

HFC 宽带接入网上行带宽分配策略的改进

宋 军 甘育裕 吴资玉

(重庆大学通信工程学院 重庆400044)

Improving the Upstream Bandwidth Allocation Policy for the HFC Broadband Access Networks

SONG Jun GAN Yu-Yu WU Zi-Yu

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract The request/transmit based upstream bandwidth resource allocation policy of DOCSIS introduces a trouble to the quality of the data service provided in the HFC networks. In this paper, the mechanism of the upstream data transmitting and the process of data service transmitting in the HFC networks are described in detail, and the performance of the data service in HFC networks is analyzed. An advanced upstream bandwidth resource allocation policy is proposed to improve the quality of the data service in the HFC networks.

Keywords HFC broadband access networks, Data service, TCP, Upstream bandwidth resource allocation policy

1 引言

现代通信正在向宽带化、数字化、智能化、个人化和综合业务化的方向发展,宽带用户接入技术已成为当前通信界的研究热点之一。有线电视网已逐步升级为光纤同轴电缆混合(Hybrid Fiber/Coax, HFC)网络, HFC网具有频带宽和用户覆盖面广等优势,是为家庭用户提供宽带接入的重要手段之一,为宽带信息进入家庭铺平了“最后一公里”^[1]。

DOCSIS (Data Over Cable System Interface Specification)^[2]协议是目前得到广泛采用的 HFC 宽带接入网的网络标准。DOCSIS 协议将 HFC 网的上行带宽(频率范围为 5~42MHz)资源进行频分和时分复用,即划分为很多子频带和时隙,由多个用户共享上行带宽,下行(频率范围为 50~860MHz)则采用广播方式传输数据。上行带宽资源按照“请求/传输”策略对每个用户进行按需分配,即用户在进行上行数据传输前,先向前端申请上行带宽资源,得到前端分配的带宽资源后进行数据传输,传输完成后前端立即收回分配给该用户的带宽资源,以便分配给其他用户使用。因此,用户不能固定、长期地占用上行带宽资源,只能在前端的控制下进行统计复用。

现阶段的很多数据业务(如 Web 浏览、FTP 文件下载等)的传输层协议均为 TCP,由 TCP 拥塞控制算法^[3]对数据传输进行流量控制。HFC 网上、下行信道之间的非对称特性给 TCP 拥塞控制机制的实现及有效性带来了新的问题^[4]。基于“请求/传输”的上行带宽资源分配策略使 TCP 连接的确认包在上行队列中形成堆积甚至丢包, TCP 拥塞控制机制的自时钟(self-clocking)工作方式遭到破坏, TCP 的传输效率下降,使 HFC 网络环境中的数据业务质量达不到人们期望的水平。本文在详尽分析 HFC 网上行数据传输机制及其对数据业务质量的影响的基础上,提出了基于下行数据速率跟踪/上行带宽预分配的上行带宽资源分配策略,以提高 HFC 网络环境中的数据业务质量。

2 HFC 网上行数据传输机制

HFC 网的上行信道带宽远小于下行信道带宽,为有效利用上行带宽资源, DOCSIS 协议将每个上行信道划分为初始接入时隙、资源申请时隙和业务时隙。其中,初始接入时隙用于电缆调制解调器上电后接入 HFC 网;资源申请时隙用于有数据等待发送的用户在还没有分配到业务时隙时向前端发送上行带宽资源申请;业务时隙用于用户传输上行数据。数据在 HFC 网上行信道中的传输过程由带宽申请(包括消除信道竞争冲突)、通信调度和数据传输三个步骤组成,并由前端集中控制,如图1所示。

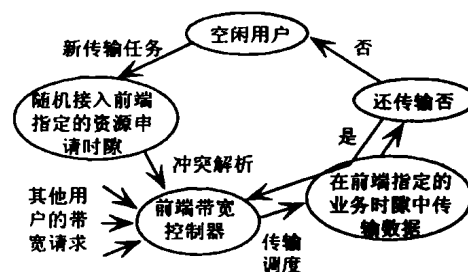


图1 上行带宽分配和数据传输过程

当用户有数据等待发送时,首先在资源申请时隙中向前端发出上行带宽请求。由于用户对资源申请时隙的接入是随机的,当多个用户在同一个人资源申请时隙中发出上行带宽请求将产生冲突,用户必须执行冲突解析算法,然后重新发送上行带宽请求直至冲突消除。为避免用户重复发送同一上行带宽请求,前端在接收到用户的上行带宽请求后,立即通过下行信道对用户的上行带宽请求进行确认,然后进行相应的上行信道带宽分配和通信调度,为用户分配业务时隙。用户在分配到的业务时隙中将数据发送到前端,如果用户又有新的数据需要发送,可以利用此业务时隙捎带新增的上行带宽请求,而不必再与其他用户竞争资源申请时隙。因此,上行数据在传输

