

FiWi 网络比例公平和 QoS 感知的分级动态带宽分配机制

何 蓉* 谢 辉 方旭明

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)

摘 要: 光纤网络和无线接入技术结合的 FiWi 网络可提供大容量、灵活以及低基础设施成本的无线接入能力。由于 FiWi 网络中客户端业务量一般具有不稳定性, 很难提前有效预测, 高效公平的动态带宽分配(DBA)机制具有重要作用。该文针对 EPON 和 WLAN 构成的 FiWi 网络提出一种分级 DBA 机制。引入剩余带宽比例因子解决多个轮询周期内各用户分配的带宽资源与其权值不匹配而产生的不公平问题; 联合考虑业务优先级、带宽请求比例和网络负载解决带宽分配中的业务 QoS 保证和信道带宽浪费问题。仿真实验表明, 与现有文献的 DBA 机制相比, 系统公平性、吞吐量和信道利用率有明显提升。且所提 DBA 算法不限定具体带宽资源类型, 具有良好通用性。

关键词: FiWi 网络; 以太网无源光网络; 无线局域网; 动态带宽分配; 比例公平; QoS 感知

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)06-1409-08

DOI: 10.11999/JEIT160731

Proportional Fair and QoS-aware Hierarchical Dynamic Bandwidth Allocation Scheme for Fiber-wireless Networks

HE Rong XIE Hui FANG Xuming

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The integration of optical and wireless technologies, denoted as Fiber-Wireless (FiWi) networks, can provide not only high capacity but also flexible wireless access ability with less infrastructure deployment. Since data traffic generated in FiWi networks usually experiences unstable and unpredictable, it is difficult to perform traffic prediction in advance. An effective and fair Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) scheme plays an important role. This paper proposes an upstream fair hierarchical DBA scheme for EPON-WLAN networks. Excess bandwidth proportion factor is introduced to address the unfair issue due to the unmatched problem between the allocated bandwidth resource and the assigned user weight among multiple granting cycles. On the other hand, in order to deal with the QoS guarantee and bandwidth waste issue in bandwidth allocation, we jointly taken into account of different traffic QoS priorities, bandwidth requirement proportion, and actual traffic load. Extensive simulation results show that compared with the existing DBA schemes, the proposed hierarchical DBA scheme can improve proportional fairness, throughput and channel utilization. Moreover, the proposed FiWi DBA scheme does not refer to a specific bandwidth resource types, thus obtains good generality.

Key words: Fiber-Wireless (FiWi) network; Ethernet Passive Optical Network (EPON); WLAN; Dynamic Bandwidth Allocation (DBA); Proportional fairness; QoS-aware

1 引言

光纤网络技术具有的传输距离远、大容量和高可靠性等特性使得其成为最合适的远距离回传网络技术, 但它部署困难、成本高, 无法实现与所有终端用户直连。作为典型无线接入技术代表的 WLAN 正向着大规模、高密度、高速率趋势发展, 其相关

标准在不断推陈出新。WLAN 具有布点灵活, 低成本的优点, 适合提供无处不在的移动宽带接入, 其带宽和速率也在不断提升。工作在 5 GHz 频段的 802.11ac 标准能支持 Gbps 的数据速率。2014 年创建的(NG60 SG)(Next Generation 60 GHz Study Group)正在开发 60 GHz 毫米波 WLAN 标准 802.11ay 作为 802.11ad 标准^[1]的下一代演进技术, 可将 PHY 峰值速率从 6.7 Gbps 提升到 MAC 峰值速率 20 Gbps 以上。但 WLAN 技术面临传输距离较短, 易受干扰, 传输可靠性不高等问题。光纤网络和无线接入技术结合的混合宽带接入网络被称为 FiWi 网络^[2]。它既有光纤网络的高带宽和高可靠性,

收稿日期: 2016-07-08; 改回日期: 2017-03-17; 网络出版: 2017-04-14

*通信作者: 何蓉 rhe@swjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471303), 国家留学基金(20130700501)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471303), China Scholarship Council (20130700501)

又能提供高速、灵活、移动的无线接入能力,具有广阔应用前景。

以太网无源光网络(Ethernet Passive Optical Network, EPON)是一种应用广泛的高性价比光纤接入网络技术,基于 P802.3ah 标准^[3],采用树形网络结构。它通过光纤线路终端(OLT)与骨干网连接,一个 OLT 可连接多个远程光网络单元(ONU),上行和下行方向使用不同波长。下行方向,OLT 通过广播方式将数据帧传送到各个 ONU。上行方向遵循 Point-to-Point (P2P) 结构,来自客户端的数据经 ONU 到达 OLT,各个 ONU 间不直接通信。EPON 和 WLAN 网络均具有点-多点结构,可提供对 QoS 的支持,也均可采用轮询方式进行带宽分配操作。故将 ONU 和无线接入网的控制器(如 WLAN 中的 AP, Wimax 中 BS)在硬件和软件上集成为一个系统组件在技术上是可行的,在现有研究成果中被广泛使用^[4-7]。

由于上行带宽限制及用户业务负载的突发性,FiWi 网络不一定总能提供足够带宽来满足所有客户端的带宽需求。因此需要有效的 DBA 为 ONU 和各用户端分配带宽资源。DBA 一般针对上行流方向。为避免上行数据传输冲突的发生,现有绝大多数研究成果在光域和无线域网络中均基于轮询机制。多点控制协议(Multi-Point Control Protocol, MPCP)是在 EPON 和 GE-PON 中被广泛采用的与 P802.3ah 标准兼容的轮询机制^[3]。它工作在 MAC 层,提供了一种适用于上行数据传输带宽分配的 OLT 与 ONU 间双向通信的信令基础框架,但并未规定任何具体的 DBA。MPCP 涉及 Gate 和 Report 这两个控制消息。Report 消息由 ONU 发送给 OLT,它携带了该 ONU 的队列状态信息和带宽请求。由 OLT 发送给某个 ONU 的 Gate 消息包含了分配给该 ONU 的传输数据的起始时间及可用带宽。

