

## 面向业务的弹性光网络光路损伤感知能效路由策略

刘焕淋<sup>\*①</sup> 方菲<sup>①</sup> 黄俊<sup>①</sup> 陈勇<sup>②</sup> 向敏<sup>②</sup> 马跃<sup>③</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)

<sup>③</sup>(国网冀北电力有限公司信息通信分公司 北京 100053)

**摘要:** 针对弹性光网络中物理损伤导致业务频谱利用率低和传输能耗高问题, 该文提出一种面向业务的链路损伤感知频谱分区(LI-ASP)能效路由策略。在LI-ASP策略中, 为降低不同信道间非线性损伤, 基于负载均衡设计一个综合考虑链路频谱状态和传输损伤的路径权重公式, 根据调制方式的频谱效率和最大传输距离构造分层辅助图, 从最高调制等级开始, 为高质量业务选择 $K$ 条边分离的最大权重传输路径; 为低质量业务选择 $K$ 条边分离的最短能效路径。然后, LI-ASP策略根据业务速率比值对频谱分区, 采用首次命中(FF)和尾端命中(LF)联合频谱分配方式, 减少不同传输速率业务间的交叉相位调制。仿真结果表明, 该文所提LI-ASP策略在有效降低带宽阻塞率的同时, 减少了业务传输能耗。

**关键词:** 弹性光网络; 物理损伤感知; 负载均衡; 频谱分区; 能耗

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1202-08

DOI: 10.11999/JEIT180580

## Energy Efficiency Routing Strategy with Lightpath Impairment Awareness in Service-Oriented Elastic Optical Networks

LIU Huanlin<sup>①</sup> FANG Fei<sup>①</sup> HUANG Jun<sup>①</sup>  
CHEN Yong<sup>②</sup> XIANG Min<sup>②</sup> MA Yue<sup>③</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)

<sup>③</sup>(Information & Telecommunication Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** To address the problems of low spectrum utilization and high energy consumption caused by physical impairment in elastic optical networks, a service differentiated energy efficiency routing strategy with Link Impairment-Aware Spectrum Partition (LI-ASP) is proposed. For reducing the nonlinear impairment between different channels, a path weight formula jointly considering the link spectrum state and transmission impairment is designed to balance the load. A modulation level-layered auxiliary graph is constructed according to traffic's spectrum efficiency and maximum transmission distance. Starting from the highest modulation in the auxiliary graph, the  $K$  link-disjoined maximum weight paths are selected for high quality requests, and the  $K$  link-disjoined shortest energy efficiency paths are selected for low quality requests. Then, LI-ASP strategy divides spectrum partition according to requests rate ratio. The First-Fit (FF) and Last-Fit (LF) spectrum allocation policies are used to reduce cross-phase modulation between the requests with different rates. The simulation results show that the proposed LI-ASP strategy can reduce the bandwidth blocking probability and energy consumption effectively.

**Key words:** Elastic optical networks; Physical impairment-aware; Load balancing; Spectrum partition; Energy consumption

收稿日期: 2018-06-12; 改回日期: 2018-12-11; 网络出版: 2018-12-17

\*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家电网公司科技项目(52010118000Q)

Foundation Item: The Project of Science and Technology of State Grid Corporation of China (52010118000Q)

## 1 引言

急剧增长的多样化互联网服务和多媒体应用如高清电视、3D视频点播、云服务和大数据等使核心网带宽需求面临严重挑战<sup>[1]</sup>。传统波分复用网络采用固定波长带宽分配限制了带宽分配灵活性，形成带宽浪费。基于光正交频分复用技术的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)可根据业务大小灵活分配子载波数目，且高频谱效率调制方式的使用进一步提高了频谱利用率，成为极具潜力的下一代智能光网络<sup>[2,3]</sup>。

路由频谱分配(Routing and Spectrum Assignment, RSA)是影响弹性光网络性能的关键问题，同时业务从源节点到目的节点还会受到线性和非线性物理损伤的影响<sup>[4]</sup>。随着弹性光网络中业务多样化及设备器件增加，不同业务要求不同传输质量使弹性光网络物理损伤问题更加严重和复杂化，且业务传输路径上累积误码率将增加带宽阻塞率。另外，网络规模化进一步增加了网络设备的耗能，严重影响信息产业发展和运营<sup>[5]</sup>。因此，设计有效的损伤感知能效RSA算法对提升光网络性能十分必要。

文献<sup>[6]</sup>提出一种动态损伤感知路由算法，该算法通过设计链路权重公式引导业务选择消耗频隙(Frequency Spectrum, FS)数目最少的可用最高调制等级，降低带宽阻塞率。但是，该链路权重公式仅考虑频谱消耗情况，未考虑路径跳数影响，选择跳数长的路径会降低频谱利用率低；另外，文献<sup>[6]</sup>缺乏量化的物理损伤模型。文献<sup>[7]</sup>结合实际物理损伤模型，联合业务疏导和多路径传输技术提高频谱效率，但是，多路径传输导致业务在传输中使用更多的光器件和端口，增加了设备能耗。文献<sup>[8]</sup>考虑业务传输时放大器自发辐射和非线性噪声对信噪比的损伤，构建静态网络损伤模型，提出基于路径长度和业务请求带宽大小排序的整数线性规划和启发式RSA算法，减少消耗频隙数目。文献<sup>[9]</sup>通过在频谱分配时增加不同业务间的保护带宽最小化业务带宽阻塞率，但是只适用固定调制方式，易造成带宽资源浪费，频谱利用率低。

