

# HFC 宽带接入网故障恢复能力的研究

宋 军<sup>1</sup> 甘育裕<sup>2</sup> 吴资玉<sup>2</sup>

(重庆大学电气工程学院<sup>1</sup> 通信工程学院<sup>2</sup> 重庆400044)

Study on the Fault Recovery Ability of HFC Broadband Access Networks

SONG Jun GAN Yu-Yu WU Zi-Yu

(College of Electric Engineering<sup>1</sup>, College of Communication Engineering<sup>2</sup>, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** The timeslot synchronous mechanism of the upstream channel in HFC network is introduced in this paper. A mathematical model is built for the fault recovery of HFC network. We emphasize on analyzing the average time of HFC network completing fault recovery. The result of theory analysis shows network scale of service domain, back-off parameter's value of the contention resolution algorithm and the allocation policy of initialization ranging slot have great effect on the fault recovery ability of HFC broadband access network.

**Keywords** HFC network, Timeslot synchronous, Fault recovery

## 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”<sup>[1]</sup>。

作为大型商用网络, HFC网应当保持极低的网络故障率。目前,基本达到每一用户年平均不可用时间为170分钟、网络可用性99.97%的水平,可与电信网(网络可用性99.99%)相媲美<sup>[2]</sup>。然而,绝对不发生故障是不可能的,一旦网络发生故障,应立即对故障予以排除,并尽快恢复网络的各种服务功能。否则,不仅会给有线电视宽带综合业务网运营商带来巨大的经济损失,还会引起用户对网络服务质量的不满,给有线电视宽带综合业务网的发展造成负面影响。因此, HFC网的故障恢复能力是有线电视宽带综合业务网运营商重点关心的一个问题,也是提高有线电视宽带综合业务网服务质量所必须解决的重要课题。

## 2 HFC网的故障恢复

### 2.1 上行信道时隙同步

HFC网的带宽资源通过频分和时分进行复用,即先以频分复用方式把通信频段分为有一定间隔的频率段,对某个载波频率再以时分复用方式实现多址技术,电缆调制解调器(Cable Modem)分别在下行信道和上行信道中接收和发送数据。为防止对上行信道产生干扰,在没有数据发送时, Cable Modem保持尽可能低的发射功率,只有在有数据需要发送时才使发射电路工作。因此, HFC网的上行数据以突发方式发送;另外,每个Cable Modem与前端的电缆调制解调器头端系统(Cable Modem Terminate System, CMTS)之间的距离各不相同,即每个Cable Modem与CMTS之间的双向传播时

延是不相同的。由于上行信道被CMTS划分成一个一个的时隙分配给Cable Modem,为了使Cable Modem的突发数据到达前端CMTS时相邻且不发生重叠,接入HFC网的所有Cable Modem必须保持上行信道时隙同步,才能保证Cable Modem在CMTS指定的上行信道时隙中发送数据,避免因与其他Cable Modem发送的数据发生碰撞造成的数据错误、数据包丢失以及由此引起网络性能下降和服务质量降低等情况的发生。因此,上行信道的时隙同步是决定有线电视宽带综合业务网能否稳定、高效地进行数据传输的关键因素之一。

DOCSIS(Data Over Cable System Interface Specification)<sup>[3]</sup>是目前得到广泛采用的HFC宽带接入网网络标准。DOCSIS标准规定HFC网的上行信道时隙同步通过测距完成。测距使Cable Modem能够精确定时上行数据的传输时间,保证上行突发数据在CMTS指定的时隙开始时到达前端,避免不同Cable Modem发送的上行数据发生碰撞。另外,测距还对Cable Modem射频信号的发射功率和发射频率进行调整。

在HFC网出现故障并对故障加以排除后,由于还未恢复上行信道的时隙同步, Cable Modem不能立即进行数据传输,用户也不能获得HFC网提供的各种网络服务。因此, HFC网并未彻底完成故障恢复。只有通过初始化测距重新建立上行信道时隙同步后, HFC网才能真正恢复提供网络传输功能,用户也才能真正获得有线电视宽带综合业务网提供的各种服务。因此,网络故障恢复时的Cable Modem初始化测距性能对HFC宽带接入网的故障恢复能力起着至关重要的作用。

