

基于光路负载均衡和邻域匹配的串扰感知资源分配方法

刘焕淋, 胡俊岭, 任 杰, 胡会霞, 唐 畅, 陈浩楠

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对空分复用弹性光网络(Space Division Multiplexing-Elastic Optical Networks, SDM-EONs)的芯间串扰和频谱碎片化问题, 该文提出一种考虑业务持续时间、光路邻域资源匹配度及芯间串扰的路由频谱纤芯分配算法. 在业务的路由选择阶段, 该文设计基于光路负载均衡和频谱碎片减少的路由策略; 在纤芯选择阶段, 设计兼顾纤芯负载及减少纤芯间串扰的纤芯选择方法; 在时-频资源块分配阶段, 设计考虑时-频资源碎片变化小和邻域匹配度变化小的资源分配方法. 仿真结果表明, 该文所提算法可以降低网络带宽阻塞率和提高频谱资源的使用效率.

关键词: 资源分配; 串扰感知; 光路负载均衡; 邻域匹配度; 频谱碎片; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)11-2746-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211049

Crosstalk Aware Resource Allocation Method Based on Lightpath Load Balancing and Neighborhood Matching

LIU Huan-lin, HU Jun-ling, REN Jie, HU Hui-xia, TANG Chang, CHEN Hao-nan

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To solve the problems of inter-core crosstalk and spectrum fragmentation in space division multiplexing-elastic optical networks(SDM-EONs), a routing spectrum core allocation with holding time, lightpath's neighborhood matching degree and inter-core crosstalk(TMD-XT-RSCA) is proposed. In the service routing stage, a routing strategy is designed to balance the lightpath's load and reduce resource fragment. In the core selection, a core selection method is designed to balance the fiber core's load and decrease inter-core crosstalk. In the time-spectrum block allocation stage, a resource allocation method through considering small change of time-spectrum fragmentation and small change of neighborhood matching degree is designed. The simulation results show that the proposed TMD-XT-RSCA algorithm can reduce the bandwidth blocking probability and improve the spectrum utilization.

Key words: resource allocation; crosstalk aware; lightpath load balancing; neighborhood matching degree; spectrum fragmentation; bandwidth blocking probability

1 引言

近年来,随着物联网发展和6G应用的兴起,网络需求多样化呈指数增长^[1,2].传统的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络采用固定的频谱粒度和单一的调制格式,降低了频谱资源使用效率,无法满足灵活多变带宽的业务需求.而基于光正交频分复用技术的弹性光网络(Elastic Optical Networks,

EONs)具有更大的灵活性和可扩展性,可根据业务请求速率灵活分配带宽资源,并自适应选择信号的调制格式^[3],提高了频谱资源的使用效率.同时,采用多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)的空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术从物理结构上对光纤进行成倍的容量扩容^[4].将空分复用技术与弹性光网络结合的空分复用弹性光网络(Space Division Multiplexing-Elas-

收稿日期:2021-08-04;修回日期:2021-11-28;责任编辑:覃怀银

基金项目:国家自然科学基金(No.51977021);重庆市自然科学基金面上项目(No.2019jcyj-msxmX0613, No.2020jcyj-msxmX0682);重庆市教育委员会科学技术研究项目(No.KJQN201900635)

tic Optical Networks, SDM-EONs), 具有频谱分配方式灵活、传输容量大、资源使用效率高等优点, 可有效支持灵活带宽业务的传输需求。

但是, SDM-EONs 在提供大容量的同时, 路由频谱纤芯分配 (Routing Spectrum Core Allocation, RSCA) 方法中产生的频谱碎片和芯间串扰 (Inter-Core Crosstalk, ICXT) 等问题影响网络的资源利用率和信号传输性能^[5]。

针对频谱资源的碎片化问题, 碎片整理是网络在适当时刻将频谱碎片聚合成较大可用频谱块, 以满足业务带宽需求^[6]。文献[7]提出一种基于多准则决策的碎片整理业务迁移新路由的方案提高频谱碎片使用效率。文献[8]提出基于多准则决策的智能碎片检测方法。而碎片避免旨在为业务分配频谱时尽量避免频谱碎片的产生^[9]。文献[10]提出 3 种基于碎片感知和时间感知的启发式算法, 寻找满足业务需求的时-频资源块。上述碎片整理和碎片避免策略可以在一定程度上提高频谱使用效率。

除了频谱碎片问题, SDM-EONs 还面临着纤芯分配的空域碎片和业务持续时间导致的时间碎片问题。文献[11]提出时间-频谱-纤芯 3 维碎片度量方法, 并提出最小频谱碎片变化量的 RSCA 算法。针对时间敏感的业务。文献[12]在 EONs 中引入时间-频谱资源度量准则, 提出一种频谱边界命中的路由调制等级频谱分配算法。这些策略因为考虑了时间碎片避免的策略, 进一步提高了资源使用效率。

当网络负载加重时, 可用频谱和纤芯资源减少, 重配置业务路由和有效的资源分配策略可进一步增加业务成功传输的概率。针对混合速率业务, 文献[13]提出一种基于频谱分区和业务重配置机制的碎片避免末端频谱匹配的频谱分配 (Fragmentation-Avoiding Spectrum Assignment based on Spectrum Partion, First-Last-Fit and Reconfiguration Mechanism, FASA-SP-FLF-RM) 算法, 业务均衡地分配在各频谱区间, 有效减少了频谱碎片和提高了频谱资源的使用效率。文献[14]提出一种基于时-频联合分区的碎片避免频谱分配 (Fragmentation-Avoiding Spectrum Assignment strategy based on Time-Spectrum Partition, FASA-TSP) 和重配置路由的频谱冲突避免策略, 提高了业务成功传输的概率。

