

doi:10.3788/gzxb20134206.0654

基于 OFDM-PON 的媒质接入控制协议设计

乔耀军, 丁福玲, 纪越峰

(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:在以太网无源光网络帧结构的基础上,针对正交频分复用无源光网络的特点,提出了一种适用于正交频分复用无源光网络的媒质接入控制协议,对多点控制协议、控制消息的结构、业务优先级等进行了设计,提出了一种提供服务质量保障的特殊情况下区别用户服务等级的动态带宽分配算法.该算法引入两级调度的机制,将带宽资源的分配分为不同优先级业务的调度和同类型业务下不同等级的光网络单元调度.文章对提出协议的时延、丢包率、吞吐量等方面的性能进行了仿真,仿真结果显示提出的媒质接入控制协议很好地实现了对各业务的服务质量保障,符合多业务接入对服务质量等的需求.

关键词:光接入网;媒质接入控制协议;服务质量;动态带宽分配

中图分类号:TN915.63; TN913.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2013)06-0654-7

Media Access Control Protocol Design in OFDM-PON

QIAO Yao-jun, DING Fu-ling, JI Yue-feng

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

Abstract: A novel media access control protocol is proposed based on EPON considering of the character of orthogonal frequency-division multiplexing passive optical network. Multi-point control protocol, control message format and the priority of services are designed and a dynamic bandwidth allocation algorithms is proposed, which supports multi-service access and ensures quality of service distinguishing user level in specified case. The proposed algorithm uses two-level mechanisms and the allocating progress can be divided into two steps—schedule for different priority of services and schedule for different level optical network unit. The proposed protocol is simulated and the results of delay, packet loss ratio and throughput performance show that the proposed protocol guarantees the quality of service requirements for different services excellently, and meets quality of service requirements of multi-service access.

Key words: Optical access network; Media access control protocol; Quality of service; Dynamic bandwidth allocation

0 引言

目前,10 Gbps 无源光网络技术已经开始商用,由于新业务的出现和高清视频等业务的增长会带来用户带宽需求的迅速增加,未来的光接入网将依然面临接入容量大、用户数量多、覆盖范围广的挑战^[1-2].相比目前主流的时分复用无源光网络,正交

频分复用无源光网络(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Passive Optical Network, OFDM-PON)具有更高的灵活性和更好的传输性能^[3-4].并且,正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiplex, OFDM)技术可以把对于高成本光器件的要求转移到低成本电器件的要求,而随着集成电路技术的发展,OFDM-PON 更容易降低实

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61271192, 60932004)、国家高技术研究发展计划(No. 2013AA013401)和国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB315705)资助

第一作者:乔耀军(1972—),男,副教授,博士,主要研究方向为光 OFDM 技术与高速传输系统. Email: qiao@bupt.edu.cn

收稿日期:2013-01-15; **录用日期:**2013-02-27

现成本. 因而,OFDM-PON 是光接入网的理想选择之一,也受到各界的广泛关注^[5-6],现在关于 OFDM-PON 技术的研究已经取得了丰硕的成果^[7-12]. 现有的研究表明,OFDM-PON 传输性能优秀,灵活性强,易于控制管理,是 40 Gbps 甚至 100 Gbps 的 NG-PON2 技术的有竞争力的方案之一^[13].

本文根据 OFDM-PON 系统的特点,设计了一种适用于 OFDM-PON 的媒质接入控制协议,并且对设计协议的丢包率、时延、吞吐量等性能进行了仿真分析.

1 OFDM-PON媒质接入控制协议设计

OFDM-PON MAC 层的任务是转发用户数据,并对转发进行管理,这个管理的核心职责是根据各个光网络单元(Optical Network Unit,ONU)的业务服务质量和吞吐量的要求调度网络资源,在各个 ONU 间动态的分配带宽. 为了完成网络控制和管理,MAC 层除了要进行用户数据调度、转发之外,还要产生、发送、接收和解析多种控制帧,以完成 ONU 注册、安全认证、带宽申请与授权、信道探测、链路维护等功能.

