

光接入网中低延迟高能效动态带宽分配算法研究

李贵鑫¹ 孙 卿¹ 张圣羽¹ 朱 敏²

(1. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要 巨大的能源消耗以及高延迟已经成为阻碍无源光网络进一步发展的主要困难. 为了解决这个问题, 绿色动态带宽分配算法最近被广泛地研究. 然而, 这些所提出来的方案并不能在降低能耗的同时满足低延迟的要求. 在本文中, 一个高能效低延迟的动态带宽分配方案被提出, 称之为“组合配对动态带宽分配算法”(Pair-Wise Combination, PWC). 本文所提出的 PWC 动态带宽分配算法能够动态地改变轮询次序, 以压缩周期长度, 提高了延迟性能. 不仅如此, 该方案在同时考虑了上、下行数据传输的情况下, 还能提高无源光网络的能效效率. 仿真结果表明, 该方案能够极大地降低能耗, 同时还能有效地降低业务延迟. 仿真结果表明, 在光网络单元的个数为 16, 上行网络负载为 0.3 时, PWC 方案下的上行延迟为 1.18 ms, 节能效率为 91.1%; 而与之对比的 ECS 能耗节约方案的上行延迟为 2.33 ms, 节能效率为 89%. 提出的 PWC 方案优于已有的 ECS 节能方案.

关键词 动态带宽分配; 能效效率; 低延迟; 无源光网络

中图分类号 TN915.6

文献标识码 A

0 引言

随着信息时代的到来, 信息技术得到了空前地快速发展, 这也导致了人们对于网络建设有了越来越高的需求. 这就迫使网络运营商去建设越来越多的通信设施. 但是, 不断增大的网络铺设带来了能耗的极大增长. 正如我们所知, 在通信设备中, 接入网部分设备相对于其他部分来说, 消耗了最多的能耗^[1]. 因此, 如何有效地降低接入网的能量消耗是一个非常重要的问题.

在以往的研究工作中, 许多研究学者都在研究如何提高无源光网络(Passive Optical Networks, PONs)的能效^[2-4]. 将睡眠模型转换机制引入到动态带宽分配算法中来降低能耗的方案已经被广泛地研究. 在文献[5]中, 作者优化了周期睡眠模型中的睡眠周期, 该方案使得能量消耗与状态转移之间得到了平衡. 在文献[6]中, 作者针对休眠与周期睡眠模型提出了一种统一的能耗管理模型, 称之为“观察睡眠模型”. 但是, 这两种睡眠模型都只是仅仅考虑了上行数据传输的情况, 并没有将下行数据的传输考虑进去. 因此, 通过采用这种方案计算出来的能耗是不够准确的. 文献[7, 8]提出了两种方案, 分别是以上行为中心的调度方案和以下行为中心的调度方案. 然而, 由于上行数据带宽请求与下行数据带宽请求大小存在较大的差异, 因此, 这两种方案都会导致带宽和能量资源的极大浪费. 最近, 在文献[9]中, 作者提出了一种节能带宽调度方案, 称之为“节能调度方案”(Energy Conservation Scheme ECS), 该方案的调度算法示意图如图 1 所示. 在该方案中, 每个光网络单元的数据传输窗口大小取决于上行数据带宽请求与下行数据带宽请求之间的最大值. 但是, 该方案同样会由于上下行数据带宽请求值的差异, 而导致带宽资源和能量资源的双重浪费.

在另一方面, 延迟敏感的无源光网络业务有着严苛的服务质量要求, 这一严格的要求并不能通过简单的设备升级来满足, 必须要采用先进的动态带宽分配算法来实现^[10-13]. 在文献[14]中, 提出了一种睡眠模型, 并将它引入到无源光网络的动态带宽分配算法中, 并建立了一个平均包延迟的数学模型. 但是, 该方案仅仅考虑了上行数据的传输, 而忽略了下行数据的传输.

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771134)资助

通讯作者: 朱敏, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 光网络与光通信, E-mail: minzhu@seu.edu.cn.