上述研究中, 文献多考虑 SDM-EONs 资源的频谱碎片或时-频资源碎片问题, 少有考虑纤芯间的 ICXT 问题, 而 ICXT 是多芯光纤中影响业务传输性能的重要因素^[15,16]。为此, 文献[15]提出了混合超级信道的 RSCA 算法, 在考虑 ICXT 情况下灵活利用空域和频域资源构建超级信道传输业务。文献[16]引入频隙 (Frequency Slot, FS) 重叠指数来检测频谱重叠度, 判断业务受到

ICXT 影响程度。文献[17]提出串扰感知的最小代价路由频谱纤芯和时间分配方案 (Routing Spectrum Core Time Allocation based Least Cost, RSCTA-LC) 方案, 从空、时、频三个资源维度考虑串扰影响代价, 设计最小化纤芯使用数和 ICXT 的资源分配算法。

为进一步减少 ICXT 和网络资源碎片化问题, 本文提出一个考虑业务持续时间、光路邻域匹配度及芯间串扰的路由频谱纤芯分配 (Routing Spectrum Core Allocation considering service holding Time, the neighborhood Matching Degree and inter-core Crosstalk, TMD-XT-RSCA) 算法。

2 ICXT 问题

在 SDM-EONs 中, 同一光纤的多个纤芯间因纤芯间距离较近, 业务占用相邻纤芯的相同频隙资源将产生频谱重叠, 则光信号功率容易泄露至相邻纤芯, 从而造成业务的 ICXT 加重, 影响业务传输质量^[4], 且 ICXT 随业务传输距离的增加而增加。现有研究表明^[15-17]: 通过在网络层设计频谱块不相邻的资源分配方法和限制路由的长度, 可以限制 ICXT 对信号传输性能影响。图 1 为 7 芯光纤的 ICXT 示意图。

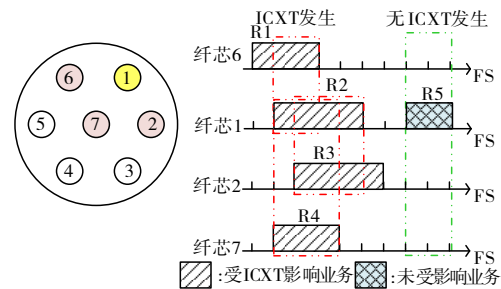


图1 ICXT 示意图

根据文献[15]中提出的串扰计算模型, 由式(1)计算单位传输长度的 ICXT 增量 h , 其中, $\eta, r, \beta, \omega_{th}$ 分别表示耦合系数、弯曲半径、传播常数以及芯间距; 将 h 代入式(2), 计算 MCF 中纤芯串扰, 在式(2)中, XT 表示纤芯受影响的串扰值, n 表示纤芯的相邻纤芯数, L 表示光纤长度。

$$h = \frac{2\eta^2 r}{\beta\omega_{th}} \quad (1)$$

$$XT = \frac{n - n \cdot \exp[-(n+1) \cdot 2hL]}{1 + n \cdot \exp[-(n+1) \cdot 2hL]} \quad (2)$$

根据文献[15], 当纤芯中没有业务时, 对相邻纤芯不产生串扰影响。因此, 本文根据业务占用 FS 重叠指数判断业务分配在纤芯上产生频谱重叠的数目, 并由频谱重叠指数修正串扰值计算模型, 如式(3)和式(4)。

$$XT_{c-a} = \frac{1 - \exp(-2hL)}{1 + \exp(-2hL)} \quad (3)$$

$$XT_c = \sum XT_{c-c_a} \quad (4)$$

上式中, XT_{c-c_a} 表示纤芯 c 和其相邻、且占用相同频谱索引号的纤芯 c_a 间的串扰, XT_c 表示传输路径上所选纤芯受到的总串扰值。

3 TMD-XT-RSCA 算法

本文所提 TMD-XT-RSCA 算法综合考虑了纤芯的空间资源、频谱资源和时间资源特性, 根据业务请求, 为业务选择负载较轻、消耗频谱资源较少、产生时间-频谱资源碎片和串扰影响较小的路由、纤芯、频谱和时间资源块。

3.1 基于路径负载和跳数的路由选择策略

根据业务请求, 在 SDN-EONs 中选择 K 条候选的最短路径。根据优先选择路径负载均衡、资源消耗较少和碎片化程度轻的思想, 计算 K 条候选路径的权重值, 并根据权重值对 K 条备选路径降序排序。其中, 路径权重值计算如式(5)。

$$W_{P_k} = \frac{\sum_{c=1}^{|C|} \sum_{f=1}^F f_{P_k}^{c,f}}{N_r \times h_k} \times \frac{FB_{\max}}{B_{P_k}} \quad (5)$$

在式(5)中, C 为纤芯集合, F 为纤芯上的频隙数; $f_{P_k}^{c,f}$ 为路径 k 纤芯 c 频隙 f 的占用状态, 若被业务占用, 值为 0, 否则, 为 1; h_k 为路径 k 的跳数, N_r 为业务所需频隙数, B_{P_k} 为路径 k 的可用频谱块数目, 该值越小, 频谱碎片越少; FB_{\max} 为候选路径中最大空闲频谱块的频隙数。式(5)计算值越大, 代表路径的负载越轻、业务占用频谱资源少且路径的频谱碎片化小。

