

基于模式间串扰避免的弹性光交换节点冲突解决方法

刘焕淋*^① 王展鹏^① 任杰^① 陈勇^② 方菲^① 温濛^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: 为了减少业务在少模光纤空分复用弹性光网络全光交换节点内资源冲突的概率, 该论文在全光分层节点结构中配置共享的有限频谱转换器与资源预留模块(LARSL), 提出基于模式间串扰避免的空-频-时域联合资源冲突解决算法(LARSL-CACRA)。在空-频域, 为LARSL-CACRA设计基于模式间串扰避免的滑动窗的模式-频谱资源块计算方法, 使频谱冲突业务获得负载更均衡的模式-频谱资源块。对于仍然冲突的业务, LARSL-CACRA使用时域资源预留模块, 进一步降低业务带宽阻塞率。仿真结果表明, 该文设计的LARSL-CACRA可以改善交换节点带宽阻塞率, 并减少业务平均时延。

关键词: 空分复用弹性光网络; 冲突解决; 串扰避免; 模式-频谱资源块; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2224-08

DOI: 10.11999/JEIT200586

Conflict Resolution of Elastic Optical Switching Node Based on Inter Modes Crosstalk-avoidance

LIU Huanlin^① WANG Zhanpeng^① REN Jie^① CHEN Yong^②

FANG Fei^① WEN Meng^①

^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: For addressing the requests conflict in all-optical switching node of space-division multiplexing elastic optical network with few-mode fibers, an all-optical Layered Architecture based on Resource reservation module and Shared Limited-range spectrum converter (LARSL) is studied in the paper. First, a inter modes Crosstalk Avoidance-based on space, frequency and time domain combing resource Conflict Resolution Algorithm for LARSL (LARSL-CACRA) is put forward. Then, a calculation method for crosstalk-avoidance resource block using sliding window is designed to search the more balanced mode-spectrum resource black for the spectrum conflicted requests in the space-frequency domain. Moreover, a time domain resource reservation module is designed to reserve still conflicting requests to next scheduling time for further reducing the bandwidth blocking probability. Simulation result show that the proposed LARSL-CACRA can decrease node's bandwidth blocking probability and can also reduce the cache delay.

Key words: Space division multiplexing elastic optical network; Conflict resolution; Crosstalk-avoidance; Mode-spectrum resource block; Bandwidth blocking probability

1 引言

传统单芯、单模的波分复用网络将频谱划分为固定波长单位的信道, 这种固定栅格的频谱分配方

式造成带宽的浪费, 并且难以满足高速、不同粒度带宽需求的数据传输要求^[1,2]。而空分复用弹性光网络(Space Division Multiplexing-Elastic Optical Networks, SDM-EONs)的光谱被划分为较小的频隙, 具有频谱分配方式灵活、传输容量大、资源利用率高优点^[3,4]。因此, 大容量和灵活带宽的SDM-EONs可以提高数据传输性能^[5,6]。基于少模光纤的空分复用技术具有每单位面积携带更多数据、光放大功率高等优点, 成为SDM-EONs技术近年来的研究热点。

收稿日期: 2020-07-16; 改回日期: 2021-01-03; 网络出版: 2021-01-07

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51977021), 重庆市自然科学基金(2019jcyj-msxmX0613, 2020jcyj-msxmX0682)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (51977021), Chongqing Natural Science Foundation (2019jcyj-msxmX0613, 2020jcyj-msxmX0682)

但是,随着全光节点中业务负载增加,当大量业务经过SDM-EONs全光节点时,存在多个业务同时需要输出至某端口,且请求的频谱资源存在重叠,这些请求相同频谱的业务因竞争相同频谱资源产生冲突和带宽阻塞问题。另外,在SDM-EONs节点,业务在不同模式传输时若频谱存在重叠,则光信号将“泄露”至相邻的模式,造成严重的模式间串扰(Cross Talk, XT)问题,模式间串扰随着光信号传输距离的增加而加剧,严重影响信号传输质量和频谱块资源的可用性^[7,8]。

对于光纤中的模式串扰问题,文献[9]提出模式串扰计算公式,但是该计算公式仅在40 km距离和特定100 Gbps传输速率有效。文献[10]在SDM-EONs中采用串扰感知的方法对业务进行模式频谱分配,该方法首选重叠数目较少的空闲频谱块承载业务,从而减小模式间串扰。文献[11]提出一种基于串扰避免的SDM-EONs频谱分配方法,该方法采用轮询方式寻找小于串扰门限值的空闲频谱块。文献[10]和文献[11]提出的算法能够有效地降低低负载时业务之间的模式串扰,但是随着负载增加,网络中能够满足串扰条件的空闲频谱越来越少,导致大量业务被阻塞。