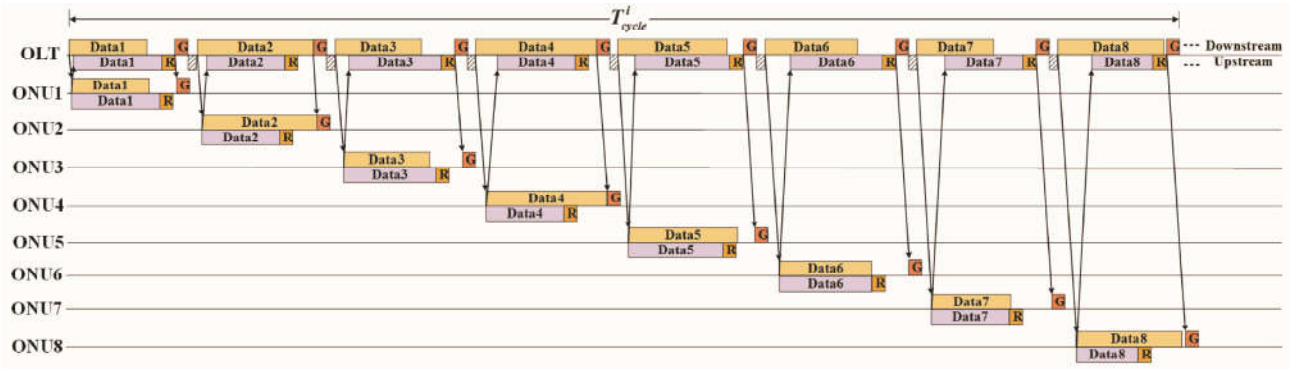


图1 ECS 方案调度流程图

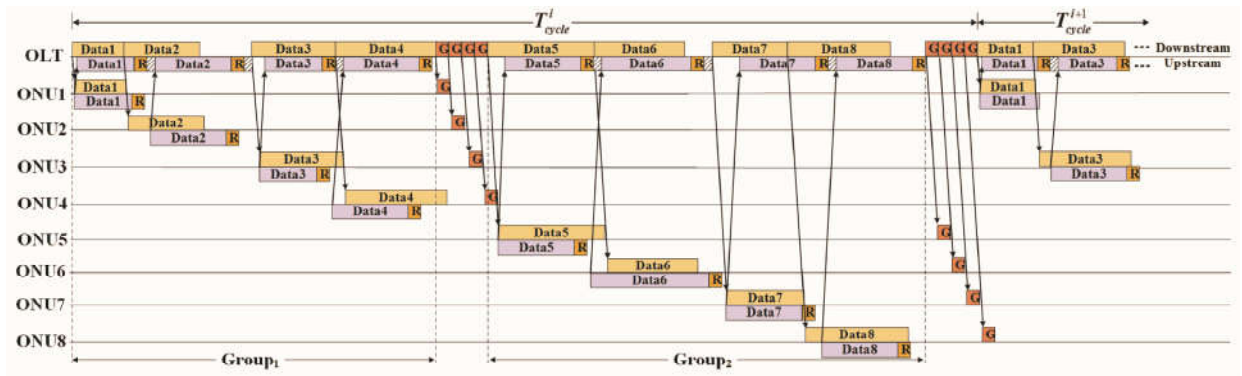


图2 PWC 方案调度流程图($\alpha=2$)

在本文中,一个基于组合配对的高能效低延迟的动态带宽分配算法被提出来,并进行了一个详细的性能仿真.本调度方案遵循无源光网络的多点控制协议,并且轮询次序安排信息是通过门帧(Gate frame)和报告帧(Report frame)来传输的.事实上,PWC 调度方案能够动态地调整轮询序列,以压缩循环周期长度,从而提高延迟性能.而且,该方案在同时考虑了上行和下行数据传输的情况下,还可以提高能源的效率.仿真结果表明,该调度方案能大大提高能源效率和降低数据包延迟.

