

基于辅助图的比特加载和损伤感知资源分配

刘焕淋¹, 刘 博¹, 陈 勇^{2*}, 葛润泽¹, 陈浩楠¹, 邓 棣¹, 霍星吉¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆工程学院, 重庆 400056)

摘要: 为了降低空分复用弹性光网络(Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks, SDM-EONs)的自发辐射噪声和非线性物理损伤问题对业务传输性能的影响, 提出基于辅助图的比特加载和物理损伤感知资源分配(Bit Loading and Physical Impairment-sensing Resource Allocation, BL-PIRA)方法. 在BL-PIRA中, 使用辅助图实现业务多策略最小代价优化的路由选择; 采用比特加载机制为业务选择满足芯间串扰和非线性物理损伤的纤芯和频谱块. 仿真结果表明, 所提BL-PIRA能降低业务阻塞率, 提高频谱利用率.

关键词: 空分复用弹性光网络; 物理损伤感知; 辅助图; 比特加载; 频谱利用率

基金项目: 国家自然科学基金(No.51977021); 重庆市自然科学基金(No.CSTB2023NSCQ-MSX0734)

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)02-0645-06

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

DOI: 10.12263/DZXB.20240129

Auxiliary Graph-Based Resource Allocation with Bit-Loading and Physical Impairment-Sensing

LIU Huan-lin¹, LIU Bo¹, CHEN Yong^{2*}, GE Run-ze¹, CHEN Hao-nan¹, DENG Di¹, HUO Xing-ji¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056, China)

Abstract: To decrease the impact of spontaneous emission noise and non-linear physical impairment on the request's transmission performance in space division multiplexing elastic optical networks (SDM-EONs), an auxiliary graph-based bit loading and physical impairment-sensing resource allocation (BL-PIRA) method is proposed in the paper. In the BL-PIRA, the auxiliary graph is introduced to optimize the multi-policy routing selection with lowest cost for the request. Then, the bit loading mechanism is used to select fiber core and spectrum block that meet crosstalk between inter-cores and non-linear physical impairment for the request. The simulation results show that the proposed BL-PIRA can reduce the request's blocking probability and improve spectrum utilization.

Key words: SDM-EONs; physical impairment-sensing; auxiliary graph; bit-loading; spectrum utilization

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.51977021); Natural Science Foundation of Chongqing (No.CSTB2023NSCQ-MSX0734)

1 引言

为满足日益增长的互联网业务对灵活带宽需求的增长^[1], 采用多芯光纤空分复用弹性光网络(Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks, SDM-EONs), 因其提供更大的传输容量、更细带宽粒度的频隙(Frequency Slot, FS)和更灵活的信号调制方式而成为最有潜力的下一代光网络^[2, 3].

SDM-EONs在增加光传输网络容量同时, 存在芯间串扰和纤芯内的非线性物理损伤(Non-Linear physical

Impairment, NLI)的问题, 导致SDM-EONs中光信号的传输质量(Quality of Transmission, QoT)下降^[4]. 准确评估SDM-EONs传输业务的光信噪比和设计有效的业务路由、纤芯选择和频谱分配(Routing, Core and Spectrum Assignment, RCSA)算法是提高SDM-EONs的QoT性能的有效途径^[5]. Su等人^[4]设计动态损伤感知(Dynamic Impairment-aware RCSA, DI-RCSA)算法, 但其联合评估模型往往高估了噪声对QoT的影响, 且该算法忽略了信号的调制格式、频谱分配和纤芯选择对QoT

的影响. Takeda 等人^[6]对文献[4]中的芯间串扰和芯内 NLI 评估模型分别进行改进, 提出联合串扰和损伤的光路配置模型 (Joint core Crosstalk and Impairment-aware Lightpath Provisioning Model, JCI-LPM). 刘焕淋等人^[7]提出考虑物理损伤和串扰感知的 RCSA 方法, 设计考虑负载和路径跳数的路由选择策略. Habibi 等人^[8]提出 NLI 评估模型和研究光路负载裕度感知的 RCSA 和功率调整方法, 但是该研究仅适用于静态业务调度, 且装箱分配方法使算法复杂度较高.

