

光路可靠性和频谱整合因子感知的 虚拟光网络生存性映射

刘焕淋¹, 胡会霞¹, 马敬¹, 陈勇², 王展鹏¹

(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: 针对多链路故障, 本文提出一种基于光路可靠性和频谱整合因子感知的空分复用弹性光网络中虚拟光网络生存性映射算法. 在虚拟节点映射时, 综合考虑物理节点属性的权重评估准则. 在虚拟链路映射时, 本文设计联合考虑频谱资源和可靠性的工作光路选择策略和基于频谱整合因子感知的工作光路频谱分区分配方法, 并设计提高保护带宽共享度的保护光路选择策略. 仿真结果显示, 本文算法提高了虚拟光网络请求接受率, 降低了带宽阻塞率.

关键词: 弹性光网络; 虚拟光网络; 可靠性; 频谱整合因子; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)04-0744-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200242

Survivable Embedding of Virtual Optical Network Based on Lightpath Reliability and Spectrum Integration Factor-Aware

LIU Huan-lin¹, HU Hui-xia¹, MA Jing¹, CHEN Yong², WANG Zhan-peng¹

(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: Aiming at the multi-link failure scenario, a survivable embedding based on lightpath reliability and spectrum integration factor-aware (SE-LRSIF) algorithm is proposed for virtual optical networks in space-division multiplexing elastic optical networks. During virtual node embedding, a weight evaluation criterion is designed to comprehensively consider the attributes of physical nodes. During virtual link embedding, a working lightpath selection strategy that jointly considers spectrum resources and reliability is designed, and a working lightpath spectrum partition allocation method based on spectrum integration factor-aware is designed to make network spectrum resources more integrated. Moreover, a protection lightpath selection strategy is designed to increase the protection bandwidth sharing. The simulation results show that the proposed SE-LRSIF algorithm can significantly improve the acceptance ratio of virtual optical network requests and reduce the bandwidth blocking probability.

Key words: elastic optical network; virtual optical network; reliability; spectrum integration factor; bandwidth blocking probability

1 引言

近年来, 各种新兴业务不断涌现, 传统的波分复用网络难以满足新业务的传输要求^[1]. 而基于正交频分复用技术的弹性光网络 (Elastic Optical Networks, E-ONs) 可将光频谱分割成更细粒度的频隙^[2], 能够灵活地分配频谱资源, 极大地提高了网络的频谱资源利用率, 被公认为是未来极具发展潜力的智能光网络^[3].

然而, 基于单模单芯光纤的 EONs 的可达容量很快在频域上已接近物理极限^[4]. 空分复用弹性光网络 (Spatial Division Multiplexing EONs, SDM-EONs) 能够从空间维度上扩展网络传输容量, 而且多芯光纤是一种能够有效实现空分复用的传输介质之一^[5]. 同时, 网络虚拟化技术能够抽象化物理网络资源, 使多个虚拟网络可以充分共享网络资源^[6]. 因此, 将网络虚拟化技术引入到 SDM-EONs 中可以进一步提升网络传输容量和

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-05-12; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. NSFC51977021, No. 61275077); 重庆市自然科学基金面上项目 (No. cstc2019jcyj-msxmX0613, No. 2020jcyj-msxmX0682)

频谱利用率.但是,SDM-EONs 与网络虚拟化技术的结合也会产生一些新的问题,最突出的问题是虚拟光网络映射问题^[7].此外,随着网络规模的不断扩大,光纤链路发生故障的概率大大增加,多链路故障比单链路故障带来更严重的经济损失^[8].因此,针对 SDM-EONs 中多链路故障,研究可靠的虚拟光网络映射问题具有重要的现实意义.

