Hao[1], CHEN Yong[2], DU Jun-dan[1], XIANG Min[2]
(1. *School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing* 400065, *China*;
2. *School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: Due to the energy consumption and imbalance resources allocation in virtual optical network embedding over elastic optical networks, a joint power consumption and load balancing for virtual optical network embedding (PC-LB-VONE) is proposed. During virtual node embedding, we select the physical node which has shorter length of its adjacent link, and smaller difference between its computing resources and bandwidth resources of its adjacent link. During virtual link embedding, considering the resource matching degree of candidate optical paths, a single-path embedding strategy based on maximal clique is proposed. When the single-path embedding strategy fails, a multi-path embedding strategy based on the average link load will be taken. Simulation results show that the proposed PC-LB-VONE algorithm can effectively decrease the energy consumption and balance the traffic load.

Key words: elastic optical networks; virtual network; maximal clique; resource matching degree; power consumption; load balance

1 引言

近年来,随着互联网应用和通信技术的快速发展,网络流量呈现爆炸式地增长,作为通信基础设施的骨干光网络面临严峻挑战[1]. 传统的波分复用网络因其波长分配粒度粗糙、调制等级单一等缺点,无法满足业务灵活带宽粒度的需求[2],而基于正交频分复用技术的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)频谱分配方式灵活、传输容量大,被认为是极具发展潜力的下一代光传输网之一[3,4].

与此同时,通信网的规模扩张导致通信业能源消耗急速增长,逐渐成为限制通信网规模发展和服务能力的主要因素[5]. 尽管网络虚拟化技术可以整合基础设施资源,允许多个虚拟网络共享 EONs 资源,提高资源利用率[6]. 但现有多数虚拟网络映射算法主要目标是提高虚拟网络映射成功率,忽略了为虚拟网络超量供给资源使 EONs 节点和链路消耗大量资源和能耗,增加网络中设备的能耗以及互联网服务提供商的运营维

收稿日期:2019-01-18;修回日期:2019-08-14;责任编辑:蓝红杰
基金项目:国家自然科学基金(No. NSFC51977021);国家电网总公司科技项目(No. 52010118000Q);重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2019jcyj-msxmX0613)

护开销[7]. 因此,研究如何减少虚拟网络映射时产生的能耗和提高映射成功率具有重要现实意义[8,9].

文献[9]考虑弹性光网络中设备能耗特点,通过构造辅助图并根据辅助图中的边权值将虚拟链路映射问题转化为最短路由问题,减少映射时的路径长度和路由能耗,但是该方法忽略了虚拟节点映射时对 EONs 能耗的影响. 文献[10]提出基于功率感知的启发式方法降低能耗,将相邻虚拟节点映射在相邻光节点上,并选择能耗小的路径进行虚拟链路映射. 文献[11]提出将虚拟节点尽量映射在已激活的光节点上,并采用疏导方式将虚拟链路映射在 EONs 光路上,减少 EONs 中带宽可变转发器能耗. 文献[12]提出一种中基于负载均衡的虚拟网络映射(Virtual Network Mapping-Load Balancing,VNMLB)方法. 文献[13]研究了自适应调制格式降低网络能耗(Virtual Network Embedding with Heuristic-degree & bandwidth,VNE-HDB)的方法. 上述方法可在一定程度上降低 EONs 的能耗或提高映射成功率,但它们均以最大限度地使用网络当前资源为虚拟网络服务,使得部分光节点或链路处于重负载状态,导致光网络资源使用不均衡,极易产生瓶颈节点或链路,大大增加了虚拟网络映射时被阻塞的概率.

基于上述背景,本文提出一种联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射方法(Joint Power Consumption and Load Balancing Strategy for Virtual Optical Network Embedding,PC-LB-VONE). 该方法通过设计动态的光节点权重公式映射虚拟节点,采用基于极大团的单路径映射策略,通过构建分层辅助图为虚拟链路确定映射光路,以此均衡网络的整体负载,降低 EONs 的能耗;同时,当单条光路映射失败时,采用基于链路负载均值的多路径映射策略,进一步提高虚拟网络成功映射的概率.

