

引用本文: 吕晶晶,冯楠,左晓博,等. 弹性光网络中时频碎片感知的可生存多路径资源分配算法[J]. 光通信技术,2025,49(3):73-78.

弹性光网络中时频碎片感知的可生存多路径资源分配算法

吕晶晶^{1,2},冯楠^{3,4},左晓博^{1,2},晏丹^{1,2},任丹萍^{1,2},赵继军^{1,2*}

(1.河北工程大学 信息与电气工程学院,河北 邯郸 056038;2.河北工程大学 河北省安防信息感知与处理重点实验室,河北 邯郸 056038;
3.中国电子科技集团公司 第五十四研究所,石家庄 050081;4.河北省光子信息技术与应用重点实验室,石家庄 050081)

摘要:针对弹性光网络(EON)中业务传输的生存性需求及频谱资源动态分配与释放引发的频谱碎片化问题,提出了一种时频碎片感知的可生存多路径资源分配(TFFA-SMRA)算法。该算法利用多路径传输技术确保业务的生存性,并通过综合链路长度和频谱资源状态来计算链路权重,以识别备选路由,从而缓解由链路资源瓶颈引起的服务阻塞问题。此外,算法引入了一种基于时-频域匹配度量的碎片感知频谱分配机制。仿真结果表明,在特定网络拓扑结构下,当业务负载为400 Erlang时,与负载均衡时频(LB-TF)算法相比,TFFA-SMRA算法能使业务阻塞率降低15.7%,同时频谱利用率提升8.52%。

关键词:弹性光网络;生存性;路由选择;频谱分配;频谱碎片

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)03-0073-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Time-frequency fragmentation-aware survivable multipath resource allocation algorithm in elastic optical network

LYU Jingjing^{1,2}, FENG Nan^{3,4}, ZUO Xiaobo^{1,2}, YAN Dan^{1,2}, REN Danping^{1,2}, ZHAO Jijun^{1,2*}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China;
2. Hebei Key Laboratory of Security and Protection Information Sensing and Processing, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China; 3. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;
4. Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Application, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: To address the survivability requirements of service transmission in elastic optical network (EON) and the spectrum fragmentation caused by dynamic allocation and release of spectrum resources, a time-frequency fragmentation-aware survivable multi-path resource allocation(TFFA-SMRA) algorithm is proposed. This algorithm employs multi-path transmission technology to ensure service survivability and calculates link weights by integrating link length and spectrum resource status to identify candidate routes, thereby alleviating service blocking issues caused by link resource bottlenecks. Additionally, the algorithm introduces a fragmentation-aware spectrum allocation mechanism based on a time-frequency domain matching metric. Simulation results show that under a specific network topology with a traffic load of 400 Erlang, compared to the load balancing and time-frequency(LB-TF) algorithm, the TFFA-SMRA algorithm reduces the service blocking rate by 15.7% while improving spectrum utilization by 8.52%.

Key words: elastic optical networks, survivability, routing selection, spectrum allocation, spectrum fragmentation

收稿日期:2024-05-26。

基金项目:河北省硕士在读研究生创新能力培养资助项目(CXZ-ZSS2024101)资助;河北省省级科技计划资助项目(22567624H)资助。

作者简介:吕晶晶(1998—),女,河北邯郸人,硕士研究生,现就读于河北工程大学信息与电气工程学院信息与通信工程专业,主要研究方向为光纤通信与宽带通信网,从事弹性光网络生存性算法相关工作。

***通信作者:**赵继军(1970—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤通信与宽带通信网。



0 引言

随着第五代移动通信(5G)商用部署、互联网协议(IP)流量激增以及云计算与数据中心互连需求的快速增长,光传送网络面临持续增加的流量压力^[1]。弹性光网络(EON)凭借其灵活的频谱分配特性,已成为支撑未来异构业务和高带宽需求的核心网络架构^[2-3]。鉴于光网络超大容量的特性,单链路故障可能导致大量数据丢失,因此提升网络生存性成为关键研究方向。传统保护技术中,单路径保护(SPP)需为工作/保护路径