文献[9]设计了透明的虚拟光网络映射策略解决对透明虚拟光网络映射问题,而文献[10]则对文献[9]中所提算法进行改进,在虚拟节点映射时,考虑未映射虚拟节点与已映射虚拟节点间的邻近度,使两个相邻的虚拟节点映射到相距较近的物理节点上.文献[11]提出了一个动态业务场景下的辅助图模型,并且通过改变辅助图的边权值完成节点和链路映射.文献[12]主要研究单链路故障下的生存性虚拟光网络映射,并提出了相应的保护策略.文献[13]研究故障概率感知的虚拟光网络映射算法(Failure-Probability-Aware Virtual Optical Network Embedding, FPA-VONE),通过将虚拟光网络请求映射到发生故障概率小的光网络单元上,提高虚拟光网络映射的可靠性,但随着网络负载的增加,使可靠性较高的物理链路成为瓶颈链路.文献[14]引入时延差优化的路径分割策略,设计了基于安全性感知的差异化虚拟网络映射算法(Security Awareness-based Diverse Virtual Network Mapping, SA-DVNM),虽然该方法在一定程度上可以降低虚拟光网络请求的阻塞率,但路径分割会加重网络的频谱碎片化程度,增加虚拟光网络请求被阻塞概率.

基于以上分析,已有的文献很少研究多链路故障场景下 SDM-EONs 的虚拟光网络映射问题.本文提出了一种基于光路可靠性和频谱整合因子感知的虚拟光网络生存性映射(Survivable Embedding for virtual optical networks based on Lightpath Reliability and Spectrum Integration Factor-aware, SE-LRSIF)算法,在保证虚拟光网络可靠映射的条件下,尽力提高虚拟光网络请求接受率.

2 问题描述与差异化业务的可靠性分析

SDM-EONs 表示为 $G_s = \{N_s, L_s, C_s\}$,其中 N_s 为物理节点集合,每个物理节点 n^s 都包含可用的计算资源 c_s ; L_s 为该网络的物理链路集合,每条物理链路 l_s 的可用带宽和可靠性分别用 b_l^s 和 r_l^s 表示; C_s 是每条物理链路上的纤芯集合.相应地,每个虚拟光网络请求表示为 $G_v = \{N_v, L_v\}$,其中 N_v 和 L_v 分别是虚拟节点和虚拟链路集合,每个虚拟节点 n^v 的计算资源需求为 c_v ,而每条虚拟链路 l_v 既有带宽需求 b_l^v 也有可靠性需求 r_l^v .

虚拟光网络映射一般包含虚拟节点映射和虚拟链路映射两个部分,除了要满足文献[14]中的节点和链

路映射约束条件外,还需满足虚拟链路的可靠性 r_l^v 需求, r_l^v 定义如下:

$$r_l^v = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (1)$$

式(1)中, T_{on} 是业务正常传输所需时间, T_{off} 表示业务因光纤链路发生故障后恢复正常传输状态所需时间.

本文采用概率保护策略保证虚拟光网络请求的可靠映射,在概率保护策略中,候选工作光路 p 的可靠性通过式(3)计算出;当配置保护光路后,候选光路 p 可靠性变为式(4)所示.最后,通过式(5)评估光路 p 的可靠性是否满足虚拟链路需求.

$$r_l^s = 1 - p_l^s \quad (2)$$

$$r_p = \prod_{l \in W} r_l^s \quad (3)$$

$$r_p = \left[1 - \prod_{l \in W} r_l^s \right] \cdot \left[1 - \prod_{l \in P} \left(r_l^s \cdot \frac{1}{N} \right) \right] \quad (4)$$

$$r_p \geq r_l^v \quad (5)$$

式(2)~式(5)中, r_l^s 表示物理链路 l 的可靠性, p_l^s 为物理链路 l 发生故障概率, r_p 表示光路 p 可靠性, W 和 P 分别表示虚拟链路映射的工作光路集合和保护光路集合, N 为与当前虚拟链路竞争保护资源的虚拟链路数.