### 2.2 Cable Modem的初始化测距

为了使刚加电或重新初始化的Cable Modem建立上行信道时隙同步, CMTS周期性地在上行信道中分配初始化测距时隙(也称作初始维护时隙),并通过上行信道带宽管理帧(MAP帧)将初始化测距时隙的分配信息发送给每个Cable Modem, Cable Modem的初始化测距过程如图1所示。

宋 军 博士生,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。

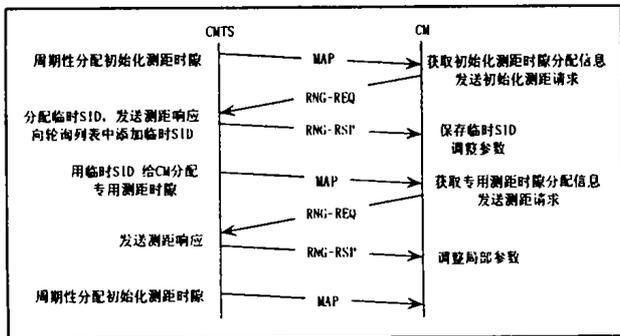


图1 CM 初始化测距

(1)初始接入 HFC 网的 Cable Modem 在完成下行信道同步后,首先等待并接收 CMTS 通过下行信道发送的 MAP 帧,从中获取上行信道初始化测距时隙分配信息;在初始化测距时隙到来时,Cable Modem 以竞争方式在初始化测距时隙中向 CMTS 发出初始化测距请求。

(2)CMTS 接收到初始化测距请求后,为 Cable Modem 分配临时的 SID,并将 Cable Modem 的临时 SID 添加到轮询测距列表中,同时向 Cable Modem 返回包含射频信号发射功率、发射频率和时钟偏移量等上行信道传输参数的测距响应信息。

(3)Cable Modem 在接收到 CMTS 的测距响应信息后,保存 CMTS 分配给自己的临时 SID,并对射频信号的发射功率、发射频率和时钟偏移量等上行信道传输参数进行初调。

(4)CMTS 通过临时 SID 为 Cable Modem 分配非竞争性专用时隙继续进行测距,对射频信号的发射功率、发射频率和时钟偏移量等上行信道传输参数进行微调,直至测距成功。

(5)初始化测距完成,Cable Modem 可以在 HFC 网中进行数据传输。

### 3 故障恢复的性能分析

通过上一节对 HFC 网故障恢复的分析可知,影响 HFC 宽带接入网故障恢复能力的关键因素是,网络故障恢复时 Cable Modem 初始化测距的性能。由于初始化测距请求是以竞争的方式在初始化测距时隙中进行发送,因此,初始化测距请求的成功发送在 Cable Modem 的初始化测距过程中起着举足轻重的作用。

Cable Modem 采用时隙 ALOHA 方式发送初始化测距请求。文[4]对时隙 ALOHA 系统的性能进行了分析,文[5]对采用各种不同的冲突解析算法时,HFC 网初始化测距的性能进行了分析。分析表明,在网络负载为100%时,系统的吞吐量达到最大( $G=0.368$ ),成功发送初始化测距请求所需的平均时间随系统吞吐量的增长而增加。这个结论基本上反映了网络处于正常工作情况下 Cable Modem 初始化测距的性能,其成立的前提条件是 Cable Modem 的数量无限、Cable Modem 初始化测距请求的到达过程服从泊松分布。

在 HFC 网故障恢复时,Cable Modem 通过初始化测距重新完成上行信道时隙同步的过程并不满足上述文献的假设条件。因此,要对 HFC 网的故障恢复能力进行分析,必须重新建立 HFC 网故障恢复的系统模型。

