

激光与光电子学进展

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

王世成¹, 陈晓静^{1,2}, 何荣希^{1*}

¹大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;

²大连科技学院, 辽宁 大连 116052

摘要 针对弹性光网络的频谱碎片问题, 提出了一种最大化业务承载力的碎片感知路由与频谱分配算法。在路由阶段利用 K 最短路由算法为业务请求离线计算 K 条跳数最短的备选路径, 在频谱分配阶段考虑到业务请求以及已建立业务连接的持续时间等因素, 对空闲频谱块(SB)的业务承载力进行评估, 并从所选路径的可用SB中挑选建立光路后关联路径中空闲资源业务承载力最大的方案建立业务连接。仿真结果表明, 该算法可以降低带宽阻塞率和链路平均碎片率, 同时提高资源利用率。

关键词 光通信; 弹性光网络; 频谱碎片; 路由与频谱分配; 持续时间

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0706007

Fragmentation-Aware Routing and Spectrum Allocation Algorithm Based on Service Carrying Capacity in Elastic Optical Networks

Wang Shicheng¹, Chen Xiaojing^{1,2}, He Rongxi^{1*}

¹College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

²Dalian University of Science and Technology, Dalian, Liaoning 116052, China

Abstract In order to solve the problem of the spectrum fragmentation in elastic optical networks, a fragmentation-aware routing and spectrum allocation algorithm for maximizing service carrying capacity is proposed in this paper. In the routing stage, K -shortest path routing algorithm is utilized to calculate K alternative paths with the minimum hops offline for connection requests. In the spectrum allocation stage, the factors such as the duration of the arriving request and established connections are considered to evaluate the service carrying capacity of the free spectrum block (SB). From available SBs of the selected path, we select the scheme that is beneficial to maximize the service carrying capacity of the free resource in the relevant paths after the lightpath is established for the connection establishment. Simulation results show that the algorithm can reduce the bandwidth blocking probability and the link average fragmentation ratio and improve the resource utilization.

Key words optical communications; elastic optical networks; spectrum fragmentation; routing and spectrum allocation; duration

1 引言

弹性光网络(EON)是光网络向灵活化、智能化

发展的重要方向^[1-3], 路由与频谱分配(RSA)是EON中的一个基本问题, 旨在为业务请求确定一条路径, 并在该路径中为其分配合适的频谱资源, 即

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-08-27; 录用日期: 2021-09-08

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

通信作者: *hrx@dlmu.edu.cn

为业务请求建立一条端到端的光路^[4-6]。但光路的动态建立与释放会导致网络中的频谱资源碎片化^[7-8],使业务阻塞率升高。为了减少频谱碎片,针对目前网络应用的多样化需求,如立即预留(IR)、提前预留(AR)以及弹性预留(MR)请求^[9],人们提出了多种碎片感知RSA算法^[8-13]。IR请求面向时延敏感型以及请求恒定带宽这类应用,如即时通信、在线购物。针对IR请求,Chen等^[10]提出了基于流量分布的碎片感知RSA算法,通过模拟到达请求的阻塞状况评估空闲资源对业务的承载力。Some等^[11]提出了一种最大化公共段(MCLS)算法,通过对比请求占用资源前后网络承载业务能力的差值选择频谱分配方案。Pederzoli等^[12]指出基于运营商的决策及底层硬件可以获取业务请求可能的带宽大小及分布,并基于此提出了一种基于路径的碎片度量RSA算法。AR请求在获得服务前可支持一定的初始延迟容忍,常应用于视频点播、大文件传输等场景中。Liu等^[8,13]为服务AR请求建立了二维资源模型,并设计了二维碎片度量指标,从频率轴和时间轴上共同优化碎片程度。MR请求既可以存在一定的服务延时容忍,又具有带宽无感知特性,常用于数据备份与迁移等场景。针对MR请求,Lu等^[9]提出了一种动态规划方法解决碎片问题。上述相关研究中,基于IR请求的RSA算法从业务承载力角度提出了碎片度量指标,以量化频谱的碎片化程度,有利于减少业务建立过程中频谱碎片的产生,但仅基于流量分布和空闲频谱块(SB)的长度设计碎片度量指标,未考虑到空闲SB的相邻频谱资源已建立业务连接(光路)的持续时间对该空闲资源(FR)业务承载力的潜在影响。而空闲SB相邻两侧频谱资源所承载业务的持续时间越短,该占用资源会越早释放,可以更早与空闲SB结合,扩大其连续性,使该部分资源有更多机会承载后续业务。相邻两侧频谱资源承载业务持续时间越长的空闲SB,将其作为后续业务请求成功建立连接的机会越小,成为频谱碎片的可能性越大,其业务承载力不及前者。因此,对空闲SB的业务承载力进行评估时,也应考虑其相邻频谱资源上已建立业务持续时间的影

响。为新到达业务请求分配资源时,不可避免地会改变选定链路与其相邻链路间FR的对齐程度,从而影响该选定路径关联路径的业务承载力。根据频谱连续性、邻接性约束条件^[10],服务当前请求时,