本文研究满足虚拟网络映射约束条件的最大化 SDM-EONs 生存虚拟网络映射的接受率问题,比被文献[11]已证明的 EONs 虚拟光网络映射问题的复杂度更高,且 SDM-EONs 虚拟网络映射问题存在 ILP 模型构造、求解复杂度过高等问题^[15],不适用于大型网络拓扑.故而,本文提出一种基于光路可靠性和频谱整合因子感知的虚拟光网络生存性映射算法.

3 SE-LRSIF 算法

3.1 物理节点评估准则

本文采用参考文献[14]中的虚拟节点权重评估准则确定虚拟节点的映射顺序,为准确评估物理节点重要性,我们设计综合评估物理节点权重的评估准则为:

$$NW(n^s) = \frac{c_s \cdot AMR_s}{1 + \sum_{n' \in Ne(n^s)} hop(n^s, n')} \quad (6)$$

$$AMR_s = \sum_{l \in ad(n^s)} \left(\frac{b_l^s}{TB_{n^s}} \cdot \sum_{l \in ad(n^s)} TFS_{l_s} \right) \quad (7)$$

式(6)中, AMR_s 表示候选物理节点的相邻链路上频谱资源的精确匹配度,其值由式(7)计算,其值越大表明候选物理节点 n^s 相邻链路上满足预映射虚拟节点邻接虚拟链路所需带宽的空闲频谱块越多; $hop(n^s, n')$ 表示 n^s 到 n' 最短光路的跳数,其值越小表示候选物理节点到已被映射物理节点的距离越近; $Ne(n^s)$ 为 n^s 的邻接节点所映射的物理节点集, TB_{n^s} 为待映射虚拟节点邻

接的所有虚拟链路所需求的总的频谱资源, TFS_l 为候选物理节点相邻链路上所有满足虚拟链路 l_i 所需带宽的空闲频谱块的总频隙数, $ad(n^v)$ 和 $ad(n^s)$ 分别为虚拟和物理节点的相邻链路集合。

SE-LRSIF 算法依次将虚拟节点映射到 $NW(n^s)$ 值较大的物理节点上, 以提高虚拟节点和虚拟链路映射的成功率。

3.2 虚拟链路映射

3.2.1 工作和保护光路选择策略

在虚拟链路映射时, 定义候选的工作光路的路径权重方法为:

$$W_p = \alpha \cdot \frac{\sum_{l \in W} \sum_{c \in C_l} BFS_l^c}{F \cdot N_c \cdot N_l} + \prod_{l \in W} r_l^s \quad (8)$$

式(8)中, BFS_l^c 为链路 l 的纤芯 c 上所有空闲频谱块的总频隙数, N_c 和 F 分别为物理链路的纤芯数、每根纤芯的总频隙数, N_l 为候选光路的总链路数, α 为权重因子。

在虚拟链路映射时, SE-LRSIF 算法总是优先将虚拟链路映射到 W_p 值最高的光路上, 以提高虚拟链路映射成功率。为提高保护带宽的共享度, 本文设计区分保护光路上共享频谱块大小的保护光路的路径权重公式, 如式(9)所示, 使用该权重公式对候选保护光路排序, 优先将虚拟链路映射到权重值较高的保护光路上, 旨在为虚拟链路提供一条可靠性较高且保护带宽消耗较少的保护光路。保护光路 p 的路径权重公式为:

$$p_p = \beta \cdot \frac{\sum_{l \in P} \sum_{c \in C_l} B_l^c}{2 \cdot F \cdot N_c \cdot N_l} + \prod_{l \in P} r_l^s \quad (9)$$

$$B_l^c = \sum_{m=0}^M b_m \quad (10)$$

$$b_m = \begin{cases} 2 \cdot \text{size}_m, & \text{size}_m > f \\ 1, & \text{size}_m \leq f \end{cases} \quad (11)$$

式(9)~式(11)中, f 为网络中所有虚拟光网络请求的最小带宽需求, size_m 为第 m 个可共享频谱块的大小, M 表示纤芯 c 上的总的可共享频谱块数, β 为权重调节因子。

