

激光与光电子学进展

弹性光网络中时-频碎片感知的频谱分配算法

王健^{1,2}, 张娟^{1,2}, 宿纪松^{1,2}, 胡劲华^{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河北省安防信息感知与处理重点实验室, 河北 邯郸 056038

摘要 频谱碎片已成为影响弹性光网络频谱利用率的主要因素。为减少频谱碎片,有效的频谱碎片化度量必不可少。基于此,本文通过对碎片资源的产生机理以及产生概率进行详细分析,构建了时-频碎片感知模型,并提出相应频谱分配算法,为连接请求选择了碎片化程度最小的频谱。仿真结果表明,相较于对比算法,提出算法在有效降低频谱碎片率的同时,能够降低业务阻塞率,以及提高频谱利用率。

关键词 光通信; 弹性光网络; 频谱碎片; 碎片感知; 业务阻塞率

中图分类号 TN929.Z

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220546

Time-Frequency Fragmentation-Aware Spectrum Allocation Algorithm in Elastic Optical Networks

Wang Jian^{1,2}, Zhang Juan^{1,2}, Su Jisong^{1,2}, Hu Jinhua^{1,2}, Zhao Jijun^{1,2*}¹*School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;*²*Hebei Province Key Laboratory of Security Information Sensing and Processing, Handan 056038, Hebei, China*

Abstract Spectrum fragmentation has become a primary factor that affects spectrum utilization in elastic optical networks. To reduce the spectrum fragmentation rate, effective measurement of the spectrum fragmentation is necessary. Thus, in this study, a time-frequency fragmentation-aware model is developed based on a detailed analysis of the generation mechanism and probability of fragmentation resources, and a spectrum allocation algorithm is proposed to select the spectrum with the least degree of fragmentation for connection requests. Simulation results show that compared with the contrast algorithm, the proposed algorithm can reduce the service blocking rate and improve spectrum utilization while effectively reducing the spectrum fragmentation rate.

Key words optical communications; elastic optical network; spectrum fragmentation; fragmentation aware; service blocking rate

1 引言

随着网络电视、云计算等多粒度业务应用的持续发展,相较于传统的波分复用网络,弹性光网络(EONs)凭借其特有的灵活性,满足了不同粒度业务连接请求的带宽需求^[1]。然而,在为连接请求规划合适路径以及分配频谱资源的路由与频谱分配(RSA)技术^[2]中,随着频谱一致性和频谱连续性等约束条件的满足,频谱资源被不断释放和重新分配,链路中出现了较多无法被连接请求使用的空闲频谱资源——频谱碎片,严重劣化了网络性能^[3]。因此弹性光网络中频

谱碎片相关问题已成为研究热点^[4-6]。

针对EONs中业务在RSA过程中产生的频谱碎片,文献[7]提出了维护式和预防式的频谱整理方案。在维护式频谱整理方案中,文献[8]根据链路上业务持续时间设置阈值,当业务请求的持续时间超过阈值后,对业务进行频谱碎片整理。在预防式的频谱整理方案中,文献[9]在空分复用弹性光网络的背景下,通过综合考虑频、时和空域的碎片资源,建立三维碎片度量模型,为业务选择了合适的空闲频谱块。为实现高效的频谱利用,文献[10]选择碎片量最少的链路,使用多路径方法实现了对连接请求的传输。进而文献[11]提出

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-18; 录用日期: 2022-03-09; 网络首发日期: 2022-03-19

基金项目: 河北省自然科学基金(F2019402240)

通信作者: *zjjun@hebeu.edu.cn

碎片最小化 RSA 算法,为连接请求选择碎片程度较低的路径进行传输,使网络中业务达到均衡状态。且在文献[12]中提出最小负载链路和路由碎片感知的 RSA,通过感知链路上业务的分配情况,不同类型的连接请求均匀地分配在链路上。除此之外,针对业务的动态变化,结合连接请求的持续时间,能够更加准确地掌握光路请求的建拆过程,减少频谱碎片的产生。文献[13]在虚拟光网络的背景下,结合链路上时域和频域的碎片设计时域和频域碎片最小化算法,均衡网络中的资源消耗,从而减少频谱碎片。文献[14]提出业务持续时间与预防式和维护式的碎片整理方案中,维护式的碎片整理效果更明显,但不可避免地出现了业务的中断。为避免碎片整理过程中出现的业务中断,在持续时间感知频谱分配(HTA-SA)算法^[15]中,计算每条备选链路上业务的持续时间的加权时差,根据最小加权时差,为连接请求选择产生时域碎片最小的频谱位置,规避了业务的重新配置,避免了业务的中断。

