

一种面向5G前传无源光网络的数字子载波动态分配策略

周豪,王懿远,蔡高飞,蔡安亮,沈建华*

(南京邮电大学通信与信息工程学院,南京210003)

摘要:针对现有静态分配方法难以适应业务流量动态变化的问题,为提升第五代移动通信(5G)前传无源光网络(PON)的资源分配效率,提出一种面向5G前传PON的数字子载波动态分配策略。通过建立多目标优化函数(最小化业务丢失率、最大化子载波利用率、最小化配置复杂度),引入健康度共享机制以增强算法全局搜索能力,并采用动态调整共享半径策略维持种群多样性。仿真实验表明,在网络负载为300 Gb/s时,所提算法较传统静态分配方法降低业务丢失率10%,子载波利用率稳定在90%以上。

关键词:第五代移动通信前传;无源光网络;数字子载波复用;动态分配;改进遗传算法

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0054-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.010

Digital subcarrier dynamic allocation strategy for 5G fronthaul passive optical network

ZHOU Hao, WANG Yiyuan, CAI Gaofer, CAI Anliang, SHEN Jianhua*

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

Abstract: To address the issue that existing static allocation methods struggle to adapt to dynamic changes in service traffic and to improve the resource allocation efficiency of passive optical network(PON) in fifth-generation mobile communication(5G) fronthaul, a digital subcarrier dynamic allocation strategy for 5G fronthaul PON is proposed. By establishing a multi-objective optimization function(minimizing service loss rate, maximizing subcarrier utilization, and minimizing configuration complexity), a health-sharing mechanism is introduced to enhance the algorithm's global search capability, and a dynamic adjustment strategy for shared radius is adopted to maintain population diversity. Simulation results show that under a network load of 300 Gb/s, the proposed algorithm reduces the service loss rate by 10% compared to traditional static allocation methods, with subcarrier utilization remaining stable above 90%.

Key words: the fifth-generation mobile communication fronthaul, passive optical network, digital subcarriers multiplexing, dynamic allocation, improved genetic algorithm

收稿日期:2024-10-09。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(62301284)资助;南京邮电大学企业委托研发重点课题(KH0020322072)资助。

作者简介:周豪(2000—),男,硕士研究生,现就读于南京邮电大学通信与信息系统专业,主要研究方向为5G前传无源光网络中的数字子载波动态分配策略,参与了基于软件定义的5G前传PON子载波动态分配、5G前传PON请求业务流量预测等项目的工作。

***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率大容量光纤通信系统、智能光网络等。



0 引言

根据第53次《中国互联网络发展状况统计报告》^[1],截至2023年12月,我国第五代移动通信(5G)用户规模已达8.05亿。5G网络的快速普及对网络架构和资源调度提出了更高要求,云无线接入网(C-RAN)凭借其高效的干扰控制和成本优势,被视为5G/6G网络的关键架构。其中,远程无线射频单元(RRH)与基带处理单元(BBU)的分离部署是C-RAN的核心特征,而如何在网络前传中实现RRH与BBU池的高效连接成为研究重点。

无源光网络(PON)凭借高带宽、低时延等优势,被认为是5G/6G前传网络的理想解决方案^[2-3]。近年来,针对PON资源分配的研究取得了一定进展:WELCH D等人^[4]提出了基于数字子载波复用(DSCM)的点对多点(P2MP)架构,但未充分考虑5G前传网络的动态业务需求;RUFFINI M等人^[5]探索了PON系统的虚拟化上行容量调度方法,但数据有效传输率较低,业务丢失率较高;SHAKESPEAR-MILES H等人^[6]进一步研究了DSCM的动态分配策略,但其模型未能适应接入用户流量波动,本质上仍属于静态资源分配。除此之外,现有研究主要围绕设备成本优化、频谱效率提升及突发流量应对展开,而对流量实时动态变化的适应性研究仍显不足。为此,本文提出一种面向5G前传PON的数字子载波动态分配策略,在现有模型^[6]基础上引入启发式算法,增强资源分配的灵活性和自适应性,以应对复杂多变的5G前传业务需求。

1 系统模型与算法设计

1.1 系统架构

本文研究的5G前传PON系统采用基于频分复用(FDM)的架构,如图1所示。系统由以下核心组件构成:

光网络单元(ONU):8个边缘节点(A,B,...,H),每个ONU最多支持4个数字子载波并行传输;

光线路终端(OLT):1个中心节点,最多支持16个子载波并行传输;

传输链路:由10 km光纤和1:8分光比的光分路器组成。

每个数字子载波采用16进制正交幅度调制(16QAM)方式,最大信息传输速率为15 Gb/s。系统面

临的动态资源分配问题可表述为:在时变业务需求下,实时为各ONU分配子载波资源,同时最小化业务丢失率 U 、最大化子载波利用率 V 和最小化配置复杂度 W 。

1.2 优化目标函数

本文引入权重系数 $\alpha>\beta>\gamma$,建立多目标优化函数 f_{OBJ} 如式(1)所示。

$$f_{\text{OBJ}} = \min \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} (\alpha U - \beta V + \gamma W) \vartheta \quad (1)$$

其中, t 为时隙; T 为总时隙数,即整个优化过程涵盖的时间长度; c 为子载波的编号,在分配模型中标识第几个子载波; C 为系统中可用子载波的总数; ϑ 为分配指示变量,分配时 ϑ 为1,否则 ϑ 为0; U 、 V 、 W 的表达式分别如式(2)~式(4)所示。

$$U = \max(A_t - A_c, 0) \quad (2)$$

$$V = (1 - A_c U_b) \times 100\% \quad (3)$$

$$W = f(S_1, S_2) = \sum_{i=1}^n (\Delta_i + \sum_{j=1}^m |p_{ij}^{S_1} - p_{ij}^{S_2}|) \quad (4)$$

其中, m 为子载波在一个ONU内部的编号,即一个ONU内第 m 个子载波的位置; n 为ONU编号; A_t 为ONU的流量需求, A_c 为实际分配子载波承载的传输速率,当 $A_t > A_c$ 时发生业务丢失; U_b 为未子载波利用容量, $U_b = \max(A_c - A_t, 0)$; Δ_i 表示第 i 个ONU上子载波配置发生变化的数量, $p_{ij}^{S_1}$ 、 $p_{ij}^{S_2}$ 分别表示 S_1 、 S_2 方案下第 j 个子载波所处的位置, $|p_{ij}^{S_1} - p_{ij}^{S_2}|$ 用于衡量当某一ONU的速率需求突增时,是否优先重新分配相邻ONU的空闲子载波,即选择循环寻优步数最少的方案,从而最小化系统响应时间。

f_{OBJ} 的约束条件如下:

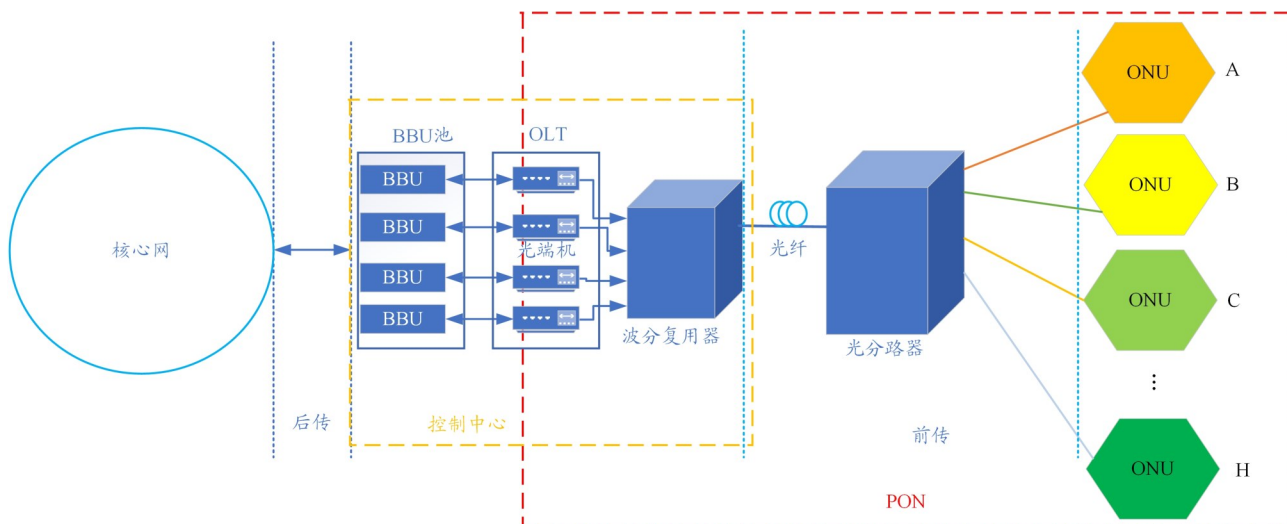


图1 基于FDM的5G前传PON系统架构

$$\sum_{t \in T} A_c \leq MN \quad (5)$$

$$\sum_{c \in C} \delta \vartheta = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \delta \mu \vartheta \leq 1 \quad (7)$$

式(5)中, M 表示每个子载波最多承载的信息传输速率, N 表示OLT能提供的子载波数最大值。式(6)确保一个可用信道只能分配给一个参与服务的ONU,避免出现因信道重复分配而导致不同ONU之间的业务冲突或者拥塞。式(7)确保每段波长最多可以被来自单一的ONU的一个数字子载波占用。本文提出的分配策略旨在通过动态调整子载波的分配来提高5G前传网络的效率,最小化业务丢失率,最大化子载波利用率,同时降低子载波的配置复杂度。

1.3 改进遗传算法的健康度共享策略

传统遗传算法在求解本文模型时易出现早熟收敛问题,为此本文提出改进的健康度共享策略以维持种群多样性,降低算法陷入局部最优的概率。具体实现过程如下:首先,随机生成初始解作为子载波分配方案,采用长度为 n 的数组表示染色体,包含时间点、ONU分配的子载波数目及节点当前流量需求函数。然后,计算种群中个体间的共享函数值 D 以度量其相似度,并据此实施共享半径动态调整策略。

共享函数值计算公式定义如下:

$$D=1-d_{AB}/\sigma_{share} \quad (8)$$

其中, d_{AB} 为AB之间的欧氏距离, σ_{share} 为共享半径, α 为衰减系数(用于控制共享半径缩减速度)。传统的健康度共享策略中, σ_{share} 通常是预先设置的固定值,这种方式劣势在于难以确定合适的初始值,共享半径过大导致适应度较好的个体遭到破坏,过小则难以维持种群多样性。

共享半径动态调整策略具体步骤如下:首先,在每一代结束时,对于种群中每个个体计算适应度值;其次,对适应度值从高到低排序,分别选取当代适应度排名前50%的个体作为集合A,后50%的个体作为集合B,然后对这2个集合分别计算相对于上一代的平均改善程度。对改善程度大于等于20%的集合施加惩罚,即将其共享半径缩小10%;而对改善程度小于20%的集合,则保持其共享半径不变。重复以上步骤,直到2个集合的适应度改善程度均小于20%为止。

应用改进的健康度共享策略后的仿真结果表明,通过引入这一策略,不仅能够一定程度上保持种群多样性,还能增强算法的鲁棒性。

1.4 动态分配流程

数字子载波动态分配实现流程如图2所示。算法执行流程如下:

- 1)空闲子载波检查:检查当前是否有空闲子载波,若有则直接分配;否则进入再分配流程。
- 2)容量需求差计算:计算各ONU当前时刻与上一时刻的容量需求差,并按差值降序排列,优先处理需求增量大的ONU。
- 3)子载波调整:跳过相邻ONU的当前载波,激活下一个可用子载波。
- 4)流量需求读取:读取各边缘节点的流量需求,并计算所有子载波的当前承载信息速率。
- 5)目标函数判断:检查目标函数是否达到最小值。若未达到,则返回3)继续调整;否则,停止并输出配置方案。

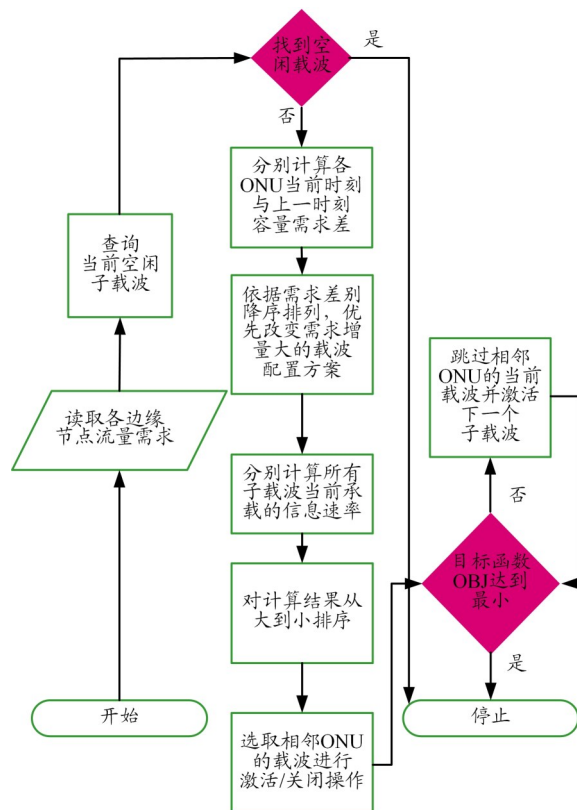


图2 数字子载波动态分配实现流程

2 仿真实验及结果分析

2.1 实验设置

本文基于图1所示的系统架构,参照文献[6]进行参数配置。实验采用OMNet++网络模拟器模拟动态流量场景,重点考察流量需求波动条件下的算法性能,对比分析改进遗传算法与传统遗传算法、静态分配

算法、文献[6]算法的差异。遗传算法参数设置如下:以数学模型目标函数作为适应度函数,交叉概率为0.8,变异概率为0.05,最大迭代次数为300次。针对多目标优化中量纲不统一的问题,采用百分比归一化方法处理各优化目标,避免数量级差异导致的优化偏差。

2.2 算法改进收敛性分析

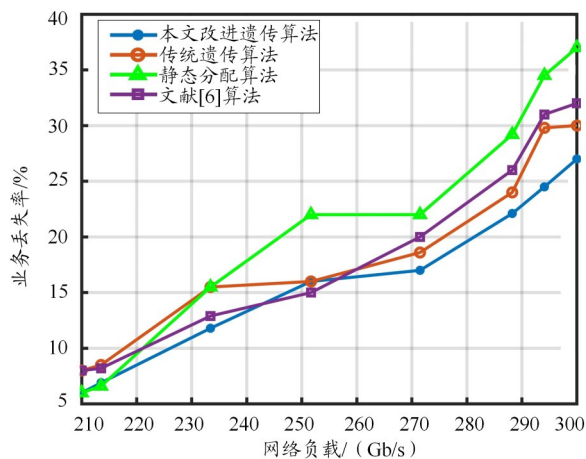
图3为算法收敛曲线对比图。可以看出,改进遗传算法通过引入健康度共享策略后收敛程度更高,其适应度函数收敛值更小,说明更加接近子载波配置最优方案,减少了局部最优的影响。相较于传统遗传算法,在0~50迭代次数以内,改进遗传算法下降趋势相对平滑,而传统遗传算法则较为陡峭,因此会错过部分潜在的可能解。

2.3 各项性能分析

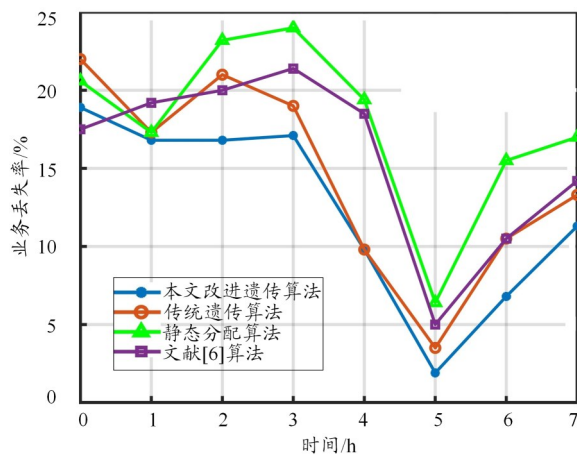
图4(a)为网络负载动态变化时的业务丢失率情况。当负载为210 Gb/s时,各算法性能相近;当负载增