3.2.2 工作和保护光路的纤芯频谱分配算法

当确定虚拟链路映射的候选光路后, 本文采用参考文献[5]中的纤芯优先级排序方法选择相应的纤芯。引入频谱分区思想, 本文将整个频谱区域划分成工作区和共享保护区, 提出一种基于频谱整合因子的工作光路频谱分配方法。在为工作光路分配频谱块时, 优先选择使物理光路以及邻接链路的频谱资源更加整合的频谱块, 以减少网络频谱碎片。保护光路的频谱分配采用基于最小空闲频隙消耗的共享路径保护方法。纤芯 i

的频谱整合因子 MF_i 为:

$$C_l^i = \frac{\sum_{j=1}^{F-1} \lambda_j \lambda_{j+1}}{|B|} \quad (12)$$

$$C_p^i = \sum_{l \in W} C_l^i \quad (13)$$

$$MF_i = \sum_{l=1}^{Nu} FS_c^l \cdot C_p^i \quad (14)$$

式(12)~式(14)中, $|B|$ 为物理链路 l 的纤芯 i 上的可用频谱块数; 若纤芯 i 上第 j 个频隙是空闲的, 则 $\lambda_j = 1$, 否则, $\lambda_j = 0$; C_l^i 和 C_p^i 分别为链路 l 和物理光路 p 上纤芯 i 的频谱连贯度, 它们的值越大表明纤芯 i 上的频谱资源越连贯。 FS_c^l 为纤芯 i 上与预分配频隙有相同频隙号且被占用的总频隙数, Nu 为候选光路的邻接链路总数。

3.3 基于光路可靠性和频谱整合因子感知的虚拟光网络生存性映射算法过程

SE-LRSIF 算法

输入: 空分复用弹性光网络 $G_s = \{N_s, L_s, C_s\}$ 和虚拟光网络请求 $G_v = \{N_v, L_v\}$ 。

输出: 虚拟光网络请求的路由频谱纤芯分配方案。

- 步骤 1 执行频谱分区, 记录 G_s 的节点数 N 和链路数 LV , 设 $n=1, l_i=1, i=1, j=1$ 。根据文献[14]评估虚拟节点权重, 并升序排列虚拟节点在集合 $V = \{vn_1, vn_2, \dots, vn_n, \dots, vn_N\}$ 中; 根据式(6)评估物理节点权重, 并升序排列物理节点在集合 $S = \{sn_1, sn_2, \dots, sn_m, \dots, sn_M\}$ 中;
- 步骤 2 判断 vn_n 的计算资源是否不大于 sn_m 的计算资源, 若是, 则将节点 vn_n 映射到节点 sn_m 上, 转至步骤 3; 否则, $m=m+1$, 重复该步骤, 若 $m>M$, 阻塞虚拟请求 G_v ;
- 步骤 3 令 $n=n+1$, 判断 n 是否大于 N , 若是, 则执行步骤 4; 否则, 转步骤 2;
- 步骤 4 为虚拟链路 lv 计算 K 条候选的映射光路, 按式(8)对候选光路降序排序并保存为 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_l, \dots, W_K\}$, 计算各候选光路可靠性, 若 $r_{w_i} \geq r_b$, 则执行步骤 5; 否则, 转步骤 8;
- 步骤 5 根据纤芯选择算法确定 W_l 上的纤芯 c , 并在其工作区上搜寻满足 l_i 带宽需求的可用频谱块, 加入到集合 B , 若 B 为空, 再搜寻纤芯 c 的共享保护区, 若 B 仍为空, 再遍历其他纤芯, 判断 B 是否为空, 若是, $i=i+1$, 执行步骤 6; 否则, 转步骤 7;
- 步骤 6 若 $i>K$, 则阻塞 G_v ; 否则, 转步骤 5;
- 步骤 7 调用式(14)计算 B 中的每个频谱块被 l_i 预占用后纤芯 c 的频谱整合因子, 选择频谱整合因子大的频谱块分配给 l_i 映射的工作光路, 转步骤 12;
- 步骤 8 为 l_i 计算 K 条保护光路, 根据式(9)对保护光路, 且降序排序在集合 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_K\}$ 中, 选择 P_j 作为 l_i 预映射保护光路, 转步骤 9;
- 步骤 9 检查 P_j 的频谱使用情况, 首先在纤芯的共享保护区上搜寻满足 l_i 带宽需求的可用频谱块, 若未找到, 则在频谱的工作区搜寻, 若找到满足 l_i 带宽需求的可用频谱块, 按消耗空闲频隙数从小到大排序可用频谱块, 转步骤 10; 否则, $j=j+1$, 转步骤 11;
- 步骤 10 轮询每个可用频谱块, 计算当前频谱块被预占用后 l_i 以及所有共享该频谱块的虚拟链路所映射保护光路的可靠性, 若

