

# 基于 HFC 网络上行信道 CDMA-预约 ALOHA 多接入方式吞吐量分析

孙飞燕, 张朝阳, 陈文正

(浙江大学信息学院信息与通信工程研究所, 浙江杭州 310027)

**摘 要:** 为了在 HFC 网络上实现交互式业务, 人们对基于 HFC 网络的介质访问协议进行了广泛的研究. 已出现的几种基于 HFC 的 MAC 协议基本上都采用了竞争与预约相结合的访问机制. 基于 CDMA 的 HFC 是新一代的 HFC 系统. 本文提出了一种基于 CDMA 的双向 HFC 网络竞争与预约相结合的上行信道多址接入方式, 并且为该协议系统建立了四状态 Markov 链分析模型, 对该协议进行了性能分析, 并给出了计算机实验结果与分析.

**关键词:** HFC 网络; MAC; 多址接入; CDMA; CDMA-预约 ALOHA; Markov

**中图分类号:** TN961 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 11-1552-03

## On Throughput Performance of the CDMA Reservation ALOHA Multiple Access System for the HFC Network

SUN Fei-yan, ZHANG Zhao-yang, CHEN Wen-zheng

(Dept. Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** In order to support interactive services based on HFC networks, researchers have proposed several medium access control protocols, most of which adapt to reservation mechanism based on random access mechanism. The CDMA based HFC is a new generation of HFC system. In this paper, a CDMA-Reservation Aloha access approach for the HFC network is proposed. Markov chain system model is defined and a closed-form expression for the throughput is derived. Finally the steady state numerical performances are analyzed.

**Key words:** HFC network; MAC; multiple access; CDMA; CDMA-Reservation Aloha; markov

### 1 引言

在双向 HFC 网中存在两种类型的信道: 从前端到用户的下行广播信道和从用户到前端的上行多址信道. 因此, 必须有一个多址接入协议来解决用户上行的有效接入. 目前已出现的 HFC 系统的 MAC 协议大部分是预约型的 ALOHA 协议<sup>[1~3]</sup>. 但这种基于时分的接入方式对信道条件要求较高. 采用扩频技术的码分多址 (CDMA) 接入方式既可有效地抑制上行噪声, 又能有效地利用上行带宽. 考虑到码分多址的优越性能, CDMA 特别适合于双向有线电视网的上行接入<sup>[4]</sup>. 可以肯定地说如果 CDMA 技术与 ALOHA 技术相结合, 则会使原来的 ALOHA 技术的吞吐量得到改善.

因此本文首先提出了一种适用于 HFC 网络上行信道的 CDMA-预约 ALOHA 多址接入协议. HFC 上行信道先用 CDM 方法划分成多个独立的码分信道, 每个码分信道采用预约 ALOHA 方式. CDMA-预约 ALOHA 为上行信道提供一个信道容量高、有效对付噪声环境及带宽管理灵活的解决方案.

然后本文对 CDMA-预约 Aloha 接入系统的 MAC 层协议的性能进行了分析和比较. 通过建立系统的离散时间马尔可夫链模型, 先推导了单个码分信道预约接入模式下的系统吞

吐量公式, 然后推出  $M (M > 1)$  个码分信道的系统吞吐量. 同时分析了系统各参数对吞吐量的影响, 并将结果与时隙 ALOHA 进行了比较.

### 2 CDMA-预约 ALOHA 上行多用户随机接入系统协议模型

HFC 网络包括一个 CMTS (中心端) 和一些 CM (用户), 一个下行广播信道和  $M$  个上行码分信道. 所有 CM 共享这  $M$  个码分信道. 上行信道的传输时间轴被划分为一个一个的时隙 (一个上行包的发送时间). CMTS 控制每个时隙的使用. CMTS 通过下行信道广播的方式, 通知 CM 当前信道的状态, 以及 CM 可以在哪些时段用那些扩频序列发送上行随机信号.

假设在某一时段可以分配  $M$  个码分信道用于用户端 CM 的随机上行接入, 则 CMTS 把所有允许随机上行的 CM 分成  $M$  组, 每组分配一个码. 这样 CDMA 系统可看成  $M$  个独立的非 CDMA 系统, 每一个码分信道均采用预约 ALOHA 技术. 下面的描述都针对一个码分信道上的情况.

