

基于灾难预测多区域故障的虚拟光网络生存性映射

刘焕淋^{*①} 杜理想^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(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

摘 要: 生存性虚拟光网络映射是提高光网络应对灾难故障的重要技术保障措施。为解决灾难性多区域故障导致弹性光网络的带宽容量损失问题, 该文提出基于灾难预测故障模型的蚁群优化虚拟光网络映射 (DFM-ACO-VNM) 算法。在该算法中, 设计基于光节点资源和相邻链路的全局潜在故障概率的光节点排序映射准则, 并设计启发式信息公式实现多区域故障下最小带宽容量损失的虚拟节点和虚拟链路协同映射。仿真结果表明, 该文所提算法在多区域故障时能降低带宽容量损失, 减少带宽阻塞率和提高频谱利用率。

关键词: 弹性光网络; 多区域故障; 生存性映射; 蚁群优化; 带宽容量损失

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1710-08

DOI: 10.11999/JEIT190561

Disaster Prediction-based Survivable Virtual Optical Network Mapping for Multi-Area Faults

LIU Huanlin^① DU Lixiang^① CHEN Yong^② WANG Zhanpeng^①

^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, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Survivable virtual optical network mapping is an important technology to improve the optical network response to disaster failures. In order to solve the problem of bandwidth capacity loss caused by multi-area faults resulted from disasters in Elastic Optical Networks (EONs), a multi-area disaster fault model of survivable virtual network based on risk assessment is established, and a Disaster Fault Model based Ant Colony Optimization for Virtual Network Mapping (DFM-ACO-VNM) algorithm is proposed in the paper. An optical node ranking mapping criterion based on node resources and global potential failure probability of adjacent links in EONs is designed. Then, a heuristic information formula is designed to realize cooperative mapping of virtual nodes and virtual links with minimum bandwidth capacity loss under multi-area faults. The simulation results show that the proposed algorithm can decrease the bandwidth capacity loss, reduce the bandwidth blocking probability and improve the spectrum utilization in multi-area faults.

Key words: Elastic Optical Network (EONs); Multi-area fault; Survivability mapping; Ant Colony Optimization (ACO); Bandwidth capacity loss

1 引言

近年来, 随着云计算、视频点播、智能家居以

及万物互联等一系列新兴应用的不断涌现, 新型的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)凭借其高带宽容量、低时延、低功耗、细粒度等优点^[1,2], 逐步替代带宽固定、调制格式单一的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络^[3], 成为下一代极具前景的光传送网。同时, 渐进发展的通信网络体系构架和运营商之间设备资源的壁垒, 使得“僵化”网络资源利用率较低, 网络虚拟化技术被引入到EONs中解决互联网僵化的问题^[4,5]。

虚拟网络请求通常由带有资源约束条件的虚拟

收稿日期: 2019-07-25; 改回日期: 2020-02-19; 网络出版: 2020-03-12

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51977021); 重庆市自然科学基金面上项目(2019jcyj-msxmX0613)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (51977021), The Natural Science Foundation Project of Chongqing Science and Technology Commission (2019 jcyj-msxmX0613)

节点(Virtual Node, VN)和虚拟链路(Virtual Link, VL)组成^[6], 如何在EONs中为虚拟网络提供有效地资源分配被称作虚拟网络映射问题, 且已被证明是NP-hard问题^[7]。在网络虚拟化环境下, 大量的虚拟光网络同时存在于一个光网络中, 由于人为破坏或自然灾害, EONs的部分节点和光纤链路可能会失效, 影响虚拟网络映射的生存性。文献[8-10]研究了生存性虚拟网络映射(Survivable Virtual Network Mapping, SVNM)方法, 解决SVNM问题的常用策略分为两类: 一种是在故障发生前预留或备份底层资源的保护机制; 另一种是通过重新映射故障节点或链路到正常的底层节点和链路的恢复机制, 这两种策略解决单一节点或链路故障环境下SVNM问题被证明是有效的, 但是, 解决多故障和容量更大的EONs的生存能力是欠缺的。

相比于传统光网络的单一故障场景, 由灾难引起的大容量EONs的多链路和多区域、大范围网络故障的影响范围更广泛, 后果更严重^[11,12]。针对区域故障和多链路故障问题, 文献[13]通过多域的生存路径拓扑聚集方案, 提出了一种域间最小重叠区域路由算法, 降低主路径和备份路径同时发生故障的风险, 但是该多域聚集和重叠区路由方法的资源紧张使业务阻塞率较高。文献[14]针对多链路故障保护的资源消耗冗余度较高的问题, 设计考虑链路负载和故障风险的代价函数, 提出一种最小故障风险损失的概率保护策略, 为点到点数据业务选择故障风险小且频谱资源消耗少的概率保护光路。但是该方法的最小风险路径没有考虑链路带宽资源和频谱碎片特性, 当最小风险路径失败后, 业务流分割传输失败的概率风险较高。文献[15]针对虚拟网络对安全性需求差别和保护资源冗余度高问题, 提出一种基于安全性感知的时延差异化虚拟光网络的映射策略, 在链路发生故障时为差异化虚拟网络请求提供安全保证。但是, 该方法假设故障概率服从确定的均匀分布, 无法描述自然灾害发生不确定的情况。

