

# 基于SDN的自适应路由与波长分配方法

赵中楠<sup>1,2</sup>, 王健<sup>1</sup>, 郭红微<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 黑龙江工程学院数学系, 黑龙江 哈尔滨 150015)

**摘要:** 路由与波长分配是全光网络重要的资源分配方法。针对传统方法与新架构结合的问题, 提出了一种基于SDN的自适应多目标路由与波长分配方法, 能够通过自我调节的方式实现全光网络的链路资源调配。该方法基于SDN服务功能链模式, 以调度时间和链路质量为调度目标, 将路由与波长分配问题构建为0-1整数规划问题, 同时采用二进制混合拓扑粒子群算法对该模型求解实现网络资源的优化调度。仿真实验结果表明, 所提方法在恢复时间、阻塞率、资源利用率等指标的测试中均优于传统经典算法的性能。

**关键词:** 软件定义网络; 全光网络; 路由与波长分配; 服务功能链

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019157

## Adaptive routing and wavelength assignment method based on SDN

ZHAO Zhongnan<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, GUO Hongwei<sup>3</sup>

1. School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

3. Department of Mathematics, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150015, China

**Abstract:** Routing and wavelength assignment is an important resource allocation method of all-optical network. Aiming at the problem of traditional method combined with the new architecture, an adaptive multi-objective routing and wavelength assignment method based on SDN was proposed, which could realize the allocation of link resources of all-optical network through self-regulation. Based on the SDN service function chain model, service scheduling time and link service quality were taken as the scheduling objective, routing and wavelength assignment problem was constructed as the 0-1 integer programming problem, meanwhile, binary hybrid topology particle swarm optimization algorithm was used to optimize the network resources for optimal scheduling. The simulation results show that the proposed method is superior to the traditional classical algorithms in the test of recovery time, blocking rate and resource utilization.

**Key words:** software defined network, all-optical network, routing and wavelength assignment, service function chaining

### 1 引言

全光网络具有全光域信息交换的特点<sup>[1]</sup>, 摒弃了传统光电转换的模式, 大大提高了数据的传输速度, 有效地提升了信息交换的容量, 正越来越受到

业界的重视<sup>[2-3]</sup>, 同时路由与波长分配 (RWA, routing and wavelength assignment) 作为其资源分配的重要方法一直都是研究的热点, 与此同时也提出了很多方法<sup>[4-5]</sup>来提高资源的分配效率。伴随着软件定义网络 (SDN, software defined network) 的提出,

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2019-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61403109); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2019M651263); 高校博士点科研基金资助项目 (No.20112303120007); 黑龙江省教育厅科学技术研究基金资助项目 (No.12541169)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61403109), China Postdoctoral Science Foundation (No.2019M651263), The Education Ministry Doctoral Research Foundation of China (No.20112303120007), The Scientific Research Fund of Heilongjiang Provincial Education Department (No.12541169)

业界很多传统应用都面临着挑战,如何能够使传统的方法在新框架下实现有效的应用并与之融合也成了当下需要分析的问题,因此本文从这个角度进行了研究。

在光网中,信息是通过不同链路中不同波长信道进行传递的,RWA 就是根据传输需求选择合适链路并匹配相应信道从而实现信息传送的方法。其运作方式主要分为 2 种:静态 RWA 与动态 RWA,其中,静态方式相对稳定,调度成功率高,但是难以适应网络复杂变化的需要且资源利用率低,分配方式不够灵活;动态方式则通常以在线的方式运行,能够根据网络的变化需要适时进行调配。不同的运作方式对系统的运行效果产生不同的影响,因此一直是研究的重点,而动态方式是本文的研究对象。

鉴于此,本文提出了一种基于 SDN 的多目标自适应路由与波长分配(SO-MO-RWA, SDN oriented multi-objective routing and wavelength assignment)方法。该方法考虑到全光网络高速传输以及高效链路调度的需要将调度时间和链路质量作为联合调度目标,构建了 0-1 整数规划的 RWA 问题模型同时应用二进制混合拓扑粒子群算法对问题求解。整个方法采用基于 SDN 的调度方式,能够实时获取网络资源状态信息,并以按需方式实现网络资源的动态分配。

## 2 相关工作

RWA 的研究内容可以从以下几个方面进行分析。

首先,从不同研究角度设定不同的评价指标,如资源分配比率、链路损伤感知、阻塞率等。Bonani 等<sup>[6]</sup>在研究 RWA 的固定路由、交替路由和自适应路由方法基础上,提出了最小跳固定交替算法以降低阻塞率。Tyagi 等<sup>[7]</sup>针对动态光网络,采用改进的水滴算法研究了 RWA 问题中的连接阻塞率最小化问题。Ebrahimzadeh 等<sup>[8]</sup>在建立线性物理层损伤模型的基础上,对计算出的光路质量进行估计,提出了一种动态损伤感知的 RWA 方案,该方法通过收集链路波长占用信息,采用自适应路由技术建立适合的链路。Marsden 等<sup>[9]</sup>提出了一个包含四波混合诱导串扰的路由和波长分配的快速计算方法,以最小化建立动态光路的时间。Dizdarevic 等<sup>[10]</sup>在对物理层损伤的分类及 RWA 相关算法综合研究的基础上,对 PLI-RWA (physical layer impairment routing

and wavelength assignment) 算法性能指标进行了评价。Velasco 等<sup>[11]</sup>设计了一个概率模型来计算光网络中每个链路中使用波长的数量,并在此基础上提出了一种新型的损伤感知 RWA 算法。上述各种方法能够根据链路的状态指标进行分析与设计,但是均以单指标调度为主,未能考虑复杂调度条件下的调度需要。

其次,不同的调度方法会对系统的运行效果产生影响。Bandyopadhyay 等<sup>[12]</sup>针对全光网络设计了多种启发式算法,在多项式时间内有效地解决 RWA 问题的同时降低了网络资源的能耗。Jaumard 等<sup>[13]</sup>针对 RWA 中光路重新排列问题进行了研究,采用 E-optimal 方法评估它所需要的最小光路重排数量,以最大化服务等级。Tang 等<sup>[14]</sup>考虑到服务差异化需求和特点,提出了基于预测和分层图模型的路由和波长分配算法,通过波长数预测机制结合分层图模型综合考虑实现路由和波长资源的分配。Ricciardi 等<sup>[15]</sup>能够在链路资源分配的过程中根据网络负载轻重,通过负载平衡和能量感知之间的动态切换实现网络资源的平衡利用。Pavarangkoon 等<sup>[16]</sup>提出了一种考虑全光载波复制的路由和波长分配方案,以最小化波长复用的多载波分布式网络所需波长。Hsu 等<sup>[17]</sup>根据光网络中的 RWA 问题的 NP(non-deterministic polynomial) 特性,提出了一种基于最大不相交路径的算法实现路由与波长的分配方法。以上研究都根据所研究的问题场景进行了算法设计,但是还缺乏在类似 SDN 这种平台结构下的具体调度方法的设计与研究。