CM 采用一种预约 Aloha 的接入模式, 当 CM 有上行数据发送时, 产生一个包长的预约请求帧向 CMTS 预约上行信道,

预约申请采用时隙 ALOHA 的方式竞争发送. 预约成功后, 就可在预约的时隙里发送数据, 直到数据传送完毕. CM 一次只能发一个请求. 当两个以上的 CM 同时在一个子信道中发送就会发生冲突, 冲突的 CM 站点随机等待一段时间后重新尝试预约.

在作分析前先给出一些假设, 这假设将使系统分析大为简化:

(1) 系统中的 CM 足够多, 即大量的 CM 同时随机地发送数据, 在每个 CM 的通信量都很小的条件下, 整个系统的请求帧到达过程可以看成是泊松过程. 该假设基于两个方面的原因: 其一, 虽然出现重发时的到达过程不再是泊松过程, 而是一个与重发策略有关的较为复杂的过程, 但只要重发的随机时延足够长, 那么仍然可以认为请求帧的到达 (包括重发帧) 是泊松的<sup>[5]</sup>. 其二, 在 HFC 接入网的局部范围内, 来自于用户端的原始请求包还没有受核心网络传输协议和路由调度算法的复杂影响, 而只是经过了简单排队, 其数据源的统计特性不同于核心网络中数据包的统计特性, 可以假定为泊松分布.

(2) 系统到达的数据帧的长度为几何分布<sup>[5]</sup>, 即

$$P[\text{帧长} = x] = \begin{cases} g_m(1 - g_m)^{x-1}, & x = 1, 2, 3 \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $x$  的单位为时隙.

(3) 信道是可靠的, 功率控制也是理想的, 并且忽略捕获效应.

### 3 CDMA-预约 ALOHA 系统吞吐量性能分析

#### 3.1 $M=1$ 时系统吞吐量性能分析

首先考虑  $M=1$  的情况下系统的吞吐量  $S$ , 这时系统只有一个上行码分信道. 在这个基础上通过简单的扩展, 很容易得出  $M>1$  时的吞吐量.

根据前面的假设, 在一个时隙中, 系统处于如下状态之一: (1) 空闲状态 ( $S_I$ ), 该时隙上行信道空闲; (2) 冲突状态 ( $S_C$ ), 该时隙有两个或两个以上的 CM 发送预约请求帧, 发生竞争冲突, 预约请求失败; (3) 发送预约请求帧 ( $S_R$ ), 该时隙只有一个 CM 发送预约请求帧, 预约成功; (4) 发送数据帧 ( $S_D$ ), 该时隙发送数据包.

由于第  $n+1$  个时隙的系统状态只与第  $n$  时隙的系统状态有关, 因此可以建成该接入系统的离散时间 Markov 链模型, 并且该 Markov 链是不可约的, 又由于只有有限个状态, 它又是遍历的, 必然存在平衡解<sup>[5]</sup>.

将马尔可夫模型的状态按矢量排列: ( $S_I, S_C, S_R, S_D$ ), 稳态概率矢量  $\Pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3)$ , 设

$p_0$  是一个时隙内没有帧到达的概率,  
 $p_1$  是一个时隙内有一个帧到达, 因为

帧到达过程假定为泊松过程, 所以

$$p_0 = e^{-G}, p_1 = Ge^{-G} \quad (2)$$

其中  $G$  为网络负载, 等于一个时隙内总共发送的平均帧数<sup>[6]</sup>. 又由式(1)知, 当系统处在  $S_D$  时, 该帧在

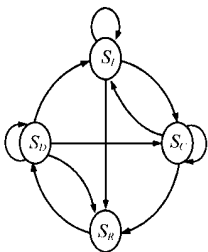


图 1 系统状态转移图

这个时隙内发送结束的概率为  $g_m$ , 于是得到图 1 的系统状态转移图和相应的状态转移矩阵, 见式(3).

