引用本文：刘鑫，何荣希，陈晓静. 弹性光网络中基于自适应调制的碎片感知共享通路保护算法[J]. 光通信技术，2020，44(2)：52-58.

弹性光网络中基于自适应调制的碎片感知共享通路保护算法

刘 鑫[1]，何荣希[1]，陈晓静[1,2]

（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：为了提高弹性光网络(EON)的频谱利用率，提出一种基于自适应调制的碎片感知共享通路保护算法。该算法利用频谱块承载权重(SBBW)衡量不同频谱块接纳业务的能力，优先选择SBBW大的链路构成候选工作路径，并利用分配前、后SBBW差值最小的频谱块建立工作路径。然后选择可用频谱块和保护频谱块承载能力大的链路构成候选保护路径，建立保护路径时优先使用分配前、后SBBW差值最小的保护频谱块，建立失败时才选择分配前、后SBBW差值最小的可用频谱块。仿真结果表明：该算法可以降低带宽阻塞率、频谱碎片率和备用容量冗余。

关键词：弹性光网络；共享通路保护；自适应调制；空闲碎片；保护碎片

中图分类号：TN929.11　**文献标识码**：A　**文章编号**：1002-5561(2020)02-0052-07

DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.012　开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

Fragment-aware shared path protection algorithm based on adaptive modulation in elastic optical networks

LIU Xin[1], HE Rongxi[1], CHEN Xiaojing[1,2]

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;
2. Dalian University of Science and Technology, Dalian Liaoning 116052, China)

Abstract: In order to increase the spectrum utilization in elastic optical networks (EON), an adaptive modulation and fragment-aware shared path protection algorithm is proposed. The proposed algorithm uses the spectrum block bearing weight (SBBW) to measure the ability of connection establishment for different spectrum blocks, and prefers the paths including links with larger SBBW as candidate working paths. The working path is established by choosing the spectrum block with the minimum difference of SBBW before and after the allocation. Then, the proposed algorithm selects the paths containing links with larger weight of both available spectrum block and protection spectrum block as candidate protection paths. The proposed algorithm prefers to use the protection spectrum block with the smallest SBBW difference before and after the allocation to establish the protection path. When the establishment fails, the available spectrum blocks with the minimum difference of SBBW before and after the allocation are selected to establish the protection path. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce the bandwidth blocking probability, spectrum fragmentation ratio and spare capacity redundancy.

Key words: elastic optical network; shared path protection; adaptive modulation; idle fragmentation; protection fragmentation

0 引言

弹性光网络(EON)采用正交频分复用(OFDM)技术，可以根据业务带宽需求动态分配合适数量的频隙(FS)，具有灵活的频谱分配方式。此外，EON还支持自适应调制，可依据传输距离选择合适的调制等级，是光网络灵活化、智能化发展的方向[1,2]。EON的资源分配需遵守频谱连续性和频谱邻接性约束，随着光路动态建立与拆除，链路上的可用频谱资源呈离散分布，导致频谱碎片增加，阻塞率升高。因此，如何减少频谱碎片是路由和频谱分配问题中亟需解决的重要问题。不少文献[3-6]都对此问题进行了研究，提出大量碎片感知频谱分配算法，但是，这些算法都未考虑网络生存性问题。EON中光纤链路承载大量业务连接，一旦出

收稿日期：2019-08-28。

基金项目：国家自然科学基金项目(61371091,61801074)资助；大连海事大学“十三五”重点科研项目(3132016318)资助；中央高校基本科研业务费专项资金(3132017078)资助。

作者简介：刘鑫(1995-)，男，辽宁大连人，2017年获得大连海事大学电子信息工程工学学士学位，现为硕士研究生，主要从事弹性光网络共享通路保护及路由算法的研究。2017年获得“大连市优秀毕业生”荣誉称号。



现故障,将造成难以估计的损失,因此,考虑生存性的频谱分配问题已成为 EON 的研究热点。EON 的生存性机制可分为保护和恢复 2 类,不同机制在恢复时间、资源利用率和控制复杂性等方面各具优势[7]。与其它机制相比,共享通路保护(SPP)具有更高资源利用率,已得到业界极大关注[8-11]。文献[8]最早讨论 EON 的 SPP 问题,提出了保守和积极 2 种 SPP 策略。文献[9]以最小化 FS 占用和保护资源占用为目标,建立了共享备份路径保护(SBPP)问题的整数线性规划模型。文献[10]提出了基于距离自适应调制的 SBPP 算法,利用区分共享 FS 代价函数来鼓励选择共享次数多的 FS 建立保护路径。文献[11]提出基于频谱分割的 SPP 算法,将频谱资源分为多个频谱段,每频谱段优先分配给具有相同带宽需求的业务请求,并通过优化链路代价函数来提高频谱共享度。但是,以上文献往往强调提高共享资源利用率,却较少考虑如何减少频谱碎片。

