

引用本文: 江亮, 葛瑞林, 陈铭毓, 等. 多芯光纤中的自适应阈值和频谱优先算法[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 29–33.

多芯光纤中的自适应阈值和频谱优先算法

江 亮, 葛瑞林, 陈铭毓, 沈建华*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 为了有效解决纤芯中的串扰问题并降低网络阻塞率, 提出了一种自适应阈值和频谱优先(AT-SF)算法, 采用纤芯分组的方式使每组中的纤芯不相邻, 将典型的 7 芯光纤分成 3 组, 第三组纤芯的优先级在业务到达过程中是可变的; 同时, AT-SF 算法引入了频隙(FS)阈值参数, 将大于 FS 阈值的业务分配在第一、第二或者第三组纤芯上, 小于等于 FS 阈值的业务只分配在第三组纤芯上。分别在 NSFNET、USNET 网络中进行了仿真实验, 对比了首次匹配(FF)、三维资源分配(3D-RA)、路径优先(aW-PF)、共轭梯度频谱优先(CG-SF)算法性能。仿真结果表明, 与其它算法相比, AT-SF 算法在网络处于高负载状态时能获得更好的阻塞率和串扰性能。

关键词: 空分复用弹性光网络; 串扰; 频隙阈值

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)05-0029-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Adaptive threshold and spectrum first algorithm in multi-core fiber

JIANG Liang, GE Ruilin, CHEN Mingyu, SHEN Jianhua*

(School of communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjin 210003, China)

Abstract: In order to solve the crosstalk problem and reduce the blocking rate, an adaptive threshold and spectrum first (AT-SF) algorithm is proposed. The fiber cores in each group are grouped so that they are not adjacent, and a typical 7-core fiber is divided into three groups. The priority level of the third group of fiber cores is variable during the service arrival process. At the same time, the AT-SF algorithm introduces the frequency slot(FS) threshold parameter, and allocates the services greater than the FS threshold to the first, second or third group of fibers, while the services less than or equal to the FS threshold are only allocated to the third group of fibers. The simulation experiments are carried out in NSFNET and USNET networks, and the performance of first match(FF), 3D resource allocation(3D-RA), path first(aW-PF) and conjugate gradient spectrum first(CG-SF) algorithms are compared. The simulation results show that the AT-SF algorithm can obtain better blocking rate and crosstalk performance than other algorithms when the network is under high load.

Key words: space division multiplexing elastic optical network, crosstalk, frequency slot threshold

0 引言

面对网络带宽需求急剧增长的趋势, 传统的波分复用(WDM)技术由于采用基于固定栅格频谱分配方

法分配频谱, 导致频谱资源浪费严重。为解决此问题, 学术界提出引入基于正交频分复用技术的弹性光网络(EON), 其不仅可以将频谱单元划分为更加精细的栅格粒度——频隙(FS), 而且通过 FS 的灵活组合能够自适应地为业务请求选择合适路径并进行资源分配, 极大地提高了资源的利用效率。为了进一步提升光纤通信系统容量, 可以引入空分复用(SDM)技术形成空分复用弹性光网络(SDM-EON)^[1-5]。目前, SDM 主要分为 2 种, 即按纤芯复用和按模式复用, 而多芯少模光纤(FM-MCF)同时采用了这 2 种复用技术, 使得单纤容量得到了进一步的提升^[6]。FM-MCF 通过包括波长、振幅、相位等在内的信号不同维度的复用, 可以

收稿日期: 2022-05-03。

基金项目: 南京邮电大学研发基金类项目(2022 外 072)资助。

作者简介: 江亮(1998—), 男, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学通信与信息工程专业, 主要研究方向为空间复用弹性光网络中的路由选择和频谱分配问题, 参与了南京邮电大学横向科研课题“新一代智能 SD-WAN 体系架构及其关键技术”的研发工作。

* 通信作者: 沈建华(1972—), 男, 工学博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为高速大容量光纤通信系统、智能光网络等。



