

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

刘焕淋^{*①} 林振宇^① 王欣^① 陈勇^② 向敏^② 马跃^③

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

^③(国网冀北电力有限公司信息通信分公司 北京 100053)

摘要: 针对虚拟环境下底层网络中光纤的概率性故障, 传统的100%保护至少需要配置一条保护路径, 造成资源冗余度高和虚拟网络请求接受率低的问题, 该文提出一种基于安全性感知的差异化虚拟光网络的映射(SA-DVNM)策略, 在链路发生故障时为差异化虚拟网络请求提供安全保证。在SA-DVNM策略中, 设计了一个综合考虑物理节点对之间跳数和相邻带宽大小的节点权重式避免链路映射过长, 并提出路径频谱资源使用均衡的链路映射机制, 最小化瓶颈链路的数量。当单路径传输失败时, SA-DVNM策略设计允许路径分割的资源分配机制, 为保障时延敏感业务的安全性, SA-DVNM策略在路由选择中设计了基于时延差优化的多路径路由频谱分配方法。仿真结果表明该文所提策略在概率故障环境中能够降低带宽阻塞率, 提高频谱资源利用率和虚拟光网络接受率。

关键词: 虚拟光网络; 安全性感知; 差异化映射; 路径分割; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0424-09

DOI: 10.11999/JEIT180335

A Diverse Virtual Optical Network Mapping Strategy Based on Security Awareness in Elastic Optical Networks

LIU Huanlin^① LIN Zhenyu^① WANG Xin^① CHEN Yong^②
XIANG Min^② MA Yue^③

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^③(Information & Telecommunication Company, State Grid Jibei Electric Power CLP, Beijing 100053, China)

Abstract: Due to the probabilistic failure of the optical fiber of the underlying network in the virtual environment, traditional full protection configures one protection path at least which leads to high resource redundancy and low acceptance rate of the virtual network. In this paper, a Security Awareness-based Diverse Virtual Network Mapping (SA-DVNM) strategy is proposed to provide security guarantee in the event of failures. In SA-DVNM, the physical node weight formula is designed by considering the hops between nodes and the bandwidth of adjacent links, besides, a path-balanced link mapping mechanism is proposed to minimize the overloaded link. For improving the acceptability of virtual network, SA-DVNM strategy designs a resource allocation mechanism that allows path cut when a single path is unavailable for low security. Considering the difference of time delay to ensure the security of delay-sensitive services, a multipath routing spectrum allocation method based on delay difference is designed to optimize the routing and spectrum allocation for SA-DVNM strategy. The simulation results show that the proposed SA-DVNM strategy can improve the spectrum utilization and virtual optical network acceptance rate in the probabilistic fault environment, and reduce the bandwidth blocking probability.

收稿日期: 2018-04-11; 改回日期: 2018-08-29; 网络出版: 2018-09-13

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家电网公司科技项目(52010118000Q)

Foundation Item: The Project of Science and Technology of State Grid Corporation of China (52010118000Q)

Key words: Virtual optical network; Security Awareness (SA); Differential mapping; Path cutting; Bandwidth blocking probability

1 引言

近年来,随着云计算、数据中心网络的快速发展,海量信息的交换,传统的带宽固定、调制格式单一的波分复用网络面临着严峻的挑战^[1-2]。因此在此基础上,设计一个具有更大容量且灵活的网络架构十分必要。基于正交频分复用的弹性光网络通过在光域中使用更细粒度的子载波(如12.5 GHz或6.25 GHz)承载网络业务,并引入带宽可变的光器件和智能的光交换机制^[3],使其更加灵活地配置网络资源,显著提高了网络资源利用率,因此被认为是一种能支持大业务成功传输的网络^[4]。同时,网络虚拟化技术作为一项新技术允许多个逻辑上隔离的虚拟网络共存于同一个底层网络,通过共享网络资源,提高固有资源利用率,并促进物理设备共享且能够为用户提供多样化的服务^[5,6]。

然而,为虚拟网络分配底层网络资源即虚拟网络映射,具有很强的挑战性,涉及到虚拟网络对底层网络拓扑、资源消耗以及位置等多条件约束,计算复杂。而且,弹性光网络中路由与频谱分配需遵循严格的频谱约束条件,即频谱一致性、频谱连续性以及频谱不重叠,因此如何为虚拟网络提供合理的底层网络资源,目前已证明是NP(Non-deterministic Polynomial)难问题^[7,8]。由于底层网络的链路故障会导致大量正在传输业务的中断、数据丢失,从而影响虚拟网络映射,因此如何保障虚拟网络的可靠映射十分有必要^[9]。

为了解决虚拟网络的可靠映射,目前已经有很多文献提出了相关的解决策略。文献^[10]为提高网络生存性,预置备份资源,在网络发生故障时能够成功传输业务,通过群搜索优化算法(GSVNE)寻找最优映射方法,动态调整工作资源和保护资源的比例,但该方法需要大量消耗频谱资源,降低了频谱利用率。文献^[11]提出基于混合策略的启发式链路备份生存性算法,但是没有考虑备份资源的冗余量。文献^[12]研究重映射算法,对失效所影响的虚拟节点或链路进行迁移,并进行节点和链路的重新分配,但是底层空闲资源较少时恢复成功率较低。文献^[13]研究生存性虚拟网络映射中的专用保护问题,虽然恢复时间快,但是消耗频谱资源过多。文献^[14]研究如何利用共享保护将虚拟光网络映射到底层网络,提高虚拟网络的生存性,从而降低底层网络阻塞率,但存在保护带宽共享度较低,频谱利用率低等问题。文献^[15]针对保护带宽共享度较

