

doi:10.3788/gzxb20134208.0929

面向频谱融合的路由频谱分配和碎片整理算法

鞠卫国¹, 黄善国¹, 徐珍珍¹, 郭秉礼², 赵永利¹, 张杰¹, 顾皖仪¹

(1 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(2 北京大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要:针对灵活栅格光网络中的频谱碎片问题,提出了面向频谱融合的路由频谱分配算法与频谱碎片整理算法.通过构建频谱放置窗口/点与频谱融合窗口,使路由频谱分配算法在安置新的带宽请求时不仅考虑了业务所在链路的频谱使用情况,而且还参考业务相邻链路上的频谱使用情况,最大程度地减少了频谱碎片.此外,频谱碎片整理算法通过重路由由网络中已有的业务,为被阻塞的请求创造了足够的频谱空间,优化了网络资源的使用情况.仿真结果表明,在动态网络环境下本文提出的算法可以有效地降低业务的阻塞率.

关键词:灵活栅格光网络; 路由频谱分配; 碎片整理; 光网络

中图分类号: TN929; TP30

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0929-7

Spectrum Fusion Oriented Routing and Spectrum Allocation Algorithm and Spectrum Defragmentation Algorithm

JU Wei-guo¹, HUANG Shan-guo¹, XU Zhen-zhen¹, GUO Bing-li²,
ZHAO Yong-li¹, ZHANG Jie¹, GU Wan-yi¹

(1 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(2 State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to address the spectrum fragmentation problem in flexible grid optical networks, the spectrum fusion oriented routing and spectrum allocation algorithm and spectrum defragmentation algorithm are proposed. The notions of spectrum allocation window, spectrum allocation point and spectrum fusion window are introduced to optimize the network resource utilization. To retain the spectrum consecutiveness as much as possible when establishing a lightpath and reduce the spectrum fragments, the proposed RSA algorithm considers the spectrum utilization in candidate links and their adjacent links. The spectrum defragmentation algorithm is used to make enough room for the blocked request by rerouting already established lightpaths. Simulation results reveal that the algorithms significantly improve the blocking probability performance and resource utilization under dynamic traffic in flexible grid optical networks.

Key words: Flexible grid optical networks; Routing and spectrum allocation; Spectrum defragmentation; Optical network

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (Nos. 2010CB328202, 2010CB328204, 2012CB315604)、国家自然科学基金 (No. 60702005)、国家高技术研究发展计划 (No. 2012AA011302) 和北京市科技新星计划 (No. 2011065) 资助

第一作者: 鞠卫国 (1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为先进光通信网络. Email: wgju@bupt.edu.cn

导师 (通讯作者): 顾皖仪 (1946-), 女, 教授, 硕士, 主要研究方向为先进光通信网络. Email: wyg@bupt.edu.cn

收稿日期: 2013-03-27; 录用日期: 2013-05-07

0 引言

由于视频流媒体、云计算与移动通信等业务的飞速发展,光网络正承受业务流量爆炸式增长带来的巨大压力,超大容量与动态灵活成为全光网技术未来的发展趋势^[1]. 目前,波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络采取“一刀切”的固定栅格(Fixed Grid)分配方式,当请求的带宽并不足以占满一个波长时,也需要为端到端的光路分配一个波长的所有容量,突现出灵活性差、频谱利用效率低的缺点. 针对这个问题,新型的灵活栅格光网络(Flexible Grid Optical Networks, FGON)被提出,迅速成为当前学术和工业界探讨的热点^[2-3]. 基于光正交频分复用(Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, O-OFDM)多载波调制技术^[4-5],频谱资源可以被切割成较小频隙(Frequency Slot, FS),如 12.5 GHz. 带宽可变光滤波技术^[6]的成熟使得多种粒度光路的建立与全光交换可以实现. 凭借着高效的频谱利用率与动态灵活的带宽分配方式,灵活栅格光网络代表了未来大容量全光网发展方向.

