

引用本文: 蔡一峰, 蓝求旺, 陈尚君, 等. 一种串扰感知的空分复用弹性光网络频谱分配算法[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 20–24.

一种串扰感知的空分复用弹性光网络频谱分配算法

蔡一峰, 蓝求旺, 陈尚君, 陈鑫, 沈建华*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 在基于多芯光纤(MCF)的空分复用弹性光网络(SDM-EON)中, 针对纤芯间串扰导致的传输信号物理损伤问题, 从频谱分配和纤芯选择角度出发, 提出了一种串扰感知的SDM-EON频谱分配算法。该算法在为业务请求分配频谱资源时通过避免填充相邻纤芯来尽量减少单个请求内部的串扰以及请求与请求之间的串扰。数值仿真结果表明: 在NSFNet和USNet 2种网络拓扑中, 该算法能够在维持较低带宽阻塞率水平的同时有效改善串扰问题。

关键词: 多芯光纤; 空分复用; 弹性光网络; 串扰

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0020-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Crosstalk-aware spectrum allocation algorithm for space-division multiplexing elastic optical networks

CAI Yifeng, LAN Qiuwang, CHEN Shangjun, CHEN Xin, SHEN Jianhua*

(College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In space-division multiplexing elastic optical networks (SDM-EON) based on multicore fiber (MCF), one of the problems is the physical impairment of transmission signals due to inter-core crosstalk. From the perspective of spectrum allocation and core selection, this paper proposes a crosstalk-aware spectrum allocation algorithm for SDM-EON. In this algorithm, when allocating spectrum resources for service requests, crosstalk within a single request and between requests can be minimized by avoiding filling adjacent cores. The numerical simulation results show that the algorithm can effectively improve the crosstalk problem while maintaining a low bandwidth blocking probability in NSFNet and USNet network topologies.

Key words: multicore fiber, space division multiplexing, elastic optical network, crosstalk

0 引言

随着互联网的发展和全球通信的快速增长, 多元化的业务(如网络直播、远程医疗、线上教育和云计算等)对网络的容量和速率的要求越来越高。采用固定频谱栅格和静态分配方式的传统波分复用(WDM)网络已经不再适用。基于光正交频分复用(OOFDM)技术的弹性光网络(EON)应运而生。不同于WDM资源粒度较粗的特点, EON对频谱资源进行了更精细地划

分, 提供了更细粒度的单元——频隙, 即光信道中最小的分配单元。频隙的划分使得EON的频谱分配更加灵活, 大大提高了频谱资源的利用率。即便如此, 随着单根光纤承载的业务传输速率不断逼近物理极限, EON同样面临着严峻的挑战。为了进一步降低网络阻塞率, 提高网络容量, 基于空分复用(SDM)的EON(SDM-EON)得到了广泛关注, 被认为是下一代光网络重要的发展方向之一。

文献[1–6]介绍了利用多芯光纤(MCF)实现SDM-EON的相关进展。在基于MCF的SDM-EON中, 纤芯间的串扰是一个关键问题, 受到学术界的高度重视。FUJII S等人^[7–8]对串扰类型进行建模分类, 提出了纤芯优先级策略和纤芯分类策略。纤芯优先级策略通过避免填充相邻纤芯来减少纤芯分配过程中的串扰, 纤芯分类策略通过为每根纤芯分配统一的带宽连接来减

收稿日期: 2021-11-19。

作者简介: 蔡一峰(1997—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 曾获得亨通光电奖学金。主要研究方向为空分复用弹性光网络中的路由选择和频谱分配问题。

* **通信作者:** 沈建华(1972—), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为高速大容量光纤通信系统。



少频谱碎片。仿真结果表明,这2种策略均可以改善整个网络的串扰和阻塞概率。但是这2种策略假定了一个业务请求只会被分配在某一根特定纤芯中,而事实上业务分配可能同时跨越多根纤芯^[9]。为解决该问题,ARPANAEI F等人^[10]提出了一种基于少模多芯光纤的中三维资源分配(3D-RA)算法,在该算法中,当单根纤芯无法满足业务需求时,将采用跨纤芯的分配方式以获得更低的阻塞概率。在此基础上,ZHANG S等人^[12]提出资源分配模型,采用路径优先和频谱优先2种不同策略,通过业务的跨纤芯分配来建立光路,并选择浪费频隙最少的分配方案,提出了按照浪费频隙升序的路径优先(aW-PF)算法和浪费频隙升序的频谱优先(aW-SF)算法,进一步降低了业务阻塞概率。

