

## 节点中介性和频谱离散度感知虚拟光网络生存性协同映射

刘焕淋\*<sup>①</sup> 胡会霞<sup>①</sup> 陈勇<sup>②</sup> 温濛<sup>①</sup> 王展鹏<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:** 虚拟网络的映射策略影响弹性光网络(EON)资源可用性和网络生存性。该文提出一种基于节点间距离和频谱离散度感知的虚拟光网络生存性协同映射(CM-DSDA)算法,研究节点计算资源和拓扑位置中介性的光节点排序策略,设计频谱离散度方法评价链路频谱碎片化程度。在虚拟链路的生存性映射中,选择邻接已映射节点中消耗频隙数少且频谱离散度低的工作光路和保护光路协同映射虚拟网络。仿真结果表明所提算法能有效地提高EON的频谱占用率和减少带宽阻塞率。

**关键词:** 虚拟光网络;生存性协同映射;节点中介性;频谱离散度;频谱占用率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)09-2166-07

DOI: 10.11999/JEIT190543

## Survivability Coordinated Mapping Based on Node Centrality and Spectrum Dispersion Awareness for Virtual Optical Networks

LIU Huanlin<sup>①</sup> HU Huixia<sup>①</sup> CHEN Yong<sup>②</sup> WEN Meng<sup>①</sup> WANG Zhanpeng<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:** The mapping strategy of virtual network has important effect on the resource availability and survivability of the Elastic Optical Network (EON). A survivable virtual optical network Coordinated Mapping based on the Distance and Spectrum Dispersion Awareness (CM-DSDA) between nodes is proposed in the paper. A physical node weighted sorting strategy is studied, which not only considers the number of physical node computing resources, but also considers the location centrality of the physical nodes in the EON topology. And a method of spectrum dispersion is designed to evaluate the link's spectrum fragmentation. During the virtual link's survivability mapping, the working and protection optical paths adjacent the position of the mapped physical nodes with the minimum number of spectrum usage and the lowest frequency spectrum dispersion are selected to coordinated mapping the virtual optical networks. Simulation results show that the CM-DSDA can effectively increase the EON's spectrum utilization and reduce bandwidth blocking probability.

**Key words:** Virtual optical network; Survivable coordinated mapping; Node centrality; Spectrum dispersion; Spectrum usage ratio

### 1 引言

随着云计算、移动互联网、未来网等数据应用快速发展,网络中海量数据的交换和不确定性流向

对传统的带宽固定、调制格式单一的波分复用光网络提出了挑战<sup>[1]</sup>。弹性光网络(Elastic Optical Network, EON)通过在光域采用正交子载波,通过引入带宽可变的光器件和智能的光交换机制<sup>[2]</sup>,配置网络资源更加灵活<sup>[3,4]</sup>。而网络虚拟化被证明是解决互联网“僵化”和设备资源利用率低的有力手段,也增强了EON的灵活扩展性和可控可管性,满足用户多样化服务需求<sup>[5,6]</sup>。但是,虚拟网络的映射涉及网络对拓扑、资源以及位置等多约束,而EON中路由与频谱分配需遵循严格的频谱一致性和频谱连续性约束条件,使虚拟光网络映射更加困难<sup>[7,8]</sup>。虚

收稿日期: 2019-07-18; 改回日期: 2020-07-08; 网络出版: 2020-07-22

\*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51977021); 重庆市科技局自然科学基金(CSTC2019jcyj-msxmX0613)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(51977021), The Natural Science Foundation Project of Chongqing Science and Technology Commission (CSTC2019 jcyj-msxmX0613)

拟网络协同映射可以提高资源利用率，但是，光路频谱碎片化问题还是不能有效解决<sup>[9]</sup>。

虚拟网络生存性映射是提高光网络抗毁坏和保证虚拟网络容灾能力的有效方法<sup>[10,11]</sup>。文献[11]提出预置备份资源，通过群搜索优化算法寻找最优的虚拟光网络的生存映射方法，并动态地调整光网络的工作光路和保护光路的资源比例。文献[12]提出基于混合策略的启发式光纤链路备份生存性算法，由于该算法没有考虑备份资源的冗余量，降低了资源利用率。文献[13]研究了在物理层光节点或链路失效后，对失效影响的虚拟节点或虚拟链路进行业务迁移和重映射，但是当物理光网络的空闲资源较少时，失效虚拟光网络业务恢复的成功率较低。文献[14]研究了生存性虚拟网络映射中的专用保护问题，虽然业务恢复时间快，但是消耗的光网络备份频谱资源过多。文献[15]提出利用共享保护的虚拟光网络映射方法提高虚拟网络生存性，但是，该方法的保护带宽资源共享度较低。为提高保护带宽共享度，文献[16]针对专用保护资源冗余度高和链路故障风险的问题，设计了考虑安全性感知的差异化虚拟光网络的映射方法和光路分割时延约束的保护策略。文献[17]提出最大需求资源的虚拟节点优先映射到资源最多光节点(Largest Computing resources requirement versus the Largest Computing resource, LCLC)的最短光路映射算法，提高虚拟节点映射成功率。进而，文献[18]针对光网络单元的概率故障问题，提出对大带宽需求请求采用链路映射最短距离算法(Largest Bandwidth requirement of virtual links versus the Shortest Distance, LBSD)，将带宽需求最多的虚拟链路映射到EON中距离最短的光路上，但是，该方法可能将两条临近虚拟链路映射到光网络很远的位置，引起故障概率小的链路产生重载现象，浪费更多频谱资源。

