

光路邻居链路频谱碎片感知的虚拟光网络协同映射算法

刘焕淋¹, 邱 艳¹, 陈 勇², 谭明明¹, 陈 想¹, 霍星吉¹, 陈浩楠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: 为了解决虚拟网络映射光路太长和频谱碎片化的问题, 论文提出一种基于邻居链路碎片感知的虚拟网络映射算法(Virtual Optical Network Embedding based on Adjacency Link Fragmentation Awareness, ALFA-VONE). 设计考虑虚拟节点资源需求和邻居节点映射状态的权值计算方法, 提高虚拟节点映射的成功率; 使用相邻虚拟节点-虚拟链路协同映射方法, 缩短映射光路长度和减少所需频段数目; 设计光路可用资源评估方法, 以提高虚拟链路映射成功率; 考虑拟分配频谱块对光路以及邻居链路造成的频谱碎片影响, 设计频谱碎片影响值评估法, 以提高频谱资源利用率. 仿真结果表明: 当网络负载为 130 Erlang 时, 所设计算法的平均映射光路跳数减少 28.4%, 带宽利用率提高 4.56%.

关键词: 弹性光网络; 虚拟网络映射; 邻居链路; 资源评估; 频谱利用率

基金项目: 国家自然科学基金(No.51977021, No.61275077); 重庆市自然科学基金(No.cstc2020jcyj-msxm1012, No.cstc2019jcyj-msxm1168)

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)07-1758-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220903

Virtual Optical Network Embedding Algorithm Based on Lightpath's Adjacency Link Fragmentation Awareness

LIU Huan-lin¹, QIU Yan¹, CHEN Yong², TAN Ming-ming¹, CHEN Xiang¹, HUO Xing-ji¹, CHEN Hao-nan²

(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: To address the difficulties of excessively long lightpath and spectrum fragmentation in virtual optical network embedding, a virtual optical network embedding based on adjacency link fragmentation awareness (ALFA-VONE) algorithm is proposed. In ALFA-VONE, considering the resource requirements of virtual nodes and the mapping status of neighbor nodes, a weight calculation method is designed to improve the success probability of virtual node embedding. And the cooperative embedding method of adjacent virtual nodes-virtual link is used to shorten the length of lightpath and reduce the number of required spectrum slots. An available resources evaluation of the lightpath is designed to improve the link embedding success probability. By considering the spectrum blocks' impact of spectrum fragments on the lightpath and adjacent links, the evaluation method of spectrum fragment impact value is designed to improve the utilization of spectrum resources. When the network load is 130 Erlang, the simulation results show that the proposed ALFA-VONE algorithm can reduce the average number of mapped lightpath hops by 28.4% and improve bandwidth utilization by 4.56%.

Key words: elastic optical networks; virtual network embedding; adjacency link; resources evaluation; spectrum utilization

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.51977021, No.61275077); Science Foundation Project of Chongqing Science and Technology Commission (No.CSTC2020 jcyj-msxmX0682)

1 引言

随着虚拟现实、在线游戏和自动驾驶的飞速发展,这些新兴的网络应用推动了通信网络的创新和升级演变^[1,2].为了适应网络中新业务的多样性需求,迫切需要物理网络基础设施能够提供不同带宽的服务能力支持,这对核心网的传输容量和适应可变带宽业务的支持能力提出严峻挑战^[3,4].基于正交频分复用技术的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)以巨大的带宽资源、灵活的带宽粒度和调制方式满足多样性的业务需求,成为极具潜力的核心网络基础设施技术^[5].

为了克服由多个网络运营商共同构建的网络基础设施协议和接口僵化问题,网络虚拟化技术被提出^[6].借助网络虚拟化,由基础设施提供商运营的主干网可以协同支持虚拟网络(Virtual Optical Network, VON)服务,提高网络资源的利用率.然而,在弹性光网络中,虚拟光网络映射(Virtual Optical Network Embedding, VONE)是虚拟请求在EONs中的路由和资源分配过程^[7].

为了提高虚拟网络在EONs中映射的频谱利用率,文献[8]借助分层辅助图实现业务的路由和频谱分配,并在分层辅助图中实现节点和链路协同映射.针对文献[8]算法存在的频谱碎片问题,文献[9]首先为静态虚拟网络请求建立了虚拟网络映射的ILP(Integer Linear Programming)模型;然后,针对动态场景,设计了基于虚拟辅助图的启发式算法;在频谱资源分配时,设计了分别考虑频谱资源均衡、频谱资源均衡和节点资源均衡、频谱资源均衡和碎片整理的三种资源分配方案;其中,频谱资源均衡和碎片整理(Spectrum Resource Traffic Balancing and DeFragmentation, SRTB&DF)的VONE性能是最好的.