另外, 业务在 SDM-EONs 传输的物理损伤对 RCSA 的影响不容忽视^[9,10]. Jana 等人^[9]提出一种基于深度强化学习的多频带弹性光网络动态资源分配方案, 通过调整波长通道减少信道的 NLI 影响. Bao 等人^[10]提出首尾命中频谱策略以减小 C+L 不同波段光路通道之间的 NLI, 但是在频谱分配中存在光路中断和降低用户 QoT 体验的风险. 为满足业务传输生存性和 QoT 需求, 研究者提出业务生存性和物理损伤感知的路由、频谱和调制格式分配策略^[11-14]. Liu 等人^[14]研究了根据业务请求, 在 SDM-EONs 中构建业务多策略的 RCSA 辅助图, 但该方法没有考虑 NLI 对业务传输性能影响, 且忽略了链路的频谱碎片率.

基于以上分析, 本文提出基于辅助图的比特加载和物理损伤感知的资源分配 (Bit Loading and Physical Impairment-Aware Resource Allocation, BL-PIRA) 方法.

2 网络模型

SDM-EONs 抽象为无向图 $G = \{N, E, C\}$, 其中, N 为光节点集合, E 为光纤链路集合, C 为纤芯集合; 业务请求表示为 $R_r = (s, d, L_r)$, 其中, s 为源节点, d 为宿节点, L_r 为业务传输速率需求值. 当业务请求到达 SDM-EONs 时, SDM-EONs 需为业务选择满足约束条件的 RCSA. 现有 RCSA 路由算法, 如 K 最短路径算法, 仅为业务寻找最短长度或跳数最少的光路以实现单一策略优化, 不能兼顾光路负载、光路长度、光路跳数、光路能耗和收发端口可用资源等多策略情况, 而基于辅助图的路由算法, 通过设置辅助图的边权值, 可以兼顾 RCSA 上述多策略路由需求.

在 RCSA 中, 纤芯选择导致的芯间串扰是不可忽略的^[6,10]. 式(1)为一种芯间串扰的计算方法^[6,14]:

$$XT = \frac{n - n \times \exp[-(n+1) \times 2hL]}{1 + n \times \exp[-(n+1) \times 2hL]} \quad (1)$$

其中, XT 表示芯间串扰值; n 为与当前纤芯相邻的纤芯数; h 为单位长度芯间串扰值; L 为传输长度.

此外, 业务在纤芯中传输时, 还受到以自相位调制和交叉相位调制为主的 NLI 影响, 使光信号功率衰减和业务的 QoT 下降. 为了更准确地评估 NLI 对光信号的

影响, 采用文献[10,14]的光信噪比评估模型, 则业务从 s 到 d 光路 P 的 NLI 值 $N_p^{s,d}$ 为^[10,14]

$$N_p^{s,d} = \frac{1}{\text{OSNR}_p^{s,d}} = \frac{\sum_{k \in P} \left(\sum_{i=1}^{N_k} P_{A,k}^{i,m} + P_{N,k} \right)}{P_R} \quad (2)$$

其中, P_R 为业务发射功率值; $P_{A,k}^{i,m}$ 为光路 P 第 k 链路频隙 i 使用调制指数 m 的自发辐射噪声; N_k 为占用 FS 数; $P_{N,k}$ 为光路 P 第 k 链路的 NLI 功率值^[10,14].

在 RCSA 中, 还需满足纤芯一致性、频谱一致性、连续性和链路的容量有限性约束^[6]:

$$P_{e,c,i} = P_{e',c,i} = 1, \forall e, e' \in P_{s,d} \quad (3)$$

$$\prod_{i=f_s}^{f_e} P_{e,c,i} = 1, \forall e \in P_{s,d}, c \in C \quad (4)$$

$$|F| \geq \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \left(\frac{L_R}{m \times B_f} + \text{GB} \right) y_{e,c} \quad (5)$$

其中, 若业务占用光路 $P_{s,d}$ 的链路 e 的纤芯 c 的 FS i , 则 $P_{e,c,i} = 1$, 否则, $P_{e,c,i} = 0$; f_s 和 f_e 表示业务分配频谱块的起始和结束 FS 索引值; F 为纤芯 FS 集合; m 为调制指数; GB 为业务间的保护 FS 数目; B_f 表示单位频隙带宽; 若业务 R_i 使用链路 e 的纤芯 c , 则 $y_{e,c} = 1$, 否则, $y_{e,c} = 0$.

