

## 自适应门限的 EPON 动态带宽分配实现\*

汪学舜<sup>1,2+</sup>, 余少华<sup>2</sup>, 罗婷<sup>1</sup>, 戴锦友<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(华中科技大学 计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430074)

<sup>2</sup>(武汉邮电科学研究院, 湖北 武汉 430074)

### Dynamic Bandwidth Allocation with Adaptive Threshold in EPON

WANG Xue-Shun<sup>1,2+</sup>, YU Shao-Hua<sup>2</sup>, LUO Ting<sup>1</sup>, DAI Jin-You<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

<sup>2</sup>(Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074, China)

+ Corresponding author: E-mail: wang\_xueshun@163.com

Wang XS, Yu SH, Luo T, Dai JY. Dynamic bandwidth allocation with adaptive threshold in EPON. *Journal of Software*, 2012, 23(3): 724-734. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4038.htm>

**Abstract:** The Ethernet passive optical networks (EPON) are high-speed solutions to the bottleneck problem of the broadband access network. To provide efficient and fair utilization of the EPON upstream bandwidth and support QoS requirements of different traffic classes, a dynamic bandwidth allocation algorithm based on gate threshold is proposed. The algorithm decides the data-receiving rate of the ONU (optical network unit), according to the ONU data-sending response rate and the gate threshold. It then, implements three methods to adapt and adjust the gate threshold, and analyzes these methods' characteristic. Simulation experiments show the algorithm can decrease average packet delay and increase network throughput.

**Key words:** Ethernet passive optical network (EPON); dynamic bandwidth allocation (DBA); optical network unit (ONU); optical line terminal (OLT); threshold

**摘要:** EPON(Ethernet passive optical network)是解决宽带接入中瓶颈问题的关键技术.为了实现 EPON 中共享上行带宽的公平和有效分配,以及不同分类业务的 QoS 保证,提出了基于门限的动态带宽分配算法.该算法根据 ONU(optical network unit)的带宽请求和门限值授权分配带宽,实现了 3 种基于反馈控制理论的自适应调整门限方法并分析了其优缺点.模拟实验结果表明,与其他算法相比,该算法能够减少平均包时延,提高网络吞吐量.

**关键词:** 以太无源光网络;动态带宽分配;光网络单元;光线路终端;门限

中图分类号: TP393 文献标识码: A

近 10 年来,Internet 互联网和计算机技术的最大发展在支持在线游戏、视频会议、远程教育以及网络电话等方面.最新的研究表明,为了满足这些业务的需求,改进无源光网络(PON)系统的带宽利用率可大幅度提高带宽.PON 系统采用时分多路技术(称为 TDM-PON)或者波分多路技术(称为 WDM-PON),使上行带宽利用率最大化.在这两种技术中,由于 TDM-PON 的可靠性更高、维护成本更低而得到了更广泛的应用.研究者提出了各种

\* 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2005AA121410)

收稿时间: 2010-07-18; 定稿时间: 2011-04-14

各样的 TDM-PON 机制,包括异步传输无源光网络(ATM-PON)<sup>[1]</sup>、宽带无源光网络(BPON)<sup>[2]</sup>、吉比特无源光网络(GPON)<sup>[3]</sup>和以太无源光网络(EPON)<sup>[4]</sup>。

一个典型的 EPON 系统包括 1 个光线路终端 OLT(optical line terminal)和多个光网络单元 ONU(optical network unit),OLT 和 ONU 通过光纤分路器相连。在下行传输时,光纤分路器将 OLT 的数据广播发送到所有 ONU,每一个 ONU 只接收数据帧头信息中目的地址为自己的数据。在上行传输时,所有 ONU 采用时分多路(TDM)机制,共享使用上行链路带宽。上行使用时分技术可以最大限度地利用上行带宽,在 ONU 传输之间需要插入适当的时间间隔,以免发生碰撞。

由于不同 ONU 传输数据的多少并不相等,所以采用固定带宽分配机制效率较低<sup>[5]</sup>。在 IEEE 的 802.3ah 标准中,可以通过多点控制协议(MPCP)实现动态带宽分配(DBA)机制<sup>[6]</sup>。通过 MPCP 协议,OLT 能够根据每一个 ONU 带宽请求的大小,动态分配合适的传送上行数据的时间窗口。另外,MPCP 协议还能够测量 OLT 与 ONU 之间的往返时间,并支持自动发现。

为了保证上行带宽得到有效利用,尤其是对下一代上下行带宽为 10G 的 EPON 系统,必须采取有效的带宽分配策略。迄今为止,最有名的上行带宽分配方法是 Kramer 和 Mukherjee 提出的交替轮循自适应循环周期算法(IPACT)<sup>[7]</sup>,该算法是一种在 OLT 进行轮循的动态带宽分配方法。

本文提出了一个基于自适应门限的 EPON 动态带宽分配机制,该算法根据 ONU 的带宽请求和门限值,授权分配带宽。如果 OLT 收到 ONU 的带宽请求小于门限值,OLT 立即分配该 ONU 请求的带宽;如果 ONU 请求带宽超过门限值,则仅分配门限值对应的带宽给该 ONU。这样,系统负载较低时,轮循周期会相应减短,改进系统的时延性能;系统负载较高时,轮循周期会相应加长,ONU 之间的保证时隙得以减少,提高了系统的利用率。本文重点对 OLT 接收 ONU 带宽请求门限值的调整进行了研究,门限值下限依据 OLT 与 ONU 之间授权消息的往返时间来确定,门限值上限依据业务的 QoS 参数来确定,以保证在系统负载较高时仍能满足业务的 QoS 需求。在调整门限的过程中,根据反馈控制理论,本文实现了 3 种门限的自适应调整方法:折半查询、比例控制和减少震荡的比例控制,每一个调整算法都是通过探寻来确定合适的轮循周期。3 种门限值调整算法的区别在于调整门限值的大小略有不同。通过分析表明,3 种算法都具有较好的快速收敛性和自适应性,比例控制算法和减少震荡的比例控制算法同时具有稳定性。对于上下行带宽为 10G 的 EPON 系统,通过一系列的模拟实验,验证了加速转发流(EF)、确保转发流(AF)和尽力而为转发流(BE)的包时延和网络吞吐量性能。实验表明,该算法对 10G EPON 系统具有有效性。