公平性是 DBA 算法的重要设计目标之一。对于存在不同 QoS 需求业务类型场景下,带宽资源的分配应该是一种相对公平,让不同业务类型获得的带宽资源与其权值匹配的比例公平。在 FiWi 网络实际应用场景中,无线接入网络用户端的业务量产生一般具有很强突发性,几乎很难提前有效进行预测。对某个上行轮询周期而言,各个无线用户所需的带宽资源很可能与其权值不匹配。若不考虑无线用户实际带宽资源需求,可能会导致带宽资源分配浪费,使某些无线用户获得的带宽大于所需。此外,同一个无线用户在多个不同上行轮询周期的带宽需求也可能不同,且不一定总和其权值吻合,存在所需带宽资源低于或超过权值的情况。从单个无线用户角度,如果不考虑其多个历史轮询周期内实

际分配的带宽情况,仅按单个轮询周期的权值来分配带宽,无法实现一段时间内的长期比例公平性。现有研究成果对 FiWi 网络 DBA 机制的公平性问题涉及不多,虽有一些文献考虑了不同业务的 QoS 特性和公平性^[5-11],但都仅针对单个轮询周期而言,且几乎都未给出公平系数(Fairness Index, FI)的性能评价结果。我们前期的工作针对 EPON 网络,提出了一种应用于各个 ONU 之间的长期比例公平动态带宽资源分配机制^[12],联合考虑了不同 ONU 的带宽需求、优先级、网络实际业务负载和各个 ONU 在多个历史轮询周期中实际被分配的带宽等因素,以获得良好的长期公平性和信道利用率。但该机制仅针对 EPON 网络,没有考虑 FiWi 网络无线域各用户之间的带宽资源分配问题。

此外,最大化信道利用率是 DBA 算法另一个重要设计目标。当存在剩余带宽可供分配时,如何平衡各用户优先级和带宽需求,有效地在超载用户间分配剩余带宽,最大化带宽利用率,是需要考虑的关键。现有大多数文献对 DBA 的优化目标为最小化包时延^[13]、最大化上行信道利用率和节省无线设备能量^[14]。文献[13]提出了一种最短传输时延优先调度机制,研究具有不同传播时延和不同负载的各个 ONU 的系统性能。文献[5]和文献[6]针对 EPON 和 802.16Wimax 构成的 FiWi 网络,分别提出了平均分配剩余带宽和按比例分配剩余带宽的 DBA 算法,二者均未考虑实际带宽请求,可能出现用户获得的带宽超过其请求值而浪费带宽。文献[10]提出一种单级 DBA 机制,由 OLT 为每个 ONU 的 3 个不同优先级队列分配带宽资源,把剩余带宽按优先级在各个过载队列间分配,也未考虑实际带宽请求。

因此,本文将致力解决上述问题,在文献[12]基础上,对 EPON 和 WLAN 构成的 FiWi 网络,提出一种兼顾公平性和 QoS 感知的上行分级 DBA 机制,即 DBA 的控制功能由 OLT 和 ONU 共同执行。在由 OLT 执行的第 1 级 DBA 中,联合考虑各个 ONU 的 QoS 优先级、实际带宽需求、网络整体负载情况以及多个历史轮询周期内实际使用的带宽资源比例等因素分配带宽,以提高系统长期比例公平性。在由各个 ONU 执行的第 2 级 DBA 中,联合考虑不同业务的 QoS 优先级、带宽请求比例和可用带宽资源来分配带宽,使各业务类型所获得的带宽不超过其所请求带宽,解决带宽分配中的业务 QoS 保证和信道带宽浪费问题,提高信道利用率。论文组织结构如下:第 2 节讨论了系统模型,第 3 节详细阐述比例公平和 QoS 感知的分级 DBA 算法的具体思路,第 4 节是性能评价和分析,最后是对全文的总结。

2 系统架构

假设 EPON 的 ONU 和 WLAN 的 AP 集成为一个系统组件 ONU-AP。每个 ONU-AP 同时作为 EPON 的 ONU 和 WLAN 的 AP 为多个无线用户 (STA) 服务。设有 N 个 ONU-AP, 第 i 个 ONU-AP 下有 m_i^{ss} 个 STA, 由 WLAN 接入网络各个 STA 产生的上行业务类型被映射为 3 种不同 QoS 需求: 即加速转发 (Expedited Forwarding, EF)、确保转发 (Assured Forwarding, AF) 和尽力而已 (Best Effort, BE)。业务传输给 ONU-AP 后被分别存放在 3 个不同 QoS 优先级队列 P1, P2 和 P3 中。其中 EF 业务对端到端时延和抖动敏感; AF 对时延不敏感, 但需要带宽的保证, BE 对带宽、抖动和时延都不敏感。假设对于上行流, 各个 ONU-AP 和 OLT 之间, ONU-AP 和其所连接的各 STA 间均采用轮询方式传输, 即不存在竞争和冲突问题。系统结构如图 1 所示, ONU-AP 中业务映射的逻辑结构如图 2 所示。