2　问题描述与能耗分析

EONs 抽象为无向图 $G_s=\{N_s,L_s\}$,其中 N_s 表示光节点集,光节点拥有一定数量的可用计算资源 C_n^s;L_s 表示光纤链路集,光纤链路拥有一定数量的可用频谱资源 B_l^s,单位为频隙(Frequency Slot,FS),链路 j 的频隙可表示为 $N_j=\{f_j^1,f_j^2,\cdots,f_j^N\}$. 类似的,虚拟网络表示为无向图 $G_v=\{N_v,L_v\}$,其中 N_v、L_v 分别表示具有一定计算资源需求的虚拟节点集与具有一定带宽资源需求的虚拟链路集,虚拟节点计算资源需求为 C_n^v,虚拟链路需求带宽资源为 B_l^v.

虚拟网络映射可分为虚拟节点映射、虚拟链路映射两个过程,分别满足映射的约束条件为

$$\sum_{s\in N_s} g_s^v=1,\forall v\in N_V;\sum_{v\in N_V} g_s^v\le 1,\forall s\in N_S \tag{1}$$

$$C_n^v\le C_n^s,\forall v\in N_V,\forall s\in N_S \tag{2}$$

$$f_e^P-f_s^P+1\ge B_l^v \tag{3}$$

$$\prod_{k=f_s^P}^{f_e^P} P_q^k=1,\forall q\in P,k\in[f_s^P,f_e^P] \tag{4}$$

$$\sum_{k=f_s^P}^{f_s^P+B_l^v-1} P_q^k\le 0,\forall q\in P,k\in[f_s^P,f_e^P] \tag{5}$$

式(1)中,g_s^v 是布尔变量,若虚拟节点 v 映射至光节点 s 上则其值为 1,否则为 0,该约束条件表明一个虚拟网络的不同虚拟节点仅能映射至不同且唯一的光节点上,但不同虚拟网络的虚拟节点可以映射在一个光节点上. 式(2)约束虚拟节点的计算资源需求不大于映射光节点的可用计算资源数目. f_s^P 和 f_e^P 分别表示在物理光路 P 上为虚拟网络分配的空闲频谱块的起始和终止频隙索引值. 式(3)表明为虚拟网络映射光路上分配的可用频谱块应满足虚拟链路频谱带宽需求. P_q^k 是一个布尔变量,值为 1 表示链路 q 上第 k 个频隙空闲,反之为 0. 式(4)、(5)分别表明在 EONs 中,为光路分配频谱资源时,必须满足光路频谱一致性、频谱连续不重叠性的约束条件.

在 EONs 中映射虚拟网络请求时,主要的耗能设备包括:节点能耗 P_N 和光路传输能耗 P_L. 其中,P_N 包括 IP 层路由器能耗 P_{IP}、带宽可变的转发器能耗 P_{BV}、带宽可变的光交叉连接器 P_{OX},P_L 主要为掺铒光纤放大器能耗.

$$P=P_N+P_L \tag{6}$$

$$P_N=2\times P_{IP}+\beta\times P_{BV}+\gamma\times P_{OX} \tag{7}$$

路由器能耗 P_{IP} 包含路由器启动后的光/电/光处理固有能耗和与业务量相关的动态能耗两部分[14]. 带宽可变的转发器能耗 P_{BV} 与光网传输信号的调制方式、业务请求速率相关,较高的调制等级需要更为复杂的处理过程,因此其能耗也相对较高,而调制等级与光路由长度相关[15]. 光交叉连接器能耗 P_{OX} 主要与光网络中节点度数和该节点上下路的业务数量相关[16]. 式(7)中,β为光路上转发器使用个数,γ为光路上光交叉连接器使用数目.

在光路上,为保证信号传输质量,一般每隔 80km 放置一个掺铒光纤放大器,因此,P_L 能耗主要取决于映射光路所经过的路径长度[16].

