

弹性光网络中碎片感知的虚拟网络协同映射算法

胡星宇^{1,2}, 任丹萍^{1,2*}, 邓玉静¹, 胡劲华^{1,2}, 赵继军^{1,2}

(1. 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 河北工程大学 河北省安防信息感知与处理重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要:为解决虚拟光网络映射中的路径过长和频谱资源浪费问题,提出了碎片感知的虚拟光网络协同映射(FA-VONE)算法。该算法通过节点排序策略提高虚拟节点映射成功率,并采用节点与链路协同映射方式减少光路跳数和频谱消耗。在链路映射阶段,利用光路资源评估策略提升虚拟链路映射成功率;在频谱分配阶段,设计频谱碎片度量指标优化频谱利用率。仿真结果表明,在 NSFNET 和 Indian Network 拓扑中,FA-VONE 在虚拟请求接受率、频谱利用率及底层网络收益方面均表现出色。

关键词:弹性光网络;协同映射;资源评估;碎片度量

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)03-0083-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Virtual network collaborative embedding algorithm based on fragmentation awareness in elastic optical network

HU Xingyu^{1,2}, REN Danping^{1,2*}, DENG Yujing¹, HU Jinhua^{1,2}, ZHAO Jijun^{1,2}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China; 2. Hebei Key Laboratory of Security and Protection Information Sensing and Processing, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China)

Abstract: To address the issues of excessive path lengths and spectrum resource wastage in virtual optical network embedding (VONE), a fragmentation-aware virtual optical network cooperative embedding (FA-VONE) algorithm is proposed. This algorithm enhances the success rate of virtual node embedding through a node ranking strategy and adopts a cooperative node and link embedding approach to reduce optical path hops and spectrum consumption. During the link embedding phase, an optical path resource evaluation strategy is employed to improve the success rate of virtual link embedding. In the spectrum allocation phase, a spectrum fragmentation metric is designed to optimize spectrum utilization. Simulation results on NSFNET and Indian Network topologies demonstrate that FA-VONE excels in virtual request acceptance rate, spectrum utilization, and substrate network revenue.

Key words: elastic optical network, collaborative embedding, resource assessment, fragmentation metric

0 引言

随着虚拟现实、自动驾驶和 ChatGPT 等新兴业务

的快速发展,网络流量急剧增加,这对光网络资源管理提出了严峻挑战^[1]。弹性光网络(EON)凭借其正交频分复用技术和自适应调制格式的优势,能够实现频谱资源的灵活分配^[2]。然而,由于通信协议和接口不统一的问题,导致资源协同管理面临困难^[3]。将 EON 与网络虚拟化技术相结合,不仅可以有效解决传统网络架构的刚性约束问题,还能显著提升频谱资源利用效率。在虚拟网络映射过程中,需要严格满足频谱连续性、一致性及无冲突性等约束条件^[4]。此外,业务请求的动态变化会导致频谱碎片化问题,严重时可能引发业务阻塞现象。因此,开展虚拟光网络中碎片感知机制的研究,对提升网络整体性能具有重要的理论和实

收稿日期: 2024-05-10。

基金项目: 河北省自然科学基金项目(F2022402007)资助;河北省省级科技计划(22567624H)资助;河北省研究生示范课建设项目(KCJSX-2024081)资助。

作者简介: 胡星宇(2000—),男,硕士研究生,现就读于河北工程大学信息与电气工程学院通信工程专业,研究方向为光纤通信与宽带通信网,主要从事光网络虚拟化中的资源分配研究,聚焦路由与资源分配算法的优化及其仿真验证。在读期间多次获得研究生奖学金。