3.2 基于串扰感知和负载均衡的纤芯选择策略

在纤芯选择中, 综合考虑纤芯分配引起串扰的芯间重叠频隙数目和纤芯的负载, 设计纤芯权重公式, 根据计算出的纤芯权重值, 对路径中的纤芯升序排列, 优先选择权重小的纤芯承载业务, 纤芯 c_i 的权重值由式(6)计算。

$$W(c_i) = \sum_{j=1}^F (1 - f_j^{c_i}) + \sum_{j=1}^F \sum_{c'_i \in P_{\text{core}}} \left((1 - f_j^{c_i}) \times (1 - f_j^{c'_i}) \right) \times \xi_1 \quad (6)$$

在式(6)中, 若纤芯 c_i 中第 j 个频隙被业务占用, $f_j^{c_i}$ 值为 0, 否则, 为 1; 若纤芯 c_i 与相邻纤芯 c'_i 的第 j 个频隙的被占用, $f_j^{c'_i}$ 值为 0, 否则, 为 1; P_{core} 为纤芯 c_i 的相邻纤芯集合; ξ_1 为权重因子。式(6)计算的值越小, 表示纤芯 c_i 负载越轻, 与相邻纤芯间的重叠频隙数目也越少。

3.3 基于邻域匹配度的时-频资源块分配策略

对一个新业务 $r(s, d, b, t_s, t_e, t_h)$, 其中 s, d, b 分别为源节点、目的节点和业务带宽, t_s, t_e, t_h 分别为业务传输

的开始时间、结束时间和业务持续时间。为业务选择时-频资源块时, 通过计算业务选择不同频谱块和时间窗产生的时频碎片变化和邻域匹配度变化总值, 选择总值最小的时-频资源块分配给业务。

3.3.1 频谱碎片变化度量

在对业务分配时-频资源块时, 产生的频谱碎片将降低频谱资源使用效率和影响网络对后续业务的服务能力。为了量化时-频资源块分配过程中频域碎片的的变化, 定义频谱碎片变化度量如式(7)和式(8)。

$$FR_i = \left(1 - \frac{FB_{\max}}{\sum_{j=1}^{BL_{bn}} BF_j} \right) \times BL_{bn} \quad (7)$$

$$\Delta FR_i = FR_i^a - FR_i^b \quad (8)$$

其中, FR_i 为业务选择候选路径纤芯中第 i 个频谱块传输业务时产生的频谱碎片化度量值, FB_{\max} 为链路中最大空闲频谱块所包含的频隙数, BF_j 为第 j 个空闲频谱块所包含的频隙数, BL_{bn} 为路径中空闲频谱块的数目。 FR_i^b, FR_i^a 分别为由式(7)计算的第 i 个频谱块分配前、分配后的频谱碎片化程度值。 ΔFR_i 值越小, 则业务分配频谱块后, 网络的频谱碎片化程度变化越小。

图2为业务分配频谱块后的频谱碎片变化示意图。一个带宽为 2FS 的业务请求, 在路径 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 中可找到 5 个可用频谱块, 根据式(7)、式(8)计算值, 选择碎片变化值最小的频谱块。以频谱块 1 为例, 分配业务前的频谱碎片为 $FR_1^b = (1 - 3/8) \times 3 = 1.875$, 分配业务后的频谱碎片为 $FR_1^a = (1 - 3/6) \times 3 = 1.5$ 。其次, 计算采用频谱块 1 传输业务时的频谱碎片变化值为 $\Delta FR_1 = -0.375$ 。同理, 计算采用频谱块 2 和频谱块 5 传输业务时的碎片变化值, 分别为 $-0.375, -0.375, -0.375$ 和 -0.875 。为减少频谱碎片, 在为业务选择频谱块的过程中, 优先选择频谱碎片变化值小的频谱块。在图2中, 选择频谱块 5 分配给业务。

3.3.2 频谱-邻域匹配度度量

频谱-邻域匹配度表示频谱块分配对相邻纤芯和相邻链路产生影响。通过式(9)、式(10)计算相邻纤芯受到频谱分配影响的空闲频隙数和相邻链路受影响的空闲频隙数。最后, 由式(11)计算频谱-邻域匹配度的变化值。

$$I_{LF}^n = \sum_{l \in L} \sum_{i=f_l}^{f_e} SB_l^i \quad (9)$$

$$I_{CF}^n = \sum_{j=f_j}^{f_e} \sum_{c'_i \in P_{\text{core}}} (f_j^{c_i} \times f_j^{c'_i}) \quad (10)$$

$$I_F^n = I_{LF}^n + \xi_2 \times I_{CF}^n \quad (11)$$

其中, I_{LF}^n 为路径的相邻链路受到串扰影响的频隙数, SB_l^i 表示相邻链路 l 中具有相同频隙索引值的频谱块中第 i 个频隙的占用情况, 若频隙被占用, $SB_l^i = 0$, 否则,