本文所提 DBA 机制的 OLT 和 ONU-AP 之间采用 Gate 和 Report 消息作为带宽资源的请求和分配信令, 交互过程遵循标准 MPCP 机制, 未引入新的信令和开销。由于 OLT 和 ONU 之间一般相距很远, 传输时延不可忽略。如各 ONU-AP 与 OLT 的距离不一致, 可能导致多个 ONU-AP 上行流间产生额外时延。但该时延可通过调度策略来弥补, 即通过合理安排各个 ONU-AP 的上行传输顺序来最小化时延。目前已有一些研究调度策略的成果, 如优先调度最短传输时延 ONU 的调度策略 SPD^[13]、优先调度最短处理

时间 ONU 的调度策略 SPT^[15]、优先调度最大帧数目 ONU 的调度策略 LNF^[15] 等。本文主要关注 DBA 算法本身, 即侧重于为各个 ONU-AP 分配多少资源。为简化系统模型, 假定各个 ONU-AP 与 OLT 间距离相等。只要采用合理调度策略, 由于各个 ONU-AP 的距离不同造成的时延差问题并不会影响本文所提 DBA 算法的实际效果。

3 基于比例公平和 QoS 感知的分级动态带宽分配

3.1 OLT 执行的第 1 级 DBA

采用分级调度策略, 第 1 级由 OLT 为各个 ONU-AP 分配带宽, 实现 m 个轮询周期内的比例公平性。考虑到通用性, 本文的 DBA 算法并不限定具体带宽资源类型, 可以是时隙、字节/比特或子载波等。本文仅以字节/比特为例进行分析。两个 ONU-AP 的相邻传输窗口之间有一个保护时间间隔 T_g 。 $T_{\text{eff}}^{\text{EPON}}$ 表示一次有效上行 EPON 轮询周期中可供所有 ONU-AP 使用的总有效传输时间, 等于一个 EPON 轮询周期时间减去轮询请求的信令开销 T_{sign} 和各个保护时间间隔总和, 如式 (1) 所示:

$$T_{\text{eff}}^{\text{EPON}} = T - T_{\text{sign}} - N \times T_g \quad (1)$$

假设上行链路的传输速率为 R_{EPON} (Mbps), 则轮询周期 T 内可用的总带宽 $B_{\text{avi}}(T)$ 为

$$B_{\text{avi}}(T) = T_{\text{eff}}^{\text{EPON}} R_{\text{EPON}} \quad (2)$$

在第一级带宽资源分配中, 每一个 ONU-AP 都对应三个参数: ω_i , $\alpha_i^{\text{req}}(T)$ 和 $\alpha_i^{\text{act}}(T)$ 。其中 ω_i 是

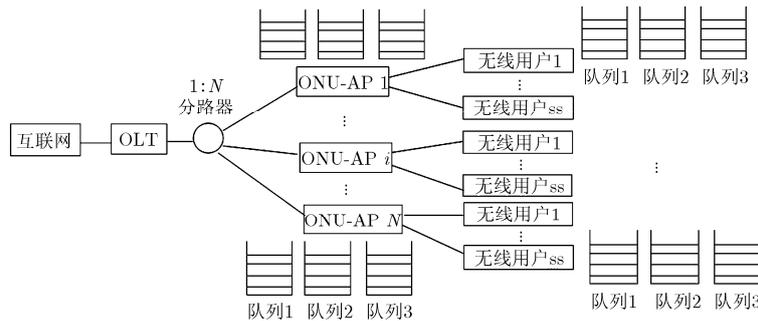


图 1 由 EPON 和 WLAN 组成的 FiWi 网络系统架构

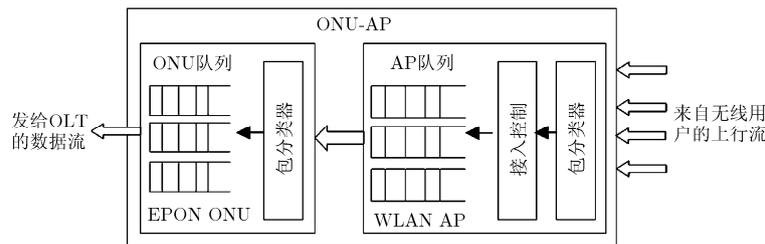


图 2 ONU-AP 业务类型映射的逻辑结构

权重因子,表示第*i*个ONU-AP在一个轮询周期内中可被分配的带宽资源比例,反映其优先级,是一个可预先设置的常数,在各个轮询周期中保持不变。 ω_i 满足

$$0 < \omega_i < 1, \sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad (3)$$

$\alpha_i^{\text{req}}(T)$ 表示在周期*T*中,第*i*个ONU-AP请求的带宽占本周期可用总带宽的比例,可根据式(4)得到。

$$\alpha_i^{\text{req}}(T) = \min \left\{ \frac{B_i^{\text{req-ONU}}(T)}{B_{\text{avi}}(T)}, 1 \right\} \quad (4)$$

其中, $B_i^{\text{req-ONU}}(T)$ 是第*i*个ONU-AP通过MPCP REPORT($B_i^{\text{req-ONU}}(T)$)消息传递给OLT的在周期*T*中所请求的带宽,是根据其3个优先级队列的长度之和计算出来的。假设链路传输速率相同,则可认为队列长度与所需带宽资源成正比关系。应满足 $0 \leq \alpha_i^{\text{req}}(T) \leq 1$,但 $\sum_{i=1}^N \alpha_i^{\text{req}}$ 可能大于、等于或小于1。由于业务突发性和不稳定性,不同ONU-AP及同一个ONU-AP在每个轮询周期的 $\alpha_i^{\text{req}}(T)$ 值都可能不同,也可能和其权重因子不匹配。如仅根据权重因子或带宽请求值来分配带宽资源,可能照成带宽资源浪费或不公平。