综上所述,虽然现在大部分文献所提算法能够从频域或时域角度减少碎片的产生,但其均忽略了连接请求对频谱碎片产生概率的考虑,导致碎片避免不完全,即当连接请求所分配资源的两侧业务离开网络,其所占光路频谱被释放,更多的碎片资源由此产生。因而,根据现有问题,本文通过分析弹性光网络中时域和频域的碎片量及其产生概率,提出一种时-频碎片感知的频谱分配(TFFA-SA)算法,并通过仿真验证了所设计算法的有效性。

2 EONs 网络拓扑与碎片度量模型

2.1 EONs 网络拓扑

本文将弹性光网络中的物理拓扑构建为 $G(V, E, S)$, 其中 V 代表物理拓扑中节点的集合, E 代表物理拓扑中链路的集合, S 为每条链路上提供的频隙集合, 并且每条链路上均具备有限数目的频谱资源。

连接请求 $R_i(s, d, b, t_b, t_e)$ 所需频隙个数 f 的计算公式为

$$f = \lceil b / (C_{\text{slot}} \times M) \rceil, \quad (1)$$

式中: b 为连接请求所需带宽; M 为连接请求 R 所需的调制等级, 本文采用二进制相移键控(BPSK)调制格式; 频隙单元 C_{slot} 取值为 12.5 GHz。

2.2 模型构建

本节将详细介绍 EONs 在频域和时域上的二维碎片感知模型。为此, 首先在时域上展示了一个新的碎片度量, 随后扩展了现有的频域碎片度量方法; 最后, 结合连接请求与频谱分配位置两侧频隙上业务的持续时间和所占频隙计算后续产生碎片的概率。

图 1 显示链路的资源占用情况, 且图中阴影部分表明了每个业务所占频谱资源和时间资源, 分别表示为不同数量的频隙(FSs)和持续时间隙(HTSs)。假

设连接请求 R_1 在此链路上传输, 需要 2 个频隙, 持续时间为 3, 由图 1 可知有备选位置 1 和备选位置 2。

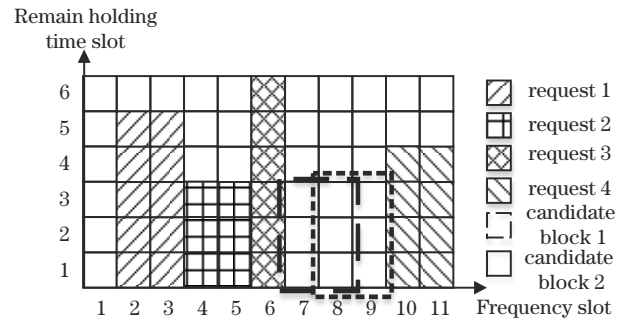


图 1 一条链路资源占用情况

Fig. 1 Resource usage of a link

2.2.1 频谱碎片度量

1) 时域碎片度量

对于每个连接请求 $R_i(s, d, b, t_b, t_e)$, 剩余持续时间 t_h 通过下式计算:

$$t_h = t_e - t, \quad (2)$$

式中: s 为业务的源节点; d 为目的节点; b 为连接请求带宽; t_b 为连接请求达到时间; t_e 为连接请求离开时间; t 为当前运行时间; t_h 为连接请求持续时间。

为方便后续计算, 将剩余持续时间所占时隙数值化, 计算公式为

$$t_s = \frac{t_h}{\tau}, \quad (3)$$

式中: τ 为单个时隙的时间容量; t_s 为剩余持续时间所占时隙数。

由于动态光路在网络中随机建立与拆除, 时域的频谱碎片影响后续业务的到来, 减少连接请求接入网络时的时域碎片, 能规整时域频谱资源。针对此问题, 结合业务的持续时间, 设置时域碎片度, 计算连接请求在每一块备选位置处产生的时域碎片量 F_t , 计算公式为

$$F_t = \frac{|t_s^{\text{hl}} - t_s^{\text{R}}| + |t_s^{\text{hr}} - t_s^{\text{R}}|}{100}, \quad (4)$$

