

## 基于边缘云计算的光纤无线网络优化设计

施凌鹏<sup>1</sup>, 冯天波<sup>1</sup>, 卢士达<sup>1</sup>, 赵修旻<sup>1</sup>, 陈晓露<sup>1</sup>, 崔昊杨<sup>2\*</sup>

- (1. 国网上海市电力公司信息通信公司, 上海 200072;
2. 上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 为了提升网络边缘数据处理能力, 满足终端大带宽和低时延的要求, 构建了基于边缘基础设施的云计算平台, 设计了具有动态带宽调整的光纤网络模型。提出了一种基于边缘云计算的时序优化算法, 并将其应用于光纤无线网络。通过 OPNET 软件仿真分析了时序优化算法的传输时延均值, 结果显示, 优化后最大时延为 43.1 ms, 仅为传统方法的 34.2%。实验对局域网内多个终端之间的数据通信进行分析, 讨论了三种算法的传输能效、光纤信道利用率及传输能耗。实验结果显示, 采用时序优化算法的测试结果具有明显改善, 其传输能效提升了近 1 倍, 边缘云数据传输时延均值信道利用率提升了约 6.2%, 网络传输能耗均值最优。该光纤无线网络模型及其优化算法在传输时延、信道利用率以及网络能耗方面具有明显提升。其在提升光纤通信链路选择及边缘端数据交互中具有一定的优势。

**关键词:** 光纤无线网络; 边缘云计算; 时序优化; 带宽调整

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210938

## Optimal design of optical fiber wireless network based on edge cloud computing

Shi Lingpeng<sup>1</sup>, Feng Tianbo<sup>1</sup>, Lu Shida<sup>1</sup>, Zhao Xiumin<sup>1</sup>, Chen Xiaolu<sup>1</sup>, Cui Haoyang<sup>2\*</sup>

- (1. State Grid Shanghai Electric Power Information and Communication Company, Shanghai 200072, China;
2. College of Electronic and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to improve the data processing capabilities of network edge and meet the requirements of large bandwidth and low latency of the terminal, a cloud computing platform based on edge infrastructure is built, and an optical fiber network model is designed with dynamic bandwidth adjustment. A timing optimization algorithm based on edge cloud computing is proposed and applied to optical fiber wireless networks. The average transmission delay of the timing optimization algorithm is simulated and analyzed through OPNET software, and the results show that the maximum delay after optimization is 43.1 ms, which is only 34.2% of the traditional method. The experiment analyzes the data communication between multiple terminals in the local area network. The transmission efficiency, optical fiber channel utilization and transmission energy consumption of the three algorithms have been discussed. The experimental results show that the test results using the timing optimization algorithm have been significantly improved. Its transmission efficiency has increased by nearly double, the

收稿日期: 2021-12-07; 修订日期: 2021-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (52177185); 国网上海市电力公司科技项目 (52090F20007L)

作者简介: 施凌鹏, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力信息通信方面的研究。

通讯作者: 崔昊杨, 男, 教授, 博士, 主要从事电力边缘云方面的研究。

channel utilization rate of edge cloud data average transmission delay has increased by about 6.2%, and the network transmission energy consumption has the best value. The optical fiber wireless network model and its optimization algorithm have significant improvements in transmission delay, channel utilization, and network energy consumption. It has certain advantages in improving the selection of optical fiber communication links and data interaction at the edge.

**Key words:** optical fiber wireless network; edge cloud computing; timing optimization; bandwidth adjustment

## 0 引言

随着云计算技术与大数据技术在互网络中的快速应用,使得光纤通信网络向高速大容量的方向进一步推进<sup>[1]</sup>。虽然主干光纤通信网络的速度在不断提升,但是,骨干网和本地光纤通信网络、客户终端设备等的接入能力却发展缓慢,即光纤通信中“最后一公里”的瓶颈问题<sup>[2]</sup>。由于光纤通信的优势和无线终端的特征具有一定的互补性,所以,光纤无线网络模型(Fiber Wireless Network, FiWi)<sup>[3-5]</sup>的概念被越来越多的研究人员所重视,其集成了光通信网络的大容量、高稳定性及无线终端的灵活便捷性等优点,成为了光纤通信网络信息通信优化技术的一个新的研究热点。

由于光纤通信网络的大带宽、高可靠性、高泛在性以及低成本的特点,FiWi已成为一个快速网络接入的新方案。该网络模型需要边缘设备通过边缘云计算进行实现,故具有动态带宽调整能力的网络模型构建及其数据时序逻辑控制成为了研究重点。Chowdhury M 等人<sup>[6]</sup>提出了将边缘云技术(Mobile Edge Computing, MEC)与FiWi的资源整合,从而优化无线终端通信时隙的带宽配置,使其通过交替休眠的方式降低网络能耗。All K 等人<sup>[7]</sup>提出了基于能量计算与延迟感知的通信路径优化算法,该算法可以实现较小延迟的条件下切换通信节点的功率设定。Mamechaoui S 等人<sup>[8]</sup>设计了一种网络能耗管理方案,用于对传统路由设备与绿色路由设备之间的混叠整合,实验显示其网络通信利用率得到了一定的提升,但由于算法复杂,其时延性仍然较明显。Liu Y 等人<sup>[9]</sup>构建了一个虚拟网嵌入模型,通过把低负载设备中的剩余资源链路重复利用

的方式,降低了总活跃通信节点个数,从而提升了光纤通信网络中信息通信能力。何蓉等人<sup>[10]</sup>提出了在边缘云计算中应用动态带宽分配算法,虽然能够通过带宽分配降低信道数据阻塞的问题,但是由于其是以光线路终端为中心对信道进行交互的,所以占用上行信道带宽的过程中会导致信道利用率降低。

综上所述,为了获得更好的网络接入效果,降低网络功耗,提升网络资源利用率,文中提出了一种基于边缘云的光网络信息架构。该系统通过动态带宽调整及边缘数据处理时序优化,实现对网络传输时延、信道利用率等主要参数性能的提升。

## 1 系统构成

根据光纤无线网络系统的架构分布设定了拟优化的光纤网络边缘范围,通过时序优化算法与光纤传输路径优化模型,实现光网络信息的高效交互。

图 1 为基于边缘云的光纤无线网络示意图。光纤网络系统从结构上看,主要分为:云计算处理中心、互联网、总服务器系统、分服务器(由边缘云连接)、电力应用网络、基于无线路由的无线设备。

传统的云计算需要将设备信息全部上载至中心云,在云计算处理中心完成数据分析,当终端设备总量不大时,这种方法可以满足用户需求,但随着现有智能终端的不断加入,网络带宽传输压力激增,必须研究更高效的数据解算方式。从图 1 可以看出,分支光纤连接的本地服务器可以通过局域光纤网络连接(红色虚线),由此对海量的电网信息、无线终端信息的处理可以通过边缘云的数据处理,大幅利用靠近终端的计算能力,降低主干光纤通信压力和减少终端计算时延。

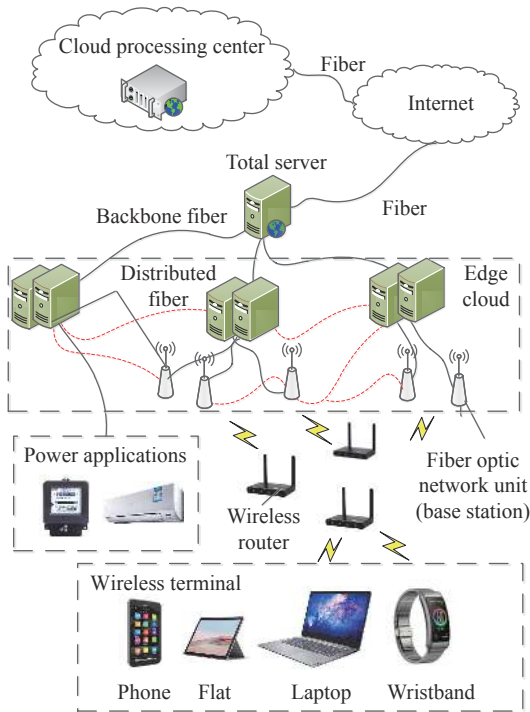


图 1 基于边缘云的光纤无线网络

Fig.1 Optical fiber wireless network based on edge cloud

## 2 时序优化算法设计

### 2.1 时序分析

对于 FiWi 网络而言,其前 endpoint 共有  $i$  个,格式类型包含:源地址、终端地址、帧的长度、校样请求码等。则节点  $i$  的帧长度<sup>[11]</sup>为:

$$F_i = F_{\text{long}} \times i + F_0, \quad i \in S_M \quad (1)$$

式中:  $F_0$  表示除帧头部分与帧尾部分的数据开销;  $i$  表示无线端节点个数;  $F_{\text{long}}$  表示节点带宽请求的信号长度;  $S_M$  表示节点集合,其中  $M$  表示节点编号。可以看出,在边缘云结构中,每一个节点对应的帧的长度是不同的,节点号与  $M$  相关,则公式 (1) 的最大值可以表示为:

$$F_{i|\text{max}} = F_{\text{long}} \times \max\{(M-1), (N-M)\} + F_0 \quad (2)$$

式中:  $M$  表示节点号;  $N$  表示最大光纤通信网络分束模块的最大分光比。设节点位置上载与传输的信息传输速率为  $V_{\text{upload}}$  和  $V_{\text{com}}$ , 则任意相邻两个节点之间的通信时延  $T_{ij}$  为:

$$T_{ij} = \frac{F_i}{V_{\text{com}}} \quad (3)$$

由此可以通过迭代循环完成对最大传输时间进行求解,则其带宽有:

$$B_{\text{max}} = \frac{[\max(T_i) - NT_{ij}] \times V_{\text{upload}}}{8N} \quad (4)$$

由此根据每个节点带宽需求  $B_i$ , 得到总带宽需求  $B_{\text{tot}} = \sum B_i$ 。则通过对比  $B_i$  是否大于  $B_{\text{max}}$  就能判断该节点的带宽需求是否超过带宽上限,从而确定该节点是否存在传输时延。在计算得到所有节点的带宽后,为存在传输时延的节点释放任务,将传输路径转移至最近的非延迟节点,从而实现边缘云数据通信路程的优化。

### 2.2 路径优化

根据时序分析中对各个节点间数据通信的传输效果分析可知,在计算得到各个节点带宽占用率的基础上需要对边缘云中的光纤网络通信路径进行优化。对于邻近节点而言,对路径长度排序,路由的权重系数是根据跳数和跨域数决定<sup>[12]</sup>, 则  $i$  节点与  $j$  节点之间的权重系数  $W_{i,j}$  有:

$$W_{i,j} = \frac{L_{i,j}}{L_{\text{max}}} + \frac{D_{i,j}}{D_{\text{max}}} \quad (5)$$

式中:  $L_{i,j}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的路径长度;  $L_{\text{max}}$  表示路径最长的链路;  $D_{i,j}$  为节点  $i$  和节点  $j$  所在的域;  $D_{\text{max}}$  为包含节点  $i$  和节点  $j$  域的边缘云域。由此可以通过边缘云限定大幅降低路径优化算法的计算量。

### 2.3 算法实现

根据以上时序分析与路径优化原则,可以给出基于边缘云计算的时序优化算法的具体实现步骤如下:

(1) 根据通信网络范围确定边缘云区域,并对边缘云覆盖区域内所有的光纤网络节点编号  $1 \sim M$ , 完成 FiWi 网络基础数据采集,包含地址信息、帧长度等;

(2) 计算节点  $i$  的帧长度  $F_i$ , 并在对每一个节点的帧长度进行排序,获得  $F_{i|\text{max}}$ , 将数据集合  $F_i$  与对比参数  $F_{i|\text{max}}$  保存至运算数据库中;

(3) 测试节点位置上载速率  $V_{\text{upload}}$  与现有网络中的传输速率  $V_{\text{com}}$ , 从而计算通信时延;

(4) 根据光纤网络参数计算最大传输带宽  $B_{\text{max}}$ , 并且将其作为分类依据对所有节点带宽进行迭代判断,将大于和小于该值的测试数据分别构建新的数组  $S1$  和  $S2$ ;

(5) 通过  $S1$  创建路径优化子区域, 完成对  $L$  参数的选择, 通过  $S2$  计算重用路径的最优值, 完成对  $D$  参数的选择, 循环所有节点数据后完成路径优化。程序流程如图 2 所示。

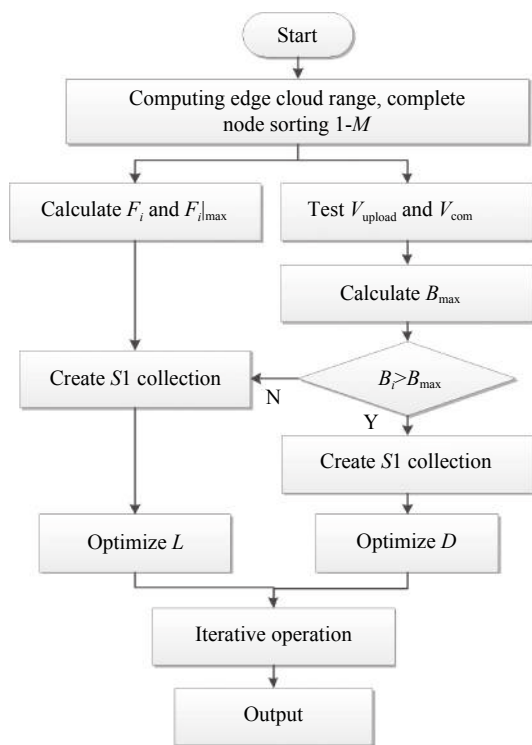


图 2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of algorithm

### 3 仿真分析

为了验证时序优化前后数据包传输时延程度, 采用 OPNET 软件进行光纤传输性能分析。采用常用的自适应循环寻址算法 (Adaptive Circular Addressing Algorithm, ACA)<sup>[13-14]</sup> 和不经文中时序优化的动态宽带分配 (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA)<sup>[15-16]</sup> 算法与文中算法 (Timing Optimization-DBA, TO-DBA) 相比较。仿真条件设定为 1 个光线路终端 (Optical Line Terminal, OLT)、32 个局域光网络节点 (Optical Network Node, ODN), 模拟距离 50 km, 相邻分布局域光纤网络距离 0.5 km, 主信道带宽 1.0 Gb/s, 用户信道 100 Mb/s, 数据包长度范围 64~1 028 字节。则  $T_{ij}=10 \mu s$ ,  $F_i=50$  byte 时, 算法对应的数据时延如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 当数据包占比总量小于 60% 时, 三种数据处理方式的数据包延迟都在 35 ms 附近, 并且数据时延的递增程度基本一致。当数据包占

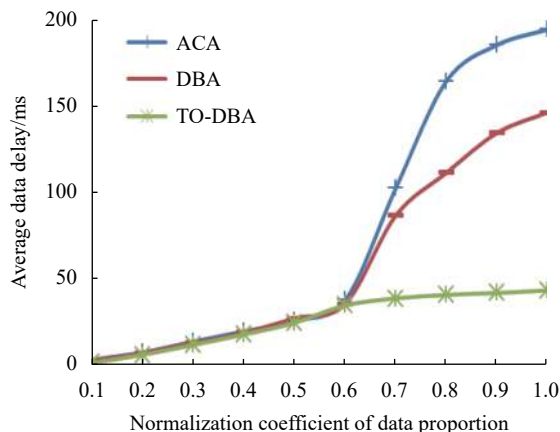


图 3 数据时延对比曲线

Fig.3 Comparison curves of data delay

比总量大于 60% 时, ACA 算法的数据延迟出现明显增大, 在数据包占比总量为 80% 后渐渐趋于平缓, 约为 194.2 ms 左右; 而 DBA 算法的增速接近线性, 最终达到 146.2 ms, TO-DBA 算法的数据时延在数据包占比趋于饱和时才达到 43.1 ms, 相比优化前提升了近 2/3。计算可知, TO-DBA 算法的时延均值仅为传统算法的 34.2%。分析认为, 当数据包占比总量较小时, 每个节点的数据带宽符合单独通信要求, 所以三种算法的数据时延几乎一致, 但随着数据总量的增大, 不进行传输时序优化的网络中会随着个别超载光纤网络节点的增多而导致时延大幅增加, 这验证了文中算法通过带宽迭代比较与通信路径优化可以达到提高网络效率的目的。

### 4 实验

实验硬件设备采用 Intel i3 型 CPU, DDR3 型 RAM, 主带宽模块 Intel B75, 8391 GT 网卡, 以及 2.6.39 版本的 Linux Kernel。分别在传输能效、信道利用率及资源利用率三个方面进行测试分析。

#### 4.1 传输能效对比

实验通过递增数据包的大小对比对应光纤网络的传输速率, 从而分析采用不同算法条件下的传输能效。测试数据采用 MATLAB 完成数据分析, 结果如图 4 所示。

由图 4 测试数据可知, 在数据包总量较小时, ACA 算法略优于未经时序优化的 DBA 算法的数据吞吐量, 而采用时序优化的 TO-DBA 算法要明显优于两种传统算法, 分析认为是因为不设置传输优先级

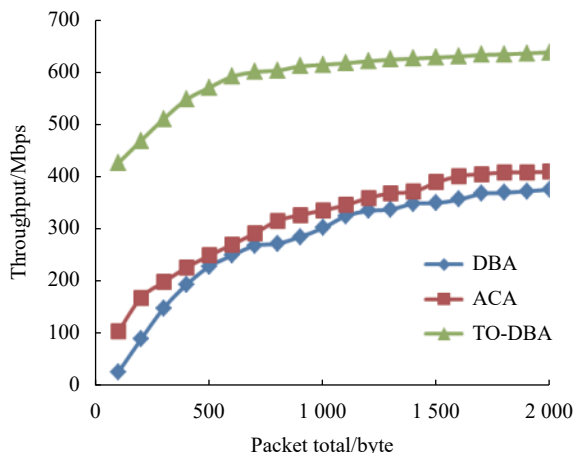


图 4 数据吞吐量对比

Fig.4 Comparison of data throughput

时,数据通信过程完全取决于数据通信的请求先后顺序,所以在完成数据通信时往往需要在不同光信道之间相互切换。而采用时序优化后,经过时序等级分类与路径优化,则大幅降低了光纤网络通信时数据类型的切换时间,从而使总传输效率得到了提升。同时,可以看出三个算法的收敛速度也各不相同,其中 TO-DBA 算法在 800 byte 后就基本平稳了,而 ACA 和 DBA 大约在 1600 byte 以后呈现平稳状态。

#### 4.2 光纤信道利用率对比

在分析数据总量的基础上,还需要考虑每个信道的利用程度,只有在信道充分被利用的条件下,通信路径的择优才有更大的发挥空间,同时,也为降低整体网络能耗提供了可能。实验通过递增通信负载强度的过程中,计算信道利用率,测试结果如图 5 所示。

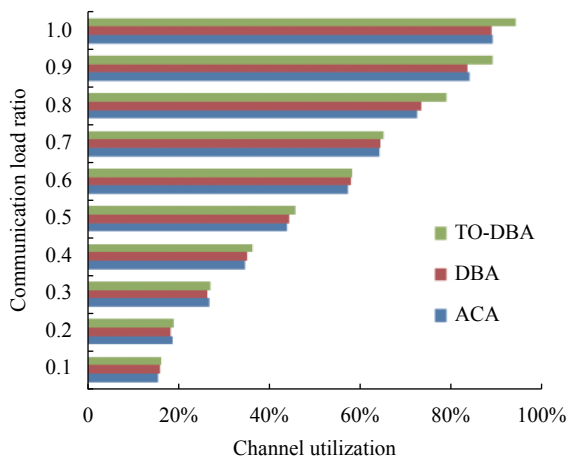


图 5 信道利用率对比

Fig.5 Comparison of channel utilization

由图 5 可知,三种算法的信道利用率比较接近,在通信负载强度占比小于 0.7 时,三种算法的信道利用率偏差均小于 3.3%,而通信负载强度占比大于 0.7 后,TO-DBA 算法的信道利用率略有提高,总体偏差在 4.5% 以内。说明三种算法的信道利用率都很充分。相比之下,对整个测试区间进行分析时,优化后总体信道利用率提升 6.2%。测试结果由于受实验室光纤网络通信带负载能力所限,满负载占比条件下的负载总量较少,所以利用率参数对网络能耗影响有限,但当负载总量基数增大时,即使在现有利用率提升水平,采用 TO-DBA 算法的优化效果也会被放大,可见采用时序优化有利于提升光纤通信网络信道利用率。在完成同等数据量传输过程中,信道利用率越高,信道通信有效工作时间的叠加时间就越低,从而可以通过休眠非工作通信线路降低边缘云光纤网络的能耗。

#### 4.3 光纤网络能耗对比

采用边缘云计算的光纤网络数据传输与优化除了降低数据传输延迟和提高传输能效之外,还有一个主要的目的,降低总体光纤网络通信的能耗,从而对比相同数据量的传输和分析能耗变化。测试方法是测试光纤网络中 Measurement Report (MR 信令) 在不同持续时间条件下的网络耗能量,结果如图 6 所示。

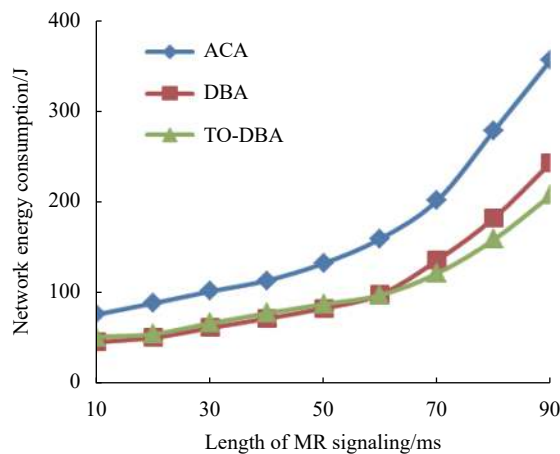


图 6 网络能耗对比

Fig.6 Comparison of network energy consumption

由图 6 可以看出,相比 ACA 算法,基于 DBA 算法的能耗具有明显优势,在 MR 的长度增大过程中,总能耗的增大量更少。在 MR 长度小于 60 ms 的条件下,优化后的算法需要消耗更多的网络能量,分析