低,提出最优共享保护映射算法,减少保护频隙消耗,但在路由与频谱分配时未考虑频谱碎片。文献^[16]研究地理位置约束的可生存虚拟光网络嵌入(A-SVNE)问题,建立ILP模型来解决,并采用极大团思想来优化映射过程,但是不适用于无喜好节点的虚拟网络。文献^[17]研究虚拟网中不同线速率下的代价模型,包括转发器和再生器的能耗,考虑物理节点之间的距离,因此产生更少的能耗,但是没有考虑物理链路上消耗频隙数目。文献^[18]从光网络单元概率故障的角度切入,构建光网络故障概率模型,提出基于故障概率感知的虚拟光网络生存性映射算法(FPA-VONE),但可能引起故障概率小的链路产生重载现象。

针对虚拟环境中底层网络的概率性故障,本文提出了一种基于安全性感知的差异化虚拟光网络的映射(SA-DVNM)策略,在故障发生时为差异化业务提供安全保证。在SA-DVNM策略中,根据物理节点之间的跳数和相邻带宽使用情况,提出路径均衡的链路映射机制,最小化瓶颈链路的数量。当单路径失效时,设计允许路径切割的资源分配机制,在路由选择中设计综合考虑安全性和频谱占用的代价函数,并权衡时延差,保障时延敏感业务安全映射,并节约频谱资源。此外,当网络无法满足业务安全性要求时,本文通过配置共享保护路径提高业务的安全系数。

2 网络模型与差异化业务的安全性理论评估模型

2.1 两种网络模型的参数分析

在虚拟光网络映射过程中涉及到两种网络模型,一种是弹性光网络,拓扑为 $G^S = (N^S, E^S)$,其中, N^S 表示弹性光网络的节点集合, E^S 表示弹性光网络的链路集合,每个节点 $n^S \in N^S$ 具有计算资源 C_n^S ,每条链路 $e^S \in E^S$ 的物理距离是 D_e^S ,可用带宽资源为 B_e^S ,链路的安全性为 S_e^S 。另一种网络模型是虚拟光网络,拓扑为 $G_i^V = (N^V, E^V)$,其中, N^V 表示虚拟网络请求的节点集合, E^V 表示虚拟网络请求的链路集合,每个虚拟节点 $n^V \in N^V$ 对数据中心处计算资源需求为 C_n^V ,每条虚拟链路 $e^V \in E^V$ 的带宽需求为 B_e^V ,所需频隙数为

$$N_{e^V} = \frac{B_e^V}{p_m \times B_{FS}} \quad (1)$$

式中, p_m 为调制等级为 m 时的频谱效率, B_{FS} 为单

个频隙的带宽。虚拟链路对物理链路的安全性要求为 S_e^V ，安全性的定义为正常工作时间与总的传输时间之比：

$$S_e^V = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{on}} + T_{\text{off}}} \quad (2)$$

式中， T_{on} 表示虚拟网络请求的正常工作时间， T_{off} 表示业务因物理链路发生故障后修复所占用的时间。假设虚拟网络请求的安全性仅受物理网络中链路故障影响，且每条物理链路的故障都是相互独立的。

2.2 差异化业务的安全性理论评估模型

在虚拟网络映射中，每个虚拟网络请求对底层网络故障的容忍度是有限的，传统的100%保护提出对每条虚拟链路提供一条保护路径，在故障发生时将业务切换到提前配置好的保护路径上，避免业务中断，保障了业务安全性。然而实际中网络故障的概率很小，100%保护消耗过多保护资源，造成较高的资源冗余度，降低虚拟网络请求的接受率。本文所提算法在安全性感知的前提下，灵活地选择链路映射和带宽分配，因此节约了保护路径上的频谱资源，提高了虚拟网络请求的接受率。为保障虚拟网络映射的安全性，在链路映射中对于虚拟网络的节点映射，除了满足其计算资源的大小，还有以下约束条件：一个节点只能映射到一个物理节点上，同一个虚拟网络的节点不能同时被映射到同一个物理节点上，除此之外，来自不同虚拟网络的节点可以映射到同一个物理节点上。节点映射的约束条件如式(3)–式(5)：

$$\phi_m^i C_N^V(i) \leq C_N^S(m), \forall i \in N^V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N^S} \phi_m^i = 1, \forall m \in N^V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N^V} \phi_m^i \leq 1, \forall m \in N^S \quad (5)$$