本文的优化目标是在满足业务传输的芯间串扰和 NLI 约束下, 最大限度地降低 SDM-EONs 业务阻塞率和提高光纤链路频谱利用率. 为此, 本文设计基于辅助图优化路由和纤芯选择以及基于比特加载机制优化业务的频谱分配的 BL-PIRA 方法.

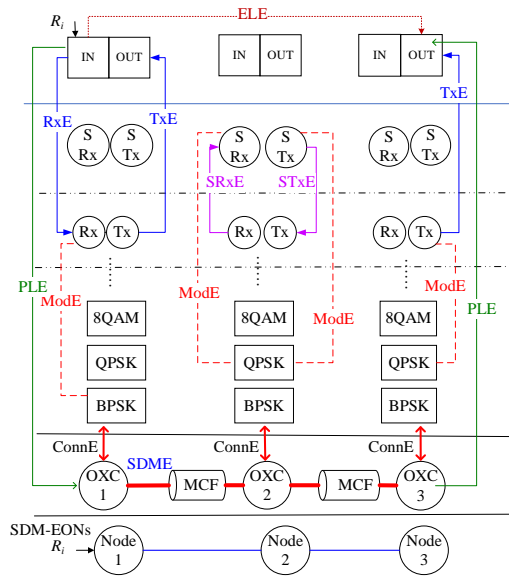
3 基于辅助图的比特加载和物理损伤感知的资源分配 (BL-PIRA)

BL-PIRA 包括基于辅助图的多策略路由选择方法以及基于比特加载机制的纤芯和频谱资源分配策略.

3.1 基于辅助图的多策略最小代价路由选择方法

在 SDM-EONs 中传输业务时, 主要使用光传输层和 IP (Internet Protocol) 网络层的节点设备传输业务, IP 网络层主要负责分组转发. 而光传输层负责在网络层路由和转发光信号, 主要由带宽可变转发器 (Bandwidth Variable Transponder, BVT)、带宽可变光交叉连接器 (Bandwidth Variable Optical Cross Connector, BV-OXC) 和光放大器 (Optical Amplifier, OA) 等器件组成. 其中, BVT 在辅助图中被分割成多个逻辑子转发器 (Sub Bandwidth Variable Transponder, SBVT), SBVT 能在光域匹配业务所需的切片带宽.

图 1 为 SDM-EONs 的辅助图 $G_A = \{N_A, E_A\}$ 模型. $G_A = \{N_A, E_A\}$ 模型构造参考算法 1 的 S1~S3 步骤, 将 SDM-EONs 的每个节点在 G_A 中用 4 层辅助节点表示: IP 网络层的 IN 和 OUT 节点, 转发器层 BVT 的接收端口 (Re-

图 1 构建 SDM-EONs 辅助图 $G_A = \{N_A, E_A\}$ 示意图**算法 1 基于辅助图的多策略最小代价路由选择方法**

输入: $G = \{N, E, C\}$, 设置 K 值, 业务请求 $R_i = (s, d, L_R)$;

输出: 业务请求 R_i 的光路 P_R 选择结果。

S1. 构造辅助图 $G_A = \{N_A, E_A\}$ 的 N_A 集合: 对 $G = \{N, E, C\}$ 的每个光节点, 添加为 N_A 集合的 IN 和 OUT 端口, Tx 和 Rx 端口, STx 和 SRx 端口, BV-OXC 端口;

S2. 构造 E_A 集合的 ConnE 边: 根据 $G = \{N, E, C\}$ 拓扑, 在 G_A 的 BV-OXC 节点间添加 ConnE 边, 并设 ConnE 权值为 10^{-6} ;

S3. 构造 E_A 的其他边: 在每个 IN 和 Rx 端口间添加 RxE 有向边, 在 Tx 端口和 OUT 端口间添加 TxE 有向边, 在 Rx 端口和 SRx 端口间添加 SRxE 有向边, 在 STx 端口 Tx 端口间添加 STxE 有向边, 添加 ModE 边, 设 ModE 权值为 10^{-6} ;