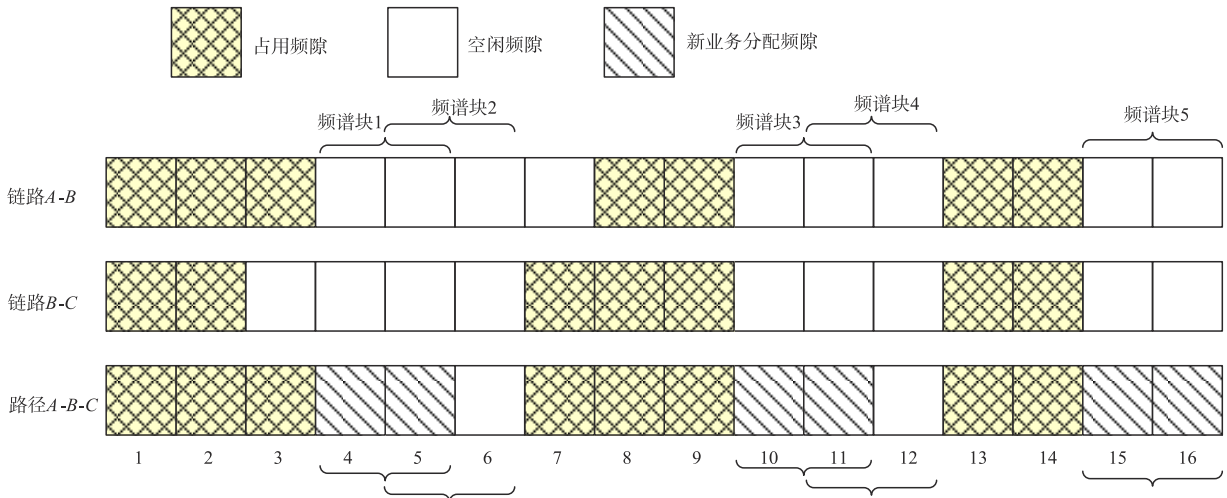


图2 频谱碎片变化示意图

$SB_i^j=1$; L' 为择路径的相邻链路集合, f_s, f_e 分别为频谱块的开始频隙索引值和结束频隙索引值, I_{CF}^n 为相邻纤芯受到串扰影响的频隙数, 参数 ξ_2 表示权重因子, 式(11)计算值 I_F^n 表示业务在分配频谱块中产生串扰的频隙总数, 其值越小, 则频谱块分配对路径频谱一致性影响越小.

图3为业务分配频谱块后频谱-邻域匹配度的变化示意图. 当一个带宽需求为2FS业务选择路径0→1→3的纤芯2作为传输路径, 由频谱一致性和连续性约束知, 可分别选择频隙号为[3, 4]、[4, 5]或[5, 6]的频谱块承载业务, 由式(9)~式(11)计算该业务分配上述3个频谱块后的频谱-邻域度变化值. 首先, 计算相邻链路影响的空闲频隙数, 路径0→1→3的相邻链路有: 0→7、0→2、1→2、3→4; 选择的频谱块在相邻链路上的状态是占用, 则代表业务分配资源后对此链路资源使用无影响. 由图3知, 对上述3个不同频谱块, 由式(9)得到相邻链路受到影响的空闲频隙数分别为3、2和5. 根据式(10), 计算相邻纤芯受到影响的空闲频隙数, 由图1所示的纤芯排列顺序知, 与纤芯2相邻的纤芯有纤芯1、3、7; 由图3知, 在链路0→1中, 相邻纤芯中受到影响的空闲频隙数分别为3、3、2. 同理, 在链路1→3中, 相邻纤芯受到影响的频隙数分别为2、3、4. 则路径0→1→3中相邻纤芯受影响频隙总数分别为5、6、6. 最后, 根据式(11)计算频谱块分配影响的频隙总数, 其值分别为13、14、17. 根据资源分配影响总频隙数目最少原则, 选择频隙号为[3, 4]的频谱块承载该业务.

设计频谱碎片变化度和频谱-邻域匹配度变化量较少的原则, 定义式(12)计算业务分配频谱块后的频谱资源变化量 ω_s , 当路径上有多个 ω_s 值最小的频谱块时, 选择 ΔFR_i 最小的频谱块.

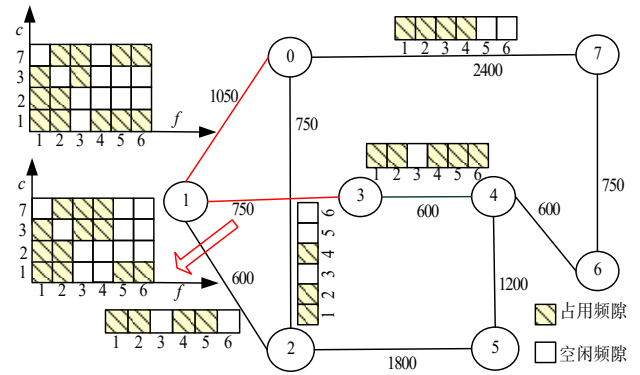


图3 频谱-邻域匹配度示意图

$$\omega_s = \Delta FR_i + I_F^n \quad (12)$$

3.3.3 时间碎片度量

在为业务 $r(s, d, b, t_s, t_e, t_h)$ 选择一个频谱块内的不同时间窗(Time Window, TW)时, 对相邻链路的时-频资源块的可用性将产生影响. 因此, 在时-频资源块分配过程中, 既要满足业务带宽需求的频谱块, 也要满足业务持续时间的需求, 即在业务要求的最早开始时间和最晚结束时间内为业务寻找合适的时-频资源块. 定义业务选择TW后产生的时间碎片变化度量如式(13)和式(14).

$$T_{l,c_i}^y = \sum_{j=1}^{B_y} T_y^j / B_y \quad (13)$$

$$TR_{s_i}^y = \frac{1}{2} \times (|T_r - T_{l,c_i}^p| + |T_r - T_{l,c_i}^n|) \quad (14)$$

其中, T_{l,c_i}^y 为链路 l 的纤芯 c_i 中第 y 个频谱块的平均持续时间, B_y 为第 y 个频谱块包含的FS数, T_y^j 为第 y 个频谱块第 j 个频隙的持续时间; $TR_{s_i}^y$ 表示业务选择频谱块 y 的时间窗 s_i 产生的时间碎片, T_{l,c_i}^p, T_{l,c_i}^n 分别表示业务选

择链路 l 的纤芯 c_i 中第 y 个频谱块相邻的前一个占用频谱块和后一个占用频谱块的平均时间,由式(13)计算. T_r 为业务持续时间. 式(14)值越小,表示业务选择该 TW 对相邻频谱块产生的时间域碎片越小.