1.1 多点控制协议

要实现多个 ONU 通过共享介质对光线路终端(Optical Line Terminal,OLT)进行数据传输,必须引入一种有效的控制机制. 多点控制协议的开销小、效率高,在无源光网络中常常被采用. 在 OFDM-PON 系统中我们也使用多点控制协议作为链路层控制协议. 原来的多点控制协议是基于 TDMA 的无源光网络^[14],为了支持 OFDMA,本文对 EPON

的多点控制协议进行了一定的修改,并且定义了 5 种适用于 OFDM-PON 的控制消息^[15].

初始化主要指 ONU 的自动发现和注册过程. 初始化过程中使用的控制消息包括注册请求 REGISTER_REQ、注册 REGISTER 和注册确认 REGISTER_ACK. 在初始化过程中,OLT 可以发现新 ONU 加入网络的请求,OLT 根据网络资源、安全性等决定是否接纳该 ONU. 若 OLT 接受该 ONU 进入网络拓扑,则 OLT 需要对 ONU 的一些必要信息进行记录,完成 ONU 注册过程.

在正常工作时,ONU 在 REPORT 中报告队列情况,向 OLT 发送带宽分配申请. OLT 在收到 ONU 的带宽申请后,按照动态带宽分配算法进行带宽资源分配,然后向 ONU 发送 GATE 消息,对 ONU 的带宽申请做出应答并分配带宽. 除了完成带宽资源分配,通过 GATE 和 REPORT 两种控制消息也可以进行动态功率控制和测距.

本文中提出的媒质接入控制协议专门占用几个子载波作为控制信道,进行控制信息等的传输,如图 1. 所有控制帧均在专门的控制信道上进行传输.