相比确定故障分布和模型的场景, 实际的网络灾难和风险分布难以预先知道。文献[16]对灾难故障的历史统计信息的可行性和合理性进行了讨论, 提出通信网络的预测灾难模型和对业务影响的分析方法。文献[17]根据历史故障数据设计灾难影响的故障模型, 并提出最小链路风险优先选择(Minimum Link Risk Priority Selection, MLRPS)算法, 在节点映射阶段, 总是将计算资源需求最大的虚拟节点映射到剩余计算资源最多的光节点上, 可能导致该光节点邻接链路因没有足够带宽而阻塞业务; 在映

射虚拟链路时, 算法采用贪婪的思想计算2个光节点之间带宽容量损失最小的路径映射, 导致虚拟光网络请求的接受率不高的问题。同时, 文献[17]提出的另一种非对称业务流分配(Asymmetric Parallel Flow Allocation, APFA)算法, 在链路映射阶段采取分流传输, 根据候选光纤链路的潜在故障概率将更多的带宽资源映射到潜在故障概率较小的光纤链路上, 提高了虚拟网络的接受率, 但分流占用更多业务间保护带宽资源, 算法复杂度较高。

灾难和风险的不确定性, 以及EONs网络路由和资源分配的复杂性, 为了提高虚拟网络生存性映射的效率和降低复杂度, 作为智能优化算法的蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)被引入虚拟网络的映射优化过程^[18,19]。针对由灾难引起的EONs多区域故障导致的生存性虚拟网络映射问题, 本文提出了提出基于灾难故障模型的蚁群优化虚拟光网络映射(Disaster Fault Model based Ant Colony Optimization for Virtual Network Mapping, DFM-ACO-VNM)算法, 通过考虑综合历史经验的区域性组件故障信息建立区域性的风险故障概率模型, 提出改进的基于蚁群优化的虚拟网络映射算法, 降低区域灾难故障对虚拟网络映射的带宽容量损失的影响, 从而减少网络的带宽阻塞率和改善EONs资源利用率。

2 生存性虚拟光网络映射问题描述

虚拟网络请求由加权无向图 $G_v(N_v, E_v)$ 表示, 其中, N_v 表示虚拟节点集合, E_v 表示虚拟链路集合, 每个虚拟节点 $n_v \in N_v$ 需求计算能力为 C_{n_v} , 每条虚拟链路 $e_v \in E_v$ 需求带宽资源为 b_{e_v} 。EONs抽象为加权无向图 $G_s(N_s, E_s)$, 其中, N_s 表示光节点集合, E_s 表示光纤链路集合, 对于每一个光节点 $n_s \in N_s$, 其计算能力为 C_{n_s} , 对于每一条光纤链路 $e_s \in E_s$, 可用的带宽资源为 $B(e_s)$ 个频隙(Frequency Slot, FS)。

虚拟网络生存性映射映射问题可分解为节点映射和链路映射两个子问题^[2,6], 其中, 虚拟节点映射需要满足: 每个虚拟节点只能映射到1个光节点上, 每个光节点最多接受1个虚拟网络节点的映射, 映射光节点的可用计算资源不小于虚拟节点请求的计算资源数目; 虚拟链路映射需要满足: 光路的连续频隙带宽大于等于虚拟链路请求的带宽, 且光路上各光纤链路的频谱分配应该满足频谱一致性和连续性的约束条件, 不同虚拟链路映射的光路允许存在链路相交和分配的频谱资源共享。

当EONs网络基础设施遭遇故障时, 上述虚拟网络的虚拟节点和虚拟链路映射除了满足资源约束

外, 还需要考虑候选映射的光节点和光纤链路的风险或可用性是否满足虚拟网络的安全性需求。图1(a)为2个虚拟网络请求, 分别包含3个VN节点、2条虚拟链路和2个VN节点、1条虚拟链路。链路上的数字表示虚拟链路需求的带宽资源, 节点旁边方框中的数字表示虚拟节点需求的计算资源大小。例如, 图1(a)的虚拟节点a需要10个单位的计算资源, 虚拟链路a-b需要5 FSs频隙带宽资源。图1(b)所示的弹性光网络的节点旁边方框中的数字表示光节点的可用计算资源。虚拟网络映射模型如图1(b)所示, 即虚拟节点a, b, c, d, e分别映射在光节点A, C, E, D, F上, 虚拟链路a-b, a-c, b-c分别映射到光路A-C, A-B-E, C-E上; 虚拟链路d-e映射到光路D-C-F上, 映射每条虚拟链路到光纤链路所分配的频谱分配如链路的图标所示。如果在图1(b)中, 光节点B和光纤链路G-F和G-H出现区域灾难故障, 则上述虚拟映射因光网络故障而失败。

通常通信网络基础设施都搭建在幅员辽阔的地表上, 区域性遭到如台风、地震、洪水等灾难, 会造成多区域大范围的光网络设备和光纤链路故障, 导致光通信网络中巨量的通信业务的带宽容量损失。本文考虑在多区域灾难故障下的生存性虚拟光网络映射问题, 通过灾难预测的方法建立多区域灾难故障模型。