由于上述研究很少考虑跨纤芯频谱分配引入的串扰,因此本文提出一种串扰感知的SDM-EOM频谱分配算法,简称为CG-SF算法。

1 算法工作原理

CG-SF算法原理如下:以典型的七芯光纤为例,纤芯编号如图1所示,其中编号1、3、5为第一组,编号2、4、6为第二组,7号单独成第三组;连续到达的业务请求将被优先交替分配在前2组纤芯上,并且每组中的频隙遍历顺序相反,以此尽量减少一个业务请求时跨纤芯频谱分配引入的“自身串扰”和不同业务请求之间的串扰;位于光纤中心的7号纤芯,由于其与外围所有纤芯均相邻,更容易引入串扰,所以优先级最低。当业务请求到达时,对所有满足一致性和连续性约束的跨纤芯频谱分配模式(FSAP)^[12]按照其理论浪费的频隙数排序,浪费数目越少优先级越高,一般尽量选取高优先级的分配方案。

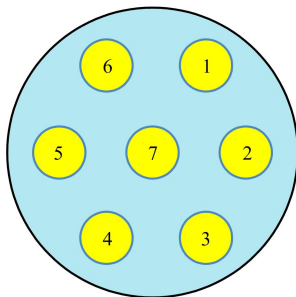


图1 纤芯分组

CG-SF算法仅用于接收其它纤芯无法分配频谱的请求,算法的实施过程如下:对于第一组和第二组,若单个业务请求需分配的频谱不超出本组的范围,则对业务请求的频谱分配不会引入“自身串扰”;持续到达的业务请求被依次交替分配在2组纤芯上,第一组从频隙的低索引向高索引分配,第二组相反,所以不同请求之间的串扰被尽可能减少。

每一个FSAP是由 (I, M) 表示的矩形块,其中 I 代表连续的空闲频隙数量, M 代表跨越的纤芯数量。若

用 Q 代表业务请求的频隙数量,则只有当 $I \times M \geq Q$ 时,请求才会被接受。如果当前业务请求5个频隙,其FSAP示例如图2所示。按照占用纤芯的数量排序,理论的FSAP包括 $(5, 1), (3, 2), (2, 3), (2, 4), (1, 5)$,其中红色方格代表使频隙对齐的填充频隙,蓝色方格代表保护频隙,两者都属于被浪费的频隙,其数量用 W 表示。另外,由于 $(2, 3)$ 是 $(2, 4)$ 的子集,即采用 $(2, 3)$ 会更加节约频隙,所以最终方案候选不考虑 $(2, 4)$ 。按照本文所提算法的思想,每个业务请求占用纤芯不超过本组,所以 $(1, 5)$ 也被排除。按照所浪费的频隙数由少到多排序,最终方案选择的优先级从高到低为 $(5, 1), (3, 2), (2, 3)$ 。

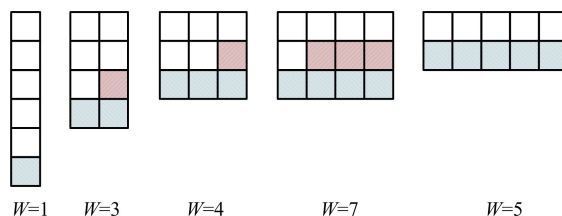


图2 $Q=5$ 时,FSAP示例

2 算法流程

2.1 CG-SF算法实现代码和流程

用无向图 $G(N, L)$ 来描述整个网络, N 和 L 分别代表网络的节点集合和链路集合,CG-SF算法实现部分的伪代码如下:

1. 纤芯分为3组,每根纤芯中共有 F 个频隙,当前请求序号为 i
2. 计算 K 条最短路径
3. For each 路径
4. 根据图 $G(N, L)$,获取路径上频隙信息
5. End
6. Set $S=1$
7. While $S \leq F$ do
8. For each 路径
9. 计算候选FSAPs并排序
10. For each FSAP
11. If i 为偶数 then
12. 在第一组纤芯中从 S 频隙正向遍历,尝试匹配FSAP
13. 在第二组纤芯中从 $F \sim S$ 频隙反向遍历,尝试匹配FSAP
14. If i 为奇数 then
15. 在第二组纤芯中从 $F \sim S$ 频隙反向

蔡一峰,蓝求旺,陈尚君,等:一种串扰感知的空分复用弹性光网络频谱分配算法

遍历,尝试匹配 FSAP

16. 在第一组纤芯中从 S 频隙正向遍历,尝试匹配 FSAP

17. 在第三组纤芯中从 S 频隙正向遍历,尝试匹配 FSAP

18. End

19. End

20. $S=S+1$

21.End

CG-SF 算法的流程如下:当新的一个业务请求到达时,首先选择最小的频隙索引号 S ,并且检查是否可以在最短路径下,采用最高优先级的 FSAP 建立光路(如伪代码第 11~17 行描述);根据目前请求序号的奇偶选择尽量在第一组或第二组纤芯中匹配 FSAP,且在 2 组中分别从 S 频隙正向遍历和 $F \sim S$ 频隙反向遍历,如果未能匹配则切换到另一组,2 组都未能成功则在第三组中尝试。如果建立失败,则采用下一个 FSAP 并再次尝试建立光路。当所有候选 FSAP 都尝试失败,则第二短的路径将会被检查。在整个算法过程中,一旦光路建立成功,则业务请求被接受;若 K 条最短路径都被检查但仍未成功建立光路,则切换到下一个频隙索引并且重复上述步骤。当遍历完所有频隙索引而未成功建立光路,则该业务请求会被拒绝。

2.2 其它 4 种算法流程

为了与 CG-SF 算法对比,本文介绍了 3D-RA 算法、aW-PF 算法、aW-SF 算法和首次命中(FF)算法的流程。在 3D-RA 算法中,如果单根纤芯能够满足需求,则请求被接受;否则,跨纤芯分配方案将被采用,算法将从第一根纤芯的第一个频隙开始,作为矩形的一个顶点,查找能够接受请求的一个矩形频隙区域。如果失败,则从第二根纤芯的第一个频隙开始,直至所有纤芯都作为起点且尝试失败,那么将从下一个频隙开始重复上述步骤直至所有频隙都被尝试或者请求被接受。在 aW-PF 算法中, K 条最短路径(KSP)算法被用来计算任意 2 个节点之间的候选路径。当请求到达时,首先选择最短路径,然后检查是否可以从第一个频隙开始采用最优的 FSAP 建立光路。如果建立失败,则采用下一个 FSAP。当所有 FSAP 都尝试失败,则从下一个频隙开始重复上述步骤。如果所有频隙都被尝试且未能建立光路,则切换到第二短路径重新检查。aW-SF 算法与 aW-PF 算法思路基本一致,区别在于前者是频谱优先而后者是路径优先,即在 aW-SF 算法中,将从第一个频隙开始检查,直至 K 条最短路径

都被尝试,才会切换到下一个频隙重新检查。FF 算法是几个算法中最简单的一种,算法在所选路由上从小索引到大索引遍历所有频隙,如果找到可用频谱段,则接受请求。

3 算法复杂度分析

CG-SF 算法伪代码中各行的时间复杂度如表 1 所示。其中, C 为纤芯数。根据表 1 可知,当 $K>1$ 时,算法整体的时间复杂度为 $O(\max\{KN^3, K \times L \times C \times F, F \times K \times (C^2 + C^2 \times Q)\})$;当 $K=1$ 时,算法整体的时间复杂度为 $O(\max\{N^2, L \times C \times F, F \times (C^2 + C^2 \times Q)\})$ 。

