

# 物理损伤感知的多芯光纤网络动态路由资源分配方法

刘焕淋<sup>1</sup>,王展鹏<sup>1</sup>,陈 勇<sup>2</sup>,张 彤<sup>1</sup>,熊琪乐<sup>1</sup>,胡俊岭<sup>1</sup>

(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:** 针对多芯光纤空分复用弹性光网络中物理损伤导致网络的频谱利用率低与带宽阻塞率高的问题,提出一种物理损伤感知的业务动态路由和资源分配方法. 在路由阶段,设计考虑路径跳数、可用资源和路径上链路资源利用率的动态路径资源评判公式,选择负载均衡和资源占用较少的候选路径. 在频谱和纤芯分配阶段,设计满足业务串扰和非线性阈值的纤芯和频谱分配方法,最小化资源分配碎片值. 仿真结果表明,当业务负载为900 Erlang时,与其他算法相比,本文所提方法的带宽阻塞率至少降低16%,频谱利用率提高3.02%以上.

**关键词:** 空分复用弹性光网络; 物理损伤感知; 资源碎片; 路径资源评判值; 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)02-0502-06

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

**DOI:** 10.12263/DZXB.20200802

## Physical Impairment Aware-Based Dynamic Routing Resource Allocation Method for Multi-Core Fiber Network

LIU Huan-lin<sup>1</sup>, WANG Zhan-peng<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>, XIONG Qi-le<sup>1</sup>, HU Jun-ling<sup>1</sup>

(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 solve the problems of low spectrum utilization and high bandwidth blocking probability caused by physical impairment for space division multiplexing elastic optical networks(SDM-EONs), a physical impairment-aware dynamic routing and resource allocation(DRRA-PIA) method is proposed. In the routing stage of DRRA-PIA, by considering the path hops, available resources and link's resource utilization of the candidate path, a dynamic path resource evaluation formula is designed to select the candidate paths with balanced load and less resource occupied for the request. In the phase of spectrum and core allocation, a method of core and spectrum allocation is designed to meet the limits of cross-talk and nonlinear impairment threshold, and minimize the resource fragmentation. Comparing with other algorithms, the simulation results show that DRRA-PIA method can decrease the network's bandwidth blocking probability at least 16% and improve the spectrum utilization more than 3.02% when the traffic payload is 900 Erlang.

**Key words:** space division multiplexing elastic optical networks; physical impairment aware; resource fragment; path resource evaluation; bandwidth blocking probability

### 1 引言

随着互联网发展和多媒体业务的爆炸式增长,高清电视、虚拟现实、云服务和在线教育等业务对光传输网络的带宽和性能提出了更高的要求<sup>[1,2]</sup>. 基于光正交频分复用技术的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)可根据业务请求的速率灵活分割细粒度的子载

波,多种业务以一种“无网格”的方式在一根光纤中共享整个光谱,成为极具潜力的新兴光骨干网技术<sup>[3,4]</sup>. 采用多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)的空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)的弹性光网络(SDM-EONs)能为业务提供更“细”粒度和更大带宽的传输通道,成为EONs实现的理想方式.

收稿日期:2020-07-30;修回日期:2022-01-05;责任编辑:马兰英

基金项目:国家自然科学基金(No.51977021);重庆市自然科学基金面上项目(No.2020jcyj-msxmX0682);重庆市教育委员会科学技术研究项目(No.KJQN201900635)

但是,SDM-EONs采用多芯光纤传输信号,物理损伤和芯间串扰(Inter-Core Cross-Talk, ICXT)是影响网络性能的重要因素<sup>[5]</sup>.文献[6]提出基于物理损伤感知的路由和资源分配算法,根据链路负载状态选择路由,降低业务传输的物理损伤,然而,该算法容易导致候选路径过长,使物理损伤更加严重.文献[7]提出物理损伤计算模型,通过业务分割和多路径传输等短路径传输减轻物理损伤影响.综合考虑候选光路的物理长度以及业务请求速率,文献[8]提出整数线性规划模型和设计启发式路由频谱分配(Routing and Spectrum Allocation, RSA)损伤感知算法.文献[9]考虑比特负载对信号损伤的影响,设计了频谱资源粒度细分的RSA算法.文献[10]从物理层分析和设计了业务传输的路径跳数和距离对信号调制格式的影响,证明高调制等级的信号需要低损伤的传输路径以保障信号质量.文献[11]提出一种拓扑分区的损伤感知路由频谱分配(Partition topology Plane Impairments aware Routing and Spectrum Assignment, PP-IRSA)算法,降低了非线性损伤对业务的影响,但是,PP-IRSA算法对信号交叉相位调制与物理损伤间的关系缺乏进一步分析.