应尽可能使关联路径中空闲频谱槽沿路径相邻、沿链路间对齐,以减少频谱碎片的产生,提升后续业务建立光路的成功率。综上所述,为了进一步减少EON中的频谱碎片,综合考虑网络中业务带宽需求及分布情况、空闲频谱块长度及其相邻资源已建光路持续时间等因素的影响,本文设计了一种基于业务承载力的碎片度量指标,并基于此提出了一种最大化业务承载力(MSCC)的碎片感知RSA算法。该算法基于K路由算法^[14]为业务请求离线计算K条跳数最短的备选路径,在进行频谱分配时计算预分配方案后关联路径中FR的业务承载力,并选择业务承载力最大的分配方式为请求建立光路。仿真结果表明,相比其他几种典型的RSA算法,该算法的频谱资源利用率更好,且能降低业务带宽阻塞率和链路平均碎片率。

2 问题描述

2.1 网络模型

EON可表示为有向图 $G(V, E)$,其中, V 为网络中的交换节点集合, E 为节点间的光纤链路集合。网络中的节点数和链路数分别为 N 和 L 。每个光纤链路具有 F 个频隙(FS),每个频隙的带宽为 B_{slot} 。状态(空闲或占用)相同的连续频隙构成SB,到达业务请求可表示为 $r(s, d, C, t_s, t_h)$,其中, s 和 d 分别为 r 的源节点、目的节点, C 为业务请求所需带宽, t_s 为业务到达时刻, t_h 为服务持续时间。

2.2 路径中空闲SB的业务承载力

网络中空闲SB的业务承载力可以很好地反映当前频谱的碎片化程度^[10-12],当链路或路径中的频谱碎片增多时,业务请求被阻塞的概率随之增加,网络可承载业务数相应减少,资源利用率就会下降。因此,在资源分配过程中应致力于寻找最大业务承载力的方案,以减少频谱碎片化程度,为后续请求留下更多较大的空闲SB。空闲SB的业务承载力受其相邻两侧SB承载业务(已建光路)持续时间的影响,即相邻两侧频谱资源所建光路持续时间较短的空闲SB,在相邻业务释放光路后,释放后的频谱资源会与其更早结合,构成更大规模的连续FR,有更多机会承载更多的业务,增加后续请求成功建立光路的概率。而相邻两侧承载业务持续时间较长的空闲SB,相邻业务释放时间较晚,已占用资源无法及时得到再次利用,其业务承载力低于前者。

为业务请求建立光路时,为了合理选择可用

SB, 路径中任意可用空闲频谱块 X_j^{SB} 的业务承载力指标 $Y(X_j^{SB})$ 可表示为

$$Y(X_j^{SB}) = \left[\sum_{w \in W} \delta_w \cdot \exp\left(\frac{|X_j^{SB}|}{\tau w}\right) \right] / T_j, \quad (1)$$

式中, W 为网络中业务请求的带宽需求集合, δ_w 为带宽需求 w 的权重因子, 取决于带宽需求 w 的业务所占比例, $|X_j^{SB}|$ 为空闲 SB 包含的频隙数, T_j 由空闲 SB 相邻两侧频谱资源上已建立光路的剩余持续时间决定。

定义路径 P 中已占用频隙 f 的剩余持续时间 $t_z^{(P,f)}$ 为该路径包含的所有链路上频隙 f 剩余持续时间 $t_z^{(e,f)}$ 的最大值, 可表示为

$$t_z^{(P,f)} = \max_{e \in P} [t_z^{(e,f)}] = \max_{e \in P} [t_d^{(e,f)} - \tau_s^{(r_i)}], \quad (2)$$

式中, $t_d^{(e,f)} = t_s^{(e,f)} + t_h^{(e,f)}$ 为链路 e 中频隙 f 占用的结束时间, $\tau_s^{(r_i)}$ 为网络中第 i 个业务请求 r_i 的到达时间。需要说明的是, 如果某条链路 e 中频隙 f 未被占用, 则 $t_z^{(e,f)} = 0$ 。基于此, 得到路径 P 中空闲 X_j^{SB} 的 T_j 值为

$$T_j = \min [t_z^{(P,\varepsilon)}, t_z^{(P,\eta)}], \quad (3)$$

式中, ε 和 η 分别为空闲 X_j^{SB} 相邻两侧的频隙。

由(1)式可知, 空闲 SB 的业务承载力与业务带

宽需求及分布有关。当网络中业务所需带宽较大时, 对于连续性程度较小的空闲 SB, 其可用带宽资源有限, 满足业务带宽需求的概率较小, 业务承载力也较小; 反之, 连续性程度较大的空闲 SB, 有更多机会成功建立业务连接, 具有更大的业务承载力。此外, 空闲 SB 越大、业务带宽需求越小, 空闲 SB 承载业务的能力就越强。同时, T_j 可以反映出空闲 X_j^{SB} 保持当前大小的剩余时间, 其值越小, 表明该空闲 SB 相邻被占用的 SB 会更早释放, 能更快与其合并成更大规模的空闲 SB, 从而有更多机会为后续到达的不同带宽需求的业务请求提供服务。空闲 SB 的 $Y(X_j^{SB})$ 值越大, 其业务承载力越强, 越有可能成功为业务请求建立光路, 成为频谱碎片的概率就越小。

