

引用本文:赵永利,宁云潇,赵子飘,等. 多维复用光网络关键技术[J]. 光通信技术,2020,44(10):1-5.

多维复用光网络关键技术

赵永利,宁云潇,赵子飘,郁小松,张 杰

(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:多维复用光网络是未来骨干网络的发展方向,它的出现推动了网络技术的进一步发展。通过调研信息通信网络的发展需求,分析了多维复用光网络中的关键技术,阐述了物理传输层面的空分复用技术研究现状,并着重介绍了多维复用光网络的架构、频谱分配及频谱重构中的前沿技术,最后对多维复用光网络与其技术发展方向进行了展望。

关键词:多维复用光网络;空分复用技术;软件定义光网络

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)10-0001-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Key technologies of multi-dimensional multiplexed optical network

ZHAO Yongli, NING Yunxiao, ZHAO Zipiao, YU Xiaosong, ZHANG Jie

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Multi-dimensional multiplexed optical network is the development direction of transmission backbone network, and it promotes the development of network technologies. This paper analyses the key technologies of multi-dimensional multiplexed optical network by investigating the development needs of the information communication network, introduces the research status on space division multiplexing technology at physical transmission level, and explains cutting-edge technologies with typical significance in the architecture, spectrum allocation and spectrum reconstruction of multi-dimensional multiplexed optical networks. Finally, the development direction of multi-dimensional multiplexed optical network and its cutting-edge technology are prospected.

Key words: multi-dimensional multiplexed optical network; space division multiplexing; software defined optical network

0 引言

互联网、移动互联网和物联网的快速发展,以及虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、4K和8K等高新技术的出现,不断地推动着全球互联网流量以十倍甚至百倍的速率高速增加。根据思科视觉网络指数报告对全球网络流量的统计与预测,2022年,全球互联网每秒需要传输约105 Gb的数据流量。为了应对网络接入用户数量的增长与网络传输设备数量的增加所带来的巨大挑战,网络运营商需要不断增加网络的传输带

宽。光纤通信系统承载了网络中大部分的流量,因此光纤通信系统的发展与商用化进程对互联网的进一步发展十分重要。从第一个商用光纤通信系统的问世到二十一世纪初,光纤通信系统最大传输容量都保持着每年80%左右的增速,增长速度超过摩尔定律;然而,在之后的数十年中,这一增速正在放缓,平均每年单根光纤的传输容量增长速度仅为20%^[1]。而互联网中的传输流量自二十世纪九十年代开始每年的增速均超过40%,并且近年来丝毫没有减缓的趋势。由此看来,互联网流量的增速远高于光纤通信系统容量的增速。随着光网络逐渐进入“P比特级传输”阶段,迫切需要进一步研究具有突破性的光纤传输技术和系统,以应对信息通信网迅速增加的数据流量^[2]。

为了满足高容量的传输需求,需要在传统的波分复用技术和光时分复用技术的基础上,进一步挖掘光纤中其它维度的资源。空分复用技术在此背景下得到了研究者的广泛关注。

收稿日期:2020-09-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(61822105)资助。

作者简介:赵永利(1981—),男,教授,博士生导师,美国加州大学戴维斯分校访问学者,IET Fellow,国家优秀青年科学基金获得者,主要从事宽带通信网、量子互联网和卫星激光组网等研究工作,获国家科技进步二等奖1次,省部级科技奖励13次。



赵永利, 宁云潇, 赵子飘, 等: 多维复用光网络关键技术

将空分复用技术引入到传统光网络之后, 虽然有效地提升了网络系统的传输容量, 但由于新维度传输资源的使用, 网络资源碎片化问题随之空域化, 原本的多维资源分配问题变得愈加繁琐, 需要针对解决多维资源碎片的研究。本文重点阐述当前空分复用技术的研究现状及多维复用光网络关键技术, 包括网络架构、频谱分配方法和频谱重构技术等。

1 空分复用技术研究现状

对光通信系统中的时域、频域等多维资源的复用及分配, 大幅提高了光通信系统的传输容量, 但对于传输容量的提升程度仍存在着瓶颈: 由于数字信号处理算法无法完全补偿光纤信道给信号带来的随机非线性噪声, 单模光纤传输容量已逼近香农极限。因而需要引入新的复用维度完成光纤通信系统信道容量的提升。

空分复用技术通过分割空间完成在空间维度的复用任务, 是现阶段应对单模光纤香农极限、进一步提升光网络性能的内在动力^[1]; 空分复用技术在提高系统传输能力的同时, 未增加安装铺设光缆所需的空间和资金成本, 是光传输系统中应对传输容量瓶颈问题的有效技术^[4]。现阶段空分复用可通过多纤光纤、多芯光纤、模分复用、轨道角动量以及少模光纤等多种方法完成。其中, 多纤光纤技术实现是在传统单纤光纤的基础上进行多纤扩展, 实现空间上的复用传输过程, 其原理较简单; 而其它空分复用技术相对复杂, 因此本文对其进行详细阐述。

1.1 多芯光纤

多芯光纤是按照一定规则在一个包层内排布多个纤芯的光纤, 所以原本需要多根普通单模光纤才能完成的传输容量可以用一根多芯光纤来实现。与单芯单模光纤相比, 多芯光纤在很大程度上节省了实际施工成本^[5-6]。美国的 OFS 公司及日本的多家企业等都是多芯光纤研究的领先者^[7]。美国 OFS 公司的 B.Zhu 等科研人员^[8]开发出一款传输距离为 11 km、传输容量为 2.5 Gb/s 的七芯光纤; 日本的科研机构^[9]在 2011 年就已经完成了七芯光纤技术的测试工作; 此外, 日本 Sumitomo 公司的研发人员在普通七芯光纤的基础上研发了沟槽辅助型的七芯光纤, 芯径材料为纯硅, 并对其串扰值进行了测试, 在传输距离为 104 km 时周边纤芯平均串扰值为 -30 dB; 此外, 2008 年, 日本北海道大学的科研人员^[10]开发出了一种新型多芯光纤, 该光纤纤芯结构采用不同种类的材料; 2020 年, 诺基亚贝尔

实验室研究人员 Roland Ryf^[11]完成了在 2000 km 跨度的 4 芯耦合芯光纤上使用空分复用技术的首次现场试验。

由此可知, 虽然关于多芯光纤的研究已经有 20 余年, 其在实验研究及商用阶段都具备一定基础, 但其实现仍然面临诸多限制, 包括: ①多芯光纤与单芯光纤耦合的问题。②单模光纤与多芯光纤耦合的器件的研究成果非常少。③无论如何改进多芯光纤的结构, 都不能完全消除其各个纤芯间的串扰问题^[12]; 对于光网络中长距离、大容量的传输需求, 多芯光纤各个芯径之间的串扰必然会对其传输性能造成影响, 所以目前不能满足每个芯径独立传输的要求^[5]。

1.2 模分复用

相比于多芯光纤, 模分复用避免了芯间串扰对传输产生的影响。模分复用利用在一纤芯中传输的各个模式间的正交性完成复用任务。可利用模分复用技术通过控制轨道角动量光束螺旋相位波前的旋转方向、角度和半径等参数, 得到可传输光信号的上百个传输模式。同时, 也可利用模分复用技术补偿少模光纤中模式耦合和模间色散所带来不利影响^[13]。

1.3 轨道角动量

光波中的粒子具有自旋角动量和轨道角动量 2 种特性^[14]。通过控制轨道角动量光束螺旋相位波前的旋转方向、角度和半径, 可以实现不同阶数的轨道角动量模式复用, 成为提升光纤通信传输容量的全新维度^[15]。

1.4 少模光纤

少模光纤通过将多个相互正交的模式分别作为独立的信道并同时信号进行传输, 可传输 2~10 个模式, 从而提升光纤传输系统的传输容量。由于少模光纤的纤芯尺寸大于单模光纤、但可传输模式数量少于多模光纤, 所以可以在降低非线性效应的影响的同时减少模间干扰的复杂性, 少模光纤支持的模式数量少, 降低了处理信道中模间干扰与模式色散的难度, 对提高信道的光信噪比及提升传输距离起到有益作用。

综上所述, 相比于波分复用技术与光时分复用技术, 空分复用技术发展空间更大, 研究意义更明显, 是实现未来大容量光网络的必经之路。空分复用技术涉及到的多纤光纤、多芯光纤、多模光纤、轨道角动量以及少模光纤等, 其中, 少模光纤融合了单模光纤长距离传输及多模光纤多模式传输且模式色散影响小等优点, 更具研究与实际应用意义。尤其是多芯少模光纤可以将多个纤芯汇聚到同一根光纤中, 且可以在一

个纤芯中传输 2 种及以上模式, 大大提高了光网络系统传输容量。在多维复用光网络中, 空分复用技术可解决未来几十年数据指数增长所带来的容量瓶颈问题; 通过将空分复用技术与其它维度复用技术相结合, 多维复用光网络可有效提升整体传输容量, 未来发展空间巨大。

2 多维复用光网络

空分复用进一步提高了光网络容量, 未来光网络也势必朝着时域/频域/空域多维一体化的方向发展。然而, 目前空域和时域/频域的结合只涉及到单纯的点到点传输, 只实现了链路容量的增加, 并未从根本上解决网络整体扩容的迫切需求。因此, 未来面向时域/空域/频域一体化光网络的部署应用, 多维复用光网络还面临着如何实现多维光交换节点, 如何实现多维网络资源高效管理和控制等问题。

多维复用光网络的资源层级由传统光网络的时域、频域扩展为多维光网络的时域、频域及空域; 资源由二维扩展到三维, 相应的控制问题更加复杂。如何高效管理并精细化调度各个维度的资源是多维复用光网络面临的突出难题^[16]。软件定义控制技术可利用逻辑集中控制功能, 在全局范围内优化网络资源; 其网络拓扑资源抽象功能可以将收集到的网络拓扑信息映射为逻辑拓扑信息, 简化拓扑信息传递和管理的数据量, 从而实现网络资源的高效管理和调度, 为多维复用光网络的控制和管理提供了全新思路。

2.1 软件定义光网络(SDON)概述

SDON 是根据网络需求, 利用软件技术对光网络的结构和功能进行动态调整, 实现对光网络需求的全局调度与控制, 进而提高资源利用率, 满足网络多样化、复杂化需求; SDON 是软件定义网络(SDN)技术为了满足光网络的特殊需求而在光域上的进一步延伸, 支持弹性资源切片虚拟, 因此更加适合多层域多约束的光网络控制^[17]。SDON 的典型架构如图 1 所示, 以控制器为核心, 利用开放的南北向接口连接其余平面。

SDON 以传统光网络架构为基础, 具有以下独特的优势: ①分离出控制平面与数据平面, 由数据平面集成底层网络传输协议, 处理网络中的数据传输细节, 简化了控制平面的控制策略; ②集中逻辑控制功能, 通过分析全网流量, 智能调控计算资源, 完成网络资源的协同控制; ③利用标准化网络接口工具向应用层应用传输网络状态信息, 并允许应用层程序改变 SDN 控制逻辑, 以应对光传送网灵活的业务需求^[17-18]。

2.2 软件定义多维复用光网络

软件定义多维复用光网络架构如图 2 所示, 主要包括 SDN 控制器、南向接口和北向接口等组成部分。

①SDN 控制器。SDN 控制器由业务管理器、消息处理单元、虚拟资源处理器、流量工程数据库及路径计算单元这五大功能部分组成, 通过南向标准接口完成对传输层网络的集中控制。为了保证 SDON 的灵活性与可扩展性, SDN 控制器可以由分布的软件模块实现。

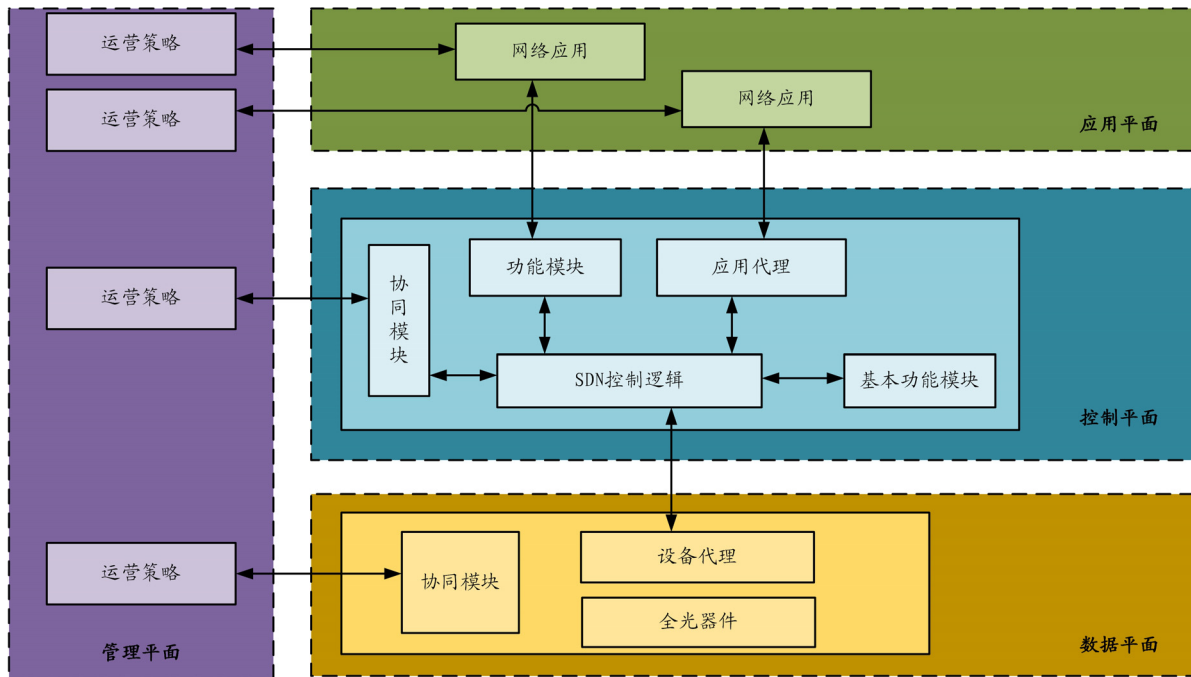


图 1 SDON 典型架构

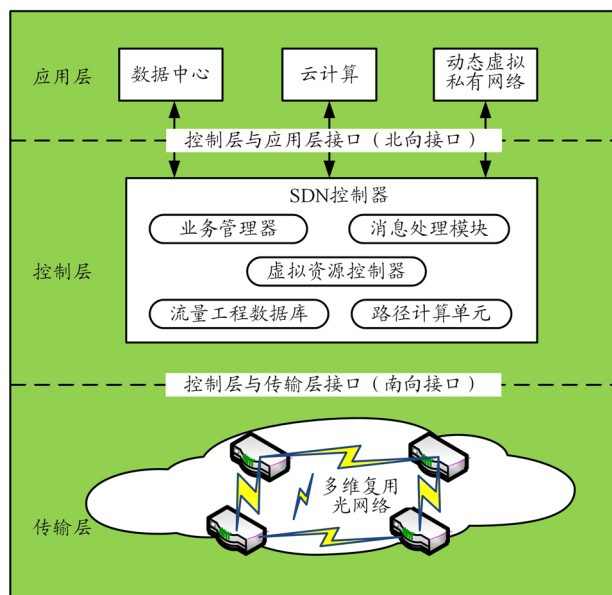


图2 软件定义多维复用光网络架构图

②南、北向接口。控制器的南向接口是控制器和多维复用光网络传输层设备之间的接口。与传统的设备管理南向接口相比,控制器南向接口关注与业务配置管理相关的资源及资源状态、告警和性能管理功能。目前光传送网设备南向接口存在较多私有信息,控制器与传输层设备之间的南向接口允许存在多种协议选择。控制器的北向接口是控制器与多维复用光网络应用层应用之间的接口,应用从北向接口完成业务的请求与分发、获取网络传输信息和调整网络服务资源等。

2.3 多维复用光网络路由与频谱分配

路由与频谱分配问题是指在网络中通过选择路由和分配频谱资源来为网络连接请求建立合适的光路,以使所需性能指标到达最优^[9]。多芯光纤或多芯少模光纤中,芯间串扰与模间串扰可能使得光信号质量严重下降而无法满足服务质量要求,最终降低频谱资源利用率,引发网络业务高阻塞率等问题。因此,如何对复杂串扰进行精确评估,有效降低其对业务传输过程中的影响,是设计路由与频谱分配时优先考虑的问题。