进一步地,为降低虚拟网映射的频谱碎片化,多种碎片整理方案被提了出来,他们的主要思想是:将碎片化的频谱资源重新整理成可用的频谱资源,提高频谱利用率,改善了EONs频谱碎片化情况^[10-13].文献[13]提出了1+1光路配置算法,既考虑了频谱碎片评估,又采用了光路分割,通过控制每条光路中的频谱碎片程度降低业务带宽阻塞率.文献[14]提出了基于动态碎片感知的虚拟光网络映射(Dynamic Fragments Awareness based Virtual Network Mapping, DFA-VNM)算法,DFA-VNM采用节点链路2阶段映射方法,首先将虚拟节点映射至物理节点碎片率较小的物理节点,然后,将虚拟链路映射到光路碎片度最小的候选最短光路上.文献[15]设计了时间-空间紧密度的空分复用弹性光网络的频谱碎片评估方法,并提出具有串扰感知的预留业务重配置路由算法.

综上所述,现有的虚拟网络映射策略大多都忽略

了虚拟网络映射时对邻居链路造成的频谱碎片影响,故本文设计了一种光路邻居链路频谱碎片感知的虚拟光网络协同映射(Virtual Optical Network Embedding based on Adjacency Link Fragmentation Awareness, ALFA-VONE)算法,其主要贡献:(1)分别设计了考虑节点资源、网络拓扑和邻居节点映射状态的虚拟节点和物理节点的权值计算方法,以提高虚拟节点映射成功概率,并设计相邻虚拟节点与虚拟链路的协同映射方法,减少虚拟链路映射的光路跳数;(2)根据光路的频谱集中度,设计了光路可用资源评估方法;(3)考虑虚拟分配频谱块对所选物理光路以及邻居链路造成的频谱碎片影响,设计了光路的频谱碎片影响值评估方法,以提高频谱资源利用率.

2 虚拟网络映射

将物理网络EONs抽象为一个加权无向图 $G^s(N^s, E^s)$,其中, N^s 表示EONs的物理节点集合, E^s 表示光纤链路集合,物理节点 n^s 的可用计算资源用 C_n^s 表示, $n^s \in N^s$,光纤链路 l 可用频隙资源用 B_l^s 表示, $l \in E^s$, B_l^s 的单位是频隙.类似地,虚拟网络请求用加权无向图 $G^v(N^v, E^v)$ 表示, N^v 为虚拟节点集, E^v 为虚拟链路集,虚拟节点 $n^v \in N^v$ 的计算资源需求值用 C_n^v 表示,每条虚拟链路 $e^v \in E^v$ 的带宽资源需求为 B_e^v 频隙.

VON映射到EONs中,包括虚拟节点映射和虚拟链路映射,其中,虚拟节点 v 映射到EONs中某个物理节点 s 上,需满足的约束条件为

$$\sum_{s \in N^s} g_s^v \leq 1 \quad (1)$$

$$\sum_{v \in N^v} g_s^v \leq 1, \forall s \in N^s \quad (2)$$

$$\sum_{s \in N^s} g_s^v \times C_n^s \geq C_n^v, \forall v \in N^v \quad (3)$$

在式(1)~(3)中, g_s^v 是布尔变量,若虚拟节点 v 映射至物理节点 s 上, $g_s^v=1$,否则, $g_s^v=0$;式(1)、式(2)表明一个虚拟节点只能映射在一个物理节点上,而一个物理节点也只能接受给定虚拟网络的一个虚拟节点映射;式(3)表明被映射的物理节点的可用计算资源必须大于等于拟映射虚拟节点的计算资源需求.

VON的虚拟链路 e 映射到EONs中某条物理光路 p 上,需满足的约束条件为

$$f_e^p - f_s^p + 1 \geq B_e^v \quad (4)$$

$$P_{l_1}^k = P_{l_2}^k = 1, \forall l_1, l_2 \in p, k \in [f_s^p, f_e^p] \quad (5)$$

$$\prod_{k=f_s^p}^{f_e^p} p_{l_1}^k = 1, \forall l \in p \quad (6)$$

$$p_{1,l}^k \times p_{2,l}^k = 0, \forall l \in p_1, l \in p_2 \quad (7)$$

其中, f_s^p 和 f_e^p 分别表示在物理光路 p 上虚拟链路占用频

谱块的起、止频隙索引值;若物理光路 p 上链路 l 的第 k 频隙可用, $p_l^k=1$;否则, $p_l^k=0$; $p_{1,l}^k$ 和 $p_{2,l}^k$ 分别表示物理光路 p_1 、 p_2 的链路 l 的第 k 频隙占用状态,若被占用,取值为1;式(4)表明映射物理光路上的可用频谱块必须满足虚拟链路的带宽资源需求;式(5)~(7)限制虚拟链路映射光路的频谱块须遵循频谱一致性、连续性与不重叠的约束条件。

