

弹性光网络中时延感知的降级恢复路由与频谱分配算法

于存谦 张 黎 何荣希* 李靖宇

(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

摘 要: 移动云计算、人工智能(AI)、5G等新兴技术应用促使弹性光网络(EON)在骨干传输网中发挥更重要的角色, 降级服务(DS)技术为降低EON的业务阻塞率、提高频谱利用率提供了新途径。该文首先对现有DS算法的资源分配不公、忽略低等级业务的体验质量(QoE)等问题, 建立了以最小化降级频次、降级等级与传输时延损失(TDL)为联合优化目标的混合整数线性规划(MILP)模型, 并提出一种时延感知的降级恢复路由与频谱分配(DDR-RSA)算法。为提高降级业务的QoE和运营商收益, 在算法的最优DS窗口选择阶段中融入降级恢复策略, 在保障传输数据量不变的前提下, 将降级业务向空闲频域复原, 从而提高频谱效率、减小降级业务TDL和最大化网络收益。最后, 通过仿真证明了所提算法在业务阻塞率、网络收益和降级业务成功率等方面的优势。

关键词: 弹性光网络; 路由与频谱分配; 降级服务; 区分服务; 降级恢复

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)10-2420-09

DOI: [10.11999/JEIT190759](https://doi.org/10.11999/JEIT190759)

Delay-aware Degradation-recovery Routing and Spectrum Allocation Algorithm in Elastic Optical Networks

YU Cunqian ZHANG Li HE Rongxi LI Jingyu

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Emerging technology applications such as mobile cloud computing, Artificial Intelligence (AI) and 5G promote Elastic Optical Network (EON) to play an important role in the backbone transmission network. Degraded Service (DS) technology can provide a new way to reduce traffic congestion and improve spectrum utilization in EON. Firstly, considering the problems of unfair resource allocation and neglecting the Quality of Experience (QoE) of low-priority services in existing DS algorithms, a Mixed Integer Linear Program (MILP) model with the joint objective of minimizing downgrade frequency, downgrade level and Transmission Delay Loss (TDL) is established. A Delay-aware Degradation-Recovery Routing and Spectrum Assignment (DDR-RSA) algorithm for degraded recovery is proposed. In order to improve the QoE of downgraded services and the revenue of operators, the strategy of degradation recovery is integrated in the optimal DS-window selection phase of the algorithm. Under the premise of guaranteeing the transmission data quantity unchanged, the degradable services are restored to the free spectrum domain, so as to increase the spectrum efficiency, reduce degraded service TDL and maximize revenue. Finally, the simulation results testify that the proposed algorithm has advantages in terms of traffic congestion, revenue and degraded service success-rate.

Key words: Elastic Optical Network (EON); Routing and Spectrum Assignment (RSA); Degraded-Service (DS); Differentiated service; Degradation recovery

收稿日期: 2019-09-13; 改回日期: 2020-06-15; 网络出版: 2020-07-17

*通信作者: 何荣希 hrx@dlmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61371091, 61801074), 中国博士后科学面上基金(2019M661074), 辽宁省自然科学基金(2019-BS-021), 中央高校基本科研业务费(3132020205, 3132019221)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61371091, 61801074), Chian General Fundation for Postdoctoral Science (2019M661074), The Natural Science Foundation of Liaoning Province (2019-BS-021), The Fundamental Research Funds for The Central Universities (3132020205, 3132019221)

1 引言

移动云计算、人工智能应用、5G移动通信等新兴技术和业务的大容量、低延迟、高质量服务的数据传输需求愈加依赖具有丰富频谱资源的弹性光网络(Elastic Optical Network, EON)^[1-3]。而降级服务(Degraded-Service, DS)技术在骨干EON中的应用无疑为降低业务阻塞提供了新途径^[4-9]。DS技术通过减小指定业务的资源分配量,使其在较低但可接受的体验质量(Quality of Experience, QoE)下保持运行,同时兼顾整体网络的服务质量(Quantity of Service, QoS)水平^[8-12]。文献[8]针对EON中资源短缺问题提出了区分业务的DS算法,该算法根据业务对QoS需求的多样性将业务按优先级区分处理,通过减少低等级业务占用的频谱来接纳高等级业务。文献[9]针对EON业务降级不均衡问题提出了均衡DS算法,通过建立QoS模型选择降级级别,根据漏桶准则判决降级容量,保障高等级业务的频谱资源和较低的阻塞率。

以上文献通过减少低等级业务占用的频谱来降低高等级业务的阻塞率,保障了高等级业务的QoS,但忽略了DS对低等级业务的不利影响。为缓解网络资源分配不公平性、维持用户忠诚度,文献[13]采取了服务费率与业务降级损失负相关的策略,动态调节服务费率,既对运营商采取DS机制进行“惩罚”,又达到了对降级用户补偿的目的。但若保障业务的传输数据量不变,低等级业务带宽容量的减少势必延长业务传输时间,严重影响用户的QoE^[14,15]。因此,在服务费率与业务降级损失的权衡中,可按照传输时延损失(Transmission Delay Loss, TDL)的不同,动态调整服务费率。

可以通过补偿降级损失来提高降级用户的黏性,使网络性能处于可接受水平,减少DS操作对降级业务带来的传输时延影响,同时尽量容纳更多、更高等级的业务^[5,6]。降级恢复(Degradation Recovery, DR)技术在保障可降级业务传输数据量不变的前提下,利用空闲频域恢复其为高等级业务舍弃的频谱份额。该技术既可降低阻塞率,又可缓解DS使降级业务增大的传输时延,使业务间的资源分配与收益处于动态均衡状态。为此,针对已有DS算法出现的资源分配不公、忽略低等级业务QoE等问题,本文首次建立了以最小化降级频次、降级等级以及TDL为联合优化目标的路由与频谱分配(Routing and Spectrum Allocation, RSA)问题的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Program, MILP)模型。该模型考虑网络资源分配与网

络收益间的联动关系抽象出支持DR, DS的RSA问题。

随后,本文提出了时延感知的降级恢复RSA(Delay-aware Degradation-Recovery Routing and Spectrum Allocation, DDR-RSA)算法。该算法根据业务的差异化需求,对不同等级业务区分处理,设计了区分业务等级的DS损失函数和DS窗口选择策略,从而选择出TDL最小、等级最低、跳数最少的降级业务,以最小化DS损失及间接影响。同时,为解决DS带来的资源分配不公并保障网络收益,设计了考虑资源分配与收益均衡关系的网络收益函数,调低降级用户的服务费率,维持用户黏性。此外,为提高降级业务的QoE,在为高等级业务选择最优DS窗口的阶段融合了DR策略,将可降级业务向空闲频域恢复,在保障传输数据量不变的前提下,减小降级业务的TDL。最后,对算法性能进行了仿真验证。