式中， ϕ_m^i 是一个布尔变量，若虚拟节点 i 映射成功则为1，否则为0。链路映射过程中，物理网络链路

的剩余带宽需要满足虚拟链路的带宽需求，虚拟链路才能被映射到物理链路上。如果虚拟节点 i, j 分别映射到物理节点 m, n 上，虚拟链路 (i, j) 被映射到 m 和 n 之间的一条路径 p_{mn} 上。其中 $\varphi_{m,n}^{i,j}$ 是一个布尔变量，若虚拟链路映射成功则为1，否则为0。 e_{mn} 代表组成 m 到 n 路径上的链路。链路映射的约束条件如式(6)和式(7)：

$$\begin{aligned} \varphi_{m,n}^{i,j} A_e^V(e_{ij}) &\leq A_e^S(e_{m,n}), \forall (i, j) \in N^V, \\ \forall (m, n) &\in N^S, \forall (e_{mn}) \in p_{mn} \end{aligned} \quad (6)$$

$$S_{p_{mn}}^S \geq S_{e_{ij}}^S \quad (7)$$

路径 p_{mn} 的安全性是由路径上每条链路的安全性共同决定，在虚拟网络映射过程中只有满足虚拟链路的安全性要求才可以被成功映射，否则虚拟网络的安全性得不到保障，无法确定其是否可以正常传输。路径 p_{mn} 的安全性计算式如式(8)：

$$S_{p_{mn}}^S = \prod_{e_{mn} \in p_{mn}} S_{e_{mn}}^S \quad (8)$$

在图1(a)中，每条链路上的两个数字分别代表了链路所能提供的安全性以及链路实际的物理距离，图1(b)表示的是一个虚拟网络请求，假设虚拟链路对安全性要求分别为：99%，98%，虚拟节点处的数字表示的是该节点对计算资源的需求大小。假设虚拟节点已经完成映射，映射结果如图1(a)所示。为虚拟链路 e_{AB} 选择3条候选路径分别为Pa(1-3)、Pb(1-2-3)、Pc(1-2-4-3)，通过式(8)对每一条候选路径的安全性分别进行计算， $S_{Pa}^S=99.9\%$ ， $S_{Pb}^S=97.5\%$ ， $S_{Pc}^S=98.8\%$ ，由链路映射约束条件式(7)可知，虚拟链路 e_{AB} 可选择Pa为映射路径传输业务，实现了虚拟网络请求的安全性需求。

虚拟网络映射算法的主要目标是在底层网络概率故障时，提高虚拟网络映射的成功率(VAR)，从而提高基础设施提供商收益。此外，本文的评价指标还包括带宽阻塞率(BBP)，资源利用率(SU)，如

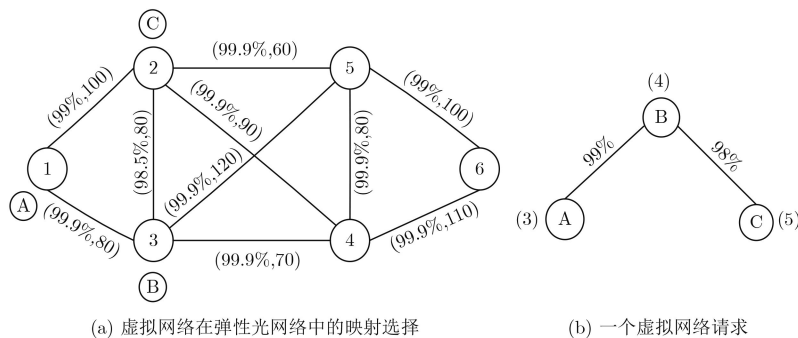


图1 虚拟光网络映射例图

式(9)—式(11):

$$\text{VAR} = \frac{\text{VR}_{\text{ac}}}{\text{VR}_{\text{to}}} \quad (9)$$

$$\text{BBP} = \frac{\text{Rate}_b}{\text{Rate}_{\text{to}}} \quad (10)$$

$$\text{SU} = \frac{u \cdot (\text{Rate}_{\text{to}} - \text{Rate}_b)}{N_e \cdot N_{\text{FS}} \cdot \text{Rate}_{\text{FS}} \cdot T} \quad (11)$$

式中, VR_{ac} 表示成功映射的虚拟网络请求的个数, VR_{to} 表示总的虚拟网络请求的个数, Rate_b 表示被阻塞虚拟网络请求的带宽需求大小, Rate_{to} 表示总的虚拟网络请求的带宽请求大小, N_e 表示底层网络中链路的总条数, N_{FS} 表示每条物理链路上初始的频隙总数, Rate_{FS} 表示每个频隙的大小, 业务持续时间服从参数为 u 的负指数分布, T 表示单位仿真时长。

3 基于安全性感知的差异化虚拟光网络映射算法

基于差异化服务的安全性理论评估模型, 为虚拟网络请求提供安全性保证的同时, 为了有效地降低带宽阻塞率, 提高虚拟光网络成功映射率, 本文提出基于安全性感知的差异化虚拟光网络映射的启发式算法(SA-DVNM), 针对底层网络路径是否能够保证业务的安全性, SA-DVNM策略将映射算法分为两种情况: 单路径路由频谱分配问题和多路径路由频谱分配问题。在单路径路由频谱分配问题中, SA-DVNM策略优先为虚拟链路选择安全性高且资源均衡的路径映射业务。在多路径路由频谱分配问题中, SA-DVNM策略为保证业务的安全性, 通过路径分割将虚拟链路上业务分割到多条路径上传输, 提高虚拟光网络的接受率。

