

# 激光与光电子学进展

## 弹性光网络中面向立即预留请求的碎片感知路由频谱分配算法

刘岩, 何荣希\*, 王钜霖, 于存谦

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

**摘要** 在弹性光网络中, 频谱碎片会造成大量业务请求被阻塞。为了减少碎片、进一步降低立即预留请求的带宽阻塞率, 提出一种二维碎片感知路由频谱分配算法。在路由阶段, 该算法综合考虑跳数和调制格式因子, 为业务请求离线计算出多条跳数较小、调制格式较好的候选路径。在频谱分配阶段, 综合考虑频谱边界的距离、对相邻资源的影响和资源使用量 3 个因子, 设计一个二维碎片度量指标——联合碎片度(CF), 以评估每个候选频谱块, 并选择 CF 最小的候选频谱块分配给业务。仿真结果表明, 与几种典型算法相比, 本文提出的算法能够进一步降低带宽阻塞率和提高频谱利用率。

**关键词** 弹性光网络; 立即预留; 路由频谱分配; 频谱碎片; 候选频谱块

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0506008

## Fragmentation-Aware Routing and Spectrum Allocation Algorithm for Immediate Reservation Requests in Elastic Optical Networks

Liu Yan, He Rongxi\*, Wang Julin, Yu Cunqian

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

**Abstract** In elastic optical networks (EON), spectrum fragmentation causes a large number of requests blocked. In order to decrease fragmentation and reduce the bandwidth blocking probability of immediate reservation (IR) requests, a two-dimensional fragmentation-aware routing and spectrum allocation (RSA) algorithm is proposed. In the routing phase, the proposed algorithm considers the route hop number and the modulation format, aiming to calculate multiple candidate paths with a smaller number of hops and a higher level of modulation format offline. In spectrum allocation phase, a two-dimensional fragmentation metric namely combined fragmentation metric (CF) is designed to evaluate each candidate spectrum block, which comprehensively considers three factors: distance to frequency boundary, impact on contiguous resources, and resource consumption. Then, the proposed algorithm will allocate the candidate spectrum block with the minimum CF to IR requests. The simulation results show that compared with several well-performed benchmark algorithms, the proposed algorithm can further reduce the bandwidth blocking probability and improve the spectrum utilization.

**Key words** elastic optical networks; immediate reservation; routing and spectrum allocation; spectrum fragmentation; candidate spectrum blocks

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-06-01; 录用日期: 2021-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(61371091, 61801074)、中国博士后科学基金(2019M661074)、辽宁省自然科学基金(2019-BS-021)、大连市科技创新基金(2019J11CY015)

通信作者: \*hrx@dmlu.edu.cn

## 1 引言

近年来,不断涌现的新应用驱动着互联网流量呈指数级增长,弹性光网络(EON)<sup>[1-2]</sup>被提出以满足海量异构的业务请求。路由频谱分配(RSA)<sup>[3-4]</sup>是EON中一个非常重要的资源分配问题,其旨在为业务建立一条端到端的光路。在EON中,立即预留(IR)<sup>[5-6]</sup>是一种最为常见的带宽预留方式,通常面向延迟敏感型的网络应用,如网页浏览、在线购物和在线视频等。IR请求到达网络,就要求立刻开始数据传输,因此EON必须立刻为IR请求预留当前可用的光路资源。

为了在EON中满足动态IR请求的光路需求,研究人员已经提出许多类型的RSA算法,如距离自适应算法<sup>[7-8]</sup>和碎片感知算法<sup>[9-15]</sup>等。然而,这些算法大多更侧重于研究频谱分配问题,而对路由方面关注不足。实际上,如果路由阶段找到的路径不合适,就会使随后的频谱分配质量大打折扣。在路由方面,传统的以跳数或距离为权重的K最短路径(KSP)算法<sup>[11]</sup>有可能为业务找到的路径距离偏长或者跳数偏多,进而导致误码率或带宽阻塞率较高。针对这个问题,本文提出一种综合考虑跳数和调制格式的离线(OHM)路由算法,试图离线为IR请求寻找多条跳数较小并且调制格式较好的候选路径,从而有效地缓解上述问题。

本文除了设计OHM路由算法之外,还对IR请求的频谱分配策略进行了深入研究。在频谱分配过程中,为业务分配的频谱资源需满足频谱连续性和频谱邻接性约束<sup>[9]</sup>。受这两个约束影响,网络中出现了大量空闲却不可用的频谱槽,进而导致大量业务被阻塞,这就是频谱碎片问题<sup>[9-10]</sup>。为了减少频谱碎片和降低业务阻塞率,文献[11]提出K最短路径和首次命中(KSP-FF)算法,试图将最短路径上起始频谱槽编号最小的可用频谱块分配给业务。文献[12]首先定义一个基于香农熵的碎片度量,然后基于此设计数种碎片感知RSA算法。文献[13]结合频谱分配造成的频谱不对齐和频谱不邻接,提出一种频空二维碎片感知(FA)算法,并结合路径负载情况,又提出一种碎片感知和拥塞避免(FA-CA)算法。文献[14]提出一种基于路径碎片感知的RSA算法,试图优化路径上的碎片状况。文献[15]提出一种碎片评估方案,试图为较长的空闲频谱块分配更大的权重,可为IR请求找到更合适的频谱资源。

但是,上述算法只局部地考虑候选路径或其邻接链路上的频谱碎裂状况,难以从全局的角度提升整个网络中空闲频谱的邻接程度和对齐程度,因此带宽阻塞率(BBP)仍较高。为进一步降低IR请求的BBP,通过综合考虑到频谱边界的距离<sup>[16]</sup>、对相邻资源的影响和资源使用量3个影响因子,本文提出一个二维碎片度量指标——联合碎片度。基于此,提出最小联合碎片度(MCF)频谱分配算法。与已有的频谱分配算法相比,MCF算法能够使全网空闲频谱变得更加邻接和对齐,有利于进一步减少频谱碎片和降低BBP。