2 基于区分降级服务和降级恢复的RSA问题建模

EON表示为 $G(N, E, C)$, N 为节点集, E 为双向光纤链路集, C 为每条链路的频谱槽集, 频谱槽数为 $|C|$ 。业务请求为 $r(s_r, d_r, b_r, t_r^{\text{arr}}, t_r^{\text{end}}, o_r, \bar{\alpha}_r) \in \psi$, 其中 $s_r, d_r \in N$ 为 r 的源、目的节点, b_r 为初始请求带宽, $t_r^{\text{arr}}/t_r^{\text{end}}$ 为 r 到达/离开时间, 单位为时隙, r 的持续时间 $H_r = t_r^{\text{end}} - t_r^{\text{arr}}$; r 数据量为 $\theta_r = H_r \times b_r$; o_r 为优先级; $\bar{\alpha}_r$ 为 r 可接受的最大时延, 即降级上限; $\psi = \{r_1, r_2, \dots, r_{|\psi|}\}$ 为业务空间。必要变量及定义见表1。

在最大化频谱资源利用率的同时, 采用DS策略尽可能多接纳高等级业务, 并通过DR策略减少DS对被降级业务带来的TDL $A_{r'}$, 以提高网络收益。因此, 将最小化DS发生频次与等级、被降级业务TDL作为联合优化目标, 即目标函数式(1)。第1部分为最小化降级业务数量, 第2部分为最小化降级业务等级, 并尽量容纳更高等级业务, 第3部分为最小化降级业务TDL

$$\sum_{r \in \psi} \delta_r + \sum_{r \in \psi} \left[\prod_{e(u,v) \in E} f_{u,v}^r \cdot (\bar{\omega} - o_r) \right] + \sum_{r \in \psi} (t_r^{\text{end}'} - t_r^{\text{end}}) \quad (1)$$

(1) RSA限制条件: 式(2)和式(3)为流守恒和无环路条件。式(4)保证业务的频谱需求不大于链路频谱槽容量。 w_r 可统一 r 在多条链路上的起始频谱槽序号, 保障频谱一致性。通过式(6)中 $w_{r_i} + b_{r_i}$ 项保障频谱连续性原则。当多个业务共享

表 1 RSA问题符号定义

变量	定义内容
$\bar{\omega}$	正整数, ψ 中的业务优先级上界;
w_r	正整数, r 所在的起始频谱槽序号;
$f_{u,v}^r$	二值变量, 若 r 经过光纤链路 $e(u, v) \in E$, 则 $f_{u,v}^r = 1$; 否则 $f_{u,v}^r = 0$;
$\rho_{i,j}$	二值变量, 若 r_i 和 r_j 经过同一段光纤链路, 且 w_i 比 w_j 小, 则 $\rho_{i,j} = 1$; 否则 $\rho_{i,j} = 0$;
$\xi_{s,u}^r$	二值变量, 若 r 的源节点为 $u \in N$, 则 $\xi_{s,u}^r = 1$; 否则, $\xi_{s,u}^r = 0$;
$\xi_{d,v}^r$	二值变量, 若 r 的目的节点为 $v \in N$, 则 $\xi_{d,v}^r = 1$; 否则, $\xi_{d,v}^r = 0$;
δ_r	二值变量, 若 r 降级, 则 $\delta_r = 1$; 否则, $\delta_r = 0$;
χ_r	正整数, r 释放的频谱槽数;
β_r	正整数, r 恢复的频谱槽数;
$v_r z_r$	正整数, DR后 r 首/尾频谱槽序号;
q_k^e	正实数, 第 k 个频谱槽可被 r 用来DR的起始时间;
$t_r^{\text{end}'}$	正实数, r 被降级后的离开时间。

同一链路时, 式(5)—式(7)不但可以识别出它们的频谱槽次序, 也可保证彼此频谱互不重叠

$$\sum_{e(u,v) \in E} f_{u,v}^r - \sum_{e(v,u) \in E} f_{v,u}^r = \xi_{s,u}^r - \xi_{d,u}^r, \quad \forall r \in \psi, \forall u \in N \quad (2)$$

$$\sum_{r \in \psi} (f_{u,v}^r + f_{v,u}^r) \leq 1, \forall e(u, v) \in E \quad (3)$$

$$w_r + b_r \leq |C| + 1, \forall r \in \psi \quad (4)$$

$$\rho_{i,j} + \rho_{j,i} = 1, \forall i, j \quad (5)$$

$$\rho_{i,j} \cdot (f_{u,v}^{r_j} + f_{v,u}^{r_j}) \cdot (f_{u,v}^{r_i} + f_{v,u}^{r_i}) \cdot [w_{r_i} + b_{r_i}] \leq w_{r_j} \forall e(u, v) \in E, \forall r_i, r_j \in \psi \quad (6)$$

$$[w_{r_j} - w_{r_i}] \cdot \rho_{i,j} \geq 0, \forall r_i, r_j \in \psi \quad (7)$$

(2)DS限制条件: 当多个业务共享同一光纤链路时, 式(8)在识别出业务等级 o_r 的前提下, 优先降级低等级业务。式(9)实现了在判定业务是否被降级的情况下, 保证其所承载的所有业务的频谱需求之和不大于该光纤链路的容量。其中 $b_r = (\chi_r - \beta_r) \cdot \delta_r$ 计算业务被降级后的频谱槽数。式(10)保证了业务被降级后的离开时间不大于其所能承受的最大传输时延

$$f_{u,v}^{r_i} \cdot o_{r_i} \geq f_{u,v}^{r_j} \cdot o_{r_j} \cdot \delta_{r_j}, \forall r_i, r_j \in \psi, \forall e(u, v) \in E \quad (8)$$

$$\sum_{r \in \psi} \{f_{u,v}^r \cdot [b_r - (\chi_r - \beta_r) \cdot \delta_r]\} \leq |C|, \forall e(u, v) \in E \quad (9)$$

$$t_r^{\text{end}'} \leq \bar{\alpha}_r, \forall r \in \psi \quad (10)$$

(3)DR限制条件: 当对可降级 r 采取DR时, 式(11)使业务恢复的频谱槽数量不大于释放的频谱槽数量。式(12)可保障 r 恢复前后的传输数据量不变, 并统一业务离开时间。式(12)和式(13)保证了