为了降低芯间串扰,文献[12]通过区分高、低优先级纤芯和采用频谱分区的方式减少频谱碎片和ICXT.为了进一步降低中等负载的多芯光纤间ICXT影响,研究者提出了“四色原则”对纤芯的频谱资源进行排序和分组后分配给业务,以降低相邻纤芯的ICXT<sup>[4,13]</sup>.

信号在SDM-EONs中传输时,除受到以ICXT为主的线性损伤外,还受到非线性损伤(Non-Linear Impairment, NLI)影响<sup>[14]</sup>.文献[15]研究了ICXT和NLI损伤感知路由、频谱、调制格式和纤芯分配(Routing, Spectrum, Modulation and Core Allocation, RSMCA)问题和混合线性整数规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)分析模型,提出部分避免ICXT的路由频谱和纤芯分配(Impairment Partially Aware Routing, Spectrum and Core Allocation, IPA-RSCA)算法,提高频谱资源利用率和减小信号传输的ICXT.

本文提出一个基于虚拟辅助图的物理损伤感知的动态路由和资源分配(Physical Impairment-Aware Dynamic Routing and Resource Allocation, DRRA-PIA)方法,在业务路由阶段,构造出业务请求路由的虚拟辅助图,根据路径评判式动态地为业务选择路由;在频谱和纤芯的资源分配中,设计物理损伤感知的一个频谱碎片度量方法为业务分配资源,以降低ICXT和传输非线性损伤的影响,提高资源利用率和降低业务的带宽阻塞率.

## 2 SDM-EONs的物理损伤

SDM-EONs的物理损伤主要来源于多芯光纤、光收发机、频谱选择开关以及光放大器包含噪声的所有信号的无差别功率放大等<sup>[2,4]</sup>.传统的物理损伤模型基本是基于复杂度较低的高斯噪声模型,但是该模型并没有考虑信号调制格式等产生的物理损伤和NLI影响<sup>[3,12]</sup>.本文采用增强型高斯噪声模型,该模型考虑了信号的调制格式对信号物理损伤和NLI的影响<sup>[4,15]</sup>.

当业务 $r$ 在路径 $p_k$ 传输,其信噪比<sup>[4,15]</sup>为

$$\text{SNR}_r^k = \frac{P_r}{P_{\text{ASE}} + P_{\text{NLI}}} \quad (1)$$

式(1)中, $P_r$ 表示业务 $r$ 的功率谱密度, $P_{\text{ASE}}$ 表示光放大器的自发辐射噪声功率谱密度, $P_{\text{NLI}}$ 表示非线性损伤噪声功率谱密度,其值计算方式<sup>[4,15]</sup>为

$$P_{\text{NLI}} = \sum_l P_G^{l,r} - P_a^{l,r} \quad (2)$$

其中, $l$ 表示路径的第 $l$ 条链路, $P_G^{l,r}$ 为传统高斯白噪声的NLI值,而 $P_a^{l,r}$ 是文献[15]中增强型高斯模型中关于信号调制格式的修正值.

由于多芯光纤的芯间距较小,光信号在其中传输时更容易泄露光功率至相邻纤芯而导致ICXT问题更加严重<sup>[4,15]</sup>.文献[4,16]提出一种优化的串扰计算模型,先通过式(3)计算纤芯单位传输长度ICXT增量 $h$ ;然后,计算纤芯的平均串扰值 $\text{XT}_{c-c_a}$ 和路径串扰值 $\text{XT}_c$ ,即

$$h = \frac{2v^2 \cdot r_c}{\rho \cdot w_p} \quad (3)$$

$$\text{XT}_c = \sum \text{XT}_{c-c_a} = \sum \frac{1 - \exp(-2h \cdot L)}{1 + \exp(-2h \cdot L)} \quad (4)$$

式(3)中, $v, r_c, \rho, w_p$ 分别表示纤芯耦合系数、弯曲半径、传播常数以及芯间距;式(4)中, $\text{XT}_{c-c_a}$ 表示一根纤芯 $c$ 和其相邻、并且占用频段号相同的纤芯 $c_a$ 间的平均串扰值<sup>[4]</sup>.