EON 的 SPP 涉及建立工作和保护路径,建立工作路径时仅能使用空闲频谱资源,如果资源分配不当,将导致该路径所经链路的剩余空闲资源出现频谱碎片(空闲碎片)。为了提高共享资源利用率,建立保护路径时应尽可能使用已预留保护资源,只有已预留保护资源不足时,才使用空闲资源。可见,在建立保护路径时,如果对于空闲资源使用不合理,也会导致空闲碎片。另一方面,如果对已预留保护资源使用不恰当(共享不合理),可能导致已预留保护频谱资源零散化。当后续业务连接与已建业务连接的工作路径链路不分离时,已预留保护资源不可共享,导致这些零散化的保护资源(称为保护碎片)无法满足建立保护路径需求。因此,在讨论 EON 的 SPP 问题时,不仅要减少空闲碎片,同时也要尽可能地避免产生保护碎片。但是,目前还未见文献涉及保护碎片问题。

实际上,在考虑生存性的频谱分配中,只有当工作路径和保护路径同时建立成功时,业务连接才成功建立。因此,在频谱分配时如果一味强调提高共享资源利用率,而忽略了避免产生空闲碎片和保护碎片,无疑会导致 2 种碎片增多,将降低为后续业务请求建立工作路径和保护路径的成功率。为解决以上问题,本文提出一种基于自适应调制的碎片感知共享通路保护(AMFA-SPP)算法。

1 问题分析

EON 可表示为 $G(N,E,C)$,其中,N 代表节点集,节点配备可调谐光收发机,节点数为 $|N|$;E 代表双向光纤链路集,链路数为 $|E|$;C 代表每条光纤链路的 FS 集,每条链路总的 FS 数为 $|C|$。业务请求为 $r_i(s_i,d_i,b_i)$,其中,s_i,d_i 为 r_i 的源、目的节点($s_i,d_i\in N$),b_i 为业务请求带宽。为了进一步提高频谱利用率,EON 采用自适应调制技术[3],可在满足信噪比和业务连接速率要求的前提下,通过提高调制等级来减少频谱资源的占用。可采用二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)和正交振幅调制(8QAM、16QAM)等调制格式,不同调制格式的频谱效率及最远无中继传输距离不同。业务请求 r_i 在不同调制方式下所需的 FS 数为:

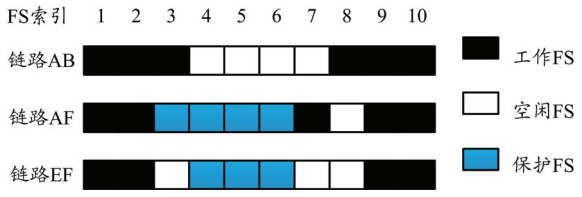
$$f_i=\left\lceil \frac{b_i}{b\cdot s} \right\rceil \tag{1}$$

其中,b=12.5 GHz,为每个 FS 的带宽;s 是采用某种调制格式的频谱效率(单位为 Gb/s)。

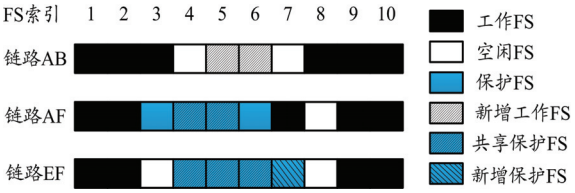
对于每一个到达业务请求 r_i,将为其建立链路分离的工作路径和保护路径。为了提高保护资源利用率,工作路径不经过相同链路的业务连接可共享保护资源。由于工作路径和保护路径的长度往往不同,通常采用不同调制格式,将分配不同数量的连续可用 FS[10]。

EON 的 FS 根据其状态不同可分为空闲 FS、工作 FS 和保护 FS 这 3 类。空闲 FS 是指当前未被占用的 FS,而工作 FS 和保护 FS 分别指被工作路径和保护路径占用的 FS。仅能利用空闲 FS 为业务请求建立工作路径,如果频谱资源分配不合理,可能导致链路上剩余空闲 FS 离散化,不能被后续业务连接使用,会产生空闲碎片。与工作路径不同,建立保护路径时可使用空闲 FS 和保护 FS(为与其工作路径链路分离的其它业务连接预留)。如果该部分保护 FS 满足业务的带宽需求,则无需新预留保护资源。由于工作路径有部分链路重合的业务连接不能共享保护资源,如果已预留的保护资源分配不合理,可能导致保护资源离散化,无法被后续业务请求的保护路径使用,会产生保护碎片。另外,建立保护路径时如果保护 FS 无法满足保护路径的带宽需求,则还需占用相邻空闲 FS 来增加保护资源预留。此时,如果频谱资源分配不合理,也可能导致相邻空闲 FS 产生空闲碎片。