作为 FGON 网络中重要的研究内容,路径与频谱分配算法(Routing and Spectrum Allocation, RSA)用来为各种带宽请求选择路由,分配频谱资源. RSA 算法在为带宽请求分配频谱资源时应遵循的限制有:1)频谱一致性限制,即沿路由的每条链路上为带宽请求分配相同位置的频谱资源;2)频隙连续性限制,即为每个带宽请求分配的频隙是连续的. 其中限制条件 2)是相对 WDM 网络中的路由与波长分配算法(Routing and Wavelength Allocation, RWA)问题新增的约束. 因为频谱资源被分割成粒度更小的频隙,带宽请求的适配也更加的灵活,使得 FGON 网络中 RSA 算法相比于 WDM 网络的中 RWA 问题更加复杂. 同时,FGON 中业务力度不一致,在动态的业务建立和拆除过程中,各自链路上空闲的频谱资源会变的不连续,形成频谱碎片(Spectrum Fragment),无法被承载新来的业务. 频谱碎片降低了网络的频谱资源使用效率,增加了业务阻塞率,严重影响网络性能. 因而,许多研究工作集中在碎片整理问题(Spectrum Defragmentation),目标在于消除频谱碎片给网络带来的影响,以优化 FGON 网络中的资源使用^[7].

文献[8]证明了 RSA 是一个 NP-完全问题,并对 FGON 中的 RSA 算法进行了 ILP 建模. 文献[9]提出了距离自适应调制格式变换的 RSA 算法. 文献[10]指出在业务动态建立和拆除的过程中,频谱碎

片的出现会降低网络的资源使用效率,提高业务的阻塞率. 文献[11]提出基于阻塞触发的碎片整理算法,通过重路由现有的业务为被阻塞的带宽请求创造可用的频谱空间. 文献[12]提出周期性触发的碎片整理算法,通过周期性的对全网碎片进行压缩以降低频谱碎片对网络性能的影响. 文献[13]提出基于节点周转能力的碎片评估方案以提高碎片整理的效率. 在碎片整理过程中需要对已建立的连接进行路径和频谱资源的重新分配,这对业务的传输质量造成影响. 文献[14]提出了面向碎片整理的波长调谐技术,实验证明在不影响业务传输质量的情况下该技术能够快速有效地改变波长位置.

为从整体上优化网络资源的使用,本文通过构建频谱放置窗口/点与频谱融合窗口提出了面向频谱融合的 RSA 算法与碎片整理算法. 遵循频谱放置窗口/点与频谱融合窗口的指导,RSA 算法为带宽请求分配资源时,同时考虑业务路径和业务相邻链路上的频谱分布的情况,尽可能将频谱汇聚在一定范围内,减少频谱碎片. 对于经过 RSA 算法后仍无法找到足够频谱资源的请求,碎片整理算法同样遵循频谱融合的原则,对现有业务进行重路由,为带宽请求创造可用的频谱空间,以减轻网络的阻塞情况.

1 频谱放置窗口/点与频谱融合窗口

定义灵活栅格光网络为 $G\{V, E, S\}$, V 代表网络中带宽可变交叉节点集合, E 代表节点间的双向光纤链路集合, S 代表每条光纤链路上频隙集合. 假定网络中节点个数为 N , 链路条数为 L , 即: $|V| = N$, $|E| = L$; 链路上频隙个数为 F , $|S| = F$, 频隙按其中心频率高低依次进行标号.

图 1 给出了一个具体的网络示例,以便于阐释

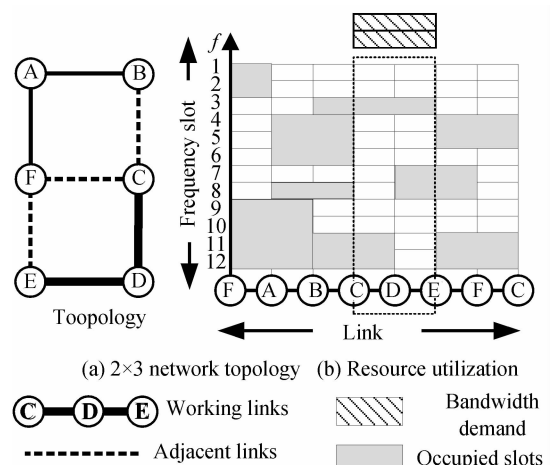


图 1 2×3 网格拓扑和网络资源使用情况
Fig. 1 2×3 network topology and resource utilization of the network

本文提出的各种概念与算法.图 1(a)表示了一个包含 6 个节点 7 条链路的 2×3 网格网络,每条链路上共有 12 个频隙的频谱资源.图 1(b)表示了当前频谱资源使用的情况,并指出新的带宽需求为 2 频隙,网络提供的业务路径是(C-D, D-E).与业务路径相邻的所有链路被定义为业务相邻链路,包括(B-C, F-C, E-F).