表 1 CG-SF 算法伪代码中各行的时间复杂度

伪代码内容	时间复杂度	伪代码内容	时间复杂度
第 1~第 2 行	$O(KN^3), K>1$	第 8~第 9 行	$O(C^2)$
	$O(N^2), K=1$	第 10 行	$O(C)$
第 3~第 5 行	$O(K \times L \times C \times F)$	第 11~第 17 行	$O(C \times Q)$
第 6~第 7 行	$O(F)$	—	—

aW-PF 算法和 aW-SF 算法的时间复杂度在 $K>1$ 时为 $O(\max\{KN^3, K \times L \times C \times F, K \times C^2 \times F \times Q\})$;在 $K=1$ 时为 $O(\max\{N^2, L \times C \times F, C^2 \times F \times Q\})$ 。3D-RA 算法的时间复杂度为 $O(\max\{N^2, L \times C \times F, C \times F \times Q\})$ 。本文所提算法的时间复杂度与前者相近,比后者稍高。

4 数值仿真和结果分析

4.1 仿真环境和评价指标

本文用 FlexGridSim^[13]进行仿真,在 2 种网络拓扑下比较了 aW-PF、aW-SF、3D-RA、FF 和 CG-SF 这 5 种算法的性能。2 种网络拓扑分别是具有 14 个节点、21 条链路的 NSFNet 和 24 个节点、43 条链路的 USNet,拓扑中的链路距离与文献[12]一致。仿真采用七芯光纤,每根纤芯的总容量为 4 THz,每个频隙定为 12.5 GHz,共有 320 个频隙,保护带宽定为 1 个频隙。业务请求的起点和终点在所有节点之间随机选择,速率均匀分布在 10~400 Gb/s,到达率服从参数为 λ 的泊松分布,持续时间服从 $\mu=1$ 的负指数分布,其中 $\lambda \times \mu$ 代表网络负载,NSFNet 和 USNet 的网络负载分别为 400~1400 Erl 和 800~1800 Erl,每次仿真模拟 100 000 个请求。调制方式按照表 2^[12]选择。

仿真主要考察性能为带宽阻塞率(BBP)^[14]和每频隙串扰(CpS)^[1],分别定义为

$$BBP = \frac{S_b}{S_a + S_b} \quad (1)$$

表 2 不同调制方式下的数据速率和传输距离

调制方式	数据速率/(Gb·s ⁻¹)	传输距离/km
PDM-BPSK	12.5	4000
PDM-QPSK	25	2000
PDM-8QAM	33.3	750
PDM-16QAM	50	400

注: PDM 为脉宽调制, BPSK 为二进制相移键控, QPSK 为正交相移键控, QAM 为正交振幅调制。

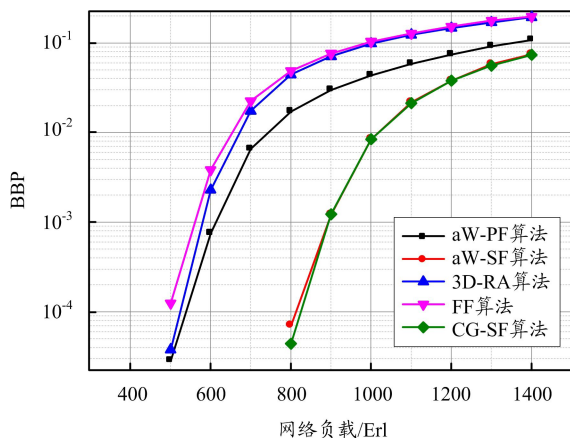
$$C_p S = \frac{A}{U} \quad (2)$$

其中, S_i 表示被阻塞的业务集合, S_s 表示成功建立业务的集合, A 表示处在相邻纤芯且占用同样频率的频隙对数量, U 表示所有被占用的频隙数量。从式(2)可见, $C_p S$ 代表了串扰所影响的频隙与链路中使用的总频隙之间的平均比率, 是对链路中串扰的一种量化, $C_p S$ 数值越高表明链路中的串扰问题越严重。