S4. 在 G_A 中的节点 s 与 d 之间添加 ELE 光路边 P_E , 并确定 ELE 最高调制指数对应的调制格式, 由式(6)计算 $C(P_E)$ 代价值;

S5. 在图 G 中, 采用 K 最短路径算法为 R_i 寻找 K 条候选光路, 在 G_A 中确定光路对应的 PLE, 若业务所需带宽小于 Rx 和 Tx 端口带宽, 则在 PLE 光路中增加 SRxE 和 STxE 边, 确定 PLE 调制格式, 由式(8)计算 PLE 光路边 $C(P_L)$ 代价值;

S6. 若 R_i 的 ELE 或 K 条 PLE 代价值不全为 ∞ , 转 S7; 否则, 若 R_i 没被分割过, 转 S8, 否则, 阻塞业务, 令 $P_R = \emptyset$, 转 S9;

S7. 为 R_i 选择 ELE 和 PLE 代价值边代价值最小的光路边, 将其在 SDM-EONs 中的对应光路记为 P_R , 转 S9; 否则, 阻塞业务 R_i , 令 $P_R = \emptyset$, 转 S9;

S8. 将业务 R_i 分割为 2 个子业务请求 $R_{i1} = (s, d, L_R/2)$ 和 $R_{i2} = (s, d, L_R/2)$, 对 2 个子业务, 分别转 S4;

S9. 若 R_i 没有被分割传输, 输出所选光路 P_R ; 否则, 分别将 R_{i1} 和 R_{i2} 所选 2 条光路组合, 作为 R_i 的输出光路 P_R .

ceiver, Rx) 和发射端口 (Transmitter, Tx) 的节点, 逻辑子转发器层的子转发器接收端口 (Sub Receiver, SRx) 和子转发器发射端口 (Sub Transmitter, STx) 节点, BV-OXC

节点; SDM-EONs 的边在 G_A 中表示为 BV-OXC 节点之间的空分复用边 (Space Division Multiplexing Edge, SDME), 连接 BVT 与 BV-OXC 的 ConnE 边, 由于 ConnE 表示端口之间连接关系, 与路由选择资源评估无关, 因此, ConnE 边权设置为 10^{-6} . 若信号需要在 IP 层进行光/电或电/光转换, 则添加从 IP 路由器到转发器的 TxE 有向辅助边和从转发器到 IP 路由器的 RxE 有向辅助边; 若使用可切片带宽可变转发器, 则添加从 IP 路由器到子转发器的 STxE 有向辅助边和从子转发器到 IP 路由器的 SRxE 有向辅助边. 在图 1 中, 对其他业务已选光路, 在 G_A 中为现存光路边 (Established Lightpath Edge, ELE). 用 K 最短路径算法为业务寻找的候选光路在 G_A 中为潜在光路边 (Potential Lightpath Edge, PLE). 最后, 为光路添加 ModE 调制格式边, 设 ModE 边权值为 10^{-6} . 候选调制格式为: BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 8QAM (8-Quadrature Amplitude Modulation) 等^[14].

考虑频谱碎片的 ELE 边代价 $C(P_E)$ 为

$$C(P_E) = \begin{cases} \frac{E(P_E) \times \text{FB}_m}{\text{FS}(R_i)} \times \frac{H(P_E)}{m}, & \text{FB}_m \geq \text{FS}(R_i) \\ \infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{FS}(R_i) = \left\lceil \frac{L_R}{B_f \times m} \right\rceil + \text{GB} \quad (7)$$

其中, P_E 为 ELE 光路; $E(P_E)$ 为光路 P_E 的能耗; $H(P_E)$ 为光路在 SDM-EONs 中的跳数; FB_m 为最大空闲频谱块包含 FS 数目; $\text{FS}(R_i)$ 为业务 R_i 所需 FS 数目.