本文以图 1 为例加以说明,图 1(a)为某时刻链路 AB、AF 和 EF 的频谱状态。图 1(b)中,假设到达业务请求 r_1,工作路径经过链路 AB,需 2FS。如果为其分配 FS5、FS6,则对于后续业务请求 r_2(工作路径也经过链路 AB,需 2FS),由于没有长度不小于 2FS 的空闲 FS 块,无法成功建立连接,此时空闲 FS4 和 FS7 即为空闲碎片。又假设业务请求 r_3 的保护路径经过链路 AF,



（a）链路 AB、AF、EF 的频谱状态



（b）空闲碎片和保护碎片

图 1 链路 AB、AF、EF 的频谱状态示意图

需 2FS 保护资源。如果选择 FS4、FS5，则对于后续业务请求 r_4（保护路径也经过链路 AF，且与 r_3 的工作路径部分链路重合，需 2FS 保护资源），由于 r_3 和 r_4 不能共享 FS4、FS5，即使存在可共享的保护 FS3 和 FS6，也无法成功建立连接，FS3 和 FS6 即为保护碎片。再假设业务请求 r_5 的保护路径经过链路 EF，需 4FS 保护资源。由于已预留的保护 FS 无法满足其带宽需求，因此需新预留 1 个空闲 FS 作为保护 FS。如果选择新预留 FS7（分配后保护 FS 包括 FS4~FS7），则对于后续业务请求 r_6（保护路径也经过链路 EF，且与 r_5 的工作路径部分链路重合，需 2FS 保护资源），由于 r_5 与 r_6 不能共享保护 FS4~FS7，则无法成功建立连接，此时空闲 FS3 和 FS8 即为空闲碎片。可见，EON 的 SPP 算法除了关注如何提高共享资源利用率外，还应考虑如何减少空闲碎片和保护碎片。

2 算法描述

AMFA-SPP 算法的目的是提高保护资源共享率，同时采用碎片感知策略以减少空闲碎片和保护碎片，主要包括工作路径建立和保护路径建立 2 个过程。前者在减少频谱资源占用的前提下，尽可能使链路上剩余的空闲 FS 连续，也就是尽量避免产生空闲碎片。而后者除了考虑减少保护资源预留和空闲碎片外，在使用已预留的保护资源时还要考虑使保护 FS 集中化，尽量避免产生保护碎片。

2.1 工作路径建立

当新业务请求到达时，首先调整链路代价值，并用 K 路由算法[12]计算源、宿节点间 K 条最短路径。建立工作路径时，需要在该路径每条链路的相同位置找到足够多（满足其带宽需求）的连续空闲频谱块。因此，每条链路上空闲频谱块所处位置以及包含 FS 数不同，对业务连接能否成功建立的影响也大不一样。链路包含的空闲 FS 数越多、空闲 FS 越集中，则为业务请求成功分配频谱资源的概率越大，连接成功建立概率越大。AMFA-SPP 算法在建立业务连接时，将尽可能留下有利于后续业务连接成功建立的频谱块，也就是要尽量避免产生空闲碎片。为了反映空闲频谱块接纳业务连接的能力，定义链路 $e(e=1,2,\cdots,|E|)$ 中第 j 个空闲频谱块的承载权重为：

$$g_{e,j}=f_{e,j}\cdot\sqrt{f_{e,j}},f_{e,j}\geqslant 1 \tag{2}$$

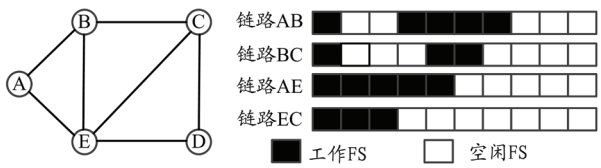
其中，$f_{e,j}$ 表示该空闲频谱块的大小（包含 FS 数）。可见频谱块包含空闲 FS 数越多，其权重越大，承载能力越强。与文献[11]频谱块承载权重与频谱块包含 FS 数呈线性关系相比，式(2)可以更好地突出频谱块越大，其承载能力越强。

为了提高工作路径成功建立的概率，应该优先选择空闲频谱块承载权重值越大的链路构成工作路径。为此，定义链路 e 的工作代价函数为：

$$w_e=\frac{1}{\sum_{j=1}^{j_e}g_{e,j}} \tag{3}$$

其中，j_e 表示链路 e 中空闲频谱块数。可见，链路 e 的空闲 FS 越多、频谱块承载能力越大，其工作代价函数越小，越有机会被工作路径选中，也越有利于成功建立工作路径。

本文对文献[11]和本文的频谱块承载权重定义进行对比，采用的网络拓扑及某时刻链路 AB、BC、AE 和 EC 的频谱状态如图 2 所示。假设此时到达业务请求 r_1，其源、宿节点为 A 和 C。节点 A 和 C 之间存在 2 条最小跳数相同的路径 A-B-C 和 A-E-C 可用于建立工作路径，二者采用相同调制格式，建立业务连接均需 4FS。依据文献[11]，可算出链路 AB、BC、AE 和 EC 的工作代价函数分别为 0.1、0.071、0.1 和 0.071，从而可得出路径 A-B-C 和 A-E-C 的工作代价函数都为 0.171。尽管二者频谱状态不同，但是其工作代价函数值相同，也就是说选路时并无区别，但若选择路径 A-



