

基于蚁群优化与准实时密钥池的生存性 虚拟网络映射方法

刘焕淋¹, 刘 博¹, 陈 勇^{2*}, 马 冰¹, 邱 艳¹, 陈浩楠¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆工程学院, 重庆 400056)

摘 要: 为增强弹性光网络的区域故障场景下虚拟网络映射的安全性与抗灾难性, 本文提出基于蚁群优化与准实时密钥池的生存性虚拟网络映射(Ant Colony Optimization and Quasi-real-time Key Pool based on Survivability Virtual Network Embedding, ACOQKP-SVNE)方法. 为降低密文传输路径潜在风险程度, 设计基于蚁群优化的密文传输路径映射策略, 为提高密钥利用率, 设计基于准实时密钥池的量子密钥分发路径映射策略; 当区域故障发生时, 采用基于不同物理组件的受损感知故障恢复策略对受影响的物理组件进行重映射. 仿真结果表明, 与对比算法相比, 所提 ACOQKP-SVNE 的带宽阻塞率最高可降低约为 16%.

关键词: 弹性光网络; 生存性虚拟网络映射; 蚁群优化; 量子密钥分发; 带宽阻塞率

基金项目: 国家自然科学基金(No.51977021); 重庆市自然科学基金(No.CSTB2023NSCQ-MSX0734)

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)09-3425-08

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

DOI: 10.12263/DZXB.20240963

A Method of Ant Colony Optimization and Quasi-Real-Time Key Pool Based on Survivability Virtual Network Embedding

LIU Huan-lin¹, LIU Bo¹, CHEN Yong^{2*}, MA Bing¹, QIU Yan¹, CHEN Hao-nan¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056, China)

Abstract: To enhance the security and anti-calimity of virtual network embedding (VNE) for multi-area faults scenarios in elastic optical networks, a method of ant colony optimization and quasi-real-time key pool based on survivability VNE (ACOQKP-SVNE) is proposed. A strategy of ciphertext data transmission path embedding based on ant colony optimization is designed to reduce the degree of the potential risk of the ciphertext transmission path, and the strategy of quantum key distribution path embedding based on quasi-real-time key pool construction to improve the key utilization. When the multi-area failure occurs, the affected physical components are recovered by using the strategy of damage-aware failure recovery based on different physical components. Simulation results show that compared with comparative algorithms, the proposed ACOQKP-SVNE algorithm can reduce the bandwidth blocking probability by up to about 16%.

Key words: elastic optical networks; survival network virtualization embedding; ant colony optimization; quantum key distribution; bandwidth blocking probability

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.51977021); Chongqing Natural Science Foundation (No.CSTB2023NSCQ-MSX0734)

1 引言

弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)凭借灵活的频谱划分以及自适应选择调制格式^[1], 能满足日益增长的移动业务、云计算和数据中心服务、区域间保

密通信等需求^[2,3]. 随着网络虚拟化技术发展, 虚拟网络映射(Virtual Network Embedding, VNE)增强 EONs 资源灵活应用的关键技术^[4,5]. 然而, EONs 的数据传输的安全性和可靠性面临巨大挑战. 而经典加密的安全传

输方式容易被攻击者利用强大的计算能力破解,使传输数据面临安全风险^[6];而EONs的设备组件老化或损坏,难以保障数据传输可靠性^[7].

量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)利用光子编码的量子态在通信双方生成安全量子密钥,具有信息理论安全性,为解决数据传输的安全性提出了更好的解决方案^[8].而生存性传输是抵抗EONs灾难和故障风险的有效传输方法^[9].但是,将QKD应用于生存性EONs,虚拟光网络(Virtual Optical Network, VON)传输不仅需要满足QKD加密密文传输带宽需求和密钥资源保证能力,还需考虑在EONs链路故障情况下的密文和密钥生存性,并保证密钥供给和消耗之间的平衡^[6,7].

Zou等人^[10]为减少大规模灾难时造成的数据丢失的问题,提出一种减灾感知的灾难管理(Disaster Management with Mitigation Awareness, DMMA)算法,设计惩罚函数以抑制重新分配资源导致业务的降级损失,但该算法因未考虑业务恢复顺序,使得业务恢复成功率低.Li等人^[11]为解决由于灾难导致的多条路径中的业务中断问题,提出一种顺序感知业务恢复(Ordering Aware Service Recovery, OASR)算法,利用遗传算子寻找最优的业务恢复顺序,但该算法在频谱分配过程中忽略了带宽资源以及频谱碎片的影响,致使带宽阻塞率较高.Liu等人^[12]为解决灾难导致底层物理网络大面积失效的问题,根据区域故障的灾害预测模型,提出最小链路风险先验选择(Minimum Link Risk Prior Selection, MLRPS)算法,在虚拟链路映射过程中,采用贪婪方法将故障的虚拟链路映射至带宽容量损失最小的路径,但在改善VON接受率方面的效果不显著.在文献[11,12]中,研究者仅关注了数据传输过程生存性策略,但没有考虑传输安全性.Zou等人^[13]为解决多域多故障场景下生存性QKD的问题,提出基于拓扑映射的多域QKD网络恢复算法,以增强网络的生存性.

