

链路可靠性感知的差异保护虚拟光网络映射

刘焕淋¹, 蒲 欣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: 针对弹性光网络的多链路故障影响虚拟光网络映射性能问题, 提出一种链路可靠性感知的差异保护虚拟光网络映射(RA-DPVONE)方法. 根据光节点的资源特性与相邻链路故障概率, 该方法设计了光节点重要性评估准则和优先映射方法. 根据候选光路上的可用频谱资源和链路故障概率, 设计虚拟链路映射的工作光路和保护光路的链路代价更新公式, 仅为不满足可靠性需求的虚拟链路映射资源共享保护光路. 仿真结果表明, 所提方法能降低网络的带宽阻塞率, 提高虚拟网络请求接受率和弹性光网络的频谱资源利用率.

关键词: 弹性光网络; 虚拟网络映射; 可靠性感知; 差异保护; 多链路故障; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)05-0946-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.015

Link Reliability-Aware Protection-Differentiated Virtual Optical Network Embedding

LIU Huan-lin¹, PU Xin¹, 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 problem that multi-link faults in elastic optical networks affect the performance of virtual optical network mapping, a method of link Reliability-Aware Protection-differentiated Virtual Optical Network Embedding (RA-PVONE) is proposed in the paper. In the RA-PVONE, an importance evaluation criteria and priority mapping method of optical nodes are designed. According to the available spectrum resources and link failure probability of candidate optical paths, the link cost updating formulas for working and protecting optical paths are designed to map the virtual link. Protection optical paths sharing spectrum resource is only configured for working optical path that do not meet the virtual link's reliability requirements. The simulation results show that the proposed method can reduce the network bandwidth blocking probability, improve virtual network acceptance ratio and the spectrum resource utilization.

Key words: elastic optical networks; virtual network mapping; reliability-aware; protection-differentiated; multiple link faults; bandwidth blocking probability

1 引言

近年来,随着互联网和通信技术的快速发展,大量基于网络的业务应用如云计算、视频点播、智能家居及万物互联等不断涌现,网络流量呈现爆炸式增长,给作为通信基础设施的骨干光网络的承载能力带来了严峻挑战^[1]. 相对波长粒度粗糙和调制格式单一的波分复用网络^[2],基于正交频分复用的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)具有频谱分配方式灵活、传输容量大、资源利用率高,被认为是极具发展潜力的下一

代光传输网之一^[3,4].

与此同时,为了解决多运营商和多设备耦合叠加的网络僵化严重、资源调度控制困难,网络虚拟化被提出用于提高底层物理光网络的基础设施资源的利用率^[5,6]. 早期的虚拟网络映射(Virtual Network Embedding, VNE)^[7,8]主要研究如何提高虚拟光网络映射的成功率和EONs资源利用率. 但是,巨大容量的光纤链路故障造成大量的业务中断和数据丢失,对网络性能影响严重^[9].

针对虚拟网络的生存性映射问题,文献[10]提出

了一种虚拟节点迁移规避光纤链路故障的生存性虚拟网络映射方法,然而,当网络负载较重时,该方法通过迁移恢复受损虚拟网络的成功率较低.文献[11]提出了一种基于故障节点迁移和链路重映射的人工蜂群启发式算法.文献[12]研究了虚拟网络映射的1+1专用保护的映射算法.文献[13]针对专用保护的频谱资源利用率低,提出了基于模糊优化度的最优共享保护映射算法,以实现频谱利用率和故障恢复概率的折中.基于共享保护,文献[14]研究光数据中心网络资源需求降序的瓶颈虚拟链路优先虚拟光网络映射(Bottleneck-first Virtual Optical Network Embedding, B-VONE)工作路径和共享保护路径方法.文献[15]设计了一种风险感知模型提出了风险感知迁移的虚拟网络映射启发式算法.从光网络单元概率故障的角度出发,文献[16]提出一种故障概率感知虚拟光网络映射(Failure Probability Awareness-Virtual Optical Network Embedding, FPA-VONE)工作和共享保护路径算法.针对链路故障导致虚拟网络数据传输风险问题,文献[17]提出一种抵抗风险的混合多路径决策(Hybrid Multipath and Decision-making, Hybrid MD)虚拟链路生存性的映射方法,该方法对故障概率低的虚拟链路采用多路径共享保护映射方案,故障概率高的光路采用1+1的高冗余保护映射方案,降低了频谱带宽的利用率.