#### 3.1 系统模型

HFC 宽带接入网通常由多个服务小区组成<sup>[2]</sup>,每个服务小区覆盖200~500个用户,这些用户的 Cable Modem 与前端

的一台 CTMS 相连,Cable Modem 每天24小时在线。在 HFC 网故障恢复时,CMTS 必须对其所覆盖的所有 Cable Modem 重新进行测距,以保证 HFC 网上行信道的时隙同步。此时,整个服务小区的 Cable Modem 可能同时向 CMTS 发出初始化测距请求,形成初始化测距请求“风暴”。Cable Modem 初始化测距请求的到达过程也不再服从泊松分布,而是批量到达;此外,当 Cable Modem 成功发送初始化测距请求,以后的测距过程由 CMTS 通过临时 SID 为 Cable Modem 安排非竞争的专用时隙进行,已成功发送初始化测距请求的 Cable Modem 不再参与对初始化测距时隙的竞争。因此,随着初始化测距的不断进行,HFC 网中等待初始化测距的 Cable Modem 不断减少。

假设 HFC 网的一个服务小区中用户数量为  $N$ ,即在 HFC 网故障恢复时,等待初始化测距的 Cable Modem 初始数量为  $N$ 。当其中的一个 Cable Modem 成功发送初始化测距请求,HFC 网中等待初始化测距的 Cable Modem 就减少一个,直至全部 Cable Modem 都成功发送初始化测距请求。因此,HFC 网故障恢复时,网络中等待初始化测距的 Cable Modem 数量变化过程可视为一个纯灭过程,其状态转移图如图2所示。

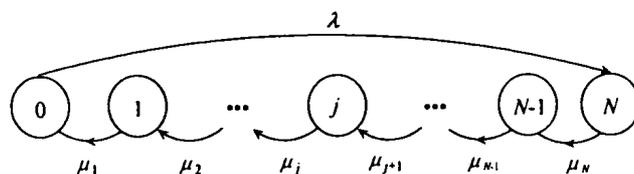


图2 故障恢复情况下初始化测距的状态转移图

根据纯灭过程的状态方程<sup>[6]</sup>,则 HFC 网初始化测距过程的状态方程为:

$$\frac{d}{dt}P_{j-1}(t) = \mu_j P_j(t) - \mu_{j-1} P_{j-1}(t) \quad (1)$$

其中, $j$  表示 HFC 网中等待初始化测距的 Cable Modem 数量, $j=0,1,2,\dots,N$ ;  $P_j(t)$  表示在经过了  $t$  个初始化测距时隙分配周期之后,HFC 网中还有  $j$  个 Cable Modem 等待初始化测距的概率。

#### 3.2 性能分析

由于故障恢复时 HFC 网完成上行信道时隙同步所需平均时间对 HFC 网的故障恢复能力起着至关重要的作用,因此我们对故障恢复情况下的系统性能分析,将着重于对 HFC 网故障恢复时完成上行信道时隙同步所需平均时间的分析。

在网络故障排除后,每个 Cable Modem 都希望第一时间重新接入 HFC 网获得各种网络服务。因此,当 CMTS 分配的第1个初始化测距时隙到来时,所有 Cable Modem 将同时向 CMTS 发出初始化测距请求,这必然导致冲突,所有 Cable Modem 的初始化测距请求都失败。因此,经过1个初始化测距时隙分配周期之后,HFC 网内仍然有  $N$  个 Cable Modem 在等待初始化测距,即:

$$P_N(1) \equiv 1 \quad (2)$$

由于冲突导致初始化测距请求发送失败,每个 Cable Modem 分别执行截断二进制指数退避算法重发初始化测距请求。Cable Modem 首先选择一个随机数  $n$ ,在重新发送初始化测距请求之前,Cable Modem 必须放弃  $n$  个 CMTS 分配的初始化测距时隙;在放弃的初始化测距时隙数量等于  $n$  后,