本文针对区域故障场景下的生存性VON安全映射问题,提出基于蚁群优化与准实时密钥池的生存性虚拟网络映射(Ant Colony Optimization and Quasi-real-time Key Pool based on Survivability Virtual Network Embedding, ACOQKP-SVNE)算法,以提高VNE的安全性和生存性.

2 基于QKD的虚拟网络映射模型

VNE包括虚拟节点映射以及虚拟链路映射.为保障VON中数据传输的安全性,虚拟链路映射除满足密文传输带宽需求外,还需为虚拟链路分配密钥资源以实现QKD.

图1所示的VNE模型包括虚拟网络层和基于QKD

的EONs物理网络.EONs可抽象为无向图 $G^s=(N^s, L^s, C^s, B^s, K^s)$; N^s 为EONs光节点集; L^s 为光纤链路集; C^s 为光节点可用计算资源集;第 m 个光节点 n_m^s 计算资源为 $C(n_m^s)$, $n_m^s \in N^s$, $C(n_m^s) \in C^s$; B^s 为光纤链路带宽资源集,连接在光节点 n_m^s 和 n_n^s 间的光纤链路 $B(l_m^n)$ 的带宽容量为 $B(l_m^n)$, $B(l_m^n) \in B^s$;每两个相邻光节点之间配备量子密钥池(Quantum Key Pool, QKP), K^s 为QKP的密钥资源集,光节点 n_m^s 和 n_n^s 之间的QKP密钥资源容量为 $k(l_m^n)$, $k(l_m^n) \in K^s$;每条光纤链路上括号中的数字分别表示可用带宽资源及QKP中存储的密钥资源容量.类似地,虚拟网络层的VON请求建模为 $G^v=(N^v, E^v)$, N^v 为虚拟节点集; E^v 为虚拟链路集;虚拟节点 n_i^v 所需计算资源为 $C(n_i^v)$;每条虚拟链路 e_i^v 的带宽需求为 $B(e_i^v)$, 密钥需求为 $k(e_i^v)$.在图1中,虚拟节点映射为: $\{VN1 \rightarrow SN1, VN2 \rightarrow SN5, VN3 \rightarrow SN4\}$.

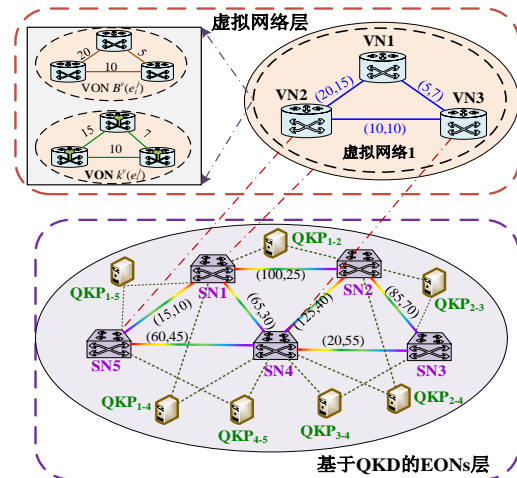


图1 基于QKD的虚拟网络映射模型示意图

将VON的虚拟节点和虚拟链路映射到EONs中,各光节点能根据VON请求连续生成量子密钥,接受网络中心控制器的密钥存储和管理约定^[14,15].当虚拟节点映射到EONs某个光节点时,该光节点的带宽资源和计算资源能满足虚拟节点资源需求,且不同虚拟节点映射到不同光节点上^[7,14].此外,VON的各虚拟链路映射到EONs某条光路时,除了要满足光路的频谱一致性、频谱连续性^[7,14]以及频谱不重叠性外,还需要满足资源约束式(1)和式(2)的条件^[7,14]:

$$B(P_1) \cdot \varphi(e_i^v, P_1) \geq B^v(e_i^v), \forall e_i^v \in E^v \quad (1)$$

$$\sum_{P_2 \in K_p} k(P_2) \cdot \psi(e_i^v, P_2) \geq k(e_i^v), \forall e_i^v \in E^v \quad (2)$$

其中, $B(P_1)$ 表示虚拟链路 e_i^v 映射到EONs的光路 P_1 所需带宽值; $\varphi(e_i^v, P_1)$ 为布尔变量,若光路 P_1 为 e_i^v 映射的密文数据映射子路径,其值为1,否则,值为0; K_p 为 e_i^v 映射的量子密钥分发路径集; $k(P_2)$ 为光路 P_1 需配置密钥

资源容量. $\psi(e_i^j, P_2)$ 为布尔变量, 若光路 P_2 是 e_i^j 的一条量子密钥映射路径, 其值为 1, 否则, 值为 0; 式(1)保证所有密文数据传输子路径的可用带宽之和满足虚拟链路 e_i^j 的带宽需求; 式(2)确保所有量子密钥分发子路径的密钥资源总和满足虚拟链路 e_i^j 的密钥需求^[14, 15].