基于上述设计的OHM路由算法和MCF频谱分配算法,本文提出一种二维碎片感知RSA算法,即OHM-MCF算法。在路由阶段,OHM-MCF算法能够为业务请求计算出多条跳数较小、调制格式较好的候选路径;在频谱分配阶段,OHM-MCF算法不仅能够使全网空闲频谱尽可能地保持对齐,而且还能减少频谱资源的使用总量。仿真结果表明,与数种经典的RSA算法相比,OHM-MCF算法能够进一步降低业务BBP和提高频谱利用率(SU)。

## 2 网络模型

EON可表示为一个有向图 $G(V, E)$ 。其中, $V$ 表示光交换节点的集合, $E$ 表示光纤链路的集合。在每个光纤链路上,频谱资源可以被划分为 $F$ 个频谱槽。每个频谱槽用符号 $C_{\text{slot}}$ 表示,对应的容量是12.5 GHz。对每一个将要到达网络的IR请求,将其标记为一个三元组 $R(s, d, C)$ ,其中 $s$ 和 $d$ 分别表示该请求的源节点和目的节点, $C$ 表示传输速率。根据距离自适应技术(即根据路径距离自适应配置调制格式),IR请求需要的传输速率 $C$ 可转换为 $N$ 个频谱槽<sup>[8]</sup>,即

$$N = \left\lceil \frac{C}{M_P \cdot C_{\text{slot}}} \right\rceil + N_g, \quad (1)$$

式中: $M_P$ 表示所选路径 $P$ 的调制格式等级; $N_g$ 是保护带宽对应的频谱槽数量; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。需要注意的是:对于不同的路径,调制格式 $M_P$ 可能不同。 $M_P = 1, 2, 3, 4$ 分别表示路径调制格式为二相相移键控(BPSK)、四相相移键控(QPSK)、8QAM和16QAM(QAM为正交振幅调制)。路径距离和调制格式的关系如表1所示<sup>[8]</sup>。

表 1 调制格式与传输距离的对应关系  
Table 1 Corresponding relation between modulation format and transmission distance

Modulation format	Spectrum efficiency / ( $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ )	Max transmission distance /km
BPSK	1	9600
QPSK	2	4800
8QAM	3	2400
16QAM	4	1200

### 3 算法描述

#### 3.1 OHM 路由算法

正如前文所述,基于跳数的 KSP 算法可能得到多条距离偏长的候选路径,基于距离的 KSP 算法可能得到多条跳数过多的候选路径。路径的距离偏长或跳数过多都会使业务难以找到可用的频谱资源,从而导致较高的带宽阻塞率。为了避免上述问题,设计一种 OHM 路由算法。OHM 路由算法在考虑路径跳数的同时,还考虑路径调制格式,试图为业务请求寻找  $K$  条跳数较小、调制等级较高的候选路径。OHM 路由算法的路由权重  $W_p$  综合考虑了每条路径的跳数和调制格式信息,其计算公式为

$$W_p = H_p + B_p, \quad (2)$$

式中:  $H_p$  表示路径  $P$  的跳数;  $B_p$  用来标志路径  $P$  对应的调制格式信息。  $B_p = 1, 2, 3, 4$  分别表示最大路径传输距离是 1200, 2400, 4800, 9600 km。路径跳数  $H_p$  越小,业务请求在 RSA 过程中越容易找到沿路径保持对齐的空闲频谱资源。  $B_p$  的值越小,表示路径的传输距离越短,请求需要的频谱槽数量越少,从而增大为请求找到可用频谱资源的概率。因此,候选路径的路由权重  $W_p$  越小,越有利于在后续的频谱分配过程中找到可用的频谱资源。

基于路由权重  $W_p$ , OHM 路由算法的主要步骤为:

- 1) 为网络拓扑  $G(V, E)$  中的每一个源节点和目的节点对  $s-d$ , 计算出所有路径;
- 2) 对任意一个  $s-d$  节点对的所有可行路径, 根据(2)式计算出每条路径对应的路由权重  $W_p$  的值, 并将所有可行路径按照  $W_p$  的值升序排列, 选取  $W_p$  值最小的前  $K$  条路径作为  $s-d$  的  $K$  条候选路径;
- 3) 重复步骤 2), 求出  $G(V, E)$  中所有  $s-d$  节点对的所有  $K$  条候选路径, 并将计算出的每个  $s-d$  节点对和对应的  $K$  条候选路径以键值对的形式存入到字典  $R_p$  中。

当一个 IR 请求  $R(s, d, C)$  到达网络时, 网络将从 OHM 路由算法离线计算好的字典  $R_p$  中提取出对应的  $K$  条候选路径, 随后在这  $K$  条路径上为业务请求查找可用的频谱资源。

值得注意的是: OHM 算法是离线路由算法, 路径计算在网络初始化阶段已经完成, 这将大大缩短业务到达网络时寻路的开销。 OHM 路由算法试图使所选路径的跳数和调制格式达到平衡, 尽量避免为业务选择跳数过多或者距离过长的路径。

#### 3.2 MCF 频谱分配算法

在考虑动态 IR 请求的 EON 场景中, 带宽阻塞率是衡量 RSA 算法性能的主要指标, 而频谱碎片是造成带宽阻塞率增加的重要因素。为进一步降低 IR 请求的带宽阻塞率, 首先提出一个二维路径资源模型。基于该模型, 提出一个候选频谱块查找策略。随后, 通过综合考虑到频谱边界的距离、对相邻资源的影响和资源消耗量等因素, 提出一个综合性的碎片度量指标——联合碎片度。基于此, 设计一种最小联合碎片度(MCF)频谱分配算法。