设 f_i 表示第 i 类灾难故障, 灾难集合为 F , 在虚拟链路映射中将同类灾难划分在同一共享风险组的链路中, 并采用分类的灾难概率预测灾难风险。灾难发生通信基础设施受影响的地理区域称为灾难覆盖区域, 灾难影响的区域形状往往不确定, 为了设计灾难故障模型描述方便, 参考文献[16,17]方法, 下面将灾难覆盖区域考虑为圆形, 表示为 $A = (A_c, A_r)$, 其中 A_c 表示灾难的中心位置, A_r 表示圆形灾难覆

盖区域的半径, $A_{\max-r}$ 为灾难区域最大边界。 $D_{c,j}$ 表示EONs通信设施组件 j 到灾难中心 c 的欧氏距离, 即 $D_{c,j} = \sqrt{d^2 + h^2}$, 其中 h 表示为灾难的深度或高度, d 表示直线距离。定义灾难冲击影响强度 DI_j 为

$$DI_j = e^{1/D_{c,j}} - 1, D_{c,j} \leq A_{\max-r} \quad (1)$$

式(1)表明通信设施组件 j 离灾难中心 c 的距离越近, 受到的灾难冲击影响强度呈指数增加。

灾难发生后是否导致通信基础设施故障, 可以通过通信设施的潜在故障概率 $p_{c_j^A}(f_i)$ 描述, 它可以根据历史故障数据的经验函数 $p_j^h(f_i)$ 计算, 其中 $p_j^h(f_i) \in [0, 1]$, $f_i \in F$ 且 $c_j^A \in G^A$, 其中 F 和 G^A 分别是灾难故障和受灾的底层弹性光网络拓扑集合, 在不大于灾难平均冲击强度的条件下, 灾难使得网络拓扑 G^A 中节点或链路设施 j 失效的潜在故障概率为[16,17]

$$p_{c_j^A}(f_i) = \left[1 - \prod_{j \in G^A} (1 - p_j^h(f_i)) \right] \times (DI_j)^2 / \left(\max_j \{DI_j\} \right)^2 \quad (2)$$

灾难 i 对通信区域 A 中设施形成的区域风险概率用 $p_A(f_i)$ 表示, $p_A(f_i) \in [0, 1]$, $f_i \in F$, 区域风险 $p_A(f_i)$ 由区域中 M 个组件受灾的权重影响平均值决定, 组件 j 受灾影响对区域故障的权重因子用 α_j 表示。

$$p_A(f_i) = \frac{1}{M} \sum_{c_j^A \in G^A} p_{c_j^A}(f_i) \times \alpha_j \quad (3)$$

基于历史网络故障的认识和数据, 采用概率论方法预测灾难对EONs底层的节点和光纤链路的故障概率对虚拟网络映射的性能影响是本文下面要研究的内容。利用上述灾难的区域风险和设施的潜在故障概率评估EONs光节点和光纤链路故障概率,

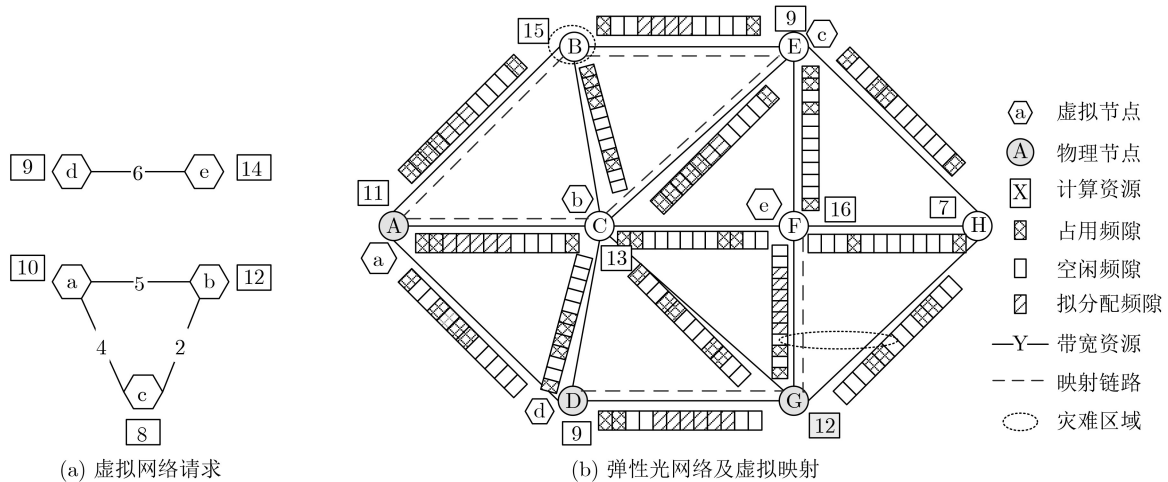


图1 虚拟网络映射到灾难弹性光网络示意图

采用蚁群算法优化虚拟网络的映射策略，以减少虚拟网络映射的带宽容量的损失。

如图1(b)所示，当同时有2个灾难发生时，光纤链路A-B, B-C, B-E, F-G, H-G都会发生故障，没有采用概率论风险模型的图1(a)所示的虚拟链路a-c, d-e映射将失效。