吕晶晶,冯楠,左晓博:弹性光网络中时频碎片感知的可生存多路径资源分配算法

分别预留资源,而多路径保护(MPP)通过流量分割与链路不相交路由实现全/部分保护,其资源利用率显著优于 SPP 方案^[4]。

路由与频谱分配(RSA)作为 EON 的核心问题,受限于频谱连续性、邻接性和不重叠三大约束条件^[5-6]。动态业务导致的频谱碎片化会降低频谱利用率,这使得碎片感知成为资源分配算法的必备特性^[7-8]。现有研究在生存性与碎片化协同优化方面已取得进展:文献[9]提出了自适应调制的共享保护算法,文献[10-11]分别基于频谱相干性公式和小尺寸碎片敏感度量优化了分配策略,但这些算法和策略均未考虑业务时域特性对碎片的影响。文献[12]提出的负载均衡时频(LB-TF)算法引入时频双域碎片度量,但其时域优化仅作为频域平局裁决机制,对阻塞率的改善有限。

基于此,本文在 EON 中提出一种基于时频碎片感知的可生存多路径资源分配(TFFA-SMRA)算法。

1 TFFA-SMRA 算法

1.1 基于 MPP 的生存性方案

本算法采用 MPP 技术确保业务生存性。光路请求可表示为动态六元组 $R(s, d, B, t_s, t_e, q)$, 其中 s, d, B, t_s, t_e, q 分别表示请求的源节点、目的节点、请求所需带宽、请求开始时间、请求结束时间以及请求的保护比。保护策略根据 q 值实施分级保障:当 $q=0$ 时,请求不实施保护;当 $q=1$ 时,请求获得全带宽保护;当 $0 < q < 1$ 时,请求获得部分保护。为确保服务质量,本文设定 $0.5 \leq q \leq 1$ 。基于多路径的生存性机制将 B 分配在连接 $s \sim d$ 的多条链路不相交路径上。当单条路径发生故障时,系统可确保至少 Bq 的流量经由其它路径传输,从而满足业务生存性要求^[13]。

在网络拓扑中,本文采用 Dijkstra 算法计算 $s \sim d$ 之间的最短路径。获取最短路径后,将其存入集合 P 中,随后移除拓扑中该路径对应的所有链路,并重复上述过程。为优化频谱资源利用率,将不相交最短路径数量上限设为 3 条^[4]。对集合 P 中的路径进行排列组合,生成候选路径组集合 C_p 。若 P 仅含 2 条路径,则唯一候选路径组为 $P_A = [P_1, P_2]$;若 P 包含 3 条路径,则两两组合形成 3 个候选路径组 P_{A1}, P_{A2}, P_{A3} ,并按总距离升序排列。为满足业务保护比条件下的带宽需求,当采用双路径传输时,2 条分路径上的带宽分配按式(1)计算;若双路径传输失败,则将请求拆分为子请求并在 3 条路径上传输,这时候选路径组 P_{A4} 包含 3 条路径,其中前 2 条分路径带宽按式(2)计算,第三条分

路径带宽按式(3)计算。

$$b_p = Bq \quad (1)$$

$$b_{p_{1,2}} = \frac{1}{2} Bq \quad (2)$$

$$b_{p_3} = \max\left(\frac{1}{2} Bq, B - Bq\right) \quad (3)$$

其中, b_p 表示双路径传输方案中各分路径上的传输带宽, $b_{p_{1,2}}$ 和 b_{p_3} 分别表示三路径传输方案中前 2 条分路径和第三条分路径传输带宽。