业务的 PLE 光路 P_L 的代价 $C(P_L)$ 为

$$C(P_L) = C_{\text{RxE}} + O_S \times C_{\text{SRxE}} + (B_L + 1) \times C_{\text{ModE}} + 2C_{\text{ConnE}} + C_{\text{SDME}} + \frac{h(P_L)}{m} + C_{\text{TxE}} + O_S \times C_{\text{STxE}} \quad (8)$$

其中, $h(P_L)$ 为 P_L 在 SDM-EONs 中的跳数; B_L 为 P_L 比特加载次数; 若使用 SBVT, 则 $O_S = 1$, 否则, $O_S = 0$; C_{ModE} 为 G_A 中光路的调制格式代价; C_{ConnE} 为 G_A 中光路选择 BV-OXC 的代价; 设 $C_{\text{ModE}} = C_{\text{ConnE}} = 10^{-6}$; C_{RxE} 和 C_{TxE} 分别为 BVT 接收和发送端口代价; C_{SRxE} 和 C_{STxE} 分别为 SBVT 接收和发送端口能耗代价; C_{SDME} 为 BV-OXC 的端口能耗代价. 各参数取值参考文献 [14] 确定.

若业务 R_i 没找到 ELE 和 PLE, 则 R_i 分割为 2 个子业务, 光路代价为子业务光路代价总和.

3.2 光路频谱碎片和非线性物理损伤感知的纤芯和频谱分配策略

业务候选光路 P_R 纤芯 c 的频谱碎片度为

$$F_c(P_R) = 1 - \frac{B_c(P_R)}{\frac{1}{H(P_R)+1} \sum_{h=1}^{N_f^c(h)}} \quad c \in C \quad (9)$$

其中, $F_c(P_R)$ 为光路 P_R 纤芯 c 的频谱碎片度值; $B_c(P_R)$ 为光路 P_R 纤芯 c 最大连续空闲频谱块的 FS 数目; $N_f^c(h)$ 为光路 P_R 的第 h 条链路中纤芯 c 的空闲频隙数目总和; $H(P_R)$ 为光路的链路数目。

为减小芯间串扰影响的频谱块选择代价公式为

$$W_f = \frac{FB_m \times \left(1 + \frac{1}{H(P_R)+1} \sum_{h=1}^{H(P_R)+1} FS_o^h \right)}{FS(R_i)} \quad (10)$$

其中, FS_o^h 为频谱块在光路 P_R 第 h 条链路的相邻纤芯的相同频隙索引位置被其他业务占用的频隙数。

若所选频谱块位于负载较重或频谱碎片化程度较大光路上时, 采用比特加载降低业务的 NLI, 采用比特加载后, R_i 所需频隙数目由式(7)改写为

$$FS_i(R_i) = \sum_j \left\lceil \frac{L_R^j}{B_j \times \eta_j} \right\rceil + GB, \text{ 且 } \sum_j L_R^j = L_R \quad (11)$$

其中, $FS_i(R_i)$ 为业务比特加载后所需频隙数, L_R^j 为业务在光路第 j 频隙的速率, η_j 为第 j 频隙调制指数。

光路频谱碎片和非线性物理损伤感知频谱分配策略的具体过程如算法 2 所示。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真环境

为验证 BL-PIRA 的性能, 本文在 NSFNET 拓扑和 USNET 拓扑上进行了模拟仿真^[4,6,14]。设随机生成 10^6 个业务请求, 业务速率均匀分布在 25 Gbps~200 Gbps 之间。每光纤 $|F|=360$ 频隙, 设 $1FS=12.5$ GHz, $|CI|=7$ ^[8], 业务的候选路由 $K=3$ 。本文对比算法为 KSP-FF(First Fit)^[13]、DI-RCSA^[4] 和 JCI-LPM^[6]。同时, DI-RCSA 和 JCI-LPM 采用基于辅助图的多策略最小代价路由方法。

4.2 仿真结果及分析

图 2 为业务阻塞率随业务负载的变化情况。从图 2 可发现: 4 种算法的业务阻塞率均随着负载的增加而增加, 这是因为当负载增加时, 网络中满足业务需求的频谱资源减少, 使业务 RSCA 失败率增加。但是, 在相同负载下, 所提 BL-PIRA 的业务阻塞率最小, 如负载为 900 Erlang 时, BL-PIRA 比 JCI-LPM 阻塞率低 3.05%, 比 DI-RCSA 阻塞率低 5.23%, 比 KSP-FF 阻塞率低 8.52%。这是因为所提 BL-PIRA 采用基于辅助图的多策略路由, 兼顾光路最短长度和最小跳数; 且 BL-PIRA 选择频谱碎片程度小的纤芯和芯间串扰小的频谱块, 对超过 NLI 阈值的频谱块采用比特加载调整调制格式, 使 SDM-EONs 可承载更多业务, 有助于业务阻塞率。