式中: t_s^{hr} 为空闲频谱块右侧的业务剩余持续时间; t_s^{hl} 为空闲频谱块左侧的业务剩余持续时间; t_s^{R} 为连接请求的持续时间。

式(4)描述了连接请求在不同空闲频谱块上的时域碎片度, 连接请求与空闲频谱块两端业务的剩余持续时间越接近, 表明在此处时域离散性越小, 产生的碎片越少。下面举例说明如何计算时域的碎片度, 如图 1 所示, 此时, 若到达连接请求为 R_1 。则代入式(4)可得

$$F_t = \frac{|6 - 3| + |4 - 3|}{100} = 0.03。$$

2) 频域碎片度量

频域的碎片度量已经被许多文献提到, 文献[16]定义了经典的外部度量法, 即最大可用频谱块占链路上总的空闲频谱块的比值。但是, 碎片的产生与连接

请求所需频隙数和分配位置有关,此度量不能明确地表示可用空闲频谱块对于当前连接请求分配后所产生的碎片度。

因此,提出连接请求 R 所需频隙数为 f ,链路上每个空闲频块所占频隙数 B_i 和连接请求所需频隙数 f 之差与链路 l 上空闲频谱块总频隙数 $\sum B_i$ 的比值作为连接请求在链路 l 上的频域碎片度。频域碎片度 F_f 由下式计算:

$$F_f = \frac{B_i - f}{\sum B_i}, \quad (5)$$

该式描述了连接请求在每个空闲频谱块上频域的碎片度,根据链路上频谱占用情况结合连接请求所需频隙数,计算在每个空闲频谱块上产生的频域碎片量。当空闲频谱块频隙数与连接请求所需频隙数越接近,则代表产生的频域碎片越少。下面举例说明如何计算频域碎片度,如图 1 所示,此时,若到达连接请求为 R_1 。代入式(5)可得

$$F_f = \frac{3 - 2}{1 + 3} = 0.25。$$

2.2.2 碎片产生概率

为进一步优化频谱资源,在连接请求所占用资源被释放后,为减少后续频谱碎片的产生,对业务在时域和频域进行感知,降低连接请求在链路上产生碎片的概率。

1) 时域碎片产生概率

由于动态业务的随机到来,且连接请求持续时间的差异性,业务所占资源被释放后频谱资源变得离散。结合连接请求与其两侧频隙上业务的持续时间,判断其所占频谱资源被释放后时域碎片的产生概率,则时域碎片产生概率的计算公式为

$$t_{\text{avg}} = \frac{t_s^{\text{sl}} + t_s^{\text{R}} + t_s^{\text{sr}}}{3}, \quad (6)$$

$$t_{\text{var}} = \frac{(t_s^{\text{sl}} - t_{\text{avg}})^2 + (t_s^{\text{R}} - t_{\text{avg}})^2 + (t_s^{\text{sr}} - t_{\text{avg}})^2}{3}, \quad (7)$$

$$t_{\text{avg}}^{\text{var,L}} = \frac{\sum_{i=1}^L t_{\text{var}}^i}{L}, \quad (8)$$

式中: t_{avg} 表示同一链路中,连接请求与每个备选位置两侧相邻频隙上业务持续时间的平均值; t_s^{sl} 表示分配位置左侧频隙上业务剩余持续时间; t_s^{sr} 表示分配位置右侧频隙上业务剩余持续时间; t_{var} 表示连接请求在备选位置与其两侧频隙上业务的持续时间方差值,其代表备选位置相邻频隙业务的持续时间与连接请求持续时间的接近程度; $\sum_{i=1}^L t_{\text{var}}^i$ 表示备选路径中每条链路中此备选位置方差值的和; L 表示备选路径中所包含的链路数; $t_{\text{avg}}^{\text{var,L}}$ 代表每条链路平均值。 $t_{\text{avg}}^{\text{var,L}}$ 越小,表示连接请求分配到该频谱位置,连接请求与相邻频隙所占业务的持续时间越相近。上述计算公式表明连接请求的持续时间与备选频谱位置两侧频隙上业务的剩余

持续时间的相近程度,当 $t_{\text{avg}}^{\text{var,L}}$ 越小,代表连接请求被释放后与相邻业务所占频谱资源一起被释放的概率越大,则产生频谱碎片的概率越小。下面举例说明如何计算时域碎片产生概率,如图 1 所示,此时,若到达连接请求为 R_1 。代入式(6)~(8)可得

$$t_{\text{avg}1} = \frac{6 + 3 + 0}{3} = 3,$$

$$t_{\text{var}1} = \frac{(6 - 3)^2 + (3 - 3)^2 + (0 - 3)^2}{3} = 6,$$

$$t_{\text{avg}1}^{\text{var,L}} = \frac{6}{1} = 6,$$

$$t_{\text{avg}2} = \frac{0 + 3 + 4}{3} = 2.3,$$

$$t_{\text{var}2} = \frac{(0 - 2.3)^2 + (3 - 2.3)^2 + (4 - 2.3)^2}{3} = 0.963,$$

$$t_{\text{avg}2}^{\text{var,L}} = \frac{0.963}{1} = 0.963。$$

2) 频域碎片产生概率

为减少频谱碎片,本文根据网络中业务的资源分配情况,考虑业务的持续时间,使与离开时间相近的业务一起传输,减小时域碎片产生概率;而从频域的角度,当连接请求与相邻频隙上业务所占资源被释放后,也会减少频域碎片产生的概率,计算公式为