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, 将造成多区域大范围光网络设备和光纤链路瘫痪^[14]. 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, 由于灾难影响区域形状是不确定的, 参考文献[12, 14]灾难影响区域描述方法, 将灾难影响区域考虑为圆形, 灾难影响区域为: $Z=(z_o, z_r)$ 表示, 其中, z_o 表示灾难中心, z_r 表示灾难覆盖区域的半径, 利用基于灾害故障风险意识的经验概率评估灾难影响区域 Z 的故障概率为^[12, 14, 15]

$$p_z(f) = \frac{1}{|M|} \sum_{M_j \in Z} p_{M_j}(f) \quad (3)$$

其中, M_j 表示在受灾影响区域中的物理组件 j , 物理组件可以是底层光网络的节点或链路; $|M|$ 为受灾影响的物理组件数目; $p_{M_j}(f)$ 为物理组件 j 的潜在失效概率^[12, 15].

满足映射的资源需求在本质上是一个资源分配问题, 包括加密业务的路由、频谱资源分配和 QKD 路由与密钥分配是计算机多项式难解问题^[7, 12, 15]. 利用蚁群算法转移概率控制信息素正反馈机制, 可以提将 VON 请求映射到路径短、故障概率低和资源消耗少的路径上, 以提高密文传输的成功率^[14, 15].

3 基于蚁群优化与准实时密钥池的生存性虚拟网络映射(ACOQKP-SVNE)

ACOQKP-SVNE 包括: 基于潜在故障概率评估的虚拟节点映射策略, 基于蚁群优化的密文传输路径映射策略, 基于准实时密钥池的 QKD 路径映射策略和基于不同物理组件的受损感知故障恢复策略.

3.1 基于潜在故障概率评估的虚拟节点映射策略

为增强虚拟节点映射与虚拟链路映射的关联性, 在评估虚拟节点重要度时, 考虑虚拟节点计算资源需求和虚拟节点相邻虚拟链路上的带宽资源需求与密钥资源需求, 虚拟节点 n_i^v 的重要度为

$$V(n_i^v) = \frac{\vartheta_1 \cdot C(n_i^v)}{\sum_{n_j^v \in N^v} C(n_j^v)} + \frac{\vartheta_2 \sum_{e_i^j \in A(n_i^v)} B(e_i^j)}{d(n_i^v) \sum_{e^v \in E^v} B(e^v)} + \frac{\vartheta_3 \sum_{e_i^j \in A(n_i^v)} k(e_i^j)}{d(n_i^v) \sum_{e^v \in E^v} k(e^v)} \quad (4)$$

其中, $C(n_i^v)$ 表示虚拟节点 n_i^v 的计算需求资源值; e_i^j 表示

与 n_i^v 相邻的虚拟链路, $A(n_i^v)$ 为与 n_i^v 相邻的虚拟链路集合; $d(n_i^v)$ 为 n_i^v 的节点度数; $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ 为权重系数, 且 $\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3 = 1$.

为提高 VNE 成功率, 评估 EONs 光节点的重要度时, 不仅考虑光节点度数和可用资源情况, 还考虑相邻光纤链路具有最小潜在故障概率, 将 n_i^v 映射到光节点 n_m^s 的重要度为

$$P(n_m^s) = \frac{C(n_m^s) \cdot d(n_m^s)}{\left(1 + \sum_{n_{m'}^s \in A_E(n_i^v)} H(n_m^s, n_{m'}^s)\right) \cdot \sum_{l_m^s \in A(n_m^s)} R(l_m^s)} \quad (5)$$

其中, $d(n_m^s)$ 为光节点 n_m^s 的节点度数; $A(n_m^s)$ 为 n_m^s 相邻的光纤链路集合; $A_E(n_i^v)$ 为与 n_i^v 相邻虚拟节点的已映射光节点集合; $H(n_m^s, n_{m'}^s)$ 为光节点 n_m^s 到 $n_{m'}^s$ 的光路跳数; 与 n_m^s 相邻的光纤链路 l_m^s 的潜在故障概率为 $R(l_m^s)$ ^[12, 14].

根据虚拟节点和光节点重要度降序排列, 依次将虚拟节点映射至底层物理网络中的光节点上.

3.2 基于蚁群优化的密文传输路径映射策略

在虚拟链路映射时, 根据虚拟链路重要度值对依次映射虚拟链路. 虚拟链路 e_i^j 的重要度计算式为

$$V(e_i^j) = \frac{V_N(n_i^v) + V_N(n_j^v)}{H(n_i^v, n_{\max}^v) + H(n_j^v, n_{\max}^v)} \quad (6)$$

其中, n_{\max}^v 为重要度值最大的虚拟节点; $H(n_i^v, n_{\max}^v)$ 和 $H(n_j^v, n_{\max}^v)$ 分别为 n_i^v, n_j^v 距离 n_{\max}^v 的光路跳数.

利用蚁群算法^[14, 16]寻找密文数据最优路径时, 设第 k 只蚂蚁在 t 时刻从光节点 n_m^s 向 n_q^s 转移概率为

$$P_t^k(n_m^s, n_q^s) = \begin{cases} \arg \max \{\tau_m^q(t) \cdot \eta_m^q(t)\}, & r \leq r_0 \\ \frac{[\tau_m^q(t)]^r \cdot [\eta_m^q(t)]^r}{\sum_{\mu \in A(m)} [\tau_m^\mu(t)]^r \cdot [\eta_m^\mu(t)]^r}, & r > r_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $A(m)$ 表示 n_m^s 的邻居光节点集合; γ 和 λ 为调节因子, 控制信息素和启发函数的相对权值; r 为随机数, r_0 为常数, 根据 r 与 r_0 的大小比较, 评估蚂蚁从光节点 n_m^s 向 n_q^s 转移的概率; $\tau_m^q(t)$ 表示 t 时刻的蚂蚁经过光纤链路 l_m^q 的残留信息素浓度; $\eta_m^q(t)$ 表示 l_m^q 启发式函数, 其更新方法参考文献[14, 16].