针对EONs的光纤链路概率性故障问题,本文提出基于链路可靠性感知的差异保护虚拟光网络映射(Reliability-Aware Protection-differentiated Virtual Optical Network Embedding, RA-PVONE)方法.

2 虚拟光网络可靠性映射问题描述

弹性光网络抽象为无向图 $G_s = \{N_s, L_s\}$,其中 N_s 表示光节点集, C_s^i 表示光节点 i 的可用计算资源值, L_s 表示光纤链路集,光纤链路 j 的可用频谱块资源为 B_s^j ,单位为频隙(Frequency Slot, FS),光纤链路 j 可靠性为 R_s^j .虚拟光网络抽象为无向图 $G_v = \{N_v, L_v\}$,其中 N_v 和 L_v 分别表示具有一定计算资源需求的虚拟节点集与具有一定传输带宽需求的虚拟链路集合,虚拟节点 r 所需要的计算资源为 C_v^r ,虚拟链路 k 需求的频谱资源为 B_v^k ,则虚拟链路 k 所需频隙数为 $N_v(k) = \lceil B_v^k / (p_m \times B_f) \rceil$,其中 p_m 为信号调制等级为 m 时的频谱效率, B_f 为该调制等级下的单频隙带宽, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整数. R_v^k 表示虚拟链路 k 的可靠性要求,映射虚拟网络时,不仅需要满足虚拟网络的计算资源和带宽需求,还要满足可靠性需求.

在虚拟网络映射中,虚拟链路映射失效有2种情况:(1)虚拟链路映射的工作光路与保护光路同时故障;(2)虚拟链路映射的工作光路发生故障,保护光路

正常,但是,因共享保护光路的多故障竞争而导致某虚拟网络映射失效.因此,虚拟链路 k 映射的故障概率可表示如式(1)所示.

$$F(l_v^k) = F_{(w,p)}^{w,p} + F_{(w,p)}^w \quad (1)$$

其中, w 表示工作光路, p 表示保护光路, $F(l_v^k)$ 为第 k 条虚拟链路因EONs故障而映射失效概率, $F_{(w,p)}^{w,p}$ 为虚拟链路映射工作路径与保护光路同时故障概率, $F_{(w,p)}^w$ 为虚拟链路映射工作光路故障,但共享的保护光路因竞争导致虚拟链路映射失效概率.

若光纤链路 j 发生故障的概率为 p_s^j ,则光纤链路正常传输概率为 $1 - p_s^j$,则虚拟链路映射的工作光路和共享保护光路同时故障概率如式(2).

$$F_{(w,p)}^{w,p} = \left(1 - \prod_{j \in P^w} (1 - p_s^j)\right) \times \left(1 - \prod_{j \in P^p} (1 - p_s^j)\right) \quad (2)$$

其中, P^w 表示工作光路的链路集合, P^p 表示保护光路的链路集合.当工作光路故障,当故障发生时,被多光路共享的保护光路存在因竞争保护光路失败而导致虚拟链路失效,其概率如式(3).

$$F_{(w,p)}^w = \left(1 - \prod_{j \in P^w} (1 - p_s^j)\right) \times \prod_{j \in P^p} (1 - p_s^j) \times \left(1 - \frac{1}{S}\right) \quad (3)$$

其中, S 表示虚拟链路映射在同一条保护光路的链路需共享频谱资源的虚拟链路条数,这里 $S > 1$.则虚拟链路 k 映射光路可靠性如式(4).

$$R(l_v^k) = 1 - (F_{(w,p)}^{w,p} + F_{(w,p)}^w) \quad (4)$$

结合式(2)和式(3),本文所提虚拟链路 k 差异映射保护光路的可靠性计算如式(5).

$$R(M_v^k) = \begin{cases} R(P^w), & R(P^w) \geq R_v^k \\ R(P^w) + \frac{1}{S} \prod_{j \in P^p} (1 - p_s^j) \times \left(1 - \prod_{j \in P^w} (1 - p_s^j)\right), & R(P^w) < R_v^k \end{cases} \quad (5)$$

其中, $R(P^w) = \prod_{j \in P^w} (1 - p_s^j)$ 为工作光路可靠度, $R(P^w) \geq R_v^k$ 表示工作光路满足虚拟链路 k 可靠性 R_v^k 需求,无需映射保护光路.

