

基于最少节点的多跳路由和频谱分配算法

李娜娜¹,宿纪松¹,包博文²,胡劲华¹,任丹萍¹,赵继军¹

(1.河北工程大学 信息与电气工程学院,河北 邯郸 056038; 2.北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室,北京 100876)

摘要:路由、调制和频谱分配(RMSA)已成为提高弹性光网络(EONs)中频谱利用率的主要方法之一。针对 RMSA 的路由选择,提出了一种基于最短距离最少节点的多跳路由、调制和频谱分配(SDLN-MHRMSA)算法。该算法通过多跳路由的光-电-光转换器将最短距离最少节点的路径划分为一定数量的子光路径,然后在每条子光路径上根据距离自适应调制技术为业务请求进行频谱分配。理论分析和仿真结果表明:所提出的算法相较于传统基于最短路径的 RMSA 算法,在阻塞率、频谱利用率方面获得了较优的性能。

关键词:弹性光网络;最少节点;多跳路由;阻塞率;频谱资源利用率

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)09-0013-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-hop routing and spectrum allocation algorithm based on least nodes

LI Nana¹, SU Jisong¹, BAO Bowen², HU Jinhua¹, REN Danping¹, ZHAO Jijun¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China; 2. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Routing, modulation and spectrum allocation (RMSA) has become one of the main methods to improve the utilization of spectrum in elastic optical networks (EONs). Aiming at the routing of RMSA, a multi-hop routing, modulation and spectrum allocation(SDLN-MHRMSA) algorithm based on the shortest distance and the least nodes is proposed. The algorithm divides the path of the shortest distance and the least nodes into a certain number of sub optical paths through the optical electric optical converter with multi-hop routing, and then allocates the spectrum for the traffic request according to the distance adaptive modulation technology on each sub optical path. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed algorithm has better performance in blocking rate and spectrum resource utilization than the traditional RMSA algorithm based on the shortest path.

Key words: elastic optical networks; least nodes; multi-hop routing; blocking probability; spectrum resource utilization

0 引言

弹性光网络(EONs)作为一种高频谱效率和可扩展的光传送网络体系架构,能够提供子波长业务通道

收稿时间:2020-02-13。

基金项目:国家自然科学基金(61905060)资助;河北省自然科学基金(F2019402240、F2018402198)资助;河北省教育厅研究生创新项目(CXZZSS2019072)资助。

作者简介:李娜娜(1993—),女,河北邯郸人,硕士研究生,现就读于河北工程大学信息与电气工程学院,主要研究方向为下一代光网络与宽带接入。曾荣获研究生国家奖学金、研究生一等学业奖学金。



和超波长业务通道,满足动态高效的带宽服务需求^[1]。EONs 中为业务请求分配资源时,需要满足频谱连续性、频谱邻接性和频谱冲突保护性限制条件^[2]。EONs 中光路的建立在空间与时间上服从随机分布,因此随着网络中光路的长期动态拆建,频谱资源被反复分配与释放,网络中可用的频谱资源呈现出凌乱无序的状态,从而形成了大量的频谱碎片^[3]。由于这些频谱碎片在频域上不具备连续性,因而难以被接下来的业务请求利用,从而严重降低了网络频谱利用率^[4]。因此,EONs 面临的当务之急是在满足业务传输质量的前提下提高网络的频谱利用率。其中,路由、调制和频谱分配(RMSA)问题是需要解决的关键问题之一。为此,国

李娜娜,宿纪松,包博文,等:基于最少节点的多跳路由和频谱分配算法

内外众多研究学者在 EONs 引入了基于距离自适应调制技术的多跳路由。Lucas R. Costa 等人^[5]提出的多跳路由 RMSA 算法,在沿传输路径的所有链路上为业务请求时均选择相同的调制格式,从而限制了频谱利用率的提高。文献[6]作者提出一种基于多跳路由的 RSA (DA-RSA)算法,将整个长路由划分为与链路数量相等的多段子光路径,并根据每条子光路径的实际物理距离为业务请求自适应地选择合适的调制格式。然而,DA-RSA 算法始终选择最短路径进行业务请求的传输,而最短路径上若有较多条链路数量,则会使全局网络的频谱资源消耗更多,因此最短路径并不是全网频谱资源消耗最少的路由。