基于蚁群优化的密文传输路径映射策略详细的步骤如策略 1 所示.

3.3 基于准实时密钥池的 QKD 路径映射策略

QKD 使量子密钥能被通信双方共享^[6, 15], 为评估量子密钥生成与消耗之间的关系, 设计光纤链路 l_m^n 的剩余密钥资源容量计算式子为

$$k(l_m^n, t_s) = G_k(l_m^n, t_s) - \zeta \cdot C_k(l_m^n, t_s), \quad 0 \leq t_s \leq T_k \quad (8)$$

其中, $k(l_m^n, t)$ 表示密钥存储时间 t 内 l_m^n 的 QKP 中剩余密钥资源容量; $G_k(l_m^n, t_s)$ 为 t_s 时 l_m^n 的 QKP 中密钥资源生成

策略1 基于蚁群优化的密文传输路径映射策略

输入: G, G' 和虚拟节点映射结果, 设 r_0 和 N 值, $t=0, V_L=\emptyset$

输出: G' 的密文传输路径和路径上频谱资源分配结果

- S1. 设蚂蚁总数 $|A|=100$, 蚂蚁 $e=0$, 设 $i=1, r=0$;
- S2. 由式(6)计算 G' 各虚拟链路重要度, 降序保存在集合 V_L 中;
- S3. 将 V_L 中第1条未映射虚拟链路, 标记为 l' , 将 l' 两端虚拟节点的已映射的光节点标记为 n_s, n_d ;
- S4. 计算 G' 的光节点 n_s 的节点度数 $d(n_s)$, 设 $e=d(n_s)$;
- S5. 从 n_s 释放蚂蚁 e , 由式(7), 计算蚂蚁 e 从 n_s 到各邻居节点的转移概率, 从 n_s 转移至转移概率值最大的邻居节点 n_e ;
- S6. 更新光纤链路 l_s^e 上的信息素浓度值与启发式函数值;
- S7. 若 $n_q=n_d$, 转 S8; 否则, 令 $n_q=n_s, t=t+1$, 转 S5;
- S8. 若 $e \geq |A|$, 转 S9; 否则, 令 $e=e+d(n_s)$, 转 S5;
- S9. 若 $i \geq N$, 转 S10; 否则, 令 $i=i+1$, 令 $e=d(n_s)$, 转 S5;
- S10. 若 n_s 到 n_d 光路不存在满足虚拟链路 l' 所需的空闲频段块, 转 S12;
- S11. 采用首选即中方式, 为 l' 映射的密文传输路径分配频谱资源, 从 V_L 中删除 l' , 若 $V_L \neq \emptyset$, 转 S3;
- S12. 返回 G' 密文传输路径映射与频谱资源分配结果.

量; $C_k(l_m^n, t_s)$ 为 t_s 内 l_m^n 的 QKP 中密钥资源消耗量; T_k 为量子密钥使用时间门限; ζ 表示 l_m^n 剩余密钥资源容量是否满足加密所需密钥量.

为最小化量子密钥消耗, 设计考虑光纤链路的密钥资源信息与跳数的量子密钥路径权值函数为

$$P_C(P_2) = \frac{\sum_{l_m^n \in P_2} \chi(l_m^n, t_s) \cdot k(l_m^n, t_s)}{1 + H(P_2)} \quad (9)$$

其中, $\chi(l_m^n, t_s)$ 为布尔变量, 若 l_m^n 中的 QKP 在光路 P_2 的 t_s 内消耗密钥资源最少的链路, 则 $\chi(l_m^n, t_s)=1$; 否则, $\chi(l_m^n, t_s)=0$; $H(P_2)$ 为光路 P_2 的跳数. $P_C(P_2)$ 值越大, 则 QKP 在 P_2 上消耗的密钥资源更少. QKD 路径映射过程如策略2所示.

3.4 基于不同物理组件的受损感知故障恢复策略

当 EONs 组件受灾影响时, 为最大程度恢复受影响的 VON 数量, 优先恢复受影响的节点承载的虚拟请求^[10,12,14], 根据式(4)对这些受影响的虚拟节点进行重新排序和重映射; 受影响的 EONs 光纤链路上承载的虚拟链路采用策略1和策略2重新映射. 为最大程度地恢复受损的 VON 数目, 设计底层物理网络中受故障影响的光纤链路恢复顺序, 其中, 光纤链路 l_m^n 的恢复顺序权值为

$$R(l_m^n) = |D_v(l_m^n)| \cdot \sum_{e^v \in D_v(l_m^n)} (B(e^v) + K(e^v)) \quad (10)$$

其中, $D_v(l_m^n)$ 表示受灾影响的 l_m^n 承载的虚拟链路集合; $|D_v(l_m^n)|$ 为 $D_v(l_m^n)$ 中虚拟链路数量. $R(l_m^n)$ 值越大, 表示 l_m^n 的恢复优先级顺序越高.

