

## 节点重要性感知的透明虚拟光网络协同映射策略

刘焕淋<sup>\*①</sup> 吕磊<sup>①</sup> 陈勇<sup>②</sup> 蔚承英<sup>①</sup> 胡浩<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

**摘要:** 针对透明弹性光网络环境下虚拟光链路映射过长和频谱碎片问题, 该文提出一种节点重要性感知的协同映射算法。在节点映射阶段, 设计节点重要性度量准则, 评估未映射节点和已映射节点的邻近性, 以及光路的频谱紧密度, 以缓解链路频谱碎片和增强节点映射的紧凑性。同时, 为了降低节点映射成功而链路映射失败的概率, 提出一种节点-链路协同映射算法, 当成功映射一对相邻虚拟节点时, 立即映射他们之间的虚拟光链路, 并分配频谱资源, 最小化虚拟光链路所映射物理光路跳数。仿真结果表明, 所提算法能够使用更少的频谱资源传输更多的虚拟光网络业务, 且缩短了虚拟光链路映射长度。

**关键词:** 弹性光网络; 网络虚拟化; 节点重要性; 协同映射

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1978-07

DOI: 10.11999/JEIT171096

## Node-importance Aware Coordinated Embedding Strategy for Transparent Virtual Optical Network

LIU Huanlin<sup>①</sup> LÜ Lei<sup>①</sup> CHEN Yong<sup>②</sup> WEI Chengying<sup>①</sup> HU Hao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** For the over-long embedding lightpath and spectrum fragmentation in transparent elastic optical networks, a node-importance aware coordinated embedding algorithm is proposed. In the stage of node embedding, in order to alleviate spectrum fragmentation and to improve the compactness of node embedding, the spectrum compactness of embedding lightpath and the adjacency between embedding node and embedded nodes are evaluated, and then two node-ranking formulas are presented. Meanwhile, to reduce the probability of the success of node embedding but the failure of link embedding, a coordinated node-link embedding algorithm is proposed. When a pair of adjacent virtual nodes is successfully embedded, the virtual optical link between them is embedded instantly, while spectrum resources are allocated, which minimizes the hops of lightpath embedded by virtual optical link. The simulation results indicate that the proposed algorithm can use the least spectrum resources to accommodate more virtual optical network demands, and reduce the embedding length of virtual optical link.

**Key words:** Elastic optical networks; Network virtualization; Node importance; Coordinated embedding

### 1 引言

近年来, 越来越多的新型应用如雨后春笋般不断涌现, 如视频点播、智能家居、移动技术等, 致使网络数据流量呈现爆炸式增长<sup>[1]</sup>, 给传输带宽资源本就有限的通信骨干网络带来了很大挑战。相比粗

糙波长分配粒度的波分复用网络<sup>[2,3]</sup>, 弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)通过采用带宽可变的光器件和更细的分配粒度, 能够为业务分配恰好满足带宽请求大小的子载波, 显著提高了频谱资源利用率, 被认为是下一代光传输网络的理想方案<sup>[4,5]</sup>。同时, 国内外许多 IT 企业逐步将自己的服务转移到云端, 利用地理位置上分散的分布式数据中心承载自己的云服务, 致使底层网络资源消耗不均, 互联网出现停滞不前的“僵化”局面。为了提升底层网络资源利用率, 光网络虚拟化技术被引入 EONs 中<sup>[6]</sup>。光网络虚拟化技术允许多个彼此隔离的

收稿日期: 2017-11-22; 改回日期: 2018-04-18; 网络出版:

\*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(面向电力业务的“IP+光”协同编排关键技术研究)(SGJBXT00YJJS1800012)

Foundation Items: National Electric Net Ltd. Technology Project (Research on Key Technology of "IP+Light" Cooperative Arrangement for Power Service)(SGJBXT00YJJS1800012)

虚拟光网络(Virtual Optical Network, VON)共享同一个底层网络资源, 并将传统互联网服务提供商分离为 2 个本质上独立的实体, 即基础设施提供商 (Infrastructure Providers, InPs) 和服务提供商 (Service Providers, SPs)。在光网络虚拟化环境下, InPs 负责部署和管理底层物理基础实施和资源; 而 SPs 可以从一个或多个 InPs 处租赁资源并创建专用 VON, 实现了底层网络资源的按需分配。