为了实现降低虚拟网络映射带宽阻塞率和能耗,提高资源利用率,现有的大量虚拟网络映射已经证明是一个 NP 难问题,通过对映射过程的能耗模型式(6)和虚拟网络映射约束条件式(1)~(5)分析,考虑虚拟网络映射在 EONs 上是一个更加复杂的过程,因此,本文提出一种联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射方法(PC-LB-VONE),通过设计有效的虚拟网络映射路由方

法和资源分配策略,减少映射网络能耗和提高虚拟网络请求的接受率.

3 联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射(PC-LB-VONE)

PC-LB-VONE 方法首先映射虚拟节点到高权值光节点上,然后根据 EONs 光路资源匹配度,设计基于极大团的虚拟链路单路径映射和基于链路负载均值多路径映射策略,提高虚拟网络接受率和降低弹性光网络能耗,均衡网络负载.

3.1 节点映射策略

为了提高虚拟节点映射成功的概率,优先映射计算资源和相邻虚拟链路带宽资源需求较大的虚拟节点. 采用文献[17]所提方法排序虚拟节点.

$$R_V(i) = c_i^v \times \sum_{j \in N(i)} b_j^v \tag{8}$$

式(8)中,c_i^v为虚拟节点 i 计算资源需求,$N(i)$表示与虚拟节点 i 相邻虚拟链路集合,b_j^v为虚拟链路 j 需求带宽资源.

为均衡 EONs 的负载,减少虚拟节点相邻链路映射到光路上产生的能耗,光节点 i 排序权重为

$$R_S(i) = \frac{c_i^s \times d_i^s \times \sum_{j \in N(i)} b_j^s}{\alpha \times \left| c_i^s \times d_i^s - \sum_{j \in N(i)} b_j^s \right| + (1-\alpha) \times \sum_{j \in N(i)} D_j} \tag{9}$$

式(9)中,c_i^s和 d_i^s分别为光节点 i 可用计算资源及度数,$N(i)$表示与光节点 i 相邻的光纤链路集合,b_j^s和 D_j分别为光纤链路 j 的可用带宽资源及链路长度,α 为权重调节因子. $R_S(i)$值越大,表明光节点 i 不仅计算资源丰富,与其相邻物理链路的可用资源差异小,且虚拟节点相邻链路映射时产生的能耗少.

3.2 基于极大团的单路径映射策略

为了减少频谱碎片的产生,避免因 EONs 瓶颈链路导致虚拟网络被阻塞,在虚拟链路映射时,PC-LB-VONE 方法考虑光路的频谱承载能力以及该光路中各链路上的平均负载,定义路径 P 的资源匹配度 $M(P)$相反数作为光路选择的代价函数.

$$M(P) = \left(A_F^P + \frac{1}{N_F^P} \times \sum_{j=1}^{L^P} \sum_{i=0}^{N} f_i\right) / (1 + T_a^P) \tag{10}$$

$$T_a^P = \frac{1}{L^P} \times \sum_{j=1}^{L^P} \sum_{i=0}^{N} f_{i,j} \tag{11}$$

式(9)中,A_F^P 表示光路 P 上所含频隙数大于虚拟链路需求带宽的可用频谱块个数,可以衡量光路上频谱资源的承载能力;$f_{i,j}$表示链路 j 上频隙 i 状态,被业务占用为 1,否则为 0;N_F^P 表示光路 P 上的空闲频谱块个数;T_a^P表示为物理光路 P 中各链路上的平均负载,该值可由式(11)计算得出,L^P表示光路 P 的光纤链路数目. M 值越高,说明该光路上频谱资源充足、频谱碎片少且各链路负载较轻.