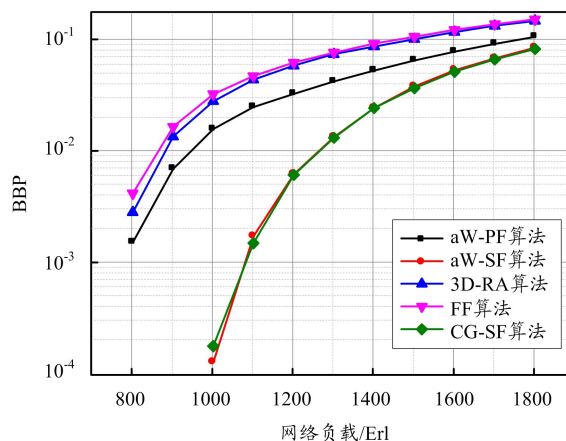
4.2 仿真结果和分析

5 种算法的 BBP 比较如图 3 所示。可以看出, 在不同网络拓扑下, 当网络处于低负载(400 Erl)时, CG-SF 算法和 aW-SF 算法的 BBP 均远小于其它 3 种算法。当网络负载逐渐升高, 这 2 种算法与其它 3 种算法的 BBP 性能差距逐渐减小, 但仍然优于其它 3 种算法。这表明 CG-SF 算法的 BBP 性能与 aW-SF 算法基本一致, 且明显优于其它 3 种算法。

5 种算法的 $C_p S$ 比较如图 4 所示。可以看出, 在 NSFNet 网络拓扑中, 当网络在低负载(400 Erl)时, 相比于 aW-PF 算法、aW-SF 算法、3D-RA 算法和 FF 算法, CG-SF 算法的 $C_p S$ 分别降低了 69.9%、73.7%、69.9%和 69.9%; 当网络在高负载(1400 Erl)时, CG-SF 算法的 $C_p S$ 分别降低了 10.1%、17.3%、5.6%和 6.2%。

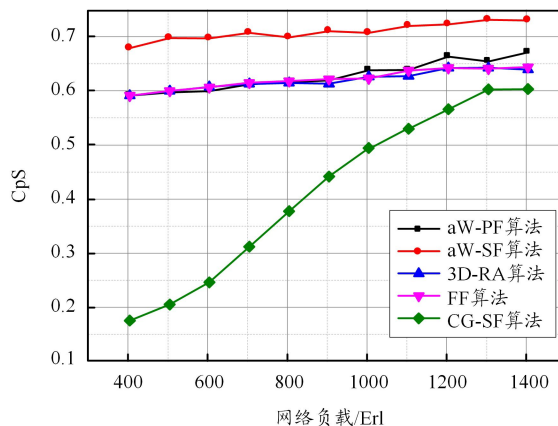


(a) NSFNet 网络中的 BBP 比较

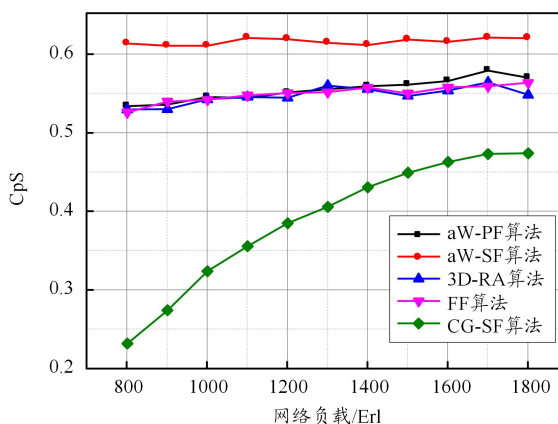


(b) USNet 网络中的 BBP 比较

图 3 BBP 比较



(a) NSFNet 网络中的 $C_p S$ 比较



(b) USNet 网络中的 $C_p S$ 比较

图 4 $C_p S$ 比较

在 USNet 网络拓扑中, 当网络在低负载(800 Erl)时, 相比于 aW-PF 算法、aW-SF 算法、3D-RA 算法和 FF 算法, CG-SF 算法的 $C_p S$ 分别降低了 56.1%、61.8%、55.8%和 55.5%; 当网络在高负载(1800 Erl)时, CG-SF

