

带有负载转移的光无线融合网跨域节点协同休眠机制

王汝言 刘侃岭* 张 鸿

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(重庆高校市级光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对跨域节点间的协同休眠、休眠节点负载转移时导致的网络拥塞等问题, 该文提出一种带有负载转移的跨域节点协同休眠机制。通过分析光网络单元(ONU)当前负载及休眠 ONU 与无线路由器间相关性选择休眠节点, 并结合最大匹配理论确定休眠节点转移负载的目标节点, 从而在保证网络连通性及业务低时延的基础上, 进一步降低网络能耗。仿真结果表明, 所提出的算法在有效降低整网能耗的同时不会对网络数据包时延产生显著影响。

关键词: 光无线融合网; 节能; 节点休眠; 负载转移

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-1012-05

DOI: 10.11999/JEIT160611

Collaborative Sleep Mechanism between Cross-domain Node with Load Transfer in Wireless Optical Broadband Access Network

WANG Ruyan LIU Kanling ZHANG Hong

(School of Telecommunication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Key Laboratory of Optical Communication and Network, Chongqing 400065, China)

Abstract: For the problem of cross-domain node sleep and network congestion caused by load transfer, this paper propose an energy-efficient policy based on collaborative sleep mechanism between cross-domain node with load transfer in WOBAN. By analyzing the current load of the Optical Network Unit (ONU) and the collaboration between ONU and wireless router, this paper applies maximum matching theory to determine sleep node and the destination of load transfer so as to reduce energy consumption on the basis of ensuring the connectivity and low latency of network. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce the energy consumption of entire network without having a significant impact on the network packet delay.

Key words: Wireless Optical Broadband Access Network (WOBAN); Energy saving; Node sleep; Load transfer

1 引言

近年来, 随着通信业务数据量呈指数型上升, 用户不断增长的带宽需求迫使未来的接入网开始向高带宽和高移动性方向演进。光无线融合网络(Wireless Optical Broadband Access Network,

WOBAN)是一种由后端的无源光网络(Passive Optical Network, PON)和前端的无线网状网(Wireless Mesh Network, WMN)构成的新型接入网^[1], 其既具备光接入网高带宽、低损耗等优势, 又具备无线接入网可移动, 灵活性等优势。

接入网中大量有源器件的存在导致其能耗占整个通信网能耗的 70%^[2], 因此, 有效的节能方案对降低整个网络能耗起着至关重要的作用^[3], WOBAN 中的节能研究主要集中在光网络单元(ONU)处^[2]。文献[4]提出了低负载 ONU 到激活 ONU 间的负载转移机制, 目的在于使低负载节点进入休眠从而降低网络能耗。文献[5]考虑在 WOBAN 中将终端设备与 ONU-AP 进行休眠同步并结合动态带宽分配(Dynamic Bandwidth Allocation, DBA)算法进行模块化休眠, 但该方法并未针对基于 Mesh 组网的无线网络提出有效的休眠策略。在下行传输方向, 文献[6]根据负载大小自适应调节链路速率及 ONU

收稿日期: 2016-06-08; 改回日期: 2016-11-25; 网络出版: 2017-01-22

*通信作者: 刘侃岭 1344917583@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61371097, 61401052, 61271261), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400418), 重庆市青年科技人才培养计划(CSTC2014KJRC-QNRC40001), 重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(渝教人[2014]47号)

Foundations Items: The National Natural Science Foundation of China (61371097, 61401052, 61271261), The Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1400418), The Youth Talents Training Project of Chongqing Science & Technology Commission (CSTC2014KJRC-QNRC40001), The Chongqing Funded Project of College Young Teachers Scheme (Yu Teaches [2014] No.47)

休眠时间。文献[7]提出将负载低于唤醒门限的 ONU 作为新到来业务的候选集, 并通过负载转移机制使满足休眠条件的 ONU 进入休眠状态来节省网络能耗。文献[8]提出根据各 ONU 之间的相关系数, 从而选取最佳 ONU 进入秒级以上的长休眠状态。但该文并未计算不同域间节点相关性大小。