如何把 VON 映射到底层网络作为光网络虚拟化环节的关键问题, 受到了广泛地研究。在 EONs 中, 根据虚拟光链路(Virtual Optical Link, VOL)能否在底层网络以全光的形式被传输, 虚拟光网络映射问题被分成不透明拟光网络映射(Opaque Virtual Optical Network Embedding, OVONE)和透明虚拟光网络映射(Transparent Virtual Optical Network Embedding, TVONE)两类问题<sup>[6]</sup>。Pagés 等人<sup>[7]</sup>为波分复用网络下 OVONE 和 TVONE 问题分别建立了整数线性规划模型, 并提出一种启发式 TVONE 算法。但是, 没有考虑节点映射。文献<sup>[6]</sup>针对 EONs 中 OVONE 和 TVONE 问题, 分别提出了整数线性规划模型和启发式算法。但是该文献对于节点重要性的评估过于简单。文献<sup>[8]</sup>提出了一种基于分层辅助图的分离式 TVONE 算法, 降低了因所有 VOL 必须分配相同的频谱资源而导致 VOL 映射失败的概率。针对 EONs 的频谱碎片问题, 文献<sup>[9]</sup>提出了一种考虑物理节点周围链路频谱连续度的 OVONE 算法。然而, 在文献<sup>[6-9]</sup>中, 都忽略了节点映射对链路映射的影响, 以及 2 个相邻虚拟节点 (Virtual Node, VN)映射到 2 个相距过远物理节点上的问题, 这将消耗更多的频谱资源, 间接地增加 VON 业务被阻塞的概率。针对 2 个相邻 VN 映射过远问题, 一些学者在 2/3 层网络中提出一种拓扑感知<sup>[10]</sup>和临近原则<sup>[11]</sup>的虚拟网络映射算法。在节点映射阶段, 考虑候选物理节点到已被映射相关物理节点的距离, 但是该方法并不能保证在链路带宽资源不足时, 虚拟链路所映射物理路径还是最短的。而对于 EONs 中节点映射紧凑性问题, 一种考虑链路频谱连贯度和候选物理节点到所有已被映射物理节点距离的分离式最短长度 TVONE 算法被提出<sup>[12]</sup>。虽然该方法能在一定程度上缩短 VOL 映射长度, 但并不能保证当一条 VOL 映射成功后, 剩余的 VOL 所映射物理光路还是最短的。

基于上述背景, 本文针对透明弹性光网络环境下 VOL 映射过长和频谱碎片问题, 提出一种节点重要性感知的节点-链路协同映射(Node-Importance

Aware Coordinated Node and Link Embedding, NIACNLE)算法。首先, 借鉴文献<sup>[8]</sup>中分层辅助图 (Layered Auxiliary Graph, LAG)思想, 根据 VON 业务的请求带宽, 将底层网络分解为一系列分层辅助图。其次, 在节点映射阶段, 评估未映射节点和已映射节点间的邻近性, 以及映射光路的频谱紧密度, 分别设计虚拟节点和物理节点排序准则, 以减轻网络频谱碎片。最后, 针对 VOL 映射过长问题, 在每成功映射一对相邻 VN 时, 立即映射他们之间的 VOL。

## 2 透明虚拟光网络映射问题描述

### 2.1 网络模型

底层 EONs 被抽象为无向图  $G^s(N^s, E^s)$ , 其中  $N^s$  为物理节点集合,  $E^s$  为物理链路集合。每个物理节点  $n^s$  可用计算资源大小记为  $C_n^s$ ; 每条物理链路  $e^s$  能传输的最大带宽容量为  $B$  单位频隙 (Frequency Slot, FS),  $b_e^s[i]$  表示链路  $e^s$  上第  $i$  个频隙是否可用, 若可用, 其值为 1; 否则为 0, 如图 1(a)所示。类似地, 一个 VON 业务表示为无向加权图  $G^v(N^v, E^v)$ , 其中  $N^v$  和  $E^v$  分别表示 VN 集合和 VOL 集合,  $C_n^v$  表示虚拟节点  $n^v$  需求的计算资源大小,  $Bw_e^v$  表示虚拟光链路  $e^v$  需求的频谱资源大小, 如图 1(b)所示。对称网络要求一个透明 VON 业务中所有 VOL 所需频谱资源大小相等<sup>[8]</sup>, 下文用  $Bw^v$  表示一个 VON 业务需求的频谱资源大小。

### 2.2 约束条件

一般地, TVONE 问题可分解为节点映射和链路映射 2 个子问题, 且分别遵循相应的约束条件。当且仅当一个 VON 业务中所有 VN 和 VOL 都映射成功时, 该业务才能被成功传输。