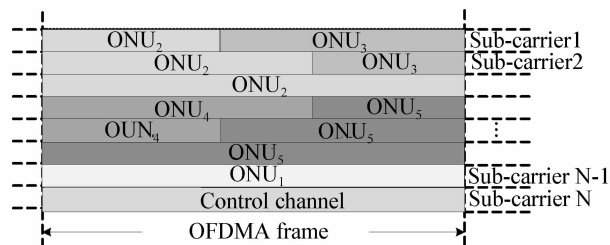


图 1 OFDM-PON 帧的构造
Fig. 1 Architecture of OFDM-PON frame

图 2 是 OFDM-PON 系统的网络结构. OFDM-

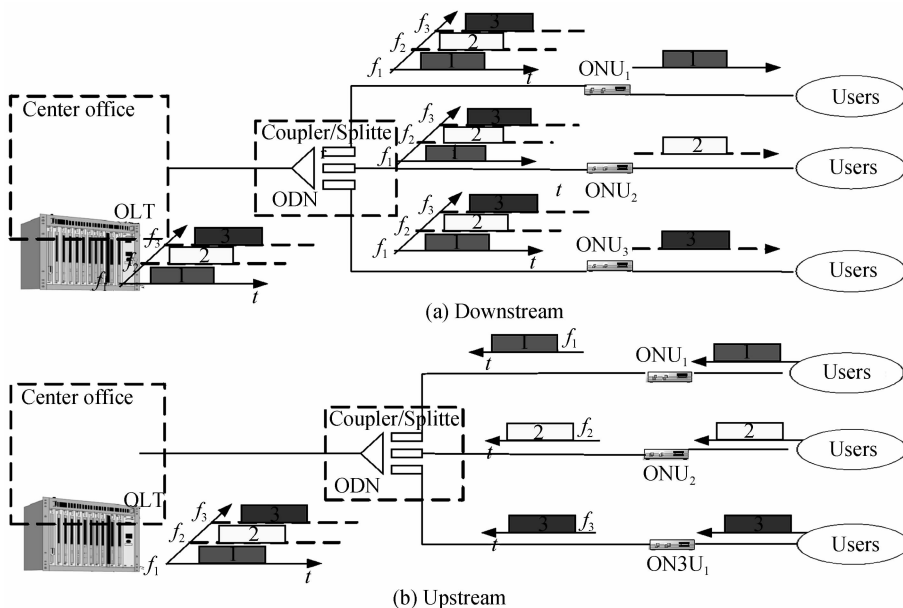


图 2 OFDM-PON 系统结构
Fig. 2 Transmission and control in OFDM-PON

PON 系统主要是由光配线网络 (Optical Distribution Network, ODN)、OLT 和多个 ONU 组成. 在下行方向如图 2(a), 将 OLT 发送给 ONU 的信息复制多份, 以广播的形式发送到各个 ONU. 在上行方向则是多对一, 如图 2(b), 需要通过多点控制协议对上行信息进行传输控制, 以实现带宽资源的合理使用并避免发生碰撞.

图 3 是 OFDM-PON 系统中的信令传输控制过程. ONU 在分配的子载波上进行数据传输的同时, 也在控制信道上发送 REPORT, 向 OLT 传送当前的队列状态. OLT 在收集到 ONU 的 REPORT 后, 读取其中的队列状态信息作为该 ONU 的带宽请求, 然后依据动态带宽分配算法进行带宽资源的分配. 在完成带宽分配之后, OLT 向 ONU 发送 GATE 消息, 在 GATE 消息中承载着 ONU 在下一个周期中的带宽分配信息. ONU 在收到 OLT 发送的 GATE 消息后, 读取带宽资源分配结果. 在下一个周期的指定时隙和指定子载波, ONU 将进行上行数据的传输.

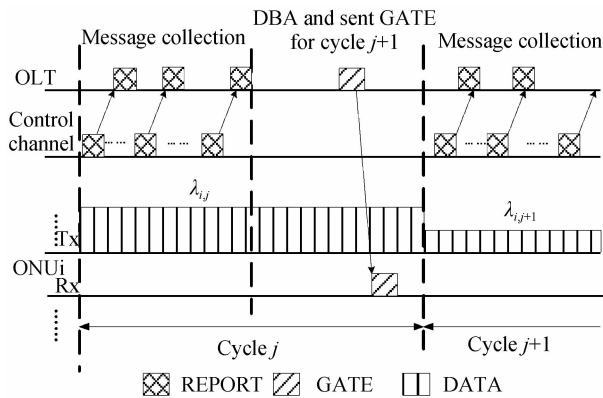


图 3 OFDM-PON 传输控制示意图

Fig. 3 Transmission and control in OFDM-PON

本文提出的媒质接入控制协议中采用固定周期的方式^[16]. 相对于可变周期的媒质接入控制协议, 固定周期可以简化媒质接入控制协议, 极大地降低系统的复杂度.

1.2 帧结构设计

从多点控制协议可以看出, 在整个的多点控制过程中涉及到的控制消息主要有 5 种: 报告消息 REPORT、授权消息 GATE、注册请求消息 REGISTER_REQ、注册消息 REGISTER、注册确认消息 REGISTER_ACK. 通过对 EPON 的控制帧进行了一定的修改, 定义了上述的 5 种适用于 OFDM-PON 的控制消息.

对于控制消息的设置, 除去前导码、帧起始定界符的长度都是 64 字节. 这种设置可以避免控制帧因为帧的长度过小被认作碎片帧而丢弃. 多点控制协

议的控制帧的通用帧格式如图 4.

Octets	
6	Destination address
6	Source address
2	Length/Type=80-08
2	Opcode
4	Time stamp
40	Data/Reserved
4	FCS

图 4 多点控制协议通用控制帧格式

Fig. 4 MPCP control frame format

下面将对控制消息的信息域进行介绍.

图 5 是 GATE 的信息域示意图. GATE 的信息域是在 EPON 的基础上进行修改得到的. 对于 GATE 消息的信息域, 除了沿用 EPON 中的起始时间和长度字段, 设计的 GATE 消息新加了子载波/子信道编号字段, 以实现 OFDM-PON 的子载波、时隙的二维带宽资源分配.