虚拟网络映射包括虚拟节点映射和虚拟链路映射.虚拟节点映射需满足虚拟网络的每个虚拟节点只能映射至唯一光节点上;且光节点可用计算资源以及度数应满足虚拟节点的计算资源与度数需求.虚拟链路映射到EONs网络的光路需要满足:光路上的可用频谱块满足虚拟链路的带宽资源需求;在进行频谱分配时,还应满足光路上各链路分配频谱一致性、频谱连续性以及频谱不重叠性的约束条件.

3 链路可靠性感知的差异保护虚拟光网络映射 (RA-PVONE) 方法

根据虚拟链路的可靠性差异要求, RA-PVONE 方法首先为虚拟链路映射一条占用频谱资源最少且故障概率低的工作光路, 采用首端匹配 (First-Fit, FF) 频谱分配方式给光路分配资源^[8], 然后用式(5)计算该光路可靠性. 若光路可靠性不满足虚拟链路可靠性需求, 还需为该虚拟链路映射另一条资源共享度高的保护光路, 并采用末端匹配 (Last-Fit, LF) 的频谱分配方式分配资源, 以减少频谱碎片的产生, 并按式(5)计算虚拟链路映射的可靠性.

3.1 虚拟节点排序映射规则

综合考虑虚拟节点所需计算资源和虚拟节点相邻虚拟链路的带宽资源需求^[14,16], 则虚拟节点 r 重要性度量方法为:

$$N_{IV}(r) = C_v^r \times \sum_{(r,n) \in L_v} B_v^{(r,n)} \quad (6)$$

其中, $B_v^{(r,n)}$ 表示虚拟节点 r 相邻的虚拟链路 (r,n) 需求的带宽.

为了提高 EONs 频谱资源利用率和映射成功率, N_{IV} 值最高的虚拟节点应当首先被映射到具有丰富计算资源、相邻链路上带宽资源、相邻链路可靠性高且节点度数大的光节点上. 根据这一思想, EONs 中光节点 i 的重要性评估方法为:

$$N_{IV}(i) = C_s^i \times \sum_{(i,n) \in L_s} \frac{B_s^{(i,n)}}{R_s^{(i,n)}} \times D_s^i \quad (7)$$

其中, $R_s^{(i,n)}$ 为光纤链路 (i,n) 可靠性.

3.2 链路可靠性感知的虚拟链路映射策略

综合考虑 EONs 的光纤链路可用频谱资源状况和故障概率, 我们设计了虚拟链路映射工作光路的光纤链路 j 代价函数为:

$$C_w^j = \frac{1}{(Z_j)^{k_1}} - k_2 \times \ln(1 - p_s^j) \quad (8)$$

其中, Z_j 表示光纤链路 j 上的空闲频隙数, p_s^j 表示光纤链路 j 的故障概率, k_1 和 k_2 为调节因子, 通过 k_1 调节均衡光纤链路上负载与频谱资源消耗关系, k_2 调节和平衡光纤链路的故障概率. 式(8)所示链路的代价函数值越小, 表明该光纤链路的空闲频谱越多, 且光纤链路的故障概率越小.

根据式(8)更新 EONs 的链路代价函数后, 使用 Di-

jkstra 算法计算 K 条代价最小的候选工作光路, 并根据式(5)模型评估各候选光路的可靠性, 优先选择可靠性高且具有足够可用频隙资源的光路, 并进行频谱分配; 否则, 就为该虚拟链路寻找满足虚拟链路带宽和可靠性要求的保护光路. RA-PVONE 方法设计的保护光路路由时光纤链路 j 代价函数如式(9), 综合考虑了光纤链路 j 的可用频隙共享情况和光纤链路的故障概率.

$$C_p^j = \begin{cases} \infty, & j \in P^w \\ \frac{F_k - S_j}{F_k} - k_3 \times \ln(1 - p_s^j), & j \notin P^w \end{cases} \quad (9)$$

其中, F_k 表示虚拟链路 k 映射的保护光路所需的频隙大小, S_j 为光纤链路 j 上可共享的保护频隙值, k_3 为该链路可靠性权重因子.