江亮, 葛瑞林, 陈铭毓, 等: 多芯光纤中的自适应阈值和频谱优先算法

突破传统光通信系统的信道容量限制,但同时也会使得资源分配问题从路由频谱分配(RSA)问题转化为更复杂的路由频谱纤芯分配(RSCA)问题。信道间的串扰(crosstalk)是影响高速率光纤通信系统的重要参数之一,多芯光纤的信道串扰更不可忽视。因此,在SDM-EON中进行资源分配时,面临着纤芯间串扰及频谱分配效率等多个维度的约束。传统的频谱分配算法如首次匹配(FF)算法虽然复杂度低,但阻塞率性能较差^[7]。针对多芯光纤的应用场景,ERWAN P等人^[8-9]提出了一种三维资源分配(3D-RA)算法。当单根纤芯无法满足业务需求时,该算法采用距离调制方式和跨纤芯的分配方式以获得更低的阻塞率。文献[10]在3D-RA算法的基础之上,提出引入FS分配模式(FS-AP)模型,采用优先路径搜索和优先频谱搜索2种不同策略,进一步降低了业务阻塞率。然而,上述这些算法或模型都是以减少业务请求的阻塞率为目标,较少考虑多芯光纤中的串扰问题。文献[12-13]提出了一种基于纤芯优先级和纤芯分组的RSCA方案,这种方案在网络处于高负载情况时可解决业务分配的可用空闲频谱不足的问题,但方案中的算法性能优势不明显。

为了解决上述问题,本文提出一种自适应阈值和频谱优先(AT-SF)算法,使网络处于高负载状态时能保持较低阻塞率并降低信道间的串扰。

1 AT-SF 算法工作原理

1.1 纤芯分组与业务分配

为了减少相邻纤芯间的串扰问题,本文采用纤芯分组的方式将典型的7芯光纤分成3组,使每组中的纤芯不相邻,如图1所示。将纤芯编号1、3、5设为第一组,纤芯编号2、4、6为第二组,纤芯编号7为第三组。AT-SF算法的基本思想如下:在业务到达过程中,第三组纤芯的优先级是可变的。当网络处于低负载时,即使不占用第三组纤芯,总体阻塞率也不会很高。此时,第三组纤芯的优先级可设为最低。当网络处于高负载时,为了降低阻塞率,可能需要占用第三组纤芯以降低总的阻塞率。此时,可以提升第三组纤芯的优先级,并将占用FS数少的业务优先分配给第三组纤芯。在为不同业务配置FS资源时,需要设置保护带,并在高负载情况下优先将占用FS数量较少的业务分配给第三组纤芯。由于第三组纤芯上的FS占用比较零散,与其他两组纤芯业务占用同样频率的FS也将减少,

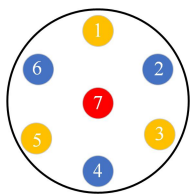


图1 纤芯分组示例

从而可以减少纤芯间的串扰。

为了根据网络负载的高低自适应地将占用FS数少的业务分配到不同优先级的纤芯上,AT-SF算法引入了FS阈值参数,将大于FS阈值的业务分配在第一、第二或者第三组纤芯上,小于等于FS阈值的业务只分配在第三组纤芯上。这意味着,当业务所需的FS数小于等于阈值时,第三组纤芯的优先级会提高;反之则会降低。初始情况下,该阈值被设定为0,这意味着会优先在第一、第二组纤芯上进行分配。在未使用第三组纤芯之前,该阈值一直保持为0。此外,当业务开始在第三组纤芯上进行频谱分配时,该阈值会根据第三组纤芯的状态进行调整:如果第三组纤芯的状态较为拥挤,则会适当调低该阈值;反之则会增大该阈值。最理想的情况就是那些所需FS数小于等于该阈值的业务刚好都能分配在第三组纤芯上。

1.2 FSAP 优先级排序

文献[10]指出,为了避免使用昂贵的大规模节点器件,分配给连接请求的每个FS块必须保持矩形形状,即FSAP。每个FSAP可以用二元组 (I, M) 来标识,其中 I 表示连续的空闲FS数量, M 表示需要占用的纤芯数量。若业务所需FS数为 Q ,不考虑保护带宽,则当 $I \times M \geq Q$ 时,该业务才会被接受。假设有一个业务请求,经计算占用5个FS,其FSAP分配如图2所示。其中,灰色为业务实际占用FS,红色为填充FS,蓝色为保护FS。由于7芯光纤被分成3组,所以最多只能跨3根纤芯,即可选的只有图中前3种方案。而这3种方案可以根据FS资源的浪费情况设置FSAP优先级,浪费少的优先级高,浪费高的优先级小。

1.3 AT-SF 算法流程与伪代码

AT-SF算法流程如下:

1) 纤芯分配和链路建立规则。设置FS阈值初始

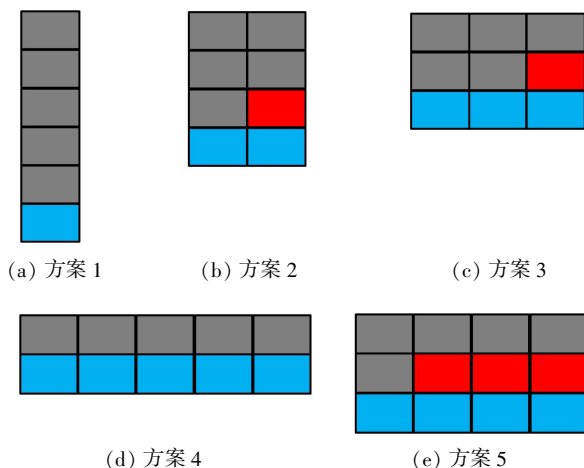


图2 FSAP分配示例

值为 0, 当一个新的业务请求到达时, 首先计算 K 条最短路径 (KSP), 本文选取实验中比较常用的值, 即 $K=3$ 。初始设置 FS 阈值为 0, 当业务到达时, 会先在第一、第二组纤芯进行频谱分配。随着业务的不断增加, 当有业务请求在第三组纤芯进行频谱分配时, 将更新 FS 阈值。在此之后, 如果有业务到达, 将计算所需的 FS 数并与 FS 阈值进行比较。如果所需的 FS 数小于或等于 FS 阈值, 在最短路径中优先按 FF 算法在第三组纤芯进行分配。如果所需的 FS 数大于 FS 阈值, 检查是否可以在最短路径下按频谱优先遍历, 并依次在第一、第二组纤芯中按 FSAP 优先级顺序建立光链路。如果第一、第二组纤芯中都不能建立链路, 则在第三组纤芯中建立链路, 同时根据第三组纤芯的负载情况更新 FS 阈值。如果第三组纤芯仍不满足建立链路的条件, 则在次最短路径按照同样的方法建立链路。依此类推, 直至在所有路径上均不能建立链路时, 该业务将被阻塞。

2) FS 阈值自适应更新规则。当业务请求刚开始进行频谱分配时, FS 阈值初始值为 0, 所以先在第一、第二组纤芯上进行分配, 此时 FS 阈值保持不变。当业务开始占用第三组纤芯时, FS 阈值会根据第三组纤芯的负载情况进行更新。在初期, FS 阈值会递增。然而, 随着业务的持续到来, 当分配给第三组纤芯的业务发生阻塞时, FS 阈值就会减半。这是由于存在阻塞率的滞后性, 即当第三组纤芯的阻塞率上升时, 表明已有大量业务发生阻塞, 这些业务的 FS 数小于或等于当前的 FS 阈值。通过将 FS 阈值减半, 可以显著降低阻塞率, 并且对其它纤芯的阻塞率影响也较小, 从而使得已有业务 FS 数小于或等于当前减半后的 FS 阈值, 能在第三组纤芯上建立链路。算法的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 AT-SF 算法

输入 网络拓扑、业务请求 (s, d, r)

输出 网络阻塞率和每 FS 串扰

- 1) Set FS 阈值 $T_h=0$
- 2) 对每个业务请求利用 KSP 算法计算 3 条最短路径
- 3) 计算业务请求所需 FS 数 n
- 4) 列举出 FSAP 并排序
- 5) For each 路径
- 6) if $n > T_h$ then
- 7) 遍历第一组纤芯 FS, 按 FSAP 优先级顺序建立链路
- 8) 遍历第二组纤芯 FS, 按 FSAP 优先级顺

序建立链路

- 9) 遍历第三组纤芯 FS
- 10) if 第三组纤芯有足够空闲 FS then
- 11) 在第三组纤芯上按 FF 算法建立链路
- 12) 更新 $T_h, T_h = T_h + 1$
- 13) else 第三组纤芯没有足够空闲 FS
- 14) 更新 $T_h, T_h = T_h / 2$
- 15) 阻塞业务
- 16) else $n \leq T_h$
- 17) 遍历第三组纤芯 FS
- 18) if 第三组纤芯有足够空闲 FS then
- 19) 在第三组纤芯上按 FF 算法建立链路
- 20) 更新 $T_h, T_h = T_h + 1$
- 21) else 第三组纤芯有足够空闲 FS
- 22) 更新 $T_h, T_h = T_h / 2$
- 23) 阻塞业务
- 24) End