1	Num of gates
4	Grant #1 start time
2	Grant #1 length
2	Grant #1 Sub_channel/Sub-carrier No.
4	Grant #2 start time
2	Grant #2 length
2	Grant #2 Sub_channel/Sub-carrier No.
4	Grant #3 start time
2	Grant #3 length
2	Grant #3 Sub_channel/Sub-carrier No.
4	Grant #4 start time
2	Grant #4 length
2	Grant #4 Sub_channel/Sub-carrier No.
2	Sync time
5	Reserved

图 5 GATE 消息信息域示意图

Fig. 5 Data field of GATE message

图 6 是 REPORT 消息的信息域示意图. 在报告位图区域, 最多对 8 个优先级的报告消息进行指示, 8 个比特的状态分别对应了 8 个队列是否存在, 若图中对应位置为 1, 则表示该位置对应队列存在.

多点控制协议的控制帧一共有五种. 除了用于维持系统正常运作、完成带宽分配的 GATE、REPORT 消息之外, 还有用于新的 ONU 的发现、注册和注销的注册请求消息 REGISTER_REQ、注册消息 REGISTER 和注册确认消息 REGISTER_

1	Num of queue sets
1	Report bit map
2	Queue #0 report
2	Queue #1 report
2	Queue #2 report
2	Queue #3 report
2	Queue #4 report
2	Queue #5 report
2	Queue #6 report
2	Queue #7 report
2	Sync time
20	Reserved

图 6 REPORT 消息信息域示意图

Fig. 6 Data field of REPORT message

ACK. 由于这三种控制信息的功能不涉及到频率/子载波的问题,与 TDM-PON 的功能类似,因而其结构的设计可以不进行修改,完全参照 EPON 进行设计.

2 动态带宽分配算法设计

2.1 业务优先级设置

为了对不同优先级别的业务提供不同的服务质量保障,在每个 ONU 的缓存中都设置了快速转发 (Expedited Forwarding, EF)、确保转发 (Assured Forwarding, AF) 和尽力转发 (Best Effort, BE) 三个不同优先级的队列. EF 业务为最高优先级的业务,其流量稳定,有一定的周期性,带宽需求比较恒定,对时延等要求较苛刻. AF 业务为次高优先级业务,对时延不敏感但是对于带宽大小要求保障. BE 业务的优先级最低,对时延不敏感,不需要保障带宽.

对于带宽分配,可以采取两步分配的策略:首先进行不同优先级业务的带宽资源分配,第二步进行 ONU 的带宽资源分配. 下面分别就不同优先级的业务的资源调度和 ONU 的带宽资源分配进行说明.

2.2 不同优先级的业务资源调度

在第 i 周期时,OLT 对所有 ONU 的带宽申请消息进行收集,包含各个 ONU 的 EF、AF、BE 三种业务类型的带宽申请量,用式(1)的矩阵 \mathbf{B} 对带宽申请量进行表示.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{1,1} & \cdots & B_{1,i} & \cdots & B_{1,N} \\ B_{2,1} & \cdots & B_{2,i} & \cdots & B_{2,N} \\ B_{3,1} & \cdots & B_{3,i} & \cdots & B_{3,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在优先级间的带宽资源分配时,分配给三种业务的带宽资源大小分别用 W_{EF} 、 W_{AF} 和 W_{BE} 表示.

首先为 EF 业务进行带宽资源分配. EF 业务是最高优先级业务,需要极好的带宽保障. 而且 EF 业务的带宽需求具有很好的可预知性和很好的稳定

性. 如式(2)所示,为保证服务质量,在算法中对于 EF 业务的带宽申请完全满足.

$$W_{EF} = \sum_{i=1}^N B_{1,i} \quad (2)$$

在完成对 EF 业务的带宽分配后,统计系统剩余的带宽值 W_{rest} . 式(3)是统计系统剩余的带宽值 W_{rest} 的表达式. 其中公式中的 $W_{traffic}$ 为业务信道带宽.

$$W_{rest} = W_{traffic} - \sum_{i=1}^N W_{1,i} \quad (3)$$

在完成 EF 业务的带宽分配后,接下来就需要进行 AF、BE 业务的带宽分配. 首先,算法计算 AF、BE 业务总的带宽申请值,若 W_{rest} 可以满足 AF、BE 业务的带宽请求,即式(4)能够满足,那么算法将按照式(5)将带宽资源分配给各业务优先级.