本文研究满足上述虚拟网络映射约束条件的最大化EONs频谱利用率和最小化频谱碎片问题,该问题被文献[13]证明是一个NP(Non-deterministic Polynomial-time)难问题,存在ILP模型构造、求解复杂度过高等问题^[9, 14]。故而,本文提出一种基于光路邻居链路碎片感知的虚拟网络协同映射算法。

3 光路邻居链路频谱碎片感知的虚拟网络协同映射算法

在ALFA-VONE中,根据虚拟节点需求的计算资源数、度数及与已映射虚拟节点关系,设计虚拟节点的权值公式;为避免相邻虚拟节点映射到相距较远的物理节点上,根据物理节点的可用计算资源数目、连通度和与已映射物理节点关系,设计物理节点的权值公式,将权值最大的虚拟节点映射到权值最大的物理节点上;设计光路可用资源评估值计算式,采用虚拟节点和虚拟链路协同映射的方法,将已映射虚拟节点关联的虚拟链路映射到光路可用资源评估值高的物理光路上;在物理光路上为虚拟链路分配碎片评估值最小的可用频谱块,以减少EONs的频谱碎片率和提高光路的频谱利用率。

3.1 虚拟节点的权值

本文设计的虚拟节点排序方法既考虑虚拟节点资源需求和在VON中邻居关系,也考虑拟映射虚拟节点与已映射的邻居虚拟节点关系,则虚拟节点 v 的权值 $R(v)$ 的计算方法为

$$R(v) = C_n^v \times \sum_{l \in N_e(v)} B_l^v \times (1 + |A_d(v)|) \times D^v \quad (8)$$

在式(8)中, $N_e(v)$ 为虚拟节点 v 邻居虚拟链路集, $|A_d(v)|$ 为与虚拟节点 v 相邻的已映射虚拟节点的数目, D^v 为虚拟节点 v 在VON拓扑中的节点度数。虚拟节点权重值越大,代表该虚拟节点需求资源数目、在虚拟网络中连接的虚拟链路数和与邻居已映射虚拟节点数越多,其映射的优先级越高。

3.2 物理节点排序权值

本文设计的物理节点 s 的权值 $R(s)$ 的计算方法如下:

$$R(s) = C_n^s \times \sum_{l \in N_e(s)} B_l^s \times D_n^s + R(s, s') \quad (9)$$

$$R(s, s') = \frac{1}{|S_{a(v)}^s|} \times \sum_{s' \in S_{a(v)}^s} \frac{F_{s'}^{s'}}{h_s^{s'} + 1} \quad (10)$$

在式(9)中, $N_e(s)$ 为物理节点 s 邻居链路集合, D_n^s 为物理节点 s 在EONs拓扑中的节点度数, $R(s, s')$ 为拟映射物理节点 s 与已映射物理节点 s' 的光路可用资源权值。在式(10)中, $S_{a(v)}^s$ 为物理节点 s 的邻居已映射物理节点的集合, $F_{s'}^{s'}$ 为物理节点 s 和已映射物理节点 s' 之间最短光路上可用频隙数, $h_s^{s'}$ 代表物理节点 s 和 s' 的最短光路的跳数。

在虚拟节点映射中,将VON权值最大的虚拟节点映射到EONs中权值最大的物理节点上;VON其他虚拟节点的映射过程由下面描述的虚拟链路的映射过程实现协同的虚拟节点映射。

3.3 光路的可用资源评估

在光路可用资源评估值的设计中,不仅考虑备选光路上可用频谱资源值,还考虑了可用频谱资源的集中度。因此,本文设计光路 p 的可用资源评估值 $S_R(p)$ 的计算式如下:

$$S_R(p) = \frac{F'}{h_p} \times \frac{1}{B_p} \sum_{i=1}^N f_{p,i+1} \times f_{p,i} \quad (11)$$