本文提出一种基于最短路径的、最少节点的多跳 RMSA 算法,该算法通过选择最少节点的路由且在相同节点数前提下选择距离之和最小的最短路径,减少全局网络频谱的资源消耗,从而降低网络阻塞率。

1 系统描述

1.1 网络模型

本文将 EONs 的物理拓扑建模为一个有向辅助图 $G(V, E, S, D)$ 。其中, V 代表网络中节点数目的集合; E 代表网络中光纤链路的集合,每条光纤链路可以最多提供 S 个带宽频隙; D 是网络中光纤链路长度的集合。每一条光纤链路均具备有限数目的频隙资源,且可以根据调制格式变化,实时选择每个频隙的传输容量^[7]。假设每个频隙的传输容量是 $M \times C_{\text{slot}}$, M 代表业务请求采用的调制阶数,其中 $M=1, 2, 3, 4, 5$ 分别对应 BPSK、QPSK、8QAM、16QAM 和 32QAM, C_{slot} 代表 $M=1$ 带宽频隙的信道容量。本文定义矩阵 U_l^i 表示光纤链路上的带宽使用状态,其中 $U_l^i=1$ 表示 l 链路上的第 i 个频隙被占用, $U_l^i=0$ 表示该频隙为空闲状态,并且可以为下一种业务请求服务。

1.2 距离自适应调制技术

为了提高 EONs 中频谱利用率,本文考虑在有向辅助图中采用距离自适应调制技术,并结合多跳路由进行频谱分配。基于距离自适应调制技术的多跳路由可以利用中间节点光-电-光转换,将 1 条光路径分割为多条独立的分段光路,每一条分段光路都可以独立地根据传输距离需求自适应选择合适的调制格式^[8],从而有效节省频谱资源,提高频谱利用率。本文采用 BPSK、QPSK、8QAM、16QAM 和 32QAM 调制格式,设置每一个频隙的信道容量为 12.5 GHz,每一个调制格

表 1 调制格式频谱效率与最长传输距离

调制格式	频谱效率/(b·s ⁻¹ ·Hz)	最长传输距离/km
BPSK	1	4800
QPSK	2	2400
8QAM	3	1200
16QAM	4	600
32QAM	5	300

式对应的频谱效率、传输距离如表 1 所示。业务请求在每段子光路所需的频隙数量可以根据带宽需求 B 、所采用的调制格式中频谱效率 m 以及频隙的固定容量来计算,如式(1)所示。

$$B_m = \left\lceil \frac{B}{m \times 12.5} \right\rceil \quad (1)$$

其中, B_m 表示业务请求采用调制格式频谱效率为 m 时光路所需的频隙数量。

2 SDLN-MHRMSA 算法

基于距离自适应调制技术的多跳路由,本文提出一种基于最短距离最少节点的多跳路由、调制和频谱分配 (SDLN-MHRMSA) 算法,该算法进一步解决了 RMSA 中的路由选择问题,从而减少全局网络频谱资源的消耗。SDLN-MHRMSA 算法首先根据源节点、目的节点为业务请求选择最少节点路由,在相同节点数前提下选择距离之和最小的最短路径。该算法路由选取流程图如图 1 所示。然后通过多跳路由的中间节点