##### 3.2.1 二维路径资源模型

为了反映沿路径维度的频谱状况, 首先建立一个二维路径资源模型来描述构成路径的每个光纤链路上的频谱资源占用状况。图 1 描述的是一个二维路径资源模型的示例。其中, 图 1(a) 是网络拓扑, 共 6 个节点, 节点间的数字表示光纤链路的距离, 单位是 km。假设有一个 IR 请求的源节点和目的节点分别为节点 1 和 6, 传输速率为 50 Gbit/s, 为该请求找到一条距离为 2400 km 的候选路径 Path 1 (1-2-4-5-6)。由表 1 可知, 可以在 Path 1 上配置的最高级别调制格式是 8QAM, 那么根据(1)式可以计算出请求在 Path 1 的每条光纤链路上需求的频谱槽数量是 2。

图 1(b) 描述了 Path 1 的二维路径资源模型, 图中水平轴和垂直轴分别表示频率和沿路径的光纤链路。在频率轴上, 频率资源被量化为  $F$  个频谱槽, 按顺序依次编号为 1, 2, ...,  $F$ 。从图 1(b) 中可以看出路径 Path 1 的每条光纤链路上的每个频谱槽的使用情况。其中, “1” 表示频谱槽空闲, “0” 表示频谱槽占用。每个频谱槽用符号  $u_l^f$  表示,  $u_l^f$  表示链路  $l$  上的第  $f$  个频谱槽。  $u_l^f = 0$  表示频谱槽被占用,  $u_l^f = 1$  表示频谱槽空闲。

已经计算出 IR 请求在每条链路上需要 2 个频谱槽, 那么沿着 Path 1 的路径资源模型的频率轴从

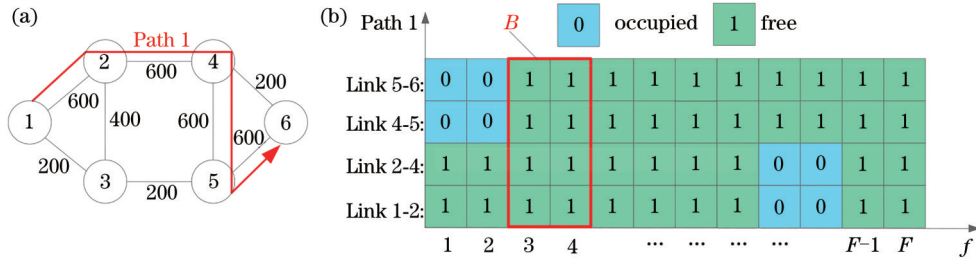


图 1 二维路径资源模型示例。(a)网络拓扑;(b)二维路径资源模型

Fig. 1 Example to describe a two-dimensional path resource model. (a) Network topology; (b) two-dimensional path resource model

左向右遍历,很快就找到一个可用的频谱块,用  $B$  表示,如图 1(b) 中方框圈起来的部分。很明显,频谱块  $B$  能够满足频谱邻接性和频谱连续性约束,可以用来为该请求建立光路连接。也就是说,网络能够根据路径 Path 1、调制格式 8QAM 和可用频谱块  $B$  等信息,为 IR 请求建立一条端到端的光路。

对于一个 IR 请求,当网络为其找到的可用频谱块不止一个时,就需要采用有效的频谱分配策略来决策出一个最优方案。可用频谱块  $B$  可以表示为一个三元组,即

$$B = (P_{s,d}^k, f_s, f_e), \quad (3)$$

式中:  $P_{s,d}^k$  表示频谱块  $B$  所在的路径;  $k$  表示候选路径中的第  $k$  条路径;  $s$  和  $d$  分别表示请求的源节点和目的节点;  $f_s$  和  $f_e$  分别表示频谱块  $B$  的起始频谱槽编号和末尾频谱槽编号。

在频谱分配策略做决策之前,首先要把所有的

候选频谱块找出来。为了查找到比较适合的候选频谱块,需要设计一个候选频谱块查找策略。

### 3.2.2 候选频谱块查找策略

当一个 IR 请求  $R(s, d, C)$  到达网络时,网络将从提前计算好的路径字典  $R_p$  中为请求提取出对应的  $K$  条候选路径,接着 MCF 频谱分配算法开始在这  $K$  条路径上查找候选频谱块。查找的候选频谱块至少须满足下面 2 个规则中的 1 个: 1) 查找的候选频谱块须紧靠频谱边界; 2) 查找的候选频谱块至少与 1 个占用频谱槽相邻。

结合图 1 的例子,假设 IR 请求在路径 Path 1 的每条链路上需要 2 个邻接频谱槽。那么按照候选频谱块的查找规则,可以在 Path 1 上查找到 3 个候选频谱块,分别是  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ ,如图 2 所示。其中,块  $B_1$  的左边界与占用频谱块相邻,块  $B_2$  的右边界与占用频谱块相邻,块  $B_3$  的左边界与占用频谱块相邻,右边界紧靠频谱右边界。

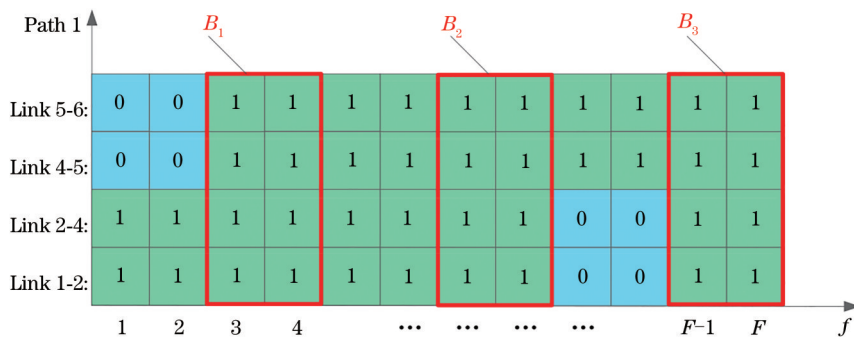


图 2 在路径资源模型上查找候选频谱块示例

Fig. 2 Example of searching candidate spectrum blocks on the path resource model

当算法在  $K$  条候选路径上为业务找到所有满足上述查找规则的候选频谱块时,算法将开始评估每一个候选频谱块的性能。为了高效地对候选频谱块进行评估,提出一个二维碎片度量指标。