在EONs中，调制等级越高单位频隙传输数据

量越大，传输单位数据所需能耗就越少，频谱效率和能效大大提升。但高调制等级抗干扰能力差且传输距离更短。文献<sup>[10]</sup>解析了传输距离和传输速率关系。文献<sup>[2]</sup>设定不同调制方式下光路信噪比和路径建立信噪比阈值之间的差值，提出光路传输质量阻塞减少的 $K$ 最短路径(K-Shortest Path with Reduction of Quality of Transmission for Optical circuit, KSP-RQoTO)算法，算法选择具有最小差值的调制方式和路径组合，减少网络中其他业务对路径传输质量的影响，降低带宽阻塞率。但是，KSP-RQoTO忽略了不同速率业务间的交叉相位调制损伤影响。文献<sup>[11]</sup>分析混合速率弹性光网络下不同速率信号间的交叉相位调制损伤，提出分区拓扑损伤感知路由由频谱分配(Partition topology Plane Impairments aware Routing and Spectrum Assignment, PP-IRSA)算法。然而，PP-IRSA未考虑距离自适应的调制方式。文献<sup>[12]</sup>提出基于带宽压缩技术和业务分割技术的路由算法保证高质量业务传输阻塞率性能，但造成低质量业务阻塞率过高，且忽视了弹性光网络越来越严重的能耗问题。

针对EONs中物理损伤对业务传输质量和网络能耗的影响，本文以降低带宽阻塞率为首要目标，降低业务传输能耗为次要目标，提出了一种服务区分的链路损伤感知频谱分区(Link Impairment-Aware Spectrum Partition, LI-ASP)能效路由策略。通过构建基于调制等级的分层辅助图，从高调制等级开始，为高质量业务计算 $K$ 条满足跳数阈值的最大权重路径，为低质量业务计算 $K$ 条能耗最小路径。同时，根据业务大小以及传输路径相邻信道数目确定频谱分区和频谱分配方式，在业务传输中断时，重配置受影响业务。

## 2 EONs网络模型与优化目标分析

### 2.1 EONs物理损伤分析

如图1所示，EONs传输系统主要包括节点带宽可变转发器(Bandwidth-Variable Transponder, BVT)、带宽可变的光交叉连接器(Bandwidth-Variable Optical Cross Connect, BV-OXC)、光纤以及节点和线路中用来放大光信号的掺铒光纤放大

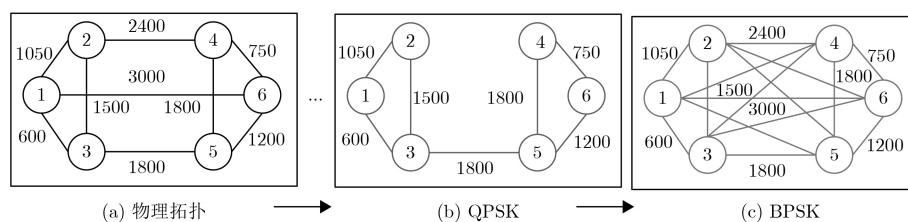


图1 调制等级分层辅助示意图

器(Erbium Doped optical Fiber Amplifier, EDFA)。

信号在光域中沿光路传输时物理损伤来自光器件和光纤链路,包括线性和非线性损伤。配置EDFA进行功率放大补偿以及使用色散补偿光纤,可降低线性损伤的影响。但是,EDFA在放大光信号时会产生和放大ASE噪声,限制信号传输距离,同时,业务传输时在光路上累积的非线性噪声也会降低光信噪比。因此,根据非线性损伤以及ASE噪声的高斯噪声模型<sup>[2,7]</sup>,业务 $r_i$ 在路径 $p_k$ 上传输时的信噪比如式(1)所示

$$\text{SNR}_{r_i}^k = \frac{G}{G_A + G_N} \quad (1)$$

式中, $G$ 表示信号功率谱密度, $G_A$ 表示放大器自发辐射噪声功率谱密度, $G_N$ 表示非线性损伤噪声功率谱密度。其中, $G_A$ 和 $G_N$ 分别可由式(2)和式(3)计算

$$G_A = \sum_{l \in r_k} N_l G_A^0 \quad (2)$$

式中, $N_l$ 为链路 $l$ 的光纤跨度数目, $G_A^0 = (e^{\alpha L} - 1) n_{sp} h \nu$ , $G_A^0$ 为单个跨度放大器自发辐射噪声功率谱密度, $\alpha$ 为功率衰减系数, $L$ 表示跨度长度, $n_{sp}$ 为粒子数反转参数, $h$ 为普朗克常量, $\nu$ 表示光载波频率。

$$G_N = \sum_{l \in p_k} N_l G_N^l \quad (3)$$

$$G_N^l = u \left( \ln(\rho B_i^2) + \sum_j \ln \frac{\Delta f_{ij} + B_j/2}{\Delta f_{ij} - B_j/2} \right),$$

$$\rho = (\pi^2 |\beta_2|) / \alpha,$$

$$u = (3\gamma^2 G^3) / (2\pi\alpha |\beta_2|) \quad (4)$$

式中, $G_N^l$ 表示单个跨度非线性损伤噪声功率谱密度,式(4)中 $B_i$ 和 $B_j$ 分别表示业务 $i$ 和 $j$ 请求的带宽, $\Delta f_{ij}$ 表示业务 $i$ 和 $j$ 中心频率间隔, $\beta_2$ 和 $\gamma$ 分别表示光纤色散系数和非线性系数。