$$\sum_{i=1}^N (B_{2,i} + B_{3,i}) \leq W_{rest} \quad (4)$$

$$\begin{cases} W_{AF} = \frac{\sum_{i=1}^N B_{2,i}}{\sum_{i=1}^N (B_{2,i} + B_{3,i})} W_{rest} \\ W_{BE} = \frac{\sum_{i=1}^N B_{3,i}}{\sum_{i=1}^N (B_{2,i} + B_{3,i})} W_{rest} \end{cases} \quad (5)$$

若 W_{rest} 不能满足 AF、BE 业务的带宽请求,也就是说式(4)不成立,AF、BE 业务的带宽申请值大于系统剩余带宽的情况下,本文引入 m 参量调节的比例分配进行 AF、BE 业务之间的带宽资源分配. 这种分配方式确保了各优先级之间的相对公平,避免某优先级业务量过大而占据其他优先级带宽、业务无法正常运行的现象发生. 具体的分配方法如式(6)所示.

$$\begin{cases} W_{AF} = W_{rest} \times m \\ W_{BE} = W_{rest} \times (1 - m) \end{cases} \quad (6)$$

式中参量 m 由式(7)确定. k 决定优先性和公平性之间的平衡,调节 k 的大小可以改变 AF 相对 BE 业务的优先性.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N B_{2,i}}{\sum_{i=1}^N B_{3,i}} + k, 0 \leq k \leq 1 - \frac{\sum_{i=1}^N B_{2,i}}{\sum_{i=1}^N B_{3,i}} \quad (7)$$

至此,完成了各个优先级间的带宽分配,得到了 W_{EF} 、 W_{AF} 和 W_{BE} 三个数据的分配结果.

2.3 ONU 的带宽资源分配

在完成了不同优先级业务的带宽资源调度之后得到了三个不同优先级的业务分得的带宽依次为 W_{EF} 、 W_{AF} 和 W_{BE} ,接下来需要对各个 ONU 进行三种业务带宽的分配.

ONU 划分了三个不同的等级,等级由高到低

分别是 level1、level2、level3. 在进行每个 ONU 的带宽资源分配时, 遵循下面的规则:

如果业务带宽满足所有 ONU 的带宽请求, 以 AF 业务带宽的分配为例进行说明.

若对于三个不同等级的 ONU 带宽请求量 $B_{1,i}$ 、 $B_{2,i}$ 、 $B_{3,i}$, 满足式(8), 则根据带宽请求, 按比例分配带宽资源.

$$\sum_{i=1}^N (B_{1,i} + B_{2,i} + B_{3,i}) \leq W_{AF} \quad (8)$$

若不满足式(8), 则带宽资源不充足. 此时应该按照 ONU 的等级分配, 通过引入 m 参量的方法, 给各个等级的 ONU 以不同的带宽保障: 等级高的优先级较好的满足带宽请求, 等级较低的 ONU 分配的带宽资源较少. 相同等级的 ONU 的资源分配遵循最小请求优先的规则. 以最高优先级的 level1 为例, 若该等级的 N_1 个 ONU 通过 m 参量的方法分得的 AF 业务总带宽为 $W_{AF,1}$, 则此时需要查找该等级的 N_1 个 ONU 对应应在 AF 业务带宽请求 $B_{i,2}$ 中的最小值, 以此为各 ONU 分配带宽, 然后按照式(9)计算剩余带宽和未满足的带宽请求.

$$W_{rest,2}^1 = W_{AF,1} - N_1^* \min_{i=1,2,\dots,N_1} \{B_{i,2}\}$$

$$req_{i,2}^1 = B_{i,2} - \min_{i=1,2,\dots,N_1} \{B_{i,2}\} \quad (9)$$

式中 $W_{rest,2}^1$ 表示经过 1 次分配后剩余带宽, $req_{i,2}^1$ 表示经过 1 次分配仍未满足的带宽请求.

