

基于网络编码的机密业务多路径光传输方法

刘焕淋¹, 邓 棣¹, 陈 勇², 唐 畅¹, 陈浩楠², 陈 想¹, 霍星吉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: 随着互联网应用发展,越来越多具有安全需求的机密业务在空分复用弹性光网络中传输时,面临被攻击或窃听的安全风险. 为了确保机密业务的传输安全性和减少频谱资源的浪费,提出一种空分复用弹性光网络中基于网络编码的机密业务多路径光传输方法. 在机密业务的路由阶段,该方法通过设计评估链路被窃听概率、路径跳数和路径上空闲频谱资源的路径代价函数,为机密业务选择最小路径代价的两路径或三路径传输策略;在纤芯选择中,设计路径碎片率和负载失衡的评估值,为机密业务选择满足业务带宽需求的碎片率低和负载均衡的纤芯;在频谱分配中,设计满足网络编码条件的频谱碎片和负载感知的频谱分配方法,通过滑动频谱窗方法,为机密业务寻找能网络编码、且导致纤芯的频谱碎片化程度小和负载均衡的频谱块. 仿真结果表明,与其他采用网络编码的路由频谱分配算法相比,在负载大于200爱尔兰时,本文所提方法能有效降低机密业务阻塞率和提高频谱资源使用率.

关键词: 空分复用弹性光网络;网络编码;多路径;窃听;机密业务;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(2024)09-3272-06

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

DOI: 10.12263/DZXB.20230856

A Network Coding-Based Multipath Optical Transmission Method for Secret Traffic

LIU Huan-lin¹, DENG Di¹, CHEN Yong², TANG Chang¹, CHEN Hao-nan², CHEN Xiang¹, HUO Xing-ji¹

(1. School of Communications 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: With the development of Internet application, more and more secret traffics with secret requirements face security challenge in terms of being attacked or eavesdropped, when they transmitted in space division multiplexing elastic optical network (SDM-EON). To ensure the transmission security of secret traffic and reduce the waste of spectrum resources, a network coding-based multipath optical transmission for security traffic (NC-MOTS) is proposed for SDM-EON. In the routing stage, we design a path cost function which can evaluate the probability of link eavesdropping, the number of path hops and the idle spectrum resources on the path. So, the NC-MOTS selects two paths or three paths transmission strategy with the minimal route cost. In fiber core selection, we design an evaluation value to evaluate the path's spectrum fragmentation and load imbalance. Then, we select the fiber core with low spectrum fragmentation and load balancing which meets the bandwidth requirements of secret traffic. In the stage of spectrum allocation, a spectrum fragmentation and load-sensing spectrum allocation method is designed to meet the network coding conditions. Through the sliding spectrum window, the spectrum block that can be network encoded and causes the low spectrum fragmentation and makes load balance between fiber cores is found. Compared with other routing spectrum allocation algorithms using network coding, the simulation results show that the proposed NC-MOTS can effectively reduce the secret traffic's blocking probability and improve spectrum resource utilization when the network load is greater than 200 Erlang.

Key words: SDM-EON; network coding; multipath; eavesdropping; secret traffic; blocking probability

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

1 引言

随着互联网应用和大数据需求的发展,对通信网的数据传输、交换、处理能力提出了更高要求^[1].采用多芯光纤空分复用的弹性光网络(Space Division Multiplexing Elastic Optical Network, SDM-EON)能提供满足海量数据需求的倍增大带宽、多粒度子信道复和调制格式等特点^[2],被认为是满足 5G 和 6G 通信性能的有效支撑技术^[3,4].

面对互联网设备和用户规模化增长,SDM-EON 的设备或链路即使在短时间内受到恶意攻击,也将导致大量数据面临严重的安全风险^[5],为保证 SDM-EON 能够抵御窃听攻击和高效传输,对机密业务设计安全有效的路由、纤芯和频谱分配(Routing Core and Spectrum Assignment, RCSA)算法已成为迫切需要解决的问题^[6].

为了解决 SDM-EON 中机密业务被窃听或攻击的问题,文献[7]提出一种安全高效的防窃听攻击资源分配(Secure and Efficient Resource Allocation scheme for Anti-eavesdropping, SERA-AE)算法,采用多路径并行传输的方法为机密业务选择负载均衡的路由,并设计了串扰感知的纤芯频谱分配算法.但是,该算法只能降低机密业务被窃听的概率,保证部分机密子业务请求不被窃听,不能为机密业务的整体数据提供保护.

