面向用户的以太网可用性模型

石 健 王少萍 魏振金

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 带冲突检测的载波侦听多路访问协议(CSMA/CD)可以有效的解决竞争,提供高的吞吐量和低的延迟时间,并且成为了局域网设计中颇具吸引力的协议. 基于计算机以太网 CSMA/CD 协议, 面向用户探讨以太网可用度模型. 通过定义工作站"拥塞状态"和"空闲状态", 建立基于网络带宽、时隙的可用度模型. 以信息成功发送概率作为衡量以太网可用性的指标. 根据以太网中工作站的数量、平均字节长度、单机产生数据的速率以及单机数据重传速率对可用性影响的分析表明,随着局域网中接入的工作站的数量的增加在相同的时间内局域网的可用度将降低. 随着数据产生率的升高,局域网的可用度将首先升高,当网络达到饱和后再增加数据产生率,局域网的可用度将降低. 提高数据的重传率能够提高局域网的可用度. 根据以上的分析,通过合理的设置网络参数, 可以使局域网达到理想的可用度.

关 键 词: 以太网; 可用性分析; 拥塞状态; 空闲状态

中图分类号: TP 393

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)04-0494-05

User oriented availability model of ethernet

Shi Jian Wang Shaoping Wei Zhenjin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Carrier sensing random multiple access with collision detection protocol (CSMA/CD) can solve competition effectively and provide high throughput and low delay, so it has become an attractive protocol to the designers of local area net (LAN). Based on LAN's CSMA/CD protocol analysis, the user oriented availability model of Ethernet is put forward. By defining the workstation operating mode as congesting model and idle mode, the availability model based on bandwidth and time slot is established. The probability of LAN sending packets successfully in specified time is defined as the availability measure of Ethernet. By analyzing the effect of different parameters which include the number of workstations in Ethernet, average length of packets, packets arrival rate and retransmission rate on availability, it is show that the LAN's availability will decrease synchronously with workstation number in network increasing. With packets arrival rate increasing, availability will improve to maximum firstly, then decrease subsequently. It also shows that increasing retransmission rate can improve LAN's availability. By setting parameters reasonably, the higher LAN's availability can be obtained.

Key words: Ethernet; availability analysis; congesting mode; idle mode

以太网(Ethernet)是20世纪70年代研制开发的一种基带以太网技术,采用载波多路访问和冲突检测(CSMA/CD)机制[1]. 由于成本较低, 性价比很好,所以得到了广泛的应用.

随着以太网应用的不断深入, 用户对以太网可用性的要求越来越高,尤其对军事指挥系统和金融部门及实时控制系统等显得更为重要. 但由于网络自身的复杂性和协议的特殊性, 对于可用性的分析需要考虑的因素很多, 因此对于以太网可用性的评价一直没有一个统一的标准[2].

收稿日期: 2005-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60371043); 国防基金资助项目(51419020404HK0150); 新世纪优秀人才支持计划资助项目

作者简介: 石 健(1978-), 男, 山东济南人, 博士生, shijian123@sina.com.

目前对于网络可用性的分析主要是基于图论的方法, 从网络拓扑连通度角度出发来进行研究[3]. 基于图论的拓扑连通度通常假设网络节点不发生故障, 网络故障主要集中在链路上[4]. 而事实上, 以太网的故障多发生在节点机上, 其链路连接发生故障的概率极低, 一旦发生故障也便于检测和维修, 信息传输延时常发生在网络传输中. 因此使用传统的拓扑连通度方法进行以太网可用度描述已经不能很好地反映出以太网的综合质量性能.

根据可用度的定义, 可用度应该是在规定的时间完成规定任务的能力[5~7]. 以太网的任务是信息的传输, 因此以太网中除了存在着单机软硬件故障外, 信道的信息拥塞、时延过长也是其关键故障模式, 突出地表现为: 当用户有数据要收发时, 并不能实现数据的实时传输. 对于网络用户来讲, 过大的网络延迟时间往往令人难以接受, 甚至使传输任务变得不可能实现. 因此, 以太网以多大的概率提供规定的速度、规定的网络负载才是用户最关心的问题. 在这个意义上, 基于用户的以太网可用度才是其可靠性中最重要的指标.

本文从以太网数据传输性能指标入手, 研究当用户有数据要发送时, 数据在(0~ t) 时间内被成功发送出去的概率(即可用度), 并讨论网络的各参数对网络可用度的影响.

1　以太网可用度建模

设 T 表示单用户成功发送一帧数据的时间, 则基于用户的网络可用度可以表示为

$$A(t) = P(T < t) \tag{1}$$

1.1　定　义

1) 定义工作站的“拥塞状态”是指工作站从产生一帧数据准备发送开始到工作站能够正常的发送为止的时间内工作站所处的状态. 处于“拥塞状态”的工作站将不再产生新的数据帧, 直到将已有的数据发送出去为止. 如果工作站没有数据要发送就定义工作站处于“空闲状态”;

2) 每台处于“空闲状态”的工作站以 λ 帧/s 的速率产生新的数据, 连续产生两个新帧之间的间隔时间服从泊松分布, 平均间隔时间为 1/λ. 当“空闲状态”的工作站产生新数据帧后立即尝试发送数据.

以太网中的工作站运行在良好的工作状态下, 可将网络中的工作站分为两组: 处于“空闲状态”的工作站和处于“拥塞状态”的工作站.

1.2　假　设

1) 网络中存在 N 台相互独立的异步的工作站(work station) 通过一条共同的链路传输数据;

2) 每台工作站的可用度为 A_w, 通信链路不发生故障;

3) 每台工作站一次仅允许发送一个数据帧, 帧平均长度为 L;

4) 每台处于“拥塞状态”的工作站以 μ 帧/s 的速率尝试重新传输数据, 连续两次尝试的间隔时间服从指数分布, 平均间隔时间为 1/μ;

5) 网络的带宽为 B;

6) 网络的竞争时隙为 $2\tau_0$. 根据 802. 3 的规格说明, 在 10Mb/s 的局域网中, 允许帧的最小发送时间为 51. 2μs, 即: $2\tau_0 = 51.2$.

对于一个以太网, N, B 和 $2\tau_0$ 反映了以太网的固有特性; λ反应了网络的繁忙程度; L 和 μ是与网络的协议有关的参数; A_w 反映了网络中单机的可用度.

根据定义 2), “空闲状态”工作站的数据帧的产生服从指数分布, 数据帧的产生率为 λ 帧/s, 则“空闲状态”的工作站数据产生的概率密度函数为

$$f_0(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{2}$$

“空闲状态”工作站在 0~ t 时间内数据产生的概率:

$$p_0(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{3}$$

“空闲状态”工作站在一个时隙内的数据产生概率:

$$p_0 = A_w(1 - e^{-2\tau_0 \lambda}) \tag{4}$$

根据假设 4), “拥塞状态”工作站的数据帧重传的概率服从指数分布, 数据帧的重传率为 μ 帧/s, 则“拥塞状态”的工作站的数据重传概率密度函数为

$$f_1(t) = \mu e^{-\mu t} \tag{5}$$

“拥塞状态”工作站在一个时隙内的数据重传概率:

$$p_1 = A_w(1 - e^{-2\tau_0 \mu}) \tag{6}$$

1.3　处于“拥塞状态”的工作站的变化

网络中存在着处于“拥塞状态”的工作站和处于“空闲状态”的工作站, 这两组工作站的行为模式不同. 为了进一步分析网络的各种性能, 首先需要得到在网络中处于“拥塞状态”的工作站的变化情况.

定义随机变量 X_0 表示在一个时隙内处于“空闲状态”的工作站产生的新帧的数量;

定义随机变量 X_1 表示在一个时隙内处于“拥塞状态”的工作站重传数据帧的数量.

假设 n_j 表示在第 j 个时隙结束时处于“拥塞状态”的工作站的数量, 则 $n_1, n_2, n_3, \cdots$ 是一个离散的马尔可夫过程, 其状态空间为 $\{0, 1, 2, \cdots, N\}$.

在第 $j+1$ 个时隙结束时, 处于“拥塞状态”的工作站的数量为 n_{j+1}, 则

$$n_{j+1} - n_j = \begin{cases} 0 & X_0 = 0, X_1 = 0 \\ -1 + (N - n_j) p_0 (L/B) & X_0 = 0, X_1 = 1 \\ 0 & X_0 = 0, X_1 > 1 \\ (N - n_j - 1) p_0 (L/B) & X_0 = 1, X_1 = 0 \\ 1 & X_0 = 1, X_1 = 1 \\ 1 & X_0 = 1, X_1 > 1 \\ X_0 & X_0 > 1 \end{cases} \tag{7}$$

在(7)式中, 当 $X_0 = 1, X_1 = 0$ 表示有一台“空闲状态”的工作站产生一个新的数据帧并竞争到了信道, 在接下来的时间内该工作站不受干扰的发送数据. 在数据发送结束之前的时间内, 处于“阻塞状态”的工作站是否重传数据对于阻塞工作站的数量的变化没有作用. 在该段时间内处于“空闲状态”的工作站一旦产生数据, 则该工作站进入“阻塞状态”. 该段时间内产生数据工作站的数量的期望值为 $(N - n_i - 1) p_0 (L/B)$.

根据(7)式可以得到在第 $j+1$ 个时隙内处于“拥塞状态”的工作站的期望变化值为

$$\begin{aligned} n_{j+1} - n_j = & -P(X_0 = 0, X_1 = 1) + \\ & (N - n_j - 1) p_0 (L/B) P(X_0 = 1, X_1 = 0) + \\ & P(X_0 = 1, X_1 = 1) + P(X_0 = 0, X_1 > 1) + \\ & \sum_{k=2}^{N-n_j} P(X_0 = k) + \\ & (N - n_j) p_0 (L/B) P(X_0 = 0, X_1 = 1) \end{aligned} \tag{8}$$

定义 $x_i = n_i / N$ 表示在第 i 个时隙结束时处于“拥塞状态”的工作站的比例.

将(8)式整理得:

$$\begin{aligned} x_{j+1} = & x_j + (1 - x_j) p_0 - \left[\frac{(1 - x_j) p_0}{1 - p_0} + \right. \\ & \frac{x_j p_1}{1 - p_1} - \frac{N x_j (1 - x_j) p_0 (L/B) p_1}{1 - p_1} - \\ & \left. \frac{N (1 - x_j)(1 - x_j - 1/N) p_0 (L/B) p_0}{1 - p_0} \right] \cdot \\ & (1 - P_0)^{N(1 - x_j)} (1 - P_1)^{N x_j} \end{aligned} \tag{9}$$

在稳态情况下, 网络中处于“拥塞状态”的工作站的比例 x 满足:

$$\begin{aligned} & (1 - x) p_0 - \left[\frac{(1 - x) p_0}{1 - p_0} + \frac{x p_1}{1 - p_1} - \right. \\ & \frac{N x (1 - x) p_0 (L/B) p_0}{1 - p_1} - \\ & \left. \frac{N (1 - x)(1 - x - 1/N) p_0 (L/B) p_0}{1 - p_0} \right] \cdot \\ & (1 - p_0)^{N(1 - x)} (1 - p_1)^{N x} = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

根据(10)式可以求出在网络的稳定状态下处于“拥塞状态”工作站的比例.

1.4 网络可用性评价

设 T_b 为工作站数据产生时间; d 为信息的竞争延迟时间; τ 为信息在信道上的传播延迟时间. 则

$$T = T_b + d + \frac{8L}{B} + \tau \tag{11}$$

对于 1 km 长的同轴电缆, $\tau \approx 5\ \mu s$, 在 10 Mb/s 的以太网中相对于信息的发送延迟非常小, 在以下的讨论中将其忽略.

在以太网中传输一帧信息的过程见图 1.

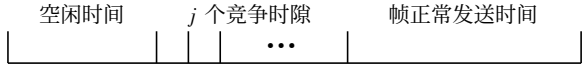

图 1 以太网中传输一帧信息的过程

在一个时隙内某台工作站要获得信道, 则表示在这个时隙内仅有一个工作站在发送数据. 概率 R 为

$$R = N A_w^N [(1 - x)(e^{2\tau_0 \lambda} - 1) + x(e^{2\tau_0 \mu} - 1)] \cdot e^{-2\tau_0 N[(1 - x)\lambda + x\mu]} \tag{12}$$

对于单台工作站, 在一个时隙内获得信道的概率 r 为

$$\begin{aligned} r = & A_w^N [(1 - x)(e^{2\tau_0 \lambda} - 1) + \\ & x(e^{2\tau_0 \mu} - 1)] e^{-2\tau_0 N[(1 - x)\lambda + x\mu]} \end{aligned} \tag{13}$$

当以太网上有一台工作站抓住了一个竞争时隙, 在接下来的时间内网络将处于不受干扰的“正常传输状态”.

当工作站经历的竞争时间正好为 j 个时隙的概率为 $r(1 - r)^{j-1}$, 因此工作站发送一帧数据要经历的平均时隙数 n 为

$$n = \sum_{j=0}^{\infty} j r (1 - r)^{j-1} = \frac{1}{r} \tag{14}$$

n 包含工作站数据产生的等待时间 T_b 和工作站竞争信道的延迟时间 d.

如果信息在 t 时间内传输成功, 则 $T < t$. 根

据(11)式, 信息的竞争延迟时间 $T_b + d < t - \frac{8L}{B}$, 则单台工作站在 $\frac{t-\frac{8L}{B}}{2\tau_0}+1$ 个时隙内数据包成功发送出去的概率 $P(T<t)$ 为

$$P(T<t)=\sum_{j=1}^{\frac{t-8L/B}{2\tau_0}+1} r(1-r)^{j-1} \qquad (15)$$

整理(15)式可得

$$P(T<t)=1-\left\{1-A_w^N\left[(1-x)(e^{2\tau_0\lambda}-1)+x(e^{2\tau_0\mu}-1)\right]e^{-2\tau_0 N[(1-x)\lambda+x\mu]}\right\}^{\frac{Bt-8L}{2\tau_0}+1} \qquad (16)$$

网络可用度描述了用户在 t 时刻内成功传输一帧数据的可能性.

2　各参数对网络可用度的影响

网络可用度目标函数反映了网络在规定的时间内成功传输数据的可能性, 从而反映了网络的可用性大小. 同时网络可用度是网络基本参数的函数, 网络各参数对网络的可用度都会造成影响.

2.1　N 对 $P(T<t)$ 的影响

假设网络的一组数据为 $B=10$Mb/s, $\lambda=494$, $\mu=1552$, $L=512$, N 分别取 10, 20, 30, 40. N 对 $P(T<t)$ 影响曲线如图 2 所示.

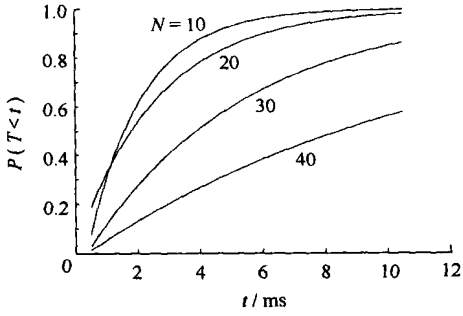

图 2　N 对 $P(T<t)$ 的影响

由图 2 可知, 在网络参数相同的条件下, 随着 N 的增加, 在同样时间点上网络可用性是下降的, 这是因为随着局域网中 N 的增加, 增加了局域网中发生冲突的可能, 因此局域网络中工作站的台数应该根据实际要达到的网络可用性的要求进行设计.

2.2　L 对 $P(T<t)$ 的影响

假设网络的一组数据为 $B=10$Mb/s, $\lambda=494$, $\mu=1552$, $N=512$, L 对 $P(T<t)$ 的影响曲线如图 3 所示.