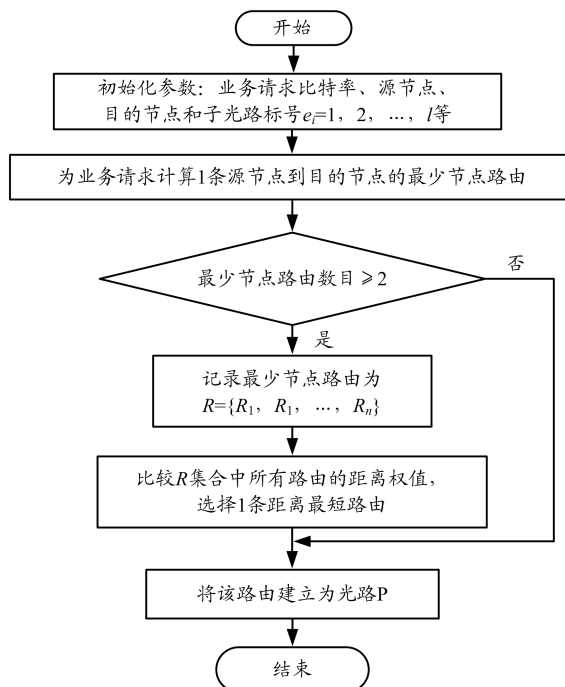


图 1 SDLN-MHRMSA 算法路由选取流程图

将整个光路分为与链路数量相同的多段独立的子光路,并且根据距离自适应调制技术在每条子光路径上为业务请求选择合适的调制格式进行频谱分配,其频谱分配流程图如图2所示。

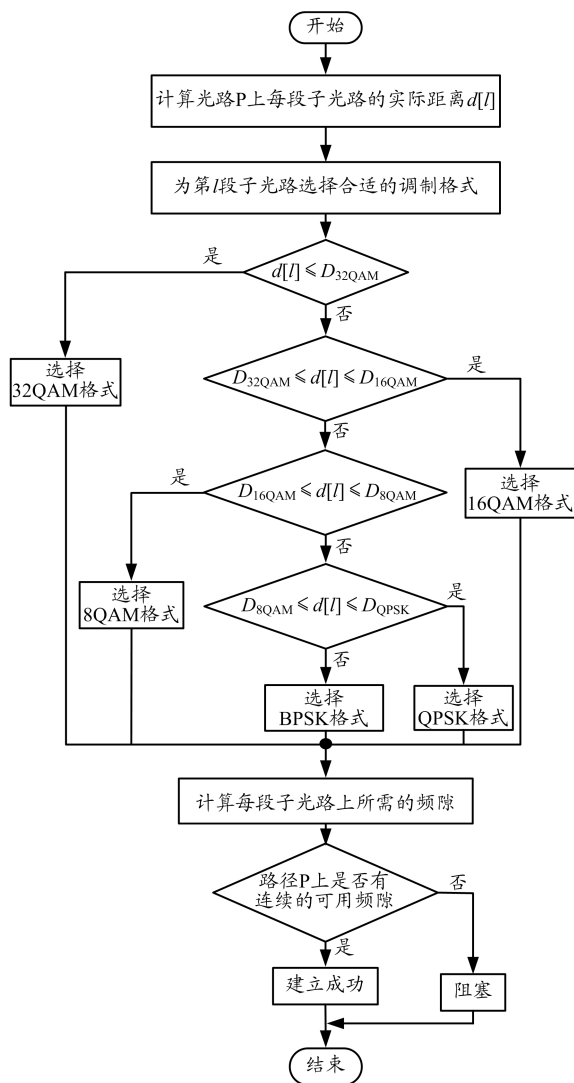
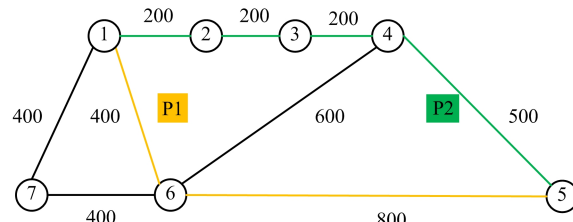


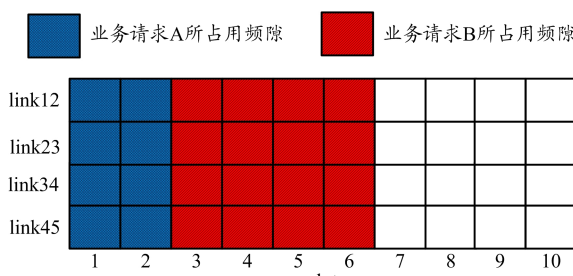
图2 SDLN-MHRMSA 算法频谱分配流程图

2种算法的资源利用情况示意图如图3所示。本文假设2个业务请求,A业务量为70 Gb/s,B业务量为200 Gb/s,从源节点1到目的节点5,假设每条链路上有10个频隙,且当前链路上的频谱资源均为空闲频隙。该举例中频谱分配采用首次命中算法,且不考虑保护带宽。拓扑图如图3(a)所示,该图中有7个节点,9条链路,链路上赋值链路距离。传统的DA-RSA算法为业务请求选择的最短路由为P2,其频谱分配情况如图3(b)所示。业务请求的频谱分配情况如表2所示,可以看出DA-RSA算法中业务A和B分别占用8和16个频隙。相反,本文所提出的SDLN-MHRMSA