宋 军 博士研究生,主要从事宽带网络技术、HFC 宽带接入网等领域的研究。甘育裕 教授,主要从事计算机网、HFC 宽带接入网、B-ISDN 和同步技术等领域的研究。吴资玉 教授,主要从事计算机网、HFC 宽带接入网、B-ISDN 等领域的研究。

过程中将经历两种时延^[5]:请求接入时延 τ_{RAD} , 用户发送上行带宽请求到获得前端确认所经历的时间; 数据传输时延 τ_{DTD} , 前端接收到上行带宽请求到前端接收完该上行带宽请求应传输的数据所经历的时间, 如图2所示。

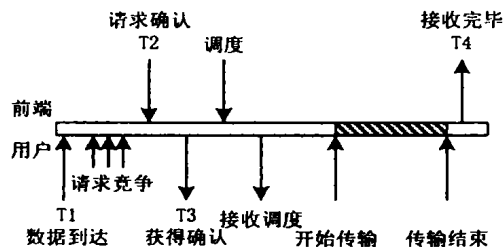


图2 上行数据传输时序图

其中:

$$\tau_{RAD} = T_3 - T_1, \tau_{DTD} = T_4 - T_2 \quad (1)$$

3 HFC 网数据业务传输过程

现阶段 HFC 网提供的数据业务如 Web 浏览、FTP 文件下载等多为非对称数据业务, 即下行信道只传输远端服务器发送给家庭用户的数据包, 而上行信道则只传输用户端反馈给远端服务器的确认包。整个数据传输过程在 TCP 拥塞控制算法的流量控制下呈现为一种交互循环, 即服务器连续发送一批数据—等待用户反馈数据已正确接收的确认信息—再次发送一批数据。因此, 每个数据业务要通过多次间隔的数据发送才能完成, 用户端反馈给远端服务器的确认包也相应地通过 HFC 网上行信道多次间隔地发送。由于服务器发送的每一批数据之间存在较大时间间隔, 与其对应的用户端反馈确认包的间隔也较大, 前端在每一批确认包发送结束后都会回收分配给用户的上行带宽资源供其他用户使用。此后, 用户端接收到服务器发送的下一批数据后再次通过 HFC 网上行信道反馈确认包时, 需重新申请上行带宽, 并等待前端分配上行带宽资源传输确认包。

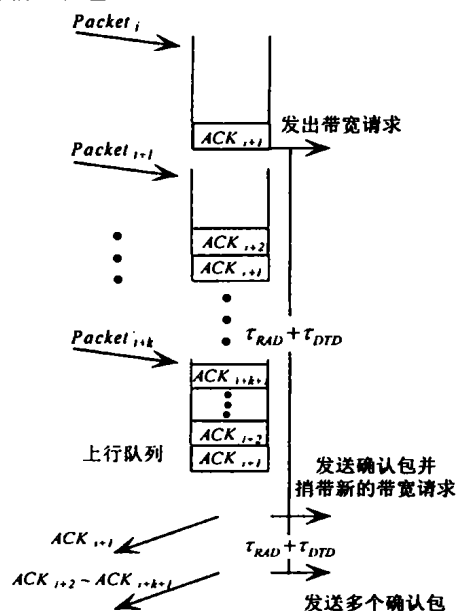


图3 数据业务在 HFC 网中的传输过程

如图3所示, 在一个数据业务中, 远端服务器的某一批(k个)数据包相继发送给用户。当数据包 $Packet_i$ 通过 HFC 网的下行信道到达用户端后, 用户端产生确认包 ACK_{i+1} (表示用

户端已正确接收第 i 个数据包, 希望接收第 $i+1$ 个数据包) 进入上行队列等待传输, 用户向前端发出上行带宽请求。由于从上行带宽请求发出到确认包 ACK_{i+1} 成功发送之间的时延较长, 在此期间, 数据包 $Packet_{i+1} \sim Packet_{i+k}$ 相继到达用户端, 用户端产生确认包 $ACK_{i+2} \sim ACK_{i+k+1}$, 进入上行队列排队。前端接收到用户的上行带宽请求后为用户分配业务时隙, 用户成功发送确认包 ACK_{i+1} , 并通过此业务时隙将传输确认包 $ACK_{i+2} \sim ACK_{i+k+1}$ 所需的上行带宽请求捎带给前端。前端再次为用户分配业务时隙, 用户再次成功发送确认包 $ACK_{i+2} \sim ACK_{i+k+1}$ 。

