

HFC 网络中上行信道的 MAC 层协议性能分析

孙晓东, 冯振明, 陆明泉
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: HFC(Hybrid Fiber Coaxial)作为一种主要接入网络,近年来受到了越来越深入的研究.HFC网络具有独特的树形分支结构,其上、下行信道在频段上相互隔离,下行信道带宽较大,是一对多的广播信道,上行信道带宽较小,是多对一的共享信道.因此HFC网络的MAC(Medium Access Control)层协议设计重点,在于如何解决共享信道的接入冲突问题,以及如何提高上行信道的利用率和降低上行信道的接入延时.本文结合当前HFC网络中主要MAC层协议的设计思想,从本质上分析了影响协议性能的关键因素.通过对MCNS(The Multimedia Cable Network System)提出的MAC层协议——DOCSISv1.0(Data Over Cable Service Interface Specifications version 1.0)进行仿真,有力证实了本文的分析结果,对我们进一步深入研究HFC网络接入技术具有很好的指导意义.

关键词: HFC网络; MAC层协议; 信道利用率; 接入延时; DOCSIS

中图分类号: TN943.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)02-0187-04

Performance Analysis of Upstream Channel MAC Layer Protocol in HFC Networks

SUN Xiaodong, FENG Zhenming, LU Mingquan
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a key access network, HFC(Hybrid Fiber Coaxial) network has been deeply studied recently. HFC network has the special tree and branch topology. Its upstream and downstream channels are separate from each other in frequency band. The upstream channel is a point to multipoint broadcasting channel with a wider bandwidth, while the downstream one is a multipoint to point share medium with a narrower bandwidth. So, the most key issues in MAC protocol design of the HFC network are focused on how to resolve the collision efficiently, how to improve the bandwidth utility and how to lower the access time delay while using upstream channels. This paper theoretically analyzed the main factors that affect these performances of a MAC protocol based on most popular designs. Also we studied the performance of DOCSIS v1.0 MAC protocol through simulation. The test results approve our analysis well. This paper can give us some guidance in our further exploration of HFC access technology.

Key words: HFC network; MAC layer protocol; bandwidth utility; access time delay; DOCSIS

1 引言

随着传统单向有线电视网络及其设备的双向改造的完成,HFC网络已成为为用户提供双向宽带综合业务的首要途径.其高达1GHz的带宽和网络基础设施建设的完备性,是xDSL和ISDN等接入方式所无法比拟的.为了兼容传统有线电视传输模式,HFC网络带宽首先被频分为若干个6MHz(NTSC制式)或8MHz(PAL制式)的频道,这些频道被统一划分为下行和上行信道.图1所示是北美流行的频带划分方式.

在树形分支结构的HFC网络里,下行信道是一种一对多

的广播信道,传输方式相对比较简单;而上行信道是一种共享信道,它的使用比较复杂.由于上、下行信道在频段上相互隔离,处于分支节点处的用户设备无法监听上行信道上的信号,也就无法检测共享信道的使用冲突,因此它们对上行共享信道的使用完全是随机的、异步的.在这种情况下,建立一套有效的上行信道管理机制是在HFC网络中提供双向综合业务的基础.

目前,很多国际化组织已经针对HFC网络接入双向业务制定了一系列规范^[3].其中最具有影响的是IEEE802.14工作组制定的IEEE802.14标准^[1]和MCNS提出的DOCSIS规范^[2].前者侧重于ATM信元的传输,提供了完善的QoS(Quality of Service)支持;后者侧重于变长IP数据包的传输,在DOCSIS v1.1

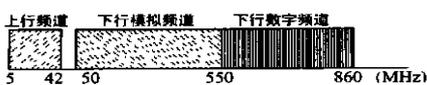


图1 HFC频带分配示意图

中提出了 QoS 的概念. 无论是 IEEE 802. 14 还是 DOCSIS, 两者 MAC 层协议的设计重点都放在上行信道上, 即上行信道的分配、服务调度以及冲突解决等. 近几年来, 学术界和产业界对 HFC 网络的研究, 也大多集中在上行信道的 MAC 层协议上, 对上行信道的分配策略^[4, 5, 9], 调度机制^[5, 8]和冲突解决方案^[6, 7]等作了大量的研究工作. 但这些工作主要通过仿真对上述某一或某几个方面作了详尽的性能分析, 而没有对上行信道的传输机制作本质上的理论研究. 本文结合上行信道的利用率和数据传输延时这两方面性能, 从理论上分析了 HFC 网络上行信道的传输机制. 最后对 DOCSIS 规范的 MAC 层协议, 进行仿真并验证了本文的分析结果.