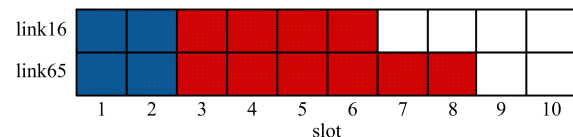
算法为业务请求选择最少节点的路由P1,其频谱分配如图3(c)所示,由表2可知,业务A和B分别占用4和10个频隙。因此,相比于传统的DA-RSA算法,本文提出的SDLN-MHRMSA算法不仅降低阻塞率,而且还能提高全网的频谱利用率。



(a) 简单拓扑图 (单位: km)



(b) DA-RSA



(c) SDLN-MHRMSA

图3 资源利用情况对比

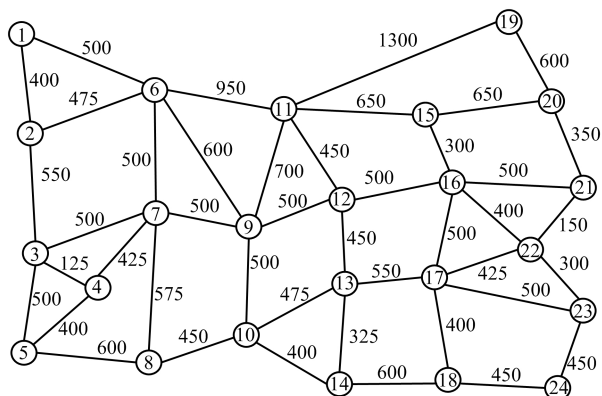
表2 业务请求的频谱分配

业务请求	频谱分配算法	光路	调制格式	所需频隙数目/个	所需频隙总数/个
A	DA-RSA	link12	32QAM	2	8
		link23	32QAM	2	
		link34	32QAM	2	
		link45	16QAM	2	
	SDLN-MHRMSA	link16	16QAM	2	4
		link65	8QAM	2	
B	DA-RSA	link12	32QAM	4	16
		link23	32QAM	4	
		link34	32QAM	4	
		link45	16QAM	4	
	SDLN-MHRMSA	link16	16QAM	4	10
		link65	8QAM	6	

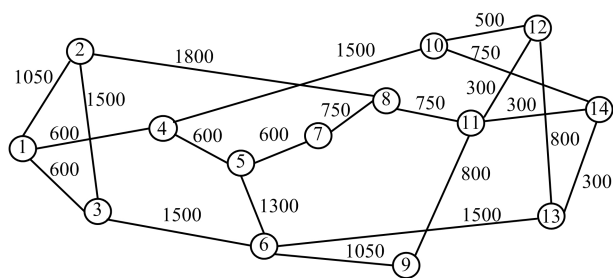
3 仿真分析

3.1 仿真环境

本文通过 24 节点 USNET 和 14 节点 NSFNET 网络拓扑图^[9]对所提出的 SDLN-MHRMSA 算法进行仿真验证,如图 4 所示。在仿真过程中,本文假设网络部署在 C 波段,每条光纤链路上的可分配带宽为 4.475 THz,每个频隙为 12.5 GHz^[6,10],因此每条光纤上有 358 个频隙。仿真中运行 10000 个业务请求,带宽为 0~100 GHz,业务请求到达服从泊松分布,连接请求的保持时间服从负指数分布^[11],保护带宽设置为 2 个频隙的间隔,采用首次命中频谱分配算法。仿真中考虑了 BPSK、QPSK、8QAM、16QAM 和 32QAM 5 种调制格式。



(a) USNET (单位: km)