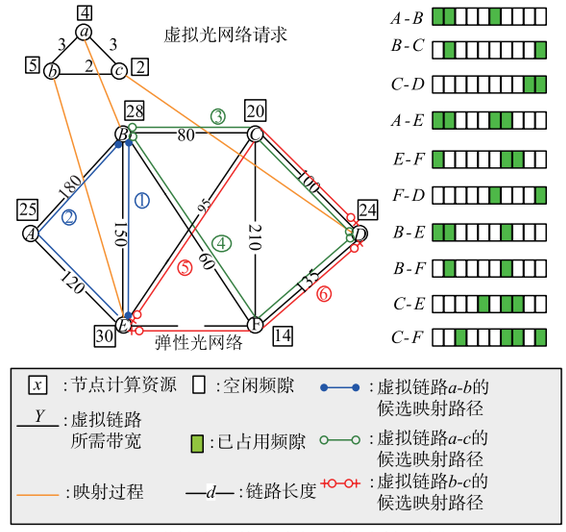

图1 弹性光网络下虚拟网络映射示意图

图 1 为弹性光网络环境下虚拟网络请求 VONR1 的映射过程. 在节点映射时,PC-LB-VONE 首先根据节点映射策略中式(8)确定虚拟节点映射的顺序:b、a、c,同时根据式(9)计算出 3 个拥有较高 SNR 值的光节点:E、B、D. 在链路映射阶段,根据虚拟链路带宽需求,通过式(10)计算各满足带宽需求的候选光路的资源匹配度,选择较高资源匹配度的光路作为候选的映射光路,如表 1.

表1 虚拟网络请求各链路的候选映射方案

虚拟链路	带宽需求	候选映射光路	光路频谱状态
a - b	3FS	$P1 = B - E$	
		$P2 = B - A - E$	
a - c	3FS	$P3 = B - C - D$	
		$P4 = B - F - D$	
b - c	2FS	$P5 = E - C - D$	
		$P6 = E - F - D$	

为了联合考虑虚拟链路映射时在 EONs 上产生的能耗与 EONs 负载状态,论文提出一种基于极大团的虚拟链路映射策略. 该策略需要构造分层辅助图,具体过程为:根据式(10)得到的光路代价函数为每条虚拟链路寻找 K 条候选映射光路,生成候选映射光路集;将每条候选映射光路表示为分层辅助图中的一个节点,即每一节点对应一条虚拟链路的候选映射光路;若两条虚拟链路的候选映射光路没有相交链路,则边连接分层辅助图中的两节点.

考虑到虚拟网络映射在 EONs 上产生的能耗,设置分层辅助图的节点权重为候选映射光路的跳数与光路

上放大器个数之和,如式(12). 同时,为减轻虚拟网络请求映射后光纤链路负载不均衡情况,设置分层辅助图中的链路权重为候选映射光路上链路平均负载差值的绝对值,如式(13). 团的权重则为该团所有节点权重与链路权重之和,如式(14).

分层辅助图的节点权重为

$$N_w(P_i) = H(P_i) + \left\lceil \frac{d(P_i)}{80} \right\rceil \tag{12}$$

分层辅助图的链路权重为

$$L_W(P_i, P_j) = \left| T_a^{P_i} - T_a^{P_j} \right| \tag{13}$$

分层辅助图 g 中极大团的权重值为

$$G_W(g) = \sum_{i \in g} N_W(P_i) + \sum_{i \in g, j \in g} L_W(P_i, P_j) \tag{14}$$

式(12)中,$H(P_i)$ 表示光路 P_i 的跳数,$d(P_i)$ 表示该光路的长度,根据上述方法构建分层辅助图,计算辅助图中各节点、链路的权重值,如图 2 所示.

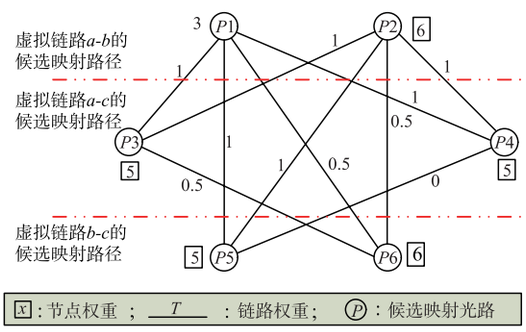

图2　虚拟网络请求候选映射方案分层辅助图

分层辅助图构建后,根据深度优先搜索方法搜索辅助图中所有极大团,并按式(12)~(14)计算每个团的权重,以及极大团对应的虚拟链路候选映射光路信息,选择总权重最小的团作为虚拟链路映射光路,也是映射能耗最少和最均衡负载的光路.

