

## 串扰感知的空分弹性光网络频谱转换器稀疏配置和资源分配方法

刘焕淋\*<sup>①</sup> 杜理想<sup>①</sup> 陈勇<sup>②</sup> 胡会霞<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 针对大容量多芯光纤空分复用弹性光网络(SDM-EON)中芯间串扰导致业务传输质量下降和阻塞率上升的问题, 该文提出了节点稀疏配置频谱转换器降低芯间串扰的路由纤芯频谱分配方法。该方法根据网络中节点中介中心性稀疏配置频谱转换器。在业务路由阶段, 设计综合考虑光路负载和节点频谱转换能力的光路选择的权重方法; 为了降低串扰, 在纤芯频谱分配阶段, 设计纤芯分组和频谱分区分配方法; 最后, 针对串扰较大的业务, 采用频谱转换以降低业务串扰和改善带宽阻塞率。仿真结果表明, 所提算法能有效地提高频谱利用率, 降低因芯间串扰导致的带宽阻塞率。

**关键词:** 空分复用弹性光网络; 芯间串扰; 频谱转换器; 纤芯路由频谱分配; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1718-08

DOI: [10.11999/JEIT190533](https://doi.org/10.11999/JEIT190533)

## Crosstalk-aware Spectrum Converters Sparse Configuration and Resource Allocation for Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks

LIU Huanlin<sup>①</sup> DU Lixiang<sup>①</sup> CHEN Yong<sup>②</sup> HU Huixia<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of inter-core crosstalk in Space Division Multiplexing Elastic Optical Network (SDM-EON), which leads to the decline of service transmission quality and the increase of blocking probability, a routing, fiber core and spectrum allocation method for reducing inter-core crosstalk through sparse configuration spectrum converter at nodes is proposed in the paper. This method configures the spectrum converter according to the node's centrality sparseness in SDM-EON. During service routing, a weighting method for optical path selection considering both optical path load and node spectrum conversion capability is designed to reduce crosstalk. In the core spectrum allocation stage, a method of fiber core grouping and spectrum partition allocation is utilized. Finally, spectrum conversion is used to reduce traffic crosstalk and improve bandwidth blocking probability for services with high crosstalk. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve the spectrum utilization and reduce the bandwidth blocking probability caused by fibers inter-core crosstalk.

**Key words:** Space Division Multiplexing Elastic Optical Network (SDM-EON); Inter-core crosstalk; Spectrum converter; Fiber core and routing spectrum allocation; Bandwidth blocking probability

收稿日期: 2019-07-15; 改回日期: 2019-11-07; 网络出版: 2020-03-17

\*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面上项目(2019jcyj-msxmX0613)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(51977021), The Science Foundation Project of Chongqing Science and Technology Commission (2019 jcyj-msxmX0613)

## 1 引言

弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)可根据业务请求的带宽大小为其灵活分配子载波数目<sup>[1]</sup>,改善了波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络固定栅格分配导致频谱利用率低的现象<sup>[2]</sup>。然而,大数据、物联网、社交网络、实时游戏以及其他大带宽应用对网络传输容量提出了更高的要求<sup>[3]</sup>,采用单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)的光网络物理容量很快将被耗尽。有研究机构预测,至2020年左右,光纤传输容量将达到100 Tb/s,达到了SMF物理极限,有限容量SMF极大地限制未来互联网应用的发展。为此,研究并行配置多SMF、多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)、多模光纤(Multi-Mode Fiber, FMF)、少模光纤(Few-Mode Fiber, FMF)或几者结合<sup>[4]</sup>实现空分复用弹性光网络(Space Division Multiplexing Elastic Optical Network, SDM-EON)进一步扩大传输容量及其必要<sup>[5]</sup>。

路由频谱纤芯分配(Routing, Spectrum and Core Assignment, RSCA)是SDM-EON中的关键问题,在引入空间维度之后,SDM-EON中的纤芯交换在减轻频谱一致性约束的同时也使资源分配问题变得更为复杂<sup>[6]</sup>。另外,SDM-EON中,业务在相邻纤芯传输时若存在频谱重叠,则光信号将会“泄露”至相邻的纤芯,造成芯间串扰(Cross-Talk, XT),这种串扰随着传输距离的增加加剧,从而严重影响信号的传输质量<sup>[7]</sup>。