### 3.2.3 二维碎片度量指标

通过综合考虑到频谱边界的距离、对相邻资源

的影响和资源使用量 3 个因子,提出一个二维碎片度量指标——联合碎片度,来对每一个候选频谱块  $B$  的性能进行评估。

**因子 1: “到频谱边界的距离”**,表示频谱块到频谱边界的距离。这个因子在文献[16]中被提出,用来优化提前预留请求的光路供应服务,非常有利于

从全网角度减少频谱碎片,增加全网空闲频谱资源的邻接程度和对齐程度,因此引入该因子来优化 IR 请求场景中的频谱状况。“到频谱边界的距离”因子  $D_F$  中频谱边界指的是频率轴上  $f=1$  或  $f=F$  的位置,  $D_F$  的值表示为

$$D_F = \min\{D_L, D_R\}, \quad (4)$$

式中:  $D_L = f_s - 1$ , 指可用频谱块到频率左边界的距离;  $D_R = F - f_e$ , 指可用频谱块到频率右边界的距离。其中,  $f_s$  和  $f_e$  分别表示可用频谱块的起始频谱槽和末尾频谱槽的编号。

通过长期为 IR 请求分配  $D_F$  值更小的频谱块, 全网中所有链路上的占用资源就会集中到靠近频谱边界的位置, 有利于在频率轴的中心区域留出更多的空闲频谱资源, 从而可以减少全网碎片的产生, 同时缓解了频谱邻接性和频谱连续性约束。

**因子 2: “对相邻资源的影响”。** 因子 2 统计的是候选频谱块更靠近频谱边界的一侧的相邻空闲频谱槽的总数量, 其结果依赖于候选频谱块更靠近于频谱的哪一侧边界, 计算公式为

$$I_A = \begin{cases} \sum_{l \in P_{s,d}^k} u_{f_s-1}^l, & 0 < D_L < D_R \\ \sum_{l \in P_{s,d}^k} u_{f_e+1}^l, & D_L \geq D_R > 0, \\ 0, & D_L = D_R = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: 当候选频谱块更靠近频谱的左侧边界时, 即  $0 < D_L < D_R$  时,  $I_A$  表示位于候选路径  $P_{s,d}^k$  上编号为  $f_s - 1$  的空闲频谱槽的数量; 当候选频谱块更靠近频谱的右侧边界时, 即  $D_L \geq D_R > 0$  时,  $I_A$  表示位于候选路径  $P_{s,d}^k$  上编号为  $f_e + 1$  的空闲频谱槽的数量; 而当候选频谱块与频谱左侧边界或者右侧边界相邻时, 即  $D_L = D_R = 0$  时, 因子  $I_A$  的值为 0。

$I_A$  的值越小, 表示与频谱块相邻的靠近频谱边界一侧的空闲频谱槽越少, 这反过来说明频谱块与更多的占用资源相邻接。因此, 在选择  $I_A$  值更小的频谱块分配后, 能够使候选路径上的占用资源在频谱轴上变得更加连续, 有利于减少频谱碎片, 使空闲频谱资源变得更邻接。

**因子 3: “资源使用量”。** 该因子表示 IR 请求在某条候选路径上的频谱资源使用量, 其值为

$$S_N = H_{P_{s,d}^k} \cdot N_{P_{s,d}^k}, \quad (6)$$

式中:  $H_{P_{s,d}^k}$  表示第  $k$  条候选路径  $P_{s,d}^k$  包含的链路数量;  $N_{P_{s,d}^k}$  表示 IR 请求在第  $k$  条候选路径  $P_{s,d}^k$  的每条链路上需求的频谱槽数量, 可以由(1)式求得。

通过选用  $S_N$  值更小的候选频谱块, 可以尽可能少占用频谱资源, 为后续请求留出更多的可用频谱资源, 从而提高频谱利用效率。另一方面, 如果频谱块所在候选路径的跳数过大, 或者距离过长, 都会使  $S_N$  的值变大。因此, 选取  $S_N$  值较小的候选频谱块能够在一定程度上避免业务在 RSA 过程中优先选到跳数大、距离长的路径, 也有利于减少频谱资源的占用。

基于上述 3 个因子, 本文提出一个用于综合评估候选频谱块性能的二维碎片度量指标——联合碎片度, 其计算公式为

$$F_M = aD_F + bI_A + cS_N, \quad (7)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别表示  $D_F$ 、 $I_A$  和  $S_N$  3 个因子在  $F_M$  中所占的权重。由于  $D_F$ 、 $I_A$  和  $S_N$  3 个因子的值都是越小越好, 因此  $F_M$  的值越小越好。

### 3.2.4 候选频谱块分配策略

在 MCF 算法得到每个可用频谱块的  $F_M$  值后, 就会把对应  $F_M$  值最小的候选频谱块以及相应的调制格式、候选路径分配给业务请求, 从而为业务建立一条端到端的最优光路。

图 3 描述的是一个计算联合碎片度的例子, 该例假设评估因子的权重  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值都是 1。其中, 图 3(a) 为网络拓扑, 图中数字表示链路距离, 单位是 km。假设有一个 IR 请求到达网络的源节点和目的节点分别是 1 和 6, 要求的传输速率是 50 Gbit/s, 那么网络为该请求找到两条候选路径, 分别是 Path 1 和 Path 2。基于距离自适应策略, 再根据表 1 和(1)式, 可以得到该请求在 Path 1 的每条链路上需要 2 个频谱槽(对应调制格式 8QAM), 在 Path 2 的每条链路上需要 1 个频谱槽(对应调制格式 16QAM)。接着, 根据候选频谱块查找规则可在 Path 1 上找到 3 个候选频谱块, 编号分别为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ , 如图 3(b) 所示; 算法在 Path 2 上找到 2 个候选频谱块, 编号分别为  $B_4$ 、 $B_5$ , 如图 3(c) 所示。然后, 算法开始为找到的 5 个候选频谱块计算联合碎片度。