在多链路故障场景中, 由式(5)可知, 保护光路上频谱资源的共享程度会降低虚拟链路映射的可靠性, 因此, 应该限制保护光路上频谱资源共享度.

如图 1 所示, 有 3 条不同可靠性需求的虚拟链路, 且虚拟节点 1, 2 和 3 已经映射到光节点 A、D 和 F 上, 虚拟链路 $l_v^{(1,2)}$ 可靠性需求为 98.5%, 映射的工作光路为 A-B-C-D, 该光路可靠性为 97.52%, 不满足业务可靠性需求. 配置保护光路 A-F-E-D 后, 根据(5)式计算虚拟链路 $l_v^{(1,2)}$ 映射光路可靠性变为 99.89%, 满足 $l_v^{(1,2)}$ 可靠性需求. 因此, 虚拟链路 $l_v^{(1,2)}$ 映射工作光路为 A-B-C-D, 保护光路为 A-F-E-D.

虚拟链路 $l_v^{(1,3)}$ 可靠性需求为 98.7%, 映射的工作光路为 A-H-F, 由式(5)计算知光路的可靠性为 98.9%, 可以满足虚拟链路的可靠性需求, 因此可以直接通过工作光路 A-H-F 传输业务, 无需为其配置保护光路, 减少了保护资源消耗.

同理, 虚拟链路 $l_v^{(3,2)}$ 满足可靠性需求映射的工作与保护光路分别为 F-G-D 和 F-E-D, 其保护光路 F-E-D 与虚拟链路 $l_v^{(1,2)}$ 映射的保护光路 A-F-E-D 存在链路相交情况, 若链路 F-E 和 E-D 相关的 2 条保护光路尽量共享频谱资源, 则 $S = 2$, 且上述 $l_v^{(1,2)}$ 映射光路的可靠性会降低, 通过式(5)再计算 $l_v^{(1,2)}$ 映射光路的可靠性为 98.70%, 仍满足 $l_v^{(1,2)}$ 要求. 而虚拟链路 $l_v^{(3,2)}$ 映射的保护光路在共享频谱分配后, 可靠性变为 98.62%, 同样满足 $l_v^{(3,2)}$ 可靠性要求. 因此, 2 条保护光路可以分配共享的频谱资源, 节约了频谱带宽.

表 1 可靠性差异保护的虚拟链路可靠性计算结果

虚拟链路	工作光路 W	保护光路 P	需求 R 值	光路共享前	光路共享后	是否满足 R
$l_v^{(1,2)}$	A-B-C-D	A-F-E-D	98.5%	99.89%	98.70%	是
$l_v^{(1,3)}$	A-H-F	无	98.7%	98.90%	98.90%	是
$l_v^{(3,2)}$	F-G-D	F-E-D	97.6%	99.91%	98.62%	是