生存性虚拟网络的映射策略导致通信区域A的预期虚拟网络带宽容量损失定义为^[17]

$$E_{BCL} = \sum_{f_i \in \mathbf{F}} p_A(f_i) \times \sum_{\gamma \in \mathbf{\Gamma}} C(\gamma) \quad (4)$$

其中， $\mathbf{\Gamma}$ 表示成功映射到底层弹性光网络的虚拟请求的集合， $C(\gamma)$ 表示虚拟请求 γ 映射后占用EONs的带宽容量代价。式(4)的数值越大，表示区域灾难预计对虚拟网络映射失败造成的带宽损失越大。而 E_{BCL} 的优化需要联合式(3)评估的区域风险概率、虚拟网络生存性映射策略和EONs的路由频谱分配方法，比已经被证明是NP-难的EONs路由频谱分配问题更加困难^[10,17]。基于蚁群优化算法，设计基于灾难故障模型的虚拟网络生存性映射算法实现式(4)的优化目标。

3 基于灾难故障模型的蚁群优化虚拟光网络生存性映射算法

基于灾难故障模型的蚁群优化虚拟网络生存性映射算法(DFM-ACO-VNM)采用虚拟节点和虚拟链路协同映射方法。在虚拟网络映射过程当中，优先映射计算资源需求最大的虚拟节点，避免虚拟节点映射到距离较远且相邻底层链路潜在故障概率大的物理节点上，因此，设计虚拟节点映射的排序公式为

$$R_{n_v} = C_{n_v} \times \sum_{e_v \in E_v} b_{e_v} \quad (5)$$

综合考虑光节点的可用计算资源、邻居光纤链路 $e_s=(n_s, n_*)$ 带宽和灾难影响，物理节点 n_s 排序规则为

$$R_{n_s} = C_{n_s} \times \sum_{e_s \in \mathbf{E}_s} \frac{B(e_s)}{M(e_s)} \quad (6)$$

其中， $M(e_s)$ 表示光纤 e_s 的灾难性能评估参数，计算如式(7)。为了利用蚁群算法优化和搜索到式(4)最小带宽容量损失目标的虚拟链路映射的候选光路，定义全局光纤链路灾难性能评估函数为

$$M(e_s) = \begin{cases} 1 + p_A(f_i) \times p_{c_{e_s}^A}(f_i) / \sum_{c_{e_s}^A \in \mathbf{E}^A} p_{e_s}^A(f_i), & c_{e_s}^A \in \mathbf{E}^A \\ 1, & c_{e_s}^A \notin \mathbf{E}^A \end{cases}, \quad f_i \in \mathbf{F}, e_s \in \mathbf{E}_s \quad (7)$$

其中，若虚拟链路映射的候选光纤链路位于灾难影响区域内， $M(e_s) > 1$ ；否则 $M(e_s) = 1$ 。

蚁群算法的启发式信息 $\eta_{i,j}$ 为虚拟链路映射在EONs光路上的映射代价函数和灾难程度乘积的倒数。

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{\sum_{e_s \in L_{i,j}} C(M(e_s)) \times M(e_s)} \quad (8)$$

其中， $L_{i,j}$ 表示当虚拟节点 n_v^i 映射到光节点 n_s^j 上时，虚拟网络中拟映射虚拟节点和已映射虚拟节点之间连接的虚拟链路的集合， $C(M(e_s))$ 为映射虚拟链路 e_s 到EONs上需要分配的带宽资源值，这里虚拟链路映射采用多商品流运输算法优化网络中虚拟链路映射后允许多路径分割传输和带宽分配^[15,17,20]。

蚁群的转移概率定义为在 t 时刻虚拟节点 n_v^i 映射到某光节点 n_s^j 的转移概率 $p_{i,j}(t)$ 。

$$p_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha \times [\eta_{i,j}]^\beta}{\sum_{h \in N_s} [\tau_{i,h}(t_s)]^\alpha \times [\eta_{i,h}]^\beta}, & \forall h \in N_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中， $\tau_{i,j}(t)$ 定义为 t 时刻虚拟节点 n_v^i 映射到光节点 n_s^j 的信息素浓度， α 和 β 分别为信息素浓度和启发式信息的权重因子。式(9)为虚拟节点 i 映射到光节点 j 的概率值，也是蚁群算法选择个体的适应度函数，是概率选择映射虚拟节点 i 到光节点 j 的依据。映射虚拟节点 n_v^i 映射到光节点 n_s^j 的信息素浓度更新如式(10)。当虚拟节点 n_v^i 倾向于映射到光节点 n_s^j ，信息素浓度 $\tau_{i,j}(t)$ 就挥发的较为缓慢， ρ 为信息素挥发因子， $|N_v|$ 为虚拟节点的数目， Q 为信息素常数， Q 值越大，蚁群算法收敛速度越快。