基于不同物理组件的受损感知故障恢复策略的具

策略2 基于准实时密钥池的量子密钥分发路径映射策略

输入: G, G' 的 VNE 结果, 设 K, T_k 值, $t_s=0, V_L=\emptyset$

输出: G' 虚拟链路 QKD 路径映射和量子密钥消耗量

- S1. 由 QKD 生成各个 QKP 中密钥容量和确定密钥生成速率, 根据 G' 各虚拟链路的重要度值, 降序保存在集合 V_L 中;
- S2. 将 QKD 系统生成的量子密钥资源存储到量子密钥池中;
- S3. 由式(8), 更新各 QKP 中的密钥容量, 如果密钥的存储时间 t_s 超过 T_k , 则销毁未在 T_k 内使用的密钥资源;
- S4. 若集合 V_L 中存在未映射 QKD 虚拟链路, 将第1条未映射虚拟路径标识为 l' , 设 $Q_L=\emptyset$, 转 S5; 否则, 转 S9;
- S5. 使用 K 最短路算法, 在 EONs 中寻找 l' 的 K 条候选 QKD 路径, 由式(9)计算 QKD 路径权值, 降序保存在集合 Q_L 中;
- S6. 从 Q_L 中选择第1条路径标识为 P_a , $\max\{k(P_a)\}$ 为 P_a 上最大剩余密钥资源容量, 若 $\max\{k(P_a)\} \geq k(l')$, 则记录 l' 的 QKD 路径 $P_2=P_a$ 和密钥消耗量, 从 V_L 中删除 l' , 转 S4;
- S7. 从集合 Q_L 中选出下一条 QKD 路径, 标识为 P_b , 统计 P_b 的 $\max\{k(P_b)\}$, 若 $\max\{k(P_b)\} \geq k(l') - \max\{k(P_a)\}$, 记录 l' 的 QKD 路径 $P_2=P_a+P_b$ 和密钥消耗量, 从 V_L 中删除 l' , 转 S4;
- S8. 从集合 Q_L 中删除路径 P_b , 若 $Q_L \neq \emptyset$, 转 S7; 否则, 转 S9;
- S9. 返回 G' 的各虚拟链路的 QKD 路径映射和密钥消耗量.

体步骤如策略3所示.

4 仿真结果与分析**4.1 仿真环境**

为验证 ACOQKP-SVNE 的性能, 分别在 14 节点、21 链路的 NSFNET 拓扑和 24 节点、43 链路 USNET 拓扑上进行仿真, 分别随机设置 3 个和 5 个灾难影响区域^[12,14], 光纤链路和节点的潜在组件失效概率在 (0,1) 间随机生成. VON 到达服从参数为 λ 的泊松分布到达, 具有保密需求的 VON 中虚拟节点数目在 [3,5] 随机生成, 每个虚拟节点计算资源在 [1,10] 随机生成, 任意虚拟节点之间连通概率为 0.5, 每条虚拟链路带宽需求为 [1,10] 频隙^[17]; 设物理网络中每个光节点的计算资源为 200 units, 每条光纤链路带宽容量为 358 频隙, 每频隙为 12.5 GHz; 设每个量子密钥池的初始密钥容量为 80 u, 密钥生成速率为 100 u/s. 蚂蚁总数 $|A|=100$, $\gamma=2, \lambda=5, \rho=0.3$, 最大迭代次数 $N=50$, 设 $r \in (0,1)$, $r_0=0.5, \omega_1=\omega_2=0.5$; $\vartheta_1=0.4, \vartheta_2=\vartheta_3=0.3; K=3, T=100 \text{ s}, \text{GB}=1, T_k=50 \text{ s}$ ^[10,12,14].

为验证 ACOQKP-SVNE 的性能, 采用的对比算法为: Zou 等人^[10]提出的 DMMA, Li 等人^[11]提出的 OASR, 以及 Liu 等人^[12]提出的 MLRPS 算法.

4.2 仿真结果及分析

在图2中, 带宽阻塞率随网络负载的增加而增加, 在相同负载下, 所提 ACOQKP-SVNE 具有最低的带宽阻塞率. 这是因为: ACOQKP-SVNE 在评估虚拟节点和光节点重要度时, 能避免虚拟链路映射的密文传输路径