***通信作者:** 任丹萍(1984—),女,博士,副教授,主要研究方向为光网络与宽带接入。



践意义。

文献[5]提出了一种动态碎片感知的虚拟网络映射策略(DFA-VNM)。该策略采用两阶段优化方法:在节点映射阶段,基于相对碎片率最小化准则选择物理节点;在链路映射阶段,同样依据相对碎片率最优原则确定物理路径。这种双重优化机制能有效降低频谱碎片化程度,提升资源利用效率。文献[6]提出了一种时变流量的虚拟光网络映射(TVT-VONE)算法,旨在解决由于资源分配与实际需求不匹配所导致高带宽阻塞率和低频谱利用率问题。文献[7]提出了一种最短光路映射策略(LCLC),该策略优先将计算资源需求最大的虚拟节点映射到可用资源最丰富的物理节点上。上述文献均采用了两阶段映射方法,但这种方法往往忽略了相邻虚拟节点之间的关联性,可能导致相邻的虚拟节点被映射至底层网络中距离较远的物理节点上,造成频谱资源浪费。为提高频谱资源的利用率,文献[8]提出一种碎片感知的路由和频谱分配策略并设计了一个二维碎片度量指标,将碎片度量最小的频谱块分配给业务,改善了EON的碎片情况。文献[9]提出了1+1光路配置方法,不仅考虑了频谱碎片的度量,同时引入光路分割技术,通过减少每条光路的碎片来降低业务阻塞。文献[10]提出资源碎片度(RFD)指标,用于评估物理节点和物理链路上的资源碎片化状况。然而,上述文献在虚拟网络映射过程中仅针对链路的频谱碎片问题进行了研究,未能从多维角度综合考量网络资源碎片化问题。

为解决虚拟节点与虚拟链路关联性不强的问题,本文从多角度综合考虑,采用节点-链路协同映射策略,提出碎片感知的虚拟光网络协同映射(FA-VONE)算法。

1 EON下的虚拟网络映射模型

1.1 网络模型

把EON作为底层网络,并将其抽象建模为无向图 $G^s(C_n^s, B_l^s)$ 。其中, C_n^s 表示一个物理节点的剩余计算资源; B_l^s 表示一条物理链路的剩余带宽资源。同样地,将虚拟网络抽象建模为无向图 $G^v(C_n^v, B_l^v)$ 。其中, C_n^v 表示一个虚拟节点的计算需求; B_l^v 表示一条虚拟链路的带宽需求^[11]。

1.2 约束条件

当虚拟网络映射至底层网络时,虚拟节点和虚拟链路都需满足相应的约束条件。当虚拟节点 v 映射到

物理节点 s 时,其限制条件如式(1)~式(3)所示。

$$\sum_{s \in N^s} a_s^v = 1 \quad \forall v \in N^v \quad (1)$$

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

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

其中, a_s^v 是一个二进制值,当虚拟节点映射成功时, a_s^v 为1;否则, a_s^v 为0; N^v 表示虚拟网络中节点的集合, N^s 表示底层网络节点的集合。式(1)和式(2)表明一个虚拟节点只能映射到一个物理节点上。式(3)表明物理节点的可用资源至少要满足虚拟节点请求资源。

虚拟链路映射的约束条件为

$$f^e - f^s + 1 \geq B_l^v \quad (4)$$

其中, f^s 、 f^e 分别表示预分配频谱块的开始、结束频隙索引值。式(4)说明物理光路上的频谱资源一定要大于或等于虚拟链路请求的带宽资源。

1.3 资源需求

在底层网络的每条光纤链路上,频谱资源被划分为多个频隙槽 C_{slot} ,每个频隙的容量为12.5 GHz。假设一个虚拟业务的传输速率为 C ,本文采用距离自适应技术来选择调制等级 M ,根据式(5)来计算虚拟业务请求的频隙槽^[12]。不同调制格式下对应的调制等级和最大传输距离如表1所示^[12]。

$$N = \left\lceil \frac{C}{MC_{\text{slot}}} \right\rceil \quad (5)$$

表1 不同调制格式下对应的调制等级和传输距离

调制格式	调制等级	最大传输距离/km
二进制相移键控(BPSK)	1	4 000
正交相移键控(QPSK)	2	2 000
8进制相移键控调制(8QAM)	3	1 000
16进制相移键控调制(16QAM)	4	500

2 FA-VONE 算法

FA-VONE算法采用节点-链路协同映射策略。首先,基于节点的计算资源需求、带宽需求和连接度,设计虚拟节点和物理节点的排序策略。然后,根据光路中频谱资源的使用情况和经过的链路数量,确定候选光路的优先级排序。此外,考虑预分配频谱块的位置及