2 HFC 上行信道传输机制分析

在 HFC 网络中, 众多完全支持双向传输的 MAC 协议都采用基于预留的 ALOHA 机制^[1, 2, 10]. 其基本思想是: 把上行信道分成一个个连续的微小时隙 (mini slot), 每个微小时隙作为一个基本传输单元, 为了以后分析方便, 定义 T 为一个微小时隙长度; 这些时隙分成两种传输方式, 一种是竞争传输, 即该时隙为所有的用户提供传输机会, 易于发生传输冲突, 也称为竞争时隙 (Contention Slot), 通常为一个微小时隙长度; 另一种是预留传输, 即往往由多个微小时隙组成一个数据传输单元, 专门保留给某一个用户用来传输数据, 这种传输方式不会发生冲突, 也称为数据时隙 (Data Slot). 当用户设备有数据要传输时, 先要使用竞争时隙向前端 (Head end) 发送所需带宽的申请. 当没有冲突发生时, 前端将收到该申请, 然后给该用户预留相应的微小时隙数, 即数据时隙. 用户收到前端的分配确认后, 就可以在相应的时隙到来时发送数据; 当有冲突发生时, 前端将不能收到申请, 也就不能向用户设备发送确认消息, 用户设备在一定时间内, 收不到确认, 就认为发生冲突, 于是进入冲突解决状态, 直到申请发送成功. 这个过程可以用图 2 来解释.

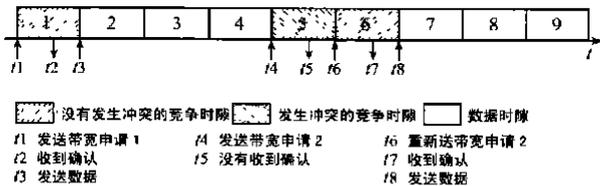


图 2 时隙化的上行带宽使用示意图

2.1 信道利用率分析

从上述上行信道的传输机制来看, 在分析上行信道的利用率时, 可以以微小时隙为单位, 把上行带宽分成竞争使用 (Contention Slot, 图 2 中的阴影时隙) 和非竞争使用 (Data Slot, 图 2 中的非阴影时隙) 两部分. 其中竞争带宽的使用完全可以用 ALOHA 原理来分析. 本文的分析假定 HFC 系统的用户处于同等碰撞机会的拓扑位置. 设在 HFC 网络中共有 N 个独立同分布的用户, 平均对每个竞争时隙, 用户以相同的概率 P 发出申请, 则系统的总负载:

$$G = N \times P \quad (1)$$

又设在某个竞争时隙中, 只有一个用户竞争使用的概率为 S ,

则下式成立:

$$S = N \times P \times (1 - P)^{N-1} \quad (2)$$

对竞争使用的上行带宽来说, S 就是其利用率 η_c . 所以用总负载 G 替换概率 P 以后, 可以得到竞争使用的上行带宽的利用率和竞争用户总负载以及用户数目的关系式:

$$\eta_c = G \times (1 - \frac{G}{N})^{N-1} \quad (3)$$

将上式对 G 求导, 可以得到上行带宽的最大利用率为:

$$\eta_{c \max} = (1 - 1/N)^{N-1}, \quad \text{当 } G = 1 \text{ 时} \quad (4)$$

结合式 (1), 可以得出我们的第一个结论:

(1) 当 N 用户以概率 $1/N$ 竞争某一时隙时, 可以获得最大的竞争带宽的利用率.

式 (4) 描述了最大利用率和用户数之间具有图 3 所示的曲线关系. 由此的第二个结论是:

(2) 竞争某一个时隙的用户数越少, 竞争带宽的利用率越高.

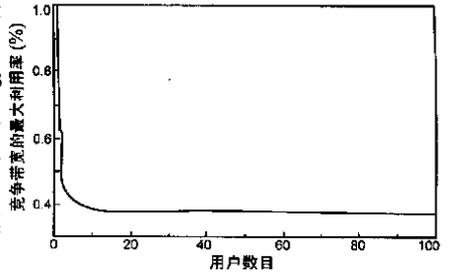


图 3 最大竞争带宽利用率和竞争用户数目的关系

对于非竞争带宽, 即预留的数据带宽, 它的利用率由下式决定:

$$\eta_d = N_p / (N_h + N_p) \quad (5)$$

其中, N_p 表示每次传输时用户数据的平均长度 (以微小时隙为单位), N_h 表示每次传输用户数据时 MAC 和 PHY 层附加的微小时隙数, 这个数值在某一个 MAC 协议内, 通常是固定的. 假设每次传输数据之前, 都必须要先申请带宽, 则整个上行信道的利用率可以表示为:

$$\eta = \frac{N_p}{N_h + N_p + N_r / \eta_c} \quad (6)$$

其中 N_r 表示发送一次带宽申请所需的微小时隙数, 通常情况下为 1. N_r / η_c 表示每次传输用户数据平均所需的竞争时隙数.

