

## 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

于存谦 张黎 何荣希\*

(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

**摘要:** 面对高速发展的互联网应用, 传统的路由与频谱分配(RSA)问题迎来新的挑战。融合降级服务(DS)技术的弹性光网络无疑为降低业务阻塞率, 提高用户体验质量(QoE)提供了新方向。该文首先针对频谱资源的低效利用和DS导致的业务收益下降问题, 建立以最小化频谱消耗和最小化DS等级、频次为联合优化目标的RSA问题的混合整数线性规划模型。随后, 提出一种基于区分DS和自适应调制的动态RSA算法。该算法考虑业务等级的差异化, 并整合自适应调制和DS技术。同时, 设计区分业务等级的DS损失函数及DS窗口选择策略, 为即将受阻业务分配理想的频谱位置和资源。此外, 设计考虑频谱与收益均衡关系的网络收益函数, 达到频谱资源高效利用, 减少降级影响, 提升网络收益的目的。最后, 仿真验证了所提算法在业务阻塞率和网络收益等方面的优势。

**关键词:** 弹性光网络; 路由与频谱分配; 降级服务; 区分服务; 自适应调制

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0038-08

DOI: 10.11999/JEIT180075

## Dynamic Routing and Spectrum Assignment Algorithm Based on Differentiated Degraded-service and Adaptive Modulation in Elastic Optical Networks

YU Cunqian ZHANG Li HE Rongxi

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

**Abstract:** Oriented to the high-rapid development of Internet applications, new challenges are encountered by the conventional Routing and Spectrum Assignment (RSA). A new direction for the blocking rate reduction and the Quality of Experience (QoE) assurance is provided to the Elastic Optical Network (EON) integrated by Degraded Service (DS) technology. Due to the inefficiency of spectrum resources and the revenue decline caused by DS, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is proposed with a joint objective that minimizes both spectrum consumption and the priorities and DS frequency of online services. A dynamic RSA algorithm based on differentiated DS and adaptive modulation is proposed, which considers service-priority differentiation, the adaptive modulation and DS technology. Meanwhile, DS loss function and DS window selection strategy are designed to differentiate service levels, and ideal spectrum location and resource are assigned for the impending blocked services. The network revenue function considering the relationship between spectrum and revenue balance is designed to achieve efficient utilization of spectrum resources, reduce the impact of degradation, and enhance network revenue. The simulation results verify the advantages of the proposed algorithm in terms of blocking rate, network profit, etc.

**Key words:** Elastic Optical Network (EON); Routing and Spectrum Assignment (RSA); Degraded Service (DS); Differentiated service; Adaptive modulation

收稿日期: 2018-01-19; 改回日期: 2018-09-26; 网络出版: 2018-10-22

\*通信作者: 何荣希 hrhx@dlmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61371091, 61801074)、中央高校基本科研业务费(3132016318, 3132017078)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61371091, 61801074), The Fundamental Research Funds for Central Universities (3132016318, 3132017078)

## 1 引言

采用正交频分复用OFDM技术的弹性光网络(Elastic Optical Network, EON)被看作是未来光传输网的主流方向<sup>[1]</sup>。近年来,大量文献针对EON中的路由与频谱分配(Routing and Spectrum Assignment, RSA)问题进行了研究,所提出算法总体可分为先应式和反应式两大类<sup>[2-7]</sup>。前者是在建立业务连接时,预先采取措施以避免或减少频谱浪费,如碎片感知RSA算法<sup>[4,5]</sup>;而后者是在业务连接建立失败时,才采取挽救措施来降低网络阻塞率,如碎片整理RSA算法<sup>[6]</sup>。另外,为进一步提高频谱利用率,EON可结合自适应调制(Adaptive Modulation, AM)技术在不改变业务速率的情况下减少频谱的占用<sup>[7]</sup>。

由于用户带宽需求的突发性,当大量业务涌入网络时,往往导致网络频谱资源短缺。此时,传统RSA算法难以找到足够资源成功建立业务连接,导致大量请求被拒绝,从而影响了用户的体验质量(Quality of Experience, QoE)<sup>[8]</sup>和运营商收益。降级服务(Degraded Service, DS)通过降低部分业务请求的资源分配量,使该业务在较低但可接受的QoE下保持运行,同时又使整个网络服务处于可接受的水平<sup>[9]</sup>。文献<sup>[9-11]</sup>针对WDM网络提出不同的DS策略,可在一定程度上解决网络资源短缺问题。但上述策略并未区分业务的不同属性,也未考虑用户不同的QoE要求,容易导致过度降级,即可能造成过多业务被降级或业务带宽被过多降级。因此,难以保证诸如远程医疗、在线游戏等业务的服务质量(Quality of Service, QoS)要求。

与采用固定栅格频谱模式的WDM网络不同,EON具有灵活栅格、细粒度等特点,而且EON中的RSA问题也不同于WDM网络的路由和波长分配RWA问题。因此,上述针对WDM网络的DS策略并不适用于EON。EON中支持DS的RSA问题还是一个较新的问题,目前仅有文献<sup>[12]</sup>涉及。

文献<sup>[12]</sup>提出一种保障QoS的降级服务(QoS-Assured Degraded Service, QADS)算法。该算法通过延长业务持续时间来补偿电层容量的降级损失,通过提高调制等级来补偿光层业务带宽的降级损失。但该算法默认为BPSK调制,在光层仅通过提高业务的调制等级来缓解频谱资源短缺。因此,其不但频谱利用率较低,而且重负载时DS成功概率也不易保障。另外,文献<sup>[12]</sup>虽然保障了业务的QoS,却未充分考虑业务优先级的区分问题带给资源和收益的具体影响。而实际上,DS效果与业务优先级区分和类型细分紧密联系,如运营商会在少

