

# 基于 40 G 相干无源光网络系统光线路终端的流量均衡策略实验

秦攀科 王立芊\* 马 骏 陈 雪 王 磊

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

**摘要** 云计算等分布式高带宽消耗业务对下一代无源光网络(NG-PON2)提出了大容量、长距离和广覆盖的发展要求。随着 NG-PON2 技术的发展,无源光网络(PON)系统的光线路终端(OLT)设备结构也日益呈现出复杂化和异构等特点。导致 PON 网络中出现了传统核心网中,由于链路和端口资源利用不均衡所带来的网络阻塞和带宽利用率低的问题。基于 40 G 相干 PON 实验系统研究了 OLT 设备流量均衡问题,提出了一种基于负载均衡的实时监测上报告警和周期性调整相结合的动态流量均衡策略。实验结果表明所设计的动态流量均衡策略可以有效地降低 PON 网络阻塞率和提高带宽利用率。

**关键词** 光通信; 无源光网络; 流量均衡; 服务质量保障

**中图分类号** TN915.63 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0405007

## Dynamic Traffic Balancing Strategy Experiment on Optical Line Terminal of 40 G Coherent Passive Optical Network

Qin Panke Wang Liqian Ma Jun Chen Xue Wang Lei

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** Driven by the emergence of cloud computing and high-bandwidth applications, the efforts of next generation passive optical network (NG-PON2) should be made on ultra-high capacity, long location and wide coverage. With the development of NG-PON2 technology, the structure of passive optical network (PON) system is also becoming more and more complex and heterogeneous. The traffic imbalance problem begins to appear in optical line terminal (OLT) of PON which is caused by the imbalanced utilization of link and port resources in conventional core networks. The downstream traffic balancing problem base on OLT of 40 G coherent PON system is proposed and discussed. In addition, a novel dynamic traffic balance strategy for the higher blocking probability and lower bandwidth utilization problems of 40 G coherent PON system is discussed. The experimental results show that the proposed dynamic traffic balance strategy can efficiently reduce the blocking probability and improve the bandwidth utilization.

**Key words** optical communications; passive optical network; traffic balancing; quality of service

**OCIS codes** 060.2330; 060.4251; 060.4256; 060.4510

## 1 引 言

下一代无源光网络(NG-PON2)技术的演进与发展,在促使无源光网络(PON)系统结构发生着显著变化的同时也促使光线路终端(OLT)设备开始承载更多的功能<sup>[1-3]</sup>。OLT内部由于流量拥塞而带来的丢包和时延增大的现象也越来越普遍<sup>[4]</sup>。近几年有关PON系统的研究主要集中于以下几个方面:1) NG-PON2技术的发展

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家 863 计划(2012AA011303)、信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)基金

作者简介: 秦攀科(1982—),男,博士研究生,主要从事光网络技术方面的研究。E-mail: qinpanke@bupt.edu.cn

导师简介: 陈 雪(1959—),女,教授,主要从事大容量光通信系统与网络和宽带接入的研究。E-mail: xuechen@bupt.edu.cn

\* 通信联系人。lqwangwang@bupt.edu.cn

促使着PON系统朝着大规模多线卡的方向发展,其结构呈现出复杂化和异构等特点<sup>[5]</sup>。多PON板级联及单PON板多PON口结构的普及,使得核心网设备中的链路、端口资源利用不均衡和网络突发流量等原因导致网络阻塞率变高和带宽利用率变低的问题也出现在PON网络的OLT设备中<sup>[6-9]</sup>。2) 具有波长可调谐和动态带宽分配能力是未来NG-PON2系统的一个重要的研究和方向。OLT可以根据光网络单元(ONU)的流量状态,动态地为其分配波长和带宽资源。PON网络下行的数据需要在OLT处进行分流并分配到不同的波长上,为了避免在OLT内部出现流量拥塞而导致网络的丢包率和阻塞率变高,需要在OLT内部进行流量均衡<sup>[9-11]</sup>。3) 为了顺应网络扁平化趋势,推动光接入与汇聚网络的融合,OLT在向着汇聚型设备方向发展。作为汇聚型设备,汇聚型OLT需要面临的主要问题之一就是下行在OLT内部端口间的流量均衡<sup>[12]</sup>。