链路 l 上各个频隙的使用情况可用 F 比特的二进制数组表示为

$$U_l = [u_1^l, u_2^l, \dots, u_F^l] \quad (1)$$

式中 u_i^l 代表其中链路 l 上第 i 个频隙的使用情况, $u_i^l = 0$ 表示该频隙空闲, $u_i^l = 1$ 表示频隙被使用.多条链路组成路径的频隙连通情况可通过链路间同一位置的频隙进行逻辑‘或’运算得到,即

$$U_r = \bigcap_{l \in L(r)} U_l = [u_1^r, u_2^r, \dots, u_F^r] \quad (2)$$

式中 $L(r)$ 代表组成路径 r 上的多条链路的集合.

1.1 频谱放置窗口/点的建立

将 U_r 中每个连续的空闲频隙块定义为频谱放置窗口 (Spectrum Allocation Window, SAW),表明路径 r 上可提供的连续可用的频谱资源,目的是为新来的带宽请求提供候选的频谱位置. SAW 的大小是窗口包含的空闲频隙的个数.同时,设定频谱放置窗口中编号最大与最小的频隙为频谱放置点 (Spectrum Allocation Point, SAP),记为 SAP_i 与 SAP_h .一般而言,对带宽请求来说,给定路径上空闲的频谱资源是有限的.为避免频谱碎片化,带宽请求一般应放置在紧邻已占用的频谱位置旁,即以 SAP 为起始或结束位置.利用 SAW 与 SAP,同时结合带宽请求的大小(记为 B),便能快速得到路径上带宽请求放置的具体位置.当 $SAW > B$ 时存在两个放置位置即 $[SAP_i, SAP_i + B - 1]$ 或 $[SAP_h - B + 1, SAP_h]$.当 $SAW = B$,则只存在一个频谱位置 $[SAP_i, SAP_i + B - 1]$.

图 2 为 SAW/SAP 构建与利用图.首先通过式

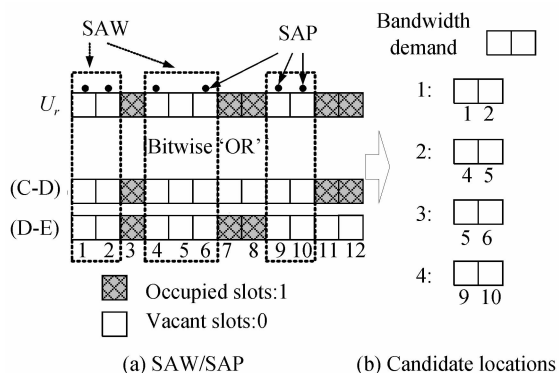


图 2 频谱放置窗口/点示意图和带宽放置位置
Fig. 2 Illustration of the SAW/SAP and candidate spectrum locations

(2)可以获知路径 C-D-E 上存在 3 个 SAW.由于带宽请求是 2 个频隙($B=2$),依照 SAW/SAP 可以计算出满足带宽需求的频谱空间.最后计算出有 4 个候选的位置提供给新来的带宽需求,见图 2(b).

1.2 频谱融合窗口的建立

相比于 SAW 描述路径上空闲频谱的连续情况,本文提出频谱融合窗口 (Spectrum Fusion Window, SFW) 以评定频隙在多条链路中被使用的情况.

首先统计所有链路上同一位置频隙 i 的利用情况 $\sum_{l \in L(i)} u_i^l$,该值越大表明这一频隙在各链路上被利用的次数越多.其中 $L(i)$ 代表链路集合,集合中的链路总数设为 M ,即: $|L(i)| = M$. $L(i)$ 中的链路不一定是连续,例如图 1 所示的各条业务相邻链路.