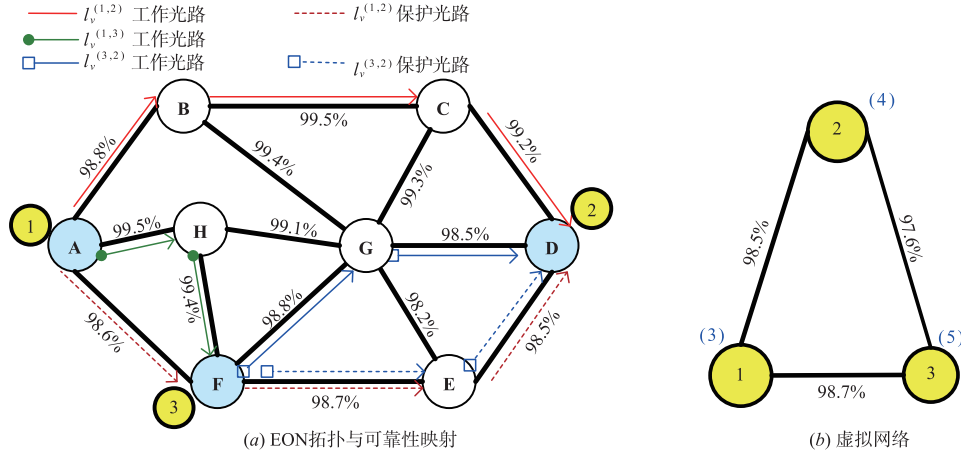


图1 业务可靠性感知的差异化光路保护示意图

3.3 工作光路首端-保护光路末端频谱分配

为了充分利用频谱资源,减少虚拟链路映射的工作光路和保护光路的频谱分配产生的频谱碎片本文采用一种工作光路-保护光路分离的频谱分区的首端匹配与末端匹配联合的 FLF (First-Last-Fit) 频谱分配方法. FLF 具体过程为:在映射一条虚拟链路时,首先在 EONs 网络中用式(8)更新各条光纤链路的代价值,用 Dijkstra 算法找到最小代价工作光路,并使用 FF 频谱分配方式分配带宽资源;然后用式(5)计算工作光路可靠度,如不满足虚拟链路可靠性需求,则采用式(9)在资源更新后的 EONs 拓扑上更新链路的代价值,并用 Dijkstra 算法找到最小代价保护光路,并根据式(5)计算满可靠性值和确定保护光路是否共享频谱资源,并在保护光路上使用 LF 频谱分配方式分配带宽资源,若光路可靠度不满足或频谱分配失败,则虚拟链路映射失败.

综上所述,论文所提的 RA-PVONE 算法步骤为:

RA-PVONE 算法

输入 弹性光网络 $G_s = \{N_s, L_s\}$ 和链路可靠性集合,各节点和链路可用资源值,虚拟网络 $G_v = \{N_v, L_v\}$ 及虚拟链路可靠性需求.

输出 虚拟网络映射结果和保护光路共享频谱情况.

步骤 1 统计虚拟节点个数 M ,令 $m=1$,根据式(6)计算虚拟节点重要性 N_n 值,降序排列在集合 $V_n = \{v_{n1}, v_{n2}, \dots, v_{nm}\}$ 中;根据式(7)计算 EONs 各光节点 N_n 值,降序排列在集合 $N_l = \{n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{ln}\}$ 中, EONs 有 N 个光节点;

步骤 2 查找集合 V_n 排序第 1 的虚拟节点 v_{n1} 映射在满足可用资源约束条件的光节点集合 N_l 的光节点,若有光节点满足 v_{n1} 要求,则将 v_{n1} 映射在该光节点上,并在集合 V_n 和 N_l 中删除已映射虚拟节点和光节点,转至步骤 3;否则阻塞该虚拟网络;

步骤 3 若 $m > M$,转至步骤 10,否则, m 加 1,执行步骤 4;

步骤 4 对更新集合 V_n 的第 1 虚拟节点,从更新后 N_l 集中找到满足资源约束条件的 K 个候选光节点,使用式(8)更新 EONs 每条链路的代价值,确定各候选光节点到已经映射的光节点之间的 K 条最小代

价工作光路;

步骤 5 选择代价最小且工作光路频谱资源满足拟映射虚拟节点和已映射虚拟节点间虚拟链路 k 的带宽需求的工作光路 P^w ,并对该工作光路采用 FF 频谱分配方法;

步骤 6 使用式(5)评估虚拟链路 k 映射的工作光路的可靠度 $R(P^w)$,若 $R(P^w) \geq R_k^t$,保存虚拟链路映射工作光路的路由和频谱分配信息,并在集合 V_n 和 N_l 中删除已映射虚拟节点和光节点,转步骤 3;否则,标记该工作光路的光路信息和分配频谱索引起始和终止序号值,执行步骤 7;

步骤 7 使用式(9)更新 EONs 每条光纤链路代价值,计算各候选光节点到已经映射光节点之间的多条最小代价保护光路;

步骤 8 依次检查各条保护光路上的频谱状态,确定是否有保护光路的空频谱块满足虚拟链路带宽需求,若保护光路有可用频谱块,按频谱共享度从小到大排序保护光路的各频谱块;

步骤 9 轮询保护光路的每个可用频谱块,使用式(5)计算当前虚拟链路 k 映射光路可靠度,若 $R(M_k^t) \geq R_k^t$,则将该虚拟链路映射到该保护光路和步骤 5 确定的工作光路上,且保护光路的频谱分配采用 LF 方法.然后,在集合 V_n 和 N_l 中删除已映射虚拟节点和光节点,转步骤 3;

步骤 10 输出虚拟网络映射结果和保护光路共享频谱情况.