本文第 1 节论述相关的研究,第 2 节论述基于门限动态带宽分配的不同实现机制,第 3 节对提出的算法性能进行了分析,第 4 节论述仿真结果并进行讨论,最后一节为结论。

## 1 相关研究

在 EPON 系统中,OLT 一般位于中心局,对所有 ONU 的上行带宽请求和分配进行管理。在带宽分配过程中,需要考虑的一个重要问题是如何为每一个 ONU 进行动态带宽分配<sup>[7]</sup>。

在 EPON 动态带宽分配机制中,有 3 种典型的机制:静态轮循、立即授权和交替轮循<sup>[8]</sup>。静态轮循机制中:OLT 首先向 ONU 发送消息,查询 ONU 带宽需求;然后,ONU 发送带宽需求,OLT 在收到 ONU 带宽请求之后进行带宽分配。静态轮循机制网络吞吐量较低,当带宽分配给 ONU 之后,信道空闲时间等于每一个 ONU 的往返时间。立即授权机制中,OLT 从一个 ONU 收到带宽请求消息之后,发送授权消息给 ONU。OLT 在接收 ONU 的上行数据和带宽请求消息时,可向其他的 ONU 发送消息。这种机制可以保证连续的上行数据传输,增加信道利用率。立即授权机制的主要缺点在于 OLT 不能对每一个 ONU 智能地分配带宽。为了解决立即授权的缺陷,交替轮循提出在每一个周期内,所有 ONU 都需要发送消息进行带宽请求,OLT 在收到所有 ONU 的带宽请求信息之后,对每一个 ONU 授权分配的带宽。交替轮循导致每一个周期内信道空闲时间等于计算时间加上往返时间。

为了解决交替轮循的信道空闲导致的低效率,很多学者进行了研究,如效用动态带宽分配机制<sup>[9]</sup>、改进的 DBA(EBDBA)<sup>[10]</sup>等。他们都使用合适的 DBA 机制,对终端用户,通过轮循调度实现爆发式传输。当一个 ONU 请

求带宽小于最小保证带宽时,OLT 无需进行 DBA 计算,立即授权请求带宽.这种方法可以减少信道空闲时间.但如果所有 ONU 终端用户都是重载或处于突发模式,该方法就不能实现实时的带宽分配,此时的 EBDBA 与 IPACT 也没有差别.另外,EBDBA 和文献[10]的算法进行带宽分配时,改变了 ONU 顺序,可能会导致大的时延抖动和网络业务的不稳定.

文献[11]中,Sue 等人通过调整 EPON 中使用的带宽请求消息和授权消息在传输窗口的位置,使传输时延最小化.OLT 使用启发式算法估计 ONU 的负载,并确定报告消息的位置,使得网络中平均传输时延最小.该方法对非均匀 ONU 负载分布的性能改进特别明显.但该算法通过启发式算法进行估算,计算时间复杂.

针对 10G EPON 中 TCP 传输,文献[12]中,Ikeda 等人提出了一种自适应轮循周期动态带宽分配(DBA-APC),该算法使 10G EPON 中 TCP 吞吐量最大化.DB A-APC 主要针对当前 DBA 算法中 TCP 流的上下行效率较低,基于带宽利用率和 TCP 的往返时间 RTT,对轮循周期进行自动调整.

文献[13]使用调度理论的方法,研究了多波长光接入网传输授权机制,将动态带宽调度问题的模型转化为一个开放式车间调度方法,对调度和波长分配进行形式化,并将其统一为一个线性规划问题,引入启发式的禁忌搜索算法来解决这个问题,同时也可改善波长分配和减少调度时间.但该算法只能在某些特定场景下产生最优解,一般情况下不能产生最优解,因此该类算法也不能应用到单波长 EPON 系统中.

## 2 基于门限动态带宽分配

本文提出的机制是在文献[10]EBDBA 的基础上改进而来的,主要针对单波长 EPON 系统中动态带宽分配,该算法称为自适应的动态带宽早期分配(ADBEA).ADBEA 在收到 ONU 的报告消息(请求带宽)之后,立即给该 ONU 进行授权带宽,而不是等待所有 ONU 的报告消息之后进行 DBA 计算并分配带宽.ADBEA 的操作如图 1 所示:如果一个 ONU 请求带宽小于门限值,OLT 立即授权请求带宽;如果 ONU 请求带宽大于门限值,则 OLT 立即授权门限值的带宽.比请求带宽少的部分,需要下一周期重新申请.考虑到 ONU 发送请求时有新的数据到达,以及网络数据流的自相似性,授权带宽按照请求带宽进行比较和分配.此外,这种方法避免了因改变 ONU 顺序而可能导致的大时延抖动和网络业务的不稳定.

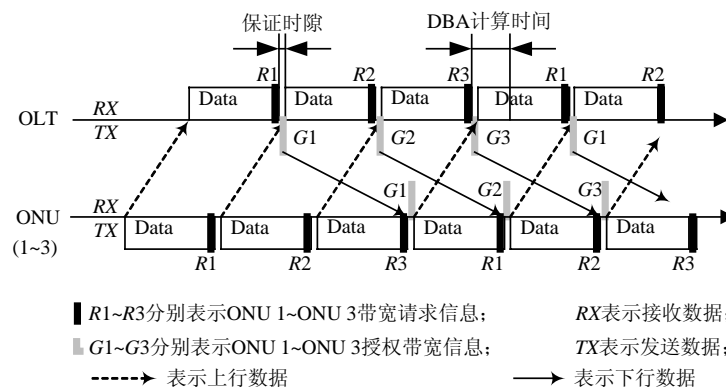


Fig.1 ADBEA schedule

图 1 ADBEA 调度机制

为了提高网络利用率,ADBEA 算法的门限值能够根据轮循周期的长短进行自适应动态变化.当网络负载较重时,门限值会适当提高.在一个轮循周期内,每一个 ONU 可接收更多数据,轮循周期会相应加长,单位时间内 ONU 之间的保证间隙个数减少,带宽利用率因此得以提高;而当网络负载较轻时,自适应降低门限值,轮循周期也相应减短,数据传输的时延性能因此得以改进.