数付费与多数免费用户间进行利益取舍。进而,文献<sup>[12]</sup>忽略了DS对低优先级业务的影响,如对低优先级业务带来的延时问题,难以保障降级用户的QoE和资源分配的公平性。为了缓解上述资源分配的不公平性、维持用户忠诚度,可采用服务费率与业务降级损失负向相关的策略,动态调节服务费率。这既是对被降级用户的补偿,同时也是对运营商采取降级机制的“惩罚”,即等级越高、降级率越高,业务收益损失就越大。但为了提高降级用户的黏性而补偿降级损失的同时,DS策略中也应关注运营商的收益最大化问题,即应在维持网络性能处于可接受水平时,容纳数量更多、等级更高的业务,并尽量减少DS操作,使业务间的资源分配与收益处于动态均衡状态。而对于EON中RSA问题的广泛研究中,能够在区分业务优先级并保障用户黏性的前提下,寻求DS措施与运营商收益动态均衡问题的研究目前还未见文献涉及。

为此,针对已有DS算法中出现的过度降级、资源分配不公、忽略频谱与收益均衡性等问题,本文首次建立了以最小化网络频谱消耗和最小化降级服务等级与频次为联合优化目标的RSA问题的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型,不但抽象出支持DS的RSA问题,并且限制条件涵盖了业务等级区分、AM和基于降级系数的DS措施。随后,提出了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 Assignment based on Differentiated Degraded-service and Adaptive Modulation, DRSA-DDAM)算法。该算法考虑了不同优先级业务的差异化处理,同时整合了AM和DS技术,最大化频谱利用率。另外,为解决精准降级的问题,设计了区分业务等级的DS损失函数和DS窗口选择策略,从而选出频谱资源降级最少、降级率最小且优先级较低的降级业务,最小化DS损失。此外,为缓解降级低优先级业务带来的资源分配不公及QoE受损问题,设计了考虑频谱与收益均衡关系的网络收益函数。该函数不但调低了被降级用户的服务费率,维持了用户黏性,同时与上述DS损失函数相配合,达到了频谱资源的高效利用和网络收益最大化的目的。最后,对算法性能进行了仿真实验。

首节交代了问题的背景和本文贡献,次节介绍了区分降级服务技术并对RSA问题进行了数学建模,第3节设计了启发式算法,第4节对算法进行了仿真和结果分析,末节总结了全文。

## 2 基于区分降级服务和自适应调制的RSA问题建模

EON可表示为 $G(N, E, C)$ , 其中 $N$ 为节点集, 节点数为 $|N|$ ;  $E$ 为双向光纤链路集, 链路数为 $|E|$ ;  $C$ 为每条链路的频隙集, 频谱槽数为 $|C|$ ; 业务请求为 $r(s_r, d_r, v_r, o_r, \bar{\alpha}_r) \in \psi$ , 其中,  $s_r, d_r \in N$ 为 $r$ 的源、目的节点;  $v_r$ 为初始请求速率, 即最高调制等级(16QAM)时需占用的基准频谱槽数;  $o_r$ 为优先级;  $\bar{\alpha}_r$ 为该业务可接受的降级系数上限;  $\psi = \{r_1, r_2, \dots, r_{|\psi|}\}$ 为业务空间,  $\varpi$ 为 $\psi$ 中的业务优先级上界。首先, 引入以下符号:

$w_r$ 为正整数,  $r$ 的起始频谱槽序号;  $m_k^r$ 为正整数, 表明 $r$ 所选定路径的调制等级序号, 值越小代表调制等级越高。  $m_k^r = 1, 2, 3, 4$ , 分别对应16QAM, 8QAM, QPSK和BPSK;  $b_r^{m_k}$ 为正整数,  $r$ 在调制模式 $m_k^r$ 下的带宽需求, 即采用 $m_k^r$ 时需占用的频谱槽数;  $\alpha_r$ 为正实数,  $r$ 的降级系数, 有 $\alpha_r \in [0, 1)$ ;  $f_{u,v}^r$ 为二值变量, 若 $r$ 经过光纤链路 $e(u, v) \in E$ , 则 $f_{u,v}^r = 1$ ; 否则,  $f_{u,v}^r = 0$ ;  $\rho_{i,j}$ 为二值变量, 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 $\rho_{i,j} = 0$ ;  $\xi_{s_r,u}$ 为二值变量, 若 $r$ 的源节点 $s_r$ 为节点 $u \in N$ , 则 $\xi_{s_r,u} = 1$ ; 否则,  $\xi_{s_r,u} = 0$ ;  $\xi_{d_r,u}$ 为二值变量, 若 $r$ 的目的节点 $d_r$ 为节点 $u \in N$ , 则 $\xi_{d_r,u} = 1$ ; 否则,  $\xi_{d_r,u} = 0$ ;  $\delta_r$ 为二值变量, 若 $r$ 被降级, 则 $\delta_r = 1$ ; 否则,  $\delta_r = 0$ 。

由于希望在最大化频谱资源利用效率的同时, 尽可能多地容纳等级较高的业务, 且减少DS的发生和降级系数的影响, 以提高网络收益。因此, 将最小化网络频谱槽使用量, 以及最小化DS发生的等级和频次作为联合优化目标。在目标函数式(1)中, 第1项为最小化全网被占用的频谱槽数量, 而第2项为最小化被降级的业务数量, 并保障高等级业务。

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{r \in \psi} \left[ \sum_{e(u,v) \in E} (f_{u,v}^r \cdot b_r^{m_k}) + w_r \right] \\ + \sum_{r \in \psi} \left[ \delta_r + \prod_{e(u,v) \in E} f_{u,v}^r \cdot (\varpi - o_r) \cdot a_r \right] \quad (1) \end{aligned}$$

(1)RSA限制性条件:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \rho_{i,j} \cdot (f_{u,v}^{r_j} + f_{v,u}^{r_j}) \cdot (f_{u,v}^{r_i} + f_{v,u}^{r_i}) \cdot [w_{r_i} + b_{r_i}^{m_k} + 1] \\ \leq w_{r_j}, \forall e(u, v) \in E, \forall r_i, r_j \in \psi \quad (6) \end{aligned}$$