3.1 节点映射策略

在节点映射过程中, 考虑到对计算资源的需求和邻接链路上对带宽资源需求大小, 采用参考文献[19]定义虚拟节点的综合评价:

$$H(n^V) = C_n^V \cdot \sum_{e \in E^V} B_e^V \quad (12)$$

式中, e 表示节点 n^V 的邻接链路, 由于本文采用的是两阶段映射, 节点映射的结果在一定程度上也影响着链路映射情况, 为了避免链路映射的物理路径过长, 消耗较多的频谱资源, 因此将物理节点之间最短路径的跳数也考虑在节点权重式中, 控制被映射到的物理节点之间跳数。此外, 还考虑物理节点的计算资源大小和邻接链路上频谱资源使用情况, 定义物理节点权重式如式(13):

$$H(n^V) = C_n^S \cdot \sum_{e \in E} F_e \Big/ \sum_{i \in N} H_i \quad (13)$$

式中, E 表示物理节点 n^V 的邻接链路集合, N 表示已经被映射的物理节点集合, F_e 表示链路 e 上空闲频隙数, H_i 表示物理节点 n^V 与已经映射物理节点 i 之间路径的最小跳数。当映射第1个虚拟节点时, 设 $H_i=1$ 。

3.2 基于路径均衡的单路径路由频谱分配方法

由于差异化业务对安全性的不同要求, 传统的链路映射优先选择安全性高的路径进行链路映射, 这可能导致网络资源使用不均衡产生瓶颈链路, 且随着虚拟网络请求负载的增加, 由于频谱分配过程受到频谱连续性和一致性的约束, 虚拟链路很难映射成功。本文在满足安全性的前提下通过优化路由选择, 均衡网络资源使用情况, 从而减少瓶颈链路的产生。链路 e 上资源情况, 即链路带宽利用率如式(14):

$$B_e = \left(1 - \frac{F_e}{N_{\text{FS}}}\right) \times 100\% \quad (14)$$

根据每条链路资源使用情况, 计算整个网络链路平均带宽利用率如式(15)。在链路映射的候选路径中计算每条路径的均衡度, 选择资源不均衡的路径进行映射, 减少瓶颈链路, 路径 P 均衡度计算如式(16):

$$\bar{B}_e = \frac{\sum_{e \in E^S} B_e}{|E^S|} \times 100\% \quad (15)$$

$$\text{PER}_P = \frac{\sum_{e \in P} [B_e - \bar{B}_e]^2}{|P|} \quad (16)$$

3.3 基于时延差优化的多路径路由频谱分配方法

SA-DVNM策略以链路的安全性为链路代价, 在链路映射中优先选择安全性较高的链路映射, 导致安全性较高光纤链路上的频谱资源使用频繁以致紧缺, 造成链路映射时频谱分配失败增加, 若选择安全性相对较低的路径进行映射则要承担较高的故障风险和业务损失。针对这一情况, 本文提出一种基于时延差优化的多路径路由频谱分配方法, 综合考虑链路频谱使用情况和链路安全性, 设计链路 e 代价如式(17):

$$W_e^S = \alpha \frac{F_e}{N_{\text{FS}}} + S_e^S \quad (17)$$

式中, α 为调节因子, 用于平衡负载与链路安全性。在更新链路代价后, 对 K 条候选路径重新排序, 若仍不存在满足频谱要求的路径, 则对链路映射 K 条候选路径进行不同组合, 即将虚拟链路分割在多条路径上传输, 为避免路径过长造成时延差问题, 本文允许路径最多分割为两条。如图1中, 对虚拟链路 e_{BC} 映射时有3条候选路径, 分别为: P1(2-3), P2(2-1-3)和P3(2-4-3)。根据安全性约束

条件式(7)计算可知, 3条候选路径均可作为虚拟链路 e_{BC} 提供安全性保障。若底层网络各条链路的频谱资源情况如图2(b)所示, 虚拟链路 e_{BC} 需要4个频隙, 由于受到频谱连续性和一致性约束, 虚拟链路上的业务因为候选路径的频谱资源不足而被拒绝, 本文采用的多路径传输策略对3条候选路径进行两两组合, 为避免路径跳数过多导致频隙消耗过多,

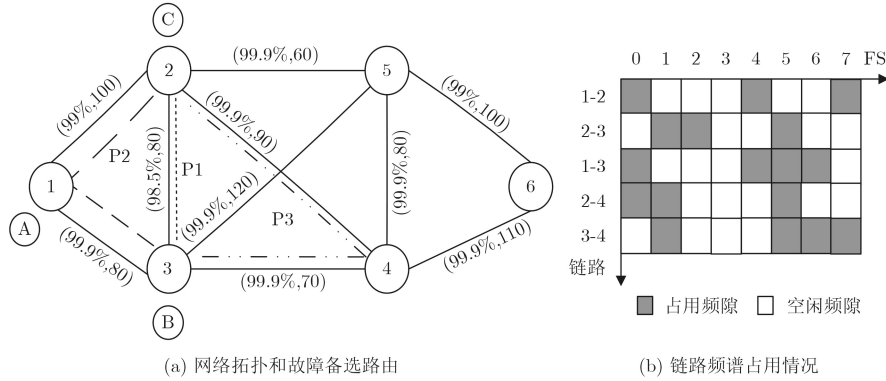


图2 虚拟链路故障概率下的路由频谱分配

$$F_{P_i} = \left\lceil \frac{H_{P_j}}{H_{P_i} + H_{P_j}} \cdot F_{e^V} \right\rceil, F_{P_j} = F_{e^V} - F_{P_i} \quad (18)$$

$$\min \text{MTF} = \left| \sum_{e_{mn} \in P_i} D_{e_{mn}}^S - \sum_{e_{xy} \in P_j} D_{e_{xy}}^S \right| \quad (19)$$