图 1 为路径 P_1 的资源状态。假设路径 P_1 由链路 e_1 和 e_2 构成, 业务带宽需求集合为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, 且呈均匀分布, 新到达业务请求为 $r_i(s_i, d_i, 5, 10, 9)$ 。路径 P_1 上空闲 X_1^{SB} 相邻两侧已建光路占用资源对应频隙 2 和频隙 8, 由(2)式和(3)式可知, $t_z^{(P_1,2)} = 7, t_z^{(P_1,8)} = 8, T_1 = 7$ 。同理, X_2^{SB} 对应频隙 11 和频隙 17, $t_z^{(P_1,11)} = 12, t_z^{(P_1,17)} = 6, T_2 = 6$ 。根据(1)式计算得到空闲 X_1^{SB} 和 X_2^{SB} 的业务承载力 $Y(X_1^{SB}) = 4.917, Y(X_2^{SB}) = 5.737$, 这表明空闲 X_2^{SB} 的业务承载力更强。

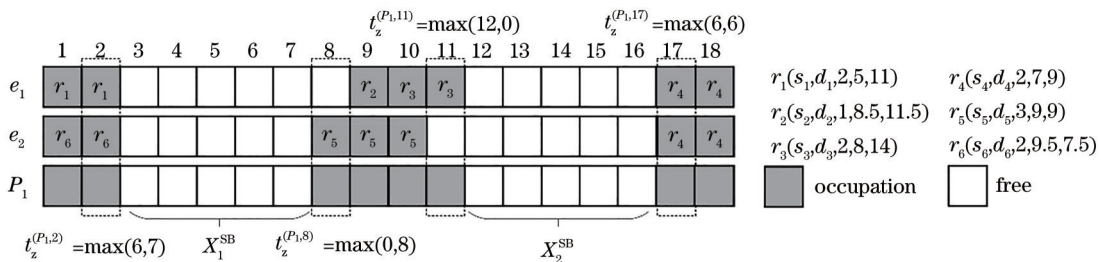


图 1 路径 P_1 的资源状态

Fig. 1 Resource occupation in path P_1

2.3 关联路径空闲资源的业务承载力

通常情况下, 实现业务传输时需要为到达请求寻找一条由邻接链路构成的端到端路径, 并在该路径上挑选满足带宽需求的空闲 SB。在该过程中, 业务要遵循频谱邻接性和连续性约束, 即要求分配的所有空闲频隙需在所选路径的各个链路上彼此对齐, 且在每条链路上彼此相邻。为新业务请求建立光路时, 会占用所选路径中的某个空闲 SB, 势必会影响到所选链路与其相邻链路间 FR 的对齐状态, 使其业务承载力发生变化。由频谱约束条件可知,

相邻链路间空闲资源的对齐程度是影响光路能否成功建立的重要因素。对齐的 FR 越多, 后续请求光路成功建立的概率就越大。因此, 为当前业务请求建立光路时应尽可能使所选链路与其相邻链路间的 FR 保持对齐, 以留下更多具有较大业务承载力的空闲 SB, 减少频谱碎片, 降低后续业务阻塞。

为了更好地描述邻接链路间 FR 的对齐状态, 引入关联路径的概念。将路径 P 的关联路径表示为路径 P 中一条链路与其一条相邻链路组成的路径, 图 2 为一个 5 节点网络拓扑, 假设新到达的业务请

求为 $r(1, 5, 3, 10, 9)$, 其候选路径 P_2 包含链路 1-2、2-4 和 4-5, 链路 1-2 的相邻链路有 3-1、2-4, 链路 2-4 的相邻链路有 4-3、4-5, 链路 4-5 的相邻链路有 3-4、5-3, 则 P_2 的关联路径集 $M_{P_2} = \{P_{2,1}, P_{2,2}, P_{2,3}, P_{2,4}, P_{2,5}, P_{2,6}\}$ 。其中, $P_{2,1} \sim P_{2,6}$ 分别为路径 P_2 的第 1 至第 6 条关联路径。

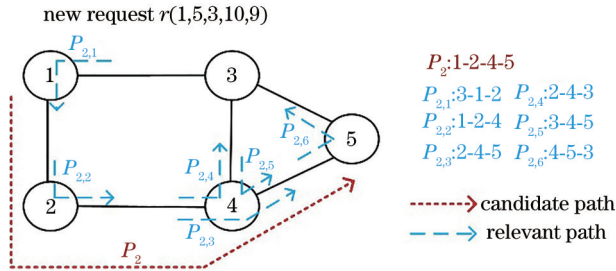


图 2 关联路径的示例图

Fig. 2 Example diagram of relevant paths

为了预留更多业务承载力较大的 SB, 以更好地服务后续业务请求, 在资源分配过程中应尽可能寻找有利于最大化所有关联路径中空闲资源业务承载力的方案, 以降低光路建立对网络中 FR 连续性的影响, 减少频谱碎片的产生。路径 P 所有关联路

径中空闲资源的业务承载力 χ_P 可表示为

$$\chi_P = \sum_{P' \in M_P} A_{P'}, \quad (4)$$

式中, M_P 为路径 P 的关联路径集, $A_{P'}$ 为某条关联路径 P' 中 FR 的业务承载力, 可表示为

$$A_{P'} = \sum_{j \in Q} Y(X_j^{SB}), \quad (5)$$

式中, Q 为关联路径 P' 中空闲 SB 的集合。

图 3 为图 2 中路径 P_2 所有关联路径中空闲资源业务承载力的计算过程, 网络当前频谱资源的使用状态及已建光路情况如图 3(a) 所示, 路径 P_2 与关联路径上的资源状态如图 3(b) 所示。由图 2 中业务 r 的带宽需求可知, 该业务需在候选路径 P_2 中找到 3 个连续空闲频隙构成的 SB 以建立光路。遍历图 3(b) 中候选路径 P_2 的频隙状态, 有 4 种 RSA 备选方案可供选择。方案 1: 频隙 3-频隙 5; 方案 2: 频隙 9-频隙 11; 方案 3: 频隙 10-频隙 12; 方案 4: 频隙 14-频隙 16。每个备选方案对应不同的候选 SB, 占用的资源也不同, 从而对每个关联路径中 FR 的业务承载力产生不同的影响。因此, 需挑选出为业务 r 建立光路后路径 P_2 所有关联路径中空闲资源业务承载力 χ_{P_2} 最大的方案。