1 PWC 调度算法原理

1.1 PWC 调度流程

如图2所示,假设16个光网络单元(Optical Network Unit ONU)与1个光线路终端(Optical Line Terminal OLT)组成了1个无源光网络系统,并且这些光网络单元被分成了两组($\alpha=2$),每组都包含了8个ONU.每组中所有的光网络单元都根据PWC方案被两两组合配对.具体调度流程为:当无源光网络系统初始化完成后,在ONU这边的操作如下.

步骤1 一旦ONU从光线路终端接收到Gate帧,它就开始处理Gate信息,并计算出相应的传输窗口大小.

步骤2 当ONU的本地时钟到达下行数据接收时间时,ONU开始接受从OLT发送来的下行数据;同理,当ONU的本地时钟到达上行数据发送时间时,ONU开始向OLT发送上行数据.在这一时间窗口,ONU被唤醒,并进入活跃状态.ONU接收和发送数据量的大小取决于数据传输窗口的大小.在上下行数据传输的同时,ONU不断地接收从用户端发送来的数据.当ONU完成了上行数据的传输后,计算出下一个周期的带宽请求,并把带宽请求值保存在Report帧中,并把它发送到OLT.

步骤3 在上述步骤完后之后,如果ONU仍在接收下行数据,那么,它就会自动进入监听模式.如果下行数据接收完毕的话,ONU就会进入睡眠模式,并且保持这个状态直到下一个周期传输开始之前被唤醒.

另一方面,OLT执行在线调度,操作流程如下(如图3所示).

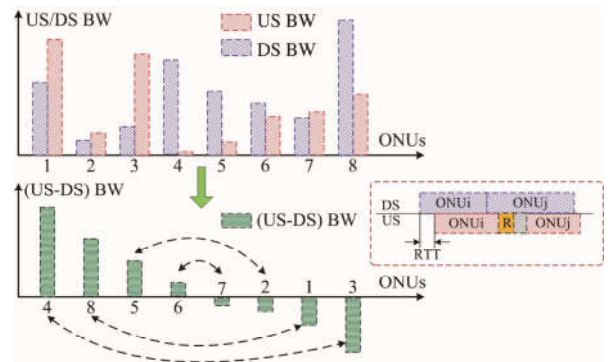


图3 PWC 方案在 OLT 边的操作

步骤 1 OLT 收集完同一组中所有 ONU 发送来的上行数据以及 Report 帧之后,开始处理这些 Report 帧,并且从中读取并计算出带宽请求。

表 1 仿真参数

参数名	参数值	描述	文献
N	16	ONU 的个数	[15]
R	1 Gbps	线速率	[15]
P_{min}	64 bytes	最小数据包	[15]
P_{max}	1518 bytes	最大数据包	[15]
B	1 Mbytes	ONU 缓存大小	[15]
T_g	1000 ns	保护帧时间	[15]
T_{prop}	5 ns / meter	单位传播延迟	[15]
P_{active}	100%	活跃状态能耗	[6]
P_{listen}	40%	监听状态能耗	[6]
P_{sleep}	5%	睡眠状态能耗	[6]

步骤 2 OLT 计算出每一个 ONU 的上下行带宽请求的差值,并且将差值按降序的方式排列,随后将这些排序后的 ONU 首尾组合配对,例如,将第一个 ONU 与最后一个 ONU 组合配对,第二个 ONU 与倒数第二个 ONU 组合配对,剩余的 ONU 依次配对组合。

步骤 3 OLT 给这些同一组的所有 ONU 发送 Gate 帧,在每一个 ONU 的数据传输窗口中,上行数据和下行数据同时传输的,以此来实现节能的目的。

1.2 传输窗口授权策略

被组合配对在一起的两个 ONU 共享的传输窗口 T_c^{PWC} ,计算公式如

$$T_c^{PWC} = \max\{B_{d1} + B_{d2}, RTT + B_{u1} + B_{u2} + 2T_{msg} + T_g\}, \quad (1)$$