不同业务在一个 5 节点网络拓扑中的频谱分配图如图 3 所示。假设更新后的频谱阈值是 2, 现在有 2 个业务请求需要从节点 A 到节点 E。其中, 蓝色和红色方块表示第一个连接请求占用的频谱, 黄色方块表示第二个连接请求所占用的频谱。第一个连接请求占用了 5 个 FS, 而第二个连接请求只占用了 1 个 FS。因此, 第一个连接请求可以优先分配给第一组或者第二组纤芯, 而第二个连接请求将被分配给第三组纤芯。由于第三组纤芯的占用情况并不高, 可以预见下次频谱阈值将更新为 3。可以看出, 3 条最短路径各不相同, FSAP 也不同, 但它们都必须满足光谱连续性和一致性条件^[14]。

1.4 AT-SF 算法复杂度分析

AT-SF 算法中, KSP 的时间复杂度为 $O(KN^3)$, N 为网络拓扑节点数。按 7 芯光纤的序号 (1、2、3、4、5、

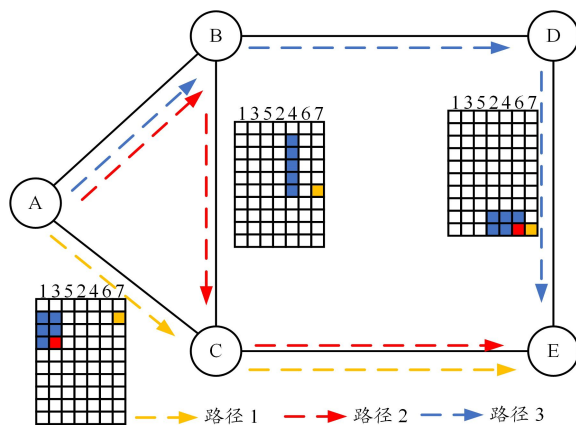


图 3 5 节点网络频谱分配图

江亮,葛瑞林,陈铭毓,等:多芯光纤中的自适应阈值和频谱优先算法

6、7)选择FSAP的时间复杂度为 $O(C)$,其中 C 为各组光纤的最大纤芯数量。假设每根光纤中FS数量为 Q ,则遍历FS的时间复杂度为 $O(Q)$ 。故算法的整体复杂度为 $O(\max(KN^3, K \times Q \times C \times L))$,其中 L 为 K 条最短路径中节点与节点之间的边数。

2 仿真与结果分析

2.1 仿真环境与性能指标

本文分别在NSFNET、USNET网络中进行了仿真实验,对比了FF、3D-RA、路径优先(aW-PF)、共轭梯度频谱优先(CG-SF)、AT-SF算法的性能。实验真采用7芯光纤,每根纤芯中的频谱总带宽为4 000 GHz,最小FS为12.5 GHz,FS总数为320个。不同业务之间的保护带宽为1个FS。业务请求的源节点和目标节点在所有节点之间随机选取,业务请求的传输速率均匀分布在10~400 Gb/s,业务请求到达目标节点服从参数为 λ 的泊松分布,持续时间服从 $1/\mu$ 的指数分布(本文仿真取 $\mu=1$),网络负载选取1 000~1 600 Erlang。每次模拟 10^5 个业务请求,仿真了10次,并对结果取平均值。根据不同传输距离采用不同调制方式,具体如表1所示^[8](PDM表示偏振多路复用,BPSK表示二进制相移键控,QAM表示正交振幅调制)。本文考察的性能指标为阻塞率 B_p 和FS串扰 C_s ^[12],其定义分别为

$$B_p = \frac{N_b}{N_b + M} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{A_c}{N_f} \quad (2)$$

其中, N_b 表示被阻塞的业务数量, M 表示成功建立的业务数量, A_c 表示处在相邻纤芯且占用同样频率的FS对, N_f 表示已使用的总FS数。本次实验初始FS阈值设为0,每次在第三组光纤中建立链路时根据第三组纤芯频谱占用情况调整FS阈值。