由上述分析可见,非线性损伤的计算和建模都较为复杂,但其对光信号传输的影响又是不可忽视且难以补偿的<sup>[4,16]</sup>.因此,本文设计了一个物理损伤感知的动态路由资源分配(DRRA-PIA)方法.

## 3 DRRA-PIA方法

在DRRA-PIA中,根据文献[17]构造业务的虚拟辅助图思想,首先执行算法1,在SDM-EONs中寻找业务的源-目的端的 $2K$ 条长度最短候选路径,计算候选路径的资源评判值,每条候选路径对应虚拟辅助图的一条虚拟链路,路径的资源评判值作为虚拟链路的边权值,构造业务的虚拟辅助图,并在虚拟辅助图中选择 $K$ 条边

权值最大的虚拟链路对应的候选路径;然后,执行算法2,根据改进的路径频谱碎片度量方法,计算候选路径每纤芯每频谱块的频谱块碎片值,为业务选择频谱碎片值小且资源分配后满足 ICXT 和 NLI 约束的候选路径、纤芯和频谱块。

当业务传输的光路径确定后,由路径的长度值确定信号调制等级  $m$ ,并根据式(5)计算业务  $r$  所需频隙数目<sup>[18]</sup>,即

$$F_s^r = \left\lceil \frac{R}{B \cdot m} \right\rceil + F_G \quad (5)$$

其中,  $R$  为业务  $r$  的请求速率,  $B$  为单位频隙带宽,  $m$  为业务选择的调制等级,  $F_G$  为业务间的保护频隙数目,  $\lceil \cdot \rceil$  表示对计算值取极大整数。

### 3.1 基于虚拟辅助图的动态路由子算法

根据业务请求,在多芯光纤的 SDM-EONs 中,执行基于虚拟辅助图的动态路由子算法,其步骤如算法1所示。

#### 算法1 基于虚拟辅助图的动态路由子算法

输入:SDM-EONs 拓扑  $G(V, E)$ , 业务请求  $r(s, d, R)$ , 链路的频隙集合  $F, K$  值。

输出:业务的候选路径集合  $P_r$ 。

- 1: 更新 SDM-EONs 拓扑  $G(V, E)$  的可用资源情况,根据业务  $r(s, d, R)$  需求,在  $G(V, E)$  中寻找  $2K$  条长度最短的候选路径,存在集合  $P$  中,其中,  $P = \{p_k\}, k=1, 2, \dots, 2K$ ;
- 2: 若集合  $P$  为空,阻塞业务  $r(s, d, R)$ , 结束 DRRA-PIA 算法;否则,转步骤3;
- 3: 根据式(6),计算每条候选路径  $p_k$  的路径评判值;
- 4: 构造业务  $r(s, d, R)$  的虚拟辅助图  $G(V', E)$ , 每条候选路径  $p_k$  对应虚拟辅助图的一条虚拟链路,虚拟链路的边权值用二元集合  $E(P', C)$  表示。其中,  $P'$  对应候选路径集合的每条路径的边连接关系,  $C$  则是每条路径的路径评判值,代表每条虚拟链路的边权值;
- 5: 在虚拟辅助图  $G(V', E)$  中,为业务选择  $K$  条边权值最大的虚拟链路,依据权值降序排列  $K$  条候选路径,将这  $K$  条虚拟链路对应的 SDM-EONs 光路保存在集合  $P_r$  中;
- 6: 输出业务的候选路径集合  $P_r$ 。