使用 f_i^l 代表第 i 个位置的频隙在链路集合 $L(i)$ 中被使用情况.设定阈值 T ,当 $\sum_{l \in L(i)} u_i^l / M > T$ 时将 f_i^l 设定为 1,表示该频隙被频繁使用;否则设为 0.通过评定每个频隙的负载情况,链路集 $L(i)$ 上各频隙的利用情况也可以用一个 F 比特的二进制数组表示为

$$U_f = [f_1^l, f_2^l, \dots, f_F^l] \quad (3)$$

将 U_f 中每个连续的被使用频隙块定义为频谱融合窗口 (SFW).图 3 为 SFW 构建图.假设 $L(i)$ 包含的是相邻链路(B-C, F-C, E-F),阈值 $T=0.65$,那么可知频隙(4, 5, 8, 11, 12)在业务相邻链路上被利用的次数较多.由此可见,频谱融合窗口表明了网络中负载较重的频隙存在的具体范围.

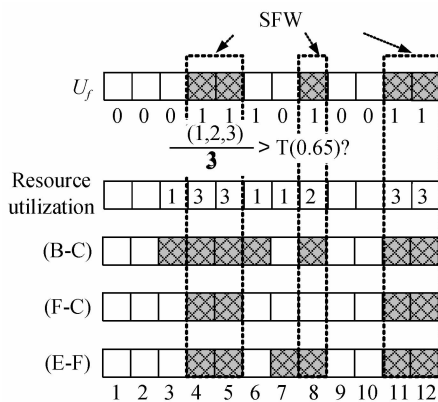


图 3 频谱融合窗口的构建
Fig. 3 Illustration example of the SFW

2 路由与频谱分配与碎片整理算法

2.1 SF-RSA 路由与频谱分配算法

基于频谱放置窗口/点与频谱融合窗口,本文提出了面向频谱融合的路由与频谱分配算法 (Spectrum Fusion oriented RSA algorithm, SF-RSA).利用 SAW/SAP 可以快速有效地判断给定

业务路径上可用的频谱空间;另一方面,利用 SFW 可以获知业务相邻链路上各个位置频隙的利用情况,从而为带宽请求放置的具体位置提供参考. SF-RSA 旨在促进业务路径及业务相邻链路上频谱的融合,将被占用的频谱压缩在一定范围内,让链路间空闲的频隙尽可能的连续,以优化资源使用情况. SF-RSA 算法步骤包括两部分:路由分配环节和频谱分配环节.

路由分配:利用 KSP(K-shortest Paths)算法计算 $K(K=3)$ 条源宿节点间的最短业务路径. 对于选定业务路径,频谱分配方法具体步骤如下:

步骤 1:计算业务路径上的 SAW/SAP,结合带宽请求大小计算出满足带宽请求的频谱位置.

步骤 2:记录所有与业务路径相邻接的链路,记为集合 $L(l)$;设定阈值,计算该链路集合的 SFW,从而获知业务相邻路径上各频隙的负载情况.

步骤 3:为尽可能融合链路间的频谱,我们希望新的业务最好占用一些负载较重的频隙. 为此,本文对业务路径上可用的频谱位置中所包含的频隙在相邻链路上的利用情况进行检查,即求和: $\sum_{i=SAP_l}^{SAP_l+B-1} f_i^l$

或 $\sum_{i=SAP_h-B+1}^{SAP_h} f_i^l$,选择该值最大的频谱位置放置带宽请求. 如果出现多个频谱位置,则选择 SAP 较小的位置.

图 4 为 SP-RSA 算法中频谱分配策略. 对于频谱位置②包含的频隙(4,5),在相邻链路上被频繁的利用,①或④包含的频隙(1,2)与(9,10)在相邻链路上则被利用的少. 如果选择第①或④的频谱位置,那么网络中连接在节点 C 或者 E 周围的链路的频谱连续便非常的差,新来的业务无法通过节点 C 或 E (参考图 1). 选择②频谱位置便可以保持网络频谱资源的连通性,从而优化资源的使用.