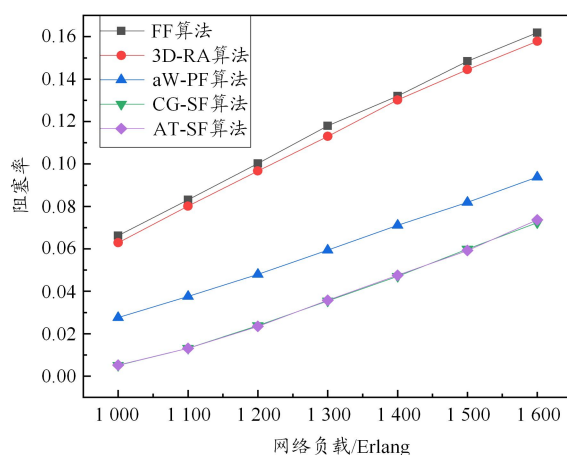
表1 不同距离采用的调制方式数据速率

距离/km	调制方式	数据速率/(Gb/s)
4 000	PDM-BPSK	12.5
2 000	PDM-QPSK	25
750	PDM-8QAM	33.3
400	PDM-16QAM	50

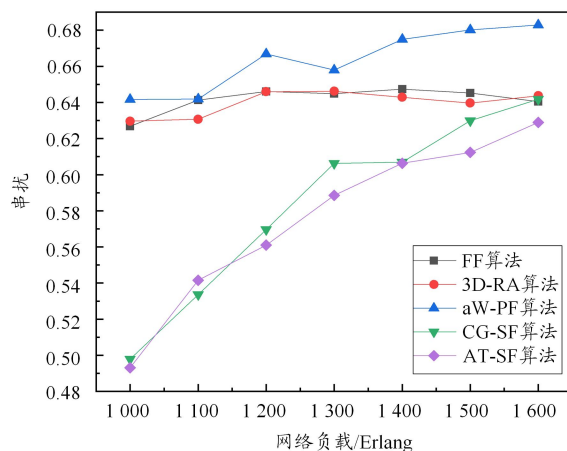
2.2 仿真结果与分析

NSFNET、USNET网络中不同算法性能仿真结果分别如图4、图5所示。

在NSFNET网络拓扑中,AT-SF算法与CG-SF算法的阻塞率相近。这是因为这2种算法都优先考虑频



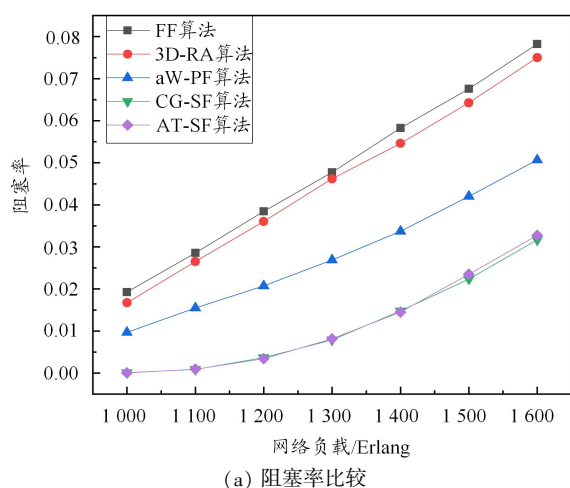
(a) 阻塞率比较



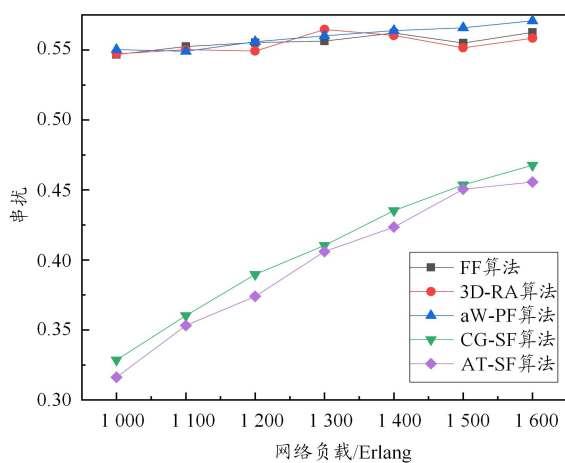
(b) 串扰比较

图4 NSFNET网络下不同算法性能比较

谱并选择浪费FS数最少的FSAP。相比其它3种算法,这2种算法的阻塞率较低。就串扰方面而言,采用纤芯分组和纤芯优先级的策略,AT-SF算法和CG-SF算法在负载较低时的纤芯串扰表现出明显的优势。当网络负载为1 000 Erlang时,AT-SF算法的串扰相比FF、3D-RA、aW-PF算法分别降低了21%、22%、23%。此时,由于FS阈值初始值为0且网络负载不高,第三组纤芯使用不多,对于大量占用FS且FS数大于FS阈值的业务请求,第三组纤芯的优先级还是最低,因此,当网络负载为1 000 Erlang时AT-SF算法和CG-SF算法比较相近。然而,随着负载的增加,纤芯分组和纤芯优先级策略的效果逐渐减弱。尽管如此,AT-SF算法引入了FS阈值,在网络负载达到1 600 Erlang时,其串扰仍然比CG-SF算法降低了2%。此时,由于网络负载较高,FS阈值会根据第三组纤芯的负载情况进行自适应调整,使得占用FS数小于等于频谱FS阈值的业务优先分配在第三组纤芯上,从而减少其它组纤芯因采用FSAP方案而产生多余的保护FS。



(a) 阻塞率比较



(b) 串扰比较

图5 USNET网络下不同算法性能比较

在USNET网络拓扑中,情况与NSFNET网络类似。由于USNET网络拓扑节点多,链路也多,所以相同负载下各算法的阻塞率和芯间串扰比NSFNET网络低。

根据图4和图5的仿真结果可知,FF算法的阻塞率和串扰都相对较高;aW-PF算法的阻塞率虽然比FF、3D-RA算法低,但芯间串扰却是最高;CG-SF算法结合了纤芯分组和纤芯优先级策略,并且按业务到达顺序分配频谱,但在高负载时串扰性能不如AT-SF算法;而AT-SF算法根据FS阈值在高负载时将占用少量FS的业务优先分配在第三组纤芯,在相同串扰下能承受的网络负载更高。

3 结束语

本文提出了一种用于解决多芯光纤中纤芯串扰问题的自适应阈值FS算法。通过引入自适应FS阈值,结合纤芯分组和优先级策略,进一步减少了高负载条件下的纤芯串扰现象。多次仿真结果表明,网络在高负载条件下既能维持较低的阻塞率,又能显著改

江亮,葛瑞林,陈铭毓,等:多芯光纤中的自适应阈值和频谱优先算法

善串扰问题。然而,目前FS阈值的自适应更新规则在将小于阈值的业务全部分配到中间纤芯方面存在一定的困难,未来考虑结合人工智能技术对阈值进行自适应更新。

参考文献:

- [1] MIROSAW K, PIOTR L, KRZYSZTOF W. Survey of resource all-ocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking[J]. Optical Switching and Networking, 2018, 27: 58-78.