EON 为业务的传输分路径动态选择适合的调制格式,以此为基础来计算候选路径组中每条路径承载业务所需的频隙数量。不同调制格式下单位频隙的容量及其支持的最远光纤传输距离^[14]的关系如表 1 所示。路径上所需频隙数 F_b 按式(4)计算。

$$F_b = \left\lceil \frac{b_p}{\eta} \right\rceil + G \quad (4)$$

其中, b_p 表示分路径上的传输带宽, η 表示对应调制格式下单位频隙的容量, G 为保护频隙(设置 $G=1$)。

表 1 不同调制格式下单位频隙容量与最远光纤传输距离的关系

调制格式	单位频隙容量/GHz	传输距离/km
二进制相移键控	12.5	4 000
正交相移键控	25	2 000
八进制 正交幅度调制	37.5	1 000
十六进制 正交幅度调制	50	500

1.2 链路权重计算

由于 EON 的网拓扑结构和业务需求的动态变化特性,单纯依赖链路长度计算最短路径并用于业务传输,可能导致某些链路被过度使用,造成这些链路上的流量负载与频谱资源分配不均衡,从而使部分链路的资源可用性显著下降。

在采用 MPP 技术保障业务连续性的场景下,系统需要在由 2 条或 3 条无交叠链路组成的最短路径集合中寻找可用的频谱资源。然而,如果某个关键链路遭遇资源瓶颈问题,可能会导致当前选定的路径组失效,这时不得不转向跳数更多、效率更低的备选路径组以寻找可用资源,这种情况不仅会造成资源浪费,还可能引起业务阻塞。因此,在评估链路权重时,除了考虑链路长度外,还需考虑该链路的频谱资源占用情况。

TFFA-SMRA 算法引入了一种改进的链路权重计算方法,此方法基于链路长度及频谱资源状态对链路权重进行动态调整,综合考量了链路长度、频谱资源利用率以及资源分布等多个维度的因素,以实现更加合理的路由决策。网络中链路权重的计算公式如下:

$$W_l = \alpha \left(\frac{L}{L_{\max}} \right) + \beta \sqrt{\frac{f_{\text{use}}}{F} \times \frac{B_l}{f_{\text{free}}}} \quad (5)$$

其中, W_l 表示链路 l 的权重值, L 为链路长度, $L_{\max}$ 为网络中最长链路的长度, f_{use} 和 f_{free} 分别为该链路上已占用频隙与空闲频隙的个数, F 为链路上总频隙数, B_l 为链路上的空闲频谱块数; α 和 β 分别为链路长度和频谱资源状态二者的权重值, $\alpha=0.2$, $\beta=0.8$ 。

仅依据链路长度作为计算最短路径权重的标准,可能会导致某些链路的质量下降,特别是在为业务实现多路径传输时。由于需要满足最短路径的链路不相交要求,次优候选路径组中的路径跳数往往较高,甚至在某些情况下不存在可行路径,这不仅会造成资源浪费,还会增加业务阻塞的风险。TFFA-SMRA 算法通过在寻径前对网络链路上的资源进行动态评估,同时考虑链路长度、频谱占用率以及资源分离程度等因素,设计链路权重计算公式,可实现更加高效的路由方式。

1.3 基于时-频域匹配度度量计算

在根据链路权重值确定备选路径之后,下一步需要在当前候选路径组中的所有路径上找到满足需求的空闲频谱块,以完成可生存多路径的建立。然而,由于网络请求的动态特性和频谱分配过程的严格约束条件,频谱碎片问题成为分配过程中的关键挑战。网络中频谱碎片化的程度直接影响着未来业务需求能否得到满足的能力。因此,在设计高效的频谱分配算法时,适当的频谱碎片度量是至关重要的基础。传统的频谱碎片度量通常基于网络中的空闲频隙和可用频谱块的数量等指标,并主要集中在频域方面。但在动态场景下,业务会按照既定的开始和结束时间到达和离开网络,这导致了不仅在频域,而且在时域也会产生碎片化现象。时域碎片同样影响着频谱资源满足未来业务需求的能力^[15]。

鉴于此,本文在 TFFA-SMRA 算法的频谱分配阶段引入了时-频域匹配度度量公式,用于提前评估当前可用频谱块 b 拟分配后对光路资源状态变化的影响。具体而言,频域匹配度与频谱块分配后链路上空闲资源的集中程度有关;而时域匹配度则考虑了当前业务的持续时间和相邻频隙中承载业务的剩余持续