3.3.4 时间-邻域匹配度量

为衡量业务在时间窗-频谱块资源分配后对相邻链路的时-频资源块的影响,定义资源块的时间-邻域匹配度如式(17),其中,式(15)表示业务选择频谱块第 i 个时间窗对相邻的受到影响的时-频资源块数目,式(16)表示业务选择频谱块第 i 个时间窗对相邻链路产生影响的时-频资源块数目.

$$\text{IRT}_r^{s_i} = \sum_{i=(f_{s-1}, f_{e+1}), j=t_s}^{j=t_e} F_{i,j} + \sum_{i=f_s, j=(t_{s-1}, t_{e+1})}^{i=f_e} F_{i,j} \quad (15)$$

$$\text{ILT}_r^{s_i} = N_l \times T_{\text{new}} \times f_{\text{new}} - \sum_{l \in L'} \text{SB}_l^{s_i} \quad (16)$$

$$\text{IR}_r^{s_i} = \text{IRT}_r^{s_i} + \text{ILT}_r^{s_i} \quad (17)$$

其中, f_s, f_e 分别表示业务分配频谱块的开始频隙索引值和结束频隙索引值, t_s, t_e 分别为业务占用的开始时间和结束时间, f_{new} 为业务所需频隙数, $F_{i,j}$ 为第 i 个频隙第 j 个时隙的占用情况,若占用, $F_{i,j}=0$, 否则, $F_{i,j}=1$; N_l 为业务选择路径的相邻链路数目, $\text{SB}_l^{s_i}$ 为业务在频谱块内选择时间窗 s_i 时,相邻链路 l 中有相同频隙索引值的时-频资源块被占用数目. 因此,式(17)计算的 $\text{IR}_r^{s_i}$ 值越小,受到业务分配时间窗 s_i 影响的时-频资源块总数越少.

设计时间碎片变化和时-邻域匹配度变化量都较少的原则,定义式(18),计算业务选择频谱块中的某时间窗后受影响的时间资源块数目.

$$\omega_t = \text{TR}_{s_i}^{c_i} + \text{IR}_r^{s_i} \quad (18)$$

综上所述,在业务的时-频资源块分配中,综合考虑频谱块和 TW 分配后产生的频谱碎片、频谱-邻域匹配度变化、时间碎片和时间-邻域匹配度变化最小的原则,定义式(19)计算业务选择不同频谱块和时间窗口后的时-频资源块变化总值.

$$\omega_{s-i} = \alpha \cdot \omega_s + (1 - \alpha) \cdot \omega_t \quad (19)$$

在式(19)中, α 为时-频资源影响的权值系数,取值为 $[0, 1]$. ω_{s-i} 值越小,表示业务的频谱块和和时间窗资源分配对网络的时-频资源块碎片和邻域度变化影响越小.

3.4 TMD-XT-RSCA 算法流程

本文所提 TMD-XT-RSCA 算法综合考虑了 SDM-EONs 的纤芯资源、频谱资源和时间窗资源,设计了时-频资源块碎片减少和串扰感知的 RSCA 算法. 详细的 TMD-XT-RSCA 算法过程如算法 1.

算法 1 TMD-XT-RSCA 算法

输入: SDM-EONs 拓扑 $G(V, E)$, 业务请求 $r(s, d, b, t_s, t_e, t_h)$;

输出: 业务路径编号 k , 纤芯编号 c , 及频谱块和 TW.

- 1: 在 SDM-EONs 中, 根据业务请求 $r(s, d, b, t_s, t_e, t_h)$, 采用最短路径算法, 寻找 K 条候选的最短路径, 由式(5)计算各候选路径权值, 降序排列至路径集合 P 中, 设路径序号 $k=1$;
- 2: 根据式(6)计算候选路径 k 中各纤芯的权重值, 升序排列至纤芯集合 C 中, 令纤芯序号 $c=1$; 根据路径 k 长度确定信号调制格式, 并根据业务需求速率 b 值计算业务所需频隙数目;
- 3: 在路径的纤芯集合 C 中, 依次寻找纤芯 c 中满足业务所需频隙数目的频谱块, 存储在业务的可用频谱块集合 $R1$ 中;
- 4: 根据式(19), 计算频谱块集合 $R1$ 中各频谱块的 ω_{s-i} 值, 升序排列在频谱块集合 $R2$ 中;
- 5: 根据式(4), 依次计算集合 $R2$ 中的频谱块分配引起的芯间串扰值, 如果所选择频谱块导致的串扰值大于串扰阈值 XT_{th} , 转步骤 6, 否则, 转步骤 8;
- 6: 若 $c < |C|$, 则 $c=c+1$, 转步骤 3; 否则, 转步骤 7;
- 7: 若 $k < |P|$, 则 $k=k+1$, 转步骤 2; 否则, 业务单路径的资源分配失败, 执行算法 2, 对业务分割传输;
- 8: 输出业务所选频谱块及的路径编号 k , 纤芯编号 c 及 TW.