在式(11)中, F' 为光路 p 上各链路满足频谱一致性的可用频隙总数, h_p 为光路 p 的跳数, N 为每条光纤链路的总频隙数, B_p 为光路 p 上可用频谱块数目, $f_{p,i}$ 为光路 p 的第 i 频隙状态,如果第 i 个频隙被VON占用,则 $f_{p,i}=0$,否则, $f_{p,i}=1$ 。 $S_R(p)$ 值越大,表示光路 p 的可用频谱块资源越丰富且碎片化程度小。

如图1所示,设虚拟节点 a, b 分别已经映射到EONs的物理节点 C, B 上,虚拟链路 $a-b$ 的带宽需求为3频隙,则虚拟链路 $a-b$ 的映射就是在物理节点 C, B 间找到可用资源评估值最大的光路。首先,通过使用K算法找到3条备选光路,分别为 $p_1: C-B; p_2: C-A-B; p_3: C-D-B$ 。由图1所示各链路的频隙占用状态,备选光路 p_1 的可用频谱块为[1-3]频隙和[8-11]频隙,备选光路 p_2 的可用频谱块为[1-2]频隙和[8-9]频隙,备选光路 p_3 的可用频谱块为[1-3]频隙和[6-10]频隙;根据式(11),分别计算上述3条备选光路的可用资源评估值,分别为: $S_R(p_1) = 5/2 \times 7/1 = 17.5$, $S_R(p_2) = 2/2 \times 4/2 = 2$, $S_R(p_3) = 6/2 \times 8/2 = 12$;通过比较,备选光路 p_1 的可用资源评估值最大,则将虚拟链路 $a-b$ 映射到备选光路 p_1 上。

3.4 频谱分配策略

本文设计的频谱碎片影响值包括:拟分配频谱块对传输光路的频谱碎片值和邻居链路的频谱碎片值。

$$FR^j = FR_c^j + \sum_{i=1}^j \sum_{x=1}^{p_i} FR_a^{i,j,x} \quad (12)$$

在式(12)中, FR^j 为光路 p 上使用第 j 个频谱块分配

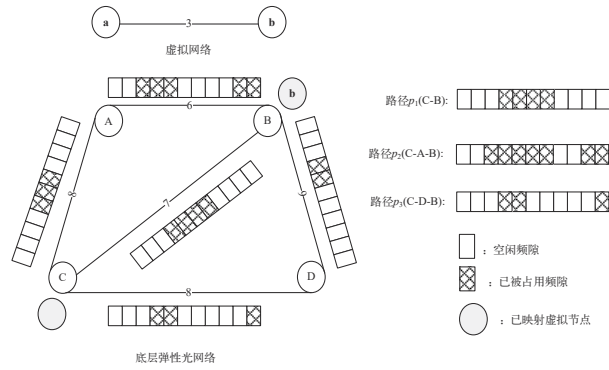


图1 光路的可用资源评估示意图

后产生的频谱碎片影响值, l 为光路 p 的光纤链路数目, ρ_i 表示与光路 p 的第 i 条光纤链路相邻的光纤链路数目, FR_c^j 表示频谱块 j 对光路 p 产生的频谱碎片值,

$FR_a^{i,j,\chi}$ 表示频谱块 j 对光路 p 的第 i 条光纤链路的邻居链路 χ 产生的频谱碎片值.

$$FR_c^j = \frac{B_p}{\sum_{i=1}^N f_{p,i} \times f_{p,i+1} + 1} \quad (13)$$

$$FR_a^{i,j,\chi} = \frac{1}{\rho_i} \times \frac{F_u^{i,j,\chi}}{F_{i,\chi}} \times \frac{B_{i,\chi}}{\sum_{i=1}^N f_{p,i} \times f_{p,i+1} + 1} \quad (14)$$

在式(14)中, $F_u^{i,j,\chi}$ 表示若在光路上分配频谱块 j , 在链路 i 的邻居链路 χ 上与该频谱块相同频隙索引值的不可用频隙的数目, $F_{i,\chi}$ 表示链路 i 与邻居链路 χ 满足频谱一致性的空闲频隙数目, $B_{i,\chi}$ 为链路 i 与邻居链路 χ 满足频谱一致性的空闲可用频谱块数目.

3.5 ALFA-VONE 算法步骤

ALFA-VONE 算法具体步骤如算法 1 所示.