时间之间的差异。可用频谱块 b 的时-频域匹配度 $M(b)$ 的计算式如下:

$$M(b) = \sum_{l \in p} \frac{M_{l,\text{Freq}}}{M_{l,\text{Time}}} \quad (6)$$

其中, $M_{l,\text{Freq}}$ 和 $M_{l,\text{Time}}$ 分别表示拟分配频谱块 b 在当前链路上频域和时域的匹配度,两者的计算式如下:

$$M_{l,\text{Freq}} = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} f_s[i] f_s[i+1]}{B_l} \quad (7)$$

$$M_{l,\text{Time}} = \frac{|H_r - H_{r,\text{left}}| + |H_r - H_{r,\text{right}}|}{4} \quad (8)$$

其中, S 表示链路上的总频隙数, H_r 表示当前请求的持续时间, $H_{r,\text{left}}$ 和 $H_{r,\text{right}}$ 分别为拟分配频谱块左右相邻频隙所承载业务的剩余持续时间, $f_s[i]$ 表示链路上第 i 个频隙的频隙占用情况,若频隙被占用,则 $f_s[i]=0$; 频隙空闲,则 $f_s[i]=1$ 。

$M(b)$ 值越大,一方面表明频域资源的集中度越高;另一方面,也显示出新业务与周围业务请求在时域上传输的同步性越强。这两方面的因素共同表明频谱块 b 的匹配度越高。因此,通过选择时-频域匹配度最大的频谱块来进行频谱分配,不仅可以为后续到来的业务留下更连续的频谱资源,还能增加后续业务成功建立的概率。

1.4 TFFA-SMRA 算法流程

TFFA-SMRA 算法实施具体步骤如算法 1 所示。

算法 1 TFFA-SMRA 算法。

输入 网络拓扑 G , 业务请求 $R(s, d, B, t_s, t_e, q)$

输出 路径组选择和频谱分配结果

1) 由链路权重计算公式,计算 G 中每条链路的权重 W_l ,并更新加权辅助拓扑 G_w 后转至步骤 2)。

2) 使用 Dijkstra 算法,在 G_w 中的 s 和 d 节点间计算第一条最短路径,记为 P_1 ,并标记所经链路,在 G_w 中去掉标记链路后计算第二条链路不相交的最短路径。迭代上述过程,为业务请求计算 3 条链路不相交的最短路径 P_1, P_2, P_3 。

3) 若 P_3 不存在,则由 P_1, P_2 组成一个候选路径组 $P_A = [P_1, P_2]$ 后转至 5), 否则转至步骤 4)。

4) 将 P_1, P_2, P_3 两两组合,组成 3 个候选路径组并按照总距离大小增序排列,记为 P_{A1}, P_{A2}, P_{A3} ,将包含 3 条路径的组合记为 P_{A4} ,组成候选路径组集合 $C_p = \{P_{A1}, P_{A2}, P_{A3}, P_{A4}\}$ 后转至步骤 5)。

5) 对于当前候选路径组 P_A ,根据业务所需的保护比及业务总带宽计算当前路径所需分配的带宽和所需

吕晶晶,冯楠,左晓博:弹性光网络中时频碎片感知的可生存多路径资源分配算法

频隙数,转至步骤6)。

6)判断是否当前候选路径组中的所有路径上均存在满足带宽需求的可用频谱块,若是,则转至步骤7);否则,在候选路径组集合中删除当前候选路径组,并转至步骤8)。

7)对于当前候选路径组中的所有路径,找出所有满足带宽需求的可用频谱块,计算可用频谱块的时-频域匹配度,选择匹配度最大的进行分配,返回当前的路径组和频谱分配结果,算法结束。