SDN 的提出为光网络的发展提供了很好的契机,近些年很多学者在光网络与 SDN 融合方面也进行了很多研究。Montero 等<sup>[18]</sup>针对传统配置的低效性问题,采用测试信号机制和 OpenFlow 协议,提出了一种基于 SDN 的高效拓扑发现方法,允许 TON (transparent optical network) 自动学习光学设备之间的物理邻接,提高数据传输的效率。光网络的发展伴随着复杂性的提升,导致传统的网络控制和管理框架无法与之匹配,文献[19-20]对 SDN 光网络中的各种管控机制及应用等相关问题进行了阐述。Yan 等<sup>[21]</sup>考虑到充分了解当前网络状态对于在短时间内更好地实现软件定义的可调度性至关重要,设计了网络监控数据和网络配置信息结合的集中式网络数据库,使网络分析应用能够更好地支持动态可编程光网络。Santos 等<sup>[22]</sup>提出了一种用于

光网络的联合 SDN 控制器体系结构，将集群策略与丰富的层次路径计算充分结合以提升路由性能。Chan 等<sup>[23]</sup>考虑到未来光网络会以指数级的数据速率增长，采用认知技术对 SDN 的光层及控制器等各层进行了分析与设计。文献[24-25]提出了相应的全光 SDN 结构的数据中心虚拟化架构，能够按需提供数据扩展环境，实现动态分割网络和计算资源，动态翻译并提供虚拟数据中心到光层的请求，为用户提供高带宽低时延的连接服务。上述文献从不同角度对 SDN 与光网络的技术融合与应用进行了研究，但是还缺乏如何在新型网络架构下进行 RWA 这类路径资源分配的具体方案的研究。

### 3 基于 SDN 的全光网络框架描述

SDN 是由斯坦福大学提出的一种新型的网络架构，其核心思想在于改变了传统将控制与调度集成的方式，将控制平面与数据平面功能解耦，通过网络的可编程性与网络功能虚拟化技术，实现了网络资源的灵活调度，提升了系统整体的运作效率。与此同时，随着技术水平的不断提高，全光网络凭借其自身传输特性的优势，正成为全球互联网主干网络的重要信息传输载体，SDN 在光网络上的部署也引起了业界和研究团体的广泛兴趣<sup>[26-27]</sup>，同时国际互联网工程任务组（IETF, The Internet Engineering Task Force）也对此进行了相应的结构定义。基于 SDN 的全光网络结构如图 1 所示。

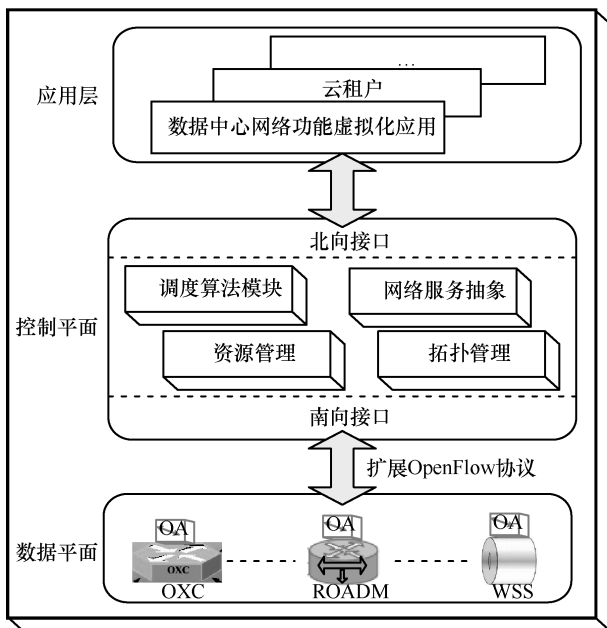


图 1 基于 SDN 的全光网络结构

基于 SDN 的全光网络结构主要由应用层、控制平面和数据平面 3 层组成，最上层为应用层，对应各种不同应用需求，例如光网互联的数据中心服务<sup>[28]</sup>和云租户应用等。第二层是控制平面，其核心部件为控制器（controller），控制器通过北向接口与应用层衔接，并提供不同的接口协议满足与不同应用的兼容性；通过南向接口与数据平面衔接，南向接口负责与基础设施资源对接，能够支持多供应商和多协议场景，主要协议为 OpenFlow，该协议采用字符流的形式，能够包容不同网络的传输格式，提供统一的数据传输接口。SDN 设计之初主要针对 IP 网络，并没有考虑光网络的信号传输特性，因此近些年相关研究也针对 OpenFlow 的结构进行了扩展<sup>[29-30]</sup>，使之适应于光网络的传输方式。控制器的主要功能模块包括资源管理、拓扑管理、调度算法模块、网络服务抽象等。最底层为数据平面，主要由全光网络基础设施构成，例如光交叉连接器（OXC, optical cross-connect）、可重构光分插复用器（ROADM, reconfigurable optical add-drop multiplexer）、波长选择开关（WSS, wavelength-selective switch）等，由于光网不断地发展，在与 SDN 融合的过程中很多新的设备也内置了 OpenFlow 协议<sup>[31]</sup>，实现与控制器的直接交互，但目前大多数的光网络设备都无法支持直接与控制器交互，因此提出了 OpenFlow 协议代理（OA, openflow agent）<sup>[32]</sup>，负责对控制器与光交换设备之间的信息转发，实现 SDN 结构下的信号传输与全光域交换的无缝衔接。

传统网络中用户以端到端方式获取资源信息，所有传输过程中的资源分配由于调度结构的限制，无法根据需要进行实时调整。网络功能虚拟化（NFV, network function virtualization）的提出实现了对网络资源的抽象，通过软件化方法对网络功能加以实现，完成对资源服务功能的部署，不但可以优化信息流的传输路径、灵活配给信息传输流量，还可以缩短业务调度周期、提高资源的调度效率。随着 SDN 与 NFV 的结合，全光网络资源调度的灵活性得到了有效提升，可以实现资源的按需分配而不再局限于某个地域、设备或者某个供应商。在这个背景下，IETF 给出了服务功能链（SFC, service function chaining）的概念<sup>[33]</sup>，服务功能链对应着从端到端传输所需一系列资源的分配方式。在基于 SDN 的全光网络结构下，该种方式能够根据业务逻辑