RA-PVONE 算法主要由 3 部分组成:虚拟节点排序、光节点排序以及映射的路由频谱分配,虚拟节点排序的复杂度为 $O(M \times \log M)$,光节点排序复杂度为 $O(N \times B)$,工作光路的路由频谱分配复杂度为 $O(K \times \log K \times B \times (|L_s| + N \times \log N))$,保护光路的路由频谱分配复杂度为 $O(|L_s| + N \times \log N)$,其中 B 为链路空闲频隙数, $|L_s|$ 为光纤链路数,则 RA-PVONE 算法复杂度为 $O(M \times \log M + N \times B + K \times \log K \times B \times (|L_s| + N \times \log N) + |L_s| + N \times \log N)$.

4 仿真验证与结果分析

为了验证本文所提 RA-PVONE 算法的性能,在通用的具有 14 个节点和 21 条链路的 NSFNET 网络上进行仿真验证. EONs 中光节点计算资源容量为 400 个单位,链路带宽容量为 358 个频隙,每根光纤的故障概率

在 $(0, 10^{-4})$ 之间均匀分布. 虚拟网络请求到达服从参数为 λ 的泊松分布, 虚拟节点数目在 $[3, 5]$ 间, 每个虚拟节点的计算资源需求为 $[5, 10]$ 单位, 虚拟节点之间的虚拟链路连通概率为0.5, 每条虚拟链路请求的频隙数从 $[2, 10]$ 频隙中随机产生, 虚拟链路可靠性需求均匀分布在 $[0.930, 0.999]$ 之间, 虚拟网络的持续时间服从参数为1的负指数分布, $K=3$. 经过多次仿真实验, 确定链路代价公式(8)和(9)中参数的最优取值为 k_1 、 k_2 和 k_3 分别取0.5、2和10.

性能评价指标为虚拟网络接受率、带宽阻塞率以及资源利用率, 对比方法为瓶颈链路优先虚拟光网络生存性映射(B-VONE)^[14], 故障概率感知的虚拟光网络映射(FPA-VONE)^[16]生存性算法和混合多路径决策(Hybrid MD)^[17]生存性映射算法.

图2为不同的网络环境下, 3种算法的带宽阻塞率性能. 从图2可以看出, 所提RA-PVONE方法在相同负载情况下获得最低的带宽阻塞率. 原因是RA-PVONE综合考虑光纤链路的故障风险和光路上频谱使用状态, 执行可靠性差异保护的虚拟链路映射方法, 降低工作光路频谱碎片化分配和瓶颈风险, 差异保护的光路采用共享LF频谱分配方法, 减少了频谱碎片, 降低了带宽阻塞率. 而对比的B-VONE方法优先映射源需求大的虚拟链路, 忽略了光节点需求且没有约束邻接的虚拟链路映射到相距较远光路上, 导致更多的频谱资源被消耗. FPA-VONE算法虽然考虑了EONs故障概率, 但是该算法在工作光路和保护光路的路由过程中没有考虑频谱碎片问题, 使得FPA-VONE算法的阻塞率性能比B-VONE略好. Hybrid MD方法虽然设计了降低阻塞率的多路径分割传输方法, 但多路径分割传输需要消耗更多保护频谱, 且该方法没有考虑频谱碎片和EONs故障情况, 所以, 带宽阻塞率比所提RA-PVONE方法差.