8)判断候选路径组集合中是否有候选路径组;若是,转至步骤6);否则,请求阻塞,算法结束。

2 仿真性能与分析

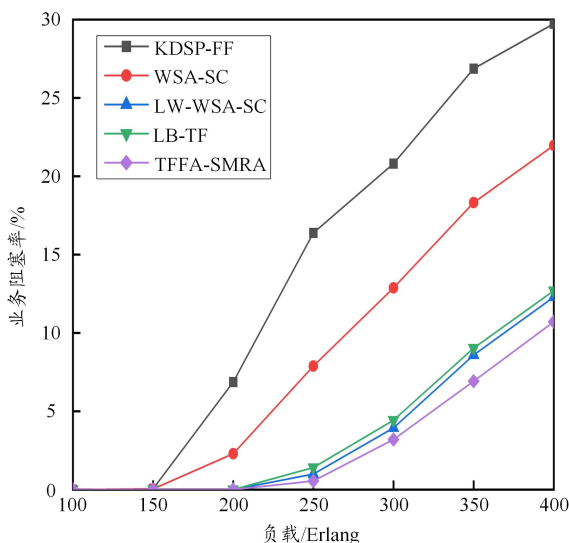
2.1 仿真环境

为了验证所提算法的性能,本文在 NSFNET 和 USNET 拓扑中进行了仿真实验^[11-12]。其中,NSFNET 包含 14 个节点和 21 条链路,USNET 包含 24 个节点和 43 条链路。在仿真实验中,每条网络链路均设有 386 个频隙。业务请求的源节点、目的节点以及请求速率均为随机生成,带宽需求均匀分布在 1~200 Gb/s。保护带宽设定为 1 个频隙,同时业务的保护比从集合 [0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1] 中随机选取。节点接收连接请求的到达过程遵循泊松分布,其平均到达率为 λ ;连接请求的持续时间遵循指数分布,其参数为 $1/\mu$ 。因此,整个网络的总负载可表示为 λ/μ ^[14]。本文实验中每次仿真 10 000 个业务请求。