（a）网络拓扑 （b）链路 AB、BC、AE 和 EC 的频谱状态

图 2 网络拓扑及链路 AB、BC、AE 和 EC 的频谱状态示意图

B-C 作为工作路径,会导致频谱分配不成功。而本文提出的 AMFA-SPP 算法利用式(2)、式(3)计算链路 AB、BC、AE 和 EC 的工作代价函数,分别为 0.125、0.076、0.089 和 0.054,则路径 A-B-C 和 A-E-C 的工作代价函数分别为 0.201 和 0.143,路径 A-E-C 被选为 r_1 的工作路径,可以成功建立工作路径。实际上,从图 2 也可以直观看出,路径 A-E-C 的碎片数量更少,空闲频谱资源更集中,与路径 A-B-C 相比,它更有利于工作路径频谱分配成功。

找出 K 条候选路径后,根据距离自适应调制可算出 r_i 在每条候选路径 o_k 上所需分配 FS 数 l_k。由于每条候选路径距离不同,l_k 可能不同。对于每条候选路径 $o_k(k=1,2,\cdots,K)$,选出该路径上所有 FS 数不小于 l_k 的空闲频谱块,构成候选频谱块集 Q_t。如果 Q_t 为空,表示无可用频谱资源建立工作路径,则阻塞该业务请求。否则,表示存在满足条件的候选频谱块。此时,依次取 Q_t 中的每一个可用频谱块进行频谱资源预分配操作。对于该频谱块的每一种分配方式(候选频谱块的 FS 数大于该路径所需分配 FS 数时,存在多种频谱分配方式),分别计算分配前、后所在路径每一条链路 e 的归一化承载权重差值,即:

$$t_{e,j}=\frac{\ln(g_{e,j}^{b}-g_{e,j}^{a})}{\ln g^{\max}} \tag{4}$$

其中,$g_{e,j}^{b}$ 和 $g_{e,j}^{a}$ 分别表示第 j 个频谱块预分配前、后在链路 e 上的承载权重;$g^{\max}=|C|\cdot\sqrt{|C|}$,表示链路 e 上所有 FS 均空闲时的承载权重。

至此,可求出对第 j 个频谱块进行频谱预分配前、后,其所在路径的归一化承载权重差值为:

$$T_j=\sum_{e=1}^{L_j} t_{e,j} \tag{5}$$

其中,L_j 是候选频谱块中第 j 个可用频谱块所在路径的链路数。T_j 越小,则在频谱分配后该频谱块的承载能力损失越小,该路径越有利于成功接纳后续业务连接。

对于第 j 个频谱块,选择 T_j 最小的分配方式作为它的唯一分配方式。当 Q_t 中的每一个频谱块都计算完毕,选择差值最小的频谱块。如果存在多个符合要求的频谱块,则首选所在路径跳数最少的频谱块。如果仍存在多个频谱块,则采用首次适应(FF)法进行选择。若后续能成功找到保护资源,则将该频谱块所在路径作为工作路径,并按照该频谱块的分配方式在相应的 FS 建立业务连接。如果未能成功找到保护路径,则拒绝该业务请求。

2.2 保护路径建立

为了保证工作路径、保护路径链路分离,建立保护路径时首先从网络拓扑中删除工作路径所经链路。保护路径的可用频谱块包括保护 FS 和空闲 FS,定义链路代价函数时应考虑可用频谱块的承载能力大小。该值越大,意味着包含空闲 FS 和保护 FS 数越多、频谱资源越集中,越有利于成功建立保护路径。因此,链路的代价函数应越小。此外,从减少保护资源预留来看,也应鼓励选择已预留保护频谱块承载能力越大的链路,以增加共享保护资源的机会,进一步提高保护路径建立成功率和共享保护资源利用率。因此,链路中所有保护频谱块的承载能力越大,其代价函数也应越小。为此,定义链路 e 的保护代价函数为:

$$r_e=\frac{1}{\sum_{j=1}^{j_e^u} u_{e,j}+\sum_{j=1}^{j_e^v} v_{e,j}} \tag{6}$$

其中,$u_{e,j}$ 和 $v_{e,j}$ 分别代表链路 e 中第 j 个可用频谱块和第 j 个保护频谱块的承载权重(由式(2)计算,$f_{e,j}$ 分别代表可用频谱块的大小和保护频谱块的大小);j_e^u 和 j_e^v 分别表示链路 e 中可用频谱块的数量和保护频谱块的数量。