辑动态分配承载业务的功能节点, 实现网络功能服务及资源部署。运行过程中, 控制器的服务抽象模块根据业务需求, 将服务所需的若干资源进行抽象, 提供相应服务功能实例。同时, 调度算法根据资源管理模块提供的网络状态信息进行资源选择, 执行服务功能的资源映射, 以不同的粒度实现资源调度, 适应光网络链路的资源选择及光路构建。服务功能链的资源分配方式对于全光网络有着积极意义, 解决了传统调度低效、资源浪费等问题, 进一步提高网络资源重构性, 实现网络的高效管理与资源的快速有效配给。

#### 4 自适应路由与波长分配模型

SDN 对资源虚拟化调度的过程中, 链路及相应波长等基础设施资源承载了数据流量, 因此在服务功能链资源部署过程中为了提供有效的传输服务, 需要综合考虑光通信的传输质量和链路的调度效率等因素。

##### 4.1 调度指标设计

RWA 被认为是全光网络解决资源调配的有效手段, 在 RWA 的调度过程中, SDN 控制器通过感知网络链路的物理损伤信息及资源分配状况, 根据 RWA 既定的调度目标对链路资源进行调整。基于全光网络调度需求的特点, 本文将调度时间和链路质量作为调度目标。其中, 调度时间是指从接受请求、执行路径规划到资源映射一系列过程所耗费的时间。当 SDN 控制器接到业务请求时, 按照服务功能链的资源分配方式, 对请求资源的服务功能进行抽象, 创建一系列服务功能集合 (SFS, service function set), 每个服务功能集合中由多个服务实例 (SFI, service function instance) 构成, 可以由不同的服务供应商提供, 从而实现完整链路资源的构建。因此可以得到  $m$  个服务功能集合  $SFS_1, SFS_2, \dots, SFS_m$ , 其中每个服务功能实例的请求时间服从泊松分布, 所对应的平均到达率为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , 根据网络流量的特征, 服务功能集合内部的服务实例的调度时长服从重尾分布<sup>[34]</sup>。服务实例  $i$  (SFI <sub>$i$</sub> ) 的服务调度时间  $T_i$  为

$$T_i = \frac{\overline{h}_i^2}{2\overline{h}_i(1-\lambda_i\overline{h}_i)} \left[ 1 + \frac{1-\lambda_i\overline{h}_i}{\lambda_i\overline{h}_i} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中,  $\lambda_i$  代表 SFI <sub>$i$</sub>  的请求到达率,  $\overline{h}_i$  和  $\overline{h}_i^2$  分别代表调度时间的一阶矩和二阶矩, 分别如式(2)

和式(3)所示。

$$\overline{h}_i = \frac{\alpha}{\alpha-1} \frac{k^\alpha}{1-\left(\frac{k}{p}\right)^\alpha} \left( \frac{1}{k^{\alpha-1}} - \frac{1}{p^{\alpha-1}} \right) \quad (2)$$

$$\overline{h}_i^2 = \frac{\alpha}{\alpha-2} \frac{k^\alpha}{1-\left(\frac{k}{p}\right)^\alpha} \left( \frac{1}{k^{\alpha-2}} - \frac{1}{p^{\alpha-2}} \right) \quad (3)$$

重尾分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\alpha k^\alpha}{1-\left(\frac{k}{p}\right)^\alpha} x^{-\alpha-1}, k \leq x \leq p \quad (4)$$

链路质量是网络传输的重要指标, 在全光网络的运行过程中, 因光学传播特性等原因会使信号受到光损耗、串扰等影响, 从而造成信号损伤。SDN 控制器拥有全局网络视图, 能够实时感知网络拓扑状态信息, 并根据信息变化对光路的物理损伤进行评估, 判断不同链路的服务状况为链路分配提供依据。评估模型主要有光信噪比 (OSNR, optical signal noise ratio) 和  $Q$  因子 2 种。实际应用中,  $Q$  因子模型由于对不同测量环境的适应性较好, 应用较广泛。 $Q$  因子模型的计算会涉及不同的物理损伤的指标, 从而对线路进行综合评定, 其中包括交叉相位调制 (XPM, cross-phase modulation)、四波混频效应 (FWM, four-wave mixing)、放大自发辐射 (ASE, amplified spontaneous emission) 等, 因此 SFI <sub>$i$</sub>  的链路质量计算如式(5)所示。

$$Q = 10 \lg \frac{P_s}{\sigma_{\text{total}} + \sigma_0} \approx 10 \lg \frac{P_s}{\sigma_{\text{total}}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{ASE}}^2 + \sigma_{\text{FWM}}^2 + \sigma_{\text{XPM}}^2$$

其中,  $\sigma_{\text{total}}$  表示交叉相位调制、四波混频效应及放大自发辐射的标准差,  $P_s$  表示对应光路信道的功率峰值,  $\sigma_0$  表示信号为 0 时的强度标准差。

##### 4.2 目标函数定义

基于上述分析与定义, 构建基于 SDN 的多目标自适应路由与波长分配模型。在不同服务供应商基础设施上, 采用 SDN 统一控制逻辑进行调度, 利用网络可编程性特点执行业务资源的虚拟化配置, 从而实现 RWA 的有效部署。在资源部署过程中, 需要考虑以下几点: 1) 服务功能序列的构建; 2) 不同供应商提供的服务基础设施的选择; 3) 根据调度目标及约束选择相匹配的光路。结合以上分

析, 本文将基于 SDN 的全光网络的资源分配问题构建为一个 0-1 整数规划问题, 其模型可以表示为  $M = (C, I, W)$ , 其中,  $C$  表示根据需要由网络抽象所构建的服务功能链, 由服务功能集合组成;  $I$  表示服务集合内部的链路资源实例;  $W$  表示链路资源内部可用的波段集合。相应目标函数的定义为

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{w_i} \left( \omega_1 T_{kji} + \omega_2 \frac{1}{Q_{kji}} \right) X_{kji}$$

- s.t. 1)  $Q_{kji} \geq Q_{th}$   
 2)  $B \geq B_{th}$   
 3)  $X_{kpi} = X_{kqi}, p, q \in \{1, \dots, n_j\}$   
 4)  $X_{kji} \in \{0, 1\}, i \in \{1, \dots, w_i\}, j \in \{1, \dots, n_j\}, k \in \{1, \dots, m\}$   
 5)  $\sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{w_i} X_{kji} = 1, j \in \{1, \dots, n_j\}, i \in \{1, \dots, w_i\}$   
 6)  $\omega_1 + \omega_2 = 1, \omega_1 > 0, \omega_2 > 0$  (6)

其中,  $Q_{th}$  和  $B_{th}$  分别表示  $Q$  因子阈值和带宽容量阈值,  $k, j, i, m, n_j$  和  $w_i$  分别表示服务功能链中服务功能集合、链路资源实例、链路可用的波段集合所对应的资源变量及相应的资源数量。