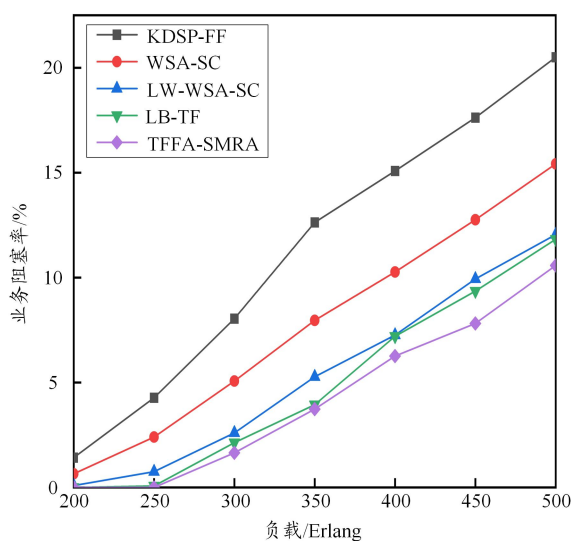
2.2 仿真结果分析

为验证 TFFA-SMRA 算法的性能,本文将其与另

外 4 种算法进行对比,分别为传统的 KDSP-FF 算法、基于频谱相干性感知的 WSA-SC 算法^[10]、将 WSA-SC 算法附加本文中链路加权优化后的 LW-WSA-SC 算法以及 LB-TF^[12]算法。在 NSFNET 和 USNET 拓扑下,5 种算法的业务阻塞率性能对比如图 1 所示。从图 1(a)可以看出,LW-WSA-SC 算法与 LB-TF 算法的业务阻塞率相近。这主要是因为这 2 种算法均采用了链路加权路由方式和碎片感知频谱分配算法,提升了路由效率,并为后续业务留下了更连续的频谱资源,因此它们的业务阻塞率较传统 KDSP-FF 算法和仅考虑频谱分配过程中碎片感知的 WSA-SC 算法有所降低。相比于上述 4 种算法,TFFA-SMRA 算法实现了最低的业务阻塞率,当业务负载为 400 Erlang 时,TFFA-SMRA 算法相比 LW-WSA-SC 算法和 LB-TF 算法的阻塞率分别降低了 12.9%和 15.7%。从图 1(b)可以看出,在相同的业务负载条件下,USNET 拓扑下的所有算法的业务阻塞率均低于 NSFNET 拓扑中的业务阻塞率。这是因为 USNET 拓扑拥有更多的链路和频谱资源,从而提供了更高的连通性和更多候选路径的选择,使得找到可用资源以满足请求变得更加容易。例如,当业务负载达到 500 Erlang 时,TFFA-SMRA 算法相较于 KDSP-FF、WSA-SC、LW-WSA-SC 和 LB-TF 算法分别降低了 46.3%、31.3%、12.2%和 10.6%的业务阻塞率。TFFA-SMRA 算法通过根据时频域匹配度来分配频谱块,不仅提高了频域上频谱资源的集中度,还增强了新业务与周围业务请求传输的同步性,进而为后续业务留出了较大的空闲频谱块,有效降低了后续业务的阻塞概率。



(a) NSFNET



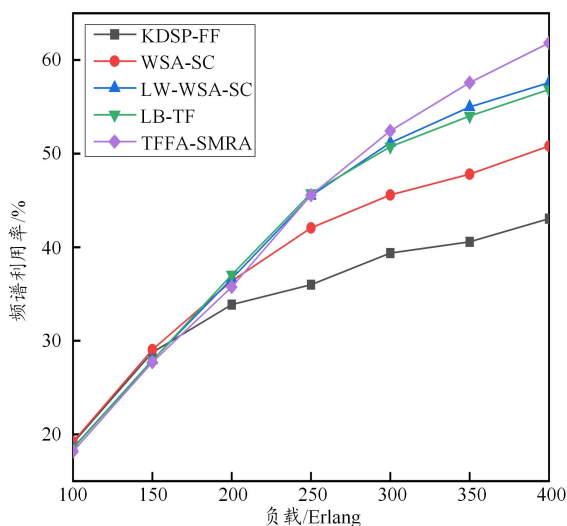
(b) USNET

图 1 不同算法业务阻塞率性能对比

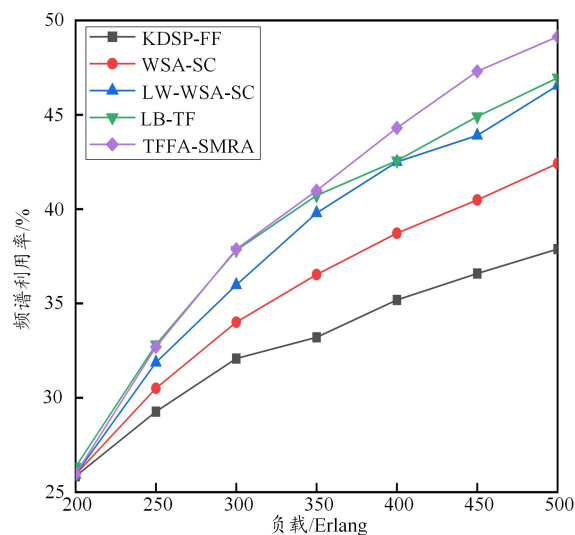
5种算法的频谱利用率性能对比如图2所示。从图2(a)可以看出,在NSFNET拓扑下,当业务负载低于250 Erlang时,LW-WSA-SC和LB-TF算法的频谱利用率相似,并且均高于KDSP-FF与WSA-SC算法。当业务负载增至400 Erlang时,TFFA-SMRA算法展现出最高的频谱利用率,相较于KDSP-FF、WSA-SC、LW-WSA-SC和LB-TF算法,分别提升了42.1%、21.6%、7.3%和8.52%。从图2(b)可以看出,在USNET拓扑中,当业务负载达到450 Erlang时,TFFA-SMRA算法的频谱利用率较之于KDSP-FF、WSA-SC、LW-WSA-SC和LB-TF算法分别提高了29.2%、16.8%、7.9%和7.1%。这一提升主要归因于以下2点:首先,TFFA-SMRA算法具有更低的阻塞率,这意味着网络