根据链路的保护代价函数,找出 K 条候选路径后,根据距离自适应调制计算出 r_i 在每条候选路径 $p_k(k=1,2,\cdots,K)$ 上所需分配 FS 数 h_k。对于每条候选路径 p_k,选出该路径上所有可用频谱块和保护频谱块,分别构成可用频谱块集 Q_s 和保护频谱块集 Q_m,选择候选频谱块时,不仅要求其包含 FS 数不小于 h_k,还要满足 r_i 的工作路径与所有保护资源对应业务连接的工作路径链路分离。如果 Q_s 为空,表示无可用频谱资源建立保护路径,则阻塞该业务请求。否则,表示存在可用的候选频谱块建立保护路径。为了提高保护资源共享率,建立保护路径时首选 Q_m 中的频谱块作为候选频谱块,仅当 Q_m 无法满足要求时,才尝试利用 Q_s 中的频谱块。

2.2.1 利用保护频谱块建立保护路径

此时,只需考虑减少保护碎片产生,因此首选最不容易形成保护碎片的频谱块。依次取 Q_m 中每一个频谱块进行频谱资源预分配操作。对于第 j 个保护频谱块,按照式(4)分别计算分配前、后所在路径每一条链路 e 的归一化承载权重差值,此时 $g_{e,j}^{b}$ 和 $g_{e,j}^{a}$ 分别表示第 j 个保护频谱块预分配前、后在链路 e 上的承载权重。从而,可按照式(5)求出对第 j 个保护频谱块进行

频谱预分配前、后，其所在路径的归一化承载权重差值 T_j。T_j 越小，说明在频谱分配后该保护频谱块的承载能力损失越小，剩余保护频谱资源更连续，后续业务连接有更多机会共享该保护频谱资源。

对于第 j 个保护频谱块，选择 T_j 最小的分配方式作为它的唯一分配方式。当 Q_m 中的每一个频谱块都计算完毕，选择差值最小的频谱块，并将该频谱块所在路径作为保护路径，并按照该频谱块的分配方式在相应的 FS 建立业务连接。

如果存在多个相同最小 T_j 的频谱块（实际上，同一频谱块的不同分配方式也可能具有相同 T_j），为了既保证剩余保护频谱资源更集中，同时又使可用频谱资源（包含空闲 FS 和保护 FS）更连续，可将这些频谱块与周围相邻的空闲频谱资源扩展成可用频谱块，然后对这些可用频谱块按照式(4)和或(5)重新计算按照当前频谱分配方式（遵循使 T_j 最小的分配方式）分配前、后的归一化承载权重差值，并选择差值最小的频谱块，按照相应方式分配保护资源。