网络编码(Network Coding, NC)被引入通信网,提供一种安全地将信息传输给授权接收方的机密数据安全传输方法^[8].随着全光 NC 技术的发展,为 SDM-EON 中机密数据反窃听攻击的光域传输方法提供了巨大的机会^[9].已有研究^[10]已证明了使用异或操作的 NC,可以执行在传输速率高达 100 Gbps.文献[11]提出基于 NC 的路由频谱分配算法(Network Coding based Routing and Spectrum Allocation, NC-RSA),将机密业务与已建立路由的非机密业务做 NC 后传输,采用模拟退火法寻找候选路由,采用遗传算法寻找编码次数少的单路径和满足机密业务需求的频谱块.文献[12]研究了网络编码和路由频谱分配(Routing and Spectrum Allocation, RSA)结合解决窃听和单链路故障场景下的生存性传输问题,降低业务阻塞率和满足业务安全机密传输要求.

在 SDM-EON 中,提高资源的频谱使用率的一个有效途径是降低业务 RSA 的频谱碎片率.文献[13,14]总结了光网络的几种碎片整理方案,将不连续小块频谱重组为连续的可用频谱块,以克服频谱碎片问题.文献[2,15,16]提出了几种碎片感知方案,能提高光纤链路频谱使用率.相比碎片整理方案,频谱碎片感知方案不

会导致业务传输中断.

针对 SDM-EON 中机密业务请求的路由、纤芯和频谱分配问题,论文提出了一种基于网络编码的机密业务多路径光传输方法(Network Coding-based Multipath Optical Transmission method for Secret traffic, NC-MOTS).

2 系统模型

将 SDM-EON 建模为一个无向图 $G(V, E, C, F)$,其中, V 表示节点集合, E 表示光纤链路集合, C 表示每条光纤链路上的纤芯集合, F 表示每条光纤链路上的频隙(Frequency Slot, FS)集合; R 为业务集合,其业务请求为 $r(s, d, B, m)$, s, d 分别表示 r 的源、目的节点, B 为业务请求的带宽值, m 表示到达业务请求的机密性,当 $m=1$ 时,表示该业务为机密业务,具有保密传输需求,否则, $m=0$.

在 SDM-EON 中,业务在多路径上传输时需满足频谱分配不重叠、一致性和连续性约束^[2,4].

$$\sum_{r \in R} y_{e,k}^{r,f,c} \leq 1, \forall r \in R, \forall e \in E, \forall c \in C \quad (1)$$

$$\sum_{f \in F} y_{e_1,k}^{r,f,c} = \sum_{f \in F} y_{e_2,k}^{r,f,c}, \forall e_1, e_2 \in p_k, \forall c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{f \in F} (y_{e,k}^{r,f+1,c} \times y_{e,k}^{r,f,c}) = \sum_{f \in F} y_{e,k}^{r,f,c} - 1, \forall e \in E, \forall c \in C \quad (3)$$

其中,若 r 占用第 k 条路径的链路 e 的纤芯 c 的频隙 f ,则 $y_{e,k}^{r,f,c}=1$,否则, $y_{e,k}^{r,f,c}=0$; e_1 和 e_2 分别为 r 在路径 p_k 上的光纤链路, k 为路径索引号.

采用网络编码传输业务时,在频谱分配时还需满足 NC 的加密传输(Encrypted Transmission, ET)和频隙匹配(Frequency Slot Matching, FSM)约束条件,ET 约束条件指机密业务所选路径与网络中已建的非机密业务路由至少有 2 个相同节点,能完成 NC 操作;而 FSM 条件指业务拟占频谱块与其他非机密业务已建路由的频谱块有重叠频隙索引值.

影响 SDM-EON 频谱使用率的因素还包括芯间串扰和频谱分配的碎片化程度.纤芯间串扰值为^[4,16]

$$XT = \frac{n - n \cdot \exp[-2 \cdot h \cdot L(n+1)]}{1 + n \cdot \exp[-2 \cdot h \cdot L(n+1)]} \quad (4)$$

其中, n 表示与所选纤芯相邻的纤芯数; L 表示光纤的传输长度; h 为单位传输长度的串扰增量值.

随着业务请求随机到达和离开 SDM-EON,光路中的频谱资源被频繁地占用和释放,导致出现多个不连续的频谱碎片,结合在光路上分配业务所需频谱块时需要满足式(1)~(3)约束,使这些碎片化的频谱块难以被业务利用.