(1)节点映射: 一个 VON 业务中不同 VN 需映射到不同的唯一底层物理节点上, 其映射过程用式

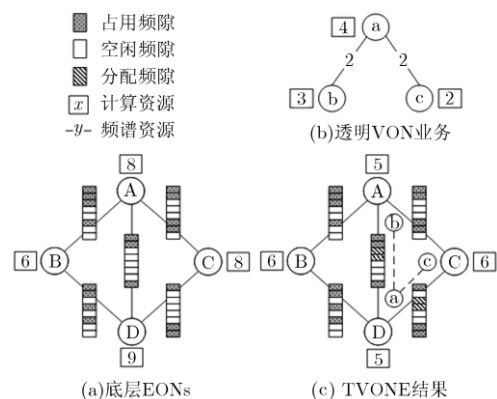


图 1 TVONE 示意图

(1)映射函数  $M_N$  表示。

$$M_N(n^v) = n^s, \forall n^v \in N^v, n^s \in N^s \quad (1)$$

约束条件为

$$M_N(m^v) = M_N(n^v) \Leftrightarrow m^v = n^v, \quad \forall m^v \in N^v, n^v \in N^v \quad (2)$$

$$C_{n^v}^v \leq C_{n^s}^s, \forall n^v \in N^v \quad (3)$$

$$D_{n^v}^v \leq D_{n^s}^s, \forall n^v \in N^v \quad (4)$$

其中,  $D_n$  表示节点  $n$  的度数。式(2)保证物理节点与虚拟节点是一一对应关系。式(3)约束 VN 所映射物理节点需满足计算资源需求。式(4)表明 VN 所映射物理节点的度数应不小于该 VN 度数<sup>[6]</sup>。如图 1(c)所示, 图 1(b)中各 VN 所映射物理节点分别为{a→D, b→A, c→C}。

(2)链路映射:链路映射子过程需要为一个 VON 业务中每条 VOL 在底层网络中找到一条边分离的物理光路, 并在沿着此光路的所有链路上分配一个大小为  $Bw^v$  的空闲频谱块  $f_s, f_e$ , 其中  $f_s$  和  $f_e$  分别表示该频谱块的起始频隙号和终止频隙号, 其映射过程可用式(5)映射函数  $M_L$  表示。其中  $P^s$  表示  $G^s$  中最短光路集合。

$$M_L e^v = p^s, \forall e^v = m^v, n^v \in E^v, \quad p^s = m^s, n^s \in P^s \quad (5)$$

约束条件为

$$M_N m^v = m^s, M_N n^v = n^s \quad (6)$$

$$p_{e^v}^s \cap p_{l^v}^s = \emptyset | M_L e^v = p_{e^v}^s, M_L l^v = p_{l^v}^s, \quad \forall e^v \in E^v, l^v \in E^v, e^v \neq l^v \quad (7)$$

$$b_e^s[i] = b_{e'}^s[i] = 1, \forall i \in [f_s, f_e], e^v \in E^v, l^v \in E^v, \quad e \in M_L e^v, e' \in M_L l^v \quad (8)$$

式(6)表示 VOL 所映射物理光路的源-目的节点为该 VOL 的 2 个 VN 所映射物理节点。式(7)保证一个 VON 业务中所有 VOL 所映射物理光路是链路不相交的<sup>[6]</sup>。式(8)表明为一个 VON 业务的所有 VOL 应分配相同的频隙。如图 1(c)所示, 图 1(b)中各 VOL 所映射物理光路为{a-b→D-A}, {a-c→D-C}, 且为每条 VOL 配置的频谱资源为图 1(c)中带斜线频隙。

### 3 动态透明虚拟光网络协同映射机制

所提 NIACNLE 算法包括 3 个部分。首先介绍传统分层辅助图的构建方法; 其次, 详细地讲述所提虚拟节点和物理节点重要性排序准则, 以及光路分离的链路映射策略; 最后叙述所提 NIACNLE 算法总流程。

#### 3.1 分层辅助图

考虑 EONs 中频谱分配需满足频谱一致性、连

续性和不重叠 3 个约束条件, 且为了保证链路映射阶段频谱分配的成功率, 本文借鉴文献[8]中分层辅助图的思想, 将底层网络分解为一系列分层辅助图。其主要思想为: 对于第  $k$  层辅助图, 根据 VON 业务的请求带宽  $Bw^v$ , 依次检查每条物理链路上第  $k$  个频隙到第  $k + Bw^v - 1$  个频隙是否全部空闲。若空闲, 则在第  $k$  层辅助图中存在此边; 否则, 在第  $k$  层辅助图中删除此边。最后, 找出辅助图中节点数不小于该 VON 业务虚拟节点数 RNodeNum 的连通子图。

#### 3.2 节点映射

文献[6]设计一种考虑节点  $n$  本地容量(Local Resource Capacity, LRC)的映射准则, 如式(9)所示。

$$LRC(n) = D_n \times C_n \quad (9)$$

其中,  $C_n$  表示节点  $n$  的计算资源大小。对于物理节点  $n^s$ , 其度数为第  $k$  层辅助图的第  $i$  个连通子图中此节点度数。对于图 2 的 VON 业务, 假设链路上有足够的频谱资源, 则其 VN 映射顺序为{a→B, b→C, c→E, d→F}。可以看出因该映射准则没有考虑预映射 VN 与已映射 VN 的关联性, 使得本来 2 个相邻的虚拟节点 a 和 c 映射到 2 个相距甚远的物理节点 B 和 E 上, 导致在链路映射阶段消耗了过多的频谱资源, 如{a-c→B-C-E}, 甚至可能因链路映射需满足约束式(7)而发生 VN 映射成功, 但 VOL 映射失败情形(如虚拟光链路 b-d 映射失败), 间接增加 VON 业务被阻塞的概率。