为此，本文设计了基于节点间距离和频谱离散度感知的虚拟光网络生存性协同映射(Coordinated Mapping based on the Distance and Spectrum Dispersion Awareness between nodes, CM-DSDA)算法，设计反映光节点剩余计算资源和在光网络拓扑中的地理位置中心特性的节点排序规则，使相邻虚拟节点映射到光网络的较短光路节点上。同时，计算候选工作和保护光路的链路频谱离散度，选择消耗频隙数少且频谱离散度低的光路协同映射虚拟链路，提高光网络带宽利用率和降低带宽阻塞率。

## 2 虚拟光网络生存性映射模型

EON拓扑抽象为 $G^S = (N^S, E^S, C^S, A^S)$ ， $N^S$ 和 $E^S$ 分别表示EON节点集和光纤链路集， $C^S$ 和 $A^S$ 分

别表示EON节点可用计算资源集合与光纤链路的可用带宽集合<sup>[14,16]</sup>；虚拟网络表示为 $G^V = (N^V, E^V, C^V, A^V)$ ， $N^V$ 和 $E^V$ 分别表示虚拟节点集合与虚拟链路集合， $C^V$ 和 $A^V$ 分别表示各虚拟节点的计算资源需求集合与各虚拟链路带宽需求集合。在虚拟节点映射时，除了满足计算资源需求外，还要满足约束条件为

$$\phi_n^j \cdot C_j^V \leq C_n^S, \forall j \in N^V, n \in N^S \quad (1)$$

$$\sum_{n \in N^S} \phi_n^j = 1, \forall j \in N^V; \sum_{j \in N^V} \phi_n^j \leq 1, \forall n \in N^S \quad (2)$$

式(2)中，若虚拟节点 $j$ 可以映射到光网络节点 $n$ ，则 $\phi_n^j = 1$ ，反之 $\phi_n^j = 0$ 。

虚拟链路映射的候选光路可用带宽需要满足虚拟链路带宽需求。若虚拟节点 $i, j$ 分别映射在光节点 $m, n$ 上，则虚拟链路 $(i, j)$ 映射在EON的一条满足带宽需求和频谱一致性、连续性的最短光路 $(m, n)$ 上<sup>[14]</sup>，虚拟链路映射需要满足的约束条件为

$$\phi_{m,n}^{i,j} \cdot A_{(i,j)}^V \leq A_{(m,n)}^S, \forall (i, j) \in E^V, \forall (m, n) \in E^S \quad (3)$$

式(3)中， $\phi_{m,n}^{i,j}$ 是布尔变量，如果虚拟链路映射成功，则 $\phi_{m,n}^{i,j} = 1$ ，否则， $\phi_{m,n}^{i,j} = 0$ 。 $A_{(i,j)}^V$ 表示虚拟链路 $(i, j)$ 需求带宽， $A_{(m,n)}^S$ 表示满足频谱一致性和连续性的最短光路 $(m, n)$ 的可用带宽值。

在图1(a)中，节点旁括号内数值表示该节点的可用计算资源数目，链路上的数值表示节点间的光纤链路距离，单位为km，设链路的可用带宽足够大。图1(b)为一个虚拟网络，标示在虚拟节点和链路旁边的数字分别表示虚拟节点资源需求数目和虚拟链路带宽需求数目。按式(1)–式(3)所述的虚拟网络映射基本约束条件，采用满足计算资源需求能力优先的原则映射虚拟节点，则图1中虚拟网络节点映射结果为： $\{C \rightarrow 5, B \rightarrow 1, A \rightarrow 2\}$ ；然后，若以满足虚拟网络的链路带宽需求条件下的最短光路优先原则映射虚拟链路，则虚拟链路映射的光路分别为： $\{(B, C) \rightarrow (1-3-5); (A, B) \rightarrow (2-1); (A, C) \rightarrow (2-4-5)\}$ ，如图2所示。

为了避免EON因为链路的故障或失效，导致虚拟网络被中断，需要设计生存性的虚拟网络映射，这样，即使发生链路故障，虚拟网络能够从链路故障状态快速恢复连接。而生存性虚拟网络映射需要同时映射工作光路和保护光路。

设 $WP_{r,i}(m, n)$ 表示第 $r$ 个虚拟网络第 $i$ 条虚拟链路映射在光节点 $m$ 和 $n$ 之间的工作光路链路集， $PP_{r,i}(m, n)$ 为相应保护光路的链路集。 $WP_e^{r,i} = 1$ 表示虚拟链路 $i$ 映射的工作光路通过链路 $e$ ， $PP_e^{r,i} = 1$ 则表示保护光路通过光纤链路 $e$ 。同一条虚拟链路