该模型融合了链路质量与调度时间 2 个指标, 以实现资源快速有效的调度。相应约束说明如下: 1)  $Q$  因子阈值, 所选择的链路需要满足指定阈值, 以保证所选择链路的信道质量符合传输要求; 2) 带宽容量阈值, 根据业务需求提供有效带宽, 保证 QoS 的传输要求; 3) 波长一致性, 链路序列均采用统一波长; 4)  $X$  取值为 1 或 0 代表相应资源的选择与否; 5) 保证光路资源的分配的唯一性; 6) 权值约束。

## 5 模型求解

由于 RWA 属于 NP 完全问题, 调度算法直接影响着 SO-MO-RWA 的性能, 针对本文所提模型的特点, 采用二进制混合拓扑粒子群优化 (BHTPSO, binary hybrid topology particle swarm optimization) 算法<sup>[35]</sup>对路径规划问题进行求解。

### 5.1 算法描述

粒子群优化 (PSO, particle swarm optimization) 算法由于具有较高的搜索效率, 广泛应用在不同领域中同时也发展了多个版本, 其中二进制粒子群优化 (BPSO, binary particle swarm optimization) 算法常用于解决整数规划等离散空间问题的 NP 优化问题, BHTPSO 针对 BPSO 易陷入局部最优解, 且收

敛速度慢等不足进行了优化, 有效地提升了性能, 在避免局部最优解的同时加速了收敛速度, 进一步提升了求解整数规划问题的效率。

与 BPSO 和 PSO 一样, BHTPSO 也是在混合拓扑粒子群优化 (HTPSO, hybrid topology particle swarm optimization) 算法的基础上离散化获得的。在 BHTPSO 中, 向量  $(X_i, V_i, P_{best_i})$  分别代表粒子  $i$  的位置、速度和最优位置,  $P_{best_i} = (P_{best_i}^1, P_{best_i}^2, \dots, P_{best_i}^d, \dots, P_{best_i}^n)$  和  $P_{gbest} = (P_{gbest}^1, P_{gbest}^2, \dots, P_{gbest}^d, \dots, P_{gbest}^n)$  分别代表其邻居粒子发现的最优位置和整个群体所获得的最优位置。BHTPSO 采用局部拓扑和全局拓扑相结合的方式进行搜索, 粒子  $i$  的下一个速度为

$$v_i^d(t+1) = w(t)v_i^d(t) + c_1(t)\text{rand}_1(P_{best_i}^d(t) - x_i^d(t)) + c_2(t)\text{rand}_2(P_{gbest}^d(t) - x_i^d(t)) \quad (7)$$

其中, 惯性权重  $w(t)$  为

$$w(t) = w_{\max} - \frac{t(w_{\max} - w_{\min})}{T} \quad (8)$$

当前粒子的下一位置可以根据群体最优  $P_{gbest}$  获得, 如式(9)所示。

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) + c_3(t)\text{rand}_3 \cdot (P_{gbest}^d(t) - x_i^d(t)) \quad (9)$$

其中, 加速因子  $c_1, c_2, c_3$  由式(10)计算获得。

$$c_j(t) = c_{j\min} + \frac{t(c_{j\max} - c_{j\min})}{T}, j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

为了提升对未知解的探索能力, 算法在搜索初期扩大搜索范围, 凸显全局搜索的效果, 随着迭代次数的增加, 减弱全局搜索强化局部搜索加速获得最优解。在此期间每个粒子的最优解需要参考  $P_{best_i}, P_{fbest_i}$  和  $P_{gbest}$  获得。

在 BHTPSO 算法的离散化过程中, 通过式(11)计算粒子的速度。粒子的速度大小与位置变化有直接的关系, 即 0 代表粒子当前位置不需要变化, 1 则相反。

$$S(a) = |\tanh(a)| \quad (11)$$

为了避免在多次迭代中出现停滞, 且无法获取最优解的现象, 可以将式(12)所示的  $E$  值添加给式(11), 以跳出本次迭代并继续加速收敛。

$$E = \operatorname{erf}\left(\frac{NF}{T}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{NF}{T}} e^{-t^2} dt \quad (12)$$

由此每个粒子的下一位置如式(13)所示。

$$\begin{aligned} a_i^d(t+1) &= v_i^d(t+1) + c_3(t) \operatorname{rand}_3(p_{\text{gbest}}^d(t) - x_i^d(t)), \\ S(a_i^d(t+1)) &= E + (1-E) \left| \tanh(a_i^d(t+1)) \right|, \\ x_i^d(t+1) &= \begin{cases} \operatorname{complement}(x_i^d(t), \operatorname{rand}_4 < S(a_i^d(t+1))) \\ x_i^d(t), \text{其他} \end{cases}, \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (13)$$

在对 SO-MO-RWA 求解的过程中，每个粒子  $X^i$  代表一个链路候选解，目标函数作为适应度函数，计算步骤描述如下。

**步骤 1** 初始化粒子  $X_i$ 、速度  $V_i$ 、位置  $P_{\text{best}_i}$  以及迭代次数等参数。

**步骤 2** 获取  $P_{\text{best}_i}$ ，更新粒子速度。

**步骤 3** 通过速度  $v_i^d(t+1)$ 、群最优位置  $P_{\text{gbest}}$  等计算粒子的下一位置。

**步骤 4** 如果满足条件，则结束运行导出最优解，否则更新  $P_{\text{best}_i}$ 、 $P_{\text{gbest}}$ ，执行步骤 5。

**步骤 5** 更新参数  $w$ 。

**步骤 6** 更新参数  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 。

**步骤 7** 若最优位置在多次迭代中没有发生变化，添加  $E$  值跳出局部搜索，执行步骤 2。

### 5.2 算法参数优化

参数优化需要粒子群算法针对具体的问题选择适合的参数以提升模型的计算效率。

#### 1) 惯性权重

针对惯性权重的取值范围，本文分别选择  $[0.3,0.6]$ 、 $[0.7,0.9]$ 和 $[1.0,1.2]$ 这 3 个区间进行了实验，如图 2 所示。不同区间数值的测试结果显示在不断迭代过程中各自呈现出不同的变化幅度，其中参数取值在 $[0.3,0.6]$ 时系统的运行效果最优。

#### 2) 加速因子

本文算法中加速因子有  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  这 3 个。根据经验，粒子群算法  $c_1$  和  $c_2$  的取值在接近或者相等时系统运行效果较好，因此分 3 种情况对其进行参数设定，其中 2 种选择将三者设置相等数值，分别为 1.5 和 2.5，另一种将  $c_1$ 、 $c_2$  等值而  $c_3$  差异化取值。如图 3 所示，测试结果显示当  $c_3$  差异化取值时，系统的运行效果要优于三者取值相同的情况。