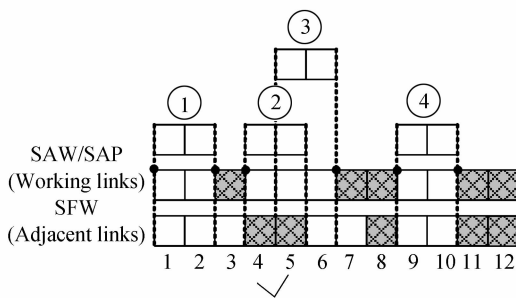


图 4 SF-RSA 中的频谱分配策略
Fig. 4 Example of the SF-RSA

2.2 SF-SD 碎片整理算法

对于经过 SF-RSA 资源分配后仍然无法被接收

的请求,本文进一步提出面向频谱融合的碎片整理算法 (Spectrum Fusion Oriented Spectrum Defragmentation Algorithm, SF-SD). 通过移动网络上现有的业务,为被阻塞的请求提供空间. SF-SD 算法的具体步骤如下:

步骤 1:计算所有 K 条业务路径上的 SAW/SAP,按大小排列 SAW(大小一致时按 SAW 所在路径的跳数排列,跳数小的在前).

步骤 2:将 SAW 所在业务路径上所有的链路记为链路集合 $L(l)$;设定阈值,计算该业务链路集合的 SFW.

步骤 3:为满足新的带宽请求,给定 SAW 上需清空的频谱空间为: $[SAP_h, SAP_h + (B - SAW)]$ 或 $[SAP_l - (B - SAW), SAP_l]$. 对于需清空的频谱空间内的频隙利用情况进行检查,即求和: $\sum_{i=SAP}^{SAP+(B-SAW)} f_i^l$ 或 $\sum_{i=SAP-(B-SAW)}^{SAP} f_i^l$,选择该值较小的频谱空间为第一清空频谱空间,另一个为第二清空频谱空间. 对于频谱空间的业务调用 SF-RSA 算法进行重路由.

步骤 4:依次按照 SAW 大小进行上述步骤,直到新来的业务被接收,或者检查过所有的 SAW. 图 5 为 SF-SD 算法运行的具体事例.

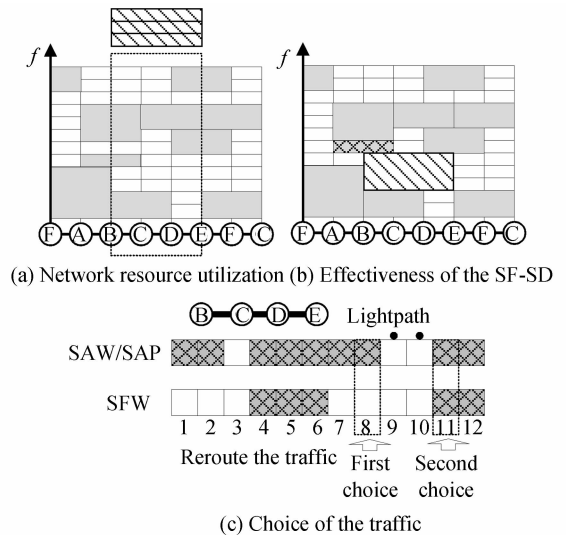


图 5 当前网络资源使用情况、碎片整理的效果和 SF-SD 中对于需要清空频隙的选择

Fig. 5 Network resource utilization, effectiveness of the SF-SD and the choice of the traffic to be rerouted

2.3 SF-RSA 与 SF-SD 算法总体流程图

图 6 为 SF-RSA 与 SF-SD 算法的流程图,说明了在业务处理流程中 SF-RSA 与 SF-SD 各自的职责与相互联系.