认为因为数据量小时,时序优化算法能带来的优化结果有限,而算法本身还需要占据一定的资源,所以其耗能略大于优化前。但当 MR 长度超过 60 ms 后,随着运算量的增大,优化后能耗降低的优势逐渐显现。以此类推,当测试网络总量不断增大时,优化算法的优势会进一步增大,验证了优化算法对降低网络能耗具有一定作用。

## 5 结 论

文中搭建了基于边缘云的光纤无线网络,设计了基于边缘云计算的时序优化算法。该光纤网络具有动态带宽调整能力,可以通过限定边缘设备范围完成域内最优通信路径的选择。实验分别采用三种算法完成对同一光纤通信网络的测试,分析对比了该光纤无线网络模型及其优化算法在传输时延、信道利用率和网络能耗三个方面的测试结果。结果显示,采用时序优化算法的结果显著优于传统算法及未优化算法。总之,文中设计在光纤无线网络通信领域具有更好的交互能效,具有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Chen Bo. Power-aware virtual optical network provisioning in exible bandwidth optical networks [J]. *Photon Netw Commun*, 2016, 32(2): 300-309.
- [2] Zhou Shenghai, Song Wei, Gu Ying, et al. Research on accurate transmission method of relay protection signal in optical fiber communication network [J]. *Automation & Instrumentation*, 2018(12): 15-18. (in Chinese)
- [3] Chatterjee B C, Sarma N, Oki E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial [J]. *IEEE Commun Surveys Tuts*, 2015, 17(30): 1776-1800.
- [4] Masoudi A, Pilgrim J A, Newson T P, et al. Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration sensor [J]. *J Light Technol*, 2019, 37(1): 1352-1358.
- [5] Wei Heng, Lu Lin, Pu Tao, et al. Fiber time delay fluctuations measurement based on one-way transfer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20200018. (in Chinese)
- [6] Chowdhury M, Steinbach E, Kellerer W, et al. Context-aware task migration for HART-centric collaboration over FiWi based tactile internet infrastructures [J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2018, 29(6): 1231-1246.
- [7] Ali K, Shaikh A. Energy and delay aware routing algorithm for fiber-wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(6): 1313-1320.
- [8] Mamechaoui S, Senouci S M, Didi F, et al. Energy efficient management for wireless mesh networks with green routers [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2015, 20(5): 567-582.
- [9] Liu Y, Yang Y H, Han P C, et al. Virtual network embedding in fiber-wireless access networks for resource-efficient IoT service provisioning [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(10): 65506-65517.
- [10] He Rong, Xie Hui, Fang Xuming. Proportional fair and QoS-aware hierarchical dynamic bandwidth allocation scheme for fiber-wireless networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1409-1416. (in Chinese)
- [11] Sarigiannidis A, Nikopolitidis P. Quality-of-service -aware fair bandwidth allocation scheme for fibre wireless networks [J]. *IET Networks*, 2016, 5(3): 56-63.
- [12] Wang Xiao, Gu Huaxi, Yang Yintang, et al. A highly scalable optical network-on-chip with small network diameter and deadlock freedom [J]. *IEEE Trans Integr Syst*, 2016, 24(12): 3424-3436.
- [13] Chen J, Li J. Passive optical network based mobile backhaul enabling ultra-low latency for communications among base stations [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2017, 9(10): 855-863.
- [14] Li M, Chen H L. Energy-efficient traffic regulation and scheduling for video streaming services over LTE a networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 18(2): 334-347.
- [15] Hossain A, Hossain A D, Kouar M, et al. Revisiting FiWi: On the merits of a distributed upstream resource allocation scheme [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2017, 9(9): 773-781.
- [16] Chang W, Hu Y, Shou G, et al. An offloading scheme leveraging on neighboring node resources for edge computing over fiber-wireless (FiWi) access networks [J]. *China Communications*, 2019, 16(11): 107-119.