由式 (6), 以及结论 1 和结论 2 可以看出, 要提高上行带宽的利用率, 可以采用三种方法: 增大 N_p ; 尽量减少每个时隙的竞争用户数; 使每个用户以概率 $1/N$ 竞争每个时隙, 其中 N 是该时隙的总竞争用户数. 目前提出的对 HFC 网络上行信道 MAC 层协议的种种改进, 也主要体现在这三个方面. DOCSIS 1.0 开始支持的数据包串联 (Concatenation) 和捎带申请 (Piggyback) 功能^[2], 实际上就是增加每次传输时用户数据包的平均长度 N_p ; D Sala 在文献 [7] 中分析的三叉树冲突解决算法和 DOCSIS 1.0 中提出的二进制指数退避冲突解决算法^[2], 其本质都是扩大竞争用户的分布时隙数, 以减少每个时隙的实际竞争用户; 更直观的方法是, 将竞争时隙分类, 每一类只允许相应的用户竞争使用, 在 IEEE 802. 14 中通过 RQ 数 (Request Queue number) 将时隙分类^[1], 而 DOCSIS 1.0 则通过 SID (Service

Identifier) 将时隙分类^[2]; 文献[7, 11] 中分析的 p 坚持冲突解决算法, 使用了 R L Rives 提出的 Bayesian 估计来预测某个时隙的竞争用户数并得到接近最优的接入概率 p .

2.2 传输延时分析

在分析传输延时性能之前, 首先必须明确一下上行信道中的时隙分配策略. 上行信道的时隙分配有两种模式: 连续模式和帧模式. 连续模式是指前端的时隙分配器每收到一个用户的申请, 就为该用户分配相应的时隙数, 每次分配没有周期性, 分配的时隙数目也不固定. 图 2 所示的时隙分配就是一种连续模式, 只是其 RTD (Round Trip Delay) 较小 ($< 1 \text{ ms}$). 帧模式是指前端时隙分配器周期性地为用户分配固定长度的时隙帧, 一帧时隙中包含有数据时隙和竞争时隙, 其比例可以固定也可以动态变化. 帧模式可以看作连续模式的一个特例.

定义上行信道的传输延时 T_d 是从一个数据包到达用户设备的 MAC 层开始, 一直到前端设备完全接受到这个数据包的这段时间. 为了方便分析, 我们假设使用帧时隙分配模式, 从前面描述的上行信道传输机制可以看出 T_d 满足下式:

$$T_d = \left(\frac{m}{m+1}\right)^2 \times \frac{T_l}{2} + T_{rd} + n \times T_l + \left(\frac{1}{m+1}\right)^2 \times \frac{T_l}{2} + T_s \quad (7)$$

其中, T_{rd} 表示从发送申请信息到收到反馈的来回程延时, 包括发送延时、传输延时和前端处理延时; T_l 表示帧长, n 表示平均重发次数; T_s 表示用户数据的发送延时和传输延时. 式(7)等号右侧的第一项 $(m/(m+1))^2 \times (T_l/2)$ 表示从用户设备收到数据到等到第一个竞争时隙的间隔, 式中 m 是一个时隙帧中数据微时隙和竞争微时隙的比例; 第四项 $(1/(m+1))^2 \times (T_l/2)$ 表示从用户设备收到时隙分配确认到开始发送数据的间隔. 第一项和第四项之和是固定长度的帧结构带来的额外延时, 变化范围在 $T_l/4 \sim T_l/2$ 之间; T_{rd} 与时隙分配模式无关, 由上行信道发送速率、用户到前端的距离和前端的调度算法决定; 同样 T_s 也与时隙分配模式无关. 所以从传输延时的各组成部分来分析, 在前端的调度算法和冲突解决算法一定的情况下, 在时隙分配模式上, 每一帧的时隙数应该越少越好, 极端情况下即使用连续模式, 此时 T_l 降低为 T . 在帧模式下, 为了保证用户在下一帧到来之前能够收到前一帧发出的申请的确认, 必须保证: $T_l > T_{rd}$, 而且竞争时隙的数目最多不能超过 $(T_l - T_{rd})/T$. 在连续模式下, 当 $T_{rd} < T$ 时, T_l 可以达到 T (见图 2); 然而当 T_{rd} 较大时, 由于在 T_{rd} 期间收到较多的申请, 这会导致连续的时隙分配, 导致 T_l 的急剧增大. 所以 D Sala 等人在文献[7]和文献[11]中分别提出了交叉-连续分配和 FMS (Forced Mini slots) 的方法, 以打破大 T_{rd} 带来的长分配周期 T_l .