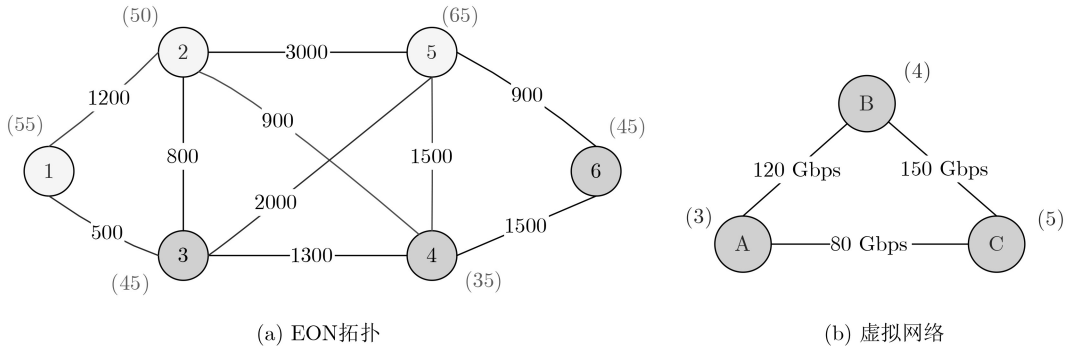


图1 网络拓扑示意图

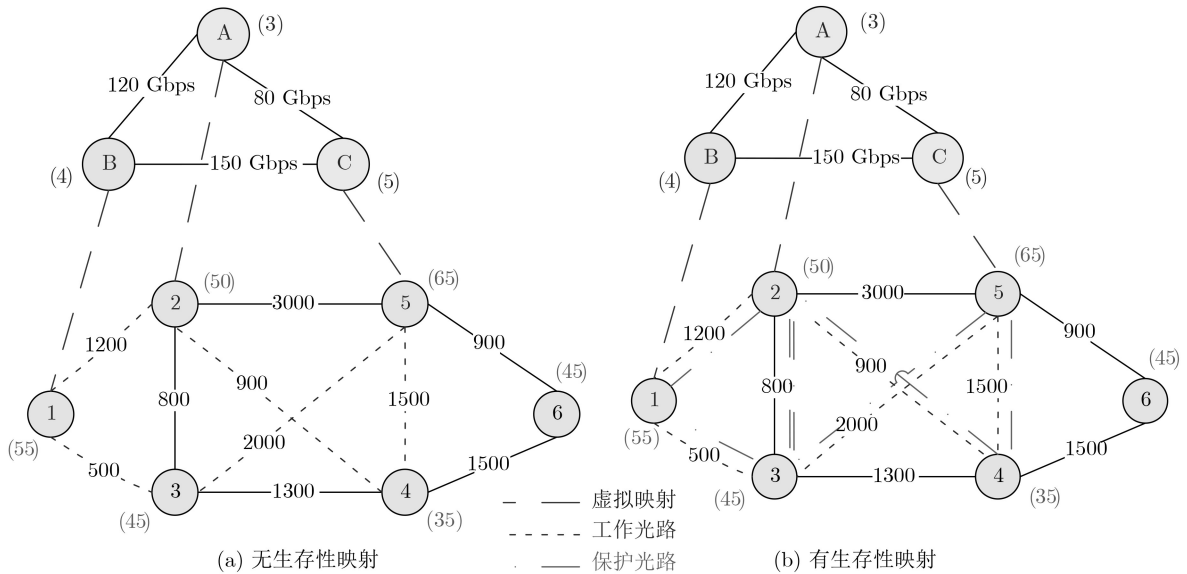


图2 光虚拟网络映射示意图

映射的工作光路和保护光路需满足链路不相交约束条件，即

$$\begin{aligned}
 WP_e^{r,i} + PP_e^{r,i} &\leq 1, \forall r \in R, \forall e \in E^s, \\
 WP_e^{r,i} &\in (0, 1), PP_e^{r,i} \in (0, 1)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

根据最短跳路径算法和式(4)条件，在EON中确定各虚拟链路映射的工作光路和保护光路，不同虚拟链路映射的工作光路间、保护光路间可以共享物理链路带宽资源。根据上述图1的虚拟映射确定的工作光路如图2(a)所示，在图2(a)中寻找虚拟请求的保护光路，如图2(b)所示。其中，工作光路1-2的保护光路是1-3-2；工作光路2-4-5的保护光路是2-3-5；工作光路1-3-5的保护光路是1-2-4-5。可以发现，工作光路1-2和保护光路1-2-4-5共享物理链路1-2带宽资源，工作光路2-4-5和保护光路1-2-4-5共享物理链路2-4和4-5带宽资源，工作光路1-3-5和保护光路1-3-2共享物理链路1-3带宽资源。