块  $B_1$  更靠近频率的左边界, 根据(4)~(6)式, 可以分别计算出块  $B_1$  到频谱边界的距离  $D_F(B_1) = 2$ ; 块  $B_1$  对左侧相邻资源的影响  $I_A(B_1) = 2$ ; 块  $B_1$  的资源使用量为  $S_N(B_1) = 2 \times 4 = 8$ 。在图 3(b) 中, 可以更直观地看到这几个评估因子的计算。因此, 根据(7)式, 可以计算出块  $B_1$  的联合碎片度为  $F_M(B_1) =$

$D_F(B_1) + I_A(B_1) + S_N(B_1) = 2 + 2 + 8 = 12$ 。采取与块  $B_1$  同样的计算方法,可以计算出块  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  和  $B_5$  的联合碎片度,分别是: $F_M(B_2) = 4 + 2 + 8 = 16$ ;

$F_M(B_3) = 0 + 0 + 8 = 8$ ;  $F_M(B_4) = 2 + 2 + 3 = 7$ ;  
 $F_M(B_5) = 0 + 0 + 3 = 3$ 。

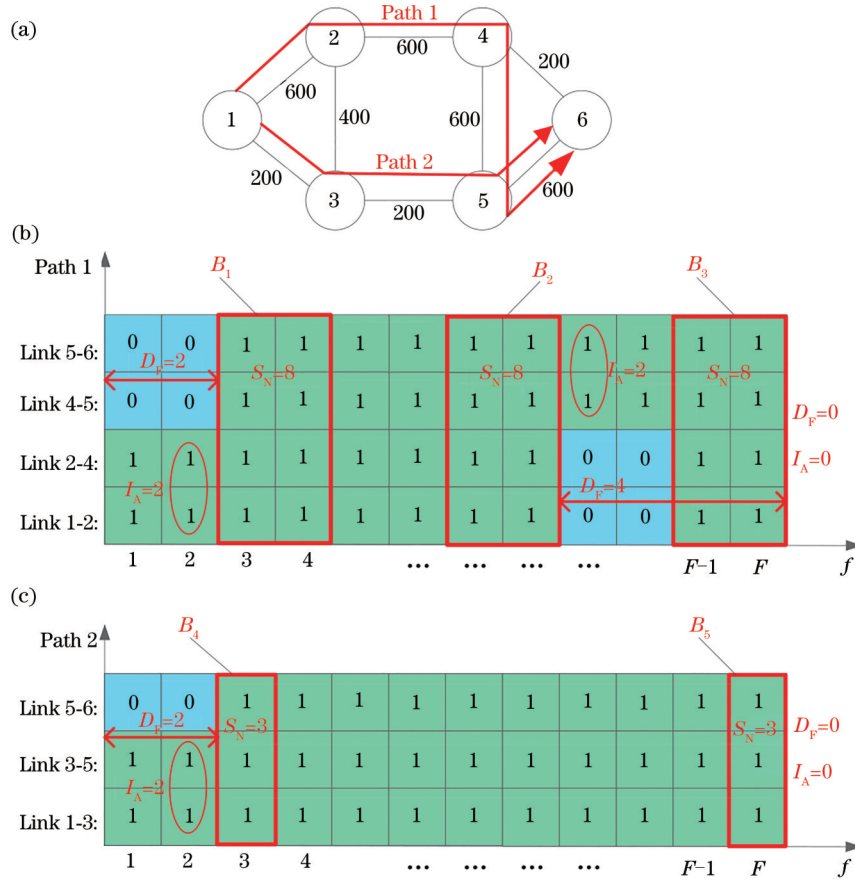


图 3 联合碎片度计算示例。(a)网络拓扑;(b) Path 1 的路径资源模型;(c) Path 2 的路径资源模型

Fig. 3 Example describing how to calculate the joint fragmentation degree. (a) Network topology; (b) path resource model of Path 1; (c) path resource model of Path 2

通过比较上述 5 个块的  $F_M$  值,可以知道块  $B_5$  的  $F_M$  值最小,因此块  $B_5$  的性能最好。分析如下。

块  $B_1$  与块  $B_2$  消耗的频谱槽总数量相同、对邻接资源的影响相同,但块  $B_1$  比块  $B_2$  更靠近频谱边界,更有利于在频谱中央保留出更多的空闲资源,因此块  $B_1$  比块  $B_2$  更好。块  $B_1$  与块  $B_4$  对邻接频谱资源的影响相同、到频谱边界的距离相同,但块  $B_4$  比块  $B_1$  消耗更少的频谱资源,因此块  $B_4$  比块  $B_1$  更好。块  $B_5$  与块  $B_3$  到频谱边界的距离相同、对邻接资源的影响相同,但块  $B_5$  比块  $B_3$  消耗更少的频谱资源,因此块  $B_5$  更好。块  $B_5$  比块  $B_4$  到频谱边界的距离更小、对相邻资源的影响更小。因此块  $B_5$  在所有候选频谱块中是最优的。最后, MCF 算法将频谱块  $B_5$ 、块所在路径 Path 2 和调制格式 16QAM 等资源分配给对应的 IR 请求,并基于此为请求建立一条端到端的光路连接。

### 3.3 整体算法流程

基于 3.1 节设计的 OHM 路由算法和 3.2 节设计的 MCF 频谱分配算法,提出一种二维碎片感知 RSA 算法,旨在在进一步降低 EON 中 IR 请求的 BBP 和提高 SU。OHM-MCF 算法分为路由选择和频谱分配两个阶段,伪代码如表 2 所示。路由阶段采用离线的 OHM 路由算法,频谱分配阶段采用在线 MCF 算法。

首先,在网络的初始化阶段,网络采用离线的 OHM 路由算法提前为  $G(V, E)$  中的每个  $s-d$  对计算出  $K$  条候选路径,并以键值对的形式存入字典  $R_p$  中,如表 2 中的阶段 I(1~6 行)所示。