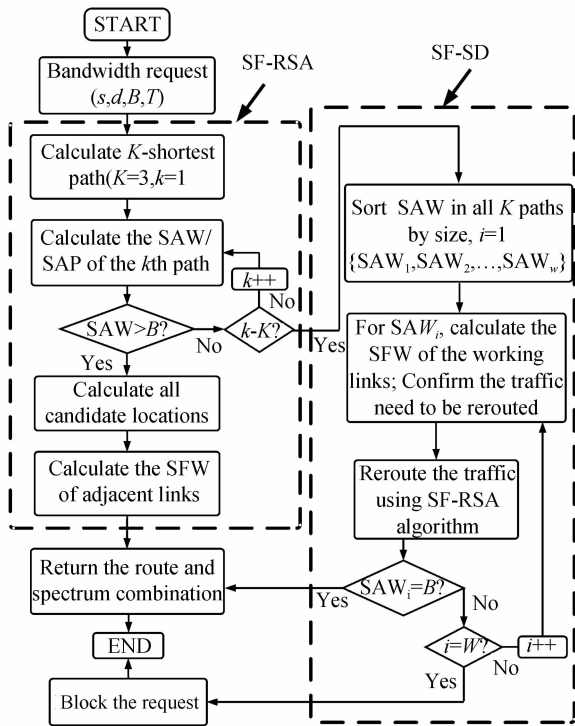


图6 SF-RSA与SF-SD算法总体流程

Fig. 6 Flowchart of the SF-RSA and SF-SD algorithms

3 仿真与结果分析

为评价所提出算法的性能,本文针对两种典型的网络拓扑进行了数值仿真,即 NSFNET 网络和 5×5 网格网络. 设定连接节点的双向光纤链路中可用频谱带宽总资源为 4 000 GHz. 结合实际网络运营情况,网络线路端支持 5 种线路连接速率: 10 Gb/s, 40 Gb/s, 100 Gb/s, 400 Gb/s 和 1 Tb/s. 在 FGON 网络频段为 12.5 GHz 的情况下,每条链路能够承载 320 个频隙. 5 种线路速率所需频谱带宽为 25 GHz, 50 GHz, 50 GHz, 75 GHz, 150 GHz^[15], 对应所需频隙数分别为 (2, 4, 4, 6, 12) 个. 在 WDM 网络波长间隔为 50GHz 的情况下,每条链路能够承载 80 个波长. 5 种线路速率所需的波长个数分别为 (1, 1, 1, 4, 10) 个. 假设网络中 5 种连接速率请求出现的概率相同(均为 0.2). 连接请求空间上随机分布;连接请求到达率服从到达率为 λ 的泊松分布,连接请求持续时间服从均值为 μ 的负指数分布. 仿真中对于频谱融合窗口中阈值 (T) 的设定为: $T=0.65 (M \leq 5)$; $T=0.7 (5 < M \leq 10)$; $T=0.74 (M > 10)$. 本文对另外三种算法进行了对比:

1) 基于 First-Fit (FF) 频谱分配算法的 RSA 算法,记为 FF-RSA. 首先使用 KSP 算法计算出 K 条有优先级排序的最短路径. 在第 i 条最短路径上,使用 FF 策略从最小的频隙开始搜寻可用频隙,直到找到满足带宽要求的连续的可用频率隙;

2) 传统 WDM 网络架构下路由波长配算法,记为 RWA in WDM. 使用 KSP 路由算法与 First-Fit 波长分配算法处理节点间的连接请求;

3) 文献[10]提出的碎片整理算法最小中断碎片整理算法 (Disruption-Minimized Spectrum Defragmentation Algorithm, DM-SD), 记为 DM-SD-RSA. 连接请求无法被接收是因为候选路径上的某些链路无法提供足够的频谱资源(记为障碍链路). DM-SD-RSA 算法为被阻塞的连接请求选择障碍链路最少的路径和频谱分配(如果存在多条这样的路径,选择路径上已被占用的频隙中频谱位置最低的那条),然后对于障碍链路上相关的业务进行重路由(本文调用 SF-RSA 进行重路由),为被阻塞的连接请求创造所需的频谱空间.