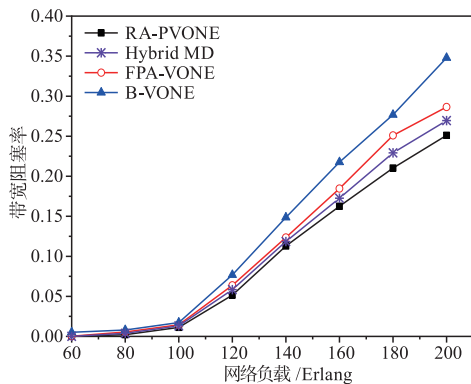


图2 不同负载下虚拟网络映射的带宽阻塞率

图3为在不同的网络环境下, 三种算法呈现出的虚拟网络请求接受率的变化情况. 如图3所示, 本文所

提RA-PVONE算法在两种拓扑的各负载情况下均获得了最高的虚拟网络请求接受率, 这是由于RA-PVONE算法首先将虚拟节点映射到EONs中资源丰富且节点度数大的重要光节点上, 避免了瓶颈节点产生. 同时, RA-PVONE的工作光路和保护光路的路由代价函数, 充分考虑了光路的频谱状态和故障概率及频谱共享程度, 保证将虚拟链路映射到消耗频隙更少、碎片程度较轻和可靠性高的较短跳光路上, 节约更多的频谱资源, 从而降低了虚拟网络请求被阻塞的可能性, 提高虚拟网络的接受率.

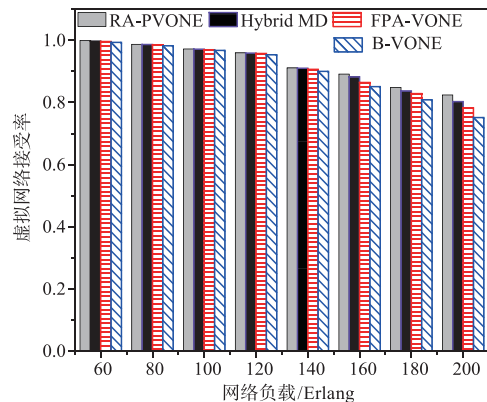


图3 不同负载下的虚拟网络请求接受率

图4表示三种算法在不同网络环境下表现的频谱利用率的变化情况, 这里的频谱利用率是单位时间内映射成功的虚拟网络带宽和与EONs网络带宽的比值. 由图4可知, 随着负载增加, 越来越多虚拟网络请求到达网络, 所有算法的频谱利用率随之增加, 而本文所提RA-PVONE算法在两种拓扑中均获得最高的频谱利用率, 这是由于RA-PVONE方法在为虚拟链路映射工作光路时考虑光纤链路故障状态和可用频谱状态, 而在选择保护光路时则考虑了光纤链路的空闲频隙状态和满足可靠下尽量不保护或共享频谱资源的保护方法, 且采用的工作光路-保护光路分离的FLF频谱分配方式进一步减少频谱碎片的产生. 而B-VONE、FPA-VONE

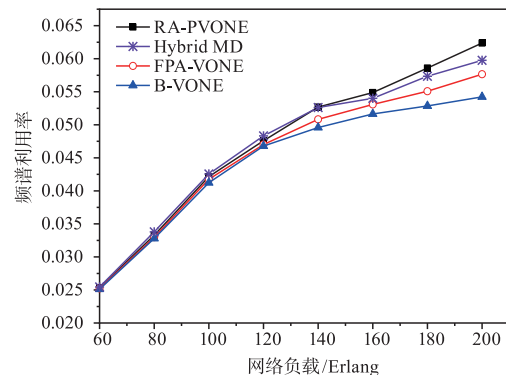


图4 不同负载下的频谱利用率

和 Hybrid MD 方法在工作光路选路策略、保护方式、频谱分配方式和考略链路可靠性对映射虚拟光路成功率方面考虑不足,所以虚拟网络映射的频谱利用率差一些。

图 5 为三种算法在两种网络拓扑下虚拟网络请求的映射失效概率随负载的变化情况,这里的虚拟网络映射失效概率是指虚拟网络映射失败数目与虚拟网络请求总数的比值。虽然 FPA-VONE 算法和 B-VONE 算法在链路映射时选择最小故障概率光路映射,但是由于路由代价没有反映光路的可用频谱资源状况和光路跳数影响,没有考虑减少保护光路频谱占用的方法,导致他们的虚拟链路映射需要占用更多的频谱资源,因此虚拟网络请求的平均故障概率更大。而论文所提 RA-PVONE 方法在工作光路不满足虚拟链路可靠性映射要求时,才进行保护光路映射,且保护光路尽量在满足虚拟链路可靠性需求下共享频谱资源,减少了虚拟网络映射消耗的频谱资源,减小了虚拟网络可靠映射的失败概率。