假设一个 EPON 系统中, $N$  个 ONU 与一个 OLT 相连. EPON 系统上行带宽为  $C$ bps,授权周期为  $T_{cycle}$ .在该周

期内,所有活跃的 ONU 都能向 OLT 发送数据和报告消息.对于授权周期,有两个限制点: $T_{\min}$  和  $T_{\max}$ ,其中, $T_{\min}$  大于授权消息往返时间, $T_{\max}$  小于 QoS 参数保证的上限.如果授权周期  $T_{\text{cycle}}$  大于  $T_{\max}$ ,则降低单个周期内 OLT 接收 ONU 数据的门限,使其授权周期  $T_{\text{cycle}}$  下降;如果授权周期  $T_{\text{cycle}}$  小于  $T_{\min}$ ,需要增加单个周期内 OLT 接收 ONU 数据的门限,直至该轮循环周期达到  $T_{\max}$ .因此,ADBEA 在任何时候都能有效地保证授权周期在  $[T_{\min}, T_{\max}]$  之间.

对于  $N$  个活跃的 ONU 系统,轮循环周期由 3 部分组成,即所有 ONU 数据包传输的时间、 $N$  个 ONU 报告消息的传输时间和  $N$  个连续 ONU 传输之间的保证时隙.轮循环周期计算如下:

$$T_{\text{cycle}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N P_i\right) + N \cdot P_{PD}}{C} + N \cdot T_{\text{guard}} \quad (1)$$

其中, $P_{PD}$  为 MPCP 报告消息大小, $P_i$  为第  $i$  个 ONU 发送的数据长度, $T_{\text{guard}}$  为 ONU 传输之间保证时隙, $N$  为 ONU 的个数.

OLT 在进行带宽分配时,进行授权的是允许传输的字节数.授权门限值  $P$  是单个周期内允许传输的最大字节数.根据反馈控制理论的原理,门限值调整算法的主要目标如下:

- (1) 高效率:门限的调整,使 EPON 系统的网络性能得到提高;
- (2) 自适应性:使用尽可能少的参数配置;
- (3) 快速收敛性:尽可能快地收敛到静态或动态负载的操作点;
- (4) 稳定性:无论 ONU 发送速率如何分布,算法都能够收敛,并且对网络参数的未知信息具有健壮性.

在调整门限的动态带宽分配算法中,如果轮循环周期下降到给定的区域  $[T_{\min}, T_{\max}]$ ,不进行门限调整,设  $T_0$  是期望的操作点,默认情况下,假定  $T_0$  是  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  的中间值,每一个调整算法都是通过探寻来确定合适的  $T$ .根据负反馈原理,当授权门限值增加时,轮循环周期不会减少.我们提出 3 种门限值的调整算法,所有算法的区别在于调整门限值的大小略有不同.当然,这种计算会影响到稳定性,如门限值是否收敛到  $[T_{\min}, T_{\max}]$  之间的点和收敛速度.归纳我们的算法如下:

- (1) 折半查询算法(ADBEA-BT):该简单算法只能满足静态门限值调整算法的前 3 个目标;
- (2) 比例控制算法(ADBEA-PC):该算法满足门限值调整算法的所有目标;
- (3) 减少振荡的比例控制算法(ADBEA-FRP):该算法改进了比例控制算法,并考虑了稳定性和可追踪性.

## 2.1 折半查询算法 ADBEA-BT

对  $N$  个活跃的 ONU,OLT 一个周期内接收 ONU 数据的门限值  $P_H$  范围为  $[P_{LB}, P_{HB}]$ , $P_{LB}$  和  $P_{HB}$  的计算如下:

$$P_{LB} = \left(T_{\min} - N \cdot T_{\text{guard}} - N \cdot \frac{P_{PD}}{C}\right) \cdot \frac{C}{N} \quad (2)$$

$$P_{HB} = \left(T_{\max} - N \cdot T_{\text{guard}} - N \cdot \frac{P_{PD}}{C}\right) \cdot C \quad (3)$$

以上范围对应两种极端情况: $P_{LB}$  对应  $N$  个 ONU 均为高负荷且轮循环周期长度处于下限的情况; $P_{HB}$  对应只有一个活跃的 ONU 为高负荷且轮循环周期长度处于上限,其他 ONU 没有数据发送的情况.

折半查询门限值调整为:每次查询减少一半查询范围.该算法依据轮循环周期确定调整方向,轮循环周期  $T_{\text{cycle}}$  大于  $T_{\max}$  时,下一周期的门限值  $P'_H$  为当前周期的门限值  $P_H$  与  $P_{LB}$  之和的一半,即

$$P'_H = (P_H + P_{LB}) / 2 \quad (4)$$

其中, $P'_H$  为调整后门限, $P_H$  为调整前门限.

轮循环周期  $T_{\text{cycle}}$  小于  $T_{\min}$  时,下一周期的门限值为当前周期的门限值与  $P_{HB}$  之和的一半,即

$$P'_H = (P_H + P_{HB}) / 2 \quad (5)$$

轮循环周期在  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  之间时,门限值则不需要进行调整.

折半查询不需要配置步进,增加和减少规则是对称的.实验结果表明:折半查询对静态负载收敛较快,但因其稳定性较差而不适合动态变化.

## 2.2 比例控制算法ADBEA-PC

折半查询直接调整OLT一个周期内接收ONU数据的门限值,并没有考虑轮循周期超出目标的范围.下面提出一种考虑轮循周期超出目标值大小的新算法.当一个ONU请求传输数据超过门限值时,称为重载ONU.如果重载ONU数量为 $n$ ,则门限值的调整按式(6)计算:

$$\Delta P = \frac{(T_{cycle} - T) \cdot C}{n} \quad (6)$$

其中, $T$ 为 $[T_{min}, T_{max}]$ 之间的一个目标轮循周期,在重载时,该值取为 $T_{max}$ ;轻载时,取为 $T_{min}$ .