由于EON的节点计算能力和链路带宽有限，为了提高虚拟网络生存性映射成功率，减少虚拟链路映射的资源消耗开销，将虚拟链路映射到跳数和

消耗频谱更少的工作光路和保护光路是必要的。为此，本文设计综合评估光节点位置中心性和光路频谱离散度感知的生存性虚拟网络映射算法。

### 3 节点间距离和频谱离散度感知的虚拟光网络生存性协同映射(CM-DSDA)算法

#### 3.1 光节点排序映射方法

满足虚拟节点映射约束条件式(1)、式(2)条件下，设计虚拟节点A资源需求评价公式为<sup>[9]</sup>

$$H(N_A^V) = C_A^V \times \sum_{(A,i) \in E^V} B_{(A,i)}^V, A \in N^V \tag{5}$$

式(5)中， $C_A^V$ 表示虚拟节点A对计算资源的需求值， $B_{(A,i)}^V$ 表示与虚拟节点A关联的虚拟链路(A, i)的带宽需求。为了将虚拟链路映射到更少跳数的光路上，减少虚拟网络映射消耗的频谱资源，兼顾光节点的资源丰富性和位置拓扑中心性，光节点n的中介值为

$$\begin{aligned}
 H(N_n^S) &= \alpha \times C_n^S + (1 - \alpha) \times N_{n-P} \\
 &\times \sum_{(n,m) \in P_n, m \in N^S} \frac{1 + H(n,m)}{d(n,m)}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

式(6)中,  $\alpha$ 为光节点的可用资源权重因子,  $C_n^S$ 表示光节点 $n$ 的剩余可用计算资源值,  $P_n$ 表示通过光节点 $n$ 的光路集合,  $d(n, m)$ 表示某条光路( $n, m$ )的距离,  $H(n, m)$ 表示某条光路( $n, m$ )的跳数,  $N_{n-P}$ 表示通过光节点 $n$ 的已映射光路数目。式(6)的计算值越大, 表示光节点 $n$ 有较多的可用资源和在EON拓扑中处于较中心的地理位置特性。

### 3.2 虚拟节点和链路协同映射方法

若虚拟节点 $N_i^V$ 已经成功映射在光节点 $N_m^S$ 上。当映射下一个虚拟节点 $N_j^V$ 时, 首先在EON中选择满足 $N_j^V$ 计算资源需求的光节点并加入集合 $BN_j^S = \{N_a^S, N_b^S, \dots, N_k^S\}$ 中, 用最短跳光路算法计算光节点 $N_m^S$ 与集合 $BN_j^S = \{N_a^S, N_b^S, \dots, N_k^S\}$ 中每节点之间的最短跳光路, 保存在光路集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 中。若映射候选节点的最短跳光路不止一条, 则对各光路用首选即中方法预分配频谱, 对每条光路上的各光纤链路频谱分配需要满足频谱一致性和连续性约束条件, 计算光路集合中每条链路的频谱离散度。例如, 对于光路 $p_k$ , 按首次命中的方法为光路分配可用频谱块 $SB_i$ , 若该光路上有 $J$ 个空闲频谱块和 $L$ 条链路, 光路的光纤链路集合记为 $L^{P_k}$ , 则链路 $l$ 的频谱离散度 $F_l^{P_k}$ 计算方法为

$$F_l^{P_k} = \frac{1}{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (FS_{j,i2}^l - FS_{j,i1}^l) \times \sum_{j=1}^J (FS_{j,i2}^l - FS_{j,i1}^l + 1)}, \quad l \in L^{P_k} \quad (7)$$

式(7)中,  $FS_{j,i1}^l$ 和 $FS_{j,i2}^l$ 分别表示光链路 $l$ 的第 $j$ 个空

闲频谱块的频隙索引号起始值 $i1$ 和结束值 $i2$ 。 $F_l^{P_k}$ 值越大, 代表链路 $l$ 可用频谱的离散程度越大, 链路上的频谱碎片越多。

对 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 中的各光路, 根据式(7)计算各光路的频谱离散度, 选择各光路频谱离散度最大的链路 $l_{\max}^{P_k} = \text{Max}_{l \in P_k} \{F_l^{P_k}\}$ 构成重载链路集合 $\{l_{\max}^{P_1}, l_{\max}^{P_2}, \dots, l_{\max}^{P_k}\}$ , 选择光路重载链路集合中频谱离散度最小链路 $L_{\max} = \text{Min}\{l_{\max}^{P_1}, l_{\max}^{P_2}, \dots, l_{\max}^{P_k}\}$ 对应的光路, 作为虚拟链路( $N_i^V, N_j^V$ )映射的光路, 该光路的端点即为虚拟节点 $N_i^V$ 和 $N_j^V$ 协同映射的光节点。

如果已映射光节点大于1个, 则拟映射虚拟节点 $N_j^V$ 的每一个候选光节点到已映射光节点间存在多条最短光路, 计算每个候选节点的所有最短跳光路的链路频谱离散度最大值总和, 选择频谱离散度总和最小对应的候选光节点映射虚拟节点 $N_j^V$ 。