3 基于网络编码的机密业务多路径光传输方法(NC-MOTS)

SDM-EON 的 RCSA 被证明是 NP-hard 问题^[2,4],在复杂的大型网络中,不适用整数线性规划模型进行求解.为此,本文提出应对窃听攻击的 RCSA 问题的启发式 NC-MOTS 算法,NC-MOTS 算法包括路径组合选择、纤芯选择以及频谱分配策略.

3.1 基于路径代价函数的路由选择策略

根据业务请求,执行边分离 K 最短路径算法,为业务寻找候选最短路径集;对非机密业务,根据候选路径跳数与调制指数的乘积值,降序排列 K 条候选路径,采用首选即中的频谱分配方式确定频谱块;对机密业务,根据路径代价函数值,降序排列 K 条候选路径在集合 P^r 中,为业务选择满足路径窃听概率阈值的最小代价路径.路径代价函数值为

$$P_e(p_k) = 1 - \prod_{l \in p_k} (1 - P_e^l) \quad (5)$$

$$P_{\text{cost}} = \omega_1 \times \frac{h_k}{M_k \times N_f^k} + \omega_2 \times P_e(p_k) \quad (6)$$

在式(5)中, $P_e(p_k)$ 为路径 p_k 的窃听概率; P_e^l 为链路 l 的窃听概率值;在式(6)中, ω_1 和 ω_2 为权重系数,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$; h_k 为 p_k 的跳数; M_k 为 p_k 的调制指数; N_f^k 为路径 p_k 上可用空闲频隙数.

将机密业务分割为多路径传输,如算法1和算法2所示.首先,机密业务采用两路径选择策略,将业务分割2部分,在2条路径上寻找满足NC的ET和FSM条件的可用频谱块;若两路径选择策略失败,则采用三路径选择策略传输机密业务.

算法1 两路径选择策略

输入:机密 $r(s,d,B,1),G(V,E,C,F),P^r$,设 $N_p=0$;

输出:两条路径组成候选路径集合 P^c ,业务在集合 PC 中每条路径 p_k 上应分配的频隙数目集合 N^f .

S1. 选择 P^r 前2条路径,标记为 p_a 和 p_b ,保存在 P^{ab} 中;

S2. 由式(7),计算 p_a 和 p_b 路径上应分配带宽 $B(p_a)$ 和 $B(p_b)$;

S3. 由式(8),分别计算 p_a 和 p_b 路径上所需分配的频隙数目 $f_s(p_a)$ 和 $f_s(p_b)$;

S4. 若 p_a 和 p_b 路径上都存在满足业务需求的频谱块,则将路径组合 P^{ab} 存入集合 P^c 中,将2条路径上所需分配的频隙数目一起加入集合 N^f 中,输出 P^c 和 N^f , $N_p=2$,结束算法;否则,从 P^{ab} 中删除不满足业务频隙需求的路径,转S5;

S5. 若集合 P^r 中所有路径都已尝试过加入 P^{ab} ,转算法2;否则,统计 P^{ab} 中的路径数目,记为 N_M ,从 P^r 中任选 $2 \sim N_M$ 条没有尝试的路径加入集合 P^{ab} ,转S2.

为尽可能地使窃听概率低的路径上传输尽可能多的业务带宽.因此,设计基于链路窃听概率的路径带宽

算法2 三路径选择策略

输入:机密 $r(s,d,B,1),G(V,E,C,F),P^r$,设 $N_p=0$;

输出:两条路径组成候选路径集合 P^c ,业务在集合 PC 中每条路径 p_k 上应分配的频隙数目集合 N^f .

S1. 选择 P^r 前3条路径,标记为 p_a 、 p_b 和 p_c ,保存在 P^{abc} 中;

S2. 由式(7),计算 p_a 、 p_b 和 p_c 路径上分别应分配的带宽 $B(p_a)$ 、 $B(p_b)$ 和 $B(p_c)$;

S3. 由式(8),计算 P^{abc} 中 p_a 、 p_b 和 p_c 路径上所需分配频隙数目 $f_s(p_a)$ 、 $f_s(p_b)$ 和 $f_s(p_c)$;

S4. 若 p_a 、 p_b 和 p_c 路径上都存在满足所需频隙需求的频谱块,将 P^{abc} 存入集合 P^c 中,将3条路径上所需分配的频隙数目加入集合 N^f 中,输出 P^c 和 N^f , $N_p=3$,结束算法;否则,从 P^{abc} 中删除不满足频隙需求的路径,转S5;

S5. 若集合 P^r 中所有路径都已计入过集合 P^{ab} ,输出 $P^c=\emptyset$ 和 $N^f=\emptyset$,结束算法;否则,统计 P^{abc} 中的路径条数为 N_M ,从 P^r 中任选 $3 \sim N_M$ 条没有尝试的路径加入 P^{abc} ,转S2.