文献<sup>[8]</sup>中研究了采用按需节点结构和传统节点结构的SDM-EON中的RSCA问题,提出了最小化分配失败业务数和包交换调度的启发式算法,但是在芯间串扰方面仅仅依赖阈值改变信号调制等级。文献<sup>[9]</sup>设计纤芯优先级分类服务业务的路由最小代价频谱分配(Core Priority-RSCA, CP-RSCA)算法,虽然降低了算法复杂度,但是纤芯分配不够灵活,当网络中不同带宽大小业务的比例不同时,难以确定一个合适的方法来划分纤芯数。文献<sup>[10]</sup>提出图着色的纤芯RSCA(Core Graph-RSCA, CG-RSCA)算法,采用图着色和频谱分区的方法将纤芯和频谱区域进行划分,将不相邻的纤芯划分为一组以降低网络中、低负载时的串扰。文献<sup>[11]</sup>提出了基于超级信道的串扰感知的纤芯频谱分配算法,该方法采用启发式思想,其阻塞率和频谱利用率比基本的RSCA有所改进,但是超级信道和多速率业务需求的组合算法复杂。文献<sup>[12]</sup>研究了SDM-EON中的静态RSCA问题,提出了最小化使用频隙索引值的严格检查串扰的启发式算法。文献<sup>[13]</sup>中提出

采用在一根MCF中双向传输业务以抑制串扰,提出了两种纤芯优先级策略以决定用于不同方向传输的纤芯,并与频谱分区相结合提出了串扰抑制的RSCA。

上述文献在考虑串扰时或是将串扰阈值作为判决条件严格检查,或是在分配资源时尽量避免分配在相邻纤芯上,而在不满足串扰阈值条件时仅考虑降低调制等级,少有在在不满足串扰阈值条件时利用其他方式优化阻塞率性能的研究。在EONs研究中,有人提出在交换节点配置频谱转换器(Spectrum Converter, SC),SC在不中断光信号传输同时,松弛了业务的路由频谱的一致性约束条件,使得光路的频谱分配更加灵活,显著降低业务的带宽阻塞率<sup>[14,15]</sup>。而且,通过将业务最初占用的频隙转换至相邻纤芯数较少的频谱区域来优化串扰,并且目前鲜有利用频谱转换器优化SDM-EON中芯间串扰的研究。但是,光域的频谱转换器存在技术不成熟、成本高和实现困难的缺点,因此,如何合理地配置光域的频谱转换器,最大化SC利用率成为一个重要的研究问题。

基于以上分析,针对SDM-EON中考虑串扰的RSCA问题,本文提出了一种考虑节点光域频谱转换能力和芯间串扰的路由纤芯频谱分配算法(Routing, Spectrum and Core Allocation considering Node Spectrum Conversion Capability and Cross-Talk, NSCC-XT-RSCA)。

## 2 考虑节点频谱转换能力和芯间串扰的RSCA算法

为了降低基于MCF的SDM-EON中XT对业务传输性能的影响和更高效地利用光交换节点配置的频谱转换器减轻XT,本文提出了考虑SDM-EON节点频谱转换能力和芯间串扰的RSCA算法。所提NSCC-XT-RSCA算法首先根据网络拓扑计算网络各节点的中介中心性,确定网络中需要配置频谱转换器的节点;在业务路由阶段,设计光路权重公式选择均衡光路负载、传输距离以及节点频谱转换能力的传输光路;在纤芯和频谱分配阶段,设计顶点着色方法将布局不相邻的MCF纤芯分为一组并划分频谱区域,之后为业务选择串扰较低的低代价RSCA,若RSCA的串扰超过阈值,则采用频谱转换降低串扰。

### 2.1 SDM-EON的芯间串扰

为了降低SDM-EON的芯间串扰,文献<sup>[16,17]</sup>提出可以通过使用沟槽辅助光纤、减小宏弯损耗和微弯损耗使MCF具有相对较低的串扰值。为了更好地评估MCF芯间的XT,解决串扰计算的“过保

护”问题，文献[12]对串扰计算模型<sup>[16]</sup>进一步简化，则MCF纤芯总串扰定义为

$$XT_c = \sum XT_{cc_a}, XT_{cc_a} = \frac{1 - \exp(-2hL)}{1 + \exp(-2hL)} \quad (1)$$

其中， $XT_{cc_a}$ 表示纤芯 $c$ 和其相邻、并且占用同位频谱域的纤芯 $c_a$ 间的串扰， $XT_c$ 为总串扰，其值为传输光路上每链路选择的承载纤芯所受串扰的总和； $L$ 表示传输长度， $h$ 表示单位传输长度的XT常量，与纤芯耦合系数、弯曲半径、传播常数以及沟槽宽度有关。分析式(1)，可以看出XT与相邻的占同位频谱的纤芯数以及传输距离息息相关。因此，RSCA的路由长度/跳数以及如何为业务分配纤芯的频隙资源，使活跃纤芯最少是SDM-EON中RSCA问题不可忽视的因素。

### 2.2 SDM-EON节点稀疏配置频谱转换器

在SDM-EON节点上配置光域的频谱转换器可松弛业务RSCA的频谱一致性约束，有利于提高网络频谱利用率和提高业务成功传输概率<sup>[14,15]</sup>。然而，全光的频谱转换器技术复杂和成本高昂，在光节点上稀疏配置频谱转换器是一种有效的成本效益方式，选择哪些重要节点配置频谱转换器又成为一个难题。