对周围频谱资源的影响,设计频谱碎片度量指标。

2.1 虚拟节点和物理节点的权值评估

虚拟节点的权值 $R(v)$ 计算方法如式(6)所示。

$$R(v) = C_n^v \sum_{l \in N_e^v(v)} B_l^v D^v \quad (6)$$

其中, $N_e^v(v)$ 表示 v 的邻居链路集合, D^v 表示与 v 直接相连的虚拟节点个数。 $R(v)$ 值越大, 说明该虚拟节点的优先级越高。

物理节点的权值 $R(s)$ 计算方法如式(7)所示。

$$R(s) = C_n^s \sum_{l \in N_e^s(s)} B_l^s D^s \quad (7)$$

其中, $N_e^s(s)$ 为 s 的邻居物理链路集合, D^s 表示与 s 直接相连的物理节点个数。 $R(s)$ 值越大, 说明该物理节点的可用计算资源越丰富, 承载虚拟节点的优先级越高。

在虚拟节点映射中, 将 VON 权重值最大的虚拟节点映射到 EON 中权重值最大的物理节点上, 有助于资源最优化分配和网络负载均衡的优化。

2.2 光路的可用资源评估

当虚拟节点成功映射到底层物理节点之后, 下一步操作是在底层网络中为相应的物理节点对寻找一条可用的光路, 并分配频谱资源。在选择光路的过程中, 采用 K 最短路径(KSP)算法来为虚拟业务寻找 3 条候选光路。基于光路频谱的连续性和经过的链路数量这 2 个因素, 本文设计出一种针对候选光路的排序策略, 以提升虚拟请求映射的成功率。

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^{F-1} u_i^p u_{i+1}^p}{B_p} \times \frac{\sum_{i=1}^F u_i^p}{F} \quad (8)$$

$$B_p = \sum_{i=1}^F u_i^p - \sum_{i=1}^{F-1} u_i^p u_{i+1}^p \quad (9)$$

$$W = \frac{C_p}{h_p} \quad (10)$$

其中, C_p 表示当前路径中空闲资源的可利用程度, u_i^p 表示光路满足频谱一致性后频隙的状态。若 u_i^p 值为 1, 说明该频隙为空闲频隙; 若 u_i^p 值为 0, 说明该频隙已被占用。 B_p 表示光路 p 上可用频谱块数, F 表示每条光纤链路包含的频隙总数, h_p 为光路的跳数, W 为光路径的可用资源评估值。 W 值越大, 说明当前候选光路的频谱连续性较好, 可用频隙资源较多。

光路可用资源评估过程如图1所示。在虚拟网络

映射场景中, 假设虚拟节点 a 和 b

已经分别映射到底层物理网络的节点 A 和 D 上, 且虚拟链路请求的带宽需求为 3 个频隙。

为了完成该虚拟链路的映射, 需要从底层网络中选择一条连接节点 A 和节点 D 且资源评估值 W 最大的物理光路。

首先, 采用 KSP 算法生成 3 条候选路径, 包括: 路径 1 (A-B-C-D)、路径 2 (A-F-E-D) 以及路径 3 (A-D)。

由图1可知, 路径 1 的可用频谱块为 [4-6] 频隙、[10] 和 [12] 频隙; 路径 2 的可用频谱块为 [2-3] 频隙和 [7-10] 频隙; 路径 3 的可用频谱块为 [1-3] 频隙、[7-9] 频隙和 [12] 频隙。

根据式(8)~式(10), 计算上述 3 条候选路径的可用资源评估值, 分别为: $W_1=0.09$, $W_2=0.33$, $W_3=0.78$ 。通过比较可知, 路径 3 不仅在评估值上显著优于其它 2 条路径, 其频谱资源的连续性和利用率也更为突出。

因此, 最终选择将虚拟链路 $a-b$ 映射至路径 3, 既满足了 3 个频隙的带宽需求, 又实现了底层频谱资源的最优配置, 充分体现了资源评估模型的有效性。

2.3 频谱分配策略

在频谱资源分配过程中, 需要从多维度综合考量频谱碎片化问题, 以选择最优的空闲频谱块分配给业务请求。

为此, 本文设计了一个碎片度量指标, 该指标由 3 个关键影响因子构成: 预分配频谱块到频谱边缘的距离、预分配频谱块对相邻资源的影响以及预分配频谱块对光路频谱连续度的影响。