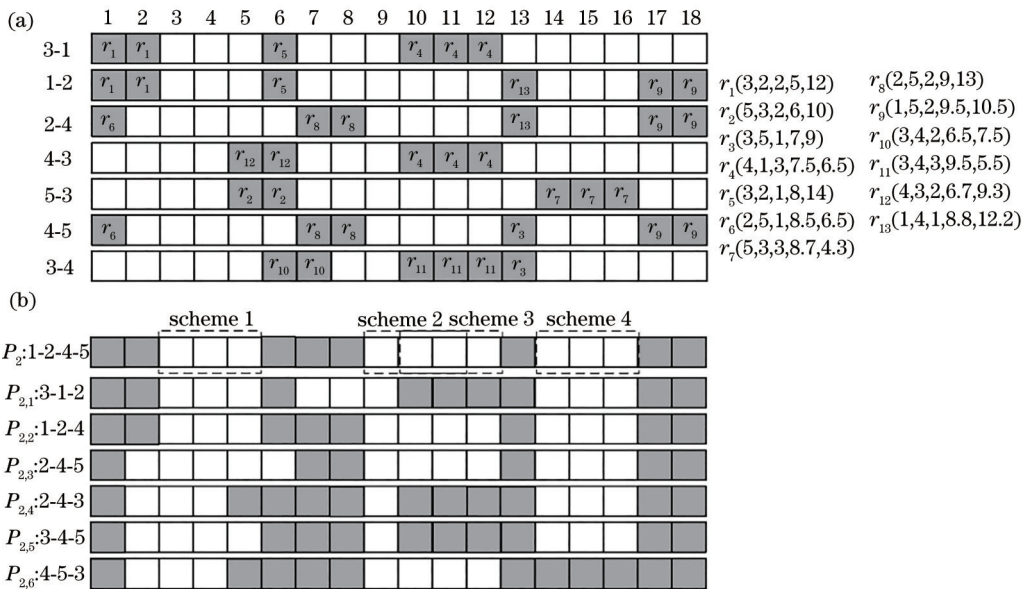


图 3 网络的资源状态。(a) 已建立业务请求; (b) 候选路径与关联路径上的资源状态

Fig. 3 Resource occupation of the network. (a) Established requests; (b) resource occupation of candidate path and relevant paths

图 4 为不同 RSA 方案下各关联路径中 FR 的业务承载力情况, 以关联路径 $P_{2,1}$: 3-1-2 和 $P_{2,6}$: 4-5-3 为例, 详细说明了在方案 1 到方案 4 下, 路径中资源的分布状态以及路径中各空闲 SB 对应的

$Y(X_j^{SB})$ 值。

以预分配方案下的路径 $P_{2,1}$: 3-1-2 为例说明关联路径中 FR 业务承载力的具体计算过程。假设业务带宽需求集合为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, 且呈均匀分布,