虽然目前已有大量针对 WOBAN 的节能研究, 但现有研究并未结合 WOBAN 中光域和无线域的特点对 ONU 以及无线路由器的休眠进行综合考虑, 原因在于无线路由器的休眠会对网络的连通性及用户的接入覆盖产生影响。同时现有研究在对休眠 ONU 进行负载转移时, 仅选取任意处于激活状态的 ONU 作为转移目标, 并未考虑激活 ONU 负载过重会导致网络性能恶化的问题。

针对上述问题, 本文提出一种带有负载转移的跨区域节点协同休眠机制(Collaborative Sleep Mechanism between cross-domain node with Load Transfer, CSMLT)。首先根据 ONU 当前的工作负载进行区分式路由使业务尽可能集中在少数 ONU 上; 其次, 分别从转发路径及用户业务两方面计算光域 ONU 与无线域无线路由器间相关系数大小; 再次, 利用最大匹配理论选取负载转移的目标 ONU, 同时休眠相关的 ONU 及无线路由器; 最后, 根据 PON 侧 DBA 周期的变化情况动态调整无线侧相关门限值的设定。

2 ONU 及无线路由器协同休眠

WOBAN 包含光域及无线域两部分, 光域由放置在中心端局(Central Office, CO)的光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)和多个 ONU(Optical Network Unit)构成。无线域为多个无线路由器构成的多跳网状网结构, 可应用于无线局域网、无线城域网及传感网^[9,10]等多种网络中。

2.1 目标 ONU 集合划分

在网络低负载时, 可让处于闲置状态下的 ONU 进入休眠状态^[1]以达到降低网络能耗的目的。本文首先将 ONU 节点分成以下 3 类集合: SS, MS 以及 HS。休眠集合 SS 内的 ONU 不参与数据转发, 而对于中负载集合 MS 及重负载集合 HS, 以集合内 ONU 个数作为被选作目标集合的概率, 即选择 MS, HS 为目标集合的概率分别为 P_m 和 $1 - P_m$ 。在集合 MS 中, 计算该集合内各 ONU 当前工作负载在总负载中所占比值, 并将其值作为该 ONU 被选作目的节点的概率, 如式(1)所示。

$$WC_{\text{onu}}^{\text{MS}} = WC_{\text{onu}}^1 + WC_{\text{onu}}^2 + \dots + WC_{\text{onu}}^{N_m-1} + WC_{\text{onu}}^{N_m} \quad (1)$$

对于任意 ONU_j 属于 MS, 新到来业务以该 ONU 为目的节点的概率 P_j 如式(2)所示, N_m , N_h 分别表示 MS, HS 中 ONU 的个数。而对于 HS 中的 ONU, 考虑到本身负载较重, 因此令 HS 中 ONU 被选作目的节点的概率均等, 如式(3)所示。

$$P_j = P_m \times \left(WC_{\text{onu}}^j / WC_{\text{onu}}^{\text{MS}} \right) = \left(N_m / (N_m + N_h) \right) \times \left(WC_{\text{onu}}^j / (WC_{\text{onu}}^1 + WC_{\text{onu}}^2 + \dots + WC_{\text{onu}}^{N_m-1} + WC_{\text{onu}}^{N_m}) \right) \quad (2)$$

$$P_j = 1 / (N_m + N_h) \quad (3)$$

2.2 域间节点的关联程度分析

确定休眠 ONU 后, 影响无线路由器与 ONU 相关程度的因素包括两个方面: 路径和业务, 即分别从物理连接角度和实际传输角度来衡量域间节点的关联程度。其中, 路径相关系数 R_p 是指以 ONU_j 为目的节点且经过无线路由器 i 的路径数 N_{pi}^j 与总路径数 N_p 的比值, 如式(4)所示。假设无线侧采用最短路径算法进行路由, 则网络中总的路径数如式(5)所示。

$$R_p = N_{pi}^j / N_p \quad (4)$$

$$N_p = n \times \left(N_w - \sum_{k=1}^N (1 - \alpha_k) N_k \right) \quad (5)$$

式中, n 表示参与轮询的 ONU 个数。 α_k 表示第 k 个 ONU 是否参与轮询, $\alpha_k = 0$ 表示该 ONU 不参与 OLT 轮询, $\alpha_k = 1$ 表示该 ONU 参与轮询。 N_w 表示网络中无线路由器数, 任意与 ONU 强相关的休眠无线路由器的个数分别为 $N_1, N_2, \dots, N_k, N_N$, 将式(5)代入式(4)得其路径相关系数。