对于剩余带宽的分配, 依然从未满足的带宽请求中查找最小值, 以此最小值分配给各个 ONU, 然后重新计算剩余带宽和未满足的带宽请求值. 循环该过程直至剩余带宽的数值不足以为每个不满足带宽请求的 ONU 分配当前的最小带宽请求值, 即满足式(10).

$$W_{rest,2}^k \leq n^* \min_{i=1,2,\dots,n} \{req_{i,2}^{k-1}\} \quad (10)$$

式中, $W_{rest,2}^k$ 表示经过 k 次分配以后的剩余带宽, $req_{i,2}^k$ 表示经过 k 次分配仍未满足的带宽请求, n 表示此时带宽请求未得到满足的 ONU 的个数. 此时将剩余带宽均匀分配给各个 ONU. 至此, level1 的 AF 业务带宽分配已经完成. 每个 ONU 分配的带宽值为上述循环中分得的带宽值的累加.

BE 业务的带宽分配也遵循同样的规则.

至此, 已经完成了所有 ONU 的三种不同优先级业务的带宽资源分配.

在带宽分配运算完成后, OLT 将含有带宽分配信息的矩阵通过广播的形式发送给所有 ONU,

ONU 以此分配结果进行下一周期的数据传输.

3 仿真以及结果分析

为了验证本文提出的媒质接入控制协议, 对该协议进行仿真, 并且对实验得到的结果进行分析.

3.1 仿真实验

设定系统的上行带宽为 20Gbps, OFDM-PON 系统由一个 OLT 和 128 个 ONU 组成, ONU 与 OLT 之间的距离设定为 40 km. 每个 ONU 都产生 EF、AF、BE 三种类型的业务, 为 3 种类型的业务各设置一个队列, ONU 上报带宽请求时需要上报三种类型业务的队列长度. 仿真中设定有 2048 个子载波, ONU 的缓存大小设置为 1MB. ONU 划分了三个不同的等级, 等级由高到低分别是 level1、level2、level3, 数量分别为 32、32 和 64.

仿真中设置了不同大小的业务量以模拟网络中用户数据业务不同时, 网络的各项性能参量不同. 仿真中通过网络载荷参量控制各项业务数据的产生, 并且将产生的业务速率对网络带宽归一化, 即网络载荷为 1 时, 对应的业务数据总量为网络带宽.

3.2 实验结果以及分析

通过仿真可以得到在不同网络载荷的情况下该算法与服务质量相关的平均包时延 (Packet Average Delay, PAD) 和平均丢包率 (Packet Loss Ratio, PLR). 仿真在不同网络载荷的情况下得到的平均包时延性能曲线如图 6. 由图 6 可以看出, 在网络载荷大于 0.6 时, 提出的算法中各业务类型的平均包时延开始急剧增加. 对于最高优先级的 EF 业务, 时延一直保持的稳定的、较低的水平. AF、BE 业务的时延大于 EF 业务, 同时由于引入了 m 参量的机制, 使得 AF 业务有一定的带宽保障, 因而其时延也小于 BE 业务. 提出的算法在平均包时延性能上略优于恒定比特率算法^[17]. 这是由于与恒定比特率算法不同, 提出的算法首先进行的是业务优先级之间的带宽分配, 可以提供三种业务类型的相对公平的服务质量保障.

从图 7 中可以看出, 提出的算法 EF 业务的平均包时延满足语音和 TDM 接入业务的时延小于 1.5 ms 的建议. 这是由于引入了带宽预分配机制. 带宽预分配机制消除了由于流水线结构带来的本周期的数据包需要等待至下一周期带宽申请获得响应之后才能传输的一个周期的固定时延. AE 和 BE 业务在网络载荷低于 0.6 时平均包时延在 2 ms 以内.