$$F_{\text{adj}} = \frac{1}{f_l + f_r + f}, \quad (9)$$

式中: f_l 为备选空闲频谱块左侧频隙上业务所占频隙数量; f_r 为备选空闲频谱块右侧频隙上业务所占频隙数量; f 为连接请求所需频隙数量; F_{adj} 为连接请求及其两侧频隙上业务所占频隙之和。式(9)表明, F_{adj} 越大,代表连接请求与相邻频隙所占业务的频谱资源被释放后,能空出更多的空闲频谱资源,产生频域碎片的概率越小。下面举例说明如何计算频域碎片产生概率,如图 1 所示,此时,若到达连接请求为 R_1 。代入式(9)可得

$$F_{\text{adj}1} = \frac{1}{1 + 2 + 0} = \frac{1}{3},$$

$$F_{\text{adj}2} = \frac{1}{0 + 2 + 2} = \frac{1}{4}。$$

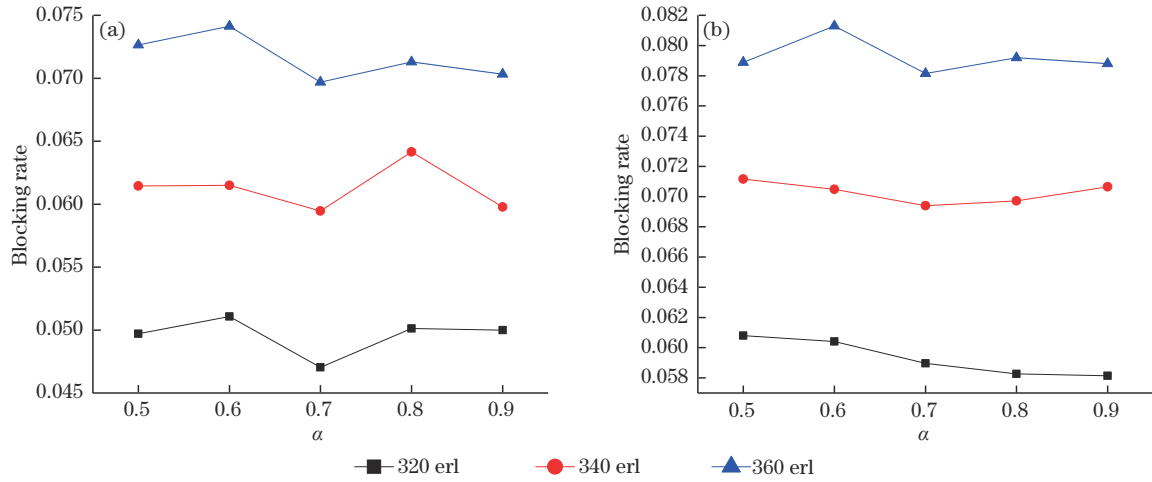
2.2.3 时-频碎片感知模型

给定上述两个权重的定义,提出时-频碎片感知模型,如下式所示:

$$F = \alpha \cdot F_t \cdot t_{\text{avg}}^{\text{var,L}} + (1 - \alpha) \cdot F_f \cdot F_{\text{adj}}, \quad (10)$$

式中, α 为时域所占权重。

随着网络负载的变化,针对不同的 α 阻塞率会有不同的变化,由图 2 可知,在 NSFNET 中,不同的业务负载,在 $\alpha=0.7$ 时,阻塞率均为最小;而在 USNET 中,当负载较小时如业务量为 320 erl 时, α 越大,阻塞率越小,而随着负载量的增大,如业务量为 340 erl 和 360 erl, $\alpha=0.7$ 时,阻塞率最小。时域和频域权重的不同会出现不同的阻塞率,且 α 为 0.7 时网络在较大业务

图2 不同 α 对阻塞率的影响。(a) NSFNET拓扑;(b) USNET拓扑Fig. 2 Effect of different α on blocking rate. (a) NSFNET topology; (b) USNET topology