其中 T_{msg} 和 T_g 分别为多点控制协议帧传输所用时间以及保护帧的时间。 B_{d1} 和 B_{u1} 分别为第一个 ONU 的下、上行带宽请求的大小。 B_{d2} 和 B_{u2} 分别为第二个 ONU 的下、上行带宽请求的大小。然而,在前面提到的 ECS 带宽调度方案中,两个连续的 ONU 的数据传输窗口之和为

$$T_c^{ECS} = \max\{B_{d1}, RTT + B_{u1} + T_{msg}\} + T_{msg} + \max\{B_{d2}, RTT + B_{u2} + T_{msg}\} + T_{msg} + T_g. \quad (2)$$

2 能耗模型

本小节主要建立了一个 PON 系统的节能模型,并给出了基于 PWC 的动态带宽分配算法相较于传统的 IPACT 带宽分配算法的节能效率。从前文的阐述中可知,在传统的 IPACT 带宽分配算法中,所有的 ONU 都时刻处于活跃状态,该算法不考虑节能措施。因此,基于 PWC 的动态带宽分配算法的节能效率

$$\eta^{PWC} = \frac{E^{IPACT} - E^{PWC}}{E^{IPACT}} = 1 - \frac{E^{PWC}}{E^{IPACT}}, \quad (3)$$

其中 E^{IPACT} 表示的是 IPACT 带宽分配算法中单个 ONU 在一个轮询周期内的平均能耗。 E^{PWC} 定义为 PWC 带宽分配算法中单个 ONU 在一个轮询周期内的平均能耗。因此,该节能效率表示的是 PWC 带宽分配算法相对于 IPACT 带宽分配算法在一个周期内单个 ONU 平均节能效率。 E^{IPACT} 的具体计算公式为

$$E^{IPACT} = T_c \times P_{active}, \quad (4)$$

其中参数 P_{active} 代表的是 ONU 处于 active 状态下的能耗。 E^{PWC} 的具体计算公式如

$$E^{PWC} = T_c^{PWC} \times P_{active} + T_c^{PWC} \times P_{listen} + T_c^{PWC} \times P_{sleep}, \quad (5)$$

其中 P_{active} 、 P_{listen} 以及 P_{sleep} 的描述和参数值如表 1 所示。 T_c^{PWC} 、 T_c^{PWC} 以及 T_c^{PWC} 分别对应 ONU 在一个轮询周期内处于 active、listen 以及 sleep 状态下的时长。轮询周期长度为 T_c^{PWC}

$$T_c^{PWC} = T_c^{PWC} + T_c^{PWC} + T_c^{PWC}. \quad (6)$$

在 PWC 动态带宽分配算法中,ONU 只存在三种工作状态,因此 T_c^{PWC} 的值为 T_c^{PWC} 、 T_c^{PWC} 以及 T_c^{PWC} 三者之和。我们定义 ONU 给 OLT 发送上行数据的时间为 T_c^{PWC} ,ONU 处于只接收下行数据而不发送上行数据的状态的时间为 T_c^{PWC} ,ONU 处于既不接收下行数据也不发送上行数据的状态的时间为 T_c^{PWC} 。

在 ECS 动态带宽分配算法中,对于任何一个 ONU 都只能在被授权的数据传输窗口内进行上下行数据的传输。而在数据传输窗口之外,调度算法为了节能,使得 ONU 进入到 sleep 状态。因此,ECS 动态带宽分配

算法的节能效率 η^{ECS} 计算公式为

$$\eta^{\text{ECS}} = \frac{E^{\text{IPACT}} - E^{\text{ECS}}}{E^{\text{IPACT}}}, \quad (7)$$

其中 E^{ECS} 的计算公式为

$$E^{\text{ECS}} = T_{\text{active}}^{\text{ECS}} \times P_{\text{active}} + T_{\text{sleep}}^{\text{ECS}} \times P_{\text{sleep}}, \quad (8)$$

轮询周期长度 T_c^{ECS} 可表示为

$$T_c^{\text{ECS}} = T_{\text{active}}^{\text{ECS}} + T_{\text{sleep}}^{\text{ECS}}. \quad (9)$$

3 实验结果

本节展示了基于 PWC 调度方案的性能分析. 为了展现 PWC 方案相比于 ECS 方案在系统节能以及数据包延迟等方面的优势, 我们做了一系列仿真实验, 仿真实验是基于离散事件仿真库完成的^[12].

