

引用本文:王世成,王钜霖,何荣希. EON 中针对提前预留业务的碎片感知 RSA 算法[J]. 光通信技术,2022,46(5):25-33.

EON 中针对提前预留业务的碎片感知 RSA 算法

王世成,王钜霖,何荣希*

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要:为了减少弹性光网络(EON)中的频谱和时间碎片,针对提前预留(AR)业务提出一种碎片感知路由与频谱分配(RSA)算法。在选路阶段,该算法采用 K 最短路径算法,综合考虑路径距离、跳数、频谱资源消耗和邻接链路数等因素影响来挑选候选路径集;在资源分配阶段,则采用局部影响因子统计可能产生的频谱和时间碎片,以降低候选资源块周围的频谱、时间资源碎片化程度,并利用整体影响因子尽可能将占用资源集中在频率轴边界处,以增加中间空闲资源连续性,同时还引入时域资源使用度因子以避免过度占用资源。仿真结果表明,该算法进一步改善了带宽阻塞率性能,提高了资源利用率。

关键词:弹性光网络;路由与频谱分配;提前预留;碎片感知

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0025-09

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fragmentation-aware RSA algorithm for advance reservation services in EON

WANG Shicheng, WANG Julin, HE Rongxi*

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to reduce spectrum and time fragmentation in elastic optical networks (EON), a fragmentation-aware routing and spectrum allocation (RSA) algorithm is proposed for advance reservation (AR) services. In the stage of route selection, the algorithm uses K -shortest path algorithm to select alternative path set by comprehensively considering the influence factors of path distance, hop count, spectrum resource consumption and adjacency link number. In the stage of resource allocation, local influence factors are used to count the possible spectrum and time fragmentation, so as to reduce the fragmentation of spectrum and time resources around the candidate resource blocks. The overall influence factors are used to concentrate the occupied resources at the boundary of the frequency axis as much as possible, so as to increase the continuity of intermediate idle resources. At the same time, time-domain resource utilization factors are introduced to avoid excessive resource occupation. The simulation results show that the algorithm improves bandwidth blocking probability performance and resource utilization.

Key words: elastic optical network, routing and spectrum allocation, advance reservation, fragmentation-aware

0 引言

基于正交频分复用(OFDM)的弹性光网络(EON)能够根据业务需求大小灵活分配带宽资源,克服了波分复用(WDM)光网络带宽分配模式固定、资源浪费严

重等不足^[1]。路由与频谱分配(RSA)是 EON 的一个关键问题,其目的是为业务请求选择合适的路径和频谱资源来建立光路(业务连接)^[2-3]。由于光路的动态建立与释放,导致一些空闲资源因不满足频谱连续性、邻接性等限制而不能用来建立业务连接而成为碎片^[4-5]。碎片的产生无疑会浪费资源,增加网络阻塞率,给网络运营商带来巨大损失。碎片整理 RSA 算法和碎片感知 RSA 算法是处理碎片问题的 2 种典型方法^[6],前者通过重新排列已分配频谱资源来降低网络碎片化程度,但可能造成业务中断而影响用户体验;后者通过设计度量指标来评估预选方案对网络碎片化的影响,并基于指标设计了资源分配策略,不影响已建立的连接。

EON 中往往存在多种业务类型,如时延敏感的即

收稿日期:2022-05-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(61371091、61801074)资助;大连市科技创新基金项目(2019J11CY015)资助。

作者简介:王世成(1997—),男,硕士研究生,现就读于大连海事大学信息科学技术学院信息与通信工程专业,主要从事光通信网络及路由与频谱分配算法方面的研究工作,并针对具体的弹性光网络进行路由与频谱分配算法研究及仿真验证。

* **通信作者:**何荣希(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为光网络和无线网络技术。



王世成,王钜霖,何荣希:EON 中针对提前预留业务的碎片感知 RSA 算法

时预留 (IR) 业务和支持初始时延容忍的提前预留 (AR) 业务等^[6]。IR 业务请求要求业务到达网络时需立刻开始传输数据,而 AR 业务请求在获得服务之前允许一定的时延。AR 业务请求包括视频会议、大文件传输和数据备份等应用,允许业务在开始时间前某个时刻向网络申请预留带宽资源,通过将业务所需带宽资源提前预留,可更好保证其服务质量(QoS)要求。因此,针对 AR 业务设计 RSA 算法需考虑频谱和时间 2 个维度的资源规划,以减少碎片。目前,一些文献^[7-10]针对 AR 业务的 RSA 问题进行了研究。文献[7]针对 EON 中的 AR 业务请求,提出基于可用时间-频谱连续性的度量来描述沿频率轴和时间轴的碎片,所提算法致力于最大化资源分配过程中网络空闲资源的连续程度。文献[8]提出一种与文献[7]类似的度量来描述二维(频谱-时间)资源矩阵的碎片程度,所提算法选择预分配方案中碎片化程度最小的资源块,可改善 AR 业务阻塞率和平均初始延迟。但是,上述文献并未全面考虑分配资源时会在相邻区域产生频谱碎片及时间碎片,无疑会降低资源利用率。为提高频谱效率,文献[9]提出一种优化的路由策略,但该策略仅适用于持续时间已知的 AR 业务请求类型,具有一定的局限性。为进一步改善 AR 业务的阻塞率,文献[10]尽可能使业务集中占用二维资源模型边界处的资源,从而使中心区域资源保持空闲。该算法考虑到二维资源模型中频率-时间单元的时效性,尽量将业务安排在靠近时间轴和频谱轴边界处的位置。然而,其并未考虑到候选资源块每个相邻频率-时间单元的分布状况,挑选资源块时可能会产生大量的频谱碎片和时间碎片;同时,该算法将业务占用的资源大量集中在时间轴边界处,有可能导致边界处某个时间槽中频谱资源被过度使用,后续业务请求无法及时找到可用资源。

在 RSA 选路过程中,路由策略往往采用经典的 K 最短路径(KSP)算法^[11-12]进行选路,而且 KSP 算法多以路径距离或跳数为路由权重来选择多条候选路径,无法兼顾距离和跳数对资源消耗量的影响。但是,仅考虑单一权重均可能加剧资源消耗。另一方面,在建立光路时,与所选路径邻接的相邻链路也会受到资源占用带来的影响,导致相邻链路间空闲资源对齐性降低、碎片化程度增加。因此,路径跳数、距离及其相邻链路数都应作为选路的重要考虑因素,而目前未见文献涉及。为此,本文将综合考虑以上因素的影响,提出一种基于联合考虑路径距离、跳数、频谱消耗量和相邻链路数(PHSA)路由策略和考虑二维资源模型中时