在算法1的步骤3中,计算每条候选路径的路径资源评判值为

$$W_{p_k}^r = \frac{\sum_{A_k \in F, A_k \geq F_s^r} N_{A_k}}{\sum_{i \in p_k} (N^i/N) + U_{p_k} \times H(p_k)} \quad (6)$$

$$U_{p_k} = \begin{cases} \eta_{p_k}, & \eta_{p_k} \leq \alpha, 0 \leq \alpha \leq \beta \leq 1 \\ \eta_{p_k} \times \gamma, & \alpha < \eta_{p_k} \leq \beta, \gamma > 1 \\ \infty, & \eta_{p_k} > \beta \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_{p_k} = \max_{i \in p_k} \{U_i\}; U_i = \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^F \frac{f_{i,j}^c}{F \times C} \quad (8)$$

式(6)中,  $W_{p_k}^r$  表示业务  $r$  的第  $k$  条候选路径  $p_k$  的评判值,该值越大,表示候选路径  $p_k$  的可用资源越多,业务传输性能越有保障;  $N_{A_k}$  表示当前路径  $p_k$  上满足  $r$  请求所需频隙数  $F_s^r$  的可用频谱块数目,  $A_k$  表示可用频谱块,  $F_s^r$  由式(5)计算;  $C$  为每条链路的纤芯数目,  $F$  为每根纤芯包含频隙数;  $N^i$  表示经过  $i$  链路的最短路径的数目;  $N$  表示 SDM-EONs 的光节点数目,  $H(p_k)$  为路径  $p_k$  的链路数。式(7)中,  $U_{p_k}$  表示路径  $p_k$  的负载影响路径上资源不可用情况。式(8)中,  $\eta_{p_k}$  为路径  $p_k$  的路径负载值,其中,  $f_{i,j}^c$  是布尔变量,若链路  $i$  的纤芯  $c$  的频谱块  $j$  空闲可用,则  $f_{i,j}^c$  为 1, 否则,  $f_{i,j}^c$  为 0;  $U_i$  表示链路  $i$  的平均负载。

### 3.2 物理损伤感知的路径频谱碎片度量

在多芯光纤的 SDM-EONs 中,由于 ICXT、非线性损伤和业务占用频谱块的动态特性,频谱碎片问题更加严重<sup>[4]</sup>。基于此,本文设计了路径频谱碎片度量公式,综合考虑了纤芯-频谱分配、ICXT 和 NLI 影响,即

$$F_c^l = \frac{\sum_{u=1}^F F_u^{p_i}}{F} \times \frac{\sum_{i=1}^F g_j^{c,l}}{G^{c,l}} \times (\omega^\tau \log_2 f_{c-a}^l) \quad (9)$$

式(9)第1部分为芯间交叉信道调制产生的 NLI 值估算;第2部分为纤芯  $c$  占用的频谱块数与连续频谱块总数  $G^{c,l}$  的比值,若链路  $l$  的纤芯  $c$  频谱块被占用,  $g_j^{c,l}=1$ , 否则,  $g_j^{c,l}=0$ , 第2部分体现了被占用频谱块越多,链路负载越重,频谱碎片化加重;最后一个部分是估算占用相邻纤芯的同频隙频谱产生的 ICXT 值,  $\omega$  为 ICXT 系数,  $\tau$  表示导致芯间串扰的相邻纤芯数目,  $f_{c-a}^l$  为与链路  $l$  纤芯产生芯间串扰的频隙数。

基于考虑物理损伤的路径频谱碎片度量方法,设计了算法2。

## 4 仿真验证与结果分析

### 4.1 仿真环境及评价指标

为了验证提出的 DRRA-PIA 算法性能,将 DRRA-PIA 与不考虑损伤感知的 KSP-FF (K Shortest Paths-First Fit) 基准算法<sup>[11]</sup>、采用拓扑分区的损伤感知的 PP-IR-SA<sup>[11]</sup>和考虑部分 ICXT 避免的 IPA-RSCA<sup>[15]</sup>进行带宽阻塞率和频谱利用率的性能对比。

本文的仿真网络环境为 NSFNET 和 USNET 拓扑<sup>[5,11]</sup>,如图1所示。图1中每条光纤链路包含7纤芯,每纤芯有360 FS,  $1\text{FS}=12.5\text{GHz}$ ,  $F_G=1\text{FS}$ , 业务的候选路径数  $K=3$ 。仿真业务数目为  $10^6$  个,业务请求大小在 50 Gb/s、100 Gb/s、200 Gb/s 和 400 Gb/s 中均匀分布,业务到达服从泊松分布,持续时间服从负指数分布<sup>[4]</sup>。路