另外,为了有效地解决全光节点中业务因竞争相同频谱资源而导致的业务带宽阻塞率过高问题,文献[12]提出一个基于时间预留的EONs节点结构和延迟分配频谱(Specified Time Specified Duration-Delayed Spectrum Allocation, STSD-DSA)的时-频联合算法,该算法将冲突业务预留至下一时隙再进行交换,STSD-DSA算法虽然可以降低业务的带宽阻塞率,但业务平均时延和串扰问题均未考虑。文献[13]提出一种针对多播业务的波长域冲突解决方法,该方法在全光节点结构中配置有限频谱转换器(Limited Range Spectrum Converter, LRSC),将冲突业务的频谱在一定转换范围内进行频谱转换,该方法虽然可以降低全光节点中业务的带宽阻塞率,但是未有效考虑频谱碎片和频谱转换后的串扰情况,随着全光节点中业务负载增加,节点需要配置的LRSC数量(Number of LRSC, NL)快速增加。文献[14]在文献[12,13]基础上,提出一个基于业务持续时间的滑动窗路由模式频谱时隙分配(Sliding Window - Routing Spectrum Mode and Time Assignment, SW-RSMTA)的空-时-频算法,该算法规定在预留时隙窗口内,冲突业务可以选择延迟任意时隙进行交换,降低业务的带宽阻塞率和平均时延;并且SW-RSMTA算法还在全光节点收发端配置多输入多输出数字处理设备(Multiple Input

Multiple Output-Digital Signal Processing, MIMO-DSP)对信号传输中受到的物理损伤进行补偿,降低串扰对业务传输过程中对光信号质量的影响。

文献[15]考虑在多芯光纤的SDM-EONs的按需全光节点结构中配置LRSC,提出一个基于频谱连续度的空-频域联合冲突解决算法,该算法采用先空域、后频域的方法解决业务的冲突调度,使全光节点的带宽阻塞率进一步降低,但是该方法没有考虑芯间的频谱串扰问题。

虽然LRSC可在频域即时解决冲突业务,但是随着大容量少模光纤应用于SDM-EONs网络,不同于文献[14]的多芯光纤的SDM-EONs,少模SDM-EONs的模式间串扰使频谱资源的可用性变得更加复杂,LRSC的频谱转换能力不仅要考虑频谱碎片,还需要考虑模式间串扰导致的频谱块资源不可用问题^[16]。

基于以上分析,本文考虑LRSC的数量、LRSC的转换范围和少模光纤的模式间串扰问题,设计一个基于时域资源预留和共享有限频谱转换器的全光分层节点结构(all optical Layered Architecture based on Resource reservation and Shared Limited-range spectrum converter, LARSL),并基于LARSL,提出基于纤芯模式间串扰避免的空-频-时域联合资源冲突解决算法(Crosstalk Avoidance-based on space, frequency and time domain combining resource Conflict Resolution Algorithm, CACRA)。

2 共享LRSC和资源预留模块的全光分层交换节点结构

SDM-EONs网络根据业务请求的源、目的光节点为业务分配一条光传输路径,且为光路分配满足频谱连续性和频谱一致性的可用频谱块。但是,随着网络中业务负载快速增加,能够满足业务频谱连续性和一致性的频谱资源逐渐耗竭,模式间串扰问题进一步降低了频谱资源的可用性。同时,为了满足不断增长的IP数据需求,网络运营商不得不部署更多大容量的网络设施,规模化发展的网络设施使得业务调度和资源分配更加复杂,提高资源利用率是降低高负载网络带宽阻塞率的有效途径之一^[17]。

为了降低业务的带宽阻塞率,文献[16]提出一个分层交叉连接全光节点结构,采用频谱分散扫描-频谱优先-路由频谱分配(Layer optical cross connections-Scattered Spectrum Scan with - Spectrum First - Routing and Spectrum Allocation, Layer SSS-SF-RSA)的空-频算法调度业务,但是,其冲突解决能力与第2层中模式交换端口数有关,

当业务负载增加时,模式交换所需的端口数快速增加,使所需配置的光器件数量迅速增加。文献[13,14]分别使用资源预留模块和频谱转换模块处理冲突业务,证明在减少所需端口时同时,能降低业务的带宽阻塞率。

本文提出的基于资源预留和共享LRSC的全光分层节点结构(all layer Layered Architecture based on resource Reservation and Shared Limited range spectrum converter, LARSL),如图1。本结构包括1个控制模块, N 个输入/输出端口,每个端口内有1根纤芯,每根纤芯有 M 种模式,模式间切换使用空间选择开关(Space Selection Switch, SSS),每个端口包含1个模分复用/解复用器和1个MIMO-DSP^[14],模分复用/解复用器用于复用和解复用信号的模式,MIMO-DSP可以缓解信号在传输过程中的物理损伤。控制模块主要功能是调度业务使用各端口和各模块设备的资源。

在图1中,基于LARSL,业务最多可被分配至3个资源维度传输,以减少业务被阻塞的概率。当光纤中的业务进入输入端口时,首先会经过模式解复用器将光纤解复用为 M 个模式,其次解复用后的 M 个模式中的业务通过MIMO-DSP补偿传输过程的光信号物理损伤;控制模块控制 M 个模式中的业务在LARSL的第1层进行 $N \times N$ 全连接模式的频谱空间交换。若业务因竞争相同频谱资源而导致冲突时,控制模块将冲突业务切换至由共享LRSC池和资源预留池组成的全光分层节点结构第2层进行调度,第2层根据本文所设计的冲突解决算法,将冲突业务在频谱转换范围内进行频谱转换,或将业务预留一定时隙后再调度。最后这些成功调度的业务经过MIMO-DSP和模式复用器复用至光纤上进行传输。光节点在调度中,若发现频谱分配或频谱转换后存在模式间串扰问题,则采用本文设计的频谱串扰避免方法分配模式和频谱。