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^{|N_v|} Q \times \eta_{i,j}^k \quad (10)$$

本文提出的基于灾难故障模型的蚁群优化虚拟光网络映射算法(DFM-ACO-VNM)伪代码如表1。

4 仿真性能与分析

4.1 仿真环境及评价指标

为验证本文所提的DFM-ACO-VNM算法的性能，分别在具有14节点21条链路的NSFNET拓扑和24节点43链路的USNET拓扑中进行仿真验证。如图2(a)和图2(b)所示，每个拓扑中设置5个灾难影响区域且互不重叠^[21]，为便于计算，设受灾难区域影响的光纤链路的潜在故障概率随机分布在 $[0, 1]$ ，每个光节点CPU计算资源200个单位，每条链路总带宽为320 FSs。虚拟网络请求到达服从泊松分布，虚拟节点数随机分布在 $[3, 5]$ ，每个虚拟节点

表 1 DFM-ACO-VNM算法

输入: 输入底层网络 $G_s(N_s, E_s)$ 和灾难事件 F , 虚拟网络请求 $G_v(N_v, E_v)$ 。

输出: Ant_{best} , 即虚拟网络的虚拟节点映射, 虚拟链路映射和频谱资源分配结果。

- (1) 初始化信息素浓度矩阵 $\tau[n][m]$, 启发式信息矩阵 $\eta[n][m]$, 转移概率矩阵 $P[n][m]$, 初始化 $A_{best} = 1000000$, n 为 N_v 集合的虚拟节点数, m 为 N_s 集合的光节点数, 设置蚁群算法最大迭代次数 G_{max} , 迭代变量 $j=0$; A_j 为虚拟网络蚁群映射第 j 轮结果;
- (2) 根据灾难集合 F , 计算EONs区域 A 灾难概率 $p_A(f_i)$, 根据式(7)计算各光纤链路 e_s 的灾难评估 $M(e_s)$ 值;
- (3) 根据式(5), 对虚拟网络中的虚拟节点降序排列在集合 R_{n_v} 中;
- (4) For($j=0, j+1, j < G_{max}$)
- (5) For 从排序第1个虚拟节点到第 n 个虚拟节点
- (6) 执行EBCL-VNM映射算法(表2), 构造虚拟网络映射解 A_j ;
- (7) End for
- (8) If $E_{BCL}(A_{best}) > E_{BCL}(A_j)$
- (9) 令 $E_{BCL}(A_{best}) = E_{BCL}(A_j)$
- (10) End if
- (11) 根据式(10), 更新信息素浓度矩阵
- (12) if converge
- (13) Break;
- (14) end if
- (15) end for
- (16) Return $E_{BCL}(A_{best})$ and A_{best}

表 2 EBCL-VNM 算法

- (1) 初始化虚拟网络请求的虚拟节点、链路映射结果集合和资源分配集合, 即 $A_0 = \emptyset$;
- (2) 根据式(6), 排序EONs中光节点在集合 R_{n_s} 中;
- (3) 选择顺序列表 R_{n_v} 中的第1个虚拟节点 n_v^0 ;
- (4) 选择顺序列表 R_{n_s} 中的第1个光节点 n_s^0 ;
- (5) 将满足资源约束的 n_v^0 映射到 n_s^0 , 记录已映射节点信息, 并从集合 R_{n_v} 中删除 n_v^0 ;
- (6) For 依次映射集合 R_{n_v} 的剩余虚拟节点
- (7) 当前拟映射虚拟节点 n_v^i 加入已映射虚拟节点和虚拟链路集合时, 根据式(8)结果确定需要新映射的虚拟链路;
- (8) 找出满足虚拟节点资源约束条件的候选光节点集合 n_s^{i-C} ;
- (9) For 对所有候选光节点集合 n_s^{i-C} 依次执行
- (10) 运行多商品流算法映射各虚拟链路的 K 条候选光路路由和资源光路带宽分配;
- (11) 根据式(8)计算启发式信息矩阵 $\eta[n_v^i][n_s^j]$;
- (12) 根据式(9)计算转移概率矩阵 $P[n_v^i][n_s^j]$;
- (13) 将虚拟节点 n_v^i 按式(9)计算值, 概率地选择映射到光节点 j ;
- (14) End for
- (15) 更新虚拟节点和虚拟链路映射集合;
- (16) End for
- (17) Return 虚拟节点映射、虚拟链路映射和资源分配结果。

的计算资源[1, 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需求带宽在[1, 10] FSs随机产生, 虚拟网络的持续时间服从负指数分布。使用蚁群算法涉及的仿真参数为: $\alpha=2$, $\beta=5$, $\rho=0.8$, $Q=5$, 最大迭代次数 G_{max} 为50^[18,19]。对比算法为最小链路风险优先选择(APFA)算法^[17]

和基于光纤链路故障概率的非对称业务流分配(MLRPS)算法^[17]。仿真指标为网络带宽阻塞率(Bandwidth Blocking Probability, BBP), 频谱利用率(Spectrum Utilization, SU)和带宽容量损失。