同时, 候选频谱块需满足以下任一条件: 1) 与频谱边缘相连; 2) 与已占用的频隙相邻。

在频谱分配过程中, 碎片度量指标的第一个关键因子“预分配频谱块到频谱边缘的距离”可量化为参

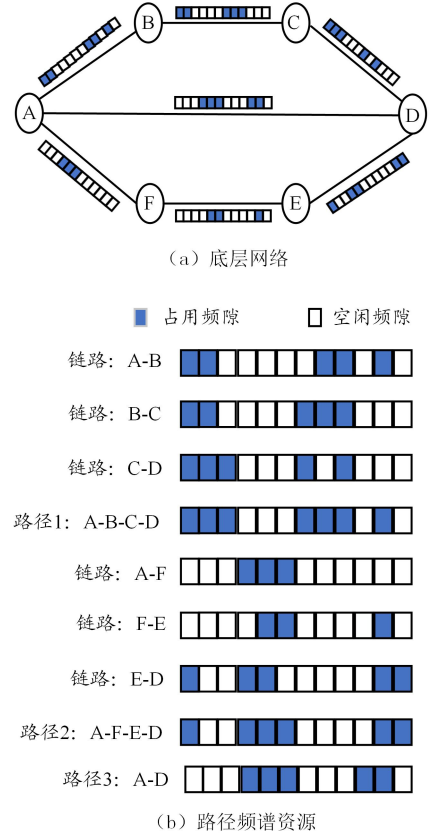


图1 光路的可用资源评估示意图

胡星宇,任丹萍,邓玉静,等:弹性光网络中碎片感知的虚拟网络协同映射算法

数 D , 如式(11)所示。

$$D = \min\{D_L, D_R\} \quad (11)$$

其中, D_L 表示候选频谱块到频谱左边界的距离, D_R 表示候选频谱块到频谱右边界的距离。 $D_L = u_{fs}^p - 1$, $D_R = F - u_{fe}^p$, u_{fs}^p 和 u_{fe}^p 分别表示光路径中候选频谱块的起始频隙编号和结束频隙编号。 D 值越小, 意味着预分配的频谱块更靠近频谱边缘, 这将在光路频谱轴的中心位置留出更多的连续空闲频谱, 有助于降低频谱碎片化。

碎片度量指标的第二个关键因子“预分配频谱块对相邻资源的影响”用 I 表示, 如式(12)所示。

$$I = \begin{cases} \sum_{l \in P} u_{fs-1}^l, & 0 < D_L < D_R \\ \sum_{l \in P} u_{fe+1}^l, & D_L \geq D_R > 0 \\ 0, & D_L = D_R = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, P 表示业务请求的传输路径, 即其在物理网络中所经过的链路集合, l 表示业务请求当前所在的光纤链路。当预分配频谱块更靠近频谱左边界时, I 值等于所经过链路中频隙序号为 $f_s - 1$ 的空闲频隙总数; 当预分配频谱块更靠近频谱右边界时, I 值等于所经过链路中频隙序号为 $f_e + 1$ 的空闲频隙总数; 若预分配频谱块在频谱边缘上, 则 I 的值为 0。预分配频谱块相邻资源的影响如图 2 所示。当业务请求需要 1 个频隙资源并通过链路 AB、BC、CD 传输时, 存在 3 种可行的预分配方案, 其对应的 I 值分别为 2、1 和 0。 I 值越小, 说明预分配频谱块与更多已占用频隙资源相邻。通过选择 I 值较小的候选频谱块, 可以增强光路中的频谱连续度, 从而降低频谱碎片化, 使空闲频谱资源更加紧密相邻。

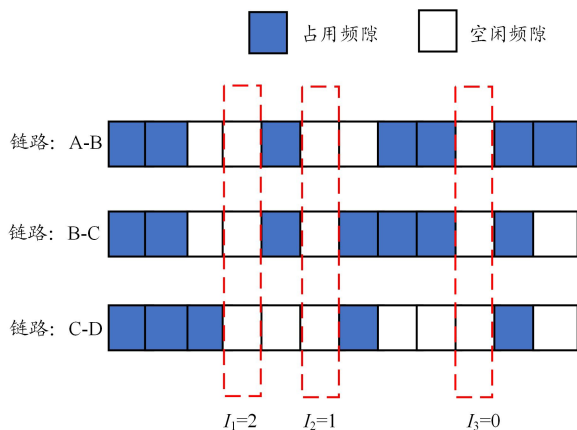


图 2 预分配频谱块对相邻资源的影响

碎片度量指标的第三个关键因子“路径频谱资源中连续频隙的邻接程度”用 S 表示, 如式(13)所示。

$$S = \frac{B_p}{\sum_{f=1}^{F-1} u_f^p u_{f+1}^p + 1} \quad (13)$$

当候选频谱块预分配之后, B_p 表示光路上满足频谱约束性条件后可用的频谱块; $\sum_{f=1}^{F-1} u_f^p u_{f+1}^p$ 表示光路上空闲频隙之间的连接点数。 S 值越小, 说明光路中每个空闲频率块所具有的平均连接点数越多, 可用的频隙资源更加连续。