3.1 仿真参数

在该无源光网络系统中, 我们假设一个 OLT 以及 16 个 ONU, 并且每个 ONU 的传输延迟随机分布在 2.5-100 μs , 相对于 OLT-ONU 之间的距离随机分布在 0.5-20 km. 根据 PON 多点控制协议, Gate 帧与 Report 帧的长度都为 64 bytes. 由于在该系统中, OLT 一直都处于活跃状态, 故在计算能耗时不将其考虑在内. 为了方便计算能耗, 我们采用 ONU 发射机和接收机的百分比能耗. P_{active} 为 ONU 的发射机与接收机同时处于活跃状态时的能耗. P_{listen} 为只有 ONU 的接收机处于活跃状态时的能耗. 最后, 当 ONU 的发射机与接收机均处于睡眠状态时, ONU 的能耗可定义为 P_{sleep} . 为了获得一个准确的性能分析, 上行和下行的业务数据都是由自相似业务模型生成^[12], 并且每一个数据包均以标准的以太帧的格式封装. 为了简单起见, 我们假设所有的 ONU 的上下行负载相同, 并且它们的取值从 0.05 一直到 0.9.

3.2 仿真结果分析

本部分展示了 PWC 方案与 ECS 方案在节能、平均周期长度、平均上行数据延迟、平均下行数据延迟等性能方面的比较. 所有的仿真结果都是以负载为变量的函数. 同时, 在仿真计算中, 还考虑了 ONU 个数 N 对各个网络性能参数的影响. 在该仿真中, 分组参数 α 被设置为 1.