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

式(2)为流守恒条件。式(3)保证路径无死锁。式(4)保证任意业务的频谱槽需求不能超过链路容量。  $w_r$ 可统一 $r$ 在有多段链路上的起始频谱槽序号, 保障频谱一致性。通过式(6)中 $w_{r_i} + b_{r_i}^{m_k}$ 项保障频谱连续性原则。当多个业务共享同一链路时, 式(5)–式(7)不但可识别出它们的频谱槽次序, 也可保证彼此的频谱互不重叠。

(2)DS限制性条件:

$$m_k^r = \sum_{e(u,v) \in E} f_{u,v}^r, \forall r \in \psi \quad (8)$$

$$b_r^{m_k} = v_r \cdot 2^{m_k^r - 1} \quad (9)$$

$$f_{u,v}^{r_i} \cdot o_{r_i} \geq f_{u,v}^{r_j} \cdot o_{r_j} \cdot \delta_{r_j}, \forall r_i, r_j \in \psi, \forall e(u, v) \in E \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum_{r \in \psi} \{f_{u,v}^r \cdot [b_r^{m_k} \cdot (1 - \alpha_r \cdot \delta_r)] + 1\} \leq |C| + 1, \\ \forall e(u, v) \in E \quad (11) \end{aligned}$$

$$\alpha_r \leq \bar{\alpha}_r, \forall r \in \psi \quad (12)$$

式(8)和式(9)可依据 $r$ 路径的长短选择调制等级, 并计算频谱槽数。当多个业务共享同一链路时, 式(10)不但可以识别业务等级 $o_r (\forall r \in \psi)$ , 还保证优先降低等级业务。式(11)在判定业务是否降级的情况下, 满足光纤链路的频谱容限, 其中 $[b_r^{m_k} \cdot (1 - \alpha_r \cdot \delta_r)]$ 计算业务降级后的频谱槽需求数。式(12)保证了业务实际的降级系数不大于降级系数上限 $\bar{\alpha}_r$ 。

由于式(1), 式(11)和式(12)中存在实数变量, 故上述问题属于MILP问题。同时, 式(1), 式(6), 式(7), 式(10)和式(11)中存在着(0, 1)变量与其他变量相乘的情况, 构成(0, 1)规划和MILP的耦合。因此, 该问题属于NP-Hard问题。下一节提出一种启发式算法, 以适应实际工程的需要。

## 3 启发式算法

### 3.1 算法解析

DRSA-DDAM算法的核心是自适应调制RSA和最优DS窗口选取。DRSA-DDAM将每条链路中的剩余频谱资源作为链路代价, 利用 $K$ 路由算法<sup>[13]</sup>寻找备选路径集 $P_K = \{p_k\}$ , 并从备选路径选出与业务速率相匹配的连续频谱段落作为服务窗口。在DS策略中, 基于计算降级业务损失<sup>1)</sup>的方

<sup>1)</sup> 对已建业务连接进行DS会降低其QoE, 运营商以较低的租赁费用换得用户的忠诚度, 故被降级业务的单位利润率会有所降低。

法，不断迭代比较不同频谱段落的业务损失之和，选出降级业务损失最小的频谱段作为最优DS窗口。

(1) 自适应调制RSA(AM-RSA)：根据 $K$ 条路径的物理长度，分配各自的调制等级 $M_k$ 。 $M_k$ 为正整数，对应的进制数为2, 4, 8, 16等，分别对应BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM等。利用式(13)计算 $p_k$ 上的单个频谱槽承载的速率 $\sigma_k$ (正实数)。此处 $C_s$ 为频谱槽容量。然后，根据路径中链路间的频谱槽占用情况构建 $[U_k^r]_{H \times |C|}$ ，记录 $p_k$ 中每跳链路 $h$ 的频谱占用情况，作为确认最优路由和服务窗口的基础，如式(14)所示，其中 $H$ 为路径的跳数， $|C|$ 为每跳链路的频谱槽数，元素 $u_{h,c}^{r,k}$ 为二值变量，若 $p_k$ 中每跳链路 $h$ 的第 $c$ 位频谱槽被占用，则 $u_{h,c}^{r,o} = 1$ ；否则， $u_{h,c}^{r,o} = 0$ 。

$$\sigma_k = C_s \cdot \log_2 M_k, \forall p_k \in P_K \quad (13)$$

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

$$[S_k^r]_{1 \times |C|} = \prod_{h \in p_k} [U_k^r]_{H \times |C|} = [\mu_1^r \quad \mu_2^r \quad \cdots \quad \mu_{|C|}^r] \quad (15)$$

$$n_{b,e}^k = e - b + 1, \forall B_{b,e}^k \in p_k, \forall p_k \in P_K \quad (16)$$

$$v_{b,e}^k = n_{b,e}^k \cdot \sigma_k \quad (17)$$

$$\tau_{b,e}^k = (v_r - v_{b,e}^k) / \sigma_k \quad (18)$$

通过式(15)得出每条路径的频谱占用结果，其中， $[S_k^r]_{1 \times |C|}$ 标记 $p_k$ 的频谱占用情况，其元素 $\mu_c^{r,k}$ 为二值变量，是 $[U_k^r]_{H \times |C|}$ 中每列元素或运算的结果，若 $p_k$ 的第 $c$ 位频谱槽被占用，则 $\mu_c^{r,k} = 1$ ；否则， $\mu_c^{r,k} = 0$ 。由此计算每条路径的连续频谱槽窗口 $B_{b,e}^k$ ，该窗口的首、末位序号分别是 $b$ 和 $e$ ，则 $[b - \tau_{b,e}^k, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^k]$ 分别表示紧邻 $B_{b,e}^k$ 的左、右侧频谱区间。然后，通过式(16)和式(17)计算不同 $B_{b,e}^k$ 承载的速率 $v_{b,e}^k$ ，其中 $n_{b,e}^k$ 为正整数，是 $B_{b,e}^k$ 占用的频谱槽数。式(18)计算每个 $B_{b,e}^k$ 为满足 $r$ 仍需要的频谱槽数 $\tau_{b,e}^k$ 。当有 $\tau_{b,e}^k \leq 0$ 时，说明存在可为 $r$ 直接分配频谱的空闲 $B_{b,e}^k$ 。如果存在多个 $\tau_{b,e}^k$ 满足 $\tau_{b,e}^k \leq 0$ ，将它们按照调制等级从高到低、 $\tau_{b,e}^k$ 值由大到小的顺序放入备选窗口堆栈 $\Theta_{win}^r$ ，并从栈顶析出 $B_{b,e}^k$ (top)为 $r$ 分配频谱(从 $B_{b,e}^k$ (top)的 $b$ 位开始分配)。