频资源局部和整体分布(LGD)的频谱分配策略的 RSA (PHSA-LGD-RSA)算法。

1 问题描述

1.1 网络模型

EON 可表示为 $G(V, E)$,其中 V 为网络中交换节点集, E 为节点间光纤链路集。每条光纤链路具有 F 个频隙,每个频隙带宽用 Z_{slot} 表示。到达网络的 AR 业务请求用 $r(s, d, t_b, t_e, \tau, \gamma)$ 表示,其中 s, d 分别为 r 的源节点、宿节点, t_b 为业务到达时刻, t_e 为服务持续时间, τ 为请求速率, γ 为业务开始时间窗口。业务的开始时间可在 γ 内灵活选择,取值范围为 $[\gamma_{start}, \gamma_{end}]$,其中 γ_{start} 为业务最早的开始时间, γ_{end} 为最晚的开始时间。

1.2 链路与路径资源模型

AR 业务请求会涉及时间维度上的资源调度,为了更好地利用网络中的频谱资源,本文以光纤链路 e 的频谱资源为例,利用时间轴和频率轴构建二维(时间-频谱)资源(下文简称时频资源)模型,如图 1 所示。

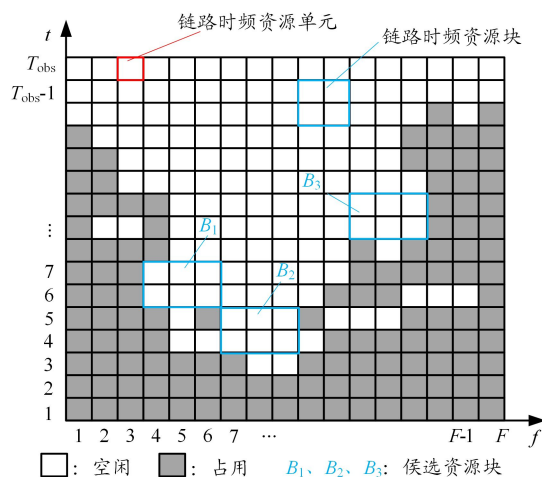


图 1 链路二维资源模型

为了便于描述,本文引入以下概念:

①频谱槽。EON 中光纤链路上频谱资源被划分成 F 个频谱槽,每个频谱槽被称为频隙。

②时间槽。假设 EON 以时间离散方式运行,光纤链路上的时间资源可划分成 T_{obs} 个时间槽,每个时间槽被称为时隙,假设网络只在时隙的开始时刻为业务分配资源^[13]。

③链路时频资源单元。链路时频资源单元是光纤链路上资源分配的最小单位。图 1 中每个小矩形块即为一个链路时频资源单元,如红色实线框区域所示。每个单元可具备空闲或占用 2 种状态。当某个单元处

于空闲状态时,表示该链路时频资源单元未被分配,可被到达业务请求使用。反之,其处于占用状态,表示它已被先前某业务使用或提前预留,无法再进行分配。每个单元的状态可表示为

$$h_{t,f}^e = \begin{cases} 1, & \text{空闲} \\ 0, & \text{占用} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $h_{t,f}^e$ 为链路 e 上位于第 t 行第 f 列的链路时频资源单元。同时,基于链路时频资源单元可得到由 T_{obs} 行时隙和 F 列频隙组成的链路资源矩阵为

$$H_{T_{\text{obs}},F}^e = \begin{bmatrix} h_{1,1}^e & h_{1,2}^e & \cdots & h_{1,F}^e \\ h_{2,1}^e & h_{2,2}^e & \cdots & h_{2,F}^e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{T_{\text{obs}},1}^e & h_{T_{\text{obs}},2}^e & \cdots & h_{T_{\text{obs}},F}^e \end{bmatrix} \quad (2)$$

④链路时频资源块。由一个或多个彼此相邻的链路时频资源单元形成的矩形块,如图 1 中蓝色实线框区域所示。

为业务请求建立连接时,需为其在网络中寻找一条端到端路径,并在该路径挑选满足邻接性和连续性约束的可用资源。具体而言,就是要求分配的时频资源在所选路径的各个链路上彼此对齐,而且在每条链路上彼此相邻。因此,为业务请求进行资源调度之前,需在链路资源模型的基础上建立路径资源模型。

路径资源模型的建立与链路资源模型相似,不同之处在于路径由一条或多条链路组成。一种路径资源模型的示例如图 2 所示。

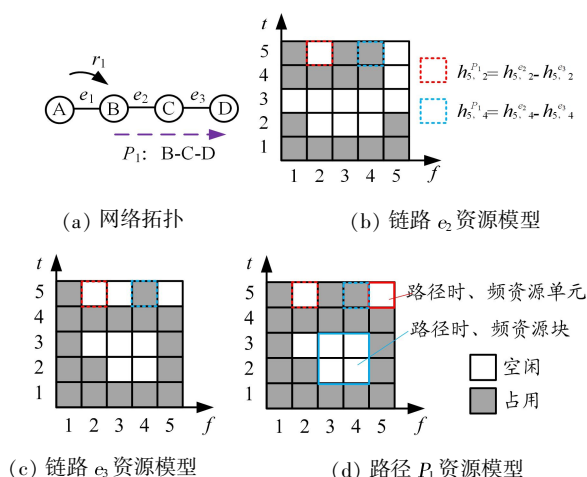


图 2 路径资源模型示例

图 2(a)为一个 4 节点网络拓扑,假设路径 P_1 由链路 e_2 和 e_3 组成,它们的链路资源模型分别如图 2(b)、图 2(c)所示,路径 P_1 的资源模型如图 2(d)所示。