综上, 频谱碎片度的计算式如(14)所示。

$$E = D + I + S \quad (14)$$

其中, E 表示碎片度量值。由于 D 、 I 和 S 的值越小越好, 因此 E 值也应该尽量小。选择 E 值较小的预分配频谱块, 可以有效降低频谱碎片率, 提高频谱资源利用率和虚拟请求接受率。

2.4 FA-VONE 算法步骤

FA-VONE 算法具体步骤如算法 1 所示。

算法 1 FA-VONE 算法

输入: 虚拟网络 G^v , EON G^s

输出: 虚拟网络映射结果、频谱利用率和底层网络收益

1) 根据式(6)计算 G^v 中虚拟节点的权重值, 并降序排序;

2) 根据式(7)计算 G^s 中物理节点的权重值, 并降序排序;

3) 采用节点-链路协同映射策略, 将权重值最大的虚拟节点映射至权重值最大的物理节点, 若映射成功, 转至步骤 4), 否则映射失败, 转至步骤 8);

4) 对已映射虚拟节点的相邻虚拟链路按带宽降序排序, 若链路两端节点均已映射, 使用 KSP 算法寻找 3 条候选光路, 若存在未映射的虚拟节点, 转至步骤 3);

5) 根据式(8)~式(10), 计算 K 条候选光路的资源评估值 W , 并将虚拟链路映射到 W 值最大的光路 p ;

6) 在光路 p 上, 找到满足虚拟链路带宽需求的可用频谱块, 根据式(11)~式(14)计算候选频谱块的碎片度量值 E ;

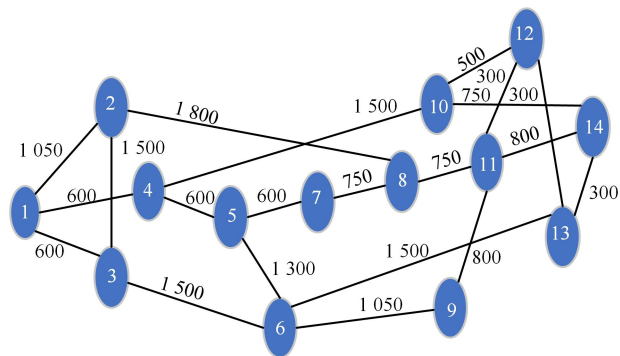
7) 将 E 值升序排序, 选择 E 值最小的频谱块分配给业务;

8) 返回映射结果, 算法结束。

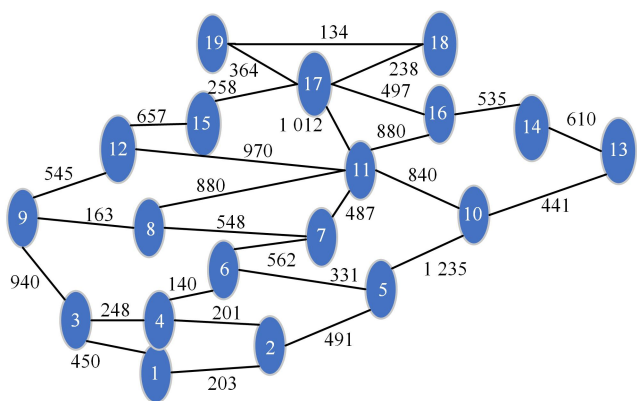
3 仿真分析

3.1 实验环境及评价指标

为验证 FA-VONE 算法性能,本文采用 NSFNET^[13] 和 Indian Network^[14] 网络拓扑,在 PyCharm 平台进行仿真。虚拟请求到达服从参数为 λ 的泊松分布,持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的指数分布。仿真拓扑如图 3 所示。



(a) NSFNET 拓扑图



(b) Indian Network 拓扑图

图 3 网络拓扑(单位:km)

仿真参数设置如表 2 所示。

仿真测试采用的性能指标为虚拟网络请求成功率、频谱利用率和底层网络收益,其定义如下:

1) 虚拟网络请求成功率: 定义为映射成功的虚拟请求数量与总虚拟请求数量的比值,用 V_{accept} 表示,其值越大,说明物理网络接受的虚拟请求数量越多,映射效果越好。该表达式为

$$V_{\text{accept}} = \frac{R_{\text{accept}}}{R_{\text{total}}} \quad (15)$$

其中, R_{accept} 表示虚拟请求映射成功的数量, R_{total} 表示虚拟请求总数量。

2) 频谱利用率: 定义为在模拟过程中被业务请求占用的总频隙槽数量与网络中总频隙槽数量的比值,用 U 表示,其值越大,说明物理网络中资源的利用效率越高。该表达式为

$$U = \frac{\mu F_{\text{accept}}}{F_{\text{total}} T} \quad (16)$$

其中, F_{accept} 和 F_{total} 表示虚拟请求成功的总带宽需求和底层网络中频隙资源的总数, μ 表示虚拟业务持续时间的参数, T 表示底层网络的运行时间。

3) 底层网络收益: 定义为在网络运行期间底层网络所产生的总收益,该收益由物理节点和物理链路上产生的收益共同构成。该表达式为

$$R_{\text{profit}}(G^v) = \alpha \sum_{v \in N^v} C_n^v t(v) + \beta \sum_{l \in L^v} B_l^v t(l) \quad (17)$$

其中, α 、 β 分别为虚拟节点和虚拟链路的权重, α 和 β 的值设为 1^[15]; t 表示虚拟网络的持续时间; L^v 表示虚拟网络中的链路集合。

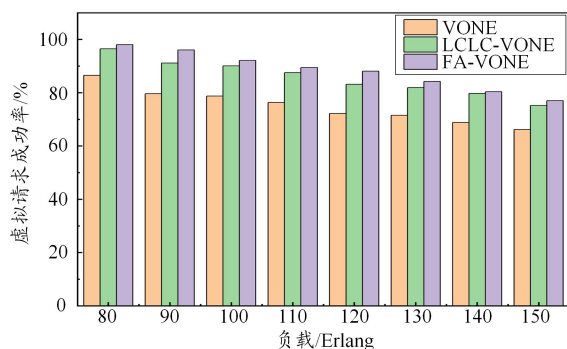
3.2 仿真结果与分析

为验证 FA-VONE 算法性能,本文选择了 2 种对比算法: 第一种是基于文献[7]提出的 LCLC-VONE 算法,该算法将需求最大的虚拟节点映射至资源最丰富的物理节点;第二种是综合了文献[7]的节点映射策略和文献[5]的链路映射策略的 VONE 算法。通过分析虚拟请求成功率、频谱利用率以及底层网络收益这 3 个关键性能指标来验证各算法的表现。

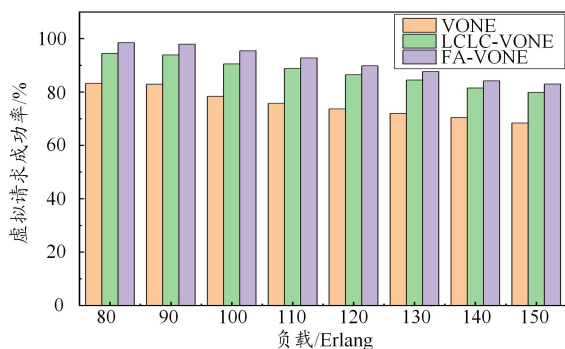
本文在 NSFNET 和 Indian Network 拓扑下对各算法进行仿真。不同负载下 3 种算法虚拟请求成功率情况如图 4 所示。可以看出,随着负载逐渐增加,3 种算法的虚拟请求成功率均呈现下降趋势。这是因为业务流的动态到达与离开过程会引发频繁的频谱资源分配与释放操作,从而产生严重的频谱碎片化问题;同时,随着负载的增加,同一时刻业务到来的数量也会增加,进一步加剧了频谱资源的碎片化程度。此外,在相同负载情况下,FA-VONE 算法的虚拟请求成功率高于 LCLC-VONE 算法和 VONE 算法。这是因为 FA-VONE 算法在虚拟业务到达后,采用节点-链路协同映射策略,加强了虚拟节点和虚拟链路之间的关联。而 LCLC-VONE 算法和 VONE 算法则采用两阶段映射策略,当所有虚拟节点全都映射至物理节点后,再进行链路映射,这可能导致虚拟网络中相邻的虚拟节点在