由于确认包 $ACK_{i+2} \sim ACK_{i+k+1}$ 是在同一个业务时隙中发送, 它们之间的发送间隔非常小, 出现确认包压缩 (ACK Compression) 现象, 这会使 TCP 连接的吞吐量下降, 不能充分利用数据包发送信道的有效带宽, 降低 TCP 的传输效率^[6], 从而影响数据业务的质量。

4 数据业务的性能分析

Web 浏览等非对称数据业务在 HFC 网络环境下的排队模型如图4所示。

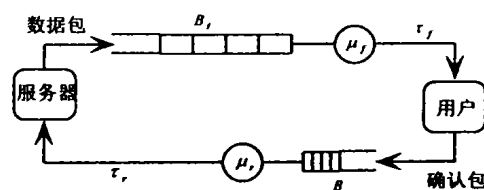


图4 非对称数据业务的排队模型

由 Little 定理^[7]可得, 服务器 TCP 源端的拥塞窗口值为:

$$W(t) = \lambda(t) \times (T + D(t)) \quad (2)$$

因此, 数据业务的吞吐量为:

$$\lambda(t) = \frac{W(t)}{T + D(t)} \quad (3)$$

其中, T 为双向信道传播时延, 即 $T = \tau_f + \tau_r$, τ_f 为数据包发送信道传播时延, τ_r 为确认包返回信道传播时延; $D(t)$ 为确认包从用户端传送到 HFC 网前端所需的时间, 由第2节分析可知:

$$D(t) = \tau_{RAD} + \tau_{DTD} \quad (4)$$

合并(3)、(4)式可得, 数据业务的吞吐量为:

$$\lambda(t) = \frac{W(t)}{T + \tau_{RAD} + \tau_{DTD}} \quad (5)$$

由于 HFC 网上行信道的请求接入时延和数据传输时延都较大, 且随着 HFC 网内网络负载的增加而增大^[5], 由(5)式可知, 这将导致数据业务的吞吐量下降。在极端情况下, 因确认包返回超时, TCP 源端会误认为数据包丢失而将拥塞窗口值减小为1, 导致数据业务的吞吐量迅速下降。

根据 TCP 拥塞控制算法, 服务器 TCP 源端拥塞窗口值随确认包返回数量而增长的速率为:

$$\frac{dW(t)}{da} = \begin{cases} 1 & W(t) \leq W_i \\ 1/W(t) & W(t) \geq W_i \end{cases} \quad (6)$$

其中, W_i 为 TCP 源端拥塞窗口门限值, 当 $W(t) \leq W_i$ 时, 数据传输处于慢启动阶段; 当 $W(t) \geq W_i$ 时, 数据传输进入拥塞避免阶段。

确认包返回服务器的速率为:

$$\frac{da}{dt} = \lambda_{ACK}(t) \quad (7)$$

其中, $\lambda_{ACK}(t)$ 为确认包的吞吐量。由(6)、(7)式可得, 服务器 TCP 源端拥塞窗口随时间增长的速率为:

$$\frac{dW(t)}{dt} = \begin{cases} \lambda_{ACK}(t) & W(t) \leq W_r \\ \frac{\lambda_{ACK}(t)}{W(t)} & W(t) \geq W_r \end{cases} \quad (8)$$

可见, TCP 源端的拥塞窗口的增长速度与确认包的吞吐量成正比。在确认包 ACK_{i-1} 返回服务器后到确认包 ACK_{i+2} 返回服务器之前这一段较长的时间里, 只有确认包 ACK_{i+1} 返回服务器, 确认包的吞吐量很低。因此, TCP 源端的拥塞窗口值和数据业务的吞吐量很小。在确认包 ACK_{i+2} 返回服务器到确认包 ACK_{i+3} 返回服务器的这一段时间里, 共有 $k-2$ 个确认包返回服务器。由于在 HFC 网中, 这些确认包由同一个业务时隙发送到前端, 它们返回服务器的时间间隔只与 HFC 网前端和服务器之间的网络传输速度有关。通常, HFC 网前端和服务器由骨干网相连, 网络传输速度很高。因此, 此时确认包的吞吐量很大, TCP 源端的拥塞窗口值和数据业务的吞吐量迅速增大, 服务器的数据突发性加剧, 在较短时间内往数据包发送信道中发送大量数据, 造成数据包发送信道缓冲区 B_r 溢出, 引起数据包丢失, 使服务器的 TCP 源端过早进入拥塞避免阶段, 造成数据业务的吞吐量下降。

服务器数据突发性加剧使用户端确认包到达上行队列的突发性也相应增大。由于上行信道缓冲区 B_r 的容量有限, 当 $W(t) > B_r$ 时, 部分确认包将因缓冲区溢出而被丢弃, 返回服务器 TCP 源端的确认包数量减少。TCP 源端拥塞窗口值的增长速度由确认包返回的数量控制, 确认包丢失使服务器 TCP 源端的拥塞窗口值可能在慢启动阶段就增长缓慢, 也会使数据业务的吞吐量下降。