**算法 2 物理损伤感知子算法**

**输入:** 请求  $r(s, d, R)$ , 候选路径集合  $P_r$ , ICXT 与 NLI 阈值,  $k=1$ .

**输出:**  $r(s, d, R)$  的路径、纤芯和频谱分配结果.

- 1: 从候选路径集合中, 选择一条候选路径  $p_k, p_k \in P_r$ ;
- 2: 根据纤芯优先级划分规则<sup>[15]</sup>, 对候选路径  $p_k$  的多芯光纤进行排序, 存入集合  $C_p$ ;
- 3: 根据式(5)计算业务选择候选路径  $p_k$  需要的频隙数目; 轮询集合  $C_p$  中的每纤芯  $c$  的可用频隙资源, 若存在满足  $r(s, d, R)$  带宽需求的可用频谱块, 根据式(9), 计算路径的频谱碎片值, 并根据频谱碎片值, 升序排序所有可用频谱块; 否则, 若  $k=K$ , 表示所有光路都无可用的频谱块, 阻塞业务, 反之, 令  $k=k+1$ , 转步骤 1;
- 4: 依次选择碎片值较小的可用频谱块和对应的纤芯  $c$  预分配给业务  $r(s, d, R)$ , 并通过式(2)计算资源预分配后信号的 NLI 值, 若其 NLI 值不大于 NLI 阈值, 转步骤 5; 否则, 选择下一个可用频谱块, 转步骤 4; 如果没有可用频谱块, 且  $k=K$ , 表示所有光路的频谱块都不满足 NLI 要求, 阻塞业务, 若  $k < K$ , 令  $k=k+1$ , 转步骤 1;
- 5: 根据式(4)计算纤芯串扰值和路径平均串扰值. 如果路径的 ICXT 不大于 ICXT 阈值, 转步骤 6; 否则, 转步骤 4;
- 6: 输出业务  $r(s, d, R)$  的路径、纤芯和频谱块资源分配结果.

径资源评判值和路径碎片度量公式中的参数  $\alpha=0.75, \beta=0.95, \gamma=1.2, \omega=1.2$ . 传输信号的调制方式和其他物理损伤阈值等参数取值可参考文献[11].

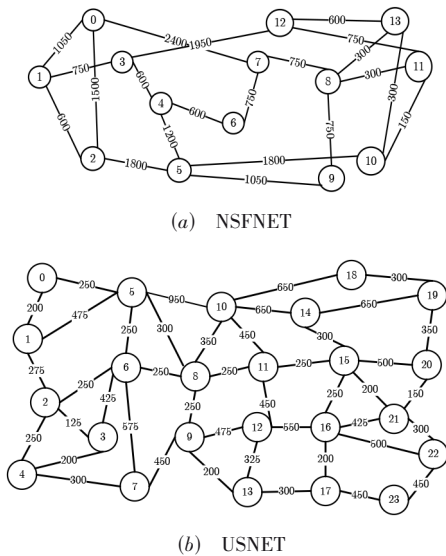


图 1 仿真网络拓扑

**4.2 仿真结果分析**

图 2 显示了不同业务负载下 KSP-FF、PP-IRSA、IPA-RSCA 和 DPPA-PIA 的带宽阻塞率性能. 在图 2 中, 随着负载的增加, 带宽阻塞率呈现增加的趋势, 其中, 本文所提 DRRA-PIA 由于采用路径评判值选择路由, 均

衡考虑链路负载和资源利用率情况; 而且, 通过设计考虑串扰感知和非线性损伤感知的路径碎片度量公式优化资源分配, 将物理损伤的影响降到最小, 因此, DRRA-PIA 的带宽阻塞率最低. 在对比算法中, 具有拓扑分区的损伤感知路由频谱分配 PP-IRSA 性能略优于无损感知的 KSP-FF 算法, 而考虑部分 ICXT 避免的 IPA-RSCA 算法具有距离自适应和部分损伤感知能力, 因此阻塞率比 PP-IRSA 低, 但是, IPA-RSCA 没有考虑 ICXT, 在路由时没有考虑链路重负载和物理损伤导致的频谱资源不可用问题, 其带宽阻塞率大于本文. 当业务负载为 900 Erlang 时, 本文所提方法的带宽阻塞率比 IPA-RSCA 算法的带宽阻塞率低约 16%. 相比 NSFNET 拓扑, USNET 拓扑的网络连通度更高, 使业务的路由和资源分配成功率更高, 所以, USNET 拓扑的带宽阻塞率更低.