实际上, 带宽利用率和传输延时是一对矛盾. 为了降低冲突发生的次数, 要求增加竞争时隙的数目, 这无疑违反了提高带宽利用率时式(6)对 N_r/η_c 的要求. 增大 N_p 导致连续的申请到达, 从而导致连续的时隙分配, 这也违背了降低传输延时时对 T_l 的要求. 所以在设计 MAC 层协议时, 对时隙分配模式、数据时隙和用户时隙的比例以及调度算法等实现时的细节是不加规定的. 因为这样可以具体应用环境的不同, 允许人们做出最合适的折衷选择.

3 DOCSIS 规范的 MAC 协议仿真

DOCSIS 规范是目前获得工业界认可, 使用最广泛的一种 HFC 双向接入协议. 协议的大概描述如下: 上行信道被分成连续的微时隙, 每个微时隙长度是 $6.25 \mu\text{s}$ 的 2^n 倍, 一般一个竞争时隙长度就等于一个微时隙长度, 对 DOCSIS 来说, 申请信息所需的总长度 (MAC 头 + PHY 头) 为 16Bytes, 所以一个微时隙一般能容纳 16Bytes 的数据. 前端的时隙分配器周期性地为用户发送 MAP 信息, MAP 信息里包含了下一帧的时隙使用分配情况, 每一帧包含的微时隙个数最多不能超过 4096. 用户需要发送数据时, 使用当前帧中的某个竞争时隙向前端发送带宽申请, 如果前端成功接收到了该申请, 则在下一个 MAP 信息中为该用户分配相应的时隙, 然后用户等到相应的时隙到来时将数据发送出去, 否则针对该用户没有反馈; 如果用户在发出申请后收到的下一个 MAP 信息中没有发现关于该用户的任何确认, 则认为发生了冲突, 使用二进制指数退避算法在当前 MAP 的竞争时隙中任意选择一个重新发送申请; 当重新发送 16 次以后还没有成功, 则放弃该数据.

仿真的目的主要是考察在 DOCSIS 规范中, 使用不同的时隙分配帧长度对传输延时的影响, 以及使用不同大小的数据包对上行信道利用率的影响.

使用的仿真工具是 NIST 4.0 网络仿真软件. 网络和 DOCSIS 使用配置如下: 用户数为 20, 用户到前端的最近距离是 40km, 传播延时是 $5 \mu\text{s} \cdot \text{km}^{-1}$; 上行数据发送速率是 $2.56 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 下行数据发送速率是 $30 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 前端数据处理延时是 0ms, 使用帧时隙分配模式, 竞争时隙与数据时隙的比例为 2:1, 一个数据时隙包括 4 个微时隙, 当负载较小时, 将没有多余的数据时隙转化为竞争时隙使用, 不使用 Piggyback 功能. 用户以不同的负载 (从 10% ~ 100%) 发送 ATM 信元, 以全面考察不同业务负载条件下的传输延时和信道利用率.

实验一在帧长度为 36 个微时隙的情况下, 分别考察了使用和不使用 Concatenation 功能时信道利用率情况, 仿真结果如表 1 所示.

表 1 实验一的信道利用率仿真结果

负载 (%)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
利 用 率 (%)	使用	10.0	15.8	21.3	26.6	31.8	36.8	40.1	45.0	45.6	45.8
	Concatenation	10.0	15.8	20.8	26.2	31.1	35.2	36.4	36.8	36.8	36.8
	不使用	10.0	15.8	20.8	26.2	31.1	35.2	36.4	36.8	36.8	36.8
	Concatenation	10.0	15.8	20.8	26.2	31.1	35.2	36.4	36.8	36.8	36.8

从实验数据可以看出, 在负载较小时 (50% 以下) 两种情况下的信道利用率基本一致, 这是因为在负载较小时, 数据所占用的信道带宽较小, 大部分带宽分配给了竞争时隙, 所以这时候是不是 Concatenation 功能, 对数据所占用的信道带宽没有影响, 只会改变时隙帧中竞争时隙和数据时隙的分配比例; 当负载较大时, 由于数据占用的信道带宽增大, 可分配的竞争时隙减少, 在保持数据时隙和竞争时隙分配比例的情况下, 不使用 Concatenation 功能带来的 MAC 层和 PHY 层额外负载将占用数据时隙带宽, 是实际信道利用率降低, 这时候使用 Concatenation 功能, 将减少 MAC 层和 PHY 层额外负载, 提高信

道的利用率,这相当于提高了第二节式(6)的 N_p .