4.2 仿真结果分析

图3表示2种网络环境下, 3种算法的带宽阻塞

率对比。从图3可以看出, 3种算法的带宽阻塞率随着网络负载的增加而增加, 本文提出的DFM-ACO-VNM算法相比其他2种对比算法, 获得更低的带宽阻塞率。这是因为, APFA和MLRPA算法在节点映射阶段仅仅只考虑节点计算资源, 相邻的虚拟链路被映射到相距更远的光路上, 消耗了更多的链路带宽资源。而DFM-ACO-VNM算法在虚拟网络映射时协同地将虚拟节点和虚拟光链路映射在光节点和光纤链路上, 并且根据链路启发式信息在候选映射的虚拟节点对之间找到消耗带宽更少的光纤链路, 从而能最大限度地虚拟链路映射在较短的物

理径上, 节约网络的带宽资源, 提高了资源的利用率, 降低了网络中的带宽阻塞率。在相同负载下, 在NSFNET中的3种算法的阻塞率都高于USNET网络。这是由于NSFNET网络节点的平均度数小于USNET网络, 网络的连通度相比USNET更差, 映射的光路径绕路现象更严重, 需要消耗更多的带宽资源。

图4分别显示了3种算法在NSFNET网络和USNET网络的不同负载下的带宽容量损失性能。从图4可以发现, 本文所提的DFM-ACO-VNM算法获得了最低的带宽容量损失。这是因为DFM-ACO-