现有的衡量节点重要性的方法有按照节点度数、或按照节点负载进行排序，前者存在度数高的边缘节点的不够客观现象，后者在网络中有业务传输时才可进行判定负载，不适用于交换节点器件一般是预先配置的情况。因此，本文提出节点中介中心性(Betweenness Centrality, BC)确定重要中心节点配置频谱转换器方法，节点中介中心性表示网络中节点 $i$ 的“把关(gate keeping)”能力，即网络中包含节点 $i$ 的最短长度光路的条数占所有最短长度光路条数的百分比，是衡量节点重要程度的关键指标，则节点 $i$ 的中介中心性定义为

$$BC(i) = \frac{\sum_{s,t \in V(G); s \neq i; t \neq i, s} g_i(s, t)}{0.5(N_V - 1)(N_V - 2)} \quad (2)$$

式中， $V(G)$ 表示光网络抽象的无向图 $G$ 的节点集合， $g_i(s, t)$ 表示通过中间节点 $i$ 的以源节点为 $s$ 、目的节点为 $t$ 的最短长度光路数目， $N_V$ 表示 $G$ 的节点数。除 $i$ 节点外，若网络中的任意节点对之间选1条最短长度光路，图 $G$ 的总的最短长度光路数为 $(N_V - 1)(N_V - 2)/2$ 。

### 2.3 考虑节点频谱转换能力和光路负载的业务选路策略

本文根据式(2)计算网络各节点的中介中心性并降序排序，按比例选取排序靠前的节点为其配置

光频谱转换器，将这种具有光频谱转换能力的节点称为SC<sup>+</sup>节点。在SDM-EON网络中，除了带宽不足导致传输业务被阻塞外，还受XT限制导致业务传输消耗质量下降而被阻塞。因此，为选择兼顾光路负载、光路长度、光路跳数以及节点频谱转换能力的光路，本文设计式(3)的光路选择权重方法。

$$W_p = \frac{\sum_{l_i \in p} \left[ \sum_{c_j=1}^{N_c} \sum_{x=1}^{N_{fs}} \frac{f_x^{l_i, c_j}}{N_c N_{fs}} + \alpha \frac{N_{sc_a}^{l_i}}{N_{sc}^{l_i} + 1} \right]}{\sum_{l_i \in p} (N_{l_i} / N_V) + H_p} \quad (3)$$

其中， $l_i$ 为光路 $p$ 上的链路， $N_c$ 为MCF的纤芯数， $N_{fs}$ 表示每纤芯的频隙数， $c_j$ 表示纤芯索引号， $x$ 表示频隙索引号， $f_x^{l_i, c_j}$ 为布尔变量，若链路 $l_i$ 上纤芯 $c_j$ 的第 $x$ 个频隙空闲可用，则 $f_x^{l_i, c_j}=1$ ，否则为0。 $N_{sc_a}^{l_i}$ 表示链路 $l_i$ 末端节点剩余的转换器数目， $N_{sc}^{l_i}$ 表示链路 $l_i$ 末端节点配置的转换器总数。分子求和的第1部分表示光路 $p$ 上各链路可用的剩余带宽的百分比总和；分子的第2部分求和表示光路 $p$ 上各链路 $l_i$ 末端节点上的可用频谱转换器数目百分比和，其数值越大，表示光路上可用频谱转换器越多。 $\alpha$ 为权重因子，用于权重选择负载更轻的光路或光路上剩余频谱转换器更多的光路。 $N_{l_i}$ 表示网络中经过链路 $l_i$ 的最短长度光路的数目，分母第1项求和表示光路 $p$ 上各条链路经过的所有最短长度光路对网络节点数的规范值总和， $H_p$ 表示光路 $p$ 的跳数。式(3)计算的光路权值越大，则光路上负载越轻，均衡光路跳数和光路上节点的剩余可用的频谱块和SC<sup>+</sup>节点的可用频谱转换器越多。

图1所示为节点稀疏配置频谱转换器的路由示意图，节点数 $N_V=6$ ，链路旁边括号内的第1个数字表示经过该链路的已有最短长度光路数目，第2个数值为链路上剩余可用带宽与该链路总带宽的百分比。根据式(2)计算节点{1, 2, 3, 4, 5, 6}的中心性值分别为{1.1, 1.5, 1.4, 1.3, 1.2, 0.7}，若选择节点数30%配置频谱转换器，则选择中心性值较高的节点2和3为配置频谱转换器的SC<sup>+</sup>节点。在图1