表 2 仿真参数设置

仿真参数	值
虚拟节点数量	[3, 4]
虚拟节点请求计算需求	[1, 10]
虚拟节点连通概率	0.5
物理节点可用计算资源/a.u.	400
物理链路可用频隙资源/a.u.	320



(a) NSFNET 拓扑图

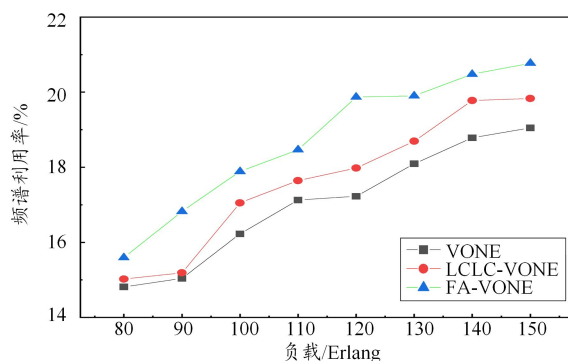


(b) Indian Network 拓扑图

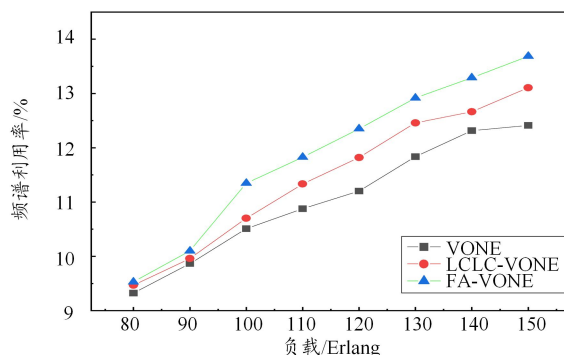
图4 不同负载下,3种算法的虚拟请求成功率情况

底层网络中相距较远,从而消耗了更多频谱资源,以至底层网络没有足够的频谱资源为后到达的业务建立连接。由图4可知,在NSFNET网络拓扑中,当网络负载为90 Erlang时,FA-VONE相对于LCLC-VONE和VONE算法虚拟请求成功率分别提升了5.37%和16.42%;在Indian Network拓扑中,当网络负载为100 Erlang时,FA-VONE算法相对于LCLC-VONE算法和VONE算法虚拟请求成功率分别提升了5.45%和21.76%。

不同负载下,3种算法的频谱利用率情况如图5所示。可以看出,随着负载的增加,3种算法的频谱利用率均呈现上升趋势。无论是在NSFNET拓扑中还是在Indian Network拓扑中,FA-VONE算法在性能上都高于LCLC-VONE算法和VONE算法。这是因为FA-VONE算法在选路阶段会优先选择频谱资源状况较好的链路,在频谱分配阶段,会优先分配靠近频谱边界的资源,优先分配与占用频谱相邻的空闲频谱块,在链路的中心区域可以留出更多的连续空闲频谱块,从而使链路的频谱资源保持在良好状况。而LCLC-VONE和VONE采用KSP算法选路方法和首次命中分配频谱块的策略,忽略了链路中频谱资源的使用状



(a) NSFNET 拓扑图

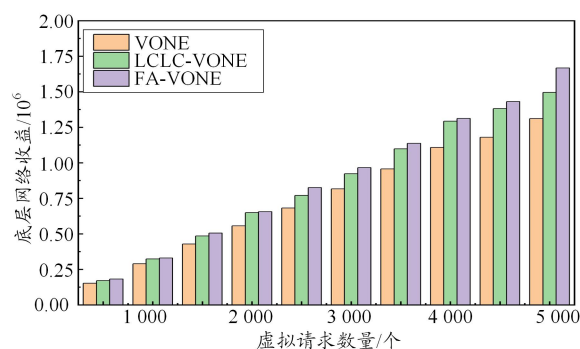


(b) Indian Network 拓扑图

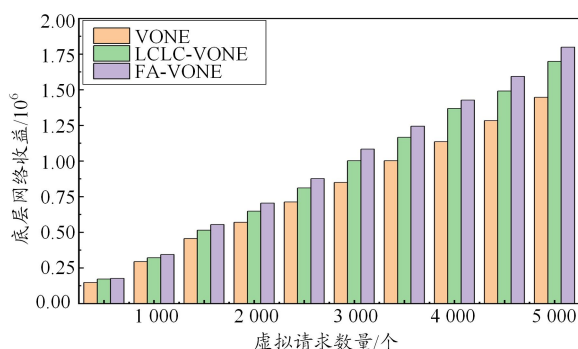
图5 不同负载下,3种算法的频谱利用率情况

况。由图5可知,在NSFNET网络拓扑中,当网络负载为90 Erlang时,相较于LCLC-VONE算法和VONE算法,FA-VONE算法的频谱利用率分别提升了10.76%和11.86%;在Indian Network网络拓扑中,当网络负载为100 Erlang时,相较于LCLC-VONE算法和VONE算法,FA-VONE算法的频谱利用率分别提升了6.04%和8.05%。