业务在频谱恢复过程中每个时隙内频谱连续性约束条件。由于式(1)、式(9)、式(10)—式(13)有实数变量, 故上述问题属于MILP问题; 同时存在着(0,1)变量与其他变量相乘的情况, 构成(0,1)规划与MILP耦合, 且DS和DR在逻辑和时序上有先后次序(可视为2个子过程), 故该完整问题属于非确定性多项式(Non-deterministic Polynomial Hard, NP-Hard)问题^[16], 为此本文提出一种启发式算法

$$f_{u,v}^r \cdot \beta_r \leq f_{u,v}^r \cdot \chi_r, \forall r \in \psi, \forall e(u, v) \in r \quad (11)$$

$$f_{u,v}^r \cdot \sum_k (t_r^{\text{end}'} - q_k^s) = \theta_r, \forall e(u, v) \in r, k \in [v_r, z_r], r \in \psi \quad (12)$$

$$q_{k+1}^s \geq q_k^s, k \in [v_r, z_r) \quad (13)$$

3 启发式算法

3.1 算法解析

本文提出了时延感知的降级恢复RSA算法(DDR-RSA)。该算法先从备选路径中选出跳数少、频谱槽序号小的连续频段落作为DS备选窗口。基于DS业务损失的计算, 比较不同频谱段的业务损失和, 选出DS业务损失最小的频段作为最优DS频谱窗口(Optimal Spectrum Window, OSW)。DR策略则在保障降级业务数据量不变的前提下, 利用空闲频域恢复其先前为高等级业务压缩掉的频谱需求。在表1基础上, 本节添加其他必要变量, 详见表2。

(1) OSW的选取: 在选出的 k 条最短路径中, 式(14)记录链路的频谱占用情况, 其中 T 和 $|C|$ 为链路的时隙数和频谱槽数。式(15)得出各路径的频谱占用结果, 元素 $u_{t,c}^p$ 为 $[U_k^t]_{T \times |C|}$ 中每列元素的或运

表 2 启发式算法部分的变量

变量	定义内容
$u_{t,c}^{l,k}$	二值变量, 若 p_k 中第 l 条链路的第 c 位频谱槽的第 t 时隙被占用, 则 $u_{t,c}^{l,k} = 1$; 否则 $u_{t,c}^{l,k} = 0$;
$u_{t,c}^p$	二值变量, 若 p_k 的第 c 位频谱槽的第 t 时隙被占用, 则 $u_{t,c}^p = 1$; 否则, $u_{t,c}^p = 0$;
$B_{b,e}^{k,h}$	p_k 的空闲频谱窗口, 其频谱槽首、末序号为 b, e , 时长为 h , 含频谱槽数为 $n_{b,e}^{k,h} = e - b + 1$;
$\tau_{b,e}^{k,h}$	正整数, $B_{b,e}^{k,h}$ 为满足 r 的带宽尚需的频谱槽数;
$\chi_{r'}$	正实数, 降级业务 r' 释放的频谱槽数;
$\tau_{b,e}^{\text{left},l}, \tau_{b,e}^{\text{right},l}$	正整数, $B_{b,e}^{k,h}$ 的每条链路上 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 或 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 内最少可释放的频谱槽数, $l \in p_k$;
$\tau_{b,e}^{\text{left}}, \tau_{b,e}^{\text{right}}$	正整数, $B_{b,e}^{k,h}$ 所在路径上 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 或 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 内可释放的频谱槽数;
$b_{r'}$	正整数, 可降级业务 r' 占用的带宽;
$\text{hop}_{r'}$	正整数, r' 所在路径的链路数;
$\theta_{r'}^{\chi_{r'}}$	正实数, r' 释放的数据量;
$[s, d]$	r' 占用的频谱, 有 $d - s + 1 = b_{r'}$;
$\theta_{r'}'$	正实数, r' 在第 t 时隙可恢复的数据量;
$\theta_{r'}'$	正实数, r' 可恢复数据量之和;
$t_{r'}^{\text{end}'}$	正实数, r' 降级后的离去时间。
$[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b), (e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$	$B_{b,e}^{k,h}$ 的左/右两侧的降级备选区间;
$[s - \chi_{r'}, d - \chi_{r'}], [s + \chi_{r'}, d + \chi_{r'}]$	r' 左/右两侧分别可恢复的频域;

算结果。由此计算每条路径的 $B_{b,e}^{k,h}$, 并找出满足 $n_{b,e}^{k,h} \geq b_r$ 及时间需求 $h \geq H_r$ 的 $B_{b,e}^{k,h}$ 。若有多个 $B_{b,e}^{k,h}$, 则按最小跳数、最小频谱槽序号的顺序为 r 分配频谱。若无满足业务的 $B_{b,e}^{k,h}$, 则找出满足 $h \geq H_r$ 的 $B_{b,e}^{k,h}$, 并计算出尚需的频谱槽数 $\tau_{b,e}^{k,h} = b_r - n_{b,e}^{k,h}$

$$[U_k^l]_{T \times |C|} = \begin{bmatrix} u_{T,1}^{l,k} & u_{T,2}^{l,k} & \cdots & u_{T,|C|}^{l,k} \\ u_{T-1,1}^{l,k} & u_{T-1,2}^{l,k} & \cdots & u_{T-1,|C|}^{l,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1,1}^{l,k} & u_{1,2}^{l,k} & \cdots & u_{1,|C|}^{l,k} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} [S_k^p]_{T \times |C|} &= \prod_{l \in p_k} [U_k^l]_{T \times |C|} \\ &= \begin{bmatrix} u_{T,1}^p & u_{T,2}^p & \cdots & u_{T,|C|}^p \\ u_{T-1,1}^p & u_{T-1,2}^p & \cdots & u_{T-1,|C|}^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1,1}^p & u_{1,2}^p & \cdots & u_{1,|C|}^p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

判别每个 $B_{b,e}^{k,h}$ 的备选频域 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 的业务, 比较域内在线业务 r' 与新业务 r 的优先级 o_r , 只有 o_r 较低的 r' 才能被降级。在确定每个可降级业务可释放的频谱槽数 $\chi_{r'}$ 后, 按式(16)和式(17)以及频谱连续性原则计算每条链路上 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 范围内最少可释放的频谱槽数 $\tau_{b,e}^{\text{left},l}$ 和 $\tau_{b,e}^{\text{right},l}$, 其中, n 为 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 内的在