## 2.2 EONs能耗分析

弹性光网络中主要的耗能器件为:BVT,BV-OXC和EDFA,业务传输能耗主要可分为与业务不相关

的固有能耗和与业务请求速率成比例的功率消耗<sup>[13]</sup>。如表1所示,不同调制方式的频谱效率不同,所消耗的业务速率相关能耗也不同。根据文献<sup>[14]</sup>能耗模型,BVT传输能耗为业务所需频隙数乘以对应调制方式下单子载波能耗与BVT固有能耗之和,即

$$P_{\text{BVT}} = P_{\text{BVT}}^0 + P_{\text{BVT}}^{r_i} \quad (5)$$

式中, $P_{\text{BVT}}^{r_i} = (\text{Sub}^m + F_G) \text{PC}_{\text{sub}}^m$ , $P_{\text{BVT}}^0$ 是转发器固有能耗为31.5 W<sup>[14]</sup>, $P_{\text{BVT}}^{r_i}$ 是业务速率相关能耗, $\text{Sub}^m$ 是调制方式为 $m$ 时业务请求的子载波数目, $F_G$ 是保护频隙数目, $\text{PC}_{\text{sub}}^m$ 是调制方式为 $m$ 时单个子载波的能耗功率。

带宽可变交叉连接器能耗与节点度数和业务所需的带宽大小相关,如式(7)所示

$$P_{\text{OXC}} = \sum_{i \in V} N_i (P_{\text{OXC}}^0 + P_{\text{OXC}}^{r_i}) \quad (6)$$

式中, $P_{\text{OXC}}^{r_i} = [(\text{Sub}^m + F_G) / \text{FS}_{\text{total}}] \cdot n_i \cdot 85$ , $V$ 为网络节点集,若光路经过节点 $i$ ,则 $N_i$ 为1,否则为0。 $P_{\text{OXC}}^0$ 是OXC固有能耗为150 W<sup>[15]</sup>, $P_{\text{OXC}}^{r_i}$ 是业务相关能耗, $\text{FS}_{\text{total}}$ 为一条光纤链路总频隙数, $n_i$ 为节点 $i$ 度数。

EDFA每隔80 km放置一个<sup>[5]</sup>,放大器的能耗主要取决于业务 $r_i$ 经过的路径长度 $d_{r_i}$ ,如式(7)所示

$$P_{\text{OA}} = P_{\text{OA}}^0 \left( \left\lceil \frac{d_{r_i}}{80} \right\rceil + 1 \right) \quad (7)$$

在有限资源并考虑物理损伤的大规模EONs中,最小化业务阻塞率的RSA算法被证明是NP(Non-deterministic Polynomial)难问题。为此,本文研究LI-ASP能效路由策略启发式算法。

## 3 LI-ASP的能效路由策略

LI-ASP策略首先按调制等级构建降序分层辅助拓扑图,先为高质量业务计算各分层图的最短路径数目,考虑路径上连续空闲频隙的数目和路径的跳数设计路径权重公式选路,基于负载均衡思想降低路径传输物理损伤。后为低质量业务选择最短路径,减少光器件和端口的使用,降低网络传输能耗。频谱分配阶段,考虑高传输速率和低传输速率业务间的交叉相位调制损伤,采用频谱分区传输不

表1 不同调制方式下子载波传输速率、能耗、最大传输距离及信噪比阈值

调制方式	调制等级 $m$	传输速率(Gb/s)	能耗功率(W)	最大传输距离(km)	信噪比阈值(dB)
BPSK	1	12.5	112.374	4000	6.8
QPSK	2	25.0	133.416	2000	9.8
8QAM	3	37.5	154.457	1000	13.7
16QAM	4	50.0	175.489	500	16.5
32QAM	5	62.5	196.539	250	19.7

同速率的业务,根据业务传输速率和路径上相邻信道数目,选择FF和LF频谱分配方式,进一步降低物理损伤的影响。若当前业务传输路径造成网络中其他业务因物理损伤而阻塞,重配置受到影响的业务,降低网络阻塞率。

### 3.1 调制等级分层辅助图

为了提高频谱效率和网络能效,本文基于调制等级传输距离限制构建分层辅助图。如图1所示,首先基于物理拓扑各节点链路间的距离,从最高调制等级开始,计算各节点对间的最短路径长度,若节点间最短路径长度满足表1所示调制等级的传输距离限制,则在相应节点间添加链路,否则删除相应链路;然后从最高调制等级辅助图开始,选择满足表1调制方式传输信噪比阈值的路由。当前路径不满足传输时,选择下一条最短路径,删除当前辅助图,构造新的辅助图。如图1(b)所示,链路2-4,1-6长度分别为2400 km和3000 km,不满足QPSK传输距离限制的2000 km约束,在拓扑上删除两条链路,如图1(c)所示,节点1到节点4的最短路径(1-2-4)长度为3450 km,满足BPSK传输距离的4000 km约束,添加链路1-4。