因此, 为了精确评估一个节点的重要程度, 本文在节点映射阶段, 提出一个节点重要性特征(Node Importance Characteristic, NIC)概念。综合考虑一个 VON 业务中未映射 VN 的度数、计算资源需求和邻居 VN 的映射状态, 以及分层辅助图中可用候选物理节点的度数、剩余计算资源和该物理节点到相关已被映射物理节点的光路跳数与频谱紧密度,

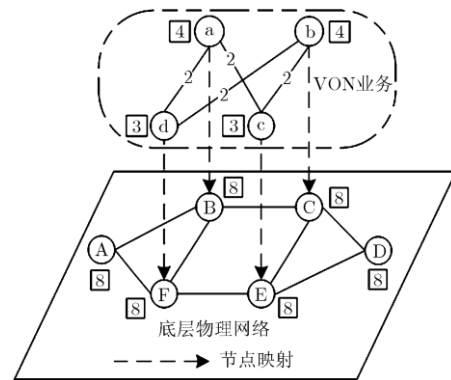


图2 基于 LRC 的 TVONE 示意图

优先映射度量值大的虚拟节点到度量值大的物理节点上。

对于一个 VON 业务,  $D_{n^v}^v$  表示虚拟节点  $n^v$  的度数。则虚拟节点  $n^v$  的重要性特征 VNIC 如式(10)所示。

$$\text{VNIC } n^v = D_{n^v}^v + \text{NN}_{n^v}^v \times C_{n^v}^v \quad (10)$$

其中,  $\text{NN}_{n^v}^v$  表示与虚拟节点  $n^v$  相邻且已映射的 VN 个数, 其作用是为了提前降低 2 个相邻 VN 映射到 2 个相距甚远物理节点上的概率。

对于连通子图  $G_k^i$ ,  $D_{n^s}^s$  表示  $G_k^i$  中物理节点  $n^s$  的度数。则物理节点  $n^s$  重要性特征 SNIC 如式(11)所示。

$$\text{SNIC}(n^s) = \frac{D_{n^s}^s \times C_{n^s}^s}{1 + \sum_{n' \in \text{EN } n^v} \text{HN } n^s, n'} \times \left( 1 + \sum_{n' \in \text{EN } n^v} \text{SC } n^s, n' \right) \quad (11)$$

$$\text{SC } n^s, n' = \frac{\text{FS}_{\text{mb}}^p}{\text{SB}_{\text{av}}^p * \text{FS}_{\text{av}}^p} \quad (12)$$

其中,  $\text{EN } n^v$  表示与预映射虚拟节点  $n^v$  相邻的所有 VN 所映射物理节点集合,  $\text{HN } n^s, n'$  表示可用候选物理节点  $n^s$  到  $n'$  的边分离最短光路跳数。SC  $n^s, n'$  表示光路频谱紧密度, 用于评估映射光路的频谱碎片程度。SB<sub>av</sub><sup>p</sup> 表示光路  $p$  上空闲频谱块数, FS<sub>av</sub><sup>p</sup> 和 FS<sub>mb</sub><sup>p</sup> 分别表示光路  $p$  上空闲频隙数和最大空闲频谱块的频隙数。SNIC  $n^s$  的值越大, 表明当把预映射虚拟节点  $n^v$  映射到该物理节点  $n^s$  时, 在链路映射阶段, 能够使用短的光路作为以虚拟节点  $n^v$  为端点的 VOL 的映射光路, 保证节点映射的紧凑性, 且能减少频谱碎片。如图 3 所示, 其 VN 映射顺序为{a→B, c→C, b→E, d→F}。