线业务数, 并遵循时域由远及近、频域由大向小的顺序寻找 $B_{b,e}^{k,h}$ 的邻近业务。式(18)和式(19)计算的是每个 $B_{b,e}^{k,h}$ 所在路径中的左、右区间内分别可释放的频谱槽数 $\tau_{b,e}^{\text{left}}$ 和 $\tau_{b,e}^{\text{right}}$ 。

$$\tau_{b,e}^{\text{left},l} = \text{Min} \left\{ \chi_{r'}^{\text{left},1}, \chi_{r'}^{\text{left},2}, \cdots, \chi_{r'}^{\text{left},n} \right\},$$

$$r' \in [b - \tau_{b,e}^{k,h}, b), \forall B_{b,e}^{k,h} \in p_k, h \geq H_r \quad (16)$$

$$\tau_{b,e}^{\text{right},l} = \text{Min} \left\{ \chi_{r'}^{\text{right},1}, \chi_{r'}^{\text{right},2}, \cdots, \chi_{r'}^{\text{right},n} \right\},$$

$$r' \in (e, e + \tau_{b,e}^{k,h}], \forall B_{b,e}^{k,h} \in p_k, h \geq H_r \quad (17)$$

$$\tau_{b,e}^{\text{left}} = \text{Min} \left\{ \tau_{b,e}^{\text{left},1}, \tau_{b,e}^{\text{left},2}, \cdots, \tau_{b,e}^{\text{left},l} \right\},$$

$$\forall B_{b,e}^{k,h} \in p_k, \forall p_k \in P_K, h \geq H_r \quad (18)$$

$$\tau_{b,e}^{\text{right}} = \text{Min} \left\{ \tau_{b,e}^{\text{right},1}, \tau_{b,e}^{\text{right},2}, \cdots, \tau_{b,e}^{\text{right},l} \right\},$$

$$\forall B_{b,e}^{k,h} \in p_k, \forall p_k \in P_K, h \geq H_r \quad (19)$$

式(20)的 γ 集合装载可容纳 r 的所有 $B_{b,e}^{k,h}$ 。可降级业务带宽降级后会延长传输时间, 通过DR策略计算业务最终离去时间 $t_{r'}^{\text{end}'}$, 以及 r' 的TDL, 见式(21)。为减小所有降级业务带来的损失, 式(22)计算 γ 内所有 $B_{b,e}^{k,h}$ 的收益损失 $w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^{k,h}}$, 取其中最小值对应的区间作为 r 的OSW, 见式(23)。

$$\gamma = \left\{ B_{b,e}^{k,h} \mid \left[\tau_{b,e}^{\text{left}} \geq \tau_{b,e}^{k,h} \right] \parallel \left[\tau_{b,e}^{\text{right}} \geq \tau_{b,e}^{k,h} \right] \right.$$

$$\left. \parallel \left[\left(\tau_{b,e}^{\text{left}} + \tau_{b,e}^{\text{right}} \right) \geq \tau_{b,e}^{k,h} \right] \right\}, h \geq H_r \quad (20)$$

$$A_{r'} = t_{r'}^{\text{end}} / t_{r'}^{\text{end}} \quad (21)$$

$$w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^{k,h}} = \sum_{r' \in \psi} w_{r'}^{B_{b,e}^{k,h}} = \sum_{r' \in \psi} A_{r'} \cdot o_{r'} \cdot \text{hop}_{r'},$$

$$\forall B_{b,e}^{k,h} \in \gamma, h \geq H_r \quad (22)$$

$$w_{\min} = \text{Min}\{w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^{1,h}}, w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^{2,h}}, \dots, w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^{k,h}}\},$$

$$\forall B_{b,e}^{k,h} \in \gamma, h \geq H_r \quad (23)$$

(2) 降级恢复策略: 先计算可降级 r' 在 $B_{b,e}^{k,h}$ 可降级备选频域 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 或 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 内能释放的频谱槽数 $\chi_{r'}$ 以及传输数据量 $\theta_{r'}^{X_{r'}}$ 。式(24)和式(25)计算 r' 所在路径上可恢复区间 $[s + \chi_{r'}, d + \chi_{r'}]$ 或 $[s - \chi_{r'}, d - \chi_{r'}]$ 在 $[t_r^a, \bar{\alpha}_{r'}]$ 内的频谱占用结果。式(24)计算 r' 在第 t 时隙可恢复的传输数据量 $\theta_t^{r'}$ 。其中, $u_{t,c}^{p_{r'}}$ 为 r' 所在路径 $p_{r'}$ 上频谱槽 c 的第 t 时隙的频谱占用结果。当频谱槽被占用时 $u_{t,c}^{p_{r'}} = 1$, 停止计算式(24), 以保障业务在每个时隙内满足频谱连续。

$$\theta_t^{r'} = \sum (u_{t,c}^{p_{r'}} + 1), c \in [s + \chi_{r'}, d + \chi_{r'}] \cup [s - \chi_{r'}, d - \chi_{r'}] \quad (24)$$

$$\theta_{r'}^{r'} = \sum \theta_t^{r'}, t \in [t_r^a, \bar{\alpha}_{r'}] \quad (25)$$

式(25)计算到第 t 时隙为止 r' 可恢复的传输数据量 $\theta_{r'}^{r'}$, 并与可释放的传输数据量 $\theta_{r'}^{X_{r'}}$ 比较。若 $\theta_{r'}^{r'} \geq \theta_{r'}^{X_{r'}}$, 记录 r' 的离去时间 $t_{r'}^{\text{end}}$ 及 $\chi_{r'}$ 。若 $\theta_{r'}^{r'} < \theta_{r'}^{X_{r'}}$, 则计算下一时隙的 $\theta_{t+1}^{r'}$, 此时需满足业务时域上连续, 使各频谱槽被业务占用的时间一致。若在 $u_{t,c'}^{p_{r'}} = 1$ 的第 t' 时隙不满足时域连续, 则式(24)和式(25)重新计算 r' 所在 $(c', d - \chi_{r'})$ 或 $[s + \chi_{r'}, c']$ 在 $[t_r^a, t']$ 内的 $\theta_{r'}^{r'}$ 。随后, 以第 t' 时隙后的频谱占用结果为初值迭代计算 $\theta_{r'}^{r'}$ 。若仍未找到满足 $\theta_{r'}^{r'} < \theta_{r'}^{X_{r'}}$ 的频谱块, 可减少 $\chi_{r'}$ 重新确认 r' 的 $\chi_{r'}$ 值, 以及离去时间 $t_{r'}^{\text{end}}$ 。