算法 1 ALFA-VONE:光路邻居链路频谱碎片感知的虚拟光网络协同映射

输入:虚拟网络 G^v ,弹性光网络 G^e ;

输出:虚拟光网络映射光路和频谱块分配结果;

步骤 1:由式(8),计算 G^v 中没有映射的所有虚拟节点映射权值 $R(v)$,并降序保存在集合 $V_R = \{v_1, v_2, \dots\}$ 中,将 V_R 中权值最大虚拟节点标记为 v_i ;

步骤 2:由式(9),计算 G^e 中未被 G^v 映射的所有物理节点权值 $R(s)$,并降序保存在集合 $S_R = \{s_1, s_2, \dots\}$ 中,将 S_R 中权值最大物理节点标记为 s_j ;

步骤 3:若物理节点 s_j 的可用资源不满足虚拟节点 v_i 需求,则映射失败,转至步骤 9;否则,若虚拟节点 v_i 映射到物理节点 s_j 不满足虚拟节点映射约束条件式(1)-(3),从 S_R 集合中删除 s_j ,转至步骤 2;若满足,则将虚拟节点 v_i 映射至物理节点 s_j ,并将 v_i 和 s_j 的映射状态更新为已映射状态,分别从 V_R 和 S_R 集合中删除该节点,转至步骤 4;

步骤 4:在 G^e 中,寻找与已映射虚拟节点邻居并且还未映射的虚拟链路,并按虚拟链路带宽资源需求非升序排列,判断具有最大带宽需求的虚拟链路对应的两端虚拟节点是否已经映射,若虚拟链路 2 端点都映射,则转至步骤 5;否则,将未映射的虚拟节点标记为 v_i ,并转至步骤 2;

步骤 5:在 G^e 中,在虚拟链路两个端点已映射的 2 个物理节点对之间,采用最短跳路径算法寻找 K 条备选光路,根据式(11),分别计算 K 条备选光路的 $SR(p)$ 值,选择 $SR(p)$ 值最大的备选光路作为虚拟链路的映射光路 p ;

步骤 6:在映射光路 p 上,找出所有满足虚拟链路带宽需求的可用频谱块和光路 p 的所有邻居光纤链路,根据式(12)-(14),计算每个可用频谱块的频谱碎片值,选择频谱碎片影响值最小的频谱块,若频谱分配成功,标记虚拟链路为已映射状态,并转至步骤 7,否则,阻塞 G^e ,转至步骤 9;

步骤 7:判断与 v_i 邻居的所有虚拟链路的映射状态是否都为已映射,若是,转至步骤 8,否则,转至步骤 4;

步骤 8:判断所有虚拟节点和虚拟链路的映射状态是否都为已映射状态,若是,转至步骤 9,否则,转至步骤 1;

步骤 9:返回 G^e 映射结果,算法结束.

4 仿真分析

为了验证 ALFA-VONE 算法的有效性和普适性,分别在包含 14 个节点和 23 条链路的 DT(Deutsche Telecom)拓扑、24 个节点和 43 条链路 USNET(United States NETwork)拓扑中进行性能仿真验证,每条光纤链路提供 320 Fs,每个节点提供 400 units 资源. VON 的虚拟节点数为 3~5 个,虚拟节点之有虚拟链路连通概率为 0.5,每虚拟节点需求资源随机分布在 1~10 units 间,每虚拟链路带宽随机分布为 1~10 FSs 间, VON 到达率服从参数为 λ 的泊松分布, VON 持续时间服从参数为 μ 的负指数分布,虚拟链路映射备选光路数目 $K=3$. 本文选择参考文献[14]提出的基于动态碎片感知的虚拟网络映射算法(DFA-VNM)以及参考文献[9]提出的频谱资源均

衡和碎片整理的虚拟网络映射算法(SRTB&DF)作为对比算法.

图 2 为三种算法在不同业务负载下的平均映射跳数,即虚拟链路映射光路的平均跳数. 可以发现:随着网络负载的增加,三种算法的平均映射跳数均呈现增加的趋势. 在相同负载下,ALFA-VONE 算在在两种网络拓扑中的平均映射跳数都最少,当网络负载为 130 Erlang 时,在图 2(a)中, SRTB&DF 的平均光路跳数比 ALFA-VONE 多 28.4%, DFA-VNM 的平均光路跳数比 ALFA-VONE 多 35.6%. 这是因为:论文所提 ALFA-VONE 算法不仅使用节点-链路协同映射的方式,还考虑了相邻两个虚拟节点的映射资源状态的虚拟节点排序规则,可以缩短相邻两个虚拟节点间的映射光路的跳数;此外,ALFA-VONE 在虚拟链路映射时,从候选的