由于ONU请求传输数据是动态变化的,不可能确切知道重载ONU的数量,而且带宽请求门限是可调整的,这也导致重载ONU数量的变化.但是通过检测过去的轮循周期和门限值,能够估计 $n$ 的值.这种思想要求记录最后的门限值 $P$ 和最后的轮循周期 $T_{last}$ .估计 $n$ 计算如下:

$$n = (T - T_{last}) / (P - P_{last}) \quad (7)$$

图2是估计 $n$ 计算的伪代码.由于ONU请求传输数据的快速变化,为了减少估计偏差,进行指数平均.使用这个估计方法,根据公式(6)对门限值进行合理的变化.这是比例控制算法ADBEA-PC的本质.比例控制算法的实现伪代码与下一节减少振荡的比例控制算法ADBEA-FRP类似,参见第2.3节的实现.

```
//Pseudocode for the algorithm to estimate the number of high offered load ONU:
Phi=0.25;
n_max=ONU number;
n=min(n_max,((1-Phi)*n_last+Phi*(T-T_last)/(P-P_last)));
n_max=n;
T_last=T;
P_last=P;
return n;
```

Fig.2 Pseudocode to estimate the number of high offered load ONU

图2 门限调整重载ONU数量估计方法

为了保持系统稳定性,当需要进行调整时,期望调整的门限和轮循周期只是进行小幅度的变化,因此实际的调整值如下:

$$\Delta P_{PC} = -K_p \cdot \Delta P \quad (8)$$

其中, $\Delta P_{PC}$ 为比例控制算法的实际调整值, $K_p$ 为门限实际调整值与需要调整值的比例.

在比例控制算法中,需要选择目标轮循周期 $T$ ,这个值应该在 $[T_{min}, T_{max}]$ 之间.本算法的实现方法是:当系统重载时,即 $T_{cycle} > T_{max}$ 时, $T$ 取为 $T_{max}$ ;当系统轻载时,即 $T_{cycle} < T_{min}$ 时, $T$ 取为 $T_{min}$ .

实验结果表明,比例算法对静态转发的收敛是单调的且相对速度较快,而收敛速度依赖于 $K_p$ 的值.

## 2.3 减少振荡的比例控制算法ADBEA-FRP

在比例控制算法中,如果采用较高的比例值 $K_p$ ,可以更快地适应ONU负载的变化,但这种强大的控制可能导致门限值的剧烈波动,从而导致收敛时间的延长.另一方面,较小的比例值 $K_p$ 可能使调整时间过长,导致平均包时延不能满足QoS要求.减少振荡的比例控制算法的目的是减少波动并能快速收敛,所以引入控制变化的参数 $K_d$ 减轻振荡.对于给定的设计代价函数, $K_p$ 和 $K_d$ 可为确定的值,因此, $K_p$ 和 $K_d$ 的引入不会带来额外的参数配置.此外,ADBEA-FRP中需要记录前一次门限值 $P_{last}$ .ADBEA-FRP的调整门限计算公式为

$$\Delta P_{FRP} = -K_p \cdot \Delta P - K_d \cdot (P_H - P_{last}) / n \quad (9)$$

其中, $\Delta P_{FRP}$ 为减少振荡的比例控制算法的实际调整值, $\Delta P$ 按公式(6)计算, $n$ 按照公式(7)计算, $P_H$ 为当前轮循周期的门限值.公式(9)中的第1项为差值的调整,第2项为跟踪反馈的变化.第1项对算法的快速性有较大的影响,较小的 $K_p$ 会导致较慢的收敛速度,较大的 $K_p$ 导致较大的偏移,甚至是系统的不稳定.第2项比第1项更容易响应变化,并且对轮循周期有减震作用. $K_d$ 越大,减震作用越大,系统就会更加稳定.

下一周期的门限值计算公式如下:

$$P'_H = P_H + \Delta P_{FRP} \quad (10)$$

ADBEA-FRP 算法实现的伪代码如图 3 所示.

```
//Pseudocode for ADBEA-FRP algorithm:
P=0; n=0;
For (i; NUM of ONUs; i++) do
  If (request bandwidth>PH)
    Gate bandwidth is PH;
  else
    Gate bandwidth is request bandwidth;
  end if
end for
Calculate Tcycle according to Eq.(1);
if ((Tcycle>Tmax) or (Tcycle<Tmin))
  T=Tmax; or T=Tmin;
Calculate new PH according to Eq.(6), Eq.(7), Eq.(9), Eq.(10);
Plast=PH; PH=new PH
end if
```

Fig.3 Pseudocode for ADBEA-FRP algorithm

图 3 算法 ADBEA-FRP 的伪代码

### 3 算法性能分析

#### 3.1 稳定性分析

本节首先使用控制理论中的流体模型分析 ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 的稳定性.

对于算法 ADBEA-FRP,OLT 接收数据的门限值按照公式(10)进行调整的主要部分为第 1 项差值的调整;第 2 项主要用于减震,对稳定性作用较小.因此,ADBEA-FRP 算法公式(9)中取  $K_d=0$ ,算法 ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 可采用相同的分析.

引入流体模型来管理分析的系统,用  $y(t)$  表示 OLT 接收 ONU 数据的门限值  $P_H$  随时间  $t$  的变化,目标轮循周期  $T$  为一个常量,位于  $[T_{\min}, T_{\max}]$  之间.根据公式(9)和公式(6), $y(t)$  的变化速率由下式给出:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -K_p \left( y(t-D) - \frac{C \cdot T}{n} \right) - K_d \left( \frac{dy(t-D)}{dt} \right) \quad (11)$$

其中, $D$  表示系统经调整稳定的时间.

**定理.** 满足并且仅仅满足  $0 < K_p < 1$  时,公式(10)是趋近于稳定的.

证明:在公式(11)中,第 2 项主要用于减震,对稳定性作用较小,可设  $K_d=0$ ,得到

$$\frac{dy(t)}{dt} = K_p \left( \frac{C \cdot T}{n} - y(t-D) \right).$$

令  $x(t)=y(t)-C \cdot T/n$ ,上式可重新写为

$$\frac{dx(t)}{dt} = K_p x(t-D).$$

下面按照文献[14]中的频域方法证明其必要性和充分性.