业务相关系数 R_s 是指以 ONU_j 为目的节点且经过无线路由器 i 的业务数 N_{si}^j 与总业务数 N_s 的比值, 如式(6)所示。综合路径相关系数及业务相关系数可得任意无线路由器 i 与 ONU_j 的总相关系数 R_i^j , 如式(7)所示, 式中 β 表示路径相关系数及业务相关系数在总相关系数中所占比重。当计算所有无线路由器与休眠 ONU 的总相关系数后, 取最大值 $R_{i,j}^{\text{MAX}}$, 使该无线路由器及其到休眠 ONU 之间最短路径上经过的无线路由器进入休眠状态。

$$R_s = N_{si}^j / N_s \quad (6)$$

$$R_i^j = (1 - \beta) R_p + \beta R_s = (1 - \beta) N_{pi}^j / \left(n \times \left(N_w - \sum_{k=1}^N (1 - \alpha_k) N_k \right) \right) + \beta N_{si}^j / N_s \quad (7)$$

3 拥塞感知的负载转移机制

ONU 休眠后, 休眠 ONU 的负载可通过前端 WMN 以重路由的方式转移到处于激活 ONU 上。当网络存在多个满足休眠条件的 ONU 时, 任意选取激活状态的 ONU 作为休眠转移负载的目的节点会使该 ONU 负载过重超过唤醒门限甚至达到容量上限, 数据包时延明显增大甚至产生拥塞或丢包。

为避免多个休眠 ONU 将负载转移到同一 ONU 上, 本文将负载转移转化为求解满足休眠条件 ONU 的最大匹配, 即分别用 V_1, V_2 表示满足条件 $WC_{\text{onu}}^k < LW$ 的 ONU 集和满足条件 $WC_{\text{onu}}^k > LW$ 的 ONU 集。如果集合 V_1 中的 ONU 能将其负载转移到集合 V_2 中的 ONU 上, 则表明存在集合 $V_1 \rightarrow V_2$ 的边, $G(V_1, V_2)$ 就表示 ONU 的具有二部划分为 (V_1, V_2) 的二分图, 找出集合 V_1 的最大匹配即为负载转移的目的 ONU。

4 自适应门限调整

考虑无线侧相关固定门限值的设定无法较好适应网络中的负载变化情况, 本文根据后端 PON 中 DBA 轮询周期变化情况将 ONU 休眠/唤醒门限值的设定做动态修正, 即当第 k 次轮询周期 T_{cy}^k 的长度大于第 $k-1$ 次轮询周期 T_{cy}^{k-1} , 此时将 ONU 的休眠门限及唤醒门限调整为

$$HW = HW - \Delta HW \quad (8)$$

$$LW = LW - \Delta LW \quad (9)$$

休眠、唤醒门限的降低使 ONU 更难进入休眠且更容易被唤醒。同理, 当第 k 次轮询周期小于第 $k-1$ 次轮询周期时, 网络负载降低, 从而可适当增加 ONU 的休眠、唤醒门限使更多 ONU 处于休眠状态:

$$HW = HW + \Delta HW \quad (10)$$

$$LW = LW + \Delta LW \quad (11)$$

5 网络能耗模型

为计算 WOBAN 的总能量消耗, 需分别计算 ONU 及无线路由器在 1 次轮询周期内的能耗。就 ONU 而言, 假设 WOBAN 中 ONU 个数为 N , 激活状态的 ONU 个数为 n , 则 1 次轮询周期内 ONU 总能耗如式(12)所示, 式中 E_{sl} , E_{nsl} 分别表示处于休眠、激活状态的 ONU 能耗。

$$E_{\text{ONU}} = \sum_{k=1}^{N-n} E_{\text{sl}} + \sum_{l=1}^n E_{\text{nsl}} \quad (12)$$

