

基于斐波那契树优化算法的数据中心流量调度策略

王耀民^{1,2}, 王霞¹, 董易¹, 张松海¹, 施心陵¹

(1. 云南大学信息学院, 云南 昆明 650504; 2. 中国电信股份有限公司昆明分公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 为提高运营商数据中心流量调度能力, 同时考虑网络结构和网络流量两方面因素, 设计了一种软件定义网络 (SDN) 架构数据中心的流量分析预测在线调度机制。针对数据中心流量调度的多维、多约束和多模态问题, 提出基于斐波那契树优化 (FTO) 算法的流量调度策略, 将 FTO 算法嵌入分析预测和在线调度 2 个阶段, 发挥 FTO 算法全局局部交替迭代寻优和多模特性, 得到流量调度的最优解和多个有价值的次优解。模拟平台验证表明, FTO 流量调度策略能够对数据中心流量进行合理调度, 有效提升运营商数据中心网络的负载均衡能力。

关键词: 数据中心; 软件定义网络; 流量调度; 斐波那契树优化; 多模寻优

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020075

Data center traffic scheduling strategy based on Fibonacci tree optimization algorithm

WANG Yaomin^{1,2}, WANG Xia¹, DONG Yi¹, ZHANG Songhai¹, SHI Xinling¹

1. School of Information Science & Engineering, Yunnan University, Kunming 650504, China

2. China Telecom. Limited Co. Kunming Branch, Kunming 650051, China

Abstract: To improve traffic scheduling capabilities in network provider data centers, both network structure and network traffic flow were considered at the same time. The analysis prediction and online scheduling mechanism was proposed in data center based on software defined networking (SDN). Aiming at the multi-dimensional, multi-constrained and multi-modal problems of traffic flow scheduling in data centers, the traffic flow scheduling strategy based on Fibonacci tree optimization (FTO) algorithm was proposed. FTO algorithm was embedded into two stages of analysis prediction and online scheduling, took it advantage of global local alternating and multi-model optimization characteristics, the optimal solution and suboptimal solutions of traffic scheduling had been got at one time. The emulator result shows that, the FTO traffic scheduling strategy can schedule traffic in data centers reasonably, which improves the load balancing capability of network providers' data centers effectively.

Key words: data center, SDN, traffic scheduling, Fibonacci tree optimization, multi-modal optimization

1 引言

互联网已成为当代社会经济发展与技术革新的重要基础设施。数据中心承载各类互联网业务, 流量呈指数级增长, 流量调度的不合理会导致网络负载不均, 严重影响网络性能和业务体验^[1]。因此, 合理的流量调度对保证数据中心网络性能和业务

体验至关重要。

近年来, 为提高数据中心流量调度能力, 研究者提出了软件定义网络 (SDN, software defined networking) 架构的数据中心^[2]。SDN 架构将网络的控制平面与数据平面解耦, 逻辑集中的控制平面和可编程的数据平面能实现流量灵活的细颗粒调度^[3-4], 给数据中心的流量优化带来新的解决思路^[5-14]。

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2020-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.81771928, No.61561049)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.81771928, No.61561049)

目前,许多运营商都开始对 SDN 架构数据中心进行探索和实验^[15]。

运营商数据中心网络规模大,承载业务多,这对流量调度提出更高的要求。运营商数据中心通常根据运营经验或设备默认的静态阈值实施流量调度。静态阈值的调度策略无法针对数据中心在线流量情况进行动态自适应调度,影响流量优化的效果。而且由于数据中心流量的动态特性^[16],静态阈值的调度策略容易造成流量负载不均,对数据中心整体性能造成影响。

针对上述不足,本文以运营商数据中心为研究对象,同时考虑网络结构和网络流量两方面因素,设计一种 SDN 架构数据中心的流量分析预测在线调度机制,提出基于斐波那契树优化 (FTO, Fibonacci tree optimization) 算法的数据中心流量调度策略(下文简称 FTO 流量调度策略)。所提流量调度策略能基于多时间尺度进行多维、多约束、多模态的流量调度寻优,实现数据中心多优化方案的流量负载均衡调度,以解决运营商数据中心流量调度优化问题,提高数据中心网络负载均衡能力。本文的创新和主要工作如下。

1) 设计数据中心流量的分析预测在线调度机制。以数据中心历史流量信息为参考,根据卡尔曼一步预测原理分析预测在线流量;发挥 SDN 集中控制和可编程特性,依据分析预测的动态阈值信息识别网络链路中的异常在线流量,以最小化最大链路利用率为目标,结合动态阈值信息实施数据中心流量在线调度优化;分析流量异常原因,迭代修正分析预测函数。

2) 提出 FTO 流量调度策略。将 FTO 算法嵌入流量调度机制的分析预测和在线调度 2 个阶段,发挥算法全局局部交替迭代寻优和多模特性优势,求解分析预测的动态阈值和在线调度的优化方案。FTO 算法设计了 FTO 结构、约束冲突原则和距离参数,解决流量调度的多维、多约束和多模态问题。

3) Mininet 搭建模拟运营商数据中心网络,验证 FTO 流量调度策略的有效性和适用性。模拟平台验证表明,FTO 流量调度策略能够对数据中心流量进行合理调度,有效提升网络负载均衡能力。FTO 算法具有稳定的全局寻优能力和灵活的多模特性,同等条件下 FTO 算法寻优结果优于遗传算法(GA, genetic algorithm)和蚁群优化(ACO, ant colony

optimization) 算法。而且,FTO 算法可根据数据中心运营要求得到全局最优方案或多个有价值的次优方案,对解决基于不同时间尺度的数据中心流量调度优化问题具有实用价值。

2 相关工作

目前,基于 SDN 架构数据中心的流量调度问题受到了国内外学术界和产业界的广泛关注,周桐庆等^[4]对 SDN 的流量调度问题进行了综述,明确指出 SDN 能借助集中控制器的网络全局视野和流量的集中控制,提高网络链路利用率、负载均衡能力,避免网络拥塞。关于数据中心的流量调度研究可分为以网络结构为中心和以网络流量为中心两类^[5]。以网络结构为中心的调度策略利用数据中心多等价路径对流量进行转发。Chiesa 等^[6]提出基于等价多路径(ECMP, equal-cost multi-path)算法的流量调度方法,通过数据分组头哈希值对应等价路径权重转发流量。但由于转发过程大多不考虑流量大小与链路适配性,可能造成多条等价链路负载不均和网络拥塞。文献[7-8]提出一种基于链路关键度的自适应负载均衡流量调度方法,针对网络瞬时性能下降做出调整,但流量拆分可能造成接收端数据分组丢失或乱序。Hartert 等^[9]提出一种 DFEO(declarative forwarding expressive optimizer)方法,基于多路径网络结构设计中间节点路由模型和启发式计算来控制运营商级网络的流量调度,DFEO 对网络结构要求较高,实际网络应用部署的难度较大。以网络流量为中心的调度策略根据流量状况调整其传输路径。Al-fares 等^[10]提出 Hedera 流量调度方案,当识别到大象流时,通过模拟退火算法得到该流量的优化路径。文献[11-12]通过智能优化算法的粒子群算法寻优得到最优流量调度方案。文献[13-14]提出一种基于蚁群优化的链路负载均衡策略,并在此基础上进一步提出了一种面向带宽碎片最小化和服务质量(QoS, quality of service)保障的动态流量调度算法。文献[17-18]提出了一种基于 SDN 的数据中心网络多路径流量调度算法。文献[19]提出了面向云数据中心的多业务差异化流量管理优化策略,可解决运营商云数据中心多业务差异化流量管理问题,有效提升了云数据中心的网络性能和业务体验。文献[20]设计了一种贪心轮询算法依次为大象流选择轻载路径,以避免大象流造成的链路拥塞。Zhang 等^[21]应用稳定匹配理论提出了一种大象流调

度解决方案 Fincher, 可以有效地提高流量调度性能并避免拥塞, 但识别大象流的静态阈值无法针对数据中心流量的动态特征进行自适应调度, 实际应用中存在局限性。Nagaraj 等^[22]针对不同服务级别目标, 设计了一种分布式流量优化算法 NUMfabric, 解决数据中心网络资源利用率问题, 流量能快速收敛到指定网络路径并最小化流量调度周期, 但分布式优化算法容易陷入局部最优。

综上所述, 以网络结构为中心的调度策略容易造成负载不均、分组丢失或乱序等问题; 而以网络流量为中心的调度策略通常只能对单一流量或局部路径进行优化, 无法实现全局优化。两类调度策略均存在不足之处和局限性, 不适用于大型数据中心。

因此, 运营商数据中心流量调度策略必须在适应其网络结构和流量动态特性的基础上实现流量的全局优化和动态自适应。同时, 为应对流量动态特性, 要求调度策略能一次提供多个符合条件的可选优化方案, 提高流量优化的灵活性和有效性。

3 流量调度机制

数据中心的网络结构和流量特征是设计流量调度机制的关键。学校、企业和运营商等不同类型的数据中心, 由于其网络结构、承载业务和用户属性不同, 流量特征具有明显的差异^[23]。因此, 需要针对数据中心特点设计与之相适应的流量调度机制。

3.1 流量信息描述

本文以运营商数据中心为研究对象, 对其一年中的不同季节、一个月内的不同周以及一周内的工作日(周一至周五)和休息日等历史流量进行研究。运营商数据中心周流量如图 1 所示。

研究表明, 运营商数据中心流量既有相似性也

存在差异性, 图 1 充分体现了运营商数据中心流量的周期性、随机性和突发性等特点。流量的周期性为分析预测提供依据; 流量的随机性和突发性要求调度机制具备动态自适应的在线调度能力。因此, 需要针对流量特征设计合适的调度机制。