图 7 与图 8 分别展示了 5 种算法的阻塞性能与资源利用率. 首先,最为明显的是 FGON 网络灵活的资源分配机制相比于 WDM 网络可以明显地降低阻塞率并提高资源的利用率. 其次,本文提出的 SF-RSA 算法取得了较低的阻塞率,这是因为算法在频谱分配过程中最大程度上保持了频谱资源的连续性,降低了频谱碎片带来的危害. 当网络负载增大时,各个频隙负载增加, SF-RSA 带来的增益受到限制. 加入碎片整理算法后, SF-SD-RSA 与 DM-SD-

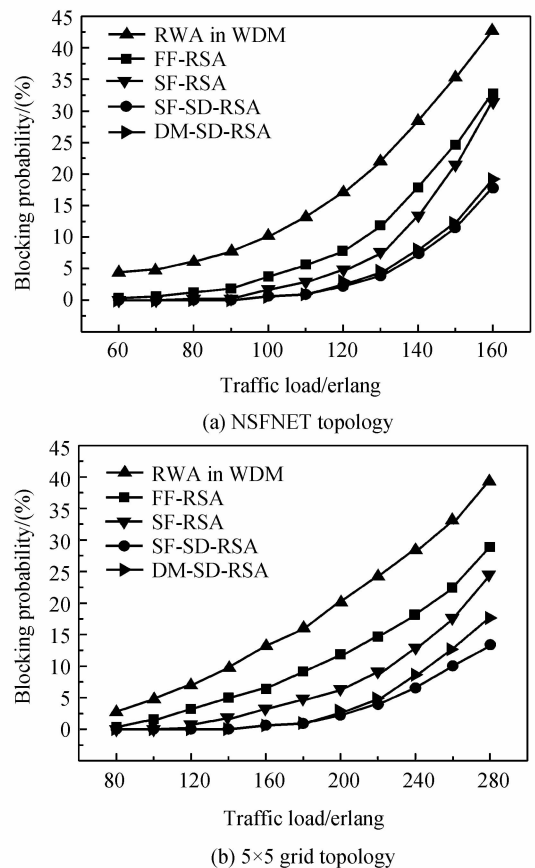


图7 5种算法阻塞性能比较

Fig. 7 Blocking probability of five strategies

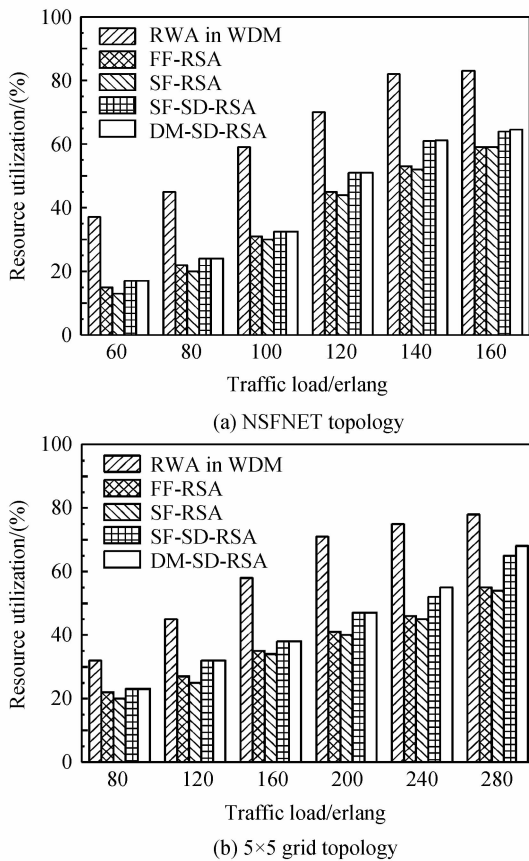


图8 5种算法网络资源利用率的比较

Fig. 8 Resource utilization of five strategies

RSA算法通过重路由网络中已有的业务为被阻塞的带宽请求提供可用的频谱,可以大大降低网络阻塞率. SF-SD关注于寻找最大的频谱放置窗口,而DM-SD则选择障碍链路最少的路径.从仿真结果可知,大多数情况下两个碎片整理算法性能较为接近.但是在 5×5 网格拓扑中,当业务负载较重时, SF-SD表现出更好的效果.这是因为SF-SD对于业务的重路由依照频隙利用的程度进行选择,对网络环境的认知更加的细微.在网络负载较重时,DM-SD需要处理的障碍链路较多,重路由次数较多,这使得碎片整理算法的性能受到了限制.总体来讲,由于 5×5 网格网络较好的连接性,本文提出的算法在取得了更好的效果.