蔡一峰,蓝求旺,陈尚君,等:一种串扰感知的空分复用弹性光网络频谱分配算法

算法的 CpS 分别降低了 16.7%、23.4%、13.5% 和 15.8%。这表明在不同网络拓扑下,当网络处于低负载时,CG-SF 算法能明显降低串扰,而当网络负载逐渐升高,这种优势渐渐减少。这是因为在低负载情况下,频谱中空闲频隙较多,不同组纤芯接收的请求能有效错开从而避免填充相邻纤芯;当负载升高,频谱越发拥挤,纤芯之间的串扰逐渐不可避免,所以这种分配策略的效果逐渐减弱。

5 结束语

在基于 MCF 的 SDM-EON 中,纤芯之间的串扰是一个关键问题。本文提出了一种串扰感知的空分复用弹性光网络 (SDM-EON) 频谱分配算法 (CG-SF 算法),在为业务请求分配频谱资源时尽量避免单个请求内部的串扰以及请求与请求之间的串扰。数值仿真结果表明:aW-SF 算法在牺牲了串扰性能的条件下,相比于其它几种算法明显降低了 BBP,而本文提出的 CG-SF 算法,在维持与 aW-SF 算法基本一致的 BBP 的情况下,较大改善了串扰问题,且在低负载网络状况下尤为明显。因此,CG-SF 算法不仅减少了纤芯间串扰,还提高了通信质量的可行性。本文不足在于仅仿真了 2 个特殊网络拓扑,后续工作将会着重在更多网络拓扑中验证其性能。

参考文献:

- [1] FUJII S, HIROTA Y, TODE H, et al. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(12): 1059–1071.
- [2] MUHAMMAD M, ZERVAS G, FORCHHEIMER R. Resource allocation for space-division multiplexing: optical white box versus optical black box networking[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4928–4941.
- [3] JORDI P, JOAN M G, ALBERT P, et al. Flex-grid/SDM backbone network design with inter-core XT-limited transmission reach [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016.
- [4] DHARMAWEERA M N, YAN L, KARLSSON M, et al. Nonlinear-im-pairments-and crosstalk-aware resource allocation schemes for multi-core-fiber-based flexgrid networks [C]// ECOC. Proceedings of European Conference on Optical Communication. Dusseldorf: VDE, 2016: 1–3.
- [5] YANG M, ZHANG Y, WU Q. Routing, spectrum, and core assignment in SDM-EONS with MCF: Node-arc ILP/MILP methods and an efficient XT-aware heuristic algorithm [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2018, 10(3): 195–208.
- [6] YAGHUBI-NAMAAD M, RAHBAR A G, ALIZADEH B. Adaptive modulation and flexible resource allocation in space-division-multiplexed elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2018, 10(3): 240–251.
- [7] FUJII S, HIROTA Y, TODE H, et al. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(12): 1059–1071.
- [8] FUJII S, HIROTA Y, TODE H. Dynamic resource allocation with virtual grid for space division multiplexed elastic optical network [C]// ECOC. Proceedings of 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013). London: IET, 2013: 1–3.
- [9] ZHAO Y, ZHU Y, WANG C, et al. Super-channel oriented routing, spectrum and core assignment under crosstalk limit in spatial division multiplexing elastic optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2017, 36 (jul.): 249–254.
- [10] ARPANAEI F, ARDALANI N, BEYRANVAND H, et al. Three-dimensional resource allocation in space division multiplexing elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10 (12): 959–974.
- [11] CVIJETIC M, DJORDJEVIC I B, CVIJETIC N. Dynamic multidimensional optical networking based on spatial and spectral processing[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 9144–9150.
- [12] ZHANG S, YEUNG K L. Dynamic service provisioning in space-division multiplexing elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(11): 335–343.
- [13] MOURA P M, DRUMMOND A C. Flex grid sim: flexible grid optical network simulator[EB/OL]. [2021-11-19]. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/Flex-GridSim/>.
- [14] SHI W, ZHU Z, ZHANG M, et al. On the effect of bandwidth fragmentation on blocking probability in elastic optical networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 2970–2978.