量时阻塞率表现最好,故本文将 α 取值为0.7。

式(10)分为两部分,前一部分代表时域碎片度,后一部分代表频域碎片度,每一部分分别考虑了连接请求在分配位置产生的碎片量及其被释放后产生时域和频域碎片的概率。总的来说 F 值越小,代表此备选位置的时域和频域的频谱碎片越小,及后续产生碎片的概率也越小,能有效地缓解后续业务的阻塞问题。下面举例说明如何计算备选位置的碎片度,如图1所示,此时,若到达连接请求为 R_1 。代入式(10)可得

$$F_1 = 0.7 \times 0.03 \times 6 + 0.3 \times 0.25 \times \frac{1}{3} = 0.15075,$$

$$F_2 = 0.7 \times 0.03 \times 0.963 + 0.3 \times 0.25 \times \frac{1}{4} = 0.038973.$$

3 算法描述

3.1 时-频碎片感知的频谱分配算法

本文提出TFFA-SA算法,该算法结合由碎片度和碎片产生概率构成的时-频碎片感知模型,为业务选出了最优的空闲频谱块。

表1给出了该方案中每个连接请求的频谱分配过程。当一个连接请求 $R_i(s, d, b, t_b, t_e)$ 到达时,首先使用 K 条最短路径(KSP)算法将 k 条最短路径规划为 P [步骤1],接下来,分别使用式(1)~(3)计算请求 R 在路径 P_j 上的FSs和HTSs的数值[步骤2)~步骤4)];在路径中的链路中寻找所有的可用空闲频谱块[步骤5)];进而利用式(4)和式(5)计算每一个可用频谱块的时域和频域碎片度[步骤7)];然后利用式(6)~(9)计算备选位置产生时域和频域碎片的概率[步骤8)];最后根据式(10)计算每一块备选位置产生的碎片量[步骤10)];得到 F 值进行比较后为连接请求进行分配,否则,如果搜索完前三条路径均无法为连接请求分配合适的频隙,则阻塞业务[步骤12)~步骤21)]。

3.2 算法复杂度分析

本文所提TFFA-SA算法的时间复杂度主要包括两

表1 算法流程

Table1 Algorithm flow

Spectrum allocation for time-frequency fragmentation aware algorithm
Input: arriving connection request $R_i(s, d, b, t_b, t_e)$
Output: spectrum allocation
1) Plan k shortest paths as P with KSP algorithm for connection request R
2) For path P_j from $j=1$ to $j=4$ do
3) For link L form $i=1$ to $i=l$ do
If available block can be found for connection request R
4) Compute number of FSs and HTSs requested by connection R using Eq. (1) and Eq. (3) respectively
5) Find available blocks B_i in link l of P_j
6) For available spectrum block B_i from $i=1$ to $i=s$
7) Compute time domain fragmentation metric and frequency domain fragmentation metric using all available bocks in link l using Eq. (4) and Eq. (5)
8) Compute probability of time domain and frequency domain fragmentation using Eqs. (6)~(9)
9) Endfor
10) Finally, value of this position is calculated according to Eq. (10) and stored in value set F
11) Break
12) Else
13) Find next path
14) If $j==4$
15) Break request
16) Break
17) Endif
18) Endif
19) Endfor
20) Endfor
21) Get minimum of F , find corresponding spectral position; finish spectrum allocation

部分,路径路由和频谱分配。通过应用Dijkstra算法寻找KSP算法的时间复杂度为 $O(K|E|\log|V|)$,其中 $|V|$ 和 $|E|$ 分别是网络中节点数量和节点间链路的数量。本文算法频谱分配方式的时间复杂度为 $O(|E|\times S)^2$, S 为链路上频隙个数大于连接请求的空闲频谱块数。因此本文所提算法的时间复杂度为 $O(K|E|\log|V|(|E|\times S)^2)$ 。而对比算法HTA-SA算法的复杂度为 $O(|E||F|+|V|^2)$,本文算法计算复杂度较低。

4 仿真及分析

4.1 拓扑结构与参数设置

本文通过模拟具有 14 个节点、21 条链路的 NSFNET 和 24 个节点、43 条链路的 USNET 的网络拓扑图对所提出的 TFFA-SA 算法进行仿真验证。如图 3 所示,在仿真过程中,假设弹性光网络部署在 C 波段,每条光纤链路上的可分配带宽为 4.475 THz,每个频隙带宽为 12.5 GHz,因此每条光纤链路上能够承载 358 个可用频隙。连接请求的到达服从参数为 λ 的泊松分布,持续时间服从参数为 μ 的负指数分布,即全网