$\alpha_i^{\text{act}}(T)$ 表示在周期*T*中,OLT给第*i*个ONU-AP实际分配的带宽比例。这是综合考虑了各个ONU-AP的请求带宽比例、权重因子、*T*中可用总带宽,以及前*m*个周期实际使用带宽情况得到的。 $0 \leq \alpha_i^{\text{act}}(T) \leq 1$, $\alpha_i^{\text{act}}(T)$ 值可能大于、等于或小于其 ω_i ,但分配给所有ONU-AP的实际带宽比例之和不应大于1,即应满足 $\sum_{i=1}^N \alpha_i^{\text{act}} \leq 1$ 。OLT收到所有ONU-AP发来的带宽请求后,会首先统计周期*T*中可提供的剩余带宽比例总和 $\phi_f(T)$ 。即当一个ONU-AP所请求的带宽比例小于其 ω_i 时,计算其差值,然后把所有差值进行求和。

$$\phi_f(T) = \sum_{i=1}^N \max(\omega_i - \alpha_i^{\text{req}}, 0) \quad (5)$$

接着,OLT会统计出周期*T*中超出其权重因子的额外带宽请求比例总和 $\phi_{\text{req}}(T)$,如式(6)所示。

$$\phi_{\text{req}}(T) = \sum_{i=1}^N \max(\alpha_i^{\text{req}} - \omega_i, 0) \quad (6)$$

然后根据 $\phi_f(T)$ 和 $\phi_{\text{req}}(T)$ 的大小,分成以下几种情况进行处理:

(1)若 $\phi_f(T) = 0$,说明本轮询周期中没有剩余带宽可供重新分配,即所有ONU-AP的请求带宽比例都大于或等于其权值,各个ONU-AP实际获得的带宽比例等于其权值,即 $\alpha_i^{\text{act}}(T) = \omega_i, i = 1, 2, \dots, N$ 。

(2)若 $\phi_{\text{req}}(T) \leq \phi_f(T)$,说明供大于求,每个ONU-AP的带宽比例请求均可以满足,各个ONU-AP实际获得的带宽比例等于其请求带宽比例,即 $\alpha_i^{\text{act}}(T) = \alpha_i^{\text{req}}(T)$ 。

(3)若 $\phi_{\text{req}}(T) > \phi_f(T)$,说明供小于求,与文献[5]中平均分配剩余带宽方式不同,本文考虑根据剩余带宽比例因子 β_i 来进行分配。首先根据当前轮询周期之前*m*个周期内第*i*个ONU-AP实际获得的带宽比例和其权重因子来计算其可获得的 β_i ,如式(7)所示。

$$\beta_i = \begin{cases} \frac{\omega_i}{\sum_{i \in S} \omega_i}, & j = 0, \forall i \in S_T \\ \max \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^j \alpha_i^{\text{act}}(T-k)}{j \times \omega_i}, \omega_i \right) & \\ \sum_{i \in S} \max \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^j \alpha_i^{\text{act}}(T-k)}{j \times \omega_i}, \omega_i \right) & \\ j \geq 1, \forall i \in S_T \end{cases} \quad (7)$$

其中, S_T 为在周期*T*中所请求的带宽资源比例大于其权重因子的所有ONU-AP的集合,即有额外带宽请求的ONU-AP的集合。*j*为当前周期*T*之前的历史轮询周期数,*j*的取值应满足式(8):

$$j = \min(j, m) \quad (8)$$

$j = 0$ 表示第一个初始周期,它没有历史周期,故直接利用各个ONU-AP的权重因子来计算 β_i ;当 $j > m$ 时, $j = m$ 。即最多只考虑*m*个轮询周期内的公平性。如果在前面*j*个历史轮询周期内出现了实际分配的带宽比例总和大于其权值总和的情况,则将 β_i 值设为 ω_i ,应满足 $\sum_{i \in S} \beta_i = 1$ 。

然后按照式(9)计算各个ONU-AP在周期*T*中实际获得的带宽比例。需说明的是,由于权重因子加上按照 β_i 所分配的剩余带宽比例后,可能会超过该ONU-AP所请求的带宽比例。为避免带宽资源浪费,取二者的最小值作为实际分配的带宽比例。

$$\alpha_i^{\text{act}}(T) = \min(\alpha_i^{\text{req}}(T), \omega_i + \beta_i \times \phi_f(T)) \quad (9)$$

$\alpha_i^{\text{act}}(T)$ 乘以周期*T*内可用的总带宽值 $B_{\text{avi}}(T)$,就可以得到本轮询周期内第*i*个ONU-AP实际被分配的带宽值 $B_i^{\text{act}}(T)$,如式(10)所示。OLT通过MPCP GATE消息将 $B_i^{\text{act}}(T)$ 值发送给第*i*个ONU-AP。

$$B_i^{\text{act}}(T) = \alpha_i^{\text{act}}(T) B_{\text{avi}}(T) \quad (10)$$

OLT执行的第1级DBA算法伪代码表1所示。该

级DBA算法的基本操作是计算各个ONU-AP剩余带宽比例因子 β_i , 计算规模最大为 Nm , 该级算法的时间复杂度为 $T(Nm)$ 。

表 1 OLT执行的第一级DBA算法伪代码

1	获取 $B_i^{\text{req-ONU}}(T)$ 和 ω_i , $i = 1, 2, \dots, N$, 计算 $B_{\text{avi}}(T)$
2	根据式(4)计算各个 $\alpha_i^{\text{req}}(T)$ 值
3	根据式(5)计算 $\phi_f(T)$
4	根据式(6)计算 $\phi_{\text{req}}(T)$
5	if $\phi_{\text{offer}}(T) == 0$, then
6	$\alpha_i^{\text{act}}(T) = \omega_i$, $i = 1, 2, \dots, N$
7	else if $\phi_{\text{req}}(T) \leq \phi_f(T)$, then
8	$\alpha_i^{\text{act}}(T) = \alpha_i^{\text{req}}(T)$, $i = 1, 2, \dots, N$
9	else{ 根据式(7)计算 β_i , $\forall j \in S_T$
10	根据式(9)计算 $\alpha_i^{\text{act}}(T)$, $i = 1, 2, \dots, N$ }
11	endif
12	endif
13	根据式(10)计算 $B_i^{\text{act}}(T)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 并通过GATE消息发送给各ONU-AP