分配函数,如式(7)所示;并由式(8)计算业务分割在每条路径所需分配的频隙数目^[7,11].

$$B(p_k) = \frac{P_e(p_{N_p-k+1})}{\sum_{k=1}^{N_p} P_e(p_k)} \times B \quad (7)$$

$$f_s(p_k) = \left\lceil \frac{B(p_k)}{B_j \times M} \right\rceil + \text{GB} \quad (8)$$

其中, N_p 为选择传输机密业务的路径条数; $B(p_k)$ 为 p_k 应分配的带宽值; B_j 为最低调制指数的单位频隙带宽; M 为调制指数;GB为业务间的保护频隙数.

3.2 基于路径碎片率和负载失衡的纤芯选择方法

当SDM-EON中的频谱资源碎片化程度严重和负载较大时,后续业务难以在路径中找到可用资源.为此,设计路径碎片率和负载失衡的评估值如式(9),按该评估值升序排序候选路径 p_k 的纤芯在集合 C^k 中.

$$\Theta^{k,c} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N(B_i^{k,c})} 1}{\sum_{i=1}^{N(B_i^{k,c})} B_i^{k,c}} \right) \times \frac{N(B_i^{k,c})}{\sum_{i=1}^{N(B_i^{k,c})} B_i^{k,c}} \times \frac{|F|}{I^{k,c}}, \sum_{i=1}^{N(B_i^{k,c})} B_i^{k,c} \neq 0} \\ 0, \sum_{i=1}^{N(B_i^{k,c})} B_i^{k,c} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\Theta^{k,c}$ 为路径 p_k 的纤芯 c 的路径碎片率; $B_i^{k,c}$ 为 p_k 的纤芯 c 中第 i 个不小于业务频隙需求的可用空闲频谱块包含的频隙数目; $N(B_i^{k,c})$ 为 p_k 的纤芯 c 上可用频谱块的个数; $I^{k,c}$ 为 p_k 的纤芯 c 中空闲频隙数.

3.3 基于网络编码、碎片与负载感知的频谱分配

首先,在SDM-EON的已建立非机密业务路由集合中,寻找能为 P^c 集合中各路径提供满足ET约束和FSM约束的路径组合集 P_{ET} ;然后,搜索 P^c 中候选路径 p_k 与 P_{ET} 中满足NC的ET和FSM条件的空闲频谱块,保存在机密业务

的可用频谱块集 $F_v(p_k)$ 中;若 $F_v(p_k)$ 非空,在 $F_v(p_k)$ 中创建大小为 $f_s(p_k)$ 的滑动频谱窗(Spectrum Window, SW);最后,由式(9)计算评估值,升序排序在 $F_{SW}(p_k) = \{SW_1, SW_2, \dots, SW_j\}$.

NC-MOTS算法的频谱分配详细过程见算法3.

算法3 NC-MOTS算法的频谱分配

输入:机密业务 $r(s, d, B, 1), G(V, E, C, F)$, 集合 P^c , 集合 N^f , 候选路径 p_k 上纤芯集合 C^k , 网络中其他已建非机密业务路由集 P_{ed} , 串扰阈值 XT_{th} , $S^r = \emptyset, i=1, j=1, c=1$;

输出:集合 P^c 中路径 p_k 上的频谱块分配结果.