为方便讨论,本文引入路径时频资源单元和路径

时频资源块 2 个概念。

⑤路径时频资源单元。图 2(d)中每个小矩形块即为一个路径时频资源单元,如红色实线框区域所示。每个路径时频资源单元的状态由多个链路单元决定,可表示为

$$h_{t,f}^p = \prod_{e \in p} h_{t,f}^e \quad (3)$$

其中, $h_{t,f}^p$ 为路径 p 上位于第 t 行第 f 列的路径时频资源单元的状态,具备空闲或占用 2 种状态,即

$$h_{t,f}^p = \begin{cases} 1, & \text{空闲} \\ 0, & \text{占用} \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,只有与某路径资源单元处于相同位置的全部链路资源单元均空闲时,该路径资源单元才处于空闲状态,即 $h_{t,f}^p=1$ 。例如,图 2(d)中红色虚线框对应的路径资源单元 $h_{5,2}^{P_1}$,根据式(3)可知, $h_{5,2}^{P_1}=h_{5,2}^{e_2} \cdot h_{5,2}^{e_3}=1$ 。反之,一旦某个链路资源单元处于占用状态,则其对应的路径资源单元处于占用状态,如图 2(d)中蓝色虚线框对应的路径单元 $h_{5,4}^{P_1}$,据式(3)可知, $h_{5,4}^{P_1}=h_{5,4}^{e_2} \cdot h_{5,4}^{e_3}=0$ 。基于此,推导出路径资源矩阵为

$$H_{T_{\text{obs}},F}^p = \begin{bmatrix} h_{1,1}^p & h_{1,2}^p & \cdots & h_{1,F}^p \\ h_{2,1}^p & h_{2,2}^p & \cdots & h_{2,F}^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{T_{\text{obs}},1}^p & h_{T_{\text{obs}},2}^p & \cdots & h_{T_{\text{obs}},F}^p \end{bmatrix} \quad (5)$$

⑥路径时频资源块。与链路时频资源块的概念类似,路径时频资源块是由一个或多个彼此相邻的路径时频资源单元形成的矩形块,如图 2(d)中蓝色实线框区域所示。

本文以图 2 为例简要描述路径资源模型的建立过程:假设某业务请求 r_1 到达后,为其选定路径 P_1 (包含链路 e_2 和 e_3),根据式(2)可得图 2(b)和图 2(c)中链路 e_2 和 e_3 的链路资源模型。在此基础上,根据式(3)和式(5),可进一步确定路径 P_1 资源模型,如图 2(d)所示。

1.3 时频资源分配

AR 业务请求涉及频域和时域 2 个维度资源的调度,根据路径资源模型,可为到达请求 $r(s, d, t_b, t_c, \tau, \gamma)$ 在所选路径中进行时频资源分配,即在候选路径资源模型中,寻找满足传输速率 τ 和持续时间 t_c 的某路径时频资源块 B_j 。候选资源块 B_j 可定义为

$$B_j = (f_{\text{start}}, f_{\text{end}}, t_{\text{start}}, t_{\text{end}}) \quad (6)$$

其中, f_{start} 和 f_{end} 分别表示矩形块 B_j 上频隙的起止编

王世成,王钊霖,何荣希:EON 中针对提前预留业务的碎片感知 RSA 算法

号, t_{start} 和 t_{end} 则表示 B_j 上时隙的起止编号。结束频隙 f_{end} 、结束时隙 t_{end} 的编号可通过 $f_{\text{end}}=f_{\text{start}}+I_{\text{freq}}-1$, $t_{\text{end}}=t_{\text{start}}+I_{\text{time}}-1$ 求得, I_{freq} 为满足业务传输速率 τ 的邻接频隙数, I_{time} 为满足业务持续时间 t_c 的邻接时隙数。当采用距离自适应调制策略^[13]时,对于相同业务请求,不同路径可采取的调制格式不同,进而所需频隙数不同。若某业务传输速率为 τ ,则业务 r 所需频隙数 C 为

$$C = \left\lceil \frac{\tau}{u_p \cdot Z_{\text{slot}}} \right\rceil \quad (7)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。 u_p 表示路径 p 上采取的调制等级,不同选定路径的传输距离有所区别,进而可采取不同的调制格式。

1.3.1 局部影响因子

为业务请求在网络中预留资源建立光路,不可避免会影响到所选资源块周边频隙或时隙的邻接性和对齐性,进而改变局部区域的资源分布。此时,在选择候选资源块时应尽可能将其安排在周边占用资源较多的位置上,以降低对频谱轴、时间轴连续空闲资源单元的破坏,减少所选区域附近的局部碎片产生。基于以上考虑,在对所选资源块的优劣进行评估时,应充分考虑其在当前路径中每条链路的周边资源单元的状态。因此,本文引入局部影响因子 X_{local} ,其定义为

$$X_{\text{local}} = \sum_{e \in p} (X_{\text{freq}}^e + X_{\text{time}}^e) \quad (8)$$

其中, X_{freq}^e 为链路 e 上该资源块沿时间轴产生的局部频谱碎片度, X_{time}^e 为链路 e 上该资源块沿频率轴产生的局部时间碎片度,二者计算式分别为

$$X_{\text{freq}}^e = \sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} (h_{t, f_{\text{start}}-1}^e + h_{t, f_{\text{end}}+1}^e) \quad (9)$$

$$X_{\text{time}}^e = \sum_{f=f_{\text{start}}}^{f_{\text{end}}} (h_{t_{\text{start}}-1, f}^e + h_{t_{\text{end}}+1, f}^e) \quad (10)$$

X_{freq}^e 值越小,说明该资源块频谱边界处的空闲相邻资源单元较少,对局部资源空闲频隙的邻接性影响小。类似地, X_{time}^e 值越小,说明该资源块时间边界处的空闲相邻资源单元较少,对局部资源空闲时隙的对齐性影响小。综上, X_{local} 值越小,表明选取该资源块对局部资源连续性分布状态的影响越少,更加有利于保持时频资源的连续程度。

图3为 X_{local} 的计算示例。此处采用图1的资源模型,假设某 AR 业务请求到达后,其候选路径仅由一条链路 e 组成,此时路径资源模型等同于链路资源模型。

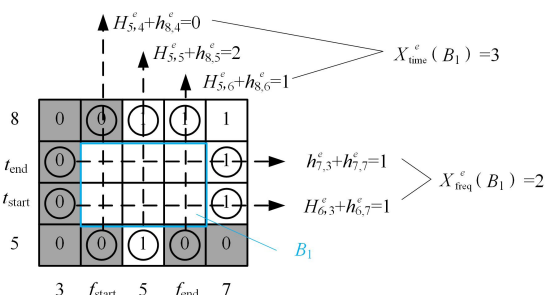


图3 X_{local} 的计算示例

本文以候选资源块 B_1 为例分析 X_{local} 的计算过程,候选资源块 B_1 及其周边资源单元分布状态已在图3中给出。对于候选资源块 B_1 ,其频隙起止编号分别为 $f_{\text{start}}=4$, $f_{\text{end}}=6$;时隙起止编号分别为 $t_{\text{start}}=6$, $t_{\text{end}}=7$ 。根据式(9)、式(10)可知,挑选 B_1 时,沿时间轴产生的局部频谱碎片度 $X_{\text{freq}}^e(B_1)=1+1=2$,沿频谱轴产生的局部时间碎片度 $X_{\text{time}}^e(B_1)=0+2+1=3$,可得局部资源联合碎片度 $X_{\text{local}}(B_1)=2+3=5$ 。同理可得,候选资源块 B_2 和 B_3 的局部资源联合碎片度为 $X_{\text{local}}(B_2)=7$, $X_{\text{local}}(B_3)=6$ 。与 B_2 和 B_3 相比,此时 $X_{\text{local}}(B_1)$ 最小, B_1 附近空闲的相邻资源单元少,即 B_1 附近已占用的相邻资源单元较多,进行资源分配后可更好保持局部空闲资源单元的连续性,产生的碎片最少。因此,应为候选资源块 B_1 分配业务请求。