**必要性:**根据控制理论,任何特征方程式的根必定依赖于左半平面.在  $0 \sim D$  的任意时间内, $K_p$  由特征方程式  $s + K_p e^{-sD} = 0$  的稳定性来确定.

将  $K_p$  的集合记为  $S$ (文献[14]的约定),有效解记为  $S_R$ ,无效解记为  $S_L$ .根据 Routh-Hurwitz 准则, $K_p$  的集合  $S$  应满足  $S = \{K_p > 0\}$ .另外,如果  $D > 0$ ,存在  $K_p$  满足特征方程式.根据文献[14],可以得到无效解满足:

$$S_L = \{K_p \geq \pi/(2D)\}.$$

为了保证一致性, $K_p$  不能大于 1.在本系统中,要求调整稳定的时间  $D$  一般较小,因此  $\pi/(2D) > 1$ .故系统稳定的条件下,满足  $0 < K_p < 1$ .

**充分性:**对于开放环路的传递函数定义如下:

$$L(s, K_p, D) = K_p e^{-sD} / s.$$

设调整稳定的时间上限为  $D_0$ , 对任意正的调整时间  $D > 0$ , 满足  $D < D_0$ , 传递函数的相位角满足以下不等式:

$$\angle L(j\omega, K_p, D) > \angle L(j\omega, K_p, D_0).$$

传递函数得到正的相位失真, 因此 ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 算法是稳定的系统.  $\square$

为了确定稳定状态下的  $K_d$ , 引入代价函数. 代价函数是门限控制算法有效性的度量函数, 定义如下:

$$J = \sum_{i=1}^{i=k} f(T_i - T) \quad (12)$$

其中,  $k$  为算法稳定之前经历的轮循周期数,  $T_i$  为第  $i$  个周期的轮循周期长度,  $T$  为期望的轮循周期长度. 代价函数  $f$  可以是方差函数或其他函数.

在公式(12)中,  $k$  类似于控制理论中的设定时间, 表示系统响应减少的时间. 如果代价函数为方差函数, 公式(12)的准则是, 对每一个轮循周期, 容忍小的偏差, 惩罚大的偏差, 即  $J$  越小越好. 而对于给定的  $[T_{\min}, T_{\max}]$ ,  $J$  能区分各种算法的有效性. 过分保守的算法倾向于较大的  $J$ , 在某一轮循周期, 门限值的较大变化会导致  $J$  较大.

对于有限的  $k$  值, 公式(12)可以进行优化, 选取合适的  $K_p$  和  $K_d$ , 使  $J$  最小, 即根据  $\frac{\partial J}{\partial K_p} = 0$  和  $\frac{\partial J}{\partial K_d} = 0$  计算选取的  $K_p$  和  $K_d$ .

### 3.2 带宽利用率分析

ADBEA 算法是一种基于爆发轮循的方式, OLT 在收到 ONU 带宽请求后, 可立即进行授权. 由于 OLT 上行传输和下行传输采用不同的波长, 根据图 1 中的调度机制, ADBEA 可有效利用轮循周期的计算和授权消息往返之间存在的空闲信道. 根据公式(1), 一个周期中, OLT 接收所有 ONU 数据和为

$$\left( \sum_{i=1}^N P_i \right) = C \cdot (T_{\text{cycle}} - N \cdot T_{\text{guard}}) - N \cdot P_{PD}.$$

根据 EPON 系统实际运行情况, 虽然 ONU 负载变化较为频繁, 但 OLT 中一种传输状况的传输会持续数秒时间. 因此, 对于 ONU 处于重负载的条件下, 可假定单位时间内授权周期不变, OLT 可接收的 ONU 上行吞吐量为

$$P_{th} = \frac{1}{T_{\text{cycle}}} \left( \sum_{i=1}^N P_i \right) = C \cdot \frac{C \cdot N \cdot T_{\text{guard}}}{T_{\text{cycle}}} - \frac{N \cdot P_{PD}}{T_{\text{cycle}}}.$$

从上式可以看出, OLT 的授权周期  $T_{\text{cycle}}$  越长, 单位时间内 OLT 接收 ONU 的上行数据越多, 其上行带宽利用率越高. ADBEA 算法实现中, 重载时随着授权门限值的增加, 轮循周期逐步延长, 直至授权周期为  $T_{\max}$ , 该值是所能选取的授权周期的最大值. 从以上调整授权门限值的方向可以看出, ADBEA 在重载时, 能够有效提高 ONU 的上行带宽利用率.

在 EPON 系统中, 包时延定义为包到达 ONU 的时刻与离开 OLT 的时刻之间的间隔, 该值由 3 部分组成: 包到达 ONU 队列与 ONU 开始发送报告消息之间的时间间隔、ONU 开始传输报告消息与 OLT 响应传输请求而发送授权窗口时刻之间的时间间隔以及包的传输时间. 轻载时, ADBEA 算法减小授权门限值, 致使轮循周期缩短, 这样可以减短数据包在 ONU 队列内的排队时间, 因此在轻载时, ADBEA 可以有效地降低时延.

## 4 性能分析

为了验证算法的有效性, 按照文献[3]的方法进行计算机模拟实验. 实验的 EPON 系统由一个 OLT 和多个 ONU 组成, 形成星形连接. OLT 与 ONU 之间通过 MPCP 轮循机制进行发现, 连接带宽为双向 10Gbps, OLT 与 ONU 之间的距离统一为 20Km.

对本文中算法的代价函数取为轮循周期的方差函数, 通过优化计算选取的  $K_p$  应小于 1,  $K_d \approx 0.48$ . 本节用 ns-2 模拟自适应门限的 EPON 动态带宽分配算法, 首先对算法的稳定性和参数  $K_p$  变化对算法性能的影响进行了实验; 然后, 对各算法性能进行了实验比较.