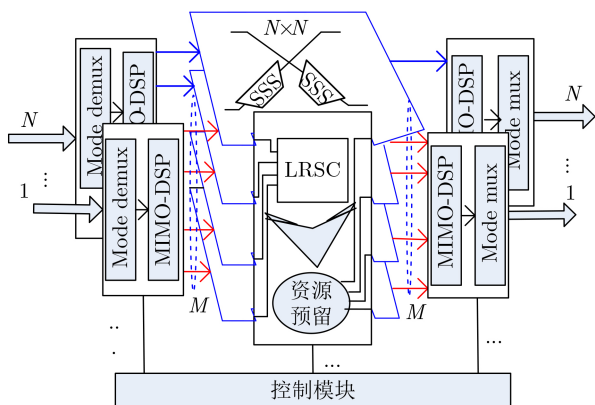


图1 基于共享LRSC和资源预留模块的全光分层节点结构(LARSL)

3 基于串扰避免和空-频-时域联合的资源冲突解决算法

LARSL可以灵活地实现业务在节点中的交换和冲突解决,但是LARSL中配置的光器件数量过多,不同模式之间相同频谱占用将导致模式串扰问题,所以本文在LARSL基础上提出一个基于串扰避免的空-频-时域联合资源冲突解决算法(Crosstalk Avoidance-based on space, frequency and time domain combing resource Conflict Resolution Algorithm, CACRA)。所提LARSL-CACRA首先根据模式和频谱资源的占用情况,构造模式串扰辅助图;其次,在空-频域提出一个基于滑动窗的频谱资源块计算方法计算不同空闲频谱块资源值,并更新模式串扰辅助图;然后,根据频谱资源值和串扰值选择合适的空闲频谱块进行转换;最后,对于空-频域不能解决的冲突业务,预留模块将冲突业务预留至下一时隙调度。

3.1 模式串扰辅助图

不同模式的相同频谱被业务占用将产生模式串扰问题,模式串扰问题严重影响业务传输性能^[5]。为此,本文基于模式串扰和频谱占用情况构造模式串扰辅助图,每一个模式-频谱块(Mode Spectrum, MS)由2部分组成,如式(1)所示,MS有2个下标,用 k 和 f 表示,分别代表模式和频隙索引值,MS由频谱占用(Spectrum Occupied, SO)标识 S_O 和串扰值(Crosstalk Value, CV)标识 C_V 表示,其中,式(1)中的 S_O 为布尔变量,表示频隙是否被占用,若被占用, $S_O=1$,否则 $S_O=0$ 。

图2(a)表示一根光纤的5个模式的7个频隙的MS值分布情况,现有A,B,C和D共4个业务等待分配模式-频隙资源。在图2(a)中, $MS_{1,1} = \{2, 1\}$ 表示模式LP01中模式1的频隙1串扰值 $C_V=2$,且模式1的频隙1被占用,所以 $S_O=1$ 。参考文献[14]研究表明:不同模式的信号之间存在串扰,即LP01, LP21和LP11之间存在模式间串扰;而相同模式的不同分组间不存在串扰,即LP11a和LP11b没有串扰,同理,LP21a和LP21b没有串扰

$$MS_{k,f} = \{C_V, S_O\}, k \in M, f \in F \quad (1)$$

$$C_V = \begin{cases} C_V + 1, & f \text{频隙在 } k \text{模式存在串扰} \\ C_V + 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_O = \begin{cases} 1, & \text{模式 } k \text{的 } f \text{频隙被使用} \\ 0, & \text{模式 } k \text{的 } f \text{频隙未被使用} \end{cases} \quad (3)$$

根据不同模式之间相同频谱占用情况,设计式(1)、式(2)、式(3)构造串扰辅助图,反映各光纤端口模式-频谱资源占用和频谱被影响的串扰值,便于计算空闲的频谱资源块。

3.2 基于滑动窗的频谱块资源衡量方法

当业务到达LARSL时，控制模块根据业务的目的端口交叉连接，对每个目的端口，根据频谱占用和式(1)、式(2)、式(3)构造串扰辅助图。如图2(a)所示，目的端口上的每个业务包含3个参数，分别表示业务的模式分组、起始频隙和截止频隙索引号，则业务A和B所对应的模式和频谱均空闲，业务A和B分配频隙后，利用式(1)、式(2)、式(3)更新串扰辅助图，更新占用频隙的串扰辅助图如图2(b)所示。由于不同模式占用相同频谱才产生串扰，所以图2(b)、图2(c)、图2(d)只显示了串扰改变区域的辅助图情况。对业务分配频隙后，检查所分配频隙的串扰值是否小于阈值，即满足式(4)，其中 C_V 值由式(2)进行计算，而TH是串扰阈值，若满足式(4)，则该频谱可以分配给业务，否则，不能分配。若设TH=4，由式(2)计算业务A和B模式-频谱分配后的串扰值均为2，满足式(4)，则业务A和B分配的模式-频谱可行。