1.3.2 整体影响因子

为业务建立光路,不仅要满足连续性、邻接性等约束条件,还要考虑网络中有限的可利用空闲资源。为高效利用有限资源,在选取候选资源块时,可优先选择频率边界处的频谱,使占用的资源集中在频率轴的两侧,进而使频率轴的中心区域资源保持空闲,提高邻接空闲资源单元的连续程度。当后续业务到达时,也更容易找到满足要求的频谱资源,提升光路成功建立几率。考虑到以上因素,本文引入整体影响因子 Y_{whole} ^[10],即

$$Y_{\text{whole}} = \min \{ f_{\text{start}}-1, F-f_{\text{end}} \} \quad (11)$$

其中, $f_{\text{start}}-1$ 为候选资源块距离频谱轴最左边界的距离, $F-f_{\text{end}}$ 为候选资源块距离频谱轴最右边界的距离。 Y_{whole} 值越小,表示候选资源块距离频谱边界越近,挑选该块作为分配方案有助于使占用资源集中在频率轴边界处,从而保持中间空闲资源单元的连续程度。

图1中候选资源块有 $B_1(4,6,6,7)$ 、 $B_2(7,9,4,5)$ 和 $B_3(12,14,9,10)$ 。以 B_1 为例,该资源块距离频谱左边界的距离为 $f_{\text{start}}-1=4-1=3$,距离频谱右边界的距离为 $F-f_{\text{end}}=17-6=11$ 。根据式(11)可知,该资源块的频谱边界度 $Y_{\text{whole}}(B_1)=\min \{ 3, 11 \}=3$ 。同理,候选资源块 B_2 和 B_3 的频谱边界度 $Y_{\text{whole}}(B_2)=6$, $Y_{\text{whole}}(B_3)=3$ 。此

时 $Y_{\text{whole}}(B_1)=Y_{\text{whole}}(B_3)<Y_{\text{whole}}(B_2)$, 因此应挑选 B_1 或 B_3 来分配给业务, 因为相比于候选资源块 B_2 , B_1 或 B_3 更加靠近频率边界, 选择 B_1 或 B_3 可以保持中间区域空闲资源的连续性, 预留更大的空闲资源块供后续业务使用。

1.3.3 时域资源使用度因子

AR 业务可容忍一定的初始延迟, 即在建立光路时, 业务的开始时间可晚于到达时间, 因此频谱分配过程会涉及时间维度的资源调度。AR 业务包含开始时间固定及持续时间已知 (STSD-fixed) 型 (视频会议、现场直播等) 和开始时间灵活及持续时间已知 (STSD-flexible) 型^[14] (大型文件传输、数据备份等)。为了便于描述, 本文将它们分别简称为 fixed 型 AR 业务和 flexible 型 AR 业务请求。相比于 fixed 型 AR 业务请求, flexible 型 AR 业务请求的开始时间可在灵活时间窗 γ 内自由选择。当上述业务共存时, 由于开始时间的灵活性, flexible 型 AR 业务请求更容易在路径资源模型中抢占到空闲时频资源。随着网络运行, 时隙的频谱资源占用量逐渐增加, fixed 型 AR 业务请求到达后, 网络中空闲时频资源可能无法满足其业务需求而成为碎片, 导致请求大量阻塞。为尽量避免出现上述问题, 可将 flexible 型 AR 业务请求分配到频谱资源占用量较小的时隙。

由于每个时隙中资源的占用涉及到时间维度的资源调度, 可将时隙中频谱资源的占用量称为时间-频谱占用量 $n_{\text{occupied}}(t_i)$, 即

$$n_{\text{occupied}}(t_i) = \sum_{f=1}^F (1-h_{t_i,f}^p) \quad (12)$$

其中, t_i 表示时隙编号, $h_{t_i,f}^p$ 表示候选路径 p 中第 t_i 行和第 f 列的路径时频资源单元状态。 $n_{\text{occupied}}(t_i)$ 值越大, 意味着时隙 t_i 中占用的频谱资源量越多, 在每个时隙对应的频隙数量相同且有限的情况下, 占用的频谱资源量越多, 剩余的空闲资源就越稀少, 能满足后续业务成功建立光路的几率就越小。基于以上特点, 本文引入时域资源使用度因子来避免时隙中资源被过度占用。时域资源使用度 m_{used} 是指矩形块所处时隙的平均频谱占用率, 其值为

$$m_{\text{used}} = \frac{\sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} n_{\text{occupied}}(t_i)}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}} + 1} = \frac{\sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \sum_{f=1}^F (1-h_{t,f}^p)}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}} + 1} \quad (13)$$

其中, $\sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \sum_{f=1}^F (1-h_{t,f}^p)$ 为从时间间隔 t_{start} 到 t_{end} 占用的总频谱资源量, $t_{\text{end}} - t_{\text{start}} + 1$ 为占用的时隙数量。 m_{used} 值越

小, 每个时隙中的时间-频谱占用量越小。在进行资源配置时, 应尽可能将 flexible 型 AR 业务请求分配到 m_{used} 值较小的候选资源块, 以避免时隙中频谱资源的过度使用, 降低因时隙中可用频谱资源稀少而导致的业务阻塞。

本文以图 1 为例说明时域资源使用度的计算过程。假设某 flexible 型 AR 业务请求到达后, 其候选路径仅由一条链路 e 组成, 此时路径资源模型等同于链路资源模型。对于候选资源块 B_1 , 其所处的时隙编号是 t_6 和 t_7 。在 t_6 时, 路径上有 7 个路径时频资源单元被占用; 在 t_7 时, 该路径上有 9 个路径时频资源单元被占用。因此, 由式 (13) 可得 $m_{\text{used}}(B_1) = (7+9)/2 = 8$ 。同理, 候选资源块 B_2 和 B_3 的时域资源使用度为 $m_{\text{used}}(B_2) = 10.5$, $m_{\text{used}}(B_3) = 6$ 。显然, B_3 的时域资源使用度最小, 此时应将候选资源块 B_3 分配给业务, 有助于缓解一些时隙 (如 t_4 和 t_5 等) 中频谱资源过度使用, 在后续 fixed 型 AR 业务请求到达时更有利于找到空闲资源。