#### 4.1 模拟环境

在模拟实验中,自动发现的过程通过 MPCP 已经完成,OLT 与所有 ONU 的往返时间  $RTT$  为  $200\mu\text{s}$ (即传输时延为  $100\mu\text{s}$ ).不同 ONU 之间的数据帧间隔时间为  $2\text{ns}$ ,以太网帧间隔大小为  $20$  字节.根据文献[15],对最高优先级的 EF 流,其时延上限为  $2\text{ms}$ ;对中等优先级的 AF 数据流,其时延上限为  $8\text{ms}$ ;对最低优先级的 BE 数据流,其时延上限为  $20\text{ms}$ .ADBEA 各算法的授权周期上限限制  $T_{\text{max}}$  为  $2\text{ms}$ ,下限限制  $T_{\text{min}}$  为  $1\text{ms}$ .若无特别说明,ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 的  $K_p$  取为  $0.8$ ,ADBEA-FRP 的  $K_d$  取为  $0.48$ .

在模拟实验环境中,每一个 ONU 生成 3 种不同的传输流(EF,AF 和 BE),EF,AF 和 BE 流量的比例分别为  $20:40:40$ .EF 数据流均为  $64$  字节,AF 流大小在  $1518$  字节与  $64512$  字节之间均匀分布,BE 包与 AF 包随机变化规律一致.

为了保证高优先级的数据流优先传输,在每一个 ONU 里有 3 个不同的优先级队列,共享  $10\text{M}$  字节的缓存.当用户向 ONU 发送数据时,ONU 对每一个以太网帧的业务类型域进行检查,并将其放到相应的优先级队列里.当 ONU 收到大量 AF 帧而导致缓存队列满载,此时如果又有新的 AF 帧到达而 BE 帧队列不空,BE 帧则将被丢弃. ONU 发送时,优先发送高优先级队列的数据帧.

#### 4.2 自适应门限稳定性和参数实验

假设 50 个 ONU 向 OLT 发送数据,OLT 接收数据能力为  $10\text{Gbps}$ ,各 ONU 发送速率随机变化,这可能导致输入部分发生较大的变化,系统边界不稳定.数据流变化为:15 个 ONU 发送正弦变化的负载,其中 5 个的速率为  $50\sin(0.16t)+300\text{Mbps}$ ,另外 5 个的速率为  $50\sin(0.16t+0.5\pi)+150\text{Mbps}$ ,最后 5 个的速率为  $100\sin(0.16t+1.5\pi)+350\text{Mbps}$ ;10 个 ONU 负载为在  $150\text{Mbps}$  和  $250\text{Mbps}$  之间的方形脉冲,时间周期为  $10\text{s}$ ;25 个 ONU 发送高斯分布的负载:其中 10 个均值为  $300\text{Mbps}$ ,变化幅度为  $100\text{Mbps}$ ;另外 10 个均值为  $350\text{Mbps}$ ,变化幅度为  $50\text{Mbps}$ ;最后 5 个均值为  $400\text{Mbps}$ ,变化幅度为  $100\text{Mbps}$ .图 4 显示了 OLT 接收端口的平均接收速度.

根据以上实验,可以得到以下结论:

输入扰动后,无论是接收速率超过带宽能力还是小于带宽能力,ADBEA-FRP 算法都是稳定和收敛的.

在实验中,如果 ONU 数量很大,折半查询算法 ADBEA-BT 的瞬时响应并不令人满意.在算法收敛之前,存在大量的越界现象,导致门限值剧烈变化.另外,慢响应和重新初始化也导致大量的越界.

比例控制算法 ADBEA-PC 算法相对快速和稳定,但在有扰动时,也存在大量的越界,收敛时间较长.

与其他算法相比,ADBEA-FRP 算法更健壮,在有外部扰动时,越界较少,而且收敛时间短.

在以上实验的基础上,对 ADBEA-FRP 算法修改不同的  $K_p$  值进行实验,图 5 显示了在不同  $K_p$  情况下的测试结果.

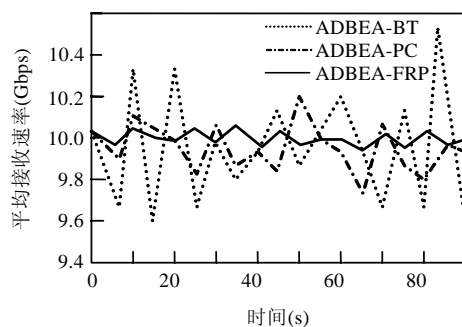


Fig.4 Average receive rate with different threshold schedule

图 4 不同门限调整算法出端口平均接收速率

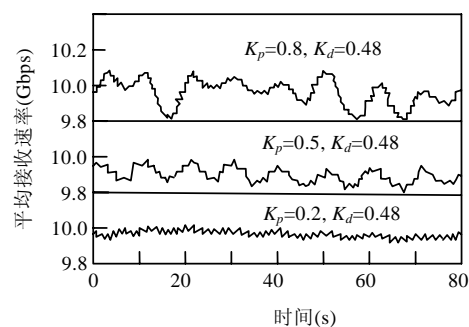


Fig.5 Average receive rate with different parameter  $K_p$  in ADBEA-FRP algorithm

图 5 ADBEA-FRP 算法参数  $K_p$  对入端口接收速率的影响



对于 ONU 发送速率波动较大时,  $K_p$  越小, ADBEA-FRP 算法的响应越光滑;  $K_p$  越大, ADBEA-FRP 算法对噪声和发送速率大小越敏感. 另外, 重复上述实验, 改变重载 ONU 数量估计中的常量  $\phi=0.95$ . 结果表明,  $\phi$  越大, 越能跟踪重载 ONU 数量的变化; 但是,  $\phi$  的变化对平衡点并没有影响.

### 4.3 性能比较实验

在性能实验中, 存在两组 ONU, 一组为轻载流量传输(32 个 ONU), 另一组为重载流量传输(32 个 ONU), 参照文献[10], 每一个 ONU 生成 3 种不同的传输流(EF, AF 和 BE), 每一种传输流按照 Hurst 参数的 Pareto 分布随机生成. 其他参数与模拟环境中一致.