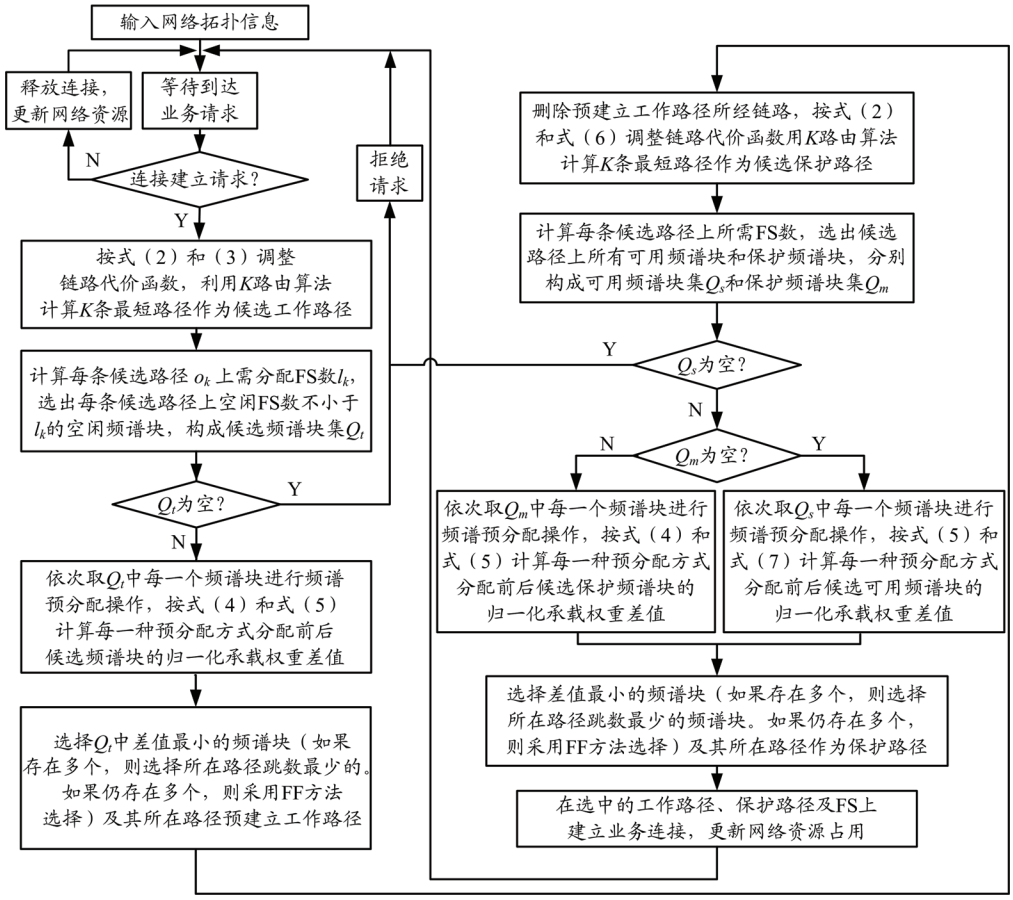


图 3 AMFA-SPP 算法流程图

2.2.2 利用可用频谱块建立保护路径

如果 Q_m 中频谱块无法满足要求，则尝试选用 Q_s 中频谱块。可用频谱块包含保护 FS 和空闲 FS 这 2 种频谱资源，为了最大程度提高共享资源利用率，同时减少空闲碎片和保护碎片的生成，需对可用频谱块的代价权重做出修改。对于第 j 个可用频谱块，分别计算分配前、后所在路径每一条链路 e 的归一化承载权重差值，即：

$$s_{e,j}=\frac{\ln\left(g_{e,j}^{b}-g_{e,j}^{a}\right)}{\ln g^{\max}}+\frac{\ln\left(f_{e,j}^{b,\mathrm{free}}-f_{e,j}^{a,\mathrm{free}}+1\right)}{\ln|C|} \tag{7}$$

其中，$g_{e,j}^{b}$ 和 $g_{e,j}^{a}$ 分别表示第 j 个可用频谱块预分配前、后链路 e 上的承载权重；$f_{e,j}^{b,\mathrm{free}}$ 和 $f_{e,j}^{a,\mathrm{free}}$ 分别表示第 j 个可用频谱块预分配前、后链路 e 上的空闲 FS 数。从而，可按照式(5)（$t_{e,j}$ 用 $s_{e,j}$ 代替）求出对第 j 个可用频谱块进行频谱预分配前、后，其所在路径的归一化承载权重差值 T_j。差值越小，说明在频谱分配后该可用频谱块的承载能力损失越小，剩余可用频谱资源更连续，可为后续业务保护路径的建立提供更多机会。

对于第 j 个可用频谱块，选择 T_j 最小的分配方式作为它的唯一分配方式。当 Q_s 中的每一个频谱块都计算完毕，选择差值最小的频谱块，并将该频谱块所在路径作为保护路径，按照该频谱块的分配方式在相应的 FS 建立业务连接。AMFA-SPP 算法流程图如图 3 所示。

本文对比了 SBPP-SWP-FF 算法[10]和 AMFA-SPP 算法，结果如图 4 所示。在图 2(a)所示网络拓扑中，业务连接 r_1 的工作路径和保护路径分别为 C-E 和 C-B-E，在保护路径预留保护 FS3~FS5，而 r_2 的工作路径和保护路径分别为 C-D-E 和 C-B-E，在保护路径预留保护 FS4、FS5，链路 BE、BC 的频谱状态如图 4(a)所示，图中标注了共享每个保护 FS 的业务连接数。假设到达业务请求 r_3，选择工作路径 B-A-E 和保护路径 B-E，需 2FS 保护资源。如果只追求共享资源利用率而不

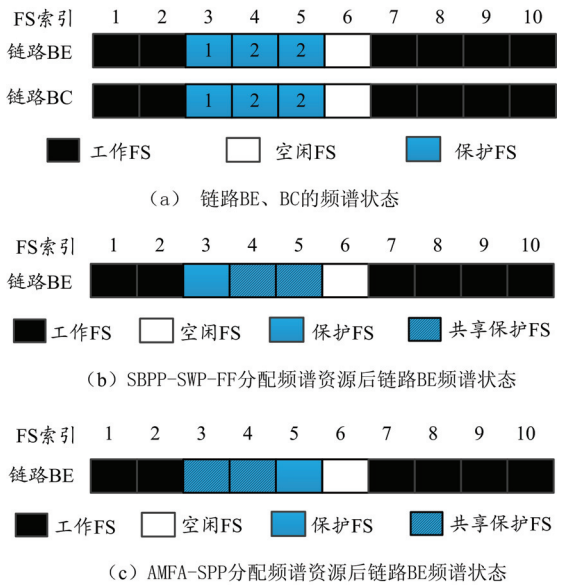


图 4 SBPP-SWP-FF 算法与 AMFA-SPP 算法保护路径建立对比

考虑频谱碎片(SBPP-SWP-FF),由于 FS4、FS5 被更多业务连接的保护路径共享,r_3 的保护路径将共享 FS4、FS5,如图 4(b)所示。AMFA-SPP 算法优先选择保护频谱块(由 FS3~FS5 构成),可计算出 FS3、FS4 和 FS4、FS5 这 2 种分配方式的归一化承载权重差值均为 0.415。此时将该保护频谱块扩展成可用频谱块（由 FS3~FS6 构成),可计算出分配 FS3、FS4 的归一化承载权重差值为 0.476，而 FS4、FS5 的归一化承载权重差值为 0.519。因此,r_3 的保护路径将共享 FS3、FS4,如图 4(c)所示。对于后续业务请求 r_4(工作路径为 B-A-E,保护路径为 B-E,需 2FS 保护资源),由于 r_4 与 r_3 工作路径链路重合,因此保护路径需新预留 2FS 保护资源,此时 SBPP-SWP-FF 算法找不到可用保护资源,连接请求被阻塞。而 AMFA-SPP 算法可利用 FS5 和 FS6 建立保护路径。