3.2 流量调度机制设计

本文设计了 SDN 架构数据中心流量的分析预测在线调度机制, 发挥 SDN 集中控制器对流量的多维分析和全局控制优势, SDN 架构数据中心如图 2 所示。首先, 从运营管理的角度, 以数据中心同一季节内一天或一周的历史流量信息为依据, 应用智能优化算法对未来一天或一周数据中心的在线流量趋势进行一步预测, 将此分析预测结果作为异常流量识别依据; 然后, 对数据中心在线流量实时监测, 并按照多时间尺度进行统计分析, 当发现异常流量时激活在线调度机制, 通过智能优化算法的多维、多约束的多模态寻优实现流量调度优化; 最后, 分析异常原因迭代修正预测函数。

本文根据运营商数据中心网络结构和流量特性设计了流量的分析预测在线调度机制, 通过一步预测方法分析得到动态阈值, 与传统大象流和老鼠流的静态阈值调度机制相比能提高流量优化的准确性和有效性。SDN 集中控制的在线调度能避免传统分布式数据中心的局部限制, 确保流量优化的全局性和时效性。

3.3 流量调度机制建模

通过流量分析预测、异常流量识别和流量在线调度等环节实现数据中心流量的调度优化, 需要建立与流量调度机制各环节相匹配的模型与规则。

3.3.1 流量分析预测

参考数据中心流量的历史信息, 利用 FTO 求解多峰函数速度快、精度高的特性^[24], 得到流量动态

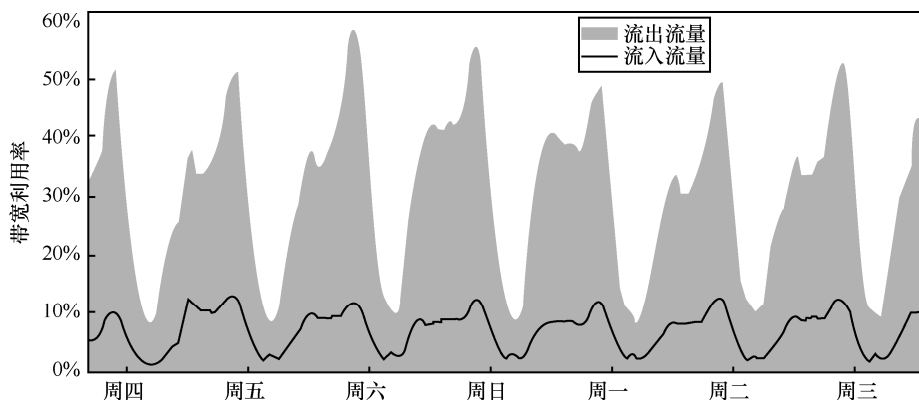


图 1 运营商数据中心周流量

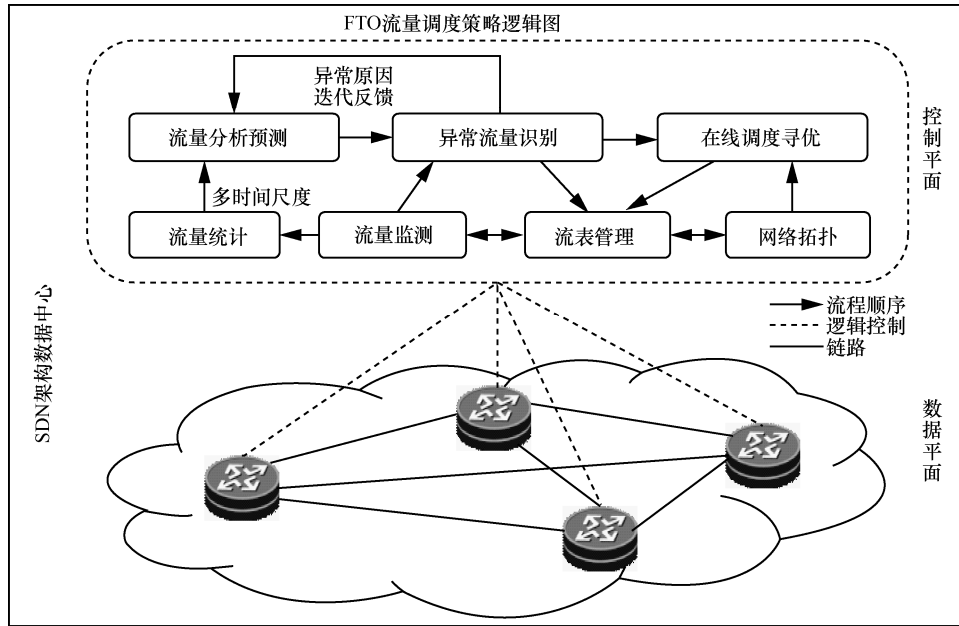


图 2 SDN 架构数据中心

阈值上下界。结合卡尔曼一步预测原理^[25-27]获得数据中心链路在线流量的分析预测函数，将分析预测结果作为异常流量识别依据装入 SDN 控制器，如式(1)所示。

$$P_{ij}(t) = B_{ij}(t) + W_{ij}(t) + v_{ij}(t), (i, j) \in E \quad (1)$$

其中， $P_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 上预测的总流量， $B_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 上预测的周期流量， $W_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 上预测的随机变化流量， $v_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 上预测的突发流量。

3.3.2 异常流量识别

SDN 集中控制器对数据中心在线流量进行实时监测，通过识别规则发现链路中的异常流量。设 $P_{ij}^{\max}(t)$ 、 $P_{ij}^{\min}(t)$ 为链路 (i,j) 的分析预测的动态阈值上下界函数， $f_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 的在线流量，网络中发现疑似的异常流量时为起始时刻 t_0 。异常流量识别规则如下。

规则 1 当 $t=t_0$ 时，如果 $f_{ij}(t_0) > P_{ij}^{\max}(t_0)$ ，且 $f_{ij}(t_0 + \Delta t) > P_{ij}^{\max}(t_0 + \Delta t)$ ，即在线流量大于依据历史流量信息分析预测的动态阈值上界，且持续时长超过时间间隔 Δt ，则表示网络链路中出现异常流量，可能引起网络拥塞，需要激活在线调度机制进行流量调度优化。

规则 2 当 $t=t_0$ 时，如果 $f_{ij}(t_0) < P_{ij}^{\min}(t_0)$ ，且 $f_{ij}(t_0 + \Delta t) < P_{ij}^{\min}(t_0 + \Delta t)$ ，或 $f_{ij}(t_0 + \Delta t) \rightarrow 0$ ，即在线

流量小于依据历史流量信息分析预测的动态阈值下界，且持续时长超过时间间隔 Δt ，或在线流量趋近于 0，则表示网络设备和链路可能出现中断或存在故障隐患，需尽快排除。

规则 1 和规则 2 保证了数据中心网络的稳定性，避免频繁流量调度对网络性能的影响。异常流量识别规则引入时间间隔 Δt 的概念，网络中发现疑似的异常流量时作为起始时刻 t_0 ；通过 Δt 的观察期确认后，再激活在线调度机制。引入时间间隔 Δt 与网络结构和业务流量特征的合理设置，能有效避免路由振荡或瞬时突发流量等的干扰，提高异常流量识别的准确性和网络的稳定性。

由此可见，本文设计的分析预测在线调度机制是基于历史数据的流量优化管理策略，其分析预测模型和异常流量识别规则均具有时间相关性，时间尺度可按实际应用需要选取小时、天、周、月和年等。合理的时间尺度设置能使所设计的分析预测模型和流量识别规则得以有效应用。综合网络运营管理、网络结构和业务流量特征以及用户的应用需求等方面因素，本文拟定时间尺度设置基本原则如下。

1) 结合数据中心网络运营管理和流量调度优化的实际需求，根据制定的流量优化目标设置与之适配的时间尺度，确保达到流量优化的目标。

2) 针对流量调度优化目标，结合网络结构、网络规模、流量特征、应用场景等各方面实际情况设

置相应时间尺度，确保流量优化达到预期效果。

3) 在分析数据中心承载的业务特征和用户业务需求的基础上，设置相应的时间尺度，确保流量调度机制实际应用的合理性和有效性。

3.3.3 流量在线调度

根据运营商数据中心网络特征，设计无向图 $G(V,E,C)$ ，其中， V 表示数据中心网络节点集合， E 表示数据中心链路集合， C 表示 V 和 E 的容量， C_{ij} 表示链路 (i,j) 的带宽容量， $(i,j) \in E$ ， D 和 L 分别表示数据中心网络节点和链路数量。

集合 $K = \{1, 2, \dots, k, \dots\}$ 表示数据中心的业务。 N_k 表示第 k 个业务流的备选路径集合，第 k 个业务流的可选路由集合为 $P_k = \{p_k^1, p_k^2, \dots, p_k^l, \dots\}, l \in N_k$ 。三元组 (S_k, d_k, λ_k) 中， S_k 和 d_k 分别表示源节点和目的节点， λ_k 表示业务带宽需求。 λ_{kl} 表示第 k 个业务流在路径 l 上的流量。 X_{ij}^{kl} 表示第 k 个业务流的第 l 条路径是否经过链路 (i,j) ， $f_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 上的在线流量， μ 表示网络中的最大链路利用率。

$$X_{ij}^{kl} = \begin{cases} 1, & \text{业务 } k \text{ 的第 } l \text{ 条路径经过链路 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{ij}(t) = \sum_{l \in N_k} \sum_{k \in K} \lambda_{kl} X_{ij}^{kl} \quad (2)$$

$$\mu = \max \left\{ \frac{f_{ij}(t)}{C_{ij}} \right\}, \mu \in \{0, 1\} \quad (3)$$

在线调度过程中，SDN 集中控制的网络全局视图根据数据中心网络结构，将存在异常流量的重载链路中部分流量向网络中相对轻载的链路转移，以最小化最大链路利用率为优化目标函数^[28-29]，同时，考虑网络结构和网络流量两方面因素，避免数据中心局部出现网络拥塞，提高网络整体负载均衡能力。