(2) 最优DS窗口选取：通过自适应调制RSA若

只有 $\tau_{b,e}^k > 0$ ，则 $r$ 面临阻塞风险。首先，判别每个 $B_{b,e}^k$ 的备选频谱区间 $[b - \tau_{b,e}^k, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^k]$ ，并比较区间内紧邻 $B_{b,e}^k$ 的已建业务连接 $r'$ 与新业务 $r$ 的优先级 $o_r$ 高低。 $o_r$ 较低的 $r'$ 作为降级的备选项，可求出 $B_{b,e}^k$ 的临近区间内可降级的业务 $r'$ 减少的速率 $\chi_{r'}$ 。

$$\chi_{r'} = v_{r'} \cdot \alpha_{r'}, \forall r', \forall B_{b,e}^k \quad (19)$$

在式(20)和式(21)中， $\tau_{b,e}^{l,h}$ 和 $\tau_{b,e}^{r,h}$ 分别表示 $B_{b,e}^k$ 所在路径中，各跳链路 $h$ 可空闲出的左侧 $[b - \tau_{b,e}^k, b)$ 范围内、右侧 $(e, e + \tau_{b,e}^k]$ 范围内临近区间的频谱槽数。在保证 $\alpha_{r'} \leq \bar{\alpha}_{r'}$ 的前提下，求得每个 $B_{b,e}^k$ 所在的各跳链路 $h$ 中，左、右区间内分别可空闲出的频谱槽数 $\tau_{b,e}^l$ 和 $\tau_{b,e}^r$ 为

$$\tau_{b,e}^l = \min \left\{ \tau_{b,e}^{l,1}, \tau_{b,e}^{l,2}, \cdots, \tau_{b,e}^{l,h} \right\}, \quad \forall B_{b,e}^k \in p_k, \forall p_k \in P_K \quad (20)$$

$$\tau_{b,e}^r = \min \left\{ \tau_{b,e}^{r,1}, \tau_{b,e}^{r,2}, \cdots, \tau_{b,e}^{r,h} \right\}, \quad \forall B_{b,e}^k \in p_k, \forall p_k \in P_K \quad (21)$$

随后，通过式(22)筛选出可容纳 $r$ 的所有 $B_{b,e}^k$ ，并放入备选集合 $\gamma$ 中。若有 $B_{b,e}^k$ 满足式(22)内的2或3个条件，分别计算不同区间组合的 $w_{sum}^{B_{b,e}^k}$ ，并取 $\text{Min}_B \left\{ w_{sum}^{B_{b,e}^k} \right\}$ ，确定该值对应的区间为此 $B_{b,e}^k$ 的DS窗口。通过式(23)和式(24)计算 $\gamma$ 中所有 $B_{b,e}^k$ 的受损收益 $w_{sum}^{B_{b,e}^k}$ ，然后用式(25)求出最小DS损失值 $w_{min}$ ，并将其对应的 $B_{b,e}^k$ 作为放置 $r$ 的最优DS窗口。

$$\gamma = \left\{ B_{b,e}^k \left[ \left[ \tau_{b,e}^l \geq \tau_{b,e}^k \right] \right] \left[ \left[ \tau_{b,e}^r \geq \tau_{b,e}^k \right] \right] \left[ \left[ \left( \tau_{b,e}^l + \tau_{b,e}^r \right) \geq \tau_{b,e}^k \right] \right] \right\} \quad (22)$$

$$w_{r'}^{B_{b,e}^k} = \chi_{r'} \cdot o_{r'}, \forall r', \forall B_{b,e}^k \in \gamma \quad (23)$$

$$w_{sum}^{B_{b,e}^k} = \sum_{r \in \psi} w_r^{B_{b,e}^k}, \forall B_{b,e}^k \in \gamma \quad (24)$$

$$w_{min} = \min \left\{ w_{sum}^{B_{b,e}^k}, w_{sum}^{B_{b,e}^k}, \cdots, w_{sum}^{B_{b,e}^k} \right\}, \forall B_{b,e}^k \in \gamma \quad (25)$$

### 3.2 算法步骤

DDSA-DDAM为动态算法，其伪代码如表1所示。针对新业务 $r$ ，首先根据式(14)计算路径集合 $P_K$ 。对 $P_K$ 中的 $K$ 条路径分配最优调制方式 $M_k$ ，通过式(13)计算出每个频谱槽承载的速率 $\sigma_k$ (第3, 第4行)。然后，构建 $[U_k^r]_{H \times |C|}$ 并通过式(15)得出每条路径的频谱槽占用情况 $[S_k^r]_{1 \times |C|}$ ，由此计算出每条路径的 $B_{b,e}^k$ ，放入集合 $\Theta$ 中(第5—第8行)。通过式

表1 DRSA-DDAM算法伪代码

---

算法 DRSA-DDAM

输入:  $\psi, G(N, E, C)$ .

输出: blocking rate, average slot/demand, net profit.