### 3.2 高质量业务路径权重计算

高质量业务对误比特率容忍度低,更易受到物理损伤影响而导致业务阻塞。本文基于负载均衡思想为高质量业务选择路径损耗较低的路径权重值小的光路。为降低传输路径上累积的物理损伤,路径权重公式优先考虑经过最短路径数目较小的路径,以降低不同业务之间产生的串扰和非线性损伤。同时,基于负载均衡的选路方式可有效降低瓶颈链路的发生,选择路径跳数少的路由可以降低频谱消耗和随路径跳数增加累积的物理损伤。因此,基于负载均衡思想设计的路径权重公式如式(8)所示

$$W_{p_k} = \frac{N_{A_k}}{\sum_{l \in p_k} (d_l^n / N) + \text{hop}_{p_k}} \quad (8)$$

式中,  $N_{A_k}$  为路径  $p_k$  上连续空闲频隙的数目,  $d_l^n$  表示经过链路  $l$  的最短路径数目,  $N$  表示网络拓扑中节点的数目,  $\text{hop}_{p_k}$  表示路径  $p_k$  的跳数。

### 3.3 物理损伤致业务阻塞的重配置机制

针对当前业务传输路由因加重网络中正在传输其他业务的物理损伤,导致业务中断的问题,本文提出一种物理损伤致业务阻塞的重配置机制。当业务成功进行路由频谱分配后,根据物理损伤模型计算出当前业务的物理损伤。同时,统计网络中是否有其他业务因物理损伤加剧而阻塞。若有,将被阻塞业务存放到集合BT中,使用LI-ASP策略为集合BT中的业务重新RSA,降低带宽阻塞率。

### 3.4 LI-ASP能效路由策略步骤

LI-ASP能效路由策略步骤如表2所示。

## 4 仿真性能与分析

### 4.1 仿真环境及评价指标

为了验证本文提出的LI-ASP能效路由策略性能,对比KSP-FF算法、PP-IRSA算法<sup>[1]</sup>和KSP-RQoTO算法<sup>[2]</sup>,仿真性能指标为带宽阻塞率、频谱利用率和节能率。其中,节能率为对比算法PP-IRSA, KSP-RQoTO和本文策略相比于调制等级自适应的KSP-FF算法节约的能耗比率。所有算法在如图2所示的3个网络中进行仿真验证。图2中每条光纤链路有360个频隙,  $1 \text{ FS} = 12.5 \text{ GHz}$ , 保护频隙  $F_G=1$ , 候选路径  $K=3$ 。业务数目为  $10^6$  个, 3种业务请求频隙带宽分别为4 FS, 8 FS, 16 FS, 业务数目比例为4:3:2, 按泊松分布到达。采用调制方式如表1所示, 最高调制等级  $M=5$ 。其中, 物理损伤参数设置如表3所示,  $\text{BER}_t^h$  和  $\text{BER}_t^l$  分别是高质量业务和低质量业务传输误码率阈值, 2类业务的业务量比例为1:1。

### 4.2 仿真结果分析

如图3所示, 仿真了不同业务负载下各算法的带宽阻塞率性能, 带宽阻塞率随业务负载的增加而增加。相比于USNET网络, NSFNET和DT网络平均节点度数更低, 网络连通度更差, 所以相同负载下更易发生阻塞, 带宽阻塞率较高。本文所提LI-ASP策略具有最优的带宽阻塞率性能, 其中LI-ASP-N为不考虑物理损伤时本文提出的LI-ASP路由策略, 获得最低的带宽阻塞率, 考虑物理损伤时本文所提路由策略LI-ASP获得了次低的带宽阻塞率。主要是由于高质量业务在选择路由时, LI-ASP综合考虑路径上频谱资源使用情况与全网链路承载业务情况, 基于负载均衡思想降低了传输物理损伤和带宽阻塞率。在频谱分配阶段, LI-ASP采用频谱分区思想, 降低不同速率业务间的交叉相位调制和不同信道之间的串扰。而重配置机制避免了业务传输引起网络中已有业务中断导致网络性能恶化的情况, 保证高负载时的带宽阻塞率性能。

图4显示了4种算法在3种网络场景下不同业务负载时的高质量业务带宽阻塞率性能对比, 由图4可看出本文所提LI-ASP策略在2种场景下具有明显的带宽阻塞率性能优势。主要是因为, LI-ASP策略针对高质量业务具有更高的信噪比阈值要求的情况, 设计了考虑链路频谱资源和网络拓扑损伤的路径权重公式, 降低业务经过瓶颈链路的概率, 减少了业务传输时的物理损伤, 同时考虑了路径跳数对带宽阻塞率的影响, 避免负载均衡时路径过长, 消

表2 LI-ASP能效路由策略步骤

**输入** 光网络拓扑  $G(V, E, S)$ , 节点集  $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, |V|\}$ , 链路集  $E = \{e_{ij} | i, j \in V, i \neq j\}$ , 链路频隙集  $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, |S|\}$ , 业务集  $R = \{r_i | i = 1, 2, \dots, |R|\}$  表示, 令  $k = 1, m = M$ , 业务请求  $r_i(s, d, fs\_n, Q)$ ,  $s$  为源节点,  $d$  为目的节点,  $fs\_n$  为业务请求频隙数目,  $Q=1$  表示高质量业务;  $Q=0$  为低质量业务。使用Dijkstra算法计算所有源目的节点间的  $K$  条最短路径KSP集合(预处理),  $M$  层调制等级辅助图(预处理)。

**输出** 业务  $r_i$  的传输路径  $p_k$  和分配的第1个、最后频隙索引值  $f_{ts}$  和  $f_{te}$ 。

步骤1 业务  $r_i(s, d, fs\_n, Q)$  到达, 从频谱效率最高调制等级  $m=M$  分层辅助图开始为业务选择传输路径;

