

空分复用弹性光网络中基于频谱集中度的频谱冲突解决算法

方菲, 刘焕淋, 陈勇, 胡会霞

(重庆邮电大学 光通信与网络重点实验室, 重庆 400065)

摘要:为了解决空分复用弹性光网络节点中业务冲突问题,在动态功能节点结构中配置全频谱转换器(FRSC)和空间选择开关(SSS)来转换冲突业务的频谱,并在该节点结构基础上提出一种基于频谱集中度的频谱冲突解决(SCRASC)算法,该算法综合考虑已使用的频谱块占比以及空闲频谱块与最大频谱块的距离,优化频谱的集中度。仿真结果表明该算法在带宽阻塞率方面取得了较优的性能。

关键词:空分复用弹性光网络; 频谱冲突; 节点结构; 全频谱转换器; 空间选择开关

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)07-0032-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spectrum conflict resolution algorithm based on spectrum concentration in space division multiplexing elastic optical network

FANG Fei, LIU Huanlin, CEHN Yong, HU Huixia

(Optical Communication and Network Key Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to solve the problem of service conflict in space division multiplexing elastic optical network nodes, full range spectrum converter(FRSC) and space selection switch(SSS) are configured in the dynamic function node structure to convert the spectrum of conflicting services. Based on this node structure, a spectrum conflict resolution algorithm based on spectrum concentration(SCRASC) is proposed. This algorithm comprehensively considers the used spectrum block ratio and the distance between the free frequency block spectrum and the largest spectrum block to optimize the frequency of the spectrum concentration. Simulation results show that the algorithm achieves better performance in terms of bandwidth blocking rate.

Key words: space division multiplexing elastic optical network; spectrum conflict; node structure; full range spectrum converter; space selection switch

0 引言

基于多芯光纤(MCF)的空分复用弹性光网络(SDM-EON)可以根据路径和请求的需求大小,选择合适的调制格式和细粒度频谱,具有高效、灵活地分配频谱资源等优点^[1,2]。业务经过网络中的全光交换节点时,存在因为争夺同一目的端口的相同频谱而产生冲突的问题。为了解决这一冲突问题,文献[1]提出一种

收稿日期: 2019-11-22。

基金项目: 国家自然科学基金(61275077)资助; 国家自然科学基金(52010118000Q)资助; 重庆市前沿基础研究项目(2015jcyjA40024)资助。

作者简介: 方菲(1995—),女,重庆忠县人,硕士生,现就读于重庆邮电大学通信与信息工程学院电子信息与通信工程专业,主要从事空分复用弹性全光网络全网路由策略、核心交换节点设计和分组冲突避免调度算法研究工作。



无色无向无冲突的光分插复用节点结构,并在节点结构上设计频谱分配算法,但是该算法的频谱碎片化非常严重,导致整个网络的带宽阻塞率较高。文献[2]提出一种利用基于按需节点结构(AoD)的空频联合冲突解决算法,该算法结合频谱连续度在空域和频域对冲业务进行转换。AoD能够根据需要使用节点内部不同的端口,实现灵活的业务处理,但是需提前配置所有的光器件,成本和能耗都较高。文献[3]提出一种基于有限频谱转换器(LRSC)和全频谱转换器(FRSC)的动态功能节点结构,并在该结构基础上提出了一种同时考虑有限频谱器数目和最大占用频隙索引值的双重权重极大团调度算法。该算法虽然能在LRSC和FRSC数量较小的情况下转换大量冲突业务,但是该算法只是在单域中进行冲突解决,所以阻塞率仍需要进行优化。因此,本文提出一种基于共享FRSC的动态

功能结构 (Dynamic Functional Architecture Sharing FRSC,DFASF)节点,并就此节点结构提出一种基于频谱集中度的频谱冲突解决(SCRASC)算法。

1 问题描述和理论模型

1.1 DFASF 节点

在节点结构中,通常分为路由选择型、广播选择型、动态功能选择型和AoD^[4]。相对于动态功能选择型和AoD,路由选择型和广播选择型功能比较单一,不适用于复杂业务和吞吐量较大的网络。AoD可以在节点中提前配置各种光器件,例如掺铒光纤放大器、复用/解复用器和再生器等,可以根据业务需求灵活进行处理,但是AoD在应对吞吐量较小的网络和简单业务时,会造成大量端口浪费。相较于以上3种节点结构,动态功能选择型节点结构结合三者优点,在路由选择型或广播选择型的基础上配置相关的器件对业务进行处理,能够有效地应对各种业务和网络。对于业务冲突问题,文献[5]在动态功能节点结构基础上配置FRSC对冲突业务进行处理,FRSC可以将冲突频谱转换至其它空闲频谱,有效降低带宽阻塞率。另一方面,基于MCF的空分复用(SDM)技术可以将冲突频谱切换至其它纤芯,也可以降低带宽阻塞率。所以,本文在SDM-EON中结合动态功能节点配置FRSC对冲突业务进行处理。

本文提出的DFASF节点如图1所示,输入、输出端各有N个端口,每个端口内有n根纤芯,在交换单

元的两端均配置空间选择开关(SSS),可以将业务切换至其它纤芯。本文配置的FRSC采用节点共享式配置^[6]。另外,该节点结构还有一个控制模块,控制模块控制无冲突业务的交换、冲突业务的纤芯切换和频谱转换等。

虽然在节点中配置FRSC和SSS可以有效地降低业务被阻塞的概率,但是由于网络中所有节点均配置FRSC和SSS,整个网络的成本会迅速增加。为了在成本和阻塞性能之间进行折中,本文提出的DFASF在全网节点中采用文献[7]提出的方法进行稀疏配置。

1.2 SCRASC 算法

本文提出的节点结构可以灵活地实现业务的交换,但是冲突业务的频谱转换和FRSC的使用数量需要进一步优化。基于以上节点结构,本文提出一种SCRASC算法,以应对争夺同一目的端口资源的问题。纤芯-频谱图如图2所示,业务有3个参数:第一个参数C₃表示该业务是去往纤芯3;第二个和第三个参数表示业务的起始和截止频隙分别为7和8。由于业务传输时需要遵循频谱一致性^[8],业务A会优先考虑频隙7和8,但是图2中纤芯3的7和8号频隙已经被占用,所以产生频谱冲突。如果没有相应的冲突解决算法,业务会被直接阻塞,大量业务被阻塞会导致整个网络处于瘫痪状态。为了解决这一问题,本文考虑将业务切换至其它空闲纤芯,或是转换到其它空闲连续频谱。但是,目前将业务切换到其它纤芯的器件发展并不成熟^[9],本文采用一个纤芯切换权值Δ来衡量纤芯切换的难易程度对节点阻塞率的影响。

由于网络上的频谱块使用情况对业务的阻塞影响较大,本文结合文献[10]考虑纤芯上的频谱集中度来衡量冲突业务。频谱集中度主要指括频谱块占用比和最大占用频谱块情况。已经使用的频谱块占用比越低,表明空闲的频谱块越少,频谱的使用相对集中。另一方面,考虑最大占用频谱块的原因是,如果业务转换到最大占用频谱块的两边的空闲频隙,可以减小碎片频隙的产生。综上所述,本文设计了式(1)来计算空闲频谱块信息。

$$FBS=\frac{B_{used}+1}{B_{all}+1}\times\frac{DMB_{used}+1}{I_{Max}}+\Delta \tag{1}$$

其中,FBS是空闲频谱块信息。该信息由两部分组成:

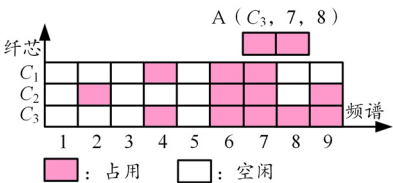


图2 纤芯-频谱图

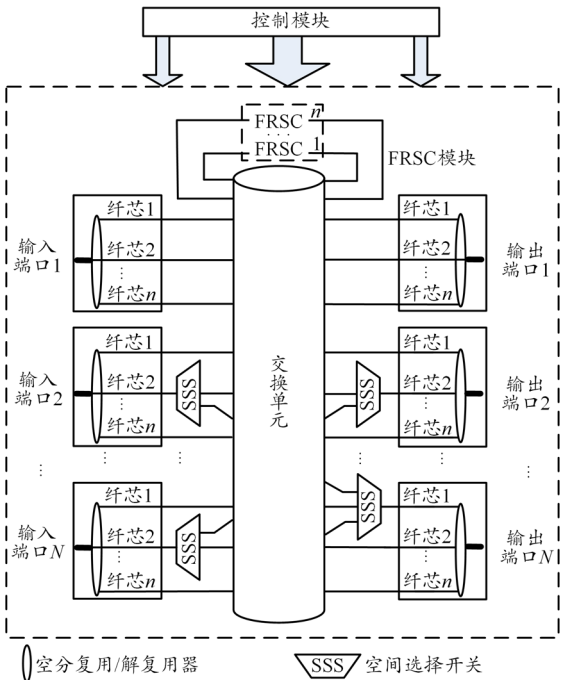


图1 DFASF 节点

第一部分是频谱集中度;第二部分是纤芯切换难易程度。 B_{used} 是使用的频谱块总数, B_{all} 是总共的频谱块数目,两者相比的结果是纤芯中已使用的频谱块的占用情况,该值越小,表明纤芯中频谱块的占用相对集中,后续业务被接受的概率越高。 DMB_{used} 是满足条件的空闲频谱块离最大占用频谱块的距离, I_{Max} 是最大频隙索引,两者相比的结果是转换频谱离最大占用频谱块的位置,该值越小,表明冲突频谱转换至该位置后,越有可能组成一个较大的占用频谱块。 Δ 是纤芯切换权值,该值的大小反映纤芯切换的难度。各个分子、分母加 1 的目的是避免该项为 0,影响结果计算。下面以图 2 中纤芯 1 的空闲频谱(1,2)为例说明:纤芯 1 中已占用的频谱块数为 $B_{\text{used}}=2$,所以 $B_{\text{used}}+1$ 的值为 $2+1=3$,纤芯 1 中所有频谱块数量 $B_{\text{all}}=5$,所以 $B_{\text{all}}+1$ 的值为 $5+1=6$,那么频谱块的占用比为 $3/6$;由于空闲频谱(1,2)距离纤芯 1 中最大占用频谱块的距离 $DMB_{\text{used}}=3$,所以 $DMB_{\text{used}}+1$ 的值为 $3+1=4$, I_{Max} 的值为 9;由于与业务 A 的纤芯不同,所以需要加上一个 Δ 值,于是 FBS 的值为 $3/6 \times 4/9 + \Delta = 2/9 + \Delta$ 。如果需要切换纤芯,就需要使用 SSS,文献[2]中假设使用 SSS, Δ 的值为 1,否则 Δ 的值为 0。但是,式(1)中第一项值小于 1,如果使用 SSS, Δ 的值仍为 1,其它纤芯的 FBS 值始终大于原纤芯,业务不可能切换至其它纤芯。所以。本文考虑 Δ 值在 $[0,1]$ 之间。另一方面,不同空闲频谱和纤芯所导致的纤芯频谱集中度数量级也有差异,并且相同数量级的 Δ 之间阻塞率区别较小,因此本文考虑 Δ 值取不同数量级。

SCRASC 算法思路是将满足冲突业务大小的空闲频谱块按照其频谱集中度升序排列,当比较 $FC_i - FC_j > \Delta$ 时,后续的空闲频谱块可以不必再比较,直接选定当前频谱块。这一方法可以降低计算复杂度。其中, FC_i 、 FC_j 分别是当前选定的第 i 、 j 个频谱集中度值。另外, BL_i 和 BL_j 分别是需要比较的第 i 和第 j 个空闲频谱块 ($i < j$),具体计算情况如下:

◆ BL_i 和 BL_j 与冲突业务 A 的纤芯均相同,或均不相同,则

$$FC_i < FC_j, FC_i = FC_j, BL_i = BL_j;$$

$$FC_i > FC_j, FC_i = FC_j, BL_i = BL_j。$$

◆ BL_i 与冲突业务 A 的纤芯相同, BL_j 与冲突业务 A 的纤芯不同,则

$$FC_i < (FC_j + \Delta), FC_i = FC_j, BL_i = BL_j;$$

$$FC_i > (FC_j + \Delta), FC_i = FC_j, BL_i = BL_j;$$

◆ BL_j 与冲突业务 A 的纤芯相同, BL_i 与冲突业务

表 1 冲突业务 A 转换资源表

纤芯	空闲频谱块 (BL_i)	$(B_{\text{used}}+1) / (B_{\text{all}}+1)$	$(DMB_{\text{used}}+1) / I_{\text{Max}}$	频谱集中度 (FC_i)	FBS 值最小($\checkmark$)		
					$\Delta=0.01$	$\Delta=0.1$	$\Delta=1$
C_1	(8,9)	3/6	1/9	1/18	$\checkmark$	$\checkmark$	—
C_2	(4,5)	4/7	1/9	4/63	—	—	—
C_2	(3,4)	4/7	2/9	8/63	—	—	—
C_1	(2,3)	3/6	3/9	1/6	—	—	—
C_3	(2,3)	3/5	3/9	1/5	—	—	$\checkmark$
C_1	(1,2)	3/6	4/9	2/9	—	—	—
C_3	(1,2)	3/5	4/9	4/15	—	—	—

A 的纤芯不同,则

$$(FC_i + \Delta) < FC_j, FC_i = FC_j, BL_i = BL_j;$$

$$(FC_i + \Delta) > FC_j, FC_i = FC_j, BL_i = BL_j。$$

根据图 2,当业务 A 到达时,可以得到以下结果:当 $\Delta=0.01$ 时,纤芯 1 的频谱块(8,9)的 FBS 值最小;当 $\Delta=0.1$ 时,纤芯 1 的频谱块(8,9)的 FBS 值最小;当 $\Delta=1$ 时,纤芯 3 的频谱块(2,3)的 FBS 值最小。具体情况如表 1 所示,控制模块将冲突业务的频谱转换到 FBS 值最小的纤芯和频谱上。

2 仿真结果及分析

为了验证所提出的节点结构和冲突解决算法,本文将分别与 CCC-ROADM^[1]、AOD-SSJSS^[2]、CLFSC-DWMCS^[3]等算法进行对比。该验证在 VS2010 开发平台上进行,具体仿真参数如下:一般网络中平均节点个数都大于 3,那么每个节点的端口数必须大于 3,考虑到节点成本问题,本文节点结构中的输入和输出端口数目设置为 4,多芯光纤的数量 n 为 3^[2],且每个纤芯有 240 个频隙,频隙大小为 12.5 GHz^[11]。业务从本地经节点进入网络时,频谱分配方式为首次适应算法,本文的冲突业务都来自交换业务。所有业务到达服从泊松分布,业务带宽大小服从 $[1,21]$ 区间内的均匀分布,采用二进制相移键控(BPSK)调制进行传输。纤芯之间的耦合方式为弱耦合^[12],纤芯之间的串扰影响较小,本文暂不考虑。仿真性能指标为带宽阻塞率^[13]。

考虑到节点中配置 FRSC,在节点中过多配置 FRSC 会导致器件的浪费,成本也会随之增高。所以,本文首先仿真了在不同负载下节点配置不同的 FRSC 数量所导致的带宽阻塞率情况,如图 3 所示。可以看出,在 FRSC 数量 $FN=15$ 时,带宽阻塞率最低。比较相同 Δ 值下不同 FN 时的带宽阻塞率,可以发现 $FN=15$

与 $FN=10$ 的带宽阻塞率差值小于 $FN=10$ 与 $FN=5$ 的带宽阻塞率差值, 即 $FN=15$ 时带宽阻塞率改善率开始下降。由于承载业务的频谱是有限的, 所以带宽阻塞率不会一直降低。本文还仿真了纤芯切换 Δ 值而导致的业务带宽阻塞率改变情况, 由于 $\Delta=0$ 与 $\Delta=0.01$ 时的带宽阻塞率十分相似, 所以本文取 Δ 值从 0.01 开始变化。图 3 中, 随着 Δ 值的增加, 带宽阻塞率呈现一个逐渐增大的趋势, 这是因为 Δ 值较大, 节点会优先选择冲突业务自身纤芯进行切换, 频谱集中度的影响减小, 增加了纤芯中频谱的碎片。