相比图 2(a), 图 2(b) 中的 4 种算法的业务阻塞率更低, 这是由于 USNET 连通度比 NSFNET 大, 其节点和

算法 2 光路频谱碎片和非线性物理损伤感知频谱分配策略

输入: $G=\{N,E,C\}; R_i=(s,d,L_R); P_R$, 设置 X_{th} 和 NLI 阈值;

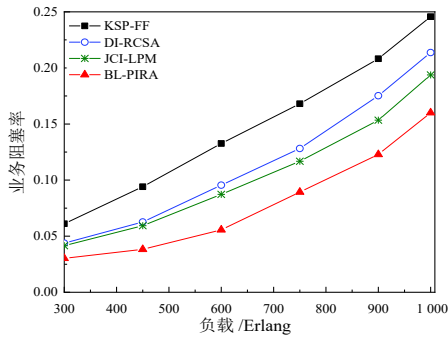
输出: R_i 的路由、纤芯、调制格式和频谱分配方案。

- S1. 由式(9), 计算光路 P_R 上各纤芯的频谱碎片程度值, 并升序排列光路 P_R 的候选纤芯;
- S2. 由光路长度确定光路的最高调制指数对应的调制格式; 由式(7), 计算 R_i 在光路 P_R 上所需最少频隙数目 $FS(R_i)$;
- S3. 由式(1), 计算所选光路 P_R 的候选纤芯的芯间串扰值, 将大于 X_{th} 的纤芯从光路的候选纤芯集合中删除;
- S4. 遍历候选纤芯中大于 $FS(R_i)$ 的空闲频隙块, 保存在 F_o 集合中, 若 $F_o=\emptyset$, 阻塞业务, 转 S11; 否则, 转 S5;
- S5. 由式(10), 计算 F_o 的 W_f 值, 并升序排列在 F_o 中;
- S6. 从 F_o 中依序选择一个频谱块, 由式(2), 计算其 NLI 值, 若 NLI 值小于 NLI 阈值, 转 S10; 否则, 转 S7;
- S7. 依次选择该频谱块的未比特加载频隙, 采用比特加载方法对该频隙降 1 级调制指数的调制格式, 由式(2), 再计算频谱块的 NLI 值, 若小于 NLI 阈值, 转 S10; 否则, 转 S8;
- S8. 若该 FS 采用的最低调制格式, 转 S7; 否则, 采用比特加载方法对该 FS 降低 1 级调制格式, 由式(2) 计算频谱块的 NLI 值, 若 NLI 值小于 NLI 阈值, 转 S10; 否则, 转 S9;
- S9. 若该频隙不是频谱块的结束索引值 FS, 转 S7; 否则, 从 F_o 中删除该频谱块, 若 F_o 非空集, 转 S6, 否则, 标志 RSCA 失败, 转 S11;
- S10. 由式(11) 计算比特加载后, 业务所需 $FS(R_i)$; 若 F_o 中频谱块与相邻空闲频隙之和大于 $FS(R_i)$, 则将其作为 R_i 的频谱块, 转 S11, 否则, 从 F_o 中删除该频谱块, 若 F_o 非空, 转 S6, 否则, 标志 RSCA 失败, 转 S11;
- S11. 若业务 RSCA 成功, 输出业务 R_i 的 RSCA 分配信息, 否则, 输出 RSCA 失败标志, 结束算法 2。