然后,随着 IR 请求随机到达网络,网络开始进入动态服务供应阶段,也就是阶段 II(表 2 中的 7~20 行)。在阶段 II,需要在线的 MCF 频谱分配算法

表 2 OHM-MCF 算法伪代码  
Table 2 Pseudo code of OHM-MCF algorithm

**Algorithm 1. The proposed OHM-MCF algorithm**

**Input:** An IR request  $R(s, d, C)$  and network topology  $G(V, E)$ ;  
**Output:** The best candidate spectrum block  $B$  and the routing path where the block is located;  
**Phase I: Network Initialization (OHM routing process)**  
**1:** for each  $s$ - $d$  pair in  $G(V, E)$  do  
**2:** calculate all feasible routing paths;  
**3:** calculate  $W_p$  with Formula (2) for each feasible path of  $s$ - $d$  pair;  
**4:** choose the first  $K$  candidate paths according to the ascending order of  $W_p$ ;  
**5:** take each  $s$ - $d$  pair and the corresponding  $K$  candidate paths as key value pairs and store them in the dictionary  $R_p$ .  
**6:** end for  
**Phase II: Dynamic Service Provision (MCF spectrum allocation process)**  
**7:** Extract  $K$  candidate paths corresponding to the requested  $s$ - $d$  from  $R_p$ ;  
**8:** for each path do  
**9:** build the path resource model for path;  
**10:** find all candidate spectrum blocks based on spectrum block search strategy;  
**11:** for each spectrum block  $B$  do  
**12:** calculate  $F_M$  with Formula (7);  
**13:** end for  
**14:** end for  
**15:** if candidate spectrum blocks exist then  
**16:** determine the best spectrum block  $B$  with minimum  $F_M$ ;  
**17:** assign the best block and the corresponding path to the request;  
**18:** else  
**19:** block the request;  
**20:** end if

来处理 IR 请求的光路建立问题。当一个 IR 请求  $R(s, d, C)$  到达网络时, MCF 算法根据请求的  $s$ - $d$  对从字典  $R_p$  中提取出相应的  $K$  条候选路径。然后根据每条路径的频谱状况, 建立对应的二维路径资源模型。基于每条路径的路径资源模型, 按照频谱块查找策略, 找到  $K$  条路径上所有的候选频谱块。如果候选频谱块不存在, 则阻塞这个 IR 请求; 如果频谱块存在, 那么根据 (7) 式计算出每个候选频谱块对应的二维碎片度量指标  $F_M$ 。最后, MCF 算法将  $F_M$  值最小的候选频谱块和块所在的路径分配给这个 IR 请求。

OHM-MCF 算法的时间复杂度可以通过表 2 进行推导。1~6 行描述的 OHM 路由算法是离线计算的, 因此不计入整体时间复杂度。9~10 行描述的是每条候选路径上可用频谱块的查找阶段, 最坏情况下的时间复杂度是  $O(|V| \cdot F)$ 。其中,  $|V|$  表示拓扑中的节点数, 任何候选路径包含的链路数都应

小于  $|V|$ 。假设找到的候选频谱块的数量是  $I$ , 那么在每条候选路径上计算可用频谱块联合碎片度的最坏时间复杂度为  $O(|V| \cdot I)$ 。因此, 8~14 行的时间复杂度是  $O(K \cdot |V| \cdot F) + O(K \cdot |V| \cdot I) = O(K \cdot |V| \cdot F)$ 。15~20 行的时间复杂度是  $O(I)$ 。因此, OHM-MCF 算法最坏时间复杂度近似为  $O(|V| \cdot K \cdot F)$ 。

## 4 仿真及数据分析

### 4.1 仿真设置

假设 EON 运行在 C 波段, 每个光纤链路的带宽容量是 4.475 THz。基于光正交频分复用 (O-OFDM) 技术, 每个频谱槽的大小被设置为 12.5 GHz。因此, 每个光纤链路能够容纳 358 个频谱槽。仿真拓扑采用 14 节点的 NSFNET 拓扑和 24 节点的 USFNET 拓扑<sup>[17]</sup>。在仿真中, IR 请求服从泊松分布, 平均每分钟到达  $\lambda$  个 IR 请求, 每个 IR 请求的持

续时间服从平均值为  $1/\mu$  的负指数分布。因此,IR 请求的网络负载为  $\lambda/\mu$ ,单位是爱尔兰(Erlang)。仿真时取  $\mu$  的值为 0.1。每一个 IR 请求的源节点和目的节点在网络中随机选择,请求的传输速率在集合 {30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 Gbit/s} 中随机选择。按照以上参数,每次仿真测试都随机生成  $10^5$  个 IR 请求。

另外,本文测试的所有 RSA 算法都采用距离自适应策略,采用的调制格式包括 BPSK、QPSK、8QAM 和 16QAM,其对应的每个符号携带比特数依次是 1、2、3、4,对应的最大传输距离见表 1。K 的值被设置为 5,表示 OHM-MCF 算法和其他比较算法分别为每个 IR 请求确定 5 条候选路径。

基于上述仿真设置,对提出算法和对比算法进行仿真测试,所有仿真数据都是 10 次随机实验的平均值,数据的置信水平为 95%。

## 4.2 仿真指标

仿真测试采用的性能指标分别是 BBP 和 SU。

1) BBP:表示被阻塞的数据量(传输速率与持续时间的乘积)占总请求数据量的百分比<sup>[18]</sup>,即

$$P_B = \frac{\sum_{r \in R_B} C_r \cdot H_r}{\sum_{r \in R} C_r \cdot H_r}, \quad (8)$$

式中: $R$ 表示 IR 请求的集合; $R_B$ 表示被阻塞的 IR 请求的集合; $C_r$ 和  $H_r$ 分别表示请求  $r$  的传输速率和持续时间。每个 IR 请求的持续时间  $H_r$  是根据均值为  $1/\mu$  的负指数分布生成的。BBP 值越小意味着网络中被阻塞的总数据量越少,EON 能够承载更多的网络流量,说明算法的性能越优越。