针对影响业务传输质量的参数复杂、综合评估困难的问题,从链路角度出发,文献[20]提出空闲频谱可用性概念,并基于此概念设计了串扰感知的资源分配方法;其次,为了综合评估链路上的多参数对业务选路的影响,提出了基于自组织映射神经网络模型的路由与资源分配算法。图3给出了一个具体的算法示例。通过监督系统模块的竞争层竞争机制,输出影响业务传输的主要因素,基于此对网络中的所有链路进

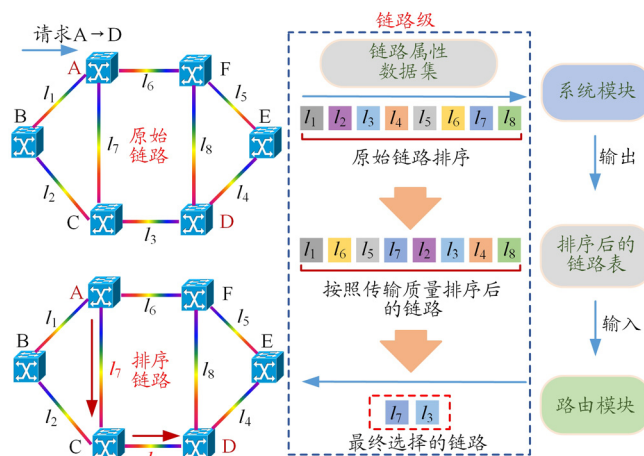


图3 算法示例

行等级重排序,并将等级值作为权值设计路由与资源分配方案。仿真结果表明此方法可以降低资源碎片化程度,降低业务阻塞率,提升资源利用效率^[20]。

2.4 多维复用光网络频谱重构

为了解决频谱资源在网络中出现的碎片化问题,合理利用频谱资源,频谱资源碎片需要被合理地整合优化以提高频谱资源的利用率,此过程成为频谱重构。为了更好地利用多维复用光网络中的频谱资源碎片,文献[21]提出基于度量即频谱紧致度的可感知串扰的频谱碎片整理算法,算法在改善系统频谱碎片问题及网络阻塞问题等方面可以达到比基准算法更好的性能。同时,定义了频谱紧致性的概念以测量多维复用光网络中的频谱性能。此外,随着频谱紧致度阈值从10~50的范围内增大,阻塞概率降低,当阈值为50时在阻塞概率和频谱利用率方面具有比其它阈值更好的性能。文献[22]提出了可感知串扰的频谱重构方案,定义了时间维度频谱紧致度,在此基础上使用可感知串扰的频谱重构方案对网络频谱碎片进行了重构。结果表明:文献[22]提出的具有2种重新配置策略的频谱重构算法在平均频谱紧致度、阻塞概率和频谱利用率方面可以达到比基准算法更好的性能;并在三维(时域、频域及空域)资源场景中提出了基于预先保留请求的频谱碎片重构方案,这种重构方案可为网络频谱资源利用率带来约5%的优化。

3 结束语

为了更好地应对网络流量爆发式增长,同时复用时空、频域和空域等多维资源的光网络将是光传输网络进一步演进的方向。在多维复用光网络中,存在着芯间干扰与模间串扰、网络动态需求引起的多元资源

碎片化等一系列问题,需要对多维资源进行选择与分配、对多维碎片进行整理与优化,以进一步推进多维复用光网络的发展。目前,研究学者在软件定义组网、路由与频谱分配以及频谱资源重构等方面已取得了一系列研究成果,然而多维复用光网络仍然存在较大的研究空间和应用局限,具体情况如下:

①基于人工智能的网络高效控制拓展研究。虽然已有部分文献采用机器学习算法用于实现多维复用光网络中资源分配与优化,但从控制层面上看,其仍存在诸多问题有待解决,如融合边缘计算、云计算等新兴技术的协同控制问题,面向多样业务形态复杂需求的高效控制问题等。特别地,当引入虚拟化等技术后,网络控制将变得异常复杂,控制效率仍亟待进一步提升。

②高芯密度光纤场景中资源分配与优化拓展研究。为了实现光网络传输容量的进一步提升,多芯光纤或多芯少模光纤成为未来多维复用光网络发展的必然趋势。当利用芯密度过高的多芯光纤传输时,从网络层角度出发,其资源分配与优化算法设计将变得异常复杂,特别是当网络中承载的业务种类繁多时,纤芯串扰及其评估等因素会对业务承载造成较大影响。