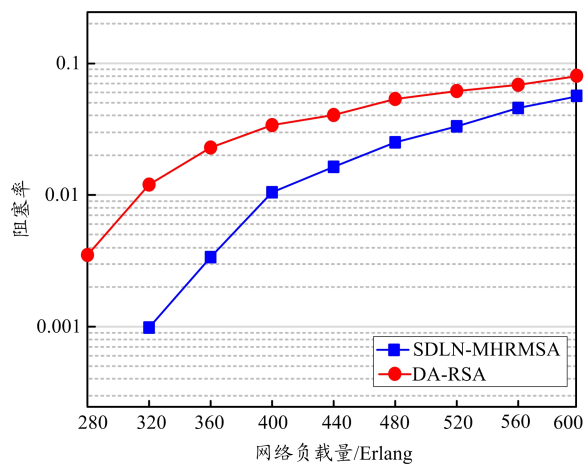


(b) NSFNET (单位: km)

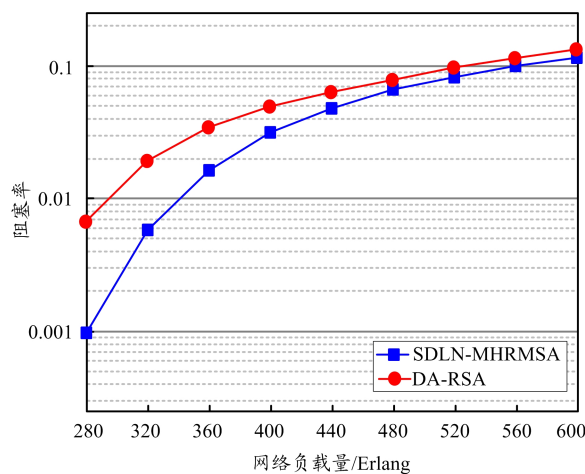
图 4 仿真拓扑

3.2 仿真结果

本文首先对 DA-RSA 算法和 SDLN-MHRMSA 算法在阻塞率方面的性能进行了比较。在 2 种不同网络拓扑下,仿真曲线如图 5 所示。显然,在 USNET 和 NSFNET 网络拓扑中,2 种算法的阻塞率都随着网络负载量的增加而增加。这是因为随着网络负载量的增加,网络单位时间生成的业务请求数目会相应增加,且当网络中每一条链路上所占用的频隙资源趋于饱和时,接下来的业务请求将面临可用频谱资源的短



(a) USNET

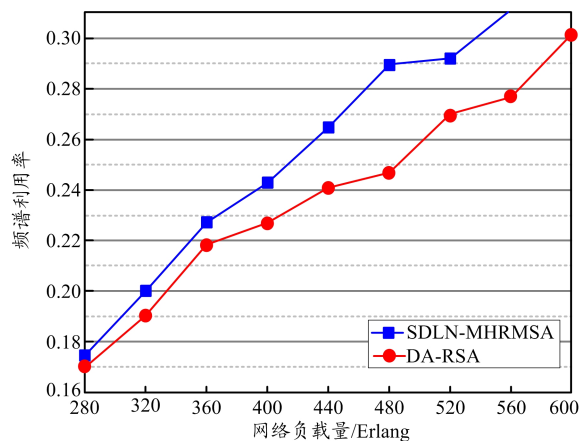


(b) NSFNET

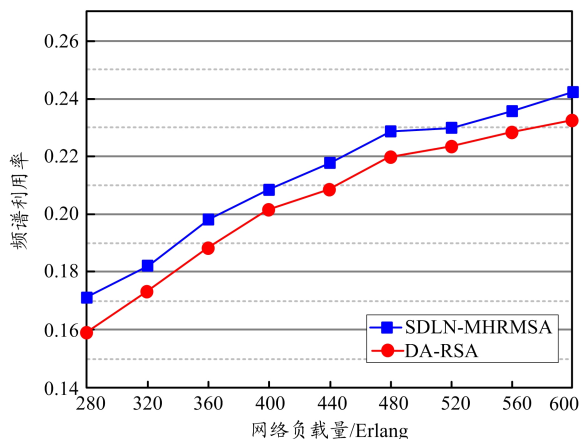
图 5 DA-RSA 和 SDLN-MHRMSA 算法阻塞性能对比

缺。此外,NSFNET 中 2 种算法的阻塞率都比 USNET 中的略高。这是因为 USNET 中的节点数和光纤链路数明显多于 NSFNET 中的相关数量,这会使得 USNET 中业务请求能够有更多频谱资源为业务请求进行分配,从而降低链路上的资源分配压力。此外,在相同仿真条件下,SDLN-MHRMSA 算法的阻塞率总是低于 DA-RSA 算法。这是因为 SDLN-MHRMSA 算法在为业务请求选取路由时,优先为业务请求选择一条最少节点路径,且当多条路径具有相同节点数时则选取距离之和最小的最短路径。通过这种方式,能够使得每一种业务请求在较少的链路上传输,从而减少业务请求在全局网络链路的分布,因此网络可成功接收更多的业务请求,从而使 SDLN-MHRMSA 算法具有较低的阻塞率。