1.3.4 分配策略

为了更好评估候选资源块的可用性, 在频谱分配过程中, 本文综合考虑以上因素后, 给予局部度量因子 X_{local} 及整体度量因子 Y_{whole} 不同权重比, 并对这些因子采取加权方式进行度量。在资源分配过程中, 为 AR 业务在资源矩阵中挑选可用资源块时, 利用式 (14) 尝试找到对局部时频资源和整体频谱碎片化程度影响最小的候选资源块, 即分配因子 W 值最小的候选资源块。

$$W = \alpha X_{\text{local}} + (1-\alpha) Y_{\text{whole}} \quad (14)$$

其中, α 为权重比。如果仅有一个最小值的候选资源块, 则将其分配给该请求。若存在多个拥有相同最小值的候选资源块, 则需进一步为业务挑选合适的时频资源。此时, 若当前业务为 flexible 型 AR 业务请求, 相比于 fixed 型 AR 业务请求, 其开始时间更加灵活。根据这一特点, 利用式 (13) 从上述候选资源块中挑选 m_{used} 值最小的候选资源块作为最后的分配方案。因此, 通过考虑时域资源使用度, 有助于避免频谱资源过度使用, 使后续业务请求到达时更易找到可用资源。若当前业务为 fixed 型 AR 业务, 则优先选择第一个路径时频资源块, 使占用的资源集中在资源模型的起始边界处, 有利于提高空闲资源的连续性。

2 算法描述

PHSA-LGD-RSA 算法为新到达业务请求建立光路的过程可分为 2 个子阶段, 即路由选择阶段和资源分配阶段。

王世成,王钊霖,何荣希:EON 中针对提前预留业务的碎片感知 RSA 算法

2.1 路由选择阶段

在进行路由选择时,如果仅考虑选择距离最短的 K 条路,可能导致所选路径跳数过多,不仅会消耗大量的频谱资源,而且受到频谱连续性约束条件限制,频谱分配过程中业务要找到链路间对齐的空闲资源难度大大增加。反之,如果仅考虑选择跳数最短的 K 条路,则选择的路径距离可能过长。根据距离自适应调制的原则,只能采取较低的调制格式建立光路。由式(7)可知,这种做法会加剧频谱资源消耗。因此,在路由选择过程中应综合考虑路径距离、跳数和频谱资源消耗,以高效利用资源,降低业务阻塞。

另一方面,当挑选路径建立光路时,所选路径相邻链路也会受到当前请求资源占用的影响,可能导致链路间的空闲资源无法对齐,会降低空闲资源可利用性,增加频谱碎片,降低后续业务成功建立光路几率。因此,在路由选择过程中,备选路径与其相邻链路间空闲资源的对齐度也应作为一个重要考虑因素。经分析发现,资源占用对相邻链路间的空闲资源对齐度的影响与当前所选路径的相邻链路数有关。所选路径的相邻链路数越少,资源配置过程中受到影响的链路间资源就少。因此,应尽量挑选相邻链路数较少的路径,有利于保持网络中链路之间的空闲资源对齐度。

PHSA-LGD-RSA 算法具体过程如下:

①业务到达前,进行路由过程的第一阶段,对网络 $G(V, E)$ 中的每个源宿节点对 (s, d) 分别以路径跳数和距离为路由权重离线计算 K 条备选路径,并存入 K 条最短跳数路径集 $P_{s,d}^{\text{hop}}$ 以及 K 条最短距离路径集 $P_{s,d}^{\text{distance}}$ 中。若 $P_{s,d}^{\text{hop}}$ 和 $P_{s,d}^{\text{distance}}$ 中存在重复元素,则进行去重处理并将所得结果放入源宿节点对的临时备选路径集 $P_{s,d}^{\text{temp}}$,如式(15)所示。同时,对临时路径集中的每个元素(临时路径 p)获取其相邻链路数 A_p ,如式(16)所示。其中, l_e 为链路 e 的相邻链路数。若某临时路径 p 所包含的链路中存在相同的相邻链路,则只需计算一次。接着,将预计算得到的所有临时路径的相邻链路数记录在相邻链路数集合 Q_p 中。

$$P_{s,d}^{\text{temp}} = P_{s,d}^{\text{hop}} \cup P_{s,d}^{\text{distance}} \quad (15)$$

$$A_p = \sum_{e \in p} l_e \quad (16)$$

A_p 值越小,说明路径 p 的相邻链路数越少,挑选此路径可影响较少的邻接链路间空闲资源对齐。

②业务请求到达后,根据距离自适应调制原则,计算该业务在 $P_{s,d}^{\text{temp}}$ 中的任意路径 p 需消耗的频谱资源量

C_p , 即

$$C_p = \left\lceil \frac{\tau}{u_p \cdot Z_{\text{slot}}} \right\rceil \eta_p \quad (17)$$

其中, η_p 为路径 p 的跳数。 C_p 越小,所选路径 p 需消耗的频谱资源量越少,可为后续业务预留更多空闲资源。

③从 Q_p 中获取路径 p 的相邻链路数 A_p , 从而可得到路由权重 θ_p 为

$$\theta_p = C_p + A_p \quad (18)$$

θ_p 越小,说明路径 p 越适合为新到业务建立光路。

④根据路由权重 θ_p , 对 $P_{s,d}^{\text{temp}}$ 中的所有路径进行升序排序,并将所得结果的前 K 条路径作为当前源宿节点对的备选路径放入备选路径集 $P_{s,d}$ 中。

2.2 资源分配阶段

当 AR 业务请求 $r(s, d, t_b, t_e, \tau, \gamma)$ 到达后,进入路由过程的第二阶段,并依据业务源节点、宿节点,从路径集 $P_{s,d}$ 中选择候选路径。选取可用路径后,则进入资源分配阶段。