目标函数如式(4)所示。

$$\min \mu \quad (4)$$

约束条件如式(5)~式(9)所示。

$$\sum_{j(i,j) \in E} X_{ij}^{kl} - \sum_{j(j,i) \in E} X_{ji}^{kl} = 0, k \in K, l \in N_k, i \neq s_k, d_k \quad (5)$$

$$\sum_{j(i,j) \in E} X_{ij}^{kl} - \sum_{j(j,i) \in E} X_{ji}^{kl} = 1, k \in K, l \in N_k, i = s_k \quad (6)$$

$$\sum_{j(i,j) \in E} X_{ij}^{kl} - \sum_{j(j,i) \in E} X_{ji}^{kl} = -1, k \in K, l \in N_k, i = d_k \quad (7)$$

$$f_{ij}(t) \in \{P_{ij}^{\min}, P_{ij}^{\max}\} \cup f_{ij}(t) \in \{0, C_{ij}\mu\} \quad (8)$$

$$X_{ij}^{kl} \in \{0, 1\}, \mu \geq 0 \quad (9)$$

约束条件中，式(5)~式(7)表示数据中心网络流量守恒；式(8)表示链路上承载的业务流量总和满足异常流量识别规则约束或不超过链路的物理带宽；式(9)表示第 k 个业务流是否选择第 l 条路径，同时最大链路利用率非负。

由此可知，数据中心流量调度不但是 NP-hard 问题，而且是一个多维、多约束的多模态优化问题。本文利用 FTO 算法全局寻优能力和多模特性^[30-31]，尝试将 FTO 算法嵌入流量分析预测在线调度机制中，通过算法迭代寻优分析预测的动态阈值和在线调度的优化方案，解决运营商数据中心流量调度问题。

4 FTO 算法

FTO 算法是一种基于斐波那契法和黄金分割法思想设计的智能优化算法^[24-25]。为解决数据中心流量调度多维、多约束的多模态问题，FTO 算法需要具备多维寻优、多约束处理和多模能力。

4.1 FTO 算法原理

斐波那契法和黄金分割法求解一维单峰函数无约束问题的最优性已得到证明^[32]。针对数据中心流量调度问题，要求 FTO 算法能将斐波那契法和黄金分割法的最优性从一维拓展到多维。在流量调度的多维解空间依概率随机生成全局点，按照黄金分割法生成局部点，形成算法的全局局部交替迭代寻优过程。利用计算机内存存储算法寻优得到的可行解，根据斐波那契数列增长形式，将其构造为 FTO 算法树结构。

4.2 FTO 算法基本结构

FTO 算法针对流量调度问题构建多维空间的斐波那契树结构，其基本结构如图 3 所示。

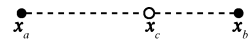


图 3 FTO 算法基本结构

其中，向量 x_a 为全局端点， x_c 为局部试探点。向量 x_a, x_b, x_c 满足式(10)的比例关系和式(11)的线性关系。

$$\frac{\|x_c - x_a\|}{\|x_b - x_a\|} = \frac{\|x_b - x_c\|}{\|x_c - x_a\|} = \frac{F_i}{F_{i+1}} \quad (10)$$

$$x_c = x_a + \frac{F_i}{F_{i+1}}(x_b - x_a) \quad (11)$$

其中, F_i 为斐波那契数列第 i 项, $\frac{F_i}{F_{i+1}}$ 符合黄金分割法。

4.3 FTO 算法树结构

FTO 算法在流量调度机制的分析预测和在线调度寻优过程中主要分为全局搜索、局部搜索和 FTO 树生成 3 个阶段。在流量调度问题多维解空间中, 依概率随机生成初始化端点集合 S , 集合大小满足斐波那契数列, 即 $|S|=F_i$ 。然后, 进入 FTO 算法迭代寻优的各阶段。

1) 全局搜索阶段。在流量调度问题的解空间中, 依概率生成全局随机点 G , 如式(12)所示。全局点 G 和端点集合 S 内的所有点按照 FTO 基本结构, 根据式(10)和式(11)生成 F_i 个新试探点。故此阶段共生成 $F_i + 1$ 个新增点, 一个全局点满足全局随机性, F_i 个局部试探点满足黄金分割法。

$$G = [x_1, x_2, \dots, x_d]$$

$$x_i = \text{unrand}(\min_i, \max_i) \quad (12)$$

其中, d 为维度, \max_i 和 \min_i 为解空间第 i 维的上下界, 函数 $\text{unrand}(\min_i, \max_i)$ 表示 G 中第 i 维满足全局随机性。

2) 局部搜索阶段。在流量调度问题解空间中, 端点集合 S 中函数值最优端点 f_{best} 与集合 S 内的其余所有端点根据 FTO 基本结构, 按照式(10)和式(11)生成 $F_i - 1$ 个新试探点, 局部试探点满足斐波那契数列特性。FTO 算法全局和局部搜索如图 4 所示。

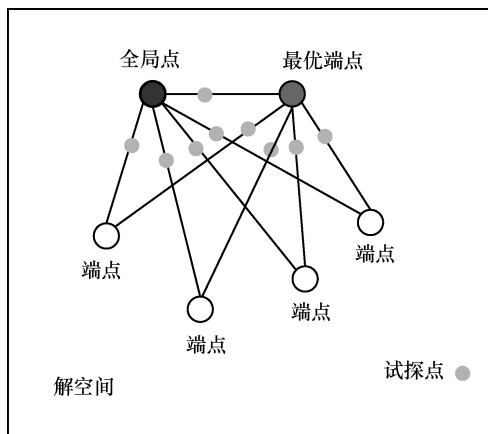


图 4 FTO 算法全局和局部搜索

3) FTO 树生成阶段。FTO 算法全局和局部搜索交替迭代 n 次后, 根据斐波那契数列增长形式, 保留 F_n 个可行解。利用计算机内存将留存的可行解构造满足黄金分割法的 FTO 结构, 如图 5 所示。

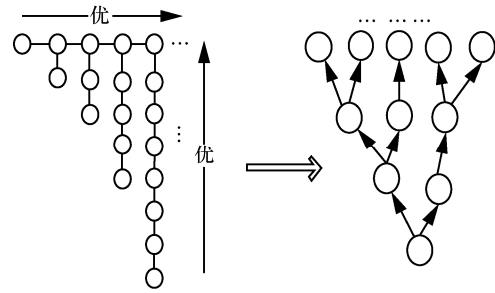


图 5 FTO 结构

FTO 算法迭代过程全局点和局部点均能提供启发式信息, 全局点的全局随机性和局部点的斐波那契数列性保证算法的全局随机性和最优性。FTO 算法全局局部交替迭代过程如同在问题解空间构建了一张搜索“网”, 通过全局搜索的扩张和局部搜索的收缩, 既保证了算法全局和局部搜索的均衡性, 使迭代寻优过程渐近收敛逐步逼近最优解, 又可有效避免算法陷入局部最优。

随着算法迭代次数的增加, 斐波那契数列值快速增长会影响算法效率。考虑流量调度优化问题实际, 设定 FTO 结构大小如式(13)所示。

$$\text{num} < F_i, i = 2, \dots, n \quad (13)$$

其中, num 为流量调度机制所需解数量, F_i 为斐波那契数列的大小。若所需解个数 $\text{num}=3$, 则 $F_i=5$ 。

至此, FTO 算法在斐波那契法和黄金分割法的基础上由一维延伸至多维, 拓展了算法的应用范围。FTO 结构设计可根据具体问题进行调整适配, 对于解决实际问题具有较好的普适性。FTO 计算复杂度与全局点、局部点数量和 FTO 结构有关^[24,30]。本文针对流量管理问题设计的 FTO 结构依据斐波那契数列线性增长, 运算简单, 复杂度低, 对于解决数据中心的流量调度问题具有很好的实用价值。但数据中心流量调度属于多约束优化问题, 算法还需要具备多约束处理能力。

4.4 FTO 流量调度多约束处理

为使 FTO 算法具备处理流量调度多约束的能力, 本文设计了一种约束冲突规则^[31], 能简单有效地处理多约束问题, 其基本思想如下。

1) 对 FTO 算法寻优过程产生的所有可行解进行冲突度评估。若符合式(5)~式(9)的各项约束条件, 则冲突度保持不变; 否则, 每违背式(5)~式(9)的一项约束条件, 则冲突度加 1。

2) FTO 算法删除可行解的过程中, 利用求解式(4)的目标函数值与冲突度共同决策。可行解函数

值越优且冲突度越小，则解越优。

针对流量调度的多维问题可根据实际情况考虑各约束之间的优先级和重要性，以提高多约束处理针对性和有效性。FTO 算法使用约束冲突规则是一种高效的方法，在处理多约束的过程中并未改变目标函数结构或引入额外参数，保证了算法的简便性和有效性。

在数据中心流量调度优化过程中，任何多维变量或约束条件的变化都可能导致 FTO 迭代寻优的全局最优方案成为次优、次次优甚至非优方案，无法达到流量优化的目的。故 FTO 算法的多模特性对解决数据中心流量调度问题具有重要的实用价值和现实意义。

4.5 FTO 流量调度多模特性

由于数据中心网络、流量和用户需求等多种因素时刻变化，若能同时得到多个满足条件的流量调度方案，就能更有效地应对数据中心的动态特性，提高流量优化的灵活性和稳健性。经济学中的次优理论^[33]也对类似多方案解决动态复杂问题的合理性和有效性进行了验证。

针对数据中心的流量调度问题，为使 FTO 算法具备多模特性，考虑运营商数据中心流量特征，算法引入距离参数，其值根据奈奎斯特采样定理和流量调度问题目标函数变化频率来确定，如式(14)所示。

$$\begin{cases} D_{X,Y} > R \\ D_{X,Y} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (X_k, Y_k)} \\ R = \frac{f}{2} \end{cases} \quad (14)$$

其中， $D_{X,Y}$ 为 X 与 Y 的欧氏距离， R 为距离参数， f 为目标函数的最大变化频率， X_k 与 Y_k 表示迭代过程中任意变量 X 与 Y 的第 k 维坐标。迭代得到的可行解之间两两满足式(14)的约束。

- 1) 若 $D_{X,Y} < R$ ，则保留 2 个解中函数值较优的解。
- 2) 若 $D_{X,Y} > R$ ，则 2 个解均保留。

将所有满足距离参数约束的可行解存储起来，可行解按照链表方式存入 FTO 结构链表中，可随时对寻优结果进行回溯，此结果记忆功能提高了算法启发能力和优化效率。

由上述分析可知，FTO 算法具备灵活的多模特性，能在流量调度机制的分析预测阶段，一次得到多个预测的动态阈值；在线调度阶段可根据需要得到多个优化方案，提高了 FTO 流量调度策略分析预

测的有效性和在线调度的灵活性。

4.6 FTO 流量调度策略流程

FTO 流量调度策略流程伪代码如下所述。

输入 num、 N 、 R

初始化 流量调度解空间端点集合 S ，业务数量 K 和带宽范围

- 1) while $i \leq N$
- 2) begin FTO
- 3) $F_1 = F_2 = 1$
- 4) for $i > 2$
- 5) $F_i = F_{i-2} + F_{i-1}$
- 6) FTO_() 根据式(12)生成全局随机点 G
- 7) for each $s \in S$ do
- 8) G 与 s 按照式(11)产生 F_i 个局部试探点
- 9) end for
- 10) 确定集合 S 中最优值点 f_{best}
- 11) for each $s \in S$ do
- 12) f_{best} 与其余的端点 s 按黄金分割法等比例生成 $F_i - 1$ 新的局部点
- 13) end for
- 14) end for
- 15) FTO_R() 判断迭代过程产生的可行解是否满足 R
- 16) for each $s \in S$ do
- 17) if $D_{X,Y} < R$ then $S \leftarrow$ the better solution
- 18) else then $S \leftarrow$ both solutions
- 19) end if
- 20) end for
- 21) 根据式(14)留下 F_{i+1} 个可行解，形成新的解空间端点集合 S
- 22) 如果判断迭代次数达到 N ，转到步骤 25) 行；否则转到步骤 6)
- 23) end
- 24) 输出 num 个可行解
- 25) end while

FTO 流量调度策略针对数据中心流量调度多维、多约束和多模优化问题，通过 FTO 结构将斐波那契法和黄金分割法的最优性从一维拓展到多维，解决流量调度的多维问题；设计约束冲突处理规则，处理流量调度多约束问题；根据数据中心流量特征和调度需要，引入距离参数使算法得到多个可选流量优化方案。发挥 FTO 算法全局随机性和最优性，通过全局

局部交替迭代寻优实现数据中心流量的调度优化。

FTO 流量调度策略的计算复杂度与全局点、局部点数量和 FTO 结构有关^[24,30-31]。本文针对流量调度优化问题设计的 FTO 结构如图 5 所示，全局点、局部点依据斐波那契数列线性增长，运算简单，复杂度为 $O(FCnN_s^2)$ ，其中， $FC = \sum_{i=1}^n F_i$ 为迭代斐波那契数列和， n 为迭代次数， N_s 为端点集合。

5 实验与分析评估

5.1 实验环境搭建

1) 模拟平台

本文提出的 FTO 流量调度策略主要针对运营商数据中心。但此类数据中心承载大量业务，为保证网络服务质量，无法对业务流量进行重复性实验，实验过程无法重现，因此通过搭建 Mininet^[34]+POX^[35]模拟平台，验证 FTO 流量调度策略的有效性。模拟平台配置如下：2 台 DELL R720，双 Xeon E5620，2.4 GHz，内存 8 GB，硬盘 600 GB。

2) 网络拓扑

实际的运营商数据中心综合考虑业务需求、网络性能和运营成本等多种因素，网络结构为类 Fat-tree 结构。故在 Mininet 平台构建一个规模为 4 个 POD 的 Fat-tree 结构，如图 6 所示。设置交换机与主机互联链路带宽为 100 MB，交换机与交换机互联链路带宽为 1 GB。时延、分组丢失等基础参数设置为 Mininet 平台缺省默认值。模拟平台未涉及实际网络常用 10 GB 和 100 GB 链路带宽场景，而通过等比例带宽的模拟，既不影响对 FTO 流量调度策略效率和性能评估，又可降低平台性能限制对结果的影响。

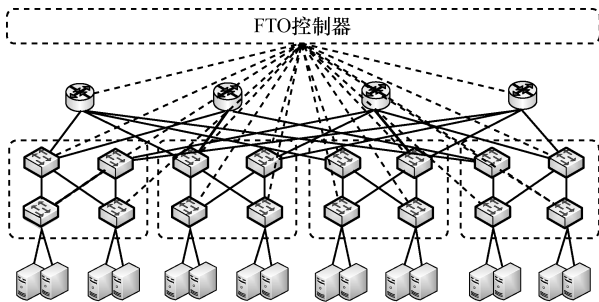


图 6 Fat-tree 实验拓扑结构

5.2 实验与分析

1) 多峰函数极小值寻优

为确保 FTO 流量调度策略的分析预测和在线调度能力，设计实验验证 FTO 算法的寻优能力和多

模特性能，准确求解预测动态阈值和流量调度方案。借助 MATLAB2016a 进行仿真，将本文所设计流量调度机制中动态阈值的寻优问题转化为 FTO 算法求解一维多峰函数极值点问题，并将类似数据中心流量特征的各类多峰函数作为算法的优化实例进行求解，验证 FTO 嵌入分析预测阶段的有效性。同时，利用多维多峰函数验证 FTO 嵌入在线调度阶段的有效性，在线调度的优化目标是最小化最大链路利用率，设置多峰函数的寻优目标为求解多维多峰函数极小值。

$$f_1(x) = -e^{-2\ln(2)(x-0.0667)^2} \sin^6(5\pi x) \quad (15)$$

其中， $x \in [0,1]$ ，函数有 5 个不等高等间距的峰值，设 num=5， $R=0.1$ 。

$$f_2(x) = -\ln(x)(\sin(e^x) + \sin(3x)) \quad (16)$$

其中，函数有 9 个不等高不等距的峰值，设 num=13， $R=0.75$ 。

$$f_3(x) = -\left[\left(\frac{3}{0.05 + x_1^2 + x_2^2} \right)^2 + (x_1^2 + x_2^2)^2 \right] \quad (17)$$

其中， $x_1, x_2 \in [-5.12, 5.12]$ ，函数为大海捞针函数，共有 5 个峰值，设 num=5， $R=3.5$ 。

算法每次迭代 20 次，重复实验 30 次，记录寻优结果均值如表 1 和图 7 所示。

表 1 多峰函数的录优结果

测试函数	峰值序号	最优解	函数值	理论值
$f_1(x)$	1	0.099 9	-0.998 5	-1.000 0
	2	0.299 6	-0.927 5	-0.927 4
	3	0.499 2	-0.771 2	-0.771 2
	4	0.698 8	-0.574 1	-0.574 1
	5	0.898 4	-0.382 6	-0.382 6
$f_2(x)$	1	2.651 2	-1.944 6	—
	2	3.010 8	-1.516 2	—
	3	2.116 6	-0.725 4	—
	4	3.281 1	-0.699 5	—
	5	3.949 0	-0.466 9	—
	6	3.494 8	-0.158 8	—
	7	3.819 6	-0.140 5	—
	8	1.048 1	-0.013 3	—
	9	3.670 5	-1.632 8e-04	—
$f_3(x)$	1	(-0.010 6, 0.010 9)	-3 566.800 0	-3 600
	2	(-5.120 0, 5.120 0)	-2 748.800 0	-2 748
	3	(5.120 0, -5.120 0)	-2 748.800 0	-2 748
	4	(5.120 0, 5.120 0)	-2 748.800 0	-2 748
	5	(-5.120 0, -5.120 0)	-2 748.800 0	-2 748

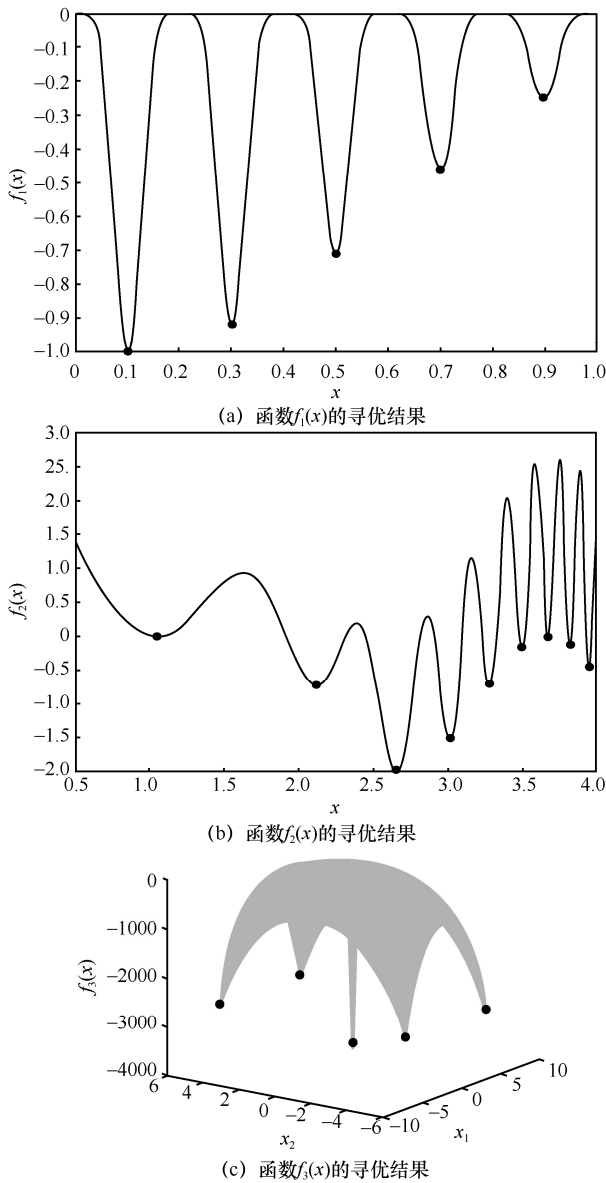


图 7 多峰函数的寻优结果

由表 1 和图 7 的结果可知, FTO 算法可以一次性找到多峰函数的全部峰值点, 且寻优结果的精度较高, 例如函数 f_3 有一个全局最优解和 4 个等距分布的等高局部最优解, 不仅能一次性找到函数的所有峰值点, 寻优结果的精度也比较高。性能不佳的算法容易陷入局部最优解, 找不到全局最优解。可见, 当 FTO 嵌入分析预测阶段, 能充分发挥 FTO 算法稳定的寻优能力和灵活的多模特性, 根据需要一次性准确寻优到多个预测阈值, 提高了分析预测的效率。同时, 结合运营商数据中心流量调度实际, 针对预测时间尺度(周、日、高峰期等)设置所需解 num, 可保证寻优结果与分析预测机制相匹配, 提高流量调度机制应用的普适性和灵活性。

多维多峰函数 $f_4(x)$ 、 $f_5(x)$ 寻优, 算法每次迭代 30 次, 重复实验 30 次, 记录寻优结果均值如图 8 所示。

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (18)$$

$$f_5(x) = 418.98288727243369n - \sum_{i=1}^n \sin(\sqrt{|x_i|}) \quad (19)$$

由图 8 的结果可知, FTO 算法对于多维多峰函数依旧具备较强的全局寻优能力和灵活的多模能力, 不仅能一次性找到被测函数的所有峰值点, 寻优结果的精度也比较高。当 FTO 嵌入流量在线调度阶段, FTO 全局寻优能力保证流量调度方案的全局最优性, 对于运营商的数据中心流量调度具有重要意义。同时, FTO 的多模特性求解得到多个满足条件的流量调度方案, 能更有效应对数据中心的动态特性, 提高流量调度优化的灵活性和稳健性。

2) 流量在线调度模拟

流量在线调度的优化目标是 minimized 最大链路利用率, 这样可以使网络中的流量重载链路向相对轻载的链路转移, 降低流量分布不均衡造成网络拥塞的可能性。FTO 流量调度策略针对运营商数据中心设计, 更关注网络性能和运行状况。故实验重点关注 Fat-tree 结构中的核心层和汇聚层的网络和链路情况, 主机部分暂不作为研究重点。

模拟平台实验参数配置如表 2 所示, 重复实验 30 次。本文设计模型与文献[36-37]模型类似, 因此将本文 FTO 算法与文献[36-37]的 GA 和 ACO 算法进行比较, 实验结果如表 3 和表 4 所示。

从表 3 和表 4 可以看出, 实验 1 中, FTO 算法寻优结果优于 GA 和 ACO 算法的寻优结果, FTO 算法一次实验即可根据需要得到最优、次优和次次优 3 个有效解, 文献[36-37]中 GA 和 ACO 算法不具备多模能力。FTO 算法流量调度策略的多方案特性对于解决数据中心流量调度问题具有很好的应用价值。

实验 2 中, 为进一步模拟运营商数据中心多业务、高带宽需求特性, 业务数量增加至 100, 带宽为 500 MB、1 000 MB 随机选取, FTO 算法依然保持稳定的全局寻优能力, 根据需要得到最优、次优和次次优解, FTO 算法寻优结果依然优于 GA 和 ACO 算法。相较 GA 和 ACO 算法,

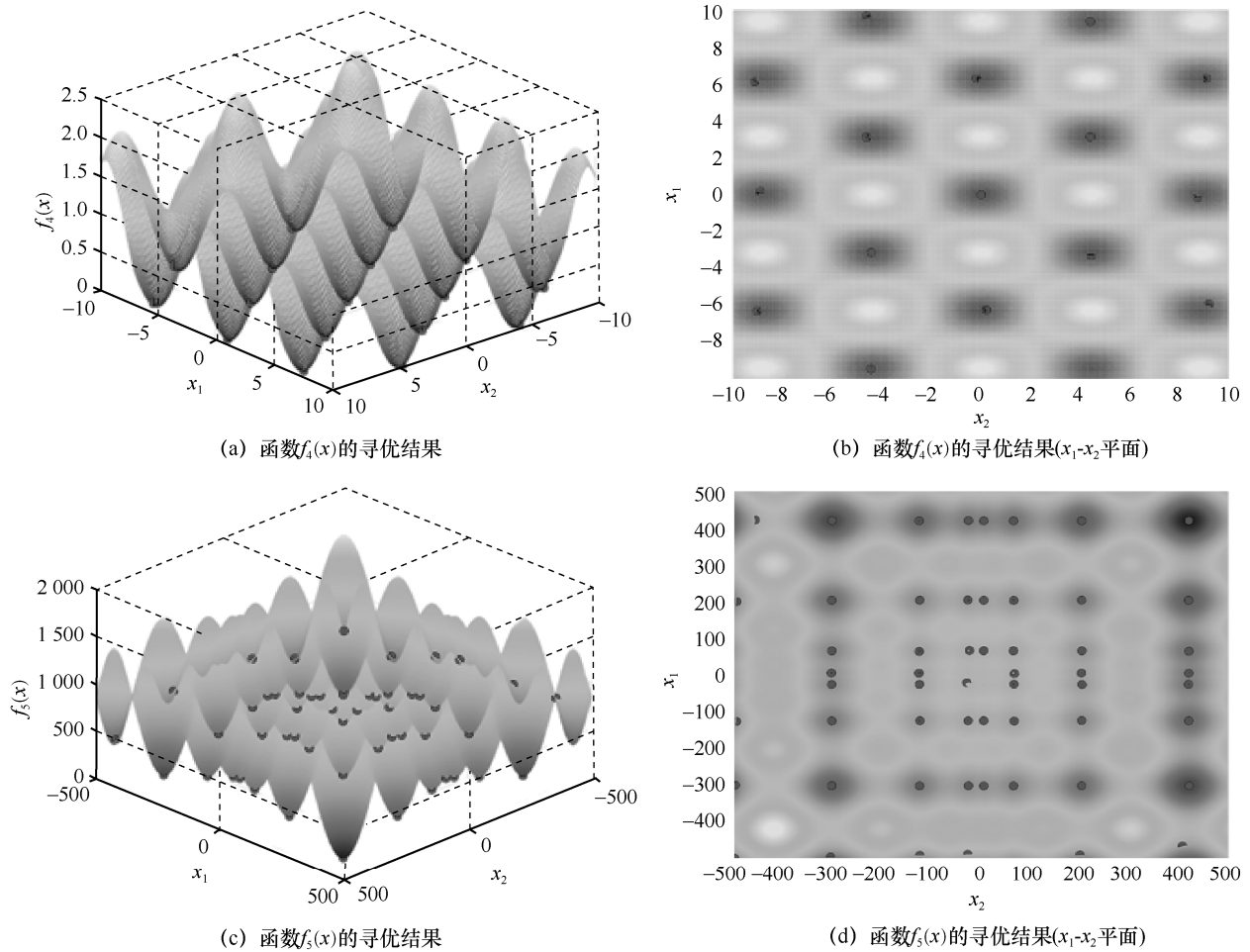


图 8 多维多峰函数的优化结果

FTO 算法更简便、高效，其稳定的全局寻优能力和灵活的多模特性对于解决运营商数据中心这类大规模、多维和多约束的流量调度问题更具实用性。

表 2 实验参数

实验参数	参数设置
网络节点	$D=20$
网络链路	$L=48$
业务数量	$K=50$
业务带宽	(0,1 000)随机取值
实验 1 迭代次数	300
所需解	3
距离参数	200
业务数量	$K=100$
业务带宽	(500,1 000)随机取值
实验 2 迭代次数	500
所需解	3
距离参数	100

表 3 实验 1 算法寻优结果比较

算法	最优解	次优解	次次优解	迭代次数	多模特性
GA	55.43%	—	—	300	×
ACO 算法	53.62%	—	—	300	×
FTO 算法	46.53%	47.26%	51.83%	300	√

表 4 实验 2 算法寻优结果比较

算法	最优解	次优解	次次优解	迭代次数	多模特性
GA	83.16%	—	—	500	×
ACO 算法	76.22%	—	—	500	×
FTO 算法	71.56%	74.37%	81.49%	500	√

综上，FTO 流量调度策略具备了灵活的多模特性，能一次得到多个预测的动态阈值，提高了 FTO 流量调度策略分析预测的有效性。相较文献[10,21]仅能识别大象流的流量调度策略，FTO 流量调度策

略能更好地应对数据中心流量的动态特征，尤其是面向网络规模大、承载业务多的运营商数据中心。同时，相较文献[36-37]中每次寻优只能得到唯一解的流量调度策略，FTO 流量调度策略可根据需要得到多个流量调度方案，提高了流量在线调度的灵活性，能更好地适配运营商数据中心大规模网络中多维、多约束、多模态的流量调度需求，实现运营商数据中心流量的弹性化负载均衡。因此 FTO 流量调度策略对于运营商数据中心的流量调度优化更具实用价值和现实意义。

3) FTO 流量调度策略有效性

实际网络中 SDN 流量监控系统数据采集周期为 5~10 min/次。同时，考虑数据中心网络中核心层和汇聚层网络性能和流量特征，核心层网络设备集中，性能和带宽容量整体优于汇聚层，如核心层的频繁流量优化，可能影响数据中心整体稳定性。汇聚层网络规模大，整体带宽利用率高，当出现异常流量时应及时调度，避免网络拥塞。故依照本文设计的异常流量识别规则，需要对数据中心核心层和汇聚层进行差异化的时间间隔 Δt 设置。