流量均衡是通过一定的流量分配策略,避免网络瓶颈过早出现而导致链路或端口的负载过重,从而解决网络中由于资源利用率不平衡导致网络阻塞问题的一种方法<sup>[11]</sup>。传统的传送网流量均衡策略主要是通过负载均衡技术来实现,旨在克服传统路由方法把业务集中在单个链路或端口,通过某种负载分担策略把数据流量扩散到更多可用的链路或处理设备上,从而有效地将网络中闲置的资源利用起来<sup>[13-15]</sup>。

本文基于40 G相干PON实验系统研究了PON网络流量均衡问题。在介绍实验系统结构的基础上分析了PON网络产生流量不均衡问题主要的原因。提出了一种基于负载均衡的实时监测上报告警和周期性调整相结合的动态流量均衡策略。并通过多种不同的应用场景进行实验验证,结果表明,所设计的动态流量均衡策略可以有效地降低PON网络阻塞率和提高带宽利用率。

## 2 40 G相干PON实验系统介绍及流量均衡问题

40 G相干PON实验系统结构如图1所示。OLT网络侧有四个10 G以太网(10 GE)接口可实现网络侧最大40 G的接入带宽,光网络单元(ONU)的客户侧有两个10 GE的接口可实现最大20 G带宽的接入目标。实验系统支持最大传输距离为40 km,最大分支比为1:64。下行单波长线路速率为44.58 Gb/s,调制格式为偏振复用-差分正交相移键控(PM-DQPSK),接收端ONU采用相干接收。上行单波长线路速率为10.3125 Gb/s,调制格式为开-关键控(OOK),接收端OLT采用直接检测接收,传输模式是突发传输。使用10 G以太无源光网络(EPON)的多点控制协议(MPCP)完成动态带宽分配,使得所有的ONU共享上行10 G带宽。

系统下行数据处理流程为:核心网的数据通过OLT网络侧的4个10 GE接口接入40 G流量的数据。介质访问控制层(MAC)数据交换模块将网络侧4路10 G数据交换到客户侧的4个10 GE接口。40 G成/解帧芯片将4路10 G数据复用成1路40 G数据,通过40 G PM-DQPSK光调制模块将40 G数据调制到光上发送到各ONU处。ONU的40 G PM-DQPSK光调制模块接收数据并进行光解调之后将40 G数据发送到解帧交换和多点控制协议(DFS & MPCP)模块进行解帧处理并形成4路10 G数据,并根据MAC地址对数据进行过滤,从而形成最后发送给用户的10 G或1 G数据。上行数据处理流程为:ONU接收10 G或1 G的用户侧数据,进入DFS & MPCP模块对其进行成帧映射。然后通过光突发调制模块发送到OLT。OLT接收到数据以后通过多点控制协议和操作维护管理(MPCP & OAM)模块对其进行解帧处理。解帧后的10 G数据通过交换模块的路