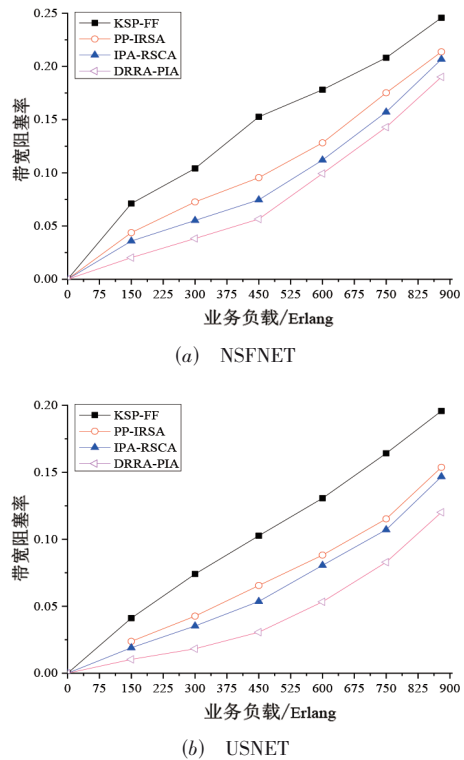


图 2 不同业务负载下带宽阻塞率

图 3 展示了 4 种算法的频谱利用率随负载变化的情况. 其中, DRRA-PIA 在不同的网络拓扑上都获得了最高的频谱利用率, IPA-RSCA 次之. 这是因为, 本文所提 DRRA-PIA 在路由选择时, 综合考虑了候选光路的跳数、路径上各链路的资源利用率和可用频谱块分布特性, 能动态地均衡链路负载, 减少网络中瓶颈链路的产生; 在业务的资源分配过程中, DRRA-PIA 根据改进的碎片度量公式, 保证纤芯和频谱分配时最小化资源碎

片. 因此,考虑芯间串扰和NLI的DRRA-PIA能进一步减少业务阻塞率,提高频谱资源的利用率. 当业务负载为900 Erlang时,本文所提方法的频谱利用率比IPA-RSCA算法的频谱利用率高约3.02%.

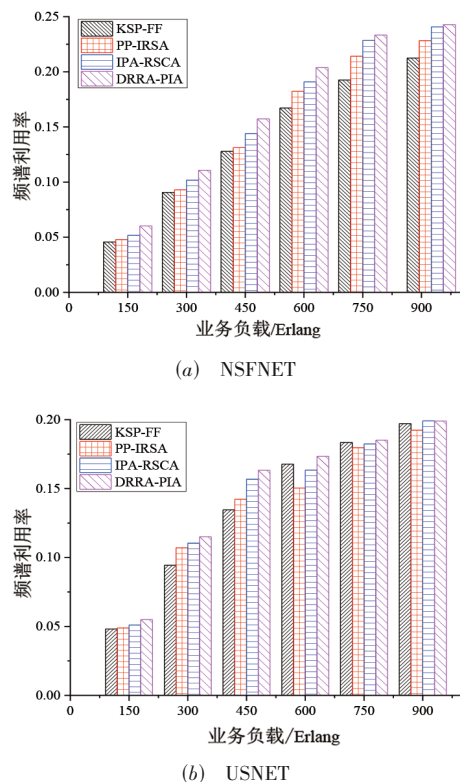


图3 不同业务负载下频谱利用率

## 5 总结

针对SDM-EONs的ICXT和NLI问题,设计了根据路径资源评判值的路由和考虑物理损伤及串扰感知的碎片避免的频谱纤芯资源分配方法. DRRA-PIA方法能提高业务动态路由、资源分配的效率,同时较好地降低了光路物理损伤和非线性损伤对业务性能的影响,对下一代多芯大容量光网络增加资源使用率和提高网络的服务质量都具有重要意义.