步骤2 判断  $Q$  是否为1, 若为1, 为高质量业务, 算法转步骤3; 否则, 为低质量业务, 转算法步骤4;

步骤3 根据式(8)计算源和目的节点间  $K$  条满足跳数阈值Hop的最大权重路径  $P^H\{p_1, p_2, \dots, p_K\}$ , 转步骤5;

步骤4 根据业务源节点和目的节点选择存放在KSP中的  $K$  条最短路径, 根据能耗模型计算路径能耗, 按照能耗大小升序排列  $K$  条路径  $P^L\{p_1, p_2, \dots, p_K\}$ ;

步骤5 计算当前调制等级下业务  $r_i$  传输所需的频隙数目, 从路径集合中选择第  $p_k$  条路径,  $k = 1, 2, \dots, K$ , 计算该路径上可用频谱块  $\mathbf{Block}\{b_1, b_2, \dots, b_j\}$ , 若可用频谱块集合非空, 转算法步骤8; 否则转算法步骤6;

步骤6 若  $m < 1$ , 当前传输路径无可用调制方式, 转步骤7; 否则降低调制等级,  $m = m - 1$ , 转步骤2;

步骤7 若  $k > K$ , 业务  $r_i$  被阻塞, 释放网络中已传输业务占用的频谱资源, 更新光网络  $G$  的频谱资源; 否则,  $k = k + 1, m = M$ , 转算法步骤5;

步骤8 根据业务请求频隙数目  $fs\_n$ , 分别计算采用FF和LF频谱分区分配策略需要占用候选路径上各链路相邻信道数目和的值, 选择占用相邻信道数目和值较小的FF或LF频谱分配方式;

步骤9 根据物理损伤模型计算该路径上业务的传输误比特率  $BER_{r_i}^k$ , 若  $BER_{r_i}^k$  小于业务误码率阈值, 转算法步骤10; 否则,  $m = m - 1$ , 转算法步骤5;

步骤10 判断传输路径  $p_k$  是否造成网络中其他正传输业务阻塞, 若是, 记录阻塞的业务  $\mathbf{BT}\{rb_1, rb_2, \dots, rb_i\}$ , 调用LI-ASP能效路由策略重配置被阻塞的业务  $\mathbf{BT}\{rb_1, rb_2, \dots, rb_i\}$ ; 否则, 转算法步骤12;

步骤11 若业务重配置成功, 转算法步骤12; 否则,  $m = m - 1$ , 转算法步骤5;

步骤12 业务  $r_i$  成功传输, 记录传输路径  $p_k$ , 记录分配的第1个频隙索引值  $f_{ts}$  和最后频隙索引值  $f_{te}$ 。

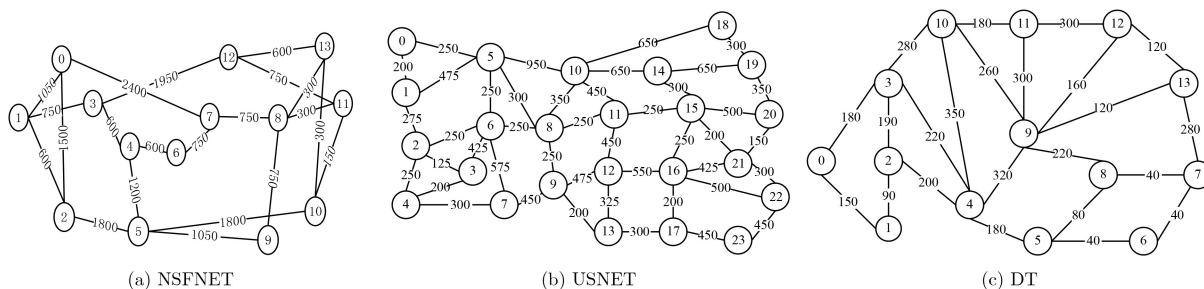


图2 仿真网络拓扑

表3 物理损伤参数设置

参数	值	参数	值
$G(\text{W/THz})$	0.015	$L(\text{km})$	80
$\alpha(\text{dB/km})$	0.22	$v(\text{THz})$	193
$n_{sp}$	1.8	$\beta_2(\text{ps}^2/\text{km})$	-21.7
$h(\text{J/s})$	$6.626 \times 10^{-34}$	$\gamma(\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$	1.32
$BER_t^h$	$10^{-12}$	$BER_t^l$	$10^{-9}$

耗更多的频谱资源。频谱分配阶段考虑采用经过相邻信道数目少的频谱分配方式, 进一步降低不同信道间串扰, 增加高质量业务成功传输的概率。

图5仿真了4种算法在2种网络场景下的不同业务负载时的低质量业务带宽阻塞率性能对比, 本文所提路由策略性能优于KSP-FF算法。而对比算法KSP-RQoTO和PP-IRSA由于未考虑服务区分, 低

质量业务带宽阻塞率性能优于本文路由策略, 但是高质量业务的带宽阻塞率性能明显劣于本文所提的LI-ASP策略。同时, 本文所提的LI-ASP策略具有最优的整体带宽阻塞率性能。

如图6所示, 显示了4种算法在3种不同网络场景下不同业务负载时的频谱利用率性能对比情况。由图可知, 本文所提的LI-ASP策略在3种网络拓扑下都获得了最高的频谱利用率, 对比算法KSP-RQoTO获得了次优的频谱利用率性能。这是因为, 本文所提策略LI-ASP构建了调制等级分层辅助图, 基于辅助图优先选择频谱效率高的调制等级。选路阶段, 为高质量业务选择路径跳数少和连续空闲频隙较多的光路, 为低质量业务选择最短能效路由, 节约了频谱使用, 提高了频谱利用率。频谱分配阶段, 引入频谱分区方法降低频谱碎片化程