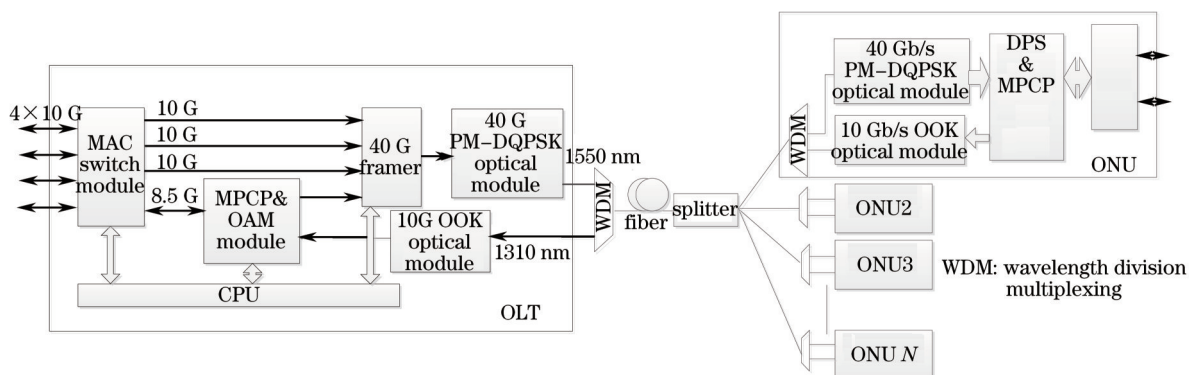


图1 40 G相干PON实验系统结构图

Fig.1 System architecture of 40 G coherent PON

由功能分配到4个10 GE网络侧接口。

在40 G相干PON系统下行数据处理过程中,为了将网络侧的数据成功转发到下行用户,避免发生流量拥塞,需要在OLT的交换模块将网络侧的4路数据均分到客户侧的4个端口。实现方法是将客户侧用户的MAC地址按照一定的策略配置到交换模块的下行端口,这样就使得从网络侧过来的该用户的数据被交换到下行的特定端口上。然而由于传统的静态流量均衡策略(例如:基于MAC地址平均分配和基于保证带宽之和平均分配)无法感知网络流量及端口的负载状态而导致流量不均衡问题的出现。如图2所示,MPCP & OAM功能模块从ONU处学习到在线用户的MAC地址,并按照一定的流量均衡策略将用户的MAC地址分配到交换模块的端口5~8。网络侧的4路10 G数据分别通过交换模块的4个网络侧端口1~4进入交换模块。交换模块按照数据包的目的MAC地址,即用户的MAC地址,交换到端口5~8上。由于网络的动态性及用户流量的实时变化,静态的流量均衡策略下虽然端口5~8分配的MAC地址数量是相同的,但是,由于不同用户MAC地址对应的网络流量差别很大,就会出现交换到端口5~7的流量为12 G,而交换到端口8的流量为4 G。此时就会导致端口5~7出现业务阻塞和数据丢包的情况。

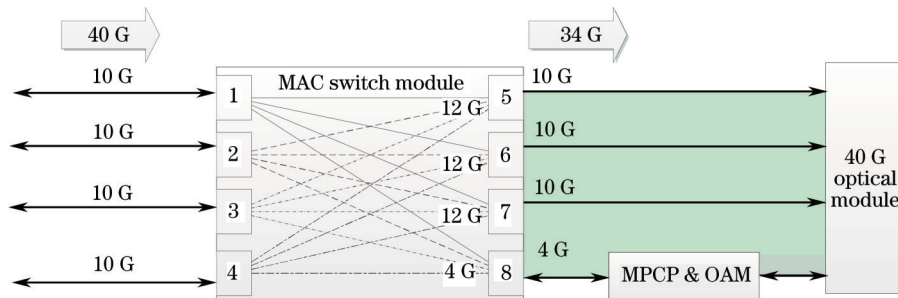


图2 流量均衡问题描述

Fig.2 Traffic balancing problem statement

综上所述,40 G相干PON实验系统产生流量不均衡的具体原因主要有:1) MPCP & OAM功能模块的限制,交换模块端口8的最高速率只能达到8.5 G。静态流量均衡策略适应性差,无法根据实际不同实验系统的端口带宽容量做动态调整。2)用户的网络带宽占用是未知且动态变化的,静态流量均衡策略有可能导致在交换芯片内部出现发往某一端口的数据速率超过其吞吐量,而发往其他端口的数据速率还没有达到其吞吐量的现象。此时就会导致PON网络阻塞率增高和带宽利用率降低。

### 3 基于负载均衡的动态流量均衡策略

图3为基于负载均衡的动态流量均衡策略,一方面,通过交换模块统计各个端口的下行流量,并周期性地将对下行各个端口的流量状态上报到主控制模块。主控制模块周期性地对端口的流量状态进行预判并调