3.2 ONU-AP 执行的第二级 DBA

第2级DBA在第1级DBA完成后进行, 由ONU-AP为其所连接的各个STA中不同优先级业务分配带宽资源。本文将剩余带宽的分配和各优先级业务的带宽请求结合, 根据不同STA的同一优先级业务类型的带宽请求比例来分配剩余带宽, 既考虑了业务类型的优先级特性, 又保证各业务类型所获得的带宽不会大于其请求值, 避免了文献[4-6]中可能存在的带宽浪费, 提高了信道利用率。

假设第 i 个ONU-AP连接的STA数目是 m_i^{ss} , 所有ONU-AP都执行相同的DBA算法。假设连接到ONU-AP的每个STA产生3种不同优先级业务类型。根据不同业务的QoS特性, 每个业务类型都对应一个带宽权值 γ_k ($k=1, 2, 3$), 优先级越高的业务类型对应越高的权值。假设业务优先级从1至3是递减的, 应满足式(11):

$$0 < \gamma_k < 1, \sum_{k=1}^3 \gamma_k = 1, \gamma_3 < \gamma_2 < \gamma_1 \quad (11)$$

$B_{i,j}^{\text{req}}(T)$ 为第 i 个ONU-AP所连接的第 j 个STA在周期 T 中的带宽请求, $B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$ 表示第 i 个ONU-AP所连接的第 j 个STA中优先级为 k 的业务类型的带宽请求, $B_{i,j}^{\text{req}}(T) = \sum_{k=1}^3 B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$ 。 $B_{i,j}^{\text{act}}(T)$ 为第 i 个ONU-AP所连接的第 j 个STA在周期 T 中实际被分配的带宽值, $B_{i,j,k}^{\text{act}}(T)$ 为第 i 个ONU-AP所连接的第 j 个STA中优先级为 k 的业务类型实际分配的带宽, $B_i^{\text{act}}(T) = \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} B_{i,j}^{\text{act}}(T) = \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} \sum_{k=1}^3 B_{i,j,k}^{\text{act}}(T)$ 。第2

级DBA的具体带宽分配算法如下。

(1)如果

$$B_i^{\text{act}}(T) = \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} B_{i,j}^{\text{req}}(T) = \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} \sum_{k=1}^3 B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$$

说明供等于求。此时各个STA中每个优先级业务类型被分配的带宽等于其带宽请求值, 如式(12)所示。

$$B_{i,j,k}^{\text{act}}(T) = B_{i,j,k}^{\text{req}}(T), \quad j = 1, 2, \dots, m_i^{\text{ss}}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (12)$$

(2)从3.1节可知, 在周期 T 中, 第 i 个ONU-AP从OLT处获得的实际可用带宽 $B_i^{\text{act}}(T)$ 不会大于该ONU-AP中所有STA的所有优先级业务类型的带宽请求总和, 即不会出现供大于求的情况 $B_i^{\text{act}}(T) > \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} B_{i,j}^{\text{req}}(T)$ 。

(3)若 $B_i^{\text{act}}(T) < \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} B_{i,j}^{\text{req}}(T)$, 说明供小于求。

先根据式(13)计算第 i 个ONU-AP所连接的各优先级业务类型 k 可获得的总带宽 $B_{i,P_k}^{\text{act}}(T)$, 其中 P_k 为优先级业务类型, $k = 1, 2, 3$ 。然后根据式(14)统计各优先级业务类型可提供的剩余带宽总和 $\psi_f(T)$, 其中 $B_{i,P_k}^{\text{req}}(T)$ 为第 i 个ONU-AP所连接的优先级业务类型 k 请求的总带宽, $B_{i,P_k}^{\text{req}}(T) = \sum_{j=1}^{m_i^{\text{ss}}} B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$ 。

$$B_{i,P_k}^{\text{act}}(T) = B_i^{\text{act}}(T) \times \gamma_k, \quad k = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$\psi_f(T) = \sum_{k=1}^3 \max(B_{i,P_k}^{\text{act}}(T) - B_{i,P_k}^{\text{req}}(T), 0) \quad (14)$$

然后按优先级从大到小的顺序, 依次比较 $B_{i,P_k}^{\text{act}}(T)$ 和 $B_{i,P_k}^{\text{req}}(T)$ 的值。若 $B_{i,P_k}^{\text{act}}(T) \geq B_{i,P_k}^{\text{req}}(T)$, 说明优先级为 k 的业务类型的请求带宽小于其可获得的带宽。为避免带宽浪费, 第 i 个ONU-AP所连接的各个STA中优先级为 k 的业务类型实际被分配的带宽等于其带宽请求值。