初始阶段(路由第一阶段)得到临时备选路径集 $P_{s,d}^{\text{temp}}$ 后,当新的业务请求 r 到达时,算法根据 r 和临时路径 $P_{s,d}^{\text{temp}}$ 信息,通过式(18)计算得到 r 的备选路径集 $P_{s,d}$ 。接下来,从 $P_{s,d}$ 中依次获取备选路径,路径可能由一条或多条链路组成。建立光路的前提是要满足资源连续性、邻接性等约束条件,因此通过式(2)得到链路资源矩阵 $H_{T_{\text{dis}}, F}^e$ 后,为了方便寻找当前所选路径中的可用资源,进一步根据式(3)和式(5)得到路径资源矩阵 $H_{T_{\text{dis}}, F}^p$ 。之后,根据当前所选路径 p_k 的路径资源矩阵 $H_{T_{\text{dis}}, F}^{p_k}$ 和 r 中的 γ 和 t_b 可得出该业务所能利用的起始时间到结束时间段 $[t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$ 。在 $H_{T_{\text{dis}}, F}^{p_k}$ 中,针对每一个可用的 $[t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$,沿频率轴寻找所有满足业务带宽需求的空闲资源块 $B_i^{p_k}$ 。若找到可用资源块,则将其作为备选的资源分配方案;若在所有可用时间段内均未找到空闲的资源,则阻塞该请求。

多个备选资源分配方案对应多个候选资源块,每一个资源块的选取会对网络产生不同影响。为了减少频谱碎片产生,降低业务阻塞,本文利用上文提到的分配因子 W 对每个候选资源块进行度量,并将 W 值最小的空闲资源块记录在候选方案集 B_{candi} 中。该算法致力于挑选 W 值最小的候选资源块分配给业务请求,若存在多个最小值相同的候选资源块,则依据不同 AR 业务类型采取不同策略。

若当前请求为 flexible 型,为了进一步挑选更优方

案,从具有相同 W 值的可用资源块中,根据式(13)继续计算上述预选块对应的 m_{used} 值,进而挑选出 m_{used} 值最小的空闲资源块 B_i^P 。若当前请求为 fixed 型,则优先选择第一个 W 值最小的空闲资源块 B_i^P 。对备选路径集 P_{s-d} 中的每条路径,按照上述资源块选取策略寻找候选矩形块。最后,直至遍历候选路径集中每条路径,选择出目标函数值最小的候选资源块和路径分配给当前业务。

3 算法复杂度分析

算法路由第一阶段采用离线计算,不计入整体时间复杂度。路由第二阶段中,临时候选路径集中路径数不超过 $2K$,挑选候选路径集的时间复杂度近似为 $O(2K+2K\log_2 K)$ 。在资源分配阶段,根据二维资源模型矩阵查找可用矩形块的时间复杂度最坏情况为 $O(K \cdot |V| \cdot F \cdot \sigma \cdot I_{\text{time}})$ 。其中, $|V|$ 为网络节点数,任何路径中的链路数应小于 $|V|$, F 为每条链路的频隙数, σ 为当前 AR 业务能使用的开始间隙数。在矩形块挑选阶段,针对每一个矩形块,计算局部影响因子 X_{local} 度量的时间复杂度为 $O[2 \cdot (I_{\text{freq}} + I_{\text{time}}) \cdot |V|]$,而整体影响因子 Y_{whole} 度量的计算可在常数时间内完成。同时,计算时域资源使用度 m_{used} 度量的时间复杂度为 $O(I_{\text{time}} \cdot F)$ 。假设找到的可用矩形块总数量为 ζ ,则最坏情况下挑选矩形块的时间复杂度为 $O[\zeta \cdot [|V| \cdot (I_{\text{freq}} + I_{\text{time}}) + I_{\text{time}} \cdot F]]$ 。因此,算法总的时间复杂度近似为 $O[2K+2K\log_2 K + |V| \cdot (K \cdot F \cdot \sigma \cdot I_{\text{time}} + \zeta \cdot I_{\text{time}} + \zeta \cdot I_{\text{freq}}) + \zeta \cdot I_{\text{time}} \cdot F]$ 。

4 仿真测试与分析

4.1 仿真参数设置

本文采用 14 节点的 NSFNet^[9]和 11 节点的 Cost239^[10]网络拓扑来验证所提算法的性能。假设每条光纤链路包含 358 个频隙,每个频隙宽度为 12.5 GHz。同时,假设网络运营商能够前瞻的最大时隙数量 $T_{\text{obs}}=300$,并且每个时隙的长度是 10 min^[9]。本文算法采取距离自适应调制策略,将调制格式二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、正交幅度调制(8QAM)和 16QAM 的最大传输距离分别设置为 9600 km、4800 km、2400 km 和 1200 km^[3]。仿真以泊松模型生成 AR 业务请求,请求在每个时隙中的平均到达率为 λ ,请求的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布,即

络负载为 λ/μ Erl。每个请求的源节点、宿节点随机选择,带宽则在 $\{50 \text{ Gb/s}, 100 \text{ Gb/s}, 150 \text{ Gb/s}, 200 \text{ Gb/s}, 250 \text{ Gb/s}, 300 \text{ Gb/s}, 350 \text{ Gb/s}, 400 \text{ Gb/s}, 450 \text{ Gb/s}, 500 \text{ Gb/s}\}$ 中随机选择,最早开始时间从 $[1, 30]$ 个时隙中随机选择,开始时间窗口的长度从 $[1, 20]$ 个时隙中随机选择。当业务最早开始时间和最晚开始时间相同时,则该请求为 fixed 类型;而最早开始时间小于最晚开始时间时,该请求为 flexible 类型。请求平均持续时间为 10 个时隙,候选路径数 $K=5$ 。每次仿真中生成 10^5 个请求,通过选取不同的随机种子值,仿真过程重复执行 10 次并取均值,数据的置信水平为 95%。

4.2 仿真测试

本文对所提算法的带宽阻塞率和资源利用率 2 个指标进行仿真测试。

4.2.1 带宽阻塞率性能测试与分析

PHSA-LGD-RSA 算法性能与局部影响因子 X_{local} 、整体影响因子 Y_{whole} 以及时域资源使用度 m_{used} 有关。为观测 X_{local} 和 Y_{whole} 的 α 对算法性能的影响,本文将 α 值分别设置为 0.1~0.9,对 PHSA-LGD-RSA 算法的带宽阻塞率性能进行仿真测试,仿真结果如图 4 所示。可以看出,随着网络负载增加,当 α 值为 0.1、0.2、0.3 时对算法无益处。这是因为 α 值过低时,在资源分配过程中,算法更加注重将频率轴边界处的资源分配给业务,而忽略了业务动态建立与释放过程中在候选资源块周围区域随机产生的时间碎片、频谱碎片,碎片的大量堆积使得后续业务无法找到可用资源,阻塞性能较差。