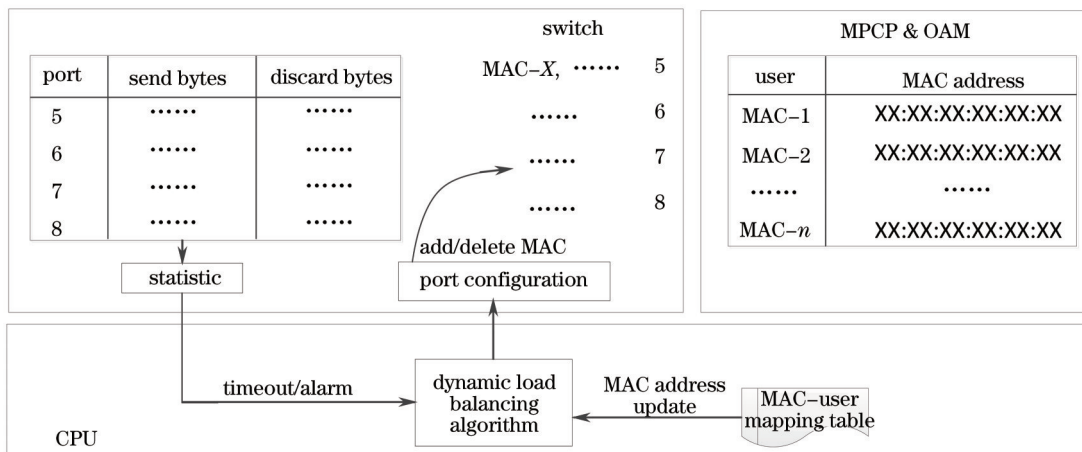


图3 基于负载均衡的动态流量均衡策略

Fig.3 Load balancing based dynamic traffic strategy

用动态流量均衡算法均衡各个端口之间的流量负载。另一方面,交换模块实时监测下行各个端口的流量状态。若端口流量接近其容量阈值则上报告警信息到主控模块。主控制模块实时地根据各个下行端口的流量状态调用动态流量均衡算法实现下行端口流量的负载均衡,从而达到动态流量均衡的目的。

此动态流量均衡策略具体步骤如下所示:

1) 系统初始运行,主控制模块从 MPCP & OAM 功能模块读取用户 MAC 地址,并根据用户的保证带宽使用基于保证带宽之和均分的策略进行初始化阶段的静态流量均衡。当有新用户上线或老用户下线时,也按照该策略进行交换模块下行各个端口 MAC 地址的更新或老化。同时,主控 CPU 开启告警响应事件(实时响应策略)并启动轮训定时器(周期性调整策略)。

2) 判断定时器到时转向步骤3),或交换模块上报流量预测告警时转向步骤4)。

3) 经过轮询时间  $T$ ,主控 CPU 启动动态流量均衡算法,读取每个端口统计的发送和丢弃字节数。逐个判断各个下行端口流量是否接近其最大带宽,或负载最大和最小端口之间的流量差是否超过阈值,或检测端口是否出现丢包。若出现以上三种情况任何一种则转向步骤4),否则转向步骤5)。

4) 根据获取的发送字节数  $Y_{trans}$ 、丢弃字节数  $Y_{discarded}$ 、MAC 层交换模块单个端口总带宽量  $P_{port}$  和轮训时间  $T$ 。计算可得每个端口在周期  $T$  内平均带宽占用量  $W_{trans} = (Y_{trans} + Y_{discarded})/T$ ,溢出的带宽占用量  $W_{exceed} = Y_{discarded}/T$ ,剩余带宽  $W_{remain} = P_{port} - Y_{trans}/T$ 。使用贪婪算法每次迭代都选择将带宽占用量大的端口上用户的 MAC 地址转移到带宽占用量最小的端口上。但是,需要保证一个基本原则是所转移的用户的最大带宽之和不能超过目标端口的剩余带宽总数。迭代执行上述算法过程直至最大带宽占用量与最小带宽占用量端口的差值小于设定的阈值。

5) 将统计寄存器和计时器置0并转向步骤2)。

#### 4 实验测试系统及结果分析

40 G 相干 PON 实验测试系统如图4所示,网络分析仪 1230B 模拟产生两路 10 G 以太网数据,并通过 OLT 的两个网络侧接口接入 PON 网络。如图2所示,实验选择交换模块的端口 1 和 2 作为网络侧数据输入端口,分别与网络分析仪 1230B 的两个输出端口相连。网络侧的数据通过端口 1 和 2 进入交换模块,经过交换模块的流量均衡和数据交换后通过端口 5 和 6 输出到客户侧。此时,通过在交换模块上执行不同的流量均衡算法,等效验证 4 个输入端口和 4 个输出端口的情况下不同的流量均衡算法的性能。