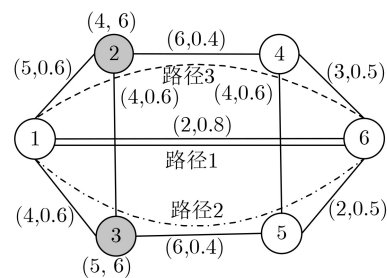


图1 节点稀疏配置频谱转换器的路由示意图

中，设SC<sup>+</sup>节点边括号内的数字分别表示剩余可用频谱转化器数目和总频谱转换器数目，对新到达源节点1、目的节点6的传输请求，从图1中可找到3条候选光路，分别为1→6，1→3→5→6和1→2→4→6。若取 $\alpha=0.1$ ，根据式(3)计算上述3条光路权重分别为 $W_1=0.6$ ， $W_2 \approx 0.295$ 和 $W_3 \approx 0.311$ 。光路权重值越大表示业务被成功传输的概率越高，因此选光路1→6。

#### 2.4 基于纤芯分组和频谱分区的纤芯频谱分配策略

为了避免在纤芯频谱分配时占用相邻纤芯的同位频隙，本文所提NSCC-XT-RSCA算法基于顶点着色的思想将纤芯进行分组，即将不相邻纤芯划分一组。同时，为了进一步降低串扰，引入频谱分区分配的思想，使得不同粒度的业务分别按照频谱索引值从小到大、从大到小的方向分配带宽。NSCC-XT-RSCA根据光路中纤芯和频谱区域的状态，定义纤芯频谱分配的成本 $C^p$ 为光路上各条链路 $l_i$ 的频谱分配成本总和。

$$C^p = \sum_{l_i \in p} C^{l_i} \quad (4)$$

$$C^{l_i} = \min \left\{ C_{s,f}^{l_i,c_j} \mid l_i \in p, c_j \in N_c, s \in S, f \in N_{fs} \right\} \quad (5)$$

$$C_{s,f}^{l_i,c_j} = \begin{cases} u_{c,s}, & \text{频谱区域}s\text{编号与光纤分组编号一致} \\ 1 + u_{c,s}, & \text{频谱区域}s\text{编号与光纤分组编号不一致} \end{cases} \quad (6)$$

其中， $C_{s,f}^{l_i,c_j}$ 表示链路 $l_i$ 上为业务预分配纤芯 $c_j$ 的频谱区域 $s$ 中 $f$ 个频隙的成本， $u_{c,s}$ 为纤芯 $c$ 中频谱区域 $s$ 的负载。 $C^{l_i}$ 表示链路 $l_i$ 上纤芯频谱分配的最终成本是搜索各纤芯和频谱分组的最小分配成本。

#### 2.5 利用频谱转换器优化XT

在纤芯、频谱的分配后，NSCC-XT-RSCA评估业务在光路 $p$ 的资源分配方案中遭受的XT值。首先，比较 $C^p$ 向上取整值与光路跳数 $H_p$ ，若 $\lceil C^p \rceil \leq H_p$ ，则判定业务所受串扰较轻，可以成功传输；否则，根据式(1)计算XT值，若XT值小于串扰阈值，则业务成功传输，否则检查所选光路中是否存在可以进行频谱转换的中间节点为SC<sup>+</sup>节点，若果存在，判断使用SC<sup>+</sup>后XT值是否小于XT阈值，否则，阻塞业务。

当一条光路上存在多个SC<sup>+</sup>节点可以优化XT的情况，本文提出了SC<sup>+</sup>节点排名方法为

$$\text{rank}(v) = \frac{N_{sc_a} - 1}{N_{sc}} + \left| \frac{(\text{XT}_b - \text{XT}_f) - \text{XT}_{th}}{\text{XT}_{th}} \right| \quad (7)$$

其中， $N_{sc_a}$ 表示节点 $v$ 剩余的空闲SC<sup>+</sup>数目， $N_{sc}$ 表

示该节点配置的SC<sup>+</sup>数目， $\text{XT}_f$ 表示优化后的业务串扰， $\text{XT}_b$ 表示频谱转换前业务所受串扰， $\text{XT}_{th}$ 为相应调制格式下串扰阈值。 $\text{rank}(v)$ 值越大，说明在节点 $v$ 的空闲频谱转换器较多，且光路使用SC<sup>+</sup>后XT值改善越大。因此，本文选取 $\text{rank}(v)$ 值高的节点作为转换节点。

#### 2.6 NSCC-XT-RSCA算法流程

本文所提NSCC-XT-RSCA流程图如表1所示，算法主要分为预处理阶段、RSCA阶段以及串扰评估与优化阶段。在预处理阶段，根据式(2)计算网络拓扑所有节点的中介中心性，根据给定的比例选取节点作为SC<sup>+</sup>节点配置频谱转化器，然后将纤芯频谱进行分组和分区；在RSCA阶段，首先根据式(3)计算出 $K$ 条最短候选光路并权值降序排列光路；然后根据式(4)计算光路的纤芯频谱的分配成本，选取成本最小的纤芯频谱分配方式；随后，由式(1)计算已选光路和纤芯频谱分配的串扰值，判断是否满足阈值要求。在光路频谱分配失败和XT值超过规定的XT阈值时候，都可以选择光路上的SC<sup>+</sup>节点优化频谱分配。