状态转移矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & 0 \\ x_0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ g_m x_0 & g_m x_1 & g_m x_2 & x_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$x_0 = p_0, x_1 = 1 - p_0 - p_1, x_2 = p_1, x_3 = 1 - g_m$$

$$\text{由方程组} \begin{cases} \Pi = \Pi M \\ \sum_j \pi_j = 1 \end{cases} \quad (4)$$

可求得稳态概率分布, 把预约请求包也计算在系统吞吐量中, 则系统归一化吞吐量

$$\bar{s} = \pi_2 + \pi_3 = \frac{x_2}{g_m + x_2} (1 + g_m) \quad (5)$$

其中  $x_2 = Ge^{-G}$

因为  $\frac{x_2}{g_m + x_2}$  是  $x_2$  的单调增函数, 所以当  $x_2$  取最大时, 即

$G=1$  时,  $\bar{s}$  达到最大

$$\bar{s}_{\max} = \frac{1/e}{g_m + 1/e} (1 + g_m) \quad (6)$$

#### 3.2 $M>1$ 时系统吞吐量性能分析

现在考虑  $M>1$  的情况. 假设网络总的负载为  $G$ , 有  $M$  个码分信道, 则单个码分信道的平均负载为  $G/M$ , 由式(6)可以直接推出单个码分信道的吞吐量为:

$$\bar{s} = \frac{x_2}{g_m + x_2} (1 + g_m) \quad (7)$$

其中  $x_2 = \frac{G}{M} e^{-G/M}$

$G=M$  时,  $\bar{s}$  达到最大

系统总的信道吞吐量为  $M$  个码分信道吞吐量的和:

$$\bar{s}_M = M \frac{x_2}{g_m + x_2} (1 + g_m), \quad (8)$$

其中  $x_2 = \frac{G}{M} e^{-G/M}$

### 4 试验结果与分析

下面对式(5)、(7)、(8)给出的系统吞吐量表达式通过计算机仿真进行分析. 为了便于比较, 在仿真中加入了时隙 ALOHA 的吞吐量曲线. CDMA-时隙 ALOHA 接入系统及其性能简要介绍如下:

$M$  个码分信道, 每个码分信道使用时隙 ALOHA 的接入方式. 假定总的归一化网络负载为  $G$ , 那么现在每一个码分信道的负载平均为  $G/M$ . 假设到达是泊松过程, 可以得到系统吞吐量和负荷的关系为<sup>[6]</sup>:

$$S = Ge^{-G/M} \quad (9)$$

#### 4.1 $g_m$ 对系统吞吐量性能的影响

图 2 表示单个码分信道 ( $M=1$ ) 的吞吐量  $S$  与网络负载  $G$  的关系. 3 条实线分别对应  $g_m=0.1$ ,  $g_m=0.5$ ,  $g_m=1$ , 即数据帧的平均长度分别为 10, 2, 1. 虚线是时隙 ALOHA 的系统吞

吐量。

由图可以看出,随着网络负载  $G$  的增加,  $S$  逐渐增大,当  $G=1$  时,  $S$  达到最大值。然后  $S$  随  $G$  的增大而减少,这是因为成功发送的帧数减少而发生冲突的帧增加。 $G$  大于 1 时曲线呈现负斜率,因而这段区域是不稳定的。可见预约 ALOHA 与时隙 ALOHA 一样,要使系统稳定工作,网络负载不能超过 1。

另一方面,随着数据帧的平均长度增加,系统的最大的吞吐量明显增加,在  $g_m = 0.1$  达到 0.86,大于时隙 ALOHA 的最大吞吐量 0.368。这说明数据帧越长,系统的吞吐量性能越好,但这是以数据帧的平均传输时间的增加为代价的。

#### 4.2 $M$ 对系统吞吐量性能的影响

图 3 是多个码分信道 ( $M > 1$ ) 时的系统吞吐量 ( $g_m =$

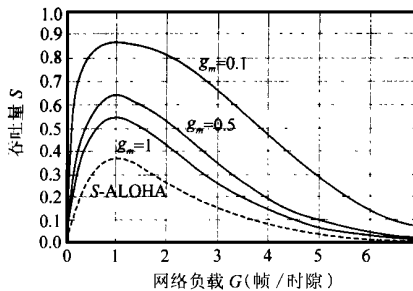


图 2  $g_m$  对系统吞吐量的影响 ( $M = 1$ )

由图可见,随着码分信道的增加,单个码分信道的最大吞吐量不变,始终为 0.86,远大于时隙 ALOHA。当  $G = M$  时  $S$  达到最大值,因此系统的稳定工作区域随码分信道的增加而增大。这也是容易理解的,因为系统总的网络负载为  $G$ ,分摊到每个码分信道的网络负载为  $G/M$ ,随着  $M$  的增加,每个码分信道的网络负载都小了,因此系统稳定工作的区域 ( $G < M$ ) 也增大了。