当 α 值为 0.4、0.5、0.6 时,在较低负载或中等负载下网络可以取得良好的阻塞性能。这是因为算法在进行资源分配时,不但使预分配方案尽量靠近频率边界,还考虑到候选资源块周围时频资源的分布状态,尽可能选取周边占用更多资源量的候选资源块,从而保持空闲资源的连续性,有效减少网络运行中碎片产生,因此保持了较好的阻塞性能。

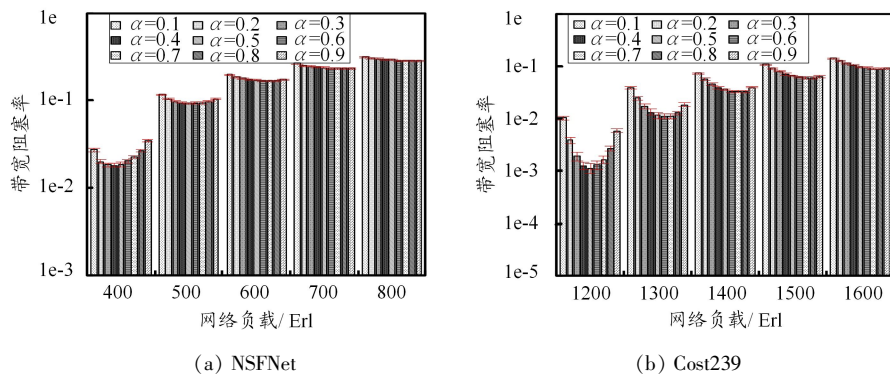


图4 不同 α 值下 PHSA-LGD-RSA 算法的带宽阻塞率

王世成,王钊霖,何荣希:EON 中针对提前预留业务的碎片感知 RSA 算法

当 α 值为 0.7、0.8、0.9 时,在低、中等负载下,过高的权重(着重考虑局部时频资源分布)对算法性能虽然无益,但这种趋势随着负载提升,有害性逐渐降低,在较高负载情况下,反而有了更好的阻塞性能表现。这是因为在负载未达到一定程度时,网络中空闲资源比较充足,此刻算法进行资源配置过于注重候选资源块周边资源的使用状态,可能导致占用的资源过于集中在部分区域。随着网络运行,一些释放掉的资源因连续性较低而无法得到及时使用,成为碎片。相比而言,随着负载提升,网络碎片化程度加大,空闲资源逐渐减少,此时算法尽可能将业务安排在周边资源占用的区域来保持现有空闲资源的连续性更为有利,可获得更好阻塞性能。

综上所述,PHSA-LGD-RSA 算法在权重比 $\alpha=0.4、0.5、0.6$ 的情况下,网络取得较好的阻塞性能。因此,下面仿真过程将 α 设为 0.5,将本文所提算法与基于跳数最短的 KSP Ford-Fulkerson (KSP-FF) 算法^[2]、PHSA-FF 算法和 Min-RDDR 算法^[10]进行对比。

2 种网络拓扑下不同算法的带宽阻塞率性能如图 5 所示。可以看出,随着网络负载增加,各算法的带宽阻塞率逐渐提升。在相同负载时,PHSA-LGD-RSA 算法的性能表现最优,KSP-FF 算法最差,PHSA-FF 算法和 Min-RDDR 算法的带宽阻塞率性能介于二者之间,且 Min-RDDR 算法优于 PHSA-FF 算法。业务到达后,KSP-FF 算法在候选路径中找到第一个可用的空闲时频资源块即分配,不考虑光路建立、释放等动态过程产生的时频碎片,因而阻塞率性能最差。PHSA-FF 算法对选路过程进行优化,尽可能保持链路间空闲资源的对齐程度,降低了业务配置过程中碎片的生成,有利于降低业务的阻塞率。但是,该算法与 KSP-FF 算法类似,未考虑光路动态建立与释放给网络碎片化带来的影响,阻塞性能可进一步改善。Min-RDDR 算法考

虑到候选资源块的选取对局部和整体碎片化程度的影响,尽量将候选资源块放置在时频资源边界处,使中心区域保持空闲,为后续业务及时找到空闲资源建立了很好的基础,阻塞性能也得到很大提升。然而,该算法注重靠近时间轴、频谱轴边界处的资源分布,而忽略靠中心区域的时频资源分布,可能导致局部碎片过多。PHSA-LGD-RSA 算法性能最优的原因在于:首先,对选路过程进行优化,尽可能挑选相邻链路数少的候选路径建立光路,以此来保持邻接链路间空闲资源的对齐度,减少邻接链路间碎片的生成;其次,在资源分配过程中,一方面从局部的角度尽量使候选资源块安排在周围局部时间碎片和局部频谱碎片产生量较少的位置,同时又从整体角度,尽量使候选资源块安排在频率轴的边界处来保持中心区域空闲,以此最大限度保持空闲资源的连续性。另一方面,考虑到 AR 业务的带宽预留特性,面向 flexible 型请求,从预选块中挑选时域资源使用度最低的资源块,避免了频谱资源过度使用,使后续业务请求到达时更易找到可用资源;而面向 fixed 型业务,则优先选择首个可用资源块,从而可以使占用资源集中在二维资源模型的边界处,有利于提高空闲资源的连续性,以取得更好的带宽阻塞率性能。

4.2.2 资源利用率性能测试与分析

2 种网络拓扑下不同算法的资源利用率性能如图 6 所示。可以看出,随着网络负载的增加,各算法的资源利用率逐渐增加。在相同负载时,PHSA-LGD-RSA 算法的资源利用率要优于其余算法,原因如下:PHSA-LGD-RSA 算法从多角度联合降低网络碎片化程度,保持了空闲资源的连续度和对齐度,有助于业务到达后及时找到可用资源,大大提升了资源的可用性;在局部影响因子方面,考虑到局部时间、频谱碎片化,在二维资源模型中,该算法尽可能沿频率轴保持

频隙的邻接度,沿时间轴保持时隙的对齐度,以此提升时频资源的空闲连续性;在整体影响因子方面,考虑到集中占用资源,尽可能利用边界处的资源来提升中间空闲资源的连续性;在时域资源使用度方面,将开始时间更为灵活的 flexible 型业务请求安排在频谱资源占用量较少的时隙,使后续到达的 fixed 型业务请求更易找到空闲资源,合理规划了二维资源模型中频谱资源的使用。综上,PHSA-LGD-