3.5 基于业务分割的频谱分配方法

对时-频资源块分配失败的业务, 根据业务带宽需求将业务分割成带宽为 $b_1=i$ 和 $b_2=b-i$ 的两个子业务, 其中, b 为业务需求带宽, i 表示业务分割后的带宽; 根据子业务带宽大小, 在候选路径中为其寻找由式(19)计算值最小的满足串扰要求的时间窗-频谱块资源. 如算法 2 所示.

算法 2 业务分割的频谱分配方法

输入: 拓扑 $G(V, E)$, 资源分配失败的业务 $r(s, d, b, t_s, t_e, t_h)$, $r_1=1$;

输出: 各子业务路径编号, 纤芯编号, 频谱块和时间窗.

- 1: 将资源分配失败的业务速率, 分割成速率为 $b_1=x$ 和 $b_2=b-x$ 的小业务, 其中, $x=1, \dots, \lfloor b/2 \rfloor$;
- 2: 在业务的候选路径集合 P 和纤芯集合 C 中, 根据候选路径长度确定信号最高调制等级, 计算子业务需求的带宽, 依次寻找满足子业务带宽需求的可用频谱块, 保存在集合 R_3 中;
- 3: 若集合 R_3 中有可精准匹配子业务需求带宽的频谱块, 转至步骤 4; 否则, 若 $r_1=1$, 则将子速率 b_1 或 b_2 业务再次分割传输, 令 $r_1=r_1+1$, 转步骤 1; 若 $r_1 \neq 1$, 阻塞业务;
- 4: 计算业务分割后子业务的带宽差, 根据带宽差的大小, 升序排列可用频谱块于集合 $Q1$ 中;
- 5: 根据式(19), 计算可用频谱块集合 $Q1$ 中各频谱块的 ω_{s-i} 值, 并升序重新排列在集合 $Q2$ 中;
- 6: 根据式(4), 依次计算频谱块集合 $Q2$ 中各频谱块的芯间串扰值, 如果频谱块的芯间串扰值小于等于串扰阈值 XT_{th} , 转步骤 7; 否则, 若 $r_1=1$, 则对频谱分配失败的业务子带宽再次分割传输, 令 $r_1=r_1+1$, 转步骤 1; 若 $r_1 \neq 1$, 阻塞业务;
- 7: 输出分割传输的各子业务的路径编号、纤芯编号及频谱块和 TW 资源信息.

4 仿真验证与结果分析

4.1 仿真环境及评价指标

为验证本文所提TMD-XT-RSCA算法的性能,分别在具有14个节点21条链路的NSFNET网络拓扑和24个节点43条链路的USNET网络拓扑中进行仿真验证. 每条链路包含7芯光纤,每根纤芯有360个频隙,每个频隙带宽为12.5 GHz,业务间保护带宽设为1 FS. 候选路径数目 $K=3$, $\xi_1=2$, $\xi_2=2$. 业务请求速率为40 Gb/s、100 Gb/s、400 Gb/s和1000 Gb/s,业务数目服从均匀分布;业务到达率服从参数为 λ 的泊松分布,持续时间服从参数为 μ 的负指数分布;仿真业务数目为 10^5 个^[17]. 其他默认仿真参数如表1所示^[15-17].

表1 仿真参数设置

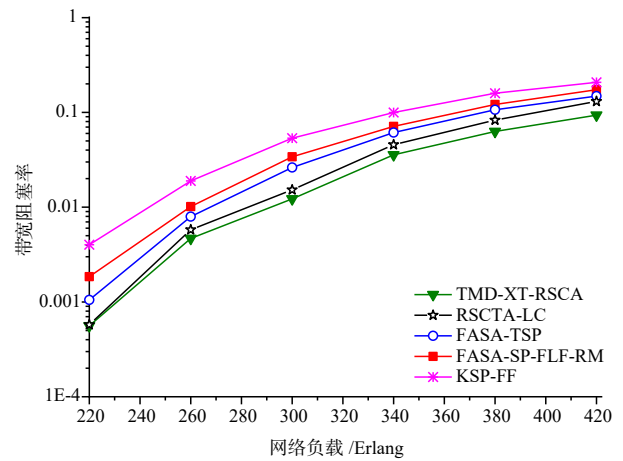
参数	含义	数值
η	耦合系数	4×10^{-4}
r	弯曲半径	50 mm
β	传播常数	$4 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$
ω_{th}	芯间距	45 μm
XT_{th1}	XT 阈值	-14 dB
XT_{th2}	QPSK XT 阈值	-18.5 dB
XT_{th3}	8QAM XT 阈值	-21 dB
XT_{th4}	16QAM XT 阈值	-25 dB
XT_{th5}	32QAM XT 阈值	-27 dB
XT_{th6}	64QAM XT 阈值	-34 dB

表1中,BPSK(Binary Phase Shift Keying)表示二进制相移键控,QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)为正交相移键控,QAM(Quadrature Amplitude Modulation)为正交振幅调制. 为验证本文提出的TMD-XT-RSCA算法的性能,选KSP-FF为基准算法,对比算法为FASA-SP-FLF-RM^[13]算法、FASA-TSP^[14]算法和RSCTA-LC^[17],性能指标为带宽阻塞率(Bandwidth Blocking Probability, BBP)和频谱使用率(Spectrum Utilization, SU)^[17].