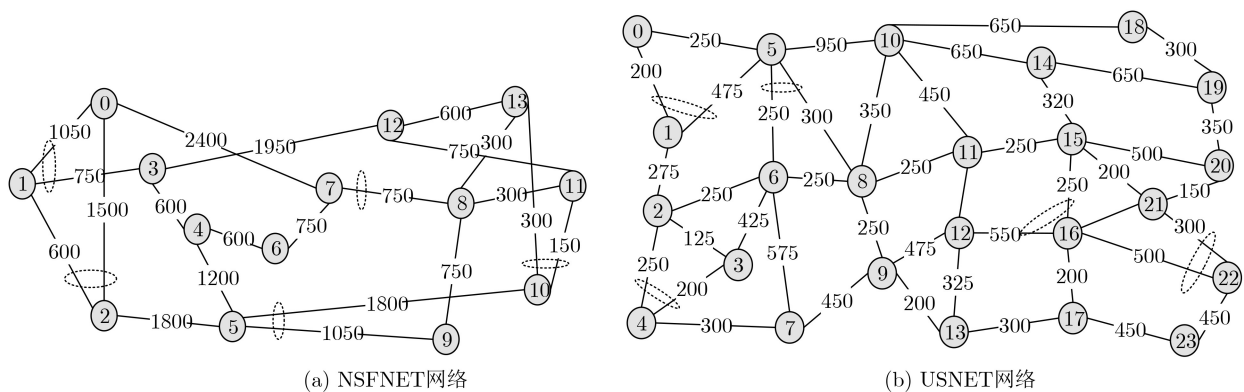


图2 仿真网络多区域灾难故障拓扑

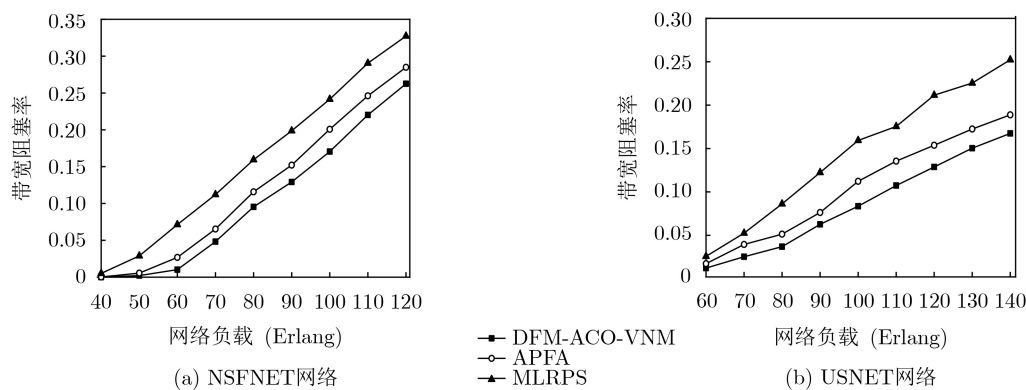


图3 不同负载下带宽阻塞率的对比

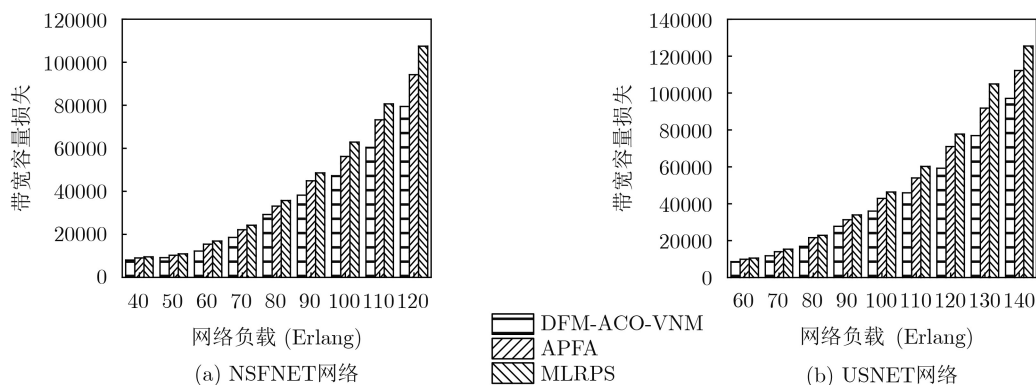


图4 不同负载下带宽容量损失的对比

VNM算法首先根据论文所提的多区域灾难故障模型评估了在多个灾难影响区域下整个底层弹性光网络中每条光纤链路的潜在故障概率。在虚拟节点和链路映射阶段,将每条光纤链路的潜在故障概率这一因素作为链路启发式信息的重要因素,利用链路启发式信息找到即使发生灾难,所选的映射虚拟网络的带宽容量损失也是最小的。在多轮的迭代后,虚拟节点利用先前遗留下的信息素浓度获得整个网络的信息并逐步倾向于映射到信息素浓度高的光节点,向着使整个虚拟网络映射之后总的带宽容量损失最小这个目标逼近,所以,相比于其他2个对比算法,本文所提的DFM-ACO-VNM算法可以得到最低的带宽容量损失。

图5为2种网络环境下,3种算法的频谱资源利用率性能比较,频谱利用率的计算方法为单位时间

内网络中传输的总业务速率与EONs网络的总带宽之比。从图5可以看出,3种算法的频谱利用率都随负载的增大而增大,相比MLRPS算法和APFA算法,本文所提算法DFM-ACO-VNM获得了最高的频谱利用率,主要是因为网络负载相同的情况下,MLRPS算法阻塞了更多的虚拟网络业务,使频谱利用率最低。此外,相对于APFA算法,DFM-ACO-VNM算法的频谱资源利用率最高,这是因为在虚拟网络映射时优化了虚拟节点和虚拟链路映射,首先是通过虚拟节点排序准则和光节点排序准则遏制了虚拟节点映射的光节点间相距甚远的问题,其次,在链路映射时,所提的蚁群启发式信息方法映射新增虚拟链路,进一步保证了虚拟链路所映射的物理光路路径较短,从而消耗更少的频谱资源,提高频谱利用率。

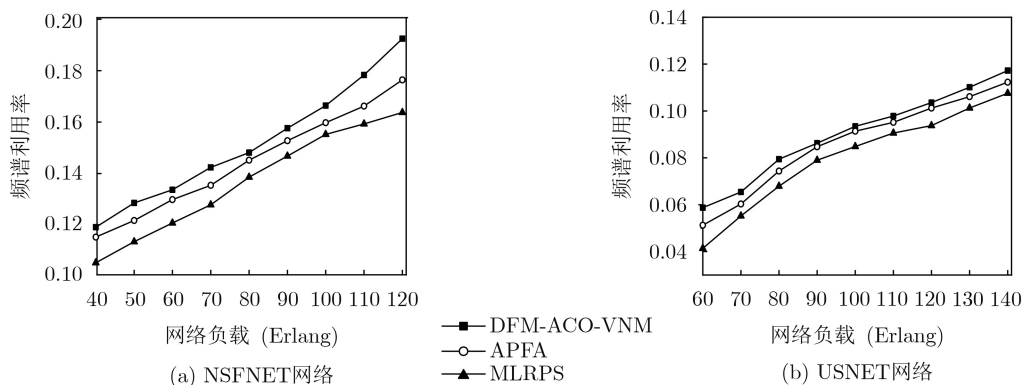


图5 不同负载下频谱利用率的对比

5 结束语

本文研究了弹性光网络中多区域灾难下虚拟网络生存性映射方法,提出了可以评估由灾难故障对底层弹性光网络产生的影响程度的灾难故障模型,用于评估灾难影响区域内底层光链路的潜在故障概率。进而,提出基于灾难故障模型的蚁群算法优化虚拟网络映射的DFM-ACO-VNM算法。在DFM-ACO-VNM算法中,蚂蚁根据启发式信息素找到带宽容量损失最少的虚拟链路映射的光纤路径,并通过多轮迭代获得使整个虚拟网络请求带宽容量损失最少的映射方案。本文方法对存在灾难风险的弹性光网络,为灵活安全的虚拟网络服务需求提供了一种有效的生存性映射方法。

参考文献

- [1] 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: Natural Science Edition*, 2017, 29(3): 313–319. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005.
- [2] 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.
- [3] ELMIRGHANI J M H, KLEIN T, HINTON K, et al. GreenTouch greenMeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(2): A250–A269. doi: 10.1364/JOCN.10.00A250.
- [4] PAOLUCCI F, CUGINI F, FRESI F, et al. Superfilter technique in SDN-controlled elastic optical networks[Invited][J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(2): A285–A292. doi: 10.1364/JOCN.7.00A285.
- [5] LU Shuaibing, WU Jie, ZHENG Huanyang, et al. On maximum elastic scheduling in cloud-based data center