$$C_V < TH \quad (4)$$

给业务C分配频谱时，发现业务C所需模式的频隙4已被其他业务占用，则业务C产生频谱冲突。本文根据模式中频谱的串扰和空闲情况，提出了一个基于滑动窗的频谱块资源衡量方法降低因频谱冲突的阻塞率。该方法滑动窗搜索所有模式的空闲频谱块，其中，左右滑动窗大小即与LRSC的频谱转换范围(Converter Range, CR)有关，上下滑动为模式搜索，在滑动搜索过程中计算业务分配在模式 k 的频隙 $[i, j]$ 资源值 $R_{i,j}^k$ ，如式(5)所示

$$R_{i,j}^k = \frac{\sum_{n \in M} \sum_{l=i}^j X_l^n}{(j-i+1) \times M} \times \left(1 - \sum_{(s,e) \in F, s=1}^{s+j-i} \frac{A_{s,e}^k}{T_{s,e}^k} \right) + N_{i,j}^S \quad (5)$$

其中， X_l^n 是一个布尔变量，若模式 n 上的频隙 l 被占用， $X_l^n=1$ ，否则 $X_l^n=0$ ， i 和 j 分别是业务请求的频隙索引号起、止值， M 是光纤中的模式分组总数。式(5)第1个分数表示在所有模式的频隙 $[i, j]$ 的频隙占用比，该值越小，表明光纤的所有模式的频隙 $[i, j]$ 资源占用少，业务分配在光纤的频隙 $[i, j]$ 上的串扰值就较小；式(5)的第2项表示 k 模式的占用频谱块与总频谱块比值， $A_{s,e}^k$ 是模式 k 中的所有空闲频谱块数量， $T_{s,e}^k$ 表示模式 k 中的总频谱块数目。若需要使用SSS进行模式切换， $N_{i,j}^S$ 值为1，否则为0。因此， $R_{i,j}^k$ 值越小，表明模式 k 上频隙索引值为

$[i, j]$ 的频谱资源越充足，模式间的串扰影响也较小。

对图2中的冲突业务C，进行上下滑动搜索空闲的模式资源，如图2(b)。然后，设置频谱滑动窗大小 $C_R=2$ 时，左右滑动搜索空闲频谱块资源，如图2(c)、图2(d)。根据式(5)计算 $R_{i,j}^k$ 值，得到的结果如表1所示。在表1中，设空闲LRSC数目 $N_L > 0$ ，串扰阈值TH=4，若 $R_{i,j}^k < TH$ ，则满足阈值要求，最小 $R_{i,j}^k$ 值对应的模式和频谱块就是业务需要的转换模式和频谱块。由表1可得：模式分组LP21a的频谱块[6,7]对应的 $R_{i,j}^k$ 值最小，所以冲突业务C可转换到模式分组LP21a的频谱块[6,7]。而业务D不能滑动搜索连续的可用频谱块，所以，业务D需要进入资源预留模块，等待下一时隙进行冲突调度。

3.3 LARSL-CACRA算法

当业务根据路由表到达LARSL节点时，采用首次适应法为业务分配模式和频谱资源，若业务在全光节点竞争频谱资源导致频谱冲突，LARSL-CACRA算法首先根据式(1)、式(2)、式(3)构造模式-频谱的串扰辅助图；然后，利用式(5)计算出在滑动窗内所有空闲的模式-频谱块的资源值 $R_{i,j}^k$ ，并升序排列空闲的模式-频谱块资源，更新模式串扰辅助图，选择满足阈值条件式(4)的最小 $R_{i,j}^k$ 值的模式和频谱块分配给业务。若在滑动窗内找不到满足阈值条件的空闲的模式-频谱块资源，则冲突业务进入预留资源模块，等待下一时隙调度，若业务等待的累积预留时隙 $T_N > L$ ，就阻塞该业务。累积预留时隙如式(6)所示

$$T_N = T_b + D_t \quad (6)$$

4 仿真性能与分析

4.1 仿真环境及评价指标

为了验证本文所提LARSL-CACRA性能，与同样解决少模光纤SDM-EON冲突调度的STSD-DSA^[12]算法、SW-RSMTA^[14]算法和Layer SSS-SF-SRA算法^[16]进行性能对比。该验证在14节点、21条链路的NSFNET网络中，具体仿真参数为：LARSL的输入/输出端口数 $N=4$ ，多模光纤的模式有LP01, LP11和LP21，其中LP11和LP21分别有2个模式分组：LP11a, LP11b和LP21a, LP21b^[14]，每个模式有240个频隙^[18]，每频隙大小为12.5 GHz。本文的数据业务均为预留型数据业务，且业务经过LARSL前未使用资源预留模块处理业务，即 $T_b=0$ 。参考文献[12]证明，最大预留时隙 L 设置为1或2。所需LRSC数量 N_L 和频谱转换范围 C_R 根据仿真结果进行确定。业务到达率 λ 服从泊松分布，