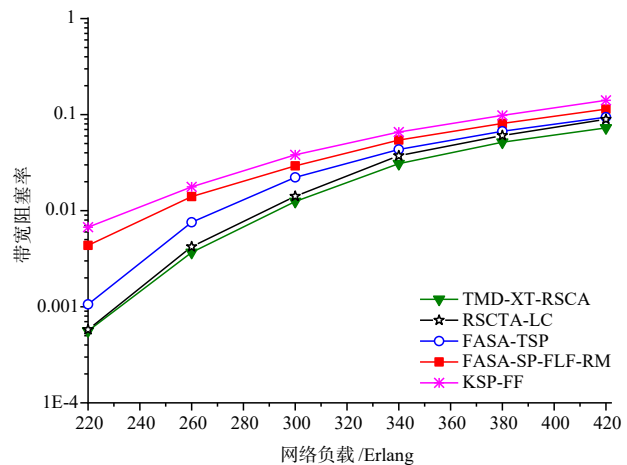
4.2 仿真结果分析

图4为5种算法在不同的网络负载下的带宽阻塞率性能. 从图4(a)和图4(b)可以看出,在相同负载下,基准算法KSP-FF的BBP最大;本文所提TMD-XT-RSCA算法的BBP最小. 这是因为,TMD-XT-RSCA算法在选择路径和纤芯时都考虑了负载均衡和ICXT影响,能更均衡地使用网络的频谱块资源;其次,该算法在资源分配中,选择业务分配后使网络时-频资源碎片化程度变化小和对频谱一致性影响小的频谱块;对资源分配失败的业务,采用业务分割传输方法,进一步减少业务的带宽阻塞概率. 对比算法RSCTA-LC也考虑时-频资源和ICXT的资源分配方法,并对失败业务采用分割传输,但是,RSCTA-LC算法没有考虑频谱块

分配对相邻链路的邻域匹配度影响,故而RSCTA-LC算法的带宽阻塞率略高于本文算法. 对比的FASA-TSP算法虽然考虑时-频分区减少频谱碎片,但是该算法在路由中没有考虑负载均衡,在资源分配中没有考虑ICXT和频谱块对邻域匹配度影响,因此,其BBP性能比RSCTA-LC算法差. 与FASA-TSP相比,FASA-SP-FLF-RM算法采用了频谱分区的频域资源分配策略,但未考虑时间碎片问题,不能避免时-频资源碎片,降低了频谱资源使用效率. 与图4(a)相比,图4(b)显示在USNET网络拓扑下的BBP性能略好一些,这是因为USNET网络拓扑的连通度高于NSFNET,则业务的路由选择和业务分割传输的成功率更大,所以USNET网络的BBP较低.



(a) NSFNET



(b) USNET

图4 不同业务负载下的带宽阻塞率

图5为不同网络负载下5种算法的频谱使用率性能. 随着网络负载的增加,5种算法的频谱使用率逐渐

增加. 在相同负载下, 本文所提 TMD-XT-RSCA 算法的频谱使用率最高. 而同样采用时-频资源分配和串扰感知的 RSCTA-LC 算法的频谱使用率次高, 基准算法 KSP-FF 的频谱使用率最低. 这是因为本文所提 TMD-XT-RSCA 算法在选择频谱块时, 为业务选择时-频资源碎片变化小和对邻接链路影响小的频谱块传输业务, 减少时-频资源碎片的产生, 提高了频谱块资源使用效率. 而对比的 RSCTA-LC 算法虽然也考虑时-频资源块碎片化影响, 但是没有考虑对邻接链路影响的邻域匹配度和纤芯链路的负载均衡, 使网络的资源碎片化程度增加, 降低了资源使用效率. 当负载较大时, 由于 TMD-XT-RSCA 算法在路由选择和纤芯选择中考虑了

负载均衡和碎片影响, 因此其频率使用效率在高负载时的效果更显著. 对比算法 FASA-TSP 采用时-频分区的频谱块分配方式减少频谱碎片, 但该算法对于不能成功传输的业务, 没有利用网络中的碎片资源对业务进行分割传输, 故其频谱使用率较低. 相比 FASA-TSP 算法, FASA-SP-FLF-RM 算法没有考虑频谱块的持续时间特性, 仅仅在频域采用精确命中的频谱分区资源分配方式, 业务动态离开和到达增加了时域和频域资源的碎片化, 故其频谱使用率比 FASA-TS 低, 但其与基准算法 KSP-FF 相比, 该算法考虑了资源的频谱分区, 一定程度上降低了频谱碎片的产生, 因而, 比 KSP-FF 算法的频率使用效率高.