### 3.3 CM-DSDA算法步骤

CM-DSDA算法首先将资源需求排序第1虚拟节点映射到资源-位置排序第1光节点上。在映射剩余的虚拟节点时, 若有多个光节点满足其计算资源的要求, 则计算已经映射的光节点与拟映射的候选光节点之间的所有最短跳光路, 选择跳数最少的光路及对应的候选光节点协同映射虚拟链路和虚拟节点。如果候选光节点有多个, 则计算各最短跳光路重载链路, 选择频谱离散程度最低的光路映射虚拟链路。CM-DSDA算法步骤如表1所示。

## 4 仿真性能与分析

### 4.1 仿真环境及评价指标

为了验证所提算法性能, 分别在如图3所示的

表1 CM-DSDA算法

输入: EON拓扑 $G^S = (N^S, E^S, C^S, A^S)$ , 虚拟网络请求 $G^V = (N^V, E^V, C^V, A^V)$ 。

输出: 虚拟网络生存性映射的节点、工作光路、保护光路和频谱分配结果。

- 步骤1 根据式(5)计算虚拟节点权值, 根据式(6)计算光节点的权值, 降序排序虚拟节点和光节点在虚拟节点集合 $VNR\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 和光节点集 $SNR\{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 中。虚拟节点数 $N$ , 光节点数 $M$ , 若 $N > M$ , 阻塞该虚拟网络请求, 否则, 设 $n=1$ ;
- 步骤2 根据约束式(1)和式(2), 根据首选即中原则判断光节点 $s_i$ 的剩余计算资源数是否满足虚拟节点 $v_n$ 需求,  $s_i \in SNR$ ,  $i=1, 2, \dots, M$ , 若满足, 将 $v_n$ 映射在 $s_i$ 上, 并在 $SNR$ 集合中删除已映射的光节点 $s_i$ 。若 $N=1$ , 输出虚拟网络映射结果, 否则,  $n=n+1$ , 转步骤3;
- 步骤3 在EON中, 计算所有候选光节点与已经映射光节点之间满足式(3)约束的虚拟链路映射的最短跳光路, 判断每条最短光路是否满足虚拟网络需求和光路上个链路频谱一致性和连续性的可用频谱块, 若满足, 光路加入候选映射的光路集合 $P$ 中;
- 步骤4 在集合 $P$ 中, 对每条最短光路 $p_k$ , 采用首次命中的频谱分配方式进行光路的满足频谱一致性和连续性的频谱预分配; 根据式(7)计算该光路的频谱离散度并确定光路的重载链路 $\max\{F_l^{P_k}\}$ , 加入重载链路集合 $\{l_{\max}^{P_1}, l_{\max}^{P_2}, \dots, l_{\max}^{P_k}\}$ 中, 根据频谱离散度大小升序排列重载链路集合;
- 步骤5 选择集合 $\{l_{\max}^{P_1}, l_{\max}^{P_2}, \dots, l_{\max}^{P_k}\}$ 中的第1条链路所对应光路 $p_k$ , 将其作为虚拟链路的映射光路, 则该映射光路的另一端点即是虚拟节点 $v_n$ 映射的光节点, 并在 $SNR$ 集合中删除已映射光节点 $s_i$ ;
- 步骤6 在EON中, 通过边分离的最短光路算法确定满足式(4)约束的映射光路的生存性保护光路, 判断保护光路是否有满足虚拟网络资源需求和满足光路上各链路的频谱一致性和连续性的可用频谱块, 若有, 转至步骤7; 若无, 则阻塞该虚拟网络请求;
- 步骤7 分别用首次命中与频谱最大共享度的频谱分配方式, 为工作光路和保护光路分配满足频谱一致性和连续性的频谱资源, 更新映射后光节点剩余计算资源, 若 $n < N$ , 转步骤2;
- 步骤8 输出虚拟网络映射结果。

14个节点21条链路的NSFNET网络和24个节点43条链路的USNET网络中进行性能仿真<sup>[17-19]</sup>,每个光节点有400单位计算资源,每条光纤链路可用带宽为358个频隙。虚拟网络服从参数为 $\lambda$ 的泊松分布,虚拟节点数目为[3, 5]个,每个虚拟节点需求计算资源随机分布在[5, 10]间,虚拟节点间的链路连通概率分别为0.5,0.75和1,每条虚拟链路带宽在{12.5 Gbps, 25 Gbps, 50 Gbps, 100 Gbps}中随机产生,虚拟网络持续时间服从负指数分布。将本文CM-DSDA算法分别与LCLC算法<sup>[17]</sup>和LBSD算法<sup>[18]</sup>进行带宽阻塞率和频谱占用率性能比较。同时,为验证本文所提光节点排序映射的合理性,我们在LCLC算法基础上增加了光节点资源-位置权重排序方法,命名为LCLC-DL算法。本文所有算法按光路距离可选的传输光信号的调制格式为BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM,且根据光路距离长度约束,尽量选择光信号容忍的最高调制等级<sup>[17,19]</sup>。