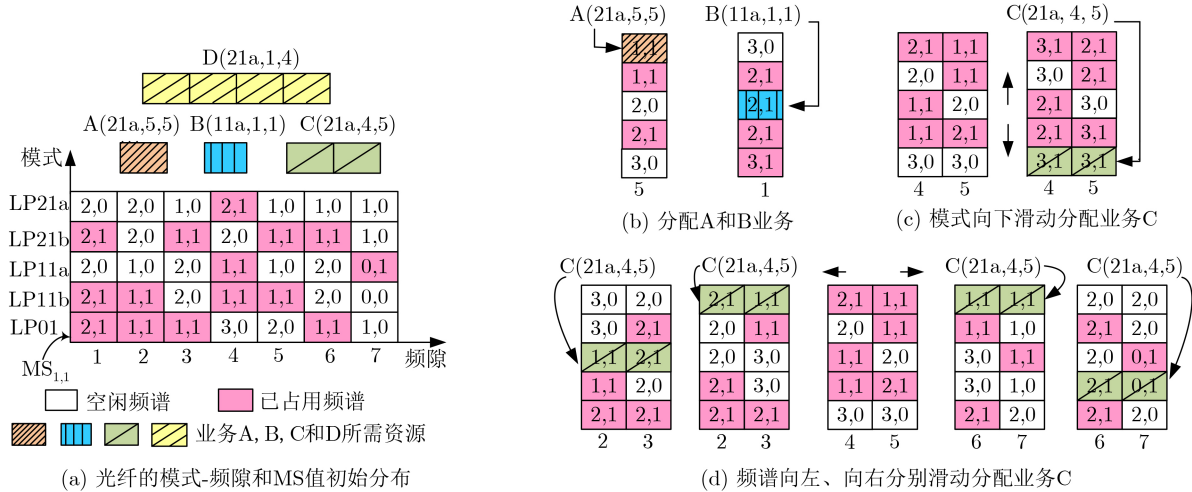


图2 模式-频隙的串扰辅助示意图

在LARSL节点的业务服务时间服从 μ 的负指数分布，业务带宽大小服从 $[1, 21]$ 频隙的均匀分布。为了体现少模光纤的SDM-EONs大容量传输数据的特点，本文的串扰门限值 $TH=4$ ，业务采用二相相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制。

4.2 仿真结果分析

在LARSL节点中，当LRSC的 C_R 和 N_L 变化时，图3仿真了CACRA算法的带宽阻塞率(BBP)性能。由于文献[14]中LRSC的 C_R 和 N_L 的递增值分别为4和10，所以本文LRSC的 C_R 和 N_L 也遵循该递增规律。设资源预留时隙 $L=1$ 。考虑LARSL在中等偏重负载情况下的调度冲突解决能力，设节点的负载为0.6。图3中，随着LRSC的 C_R 和 N_L 数量增加，带宽阻塞率呈下降的趋势，这是因为LRSC数量增加，更多的冲突业务能够通过转换频谱而解决冲突；同理，随着LRSC的转换范围越大，可供冲突业务转换的空闲频谱被找到的概率越高。由图3可知，当 $N_L > 20$ 和 $C_R > 24$ 时，业务的带宽阻塞率下降速度明显变缓，考虑到全光节点的性能和全光节点中配置光器件数量的性价比，后续仿真中，设LRSC的 $N_L=20, C_R=24$ 。

在图4中，比较了3种算法在不同负载和节点预留时隙的带宽阻塞率性能，由于Layer SSS-SF-SRA算法[16]是空-频冲突解决算法，没有时域资源模块，在这里，所以本文选择STSD-DSA算法和SW-RSMTA算法与本文的LARSL-CACRA(如表2所

示)进行对比。文献[12]考虑业务的平均时延，认为预留时隙 L 设置为1和2。本文综合考虑不同预留时隙、全光节点结构和冲突解决算法的业务带宽阻塞率情况选择合适的预留时隙。LARSL中不仅配置了LRSC，还配置了资源预留模块，但是业务预留时隙过多，导致业务的平均时延过高，所以需要结合全光节点结构和冲突解决算法选择最优的资源预留时隙。如图4所示，为了确定合适的预留时隙阈值，需要分析不同算法下不同资源预留时隙阈值的带宽阻塞率情况。

从图4可以得到，随着负载的增加，3种算法的带宽阻塞率都会增加，因为负载增加后，节点各端口的空闲模式-频谱块资源减少，频谱资源冲突概率更高，业务调度成功更加困难。但是，本文所提LARSL-CACRA算法相比同样具有空-时-频解决能力的SW-RSMA算法和时-频调度STSD-DSA算法的带宽阻塞率都更低，这是因为LARSL-CACRA算法采用滑动窗方法搜索和计算空闲模式-频谱块的资源值，并构造有效的串扰辅助图方法，选择满足串扰阈值要求的模式-资源频谱块分配给业务，有效地降低了业务的模式间串扰和频谱块资源冲突概率，减少了业务的带宽阻塞率。而采用了LRSC和MIMO-DSP解决频谱冲突和串扰感知问题的SW-RSMA算法，由于没有量化串扰值计算和能均衡负载分配的模式-频谱资源值计算方法，无法选择更有效的模式-频谱块分配给业务，因此SW-RSMA算法的阻塞率比LARSL-CACRA算法高。而STSD-DSA算法采用了时-频冲突调度，节点没有配置LRSC，缺乏空域的冲突解决和模式间串扰解决方法，所以在相同负载下，STSD-DSA算法的阻塞率最高。随着预留时隙 L 的增加，3种算法的带宽阻