S1. 由式(9),计算 P^c 中候选路径 p_k 上各纤芯的评估值,降序排列纤芯在集 C^k 中,若 C^k 为空,转S11;

S2. 若 $c \neq |C^k|$,选 p_k 的 C^k 的纤芯 c ,转S3;否则,转S11;

S3. 在集合 P_{ed} 中寻找与 p_k 至少有2个相同节点、且 P_{ed} 路径占用频段与 p_k 上纤芯 c 的空闲频段重叠的 P_{ed} 路径构成可网络编码传输加密数据的路径集 P_{ET} ;

S4. 若 P_{ET} 为空,转S11;否则,选 P_{ET} 中的1条路径,转S5;

S5. 在路径 p_k 的 N^f 集合中,寻找满足 r 所需频段数目,且与选自 P_{ET} 的路径满足FSM条件的空闲频谱块集合 $F_v(p_k)$,确定能为业务 r 网络编码的起始、末尾频段索引值 f_j^{NC} 和 f_l^{NC} ;

S6. 在 $F_v(p_k)$ 中创建SW,由式(8)计算SW的频段数 $f_s(p_k)$;

S7. 由式(9),计算 $SW_{\text{index}(f_j^{NC}-f_s(p_k)+1)} \sim SW_{\text{index}(f_l^{NC})}$ 的路径碎片与负载失衡的评估值,并升序排列各频谱窗在 Θ_{SW} 中;

S8. 若 Θ_{SW} 为空,令 $c=c+1$,转S2;否则,选择 $SW_j, SW_j \in \Theta_{SW}$;

S9. 由式(4),计算 r 分配在 p_k 的纤芯 c 的 SW_j 的XT值;

S10. 若 $XT < XT_{th}$,将纤芯和 SW_j 保存在机密业务的候选频谱块 S^r 中,令 $i=i+1$,转S4;否则,令 $j=j+1$,转S8;

S11. 若集合 S^r 为空,输出频谱分配失败结果;否则,输出集合 S^r 中路径碎片率和负载失衡的评估值最小的频谱窗.

4 仿真结果与分析

4.1 仿真环境

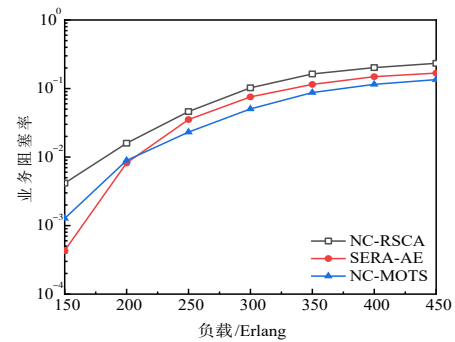
为了验证本文所提NC-MOTS算法的性能,分别在NSFNET和USNET拓扑^[7]中对机密业务的阻塞率、频谱使用率和碎片率^[16]进行性能仿真;各网络拓扑的每条链路的窃听概率值在 $[0, 10^{-3}]$ 中随机生成,路径窃听概率阈值为 0.003 ^[7], $|C|=7$, $|F|=360$ FS, 每频段为 12.5 GHz;业务请求到达服从参数为 λ 的泊松分布,业务持续时间服从参数为 μ 的负指数分布,业务速率为 $[50, 500]$ Gbps,仿真的业务数目 10^6 个,其中,机密业务占比为 40% ^[7,11]. 根网络拓扑的平均节点度数,在NSFNET中,取 $K=3$;在USNET中,取 $K=4$;取 $\omega_1=0.8$, $GB=1$ FS. 根据所选路由长度,确定最高调制指数的调制格式,并根据文献^[4, 7, 11]选择各调制格式的串扰阈值.

对比算法为NC-RSA^[11]和SERA-AE^[7]算法.为了增加可比性,修改NC-RSA算法为NC-RSCA,在确定业

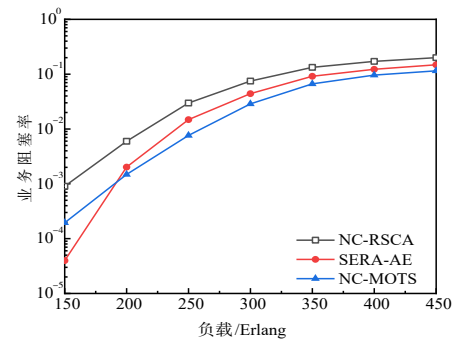
务路由后,采用式(9)计算和选择路径碎片率和负载失衡代价值最小的纤芯.