保护光路满足其对应虚拟链路的可靠性要求,则在当前频谱块上进行保护带宽分配;否则, $j = j + 1$, 转步骤 11;

步骤 11 若 $j > K$, 则阻塞 G_v ; 否则, 转步骤 9;

步骤 12 若 $l_v > LV$, 算法结束; 否则, 令 $lv = lv + 1$, 转步骤 4.

4 仿真验证与结果分析

为了验证本文所提 SE-LRSIF 算法性能, 在 NFS-NET 网络进行仿真. 每条物理链路均配置 7 根纤芯, 每根纤芯 80 个频隙. 每个物理节点的计算资源为 400 个单位, 每条物理链路的故障概率在 $(0, 10^{-4})$ 之间均匀分布, 虚拟链路的可靠性需求均匀分布在 $(0.930, 0.999)$ 之间, 每个虚拟光网络请求的节点数随机分布在 $[3 \sim 5]$, 每个虚拟节点所需求的计算资源在 $[1 \sim 10]$ 之间随机产生, 每条虚拟链路所请求的带宽资源也是在 $[1 \sim 10]$ 之间随机产生, 虚拟节点间的连通概率设置为 0.5, 式(8)和式(9)参数值 $\alpha = 1, \beta = 1$. 虚拟光网络请求到达服从参数为 λ 的泊松分布, 持续时间服从参数为 μ 的负指数分布^[14].

在不同的网络负载下, 本文仿真了 4 个性能指标, 分别为虚拟光网络请求接受率、带宽阻塞率以及频谱利用率和平均故障概率, 与多链路故障下虚拟光网络映射的 FPA-VONE^[13] 和 SA-DVNM^[14] 算法比较. 然而, 这 2 种算法均未考虑空分复用, 因此, 我们修改 FPA-VONE 算法和 SA-DVNM 算法为空分复用弹性光网络环境下的虚拟光网络映射算法, 且 3 种算法均采用相同的纤芯选择策略.

图 1 显示了 3 种算法的虚拟光网络请求接受率性能. 与其他 2 种算法相比, 本文所提 SE-LRSIF 算法获得了最高的虚拟光网络请求接受率. 这是因为本文设计了综合考虑节点间距离、相邻链路上可用频谱块的物理节点评估式, 将虚拟节点映射到距离其他已被映射物理节点较近且邻接链路频谱资源充足的光节点上, 提高了虚拟链路映射的成功率; 此外, 本文优化了工作

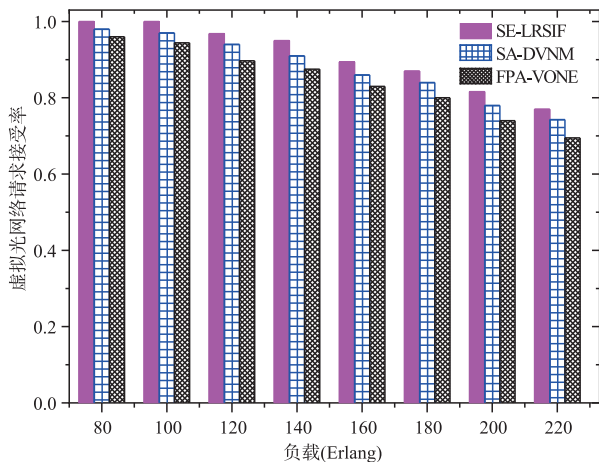


图1 虚拟光网络请求接受率

和保护光路的路由与频谱分配方式.