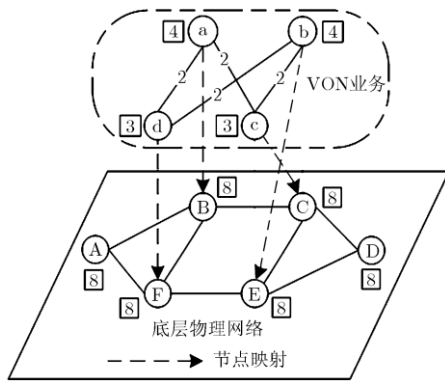


图 3 基于 NIC 的 TVONE 示意图

### 3.3 链路映射

为了降低 VN 映射成功而 VOL 映射失败的概率, 以及缩短 VOL 的映射长度, 一种边分离的节点-链路协同映射算法被提出。其主要思想为: 在分层辅助图的基础上, 当成功映射一个 VN 时, 立即查看其相邻 VN 的映射状态。若存在已映射 VN, 则使用 Dijkstra 算法为他们之间的 VOL 寻找边分离的最短映射光路, 达到节点映射、链路映射和频谱分配 3 方面协同的目的, 提高 VOL 映射成功率。其详细的伪代码过程见表 1 的算法 1。值得注意的是, 考虑约束条件式(7), 为每条 VOL 找到一条映射光路后, 则在当前连通子图中删除组成该映射光路的所有物理链路, 避免分离式映射算法在节点映射成功后, VOL 找不到映射光路情形, 如图 2 中虚拟光链路 b-d。因此, 根据图 3 中虚拟节点的映射顺序, 虚拟光链路的映射顺序为{a-c→B-C}, {b-c→E-C}, {d-a→F-B}, {d-b→F-E}, 该 VON 业务被成功接纳。

表 1 链路映射伪代码

算法 1 链路映射	
输入:	$G_k^i$ , 预映射 VN, 预映射 VN 所映射物理节点
输出:	VOL 映射状态 $S$
(1)	计算与预映射 VN 相邻的所有已映射 VN 所映射物理节点, 集合为 $\text{EN } n^v$
(2)	if $\text{EN } n^v$ 非空 then
(3)	for $\text{EN } n^v$ 中每一个物理节点 $n^s$ do
(4)	使用 Dijkstra 算法在 $G_k^i$ 中寻找一条连接预映射 VN 所映射物理节点到 $n^s$ 的最短光路
(5)	if 找到最短光路 then
(6)	在 $G_k^i$ 中删除该最短光路的所有链路
(7)	else
(8)	return $S \leftarrow \text{FAILURE}$
(9)	return $S \leftarrow \text{SUCCESS}$

### 3.4 重要性感知的节点-链路协同映射算法

所提 NIACNLE 算法的详细过程见表 2 的算法 2。当一个 VON 业务到达网络, 首先, 根据其请求带宽, 建立分层辅助图, 并找出辅助图中节点数不小于 RNodeNum 的连通子图。其次, 按照节点数降序排列所有连通子图, 以增加节点映射搜索解空间。最后, 交替执行节点映射和链路映射, 提高 VON 业务被接纳的成功率。

## 4 仿真验证与结果分析

### 4.1 仿真参数设置

为了验证所提 NIACNLE 算法的有效性和普适

表2 NIACNLE 算法

算法2 NIACNLE 算法

输入: 底层网络  $G^s$ ,  $N^s, E^s$ , VON 业务

输出: TVONE 状态  $F$

```

(1) 计算 VON 业务中每个 VN 的度数
(2) for  $k \leftarrow 1$  to  $B + Bw^v - 1$  do
(3) 建立第  $k$  层辅助图, 并找出辅助图中节点数不小于
    RNodeNum 的所有连通子图
(4) 按子图节点数降序排列所有连通子图  $G_k^i, i = 1, 2, \dots$ 
(5) for 每一个连通子图  $G_k^i$  do
(6)   flag  $\leftarrow$  TRUE
(7)   for  $j \leftarrow 1$  to RNodeNum do
(8)     按式(10)降序排列所有未映射虚拟节点  $n^v$ 
(9)     按式(11)降序排列所有未标记物理节点  $n^s$ 
(10)    for 所有未标记物理节点 do
(11)     if  $\exists n^s$ , 满足约束条件式(3)和式(4) then
(12)       $n^s \leftarrow M_N n^v$ 
(13)      调用算法1映射与  $n^v$  相邻且已映射的所有 VN
        之间的 VOL
(14)     if 返回值为 FAILURE then
(15)      flag  $\leftarrow$  FALSE
(16)     break
(17)   else
(18)     标记该 VN 已映射和物理节点已被映射
(19)   else
(20)     flag  $\leftarrow$  FALSE
(21)   break
(22) if FALSE == flag then
(23)   break
(24) if  $j ==$  RNodeNum then
(25)   在该层辅助图中映射此 VON 业务, 并分配频谱块
         $k, k + Bw^v - 1$ 
(26)   return  $F \leftarrow$  SUCCESS
(27)   取消所有 VN 和物理节点标记
(28) return  $F \leftarrow$  FAILURE

```

性, 分别在具有 14 个节点 23 条链路的 DT (Deutsche Telecom) 拓扑和具有 50 个节点 141 条链路的大型随机拓扑下进行仿真验证。底层节点计算资源容量和链路带宽资源容量分别为 200 units 和 200 FS, 每个 VON 业务的 VN 计算资源请求大小和 VOL 带宽请求大小均在 1~10 之间随机选择。在 DT 拓扑中, VON 业务的虚拟节点数为 3 或 4; 在随机拓扑中, VON 业务的虚拟节点数在 2~9 之间随机选择, 任意 VN 对之间有边连接的概率为 0.5。在动态场景下, VON 业务到达服从泊松分布, 持续时间服从负指数分布。