3.3　基于链路负载均值的多路径映射策略

当 EONs 中的单路径映射失败时,我们设计基于链路负载均值的多路径映射策略:将虚拟链路的带宽需求进行分割并分别映射在多条物理光路上进行传输,以提高虚拟链路映射的成功概率.

为了减少带宽资源的分割份数,尽量降低因多路径传输而增加的设备能耗问题,该策略仅允许将虚拟链路的带宽资源需求分割映射在 2 条物理光路上. 首先,为虚拟链路选择剩余候选映射光路中路径资源匹配度 M 值最高的光路 P_e^1 和 P_e^2,尽量将虚拟链路映射在频谱资源丰富、链路负载均值相对较小的光路上;然后,根据 2 条候选光路上各物理链路负载均值情况,确定各条光路分配的子带宽大小,2 条光路子带宽分配计算如式(15).

$$\begin{cases} b(P_e^1) = \dfrac{T_a^{P_e^2}}{T_a^{P_e^1} + T_a^{P_e^2}} \times b_j^v \\ b(P_e^2) = b_j^v - b(P_e^1) \end{cases} \tag{15}$$

式(15)中,$b(P_e^1)$ 与 $b(P_e^2)$ 分别表示分配给光路 P_e^1 和 P_e^2 带宽值,b_j^v 为虚拟链路 j 需求带宽.

PC-LB-VONE 算法

输入:弹性光网络 $G_s = \{N_s, L_s\}$,虚拟网络 $G_v = \{N_v, L_v\}$.

输出:虚拟网络映射和带宽阻塞率、能耗、负载均衡度指标.

步骤 1:虚拟网络 G_v 到达,虚拟节点个数 N、虚拟链路数 L,已映射虚拟节点数 $n=0$,已映射虚拟链路数 $l=0$;

步骤 2:根据式(8)和式(9)计算 G_v 各虚拟节点和 G_s 中各光节点权值,并降序列,排序后虚拟节点集合为 $R_V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$ 和光节点集合为 $R_S = \{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$;

步骤 3:依次映射 R_V 中的虚拟节点 v_j,从 R_S 集合中顺序找到满足式(1)、(2)条件的光节点 s_j,若 $C_n^{s_j} \geq C_n^{v_j}$,则将 v_j 映射至 s_j,标记虚拟节点 v_j 为已映射状态,$n = n+1$,否则阻塞该虚拟网络. 重复步骤 3,直至 $n = N$,转步骤 4;

步骤 4:根据带宽需求大小对虚拟链路进行降序排列,得到虚拟链路排序集合 $R_L = \{l_{v1}, l_{v2}, \cdots, l_{vL}\}$;

步骤 5:根据式(3)~(5)和式(10)为 L 条虚拟链路确定 K 条候选光路并加入集合 $E = \{p_1^1, \cdots, p_1^K, p_2^1, \cdots, p_2^K, \cdots, p_L^1, \cdots, p_L^K\}$;

步骤 6:将每条虚拟链路的 K 条候选映射光路对应到分层辅助图某一层的 K 个节点上,若 2 条虚拟链路的候选映射光路无相交链路,则在分层辅助图中边连接这 2 个节点;

步骤 7:在分层辅助图中寻找极大团,根据式(12)~(14)计算每一个极大团中节点、链路以及极大团的权重值,得到最小权重值的极大团及虚拟链路的映射光路信息集合 $\{p_1, p_2, \cdots, p_L\}$;

步骤 8:根据集合 R_L 依次映射每条虚拟链路,若 $B_l^{p_l} \geq B_l^{l_v}$,则将虚拟链路 l_{vj} 映射在一条 EONs 的光路 p_j 上,$l = l+1$,并转步骤 12,否则,需要分割光路映射,转步骤 9;

步骤 9:从集合 E 中找到 l_{vj} 的 2 条路径资源匹配度较高的候选映射光路 p_j^1 和 p_j^2,分别将其记为 p_e^1 和 p_e^2;

步骤 10:通过式(15)计算虚拟链路拟映射的 2 条光路 p_e^1 和 p_e^2 的带宽资源分配值 $b(p_e^1)$ 与 $b(p_e^2)$;

步骤 11:若 $B_l^{P_e^1} \geq b(P_e^1)$ 且 $B_l^{P_e^2} \geq b(P_e^2)$,分割映射该虚拟链路至光路 p_e^1 和 p_e^2,$l = l+1$,并转步骤 12;否则,阻塞该虚拟网络请求;

步骤 12:若 $l = L$,表示所有虚拟链路已映射,转步骤 13;否则,转步骤 8,进行下一条虚拟链路的映射;

步骤 13:输出虚拟网络映射结果和性能指标.