3.2 算法步骤

DDR-RSA由DS和DR步骤组成, DS的伪码可参见文献[13], DR的伪码参见表3。首先, 为新业务 r 计算路径集 P_K , 构建 $[U_k^l]_{T \times |C|}$, 并用式(15)得出每条路径的 $[S_k^p]_{T \times |C|}$, 据此计算出每条路径的 $B_{b,e}^{k,h}$, 放入集合 Θ 中。找出满足 r 带宽及持续时间需求的所有 $B_{b,e}^{k,h}$, 按最小跳数、最小频谱槽序号的顺序为 r 分配频谱。若带宽不足, 在满足 r 持续时间的 $B_{b,e}^{k,h}$ 中计算 $\tau_{b,e}^{k,h}$, 确定 Θ 中每个 $B_{b,e}^{k,h}$ 的邻近区间 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 内在线业务 r' 的等级。若低于 r 的等级, 则计算可降级业务 r' 能释放的频谱槽数 $\chi_{r'}$, 并用式(16)和式(17)计算 $\tau_{b,e}^{\text{left},l}, \tau_{b,e}^{\text{right},l}$ 。用式(18)和式(19)计算每个 $B_{b,e}^{k,h}$ 所在的路径中的 $\tau_{b,e}^{\text{left}}, \tau_{b,e}^{\text{right}}$, 并判断 $\tau_{b,e}^{\text{left}}, \tau_{b,e}^{\text{right}}$ 是否满足式(20)而能纳入 γ 中。若

γ 非空, 则式(21)和式(22)计算所有 $w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^{k,h}}$, 选出损失最小的 $B_{b,e}^{k,h}$, 将它及邻近区间作为 r 的OSW。

然后, 根据DR策略恢复降级业务, 同时为新业务分配路由与频谱。DR策略决定了降级业务的最终 $t_{r'}^{\text{end}}$ 以及可为高等级业务释放的 $\chi_{r'}$ 。当 $o_{r'}$ 低于 o_r 时, 应计算 r' 在 $B_{b,e}^{k,h}$ 的可降级备选频谱区间 $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b)$ 或 $(e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$ 内可释放的 $\chi_{r'}$ 和 $\theta_{r'}^{X_{r'}}$, 然后用式(24)和式(25)计算路径上的可恢复区间 $[s + \chi_{r'}, d + \chi_{r'}]$ 或 $[s - \chi_{r'}, d - \chi_{r'}]$ 在 $[t_r^a, \bar{\alpha}_{r'}]$ 内的频谱占用结果(第2行)。

若频谱 $u_{t,c}^{p_{r'}} = 0$, 用式(24)累加 t 时隙内可恢复传输的 $\theta_t^{r'}$ 。若 $u_{t,c}^{p_{r'}} = 1$, 则停止累加, 比较该频谱槽与上一时隙内 $u_{t-1,c'}^{p_{r'}} = 1$ 的频谱槽序号, 若不小于, 说明满足业务时域连续性。式(25)计算 t 时隙的 $\theta_{r'}^{r'}$, 并计算和比较下一时隙的 $\theta_{t+1}^{r'}$, 若小于, 则重新计算 r' 所在的频域 $(c, d - \chi_{r'})$ 或 $[s + \chi_{r'}, c]$ 在 $[t_r^a, t]$ 内的 $\theta_{r'}^{r'}$, 然后再计算下一时隙的 $\theta_{t+1}^{r'}$ (第5~10行)。随后判断 t 时隙 $\theta_{r'}^{r'}$ 与 $\theta_{r'}^{X_{r'}}$ 的大小, 若 $\theta_{r'}^{r'} \geq \theta_{r'}^{X_{r'}}$, 则返回 r' 的离去时间以及 $\chi_{r'}$ (第12行)。若在 $t \leq \bar{\alpha}_{r'}$ 范围内未找到满足 $\theta_{r'}^{r'} < \theta_{r'}^{X_{r'}}$ 的 $\theta_{r'}^{r'}$, 则减少 $\chi_{r'}$ 和 $\theta_{r'}^{X_{r'}}$, 重新计

表3 DR策略伪码

输入:	$\psi, G(N, E, C)$.
输出:	$t_{r'}^{\text{end}}$ and $\chi_{r'}$.
(1)	if $o_{r'} < o_r$ then
(2)	$t_{r'}^{\text{end}} \leftarrow t_{r'}^{\text{end}}, \chi_{r'} \leftarrow 0$; calculate $\chi_{r'}, \theta_{r'}^{X_{r'}}$ in $[b - \tau_{b,e}^{k,h}, b) \cup (e, e + \tau_{b,e}^{k,h}]$;
(3)	$[S_k^p]_{T \times C } \leftarrow [U_k^l]_{T \times C }$ in $[s + \chi_{r'}, d + \chi_{r'}] \cup [s - \chi_{r'}, d - \chi_{r'}]$;
(4)	while $t \geq t_r^a$ and $t \leq \bar{\alpha}_{r'}$ do
(5)	for $u_{t,c}^{p_{r'}} = 0$ do $\theta_t^{r'} \leftarrow \text{Eq.24}, c++$; end for
(6)	if $u_{t,c}^{p_{r'}} = 1$ then
(7)	if $c \geq c'$ in $u_{t-1,c'}^{p_{r'}} = 1$ then calculate $\theta_{r'}^{r'} \leftarrow \text{Eq.25}, t++$;
(8)	else then
(9)	$\theta_{r'}^{r'} \leftarrow \text{Eqs. 24-25}((c, d - \chi_{r'}) \text{ or } [s + \chi_{r'}, c]), t++$;
(10)	end if
(11)	end if
(12)	if $\theta_{r'}^{r'} \geq \theta_{r'}^{X_{r'}}$ then return $t_{r'}^{\text{end}}$ and $\chi_{r'}$; end if
(13)	end while
(14)	if $\theta_{r'}^{r'} < \theta_{r'}^{X_{r'}}$ then set $\chi_{r'} = \chi_{r'} - 1$; jump to Line 1; end if
(15)	if $\chi_{r'} == 0$ then return 0; end if
(16)	end if

算 $\chi_{r'}$ 和 $t_{r'}^{\text{end}'}$ (第14行)。当 $\chi_{r'} = 0$ ，则该业务被阻塞(第15行)。

3.3 时间复杂度分析

K 路由算法的时间复杂度为 $O(K \cdot |N|^2)$ 。寻找空闲频谱块的复杂度为 $O(K \cdot |C|)$ ；最坏情况下每条路径跳数为 $|E|$ ，则OSW选取与业务降级代价计算的复杂度为 $O(|C|)$ 和 $O(|E| \cdot |C|)$ ，则DS的复杂度为 $O[(K + |E|) \cdot |C|]$ 。而DR策略可看做是DS的逆操作，故假设极端情况下所有在线业务都需进行业务恢复，则DR的复杂度为 $O[(K + |E|) \cdot |C| \cdot |R|]$ 。经化后DDR-RSA的时间复杂度为 $O[K \cdot (|N|^2 + |C| \cdot |R|) + |E| \cdot |C| \cdot |R|]$ 。