策略3 基于不同物理组件的受损感知故障恢复策略准

输入: 受灾难影响 G^v 虚拟网络 G^v 的 VNE 结果, 设 $T=100$ s

输出: 受灾难影响的虚拟网络 G^v 重新映射的结果

- S1. 在 T 内, 若有灾难发生, 确定物理网络的受灾难影响的光节点以及光纤链路, 统计需重映射的虚拟节点和虚拟链路;
- S2. 根据式(4), 计算受损光节点承载的虚拟节点重要度值, 并降序存入集合 R_N 中;
- S3. 将集合 R_N 中第 1 个未重新映射的虚拟节点标记为 n_{max}^v ;
- S4. 根据式(5), 计算 G^v 中剩余未受灾难影响的光节点的重要度值, 并降序存入集合 S_N 中;
- S5. 将 S_N 中第 1 个光节点记为 n_{max}^s , 若 n_{max}^s 可用计算资源满足 n_{max}^v 的需求, 将 n_{max}^v 重新映射至 n_{max}^s 上, 转 S7;
- S6. 从 S_N 中删除 n_{max}^s , 若 $S_N = \emptyset$, 转 S15; 否则, 转 S5;
- S7. 从 R_N 中删除 n_{max}^v , 若 $R_N = \emptyset$, 转 S3;
- S8. 统计受损虚拟节点相邻的虚拟链路, 根据式(6)计算受损虚拟链路的重要度值, 降序存入集合 R_L 中, 转 S9;
- S9. 选 R_L 中第 1 条虚拟链路标记为 l^v , 调用策略 1, 为 l^v 寻找密文传输路径, 若失败, 转 S15;
- S10. 调用策略 2, 为 l^v 寻找 QKD 路径, 如果失败, 则转 S15
- S11. 从集合 R_L 中删除 l^v , 若 $R_L = \emptyset$, 转 S9;
- S12. 将受灾难影响且未被重新路由的光纤链路放入集合 S_L 中, 由式(10), 计算 S_L 中的受损光纤链路的恢复顺序权值, 降序排列在集合 S_L 中;
- S13. 将 S_L 中第 1 条光纤链路记为 l_i^s , 若 l_i^s 承载的是密文数据, 则采用策略 1 重路由密文数据, 若 l_i^s 承载的是 QKD 信息, 则采用策略 2 重路由 QKD 路径, 若重路由失败, 转 S15;
- S14. 从 S_L 中删除 l_i^s , 若 $S_L = \emptyset$, 转 S13;
- S15. 返回受灾难影响的 G^v 重新映射的结果.

跳数过多, 有助于减少频谱资源的消耗. 而 OASR、MLRPS 与 DMMA 算法在映射虚拟节点时, 没有考虑节点映射对虚拟链路造成的影响, 可能使相邻虚拟节点映射至跳数较多的光路上. 另一方面, 在密文路径映射阶段, ACOQKP-SVNE 通过蚁群优化策略按照概率转移找到密文数据映射的最优路径, 降低光路的频谱碎片化程度, 减少了后续 VON 因频谱资源不足而被阻塞的概率. 当网络负载为 400 Erlang 时, ACOQKP-SVNE 与 OASR、MLRPS、DMMA 算法相比, 在 NSFNET 网络中, 带宽阻塞率分别降低约 14%、16% 和 3%.

在图 3 中, 随着网络负载增加, 网络的额频谱利用率呈增长趋势, 在相同负载下, 所提 ACOQKP-SVNE 算法的频谱利用率最高. 原因是: ACOQKP-SVNE 在虚拟节点映射过程中, 评估光节点重要度时, 增加了虚拟节点与虚拟链路的关联性, 减少了密文传输路径映射至跳数过多的光路上, 提高了频谱利用率; 另外, 在密文传输路径映射阶段的路由选择过程中, 蚁群算法在

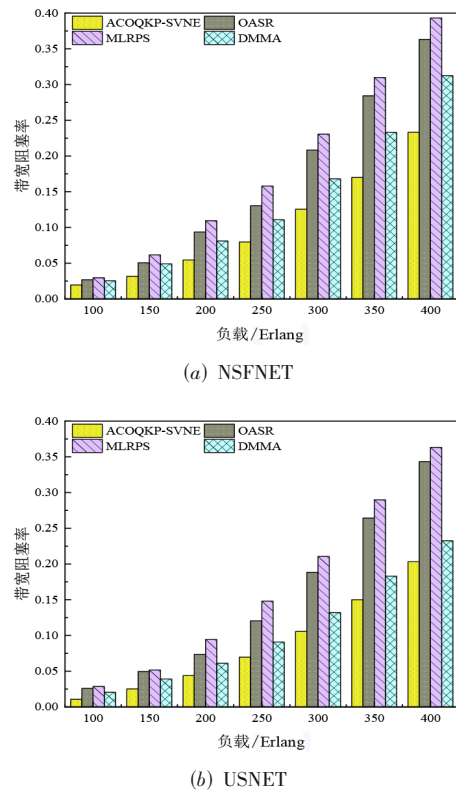


图 2 带宽阻塞率与网络负载关系

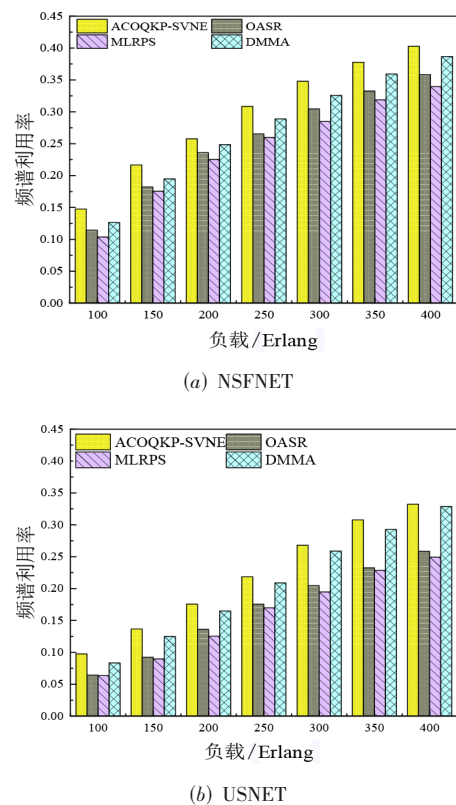


图 3 频谱利用率与网络负载关系

蚂蚁转移概率中考虑光纤链路上资源状态,提高了 VNE 成功率. 当网络负载为 400 Erlang 时, ACOQKP-SVNE 与 MLRPS 算法相比,在 NSFNET 中,频谱资源利用率提高约 7%;在 USNET 中,频谱资源利用率提高约 9%.