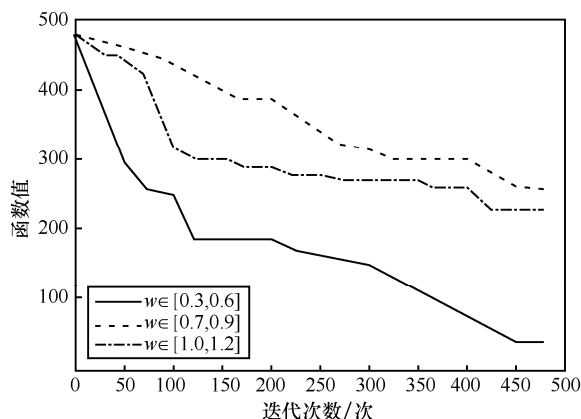


图 2 惯性权重参数测试

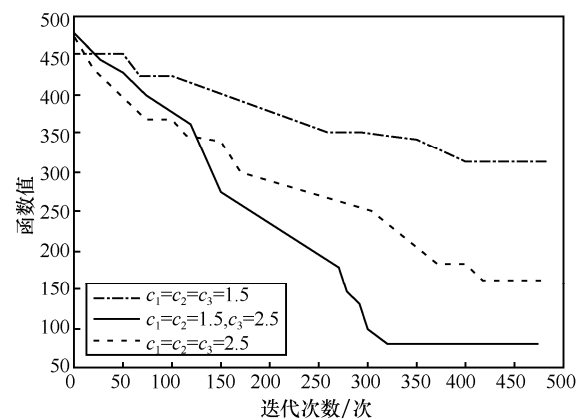


图 3 加速因子参数测试

### 3) 粒子数

为了测试不同数量的粒子对系统的影响，本文呈梯度地选择了 30、50、70、100 这 4 种粒子数。加速因子、惯性权重等参数设置在不同粒子数数量场景中均保持一致，如图 4 所示。实验结果显示，当粒子数  $N=100$  时，系统运行效果最好，也就是说在粒子数量较多的情况下，更能够提高算法的运行效率。

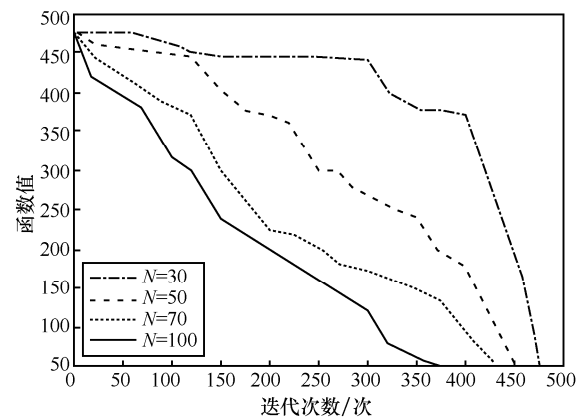


图 4 粒子数参数测试

#### 4) 最大粒子更新速度

最大粒子更新速度测试中, 均匀地选取了 3、6、9 这 3 个数值, 如图 5 所示。当  $v=6$  时, 测试结果要好于其他 2 种情况, 说明更新速度要保持在在一个相对适中的值为佳。

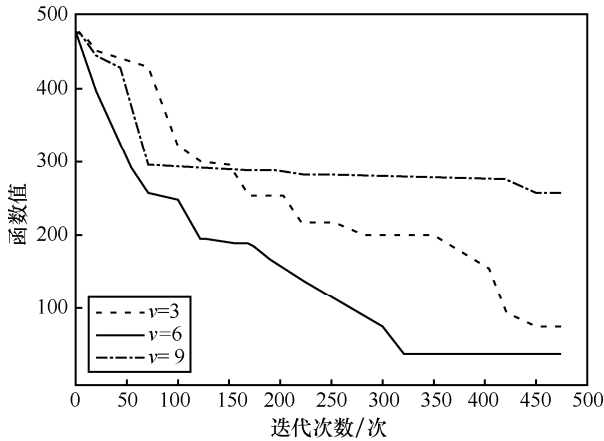


图 5 最大粒子更新速度参数测试

BHTPSO 算法相比于 BPSO 算法进一步提升了获取全局最优解的性能。在解决整数规划问题时, BHTPSO 算法能够根据相应的搜索策略和规则在解空间寻找最优可行解, 相比传统方法面对解空间过大、复杂度升高从而难于计算的情况, BHTPSO 算法能够较好地适应解空间的变化从而获得更好的近似最优解。与此同时, 为了有效评估该算法计算结果的精确度, 本文选择与隐枚举法进行比较。隐枚举法作为分支定界法的一个分类, 主要用于计算 0-1 整数规划问题, 该方法通常能够获得问题最优解。基于本文所定义模型以及参数的设定, 隐枚举法计算结果为 40.78, 为了保证 BHTPSO 算法计算结果的有效性, 采用区间估计的方法对其数值有效范围进行了统计分析, 置信水平设置为 0.95。由运行结果统计可得, BHTPSO 算法获得的最优解符合参数为  $\mu = 41.17$ 、 $\sigma = 0.42$  的正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 置信区间为  $[41.02, 41.31]$ , 即 BHTPSO 算法所求解与最优解之间的差值精度在 0.6%~1.3% 范围内, 非常接近最优解, 这说明该算法能够有效解决 0-1 整数规划问题。

BHTPSO 算法的复杂度主要由两部分构成, 一部分在于问题本身的规模, 包括解的维度  $D$ 、迭代的次数  $I$ 、粒子数  $N$  等, 此外还包括求解过程中粒子各种参数的运算步骤, 从模型关系可知, 算法的复杂度可以表示为问题规模的函数, 所以复杂度可

以表示为  $O(DIN)$ 。

#### 5.3 模型流程说明

本文整个模型的功能实现需要多个模块的调度协作, 调度流程如图 6 所示。首先系统能够实时感知底层的各种链路损伤及链路调度的状态信息, 将信息汇聚到资源管理模块并将多调度指标信息提供给 BHTPSO 算法进行计算, 同时将感知到的资源动态请求通过网络抽象转化成服务功能链的不同功能组件集合, 经过调度算法的优化获得合理的资源调度方案, 最后通过拓扑管理进行资源映射实现网络的资源重构。