3.4 DDR-RSA及DR策略示例

$o_r = II, b_r = 4, H_r = 4$ 的 r 到达图1(a)中路径 $A \leftrightarrow B$ 。 $A \leftrightarrow B$ 中有5个在线业务且没有适合 r 的频谱块，只有位于9号、大小 $n_{9,9}^{1,\infty} = 1$ 的空闲频谱块 $B_{9,9}^{1,\infty}$ ，其备选区间 $[6, 9)$ 内 $o_{r'} = I$ 的在线业务可释放 $\chi_{r'} = 3, \theta_{r'}^{X_{r'}} = 6$ 。图1(b)所示传统DS算法未对降级业务进行恢复，给降级业务带来的TDL $A_{r'} = t_{r'}^{\text{end}'}/t_{r'}^{\text{end}} = 8/2 = 4$ 。

本文基于DR来缓解降级业务的TDL。图1(c)中可恢复区间 $[2, 5)$ 在 $t = 1/t = 2$ 内可恢复的传输数据量均是0； $t = 3$ 的 $\theta_3^{r'} = 2$ ，则 $\theta_{r'}' = 2$ ； $t = 4$ 的 $\theta_4^{r'} = 3$ ，则 $\theta_{r'}' = 2 + 3 = 5$ 。当计算 $t = 5$ 的 $\theta_5^{r'}$ 时， $u_{5,3}^{p_{r'}} = 1$ 的频谱槽号3大于 $u_{4,2}^{p_{r'}} = 1$ 的序号2，不满足时域连续，并比较 $\theta_{r'}'$ 与 $\theta_{r'}^{X_{r'}}$ 。由于 $\theta_{r'}' = 5$ 小于 $\theta_{r'}^{X_{r'}} = 6$ ，不满足业务数据量需求。如图1(d)所示，可恢复频域 $(3, 5]$ 在时段 $[1, 5]$ 内可恢复的数据量 $\theta_{r'}' = 6$ 。因此 $\theta_{r'}' = \theta_{r'}^{X_{r'}} = 6$ ，满足业务需求，则 $t_{r'}^{\text{end}'} = 5, A_{r'} = 5/2 = 2.5, \chi_{r'} = 3$ 。最后， r' 执行DR，并为新业务分配频谱。

4 仿真分析

4.1 仿真设置

本节采用拓扑为NSFNET，每条边为有358个频谱槽(C-band)的双向光纤链路^[13]。业务优先级1~5随机分配，频谱槽数1~10。业务按参数为 λ 的泊松分布到达，持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布，全网负载为 λ/μ Erlang，取 $\mu = 1$ 时隙，每次产生 10^5 次业务请求。本文采用3种对比算法，分别是首次命中路由与频谱分配(First-Fit Routing and Spectrum Assignment, FF-RSA)算法^[2]、区分服务的降级服务(Differentiated-Service Degraded Service, DSDS)算法^[8]，以及仅考虑了DS而未考虑DR的基于区分降级服务和自适应调制的动态路由与频谱分配(Dynamic Routing and Spectrum As-

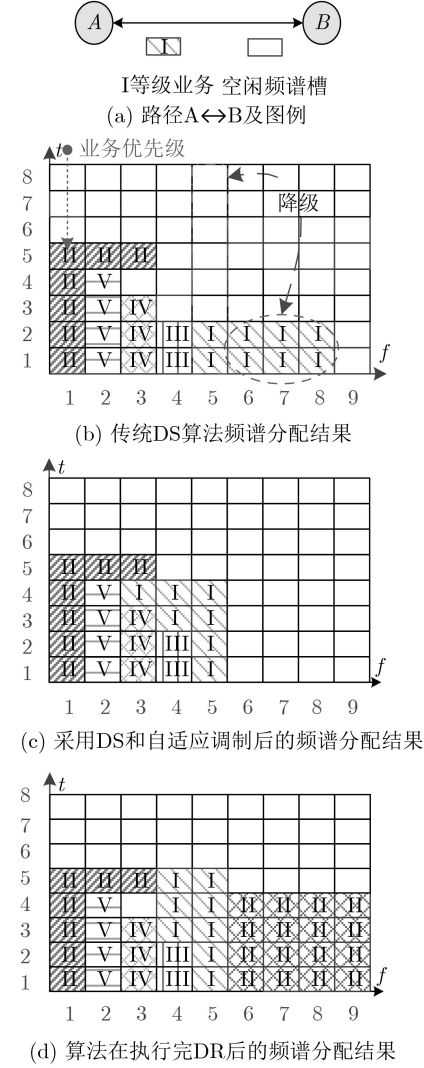


图1 降级恢复举例

signment based on Differentiated Degraded-service and Adaptive Modulation, DRSA-DDAM)算法^[13]。

仿真指标：业务数据量阻塞率 $\theta_{\text{blk}} = \sum_{i=1}^{|\psi_{\text{blk}}|} \theta_{r_i} / \sum_{j=1}^{|\psi|} \theta_{r_j}$ 为被阻塞业务的数据量与到达的总数据量的比，其中 $|\psi_{\text{blk}}|$ 为被阻塞业务数。降级服务成功率 $\theta_{\text{deg}} = |\psi_{\text{deg}}^{\text{scf}}| / |\psi_{\text{deg}}^{\text{req}}|$ 为成功基于DS而接纳的业务数 $|\psi_{\text{deg}}^{\text{scf}}|$ 与所有需要DS的业务总数 $|\psi_{\text{deg}}^{\text{req}}|$ 的比。平均延迟 $\sigma_{\text{delay}} = \sum_{r \in \psi_{\text{deg}}} (t_r^{\text{end}'} - t_r^{\text{end}}) / |\psi_{\text{deg}}|$ 为所有降级业务的实际传输时间与原定离去时间的平均差值，其中 $|\psi_{\text{deg}}|$ 为降级业务总数， σ_{delay} 越小DR越有效。网络收益 $\rho_{\text{net}} = \sum_{r \in \psi} \rho_r = \sum_{r \in \psi} (\theta_r \cdot o_r / A_r)$ 为所有成功业务的收益和，若未降级则 $A_r = 1$ 。承载的业务数据量越多，等级越高、TDL越小，收益 ρ_{net} 越大。为便于统计，将采用16QAM时业务占用单位数据量的费用作为收益单位profit-unit。