### 3 仿真性能与分析

#### 3.1 仿真环境及评价指标

为了验证本文所提NSCC-XT-RSCA算法的性能，分别在如图2所示的具有14个节点21条链路的NSFNET和24个节点43条链路的USNET中进行仿真<sup>[1]</sup>，则NSFNET和UNNET网络的链路平均长度为862 km和365 km。各链路7芯光纤，每纤芯360 FS，每FS带宽为12.5 GHz，业务间保护带宽为1 FS，取最短长度候选光路数 $K=3$ 。网络拓扑中SC<sup>+</sup>节点选择比例为总节点数20%，每SC<sup>+</sup>节点配置频谱转换器数目 $N_{sc}=28$ ，式(3)中权重因子 $\alpha=0.1$ 。仿真业务数目为 $10^5$ 个，业务到达间隔服从参数 $\lambda$ 的泊松分布，持续时间服从参数 $\mu$ 的负指数分布，业务带宽大小在1~32 FS间随机产生，信号调制格式可选BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM和64QAM，相应调制等级下最大传输距离分别为9600 km, 4800 km, 2400 km, 1200 km, 600 km和300 km，业务调制格式选择传输距离限制的最高调制格式，其他参数取值参考文献[4,8,11]。

本文选取KSP-FF(K Shortest Path with First Fit spectrum allocation)算法<sup>[8]</sup>为基准算法，并选取具有纤芯分组的CG-RSCA算法<sup>[10]</sup>与定义纤芯优先级的CP-RSCA算法<sup>[11]</sup>为对比算法，为了不失可对比性，所有算法均稀疏配置频谱转换器，区别在于所提NSCC-XT-RSCA算法采用节点中介中心性对SC<sup>+</sup>节点排名，其他算法基于节点度数排名。仿

表1 NSCC-XT-RSCA算法

- (1) 预处理阶段, 根据式(2)计算网络拓扑所有节点的中介中心性, 根据给定的比例选取节点作为SC<sup>+</sup>节点配置频谱转换器; 根据2.4节所述将纤芯频谱进行分组和分区;
- (2) 业务请求到达后, 确定业务调制格式, 并计算业务在该调制格式所需频隙数;
- (3) 根据光路权重公式(3), 计算源、目的节点间K条候选最短长度光路权重, 根据权重对候选光路进行降序排序, 设变量k=1;
- (4) 判断第k条光路上是否存在满足业务传输的可用频谱块, 如有, 转步骤(7), 否则, 转步骤(5);
- (5) 判断光路上是否有SC<sup>+</sup>节点, 如有, 则转步骤(6), 否则, 转步骤(8);
- (6) 判断光路是否有经过SC<sup>+</sup>节点转换的可用频谱块, 若有, 转步骤(7), 否则, 转步骤(8);
- (7) 根据式(4)~式(6)计算光路上的纤芯频谱分配成本C<sup>p</sup>, 确定频谱块, 转步骤(9);
- (8) 若k>K, 则业务被阻塞; 否则, 令k加1, 转步骤(4);
- (9) 判断[C<sup>p</sup>] ≥ H<sub>p</sub>?若是, 则业务在光路p上受串扰影响较大, p=1, 2, ..., k, 转步骤(10), 否则转步骤(16);
- (10) 根据式(1)计算业务所受串扰, 若该串扰小于串扰阈值条件, 则转步骤(16), 否则, 转步骤(11);
- (11) 判断光路上是否有SC<sup>+</sup>节点, 若有, 转步骤(12), 否则, 阻塞业务;
- (12) 判断光路是否存在能降低XT值的频谱块, 若有, 转步骤(14), 否则, 转步骤(13);
- (13) 判断光路信号是否为最低调制格式, 如是, 则阻塞业务, 否则, 降低调制格式, 减少业务需求的频谱块数目, 转步骤(2);
- (14) 判断是否存在2个及以上节点为SC<sup>+</sup>节点, 如有, 转步骤(15), 否则, 转步骤(10);
- (15) 根据式(7)计算各SC<sup>+</sup>节点的使用排名, 选取排名高的节点使用SC<sup>+</sup>功能, 转步骤(10);
- (16) 业务成功传输, 输出业务所选择的光路p、纤芯编号、频谱资源以及SC<sup>+</sup>节点频谱转换要求。