③多维复用光网络频谱重构拓展研究。虽然已有文献对多维复用光网络频谱碎片进行建模,并设计使用频谱重构方案对频谱碎片进行了有效的整理,但是对于频谱资源重构的研究中参数采用的阈值范围十分有限,使得仿真环境与实际网络仍有差异,对于深入研究具体参数对于网络状况也存在影响。同时,找到串扰在频谱重构过程中的关联关系也是未来需要攻克的难题。

参考文献:

- [1] MIZUNO T, MIYAMOTO Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission [J]. Optical Fiber Technology, 2016. DOI: 10.1016/j.yofte.2016.09.015.
- [2] 张楷. 少模光纤模分复用系统中的数字信号处理关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [3] ESSIAMBRE R J, RYF R, FONTAINE N K, et al. Breakthroughs in Photonics 2012: Space-Division Multiplexing in Multimode and Multicore Fibers for High-Capacity Optical Communication[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 0701307-1-0701307-8.
- [4] 裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 42-53.
- [5] 陆懿. 多芯光纤特性及其应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

- [6] 吕向东, 梁雪瑞, 喻千尘, 等. 光通信技术研究现状及发展趋势[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 76-84.
- [7] HAYASHI T. Design and Fabrication of Ultra-Low Crosstalk and Low-Loss Multi-Core Fiber[J]. Opt. Express, 2011, 19(17): 576-592.
- [8] ZHU B. Seven-Core Multi-core Fiber Transmissions for Passive Optical Network[J]. Optics Express. 2010, 18(21): 117-122.
- [9] TAKENAGA K, ARAKAWA Y, SASAKI Y, et al. A Large Effective Area Multi-Core Fiber with an Optimized Cladding Thickness[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B543-B550.
- [10] KURKOVA S, BABIN S A, LOBACH I A, et al. New mechanism of the mode coupling in multi-core fiber lasers[J]. Optics Letters, 2008, 33(1): 61-63.
- [11] Nokia Bell Lab. Nokia Bell Labs' world records and innovations in fiber optics to enable faster and higher capacity 5G networks of the future [EB/OL]. (2020-03-13) [2020-09-03]. <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/03/13/nokia-bell-labs-world-records-and-innovations-in-fiber-optics-to-enable-faster-and-higher-capacity-5g-networks-of-the-future/>.
- [12] 杨芳, 唐明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. 光学学报, 2014(1): 66-70.
- [13] 赖俊森, 汤瑞, 吴冰冰, 等. 光纤通信空分复用技术研究进展分析[J]. 电信科学, 2017(9): 118-135.
- [14] WILLNER A E, MOLISCH A F, BAO C, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. Advances in Optics & Photonics, 2015, 7(1): 66-106.
- [15] 赖俊森, 吴冰冰, 赵文玉, 等. 光通信中轨道角动量技术及应用前景分析[J]. 电信科学, 2014, 30(5): 46-50.
- [16] 黄海彬. 基于软件定义的多维光网络虚拟化技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [17] 纪越峰, 张杰, 赵永利. 软件定义光网络(SDON)发展前瞻[J]. 电信科学, 2014(8): 19-22.
- [18] 朱晔. 面向层次化控制光网络中的开放接口技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [19] ROTTONDI C, BOFFI P, MARTELLI P, et al. Optimal resource allocation in distance-adaptive few-modes backbone networks with flexible grid[C]//Asia Communications and Photonics, October 19-23, 2015, Hong Kong, China. Hong Kong: OSA, 2015: 1-3.
- [20] YAO Q, YANG H, XIAO H, et al. Crosstalk-aware routing, spectrum, and core assignment in space-division multiplexing optical networks with multicore fibers[J]. Optical Engineering, 2019. DOI: 10.1117/1.OE.58.11.116110.
- [21] ZHAO Y, HU L, ZHU R, et al. Crosstalk-Aware Spectrum Defragmentation Based on Spectrum Compactness in Space Division Multiplexing Enabled Elastic Optical Networks With Multicore Fiber[J]. IEEE Access, 2018 (6): 15346-15355.
- [22] ZHAO Y, HU L, ZHU R, et al. Crosstalk-aware spectrum defragmentation by re-provisioning advance reservation requests in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber [J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5014-5032.