式中, H_{P_i} 和 H_{P_j} 为路径 P_i 和路径 P_j 跳数, F_{e^V} 表示虚拟链路 e^V 所需的频隙数目, $D_{e_{mn}}^S$ 为链路 e_{mn} 物理距离。

表1 路由选择和频隙消耗

路由选择	频隙数	消耗频隙总数
情形1	$F_{P_1}=2$	6
	$F_{P_2}=4$	
情形2	$F_{P_1}=2$	6
	$F_{P_3}=4$	
情形3	$F_{P_2}=4$	8
	$F_{P_3}=4$	

由表1可知, 情形1和情形2所消耗频隙数相同; 针对优化函数, 情形2的距离差比情形1的距离差更小, 即情形2更接近优化值。因此虚拟链路 e_{BC} 选择路径P1和路径P3进行映射, 在最小化时延差的同时减少了频隙的使用, 从而提高虚拟网络请求的接受率。

考虑虚拟网络请求的差异性, 若 K 条路径均不满足安全性要求, 则采用文献[14]的共享保护方法为虚拟链路寻找保护路径, 在故障发生时将业务倒换到共享保护路径传输, 以提高虚拟网络请求接受率。

设计式(18), 确定不同跳数的路径上所需频隙数, 而非采用传统的平均分配方式。另一方面, 考虑到时延敏感业务因多路径的时延差导致业务传输质量下降问题, 在多路径路由选择方式上首先根据频隙消耗数大小选择候选路径组合, 再结合时延差设置优化函数如式(19)。针对不同路由选择方式, 频隙消耗如表1所示。

3.4 基于安全性感知的差异化虚拟光网络映射算法过程

输入: 弹性光网络拓扑 $G^S = (N^S, E^S)$ 和虚拟光网络拓扑 $G_i^V = (N^V, E^V)$

输出: 每个虚拟光网络业务的路由频谱分配方案

步骤1 分别记录虚拟网络请求中的节点个数 N 和链路条数 L , 初始值 $n=1, l=1$, 根据节点权重式(12)和式(13)对虚拟节点和物理节点排序, 排序后的集合分别为 $\mathbf{VNR}\{v_1, v_2, \dots, v_n, \dots, v_N\}$ 和 $\mathbf{SNR}\{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_I\}$, 虚拟链路按带宽需求大小排序 $\mathbf{VLR}\{v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{li}, \dots, v_{lL}\}$;

步骤2 判断 s_i 的计算资源是否大于 v_n 所需要的计算资源, 若大于, 则将 v_n 映射在 s_i 上; 否则, $i=i+1$, 重复该步骤, 若 $i>I$, 阻塞业务, 并记录业务带宽大小;

步骤3 更新 s_i 的计算资源大小, 并从VNR集合和SNR集合分别删除 v_n 和 s_i , $n=n+1$, 若 $n>N$, 转至步骤4; 否则, 转至步骤2;

步骤4 将每条链路的安全性设置为链路代价函数, 对第 l 条虚拟链路映射, 根据Dijkstra算法计算 K 条路径, 并根据式(8)评估每条候选路径的安全性, 若满足约束条件式(7), 则记录该候选路径, 转至步骤5; 否则, 转至步骤9;

步骤5 检查候选路径上每条链路的频谱使用情况, 若存在空闲频谱块大于等于业务所需的频隙数目, 则记录该候选路径, 令 m 表示第 m 条候选路

径, 转至步骤6; 否则, 转至步骤7;

步骤6 根据式(14), 式(15)和式(16)计算路径 m 的路径均衡度, 并按降序排序, 选择路径均衡度最大的路径进行链路映射以及频谱分配, 更新虚拟链路集合, 若集合为空, 转至步骤10; 否则, 转至步骤4;

步骤7 根据式(17)更新链路代价, 根据Dijkstra算法计算 K 条路径, 将不同的路径进行两两组合, 检查候选路径上每条链路的频谱使用情况, 若存在满足式(18)的空闲频谱块, 根据式(19)得出不同组合下优化目标值, 选出优化目标最小的路径组合进行链路映射并分配频谱, 转至步骤8; 否则, 阻塞该业务;

步骤8 更新虚拟链路集合, 若集合为空, 转至步骤10; 否则, 转至步骤4;

步骤9 根据Dijkstra算法计算 K 条路径, 按安全性降序排列, 依次检查每条路径的可用频谱块, 选择第1条满足频隙要求的路径映射, 再次使用Dijkstra算法计算 K 条路径, 找一条满足频谱要求的共享保护路径, 转至步骤8; 若不存在, 则阻塞该业务;