OLT 设备通过分路器和 40 km 光纤连接 3 个 ONU 设备。ONU 设备下连接 8 个小型企业用户和 256 个普通居民用户。所有用户及其需求全部通过 ONU 设备模拟产生。实验假设小型企业用户保证带宽为 500 M,最大带宽为 1 G,普通居民用户保证带宽为 40 M,最大带宽为 60 M。

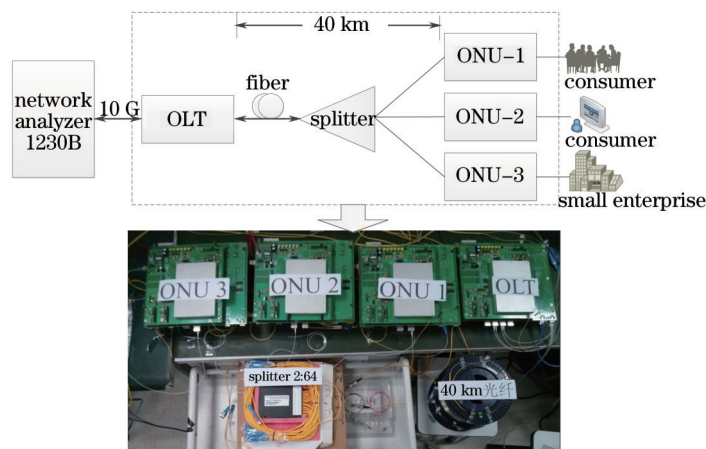


图4 实验测试系统

Fig.4 Experimental testing system

为了验证动态均衡算法周期性地预判断和调整各个端口流量的功能,实验对比随网络负载的增加,基于 MAC 地址数平均分配、基于保证带宽之和平均分配和动态流量均衡三种不同的流量均衡策略对 PON 网

络性能的影响。为了使实验与实际的网络情况更加接近,实验使用网络分析仪 1230B 随机产生的突发数据流量模拟实际网络的流量状态。实验初始条件为 8 个小型企业用户带宽占用量都达到最大带宽 1 G,普通居民用户带宽占用量为区间值 $[0, 0.06]$  G。三种不同的流量均衡策略在交换模块下行端口 MAC 地址初始分配如表 1 所示。

表 1 初始条件下交换模块 MAC 地址分配情况

Table 1 Default MAC assignment in switch module

Traffic balancing strategy	Port 5	Port 6
MAC address number average distribution	$8 \times 1 \text{ G} + 124 \times [0, 0.06] \text{ G}$	$132 \times [0, 0.06] \text{ G}$
Guaranteed bandwidth average distribution	$8 \times 1 \text{ G} + 50 \times [0, 0.06] \text{ G}$	$206 \times [0, 0.06] \text{ G}$
Dynamic traffic strategy	$8 \times 1 \text{ G} + 50 \times [0, 0.06] \text{ G}$	$206 \times [0, 0.06] \text{ G}$

如图 5 所示,随着 PON 网络负载的增加,两种静态均衡策略随着网络负载的增加及网络的突发流量到来,使得网络的阻塞率增长较大。而动态流量均衡策略网络阻塞率性能受网络负载变化和网络突发流量的影响较小。这是由于动态流量均衡策略由于采用周期性的预判并实时调整各个端口之间的流量负载,因此系统阻塞率和网络丢包率较低。同理,如图 5(b)所示,同样的网络环境下,动态流量均衡策略使得网络的带宽利用率更高。