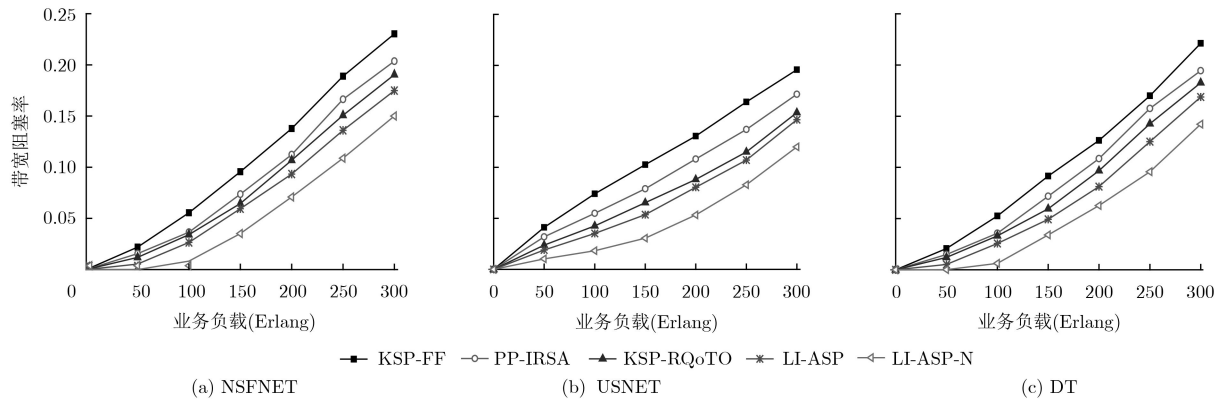


图 3 不同业务负载下各算法带宽阻塞率的对比

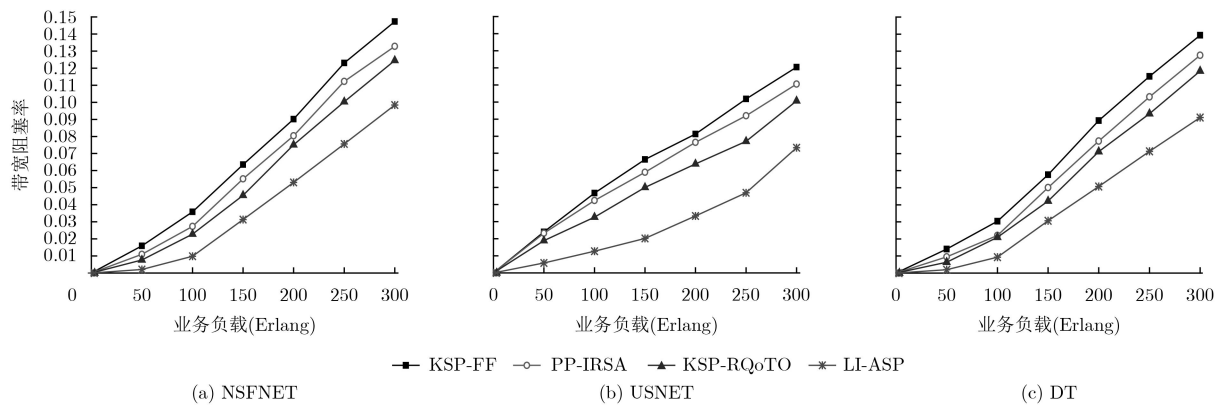


图 4 4种算法在不同业务负载下高质量业务带宽阻塞率的对比

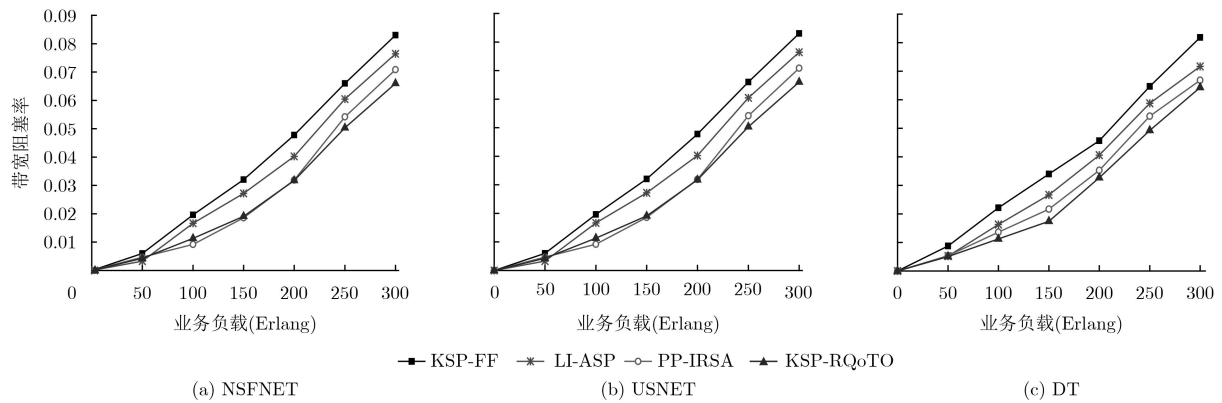


图 5 4种算法在不同业务负载下低质量业务带宽阻塞率的对比

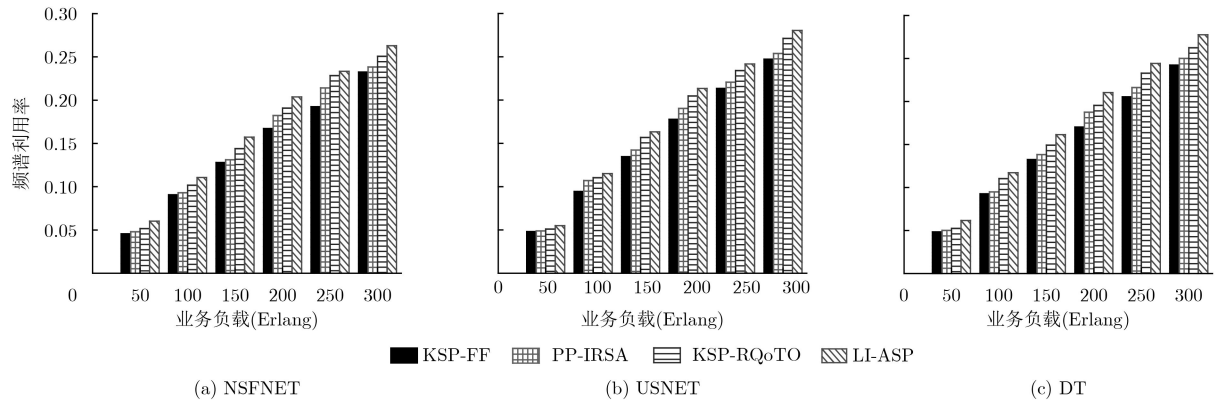


图 6 4种算法在不同业务负载下频谱利用率的对比

度, 结合FF和LF的频谱分配方式, 提高业务成功传输的概率。相比于对比算法, 本文所提LI-ASP策略为高质量业务设计降低损伤的路径权重公式, 频谱分配时考虑相邻信道的影响, 降低了业务因物理损伤而无法使用的频隙数目, 同时重配置机制的引入进一步提高了频谱利用率。

图7显示了3种算法在3种网络场景下不同业务负载时相比于KSP-FF算法节约的能量比率变化情况。可以看出, 随着业务负载增加, 3种算法的节能率都有所提升。相比于NSFNET和DT网络, USNET网络整体节能率更高, 主要是因为USNET网络链路数目较多, 节点间距离相对较短, 使用高调制等级概率增加, 平均消耗的转发器和放大

器能耗降低, 节约能耗更多。相同业务负载时, KSP-RQoTO算法相比于PP-IRSA算法具有更高的节能率, 这是由于KSP-RQoTO算法考虑调制等级对传输中物理损伤的影响, 选择满足损伤约束的最高调制等级, 降低了转发器的能耗。而本文所提LI-ASP路由策略在2种网络场景下都具有最好的节能率性能。这是因为LI-ASP策略不仅为低质量业务计算最短能效路径节约能耗, 同时构建调制等级辅助图, 为高质量业务选择跳数少、信道数目少的路由, 减少耗能器件的使用。同时, 非线性物理损伤降低, 提高了业务传输信噪比, 高频谱效率调制等级使用概率增加, 因此能效得到提升。