步骤10 算法结束。

SA-DVNM算法主要由3部分组成: 节点排序、链路映射和保护路径的路由频谱分配。虚拟节点排序的复杂度为 $O(|V_r| \times \lg|V_r|)$, 物理节点排序复杂度为 $O(|V_s| \times |B|)$, 单路径的路由频谱分配复杂度为 $O(|V_s|^2 \times |B|^2)$, 路径分割时的路由频谱分配复杂度为 $O(|V_s|^2 \times |B|^2 \times K^2)$, 保护路径的路由频谱分配复杂度为 $O(|L| + |V_s| \times \lg|V_s|)$, 其中 $|V_r|$ 为虚拟节点数目, $|V_s|$ 为物理节点数, $|B|$ 为链路频系数目, $|K|$ 为候选路径数目, $|L|$ 是物理网络的链路条数。因此, SA-DVNM算法复杂度为 $O(|V_r| \times \lg|V_r| + |V_s| \times |B| + |V_s|^2 \times |B|^2 \times K^2 + |L| + |V_s| \times \lg|V_s|)$ 。

4 算法仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

本文所提算法在Visual Studio 2010中编程实

现, 并与FPA-VONE算法^[18]和B-VONE^[18]在拓扑图为14个节点和21条链路的NSFNET网络和24个节点43条链路的USNET网络中仿真性能。在不同负载下, 分别对比了虚拟网络请求映射的成功率、带宽阻塞率和资源利用率3个性能指标, 底层网络中每个物理节点初始计算资源400单位, 每条链路带宽为358个频隙, 每根光纤的故障概率在 $(0, 10^{-4})$ 之间均匀分布, 虚拟业务请求到达服从参数为 λ 的泊松分布, 虚拟节点数目随机分布在 $[3, 5]$, 每个虚拟节点计算资源随机分布在 $[5, 10]$, 虚拟节点之间连通概率为0.5, 每条虚拟链路请求频隙数从2~10中随机产生, 安全指数要求在 $(0.930, 0.999)$ 之间均匀分布, 业务的持续时间服从参数为1的负指数分布。仿真实验中, α 取1。

4.2 仿真结果分析

图3表示的是3种算法在两种拓扑网络下带宽阻塞率的变化情况, 由图可知, 本文所提算法SA-DVNM相同仿真环境中获得了最低的带宽阻塞率。主要是在虚拟链路映射中, 当单路径资源不足时采用了路径分割策略, 允许一条虚拟链路映射到两条具有相同源目的节点的路径上, 从而降低了带宽阻塞率。除此之外, USNET网络下的带宽阻塞率要低于NSFNET网络, 这是因为USNET网络中的节点平均度数高于NSFNET网络, 从而减小了将相邻虚拟节点映射到较远距离的概率。

图4表示的是3种算法在相同仿真环境下虚拟网络接受率的对比, 由图4可知, 在轻负载情况下, 3种算法的虚拟网络接受率相当, 随着网络负载加重, 3种算法下的虚拟网络接受率差异越来越大, 其中SA-DVNM算法下的虚拟网络接受率最高, 这是因为本文所提算法在节点映射时, 考虑了节点之间的跳数, 避免链路映射过长, 从而节约更多频谱资源, 服务更多的虚拟网络请求。除此之外, 由于USNET网络中的节点平均度数高于NSFNET网