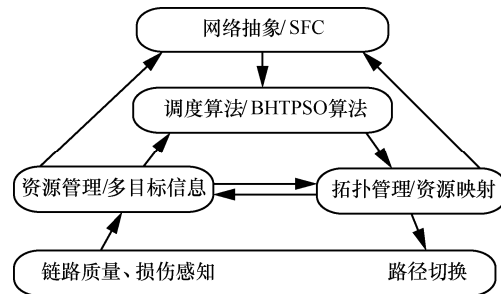


图 6 SO-MO-RWA 的结构流程

#### 6 仿真实验与结果分析

本文开发了相应的测试平台对所提出的方法进行仿真实验。测试平台采用离散事件仿真器 OMNeT++ 对网络的部件及功能进行了设计, 测试平台配置为 Intel i7, 8 GB DDR4 内存, Windows 7 64 bit。网络拓扑选择了欧洲全光网络标准测试拓扑 Pan-European<sup>[36]</sup>, 如图 7 所示, 其中包含 40 个波段、33 条链路及 17 个节点, 同时采用扩展 OpenFlow 协议实现组件间通信。相关参数如表 1 所示。

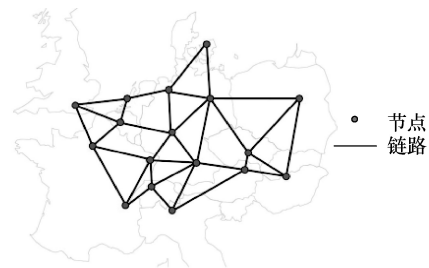


图 7 Pan-European 拓扑

基于损伤感知的路由与波长分配 (IA-RWA, impairment-aware based routing and wavelength assignment), 一直被认为是光网络主要的资源分配方法。本文采用其中较为典型的 2 种方法, 波长随机

分配 (IA-RWA-RF, impairment-aware based routing and wavelength assignment by random-fit) 和波长首次适应 (IA-RWA-FF, impairment-aware based routing and wavelength assignment by first-fit) 与本文所提方法进行比较。2 种方法采用的主要路由算法为短路径优先, 同时结合各自波长分配形式实现资源分配。

表 1 实验参数

参数	取值
$w_i$	10~40
$n_j$	2~4
$m$	5~10
$\omega_1$	0.6
$\omega_2$	0.4
$w$	0.3~0.6
$c_1$	1.5
$c_2$	1.5
$c_3$	2.5
迭代数量/次	500
初始粒子数量/个	100

1) 恢复时间

恢复时间指的是从感知损伤异常到系统调度完成实现资源重建所用的时间。对于全光网络这种大容量高速率传输的网络来说, 更短的恢复时间能够进一步减少对系统的影响保证服务质量。该指标主要是评价系统是否具有高效灵活的配置资源的调度能力, 为此在不同负载情况下分别设置了不同数量的失效链路, 以测试在不同负载及失效链路情况下系统的调度效果。同时对每种情况进行了 30 次测试, 取均值作为有效测试结果, 实验结果分别如图 8 和图 9 所示。

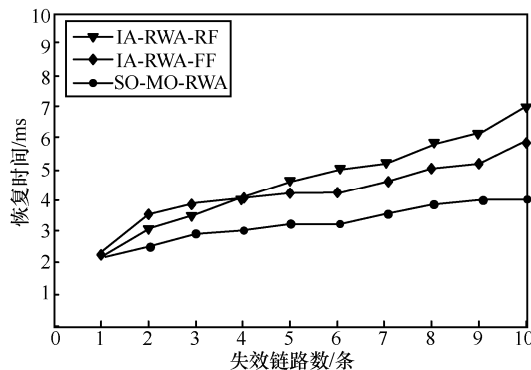


图 8 100 Erlang 条件下的恢复时间

首先, 在低负载情况下, 如图 8 所示, 当失效

链路数在 [1,4] 范围内, 由于可用资源较多, IA-RWA-RF 调度所用时间要略少于 IA-RWA-FF, 随着失效链路数量增多, IA-RWA-RF 所用时间呈现持续增长的态势, 在 [5,10] 的失效链路范围内, 其恢复时间从 4.45 ms 提升为 6.91 ms, 增长幅度达到 55%。相比于 IA-RWA-RF 和 IA-RWA-FF, SO-MO-RWA 所用时间的变化幅度要小, 呈现的曲线态势也较平缓。同样在 [5,10] 范围内, 其恢复时间从 2.92 ms 到 3.65 ms, 增长幅度为 25%。其次, 在负载较高的情况下, 如图 9 所示, IA-RWA-RF 所用时间要多于 IA-RWA-FF, 同时两者均高于 SO-MO-RWA, 实验结果显示, 在失效链路为 [6,10] 范围内, 3 种方法呈现了一定的差异, IA-RWA-RF 从 5.13 ms 变化到 7.91 ms, 变化幅度为 54%, IA-RWA-FF 从 4.64 ms 变化到 6.25 ms, 变化幅度为 35%, SO-MO-RWA 的 3.71 ms 变为 4.09 ms, 幅度为 10%。

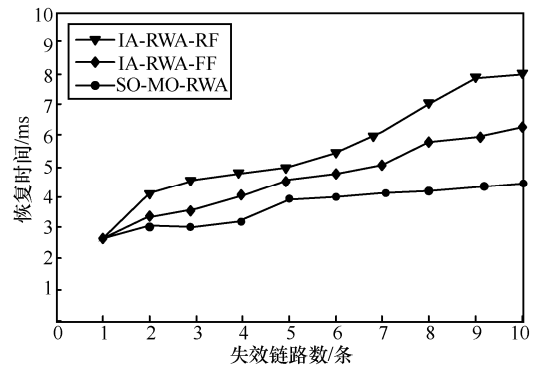


图 9 300 Erlang 条件下的恢复时间

从测试结果可以看出, 在不同负载情况下, SO-MO-RWA 所用时间都要低于 IA-RWA-RF 和 IA-RWA-FF, 其原因主要有以下几点: 首先, 在调度结构方面, SO-MO-RWA 采用 SDN 控制器通过统一的控制接口, 实时获取链路的运行状态信息, 对链路资源进行自适应调整, 保证服务的持续有效; 其次, 在调度方式上, 虚拟化的资源调度方式能够进行快速灵活的资源部署, 面向业务需求优化网络资源配置; 最后, SO-MO-RWA 以调度时间为目标, 同时选择高效的全局优化算法对调度目标进行资源匹配, 进一步提高了映射资源的执行效率, 缩短了调度时间。相比而言, 其他 2 种方法采用短路径优先, 简单但具有局部性特点, 需要在路由基础上进一步对光路进行分配实现完整的资源调度, 资源分配效率相对要低, 无法保证在发生多条链路失效情况下的系统调度性能。