Cable Modem 向 CMTS 重新发送初始化测距请求;如果重发失败,Cable Modem 将重复上述过程,直至初始化测距请求重发成功或重发超过16次后重新选择信道。其中,随机数  $n \in [1, 2^B - 1]$ ,  $B$  为截断二进制指数退避算法的退避参数,由 CMTS 统一设置,通过 MAP 帧传送给所有 Cable Modem。

因此,冲突发生后,单个 Cable Modem 在下一个初始化测距时隙中重发初始化测距请求的概率为:

$$P_R = 1/2^B \quad (3)$$

假设在某个初始化测距时隙到来时,HFC 网中还有  $j$  个 Cable Modem 等待初始化测距。由于各个 Cable Modem 选择初始化测距时隙重发初始化测距请求的过程是随机且相互独立的,那么,有一个 Cable Modem 在这个初始化测距时隙中成功发送初始化测距请求的概率为:

$$P_S(j) = \binom{j}{1} P_R (1 - P_R)^{j-1} = \frac{j}{2^B} (1 - \frac{1}{2^B})^{j-1} \quad (4)$$

假设第  $t$  个初始化测距时隙到来时,HFC 网中有  $j$  个 Cable Modem 等待初始化测距。如果有一个 Cable Modem 在这个时隙中成功发送初始化测距请求,则在时刻  $t + \Delta t$ ,HFC 网的初始化测距状态将从  $j$  转移到  $j-1$ ;假设第  $t$  个初始化测距时隙到来时,HFC 网中有  $j-1$  个 Cable Modem 等待初始化测距,如果有多个 Cable Modem 在这个时隙中发出初始化测距请求,这必然导致冲突,则在时刻  $t + \Delta t$ ,HFC 网的初始化测距状态将保持为  $j-1$ 。因此,经过  $t$  个初始化测距时隙分配周期之后,HFC 网中还有  $j-1$  个 Cable Modem 等待初始化测距的概率可表示为:

$$P_{j-1}(t + \Delta t) = P_j(t) P_S(j) + P_{j-1}(t) (1 - P_S(j-1)) \quad (5)$$

由(1)、(5)式可得,在状态  $j$  时,HFC 网中等待初始化测距的 Cable Modem 的离开率为:

$$\mu_j = P_S(j) \quad (6)$$

那么 HFC 网的初始化测距状态从  $j$  转移到  $j-1$  所经历的平均时间,即在 HFC 网中有  $j$  个 Cable Modem 等待初始化测距的情况下,成功发送一个初始化测距请求所需要的平均时间为:

$$T_j = \frac{1}{\mu_j} = \frac{1}{P_S(j)} = \frac{2^B}{j} (1 - \frac{1}{2^B})^{j-1} \quad (7)$$

因此,HFC 宽带接入网完成故障恢复(即网络故障排除后,所有的 Cable Modem 重新接入 HFC 网获得的各种网络

服务)所需的平均时间为:

$$T_C = 1 + \sum_{j=0}^N T_j = 1 + \sum_{j=0}^N \frac{2^B}{j} (1 - \frac{1}{2^B})^{j-1} \quad (8)$$

由式(8)可知,影响 HFC 宽带接入网完成故障恢复所需平均时间的主要因素包括:等待初始化测距的 Cable Modem 数量,即单台 CMTS 所覆盖的服务小区网络规模;截断二进制指数退避算法的退避参数  $B$  的值。

另外,由式(8)计算的 HFC 宽带接入网完成故障恢复所需平均时间为初始化测距时隙的个数。因此,HFC 宽带接入网完成故障恢复所需平均时间的真实时间值,与 CMTS 的初始化测距时隙分配策略以及每个分配周期中 CMTS 分配的初始化测距时隙数量有关。