表 1 对 5 种算法的性能进行了测试和比较: 折半查询 ADBEA-BT、比例控制算法 ADBEA-PC、减少振荡的比例控制算法 ADBEA-FRP、文献[11]最新提出的预估授权协议算法(IPACT-GE)和文献[10]提出的改进的动态带宽分配算法(EBDBA).

Table 1 Comparison of different DBA schemes

表 1 各种 DBA 算法比较

DBA 算法	时间复杂度	比较
IPACT-GE	$O(N)$	采用轮循机制, 不适合时延敏感业务, 剩余带宽分配给单 ONU
EBDBA	$O(5N)$	采用爆发轮循机制, 轻载效果好, 重载退化为 IPACT
ADBEA-BT	$O(N)$	网络吞吐量大, 满足时延要求, 但可能由于不稳定导致抖动大
ADBEA-PC	$O(N)$	网络吞吐量大, 满足时延要求, 但可能由于振荡导致抖动大
ADBEA-FRP	$O(N)$	网络吞吐量大, 满足时延和抖动要求, 稳定性好

图 6 为 EF 和 AF 通信数据的平均包时延的比较结果. 平均包时延的定义为包产生后与到达 OLT 所需的平均时间. 对 EF 和 AF 数据帧, 各种 DBA 算法的平均包时延均基本一致. 这是由于各 DBA 算法都优先转发 EF 和 AF 数据, 而且只要 EF 和 AF 数据流不超过带宽能力, 平均包时延将增长缓慢. 但对 BE 通信数据, 平均包时延如图 7 所示, 当负载为 6Gbps 左右, 各算法平均包时延迅速上升到 0.5s 左右; 如继续增加负载, 各算法平均包时延则不再增长. 当负载较低时, ADBEA-BT, ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 等基于门限算法的平均包时延远低于 IPACT-GE 和 EBDBA, 虽然 ADBEA-FRP 和 EBDBA 一样基于爆发轮循机制, 但在低负载时, ADBEA-FRP 的平均包时延比 EBDBA 低 30% 左右. 这是由于当负载较低时, ADBEA-BT, ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 缩短了轮循周期, 减少了等待时间. 这个结果证明了 ADBEA 对平均包时延的改进.

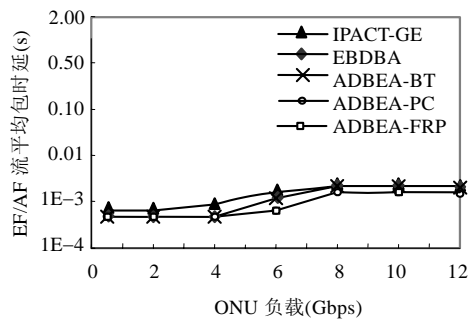


Fig.6 Average packet delay for EF/AF traffic class

图 6 EF/AF 传输流的平均包时延

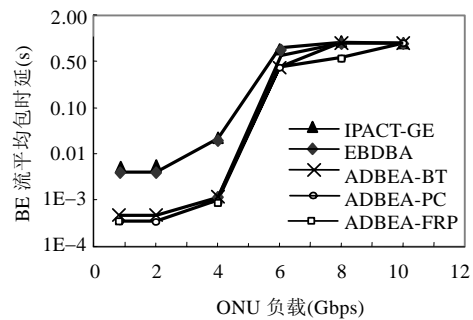


Fig.7 Average packet delay for BE traffic class

图 7 BE 传输流的平均包时延

对 EF 和 AF 通信数据的平均包抖动的定义为相邻包产生后到达 OLT 所需时间的差. 对 EF 和 AF 数据帧, 各种 DBA 算法的平均包抖动均基本一致, 这是由于各 DBA 算法都优先转发 EF 和 AF 数据. 但对于 BE 通信数据, 平均包抖动如图 8 所示, 当负载为 6Gbps 左右, 各算法平均包抖动迅速上升; 如继续增加负载, ADBEA-BT, ADBEA-PC 算法的平均抖动会发生震荡, 这是由于这两种算法调整门限的变化较为剧烈所致; 而 IPACT-GE, EBDBA 和 ADBEA-FRP 则呈现稳步上升趋势, 这是由于随着负载的增加进行丢包的结果. 从图中可以看出,

ADBEA-FRP 算法的抖动和基于预估机制的 IPACT-GE 相当,低于其他算法。

图 9 表明了 IPACT-GE,EBDBA,ADBA-BT,ADBEA-PC 和 ADBEA-FRP 等算法在各种网络负载下的网络吞吐量。网络吞吐量的定义为 1s 之内到达 OLT 的各类数据的比特数。从图中可以看出:当负载相对较低时,各算法的网络吞吐量与其他算法差不多;在负载超过 9Gbps 之后,ADBEA-FRP 算法比 IPACT-GE 和 EBDBA 算法的性能更好;如负载为 12Gbps,ADBEA-FRP 的网络吞吐量比 EBDBA 高 17%。ADBEA-FRP 的网络吞吐量较高是因为 ADBEA-FRP 在爆发条件下,通过调整带宽的门限值,减少了空闲信道时间,对上行信道利用率更高。