至300 Gb/s时,本文算法较静态分配算法降低业务丢失率10%,较其它2种算法降幅超过3%。

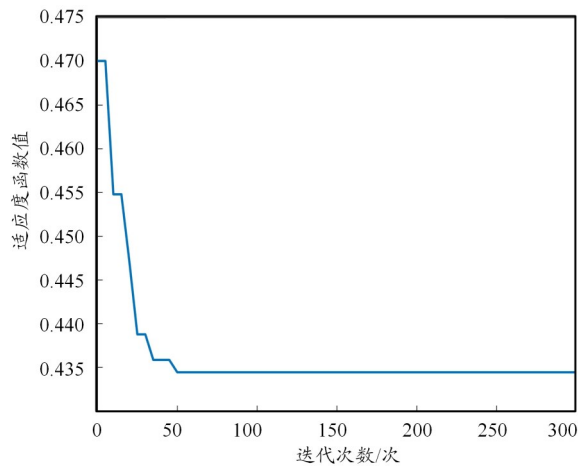
图4(b)为业务丢失率随时间变化情况。可以看出,当经历7 h后,本文算法较静态分配算法降低业务丢失率8%,较其它2种算法降幅超过2%。



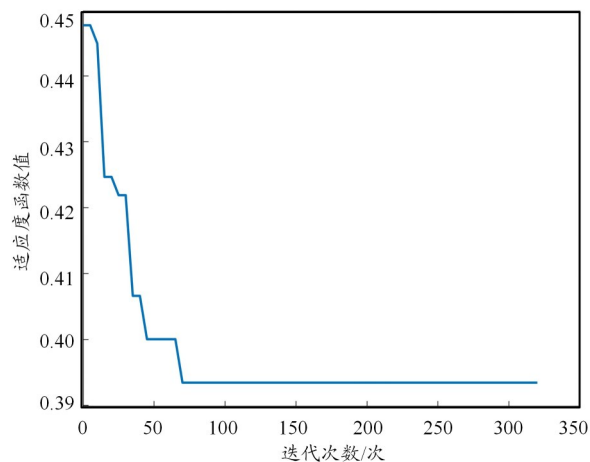
(a) 业务丢失率随网络负载变化情况



(b) 业务丢失率随时间变化情况

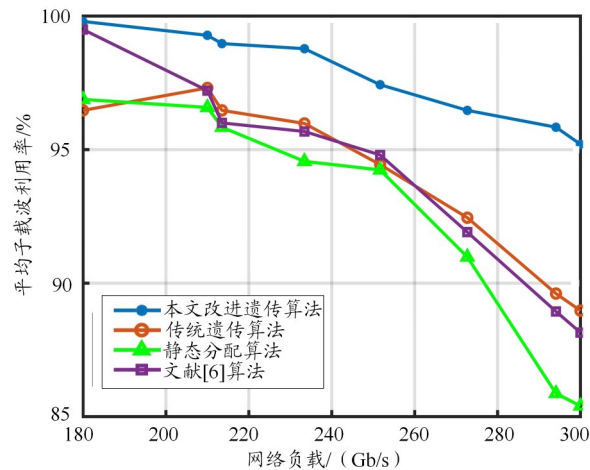


(a) 遗传算法收敛曲线

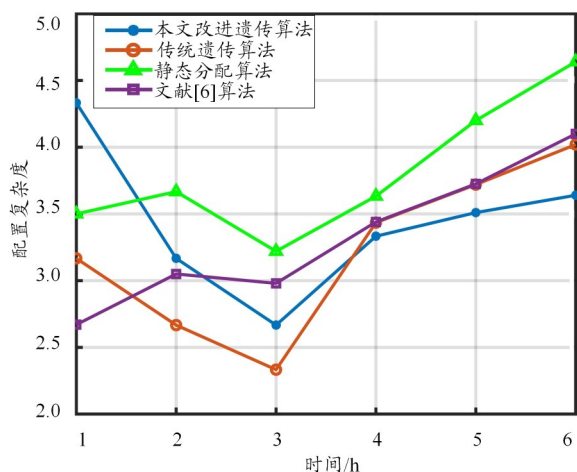


(b) 改进遗传算法收敛曲线

图3 算法收敛曲线对比图



(c) 平均子载波利用率随网络负载变化情况



(d) 配置复杂度随时间变化情况

图4 各项性能对比

图4(c)为平均子载波利用率随网络负载变化情况。可以看出,当网络负载为180~300 Gb/s时,本文算法保持数字子载波利用率稳定在90%以上,明显高于其它算法。