就无线路由器而言, 假设其个数为 N_w , 激活状态下的功耗为 P_{ac}^w , 休眠状态下的功耗为 P_{sl}^w ; 任意因 ONU 休眠而休眠的无线路由器个数分别为 $N_1, N_2, \dots, N_{N-1}, N_N$, 则一次轮询周期内工作状态及休

眠状态的无线路由器能耗分别如式(13)、式(14)所示, 相加即可得前端无线路由器总能耗。

$$E_{\text{nsl}}^w = \left(N_w - \sum_{k=1}^N (1 - \alpha_k) N_k \right) \times T_{\text{cy}} \times P_{\text{ac}}^w \quad (13)$$

$$E_{\text{sl}}^w = \sum_{k=1}^N (1 - \alpha_k) N_k \times P_{\text{sl}}^w \times T_{\text{cy}} \quad (14)$$

因此, 综合式(12), 式(13), 式(14)得 WOBAN 中节点在一次轮询周期中的总能耗。

6 数值结果分析

本文采用基于 NS2 的仿真平台对所提出的 CSMLT 算法进行验证。其对比算法包括文献[7]提出的 EASLO 算法, 文献[12]提出的 GFiWi 算法, 文献[2]提出的 BGW 算法以及文献[13]提出的 EARF 算法。本文的主要具体仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置^[14,15]

参数设定	参数数值
网络区域(m ²)	500×500
ONU 数目 N (个)	8
无线路由器数目 N_w	30
ONU 唤醒能耗(W)	5.052
ONU 休眠能耗	0.750
无线路由器唤醒能耗	1.250
无线路由器休眠能耗	0.010

6.1 不同负载下的网络能耗

不同门限值设定条件下的网络总能耗随负载增加的变化情况如图 1 所示。由图可知, 负载的增加导致网络总能耗上升, 而在负载一定的情况下, 门限值的增加使总能耗呈下降趋势。原因在于增大门限将导致低负载 ONU 更容易进入休眠, 高负载 ONU 更难达到唤醒门限, 网络中更多的 ONU 及无线路由器将处于休眠状态。

图 2、图 3 给出了当网络中 $LW=20, HW=80, T_{\text{cy}}=2 \text{ ms}$ 时, ONU 能耗及无线路由器休眠百分比随网络负载增加的变化情况。就 ONU 能耗来讲, CSMLT 算法较对比算法而言在网络处于低负载时 ONU 总能耗最低。原因在于 CSMLT 将负载较高的 ONU 以更高概率作为无线域路由的目的节点, 从而使业务集中在少数 ONU 上。图 3 中, EASLO 算法不涉及无线路由器的休眠。当网络负载 $> 4 \text{ Mbps}$ 时, CSMLT 算法的无线路由器的休眠百分比趋近于 0, 原因在于此时网络中所有 ONU 均处于激活状态, 因此不存在强相关无线路由器的休眠。

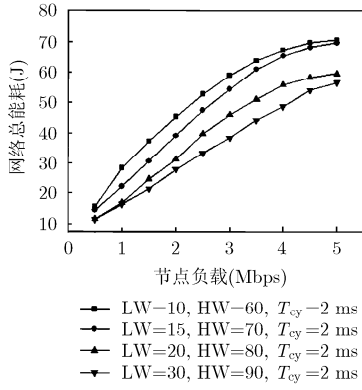


图 1 不同门限值的网络总能耗

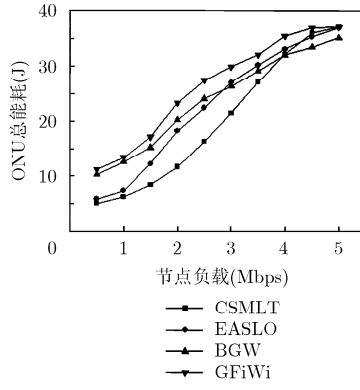


图 2 不同算法的 ONU 能耗

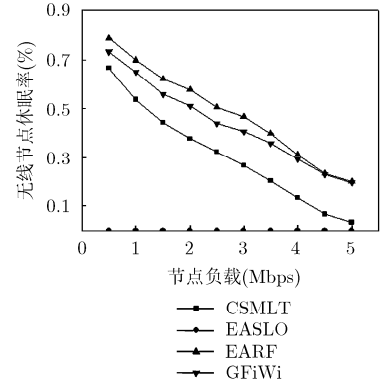


图 3 不同算法的无线路由器休眠百分比

6.2 不同负载下的数据包平均时延

图 4 表示不同门限值设定条件下的数据包平均时延随负载增加的变化情况。当网络处于低负载时，数据包时延随负载的增加缓慢上升，而当网络处于高负载时不存在休眠的节点，网络负载的增加将直接导致时延的明显增大。同时负载一定，门限值的提高会使网络时延增大。原因在于更多低负载 ONU 因休眠门限的增大进入休眠状态。