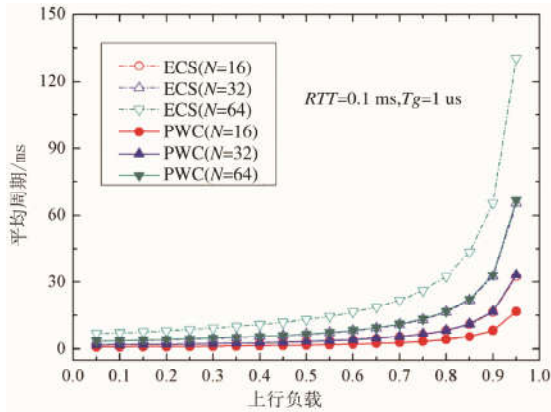


图 4 平均周期长度与上行负载的关系

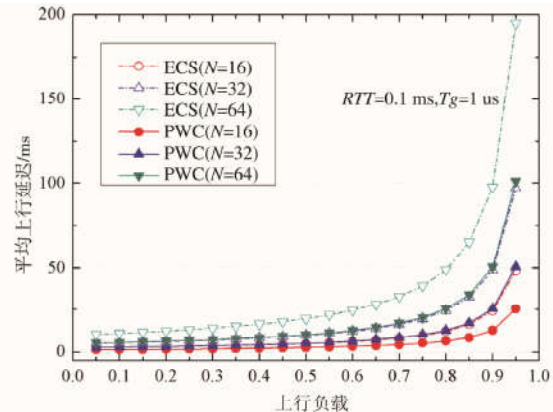


图 5 平均上行延迟与上行负载的关系

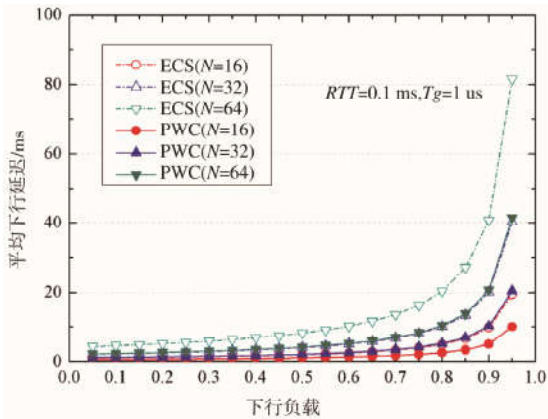


图 6 平均下行延迟与下行负载的关系

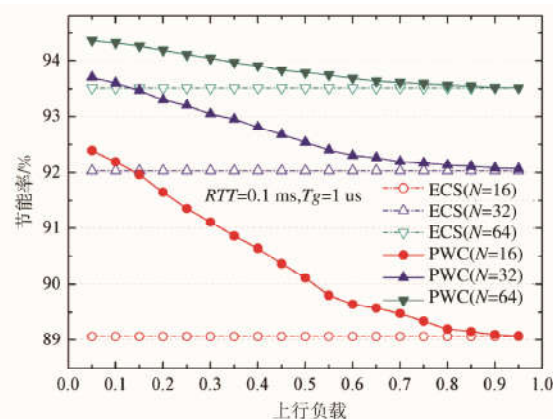


图 7 节能效率与上行负载的关系

图 4 展示了在不同的上行网络负载之下的平均周期长度, 同时还展示了系统 ONU 个数对周期长度的

影响.上行网络负载的增加势必会造成数据量的增大,进而致使周期长度快速增长.从图中可以看出,ONU的个数越多,周期长度也就越长,原因在于OLT需要花费更多的时间来将所有的ONU轮询调度一遍.在PWC和ECS方案的对比中来看,当上行负载为0.6时,PWC方案的平均周期为2ms,而ECS方案的4ms,可见PWC方案大大缩短了周期长度.

图5展示了在不同的上行网络负载之下的平均上行延迟,同时还展示了系统ONU个数对平均上行延迟的影响.上行网络负载的增加势必会造成数据量的增大,每个ONU被授权的数据传输窗口随之增大,数据帧等待传输的时间变长,那么上行数据延迟也就随之增加.同样,在PWC和ECS方案的对比中可以看出,在上行负载和ONU个数都相同的情况下,PWC方案的上行延迟远远小于ECS方案的延迟.从图4和图5的对比中可以看出,两幅图的数据变化趋势类似,这也验证了周期长度与数据延迟之间存在的正相关关系.同周期长度性能,ONU的个数对上行延迟的影响也是类似的.

图6展示了在不同的下行网络负载之下的平均下行延迟,同时还展示了系统ONU个数对平均下行延迟的影响.网络业务负载与ONU个数对下行延迟的影响同上行延迟的情况类似.在两种调度方案的仿真结果中可以看出,其他网络参数均相同的情况下,PWC方案的下行延迟远远小于ECS方案的下行延迟.从图5和图6对比中可以看出,在相同情况下,平均下行延迟小于平均上行延迟.这是由于,平均上行带宽请求总是大于平均下行带宽请求,授权的数据传输时间窗口大于下行带宽请求,缓存中的下行数据总是能及时发送.

图7展示了在不同的上行网络负载之下的节能效率,同时还展示了系统ONU个数对节能效率的影响.随着上行业务负载的增加,节能效率不断下降.这是因为,负载的增加使得每个ONU的上行和下行带宽请求都变得很大,传输窗口分配策略中RTT对于授权传输窗口的影响变得很小,每个ONU的上行和下行带宽请求相差较小,组合配对的效率降低,节能效率自然降低.ONU的个数越多,组合配对算法能够使得ONU之间的配对变得更优,节能效率越高.同样,在PWC和ECS方案的对比中可以看出,PWC方案的节能效率也是优于ECS方案的.

4 结论

在本文中,我们提出并研究了一种新颖的基于配对组合方式的PON动态带宽调度算法,该算法同时考虑了上行与下行数据的传输.相对于已有的ECS节能调度方案来说,我们所提出的PWC不仅能够在压缩周期长度,从而降低数据传输延迟,还通过引入睡眠模型,能够进一步地提高无源光网络的节能效率.

参 考 文 献

- [1] Lange C, Gladisch A. On the energy consumption of FTTH access networks[C]. // Conference on Optical Fiber Communication-includes Post Deadline Papers, San Diego, CA, 2009.
- [2] 李隆胜, 毕美华, 胡卫生. 云化移动接入网中前传链路负载自适应技术[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32(2): 58-63.
- [3] Kani J I. Power saving techniques for optical access[J]. OFC/NFOEC Los Angeles CA, 2012, 2: 1-3.
- [4] Kani J I. Power saving techniques and mechanisms for optical access networks systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 563-570.
- [5] Bang H, Kim J, Lee S S, et al. Determination of sleep period for cyclic sleep mode in XG-PON power management[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(1): 98-100.
- [6] Hirafuji R O C, Cunha K B, Campelo D R. The watchful sleep mode: a new standard for energy efficiency in future access networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 150-157.
- [7] Yan Y. Energy management mechanism for ethernet passive optical networks (EPONs)[J]. IEEE International Conference on Communications, Cape Town, 2010, 35(2): 1-5.
- [8] Yan Y, Dittmann L. Energy efficiency in ethernet passive optical networks (EPONs). protocol design and performance evaluation[J]. J Commun, 2011, 6: 249-261.
- [9] Van P D. ECS: An energy conservation scheme for integrated fiber-wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communi-

cations, 2016, 15(6): 3979-3994.

- [10] Berisa T. Low-latency polling for passive optical networks[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(6): 1288-1291.
- [11] Shao A, Dou Q, Xiao Y, et al. Bandwidth allocation design to guarantee qos of differentiated services for a novel OFDMA-PON[C]. // Communications, IEEE, 2012.
- [12] Nguyen T D, Eido T, Tülin Atmaca. An enhanced QoS-enabled dynamic bandwidth allocation mechanism for ethernet PON[C]. // International Conference on Emerging Network Intelligence, IEEE, 2009.
- [13] Choi S. Cyclic Polling-Based dynamic bandwidth allocation for differentiated classes of service in ethernet passive optical networks[J]. Photonic Network Communications, 2004, 7(1): 87-96.
- [14] Bokhari M, Saengudomlert P. Analysis of mean packet delay for upstream transmissions in passive optical networks with sleep mode[J]. Opt Switch Netw, 2013, 10(3): 195-210.
- [15] Kramer G, Mukherjee B, Pesavento G. IPACT a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON) [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 74-80.

Research on Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms with Low Delay and High Energy Efficiency in Optical Access Networks

LI Gui-xin¹ SUN Qin¹ ZHANG Sheng-yu¹ ZHU Min²

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Nanjing, Nanjing 210096, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, University of Nanjing, Nanjing 210096, China)

Abstract Huge energy consumption and high latency have become the main obstacles hindering the further development of passive optical networks. To solve this problem, green dynamic bandwidth allocation algorithms have been widely studied recently. However, these proposed schemes can not meet the requirements of low latency while reducing energy consumption. In this paper, a dynamic bandwidth allocation scheme with high energy efficiency and low latency is proposed. It is called Pair-Wise Combination (PWC). The proposed PWC dynamic bandwidth allocation algorithm can dynamically change the polling order to compress the period length and improve the performance of delay. Moreover, the scheme can also improve the energy efficiency of passive optical networks considering both up-and down-link data transmission. The simulation results show that the scheme can greatly reduce energy consumption and service delay. The simulation results show that when the number of optical network units is 16 and the load of the upstream network is 0.3, the upstream delay of the PWC scheme is 1.18 ms and the energy-saving efficiency of the PWC scheme is 91.1%, while the upstream delay of the ECS scheme is 2.33 ms and the energy-saving efficiency of the ECS scheme is 89%. The scheme is superior to the existing ECS energy-saving scheme.

Key words dynamic bandwidth allocation; energy efficiency; low latency; passive optical network