若 $B_{i,P_k}^{\text{act}}(T) < B_{i,P_k}^{\text{req}}(T)$, 说明优先级 k 的业务类型请求的总带宽大于可供分配的总带宽。此时本文根据第 j 个STA中优先级为 k 的业务类型的带宽请求值占不同STA所有优先级为 k 的业务带宽请求值的百分比来计算其带宽分配比例, 以提高带宽利用率。根据 $\psi_f(T)$ 值是否为0来判断是否有剩余带宽。若 $\psi_f(T) = 0$, 说明无剩余带宽可供分配, 按照式(15)来分配带宽; 如果 $\psi_f(T) > 0$, 说明有剩余带宽, 则按照式(16)分配带宽, 并按照式(17)来更新 $\psi_f(T)$ 值。其中 $S_{i,k}$ 表示有优先级业务类型 k 的所有连接到第 i 个ONU-AP的STA集合。需要说明的是, 式(16)中取最小值操作是为了保证所分配的带宽资源不超过请求值, 以避免带宽资源浪费。此外, 剩余带宽优先分配给优先级较高的业务类型, 即首先给 $k=1$ 的业务类型分配带宽, 分配完毕后如果还有剩余带宽, 则继续给 $k=2$ 和 3 的业务类型分配。

$$B_{i,j,k}^{\text{act}}(T) = \frac{B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)}{\sum_{j \in S_{i,k}} B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)} \times B_{i,P_k}^{\text{act}}(T), \quad \forall j \in S_{i,k} \quad (15)$$

$$B_{i,j,k}^{\text{act}}(T) = \min \left[\frac{B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)}{\sum_{j \in S_{i,k}} B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)} \times (B_{i,P_k}^{\text{act}}(T) + \psi_f(T)), B_{i,j,k}^{\text{req}}(T) \right], \quad \forall j \in S_{i,k} \quad (16)$$

$$\psi_f(T) = \max(\psi_f(T) - B_{i,P_k}^{\text{req}} + B_{i,P_k}^{\text{act}}, 0) \quad (17)$$

算法的伪代码如表2所示。该级DBA算法的主要操作是为每个ONU-AP连接的每个STA中不同优先级的业务类型分配剩余带宽。该级算法时间复杂度为 $T\left(\sum_{i=1}^N m_i^{ss}\right)$ 。由于两级DBA算法依次执行，故总时间复杂度为 $T(Nm) + T\left(\sum_{i=1}^N m_i^{ss}\right)$ ，与文献[4-6]所提DBA机制的时间复杂度相同。

表2 ONU-AP执行的第2级DBA算法伪代码

1	获得各个 $B_{i,j}^{\text{req}}(T)$ 和 $B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$, $j = 1, 2, \dots, m_i^{ss}$, $k = 1, 2, 3$ 以及 $B_i^{\text{act}}(T)$ 值
2	if $B_i^{\text{act}}(T) = \sum_{j=1}^{m_i^{ss}} B_{i,j}^{\text{req}}(T)$ then
3	$B_{i,j,k}^{\text{act}}(T) = B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$, $j = 1, 2, \dots, m_i^{ss}$, $k = 1, 2, 3$
4	else 根据式(13)和式(14)计算 $B_{i,P_k}^{\text{act}}(T)$, $k=1,2,3$ 和 $\psi_f(T)$
5	for ($k=1$ to 3)
6	if $B_{i,P_k}^{\text{act}}(T) \geq B_{i,P_k}^{\text{req}}(T)$ then
7	$B_{i,j,k}^{\text{act}}(T) = B_{i,j,k}^{\text{req}}(T)$, $\forall j \in S_{i,k}$
8	else if $\psi_f(T) = 0$
9	根据式(15)计算各个 $B_{i,j,k}^{\text{act}}(T)$, $\forall j \in S_{i,k}$
10	Else { 根据式(16)计算各个 $B_{i,j,k}^{\text{act}}(T)$, $\forall j \in S_{i,k}$
11	根据式(17)更新 $\psi_f(T)$ 值 }
12	endif
13	endif
14	endif

4 性能仿真与分析

为评价本文所提的DBA机制性能,本文采用C语言编程对所提算法和文献[5]提出的WE-DBA算法的公平系数、上行信道利用率和吞吐量等性能指标进行仿真和分析。仿真平台中EPON系统的仿真借鉴了NS3中XG-PON模块的设计思路。OLT以队列形式存储来自各个ONU-AP的数据包,当来自各个ONU-AP的数据包经过传输延迟和链路传播延迟到达OLT后,在OLT中触发读取队列中数据包的事件并执行DBA算法。STA作为客户端线程,

不断向其关联的ONU-AP发送数据包。本文采用文献[16]中定义的多优先级业务场景下的FI作为衡量DBA算法的公平性指标,如式(19)所示。其中 S_i 表示第 i 种优先级业务类型所分配到的带宽资源, ϕ_i 为该优先级业务类型对应的权重值, n 为优先级业务类型数目。上行信道利用率采用文献[13]的定义,如式(20)所示。其中, G_i 为分配给第 i 个ONU-AP的上行传输时间, Γ 为单个EPON轮询周期时间长度。

$$FI = \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\phi_i} \right)^2 / \left(n \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{\phi_i} \right)^2 \right) \quad (19)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^N G_i / \Gamma \quad (20)$$

本文部分主要仿真参数在表3中列出。与文献[5]的仿真模型类似,本文中流量负载参数通过STA数量来体现。每个STA都可生成3种业务流量,CBR业务(包速率恒定为512 kbps),VBR业务(包均值速率1 Mbps)和BE业务(包均值速率512 kbp)。VBR和BE业务流量的产生服从 $\alpha(\text{on})=2.2$, $\alpha(\text{off})=1.5$ 的pareto分布。CBR,VBR和BE业务分别对应3种不同优先级,其权值分别设置为0.5,0.3和0.2,即CBR业务优先级最高,BE业务最低。由于所有STA产生的业务流量最终会在ONU-AP处叠加,故系统中STA数量可近似反映网络业务流量负载。STA数量较少时,流量负载低。