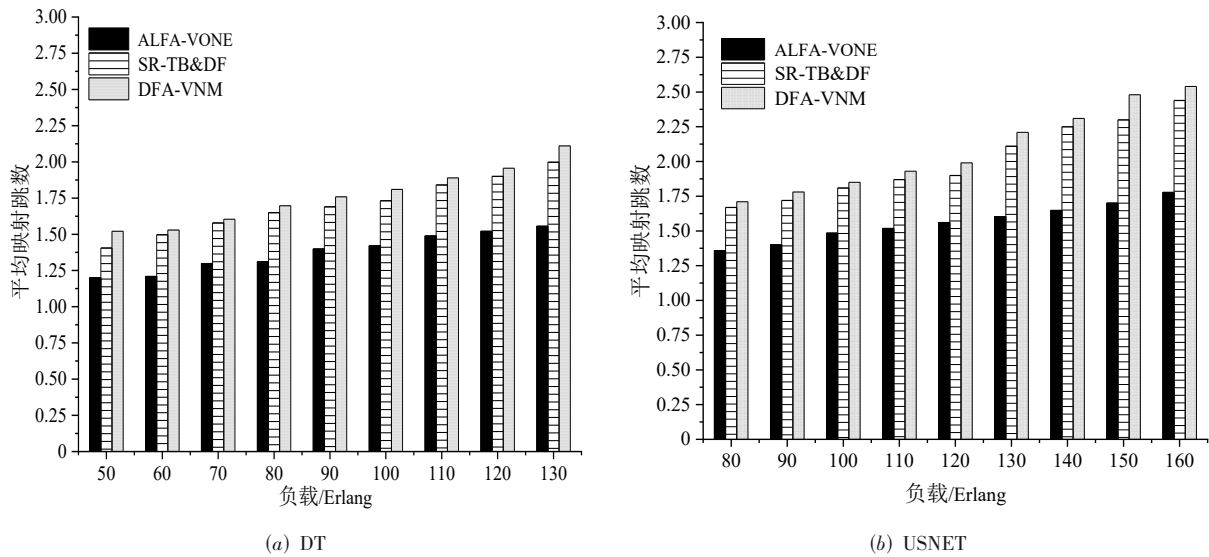


图2 不同业务负载下平均映射跳数的对比

最短 K 条备选光路中选择可用资源评估值最大的光路映射,在增加了虚拟链路映射成功概率的同时,进一步减少了映射光路的跳数. 而对比的 SR-TB&DF、DFA-VNM 算法在映射虚拟网络时重点考虑了光路上频谱碎片的情况,忽略了相邻虚拟节点映射状态对当前虚拟节点映射的影响,所以,其映射光路的跳数比本文所提

的 ALFA-VONE 算法多;由于 DFA-VNM 使用虚拟节点和虚拟链路独立的两阶段映射,忽略了虚拟节点映射对虚拟链路映射的影响,而 SR-TB&DF 使用虚拟辅助图进行虚拟网络映射,考虑了节点映射和链路映射的协同性,所以 SR-TB&DF 算法的平均映射跳数比 DFA-VNM 少一些.