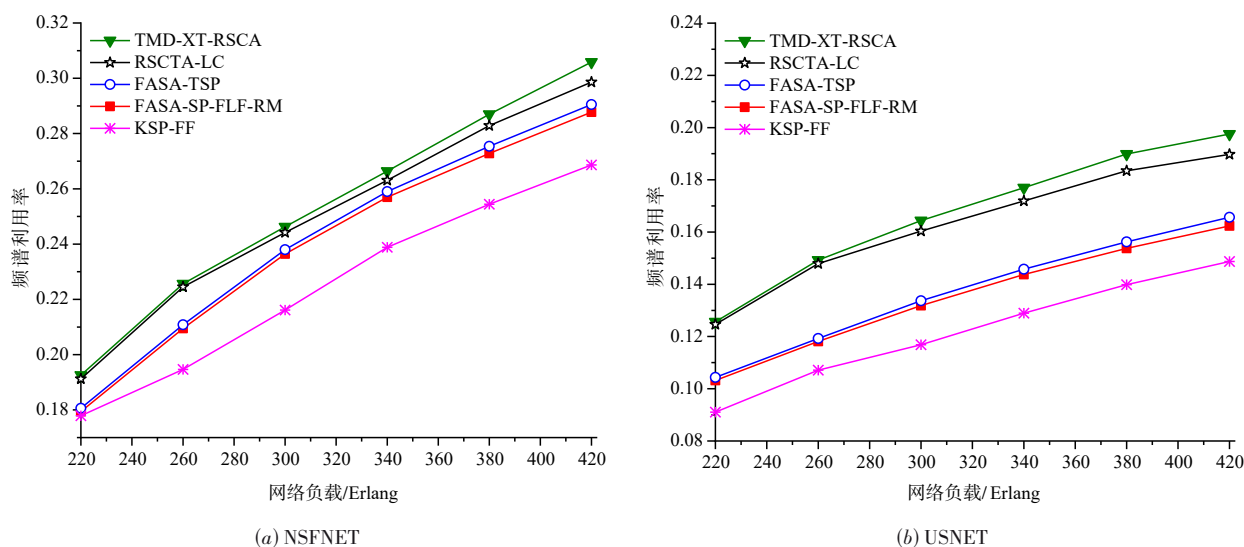


图5 不同业务负载下频谱使用率

5 结论

论文针对 SDM-EONs 中的频谱碎片和 ICXT 问题, 提出一种考虑业务持续时间、邻域资源匹配度及芯间串扰的 TMD-XT-RSCA 算法, 减少频谱碎片的产生, 提高了链路上频谱使用率. 随着未来互联网业务和应用的发展, 提高网络的资源使用效率和网络服务性能对网络运营商和数据应用的发展都至关重要.

参考文献

- [1] 柴蓉, 邹飞, 刘莎, 等. 6G 移动通信: 愿景、关键技术和系统架构[J]. 重庆邮电大学学报, 2021, 33(3): 337-347.
CHAI Rong, ZOU Fei, LIU Sha, et al. 6G mobile communication: vision, key technologies and system architecture [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021, 33(3):337-347. (in Chinese)

- [2] 严朝阳, 方飞, 曹宾, 等. 基于 LoRa 的物联网数据传输系统研究与设计[J]. 重庆邮电大学学报, 2021, 33(3): 354-363.
YAN Chao-yang, FANG Fei, CAO Bin, et al. Research and design of internet of things data transmission system based on LoRa[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021, 33(3): 354-363. (in Chinese)
- [3] AHMED T, RAHMAN S, FERDOUSI S, et al. Dynamic routing spectrum and modulation format allocation in mixed-grid optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(5): 79-88.
- [4] 刘焕淋, 杜理想, 陈勇, 等. 串扰感知的空分弹性光网络频谱转换器稀疏配置和资源分配方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(7): 1718-1725.
LIU Huan-lin, DU Li-xiang, CHEN Yong, et al. Crosstalk-

- aware spectrum converters sparse configuration and resource allocation for space division multiplexing elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(7): 1718-1725. (in Chinese)
- [5] FAEZEH Y, AKBAR G R. Novel crosstalk fragmentation-aware algorithms in space division multiplexed elastic optical networks with considering physical layer security[J]. *Optical Switching and Networking*, 2020, 37(5): 1-9.
- [6] 鲍宁海, 苏国庆, 陈静波. 恢复时间敏感的光网络混合通路保护算法[J]. *重庆邮电大学学报*, 2017, 29(3): 313-319.
BAO Ning-hai, SU Guo-qing, CHEN Jing-bo. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 29(3): 313-319. (in Chinese)
- [7] FAEZEH Y, AKBAR G R, MOHSEN Y N. Fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 1-15.
- [8] ATHARI B A, GHFFARPOUR R A, NICKRAYET M, et al. IF-RSCA: intelligent fragmentation aware method for routing, spectrum and core assignment in space division multiplexing elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 50(27): 284-301.
- [9] FAEZEH Y, AKBAR GR, AMIN G. Fragmentation and time aware algorithms in spectrum and spatial assignment for space division multiplexed elastic optical networks[J]. *Computer Networks*, 2020, 174: 107232.
- [10] CHEN H R, ZHAO Y L. Time-spectrum consecutiveness based scheduling with advance reservation in elastic optical networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(1): 70-73.
- [11] ZHANG J, BAO B W, YAO Q Y, et al. 3D fragmentation metric and RSCA scheme for space division multiplexing elastic optical networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 201595-201605.
- [12] LI X H, YUAN J L, REN Z B, et al. RMSA algorithm for malleable-reservation requests in elastic optical networks [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 57: 102236.
- [13] LIU Huan-lin, LV Lei, CHEN Yong, et al. Fragmentation-avoiding spectrum assignment strategy based on spectrum partition for elastic optical networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7906413.
- [14] LIU Huan-lin, HU Hao, CHEN Yong, et al. Fragmentation-avoiding spectrum assignment algorithm based on time-spectrum partition for elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102020.
- [15] FABRICIO R L, ANTONIO J, JHONATAN R. Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2019, 33(7): 61-73.
- [16] ZHAO Y L, HU L Z, ZHU R J, et al. Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multicore fiber[J]. *IEEE Access*, 2019, 6: 15346-15355.
- [17] TANG F X, LI Y C, SHEN G X, et al. Minimizing inter-core crosstalk jointly in spatial frequency and time domains for scheduled lightpath demands in multi-core fiber-based elastic optical network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(20): 5595-5607.

作者简介



刘焕淋 女, 1970年2月出生于重庆市. 现为重庆邮电大学教授、博士生导师. 主要研究方向为光通信技术和网络.
E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn