

基于自相似业务模型的实时调度算法研究

徐玉滨 宋立媛 沙学军

(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)

摘要 该文提出了一种基于MAC层协议的CSMA-DAMA实时调度算法,可以更好地支持多媒体业务的实时传输。对此调度算法的性能进行了理论和仿真分析。在分析中采用了能更好地反映多媒体业务特性的自相似模型,使性能的评价更加准确。通过引入按需分配机制和漏桶算法,使其在实时数据传输性能的各个方面均得到有效提高,可以更好地满足多媒体业务的实时性要求。

关键词 实时调度算法, MAC层协议, CSMA-DAMA, 自相似模型

中图分类号: TN919.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0158-05

Performance Evaluation of the Real-Time Scheduler Algorithm under Self-similar Network Traffic

Xu Yu-bin Song Li-yuan Sha Xue-jun

(Research Center of Communication Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract A new scheduler algorithm CSMA-DAMA based on the Media Access Control (MAC) sublayer is proposed, which could provide a better service for the multimedia real-time transmission. Theoretical and simulation analyses of the performance are given in which the self-similar model are used to characterize the multimedia traffic better and make the evaluation more precise. This algorithm obtains a great improvement in the performance of the real-time data transmission and satisfies the real-time requirement of the multi-media traffic better by introducing the assignment on demand and leaky bucket algorithm.

Key words Real-time scheduler algorithm, MAC, CSMA-DAMA, Self-similar

1 引言

随着网络技术的发展,多媒体业务成为网络传输的一类重要业务。多媒体业务的出现和普及从根本上改变了网络通信流量的特性。90年代初期, BellCore在进行长期观察和跟踪后,提出网络流量特性具有自相似本质的论断^[1,2],传统的Markov模型已不能对网络的性能进行准确估计。在通信流量的特性和人们对网络的需求发生改变后,原有的通信协议就不能满足人们的要求,对原有协议进行改进变成一种必然。

为了满足多媒体业务的实时性要求,文献[3-6]已经提出了很多技术方案。目前,被提出的局域网上的多媒体调度算法主要有两类:一类是基于高层协议,即进行MAC层以上部分的修改,例如准可靠多路传输协议(QMTP)和类似于FTAM协议的多媒体控制、访问、管理协议^[3,4]等,这一类协议性能仍然受到底层协议的性能影响,受底层协议性能限制;另一类是对MAC层协议进行修改,主要方式是引入优先级、改变延时等待策略^[5,6]等。这些方式会使系统复杂度增

加或者要对已经成熟的硬件接口设备进行修改,从而会给系统实现带来很大的难度。因此,本文提出了一种结合CSMA/CD和DAMA的MAC层调度算法,并通过理论和仿真结果对比分析其性能。本算法可以采用中间件技术实现,不用进行硬件上的修改,策略实现难度也较小,因此具有一定的优势。该调度算法的运用,在不改变网络平台硬件配置情况下性能得到有效提高,可以更好地满足多媒体业务的实时性要求。

2 网络控制机制

由于多媒体业务的影响,网络流量呈现明显的突发特性。传统的争用机制对于大规模突发性性能急剧恶化,在负载很低时就具有很大的延时,这对延时特性很敏感的实时数据传输影响很大。针对这样的问题,考虑将按需分配引入传统的争用机制,使得在较高负载时,可以大幅度地减小延时,以便对实时业务提供满足要求的服务。

基本思想 建立一个逻辑控制中心,对所有业务节点进

行控制，用剩余生存时间作为衡量指标，并假设系统数据信息采用背负(piggyback)信令方式，使系统控制中心知道每个业务节点对时间的要求，从而对这部分业务实现按需分配，以提高系统性能。其系统结构框图如图 1 所示。在具体实现中，考虑到新节点的接入问题，因此保留了其争用部分。在这种新的局域网策略中，每帧分为争用和按需两部分，争用部分占用 M 个时隙，采用争用的策略，这部分可将新业务接入，实现了对每个节点的公平性。传送每个数据包后将附加一部分信息，附加信息用于通知逻辑控制中心其缓存中的情况，控制中心就会根据缓存的情况，采用漏桶的方式将一帧中按需分配的时隙分配给各个站点。按需的部分长度 N ，根据缓存中的情况可调，最大为 NUM 个时隙。时隙的分配是控制中心通过广播的形式通知给各个站点。

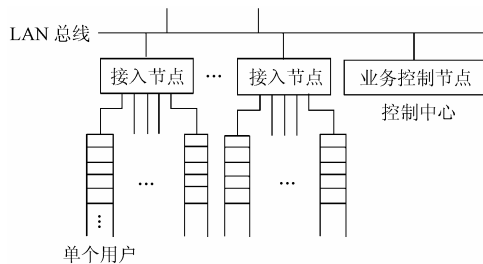


图 1 系统结构框图

Fig.1 System structure

总体结构 采用总线型结构，逻辑控制中心和多媒体接入节点直接接入总线，每个用户在多媒体接入节点处接入自身的业务。

数据格式 符合 IEEE802.3 协议中规定的标准数据格式。

多媒体接入节点的处理：在多媒体接入节点处，同时有多个用户接入，来自于不同用户的数据包在接入节点处进入统一的缓存排队。考虑到多媒体信息有时延限制，接入节点缓存中的数据会按不同的时延要求标注剩余生存时间(即在被销毁前仍可存活的时间)，这个标注值会随时间递减，包过期后即将该包丢弃。在该节点进行信息传输时，数据包将节点情况通过附加信息方式汇报给控制中心。

控制中心 信道进行数据传输时，控制中心从数据包中提取出附加信息，并通过附加信息基本了解各个节点的缓存情况，从而在按需分配时隙中，按照一定的分配策略(主要是根据剩余生存时间和缓存情况)，进行时隙分配，并将时隙分配结果通过广播通知给各个站点。

帧结构形式 1 帧中包括 M 个 R-Slot(随机争用时隙)，1 个 Broadcast Slot(广播时隙)， N 个 D-Slot(按需分配时隙， N 可调，根据业务情况变化)。其中，R-Slot 是争用时隙，用于信息数据包传送及新业务接入，保证算法对新业务的公平

性。Broadcast Slot 用于分配结果的通知，长度很小。D-slot 是按需时隙，按照逻辑控制中心的分配结果传送数据。D-Slot 的存在提高了突发数据的传输能力和强相关性业务的处理能力，降低了系统时延和丢包率，使本算法更适合自相似业务的传输。

3 调度算法及性能分析

本算法是针对多媒体传输特性提出的，采用了更能体现多媒体业务特性的自相似模型进行信源建模。自相似模型是近年来受到广泛关注的一种信源模型，其具体形式有很多种提法，其中最广为接受的是分形布朗运动(Fractional Brownian Motion)模型^[7]，本文采用这种业务模型。

假设每个用户产生的业务量为符合重尾分布的 ON/OFF 信源，根据文献[8]可知，在接入节点处接入的业务收敛于分形布朗运动分布。采用分形布朗运动作为以太网通信量的模型，则在时间 τ 内，到达的数据包的数目为

$$A(\tau) = \nu\tau + \sqrt{g\nu}B_H(\tau) \quad \tau > 0 \quad (1)$$

其中 $B_H(\tau) = X\tau^H$ 为标准 FBM， X 是一个随机变量，服从均值为 0、方差为 1 的正态分布， H 为 Hurst 参数， ν 为数据包平均到达速率， $g > 0$ 为 $A(\tau)$ 的方差系数。

3.1 自相似通信量下的 CSMA/CD 性能分析

设来自网络各站点的新到达和重传的数据包结合在一起，呈现的通信量统计特性为 FBM，即新到达和重传的数据包的总到达过程由式(1)所确定。

CSMA/CD 吞吐率定义为 1 个数据包的传输周期内，成功传输有效数据的时间与该周期之比。数据包传送周期由平均碰撞传输时间、平均成功传输时间和平均空闲时间组成。

假设 δ 为网络中相距最远的两个站点间的单向传输时间，站点在发送数据包的同时，监测信道 2δ 秒，将时隙宽度设为 2δ ，则有负载 $G=2\nu\delta$ ，为 1 个时隙内试图进行传输的新到达和重传数据包之和的平均数，且设 L 为传输 1 个数据包所需的时间， $k=\delta/L$ ， $g=1.0$ ，则可得出 CSMA/CD 的吞吐率表示公式为^[9]

$$S = \frac{\int_{a_1}^{a_2} f(x)dx}{4k - 2k \int_{a_0}^{a_1} f(x)dx + (1 - 2k) \int_{a_1}^{a_2} f(x)dx} \quad (2)$$

$$\text{其中 } a_0 = \frac{-0.5 - G}{\sqrt{G(2k)^{H-0.5}}}, \quad a_1 = \frac{0.5 - G}{\sqrt{G(2k)^{H-0.5}}}, \quad a_2 = \frac{1.5 - G}{\sqrt{G(2k)^{H-0.5}}}。$$

$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$ ， $\mu=0$ ， $\sigma^2=1$ ，从而可推得吞吐量与负载之间的关系。

3.2 实时调度算法的性能分析

首先对算法作一些简化和假设: 假设在争用时隙中这种实时调度算法采用与 CSMA/CD 基本相同的争用和监听机制, 而在按需分配时隙中, 当累积业务量小于可分配的最大时隙数目时, 该算法将会给所有在争用时隙中产生的包发送机会。

(1) 争用时隙的性能分析 在争用时隙中, 其工作过程与传统的 CSMA/CD 相同, 这里不加详细描述。为了简化分析, 将坐标轴离散化。将 A 作离散化处理, 即 $n-0.5 \leq A < n+0.5$ 时, 认为 $A=n(n=0,1,2,\dots)$ 。由式(1)可得, 在 2δ 时间内到达 n 帧数据的概率为

$$\begin{aligned} P(A(2\delta) = n) &\approx P(n-0.5 \leq A(2\delta) < n+0.5) \\ &= P\left(\frac{n-0.5-2v\delta}{\sqrt{gv(2\delta)^H}} \leq X < \frac{n+0.5-2v\delta}{\sqrt{gv(2\delta)^H}}\right) \\ &= \int_a^b \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mu=0$, $\sigma^2=1$, $a = \frac{n-0.5-2v\delta}{\sqrt{gv(2\delta)^H}}$, $b = \frac{n+0.5-2v\delta}{\sqrt{gv(2\delta)^H}}$,

$n=0, 1, 2, \dots, L, \dots$ 。

由于 M 的值可以取得很大, 这种情况下可认为其成功传输一个包的概率与普通 CSMA/CD 基本相同, 则用于成功争用的时间所占比例为

$$P = \frac{(L+2\delta) \cdot P_1}{(2\delta+2\delta) \cdot P_2 + (L+2\delta) \cdot P_1 + 2\delta \cdot P_0}$$

那么在 M 个时隙中可传送包的平均个数可以表示为

$$\begin{aligned} M_t &= P \cdot M \cdot s\delta / (L+2\delta) \\ &= \frac{P_1 \cdot M \cdot s\delta}{(2\delta+2\delta) \cdot P_2 + (L+2\delta) \cdot P_1 + 2\delta \cdot P_0} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $P_0 = P(A(2\delta)=0)$, $P_1 = P(A(2\delta)=1)$, $P_2 = P(A(2\delta) \geq 2) = 1 - P_0 - P_1$, L 为传输一个数据包所需的时间, 认为其与随机争用时隙的长度相同, 均为 $s\delta$ 。

(2) 按需分配时隙的分析 运用 CSMA-DAMA 的 MAC 层调度算法。在按需分配部分中, 只要累积业务量不超出可分配的最大时隙数目 NUM, 则可对所有已知的包进行传输。因此在该部分时隙中, 会有 3 种情况:

(a)1 帧需要传送的包数小于争用时隙的传输能力, 即小于 M_t , 此时不用进行按需分配, 直接开始下一帧。这种情况以概率 $P(A(Ms\delta) < M_t)$ 发生, 此时其吞吐量为

$$S_1 = \frac{L \cdot P_1}{(2\delta+2\delta) \cdot P_2 + (L+2\delta) \cdot P_1 + 2\delta \cdot P_0}$$

(b)1 帧需要传送的包数大于争用时隙的传输能力, 却小于帧的传输能力。此时若争用部分产生的包的个数为 $A(Ms\delta)$, 则帧长度为 $A(Ms\delta) \cdot s\delta + (M - M_t) \cdot s\delta$ 。这种情况发生的概率为 $P(M_t < A(Ms\delta) < (M_t + \text{NUM}))$ 。此时成功传输包的平

均个数为 $M_t + E$, 帧平均长度为 $(M - M_t) \cdot s\delta + E \cdot s\delta$, 所以 $S_2 = (M_t + E) \cdot s\delta / ((M - M_t) \cdot s\delta + E \cdot s\delta)$ 。

其中, $E = \int_{M_t}^{M_t + \text{NUM}} yP(A(Ms\delta) = y), P(A(Ms\delta) = y)$

$$= P\left(X = \frac{y - vMs\delta}{\sqrt{gv(Ms\delta)^H}}\right)$$

(c)1 帧需要传送的包数大于等于帧的传输能力。这时帧长度为 $(M + \text{NUM}) \cdot s\delta$, 成功传输的包的个数为 $\text{NUM} + M_t$, 这种情况发生的概率为 $P(A(Ms\delta) > (M_t + \text{NUM}))$, 对应吞吐量为 $S_3 = (\text{NUM} + M_t) / (\text{NUM} + M)$ 。

综合以上 3 种情况, 此调度算法的吞吐量为:

$$\begin{aligned} S &= P(A(Ms\delta) < M_t) \cdot S_1 + P(M_t < A(Ms\delta) < (M_t + \text{NUM})) \\ &\quad \cdot S_2 + P(A(Ms\delta) > (M_t + \text{NUM})) \cdot S_3 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $S_1 = \frac{L \cdot P_1}{(2\delta+2\delta) \cdot P_2 + (L+2\delta) \cdot P_1 + 2\delta \cdot P_0}$

$$S_2 = \frac{M_t + \int_{M_t}^{M_t + \text{NUM}} yP(A(Ms\delta) = y)}{M_t + \int_{M_t}^{M_t + \text{NUM}} yP(A(Ms\delta) = y)}$$

$$S_3 = \frac{\text{NUM} + M_t}{\text{NUM} + M}, P(u < A(Ms\delta) < v) = \int_u^v P(A(Ms\delta) = y)$$

令负载 $G=2v\delta$, 时隙长度 $L=s\delta$, 可得出吞吐量的数值形式, 并可得出相应的曲线对比。从图 2 看出, 本算法的性能要比传统的 CSMA/CD 算法具有优势。同时式(5)给出了争用时隙数目 M , 按需分配时隙最大数目 NUM, 自相似系数 H 及负载和吞吐量之间的数值关系式, 因此考察了当 M , NUM 和 H 作为参变量时的吞吐量变化情况, 从图 3 和图 4 可看出, 随着 M 减小, NUM 增大, 系统性能变好, 但是随着 M 减小, 随机接入新节点的能力变差, 因此 M 的取值要进行一个折衷, 以保持一定的接入新节点的能力和好的系统性能, 而 NUM 的取值可以选择较大的值, 会得到较好的结果。图 5 表示了自相似系数 H 变化时的系统性能变化情况, 这就说明

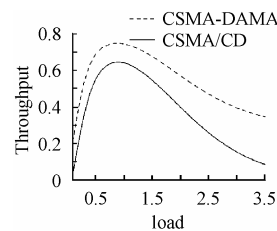


图2 两种算法的吞吐量-负载曲线(理论分析)

Fig.2 Throughput-load of two algorithms

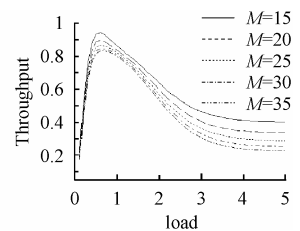


图3 不同 M 值时的吞吐量-负载曲线

Fig.3 Throughput-load under different M

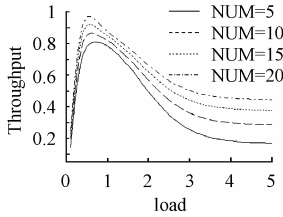


图 4 不同 NUM 值时的吞吐量-负载曲线

Fig.4 Throughput-load under different NUM

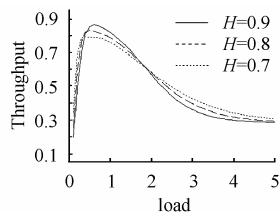


图 5 不同 H 值时的吞吐量-负载曲线

Fig.5 Throughput-load under different H

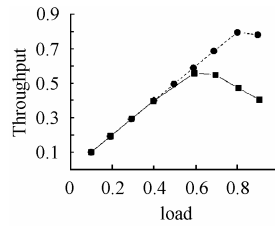


图 6 仿真吞吐量-负载曲线

Fig.6 Curve of throughput-load

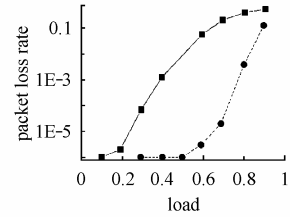


图 7 仿真丢包率-负载曲线

Fig.7 Curve of packet loss rate-load

了在负载分布变化的情况下网络性能也有一定的差异，而 Leland和Willinger等人通过研究发现^[10]，Ethernet上的信源的自相似系数大致是 0.9，所以本试验中主要针对这种情况进行分析。

4 仿真与分析

仿真中，除基本的时延和时隙长度的假设，仍有以下条件和假设：

- (1)包存在生存时间的限制，超过生存时间的包会被丢弃。
- (2)业务产生用 N -burst 模型来模拟，每个工作站的业务为 N 个 ON/OFF 信源的组合，ON 期间以 λ packet/s 的速率产生数据包，OFF 期间没有数据包产生。
- (3)分配部分开始前由控制中心进行时隙分配，广播占用时间为 τ_p (单位时延)。
- (4)按需部分长度可调，最大为 NUM 个时隙。
- (5)争用部分采用策略类似于 CSMA/CD，对其进行了一些修改，即一旦控制中心知道其缓存结果，该节点即退出争用时隙的争抢。

在以上的假设下，我们研究的改进算法与传统 CSMA/CD 协议的性能进行比较，得出它们在实时数据传输方面的性能差异。这里主要关注吞吐量、丢包率、延时的性能比较。

从图 6 可看出，新算法在负载小于 0.6 时优势并不明显，随着负载增加到 0.6 以上时，新算法的吞吐量表现出明显优势。从图 7 可以看出，对于强相关业务流，这种新算法在整个负载区间内丢包率都要比 CSMA/CD 低一至两个数量级。从图中可以看出对于传统的 CSMA/CD 策略，负载达到 0.3 之前就由于丢包率过高不能应用，而在本文提出的新算法负载达到 0.7 左右仍可保持较低的丢包率。从图 8 中可以看出，新算法在负载达到 0.7 左右均维持着很低的延时，可用于实时数据传输。而传统策略在负载达到 0.5 左右时就出现了较大的延时。

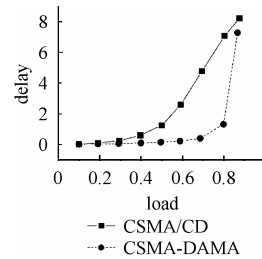


图 8 仿真延时-负载曲线

Fig.8 Curve of delay-load

5 结束语

综合吞吐量、丢包率和延时的曲线，在负载为 0.3 左右时，传统的 CSMA/CD 策略已不能满足多媒体数据传输的性能要求。而新策略在负载强度大于 0.7 以后性能才不满足要求。新算法在现有的硬件平台上，结合 CSMA-DAMA 的算法改进，通过引入按需分配和漏桶算法，将可用负载区间由 0.3 扩展到 0.7，可接入更多的用户。仿真结果表明了新算法的优越性，使其实时数据传输性得到有效提高，可以满足实时多媒体业务传输要求。

参考文献

- [1] Erramilli A, Roughan M, Veitch D, Willinger W. Self-similar traffic and network dynamics. *Proc. IEEE*, 2002, 90(5): 800 – 819.
- [2] Leland W, Taqqu M S, Willinger W, et al.. On the self-similar nature of ethernet traffic(Extended Version). *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1994, 2(2):1 – 15.
- [3] Yavatkar R, Manoj L. Optimistic strategies for large-scale dissemination of multimedia information. *Proceedings of ACM International Conference on Multimedia Table of Contents*, Anaheim California, New York, ACM Press, 1993:13 – 20.
- [4] Keller R, Effelsberg W. MCAM: An application layer protocol for movie control, access, and management. *Proceedings of ACM*

- Multimedia 93, Anaheim, California, New York, ACM Press, 1993: 21 – 29.
- [5] 白成林. 一种基于 CSMA/CD 的优先级随机分割的综合业务局域网协议. 小型微型计算机系统, 2003, 24(11): 1916 – 1918.
- [6] Molle M L. A new binary logarithmic arbitration method in ethernet. Technical Report CSRI-298, Computer System Research Institute, University of Toronto, 1994.
- [7] Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks. *IEEE J. on Selected Areas Commun.*, 1995, 13(6): 953 – 962.
- [8] Taqqu M S, Willinger W, Sherman R. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling. *Computer Communication Review*, 1997, 27: 5 – 23.
- [9] 沈伟, 冯瑞, 邵惠鹤. 自相似通信量下的 CSMA/CD 性能分析. 计算机工程, 2003 (8): 30 – 34.
- [10] Willinger W, Taqqu M S, Sherman R, *et al.*. Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1997, 5(1): 71 – 86.
- 徐玉滨: 男, 1954 年生, 博士, 教授, 研究方向为移动通信、多媒体通信、无线网络多址协议等. ybxu@hit.edu.cn
- 宋立媛: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为多媒体通信、网络协议等.
- 沙学军: 男, 1966 年生, 博士, 博士生导师. 研究方向为卫星通信、移动通信、无线网络多址协议等. shaxuejun@hit.edu.cn