2) 阻塞率

光网络的带宽资源是由不同的波长信道构成的，不同传输需求会分配不同的带宽。为了满足波长一致性的要求，不同链路要选择相同波长信道传输信号，当部分链路无法分配有效资源时，调度就会受到阻塞，阻塞率反映了有效链路资源的分配情况。由于不同算法资源调度方式直接决定着信道的分配方式，因此该指标也作为评估调度算法资源分配性能的重要指标。如图 10 所示，随着网络负载不断升高，3 种方法均有不同幅度的上升，其中，由于信道分配具有较大的随机性，因此 IA-RWA-RF 在 [40,200] 的负载区间内阻塞率增长较为明显，要高于 IA-RWA-FF。相比这 2 种算法，SO-MO-RWA 的指标变化幅度相对平缓，在 [90,160] 的负载区间内，其阻塞率从 2.19% 变为 2.47%，增长幅度为 12.8%。IA-RWA-RF 和 IA-RWA-FF 的阻塞率分别从 2.52% 提升到 4.24% 和 4.03% 提升到 6.67%，增长幅度分别为 68% 和 65%；与此同时，在 [170,200] 的负载区间内，SO-MO-RWA 随着负载的增加，指标并未呈现明显的增幅，而其他 2 种算法的上升幅度变化较为明显。由此，测试结果显示，整个测试区间内，SO-MO-RWA 相较于其他 2 种算法具有更低的阻塞率。

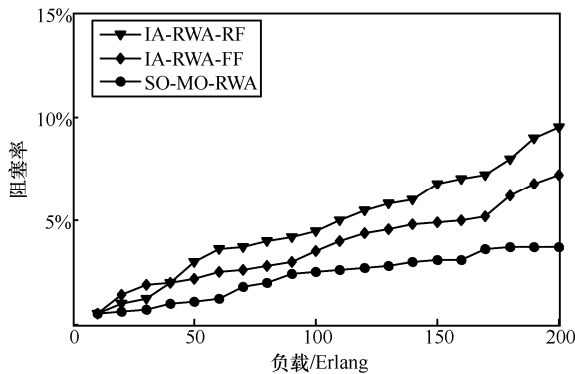


图 10 阻塞率测试结果

分析原因主要有以下几方面：首先，SDN 控制器能够统一管理网络拓扑信息，从全局角度汇聚底层的链路损伤信息，以及链路切换所需要的状态信息，进而对服务资源序列进行链路选择与流量规划，匹配有效资源避免阻塞的发生；其次，通过服务功能链方式实现对资源序列的优化部署，引导链路资源合理配给，提高资源的分配效率；最后，本文将链路资源的分配问题构建为 0-1 整数规划问

题，将链路传输需求等作为约束，并采用改进的二进制粒子群算法进行了全局优化，进一步提高了对有效资源的分配效率及链路建立的成功率。IA-RWA 采用马尔可夫链对路径资源进行构建，相比于基于 SDN 的全局资源调配的方式，这种概率模型存在一定的不确定性，且随着系统复杂度越来越高，这种不确定性更加明显，因此在实验中随着负载增加，其阻塞率也会明显增加。

3) 资源利用率

资源利用率是评价参与信息传输组件使用效率的指标，资源利用率与网络的运作方式有着紧密的关系。在以 IA-RWA-RF 和 IA-RWA-FF 为代表的 IA-RWA 调度方式中，网络调度与物理拓扑是紧耦合的，资源调度缺乏灵活性，导致资源配置融入更多冗余资源进而降低网络资源利用率。图 11 测试了 3 种算法的资源利用率。在不同的负载情况下，IA-RWA-RF 和 IA-RWA-FF 算法所对应的资源利用率在 19%~41% 范围内，而 SO-MO-RWA 对资源的利用率则要高出很多，范围为 40%~64%。结果显示，在相同负载情况下 SO-MO-RWA 均高于其他两者。虽然随着负载的增加，需要更多的资源参与调度，资源利用率均有所下降，但是相对趋势并没有变化。

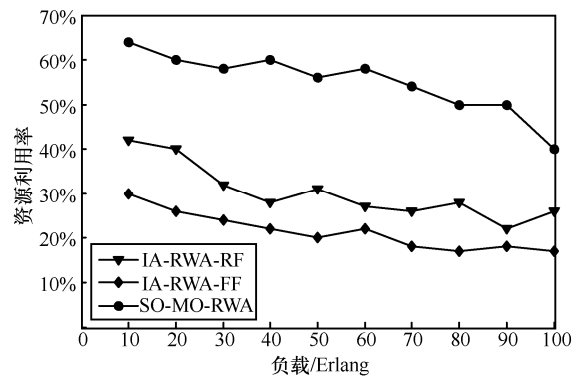


图 11 资源利用率测试结果

这是由于在 SDN 架构下控制与数据转发之间关系的解耦，以及服务功能虚拟化的应用极大地提高了网络资源配给的灵活性，能够有针对性地进行资源配给，从而有效提升资源的使用效率。同时，SDN 统一控制逻辑能够根据全局信息进行策略规划，制定相应的资源需求方案，从而提高资源的分配利用率。SO-MO-RWA 对资源的优化，提高了资源及路径的有效性，相比其他 2 种方法的局部优化调度策略而言，在资源利用上更具有优势。此外，

SDN 能够支持不同粒度的调度, 对不同资源调度需求具有更好的适应性, 根据调度要求进行资源按需匹配, 有效提高资源利用率。

## 7 结束语

本文基于 SDN 面向全光网络提出了一种自适应多目标路由与波长分配方法。该方法考虑了调度时间及链路质量多个调度目标, 根据服务功能链的资源分配结构将 RWA 问题定义为 0-1 整数规划模型, 同时采用优化的二进制粒子群算法 BHTPSO 对构建的模型求解, 实现了 SDN 下的路由与波长的分配。实验结果表明, 本文提出的 SO-MO-RWA 方法在恢复时间、阻塞率及资源利用率等性能指标上均优于 IA-RWA-RF 和 IA-RWA-FF 方法。这表明基于 SDN 的路由与波长分配相比于传统方法具有更好的性能, 同时也为光网络进一步开展相关研究提供了崭新思路。下一步研究工作中, 将考虑设计全光网络故障条件下, 面向不同需求的自主调度方案。