## 5 小结

解决系统上行信道的噪声和容量问题是实现 HFC 系统的关键所在,基于 CDMA 的 HFC 是新一代的 HFC 系统。本文提出了一种 HFC 网络 CDMA-预约 ALOHA 接入系统,把 CDMA 技术与预约 ALOHA 技术相结合,使原来的时隙 ALOHA 技术的吞吐量性能得到改善。通过把系统建成一四状态离散时间 Markov 链模型,得到了系统的归一化吞吐量表达式。分析了该系统的吞吐量性能,并给出了数据帧长度,扩频码数等参数对系统性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] L G Roberts. Dynamic allocation of satellite capacity through packet reservation [A]. AFIPS Conference Proc., National Computer Conference [C], June 1973, 42: 711-716.
- [2] J O Limb, D Sala. A protocol for efficient transfer of data over fiber/coax systems [J]. IEEE Trans. on Networking, December 1997, 5(6).
- [3] Chatschil Bisidikian, et al. MLAP: A MAC level access protocol for the HFC802.14 network [J]. IEEE Communications Magazine, March

0.1). 图中 3 条曲线分别对应  $M = 1, M = 2, M = 3$ , 虚线是时隙 ALOHA 的系统吞吐量。

由图可以看出,随着码分信道的增加,系统吞吐量明显增大。当  $M = 3$  时  $S$  的最大值已达到 2.59,远超过时隙 ALOHA。这是因为可用的码分信道多了,系统在同一时隙内能发送的帧也多了。 $G = M$  时  $S$  达到最大值,一旦  $G > M$ ,系统将会变得不稳定。可见,码分信道数量的增加同时也使系统的稳定工作区域增大。

#### 4.3 $M$ 对系统单个码分信道归一化吞吐量性能的影响

图 4 是在有  $M$  个码分信道的系统中,单个码分信道的吞吐量性能 ( $g_m = 0.1$ )。3 条曲线分别对应  $M = 1, M = 2, M = 3$ , 虚线是时隙 ALOHA 的系统吞吐量。

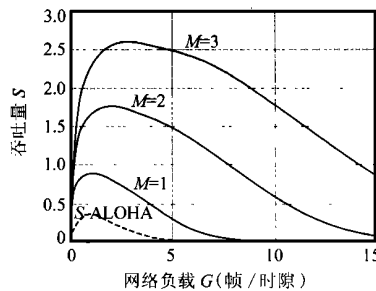


图 3  $M$  对系统吞吐量的影响 ( $g_m = 0.1$ )

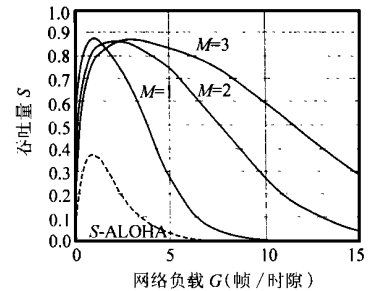


图 4  $M$  对系统中的单个码分信道吞吐量的影响 ( $g_m = 0.1$ )

1996: 114-121.

- [4] R P C Wolters. An initialization protocol for a CDMA based communications scheme for HFC/CATV networks [J]. IEEE Trans., September 1997, 43(3): 329-338.
- [5] 陈鑫林. 现代通信中的排队论 [M]. 电子工业出版社, 1999. 11.
- [6] 谢希任. 计算机网络. 第二版 [M]. 大连理工大学出版社, 1996. 4.

#### 作者简介:



孙飞燕 女. 1977 年生于江西上饶. 浙江大学通信与信息系统专业硕士研究生, 主要研究方向为多接入系统, HFC/CATV 网络, 协议工程等。



张朝阳 男. 1973 年生于湖北蕲春. 浙江大学信电系副教授. 现承担国家自然科学基金和国家教育部青年骨干教师资助项目. 主要研究方向包括宽带接入网络, 数字通信, IP 交换等。

陈文正 浙江大学信电系高工, 主要研究方向为通信与网络, 特别在全数字调制解调, HFC/CATV 网络, 可编程器件应用等方面有很深的研究。