表1 业务C冲突转换资源值计算结果

模式	LP01	LP21a	LP21a	LP11b	LP11a
频谱块	[4,5]	[6,7]	[2,3]	[6,7]	[2,3]
$R_{i,j}^r$	3/2	3/20	1/5	5/4	6/5

表 2 LARSL-CACRA算法

输入：每个网络节点的LARSL端口数 N ，模式数 M ，预留时隙最大值 L ，串扰阈值 TH ，业务 $R(k, i, j)$ ，其中， k 是业务的传输模式分组， i 和 j 分别是业务的起始和截止频隙索引值，设 $T_0=0, D_0=0$ ，业务 R 的源和目的节点，LRSC的数量 N_L 和转换范围 C_R ，模式-频谱块值 MS ，设空闲的模式-频谱块集合为 $R_{i,j}^K$ 。

输出：输出端口成功传输业务的 $R(k, i, j)$ 值、业务的预留时隙和失败传输业务的带宽。

- (1) 用最短路径算法为业务 R 计算一条从源节点到目的节点的最短跳数的路径，根据每个网络节点的LARSL上的模式分组和频谱块占用情况，利用式(1)、式(2)、式(3)构造各路由中转节点输出端口的模式-频谱的串扰辅助图；并用首次适应算法为业务分配初始的空闲模式和频谱块，使用式(1)、式(2)、式(3)更新串扰辅助图；
- (2) 若节点的路由表有多个业务争用LARSL中相同目的端口的相同模式-频谱块，或业务的目的端口的模式-频谱块已经被占用，转步骤(4)；否则，转步骤(3)；
- (3) 若该光节点的模式-频谱分配后的串扰值满足式(4)，记录节点的 $R(k, i, j)$ 值，转步骤10；否则，初始的模式-频谱分配不可行，转步骤(4)；
- (4) 若存在频谱冲突节点的LRSC数量 N_L 为0，转步骤(7)；否则，转步骤(5)；
- (5) 在所有模式和LRSC的转换频谱范围 C_R 内，分别进行上、下和左、右窗口滑动。若搜索到空闲的模式-频谱块，更新串扰辅助图，计算将业务 R 分配该模式-频谱块的串扰值 C_V ，若 C_V 满足式(4)，将该空闲的模式-频谱块资源标记为 $R(k, i, j)$ ，放入集合 $R_{i,j}^K$ 中。如果还有空闲的模式-频谱块没有搜索完，转步骤(5)，否则，如果 $R_{i,j}^K$ 为空，说明所有空闲的模式-频谱块的 C_V 不满足式(4)，转步骤(7)，否则，转步骤(6)；
- (6) 在 $R_{i,j}^K$ 资源块集合中，利用式(5)计算各模式-频谱资源块的 $R_{i,j}^k$ 值，选择最小 $R_{i,j}^k$ 值对应的空闲的模式-频谱块作为冲突业务 R 的目的转换模式-频谱，令LRSC的 N_L 值减1，记录 $R(k, i, j)$ 信息，转步骤(10)；
- (7) 进入时域资源预留模块，从第1个空闲时隙开始，依次轮询空闲时隙，执行步骤(2)–(7)，找到第1个可用的空闲时隙 D_t ，记录资源 $R(k, i, j)$ 的模式-频谱值，根据式(6)更新 T_N ，转步骤(8)，否则，转步骤(9)；
- (8) 若 $T_N > L$ ，转步骤9；否则，记录业务的 $R(k, i, j)$ 和预留时隙 D_t ，令 T_0 增加 D_t ，若路由表中还有频谱冲突的节点，转步骤(2)，否则，转步骤(10)；
- (9) 输出资源分配失败业务 R 的信息，阻塞该业务，LARSL-CACRA算法结束；
- (10) 输出成功传输业务 $R(k, i, j)$ 的路由各节点的模式-频谱值、预留时隙 D_t 、空闲LRSC数目 N_L 。

塞率都减小，这是因为预留时隙越多，冲突业务等待一定时间后被调度成功的概率越大。虽然预留时隙越大，业务的带宽阻塞率越低，但是相同算法在

相同负载的不同预留时隙阈值设置下，业务的带宽阻塞率变化较小。

结合图3和图4分析结论，在下面的仿真中，设置LARSL配置LRSC的 $N_L=20$ 和 $C_R=24, L=1$ 。

为了进一步证明本文所提LARSL-CACRA算法性能，图5增加对比了采用分层交叉连接全光节点结构的Layer SSS-SF-SRA算法性能，Layer SSS-SF-SRA算法也采用2层全光节点结构，但频谱资源冲突解决方法采用首次适应的模式内频谱交换。在图5中，随着负载增加，4种算法获得的带宽阻塞率都呈现上升趋势，其中Layer SSS-SF-SRA算法略高于LARSL-CACRA算法，这是因为LARSL-CACRA算法改进了Layer SSS-SF-SRA算