#### 4.2 仿真结果分析

图4为所提CM-DSDA和我们基于LCLC算法改进的LCLC-DL算法在采用式(6)排序候选映射光节点时不同 $\alpha$ 值和不同负载下的带宽阻塞率对比,图标中算法后括号内数字为网络负载。式(6)的 $\alpha$ 是调节光节点资源-位置的权重因子, $\alpha$ 值越大表明在映射中考虑光节点可用计算资源的权重越大,相反,则考虑光节点地理位置中心性的权重越大。由图4

可知,2种算法在不同负载下,当 $\alpha < 0.1$ 时,随着 $\alpha$ 减小,带宽阻塞率略有增加;当 $\alpha > 0.1$ 时,当 $\alpha$ 增加时,网络的带宽阻塞率也明显增加,说明虚拟节点映射位置对阻塞率影响较大。比较图4(a)和图4(b),发现在相同的 $\alpha$ 取值下,2种算法在USNET网络中获得最低的带宽阻塞率,而在NSFNET网络中的阻塞率较高,这是由于USNET网络的节点平均度数最高,网络的连通度最高,而且USNET网络的节点平均中介值较大,中心性较好,由于本文所提的CM-DSDA在虚拟节点映射中,不仅要考虑光节点的剩余计算资源大小,而且要考虑节点所处的地理位置中心性的因素,并且位置因素对带宽阻塞率的影响更大,因此,节点中心性较好的USNET网络能获得相同 $\alpha$ 值和相同业务负载下最低的带宽阻塞率。从图4(a)和图4(b)中还可以发现,当 $\alpha$ 取值在0.1左右时,2种算法都可以获得较低的带宽阻塞率。因此,在下面仿真中,CM-DSDA和LCLC-DL算法中的 $\alpha$ 取值均为0.1。

图5(a)和图5(b)为4种算法在2种网络中不同负载下的带宽阻塞率性能对比。可以看出,4种算法的阻塞率都随着网络负载增加而增加。在相同负载下,LCLC-DL算法相对于LCLC算法具有较低的阻塞率,这是因为在虚拟节点映射过程中,LCLC-DL算法不仅考虑光节点剩余计算资源大小,还考虑光节点中介性位置因素,能将虚拟节点映射到计算资

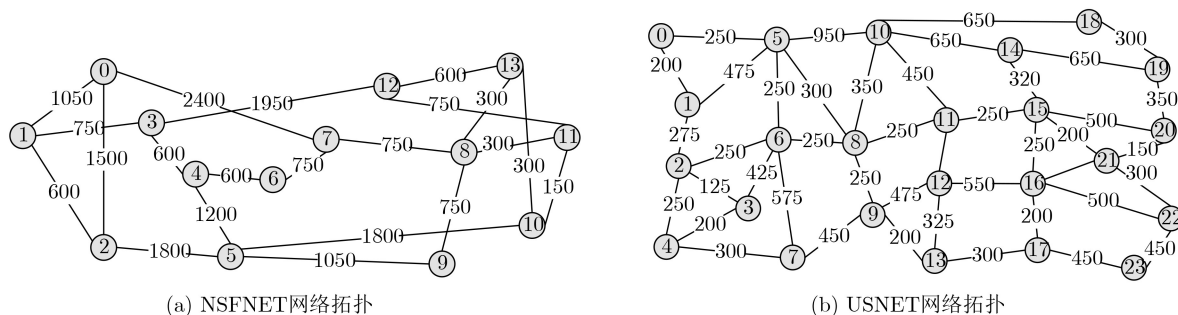


图3 仿真网络拓扑

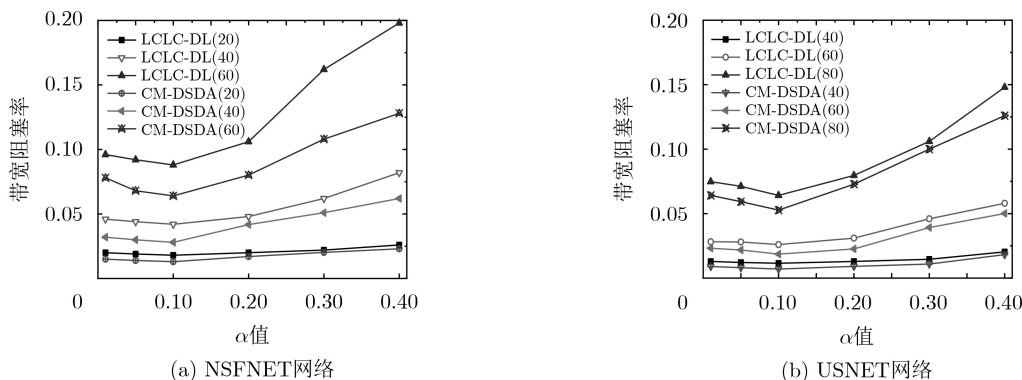


图4 不同 $\alpha$ 和负载下两种算法的带宽阻塞率

源充足且中心位置较优的光节点上。CM-DSDA算法相对LBSD, LCLC和LCLC-DL算法具有最低的阻塞率, 因为CM-DSDA算法将虚拟节点排序映射到资源和中心位置较优的光网络节点上, 且虚拟链路映射时兼顾光路的跳数和链路的频谱离散度情况, 选择频谱离散度低的光路映射, 从而提高虚拟网络生存性协同映射成功率和资源利用率。此外, 在负载相同时, NSFNET网络比USNET网络的带宽阻塞率略高, 这是由于NSFNET网络节点的平均度数小于USNET网络, 网络连通度比USNET差, 光节点在网络的位置中心性比USNET差。