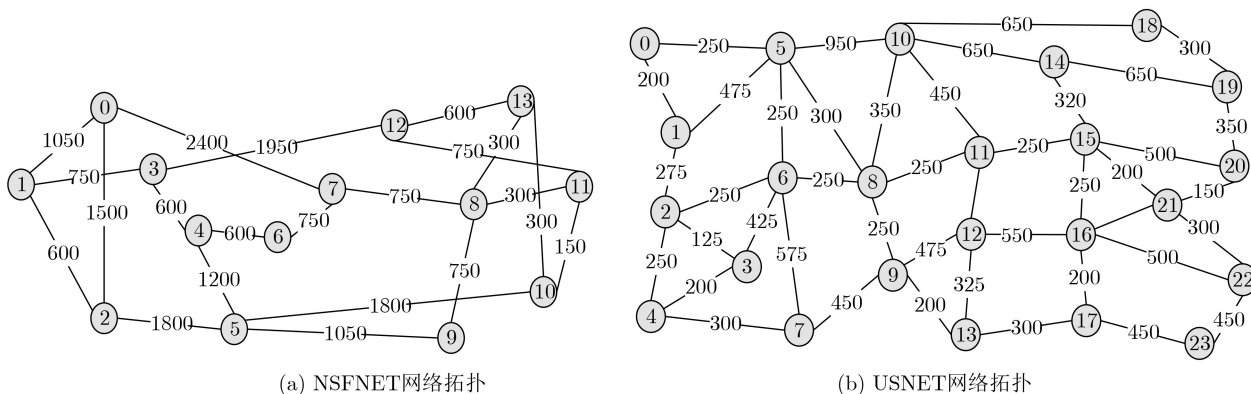


图2 仿真网络拓扑

真指标选取带宽阻塞率(BBP)、频谱利用率(Spectrum Utilization, SU)以及XT改善率。频谱利用率是仿真时间内所有成功传输业务总带宽与网络中各纤芯提供总带宽比值。XT改善率为其他算法与KSP-FF算法中因串扰导致的业务阻塞率的差值与KSP-FF算法中因串扰导致的业务阻塞率的比值。

### 3.2 仿真结果分析

图3显示了2种网络拓扑下采用4种算法时的带宽阻塞率。如图3所示, 随着网络负载升高, 4种算法的BBP都逐渐上升, 这是因为随着负载增加, 网络中可用的频谱资源和转换器资源逐渐减少, 服务能力下降。在4种算法中, KSP-FF阻塞率性能最差, 本文所提NSCC-XT-RSCA算法性能最好。对比KSP-FF和CG-RSCA, CP-RSCA, 后两者的阻塞率性能优于KSP-FF, 这是因为CG-RSCA算法将不相邻的纤芯划分为一组、并且不同组纤芯业务

分配的起始频隙也不同, 在网络中低负载状态分配业务时可有效减少承载业务纤芯的相邻纤芯数, 从而降低了串扰, 改善了阻塞率; 类似地, CP-RSCA通过定义纤芯的优先级, 在确定了一根纤芯的优先级后, 与其距离更远的纤芯会具有更高的优先级, 使得业务分配时相邻纤芯数目降低, 优化了传输时的芯间串扰性能。本文所提NSCC-XT-RSCA算法与CG-RSCA, CP-RSCA相比, NSCC-XT-RSCA的BBP更低, 其原因有3点, (1)本文所提算法基于节点中介中心性在网络中稀疏配置频谱转换器, 与其余算法相比提高了频谱转换器利用率; (2)在路由时, 综合考虑了光路负载和光路中可用频谱转换器数目, 避免出现瓶颈链路的同时优化了光路潜在的抗串扰能力; (3) NSCC-XT-RSCA算法在频谱分配时考虑了各组纤芯及其中各频谱分区的负载, 更高效地利用了有限的频谱资源。对比NSFNET和

USNET的性能，USNET的阻塞率略低，这是因为USNET比NSFNET网络的平均节点度数更高、链路长度短、连通性更好，因此，业务成功传输概率更高。

图4所示为2种网络拓扑下4种算法的频谱利用率。由图4可知，与图3所示BBP性能趋势一致，NSCC-XT-RSCA算法频谱利用率最高。这是因为所提算法采用了频谱分区的方法降低了频谱碎片化程度，并且采用多种策略协同提高业务成功传输的概率。对比CG-RSCA和CP-RSCA，CP-RSCA频谱效率较低，究其原因是CP-RSCA倾向于先使用一根纤芯的资源来承载业务，分配资源时空间维度

上纤芯分配的灵活性稍逊一筹，导致资源利用率略低于CG-RSCA策略。USNET中的频谱利用率相较于NSFNET较低，这是因为USNET链路数更多，业务分散到每条链路的负载轻一些，使得链路空闲的频谱资源更多，因此，传输相同数量业务时，USNET网络的链路平均占用的频谱资源百分比较低。