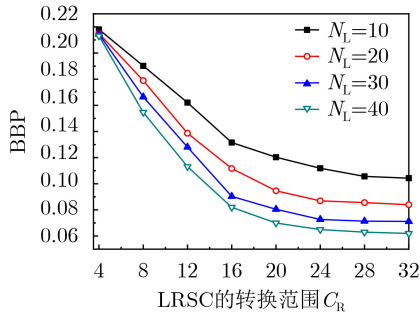


图 3 不同 N_L 的 BBP ($L=1$)

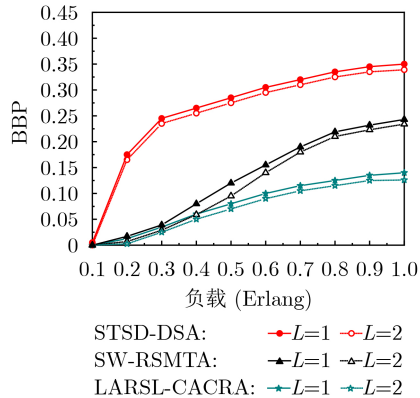


图 4 不同预留时隙的 BBP ($N_L=20, C_R=24$)

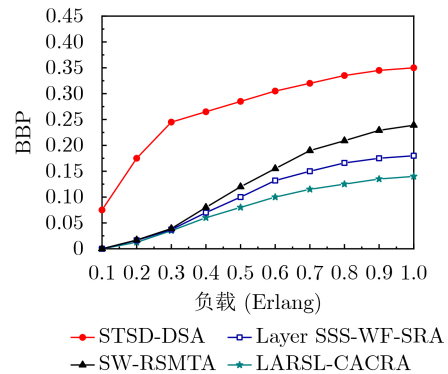


图 5 不同光节点和算法的 BBP ($N_L=20, C_R=24, L=1$)

法的模式分配方法,且本文所提LARSL-CACRA算法不依赖于端口数量,由于采用了串扰辅助图方法和模式-频谱块资源值计算方法寻找更有效的模式-频谱块,相比需要消耗大量模式和频谱端口便于光交叉连接的Layer SSS-SF-SRA算法,LARSL-CACRA算法获得的带宽阻塞率更低。

在图6中,本文比较了3种具有时域冲突解决能力算法的平均时延性能。由于Layer SSS-SF-SRA算法^[6]是空-频冲突解决算法,没有时域资源模块,所以本文选择具有时域资源模块的STSD-DSA算法、SW-RSMTA算法与本文的LARSL-CACRA算法进行时延性能对比。结合图5可以发现,本文所提LARSL-CACRA算法能够有效降低业务在交换时被阻塞概率,同时业务在经过光节点时引起的平均时延也较低。由图6可发现,随着负载增加,3种算法的业务平均时延逐渐增加,这是由于节点中需要交换的业务量增加,空闲的端口和模式-频谱块资源减少,业务竞争模式-频谱块资源的概率增加,更多竞争时变的业务需要进入时域资源模块进行缓存的冲突调度。而在相同负载下,本文所提LARSL-CACRA算法获得的平均时延最低,这是由于本文设计了有效的串扰辅助图和通过模式-频谱块资源值选择负载更轻的模式-频谱块分配给业务,提高了资源利用率,降低了业务的模式-频谱资源冲突概率,减少了业务需要时域冲突解决的概率。而对比的SW-RSMTA和STSD-DSA算法,由于在模式-频谱块分配中缺乏串扰值避免的有效方法和均衡资源选择的资源衡量方法,降低了模式-频谱资源块的利用率,使得更多的业务需要借助时域的资源预留模块解决冲突业务的调度,增加了业务通过光节点的平均时延。

5 结束语

本文设计了一个基于共享LRSC和具有时域资源预留的少模光纤SDM-EONs全光分层节点结构(LARSL),并提出一个基于串扰避免和空-频-时域联合的资源冲突解决算法(LARSL-CACRA)。在

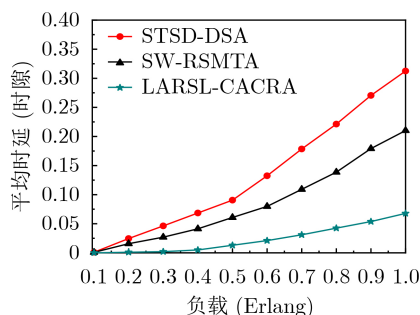


图6 不同预留时隙的平均时延($N_L=20$, $C_R=24$, $L=1$)

LARSL-CACRA算法中,本文在空-频域采用了串扰辅助图和设计了一个基于串扰避免的滑动窗模式-频谱块资源搜索和资源值计算方法,选择负载均衡的模式-频谱块分配给业务,提高资源利用率和降低业务阻塞率,同时,通过引入时域资源预留模块,进一步降低业务的带宽阻塞率。随着互联网发展和大量数据业务的应用,所提算法可以有效地提高少模光纤SDM-EONs光网络的资源利用率和网络服务性能,同时所提LARSL节点结构配置的光器件数目少,对降低光交换机造价和提高光节点的性价比意义非凡。