图 2 为 3 种算法的带宽阻塞率性能. 我们提出的 SE-LRSIF 算法相比较于 FPA-VONE 算法和 SA-DVNM 算法获得更低的带宽阻塞率, 这是由于所提算法在映射节点时实现了对物理节点性能的综合评估, 而且在链路映射时, 优先选择可用频谱块较多的工作光路和可共享频隙较多的保护光路, 还设计了用于减少频谱碎片的频谱块选择式, 极大降低了虚拟光网络请求被阻塞的概率.

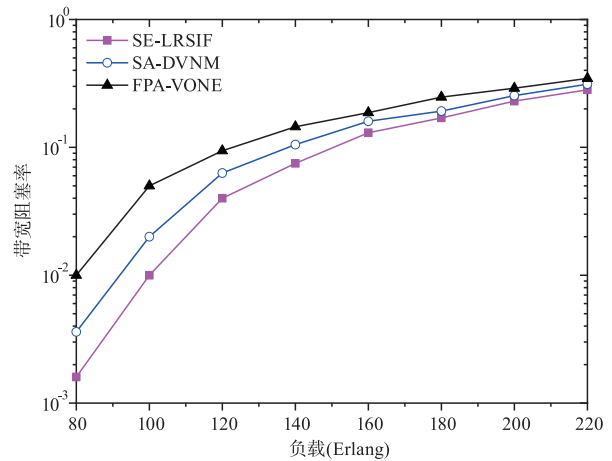


图2 带宽阻塞率

图 3 为 3 种算法的频谱利用率仿真情况. 从图 3 为可以看出, 本文所提 SE-LRSIF 算法获得了最优的频谱利用率性能, 这是由于 SE-LRSIF 算法选择有更多可共享频谱资源的保护光路进行链路映射, 减少了保护资源的消耗. 此外, 在为工作光路分配频谱时, 本文所提算法优先选择虚拟链路预映射后整合因子值大的频谱块分配给虚拟链路, 这种频谱分配方法进一步提高了网络频谱资源的利用率.

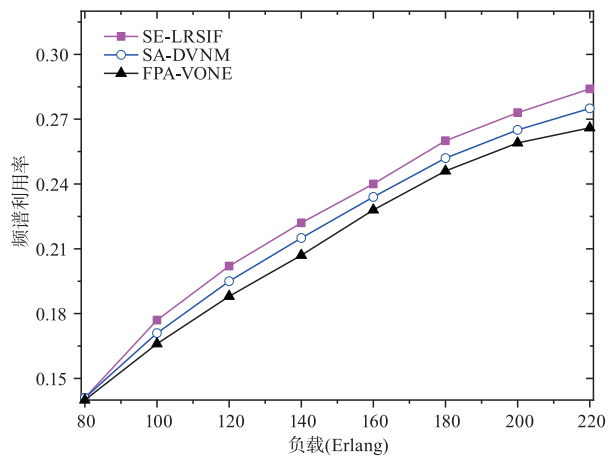


图3 频谱利用率

图 4 为 3 种算法的平均故障概率仿真结果. 可以看出, 本文所提 SE-LRSIF 算法的平均故障概率最低, 因为

本文算法在工作光路不满足可靠性需求时,能为虚拟链路配置一条资源共享的保护光路,并在路由选择时综合考虑了光路的频谱资源和可靠性,提高了虚拟链路映射的成功率,因此获得了最低的平均故障概率性能。