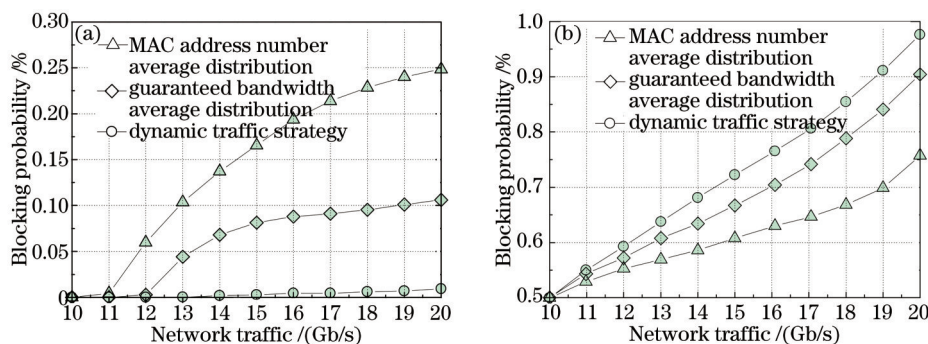


图 5 三种不同的流量均衡策略对 PON 网络性能的影响。(a) 对网络阻塞率的影响; (b) 对带宽利用率的影响

Fig.5 Effects of three kinds of different traffic strategies on PON performance. (a) Blocking ratio; (b) bandwidth utilization

为了验证动态均衡算法实时监测上报告警对 PON 网络性能的影响,实验在一定的网络负载情况下使用网络分析仪 1230B 随机产生的突发数据流量,模拟实际网络中的突发流量产生的场景。交换模块下行端口 MAC 地址初始分配如表 2 所示。实验初始条件为 8 个小型企业用户带宽量都达到最大带宽 1 G,240 个普通居民用户带宽占用量均为 50 M,其他居民带宽占用量为 0 M。实验观察其中一次突发流量到来时动态流量均衡算法对网络性能的影响。

表 2 初始条件下交换模块 MAC 地址分配情况

Table 2 Default MAC assignment in switch module

Traffic balancing strategy	Port 5	Port 6
Dynamic traffic strategy	$8 \times 1 \text{ G} + 160 \times 0.05 \text{ G}$	$80 \times 0.05 \text{ G}$

当网络出现突发流量时,某些端口瞬时会出现阻塞情况,此时交换模块会主动上报告警信息并实时地通过动态业务均衡算法调整各个端口间分配的流量。随着动态业务均衡算法的迭代执行网络阻塞率和带宽利用率如图 6 所示。由图 6(a)可知,算法递归执行首次均衡效果最明显业务阻塞率降低达到 18.85%,这是由于采用贪婪算法每次递归执行都选择将阻塞端口带宽占用量最大的多个用户均衡到带宽剩余量最多的端口,因此首次均衡效果最明显。同理,由图 6(b)可知,算法递归执行首次均衡效果最明显带宽利用率达到 88.50%。由此可见,动态流量均衡算法可以有效地应对网络突发流量所带来的问题,降低网络阻塞率和丢包率,提高网络带宽利用率。

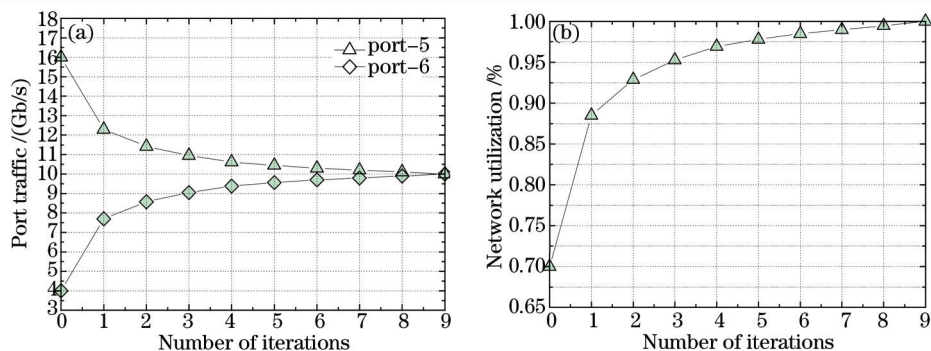


图6 算法迭代次数对PON网络性能影响。(a) 迭代次数与网络阻塞率关系; (b) 迭代次数与带宽利用率关系

Fig.6 Relationship between algorithm iterations and PON performance. (a) Relationship between algorithm iterations and PON blocking probability; (b) relationship between algorithm iterations and bandwidth utilization ratio