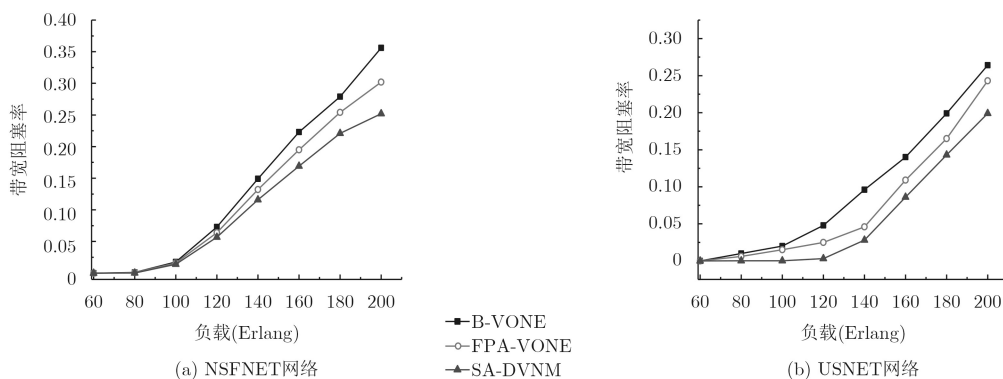


图3 不同负载下带宽阻塞率

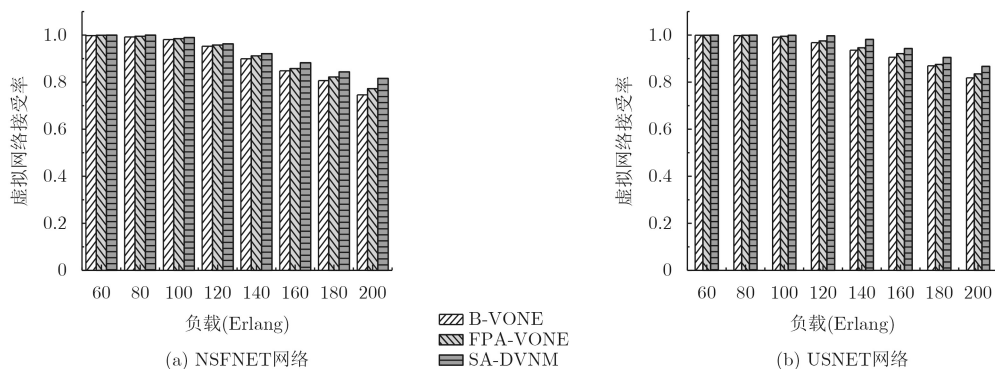


图4 不同负载下虚拟网络请求接受率

络,对于虚拟网络请求更容易找路,因此虚拟网络请求的接受率更高。

图5表示的是3种算法在两种网络环境下频谱资源利用率随负载变化的情况,由于随着网络负载增加,虚拟网络接受率增加,所以网络中频谱资源利用率也随之增加,其中SA-DVNM算法下的资源利用率是最高的,主要原因是本文采用了多路径的链路映射方法,在提高虚拟网络接受率的同时,也提高了网络频谱资源利用率。在相同负载下,USNET网络下的资源利用率要高于NSFNET网络,这是因为USNET网络中的节点平均度数高于NSFNET网络,虚拟网络请求更容易映射成功。

除此之外,图6还分析了3种算法在不同网络拓扑下虚拟网络请求的平均故障概率,反映了虚拟光网络业务在实际映射中的安全指数。虽然FPA-VONE算法和B-VONM算法在链路映射时采用的是最小故障路径传输,但是其阻塞的虚拟网络请求数量更多,因此业务的平均故障概率更大。本文所提算法SA-DVNM在单路径传输失败时,采用了路径分割策略,从而保证了虚拟网络请求的安全性,获得了最低的平均故障概率。除此之外,在相同负载下,USNET网络下的平均故障概率要高于NSFNET网络,这是因为在大网络环境下,节点对之间的跳数更多,从而增加了虚拟网络请求的平均故障概率。

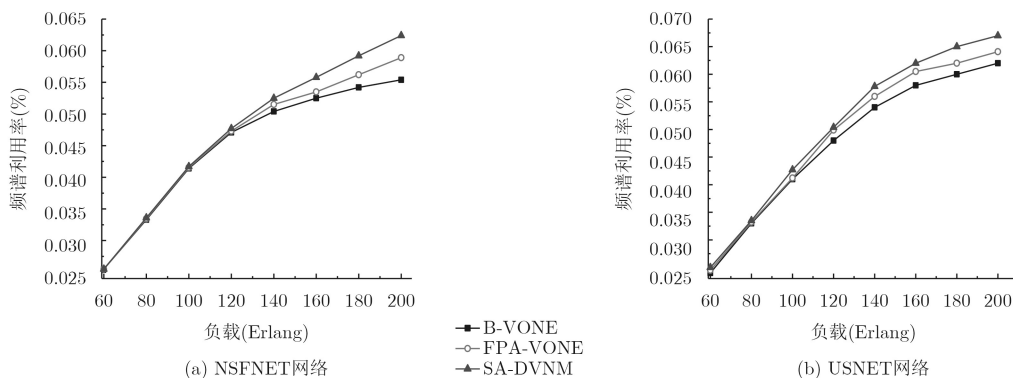


图5 不同负载下频谱利用率

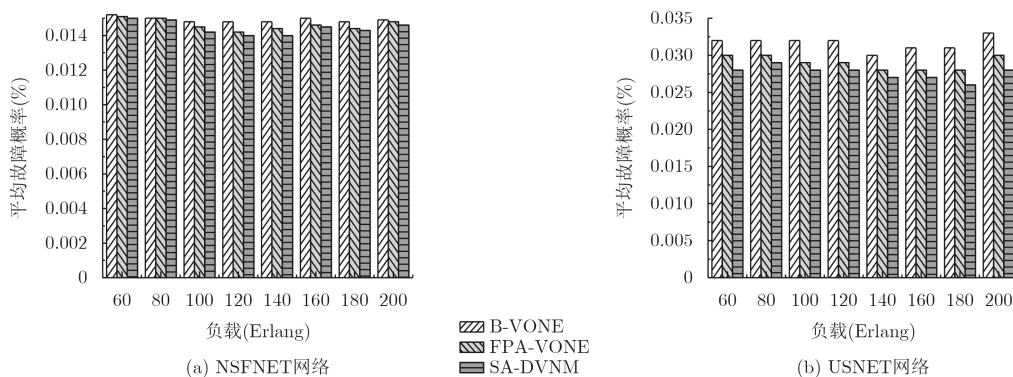


图6 不同负载下平均故障概率

5 结束语

本文研究了底层网络的概率性故障下的虚拟网络映射问题, 提出SA-DVNM策略, 在故障发生时为差异化业务提供安全保证。在SA-DVNM策略中, 提出了路径频谱资源使用均衡的链路映射机制, 最小化瓶颈链路的产生。当单路径无法传输时, 设计允许路径切割的资源分配机制, 在路由选择中设计了新的代价函数, 并且考虑时延差, 保障了时延敏感业务的安全性, 同时节约频谱以便服务更多的后续业务。仿真结果表明本文所提策略在概率故障环境中能够提高虚拟光网络接受率和频谱资源利用率, 并且很好地降低了带宽阻塞率。本文的研究结论对保障虚拟网络业务安全性, 降低保护开销具有重要的指导意义, 对新兴业务在日趋紧张的带宽资源环境下的兴起和发展起着至关重要的作用。