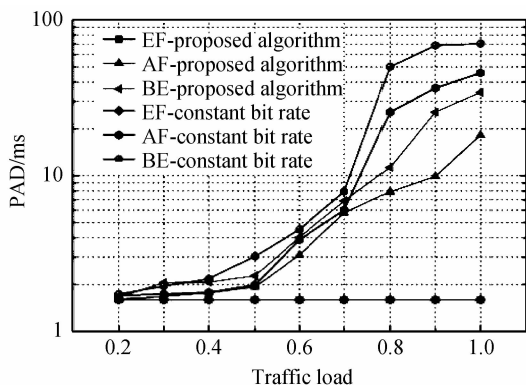


图 7 平均包时延性能曲线

Fig. 7 Packet average delay performance

仿真得到的丢包率性能曲线如图 8 所示. 类似的,在丢包率上,也显示了提出的算法对于不同种类的业务的服务质量保障. 由图 7 可以看出,在网络载荷大于 0.8 时,AF 业务和 BE 业务的丢包率较快增大,且 AF 业务的丢包低于 BE 业务. EF 业务一直保持在较低的丢包率,并且比较平稳. 这也是由于引入了带宽预分配带来的效果.

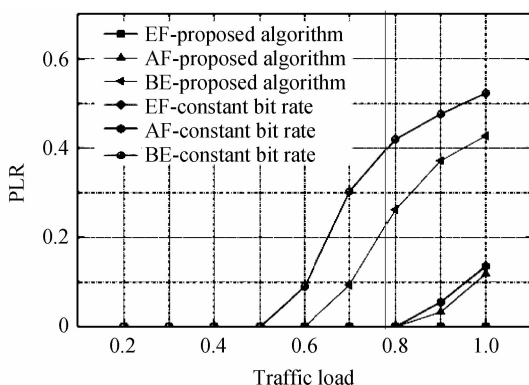


图 8 丢包率性能曲线

Fig. 8 Packet loss ratio performance

在算法中设置了 ONU 的优先级. 在带宽资源紧张的情况下,优先为高优先的 ONU 提供带宽保障,同时也要确保不过分的损伤较低优先级 ONU 的数据传输. 图 9 为 level1,也就是最高优先级的 ONU 在 AF 业务的平均包时延与所有 ONU 在 AF

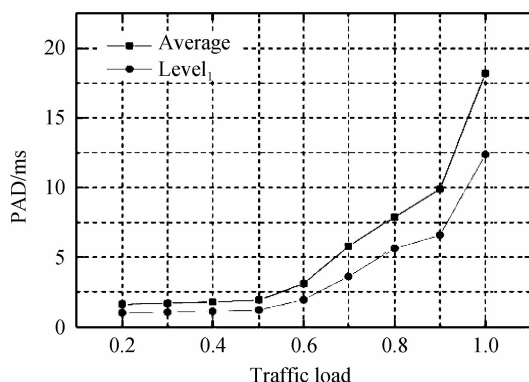


图 9 Level1 的 AF 业务平均包时延性能曲线

Fig. 9 PAD performance of level1 in AF service

业务的平均包时延对比曲线图.

仿真得到的吞吐量性能曲线如图 10 所示. 我们可以看出,新提出的算法的极限吞吐量要高于恒定比特率算法,这是由于新提出的算法通过专门的控制信道进行控制信息的交互,因而避免了恒定比特率算法中的空闲时间造成的带宽资源的浪费.

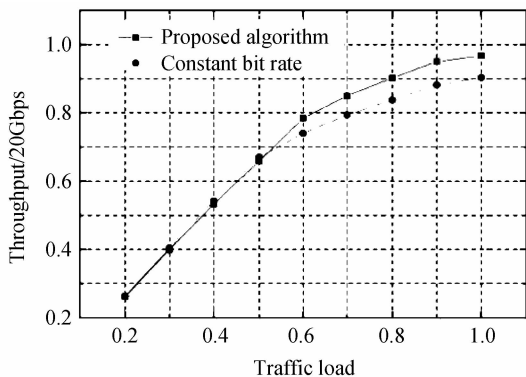


图 10 吞吐量性能仿真曲线

Fig. 10 Throughput performance

4 结论

从仿真结果可以看出,本文中提出的媒质接入控制协议很好的适配了 OFDM-PON 的网络架构,利用 OFDM-PON 系统的信道特性,实现了对各业务的服务质量保障. 总的来说,设计的协议对各个优先级的业务均提供了较好的服务质量保障,完全可以满足未来的多业务接入的需求.