## 5 结 论

基于40 G相干PON实验系统研究了OLT设备的流量均衡问题。在40 G相干PON实验系统结构基础上分析了PON网络OLT设备可能会出现流量不均衡导致业务阻塞和带宽利用率低的原因。提出了一种基于负载均衡的实时监测上报告警和周期性调整相结合的动态流量均衡策略。一方面,交换模块周期性地统计各个端口的下行流量并上报到主控制模块,主控制模块对各端口的流量状态进行预判并调用动态流量均衡算法调整各个端口之间的流量负载。另一方面,交换模块实时监测下行各个端口的流量状态,若端口流量接近其容量阈值时上报告警信息到主控模块。主控制模块根据各个下行端口的流量状态调用动态流量均衡算法进行下行端口流量的负载均衡。实验结果表明所设计的动态流量均衡策略可以有效地降低PON网络阻塞率和提高带宽利用率。

## 参 考 文 献

- 1 Chen X, Zhang Z, Hu X. The evolution trends of PON and key techniques for NG-PON[C]. Information, Communications and Signal Processing (ICICS), 2013: 1-6.
- 2 Kramer G, Pesavento G. Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network[J]. Communications Magazine, IEEE, 2002, 40(2): 66-73.
- 3 Banerjee A, Park Y, Clarke F, *et al.*. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: A review[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(11): 737-758.
- 4 Zhou L, Wong N H L, Yeo Y K, *et al.*. Traffic scheduling in hybrid WDM-TDM PON with wavelength-reuse ONU[S]. Photonic Network Communications, 2012, 24(2): 151-159.
- 5 Duser M. A review of past, present and future optical networks optics is driving structural change[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference IEEE, 2011: 1-49.
- 6 Grobe K. Next-generation access/backhaul based on ITU G. 989, NG-PON2[C]. Photonic Networks, 15. ITG Symposium, 2014. 1-6.
- 7 Ragheb A M, Fathallah H. Performance analysis of next generation-PON (NG-PON) architectures[C]. High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2011: 339-345.
- 8 Luo Y, Zhou X, Effenberger F, *et al.*. Time-and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2)[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(4): 587-593.
- 9 Kaneko S, Yoshida T, Furusawa S, *et al.*. First  $\lambda$ -tunable dynamic load-balancing operation enhanced by 3-msec bidirectional hitless tuning on symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2014: Th5A. 4.
- 10 Yoshida T, Kaneko S, Kimura S, *et al.*. An automatic load-balancing DWBA algorithm considering long-time tuning devices for  $\lambda$ -tunable WDM/TDM-PON[C]. Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition on. IET, 2013: 1-3.
- 11 Chow C W, Yeh C H. Technology advances for the 2nd stage next-generation passive-optical-network (NG-PON2)[C]. Advanced Infocomm Technology (ICAIT), 2013 6th International Conference on. IEEE, 2013: 83-84.
- 12 Nakamura H, Taguchi K, Tamaki S, *et al.*. 40 Gbit/s-class- $\lambda$ -tunable WDM/TDM-PON using  $\lambda$ -selectable B-Tx and  $4 \times M$  cyclic AWG router for flexible photonic aggregation networks[J]. Opt Express, 2013, 21(1): 463-468.

- 13 Li Ruixin, Zhao Shanghong, Liu Zhenxia, *et al.*. An on-board optical switching data channel scheduling algorithm based on burst stream[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105004.  
李瑞欣, 赵尚弘, 刘振霞, 等. 基于突发流的星载光交换数据信道调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1105004.
- 14 Yang Xiaolong, Dang Mingrui, Mao Youju, *et al.*. A new burst assembly technique for supporting QoS in optical burst switching networks[J]. Chin Opt Lett, 2003, 1(5): 266-268.
- 15 Mei Junyao, He Zhou, Wang Chuanbiao, *et al.*. Influence of dynamic IP traffic on the combined nonlinear effects in IP over WDM networks[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1777-1783.  
梅君瑶, 何舟, 王传彪, 等. IP over WDM网络中动态IP流量对非线性效应的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1777-1783.

栏目编辑: 王晓琰