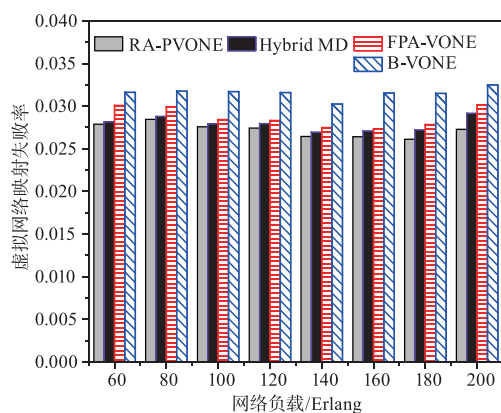


图5 三种算法在不同网络中的平均故障概率

5 总结

本文针对底层弹性光网络多链路故障下的虚拟网络映射问题,提出了一种基于可靠性感知的业务差异化虚拟光网络映射算法(RA-PVONE)。根据虚拟网络差异化的可靠性需求,设计了可靠性感知的业务差异化映射保护光路的方法。该算法对多链路故障环境中提高虚拟网络可靠映射和提高弹性光网络的有限频谱带宽利用率有积极的意义。

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,2018,30(1):1-8.
Liu Yun-jie,Zhang Jiao,Huang Tao, et al. Service customized future network architecture[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications,2018,30(1):

1-8. (in Chinese)
[2] Guo X J, Ma J, Liu H L, et al. Improved NSGA-II optimizing coding-link cost trade-offs for multicast routing in WDM networks[J]. Photonic Network Communications, 2018,35(3):309-315.
[3] 刘焕淋,杜君丹,陈勇,等. 光树分割和共享光路合并优化任多播阻塞率[J]. 电子学报,2018,46(7):1658-1662.
LIU Huan-lin, DU Juan-dan, CHEN Yong, et al. Tree-split and shared lightpath-merged for optimization bandwidth blocking probability of anycast[J]. Acta Electronica Sinica,2018,46(7):1658-1662. (in Chinese)
[4] Agrawal A, Bhatia, Vimal, Prakash, Shashi. Spectrum efficient distance-adaptive paths for fixed and fixed-alternate routing in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology,2018,40:36-45.
[5] Misawa A, Katayama M. Resource management architecture of metro aggregation network for IoT traffic[J]. IE-ICE Transactions on Communications,2018,101(3):620-627.
[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] Li J, Li D, Yu Y R, et al. Towards full virtualization of SDN infrastructure[J]. Computer Networks, 2018, 143 (OCT.9):1-14.
[8] 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):7906413.
[9] 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,2017,29(3):313-319.
Bao Ning-hai, Su Guo-qing, Chen Jing-bo. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications,2017,29(3):313-319. (in Chinese)
[10] Melo M, Sargento S, Carapinha J. Optimal virtual network migration: a step closer for seamless resource mobility[J]. Journal of Network & Computer Applications,2016,64(C):124-136.
[11] Zhu Q, Wang H Q, Feng G S, et al. Heuristic survivable virtual network embedding based on node migration and link remapping[A]. Information Technology and Artificial Intelligence Conference[C]. Chongqing, China:

- IEEE,2014. 181 – 185.
- [12] Chowdhury S,Ahmed R,Khan M A,et al. Dedicated protection for survivable virtual network embedding [J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2016,13(4):913 – 926.
- [13] Yang H,Zhu X X,Bai W,et al. Survivable VON mapping with ambiguity similitude for differentiable maximum shared capacity in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology,2016,31:138 – 146.
- [14] Jiang H H,Wang Y X,Gong L,et al. Availability-aware survivable virtual network embedding in optical datacenter networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking,2015,7(12):1160 – 1171.
- [15] Hou W G,Ning Z L,Guo L,et al. Novel framework of risk-aware virtual network embedding in optical data center networks [J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12 (3): 2473 – 2482.
- [16] Hui Y,Lei C,Luo G,et al. Survivable virtual optical network embedding with probabilistic network-element failures in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology,2015,23:90 – 94.
- [17] Ai J J,Chen H C,Guo Z H,et al. Defending against link failure in virtual network embedding using a hybrid scheme [J]. China Communications, 2019, 16 (1): 135 – 144.

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



蒲 欣 女,1995 年 9 月出生于宁夏固原市. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光通信.
E-mail: px727206138@163.com