为了更好地评估本文算法，本文将KSP-FF算法因串扰未达到阈值条件而阻塞的业务数及其带宽阻塞率为基准，仿真了采用本文算法与对比算法时的阻塞率改善，图5显示了采用3种算法时的XT改善率。如图5所示，本文所提NSCC-XT-RSCA算法性能最优。这是因为所提算法不仅仅考虑避免在

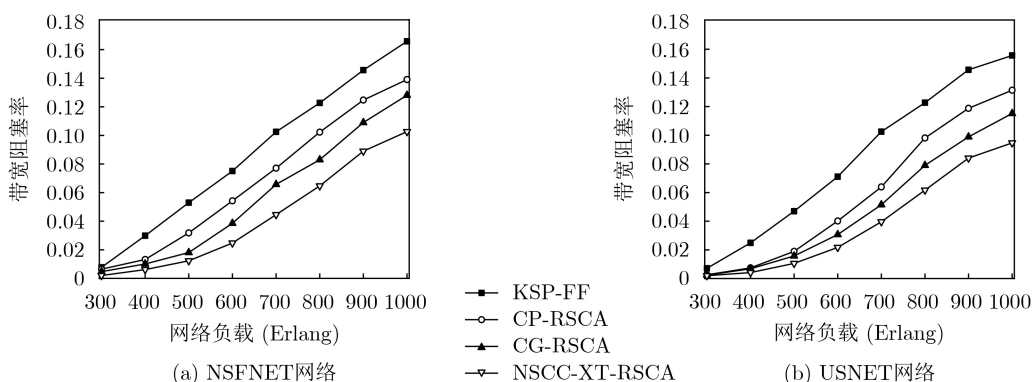


图3 不同网络负载下4种算法的带宽阻塞率

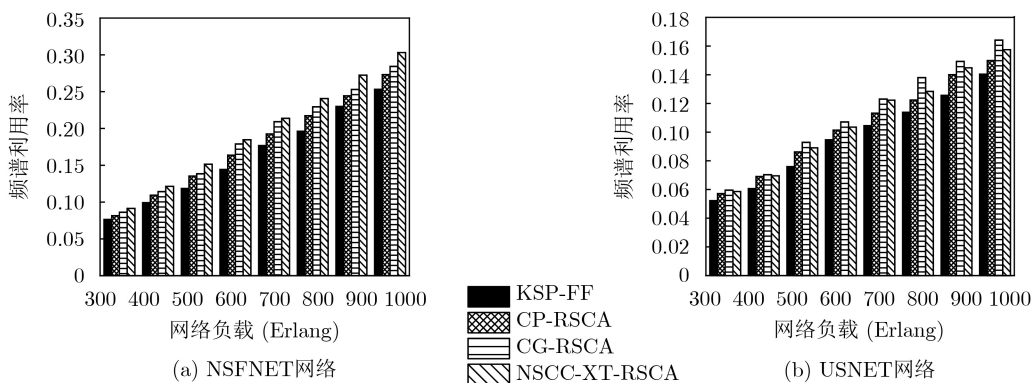


图4 不同网络负载下4种算法的频谱利用率

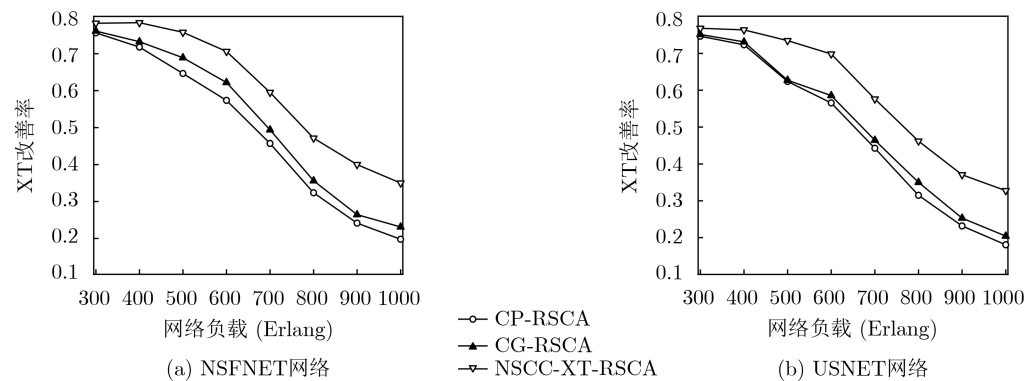


图5 与KSP-FF算法对比的各算法的XT改善率

相邻纤芯同位频谱域上分配业务,还综合考虑了负载均衡与合理配置频谱转换器,并且在存在多节点可频谱转换时,基于XT改善幅度和剩余频谱转换器数量选择节点,更高效地利用了频谱转换器资源。而随着负载上升,XT改善率逐渐下降,这是因为高负载状态下网络中空闲资源很少,借助其他方法也无益于降低芯间串扰以及业务阻塞率。对比NSFNET和USNET下的结果,NSFNET拓扑下XT改善率性能略高,这是因为与USNET相比,NSFNET网络的链路平均长度大一些,串扰影响传输性能更大,当网络中一些节点配置频谱转换器后,对串扰较大的NSFNET网络的串扰改善的性能就略大一些。