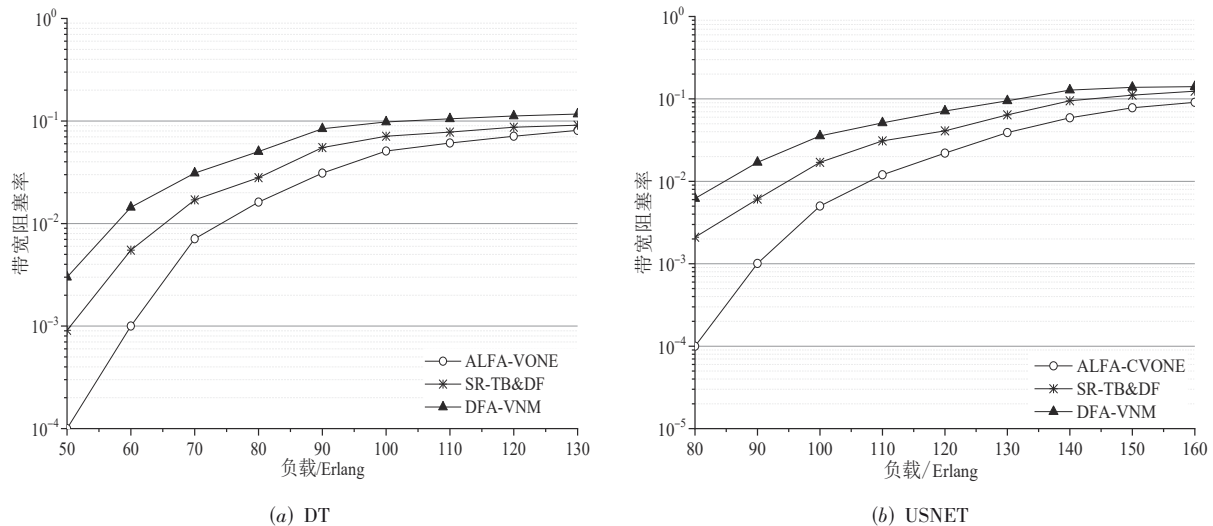


图3 不同业务负载下虚拟网络请求接受率的对比

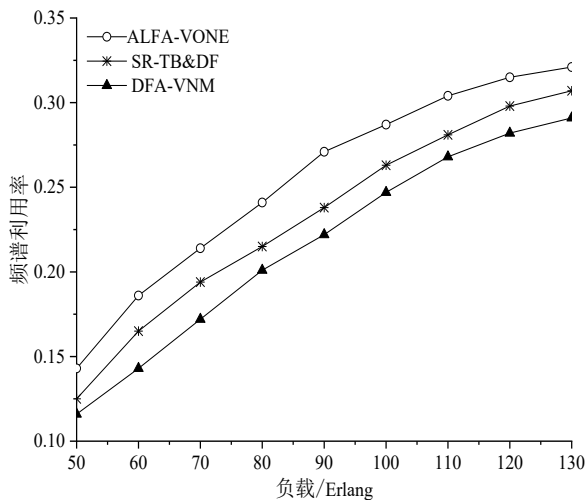
图3为在不同的业务负载下三种算法的带宽阻塞率性能. 由图3可知,所有算法的带宽阻塞率都随着业务负载的增加而逐渐升高,当网络负载为130 Erlang时,在图3(a)中,SR-TB&DF的带宽阻塞率比ALFA-VONE的带宽阻塞率高12.3%,DFA-VNM的带宽阻塞率比ALFA-VONE的带宽阻塞率高44.4%. 这是由于随

着业务负载的增加,EONs网络中剩余的可用资源减少,导致虚拟网络映射时的频谱块分配失败的概率增加. 在图3(a)和(b)中,本文提出的ALFA-VONE算法相较于对比SR-TB&DF和DFA-VNM算法的带宽阻塞率更低,这是因为ALFA-VONE算法在设计虚拟节点排序权值时,考虑了拟映射虚拟节点与已映射虚拟节点

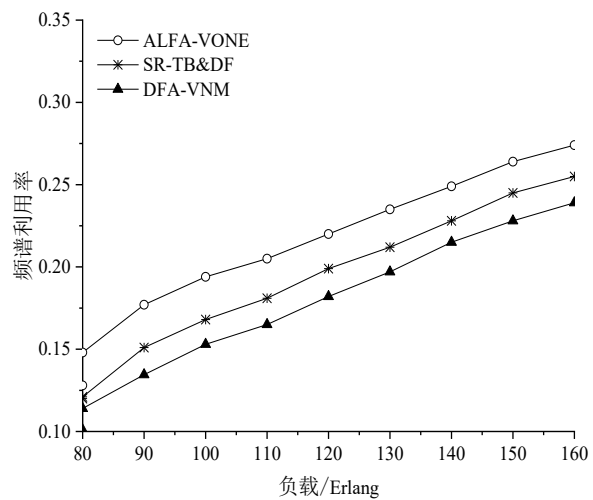
之间的邻居关系,在设计物理节点权值时,还考虑了已映射物理节点和拟映射物理节点间的频谱集中度以光路的邻居链路资源情况,增加了虚拟链路映射的频谱分配成功概率,并进一步降低了虚拟链路映射光路的跳数,节约了虚拟链路占用的频谱块数目;同时,本文提出的 ALFA-VONE 算法在频谱分配时考虑了拟分配频谱块对传输光路以及邻居链路产生的频谱碎片影响值,降低了频谱碎片率,有利于提高后续虚拟网络映射成功的概率。

图 4 为三种算法在不同业务负载下的频谱资源利用率性能。论文提出的 ALFA-VONE 算法在两种网络拓扑中都获得最高的频谱资源利用率,当网络负载为 130 Erlang 时,在图 4(a)中,ALFA-VONE 的带宽利用率比