ECMP 与运营商数据中心的真实网络场景类似，通过尽量贴近实际的模拟实验，才能有效验证 FTO 流量调度策略对于运营商数据中心的有效性和合理性。利用 IPerf 作为流量产生工具，模拟数据中心网络出现异常流量时，激活 FTO 流量调度策略，分别为核心层和汇聚层设置时间间隔 Δt 为 10 min 和 5 min。通过多次实验对核心层和汇聚层流量变化情况进行分析，验证 FTO 流量调度策略的有效性，如图 9 和图 10 所示。

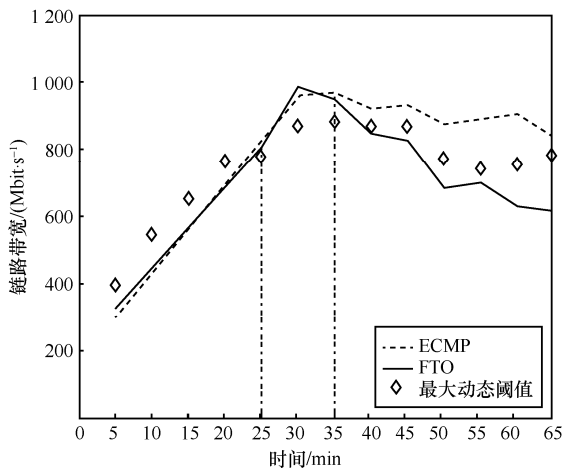


图 9 核心层流量调度分析

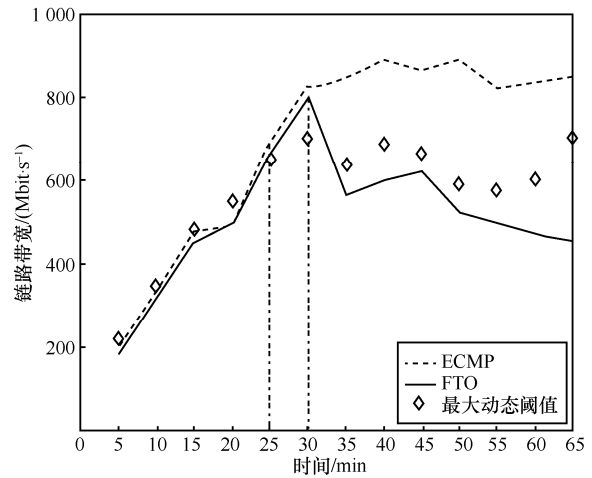


图 10 汇聚层流量调度分析

从图 9 可以看出，当核心层异常流量持续时间达到 10 min 时（第 25 min~第 35 min），激活 FTO 流量调度策略，进行流量在线调度优化，核心层链路高于动态阈值的异常流量开始下降，逐步恢复到正常范围。如未激活 FTO 流量调度策略，依然使用 ECMP 进行流量转发，核心层链路的异常流量保持不变，造成流量不均和网络拥塞。由此可见，FTO 流量调度策略能按照分析预测在线调度机制的规则和约束，如式(4)~式(9)所示，调度数据中心核心层链路异常流量，有效避免网络拥塞，保证核心层网络质量。

从图 10 可以看出，汇聚层异常流量持续时间达到 5 min（第 25 min~第 30 min），立即激活 FTO 流量调度策略，也可通过设计的分析预测在线调度机制，对数据中心汇聚层流量进行有效优化，达到流量调度优化的预期效果。由于数据中心汇聚层网络存在多条等价路径，FTO 流量调度策略能尽快完成异常流量的调度优化，避免网络拥塞。

模拟环境与真实网络环境依然存在一定差异，在实际数据中心中部署 FTO 流量调度策略时，需结合网络实际选取合理的时间尺度，设置相应的 Δt 等规则参数，确保 FTO 流量调度策略能得以有效应用。

4) FTO 流量调度策略的时间尺度适用性

本文设计的分析预测在线调度机制具有时间相关性，时间尺度包括小时、天、周、月等多种形式和组合，需要根据数据中心实际问题设置合理的时间尺度。对于运营商数据中心而言考虑其网络结构、流量特征和运营管理实际，小时、月和年属于过小和过大的时间尺度。时间尺度过小，可能造成频繁流量优化影响网络稳定性和运营效

能；时间尺度过大，则只能作为网络规划的参考依据，不适合流量优化问题。故小时、月和年等不适合运营商数据中心网络的时间尺度，不作为本文研究的重点。

为分析 FTO 流量调度策略关于时间尺度的适用性问题，实验选取运营商某数据中心同一季节一周内的工作日（周一至周五）和休息日等真实流量数据为样本进行如下实验。

实验 1 以每天为时间尺度，分别对数据中心核心层和汇聚层网络链路未来一天的流量情况进行预测，随机选取 3 天实际流量样本与分析预测结果进行比较，重复实验 20 次，实验结果均值如图 11 和图 12 所示。

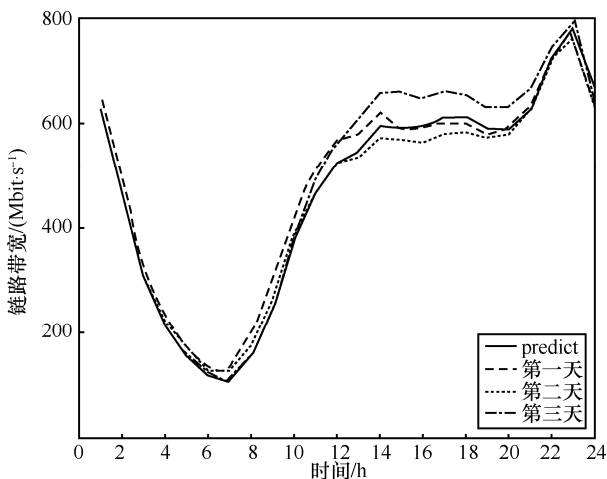


图 11 核心层一天预测流量分析

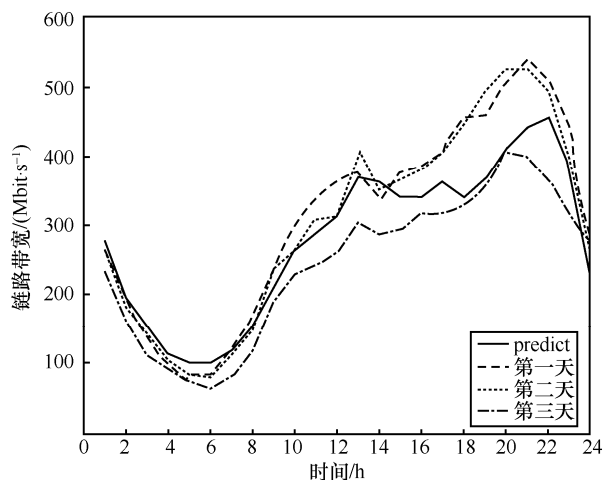


图 12 汇聚层一天预测流量分析

从图 11 可以看出，本文设计的分析预测函数生成的预测流量 *predict* 与实际流量第一天~第三天具有较高的匹配度。而且，数据中心核心层每天

的实际流量第一天~第三天和预测流量 *predict* 都具有较强周期性和自相似性特征。实验表明，以一天为时间尺度的流量分析预测能准确预测未来一天的流量变化情况，因此能充分发挥 FTO 流量调度策略有效性，分析预测在线调度机制能较准确的发现和识别网络链路中的异常流量，以规则 1 和规则 2 作为约束条件，对相应链路进行流量优化。如图 11 中第一天、第三天的根据规则 1 识别出异常流量时，可通过 FTO 流量调度策略对链路的异常流量进行在线调度，到达数据中心核心层流量分析预测在线调度优化的目的。

图 12 表明，本文设计分析预测函数生成的预测流量 *predict* 与第一天~第三天的实际流量匹配度也很高，数据中心汇聚层每天的实际流量第一天~第三天以及预测流量 *predict* 整体具有较强周期性和自相似性特征。说明 *predict* 依然可准确预测数据中心汇聚层链路未来一天的流量变化情况。当部分时段流量出现随机性和突发性的流量异常波动时，FTO 流量调度策略能够基于 *predict* 有效识别第一天~第三天链路中出现的异常流量，并按照规则 1 的约束对链路中的异常流量进行及时的在线调度，异常流量的识别与调度更具有针对性。有效避免网络拥塞，保证网络性能和业务质量。

数据中心核心层、汇聚层实验结果均充分表明，FTO 流量调度策略能适用于时间尺度为一天的数据中心流量调度优化问题，本文设计的流量调度机制以一天作为时间尺度能有效分析预测未来一天的流量情况，对于数据中心网络链路的异常流量识别和在线调度优化针对性强。而且，FTO 流量调度策略将分析预测的异常流量识别规则作为在线调度约束的动态阈值，相较传统大象流和老鼠流的静态阈值调度机制，提高了 FTO 流量调度策略流量优化的准确性和有效性。

实验 2 以一周为时间尺度分别对数据中心核心层和汇聚层网络链路流量进行分析预测，随机选取 3 周实际数据与分析预测结果进行比较，重复实验 20 次，实验结果均值如图 13 和图 14 所示。

从图 13 可见，随着时间尺度的扩大数据中心核心层每周流量变化的随机性和突发性增强，第一周~第三周具有明显的差异性，预测流量 *predict* 与实际流量第一周~第三周的匹配度下降，预测流量 *predict* 只与实际流量第一周~第三周的变化趋势基本一致，如数据中心核心层每周的流量高峰基

本出现在周五，基于周的时间尺度每周流量都基本保持单调性等。可以看出，针对数据中心核心层时间尺度为一周的流量优化问题，若 FTO 流量调度策略依然以预测信息强关联将其作为在线调度的约束条件，实际应用可能存在偏颇。如图 13 根据预测流量 predict 约束对图中第一周、第二周的周五的流量进行强制调度优化，可能对具有合理突发性的流量，如小长假或下雨天的特定情境的突发业务流量进行误优化，达不到流量调度优化的目的。因此，时间尺度为一周的流量分析预测在线调度优化，FTO 流量调度策略只应确保链路异常流量满足链路物理带宽上下限约束即可。