可以同时支持更多的业务请求,从而更多地利用了可用的频隙资源;其次,该算法结合了一个二维碎片度量模型,能够更有效地规划频谱使用,进而提高了整体频谱利用率。

5种算法的碎片率性能对比如图3所示。从图3(a)可以看出,在业务负载为100~400 Erlang时,WSA-SC、LW-WSA-SC及TFFA-SMRA算法的碎片率低于KDSP-FF和LB-TF算法。而图3(b)则显示,在USNET拓扑下,当业务负载超过450 Erlang时,WSA-SC、LW-WSA-SC与TFFA-SMRA算法的碎片率大致稳定在12%~14%。KDSP-FF算法由于采用首次命中方式进行频谱分配,未考虑碎片优化,因此其碎片化程度高于LB-TF算法。LB-TF算法虽然采用了基于熵的碎片度量进

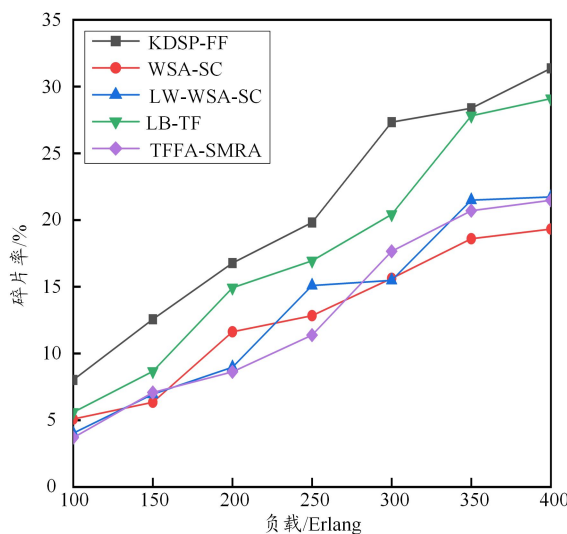


(a) NSFNET

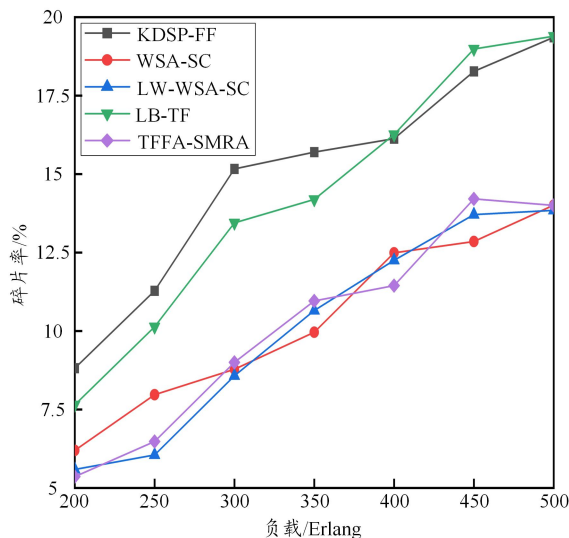


(b) USNET

图2 不同算法频谱利用率性能对比



(a) NSFNET



(b) USNET

图3 不同算法的碎片率性能对比

吕晶晶,冯楠,左晓博:弹性光网络中时频碎片感知的可生存多路径资源分配算法

行频谱分配,但相较于 LW-WSA-SC、WSA-SC 和 TF-FA-SMRA 这 3 种算法,后者利用了基于频谱相干性的频谱分配方式,在频域上实现了更精准的碎片度量,从而降低了碎片化程度。此外,因为文中碎片率计算仅涉及频域度量,故存在 WSA-SC、LW-WSA-SC 以及所提算法在相同负载下碎片率一致的情况。