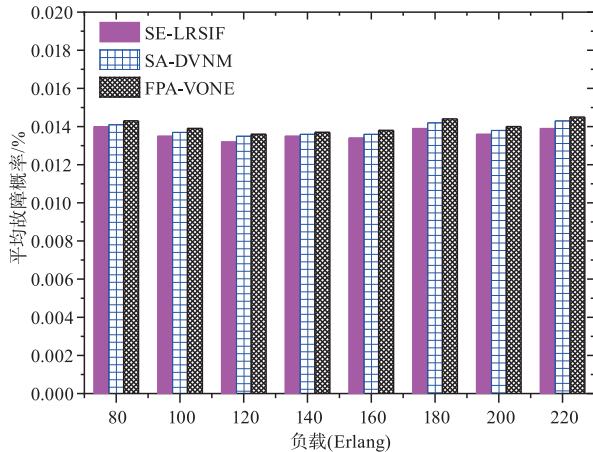


图4 平均故障概率

5 总结

本文研究了多链路故障场景下空分复用弹性光网络中虚拟光网络映射问题,提出了一种基于光路可靠性和频谱整合因子感知的虚拟光网络生存性映射算法(SE-LRSIF),以提高SDM-EONs网络的频谱资源利用率和提高虚拟网络的接受率.所提算法有利于提高SDM-EONs网络运行效率和服务性能。

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,胡浩,陈勇,等.联合能耗与负载均衡的虚拟网络映射方法[J].电子学报,2019,47(12):2488-2494.
LIU Huan-lin, HU Hao, CHEN Yong, et al. Joint power consumption and load balancing algorithm for virtual optical network embedding [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(12):2488-2494. (in Chinese)
- [3] Xiong Y, Shi J, Yang Y, et al. Lightpath management in SDN-based elastic optical networks with power consumption considerations [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(9):1650-1660.
- [4] Klaus W, Puttnam B J, Luís R S, et al. Advanced space division multiplexing technologies for optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017,9(4):C1-C11.
- [5] Yao Q, Yang H, Xiao H, et al. Crosstalk-aware routing, spectrum, and core assignment in space-division multiplexing optical networks with multicore fibers [J]. Optical Engineering, 2017,56(6):066104.
- [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]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018,30(2):159-166. (in Chinese)
- [7] Xuan H, Wang Y, Xu Z, et al. Virtual optical network mapping and core allocation in elastic optical networks using multi-core fibers [J]. Optics Communications, 2017,402:26-35.
- [8] Yin S, Huang S, Liu H, et al. Survivable multipath virtual network embedding against multiple failures for SDN/NFV [J]. IEEE Access, 2018,6:76909-76923.
- [9] Gong L, Zhu Z. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,32(3):450-460.
- [10] 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.
LIU Huan-lin, LV 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. (in Chinese)
- [11] Zhang J, Ji Y, Song M, et al. Dynamic virtual network embedding over multilayer optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015,7(9):918-927.
- [12] 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.
- [13] Luo G, Ding H, Zhou J, et al. Survivable virtual optical network embedding with probabilistic network-element failures in elastic optical networks [A]. International Conference on Optical Communications and Networks [C]. Suzhou, China: IEEE, 2014. 1-4.
- [14] 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):175-183.
LIU Huan-lin, LIN Zhen-yu, WANG Xin, et al. A diverse virtual optical network mapping strategy based on security awareness in elastic optical networks [J]. Journal of Elec-

tronics & Information Technology, 2019, 41 (2) : 175 - 183. (in Chinese)

[15] Jiang H, Wang Y, Gong L, et al. Availability-aware sur-

vivable virtual network embedding in optical datacenter networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(12) : 1160 - 1171.

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



胡会霞 女, 1997 年 5 月出生于河南开封市. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光通信网络和路由.
E-mail: 2270075845@qq.com