的总负载为 λ/μ 。源节点与目的节点随机产生,且每个连接请求所需频隙个数在 $[2,100]$ 间均匀分布。

为验证本文提出的 TFFA-SA 算法,采用数值仿真对其与 HTA-SA 算法在阻塞率、碎片率和频谱利用率等性能指标方面进行了对比分析。

首先对 TFFA-SA 算法和 HTA-SA 算法在阻塞率性能方面进行了比较。在 USNET 和 NSFNET 两种不同的网络拓扑下,仿真曲线如图 4 所示。显然, TFFA-SA 算法在阻塞率方面表现较好。在业务负载较小时,网络可用的频谱资源丰富,两种算法能成功建立连接数较多;随着网络负载的增加,网络中可用的空闲资源减少,导致成功建立连接的业务较少,阻塞率逐渐增大。在相同的仿真条件下, TFFA-SA 算法的阻塞率大体上小于 HTA-SA 算法。这是因为 TFFA-SA 算法不仅考虑时域碎片的产生,且结合频域碎片的产生及碎片的产生概率,选择产生碎片量值最小的频谱位置,当连接请求所占频谱资源被释放后链路上会空出更多的空闲频谱块,为后续业务的有效分配奠定基础。而不论是 TFFA-SA 算法还是 HTA-SA 算法,其实质都是以不同方式对链路上频谱碎片进行整理,降低阻塞率。

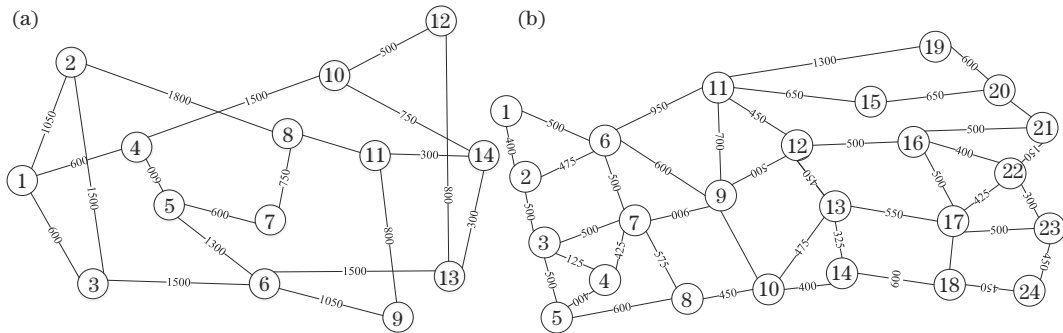


图 3 仿真拓扑图。(a) NSFNET 拓扑; (b) USNET 拓扑

Fig. 3 Simulation topology. (a) NSFNET topology; (b) USNET topology

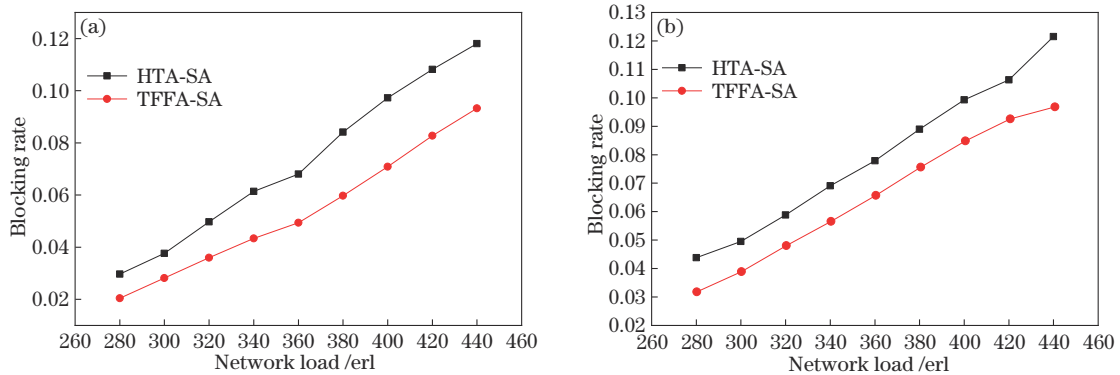


图 4 TFFA-SA 算法和 HTA-SA 算法阻塞率性能对比。(a) NSFNET 拓扑; (b) USNET 拓扑

Fig. 4 Comparison of blocking rate performance between TFFA-SA algorithm and HTA-SA algorithm. (a) NSFNET topology; (b) USNET topology