(1) **for**  $\psi \neq \emptyset$  **do**

(2)  $r \leftarrow \psi.\text{top}()$ , block\_num $\leftarrow$ 0, slot\_num $\leftarrow$ 0, success\_num $\leftarrow$ 0;

(3)  $G \leftarrow G$  updated according to  $[U_k^r]_{H \times |C|}$  in Eq. 14;

(4)  $P_K = \{p_k\} \leftarrow K - \text{Shortest}(G, r)$  and Eq. 13;

(5) **if**  $P_K \neq \emptyset$  **then**  $[S_k^r]_{1 \times |C|} \leftarrow \{[U_k^r]_{H \times |C|}$  according to Eq. 15};

(6) **for**  $\forall p_k \in P_K$  **do** search  $B_{b,e}^k$  in  $p_k$ ;  $\Theta.\text{push}(B_{b,e}^k)$ ;

(7) **end for**

(8) **end if**

(9) **if**  $\Theta \neq \emptyset$  **then**

(10) **for**  $\forall B_{b,e}^k \in \Theta$  **do**  $v_{b,e}^k \leftarrow$  Eq. 17( $B_{b,e}^k$ ),  $\tau_{b,e}^k \leftarrow$  Eq. 18( $v_{b,e}^k$ );

(11) **end for**

(12) **else if**  $\Theta = \emptyset$  **then** block  $r$ , block\_num++;  $\psi.\text{pop}()$ ;

(13) **break**;

(14) **end if**

(15)  $\Theta \leftarrow \{\Theta, \text{descending order}, (M_k, \tau_{b,e}^k)\}$ ;

(16) **if**  $\Theta.\text{top}().\tau_{b,e}^k \leq 0$  **then**

(17) Serve-win $\leftarrow$ position[ $\Theta.\text{top}()$ ]; allocate resource to  $r$ ;

(18) slot\_num +=  $r.\text{allocate}(\text{slot})$ , success\_num++;

(19) net profit +=  $r.\text{profit}$ ;  $\psi.\text{pop}()$ ; **break**;

(20) **else if**  $\Theta.\text{top}().\tau_{b,e}^k > 0$  **then**

(21) **for**  $\forall B_{b,e}^k \in \Theta$  **do**

(22) compare  $o_{r'}$  for  $r'$  in  $[b - \tau_{b,e}^k, b) \cup (e, e + \tau_{b,e}^k]$  with  $o_r$ ;

(23) **if each**  $o_{r'} \geq o_r$  **then** remove  $B_{b,e}^k$  from  $\Theta$ ; **continue**;

(24) **else then** calculate  $\tau_{b,e}^{l,h}$  and  $\tau_{b,e}^{r,h}$  of each  $h \in \{p_k\}$ ;

(25) **end if**

(26)  $\tau_{b,e}^l \leftarrow$  Eq. 20 and  $\tau_{b,e}^r \leftarrow$  Eq. 21;  $\gamma \leftarrow$  Eq. 22( $\tau_{b,e}^l, \tau_{b,e}^r$ );

(27) **end for**

(28) **if**  $\gamma \neq \emptyset$  **then**

(29) **for**  $\forall B_{b,e}^k \in \gamma$  **do**  $w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^k} \leftarrow$  {Eq. 23 and Eq. 24};

(30) **end for**

(31)  $w_{\text{min}} \leftarrow$  Eq. 25( $\gamma$ ); DS-win $\leftarrow$ place [ $B_{b,e}^k(w_{\text{min}})$ ];

(32) DS( $r'$ ) for  $r$ ; allocate resource for  $r$ ;

(33) net profit +=  $r.\text{profit}$ ;

(34) slot\_num +=  $r.\text{allocate}(\text{slot})$ , success\_num++;

(35) **else then** block  $r$ , block\_num++; **break**;

(36) **end if**

(37) **end for**

(38) **return** blocking rate $\leftarrow$ block\_num/ $|\psi|$ , net profit and average slot/demand $\leftarrow$ slot\_num/success\_num;

---

(17)计算 $\Theta$ 中每个 $B_{b,e}^k$ 的承载速率 $v_{b,e}^k$ ;再根据 $v_r$ ,通过式(18)计算出为满足 $r$ 还需要的频谱槽数 $\tau_{b,e}^k$ 。按照调制等级由高到低和 $\tau_{b,e}^k$ 值从大到小的顺序将 $\Theta$ 中的 $B_{b,e}^k$ 排序(第9—第14行)。若有 $\tau_{b,e}^k \leq 0$ ,则选择调制等级最高且最大值的 $\tau_{b,e}^k$ ,对应的 $B_{b,e}^k$ 作为服务窗口(第15—第18行)。

若 $\Theta$ 中只存在 $\tau_{b,e}^k > 0$ ,则计算 $\Theta$ 中每个 $B_{b,e}^k$ 的临近区间 $[b - \tau_{b,e}^k, b)$ 和 $(e, e + \tau_{b,e}^k]$ ,并判断区间内紧邻 $B_{b,e}^k$ 的在线业务 $r'$ 的优先级是否低于 $r$ 。若高于 $r$ 的优先级,则在 $\Theta$ 中删除对应的 $B_{b,e}^k$ ;若低于 $r$ 的优先级,调整 $\alpha_{r'}$ 并计算区间内每跳链路的 $\tau_{b,e}^{l,h}$ 和 $\tau_{b,e}^{r,h}$ (第19—第24行)。然后,根据式(20)和式(21)计算每个 $B_{b,e}^k$ 的 $\tau_{b,e}^l, \tau_{b,e}^r$ ,并判断 $\tau_{b,e}^l, \tau_{b,e}^r$ 是否满足式(22)(第25行)。从 $\Theta$ 中删除不满足式(22)的 $B_{b,e}^k$ 。最后,根据式(23)和式(24)计算出 $\Theta$ 中所有 $B_{b,e}^k$ 的降级损失 $w_{\text{sum}}^{B_{b,e}^k}$ ,并通过式(25)筛选出降级损失最小的 $B_{b,e}^k$ ,将它及其临近区间作为最优DS窗口,然后释放窗口内可降级 $r'$ 的部分带宽,为 $r$ 分配频谱(第27—第34行)。