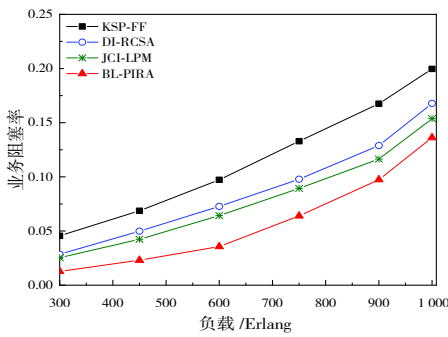
链路数目更多, 链路平均长度更短, 更容易为业务选择资源消耗更少的光路。

图 3 为 4 种算法的链路最大占用频隙索引值与负载关系。随着负载增加, 链路最大占用频隙索引值增加, 但是在相同负载下, 所提 BL-PIRA 的最大占用频隙索引值最小。原因是: KSP-FF 采用随机选择纤芯和 FF 的频谱分配方式, 导致频谱碎片离散化程度较大, 故其性能最差; 而 DI-RCSA 在频谱块分配时要联合考虑 NLI 和芯间串扰, 使其可选的频谱块的索引值或离散程度高于分别考虑芯间串扰和 NLI 影响的 JCI-LPM, 故 DI-RCSA 的最大频隙索引值大于 JCI-LPM; 而本文所提 BL-PIRA 的最大频隙索引值最低, 虽然本文提出的频谱分配方式可能使用更低调制指数的调制格式, 使业务所需频隙数目增加, 但 BL-PIRA 在 RCSA 中选择频谱碎片程度更低的纤芯和芯间串扰影响更小的频谱块, 使频谱分配更集中, 离散化程度减小, 故 BL-PIRA 的最大占用频隙索引值最小。

图 4 为频谱利用率与负载的关系。当负载增加时, 4 种算法频谱利用率也逐渐增加, 但其增加速度低于负载增加速度。原因是: 负载增加时, 传输更多业务需要占用

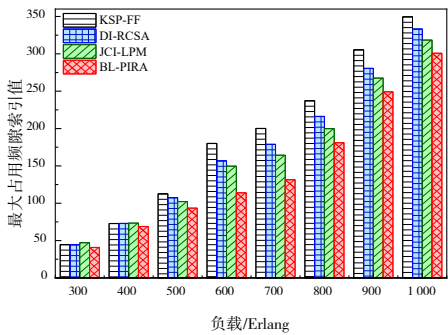


(a) NSFNET

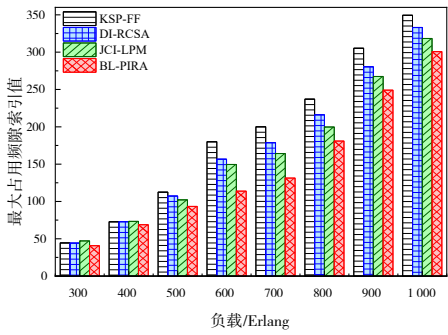


(b) USNET

图2 业务阻塞率与负载关系



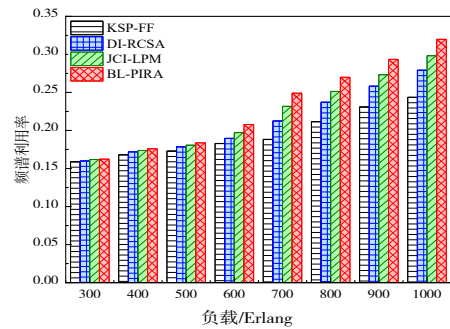
(a) NSFNET



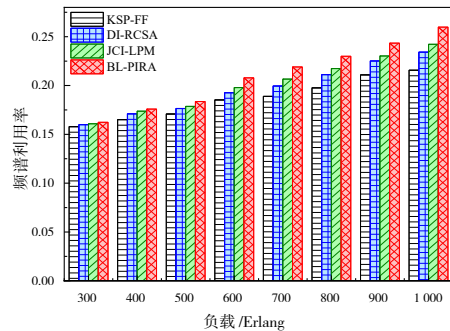
(b) USNET

图3 最大占用频隙索引与负载关系

较多的网络资源,且越来越多的业务需要选择更长或更大代价的光路,使业务传输占用的频谱资源进一步增加,频率利用率有所上升.但是,负载增加势必使网络中可用资源日趋拥挤,加剧了网络资源的紧缺程度并增加了业务阻塞概率,导致频率利用率增加的速度日趋平缓.相比其他对比算法,本文所提BL-PIRA在各种负载情况下都获得最高的频谱利用率.这是因为所提BL-PIRA在频谱分配中选择碎片程度小的纤芯和串扰小的频谱块,并采用基于比特加载调整频隙的调制格式,提高了业务频谱分配成功率并降低了频谱碎片化程度.