其次对碎片率进行了对比,验证了 TFFA-SA 算法的优势。TFFA-SA 算法和 HTA-SA 算法各自的碎片率如图 5 所示。结果表明:两种算法的碎片率随着业务量的增长而增长。这是因为,在业务负载较小时,网络可用的频谱资源丰富,两种算法能成功建立的连接数较多,碎片量较少;随着网络负载的增加,网络中可用的空闲资源减少,碎片率增大,而 TFFA-SA 算法具有较低的碎片率。这是因为该算法针对每一个连接请求,结合在备选位置产生碎片量和后续产生碎片的概率,选择产生碎片少的备选位置,从而为即将到来的连接请求预留出更多的频谱资源。而 HTA-SA 算法只是根据业务的持续时间信息,并未考虑业务频域以及碎片产生概率,导致碎片规避不完全,更多碎片由此产生。此外,这两种算法在 USNET 拓扑中的碎片率都比 NSFNET 稍低。这是因为 NSFNET 中的光纤链路数量少于 USNET 中的链路数量,因此在相同的网络负载下,每条光纤链路在为连接请求成功分配的频谱资源会更少。

最后对 TFFA-SA 算法和 HTA-SA 算法在频谱利用率方面进行了验证。在 USNET 和 NSFNET 两种不同的网络拓扑下,仿真曲线如图 6 所示。两种算法的频谱利用率性能呈上升趋势,并且 TFFA-SA 算法有较高的频谱利用率,可以看出 TFFA-SA 能够传输更多的业务。造成这种现象有两种原因,首先是因为 TFFA-SA 算法有更低的碎片率,这就意味着可以在传输过程中容纳更多的连接请求,即更高的频谱利用率;另一方面,是由于 TFFA-SA 算法根据连接请求与链路中原有业务的时域和频域信息,考虑现有的碎片量和后续产生碎片的概率,相比于 HTA-SA 有更好的表现结果,从而使频谱利用率有显著的提升。另外,这两种算法在 USNET 拓扑中的频谱利用率比 NSFNET 拓扑稍低。这是因为 NSFNET 拓扑中的光纤链路数量少于 USNET 拓扑中的链路数量,NSFNET 拓扑中碎片率小于 USNET 拓扑,能够更好地传输业务,因此频谱利用率较大。

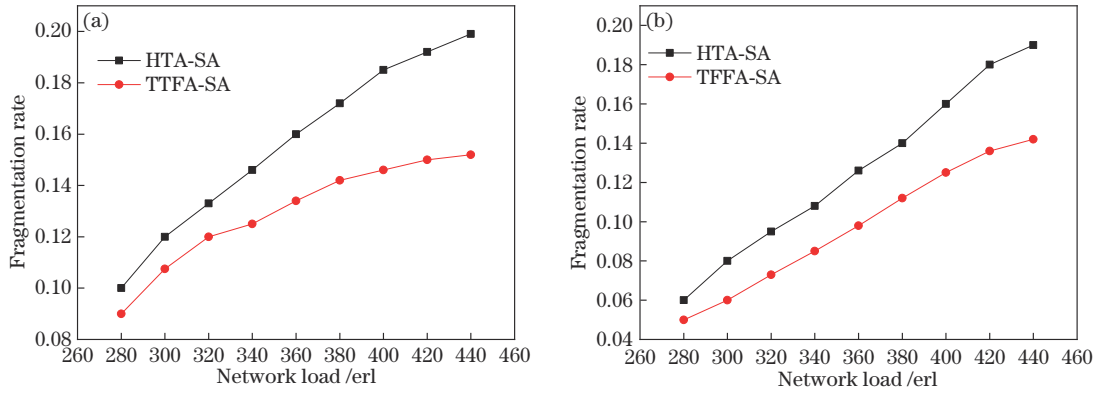


图 5 TFFA-SA 算法和 HTA-SA 算法碎片率性能对比。(a) NSFNET 拓扑; (b) USNET 拓扑

Fig. 5 Comparison of fragmentation rate performance between TFFA-SA algorithm and HTA-SA algorithm. (a) NSFNET topology; (b) USNET topology