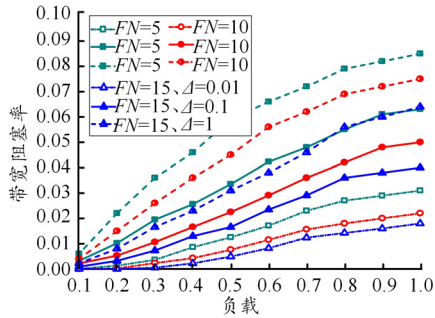


图3 不同FRSC和 Δ 值导致的带宽阻塞率

综上所述, 当 $FN=15$ 、 $\Delta=0.01$ 时, 节点的带宽阻塞率较优, 将该结论应用到本文算法中。不同节点结构和冲突解决算法在不同负载下的带宽阻塞率如图 4 所示。CCC-ROADM 算法的性能差, 因为该结构采用首次适应算法来分配频谱, 导致节点的阻塞率较高。CLFSC-DWMCS 算法比 CCC-ROADM 算法性能较优, 这是因为该算法考虑了频谱转换, 可以将冲突的频谱转换到其它空闲频谱块上, 提高了频谱利用率。但是, 该算法由于只在一个域上解决冲突, 所以带宽阻塞率高于 AoD-SSJSS 算法和本文提出的算法。AoD-SSJSS 算法与本文算法不同的是: 在节点器件配置上, 本文配置 FRSC 可以在全频谱进行转换, 而 AoD-SSJSS 配置的 LRSC 允许转换的频谱有限; 在冲突解决算法上, 本文联合考虑频谱块占用比和最大频谱块, 增加频谱的集中度, 降低频谱中的碎片, 从而降低带宽阻塞率。

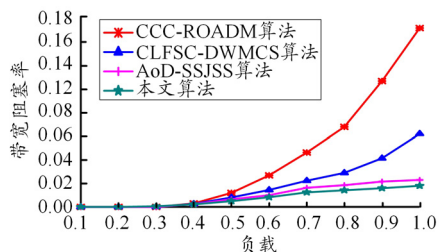


图4 不同节点结构和冲突解决算法的带宽阻塞率

法由于只在一个域上解决冲突, 所以带宽阻塞率高于 AoD-SSJSS 算法和本文提出的算法。AoD-SSJSS 算法与本文算法不同的是: 在节点器件配置上, 本文配置 FRSC 可以在全频谱进行转换, 而 AoD-SSJSS 配置的 LRSC 允许转换的频谱有限; 在冲突解决算法上, 本文联合考虑频谱块占用比和最大频谱块, 增加频谱的集中度, 降低频谱中的碎片, 从而降低带宽阻塞率。

3 结束语

SDM-EON 节点中, 频谱冲突业务对全网的吞吐量有影响。本文在动态功能节点结构基础上提出一种 SCRASC 算法。该算法对频谱块占用比和转换业务与

最大频谱块的距离进行衡量, 选出最优的纤芯和频谱进行转换。本文还考虑纤芯切换的难易程度对纤芯切换进行衡量。仿真结果表明: 相对于其它算法, 本文提出的算法带宽阻塞率性能最优。

参考文献:

- [1] MORENO-MURO F J, RUMIPAMBA-ZAMBRANO R, PAVÓ N-MARINO P, et al. Evaluation of core-continuity-constrained ROADMs for flex-grid/MCF optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 9(11): 1041-1050.
- [2] LIU H, SANG L, CHEN Y, et al. Space-frequency joint contention scheduling algorithm based on AoD in SDM-EONs[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47(1): 93-101.
- [3] LIU H, SANG L, CHEN Y. A Multicast Contention Resolution Scheme Based on Shared Spectrum Converter for Elastic Optical Switching Node [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 144: 316-323.
- [4] 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.
- [5] WEI Y, SHEN G, BOSE S K. Span-restorable elastic optical networks under different spectrum conversion capabilities [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(2): 401-411.
- [6] TODE H, HIROTA Y. Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): A99-A113.
- [7] WU J, XU M, SUBRAMANIAM S, et al. Joint banding-node placement and resource allocation for multigranular elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(8): 27-38.
- [8] LIU H, DU J, CHEN Y, et al. A coordinated virtual optical network embedding algorithm based on resources availability-aware over elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 391-398.
- [9] GE D, GUO B, YANG Y, et al. Layered OXC With Intermod Switching Bridge for Optical SDM-WDM Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(16): 3918-3924.
- [10] ZHAO Y, HU L, ZHU R, et al. Crosstalk-Aware Spectrum Defragmentation based on Spectrum Compactness in Space Division Multiplexing enabled Elastic Optical Networks with Multi-core Fiber [J]. IEEE Access, 2018(99): 1-1.
- [11] MOURA P M, FONSECA N L S D. Routing, core, modulation level, and spectrum assignment based on image processing algorithms[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(12): 947-958.
- [12] ARPANAEI F, ARDALANI N, BEYRANVAND H, et al. Three-Dimensional Resource Allocation in Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(12): 959-974.
- [13] 刘焕淋, 徐一帆, 陈勇, 等. 基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 892-898.