另外, TCP 协议采用累积确认机制, 丢失的确认包所携带的确认信息可以由其后的确认包补上。当新的数据包到达用户端后, 用户端反馈的已正确接收的数据包数量与服务器前次接收到的用户端确认正确接收的数据包数量之间存在差值。当新的确认包返回服务器 TCP 源端时, TCP 源端的拥塞窗口迅速向后滑动, 这更加剧了数据服务器的数据突发性, 造成数据业务的性能急剧下降。

5 改进的上行带宽分配策略

由前几节的分析可知, 由于 HFC 宽带接入网的上行数据传输采用基于“请求/传输”的上行带宽资源分配策略, 使用户端反馈的确认包在上行队列中形成堆积甚至丢包, 破坏了 TCP 拥塞控制机制的自时钟工作方式, 导致 TCP 的传输效率降低, 给 HFC 宽带接入网数据业务的性能和质量造成严重影响。

解决上述问题的关键在于如何减小确认包在 HFC 网上行信道中的时延和时延抖动, 并为用户提供足够的带宽, 防止确认包在上行队列中堆积和发生丢包。因此, 我们从 HFC 网的上行带宽资源分配策略入手加以改进, 提出了下行数据速率跟踪/上行带宽预分配策略对 HFC 网上行信道中的数据包的传输进行调度, 其基本思想是: 对于单个用户来说, 上行信道中的确认包到达速率和到达间隔等于下行信道对数据包的发送速率和发送间隔, 前端可以通过监测下行信道中发往各个用户的数据包的发送速率和发送间隔确定各个用户所需上行信道带宽, 并为各个用户预先分配相应的上行带宽资源, 消除请求接入时延 τ_{RAD} 和上行带宽请求在前端等待调度的时延

(数据传输时延 τ_{DTD} 的一部分), 从而避免确认包压缩现象的产生, 同时也防止了用户端缓冲区溢出导致确认包丢失, 从而提高数据业务的吞吐量和数据传输效率。该上行带宽资源策略的具体实现如下:

1) 初始化:

```
list<ServiceID> downstream_packets_list;
//(40bytes ACK + 24bytes overhead)/16 bytes minislots
size=4
```

```
ack_minislots_num=4;
```

2) 前端记录下行数据包发送情况:

```
ServiceID sid;
mac_address=get_destination_address(*packet);
sid=mac2sid(mac_address);
downstream_packets_list.addtail(sid);
send(*packet);
```

3) 生成带宽分配 MAP 帧:

```
while(!downstream_packets_list.isempty()){
    MapMaker(downstream_packets_list.gethead(),
              ack_minislots_num);
    downstream_packets_list.removehead();
}
```

结束语 HFC 宽带接入网是现阶段我国信息高速公路“最后一公里”最为经济的宽带接入平台, 它提供的各种综合业务的质量将影响它的普及和推广。本文基于对 HFC 网上行数据传输机制和数据业务性能的分析, 针对 DOCSIS 的“请求/传输”上行带宽资源分配策略给数据业务质量造成影响, 提出了一种在 HFC 网络环境下提高数据业务性能和质量的上行带宽资源分配策略。其特点是, 不用对 TCP 拥塞控制算法做任何修改, 与 DOCSIS 标准兼容, 简单易行, 可直接用于工程实现。由于该上行带宽资源分配策略针对的是非对称数据业务, 我们进一步的研究是其对双向数据业务上行数据传输性能的影响及其优化。

致谢 感谢重庆景宏高科技公司为本文的研究提供实验环境。

参考文献

- 1 WAI S L, et al. Hybrid fiber-coax system[J]. SPIE Proceedings, Oct. 1995. 23~24
- 2 SP - RFI v1.1 - I06 - 001215, Data Over Cable Service Interface Specifications 1.1[S]
- 3 Jacobson V. Congestion Avoidance and Control[J]. IEEE/ACM Transaction Networking, 1998, 6(3): 314~329
- 4 Balakrishnan H, et al. How Network Asymmetry Affect TCP[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 4: 2~9
- 5 Yingdar L, et al. Allocation and scheduling algorithm for IEEE802.14 and MCNS in hybrid fiber coaxial networks[J]. IEEE transactions on broadcasting, 1998, 44(4): 427~435.
- 6 Kalampoukas L, et al. Two-way TCP Traffic over ATM: Effect and Analysis[A]. In: Proc. Infocom'97[C], Japan, Kobe, April, 1997
- 7 盛友招. 排队论及其在计算机通信中的应用[M]. 北京邮电大学出版社, 1998