图4(d)为配置复杂度随时间变化情况。可以看出,随着时间增加,静态分配算法因缺乏历史学习能力,其配置复杂度呈单调递增趋势,与文献[6]算法的性能表现相似;传统遗传算法的配置复杂度呈先降后升趋势,这与其初期采用保守策略降低计算量,后期因流量激增导致复杂度上升密切相关;本文算法初期复杂度略高,但通过历史配置学习快速优化决策方案,最终复杂度低于对比算法并保持稳定。这种特性使系统响应时间缩短35%以上,显著提升动态分配效率。

3 结束语

本文针对5G前传PON中的动态资源分配问题,提出了一种基于改进遗传算法的数字子载波动态分配策略。通过建立多目标优化模型,综合考虑业务丢失率、子载波利用率和配置复杂度,并引入健康度共享机制与动态调整策略,有效提升了资源分配的灵活性和自适应性,能够更好地适应5G前传网络的流量波动;通过健康度共享机制增强全局搜索能力,避免早熟收敛。仿真实验表明,所提算法能在高负载条件下(300 Gb/s)较传统静态分配算法降低10%的业务丢失率,同时保持子载波利用率稳定在90%以上。然而,本研究仍存在一定局限性,例如未考虑多业务优先级调度及更复杂的光网络拓扑结构。未来工作可进一步探索深度学习在动态资源分配中的应用,并研究跨层优化策略以提升网络整体性能。

参考文献:

- [1] 中国互联网络信息中心. 中国互联网络信息中心发布第53次《中国互联网络发展状况统计报告》[J]. 国家图书馆学报, 2024, 33(2): 104-104.
- [2] LAGKAS T, KLONIDIS D, SARIGIANNIDIS P, et al. Optimized joint allocation of radio, optical, and MEC resources for the 5G and beyond fronthaul[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(4): 4639-4653.
- [3] WONG E, RUAN L. Towards 6G: fast and self-adaptive dynamic bandwidth allocation for next-generation mobile fronthaul[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(8): C203-C211.
- [4] WELCH D, NAPOLI A, BCK J, et al. Point-to-multipoint optical networks using coherent digital subcarriers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(16): 5232-5247.
- [5] RUFFINI M, AHMAD A, ZEB S, et al. Virtual DBA: virtualizing passive optical networks to enable multi-service operation in true multi-tenant environments[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(4): B63-B73.
- [6] SHAKESPEAR-MILES H, RUIZ M, VELASCO L. Dynamic subcarrier allocation for P2MP connections[C]//IEEE. Proceedings of 2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bucharest: IEEE, 2023: 1-4.
- [7] PAVON-MARINO P, SKORIN-KAPOV N, NAPOLI A. Tree-determination, routing, and spectrum assignment using point-to-multipoint coherent optics[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(7): C29-C40.
- [8] FAYAD A, CINKLER T, RAK J, et al. Design of cost-efficient optical fronthaul for 5G/6G networks: An optimization perspective[J]. Sensors, 2022, 22(23): 9394-9394.
- [9] CHEN L, JIN W, HE J, et al. A point-to-multipoint flexible transceiver for inherently hub-and-spoke optical access networks[C]//IEEE. Proceedings of 2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Shanghai: IEEE, 2023: 1-4.
- [10] LUIS V, SIMA B, DIOGO S. Autonomous and energy efficient light-path operation based on digital subcarrier multiplexing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(9): 2864-2877.
- [11] LI R, LV Q, ZHU Z. Architecting wavelength-switched optical networks with coherent P2MP transceivers[C]//IEEE. Proceedings of 2023 21st International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Qufu: IEEE, 2023: 1-3.
- [12] HOSSEINI M M, PEDRO J, NAPOLI A, et al. Optimization of survivable filterless optical networks exploiting digital subcarrier multiplexing[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(7): 586-594.
- [13] CAMPOS L A, JIA Z, ZHANG H, et al. Coherent optics for access from P2P to P2MP[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(3): A114-A123.
- [14] YIN S, ANSARI N. Nonlinear predictor-based dynamic resource allocation over point-to-multipoint (p2mp) networks: a control theoretical approach[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(12): 1052-1062.