- [2] 刘焕淋,杜理想,陈勇,等.串扰感知的空分弹性光网络频谱转换器稀疏配置和资源分配方法[J].电子与信息学报,2020,42(7):1718-1725.
- [3] 任丹萍,张黎,胡劲华.空分复用弹性光网络中串扰感知的虚拟网络映射研究[J].光学学报,2023,43(5):39-49.
- [4] XIONG Y, YE Y, ZHANG H, et al. Deep learning and hierarchical graph-assisted crosstalk-aware fragmentation avoidance strategy in space division multiplexing elastic optical networks [J]. Optics Express, 2020, 28(3): 2758-2777.
- [5] ZHEN W, HU J, CHEN Q, et al. Virtual optical network mapping approaches with inter-core crosstalk in space division multiplexing elastic optical data center networks [C]//2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Qufu, China. Qufu: IEEE, 2021: 1-4.
- [6] 梁梓豪,陈舜儿,刘伟平.多芯光纤性能的研究现状与发展分析[J].光通信技术,2017,41(1):49-52.
- [7] 张佳唯,钱凤臣,杨俊强,等.弹性光网络中路由与频谱分配算法综述[J].系统工程与电子技术,2022,44(6):2001-2010.
- [8] ERWAN P, SONG M, KARAKI J, et al. Multi-band OFDM transmission at 100 Gbps with sub-band optical switching [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(12): 2202-2219.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] CHANG J H, CHOI H G, CHUNG Y C. Achievable capacity improvement by using multi-level modulation format in trench-assisted multi-core fiber system[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14262-14271.
- [12] 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]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(12): 1059-1071.
- [13] 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.
- [14] CHRISTODOULPOULOS K, TOMKOS I, VARIGOS E A. Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation [C]//IEEE. Proceedings of 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Miami: IEEE, 2010: 1-6.