仿真指标选取业务阻塞率 (Request Blocking

Probability, RBP)、带宽阻塞率 (Bandwidth Blocking Probability, BBP)、平均消耗的频隙数以及平均最长光路跳数。对比算法选取重要性、对齐性和连续性感知的 iACT-VNE<sup>[12]</sup> 和基于 LRC 的 LaLRC-LAG<sup>[6]</sup>。为了让 iACT-VNE 具有可对比性, 对该算法也采用分层辅助图, 修改后的算法记为 iACT-VNE-LAG。同时, 也仿真了仅考虑分层辅助图和节点重要性而不采用节点-链路协同映射的透明虚拟光网络映射策略, 记为 TVONE-NI。

#### 4.2 仿真结果与分析

图 4 表示不同网络负载下 4 种算法的业务阻塞率性能对比图。由图 4 可知, LaLRC-LAG 因为在节点映射阶段具有一定盲目性, 致使在链路映射阶段消耗了大量频谱资源, 造成后来 VON 业务很容易因频谱资源不足而被阻塞。故其 RBP 性能最差。对于 iACT-VNE-LAG, 因为只考虑链路频谱碎片和候选物理节点到所有已被映射物理节点距离, 不能保证在链路映射阶段 VOL 所映射物理光路边分离后, 所有 VOL 所映射物理光路还是最短的。故 iACT-VNE-LAG 获得较好的 RBP。而所提 TVONE-NI 和 NIACNLE 算法的 RBP 性能在 2 种不同网络拓扑中均优于对比算法。这是由于 2 种算法从节点映射紧凑性和光路频谱碎片 2 个角度评估节点重要性, 在节点映射时, 尽可能避免 2 个相邻 VN 映射到 2 个相距甚远物理节点上, 减轻网络频谱碎片。此外, NIACNLE 还采用节点-链路协同映射策略, 保证了一个 VON 中所有 VOL 所映射物理光路都是最短的, 节约了宝贵的频谱资源, 所以获得最好 RBP。从图 4 中可看出, 随机拓扑的 RBP 性能优于 DT 拓扑, 因为随机拓扑网络规模比较大, 能为 VOL 找到更多传输光路, 提高 VOL 映射成功率。

图 5 表示不同网络拓扑场景下, 4 种算法带宽阻塞率性能随着网络负载的变化情况。随着网络负载的增加, 所有算法的 BBP 性能变得越来越差。这是由于网络中因不能满足资源约束条件而被阻塞的 VON 业务越来越多, 且大多为大带宽和强聚集性业务。而所提 2 种算法的 BBP 性能均优于对比算法。主要是因为本文在节点映射阶段动态评估节点的重要性, 增强了相邻 VN 所映射物理节点的紧凑性, 间接提高了 VOL 映射成功的概率, 增加了强聚集性业务被网络接纳的可能性。并且, 在评估节点重要性时, 还考虑了映射光路的频谱紧密度, 选择频谱紧密度好的光路作为映射光路, 提高了剩余频谱资源被后来业务所使用的概率。且 NIACNLE 通过采用节点-链路协同映射策略, 降低了节点映射成功而

链路映射失败的概率，从而获得了最优的 BBP 性能。相较于 DT 拓扑，所有算法的 BBP 在随机拓扑中更低。这是因为随机拓扑平均节点度数较大，聚集性较高，对强聚集性业务有很强的容纳能力。

图 6 表示不同网络负载下平均每个成功传输的 VON 业务所消耗频隙数。由图 6 可知，所提 NIACNLE 算法由于采用节点-链路-频谱分配三者协同的映射策略，总能使用跳数最少的物理光路作为 VOL 映射光路，故其消耗很少的频谱资源。同时，由于 NIACNLE 对聚集性高的和带宽请求大的 VON 业务有很强的接纳能力，而映射这些业务需要消耗过多的频隙数，故该算法平均消耗频隙数整体上多余 TVONE-NI。有趣的是，在 DT 拓扑中，所提 2 种算法在网络负载高于 90 Erlang 时出现先上升后下降现象。这是因为所提算法为了传输更多的 VON 业务，会搜索所有可能映射光路，而有些映射光路较长，会消耗较多的频谱资源，此解释能被其 RBP 佐证。在随机拓扑中，平均每个成功传输的 VON 业务所消耗频隙数大约是 DT 拓扑的 4~5 倍。其原因是随机拓扑中 VON 业务的平均虚拟节点数大于 DT 拓扑的平均虚拟节点数，VN 越多，需要映射的 VOL 越多，从而会消耗更多的频谱资源。

图 7 表示不同网络负载下平均每个成功传输的 VON 业务所映射最长物理光路跳数。LaLRC-LAG 由于没有考虑未映射节点与已映射节点的关联性，导致在链路映射阶段使用较长的物理光路作为映射