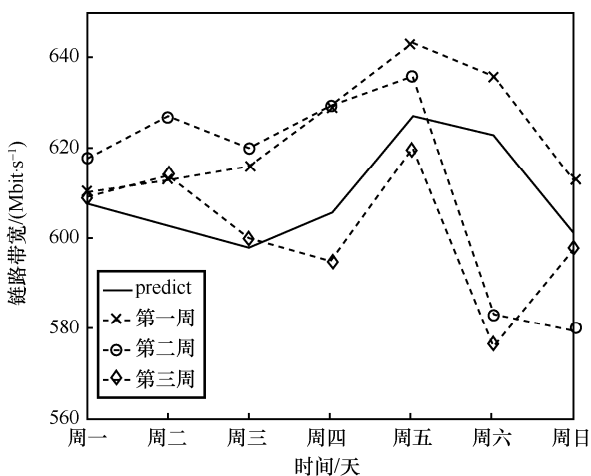


图 13 核心层一周预测流量分析

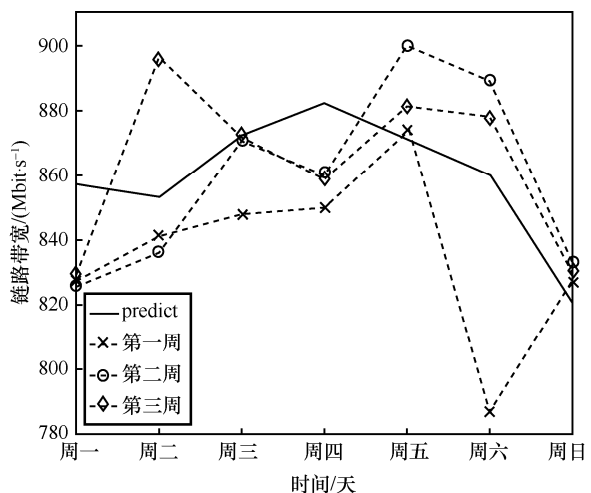


图 14 汇聚层一周预测流量分析

从图 14 中可以发现，每周时间尺度下数据中心汇聚层每周流量突发性和随机性更为明显，预测流量 predict 与实际流量第一周~第三周、以及第一周~第三周间的流量趋势都存在明显的差异性，只

是基于一周的时间尺度而言流量还基本保持各自的单调性特征。可见，针对数据中心汇聚层网络的每周流量，考虑汇聚层网络规模大，业务流量多变和链路利用率相对较高等实际情况，FTO 流量调度策略只应确保链路中的异常流量满足链路物理带宽上下限约束即可，对流量进行相对粗放的优化管理更为适宜。

为此，本文设计分析预测在线调度机制能根据时间尺度变化设置差异化的在线调度约束条件，如式(4)~式(9)所示。提高了流量调度机制和 FTO 流量调度策略对于实际问题应用的普适性和完备性。

以上实验结果表明，分析预测在线调度机制的时间尺度为一天时，将规则 1 和规则 2 作为约束，能有效识别数据中心核心层和汇聚层链路存在的异常流量并进行有效的合理调度，对于数据中心网络的一天流量调度优化适用性较好。但是，随着流量分析预测时间尺度的增大，流量随机性和突发性特征持续增强。当时间尺度扩大到一周时，FTO 流量调度策略的在线调度若依旧按照设计规则 1 和规则 2 作为在线调度约束，可能存在局限性影响流量优化效果。故将在线调度规则约束延伸为满足链路带宽约束。并且根据一周流量的单调性，分析预测阶段发挥 FTO 算法多模寻优特性，通过寻优一周流量的多峰函数来掌握流量变化趋势，当出现多峰时可有效识别异常流量；在线调度阶段 FTO 算法多模特性能得到多个符合条件的流量调度优化方案，使 FTO 流量调度策略能更好地适应数据中心流量动态变化。

5) 负载均衡能力

通常运营商数据中心网络规模较大，通过多等价格路径提高网络可靠性和实现流量的负载均衡^[38]。ECMP 与运营商数据中心的真实网络场景类似，为下一步实际网络的部署，通过尽量贴近实际的模拟实验，验证 FTO 流量调度策略对于运营商数据中心的有效性和合理性。以 IPerf 作为流量产生工具，分别选取核心层、汇聚层网络带宽利用率进行分析。对比 ECMP 和 FTO 流量调度策略对网络流量负载均衡的影响，如图 15 和图 16 所示。

从图 15 可以看出，FTO 流量调度策略能使核心层的各链路利用率处于相对稳定的区间，确保链路负载均衡性。同等条件下，ECMP 调度的各链路利用率则相差较大，个别链路利用率较高，存在局部重载或拥塞的情况。实验表明，FTO 流量调度策

略能够对数据中心核心层流量进行合理调度,提升核心层网络负载均衡能力。通常数据中心核心层带宽较大,若核心层链路负载不均,局部链路重载或拥塞必然影响网络整体性能和用户业务体验。因此 FTO 流量调度策略优于 ECMP 的流量调度能力,对于实际网络提高负载均衡能力具有重要的实用价值。

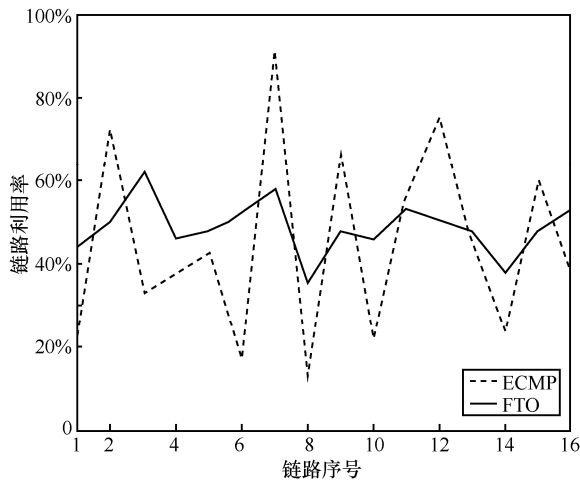


图 15 核心层链路利用率对比

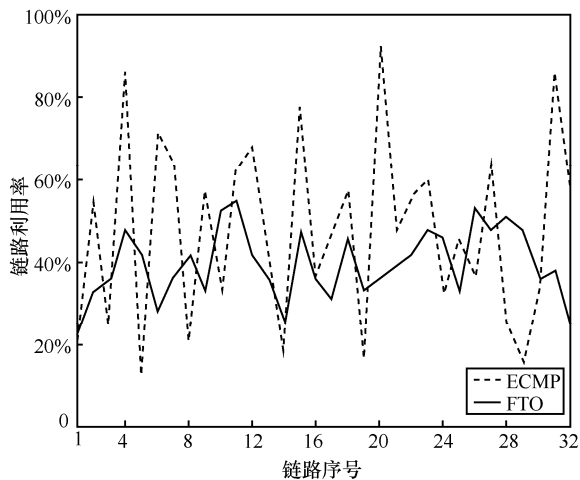


图 16 汇聚层链路利用率对比

从图 16 可以看出,FTO 流量调度策略依然能使汇聚层的各链路利用率处于相对稳定的区间,保持各链路负载基本均衡,这样能有效避免汇聚层网络的局部拥塞,提高汇聚层网络的吞吐量。同等条件下 ECMP 调度的各链路利用率相差较大,个别链路利用率极高,存在局部拥塞的情况。实验表明,FTO 流量调度策略能够对汇聚层流量进行合理调度,保证汇聚层的负载均衡能力。通常运营商数据中心汇聚层存在多条等价路径,FTO 流量调度策略

的有效调度能实现汇聚层流量的快速转发,提升网络性能,增强业务体验。

模拟环境与真实网络环境存在一定差异,后续将尝试在实际网络环境中部署 FTO 流量调度策略,进一步测试和验证该策略的有效性。

6 结束语

本文同时考虑网络结构和网络流量两方面因素,设计一种 SDN 架构数据中心的流量分析预测在线调度机制。针对数据中心流量调度的多维、多约束和多模态问题,提出 FTO 流量调度策略,将 FTO 算法嵌入分析预测和在线调度 2 个阶段,发挥 FTO 算法的全局局部交替迭代寻优和多模特性优势,根据需要得到多个满足条件的流量优化方案。利用 Mininet 搭建模拟平台,验证 FTO 流量调度策略有效性。结果表明,FTO 流量调度策略能基于一天和一周时间尺度对流量进行合理调度,提升了数据中心网络的弹性化负载均衡能力。流量优化过程中,FTO 表现出稳定的全局寻优能力和灵活的多模特性,同等条件的寻优结果优于文献[36-37]算法的结果,且能一次性得到多个满足条件的优化方案,既有效提升流量优化效率,又能更好应对数据中心动态特性。

下一步研究工作计划在实际数据中心中试点部署 FTO 流量调度策略,进一步调试和验证该策略的有效性和实用性,以此提高运营商解决数据中心流量调度问题的能力,实现数据中心流量的智能化调度。

参考文献:

- [1] BACCARELLI E, CORDESCHI N, MEI A, et al. Energy-efficient dynamic traffic offloading and reconfiguration of networked data centers for big data stream mobile computing: review, challenges, and a case study[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2016, 91(2): 182-194.
- [2] DARABSEH A, AL-AYYOUB M, JARARWEH Y, et al. SDDC: a software defined datacenter experimental framework[C]// *International Conference on Future Internet of Things & Cloud*. Piscataway: IEEE Press, 2015:189-194.
- [3] TANHA M, SAJJADI D, RUBY R, et al. Traffic engineering enhancement by progressive migration to SDN[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, PP(99):1.
- [4] 周桐庆, 蔡志平, 夏竟, 等. 基于软件定义网络的流量工程[J]. *软件学报*, 2016, 27(2): 394-417.
ZHOU T Q, CAI Z P, XIA J, et al. Traffic engineering based on software defined network [J]. *Journal of Software*, 2016, 27 (2): 394-417.