2.3 算法时间复杂度分析

AMFA-SPP 算法的时间复杂度主要取决于链路代价调整、K 路由算法以及频谱分配。建立工作路径时,链路代价调整的时间复杂度约为 $O(|E|\cdot|C|)$,K 路由算法的时间复杂度约为 $O((|E|+|N|\cdot\log|N|+K)$。在频谱分配阶段,从 K 条路径中寻找空闲频谱块的时间复杂度约为 $O(K\cdot|C|)$,选择分配前后承载权重差值最小的频谱块的时间复杂度约为 $O(K\cdot|C|\cdot\log|C|)$。因此,建立工作路径的时间复杂度近似为 $O(|N|\cdot\log|N|+|E|\cdot|C|+K\cdot|C|\cdot\log|C|)$。建立保护路径的时间复杂度与建立工作路径相同,也近似为 $O(N\cdot\log|N|+|E|\cdot|C|+K\cdot|C|\cdot\log|C|)$。

3 仿真及数据分析

本文采用 VC++搭建 EON 仿真平台，对 AMFA-SPP 算法进行性能评测,并与 AMFA-1+1、SPP-FF[8]和 SBPP-SWP-FF[10]这 3 种算法进行对比。AMFA-1+1 算法中,除了每个业务连接的保护路径不共享保护资源外,其余策略与 AMFA-SPP 算法类似。仿真拓扑为具有 14 个节点、21 条链路的 NSFNET 网络,每根光纤链路有 358 个 FS,每个 FS 的带宽为 12.5 GHz。仿真中产生 10^5 次业务请求,每次业务请求的源、宿节点随机产生，其带宽在 10 Gb/s、40 Gb/s、100 Gb/s、200 Gb/s 和 400 Gb/s 中随机选择。业务请求按参数 λ 的泊松分布到达网络,业务的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布,即全网的总负载为 λ/μ 爱尔兰(Erlang),仿真时取 μ=1。仿真评测指标为带宽阻塞率、频谱碎片率和备用容量冗余。带宽阻塞率定义为被阻塞业务的总带宽与到达业务请求总带宽的比值。频谱碎片率定义为每条链路的空闲频谱块数与空闲 FS 数比值的平均值。该值越小，平均而言每个空闲频谱块中包含的空闲 FS 数越多,潜在地可被更多后续业务请求用来成功建立连接,因此,频谱碎片率越低。备用容量冗余定义为全网已预留保护 FS 数与工作 FS 数的比值[7]。

不同网络负载下,4 种算法的带宽阻塞率性能如图 5 所示。与 AMFA-1+1 相比,SPP-FF 允许业务连接的保护路径共享已预留保护资源，可以节省频谱资源,增加了后续业务连接成功建立的机会,因此其带宽阻塞率低于 AMFA-1+1。在 SPP-FF 算法的基础上,SBPP-SWP-FF 为那些被更多业务连接共享的频谱资源设置更小的代价，使得共享保护资源利用效率更高,有利于节省更多频谱资源,因此,其带宽阻塞率性能更优。AMFA-SPP 算法在保证提高共享资源利用率的同时，优先选择可使剩余可用资源更连续的 FS,可为后续业务连接成功建立提供更多机会,因此具有最低的带宽阻塞率。

不同网络负载下,4 种算法的频谱碎片率性能如图 6 所示。与 SPP-FF 和 AMFA-1+1 相比,SBPP-SWP-FF 基于频谱窗平面，优先选择与业务连接大小相一致的频谱块,可有效减少频谱碎片,所以其频谱碎片率低于 SPP-FF 和 AMFA-1+1。而 AMFA-SPP 算法根据频谱块的承载能力选择频谱分配,可以大大减少空闲碎片和保护碎片,从而使分配后链路上的可用频谱资源更集中,因此具有最低的频谱碎片率。