$K$ 路由算法及调整链路权值的时间复杂度为 $O(K \cdot |N|^2 + K \cdot |E|)$ 。每条链路中存在 $|C|$ 个频谱槽,因此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 $|E|$ ,则最优降级窗口选取与最小业务降级代价计算的复杂度为 $O(|C|)$ 和 $O(|E| \cdot |C|)$ ,则DS操作的复杂度为 $O(K \cdot |C| + |C| + |E| \cdot |C|) = O[(K + |E| + 1) \cdot |C|]$ 。经化简,该算法的时间复杂度约为 $O[K \cdot (|N|^2 + |E| + |C|) + |E| \cdot |C|]$ 。

### 3.3 算法示例

业务 $r(o_r = 4, v_r = 50 \text{ bps})$ 到达如图1(a)所示的拓扑,图1(b),图1(c)为当前频谱占用情况,不同颜色代表不同业务。 $r$ 有两条备选路径 $p_1$ 和 $p_2$ 。 $p_1$ 和 $p_2$ 无合适的空闲频谱,但均存在可降级的频段,即 $\tau_{b,e}^k > 0$ 。

图1(b)中有 $B_{1,1}^1, B_{4,4}^1$ ,图1(c)中有 $B_{2,3}^2$ 。 $r$ 在 $p_1$ 和 $p_2$ 的调制方式分别为QPSK, BPSK,即 $M_1 = 4, M_2 = 2$ ,则 $\tau_{1,1}^1 = 1, \tau_{4,4}^1 = 1, \tau_{2,3}^2 = 2$ 。 $B_{1,1}^1$ 只须考虑区间(1,2],其中 $l_1$ 的2号频谱槽位置被优先级III的业务占用,故可降级出频谱槽数 $\tau_{1,1}^{r,1} = 1(\alpha_{r'} = 0.5)$ 。 $l_2$ 的2号频谱槽与 $l_1$ 的2号频谱槽承载同一业务,故 $\tau_{1,1}^{r,2} = 1(\alpha_{r'} = 0.5)$ ,即有 $\tau_{1,1}^r = \text{Min}\{1, 1\} = 1$ ,满足式(22)条件的 $\tau_{1,1}^r = \tau_{1,1}^1 = 1$ ,可计算降级损失 $w_{\text{sum}}^{B_{1,1}^1} = 12.5 \times 3 = 37.5$ 。同理,

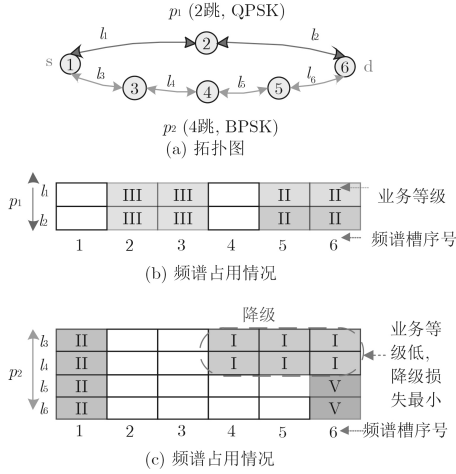


图1 DRSA-DDAM算法示例

$B_{4,4}^1$  的区间[3,4)内  $\tau_{4,4}^l = 1$ ，降级损失为  $w_{\text{sum}}^{B_{4,4}^1} = w_{\text{sum}}^{B_{1,1}^1} = 37.5$ 。而(4,5]内  $\tau_{4,4}^r = 1$ ， $w_{\text{sum}}^{B_{4,4}^1} = 12.5 \times 2 + 12.5 \times 2 = 50$ 。根据式(25)，可选择(1,2]或[3,4)作为备选DS窗口。

另外，虽然紧邻  $B_{2,3}^2$  的1号频谱槽被低优先级业务占用，但为使业务正常运行，则  $\tau_{2,3}^l = 0$ 。所以只需考虑  $B_{2,3}^2$  的(3,5]内是否存在可降级业务。经计算， $\tau_{2,3}^r = 2(a_{r_1} = 0.67)$ ，且  $w_{\text{sum}}^{B_{2,3}^2} = 25.0 \times 1 = 25.0$ ，所以3个空闲频谱块  $B_{1,1}^1, B_{4,4}^1, B_{2,3}^2$  的  $w_{\text{min}} = \{37.5, 37.5, 25.0\} = 25.0$ ，应选  $B_{2,3}^2 \cup (3,5]$  作为最优DS窗口。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真设置

本节采用VC++搭建仿真平台。拓扑采用NSFNET<sup>[14]</sup>，如图2所示。每根光纤链路的频谱槽数为358(C-band)，频谱槽带宽为12.5 GHz。业务请求支持5种优先级(1级最低，5级最高)，1~5级分别对应速率10 Gb/s, 40 Gb/s, 100 Gb/s, 200 Gb/s, 400 Gb/s，业务随机分配优先级。业务请求按参数为 $\lambda$ 的泊松分布到达网络，业务的持续时间服从均值为  $1/\mu$  的指数分布，全网的总负载为  $\lambda/\mu$  Erlang，每次产生  $10^6$  次业务请求。调制模式与数据率和传输距离的关系<sup>[15]</sup>如表2所示。采用自适应调制路由与频谱分配(Adaptive Modulation, Routing and Spectrum Assignment, AM-RSA)算法<sup>[7]</sup>、重路由与频谱分配(Lightpath Rerouting and Spectrum Assignment, LP-RSA)算法<sup>[6]</sup>和QADS算法<sup>[12]</sup>作为对比算法。

$$\rho_{\text{net}} = \sum_{r \in \psi} \rho_r = \sum_{r \in \psi} v_r \cdot o_r \cdot (1 - \alpha_r) \quad (26)$$