参考文献

- [1] LIU Siqi, LU Wei, and ZHU Zuqing. On the cross-layer orchestration to address IP router outages with cost-efficient multilayer restoration in IP-Over-EONs[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(1): A122–A132. doi: 10.1364/JOCN.10.00A122.
- [2] 郭贺铨. 5G时代的网络社会新特征与产业面临的挑战[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2020, 32(2): 171–176. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2020.02.001.
WU Hequan. New features of network society and industry challenges in the 5G era[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2020, 32(2): 171–176. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2020.02.001.
- [3] YANG Hui, YAO Qiuyan, YU Ao, et al. Resource assignment based on dynamic fuzzy clustering in elastic optical networks with multi-core fibers[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5): 3457–3469. doi: 10.1109/TCOMM.2019.2894711.
- [4] YANG Mingcong, WU Qian, and ZHANG Yongbing. Joint assignment of spatial granularity, routing, modulation, and spectrum in SDM-EONs: Minimizing the network CAPEX considering spectrum, WSS, and laser resources[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 4153–4166. doi: 10.1109/JLT.2018.2861750.
- [5] YANG Mingcong, ZHANG Yongbing, and WU Qian. Routing, spectrum, and core assignment in SDM-EONs with MCF: Node-arc ILP/MILP methods and an efficient XT-aware heuristic algorithm[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(3): 195–208. doi: 10.1364/JOCN.10.000195.
- [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: 自然科学版, 2017, 29(3): 313–319. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005.
BAO Ninghai, SU Guoqing, and CHEN Jingbo. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical

- networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2017, 29(3): 313–319. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2017.03.005).
- [7] ARPANA EI F, ARDALANI N, BEYRANVAND H, *et al.* Three-dimensional resource allocation in space division multiplexing elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(12): 959–974. doi: [10.1364/JOCN.10.000959](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000959).
- [8] 刘焕淋, 方菲, 黄俊, 等. 面向业务的弹性光网络光路损伤感知能效路由策略[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(5): 1202–1209. doi: [10.11999/JEIT180580](https://doi.org/10.11999/JEIT180580).
LIU Huanlin, FANG Fei, HUANG Jun, *et al.* Energy efficiency routing strategy with lightpath impairment awareness in service-oriented elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(5): 1202–1209. doi: [10.11999/JEIT180580](https://doi.org/10.11999/JEIT180580).
- [9] KOEBELE C, SALSU M, MILORD L, *et al.* 40km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]. The 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, Geneva, Switzerland, 2011:1–3. doi: [10.1364/ECOC.2011.Th.13.C.3](https://doi.org/10.1364/ECOC.2011.Th.13.C.3).
- [10] KLINKOWSKI M and ZALEWSKI G. Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally-spatially flexible optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(5): 213–225. doi: [10.1364/JOCN.11.000213](https://doi.org/10.1364/JOCN.11.000213).
- [11] ROTTONDI C, BOFFI P, MARTELLI P, *et al.* Routing, modulation format, baud rate and spectrum allocation in optical metro rings with flexible grid and few-mode transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(1): 61–70. doi: [10.1109/JLT.2016.2627618](https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2627618).
- [12] AFSHARLAR P, DEYLA MSALEHI A, PLANTE J M, *et al.* Routing and spectrum assignment with delayed allocation in elastic optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(3): B101–B111. doi: [10.1364/JOCN.9.00B101](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.00B101).
- [13] LIU Huanlin, SANG Liying, and CHEN Yong. A multicast contention resolution scheme based on shared spectrum converter for elastic optical switching node[J]. *Optik*, 2017, 144: 316–323. doi: [10.1016/j.ijleo.2017.06.117](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.06.117).
- [14] GUO Shijia, YIN Shan, MA Rong, *et al.* Crosstalk-aware routing, spectrum, mode and time assignment using FMF with partial MIMO equalization in flexible grid datacenter networks[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 180–187. doi: [10.1016/j.optcom.2018.11.044](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.044).
- [15] LIU Huanlin, SANG Liying, CHEN Yong, *et al.* Space-frequency joint contention scheduling algorithm based on AoD in SDM-EONs[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47: 93–101. doi: [10.1016/j.yofte.2018.11.005](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.11.005).
- [16] GE Dawei, GUO Bingli, YANG Yu, *et al.* Layered OXC with intermode switching bridge for optical SDM-WDM networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(16): 3918–3924. doi: [10.1109/JLT.2019.2920450](https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2920450).
- [17] 李达港, 李磊, 金连文, 等. 基于时间序列的Openstack云计算平台负载预测与弹性资源调度的研究[J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2016, 28(4): 560–566. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.04.018](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.04.018).
LI Dagang, LI Lei, JIN Lianwen, *et al.* Research of load forecasting and elastic resources scheduling of Openstack platform based on time series[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2016, 28(4): 560–566. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.04.018](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.04.018).
- [18] MOURA P M and DA FONSECA N L S. Routing, core, modulation level, and spectrum assignment based on image processing algorithms[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(12): 947–958. doi: [10.1364/jocn.10.000947](https://doi.org/10.1364/jocn.10.000947).

刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与网络.

王展鹏: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为弹性光网络.

任杰: 女, 1998年生, 硕士生, 研究方向为光节点调度.

陈勇: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为光通信与传感检测.

方菲: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为光节点能效调度.

温濛: 女, 1997年生, 硕士生, 研究方向为光网络资源分配.

责任编辑: 余蓉