图6为4种算法在2种网络中不同负载下的频谱资源占用率性能对比, 这里的频谱占用率是指成功映射的虚拟网络消耗频谱资源与光网络总频谱资源

的比值。由图6(a)和图6(b)可知, 在不同的网络图谱中, LCLC-DL算法相对于LCLC算法都具有较高的频谱资源占用率, 因为LCLC-DL算法将使用式(6)选择候选映射的光节点, 保证虚拟节点映射到光网络较优位置和具有充足资源的光节点, 提高了虚拟网络映射成功率。CM-DSDA算法相对其他算法具有最高的频谱占用率, 这是因为LBSD算法仅考虑将虚拟网络的大带宽需求虚拟链路映射到光网络距离较短的光路上, 可能会造成将中小带宽需求的虚拟链路被映射到光网络距离较远的位置, 占用更多频谱资源; 而CM-DSDA算法在虚拟链路映射时, 选择频谱离散度最低和路径跳数更少的光路映射, 有利于均衡链路负载和减少链路上频谱资源占用率, 提高了虚拟网络映射成功率。

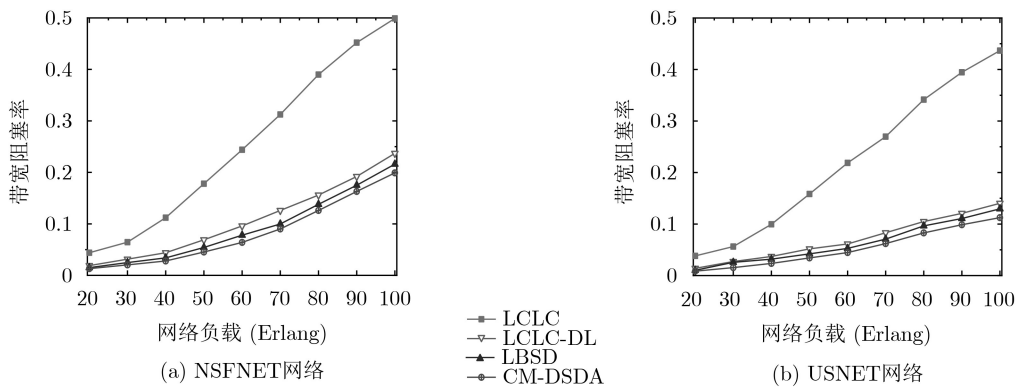


图5 不同负载下4种算法的带宽阻塞率

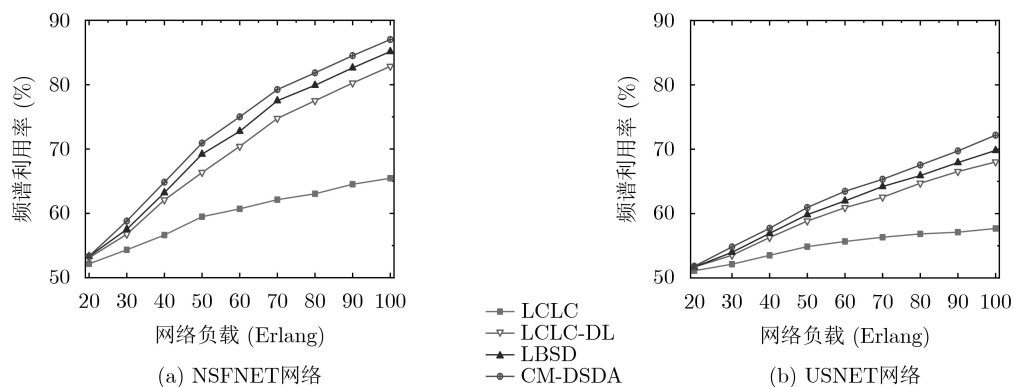


图6 不同负载下4种算法的频谱利用率

### 5 结论

本文研究了EON中生存性虚拟网络映射的问题, 提出了基于节点间距离和频谱离散度感知的虚拟光网络协同映射(CM-DSDA)算法, 设计节点资源-位置中心性排序拟映射的光节点, 并提出频谱离散度感知的虚拟网络生存性协同映射算法, 提高了虚拟光网络的映射效率。随着互联网和各种数据应用的发展, 生成性虚拟网络有效映射是保证租户

虚拟网络传输性能和提高网络有限数目资源利用率的有效途径。

### 参考文献

[1] 刘韵洁, 张娇, 黄韬, 等. 面向服务定制的未来网络架构[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(1): 1-8. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.001.  
LIU Yunjie, ZHANG Jiao, HUANG Tao, et al. Service customized future network architecture[J]. *Journal of*

- Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2018, 30(1): 1–8. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.001](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.001).
- [2] HADI M and PAKRAVAN M R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(2): 90–103. doi: [10.1364/JOCN.10.000090](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000090).
- [3] LIU Huanlin, DU Jundan, CHEN Yong, *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. doi: [10.1016/j.yofte.2018.08.021](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.08.021).
- [4] IYER S. Retracted article: Performance benefits of regeneration flexibility and modulation convertibility in elastic optical networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2018, 69(1): 167. doi: [10.1007/s11235-017-0378-0](https://doi.org/10.1007/s11235-017-0378-0).
- [5] GUO Xiaojin, HUANG Jun, LIU Huanlin, *et al.* Efficient P-cycle combination protection strategy based on improved genetic algorithm in elastic optical networks[J]. *IET Optoelectronics*, 2018, 12(2): 73–79. doi: [10.1049/iet-opt.2016.0177](https://doi.org/10.1049/iet-opt.2016.0177).
- [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: 自然科学版, 2018, 30(2): 159–166. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2018.02.002](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2018.02.002).  
SHI Yingjie, CHEN Qianbin, YANG Xixi, *et al.* Virtual resource allocation algorithm of network slice based on auction[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2018, 30(2): 159–166. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2018.02.002](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2018.02.002).
- [7] LIU Huanlin, XIONG Cuilian, CHEN Yong, *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. doi: [10.1016/j.yofte.2018.01.004](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.01.004).
- [8] WANG Wei, ZHAO Yongli, HE Ruiying, *et al.* Continuity aware spectrum allocation schemes for virtual optical network embedding in elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 29: 28–33. doi: [10.1016/j.yofte.2016.01.008](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.01.008).
- [9] 刘焕淋, 吕磊, 陈勇, 等. 节点重要性感知的透明虚拟光网络协同映射策略[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1978–1984. doi: [10.11999/JEIT171096](https://doi.org/10.11999/JEIT171096).  
LIU Huanlin, LÜ Lei, CHEN Yong, *et al.* Node-importance aware coordinated embedding strategy for transparent virtual optical network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1978–1984. doi: [10.11999/JEIT171096](https://doi.org/10.11999/JEIT171096).
- [10] 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](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005).  
BAO Ninghai, SU Goqing, and CHEN Jingbo. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2017, 29(3): 313–319. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005).
- [11] XIAO Xiancui and ZHENG Xiangwei. A proposal of survivable virtual network embedding algorithm[J]. *Journal of High Speed Networks*, 2016, 22(3): 241–251. doi: [10.3233/JHS-160546](https://doi.org/10.3233/JHS-160546).
- [12] RAHMAN M R and BOUTABA R. SVNE: Survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2013, 10(2): 105–118. doi: [10.1109/TNSM.2013.013013.110202](https://doi.org/10.1109/TNSM.2013.013013.110202).
- [13] SOUALAH O, AITSAADI N, and FAJJARI I. A novel reactive survivable virtual network embedding scheme based on game theory[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2017, 14(3): 569–585. doi: [10.1109/TNSM.2017.2717019](https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2717019).
- [14] CHOWDHURY S R, AHMED R, KHAN M M A, *et al.* Dedicated protection for survivable virtual network embedding[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2016, 13(4): 913–926. doi: [10.1109/tnsm.2016.2574239](https://doi.org/10.1109/tnsm.2016.2574239).
- [15] WANG Yuyu, LI Xin, GUO Bingli, *et al.* Survivable virtual optical network mapping in elastic optical networks with shared backup path protection[C]. The 25th IEEE Wireless and Optical Communication Conference, Chengdu, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/WOCC.2016.7506633](https://doi.org/10.1109/WOCC.2016.7506633).
- [16] 刘焕淋, 林振宇, 王欣, 等. 弹性光网络中基于安全性感知的差异化虚拟光网络的映射策略[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 424–432. doi: [10.11999/JEIT180335](https://doi.org/10.11999/JEIT180335).  
LIU Huanlin, LIN Zhenyu, WANG Xin, *et al.* A diverse virtual optical network mapping strategy based on security awareness in elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(2): 424–432. doi: [10.11999/JEIT180335](https://doi.org/10.11999/JEIT180335).
- [17] CHEN Bowen, ZHANG Jie, XIE Weisheng, *et al.* Cost-effective survivable virtual optical network mapping in flexible bandwidth optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2398–2412. doi: [10.1109/JLT.2016.2530846](https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2530846).
- [18] YANG Hui, CHENG Lei, LUO Guangjun, *et al.* Survivable virtual optical network embedding with probabilistic network-element failures in elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 23: 90–94. doi: [10.1016/j.yofte.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.02.006).
- [19] LIU Huanlin, XIONG Qile, and CHEN Yong. Routing core and spectrum allocation algorithm for inter-core crosstalk and energy efficiency in space division multiplexing elastic optical networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 70453–70464. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2985422](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985422).
- 刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络。  
胡会霞: 女, 1997年生, 硕士生, 研究方向为生存光网络频谱路由。  
陈勇: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为光通信与传感检测技术。  
温濛: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为光通信和光网络。  
王展鹏: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为光网络资源分配。