光路，从而性能最差。iACT-VNE-LAG 在节点映射时考虑了候选物理节点到所有已映射物理节点的距离，因而获得了较短的跳数。而所提 NIACNLE 算法不仅考虑了未映射节点与已映射节点的关联性，使得 2 个相邻 VN 映射到 2 个相近的物理节点上，且在每成功映射一对相邻 VN 时，立即映射他们之间的 VOL，在很大程度上保证了以最短物理光路作为 VOL 的映射光路，从而获得了最短的平均最长光路跳数。

### 5 结束语

本文研究了透明弹性光网络环境下虚拟光链路映射过长和频谱碎片问题，提出了一种节点重要性感知的节点-链路协同映射算法。考虑弹性光网络频谱分配约束条件，借鉴了传统分层辅助图的思想。为了减轻链路频谱碎片和降低 2 个相邻虚拟节点映射到 2 个相距甚远物理节点上的概率，设计了节点重要性度量准则，并提出一种节点-链路协同映射算法，降低了虚拟光网络业务被阻塞的概率，且减少了消耗的频谱资源。同时，所提算法的映射光路更短，保证了虚拟光网络业务的传输时延和用户体验。由于在评估节点重要性时忽略了每个特征对节点重要性的贡献程度。因此，在实际管理网络资源时，可以根据实际需要，给每个因子赋予不同的权重，从而获得更优的网络性能。