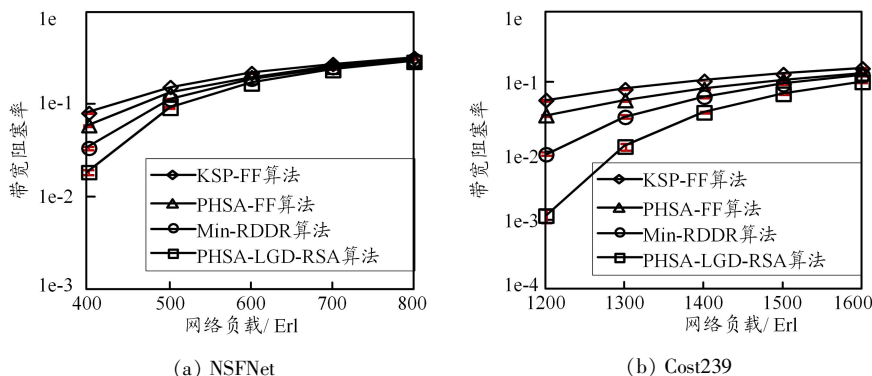


图5 不同算法的带宽阻塞率

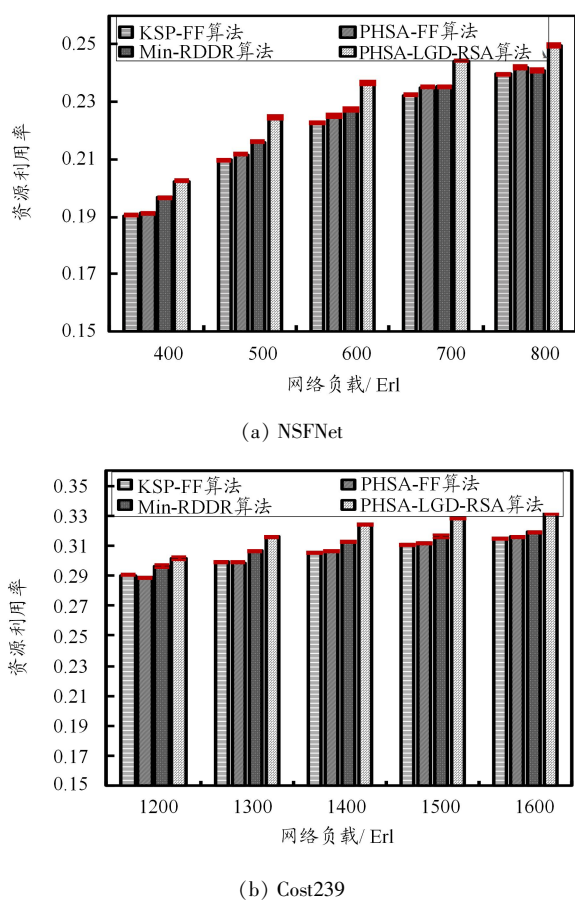


图6 不同算法的资源利用率

RSA 算法从多个角度共同减少碎片生成,保持了空闲时频资源的连续性,增加了资源的可用度,因此该算法的资源利用率最高。

5 结束语

针对 EON 中的 AR 业务,本文提出一种基于碎片感知的 PHSA-LGD-RSA 算法。该算法在路由阶段综合考虑路径距离、跳数、频谱资源消耗和相邻链路数多个因素,在 KSP 算法基础上增加了一种 PHSA 路由策略,该策略可进一步减少邻接链路间频谱碎片生成,更好地保持链路间空闲频谱连续性。在资源分配阶段,首先设计一种新的局部碎片统计方法,能更全面地评估候选方案在其相邻区域可能产生的频谱碎片和时间碎片数量,从而在资源分配阶段更好地保持了局部空闲资源的连续性。然后,从整体角度出发,尽可能将业务集中安排在频谱轴的边界处,从而保留频谱轴的中间区域有足够多的空闲资源服务后续请求。同时,考虑到 AR 业务在时间维度上的资源预留特性,将开始时间更为灵活的 flexible 型 AR 业务安排在频谱占用量较少的位置,从而缓解了时隙中频谱资源的

被占用程度,有利于减少碎片产生。仿真结果表明,该算法进一步改善了带宽阻塞性能,提高了资源利用率。

参考文献:

- [1] TOMKOS I, AZODOLMOLKY S, SOLE-PARETA J, et al. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: state of the art, trends, and research challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(9): 1317-1337.
- [2] ALYATAMA A. Relative cost routing and spectrum allocation in elastic optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(3): 38-49.
- [3] KHAN A N. Online routing, distance-adaptive modulation, and spectrum allocation for dynamic traffic in elastic optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 102026-1-102026-8.
- [4] CHATTERJEE B C, BA S, OKI E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 20(1): 183-210.
- [5] OKI E, SATO T, CHATTERJEE B C. Spectrum fragmentation management in elastic optical networks [C]//IEEE. Proceedings of 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Angers: IEEE, 2019: 1-4.
- [6] LU W, ZHU Z, MUKHERJEE B. On hybrid IR and AR service provisioning in elastic optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(22): 4659-4670.
- [7] CHEN H, ZHAO Y, ZHANG J, et al. Time-spectrum consecutiveness based scheduling with advance reservation in elastic optical networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(1): 70-73.
- [8] LI Y, ZHANG Q, XIN X, et al. Dynamic service provisioning algorithm based on degree of spectrum-time fragmentation of AR requests in elastic optical networks[C]//IEEE. Proceedings of 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Huangshan: IEEE, 2019: 1-3.
- [9] LIU Y, HE R, WANG S, et al. Temporal and spectral 2D fragmentation-aware RMSA algorithm for advance reservation requests in EONs[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32845-32856.
- [10] LI X, YUAN J, ZHANG Q, et al. Farsighted spectrum resource assignment method for advance reservation requests in elastic optical networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 167836-167846.
- [11] WAN X, WANG L, HUA N, et al. Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks [C]//OFC. Proceedings of 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Los Angeles: OFC, 2011: 1-3.
- [12] PEDERZOLLI F, SIRACUSA D, ZANARDI A, et al. Path-based fragmentation metric and RSA algorithms for elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(3): 15-25.
- [13] WANG N, JUE J P, WANG X, et al. Holding-time-aware scheduling for immediate and advance reservation in elastic optical networks [C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Communications. London: IEEE, 2015: 5180-5185.
- [14] 卢薇. 弹性光网络中面向应用的宽带资源分配与调度算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.