实验二分别考察了不同帧长度情况下,信道的传输延时情况,仿真结果见表 2.

根据表二中的数据,我们可以看出帧越长,传输延时越大,因为在基于帧的时隙分配模式中,一个用户从发送申请到发送数据,起码要隔一帧.帧的长度对传输延时的影响,在负载较大时更为严重,因为负载越大,竞争时隙的冲突越严重,对某一个用户申请来说,其成功申请需要经历的冲突次数越多,所以根据式(7)中第 3 项的定义,传输延时急剧增加.

表 2 实验二的传输延时仿真结果

负载 (%)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
传输 延时 (ms)	帧长度为 36 个微时隙	4.0	4.0	4.2	4.8	5.8	9.4	19.1	34.0	54.4	85.2
	帧长度为 64 个微时隙	7.4	7.6	7.6	8.8	11.2	15.1	24.4	44.6	70.8	116.0

4 结论

本文对 HFC 网络的上行信道传输机制进行了详细的阐述,然后从 ALOHA 时隙使用原理出发,分析并给出了上行信道利用率的数学表达式,以及为了提高上行信道利用率应该采取的措施;同时结合上行信道的时隙分配模式:连续模式和帧模式,给出了传输延时的一般表达式,明确了影响传输延时的一些主要因素.最后通过仿真实验,分别验证了 DOCSIS 规范中,使用和不使用 Concatenation 功能对上行信道利用率的影响和不同帧长度对传输延时的影响.进一步证实了我们的分析.

本文对我们更加深入的研究 HFC 网络中上行信道的 MAC 层协议有很好的指导意义.

参考文献:

- [1] IEEE 802.14 Working Group. IEEE Standard 802.14, Draft 3 Revision 1 [S]. 1998, 4.
- [2] Cable Television Laboratories, Inc. Data Over Cable Service Interface Specifications Radio Frequency Interface Specification [S]. 1997, 10.
- [3] Tzerefos P, Smythe C, Stergiou I, et al. Standards for high speed digital communications over cable TV networks [J]. Proceedings of the 6th IEE Conference on Telecommunications, 1998, (451): 224-229.
- [4] Yin W M, Lin Y D. Statistically optimized minislot allocation for initial and collision resolution in hybrid fiber coaxial networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(9): 1764-1773.

- [5] Lin Y D, Huang C Y, Yin W M. Allocation and scheduling algorithm for IEEE 802.14 and MCNS in hybrid fiber coaxial networks [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1998, 44(4): 427-435.
- [6] Golmie N, Saintillan Y, Su D. A Review of contention resolution algorithms for IEEE 802.14 networks [DB/OL]. <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, First Quarter 1999.
- [7] Sala D, Limb J O. Comparison of contention resolution algorithms for a cable modem MAC protocol [R]. International Zurich Seminar on Broadband Communications, Zurich, Switzerland, 1998.
- [8] Ivanovich M, Zukeman M. Evaluation of priority and scheduling scheme for an IEEE 802.14 MAC protocol loaded by real traffic [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM'98 [C], San Francisco, California, 1998: 1384-1391.
- [9] Droubi M, Idrene N, Chen C. Dynamic bandwidth allocation for the HFC DOCSIS MAC protocol [A]. Proceedings Ninth International Conference on Computer Communications and Networks [C]. Las Vegas, Nevada, 2000: 54-60.
- [10] Limb J O, Sala D. A protocol for efficient transfer of data over fiber/coax systems [J]. IEEE Transactions on Networking, 1997, 5(6): 872-881.
- [11] Sala D, Limb J O, Khaunte S U. Adaptive control mechanism for cable modems MAC protocols [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM'98 [C], San Francisco, California, 1998. 1392-1399.

作者简介:



孙晓东 男. 1975 年出生于江苏省张家港市. 1999 年获清华大学电子工程系无线电技术与信息系统专业学士学位. 现为清华大学电子工程系通信与信息系统专业硕士研究生. 主要研究方向为宽带网络接入技术、通信网络协议和拥塞控制、以及嵌入式系统开发.



冯振明 男. 1946 年出生于北京市. 现为清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 从事信号处理、通信与信息系统研究, 已发表论文 40 余篇.