图8所示的资源利用率是指使用的资源占总资源的比率.首先,相比于灵活栅格网络, WDM网络不仅阻塞率高,资源利用率也较高.这意味着灵活栅格光网络用更少的资源服务了更多的业务,体现了更好的频谱利用率和网络性能.其次, SF-RSA算法通过促进相邻链路间频谱的融合,在有效降低网络阻塞率的同时,消耗的频谱资源也少于FF-RSA等算法,体现了良好的性能. SF-SD算法由于需要对已建立的业务进行重路由,为被阻塞的新业务创造需要的频谱空间,消耗了更多的资源.在资源利用率提

高有限的情况下, SF-SD算法能明显地降低网络的阻塞率,体现出了优良的性能.

4 结论

新型灵活栅格光网络由于灵活的资源分配机制大大提高了频谱利用效率,同时更适合承载突发性的IP数据流,是极具前景的下一代光网络架构.但是,灵活栅格光网络中路由与频谱分配算法也更加的复杂,除了频谱一致性与频隙连续性的限制,频谱碎片是影响RSA性能的重要方面.

本文通过引入频谱放置窗口/点与频谱融合窗口,提出了面向频谱融合的路由频谱分配算法与碎片整理算法.通过同时考虑业务路径和业务相邻路径上的频谱碎片情况,将频谱汇聚在一定范围内以优化网络的资源使用情况.仿真结果显示本文提出的算法表现出了较好的网络阻塞性能和资源使用率.

参考文献

- [1] SAMBO N, CASTOLDI P, CUGINI F, *et al.* Toward high-rate and flexible optical networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, **50**(5): 66-72.
- [2] JINNO M, TAKARA H, KOZICKI B, *et al.* Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, **47**(7): 66-73.
- [3] JINNO M, OHARA T, SONE Y, *et al.* Elastic and adaptive optical networks: possible adoption scenarios and future standardization aspects[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2011, **49**(10): 164-172.
- [4] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(10): 587-589.
- [5] LIU Wu, YANG Qi. Carrier phase recovery without pilot subcarriers in coherent optical OFDM transmission systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1893-1898. 刘武, 杨奇. 相干光正交频分复用传输系统中的无导频相位纠偏方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1893-1898.
- [6] REN Guang-jun, YAO Jian-quan. Voltage-tunable liquid crystal filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 789-791. 任广军, 姚建铨. 液晶电控调谐滤波器的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 789-791.
- [7] ZHANG G Y, LEENHEER D, MOREA M, *et al.* A survey on OFDM-based elastic core optical networking[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, **15**(1): 65-87.
- [8] CHRISTODOULOPOULOS K, TOMKOS I, VARVARIGOS A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(9): 1354-1366.
- [9] JINNO M, KOZICKI B, TAKARA H, *et al.* Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2010, **48**(8): 138-145.
- [10] TAKAGI T, HASEGAWA H, SATO K, *et al.* Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation [C].

- European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), Geneva, Switzerland, 2011: 18-22.
- [11] ALBERTO V, LUIS R, MARC K, *et al.* Dynamic routing and spectrum (re) allocation in future flexgrid optical networks[J]. *Computer Networks*, 2012, **56**(12): 2869-2883.
- [12] YU X S, ZHANG J, ZHAO Y L, *et al.* Spectrum Compactness based defragmentation in flexible bandwidth optical networks [C]. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Los Angeles, America, 2012: JTh2A.35.
- [13] JU W G, HUANG S G, GUO B L, *et al.* Node handling capacity based spectrum fragmentation evaluation scheme in flexible grid optical networks [C]. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Anaheim, America, 2013: OW3A.6.
- [14] PROIETTI R, QIN C, GUAN B, *et al.* Rapid and complete hitless defragmentation method using a coherent RX LO with fast wavelength tracking in elastic optical networks [J]. *Optical Express*, 2012, **20**(24): 26958-26968.
- [15] HUANG K, IP E, HUANG M, *et al.* 10×456 -Gb/s DP-16QAM transmission over 8×100 km of ULAF using coherent detection with a 30-GHz analog-to-digital converter [C]. Optoelectronics and Communications Conference (OECC), Hokkaido, Japan, 2010: 5-9.