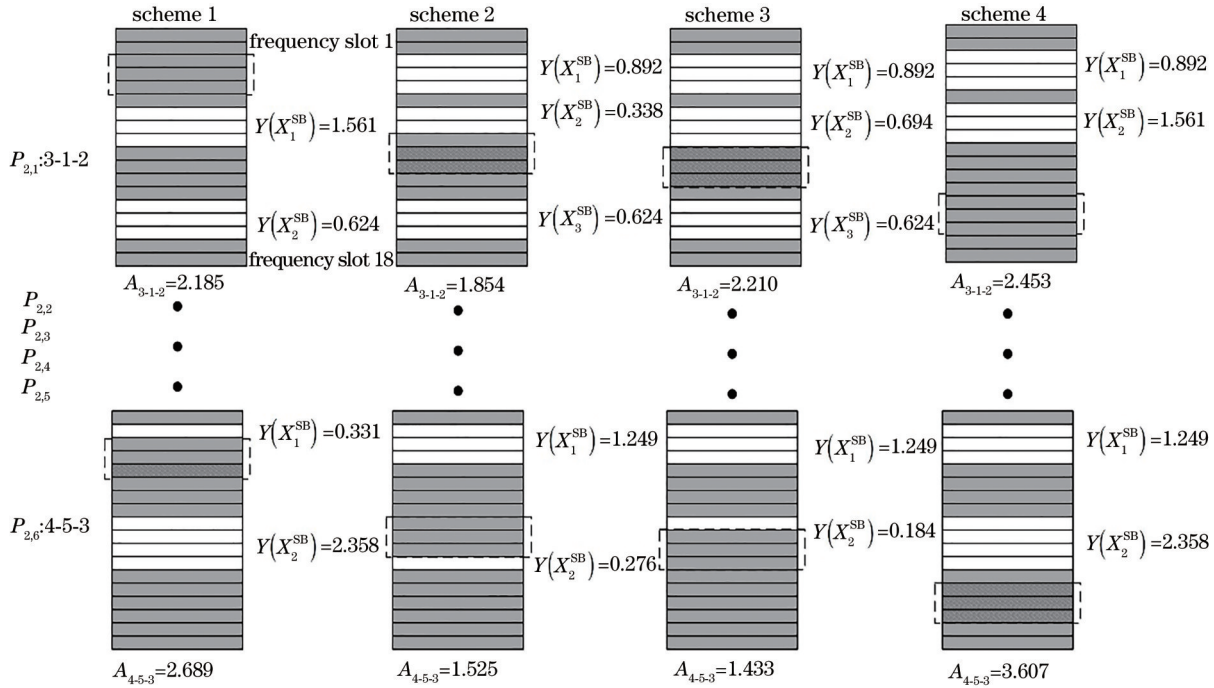


图 4 不同 RSA 方案下各关联路径中空闲资源的业务承载力

Fig. 4 Service carrying capacity of free resources in each relevant path of different RSA schemes

根据图 3(b)中 $P_{2,1}$ 的资源分布状态可知,采取方案 1 服务该业务请求时, $P_{2,1}$ 上的频隙 3-频隙 5 会由空闲状态变为占用状态, $P_{2,1}$ 上存在两个空闲 SB, 由 (1) 式可知, 两个空闲 SB 的业务承载力分别为 $Y(X_1^{SB}) = 1.561$ 、 $Y(X_2^{SB}) = 0.624$ 。根据 (5) 式得到该预分配方案下路径 $P_{2,1}$ 上 FR 的业务承载力 $A_{3-1-2} = A_{P_{2,1}} = 1.561 + 0.624 = 2.185$ 。方案 2 到方案 4 中 $A_{P_{2,1}}$ 的计算过程与上述步骤类似, 表 1 为不同 RSA 方案下关联路径 $P_{2,1} \sim P_{2,6}$ 中 FR 的业务承载力。可以发现, 采取方案 4 后, 所有关联路径 FR 的业务承载力最高, χ_{P_2} 最大。即在成功服务当前业务的情况下, 该频谱分配方式产生的频谱碎片更

表 1 各关联路径中空闲资源的业务承载力

Table 1 Service carrying capacity of free resources in each relevant path

Relevant path	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3	Scheme 4
$P_{2,1}$	2.185	1.854	2.210	2.453
$P_{2,2}$	1.910	1.700	1.700	2.178
$P_{2,3}$	2.425	7.692	7.692	8.170
$P_{2,4}$	1.369	1.873	2.057	1.662
$P_{2,5}$	1.702	4.577	4.761	3.867
$P_{2,6}$	2.689	1.525	1.433	3.607
χ_{P_2}	12.280	19.221	19.853	21.937

少, 为后续请求成功建立光路的概率更大。综上所述, 应将路径 P_2 上的频隙 14~频隙 16 分配给该业务请求。

3 算法描述

MSCC 算法为新到达业务请求建立光路的过程可分为两个子阶段, 即路由选择阶段和频谱分配阶段。

1) 路由选择阶段: 为网络中任意源节点 (s 个)、目的节点 (d 个) 对利用 K 最短路径算法离线计算出 K 条跳数最短的备选路径, 分别存入各个源、宿节点对的候选路径集 $P_{s,d}$ 中。同时, 根据备选路径包含的链路信息获取其关联路径信息, 分别存入各个备选路径的关联路径集 M_P 中。

2) 频谱分配阶段: 依据到达业务请求的源、宿节点, 从其候选路径集 $P_{s,d}$ 中依次选择路径, 为业务请求寻找满足需求的空闲频谱资源。即从当前候选路径中, 找到所有满足业务带宽需求的候选 SB。如果不存在, 则从候选路径集中继续寻找下一条备选路径的可用资源。若 K 条最短路径均不存在满足要求的候选 SB, 则阻塞该请求。如果当前候选路径存在可用资源, 则针对每个候选 SB 根据 (4) 式计算预分配方案后当前候选路径的所有关联路径中空闲资源的业务承载力 χ_P , 并挑选 χ_P 最大的分配方