仿真指标采用业务阻塞率  $\theta_{\text{blk}}$ ，网络收益  $\rho_{\text{net}}$ ，

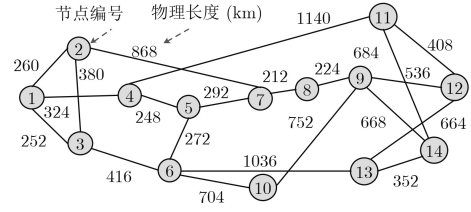


图2 NSFNET网络

表2 调制模式与数据率和传输距离的关系

调制模式	BPSK	QPSK	8QAM	16QAM
调制等级	2	4	8	16
Bit/符号	1	2	3	4
频谱槽带宽(GHz)	12.5	12.5	12.5	12.5
数据率(Gbps)	12.5	25.0	37.5	50.0
传输距离(km)	9600	4800	2400	1200

降级服务成功率  $\theta_{\text{deg}}$  和降级业务等级占比。  $\theta_{\text{blk}}$  为被阻塞的业务数  $|\psi_{\text{blk}}|$  与业务总数  $|\psi|$  的比值。  $\rho_{\text{net}}$  表示成功业务连接的收益和，即式(26)。其中， $\rho_r$  为单个业务收益；此外，为降低统计难度，根据第2节中的式(8)和式(9)，将  $r$  采用16QAM时，业务占用单个频谱槽的费用作为收益的基本单位 profit-unit， $o_r \cdot (1 - \alpha_r)$  为权值，即等级越高、降级系数越小，收益越大。  $\theta_{\text{deg}}$  为通过成功降级而接纳的业务数  $|\psi_{\text{deg}}^{\text{scf}}|$  与需通过降级才能被接收的业务总数  $|\psi_{\text{deg}}^{\text{req}}|$  的比值。此值越大，通过降级已建业务连接来接纳新到高优先级业务请求越多，DS策略越有效。

### 4.2 仿真结果与分析

图3对比了业务阻塞率  $\theta_{\text{blk}}$ 。可看出，QADS的  $\theta_{\text{blk}}$  最高，DRSA-DDAM的最低。QADS与DRSA-DDAM在阻塞率上的差值均值在17.6%左右。这是由于QADS在轻负载时，将业务的调制等级默认为BPSK，导致前期业务连接占用大量频谱，即使在后续业务即将受阻时提高调制等级，但在频谱资源节约方面收效也有限。而DRSA-DDAM算法将自适应调制贯穿始终。此外，DRSA-DDAM算法基于  $K$  路由算法和最小DS损失机制，在多条候选路径上迭代对比备选频谱块，选取最佳DS窗口，也有利于减少频谱浪费。

图4对比了网络收益  $\rho_{\text{net}}$ 。AM-RSA未融合DS技术，式(26)中的降级系数设为0。LP-RSA尽管在业务速率上没有被降级，但带来了替代路由查找和切换延时，因此，式(26)中降级系数设为  $\alpha = \beta/\Delta t$ ，其中  $\beta$  为重路由业务带来的延迟， $\Delta t$  为业务持续时间。可看出，DRSA-DDAM的  $\rho_{\text{net}}$  最高，QADS最低。这是因为全网业务收益与网络阻塞率、业务等级和DS程度有关，即阻塞率越低、

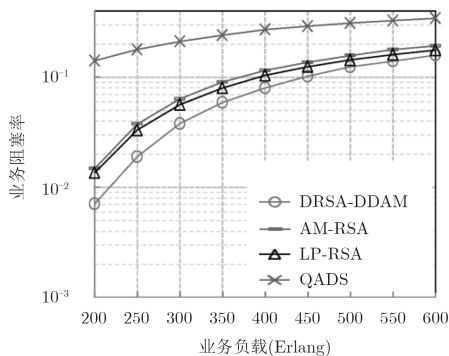


图3 4种算法的业务阻塞率

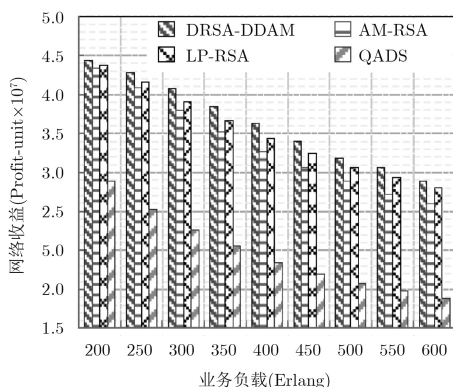


图4 4种算法的网络收益

所容纳的业务等级越高、降级程度越低，业务收益越高。QADS和AM-RSA阻塞率较高，故 $\rho_{net}$ 较低。LP-RSA阻塞率比DRSA-DDAM高，其在降级业务的选取策略也缺乏等级比较，故 $\rho_{net}$ 较DRSA-DDAM略低。

图5给出了QADS, DRSA-DDAM和LP-RSA的降级服务成功率 $\theta_{deg}$ (AM-RSA不支持降级)。业务负载的增加导致各算法的 $\theta_{deg}$ 下降，这是由于网络负载增大导致拥塞，即使采用DS，也难以找到合适的频谱块接纳新业务。相较于QADS, DRSA-DDAM提高的 $\theta_{deg}$ 可达约17.9%，即使在最高负载下，也可提高约0.4%。这是由于QADS通过提高业务调制等级来降级服务，在网络拥塞时，很难找到较短的路径来提高调制等级；此外，LP-RSA中的重路由业务也难于找到替代路由，易导致2次阻塞和DS失败。而DRSA-DDAM采用最优DS窗口选取和多个频段整合的方式，即使在重负载下， $\theta_{deg}$ 也优于另外两种算法。

图6中对比了低、中、高业务负载下，DRSA-DDAM和QADS中各个等级的业务被降级的比例情况。两种算法均倾向于降级低等级业务(等级2和等级1)，而尽量保障高等级业务。DRSA-DDAM所降低的高等级业务比例更低，最大可减少16.5%左右(200 Erlang, 等级4和等级3)。这是由于DRSA-