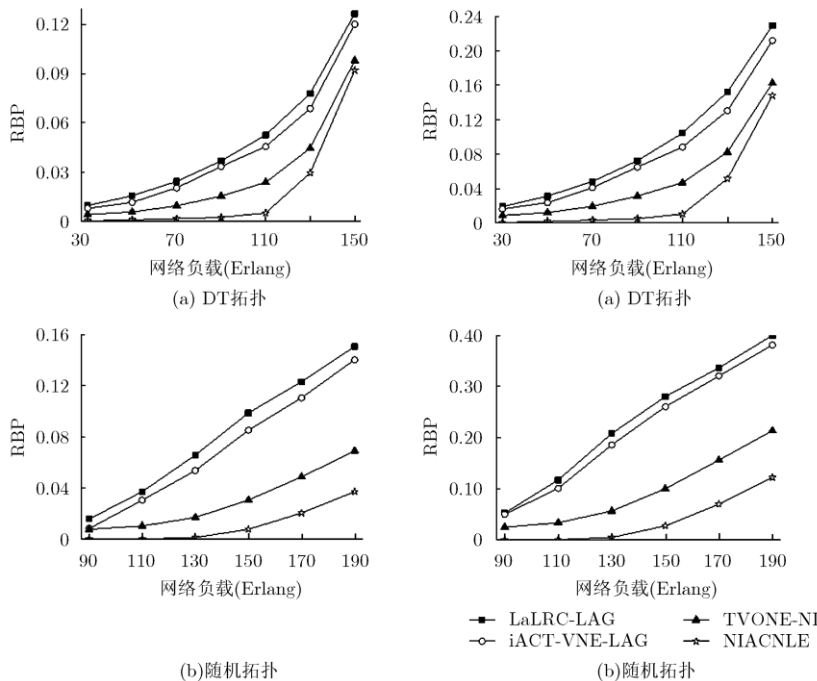


图4 DT与随机拓扑下4种算法RBP比较

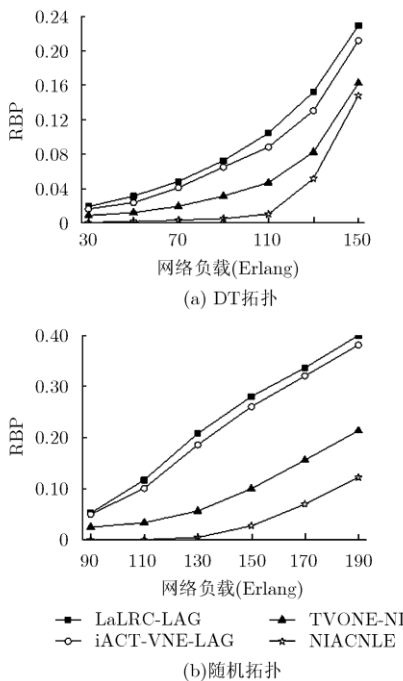


图5 DT与随机拓扑下4种算法BBP比较

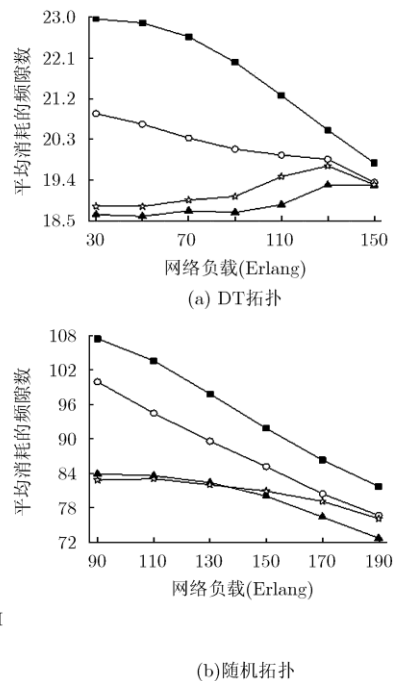


图6 DT与随机拓扑下4种算法消耗的频隙数对比

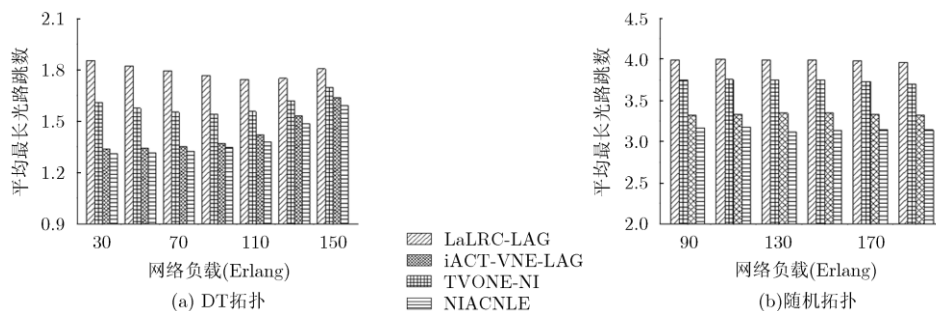


图7 DT与随机拓扑下4种算法BBP比较

## 参考文献

- [1] ÉMILE A, ALLOUNE N, FURDEK M, *et al*. Routing and spectrum assignment in elastic filterless optical networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(6): 3578-3592. doi: 10.1109/TNET.2016.2528242.
- [2] 刘焕淋, 方强, 雷芳. WDM 光网络中多播业务量疏导方法分析[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(3): 269-277. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.001.  
LIU Huanlin, FANG Qiang, and LEI Fang. Research on the dynamic multicast traffic grooming in WDM optical networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 24(3): 269-277. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.001.
- [3] 鲍宁海, 苏国庆, 陈静波. 恢复时间敏感的光网络混合通路保护算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 313-319. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005.  
BAO Ninghai, SU Guoqing, and CHEN Jingbo. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 29(3): 313-319. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005.
- [4] 刘焕淋, 徐一帆, 陈勇. 基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 892-898. doi: 10.11999/JEIT150842.  
LIU Huanlin, XU Yifan, and CHEN Yong. Spectrum-aware traffic split-merge resource allocation strategy for elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 892-898. doi: 10.11999/JEIT150842.
- [5] LIU H L, LV L, CHEN Y, *et al*. Fragmentation-Avoiding Spectrum Assignment Strategy Based on Spectrum Partition for Elastic Optical Network[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 790641301-13. doi: 10.1109/JPHOT.2017.2739750.
- [6] GONG L and ZHU Z Q. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(3): 450-460. doi: 10.1109/JLT.2013.2294389.
- [7] PAGÉS A, PERELLÓ J, SPADARO S, *et al*. Strategies for virtual optical network allocation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(2): 268-271. doi: 10.1109/LCOMM.2011.120211.111900.
- [8] GONG L, ZHAO W W, WEN Y G, *et al*. Dynamic transparent virtual network embedding over elastic optical infrastructures[C]. International Conference on Communications, Budapest, Hungary, 2013: 3466-3470. doi: 10.1109/ICC.2013.6655086.
- [9] 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. doi: 10.1007/s11432-016-5525-9.
- [10] CUI H Y, TANG S H, HUANG X, *et al*. A novel method of virtual network embedding based on topology convergence-degree[C]. International Conference on Communications Workshops, Budapest, Hungary, 2013: 246-250. doi: 10.1109/ICCW.2013.6649237.
- [11] LIU J, HUANG T, CHEN J Y, *et al*. A new algorithm based on the proximity principle for the virtual network embedding problem[J]. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 2011, 12(11): 910-918. doi: 10.1631/jzus.C1100003.
- [12] SHAKYA S and CAO X J. Transparent virtual network embedding in elastic optical networks[C]. IEEE 37th Sarnoff Symposium, Newark, USA, 2016: 71-76. doi: 10.1109/SARNOF.2016.7846768.
- 刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络。  
吕磊: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为弹性光网络路由与频谱分配。  
陈勇: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为光通信技术、传感检测等。  
蔚承英: 女, 1973年生, 讲师, 研究方向为光通信技术应用、信号处理。  
胡浩: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为弹性光网络路由与频谱分配。