当网络中 LW=20, HW=80, T_{cy} = 2 ms 时，数据包时延随负载增长的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知，高负载时 CSMLT 算法网络时延有较小幅度增长。原因在于 CSMLT 中部分强相关无线路由器会因 ONU 的休眠而停止转发业务。但由于

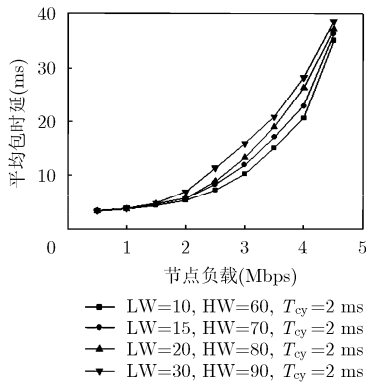


图 4 不同门限值的平均包时延

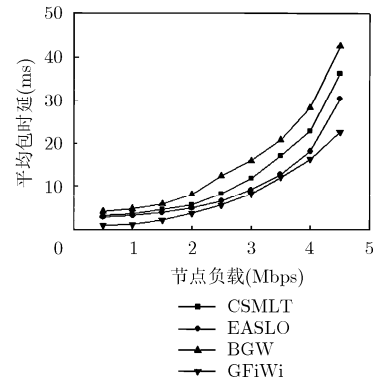


图 5 不同算法的平均包时延

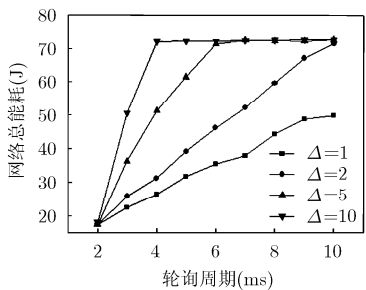


图 6 不同步进值的网络总能耗

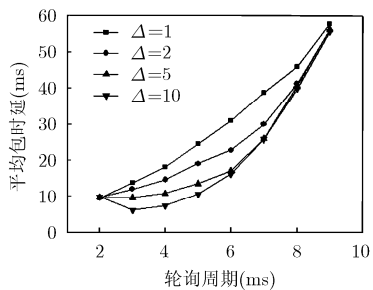


图 7 不同步进值的平均包时延

CSMLT 算法将负载转移问题转换为最大匹配问题，同时 ONU 的唤醒、休眠门限会自适应地根据后端 PON 侧 DBA 轮询周期的变化而修正以降低数据包时延，因此 CSMLT 算法仅会导致平均包时延较小幅度的增长。

6.3 不同轮询周期下的能耗及平均时延

图 6，图 7 分别表示 CSMLT 算法在网络初始门限值 LW=20, HW=80 时，不同 ΔHW, ΔLW 下的网络总能耗及时延随轮询周期增长的变化情况。由图 6 可知，步进值越大导致网络总能耗增长趋势越快，原因在于大步进值将使门限值 LW 及 HW 减小的幅度越大，网络中处于激活状态的 ONU 数量明显增多。而由图 7 可知，步进值一定的条件

下, 当 $T_{cy} \leq 3$ ms 时, 平均包时延增长相对较缓且在步进值设定为 10 时, 时延有所降低。这是由于 LW 及 HW 的较大幅度降低导致网络中更多数量的 ONU 连带其强相关无线路由器被唤醒。