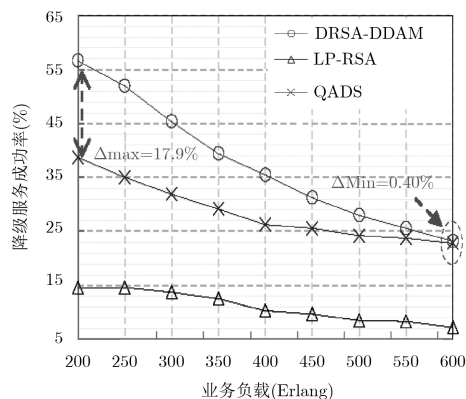


图5 DRSA-DDAM, QADS及LP-RSA的降级服务成功率

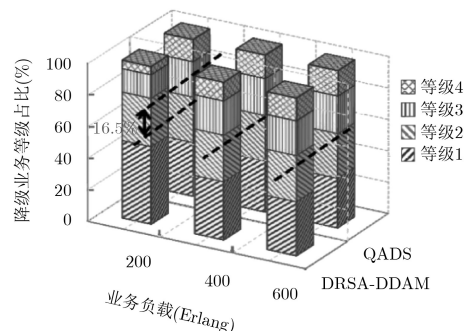


图6 DRSA-DDAM与QADS的降级业务等级占比

DDAM基于最小降级业务收益损失策略来选择最优DS窗口，该窗口通常会选择低等级业务附近，并且对于窗口两侧已建业务连接的选取也严格遵循区分业务等级的机制。

## 5 结束语

本文针对弹性光网络的面向降级服务算法中出现的降级导致业务收益下降、资源分配不公和过度降级等问题，抽象出以最小化频谱消耗和最小化降级服务等级与频次作为联合优化目标的RSA问题的MILP模型。随后，提出一种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。该算法赋予业务多种优先级以区分处理，还结合了自适应调制技术和降级服务技术，同时设计了降级损失函数及降级窗口选择策略。仿真结果表明该算法取得了较低的业务阻塞率、较高的网络收益和降级服务成功率。

## 参考文献

- [1] TALEBI S, ALAM F, KATIB I, *et al.* Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey[J]. *Optical Switching and Networking*, 2014, 13(9): 34-48. doi: 10.1016/j.osn.2014.02.003.
- [2] 刘焕淋, 杜君丹, 易鹏飞, 等. 弹性光网络中面向可靠性的链路故障概率保护与保护资源重配置策略[J]. 电子与信息学报,

- 2017, 39(11): 2579–2586. doi: [10.11999/JEIT170150](https://doi.org/10.11999/JEIT170150).
- LIU Huanlin, DU Jundan, YI Pengfei, *et al.* Reliability-oriented links failure probability protection and backup reprovisioning strategy for elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(11): 2579–2586. doi: [10.11999/JEIT170150](https://doi.org/10.11999/JEIT170150).
- [3] 刘焕淋, 易鹏飞, 张明佳, 等. 最小故障风险损失的弹性光网络多链路故障概率保护策略[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1819–1825. doi: [10.11999/JEIT161159](https://doi.org/10.11999/JEIT161159).
- LIU Huanlin, YI Pengfei, ZHANG Mmingjia, *et al.* Multi-link failure probability protection strategy based on minimum fault risk loss in elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1819–1825. doi: [10.11999/JEIT161159](https://doi.org/10.11999/JEIT161159).
- [4] ZHU Ruijie, JUE J P, YOUSEFPOUR A, *et al.* Multi-path fragmentation-aware advance reservation provisioning in elastic optical networks[C]. *IEEE Global Communications Conference*, Washington, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2016.7842011](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7842011).
- [5] 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](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2739750).
- [6] 鞠卫国, 黄善国, 徐珍珍, 等. 面向频谱融合的路由频谱分配和碎片整理算法[J]. *光子学报*, 2013, 42(8): 929–935. doi: [10.3788/gzxb20134208.0929](https://doi.org/10.3788/gzxb20134208.0929).
- JU Weiguo, HUANG Shanguo, XU Zhenzhen, *et al.* Spectrum fusion oriented routing and spectrum assignment algorithm and spectrum defragmentation algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(8): 929–935. doi: [10.3788/gzxb20134208.0929](https://doi.org/10.3788/gzxb20134208.0929).
- [7] TALEBI S and ROUSKAS G N. On distance-adaptive routing and spectrum assignment in mesh elastic optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(5): 456–465. doi: [10.1364/JOCN.9.000456](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000456).
- [8] ROBINSON M, MILOSAVLJEVIC M, KOURTESSIS P, *et al.* QoE based holistic traffic engineering in SDN enabled heterogeneous transport networks[C]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, Girona, Spain, 2017: 1–4. doi: [10.1109/ICTON.2017.8024878](https://doi.org/10.1109/ICTON.2017.8024878).
- [9] SAVAS S S, HABIB M F, TOMATORE 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).
- [10] SAVAS S S, HABIB M F, TOMATORE M, *et al.* Exploiting degraded-service tolerance to improve performance of telecom networks[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, San Francisco, USA, 2014: 1–3. doi: [10.1364/OFC.2014.W2A.31](https://doi.org/10.1364/OFC.2014.W2A.31).
- [11] VADREUVU C S K, WANG R, 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).
- [12] ZHONG Zhizhen, LI Jipu, HUA Nan, *et al.* On QoS-assured degraded provisioning in service-differentiated multi-layer elastic optical networks[C]. *IEEE GLOBECOM*, Washington, USA, 2016: 1–5. doi: [10.1109/GLOCOM.2016.7842043](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7842043).
- [13] YEN J Y. Finding the  $k$  shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712–716. doi: [10.1287/MNSC.17.11.712](https://doi.org/10.1287/MNSC.17.11.712).
- [14] GUO Hong, LI Yongcheng, LI Longfei, *et al.* Adaptive modulation and regeneration-aware routing and spectrum assignment in SBPP-based elastic optical Networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1–15. doi: [10.1109/JPHOT.2017.2685418](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2685418).
- [15] 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).
- 于存谦：男，1983年生，博士，讲师，研究方向为光数据中心网络。
- 张黎：女，1992年生，硕士生，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。