不同网络负载下,4 种算法的备用容量冗余性能如图 7 所示。SBPP-SWP-FF、SPP-FF 和 AMFA-SPP

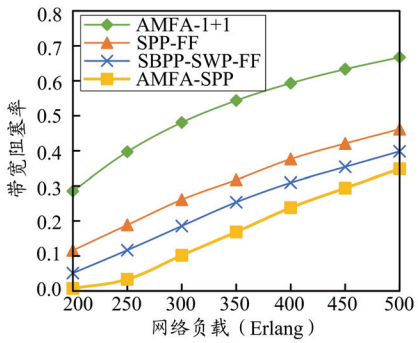


图 5 4 种算法的带宽阻塞率

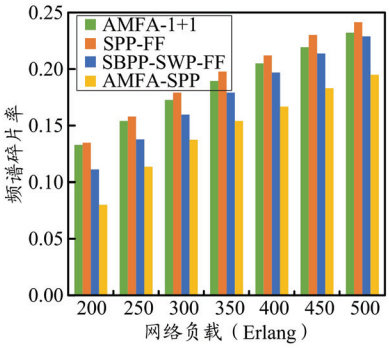


图 6 4 种算法的频谱碎片率

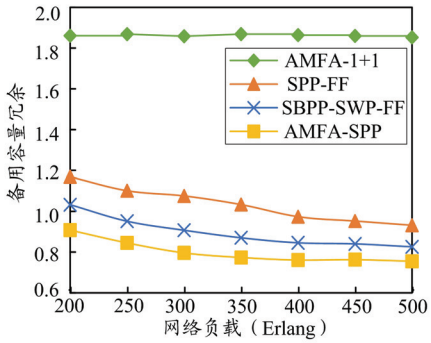


图 7 4 种算法的备用容量冗余

这 3 种算法采用共享保护机制，随着网络负载增大，建立业务连接越多，工作路径占用资源越多，并且保护路径有更多机会共享保护 FS，因此备用容量冗余随网络负载增大而减少。SPP-FF 仅采用 FF 策略选择保护 FS，而 SBPP-SWP-FF 优先使用被更多业务连接共享的保护 FS，有利于提高共享资源利用率，因此备用容量冗余低于 SFP-FF。与 SBPP-SWP-FF 算法相比，AMFA-SPP 算法并不是单纯追求提高共享资源利用率，同时还考虑减少空闲碎片与保护碎片，有利于接纳更多后续业务请求，从而保护资源可以被更多业务连接共享，因此，其备用容量冗余更低。由于 AMFA-1+1 算法不支持共享保护，因此，其备用容量冗余最高。

4 结束语

本文针对 EON 提出一种 AMFA-SPP 算法，该算法利用频谱块承载权重值反映不同频谱块接纳业务连接的能力。首先，选择频谱块承载权重值大的链路构成候选工作路径，以提高工作路径成功建立概率。从候选工作路径中选择分配前后承载权重差值最小的频谱块建立工作路径，以减少产生空闲碎片。然后，选择可用频谱块和保护频谱块承载能力大的链路构成候选保护路径，从候选保护路径中优先选择分配前后承载权重差值最小的保护频谱块建立保护路径，建立失败时才选择分配前后承载权重差值最小的可用频谱块建立保护路径，有利于提高共享资源利用率，同时减少保护碎片和空闲碎片。最后，对算法进行了仿真研究，仿真结果表明：AMFA-SPP 算法具有更低的带宽阻塞率、频谱碎片率和备用容量冗余。

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] TALEBI S, ALAM F, KATIB I, et al. Spectrum management techniques for elastic optical networks: a survey[J]. Optical Switching and Networking, 2014, 13(9): 34–48.

[3] ZHU Z, 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.

[4] WANG X, ZHANG Q, KIM I, et al. Utilization Entropy for Assessing Resource Fragmentation in Optical Networks[C]// Optical Fiber Communication Conference & Exposition, March 4–8, 2012, Los Angeles, USA. Piscataway: IEEE, 2012: 1–3.

[5] WANG H, XIN X, ZHANG J, et al. Dynamic virtual optical network mapping based on switching capability and spectrum fragmentation in elastic optical networks[C]//21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), July 3–7, 2016, Niigata, Japan. Piscataway: IEEE, 2016: 1–3.

[6] 于存谦，张黎，何荣希. 弹性光网络基于区分降级服务和自适应调制的动态路由与频谱分配算法[J]. 电子与信息学报，2019，41(1)：38–45.

[7] SHEN G, GUO H, BOSE S K. Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited)[J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(1): 71–87.

[8] SHAO X, YEO Y K, XU Z, et al. Shared-Path Protection in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation [C]// Optical Fiber Communication Conference & Exposition, March 4–8, 2012, Los Angeles, USA. Piscataway: IEEE, 2012: 1–3.

[9] SHEN G, WEI Y, BOSE S. Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2014, 6(7): 649–659.

[10] WANG C, SHEN G, BOSE S K. Distance Adaptive Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks With Shared Backup Path Protection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 2955–2964.

[11] LIU H, ZHANG M, YI P, et al. Shared path protection through reconstructing sharable bandwidth based on spectrum segmentation for elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 32(10): 88–95.

[12] EPPSTEIN D. Finding the k shortest paths [J]. SIAM Journal on Computing, 1999, 28(2): 652–673.