7 结束语

为降低 WOBAN 能耗, 本文提出一种带有负载转移的 WOBAN 跨域节点协同休眠机制。该机制通过计算 ONU 与无线路由器间相关系数对 ONU 及无线路由器进行协同休眠, 并将休眠 ONU 的负载转移问题转化为求解二分图的最大匹配问题从而有目的地选取激活状态 ONU 转移负载, 以解决跨域节点间的协同休眠、休眠节点负载转移时导致的网络拥塞等问题。与其他算法相比, 本文所提出的算法以较小增加网络平均时延为代价, 达到大幅度降低网络总能耗的目的。

参 考 文 献

- [1] WU Dapeng, LIU Zuqi, WANG Ruyan, *et al.* Dynamic bandwidth allocation mechanism in EPON with idle time eliminated[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(23): 6372-6376. doi: 10.1016/j.ijleo.2013.05.027.
 - [2] CHOWDHURY P, TORNATORE M, SARKAR S, *et al.* Building a green Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(16): 2219-2229. doi: 10.1109/JLT.2010.2044369.
 - [3] 张晚生, 刘凯. 无线网络中基于位置的能量高效协作路由算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 63-68. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00425.
ZHANG Wansheng and LIU Kai. Energy-efficient location-based cooperative routing in wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 63-68. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00425.
 - [4] LIU Yejun, GUO Lei, ZHANG Lincong, *et al.* A new integrated energy-saving scheme in green Fiber-Wireless (FiWi) access network[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(6): 1-15. doi: 10.1007/s11432-013-4958-7.
 - [5] VAN D P, RIMAL B P, MAIER M, *et al.* ECO-FiWi: An energy conservation scheme for integrated Fiber-Wireless access networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(6): 3979-3994. doi: 10.1109/TWC.2016.2531694.
 - [6] KUBO R, KANI J I, UJIKAWA H, *et al.* Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON[J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2010, 2(9): 716-729. doi: 10.1364/JOCN.2.000716.
 - [7] GONG Xiaoxue, HOU Weigang, GUO Lei, *et al.* Dynamic energy-saving algorithm in green hybrid wireless-optical broadband access network[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(14): 1874-1881. doi: 10.1016/j.ijleo.2012.05.030.
 - [8] CORREIA N, SCHUTZ G, and BARRADAS A. Correlation-based energy saving approach for smart fiber wireless networks[J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7: 525-539. doi: 10.1364/JOCN.7.000525.
 - [9] WU Dapeng, HE Jie, WANG Honggang, *et al.* A hierarchical packet forwarding mechanism for energy harvesting wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(8): 92-98. doi: 10.1109/MCOM.2015.7180514.
 - [10] THULASIRAMA P and WHITE K A. Topology control of tactical wireless sensor networks using energy efficient zone routing[J]. *Digital Communications and Networks*, 2016, 2(1): 1-14. doi: 10.1016/j.dcan.2016.01.002.
 - [11] NISHIYAMA H, TOGASHI K, KAWAMOTO Y, *et al.* A cooperative ONU sleep method for reducing latency and energy consumption of STA in smart-FiWi networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2015, 26(10): 2621-2629. doi: 10.1109/TPDS.2014.2360405.
 - [12] ALI A, ULLAH I, TRAUQEER T, *et al.* Greening FiWi access networks[C]. 2011 7th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Islamabad, 2011: 1-6. doi: 10.1109/ICET.2011.6048457.
 - [13] TRAUQEER T and ZAIDI H. Energy aware routing algorithm for FiWi networks (EARF)[C]. 2011 8th International Conference on High-capacity Optical Networks and Emerging Technologies (HONET), Riyadh, 2011: 89-94. doi: 10.1109/HONET.2011.6149795.
 - [14] SCHUTZ G and CORREIA N. Design of QoS-aware energy-efficient fiber-wireless access networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, 4(4): 586-594. doi: 10.1364/JOCN.4.000586.
 - [15] LI Chengjun, GUO Wei, HU Weisheng, *et al.* Energy-efficient dynamic bandwidth allocation for EPON networks with sleep mode ONUs[J]. *Optical Switching and Networking*, 2015, 15: 121-133. doi: 10.1016/j.osn.2014.07.003.
- 王汝言: 男, 1969 年生, 教授, 博士, 研究方向为泛在网络、全光网络理论与技术、多媒体信息处理等。
刘侃岭: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为光无线融合网络。
张 鸿: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为光无线融合网络。