其次,本文验证所提算法在频谱利用率效率方面的优势。DA-RSA 算法和 SDLN-MHRMSA 算法各自的频谱利用率结果如图 6 所示。可以看出,SDLN-



(a) USNET



(b) NSFNET

图6 DA-RSA和SDLN-MHRMSA算法频谱利用率性能对比

MHRMSA算法具有较高的频谱利用率,这是因为该算法总是选择一条节点最少且在相同节点数前提下距离之和最小的最短路径,从而减少业务请求在全局网路中的分布,为下一种业务请求预留更多的频谱资源;而DA-RSA算法总是为业务请求选择最短路径,最短路径并不是经过链路节点最少的路径,从而使得业务请求占用的链路在网络中较分散,当下一业务请求到来时若没有相应的资源进行分配,则会被阻塞,因此降低了频谱资源利用率。此外,USNET拓扑中这2种方案的频谱资源利用率都比NSFNET中的频谱资源利用率稍高。这是因为NSFNET中的光纤链路数量少于USNET中的链路数量,因此在相同的流量负载下,每个光纤链路上为业务请求成功分配的频谱资源会更少。

4 结束语

EONs中引入基于距离自适应调制技术的多跳路

由对网络的资源利用上具有重要意义。在此基础上,本文针对RMSA中的路由选择,提出了一种基于最短距离最少节点的多跳路由与频谱分配算法。该算法考虑全网路由上节点数目,找出网络中的最少节点路由且节点相同情况下选择距离最短的路由,使得传输业务占用最少的频谱资源,从而提高频谱利用率。本文算法在USNET和NSFNET 2个不同规模的网络拓扑环境下进行了仿真实验。仿真结果显示:在阻塞率、频谱利用率的性能方面,本文提出的算法比DA-RSA算法性能改进显著。

参考文献:

- [1] JINNO M, TAKARA H, KOZICKI B, et al. Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 Gb/s to over 400 Gb/s [C]// 34th European Conference on Optical Communication. September 21–25, 2008, Brussels, Belgium. Brussels: IEEE, 2008: 1–2.
- [2] CHATTERJEE B C, SARMA N, OKI E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1776–1800.
- [3] CHATTERJEE B C, BA S, OKI E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 20(1): 183–210.
- [4] ZHAO J, BAO B, YANG H, et al. Holding-time-and impairment-aware shared spectrum allocation in mixed-line-rate elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(6): 322–332.
- [5] COSTA L R, DRUMMOND A C. New distance-adaptive modulation scheme for elastic optical networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 21(2): 282–285.
- [6] ZHAO J, YAO Q, LIU X, et al. Distance-adaptive routing and spectrum assignment in OFDM-based flexible transparent optical networks [J]. Photonic Network Communications, 2014, 27(3): 119–127.
- [7] ZHAO J, BAO B, CHATTERJEE B C, et al. Dispersion based highest-modulation-first last-fit spectrum allocation scheme for elastic optical networks [J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 59907–59916.
- [8] 包博文, 李娜娜, 胡劲华, 等. 弹性光网络中距离自适应调制技术综述 [J]. 光通信技术, 2018, 42(9): 14–17.
- [9] ZHU R, ZHAO Y, YANG H, et al. Dynamic time and spectrum fragmentation-aware service provisioning in elastic optical networks with multi-path routing [J]. Optical Fiber Technology, 2016(32): 13–22.
- [10] YANG H, ZHANG J, JI Y, et al. Performance evaluation of multi-stratum resources integration based on network function virtualization in software defined elastic data center optical interconnect [J]. Optics express, 2015, 23(24): 31192–31205.
- [11] YAO Q, YANG H, XIAO H, et al. A spectrum defragmentation strategy for service differentiation consideration in elastic optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2017(38): 17–23.