4.2 结果分析

图2对比了4种算法的业务数据量阻塞率。各算法的阻塞率都随着负载的增大而升高,其中FF-RSA最高,DDR-RSA最低。DDR-RSA与FF-RSA的差值最大可达6.85%,这是由于FF-RSA未采取DS策略。DSDS和DRSA-DDAM虽采取DS策略,但降级业务的频谱资源减少导致业务持续时间的延长,以时间换取速率,挤压了后续业务的频谱空间。DDR-RSA不仅精心设计了DS窗口选择策略,而且结合DR策略,将被降级业务及时向空闲频谱区域复原,缩短了降级业务的持续时间,为后续业务提供了频谱空间。

图3对比了DDR-RSA、DSDS和DRSA-DDAM的降级服务成功率(由于FF-RSA不支持降级,因此其降级服务成功率为0)。随着业务负载增加,3算法的降级成功率曲线都在下降。在轻负载时,3算法的降级成功率接近。但随着业务负载增加,DDR-RSA的降级成功率逐渐高于DSDS和DRSA-DDAM,最大可提高6.43%。这是由于轻负载时,3种算法均能通过DS为受阻业务提供频谱。但随着负载增大,网络愈加拥塞,即使采用DS,也难以找到适合的频谱接纳新业务。由于DDR-RSA采用了DR,被降级业务可利用后续出现的空闲频域及时复原,同时被复原的业务又可在愈加拥塞的网络中再次被压缩,因此其频谱分配机制更加灵活,DS使用的频次更高,频谱被充分利用。

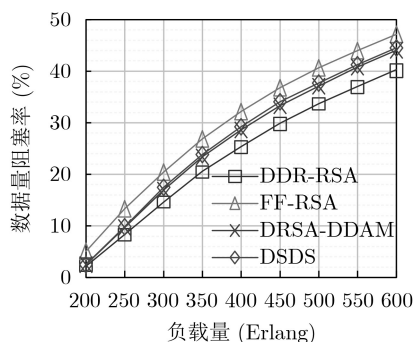


图2 4种算法的数据量阻塞率

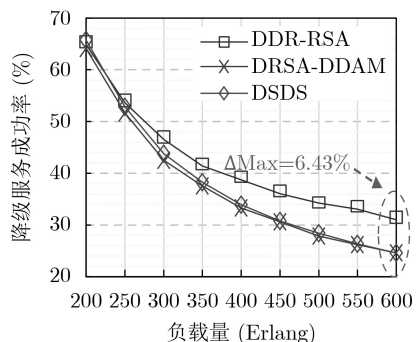


图3 3种算法的降级服务成功率

图4对比了3种算法的平均延迟时间(由于FF-RSA不支持DS,因此其平均延迟时间为0)。DRSA-DDAM中降级业务的平均延迟时间最高,与DDR-RSA的差值最大可达2.17时隙。这是由于DRSA-DDAM采用DS在减少降级业务频谱资源的同时,也延长了业务的持续时间。而DDR-RSA通过结合DR策略有效地减少了降级业务的持续时间,即在整体时间维度内减少了网络的频谱碎片。图5中DDR-RSA的网络收益最高,FF-RSA最低。这是因为全网业务收益与承载的数据量、业务等级和业务TDL相关,即数据量越大、业务等级越高、业务TDL越小,收益越高。FF-RSA因未采用DS,阻塞率较高,故收益低。DRSA-DDAM和DSDS仅采用了DS策略,导致降级TDL较大,降低了整体收益。

图6对比了3种业务负载下,DDR-RSA与DSDS和DRSA-DDAM各等级业务被降级的比例。在不同负载下,业务等级越高,被降级的比例越小。DS可成功应用于各种业务类型。此外,相较于DSDS和DRSA-DDAM,DDR-RSA降低的高等级业务比例更小。在200负载时,等级4的业务被降级比例最大可减少6.38%,这是由于DDR-RSA基于最小降级业务损失来选择DS窗口,此窗口精心定位在低等级业务附近,且对窗口两侧已建业务连接的选取也严格遵循区分等级机制,故DDR-RSA影响的高等级业务最少。

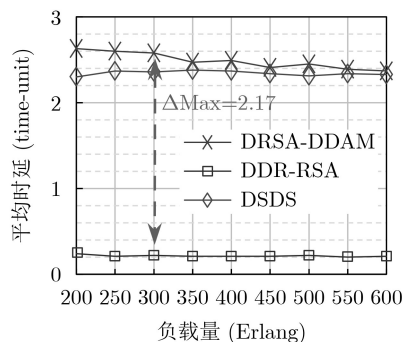


图4 3种算法的平均延迟时间

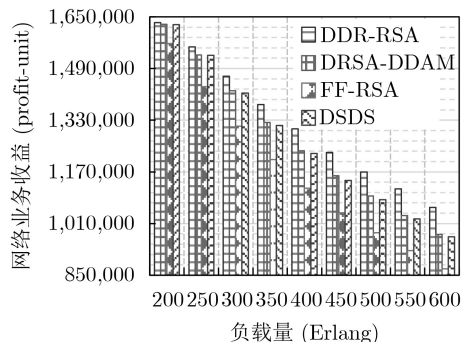


图5 4种算法的网络收益

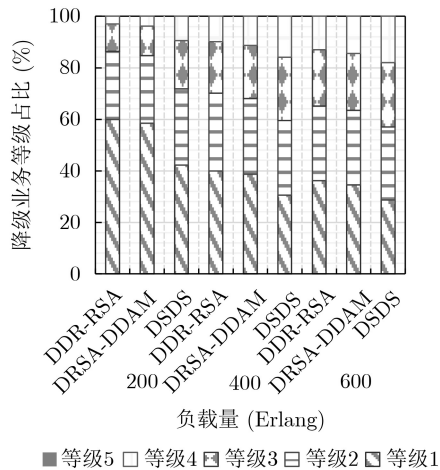


图6 3种算法的降级等级占比

3.3节已给出DDR-RSA算法的时间复杂度为 $O[K \cdot (|N|^2 + |C| \cdot |R|) + |E| \cdot |C| \cdot |R|]$ ，而3种对比算法的时间复杂度：FF-RSA为 $O(|N|^2 + |E| \cdot |C|)$ ^[2]，DSDS为 $O(|N|^3 + |N| \cdot |R|)$ ^[8]，DRSA-DDAM为 $O[K \cdot (|N|^2 + |E| + |C|) + |E| \cdot |C|]$ ^[13]。由于DDR-RSA算法中的K可控，故时间复杂度相较于DSDS和DRSA-DDAM仅需重点考量业务数|R|，即在实际生产中只要控制好各时段内所需恢复的业务数|R|，其时间复杂度并未发现明显劣势；但DDR-RSA在降级服务成功率、阻塞率和平均时延等指标上具有一定优势。