#### 4 结束语

本文针对SDM-EON中芯间串扰导致信号传输受损的问题,利用网络稀疏配置频谱转换器的方法降低串扰,提出了一种考虑节点频谱转换能力和芯间串扰的路由纤芯频谱分配算法(NSCC-XT-RSCA)。所提NSCC-XT-RSCA方法对中介中心性好的节点配置频谱转换器,设计一个兼顾业务传输距离、光路负载以及节点频谱转换能力的选路有权重方法,并在纤芯频谱分配时采用图着色的纤芯分组和频谱分区的最小代价方法降低串扰,最后,对业务传输串扰超过阈值的光路利用频谱转换降低串扰值。所提算法对支持大量数据业务在多芯光纤中高性能传输和延长光信号传输距离具有重要意义,同时,稀疏配置频谱转换器方法给运营商提供了一种少配置高昂光频谱转换器也能实现高网络性能的成本效益思路。

#### 参考文献

- [1] SHEN Gangxiang, ZHANG Ya, ZHOU Xu, *et al.* Ultra-dense wavelength switched network: A special EON paradigm for metro optical networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(2): 189–195. doi: [10.1109/MCOM.2018.1700025](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700025).
- [2] 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](https://doi.org/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).
- [3] 赵国锋, 邢媛, 段洁, 等. 物联网中时间驱动的ICN缓存机制研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(1): 68–74. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.008](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.008).  
ZHAO Guofeng, XING Yuan, DUAN Jie, *et al.* Time-driven ICN caching mechanism in internet of things[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2018, 30(1): 68–74. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.008](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2018.01.008).
- [4] TODE H and HIROTA Y. Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks[Invited][J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(1): A99–A113. doi: [10.1364/JOCN.9.000A99](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000A99).
- [5] SARIDIS G M, ALEXANDROPOULOS D, ZERVAS G, *et al.* Survey and evaluation of space division multiplexing: From technologies to optical networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2136–2156. doi: [10.1109/COMST.2015.2466458](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2466458).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] MUHAMMAD M, ZERVAS G, and FORCHHEIMER R. Resource allocation for space-division multiplexing: Optical white box versus optical black box networking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4928–4941. doi: [10.1109/JLT.2015.2493123](https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2493123).
- [9] FUJII S, HIROTA Y, TODE H, *et al.* On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(12): 1059–1071. doi: [10.1364/jocn.6.001059](https://doi.org/10.1364/jocn.6.001059).
- [10] MORITA K and HIRATA K. Dynamic spectrum allocation method for reducing crosstalk in multi-core fiber networks[C]. 2017 IEEE International Conference On Information Networking (ICOIN), Da Nang, Vietnam, 2017: 686–688. doi: [10.1109/ICOIN.2017.7899583](https://doi.org/10.1109/ICOIN.2017.7899583).
- [11] ZHAO Yongli, ZHU Ye, WANG Chunhui, *et al.* Super-channel oriented routing, spectrum and core assignment under crosstalk limit in spatial division multiplexing elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 249–254. doi: [10.1016/j.yofte.2017.04.006](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.04.006).
- [12] 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](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000195).
- [13] YUAN Hui, FURDEK M, Muhammad A, *et al.* Space-division multiplexing in data center networks: On multi-core fiber solutions and crosstalk-suppressed resource allocation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(4): 272–288. doi: [10.1364/JOCN.10.000272](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000272).
- [14] JU Min, ZHOU Fen, XIAO Shilin, *et al.* Spectrum shared p-cycle design in elastic optical networks with/without spectrum conversion capabilities[C]. 2016 International Conference on Network Games, Control, and Optimization, Avignon, France, 2016: 147–157. doi: [10.1007/978-3-319-51034-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51034-7_14).
- [15] 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).
- [16] TU Jiajing, SAITOH K, KOSHIBA M, *et al.* Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15157–15170. doi: [10.1364/OE.20.015157](https://doi.org/10.1364/OE.20.015157).
- [17] KOSHIBA M, SAITOH K, TAKENAGA K, *et al.* Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1987–1995. doi: [10.1109/JPHOT.2012.2221085](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2221085).
- 刘焕淋：女，1970年生，教授，研究方向为光通信技术与网络。  
杜理想：男，1995年生，硕士，研究方向为光网络路由算法。  
陈勇：男，1963年生，教授，研究方向为光通信与传感检测。  
胡会霞：女，1997年生，硕士，研究方向为光网络调度算法。

责任编辑：阮望