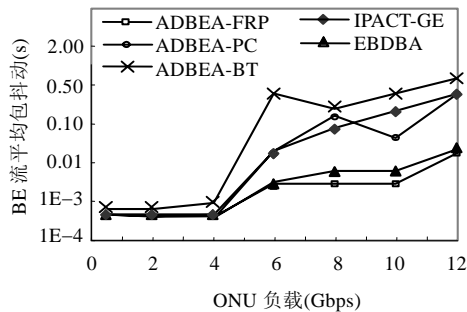


Fig. 8 Average packet jitter for BE traffic class

图 8 BE 传输流的平均包抖动

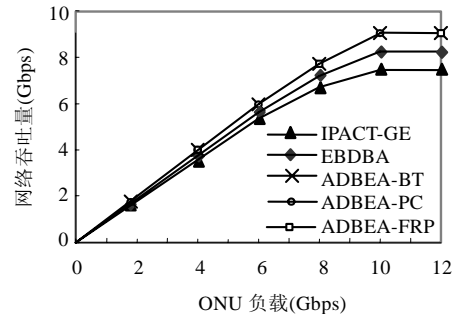


Fig. 9 Network throughput comparison of different DBA methods

图 9 网络吞吐量比较

## 5 结论

根据 EPON 系统动态带宽早期分配机制,本文提出了基于门限控制的动态带宽早期分配算法。该算法允许 OLT 对 ONU 进行实时带宽分配:当 ONU 请求带宽小于门限时,OLT 立即分配请求的带宽;当 ONU 请求带宽超过门限值时,OLT 立即分配门限值的带宽。当负载较低时,本算法设置较低的门限,减短轮循周期,从而降低数据转发的时延;当负载较高时,在满足 QoS 的前提下,则设置较高的门限,延长轮循周期,减少单位时间内 OLT 连续接收以太网数据帧的空闲信道时间,提高网络吞吐量。基于反馈控制理论的基本方法,本文开发了 3 种门限自适应调整的方法:折半查询、比例控制和减少振荡的比例控制。3 种方法均能够满足要求,但从稳定性和收敛性来说:折半查询可能不收敛,而且振荡较大;比例控制能够快速收敛,但同样存在振荡的问题;减少振荡的比例控制方法收敛最快,稳定性也最好。在 10G EPON 系统中的实验结果表明,3 种基于门限的 DBA 算法都能在高负载时具有较高的网络吞吐量,在低负载时具有较低的平均包转发时延。因此,基于门限的动态带宽早期分配算法对于 10G EPON 系统是有效的。

## References:

- [1] Shumate PW. Fiber-to-the-Home: 1977-2007. *Journal of Lightwave Technology*, 2008,26(9):1093-1103. [doi: 10.1109/JLT.2008.923601]
- [2] McGarry M, Reisslein M, Maier M. Ethernet passive optical network architectures and dynamic bandwidth allocation algorithms. *IEEE Communications Surveys*, 2008,10(3):46-60. [doi: 10.1109/COMST.2008.4625804]
- [3] Skubic B, Chen JJ, Ahmed J, Wosinska L, Mukherjee B. A comparison of dynamic bandwidth allocation for EPON, GPON, and next-generation TDM PON. *IEEE Communications Magazine*, 2009,47(3):S40-S48. [doi: 10.1109/MCOM.2009.4804388]
- [4] Kramer G, Mukherjee B, Pesavento G. Ethernet PON (EPON): Design and analysis of an optical access network. *Photonic Network Communication*, 2001,3(3):307-319. [doi: 10.1023/A:1011463617631]
- [5] Holmberg T. Analysis of EPONs under the static priority scheduling scheme with fixed transmission times. In: Biswanath M, *et al.*, eds. *Proc. of the 2nd Conf. on Next Generation Internet Design and Engineering (NGI 2006)*. Valencia, Berlin: Springer-Verlag, 2006. 192-199. [doi: 10.1109/NGI.2006.1678241]

- [6] Hajduczenia M, da Silva H, Borges N. Discovery process for emerging 10 Gb/s EPONs. *IEEE Communications Magazine*, 2008,46(11): 82–90. [doi: 10.1109/MCOM.2008.4689249]
- [7] Kramer G, Mukherjee B, Esavento G. Interleaved polling with adaptive cycle time (IPACT): A dynamic bandwidth distribution scheme in an optical access network. *Photonic Network Communications*, 2002,4(1):89–107. [doi: 10.1023/A:1012959023043]
- [8] Choi SY, Lee S, Lee TJ, Chung MY, Choo H. Double-Phase polling algorithm based on partitioned ONU subgroups for high utilization in EPONs. *Journal of Optical Communication Network*, 2009,1(5):484–497. [doi: 10.1364/JOCN.1.000484]
- [9] Zhang JY, Liu L. Implement mechanism on distributed EPON DBA based on utility. *Journal of Software*, 2008,19(7):1693–1706 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1693.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01693]
- [10] Lim W, Yun CH, Yang YM, Lee H, Kim K. Burst-Polling-Based dynamic bandwidth allocation using adaptive minimum guaranteed bandwidth for EPONs. *Journal of Optical Communication Network*, 2009,1(7):594–599. [doi: 10.1364/JOCN.1.000594]
- [11] Sue CC, Cheng HW. A fitting report position scheme for the gated IPACT dynamic bandwidth algorithm in EPONs. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2010,18(2):624–637. [doi: 10.1109/TNET.2009.2030189]
- [12] Ikeda H, Kitayama K. Dynamic bandwidth allocation with adaptive polling cycle for maximized TCP throughput in 10G-EPON. *Journal of Lightwave Technology*, 2009,27(23):5508–5516. [doi: 10.1109/JLT.2009.2031127]
- [13] Meng L, El-Najjar J, Alazemi H, Assi C. A joint transmission grant scheduling and wavelength assignment in multichannel SG-EPON. *Journal of Lightwave Technology*, 2009,27(21):4781–4792. [doi: 10.1109/JLT.2009.2026913]
- [14] Xu H, Datta A, Bhattacharyya SP. PID stabilization of LTI plants with time-delay. In: *Proc. of the 42nd IEEE Conf. on Decision and Control*. 2003,4:4038–4043. [doi: 10.1109/CDC.2003.1271782]
- [15] Jiang SM, Xie J. A frame division method for prioritized DBA in EPON. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006,24(4):83–94. [doi: 10.1109/JSAC.2006.1613774]

#### 附中文参考文献:

- [9] 张晋豫,刘犁.基于效用 EPON 分布式动态带宽分配实现机制.软件学报,2008,19(7):1693–1706. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1693.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01693]



汪学舜(1970—),男,湖北浠水人,博士生,主要研究领域为流媒体数据传输,QoS 保证.



罗婷(1976—),女,博士生,主要研究领域为系统可靠性.



余少华(1962—),男,博士,教授级高工,博士生导师,主要研究领域为 IP 互联网络,城域网.



戴锦友(1968—),男,博士,高级工程师,主要研究领域为多业务以太网.