式建立光路。

MSCC 算法的目的是在建立光路过程中寻找最大化所有关联路径中空闲资源业务承载力的

方案,尽可能为后续请求留下更多较大业务承载力的空闲 SB,以减少频谱碎片的产生,具体流程如图 5 所示。

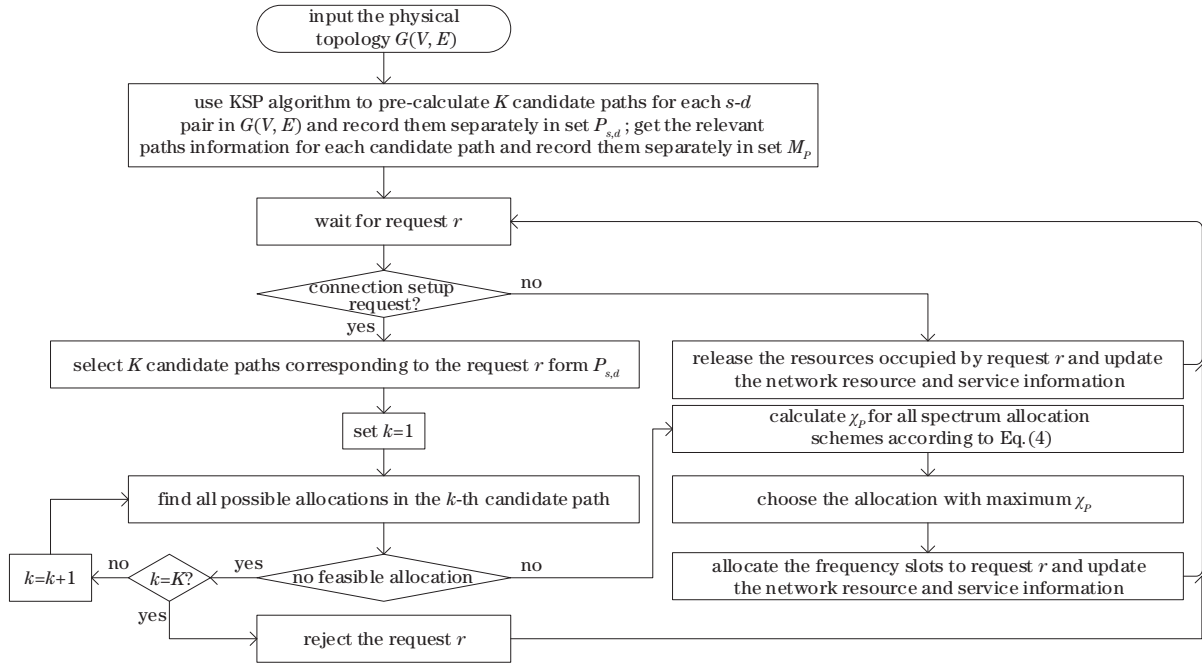


图 5 MSCC 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the MSCC algorithm

MSCC 算法的路由阶段采用离线计算,不计入整体时间复杂度,其时间复杂度主要取决于频谱分配过程。候选路径中寻找空闲 SB 最坏情况下的时间复杂度为 $O(N \cdot F)$ 。其中, N 为网络节点数,任何候选路径中的链路数应小于 N , F 为每条链路上的频隙数。所选路径的关联路径数与其链路数有关,链路数越多,其关联路径数就越多,每条链路与其相邻链路组成的关联路径数不超过 $N \cdot (N - 1) / 2$, 所选路径的关联路径数小于 $N \cdot [N \cdot (N - 1) / 2]$ 。假设所选路径中找到的可用空闲 SB 数为 I , 每个关联路径包含两条链路,每个预分配方案下关联路径中空闲资源业务承载力的时间复杂度不超过 $O\{N \cdot [N \cdot (N - 1) / 2] \cdot 2 \cdot F\} = O(N^3 \cdot F)$, 则所选路径上所有预分配方案的时间复杂度不超过 $O(I \cdot N^3 \cdot F)$, MSCC 算法的时间复杂度不超过 $O[K \cdot (N \cdot F + I \cdot N^3 \cdot F)] = O(K \cdot I \cdot N^3 \cdot F)$ 。

4 仿真结果及数据分析

采用 14 节点的美国国家科学基金网 (NSFNET)^[8] 和 11 节点的泛欧洲 Cost239^[15] 网络拓扑验证本算法的性能,并将其与首次适合 (FF)^[5]、

MCLS^[11] 及最小碎片化-1 (MF1)^[12] 算法进行对比实验。假设每个光纤链路包含 358 个频隙,每个频隙的宽度为 12.5 GHz。业务到达速率服从参数为 λ 的泊松分布,业务持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布,即全网总负载为 λ/μ ,单位为 erl。业务请求占用频隙数量在区间 $[1, 10]$ 上均匀分布,仿真时, $\mu = 0.1, K = 4$ 。为了对比不同频谱分配策略,四种算法都是在选定的 K 条备选路径中依次按设计的频谱分配策略进行频谱分配,一旦某条备选路径找到合适的 SB 便停止搜索。每次仿真中生成 10^5 个请求,通过选取不同的随机种子值,将仿真过程重复执行 30 次并取均值,数据的置信水平为 95%。仿真指标为带宽阻塞率^[16]、资源利用率^[17] 和链路平均碎片率。基于熵的碎片度量方法^[18-19] 常用来量化链路上的频谱碎片化状态,因此,引入链路平均碎片率 (LAFR) 验证 MSCC 算法在降低网络频谱碎片化程度方面的性能,该指标能反映网络中平均每条链路上频谱资源的碎片化程度,可表示为

$$\varphi_{\text{LAFR}} = \frac{\sum_{l \in E} \sum_{u \in U_l} \frac{\rho_u}{F} \ln \frac{F}{\rho_u}}{L}, \quad (6)$$

式中, U_l 为链路 l 上的空闲 SB 集合, ρ_u 为链路中第 u 个 SB 包含的连续空闲 FS 数。可以发现, φ_{LAFR} 值越小, 网络中每条链路空闲频谱资源的连续性程度越高, 碎片率越低, 能更好地承载后续具有不同带宽需求的业务请求, 算法的性能也更优越。