### 参考文献

[1] XU Y X, YAN L, AGRELL E, et al. Iterative resource allocation algorithm for EONs based on a linearized GN model [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(3): 39-51.

[2] 何利, 曹启彦. 基于检验点的移动云资源调度策略研究 [J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(1): 103-112.

HE L, CAO Q Y. Research on mobile cloud resource scheduling strategy based on checkpoint[J]. *Journal of*

*Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2019, 31(1): 103-112. (in Chinese)

[3] 施颖洁, 陈前斌, 杨希希, 等. 基于拍卖的网络切片虚拟资源分配算法研究[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, 30(2): 159-166.

SHI Y J, CHEN Q B, YANG X X, et al. Virtual resource allocation algorithm of network slice based on auction[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*, 2018, 30(2): 159-166. (in Chinese)

[4] 熊琪乐. 空分复用弹性光网络中优化物理损伤和能耗的资源调度算法[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.

XIONG Q L. Resource Scheduling Algorithm for Optimizing Physical Impairment and Energy Consumption in Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020. (in Chinese)

[5] 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.

LIU H L, FANG F, HUANG J, 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. (in Chinese)

[6] ZHU M, GAO P, ZHANG J, et al. Energy efficient dynamic virtual optical network embedding in sliceable-transponder-equipped EONs[C]//GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2018: 1-6.

[7] YANG S, KUIPERS F. Impairment-aware routing in translucent spectrum-sliced elastic optical path networks[C]//2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications. Vilanova i la Geltru, Spain: IEEE, 2012: 1-6.

[8] MADUSHANKA N D, ZHAO J Z, LI Y, et al. Traffic-grooming- and multipath-routing-enabled impairment-aware elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(2): 58-70.

[9] ZHAO J Z, WYMEERSCH H, AGRELL E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(22): 4554-4564.

[10] BEHERA S, DEB A, DAS G, et al. Impairment aware routing, bit loading, and spectrum allocation in elastic op-

tical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3009-3020.

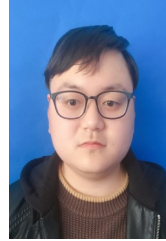
- [11] MEHRVAR H, RAD M, JANZ C, et al. T-SDN control strategy for expedited connection services using physical layer impairment-aware RSA[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition(OFC). Los Angeles, USA: IEEE, 2017: 1-3.
- [12] ZHAO J J, WANG W Y, LI W, et al. A novel partition-plane impairment aware routing and spectrum assignment algorithm in mixed line rates elastic optical networks[J]. Photonic Network Communications, 2017, 33(1): 11-18.
- [13] FUJII S, HIROTA Y, TODE H, et al. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multi-core fibers in elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(12): 1059-1071.
- [14] MORITA K, HIRATA K. Dynamic spectrum allocation method for reducing crosstalk in multi-core fiber networks [C]//2017 International Conference on Information Networking. Da Nang, Vietnam: IEEE, 2017: 686-688.
- [15] MORENO M F J, RUMIPAMBA Z R, PAVÓN M 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.
- [16] HABIBI M, BEYRANVAND H. Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(5): 179-189.
- [17] YANG M C, ZHANG Y B, WU Q. 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.
- [18] 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.  
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(Natural Science Edition), 2017, 29(3): 313-319. (in Chinese)

## 作者简介



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

E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn



王展鹏 男, 1995年生, 河南人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光通信网络和路由.

E-mail: 280790273@qq.com



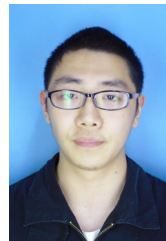
陈勇 男, 1963年生, 重庆人. 重庆邮电大学教授. 主要研究方向为光无线通信, 物联网和信号检测技术.

E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn



张彤 女, 1996年生, 安徽人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光无线通信.

E-mail: 1679326124@qq.com



熊琪乐 男, 1995年生, 湖北人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光通信网络和路由.

E-mail: S170131029@stu.cqupt.edu.cn



胡俊岭 男, 1998年生, 内蒙古人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光通信网络和通信.

E-mail: h2252236035@163.com