结合图 1、图 2 和图 3 的数据分析可知,本文所提 TFFA-SMRA 算法不仅考量了链路长度和负载情况,还考虑了频谱资源的分离程度,并通过链路加权的方式找到了最优路由方案,有效地降低了当前业务的阻塞概率,提高了频谱利用率。随后,该算法通过在时域和频域中精确测量频谱块匹配度来感知碎片,为未来业务预留更大块的空闲频谱资源,进一步降低业务阻塞率,提升频谱利用率。因此,相较于其它 4 种比较算法,TFFA-SMRA 算法在 NSFNET、USNET 中都表现出了最佳性能。

3 结束语

本文针对 EON 中的路由与频谱分配问题,采用了 MPP 技术以确保业务的生存性;通过多参数联合评估链路权重,有效提升了路由效率;同时引入基于时-频域匹配度量的碎片感知资源分配算法,优化了网络性能。仿真结果表明,所提出的 TFFA-SMRA 算法在降低业务阻塞率和提升频谱利用率方面相较于对比算法表现出色。具体而言,在 NSFNET 拓扑结构中,与 LW-WSA-SC 和 LB-TF 算法相比,本算法将业务阻塞率分别降低了 12.9%和 15.7%,同时将频谱利用率提高了 7.3%和 8.52%。而在 USNET 拓扑下,相对于 LW-WSA-SC 和 LB-TF 算法,TFFA-SMRA 算法同样展示了优越性能,使业务阻塞率分别下降了 12.2%和 10.6%,并使频谱利用率分别提升了 7.9%和 7.1%。这些结果表明,无论是在 NSFNET 还是 USNET 拓扑结构中,TFFA-SMRA 算法均显著优于其它对比算法,为提高光网络的性能提供了新的解决方案。

参考文献:

- [1] KIM K O, DOO K H, LEE H H, et al. High speed and low latency passive optical network for 5G wireless systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 37(12): 2873–2882.
- [2] CAI A, GUO J, LIN R, et al. Multicast routing and distance-adaptive spectrum allocation in elastic optical networks with shared protection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(17): 4076–4088.
- [3] SRINIVAS A M, KUMAR R, BARLA P. Blocking triggered multi-path routing with spectrum retuning in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 83: 103673-1–103673-21.
- [4] HALDER J, ACHARYA T, CHATTERJEE M, et al. ES-RSM-RSA: a novel energy and spectrum efficient regenerator aware multipath based survivable RSA in offline EON[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(3): 1451–1466.
- [5] BAO N, SU G, CHEN J. 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.
- [6] 王世成,陈晓静,何荣希. 弹性光网络中基于业务承载力的碎片感知路由与频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 122–130.
- [7] LECHOWICZ P. Regression-based fragmentation metric and fragmentation-aware algorithm in spectrally-spatially flexible optical networks [J]. Computer Communications, 2021, 175: 156–176.
- [8] LUO Z, YIN S, ZHAO L, et al. Survivable routing, spectrum, core and band assignment in multi-band space division multiplexing elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(11): 3442–3455.
- [9] 刘鑫,何荣希,陈晓静. 弹性光网络中基于自适应调制的碎片感知共享通路保护算法[J]. 光通信技术, 2020, 44(2): 52–58.
- [10] LIU H, MA J, CHEN Y, et al. A survivable VON embedding algorithm based on resource mean and spectrum coherence-aware in elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102103-1–102103-9.
- [11] LIU H, 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.
- [12] YU M, JIANG J, SHANG T, et al. A load balancing and time-frequency fragmentation-aware algorithm for elastic optical network [C]//IEEE. Proceedings of 2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Wuhan: IEEE, 2023: 1–5.
- [13] TAKEDA K, SATO T, SHINKUMA R, et al. Multipath provisioning scheme for fault tolerance to minimize required spectrum resources in elastic optical networks[J]. Computer Networks, 2021, 188: 107895-1–107895-14.
- [14] 王健,张娟,宿纪松,等. 弹性光网络中时-频碎片感知的频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 183–189.
- [15] 陈铭毓,沈建华. 一种提高弹性光网络性能的路由策略[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 16–21.