(a) NSFNET



(b) USNET

图4 频谱利用率与负载关系

5 结论

针对芯间串扰和非线性物理损伤导致SDM-EONs的RCSA失败率增加的问题,论文基于辅助图的多策略最小代价路由以及基于比特加载的光路碎片和物理损伤感知频谱资源分配方法能提高业务的QoT性能.随着互联网应用的增长,保证业务QoT和提高资源利用率的方法对增强SDM-EONs网络服务性能具有积极意义.

参考文献

[1] 陆汝钊.从大数据到大知识[J].重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(6): 921-928.

LU R Q. From big data to big knowledge[J]. Journal of

- Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 34(6): 921-928. (in Chinese)
- [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(自然科学版), 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 (Natural Science Edition), 2021, 33(1):52-58. (in Chinese)
- [3] ZHENG W C, YANG M C, ZHANG C X et al. Robust design against network failures of shared backup path protected SDM-EONs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(10): 2923-2939.
- [4] SU J S, ZHANG J, WANG J, et al. Dynamic impairment-aware RMCSA in multi-core fiber-based elastic optical networks[J]. Optics Communications, 2022, 518: 128361.
- [5] 张盛峰, 陈会丹, 彭樱. SDM-EON中基于串扰避免的多纤芯分配算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(1): 23-30.
ZHANG S F, CHEN H D, PENG Y. Multi-core assignment algorithm based on crosstalk-avoiding in space division multiplexing elastic optical networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2023, 35(1):23-30. (in Chinese)
- [6] TAKEDA K, SATO T, CHATTERJEE B C, et al. Joint inter-core crosstalk and intra-core impairment-aware lightpath provisioning model in space-division multiplexing elastic optical networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(4): 4323-4337.
- [7] 刘焕淋, 王展鹏, 陈勇, 等. 物理损伤感知的多芯光纤网络动态路由资源分配方法[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 502-507.
LIU H L, WANG Z P, CHEN Y, et al. Physical impairment aware-based dynamic routing resource allocation method for multi-core fiber network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 502-507. (in Chinese)
- [8] HABIBI M, BEYRANVAND H. Reducing blocking probability and QoT violation in dynamic elastic optical networks via load-aware margin selection[J]. Computer Networks, 2022, 214: 109146.
- [9] JANA R K, CHATTERJEE B C, SINGH A P, et al. Quality-aware resource provisioning for multiband elastic optical networks: A deep-learning-assisted approach[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(11): 882-893.
- [10] BAO B, YANG H, YAO Q, et al. Impairment-reduced resource allocation with full-life-cycle SNR guarantee in hybrid C/C+L band elastic optical networks[C]//IEEE 20th International Conference on Optical Communications and Networks(ICOCN). Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.
- [11] 刘焕淋, 胡俊岭, 任杰, 等. 基于光路负载均衡和邻域匹配的串扰感知资源分配方法[J]. 电子学报, 2022, 50(11): 2746-2753.
LIU H L, HU J L, REN J, et al. Crosstalk aware resource allocation method based on lightpath load balancing and neighborhood matching[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(11): 2746-2753. (in Chinese)
- [12] CHEBOLU V, BEHERA S, DAS G. Robust RMSA design for shared backup path protection based EON against nonlinear impairments[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(8): 640-653.
- [13] LACERDA J, FONTINELE A, CAMPELO D, et al. Dedicated protection considering physical layer impairments in elastic optical networks[C]//IEEE 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Piscataway: IEEE, 2020: 1-4.
- [14] LIU H L, HU J L, CHEN Y, et al. Auxiliary graph-based energy-efficient routing resource allocation algorithm in space division multiplexing elastic optical networks[J]. Optics Communications, 2023, 535: 129321.

作者简介



刘焕淋 女, 1970年2月出生于重庆市. 重庆邮电大学教授, 博士, 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



陈勇 男, 1963年7月出生于重庆市. 重庆邮电大学教授, 硕士生导师. 主要研究方向为光信号处理.
E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn



刘博 男, 2000年6月出生于四川省内江市. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为光网络资源分配.
E-mail: 2499109944@qq.com