图 6 为两种网络拓扑下不同算法的带宽阻塞率。可以发现, 各算法的带宽阻塞率均随着网络负载的增加逐渐提升。在相同负载情况下, MSCC 算法的带宽阻塞率性能优于其他三种算法, FF 算法的带宽阻塞率性能最差, 而 MCLS 和 MF1 算法的带宽阻塞率性能介于二者之间, 且 MCLS 算法优于 MF1 算法。FF 算法将业务集中在频率轴一侧, 找到首个

空闲资源块立即建立光路, 不考虑光路动态建立与释放过程中生成的频谱碎片, 导致频谱轴上空闲资源的连续程度较低, 阻塞性能最差。MF1 算法以减少路径中的频谱碎片为优化目标, 尽可能降低光路建立后的频谱碎片化程度, 在一定程度上缓解了业务的阻塞。MCLS 算法致力于降低频谱分配过程中对邻接链路间对齐空闲频谱的影响, 带宽阻塞性能得到了进一步提升。相比上述三种算法, MSCC 算法的阻塞性能更优, 原因是 MSCC 算法考虑了相邻两侧承载业务持续时间的影响, 在频谱分配过程中, 考虑所选路径的关联路径中空闲资源的分布状况, 尽最大限度保留业务承载力更大的空闲频谱。

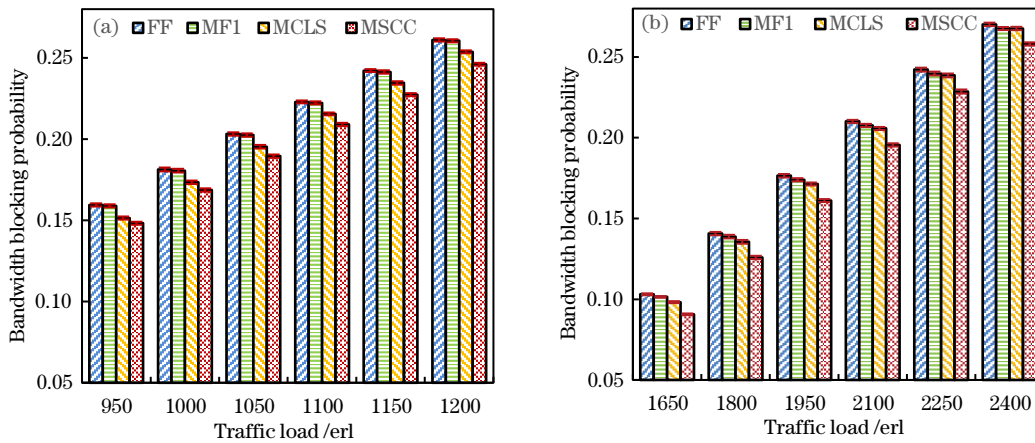


图 6 不同算法的带宽阻塞率。(a) NSFNET; (b) Cost239

Fig. 6 Bandwidth blocking probability of different algorithms. (a) NSFNET; (b) Cost239

图 7 为两种网络拓扑下不同算法的链路平均碎片率。可以发现, 随着网络负载的增加, 所有算法的链路平均碎片率整体均呈下降趋势。原因是网络负载的提升使空闲频谱资源逐渐变少, 更多光路的动态建立与释放进一步加剧了频谱的碎片化程

度。此外, 在相同负载下, MSCC 算法的链路平均碎片率最低, FF 算法的链路平均碎片率最高, MF1 和 MCLS 算法的链路平均碎片率位于二者之间。原因是 FF 算法不考虑当前频谱分配策略对网络整体空闲资源分布的影响, 找到首个满足业务带宽需

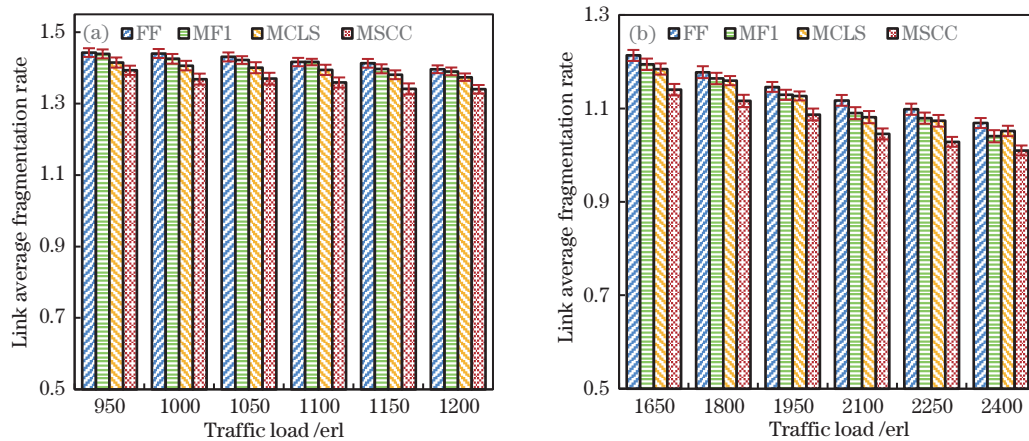


图 7 不同算法的链路平均碎片率。(a) NSFNET; (b) Cost239

Fig. 7 Link average fragmentation rate of different algorithms. (a) NSFNET; (b) Cost239

求的空闲频谱块后立即进行分配;MF1和MCLS算法分别考虑到优化路径中的频谱碎片并减少邻接链路间频谱不对齐产生的频谱碎片,降低了频谱的碎片化程度;而MSCC算法尽可能预留关联路径中业务承载力较高的频谱块,以降低光路建立对网络中空闲频谱连续性的影响,使链路中的空闲资源更加集中,进一步降低了频谱碎片化程度。