4　仿真验证与结果分析

为了验证本文所提 PC-LB-VONE 方法的有效性,在具有 14 个节点 21 条链路的 NSFNET 拓扑中进行仿真验证. EONs 节点计算资源和链路带宽资源分别为 200 单位和 320 频隙,设光节点的权重调节因子 $\alpha = 0.8$. 虚拟网络业务到达服从泊松分布,持续时间服从负指数分布,每个虚拟网络的节点计算资源需求和虚拟链路的频谱资源需求均在[1,10]之间随机分布,虚拟网络请求的虚拟节点数为[3,5],任意虚拟节点对之间有链

路连通概率为 0.5.

仿真性能指标为带宽阻塞率、频谱资源利用率、能耗以及网络负载均衡度. 对比方法为基于负载均衡的虚拟网络映射(VNMLB)方法[12]和自适应调制格式降低网络能耗的(VNE-HDB)方法[13].

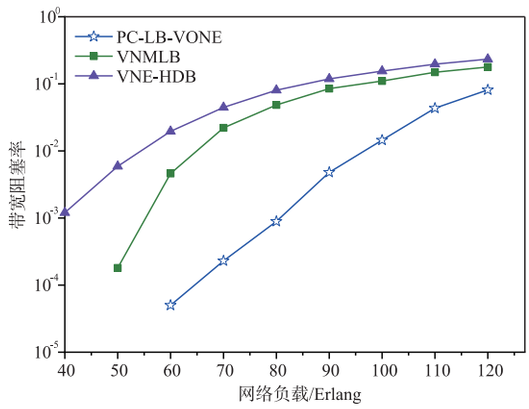

图3 带宽阻塞率与网络负载关系

图 3 所示虚拟网络请求带宽阻塞率的性能对比. 随着网络负载增加,所有方法的带宽阻塞率也随之增加,但 PC-LB-VONE 方法获得最低的带宽阻塞率. 这是由于 PC-LB-VONE 将频谱资源丰富、连贯度高、负载较轻的物理光路作为虚拟链路的候选映射路径,一定程度上降低了因物理光路上频谱资源不足而导致虚拟链路被阻塞的可能性. 同时,当虚拟网络请求增多,网络负载较重时,PC-LB-VONE 方法提出了基于链路负载均值的多路径映射策略,根据候选光路上的链路负载情况将虚拟链路的带宽资源需求分割映射至 2 条光路上传输,进一步降低虚拟网络请求的阻塞率.

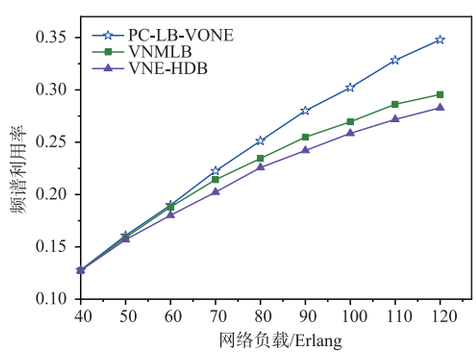

图4 频谱资源利用率与网络负载关系

图 4 为 3 种方法呈现出的频谱资源利用率的性能对比. 由图 4 可知,本文所提 PC-LB-VONE 方法均获得了最高的频谱资源利用率,服务了更多的虚拟请求. 这是由于 PC-LB-VONE 通过衡量物理光路的路径资源匹配度,将具有相对较多可用频谱块、碎片化程度轻的物理光路作为虚拟链路的候选映射路径. 当单路径策略映射失败时,PC-LB-VONE 允许虚拟链路分割映射至多条物理光路上,尽可能地利用光路上的空闲频谱资源传输更多的虚拟网络请求,因而 PC-LB-VONE 方法能有效地提升弹性光网络中的频谱资源利用率,服务更多虚拟网络.