表3 部分主要仿真参数

ONU-AP的数量	16
上行信道带宽	1 Gbps
保护时间	1 μ s
OLT与ONU-AP之间的传输距离	15 km
单个轮询周期长度	2 ms
历史轮询周期数 m	5
WLAN无线信道带宽	20 MHz

图3给出了本文所提的DBA和WE-DBA机制随STA数量变化时的公平系数FI。横坐标STA的数量是指单个ONU-AP所连接的STA数目。从图3中可看出,本文算法在业务负载较低和较高时均能取得较好公平性,这是由于本文算法考虑了历史 m 个周期内实际使用的带宽资源比例和权值来分配当前周期的带宽资源,从而保证较长时间内带宽资源分配的公平性。WE-DBA机制下的FI值则随业务负载的增加而增加,当业务负载达到并超过饱和值时(STA=70时),其FI值下降明显。图4为

WE-DBA 与本文所提 DBA 机制的上行信道利用率随 STA 数量变化情况。可看出当 STA 数量较少, 信道处于非饱和状态时, 两种机制下的信道利用率都较低。但随着 STA 数量增加, 业务负载量增加, 信道利用率也随之提高。当网络业务负载量达到并超过饱和状态时, 信道利用率均趋于稳定值。本文所提 DBA 下的信道利用率始终优于 WE-DBA 机制。这是由于本文采取将剩余带宽分配和各优先级业务带宽请求结合的准则, 使所分配带宽不会大于所需带宽, 避免了带宽分配过程中的浪费, 从而提高信道利用率。

图 5 和图 6 分别显示了本文所提 DBA 和 WE-DBA 机制下 3 种业务类型的平均吞吐量和总吞吐量随着 STA 数量变化的情况。可以看出, 当信道处于非饱和状态下时, 带宽资源充足, 每种业务类型均可获得所请求的带宽资源, 其平均吞吐量主要和其业务负载有关, 不同业务类型获得的平均吞吐量可能与其优先级不一致。此外, 3 种业务类型的平均吞吐量都随着 STA 数量的增加而增加。当到达业务负载饱和点后, 带宽资源不能满足带宽请求, 3 种业务类型的平均吞吐量均趋于稳定, 但有轻微波动。不同业务类型所获得的平均吞吐量与其优先级是一致的, 即优先级最高的 CBR 业务的吞吐量最高, BE 业务的的吞吐量最低。本文所提 DBA 机制的业务平

均吞吐量和总吞吐量均优于 WE-DBA 机制。为比较本文算法和 WE-DBA 的吞吐量性能, 本文借鉴文献 [5] 定义的吞吐量变化比例 (Throughput Variance Percentage, TVP), 对两种 DBA 机制下 3 种业务类型的 TVP 进行了仿真和计算, 如式 (21) 所示, 其中 $Thr_{proposed}$ 和 Thr_{WE-DBA} 分别为本文所提 DBA 机制 WE-DBA 机制下的平均吞吐量。TVP 值反映了所提 DBA 机制和 WE-DBA 机制下平均吞吐量的差异程度。图 7 的仿真结果显示本文所提 DBA 机制下 3 种业务类型的吞吐量性能都优于 WE-DBA。最好情况下, BE 业务的吞吐量增益可达 44%。随着 STA 数量增加, 业务负载量不断增加并超过饱和值, 网络吞吐量逐渐趋于稳定, 两种机制下 3 种业务类型的吞吐量差异逐渐缩小, 并趋于稳定且伴随着轻微波动。

$$TVP = \frac{Thr_{proposed} - Thr_{WE-DBA}}{Thr_{WE-DBA}} \times 100\% \quad (21)$$

5 结论

公平性和最大化信道利用率是 DBA 机制的两个重要设计目标。本文针对 EPON 和 WLAN 网络构成的 FiWi 网络, 考虑不同用户和业务类型的不同 QoS 需求, 网络业务负载具有的突发性和不可预测性, 提出了一种上行分级动态带宽分配策略。第 1 级 DBA 机制致力于实现多个轮询周期内的长期比