不同虚拟请求数量下底层网络的收益情况,如图6所示。可以看出,在100 Erlang负载的情况下,随着虚拟请求的增加,3种算法的底层网络收益也呈现递增趋势,且所提的FA-VONE算法均优于其它算法。这是因为该算法的虚拟请求成功率较高且在底层网络中的频谱资源消耗较低,导致底层网络有更多的空闲频谱资源可以容纳新到达的业务请求。由图6可知,在NSFNET网络拓扑中,当网络负载为100 Erlang且虚拟请求数量为5 000时,FA-VONE算法的底层网络的收益相对于LCLC-VONE算法和VONE算法分别提升了11.52%和27.19%;在Indian Network网络拓扑中,相较于LCLC-VONE算法和VONE算法,FA-VONE算法的底层网络收益分别提升了5.92%和24.33%。



(a) NSFNET 拓扑图



(b) Indian Network 拓扑图

图6 不同虚拟请求数量下,3种算法的底层网络收益

4 结束语

本文提出了一种 FA-VONE 算法。该算法通过设计节点权重评估策略,优先映射更重要的虚拟节点;在为虚拟链路分配路径时,优先选择频谱资源丰富且状态良好的路径,从而提高虚拟请求映射的成功率。实验结果显示,本算法不仅能有效节省底层网络资源,还能提升频谱利用率,并支持更多的虚拟网络请求。仿真结果表明,与现有算法相比,所提出的 FA-VONE 算法在虚拟请求成功率、频谱利用率以及底层网络收益方面均有显著提升。

参考文献:

- [1] 任丹萍,张黎,胡劲华.空分复用弹性光网络中串扰感知的虚拟网络映射算法[J].光学学报,2023,43(5):39-49.
- [2] ZHAO J J, ZHOU Y, FENG N, et al. 2-D fragmentation-aware RMSA based on the relative flexibility of advance reservation requests in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 78: 103296-1-103296-10.
- [3] BEDELTOUAB A, HASAN M M, KARMOUCH A. Resource discovery and allocation in network virtualization[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(4): 1114-1128.
- [4] WEI W T, GU H X, PATTAVING A, et al. Optimizing energy and spectrum efficiency of virtual optical network embedding in elastic optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2020, 37: 100568-1-100568-34.
- [5] 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.
- [6] LIU H, WEN M, CHEN Y, et al. Virtual optical network embedding of time-varying traffic in elastic optical networks [J]. Optics Communications, 2022, 508: 127693-1-127693-9.
- [7] CHEN B W, ZHANG J, XIE W S, et al. Cost-effective survivable virtual optical network mapping in flexible bandwidth optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2398-2412.
- [8] 刘岩,何荣希,王钜霖,等.弹性光网络中面向立即预留请求的碎片感知路由频谱分配算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(5):156-165.
- [9] 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.
- [10] LU H C, ZHANG F Y. Resource fragmentation-aware embedding in dynamic network virtualization environments [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(2): 936-948.
- [11] 刘焕淋,邱艳,陈勇,等.光路邻居链路频谱碎片感知的虚拟光网络协同映射算法[J].电子学报,2023,51(7):1758-1764.
- [12] ZHU Z Q, LU W, ZHANG L, et al. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 31(1): 15-22.
- [13] 商盼盼,任丹萍,张娟,等.弹性光网络中面向业务精确迁移的频谱碎片整理算法[J].光通信技术,2021,45(10):51-57.
- [14] JANA R K, CHATTERJEE B C, SINGH A P, et al. Performance evaluation of conventional spectrum-allocation policies for C+ L band elastic optical networks[C]//IEEE. Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems(ANTS). India: IEEE, 2021: 348-353.
- [15] 熊文成,王颖,邱雪松,等.基于链路优先的快速协同虚拟网络映射算法[J].通信学报,2015,36(3):253-261.