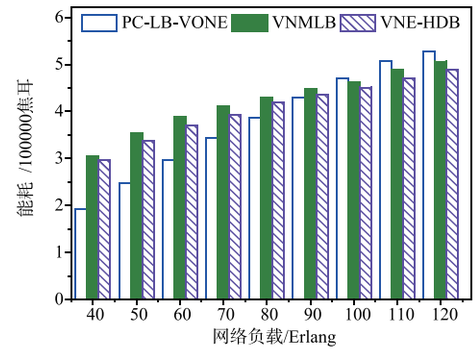

图5 能耗与网络负载关系

图 5 为 3 种算法的虚拟网络业务映射时在弹性光网络中产生的能耗. 由图 6 可知,当网络负载较小时,所提 PC-LB-VONE 方法对于降低网络能耗效果显著,这是因其在排序光节点时考虑了相邻链路的平均长度,避免虚拟链路的映射光路过长;此外,在基于极大团的单路径映射中,将虚拟链路映射的能耗转化为极大团中的节点权重,并选择使团权重值最小的虚拟链路映射方案,进一步降低了网络能耗. 然而,随着网络负载不断增加,尽管基于链路平均负载的多路径映射策略可有效地降低虚拟网络的阻塞率,但同时也加剧了物理光路上通信设备的能源消耗,因此,在网络负载较高时,PC-LB-VONE 方法也呈现出较大的能耗值.

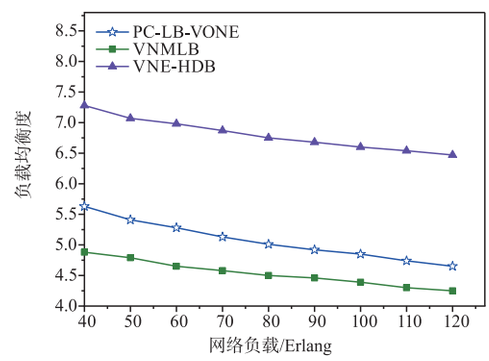

图6 负载均衡度与网络负载关系

图 6 所示为 3 种方法的负载均衡度性能,该值越小则说明物理链路上频谱资源的分配越均衡. 在图 6 中,本文所提 PC-LB-VONE 方法的负载均衡度性能接近于专注负载均衡的虚拟网络映射方法 VNMLB,且始终优于以降低能耗为主的 VNE-HDB 方法,这是由于 PC-LB-VONE 在进行光节点权重排序时考虑了节点计算资源和相邻链路可用带宽资源的差异,避免产生瓶颈节点. 在虚拟链路映射时,PC-LB-VONE 方法将各虚拟链路候

选映射光路上的链路平均负载差值作为分层辅助图中极大团的链路权重,进一步减少了物理链路上频谱资源分配不均的情况,因而它在降低能耗的同时获得较优的负载均衡度性能.

5 总结

本文针对虚拟网络映射到弹性光网络上的能耗和阻塞率问题,提出了一种联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射方法(PC-LB-VONE).该方法在虚拟链路映射阶段采用基于极大团的单路径映射和多路径分割映射方法,以减少虚拟网络请求映射时产生的能耗和阻塞率的同时,均衡了网络负载需.

参考文献

[1] 何利,曹启彦.基于检验点的移动云资源调度策略研究[J].重庆邮电大学学报,2019,31(1):103-112.
HE Li, CAO Qi-yan. Research on mobile cloud resource scheduling strategy based on checkpoint [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019,31(1):103-112. (in Chinese)

[2] 刘焕淋,杜君丹,陈勇,等.光树分割和共享光路合并优化任多播阻塞率[J].电子学报,2018,46(7):1658-1662.
LIU Huan-lin, DU Juan-dan, CHEN Yong, et al. Tree-split and shared lightpath-merged for optimization bandwidth blocking probability of manycast[J]. Acta Electronica Sinica,2018,46(7):1658-1662. (in Chinese)

[3] Liu H L, Du J D, Chen Y, et al. A coordinated virtual optical network embedding algorithm based on resources availability-aware over elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology,2018,45:391-398.