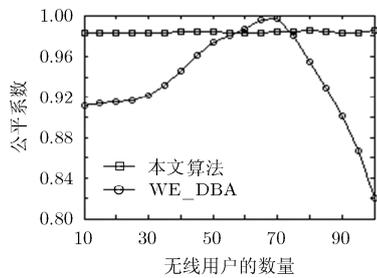


图 3 本文所提机制与 WE-DBA 机制的 FI 比较

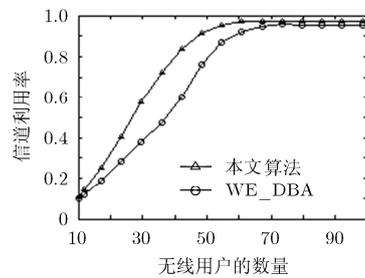


图 4 本文所提机制与 WE-DBA 机制的信道利用率比较

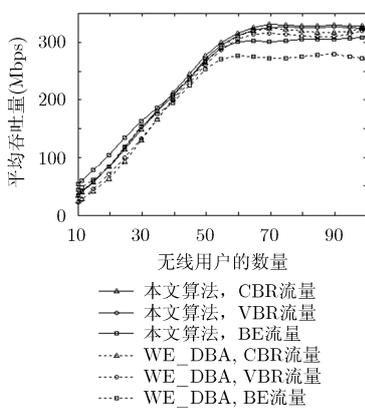


图 5 两种机制下 3 种业务类型平均吞吐量

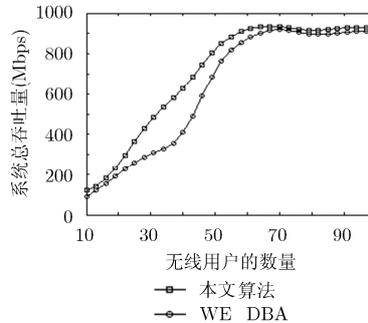


图 6 两种 DBA 机制下系统总吞吐量

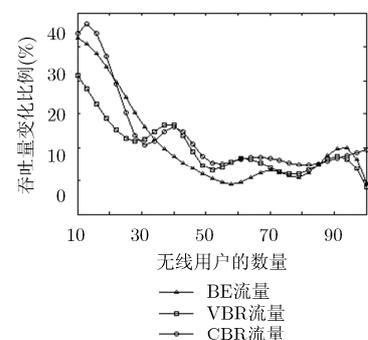


图 7 两种机制下 3 种业务类型的 TVP

例公平性和高信道利用率。第 2 级 DBA 机制根据不同无线用户中同一优先级业务类型的带宽请求比例来分配带宽, 使各业务类型所获得的带宽不会大于其所请求带宽, 避免带宽浪费。而按照业务优先级递减的次序分配剩余带宽的思路使得高优先级业务的带宽需求会优先得到保障。仿真实验表明本文所提出分级 DBA 机制是有效的, 特别在网络高业务负载, 带宽资源小于用户带宽需求情况下, 能较好地保证比例公平性、信道利用率和吞吐量。

参 考 文 献

- [1] IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements, part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 3: Enhancements for very high throughput in the 60 GHz band[S]. March 2014.
 - [2] GHAZISAIDI N and MAIER M. Fiber-Wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Network*. 2011, 17(1): 36-42. doi: 10.1109/MNET.2011.5687951.
 - [3] IEEE 802.3ah task force home page, IEEE P802.3ah Ethernet in the first mile task force[OL]. <http://www.ieee802.org/3/efm.2004>.
 - [4] SARIGIANNIDIS A G, ILORIDOU M, NICOPOLITIDIS P, et al. Architectures and bandwidth allocation schemes for hybrid wireless-optical networks[J]. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 427-468. doi: 10.1109/COMST.2014.2356640.
 - [5] YANG K, OU Shumao, GUILD Ken, et al. Convergence of Ethernet PON and IEEE 802.16 broadband access networks and its QoS-aware dynamic bandwidth allocation scheme[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(2): 101-116. doi: 10.1109/JSAC.2009.090202.
 - [6] JIANG Ling, FU MingLei, and LE Zichun. Hierarchical QoS-aware dynamic bandwidth allocation algorithm for wireless optical broadband access network[C]. International Conference on Electronics, Communications and Control, Ningbo, China, 2011: 4329-4332. doi: 10.1109/ICECC.2011.6066634.
 - [7] SARIGIANNIDIS P, LOUTA M, PAPANIMITRIOU G, et al. Alleviating the high propagation delays in FiWi networks: A prediction-based DBA scheme for 10G-EPON-WiMAX systems[C]. International Workshop on Fiber Optics in Access Network, Brno, Czechoslovakia, 2015: 45-50. doi: 10.1109/FOAN.2015.7320478.
 - [8] RANAWEERA C, WONG E, LIM C, et al. Architecture discovery enabled resource allocation mechanism for next generation optical-wireless converged networks[J]. *Optical Communication Network*, 2013, 5(9): 1083-1095.
 - [9] SARIGIANNIDIS A and NICOPOLITIDIS P. Quality-of-service-aware fair bandwidth allocation scheme for fiber wireless networks[J]. *IET Networks*, 2016, 5 (3): 56-63. doi: 10.1049/iet-net.2015.0090.
 - [10] NAM R, NM D, SK S, et al. The delay and fairness study of a centralized EPON DBA algorithm[C]. IEEE Region 10 Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014: 301-305. doi: 10.1109/TENCONSpring.2014.6863046.
 - [11] LI Yan, WANG Jianping, and QIAO Chunming. Integrated Fiber-Wireless (FiWi) access networks supporting inter-ONU communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(5): 714-724. doi: 10.1109/JLT.2009.2038598.
 - [12] HE Rong, XIE Hui, and FANG Xuming. A long-term proportional fair dynamic bandwidth allocation scheme for EPON[C]. The 25th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC). Chengdu, China, 2016: 1-5. doi: 10.1109/WOCC.2016.7506545.
 - [13] MCGARRY M P, REISSLEIN M, AURZADA F, et al. Shortest Propagation Delay (SPD) first scheduling for EPONs with heterogeneous propagation delays[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(6): 849-862. doi: 10.1109/JSAC.2010.100810.
 - [14] VAN D P, RIMAL B Pr, 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.
 - [15] MCGARRY M P, REISSLEIN M, COLBOURN C J, et al. Just-in-time scheduling for multichannel EPONs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1204-1216. doi: 10.1109/JLT.2008.919366.
 - [16] HE Rong and FANG Xuming. A fair MAC scheme for EDCA based wireless networks[C]. International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, Washington DC, USA, 2009: 1-6. doi: 10.1109/TRIDENTCOM.2009.4976242.
- 何 蓉: 女, 1974 年生, 副教授, 研究方向为无线通信网络、无线资源管理。
 谢 辉: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为无线资源管理。
 方旭明: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信网络、高速铁路宽带无线接入。