SRTB&DF 的带宽利用率高 4.56%,ALFA-VONE 的带宽利用率比 DFA-VNM 的带宽利用率高 10.3%。原因是:ALFA-VONE 算法考虑光路可用资源频谱和频谱碎片影响值,能将邻近的虚拟节点映射到具有较少跳数且频谱资源丰富的光路上,并减少虚拟链路映射对邻居光纤链路的频谱碎片化影响,从而减少了频谱资源的浪费,使 EONs 能承载更多的虚拟链路需求;同时,在光路选择时,ALFA-VONE 算法选择光路可用资源评估值最大的备选光路,保证光路距离较短的同时光路的频谱碎片也较少;最后,在频谱分配时,ALFA-VONE 算法不仅考虑了拟分配频谱块对传输光路产生的频谱碎片影响,还考虑到了拟分配频谱块对邻居光纤链路的碎片影响,使 EONs 的频谱碎片减少和频谱利用率提高。



(a) DT



(b) USNET

图 4 不同业务负载下频谱利用率的对比

5 总结

本文设计了一种基于光路可用资源和光路与邻居链路频谱碎片影响值的虚拟光网络映射算法,通过设计虚拟节点排序映射规则和虚拟节点和虚拟链路协同映射的方法,将虚拟链路映射到物理节点邻近、光路可用频谱资源丰富和频谱碎片影响值较小的物理光路上,减少了虚拟网络映射占用的频谱资源和提高了频谱利用率。随着大量虚拟网络应用的发展,本文所提的虚拟网络映射方法节约了光网络频谱资源,使弹性光网络能服务更多的虚拟网络,有利于提高弹性光网络的频谱资源利用率和促进虚拟网业务的发展。

参考文献

[1] 柴蓉,邹飞,刘莎,等. 6G 移动通信: 愿景、关键技术和系统架构[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33

(3): 337-347.

CHAI R, ZOU F, LIU S, et al. 6G mobile communication: Vision, key technologies and system architecture[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(3): 337-347. (in Chinese)

[2] LIU S Q, KONG J W, PAN X Q, et al. Highly-efficient and automatic spectrum inspection based on AutoEncoder and semi-supervised learning for anomaly detection in EONs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(5): 1243-1254.

[3] YANG H, ZHAN K X, BAO B W, et al. Automatic guarantee scheme for intent-driven network slicing and reconfiguration[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 190: 103163.

[4] CHEN X, LI J H, GUO B L, et al. All-optical OXC transi-

- tion strategy from WDM optical network to elastic optical network[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4076-4087.
- [5] 付亚伟. 大数据互联网时代光纤通信技术的发展与挑战[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2021, 33(1): 52-58.
FU Y W. Development and challenge of optical fiber communication technology in the era of big data Internet[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2021, 33(1): 52-58. (in Chinese)
- [6] BELBEKKOUCHE A, HASAN M M, KARMOUCH A. Resource discovery and allocation in network virtualization [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14 (4): 1114-1128.
- [7] WEI W T, GU H X, PATTAVINA A, et al. Optimizing energy and spectrum efficiency of virtual optical network embedding in elastic optical networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2020, 37(5): 1-10.
- [8] GONG L, ZHU Z Q. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(3): 450-460.
- [9] ZHU M, ZHANG S Y, SUN Q, et al. Fragmentation-aware VONE in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(9): 809-822.
- [10] CHATTERJEE B C, BA S, OKI E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 183-210.
- [11] 刘焕淋,王展鹏,陈勇,等. 物理损伤感知的多芯光纤网络动态路由资源分配方法[J]. *电子学报*, 2022, 50(2): 502-507.
LIU H L, WANG Z P, CHEN Y, et al. Physical impairment aware-based dynamic routing resource allocation method for multi-core fiber network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(2): 502-507. (in Chinese)
- [12] 张盛峰,陈会丹,彭樱. SDM-EON中基于串扰避免的多纤芯分配算法[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2023, 35(1): 23-30.
ZHANG S F, CHEN H D, PENG Y. Multi-core assignment algorithm based on crosstalk-avoiding in space division multiplexing elastic optical networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2023, 35(1): 23-30. (in Chinese)
- [13] CHATTERJEE B C, OKI E. Defragmentation based on route partitioning in 1 + 1 protected elastic optical networks[J]. *Computer Networks*, 2020, 177: 107317.
- [14] BAI H F, CHEN W B, LIU L, et al. Dynamic fragments awareness based virtual network mapping strategy of elastic optical networks[J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17 (7): 427-431.
- [15] ZHU R J, LI S H, WANG P S, et al. Time and spectrum fragmentation-aware virtual optical network embedding in elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102117.

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、博士生导师.主要研究方向为光通信技术和网络.

E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn



邱艳 女,1998年10月出生于四川省仪陇县.重庆邮电大学硕士研究生.主要研究方向为光网络调度算法.

E-mail: 2311925484@qq.com