2) SU:表示被业务连接占用的总的频谱槽数量占网络中总的频谱槽数量的百分比<sup>[19]</sup>,即

$$S_U = \frac{\sum_{l \in E} \sum_{f=1}^F (1 - u_l^f)}{|E| \times F}, \quad (9)$$

式中: $|E|$ 表示网络总链路数;分子表示网络中被占用的总频谱槽数量,分母表示网络中总的频谱槽数量。SU 越高,表示网络使用有限的频谱资源服务了更多的 IR 请求,意味着频谱碎片问题得到有效缓解,进而突出所提出算法性能的优越性。

## 4.3 数据分析

图 4 给出了 NSFNET 拓扑下 OHM-MCF 算法和其他数种 RSA 算法的 BBP 性能。可以看出,随

着负载增加,这几种算法的 BBP 都在逐渐升高。当考虑相同的网络负载时,OHM-MCF 算法能实现比 FF 算法、FA 算法和 FA-CA 算法更低的 BBP。FF 算法减少碎片的能力较弱,对应的阻塞率性能最差。FA 算法优先考虑频谱分配造成的沿频谱轴的频谱碎裂,其次考虑邻接链路上的频谱不对齐因素,有效地减少了碎片,比 FF 算法能够实现更好的性能。FA-CA 算法综合考虑频谱碎裂、频谱不对齐和路径拥塞因素,能够在负载较高时实现比 FA 算法更好的性能。在 500~650 Erlang 时,FA 算法阻塞率性能优于 FA-CA,而在 650~800 Erlang 时,FA-CA 算法的性能优于 FA 算法。这是因为,在负载较低的情况下,路径拥塞对阻塞的影响较小,因此 FA 算法更优;而在负载较高的情况下,路径拥塞对阻塞的影响变得很大,考虑拥塞避免的 FA-CA 算法能够实现更好的性能。

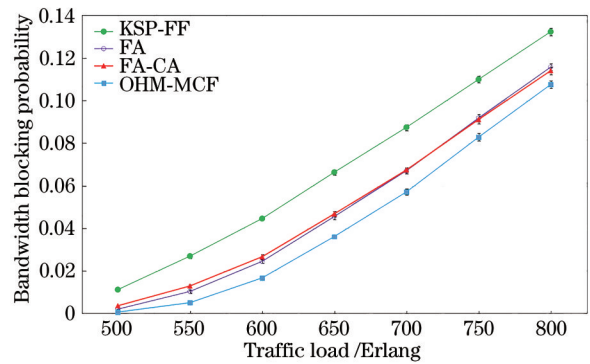


图 4 NSFNET 中的带宽阻塞率

Fig. 4 Bandwidth blocking probability in the NSFNET

从图 4 中可以看出,3 种算法的阻塞率性能都明显低于本文提出的 OHM-MCF 算法。OHM-MCF 算法相较于 FF 算法的性能提升最为明显,在 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800 Erlang 时,实现的 BBP 下降率分别是 94.6%, 81.3%, 62.6%, 45.6%, 34.7%, 24.7%, 18.8%。与这 3 个算法相比,OHM-MCF 算法能够有效降低 BBP 的原因有 4 点:1) OHM 路由算法能够有效避免查找的路径跳数过多或距离过长的弊端;2) MCF 算法的“到频谱边界的距离”因子能够尽可能地使全网所有链路上的空闲频谱资源集中到靠近频率中央的位置,从而从全局角度缓解 RSA 过程中的频谱邻接性和频谱连续性约束;3) MCF 算法的“对相邻资源的影响”因子能够促进路径资源模型上占用资源的连续程度,进而提高路径上空闲频谱的可用性;4) MCF 算法的“资源使用量”因子能够减少频谱资源的消



耗,为后续请求留出更多的空闲频谱。因此,OHM-MCF算法能够进一步降低BBP。

图 5 描述了上述 4 种算法在 USFNET 拓扑中的 BBP。通过比较图 4 和图 5 可以看出,在 USFNET 中,OHM-MCF 算法能够实现更显著的性能提升。其中,在 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900 Erlang 时,相较于 FF 算法的 BBP 下降率分别是 96.5%, 91.4%, 77.6%, 63.3%, 49.4%, 39.4%, 32.4%。提出的算法在 USFNET 具有更好性能的原因是:与 NSFNET 相比,USFNET 拥有更多的节点数和链路数。与对比算法相比,OHM-MCF 算法能够从全局角度增强空闲频谱的邻接性和连续性,因此能够实现更低的 BBP。由此可见,OHM-MCF 算法对于不同的拓扑结构具有良好的适应性,并且随着拓扑的增大,该算法会表现出越来越好的性能。

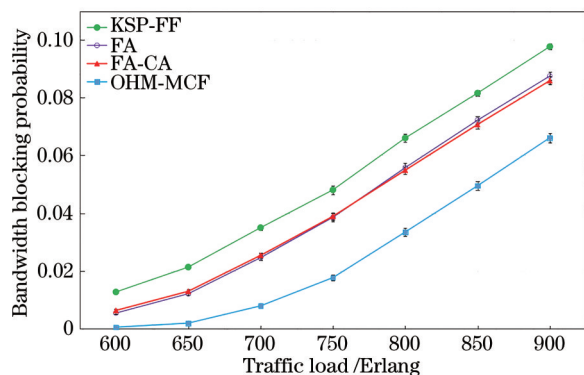


图 5 USFNET 中的带宽阻塞率

Fig. 5 Bandwidth blocking probability in the USFNET

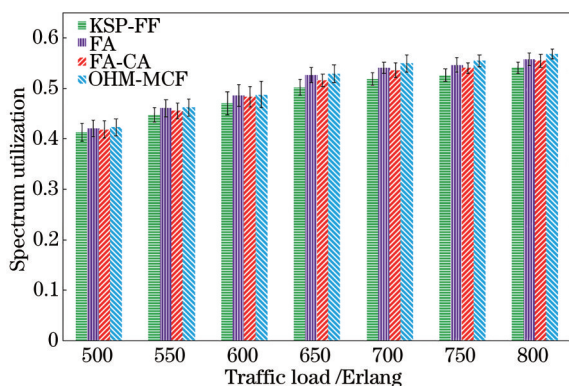


图 6 NSFNET 中的频谱利用率

Fig. 6 Spectrum utilization in the NSFNET

图 6 描述的是 KSP-FF、FA、FA-CA 和 OHM-MCF 算法在 NSFNET 拓扑中的 SU。明显地,这 4 种算法的 SU 随着网络负载的增加而逐渐变大。在考虑相同的网络负载时,与 KSP-FF 算法、FA 算