图 4 显示了 EONs 组件失效后 VON 重映射的恢复成功率. 随着网络负载增加,受损 VON 恢复成功率逐渐降低,原因是:当网络负载增加时,满足 VNE 的 EONs 空闲资源越来越少,降低了受损 VON 重映射成功率. 此外,相比 OASR、MLRPS 与 DMMA,在相同负载下,ACOQKP-SVNE 具有最高的 VNE 恢复成功率,这是因为:在虚拟节点映射过程中,ACOQKP-SVNE 评估光节点重要度时,考虑了相邻光纤链路的潜在风险,光节点度数 and 可用资源数目,有助于降低后续密文传输路径或 QKD 路径发生故障的概率;同时,在 VNE 恢复过程中,ACOQKP-SVNE 通过感知物理组件受灾难的影响情况,确定受损物理组件恢复顺序,提高 VNE 恢复成功率.

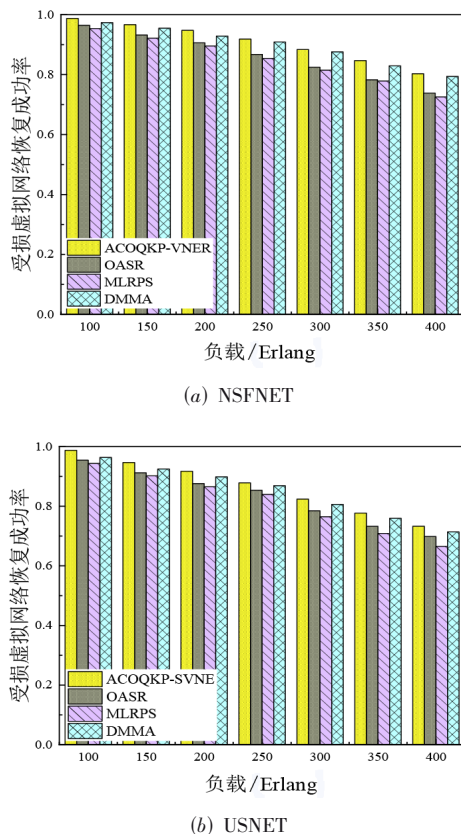


图 4 受损 VON 恢复成功率与负载关系

图 5 反映了 QKP 采用不同时间阈值 T_k 时密钥资源的利用率. 在两种网络中,当 $T_k=30$ u 时,量子密钥生成后在 QKP 中存储时间较短,密钥安全性较高;当网络负

载从较小值开始增加, QKP 中的量子密钥需为越来越多的 VON 提供加密服务,故所提算法的密钥资源利用率也增加;但是,当负载继续增加时,部分 VON 因缺少密钥资源而映射失败,故密钥资源利用率呈下降趋势. 在 $T_k=50$ u 和 $T_k=80$ u 时,当网络负载从较大值开始增加时, QKP 中密钥资源也呈现“供不应求”状态,部分 VON 被拒绝,则密钥资源利用率趋于平缓,甚至下降趋势. 相比 $T_k=30$ u, 由于 $T_k=50$ u 和 $T_k=80$ u 允许密钥存储时间更长,在负载较大时,其密钥资源利用率下降的趋势平缓一些.

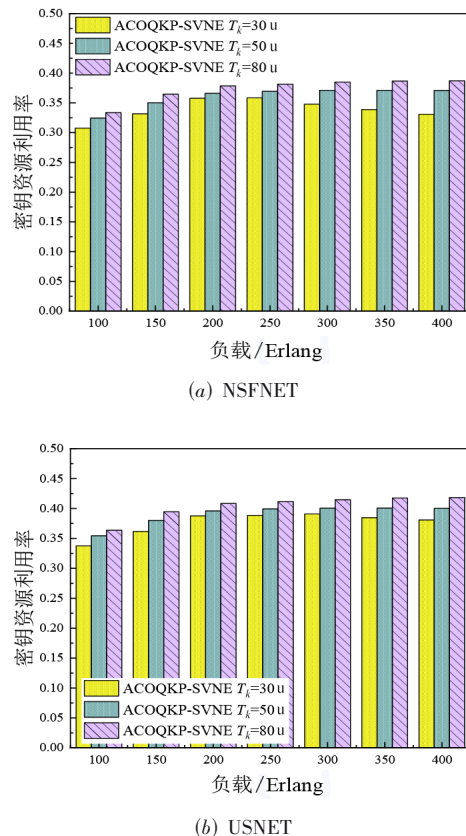


图 5 密钥资源利用率与负载关系

5 结束语

为了提高 VNE 在 EONs 上的成功率和安全性,本文设计一种基于蚁群优化与准实时密钥池的生存性虚拟网络映射算法,当 EONs 发生组件故障后,算法确定受损组件的 VON 恢复顺序,以最大化恢复受灾难影响的 VON. 随着互联网中数据安全可靠传输和远程访问需求的增长,本文所提方法能增强 VNE 的安全性以及抗故障的生存性传输.