4.2 仿真结果及分析

图1(a)和图1(b)为3种算法在2种拓扑中的业务阻塞率与负载关系.随着负载增加,业务阻塞率也增加,当负载大于200 Erlang时,NC-MOTS算法的阻塞率最低.原因是:当负载增加时,SDM-EON的可用频谱资源更趋紧缺,故所有算法阻塞率都增加;由于NC-RSCA算法侧重NC路由而忽略了频谱分配对频谱碎片化影响,其机密业务采用单路径传输,当网络的负载增加后,满足NC的路由数目减少,故NC-RSCA算法的业务阻塞率最高;而采用多路径传输的SERA-AE和NC-MOTS算法的阻塞率较低,相比SERA-AE算法,所提NC-MOTS算法还采用网络编码和选择路径碎片-负载失衡代价值小和被窃听概率小的路由,提高了机密业务的路由成功率.



(a) NSFNET



(b) USNET

图1 业务阻塞率与负载关系

相比图1(a),NC-MOTS算法在图1(b)相同负载时的阻塞率更低,这是因为USNET的节点和链路数更多,平均节点度数更高,为机密业务找到满足其NC条件的已建非机密业务路径概率更大.

图2展示了3种算法的频谱使用率与网络负载关系.从图2(a)和图2(b)可以发现,当网络负载增加,3种算法的频谱使用率都逐渐增加,且在相同负载下,

SERA-AE算法和NC-MOTS算法的频谱使用率都高于NC-RSCA算法。这是因为SERA-AE算法和NC-MOTS算法均采用多路径负载均衡的路由选择策略,负载增加时,其基于NC的多路径传输能有效地利用网络中的碎片化频谱块,提高频谱使用率。此外,相较于SERA-AE算法,本文所提的NC-MOTS算法在负载大于200 Erlang时具有更高的频谱利用率。这是因为NC-MOTS算法不仅在业务路由选择阶段选择使用频谱消耗代价更小和负载均衡的路径,在纤芯选择时,选择路径碎片率和负载失衡评估值最小的纤芯;在频谱分配阶段,基于网络编码和路径碎片与负载感知的频谱分配,能将业务分配在具有路径碎片率和负载强度的评估值最低的位置,在降低业务阻塞率同时,进一步提高了频谱使用率。

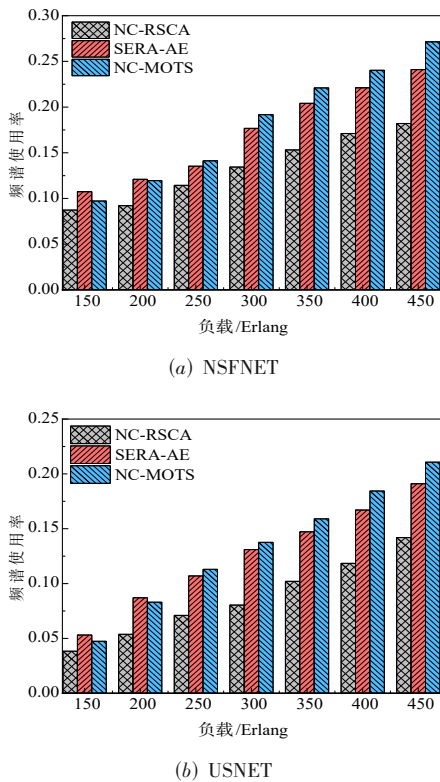


图2 频谱使用率与负载关系

图3展示了频谱碎片率与网络负载关系。当网络负载增加时,3种算法的频谱碎片率都逐渐升高,在相同负载下,NC-RSCA算法的频谱碎片率最高。这是因为SERA-AE算法和NC-MOTS算法均采用多路径路由选择策略,能利用网络中的较小尺寸的碎片化空闲频谱块传输业务,从而降低了频谱碎片率。而且,相比SERA-AE算法,NC-MOTS算法的频谱碎片率最低,这是因为NC-MOTS算法在频谱分配时,通过滑动频谱窗的位置,选择将业务请求分配在具有路径碎片率和负