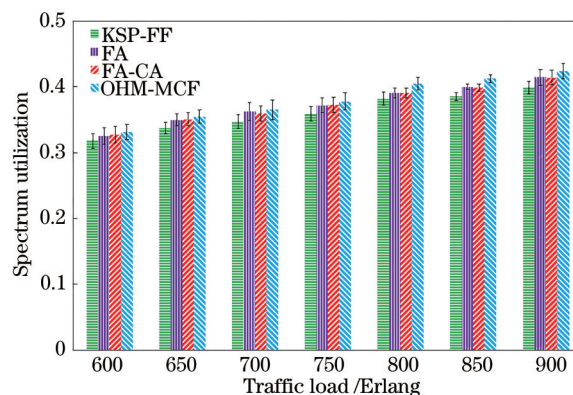


图 7 USFNET 中的频谱利用率

Fig. 7 Spectrum utilization in the USFNET

法和 FA-CA 算法相比,OHM-MCF 算法具有最高的 SU。这是因为该算法能够增强全网所有链路上和所有候选路径上空闲频谱资源的邻接程度和对齐程度,更有效地减少频谱碎片,从而使频谱得到更充分的使用。因此,OHM-MCF 算法的 SU 最高。图 7 对比了上述 4 种算法在 USFNET 拓扑中的 SU。与 NSFNET 拓扑类似,OHM-MCF 算法在 USFNET 拓扑中的 SU 也是最高的。

## 5 结 论

研究了动态 EON 场景下 IR 请求的 RSA 问题。提出一种综合考虑路径跳数和调制格式的路由算法(OHM 算法),并提出一个综合性的碎片评估度量——联合碎片度,基于此设计了一个二维碎片感知的 MCF 频谱分配算法。OHM 路由算法和 MCF 频谱分配算法结合,组成了 OHM-MCF 算法。仿真结果表明:与数种经典的 RSA 算法相比,OHM-MCF 算法能够进一步降低 BBP 和提高 SU;提出算法能够从全网角度优化频谱状况,因此在更大的拓扑中,OHM-MCF 算法将表现出更优的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Liu T T, He R X, Chen X J. Holding-time-aware multipath routing and spectrum allocation algorithm in SD-EON with traffic grooming[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210602. 刘彤彤,何荣希,陈晓静.流量疏导 SD-EON 中的持续时间感知多径路由与频谱分配算法[J].激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210602.
- [2] Xuan H J, Wei S W, Guo H P, et al. Modeling and optimization algorithm for virtual network function deployment in inter-datacenter elastic optical networks

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 210601.  
宣贺君, 魏士伟, 郭华平, 等. 关于数据中心间弹性光网络中虚拟网络功能配置的问题建模及优化算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 210601.
- [3] Chatterjee B C, Sarma N, Oki E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: a tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3): 1776-1800.
- [4] Hu Y, Xiao S, Feng J J. Model and algorithm for routing and fiber-core assignment in multi-core elastic optical networks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(6): 060604.  
胡艳, 校松, 冯晶晶. 多纤芯弹性光网络中选路和纤芯分配模型及算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 060604.
- [5] Triay J, Cervelló-Pastor C, Vokkarane V M. Analytical blocking probability model for hybrid immediate and advance reservations in optical WDM networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2013, 21(6): 1890-1903.
- [6] Sugihara S, Hirota Y, Fujii S, et al. Dynamic resource allocation for immediate and advance reservation in space-division-multiplexing-based elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(3): 183-197.
- [7] Jinno M, Kozicki B, Takara H, et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(8): 138-145.
- [8] Zhu Z Q, Lu W, Zhang L, et al. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 15-22.
- [9] Adhikari D, Datta D, Datta R. Impact of BER in fragmentation-aware routing and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. *Computer Networks*, 2020, 172: 107167.
- [10] 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.
- [11] Christodoulopoulos K, Tomkos I, Varvarigos E A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(9): 1354-1366.
- [12] Wright P, Parker M C, Lord A. Minimum- and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(1): A66-A72.
- [13] Yin Y W, Zhang H, Zhang M Y, et al. Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(10): A100-A106.
- [14] Pederzoli F, Siracusa D, Zanardi A, et al. Path-based fragmentation metric and RSA algorithms for elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(3): 15-25.
- [15] Singh K K, Prakash Singh S, Sengar S. Fragmentation suppressed RSA algorithm for elastic optical network: a quantitative approach[C]//2018 IEEE British and Irish Conference on Optics and Photonics (BICOP), December 12-14, 2018, London, UK. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [16] Li X H, Yuan J L, Zhang Q K, et al. Farsighted spectrum resource assignment method for advance reservation requests in elastic optical networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 167836-167846.
- [17] Zhu R J, Zhao Y L, Yang H, et al. Dynamic time and spectrum fragmentation-aware service provisioning in elastic optical networks with multi-path routing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 32: 13-22.
- [18] Lu W, Zhu Z Q. Dynamic service provisioning of advance reservation requests in elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(10): 1621-1627.
- [19] Wang N N, Jue J P, Wang X, et al. Holding-time-aware scheduling for immediate and advance reservation in elastic optical networks[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 8-12, 2015, London, UK. New York: IEEE Press, 2015: 5180-5185.