图 8 为两种网络拓扑下不同算法的资源利用

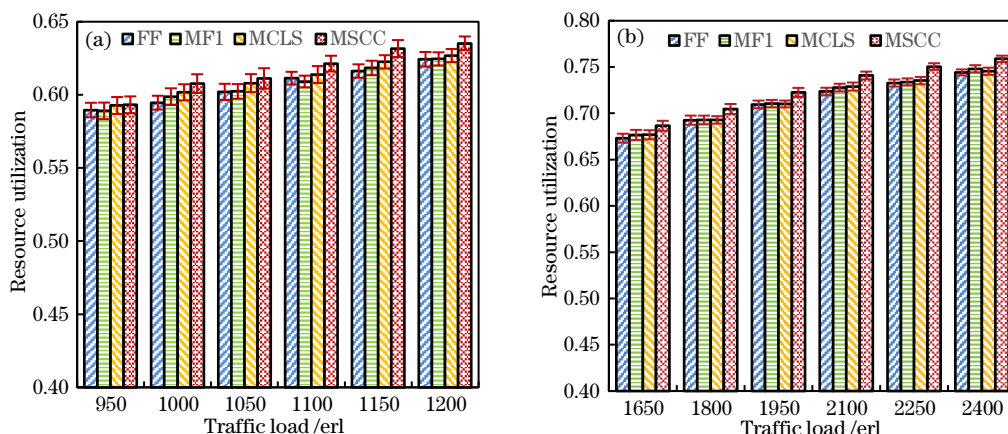


图 8 不同算法的资源利用率。(a) NSFNET; (b) Cost239

Fig. 8 Resource utilization of different algorithms. (a) NSFNET; (b) Cost239

5 结 论

针对 EON 中的频谱碎片问题,提出了一种最大化业务承载力的碎片感知 RSA 算法。该算法减少了资源分配过程对邻接链路间对齐空闲资源连续性的影响,尽可能在为当前业务请求建立光路后留下更多关联路径中业务承载力高的空闲频谱块,有利于提升网络中空闲频谱资源的连续性及可用性,减少频谱碎片的产生。仿真结果表明,相比其他算法,该算法能在减少带宽阻塞、降低链路平均碎片率的同时提升资源利用率。

参 考 文 献

- [1] Zhang S Y, Yeung K L. Dynamic service provisioning in space-division multiplexing elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(11): 335-343.
- [2] Zhu W, Li J, Pei L, et al. Analysis and optimization of an instantaneous frequency measurement based on polarization time delay interference[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2107001.
朱伟,李晶,裴丽,等.基于偏振延时干涉的瞬时频率测量系统分析与优化[J].光学学报,2021,41(21): 2107001.
- [3] Liu Y, Li J, He Y J, et al. Quadruple frequency tunable symmetrical triangular waveform signal generator based on Dual-Parallel Mach Zehnder modulator and Balanced Photodetector[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 1906005.
刘元,李晶,贺永娇,等.基于双平行马赫曾德尔调制和平衡光电探测的四倍频可调对称三角形函数波形信号发生器[J].光学学报,2021,41(21): 1906005.
- [4] Behera S, Das G. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with minimal disruption[C]//2020 National Conference on Communications (NCC), February 21-23, 2020, Kharagpur, India. New York: IEEE Press, 2020: 19510248.
- [5] Xuan H J, Wang Y P, Xu Z Q, et al. Node security-aware spectrum allocation algorithm in elastic optical networks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1206002.
宣贺君,王宇平,徐展琦,等.弹性光网络中考虑节点安全性的频谱分配算法[J].中国激光,2016,43(12): 1206002.
- [6] Li L, Li H J. Performance analysis of novel routing and spectrum allocation algorithm in elastic optical networks[J]. Optik, 2020, 212: 164688.

- [7] Lechowicz P, Tornatore M, Wlodarczyk A, et al. Fragmentation metrics and fragmentation-aware algorithm for spectrally/spatially flexible optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(5): 133-145.
- [8] Liu Y, He R X, Wang S C, et al. Temporal and spectral 2D fragmentation-aware RMSA algorithm for advance reservation requests in EONs[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 32845-32856.
- [9] Lu W, Zhu Z Q. Malleable reservation based bulk-data transfer to recycle spectrum fragments in elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 2078-2086.
- [10] Chen X, Li J H, Zhu P K, et al. Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(11): 1064-1074.
- [11] Sone Y, Hirano A, Kadohata A, et al. Routing and spectrum assignment algorithm maximizes spectrum utilization in optical networks[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. New York: IEEE Press, 2011: 12356224.
- [12] 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.
- [13] Chen H R, Zhao Y L, 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.
- [14] Wan X, Wang L, Hua N, et al. Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks [C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 12049921.
- [15] 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.
- [16] Yuan J L, Ren Z B, Zhu R J, et al. A RMSA algorithm for elastic optical network with a tradeoff between consumed resources and distance to boundary [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 238-247.
- [17] 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.
- [18] Wright P, Parker M C, Lord A. Simulation results of Shannon entropy based flexgrid routing and spectrum assignment on a real network topology[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), London, UK. London: Institution of Engineering and Technology, 2013: 1-3.
- [19] 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.