## 参考文献:

- [1] JI Y F, ZHANG J. Prospects and research issues in multi-dimensional all optical networks[J]. *Electronic Technology & Information Science*, 2016, 59(10):1-14.
- [2] ANGELOU M, AZODOLMOLKY S. Benefits of implementing a dynamic impairment-aware optical network: results of EU project DICONET[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(8):79-88.
- [3] PATEL D S, PANCHOLI P N. Security issues and attack management in AON-A review[C]//*Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking*. IEEE, 2012:1-6.
- [4] EBRAHIMZADEH A, RAHBAR A G, ALIZADEH B. Dynamic impairment-aware provisioning based on quadratic model in all optical networks[C]//*Electrical Engineering*. IEEE, 2015:193-197.
- [5] SHADAB M, PIRUTHIVIRAJ P. Simulation and analysis of blocking probability using RWA algorithm for all-optical networks[J]. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2014, 2(5):4311-4317.
- [6] BONANI L H, FORGHANI-ELAHABAD M. An improved least cost routing approach for WDM optical network without wavelength converters[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016(32):30-35.
- [7] TYAGI D K, CHAUBEY V K, KHANDELWAL P. Routing and wavelength assignment in WDM network using IWD based algorithm[C]//*International Conference on Computing, Communication and Automation*. IEEE, 2017:1424-1429.
- [8] EBRAHIMZADEH A, RAHBAR A G, ALIZADEH B. Dynamic impairment-aware provisioning based on quadratic model in all optical networks[C]//*Electrical Engineering*. IEEE, 2015:193-197.
- [9] MARSDEN A, MARUTA A, KITAYAMA K I. Reducing the lightpath establishing time of FWM-aware dynamic RWA for wavelength-routed optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2009, 18(2): 183-190.
- [10] DIZDAREVIC H, DIZDAREVIC S, SKRBIC M, et al. A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in transparent wavelength routed optical networks[C]//*International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*. IEEE, 2016:530-536.
- [11] VELASCO L, JIRATTIGALACHOTE A, MONTI P, et al. Probabilistic-based approach for fast impairments-aware RWA in all-optical networks[C]//*Optical Fiber Communication*. IEEE, 2010:1-3.
- [12] BANDYOPADHYAY A, CHAKRABORTY D, BHATTACHARYA U, et al. On improving static routing and wavelength assignment in WDM all-optical mesh networks[M]//*Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics*. Heidelberg: Springer, 2016.
- [13] JAUMARD B, DARYALAL M. Optimizing spectrum utilization in dynamic RWA[C]//*International Conference on Optical Network Design and Modeling*. IEEE, 2016:1-6.
- [14] TANG L R, LOU J, HE Y. Electrical optical network RWA algorithm based on prediction and layered graph model[C]//*International Conference on Natural Computation and, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. IEEE, 2016:2014-2018.
- [15] RICCIARDI S, SEMBROIZ-AUSEJO D, PALMIERI F, et al. A hybrid load-balancing and energy-aware RWA algorithm for telecommunication networks[J]. *Computer Communications*, 2015, 77(C):85-99.
- [16] PAVARANGKOON P, OKI E. A routing and wavelength assignment scheme considering full optical carrier replication in multi-carrier-distributed optical mesh networks with wavelength reuse[J]. *Optical Switching & Networking*, 2018(28):23-35.
- [17] HSU C C, CHO H J, FANG S C. Solving routing and wavelength assignment problem with maximum edge-disjoint paths[J]. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2017, 13(2):62-62.
- [18] MONTERO R, AGRAZ F, PAGÈS A, et al. Dynamic topology discovery in SDN-enabled transparent optical networks[C]//*International Conference on Optical Network Design and Modeling*. IEEE, 2017: 1-6.
- [19] ROUSTRAY S K, JHA M K, JAVALI A, et al. Software defined networking for optical networks[C]//*Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics*. IEEE, 2017:133-137.
- [20] LEENHEER M D, HIGUCHI Y, FURUSAWA T, et al. SDN control of optical networks[C]//*European Conference on Optical Communication*. IEEE, 2017:1-3.
- [21] YAN S Y, NEJABATI R, SIMEONIDOU R. Data-driven network analytics and network optimisation in SDN-based programmable optical networks [C]//*International Conference on Optical Network Design and Modeling*. IEEE, 2018:234-238
- [22] SANTOS J. On the impact of deploying federated SDN controllers in optical transport networks[C]//*Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*. IEEE, 2016:1-3.
- [23] CHAN V W S, JANG E. Cognitive all-optical fiber network architecture[C]//*International Conference on Transparent Optical Networks*. IEEE, 2017:1-4.
- [24] KONDEPU K, JACKSON C. Fully SDN-enabled all-optical architecture for data center virtualization with time and space multiplexing [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 7(10) : 90-101.

- [25] JACKSON C, KONDEPU K, OU Y, et al. COSIGN: a complete SDN enabled all-optical architecture for data centre virtualisation with time and space multiplexing[C]// European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2017:1-3.
- [26] TALLI G, PORTO S, CAREY D, et al. Multi-service SDN controlled reconfigurable long-reach optical access network[C]// European Conference on Networks and Communications. IEEE, 2017:1-5.
- [27] KAMCHEVSKA V, CRISTOFORI V, ROS F D, et al. Synchronization algorithm for SDN-controlled all-optical TDM switching in a random length ring network[C]// Optical Fiber Communication Conference. IEEE, 2016:1-3.
- [28] JACKSON C, NEJABATI R, AGRAZ F, et al. Demonstration of the benefits of SDN technology for all-optical data centre virtualisation[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. IEEE, 2017:1-2.
- [29] JI Y, ZHANG J, ZHAO Y, et al. All optical switching networks with energy-efficient technologies from components level to network level[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(8):1600-1614.
- [30] PAOLUCCI F, SAMBO N, MELONI G, et al. SDN control of all-optical frequency conversion and defragmentation for super-channels[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. IEEE, 2014:1-3.
- [31] XIONG Y, SHI J, LYU Y, et al. Power-aware lightpath management for SDN-based elastic optical networks[C]// International Conference on Computer Communication and Networks. IEEE, 2017:1-9.
- [32] LI Y, MO W, ZHU S, et al. tSDX: enabling impairment-aware all-optical inter-domain exchange[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, PP(99):1.
- [33] ALDRIN S. Service function chaining (SFC) operation, administration and maintenance (OAM) framework[Z].4th ed. IETF, (2018-03-05) [2018-07-30].
- [34] 伍之昂, 罗军舟, 宋爱波,等. 具有 QoS 保证的服务资源联合分配与管理[J]. 软件学报, 2009, 20(12): 3150-3162.  
WU Z A, LUO J Z, SONG A B, et al. QoS guaranteed service resource co-allocation and management[J]. Journal of Software, 2009, 20(12): 3150-3162.
- [35] BEHESHTI Z, SHAMSUDDIN S M. Memetic binary particle swarm optimization for discrete optimization problems[J]. Information Sciences An International Journal, 2015, 299(C): 58-84.
- [36] CUGINI F, SAMBO N. Enhancing GMPLS signaling protocol for encompassing quality of transmission (QoT) in all-optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(19): 3318-3328.

## [作者简介]



赵中楠（1978- ），男，黑龙江哈尔滨人，博士，哈尔滨理工大学讲师，主要研究方向为通信系统安全、软件定义网络、认知网络等。



王健（1979- ），女，黑龙江哈尔滨人，博士，哈尔滨理工大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为移动群智感知、认知网络、可信计算。



郭红微（1978- ），女，黑龙江哈尔滨人，黑龙江工程学院讲师，主要研究方向为安全态势感知与认知计算。