[4] Xu Y, Yan L, Agrell E, et al. Iterative resource allocation algorithm for EONs based on a linearized GN model[J]. Journal of Optical Communications and Networking,2019, 11(3):39-51.

[5] Nonde L, El-Gorashi T E H, Elmirghani J M H. Energy efficient virtual network embedding for cloud networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (9): 1828-1849.

[6] 施颖洁,陈前斌,杨希希,等.基于拍卖的网络切片虚拟资源分配算法研究[J].重庆邮电大学学报,2018,30(2):159-166.
SHI Ying-jie, CHEN Qian-bin, YANG Xi-xi, et al. Virtual resource allocation algorithm of network slice based on auction[J]. 2018,30(2):159-166. (in Chinese)

[7] Gong X X, Guo L, Shen G X, et al. Virtual network embedding for collaborative edge computing in optical-wireless networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35 (18):3980-3990.

[8] Liu H L, Xiong C L, Yong C, et al. An optimization method of VON mapping for energy efficiency and routing in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 41:173-181.

[9] Lin R P, Luo S, Wang H R, et al. Energy-aware virtual network embedding in flexi-grid networks[J]. Optical Express, 2017, 25(24):29699-29713.

[10] Chen B W. Power-aware virtual optical network provisioning in flexible bandwidth optical networks[J]. Photonic Network Communications, 2016, 32(2):1-10.

[11] Zhu M, Gao P, Zhang J, et al. Energyefficient dynamic virtual optical network embedding in sliceable-transponder-equipped EONs[A]. IEEE Global Communications Conference[C]. Singapore, Singapore: IEEE, 2018. 1-6.

[12] 徐展琦,王凯,丁喆,等.一种负载均衡的虚拟网络映射方法[J].西安电子科技大学学报,2017,44(5):7-12.
XU Zhan-qi, WANG Kai, DING Jie, et al. Virtual optical network mapping algorithm with load balancing[J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(5):7-12. (in Chinese)

[13] Lin R P, Luo S, Zhou J W, et al. Virtual network embedding with adaptive modulation in flexi-grid networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17):3551-3563.

[14] Fallahpour A, Beyranvand H, Salehi J. Energy-efficient manycast routing and spectrum assignment in elastic optical networks for cloud computing environment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (19): 4008-4018.

[15] Liu H L, Zhou B T, Chen Y. Spectrum allocation based on spectrum integration and re-routing for elastic optical networks[J]. IET Optoelectronics, 2016, 10(5):179-183.

[16] Vizcaíno J L, Soto P, Ye Y, et al. Differentiated quality of protection: An energy and spectral-efficient resilience scheme for survivable static and dynamic optical transport networks with fixed and flexible-grid[J]. Optical Switching and Networking, 2016, 19:78-19.

[17] Wang H X, Zhao J X, Li H, et al. Opaque virtual network mapping algorithms based on available spectrum adjacency for elastic optical networks[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(4):1-11.

作者简介

刘焕淋　女,1970 年 2 月出生于重庆市.重庆邮电大学教授、博士和硕士生导师.主要研究方向为光通信技术和网络.
E-mail:liuhl@cqupt.edu.cn

胡 浩 男,1995 年 5 月出生于湖北荆州市. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光通信网络.
E-mail:yogaqaq@ foxmail. com.

陈 勇 男,1963 年 7 月出生于重庆市. 重庆邮电大学教授、硕士生导师. 主要研究方向为自动控制和光信号处理.
E-mail:chenyong@ cqupt. edu. cn

杜君丹 女,1993 年 8 月出生于湖北仙桃市. 重庆邮电大学硕士生. 主要研究方向为数据中心光网络及路由算法.
E-mail:dujundan@ sina. com

向 敏 男,1974 年9 月出生于四川省万源市. 重庆邮电大学教授、硕士生导师. 主要研究方向为智能电网、工业互联网研究等.
E-mail:xiangmin@ cqupt. edu. cn