- [5] 邓罡, 龚正虎, 王宏, 等. 现代数据中心网络资源管理技术分析综述[J]. 通信学报, 2014, 35(2):166-181.
DENG K, GONG Z H, WANG H, et al. Analysis and review of network resource management technology in modern data centers [J]. Journal on Communications, 2014, 35(2): 166-181.
- [6] CHIESA M, KINDLER G, SCHAPIRA M. Traffic engineering with equal-cost-multipath: an algorithmic perspective[C]// IEEE Infocom. Piscataway: IEEE Press, 2014: 779-792.
- [7] 杨洋, 杨家海, 王会, 等. IP 网络时延敏感型业务流自适应负载均衡算法[J]. 通信学报, 2015, 36(3):131-141.
YANG Y, YANG J H, WANG H, et al. Adaptive load balancing algorithm for delay-sensitive service flows in IP networks [J]. Journal on Communications, 2015, 36 (3): 131-141.
- [8] 杨洋, 杨家海, 秦董洪, 等. DraLCD: 一种新的数据中心流量工程方法[J]. 电子学报, 2017, 45(5):1261-1267.
YANG Y, YANG J H, QIN D H, et al. DraLCD: a new data center traffic engineering method[J]. Journal of Electronics, 2017, 45(5): 1261-1267.
- [9] HARTERT R, VISSICCHIO S, SCHAUS P, et al. A declarative and expressive approach to control forwarding paths in carrier-grade networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(5):15-28.
- [10] AL-FARES M, RADHAKRISHNAN S, RAGHAVAN B, et al. Hedera: dynamic flow scheduling for data center networks[C]// USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation. New York: ACM Press, 2010: 281-296.
- [11] 林智华, 高文, 吴春明, 等. 基于离散粒子群算法的数据中心网络流量调度研究[J]. 电子学报, 2016, 44(9):2197-2202.
LIN Z H, GAO W, WU C M, et al. Research on data center network traffic scheduling based on discrete particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 44(9): 2197-2202.
- [12] SUBBIAH S, PERUMAL V. Energy-aware network resource allocation in SDN[C]// International Conference on Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016, doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566506.
- [13] 唐宏, 王欣欣, 刘亦星. 面向带宽碎片最小化和 QoS 保障的数据中心网络流量调度算法 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4):987-994.
TANG H, WANG X X, LIU Y X. A traffic scheduling algorithm for bandwidth fragmentation minimization and QoS guarantee in data center network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 987-994.
- [14] 王欣欣. 基于蚁群算法的数据中心网络流量调度策略研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
WANG X X. Research on data center network traffic scheduling strategy based on ant colony algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [15] 王歆平, 王茜, 刘慧恩, 等. 基于 SDN 的按需智能路由系统研究与验证[J]. 电信科学, 2014, 30(4):8-14.
WANG Y P, WANG Q, LIU E H, et al. Research and verification of SDN-based intelligent routing system on demand [J]. Telecommunications Science, 2014, 30 (4): 8-14.
- [16] BENSON T, AKELLA A, MALTZ D A. Network traffic characteristics of data centers in the wild[C]// ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2010: 267-280.
- [17] 金勇, 刘亦星, 王欣欣. 基于 SDN 的数据中心网络多路径流量调度算法[J]. 计算机科学, 2019(6): 90-94.
JIN Y, LIU Y X, WANG X X. Multi-path traffic scheduling algorithm for data center networks based on SDN[J]. Computer Science, 2019(6): 90-94.
- [18] 刘亦星. 基于 SDN 的数据中心多路径流量调度策略研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
LIU Y X. Research on multi-path traffic scheduling strategy of data center based on SDN[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [19] 王耀民, 王霞, 董易, 等. 面向云数据中心的业务差异化流量管理优化策略[J]. 通信学报, 2019, 40(11):45-56.
WANG Y M, WANG X, DONG Y, et al. Multi-service differentiated traffic management optimization strategy for cloud data centers [J]. Journal on Communications, 2019, 40 (11): 45-56.
- [20] 汪硕. 云数据中心流量调度机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
WANG S. Research on cloud data center traffic scheduling mechanism[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [21] ZHANG Y, CUI L, ZHANG Y. A stable matching based elephant flow scheduling algorithm in data center networks [J]. Computer Networks, 2017, 120:186-197.
- [22] NAGARAJ K, BHARADIA D, MAO H, et al. Numfabric: fast and flexible bandwidth allocation in datacenters[C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. New York: ACM Press, 2016: 188-202.
- [23] KANDULA S, SENGUPTA S, GREENBERG A G, et al. The nature of data center traffic: measurements & analysis[C]//ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference. New York: ACM Press, 2009: 202-208.
- [24] 张松海, 施心陵, 李鹏, 等. 多峰函数优化的黄金分割斐波那契树优化算法[J]. 电子学报, 2017, 45(4):791-798.
ZHANG S H, SHI X L, LI P, et al. Golden segmentation Fibonacci tree optimization algorithm for multimodal function optimization [J]. Chinese Journal of Electronics, 2017,45(4):791-798.
- [25] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于混沌理论与改进回声状态网络的网络流量多步预测[J]. 通信学报, 2016, 37(3):55-70.
TIAN Z D, LI S J, WANG Y H, et al. Multi-step prediction of network traffic based on chaos theory and improved echo state network [J]. Journal on Communications, 2016, 37 (3): 55-70.
- [26] 李捷, 侯秀红, 韩志杰. 基于卡尔曼滤波和小波的网络流量预测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3):725-728.
LI J, HOU X H, HAN Z J. Research on network traffic prediction algorithm based on Kalman filter and wavelet [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29 (3): 725-728.
- [27] 于艳华, 宋俊德. 一种基于异常点检测的电信网络性能监控策略[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9):2220-2225.
YU Y H, SONG J D. A telecom network performance monitoring strategy based on outlier detection [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31 (9): 2220-2225.

- [28] 董谦, 李俊, 马宇翔. 基于集中控制的命名数据网络流量调度方法[J]. 通信学报, 2018, 39(7):72-84.
DONG Q, LI J, MA Y X. Traffic control method for named data network based on centralized control [J]. Journal on Communications, 2018, 39(7):72-84.
- [29] 董谦, 李俊, 马宇翔, 等. 软件定义网络中基于分段路由的流量调度方法[J]. 通信学报, 2018, 39(11):23-35.
DONG Q, LI J, MA Y X, et al. Traffic scheduling method based on segment routing in software-defined networking[J]. Journal on Communications, 2018, 39(11): 23-35.
- [30] 董易, 吕丹桔, 王霞, 等. 斐波那契树优化算法全局随机性概率收敛分析[J]. 控制与决策, 2018, 3(1): 1-10.
DONG Y, LYU D J, WANG X, et al. Probabilistic convergence analysis of global randomness for Fibonacci tree optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2018, 3(1): 1-10.
- [31] 王霞, 吕丹桔, 董易, 等. 基于斐波那契树优化算法的切割参数多方案优化方法[J]. 控制与决策, 2018, 8(1):1373-1381.
WANG X, LYU D J, DONG Y, et al. Optimization of cutting parameters based on Fibonacci tree optimization algorithm [J]. Control and Decision, 2018, 8(1): 1373-1381.
- [32] 周云才. 黄金分割法在无穷远处是最优的[J]. 石油天然气学报, 1993(1):97-101.
ZHOU Y C. The golden section method is optimal at infinity [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 1993 (1): 97-101.
- [33] 吴汉洪. 次优理论述评[J]. 学术论坛, 2002(1): 74-76.
WU H H. A review of suboptimal theory[J]. Academic Forum, 2002 (1): 74-76.
- [34] OLIVEIRA R L S D, SHINODA A A, SCHWEITZER C M, et al. Using Mininet for emulation and prototyping software-defined networks[C]// Communications & Computing. Piscataway: IEEE Press, 2014: 25-42.
- [35] RAMADONA S, HIDAYATULLOH B A, SISWANTO D F, et al. The simulation of SDN network using POX controller: case in Politeknik-Caltex Riau[C]// International Conference on Telecommunication Systems Services & Applications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1186-1217.
- [36] 刘红, 白栋, 丁炜. 应用于 MPLS 网络负载均衡的启发式自适应遗传算法研究[J]. 通信学报, 2003, 24(10): 39-45.
LIU H, BAI D, DING W. Research on heuristic adaptive genetic algorithm for load balancing in MPLS networks [J]. Journal on Communications, 2003, 24 (10): 39-45.
- [37] 伊鹏, 刘洪, 胡宇翔. 一种可扩展的软件定义数据中心网络流调度策略[J]. 电子与信息学报, 2017, 38(4):825-831.
YI P, LIU H, HU Y X. A scalable software-defined data center network flow scheduling strategy[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 38(4):825-831.
- [38] 王耀民. 昆明电信 IP 城域网网络路由优化改造方案的技术研究[D].

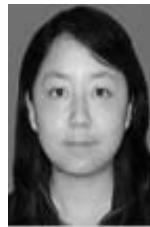
南京: 南京邮电大学.

WANG Y M. Technical research on the optimization and reconstruction scheme of Kunming Telecom's IP metropolitan area network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications.

[作者简介]



王耀民 (1986-), 男, 云南昆明人, 云南大学博士生, 主要研究方向为数据中心、软件定义网络、智能优化算法。



王霞 (1985-), 女, 云南保山人, 云南大学博士生, 主要研究方向为信号系统、智能优化算法。



董易 (1985-), 男, 云南保山人, 云南大学博士生, 主要研究方向为信号系统、智能优化算法。



张松海 (1991-), 男, 云南昆明人, 云南大学硕士生, 主要研究方向为智能优化算法。



施心陵 (1956-), 男, 云南昆明人, 云南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号处理与信息系统、智能优化算法。