- networks for virtual machines with the hose model[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2019, 34(1): 185–206. doi: [10.1007/s11390-019-1890-3](https://doi.org/10.1007/s11390-019-1890-3).
- [6] LIN Rongping, LUO Shan, ZHOU Jingwei, *et al.* Column generation algorithms for virtual network embedding in flexi-grid optical networks[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10898–10913. doi: [10.1364/OE.26.010898](https://doi.org/10.1364/OE.26.010898).
- [7] DUBOIS D J and CASALE G. Autonomic provisioning and application mapping on spot cloud resources[C]. 2015 International Conference on Cloud and Autonomic Computing, Boston, USA, 2015: 57–68. doi: [10.1109/ICCAC.2015.21](https://doi.org/10.1109/ICCAC.2015.21).
- [8] XIE Weisheng, JUE J P, ZHANG Qiong, *et al.* Survivable virtual optical network mapping in flexible-grid optical networks[C]. 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications, Honolulu, USA, 2014: 221–225. doi: [10.1109/ICCNC.2014.6785335](https://doi.org/10.1109/ICCNC.2014.6785335).
- [9] ZHANG Huibin, WANG Wei, ZHAO Yongli, *et al.* Shared protection based virtual network mapping in space division multiplexing optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 42: 63–68. doi: [10.1016/j.yofte.2017.12.004](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.12.004).
- [10] XUAN Hejun, WANG Yuping, XU Zhanqi, *et al.* Virtual optical network mapping and core allocation in elastic optical networks using multi-core fibers[J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 26–35. doi: [10.1016/j.optcom.2017.05.065](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.05.065).
- [11] GALDAMEZ C and YE Zilong. Resilient virtual network mapping against large-scale regional failures[C]. 2017 IEEE Conference of Wireless and Optical Communication, Newark, USA, 2017: 1–4. doi: [10.1109/WOCC.2017.7928978](https://doi.org/10.1109/WOCC.2017.7928978).
- [12] FERDOUSI S, DIKBIYIK F, FARHAN HABIB M, *et al.* Disaster-aware datacenter placement and dynamic content management in cloud networks[J]. *IEEE OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(7): 681–694. doi: [10.1364/JOCN.7.000681](https://doi.org/10.1364/JOCN.7.000681).
- [13] GOUR R, KONG Jian, ISHIGAKI G, *et al.* Survivable routing in multi-domain optical networks with geographically correlated failures[C]. 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2017.8254775](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254775).
- [14] 刘焕淋, 易鹏飞, 陈勇, 等. 一种最小故障风险损失的弹性光网络多链路故障概率保护策略[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1819–1825. doi: [10.11999/JEIT161159](https://doi.org/10.11999/JEIT161159).
- LIU Huanlin, YI Pengfei, CHEN Yong, *et al.* Multi-link failure probability protection strategy based on minimum fault risk loss in elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1819–1825. doi: [10.11999/JEIT161159](https://doi.org/10.11999/JEIT161159).
- [15] 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 Zhengyu, 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).
- [16] POURVALI M, BAI Hao, CRICHIGNO J, *et al.* Multicast virtual network services embedding for improved disaster recovery support[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(7): 1362–1365. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2822739](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2822739).
- [17] WANG Ying, LIU Xiao, QIU Xuesong, *et al.* Prediction-based survivable virtual network mapping against disaster failures[J]. *International Journal of Network Management*, 2016, 26(5): 336–354. doi: [10.1002/nem.1939](https://doi.org/10.1002/nem.1939).
- [18] 朱颢东, 孙振, 吴迪, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2016, 28(6): 849–855. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.06.017](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.06.017).
- ZHU Haodong, SUN Zhen, WU Di, *et al.* Path planning for mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2016, 28(6): 849–855. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.06.017](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.06.017).
- [19] ZHENG Hongkun, LI Jingjing, GONG Yuejiao, *et al.* Link mapping-oriented ant colony system for virtual network embedding[C]. 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, San Sebastian, Spain, 2017: 1223–1230. doi: [10.1109/CEC.2017.7969445](https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969445).
- [20] 谢晖. 抗毁SDN光网络资源优化调度研究[J]. 激光杂志, 2019, 40(4): 97–101. doi: [10.14016/j.cnki.jgzz.2019.04.097](https://doi.org/10.14016/j.cnki.jgzz.2019.04.097).
- XIE Hui. Research on optimal scheduling of SDN optical network resources[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(4): 97–101. doi: [10.14016/j.cnki.jgzz.2019.04.097](https://doi.org/10.14016/j.cnki.jgzz.2019.04.097).
- [21] DU Xiaowu and MA Lisheng. Backup path provisioning for service protection against disaster failures in telecom networks[C]. 2017 International Conference on Networking and Network Applications, Kathmandu, Nepal, 2017: 220–224. doi: [10.1109/NaNA.2017.40](https://doi.org/10.1109/NaNA.2017.40).
- 刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络。
杜理想: 男, 1995年生, 硕士, 研究方向为光网络生存性路由算法。
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。
王展鹏: 男, 1996年生, 硕士, 研究方向为光网络生存性调度算法。