5 结束语

本文针对EON中降级服务算法的资源分配不公、忽略低等级业务QoE等问题，首先抽象出以最小化降级频次、等级与TDL为联合优化目标的MILP模型，同时设计了区分业务等级的降级损失函数和降级窗口选择策略。为提高降级用户的QoE和黏性，提出了支持降级恢复策略的时延感知降级恢复算法DDR-RSA，在保障传输数据量不变的前提下，将降级业务向空闲频域恢复，以减小降级业务TDL并增大网络收益。仿真结果表明该算法取得了较低的业务数据量阻塞率和平均延迟时间、较高的网络收益和降级服务成功率。

参考文献

- [1] ZHU Zuqing, LU Wei, ZHANG Liang, *et al.* Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 15–22. doi: [10.1109/JLT.2012.2227683](https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2227683).
- [2] GU Yamei, YUAN Xin, and YOU Shanhong. Blocking performances for fixed/flexible-grid and sub-band conversion in optical networks[C]. 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Shanghai, China, 2014: 116–120. doi: [10.1109/ICCCChina.2014.7008254](https://doi.org/10.1109/ICCCChina.2014.7008254).
- [3] 朱丹, 徐威远, 陈文娟, 等. 基于光波分复用网络的分布式多目标定位系统[J]. *雷达学报*, 2019, 8(2): 171–177. doi: [10.12000/JR19028](https://doi.org/10.12000/JR19028).
- [4] ZHU Dan, XU Weiyuan, CHEN Wenjuan, *et al.* Distributed multi-target localization system based on optical wavelength division multiplexing network[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 171–177. doi: [10.12000/JR19028](https://doi.org/10.12000/JR19028).
- [5] SAVAS S S, HABIB M F, TORNATORE M, *et al.* Exploiting degraded-service tolerance to improve performance of telecom networks[C]. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco, USA, 2014: W2A. 31. doi: [10.1364/OFC.2014.W2A.31](https://doi.org/10.1364/OFC.2014.W2A.31).
- [6] MUHAMMAD A, CAVDAR C, WOSINSKA L, *et al.* Service differentiated provisioning in dynamic WDM networks based on set-up delay tolerance[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(11): 1250–1261. doi: [10.1364/JOCN.5.001250](https://doi.org/10.1364/JOCN.5.001250).
- [7] SAVAS S S, HABIB M F, TORNATORE M, *et al.* Network adaptability to disaster disruptions by exploiting degraded-service tolerance[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(12): 58–65. doi: [10.1109/MCOM.2014.6979953](https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979953).
- [8] VADREUVU C S K, WANG Rui, TORNATORE M, *et al.* Degraded service provisioning in mixed-line-rate WDM backbone networks using multipath routing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(3): 840–849. doi: [10.1109/TNET.2013.2259638](https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2259638).
- [9] ZHONG Zhizhen, LI Jipu, HUA Nan, *et al.* On QoS-assured degraded provisioning in service-differentiated multi-layer elastic optical networks[C]. 2016 IEEE Global Communications Conference, Washington, USA, 2016: 1–5. doi: [10.1109/GLOCOM.2016.7842043](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7842043).
- [10] SANTOS A S, HOROTA A K, ZHONG Zhizhen, *et al.* An online strategy for service degradation with proportional QoS in elastic optical networks[C]. 2018 IEEE International Conference on Communications, Kansas City, USA, 2018: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2018.8422781](https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422781).
- [11] HOU Weigang, GUO Lei, NING Zhaolong, *et al.* Appropriate service degradability for virtualized inter-data-center optical networks[C]. 2018 IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, UAE, 2018: 206–212. doi: [10.1109/GLOCOM.2018.8647198](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647198).
- [12] HOU Weigang, NING Zhaolong, GUO Lei, *et al.* Service degradability supported by forecasting system in optical data center networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(2): 1514–1525. doi: [10.1109/JSYST.2018.2821714](https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2821714).
- [13] ROJAS J S, GALLÓN Á R, and CORRALES J C. Personalized service degradation policies on OTT applications based on the consumption behavior of users[C].

- The 18th International Conference on Computational Science and Its Applications, Melbourne, Australia, 2018: 543–557. doi: [10.1007/978-3-319-95168-3_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95168-3_37).
- [13] 于存谦, 张黎, 何荣希. 弹性光网络基于区分降级服务和自适应调制的动态路由与频谱分配算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 38–45. doi: [10.11999/JEIT180075](https://doi.org/10.11999/JEIT180075).
- YU Cunjian, ZHANG Li, and HE Rongxi. Dynamic routing and spectrum assignment algorithm based on differentiated degraded-service and adaptive modulation in elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 38–45. doi: [10.11999/JEIT180075](https://doi.org/10.11999/JEIT180075).
- [14] YANG Anjia, WENG Jian, CHENG Nan, *et al.* DeQoS attack: Degrading quality of service in VANETs and its mitigation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(5): 4834–4845. doi: [10.1109/TVT.2019.2905522](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2905522).
- [15] PROTO S, VENTURA F, APILETTI D, *et al.* PREMISES, a scalable data-driven service to predict alarms in slowly-degrading multi-cycle industrial processes[C]. 2019 IEEE International Congress on Big Data, Milan, Italy, 2019: 139–143. doi: [10.1109/BigDataCongress.2019.00032](https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2019.00032).
- [16] 张海波, 李虎, 陈善学, 等. 超密集网络中基于移动边缘计算的任务卸载和资源优化[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(5): 1194–1201. doi: [10.11999/JEIT180592](https://doi.org/10.11999/JEIT180592).
- ZHANG Haibo, LI Hu, CHEN Shanxue, *et al.* Computing offloading and resource optimization in ultra-dense networks with mobile edge computation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(5): 1194–1201. doi: [10.11999/JEIT180592](https://doi.org/10.11999/JEIT180592).
- 于存谦: 男, 1983年生, 博士, 副教授, 研究方向为光数据中心网络.
张 黎: 女, 1992年生, 硕士, 研究方向为弹性光网络.
何荣希: 男, 1971年生, 博士, 教授, 研究方向为光网络和无线网络技术.
李靖宇: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向光数据中心网络.
- 责任编辑: 余 蓉