参考文献

- [1] CHANCLOU P, CUI A, GEILHARDT F, et al. Network operator requirements for the next generation of optical access networks[J]. *IEEE Network*, 2012, 26(2): 8-14.
- [2] BREUER D, GEILHARDT F, HULSERMANN R. Opportunities for next-generation optical access[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(2): s16-s24.
- [3] WEIS E, BREUER D, LANGE C. Technologies for next generation optical access[C]. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2012 14th, 2012: 1-2.
- [4] CVIJETIC N. Recent progress in DSP-based optical access and OFDMA-PON[C]. Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) 2012 17th, 2012: 134-135.
- [5] CVIJETIC N. Optical OFDM for next-generation PON[C]. Signal Processing in Photonic Communications, Karlsruhe, Germany, 2010: 1-4.
- [6] MEHEDY L, BAKAUL M, NIRMALATHAS A. Frequency interleaving towards spectrally efficient directly detected optical OFDM for next-generation optical access networks[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23161-23172.
- [7] LIU B, ZHANG L, XIN X, et al. Constellation-masked secure communication technique for OFDM-PON[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25161-25168.
- [8] JIN X Q, TANG J M. Experimental investigations of wavelength spacing and colorlessness of RSOA-based ONUs in real-time optical OFDMA PONs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(16): 2603-2609.

- [9] ZHANG J, YI X, YANG Q, *et al.* Collective reception of orthogonal band multiplexed data streams for OFDM-PON upstream transmissions[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(17): 3597-3603.
- [10] CHEN L, QIAO Y, ZHAO Y, *et al.* Wide-range frequency offset estimation method for a DD-OFDM-PON downstream system [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, **4**(7): 565-570.
- [11] ZHANG L, XIN X, LIU B, *et al.* Physical-enhanced secure strategy in an OFDM-PON[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(3): 2255-2265.
- [12] HU Shan-mei, CHEN Lin. A radio over fiber system with frequency sextuple optical millimeter-wave generation carrying OFDM signal utilizing phase modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 699-703.
胡善梅, 陈林. 基于相位调制器产生六倍频光毫米波的 OFDM 信号光传输系统研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(4): 699-703.
- [13] CVIJETIC N. OFDM for next-generation optical access networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4): 384-398.
- [14] IEEE 802.3ah, CLAUSE 64.3 Multi-point control protocol (MPCP) [S], IEEE 2004.
- [15] 靳颖, 以太无源光网络点到多点控制技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2004 年.
- [16] CHEN C, QIAO Y, JI Y. Dynamic bandwidth allocation algorithm for orthogonal frequency division multiplexing access-passive optical network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 684-689.
- [17] WANG Y, LIU Y. Design of DBA algorithm in EPON uplike [C]. Fifth conference on Information Assurance and Security (IAS 2009), 2009, 1: 751-753.

• 下期预告 •

一种改进的图像快速去雾新方法

庞春颖¹, 嵇晓强¹, 孙丽娜², 郎小龙²

(1 长春理工大学 生命科学技术学院, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130030)

摘要:为提高雾霭天降质图像的清晰度和色彩保真度, 本文基于暗原色先验提出了一种改进的图像快速去雾方法. 针对原方法运算时间过长的问題, 在保证去雾效果的前提下, 利用快速双边滤波方法代替软件抠图修复透过率图, 大幅度地降低了计算量和复杂度, 处理时间仅为原方法的 5%, 满足了一般工程上的实时性要求. 并针对去雾处理后的图像亮度降低、颜色较实际场景偏暗的问题, 提出了一种简单有效的图像对比度和亮度增强的方法, 自适应地增强了图像的亮度, 并对局部由于雾浓度过高而造成不清晰的区域, 进行了对比度修正. 大量实验结果表明, 该方法能够快速有效地复原出雾天场景的对比度和真实色彩, 从而一定程度上保证了户外成像系统在恶劣天气下工作的稳定性和可靠性.

关键词:雾霭; 图像去雾; 暗原色先验; 快速双边滤波