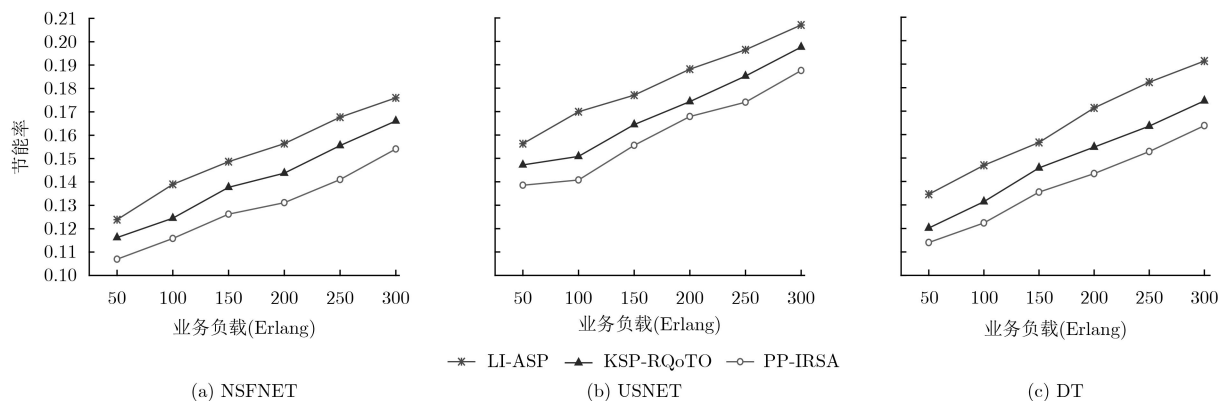


图7 3种算法在不同业务负载下节能率的对比

## 5 结束语

本文针对当前损伤感知路由算法考虑损伤因素单一、频谱利用率低以及忽视网络能耗等问题, 提出了服务区分LI-ASP能效路由策略降低业务带宽阻塞率和网络能耗。为高质量业务设计了综合考虑频谱消耗和物理损伤的路径权重公式, 在构建的频谱效率调制等级辅助图上为高质量业务选择高质量传输路径, 为低质量业务选择能效路由。在频谱分配时, 考虑频谱分区和相邻信道数目对物理损伤的影响, 结合FF和LF频谱分配方式降低交叉相位调制的影响, 同时重配置机制的引入避免了网络性能出现恶化。随着万物互联、大数据和云计算等的不断发展, 光网络设备和服务越来越复杂化多样化, 本文的研究结论对降低业务经过光网络设备的物理损伤和网络能耗, 提高频谱利用率和带宽阻塞率性能具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 熊余, 刘川波, 孙鹏. 考虑业务服务质量的光线路终端节能算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2017, 29(2): 208–215. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.011.
- [2] 刘焕淋, 熊翠连, 陈勇. 频谱效率优先的任播路由冲突感知的弹性光网络资源重配置[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1697–1703. doi: 10.11999/JEIT161093.
- [3] LIU Huanlin, XIONG Cuilian, and CHEN Yong. Collision-aware reconfiguration resource based on spectrum efficiency first for anycast routing in elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1697–1703. doi: 10.11999/JEIT161093.
- [4] LIU Huanlin, LÜ Lei, CHEN Yong, et al. Fragmentation-avoiding spectrum assignment strategy based on spectrum partition for elastic optical networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1–13. doi: 10.1109/JPHOT.2017.2739750.
- [5] XIONG Yu, LIU Chuanbo, and SUN Peng. Energy saving algorithm for optical line terminal considering quality of service[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 29(2): 208–215. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.011.
- [6] 鲍宁海, 刘翔, 张治中, 等. WDM节能光网络中的抗毁保护算法研究[J]. 重庆邮电大学学报, 2012, 24(3): 278–282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.03.002.
- [7] BAO Ninghai, LIU Xiang, ZHANG Zhizhong, et al. Survival

- protection algorithm in WDM energy-efficient optical network[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 24(3): 278–282. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2015.03.002](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2015.03.002).
- [5] TAN Yanxia, GU Rentao, and JI Yuefeng. Energy-efficient routing, modulation and spectrum allocation in elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36(2017): 297–305. doi: [10.1016/j.yofte.2017.05.001](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.05.001).
- [6] YANG Song and KUIPERS F. Impairment-aware routing in translucent spectrum-sliced elastic optical path networks[C]. European Conference on Networks and Optical Communications, Vilanova, Spain, 2012: 1–6. doi: [10.1109/NOC.2012.6249946](https://doi.org/10.1109/NOC.2012.6249946).
- [7] AGRELL E, ZHAO Juzi, LI Yan, *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. doi: [10.1364/JOCN.8.000058](https://doi.org/10.1364/JOCN.8.000058).
- [8] ZHAO Juzi, WYMEERSCH H, and AGRELL E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(22): 4554–4564. doi: [10.1109/JLT.2015.2474130](https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2474130).
- [9] REN Rongrong, HOU Weigang, GUO Lei, *et al.* Spectrum and energy-efficient survivable routing algorithm in elastic optical network[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(20): 8795–8806. doi: [10.1016/j.ijleo.2016.06.088](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.088).
- [10] KLEKAMP A, DISCHLER R, and BUCHALI F. Transmission reach of optical-OFDM superchannels with 10-600 Gb/s for transparent bit-rate adaptive networks[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, Geneva, Switzerland, 2011: 1–3. doi: [10.1364/ECOC.2011.Tu.3.K.2](https://doi.org/10.1364/ECOC.2011.Tu.3.K.2).
- [11] ZHAO Jijun, WANG Wenyan, LI Wei, *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): 1–8. doi: [10.1007/s11107-015-0601-4](https://doi.org/10.1007/s11107-015-0601-4).
- [12] ABKENAR F S, RAHBAR A G, EBRAHIMZADEH A. Providing Quality of Service (QoS) for data traffic in Elastic Optical Networks (EONs)[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41(3): 1–10. doi: [10.1007/s13369-015-1886-4](https://doi.org/10.1007/s13369-015-1886-4).
- [13] GUO Lei, WU Ying, HOU Weigang, *et al.* Green grooming in spectrum-sliced elastic optical path networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 32(1): 115–125. doi: [10.1007/s11107-015-0580-5](https://doi.org/10.1007/s11107-015-0580-5).
- [14] LIU Huanlin, ZHOU Bangtao, and CHEN Yong. Spectrum allocation based on spectrum integration and re-routing for elastic optical networks[J]. *IET Optoelectronics*, 2016, 10(5): 179–183. doi: [10.1049/iet-opt.2015.0136](https://doi.org/10.1049/iet-opt.2015.0136).
- [15] TANAKA T, INUI T, KADOHATA A, *et al.* Multiperiod IP-over-elastic network reconfiguration with adaptive bandwidth resizing and modulation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(7): A180–A190. doi: [10.1364/JOCN.8.00A180](https://doi.org/10.1364/JOCN.8.00A180).
- 刘焕淋：女，1970年生，教授，研究方向为光通信技术与未来网络。  
方菲：女，1995年生，硕士生，研究方向为光网络能效节点与调度算法。  
黄俊：男，1992年生，硕士生，研究方向为光网络QoS保证与节能。  
陈勇：男，1963年生，教授，研究方向为光通信技术、传感检测与自动化技术。  
向敏：男，1974年生，教授，研究方向为智能电网，工业物联网。  
马跃：男，1977年生，高级工程师，研究方向为电力通信。