载失衡的评估值最低的频谱窗处,进一步降低了路径上的频谱碎片率。

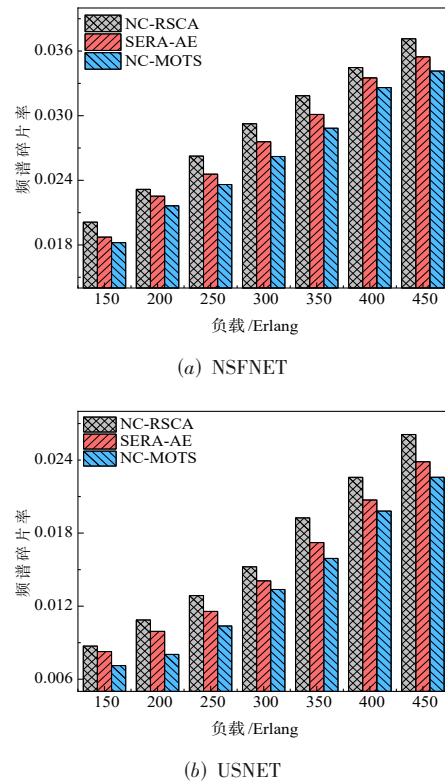


图3 频谱碎片率与负载关系

5 结论

为了提高机密业务安全传输的性能,提出一种基于网络编码的机密业务多路径光路传输方法。该方法考虑链路窃听概率和网络编码方法,灵活地选择低代价的多路径和低碎片率和负载失衡的纤芯和频谱块价传输业务,以提高SDM-EONs的频谱资源利用率。

参考文献

- [1] 陆汝铃. 从大数据到大知识[J]. 重庆邮电大学学报, 2022, 34(6): 921-928.
- [2] LU R Q. From big data to big knowledge[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022, 34(6): 921-928. (in Chinese)
- [3] LIU H L, TANG C, CHEN Y, et al. A survivable multipath resource allocation strategy based on fragmentation-sensitive fragmentation-aware in space division multiplexing elastic optical networks[J]. Computer Communications, 2023, 204: 78-88.
- [4] HALDER J, ACHARYA T, BHATTACHARYA U. A novel RSCA scheme for offline survivable SDM-EON

- with advance reservation[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(2): 804-817.
- [4] 张盛峰, 陈会丹, 彭樱. SDM-EON 中基于串扰避免的多纤芯分配算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2023, 35(1): 23-30. ZHANG S F, CHEN H D, PENG Y. Multi-core assignment algorithm based on crosstalk-avoiding in space division multiplexing elastic optical network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2023, 35(1):23-30. (in Chinese)
- [5] BAO B, YANG H, YAO Q, et al. S DFA: A service-driven fragmentation-aware resource allocation in elastic optical networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(1): 353-365.
- [6] LIU X. Enabling optical network technologies for 5G and beyond[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(2): 358-367.
- [7] BAI W, YANG H, YU A, et al. Eavesdropping-aware routing and spectrum allocation based on multi-flow virtual concatenation for confidential information service in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 40: 18-27.
- [8] CHEN L K, LI M, LIEW S C. Breakthroughs in photonics 2014: Optical physical layer network coding, recent developments, and challenges[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-6.
- [9] HAI D T. On routing, wavelength, network coding assignment, and protection configuration problem in optical-processing-enabled networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 20(3): 2504-2514.
- [10] LU G W, QIN J, WANG H, et al. Flexible and re-configurable optical three-input XOR logic gate of phase-modulated signals with multicast functionality for potential application in optical physical-layer network coding[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2299-2306.
- [11] SAVVA G, MANOUSAKIS K, ELLINAS G. Providing confidentiality in optical networks: Metaheuristic techniques for the joint network coding-routing and spectrum allocation problem[C]//2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks. Piscataway: IEEE, 2020: 1-4.
- [12] SAVVA G, MANOUSAKIS K, ELLINAS G. Network coding-based routing and spectrum allocation in elastic optical networks for enhanced physical layer security [J]. Photonic Network Communications, 2020, 40(3):160-174.
- [13] 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, 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, 2023, 35(2): 286-293. (in Chinese)
- [14] ZHU M, ZHANG S, SUN Q, et al. Fragmentation-aware VONE in elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(9): 809-822.
- [15] 刘焕淋, 邱艳, 陈勇, 等. 光路邻居链路频谱碎片感知的虚拟光网络协同映射算法[J]. 电子学报, 2023, 51(7): 1758-1764. LIU H L, QIU Y, CHEN Y, et al. Virtual optical network embedding algorithm based on lightpath's adjacency link fragmentation awareness[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(7): 1758-1764. (in Chinese)
- [16] 刘焕淋, 胡俊岭, 任杰, 等. 基于光路负载均衡和邻域匹配的串扰感知资源分配方法[J]. 电子学报, 2022, 50(11): 2746-2753. LIU H L, HU J L, REN J, et al. Crosstalk aware resource allocation method based on lightpath load balancing and neighborhood matching[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(11): 2746-2753. (in Chinese)

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



邓 隽 男, 2001年4月出生于四川南溪县. 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: 2650389286@qq.com