参考文献

- [1] DEFFERT M A, FORGHANI-ELAHABAD M, BONANIL

- H. Enhancing consecutiveness in elastic optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2024, 47(2): 97-105.
- [2] 邬贺铨. 大模型融入云平台, 信息化走向数智化[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2024, 36(1): 1-8.
WU H Q. Integration of large-scale models and cloud, transition from informatization to digital intelligence[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2024, 36(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] 陆汝钤. 从大数据到大知识[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2022, 34(6): 921-928.
LU R Q. From big data to big knowledge[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2022, 34(6): 921-928. (in Chinese)
- [4] 刘焕淋, 刘博, 陈勇, 等. 基于辅助图的比特加载和损伤感知资源分配[J]. *电子学报*, 2025, 53(2): 645-650.
LIU H L, LIU B, CHEN Y, et al. Auxiliary graph-based resource allocation with bit-loading and physical impairment-sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(2): 645-650. (in Chinese)
- [5] 刘焕淋, 谭明明, 任杰, 等. 基于频谱切片的弹性光网络中可调度请求资源分配算法[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2023, 35(2): 286-293.
LIU H L, TAN M M, REN J, et al. Resource allocation algorithm for scheduled lightpath demands in elastic optical networks based on spectrum slicing[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2023, 35(2): 286-293. (in Chinese)
- [6] WRIGHT P, WHITE C, PARKER R C, et al. 5G network slicing with QKD and quantum-safe security[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2021, 13(3): 33-40.
- [7] LIU H L, HUO X J, CHEN Y, et al. Shared protection survivable multipath-based VONE in EONs integrated with QKD[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(17): 5800-5807.
- [8] BRUNNER H H, FUNG C F, PEEV M, et al. Demonstration of a switched CV-QKD network[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2023, 10(1): 38.
- [9] XU S G, SAHOO S, FERDOUSI S, et al. Scheme of carrier cooperation with coordinated scheduling for faster and lower-cost failure/disaster recovery[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(5): B45-B59.
- [10] ZOU R J, HASEGAWA H, SUBRAMANIAM S. DRAMA: Disaster management algorithm with mitigation awareness for elastic optical networks[C]//2021 17th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks. Piscataway: IEEE, 2021: 1-7.
- [11] LI S, GU R T, ZHANG G, et al. Order aware service recovery algorithm in elastic optical network with multiple failures[C]//2019 International Conference on Networking and Network Applications. Piscataway: IEEE, 2020: 135-141.
- [12] LIU X, WANG Y, XIAO A L, et al. Disaster-prediction based virtual network mapping against multiple regional failures[C]//2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. Piscataway: IEEE, 2015: 371-378.
- [13] ZOU J, LIU Y A, SHI Z Y, et al. Topological mapping based failure recovery in multi-domain quantum key distribution networks[C]//2021 Opto-Electronics and Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.
- [14] 刘焕淋, 葛润泽, 陈勇, 等. 基于蚁群优化准实时密钥池的生存性虚拟网络映射方法: CN119420654A[P]. 2025-02-11.
- [15] MEHIC M, MICHALEK L, DERVISEVIC E, et al. Quantum cryptography in 5G networks: A comprehensive overview[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(1): 302-346.
- [16] LI S G, WEI Y F, LIU X, et al. A new fast ant colony optimization algorithm: The saltatory evolution ant colony optimization algorithm[J]. *Mathematics*, 2022, 10(6): 925.
- [17] 刘焕淋, 邓棣, 陈勇, 等. 基于网络编码的机密业务多路径光传输方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(9): 3272-3277.
LIU H L, DENG D, CHEN Y, et al. A network coding-based multipath optical transmission method for secret traffic[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(9): 3272-3277. (in Chinese)

作者简介



刘焕淋 女,1970年2月出生于重庆.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



刘 博 男,2000年6月出生于四川内江.重庆邮电大学硕士研究生.主要研究方向为光网络资源分配.

E-mail: 2499109944@qq.com



陈 勇 男,1963年7月出生于重庆.重庆工程学院教授、硕士生导师.主要研究方向为自动控制和光信号处理.

E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn



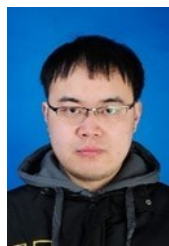
马 冰 女,2022年8出生于河南叶县.重庆邮电大学硕士研究生.主要研究方向为光网络资源分配.

E-mail: 2385934401@qq.com



邱 艳 女,1998年10出生于四川仪陇.重庆邮电大学硕士研究生.主要研究方向为光网络资源分配.

E-mail: 2311925484@qq.com



陈浩楠 男,1996年11出生于重庆.重庆邮电大学硕士研究生.主要研究方向为光通信.

E-mail: 1412875479@qq.com