

基于全光节点频谱集中度和频谱离散转换的业务调度方法

刘焕淋¹,温 濛¹,陈 勇²,任 杰¹,胡俊岭¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆 400065; 2. 重庆邮电大学自动化学院,重庆 400065)

摘 要: 为了减少多芯光纤空分复用弹性光网络中光节点业务调度的失败概率,该文基于共享有限波长转换器和光纤延迟线的动态功能光交换节点结构,提出基于频谱集中度和频谱离散转换的业务调度方法.该方法能将业务调度到频谱碎片少和频谱集中度高的输出端口和纤芯;对调度失败的业务,采用基于频谱离散转换度和时域缓存联合的冲突解决方法,减少业务在光交换节点的平均延迟并降低业务调度失败概率.仿真结果表明,本文所提的算法能在降低全光交换节点业务的带宽阻塞率的同时,减少频谱转换器的使用数目和业务的平均时延.

关键词: 空分复用弹性光网络; 业务调度; 频谱集中度; 频谱离散转换; 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)01-0135-07

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

DOI: 10.12263/DZXB.20200916

Service Scheduling Based on Spectrum Aggregation and Spectrum Discrete Conversion of Optical Node

LIU Huan-lin¹, WEN Meng¹, CHEN Yong², REN Jie¹, HU Jun-ling¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to reduce the probability of service scheduling failure in multi-core fiber space division multiplexing elastic optical network, based on the dynamic functional architecture optical switching node with limited wavelength converter and fiber line delay(DASLF), the service scheduling based on spectrum aggregation and spectrum discrete conversion(SS-SASDC) is proposed for all-optical node in the paper. The proposed SS-SASDC can schedule the service to fiber port and fiber core with less spectrum fragmentation and high spectrum aggregation. For the conflict service, SS-SASDC algorithm adopts the conflict resolution method based on spectrum discrete conversion and time domain buffer to reduce the average delay and decrease the probability of traffic scheduling failure in optical switching node. Simulation results show that the proposed SS-SASDC algorithm can not only reduce service's bandwidth blocking probability, but also decrease the used number of spectrum converters, and reduce the cache delay of services.

Key words: space division multiplexing elastic optical network; service scheduling; spectrum aggregation; spectrum discrete conversion; bandwidth blocking probability

1 引言

随着万物互联网应用发展,如高清晰度电视、互动游戏、网络直播、物联网、云计算等快速发展,业务对传输带宽资源需求快速增长,网络的负载不断加重^[1],急需使用带宽更大的光纤骨干网络和提高资源利用率的方法,增加光网络的负载能力^[2].

基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术的弹性光网络(Elastic Optical Network, EON),将光谱被划分为较小的频隙粒度,使频谱分配方式更加灵活、传输容量大、资源利用率高^[3,4].多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)的EON可以极大地提高链路的

传输容量^[5]. 但是,在SDM-EON中,大量数据业务到达SDM-EON光交换节点时,由于光节点的端口收发器数量有限,业务由于争用端口的频谱资源导致业务冲突,因而在SDM-EON交换节点处的调度失败. 因此,设计有效的业务调度方法提高SDM-EON节点资源利用率和吞吐量是有意义的^[6].

采用动态功能交换的SDM-EON光交换节点能根据业务的需求对光器件的功能进行重构和按需选择^[7, 8],在控制模块作用下灵活使用有限的光学器件,提高有限光器件处理业务的能力,减少业务因争用目的端口资源而产生的冲突,降低业务的带宽阻塞率^[9, 10]. 在交换节点中,如果多个业务都需要交换去节点的同一目的端口,当这些业务的交换时刻和占用频谱资源重叠时,称业务在交换节点处产生时间或频谱冲突,把这些业务称为冲突业务^[11]. 为了提高光交换节点业务调度能力,在光节点常常配置相应的光纤延迟线、多芯光纤或频谱转换器分别解决时域、空域和频域实现对冲突业务的重调度,使其被成功调度到无重叠资源区^[12, 13].

文献[14]讨论在EON的节点配置有限频谱转换器(Limited Range Spectrum Converter, LRSC)在频域解决业务冲突调度的问题,在网络低负载时,使整个网络的带宽阻塞率比较低. 但是,随着网络负载的增加,由于LRSC的数目和转换范围有限,业务的带宽阻塞率以指数的方式不断增加. 文献[7]考虑在MCF的EON端口上使用首次适应(First Fit, FF)-最后适应(Last Fit, LF)频谱分配算法对业务进行频谱资源集中分配以避免频谱冲突,但是,该算法只适用于业务的根节点解决资源分配问题,不适用于业务在路由的中转节点发生冲突的解决,因此,该算法的冲突解决能力有限,当网络负载较重和网络中资源碎片化严重时,业务的带宽阻塞率较高. 所以,在EON的节点冲突解决方法中,单域的资源冲突解决能力和效果都比较有限.

在SDM-EON节点的多域冲突业务的资源调度研究中,文献[5]提出一个纤芯一致性光节点结构(Core-Continuity-Constrained-Re-configurable Optical Add/Drop Multiplexer, CCC-ROADM),采用FF方式分配频谱资源,但是由于纤芯和频谱分配方式不灵活,所以该结构的业务带宽阻塞率较高. 文献[10]提出按需光节点结构和纤芯-频谱域联合的冲突调度(Architecture on Demand Space-Spectrum Joint Scheduling, AoD-SSJS)算法调度冲突的业务,该算法考虑不同纤芯的频谱碎片程度和频谱转换器的使用,将冲突业务切换到空闲纤芯和空闲频谱块,因此, AoD-SSJS算法联合了空域和频谱域解决业务的冲突问题. 但是,当大量业务被调度至相同纤芯时,某些链路上的纤芯成为重载纤芯,从而形成

瓶颈链路,降低了网络的资源利用率. 文献[15]提出一个基于网络编码和共享反馈光纤延迟线节点结构(Architecture Based on Network Coding and Shared Feedback fiber delay line, NCSFBA),并基于NCSFBA提出一个时间-频谱域联合的冲突解决调度策略(Time-Frequency Joint Scheduling Strategy, TFJSS),该策略虽然能够通过网络编码和时间-频谱域有效地处理冲突业务,但该策略仅考虑冲突业务频谱转换后的可用位置和首选即中的光纤延时线(Fiber Delay Line, FDL)时域缓存,没考虑FDL和频谱转换联合的资源分配方法,因此,业务的时延较大,频谱资源利用率有待提高.

综上所述,在多芯光纤的SDM-EON中,研究空间-时间-频谱的多域联合冲突调度算法较少,基于此,本文设计基于共享LRSC与FDL的全光动态功能节点结构(Dynamic functional Architecture optical Switching node with Limited wavelength converter and Fiber line delay, DASLF),并提出基于频谱集中度和频谱离散转换的业务调度(Service Scheduling based on Spectrum Aggregation and Spectrum Discrete Conversion of all-optical node, SS-SASDC)方法.

2 基于共享LRSC与FDL的DASLF

如图1所示,基于共享LRSC与FDL的动态功能选择型交换节点结构(DASLF)包括一个集中控制模块, N 个输入/输出端口,每个端口内有 C 根纤芯和1个 $C \times C$ 的频谱选择开关(Spectrum Selective Switch, SSS),每个端口根据需要可以配置不多于 C 个的SDM复用/解复用器,SSS用于纤芯-频谱域的冲突解决;同时,DASLF光节点还包括 N_l 个节点反馈共享池配置的LRSC和 B 个节点反馈共享池配置的FDL,其中,每个LRSC的频谱转换度为 R_l ,FDL的缓存基本粒度为 D 时延单位(ns),采用筒并式结构配置,可以提供 $1, 2, \dots, B$ 单位的离散时间延迟. 控制器模块对到达输入端口的业务进行调度处理,对无冲突的业务根据业务请求进行纤芯和端口交换输出,对有冲突的业务根据SS-SASDC算法决策频谱转换或延时调度.

在图1中,为了解决业务占用资源的冲突问题,降低业务的带宽阻塞率,本文基于图1的DASLF光节点结构,提出基于频谱集中度和频谱离散转换的业务调度(SS-SASDC)方法,该算法对冲突业务首先在纤芯-频谱域进行纤芯-频谱选择解决业务调度;然后,利用FDL缓存和LRSC在时间-频谱域解决冲突业务的调度. SS-SASDC算法的业务调度方法可以减少纤芯的频谱碎片,提高空闲频谱集中度和资源利用率.

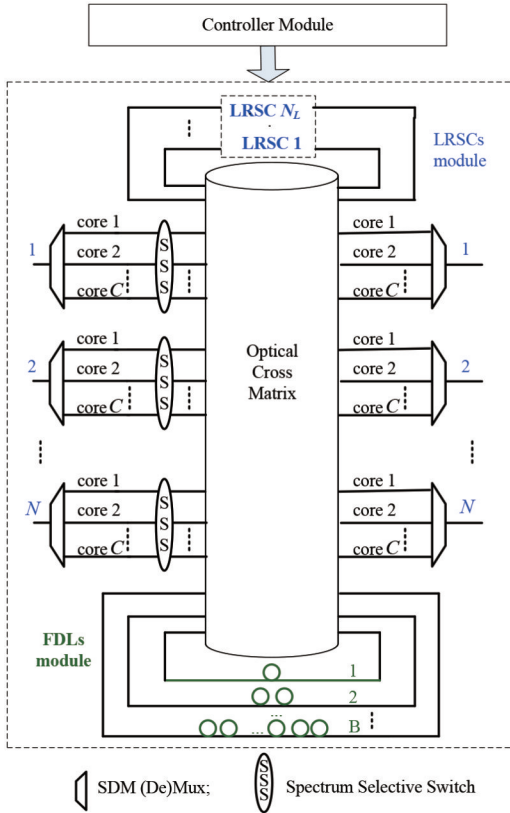


图1 DASLF光节点结构

3 基于频谱集中度和频谱离散转换的业务调度(SS-SASDC)方法

在 DASLF 节点结构中,所提 SS-SASDC 算法主要从纤芯-频谱域、时间-频谱域联合解决冲突业务的调度.在纤芯-频谱域,SS-SASDC 算法根据业务的目的端口的所有纤芯的频谱使用状态,设计了基于频谱集中度的纤芯-频谱选择和频谱块分配方法,使纤芯的频谱碎片减少和提高频谱利用率,减少 SSS 和 LRSC 使用概率.对仍未解决的冲突,设计基于频谱离散转换的时间-频谱域联合的冲突解决方法,减少冲突业务使用 FDL 和 LRSC 的概率,减少频谱碎片产生和提高有限 FDL 和 LRSC 的资源利用率.

3.1 基于频谱集中度的纤芯-频谱选择

为了减小纤芯的频谱碎片和提高纤芯的频谱利用率,当业务发生冲突时,首先确定各纤芯上满足业务带宽的空闲频谱块,如果频谱块不需要频谱转换或空闲频谱块在 LRSC 转换范围内,即满足式(1)约束条件,则空闲频谱块是业务 r 的可用频谱块.

$$\begin{cases} |f_r^{e0} - f_r^{b0}| = |f_r^{e1} - f_r^{b1}|, \\ |f_r^{e1} - f_r^{e0}| \leq R_L, N_L > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, f_r^{b0} 和 f_r^{e0} 分别表示频谱转换前业务 r 占用频谱块的起、止频隙索引号, f_r^{b1} 和 f_r^{e1} 则是 r 频谱转换后占用

频谱块的起、止频隙索引号,当冲突业务使用 LRSC 频谱块转换成功后,LRSC 的数量 N_L 值减 1.

设计基于频谱集中度的纤芯和可用频谱块选择方法,频谱块的频谱集中度 F_B 计算如式(2).

$$F_B = F_C / (\alpha \times \beta) \quad (2)$$

$$F_C = 1 - \frac{B_u}{B_T} \times \frac{D_u + 1}{I_M} \quad (3)$$

在式(2)中,频谱集中度 F_B 由频谱集中度 F_C 、使用纤芯切换光开关 SSS 的惩罚系数 α 和 LRSC 使用的惩罚系数 β 组成,当不使用上述光器件时, $\alpha = \beta = 1$, 否则, $\alpha > 1$, $\beta > 1$, α 和 β 的取值根据光器件的成本和可用数目确定. F_B 值越大,表示选择该频谱块的纤芯-频谱资源越集中,频谱碎片化程度越小,资源的集中度越好.频谱集中度 F_C 由式(3)计算,其中, B_u 是使用的频谱块总数, B_T 是总的频谱块数目,两者比值表示纤芯中频谱块的占用情况,该值越小,表明纤芯的频谱碎片化较轻, F_C 值越大. D_u 是满足业务需求大小的纤芯上空闲频谱块距离已占用频隙的最小距离, I_M 是纤芯的最大频隙索引值,其比值表示待转换频谱块距离最大占用频谱块的位置,该值越小,表明冲突业务转换至该频谱块后,频谱碎片越小,资源占用越集中, F_C 值越大.

基于频谱集中度的纤芯-频谱域冲突解决策略思想为:如果交换节点输出端口中业务需求的目的纤芯和频隙空闲,直接交换业务到输出端口的指定纤芯和频谱块;否则,对冲突业务进行纤芯-频谱冲突调度.在纤芯-频谱冲突调度中,首先,计算业务需求输出端口的纤芯的满足业务带宽的各可用频谱块的 F_C 值;然后,计算 F_B 值;最后,比较各可用频谱块的 F_B 值,选择最大 F_B 值的纤芯和频谱块,作为业务冲突调度的资源.

3.2 基于频谱离散转换的时间-频谱域冲突解决方法

对于纤芯-频谱域未解决的冲突业务,本文提出基于频谱离散转换的时间-频谱域冲突解决方法.该方法主要使用光节点反馈共享配置的 LRSC 和 FDL,分别对冲突业务通过时域缓存和频域的波长转换联合解决冲突业务的时域和频域调度.

当业务选择纤芯、FDL 和 LRSC 解决资源冲突调度时,业务 r 选择最小资源时间-频谱资源离散度 $R_{r,C,k}$ 值对应的第 k 个 FDL 时隙的纤芯 C 中可用频谱块, $k=0, 1, \dots, B$, 当 $k=0$ 表示冲突业务不使用 FDL, 仅适合用 LRSC 解决业务的冲突调度, $R_{r,C,k}$ 值的计算如式(4)所示.

$$R_{r,C,k} = (k+1) \times (1 + R_{r,C}^{e1}) \quad (4)$$

其中, $R_{r,C}^{e1}$ 表示频谱转换到截止频隙 $e1$ 后在纤芯 C 的频谱离散值,其计算方法如式(5)所示.

$$R_{r,C}^{e1} = \begin{cases} B_{r,C}^{e1} \times \frac{I_{r,C}^{e1,R} - I_{r,C}^{e1,L} + 1}{I_{r,C}^{e0,R} - I_{r,C}^{e0,L}}, & \text{use LRSC} \\ 0, & \text{not use LRSC} \end{cases} \quad (5)$$

在式(5)中,当冲突业务不使用LRSC、仅使用FDL解决冲突调度时, $R_{r,C}^{e1}=0$;当使用LRSC解决业务的冲突调度,LRSC的转换范围和可用LRSC数目需满足式(1)约束。 $B_{r,C}^{e0}$ 表示业务 r 冲突解决前纤芯中的空闲频谱块数。 $B_{r,C}^{e1}$ 是业务 r 冲突解决后纤芯中的空闲频谱数目。 $B_{r,C}^{e1}/B_{r,C}^{e0}$ 表示业务 r 从起始频隙 $e0$ 频谱转换到起始频隙 $e1$ 引起的频谱碎片化比值,比值小于1表示频谱碎片化程度减小,比值越大,表示频谱转换方式使纤芯的碎片更严重。 $I_{r,C}^{e1,R}$ 和 $I_{r,C}^{e1,L}$ 分别表示业务 r 放入纤芯 C 的空闲频谱块的最大和最小频隙索引号,两者差值越小,表示业务 r 放置在 $e1$ 开始频隙号后,纤芯的空闲频谱块更集中。 $I_{r,C}^{e1,R}$ 和 $I_{r,C}^{e1,L}$ 分别表示业务 r 转换前纤芯 C 的空闲频谱块最大和最小的频隙索引号。

3.3 SS-SASDC 算法步骤

当业务到达光交换节点时,节点的控制模块根据业务需求,首先判断能否直接交换到输出端口,若不能,则使用SS-SASDC算法解决业务的冲突调度。在SS-SASDC算法中,首先根据本文3.1节方法判断在纤芯-频谱域能否解决业务的冲突调度,如果不能,则根据本文3.2节方法判断使用LRSC和FDL能否在时间-频谱域解决业务的冲突调度,若失败,则阻塞业务。SS-SASDC算法步骤如算法1所示。

算法1 SS-SASDC算法步骤

输入 业务 $r(p, C, [f_r^{b0}, f_r^{e0}])$, p 为业务得输出端口号, C 为业务输入的纤芯号, $[f_r^{b0}, f_r^{e0}]$ 为业务的起、止频隙号, DASLF光节点结构和参数 N, N_L, R_L, B 数值及各纤芯的频谱分配情况, 设 $k=0$ 。

输出 分配给业务 $r(p, C, [f_r^{b0}, f_r^{e0}])$ 的纤芯、频谱块、使用FDL缓存时隙 k 值和 N_L 。

步骤1 若DASLF光节点的输出端口 p 的纤芯 C 的频谱块 $[f_r^{b0}, f_r^{e0}]$ 空闲可用, 则交换输入业务 r 到输出端口和纤芯的频谱块, 转步骤4; 否则, 转步骤2。

步骤2 在纤芯-频谱域解决业务冲突调度: 查询输出端口 p 各纤芯的空闲频谱块, 若存在带宽大于等于 $(f_r^{e0} - f_r^{b0})$ 的可用频谱块, 则根据式(1)~(3), 计算各纤芯的可用频谱块的频谱集中度 F_b , 选择最大 F_b 值对应纤芯的可用频谱块分配给业务 r , 置延迟时隙 $k=0$, 转步骤4; 否则, 转步骤3。

步骤3 在时间-频谱域解决业务的调度: 查询请求 r 的纤芯 C 的各FDL延时线 $kD(k=1, 2, \dots, B)$ 上的可用频谱块, 若没有可用的频谱块, 则阻塞业务请求, 结束算法; 否则, 根据式(1)、式(4)和式(5)计算各可用频谱块的时间-频谱资源离散度 $R_{r,C,k}$ 值, 选择最小 $R_{r,C,k}$ 值对应的第 k 根FDL延迟线和频谱块分配给业务 r , 确定 k 值, 如果该频谱块需要使用LRSC转换, 则 N_L 减1, 转步骤4。

步骤4 输出业务 r 的纤芯、延迟时隙 k 和分配的频谱块信息。

4 仿真及分析

4.1 仿真环境

为验证论文所提的DASLF光节点结构和SS-SASDC算法的性能, 将DASLF结构与CCC-ROADM^[5]结构、AOD结构和SSJS^[10]算法、NC-SFBA结构和TFJSS算法^[15]进行对比。该验证在VS2010开发平台上进行, 具体仿真参数为: DASLF的输入/输出端口数 $N=4$, FDL缓存粒度 D 设为1时间单位。光纤中纤芯的数量 C 为3, 且每个纤芯有320个频隙, 每频隙大小为12.5 GHz; 缺省时, LRSC的 $R_L=20, N_L=20, FDL$ 的 $B=2$ 。业务到达服从泊松分布, 业务带宽大小服从 $[1, 21]$ FS的均匀分布, 仿真业务数目为10 000个, 负载 ρ 从0.1至1均匀变化, 业务采用BPSK(Binary Phase Shift Keying)进行传输。当节点解决业务冲突调度时需要使用SSS, $\alpha=2$, 否则, $\alpha=1$; 需要使用LRSC时, $\beta=2$, 否则, $\beta=1$ 。本文中的纤芯采用弱耦合方式^[16], 可以不考虑纤芯之间的串扰。仿真性能评价指标有业务的带宽阻塞率和业务的平均时延。

4.2 仿真结果及分析

为验证论文所提SS-SASDC算法性能, 在DASLF结构中, 图2仿真了3种冲突解决策略随着 R_L 和 N_L 增加且 $B=1$ 时业务的带宽阻塞率变化情况。这3种算法分别是仅仅采用SSS选择纤芯的空域解决(Space-Only), 采用纤芯-频谱域冲突联合解决(Space Joint Spectrum, SJS)方法和本文采用的纤芯-频谱、时间-频谱联合的(SS-SASDC)算法。为验证在中高负载时DASLF结构的冲突解决性能, 设网络负载 $\rho=0.8$ 。

从图2可以发现, Space-Only只在纤芯之间进行冲突解决, 所以Space-Only算法的带宽阻塞率最高, 且不随着 R_L 和 N_L 变化而变化。当 N_L 增加, 具有频谱冲突解决能力的SJS算法和SS-SASDC算法通过频谱转换解决业务冲突的能力增强, 所以, 它们的业务带宽阻塞率下降。当 R_L 增加, LRSC频谱转换范围增加, 其冲突解决能力增强, 业务带宽阻塞率下降。在相同的 R_L 和 N_L 条件下, SJS算法仅具有纤芯-频谱的冲突解决能力, 而本文所提SS-SASDC算法具有纤芯-频谱和时间-频谱冲突调度能力, 虽然业务最多缓存1时隙, 但是, SS-SASDC算法的冲突解决能力显著增加, 其业务带宽阻塞率明显下降。

由图2可知, 随着 N_L 和 R_L 增加, 业务带宽阻塞率逐渐减小。但是, LRSC频谱转换器的制造成本高昂, 光节点配置数目不多, 因而确定本文所提结构的LRSC数量就很重要。图3仿真了SS-SASDC算法在相邻频谱转换度下不同LRSC数量对应的业务带宽阻塞率改善情况。本文中的带宽阻塞率改善是指在相同LRSC数量时, 相邻转换度之间业务带宽阻塞率的差值。

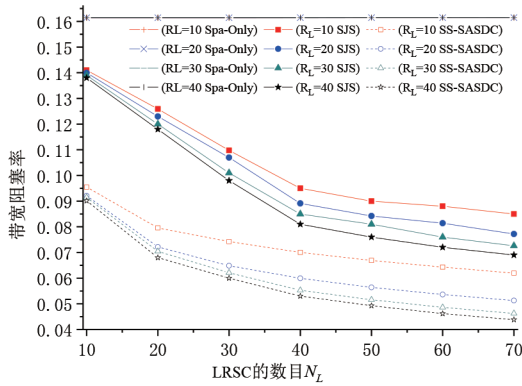


图2 LRSC数目对带宽阻塞率影响 ($\rho=0.8$)

在图3中,当频谱转换度 $\Delta R_L=10$ 时,通过比较,发现 $R_{L1}=20$ 和 $R_{L2}=10$ 的业务带宽阻塞率的改善效果最佳. 这是因为在 $R_L=20$ 时,大多数冲突业务在该频谱转换范围内能找到纤芯的空闲频隙块;当 $R_L>20$ 时, $\Delta R_L=10$,虽然较大的频谱转换范围能够解决更多的冲突业务,但是提高 R_L 的值将增加额外的器件成本,而带宽阻塞率改善的值不断下降,性价比下降. 随着 N_L 增加,业务带宽阻塞率改善提高,这是因为 LRSC 数量越多,冲突业务越有可能被解决. 在图3中, $N_L=40$ 与 $N_L=20$ 之间的业务带宽阻塞率改善约为 0.2%,差别较小. 因此,在下面的仿真中,取 $N_L=20, R_L=20$.

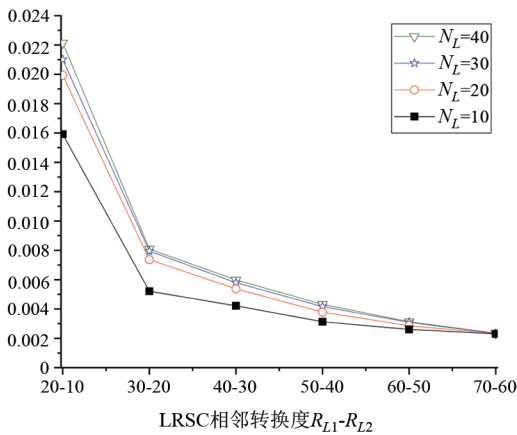


图3 LRSC增加转换度的带宽阻塞率改善

图4是在 $R_L=20, N_L=20$ 时,验证 DASLF 光节点中配置不同 FDL 数目时对业务的带宽阻塞率影响. 从图4可知,随着负载的增加,配置不同 FDL 数目的 DASLF 结构中业务带宽阻塞率都逐渐增加. 同时,在相同负载情况下,当 FDL 数目 B 增加时,冲突业务通过时间-频谱域解决概率增加,业务的带宽阻塞率也有一定的改善. 所以,增加 FDL 配置可以有效地降低 DASLF 结构的业务带宽阻塞率. 但是,配置大量的 FDL 使 DASLF 光节点臃肿,而且过多使用 FDL 对有时延约束的某些时延敏感型业务极为不利,所以,适量配置 FDL,既能降低业

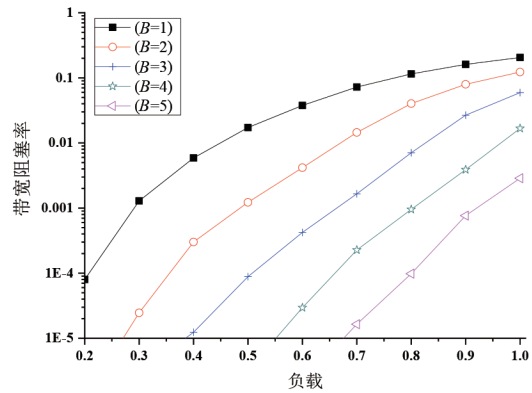


图4 FDL配置数量对带宽阻塞率影响

务的带宽阻塞率,又对业务的时延没有较大影响.

图5表示在不同负载下 B 值对业务的平均时延,平均时延单位为时隙. 从图5可以发现,随着负载增加,平均时延也在增加;当负载不变时,FDL的 B 值增加,业务的平均时延也在逐渐增加. 其中,在 $B=2$ 和 $B=1$ 之间,业务的平均时延增加较快,而 $B=2$ 与 $B=3$ 之间平均时延增加稍慢. 这是因为在 $B=2$ 时,节点已经解决大多数冲突业务的调度,再继续增加 B 业务带宽阻塞率和冲突解决能力下降,所以,业务的平均时延增长缓慢. 由图5知,设 $B=2$ 能较好折中业务带宽阻塞率和平均时延.

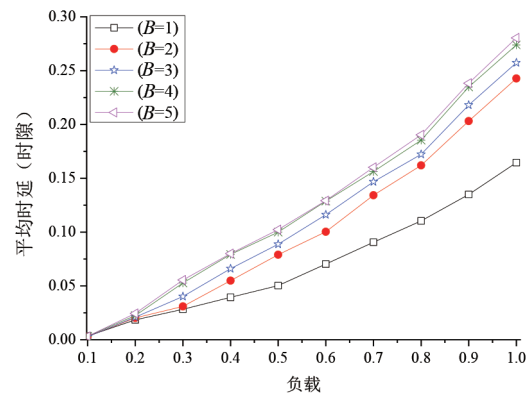


图5 FDL数量对平均延迟影响

图6中验证了本文所提 DASLF 节点和 SS-SASDC 调度算法的带宽阻塞率性能,对比节点结构及对应算法分别为:与 CCC-ROADM, NCSFBA-TFJSS, AOD-SSJS 和 AOD-SSJS+FDL 各节点配置的端口数目、纤芯数目、需要使用的 LRSC 和 FDL 数目一致,其中, NCSFBA-TFJSS 不需要 LRSC,但是需要使用的网络编码器数目设为 20,与 LRSC 数目一致. 从图6可以看出, CCC-ROADM 结构的带宽阻塞率最高,本文所提的 DASLF 节点和 SS-SASDC 算法的带宽阻塞率最低. 这是因为,在 CCC-ROADM 结构中,业务交换必须遵循纤芯一致性,

基于波长单位带宽的交换粒度不够灵活,带宽资源利用率比较低,当负载增大时,CCC-ROADM结构的带宽阻塞率也线性上升.而NCSFBA-TFJSS在节点中配置FDL,冲突业务直接缓存在FDL上,等待后续时隙再进行调度,虽然NCSFBA-TFJSS在时间-频谱域对冲突业务进行解决,但是业务缓存方式采用FF,当业务负载逐渐增大时,时间-频谱域上的资源逐渐枯竭,导致业务的带宽阻塞率快速增长.而AOD-SSJS仅在纤芯-频谱域对冲突业务进行解决,由于AOD-SSJS在纤芯-频谱域上设计一个基于频谱连续度的冲突解决算法,因此AOD-SSJS的业务带宽阻塞率低于CCC-ROADM和NCSFBA-TFJSS.

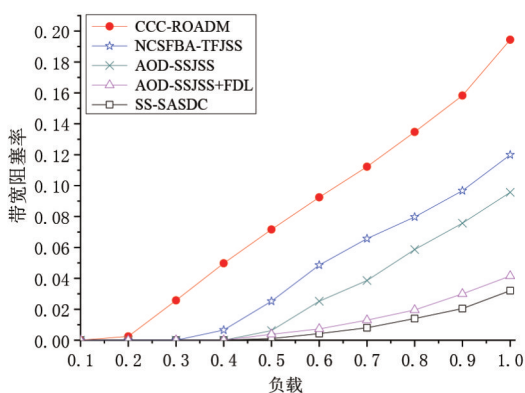


图6 不同节点和算法的带宽阻塞率

在图6中,为增加可比性,本文在对比算法中性能最佳的AOD-SSJS结构和算法中加入FDL,且 $B=2$,命名为AOD-SSJS+FDL,使其成为一个纤芯-频谱、时间-频谱域能解决冲突的结构和算法.从图6中可以发现,本文所提SS-SASDC优于AOD-SSJS+FDL,这是因为SS-SASDC充分利用纤芯-频谱域和时-域的冲突解决能力,设计了基于频谱集中度和基于频谱离散转换度的冲突解决策略,对少量的LRSC和FDL使用中以减小频谱碎片产生和增加空闲频谱集中度为目标,提高了资源利用率并降低了业务的带宽阻塞率.

5 总结

为了提高SDM-EON节点的冲突调度能力并降低带宽阻塞率,本文提出了DASLF节点和SS-SASDC算法,设计了纤芯-频谱和时间-频谱的纤芯频谱转换和延时间-频谱谱转换方法,提高了冲突解决中空闲资源的集中度并降低了频谱转换的资源碎片.随着互联网和大量数据的应用和发展,本文所提的节点结构和冲突解决算法可以有效地保障数据传输的性能和提高资源利用率,对提高交换节点处理能力和促进高性能网络发展具有积极的意义.

参考文献

- [1] CAI T, WU Y X, FARMAN H, et al. Blockchain-empowered big data sharing for Internet of things[J]. International Journal of Web Services Research, 2021, 18(1): 58-69.
- [2] 付亚伟. 大数据互联网时代光纤通信技术的发展与挑战[J]. 重庆邮电大学学报, 2021, 33(1): 52-58.
FU Y W. Development and challenge of optical fiber communication technology in the era of big data internet[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications. 2021, 33(1): 52-58. (in Chinese)
- [3] IYER S. On routing, modulation format, space and spectrum allocation with protection in space division multiplexing-based elastic optical networks[J]. Journal of Information and Telecommunication, 2020, 4(1): 105-117.
- [4] 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 N H, SU G Q, CHEN J B. 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)
- [5] MORENO-MURO F J, RUMIPAMBA-ZAMBRANO R, PAVÓN-MARINO P, et al. Evaluation of core-continuity-constrained ROADMs for flex-grid/MCF optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(11): 1041-1050.
- [6] YAGHUBI-NAMAAD M, RAHBAR A G, ALIZADEH B. Adaptive modulation and flexible resource allocation in space-division-multiplexed elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(3): 240-251.
- [7] ZHANG J, ZHU B, YANG X M, et al. A novel multi-granularity two-layer SDM ROADM architecture[J]. Optical Communications, 2021, 47: 126473.
- [8] GHAZVINI H, MINA S, RAHBAR G, et al. Load balancing, multipath routing and adaptive modulation with traffic grooming in elastic optical networks[J]. Computer Networks, 2020, 169: 107081(1:13).
- [9] DING S, YIN S, ZHANG Z, et al. Evaluation of the flexibility of switching node architectures for spaced division multiplexed elastic optical network[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2020: 1-3.
- [10] LIU H L, SANG L Y, 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.

- [11] 黄梅根, 庞瑞琴, 刘亮, 等. 基于SDN的数据中心网络中考虑等待时间的流调度策略研究[J]. 重庆邮电大学学报, 2021, 33(2): 202-208.
HUANG M G, PANG R Q, LIU L, et al. Research on flow priority scheduling algorithm considering wait time in data center network based on SDN[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications. 2021, 33(2): 202-208. (in Chinese)
- [12] 刘焕淋, 方菲, 陈勇, 等. 基于无色无向无冲突可重构光分插复用器节点的全光IP组播能效调度[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(11): 2571-2577.
LIU H L, FANG F, CHEN Y, et al. Energy-efficient scheduling algorithm for all optical ip multicast based on CDC-F ROADM node[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(11): 2571-2577. (in Chinese)
- [13] YANG S, STOL N. Design of delay-line buffers for asynchronous optical packet switched networks[C]//Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference. Southbank, VIC, Australia: IEEE, 2015: 206-211.
- [14] KABACIŃSKI W, MICHALSKI M, ABDULSAHIB M. Wide-sense nonblocking elastic optical switch[J]. Optical Switching and Networking, 2017, 25: 71-79.
- [15] LIU H, LI Y, PENG H, et al. Multicast contention resolution based on time-frequency joint scheduling in elastic optical switching networks[J]. Optical Communications, 2017, 383: 441-445.
- [16] GUO D W, DU B L, YANG Y, et al. Layered OXC with intermode switching bridge for optical SDM-WDM networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(16): 3918-3924.

作者简介



刘焕淋 女, 1970年生, 重庆人, 博士. 重庆邮电大学教授、硕士生导师. 主要研究方向为光通信技术和网络.

E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn



温 濛 女, 1995年生, 四川冕宁人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为弹性光网络的资源优化分配.

E-mail: 2227673840@qq.com