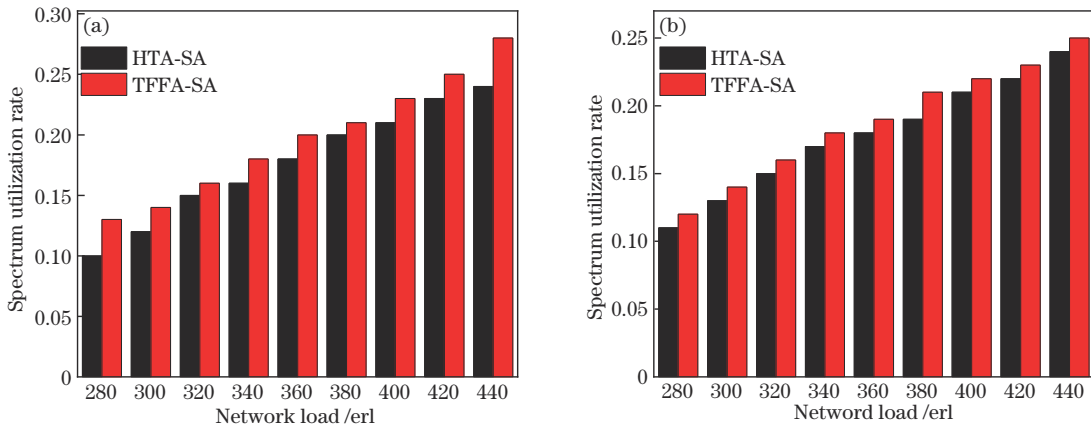


图 6 TFFA-SA 算法和 HTA-SA 算法频谱利用率性能对比。(a) NSFNET 拓扑; (b) USNET 拓扑

Fig. 6 Comparison of spectrum utilization performance between TFFA-SA algorithm and HTA-SA algorithm. (a) NSFNET topology; (b) USNET topology

5 结 论

为减少频谱碎片的产生,建立了时间-频谱二维碎片度量模型,提出了一种时-频碎片感知的频谱分配算法。结合连接请求在网络中产生的时域和频域碎片及后续产生碎片的概率,在最大程度上避免了碎片的产生。根据不同网络拓扑的仿真结果,与对比算法相比,本文所设计的频谱分配算法可有效减少频谱碎片,降低阻塞率,提高频谱利用率。而所设计的算法仅考虑业务在时域和频域的碎片问题,未考虑业务的多粒度特性,因此后续工作需要加入多粒度业务公平性,缓解多粒度业务中大带宽业务的阻塞,设计更有效的频谱分配算法。

参 考 文 献

- [1] Klinkowski M, Walkowiak K. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(8): 884-886.
- [2] Ujjwal, Thangaraj J. Review and analysis of elastic optical network and sliceable bandwidth variable transponder architecture[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(11): 110802.
- [3] Alyatama A. Relative cost routing and spectrum allocation in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(3): 38-49.
- [4] Oki E, Sato T, Chatterjee B C. Spectrum fragmentation management in elastic optical networks[C]//2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 9-13, 2019, Angers, France. New York: IEEE Press, 2019.
- [5] Yin Y W, Zhang M Y, Zhu Z Q, et al. Fragmentation-aware routing, modulation and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks[C]//Optical Fiber Communication Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2013: OW3A.5.
- [6] Fukuda T, Liu L, Baba K I, et al. Fragmentation-aware spectrum assignment for elastic optical networks with fully-distributed GMPLS[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: Tu2B.3.
- [7] Chatterjee B C, Ba S, Oki E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 183-210.
- [8] 商盼盼, 任丹萍, 张娟, 等. 弹性光网络中面向业务精确迁移的频谱碎片整理算法[J]. *光通信技术*, 2021, 45(10): 51-57.
- Shang P P, Ren D P, Zhang J, et al. Service-oriented spectrum defragmentation algorithm with exact migration in elastic optical networks[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(10): 51-57.
- [9] Zhang J, Bao B W, Yao Q Y, et al. 3D fragmentation metric and RCSA scheme for space division multiplexing elastic optical networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 201595-201605.
- [10] Yousefi F, Rahbar A G, Yaghubi-Namaad M. Fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102019.
- [11] Horota A, Figueiredo G B, da Fonseca N L S. Routing and spectrum assignment algorithm with fragmentation minimization in elastic optical networks[C]//2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, May 5-9, 2014, Florianopolis, Brazil. New York: IEEE Press, 2014: 436-442.
- [12] Batham D, Yadav D S, Prakash S. Least loaded and route fragmentation aware RSA strategies for elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 39: 95-108.
- [13] 刘焕淋, 胡浩, 熊翠连, 等. 基于时频联合碎片感知的资源均衡虚拟光网络映射算法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(10): 2345-2351.
- Liu H L, Hu H, Xiong C L, et al. Resources balancing algorithm based on the time-frequency fragment awareness for virtual optical network mapping[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2345-2351.
- [14] Singh S K, Jukan A. Efficient spectrum defragmentation with holding-time awareness in elastic optical networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(3): B78-B89.
- [15] Yang F T, Wang L, Wang L Q, et al. Holding-time-aware spectrum allocation algorithm for elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 41: 155-162.
- [16] Wang R, Mukherjee B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks[C]//2012 IEEE Global Communications Conference, December 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 2907-2911.