**结束语** HFC 网络是目前比较合理的用户宽带接入网选择方案之一,解决了信息高速公路建设中的用户接入网瓶颈问题。作为大型商用网络,HFC 宽带接入网的故障恢复能力是有线电视宽带综合业务网运营商重点关心的一个问题,也是提高有线电视宽带综合业务网服务质量所必须解决的重要课题。本文运用纯灭过程排队模型对 HFC 网的故障恢复进行了系统建模,并对 HFC 网完成故障恢复所需的平均时间进行了理论分析。分析结果表明,提高 HFC 宽带接入网的故障恢复能力,必须从服务小区网络规模、截断二进制指数退避算法的退避参数值、初始化测距时隙的分配策略等方面加以改进。

## 参考文献

- 1 Wai S L, et al. Hybrid fiber-coax system[J]. SPIE Proceedings, Oct. 1995, 23~24
- 2 韦乐平. 接入网. 北京:人民邮电出版社. 1997
- 3 MCNS Holding. Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Radio Frequency Interface Specification, SP-RF1v1. 1-101-990311[S]. Mar. 1999
- 4 谢希仁,陈鸣,张兴元. 计算机网络[M]. 电子工业出版社,1994
- 5 Sala D, Hartman D, Limb J O. Comparison of algorithms for stations registration on power-up in an HFC network [D]. IEEE802. 14 Working Group, Jan. 1996
- 6 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
- 22 Warren P, Boldyreff C, Munro M. Characterizing evolution in Web sites. Some case studies. In: Proc. of the Intl. Workshop on Web Site Evolution, Oct. 1999
- 23 Conallen J. Building Web Applications with UML. Addison-Wesley, Reading, MA, 2000
- 24 Ricca F, Tonella P. Web site analysis: Structure and evolution. In: Proc. ICSM2000, 2000. 76~86
- 25 Kung D C, Liu C-H, Hsia H. An Object-Oriented Web Test Model for Testing Web Applications. In: Proc. of APAQS 2000, Oct. 2000. 111~121
- 26 Liu C-H, Kung D C, Hsia P. Object-Based Data Flow Testing of Web Applications. In: Proc. of APAQS 2000, Oct. 2000. 7~16
- 27 Kung D, Gao J, Hsia P, Lin J, Toyoshima Y. Design Recovery for Software Testing of Object-Oriented programs. In: Proc. of Working Conf. on Reverse Engineering, May 1993. 202~211
- 28 卢虹,徐宝文. 一种 Web 应用的状态测试方法. 计算机工程与应用, 2002, 2: 55~57
- 29 Kallepalli C, Tian J. Measuring and Modeling Usage and Reliability for Statistical Web Testing. IEEE Trans. Software Engineering, 2001, 27(11): 1023~1036
- 30 徐宝文,张卫丰. 数据挖掘技术在 Web 预取中的应用研究. 计算机学报, 2001, 4: 430~436

(上接第104页)

- 11 陈振强,徐宝文. 一种并发程序依赖性分析方法. 计算机研究与发展, 2002, 39(2): 159~164
- 12 Chen Z, Xu B. Slicing Concurrent Java Programs. ACM SIGPLAN Notices, 2001, 36(4): 41~47
- 13 Chen Z, Xu B, Yang H. Detecting Dead Statements for Concurrent Programs. In: Proc. of SCAM 2001, IEEE CS Press. Florence, Italy, 65~72
- 14 Xu B, Chen Z. Dependence Analysis for Recursive Java Programs. ACM SIGPLAN Notices, 2001, 36(12): 70~76
- 15 Weblint. <http://www.weblint.org>
- 16 W3C HTML Validation Service. <http://validator.w3.org/>
- 17 Net Mechanic. <http://www.netmechanic.com>
- 18 Doctor HTML. <http://www2.imagiware.com/RxHTML>
- 19 TCAT for Java. <http://www.soft.com/Products/Coverage.msw/tcatj.html>
- 20 Visual Test. <http://www.rational.com/products/visual-test/prodinfo/whitepapers/index.jhtml>
- 21 Warren P, Boldyreff C, Munro M. The evolution of websites. In: Proc. of the Intl. Workshop on Program Comprehension, May 1999, 178~185