参考文献

- [1] 熊余, 刘川波, 孙鹏. 考虑业务服务质量的光线路终端节能算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(2): 208–215. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.011.
- XIONG Yu, LIU Chuanbo, and SUN Peng. Energy saving algorithm for optical line terminal considering quality of service[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 29(2): 208–215. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.011.
- [2] ANOH N G, BABRI M, KORA A D, *et al.* An efficient hybrid protection scheme with shared/dedicated backup paths on elastic optical networks[J]. *Digital Communication Networks*, 2016, 3(1): 11–18. doi: 10.1016/j.dean.2016.05.001.
- [3] 刘焕淋, 张明佳, 陈勇, 等. 频谱可用性和保护带宽共享度感知的弹性光网络生存性多路径策略[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2472–2478. doi: 10.11999/JEIT161374.
- LIU Huanlin, ZHANG Mingjia, CHEN Yong, *et al.* Survivable multipath strategy based on spectrum availability and protection bandwidth sharing degree-aware for elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2472–2478. doi: 10.11999/JEIT161374.
- [4] HADI M and PAKRAVAN M R. Spectrum-convertible BVWXC placement in OFDM-based elastic optical networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1–12. doi: 10.1109/JPHOT.2017.2657738.
- [5] CASTRO A, GIORGETTI A, CUGINI F, *et al.* Superfilter technique in SDN—Controlled elastic optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7(2): A285–A292. doi: 10.1364/JOCN.7.00A285.
- [6] HAMMAD A, NEJABATI R, and SIMEONIDOU D. Cross-layer optimization of network resource virtualization in IP over O-OFDM networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2016, 8(10): 765–776. doi: 10.1364/JOCN.8.000765.
- [7] YIN Yawei, ZHANG Huan, ZHANG Mingyang, *et al.* Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2013, 5(10): A100–A106. doi: 10.1364/JOCN.5.00A100.
- [8] YE Z, ZHU Y, JI P N, *et al.* Virtual infrastructure mapping in software-defined elastic optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 34(1): 1–11. doi: 10.1007/s11107-016-0678-4.
- [9] 鲍宁海, 刘翔, 张治中, 等. WDM节能光网络中的抗毁保护算法研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(3): 278–282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.002.
- BAO Ninghai, LIU Xiang, ZHANG Zhizhong, *et al.* Survival protection algorithm in WDM energy-efficient optical network[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2012, 24(3): 278–282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.002.
- [10] XIAO Xiancui and ZHENG Xiangwei. A proposal of survivable virtual network embedding algorithm[J]. *Journal of High Speed Networks*, 2016(22): 241–251. doi: 10.3233/JHS-160546.
- [11] RAHMAN M R and BOUTABA R. SVNE: Survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization[J]. *IEEE Transactions on Network & Service Management*, 2013, 10(2): 105–118. doi: 10.1109/TNSM.2013.013013.110202.
- [12] SOUALAH O, FAJJARI I, AITSAADI N, *et al.* A reliable virtual network embedding algorithm based on game theory within cloud's backbone[C]. IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 2975–2981. doi: 10.1109/ICC.2014.6883777.
- [13] CHOWDHURY S R, 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. doi: 10.1109/TNSM.2016.2574239.
- [14] WANG Yuyu, LI Xin, GUO Bingli, *et al.* Survivable virtual optical network mapping in elastic optical networks with shared backup path protection[C]. Wireless and Optical Communication Conference, Chengdu, China, 2016: 1–4. doi: 10.1109/WOCC.2016.7506633.
- [15] YANG Hui, ZHU Xiaoxu, BAI Wei, *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. doi: 10.1016/j.yofte.2016.07.002.
- [16] JIANG Huihui, WANG Yixiang, GONG Long, *et al.*

- Availability-aware survivable virtual network embedding in optical data center networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7(12): 1160–1171. doi: [10.1364/JOCN.7.001160](https://doi.org/10.1364/JOCN.7.001160).
- [17] CHEN Bowen. 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 and CHENG Lei. 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] WANG Hongxiang. 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](https://doi.org/10.1007/s11432-016-5525-9).
- 刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络.
- 林振宇: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为光网络资源优化调度和分配.
- 王 欣: 女, 1991年生, 硕士生, 研究方向为生存性虚拟光网络映射.
- 陈 勇: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为光通信技术、传感检测与自动化技术.
- 向 敏: 男, 1974年生, 博士, 研究方向为智能电网、工业物联网及自动控制.
- 马 跃: 男, 1977年生, 高级工程师, 研究方向为电力通信与调度优化.