由图 3 可知, 随着 L 的增加, 在 0~ t 时间数据包发送出去的概率也会随之下降. 从可用性的角度反映其可用性下降, 这是因为数据包长度越长意味着数据包传输所需的时间就越长. 同时 CSMA/CD 协议共享式以太网络中每台工作站是以独占网络资源的形式来发送数据的, 这样一来由于某台工作站的数据在传输过程中占用信道的时间加长, 从而导致其它工作站发生冲突的机会加大, 因此网络中数据包的平均长度也直接影响着网络的可用性.

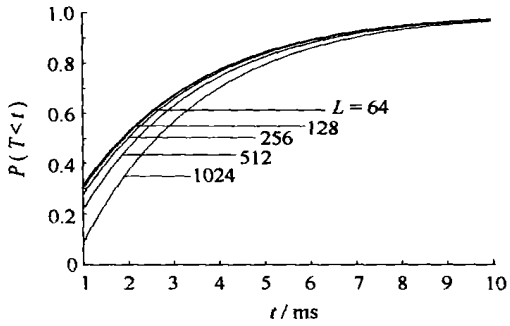

图 3　L 对 $P(T<t)$ 的影响

2.3　λ 对 $P(T<t)$ 的影响

λ 直接反应了网络的繁忙程度, λ 越高意味着网络越繁忙. 假设网络的一组数据为 $B=10$Mb/s, $N=20$, $\mu=1552$, $L=256$, λ 对 $P(T<t)$ 的影响曲线如图 4 所示.

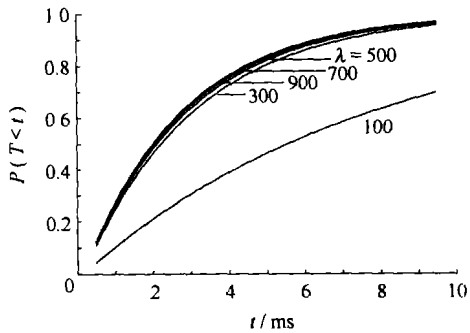

图 4　λ 对 $P(T<t)$ 的影响

由图 4 可知, 网络可用度首先随着 λ 的增长而增长, 此时网络尚未达到饱和, 网络中发生冲突的概率比较小. λ 达到一门限值, 网络的可用度将随着单机的数据产生率的升高而降低, 此时网络达到饱和, 网络中的冲突比较高.

2.4　μ 对 $P(T<t)$ 的影响

假设网络的一组数据为 $B=10$ Mb/s, $N=20$, $\lambda=494$, $L=512$, μ 对 $P(T<t)$ 的影响曲线如图 5 所示. 网络中由于冲突的存在导致数据的重传, 由图 5 可以看出随着 μ 的加大使得在时间 0~ t 内数据成功发送出去的概率也在加大.

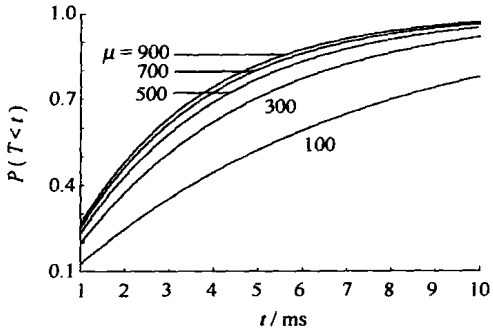

图5 单机μ对$P(T<t)$的影响

3 结束语

本文从以太网入手,面向用户提出了基于网络业务性能的以太网综合可用度模型及其评价函数.通过对局域网可用性的分析可知,随着局域网中接入的工作站的数量的增加,在相同的时间内局域网的可用度将降低.随着数据产生率的升高,局域网的可用度将首先升高,当网络达到饱和后再增加数据产生率,局域网的可用度将降低.提高数据的重传率能够提高局域网的可用度.根据以上的分析,通过合理的设置网络参数,可以使局域网达到理想的可用度.由于在以太网可用性研究中,如何将以太网中各种网络性能参数用于可用性评价,建立基于网络业务性能的综合可用性评价量度一直是一个难点,本文的研究成果可广泛用于以太网综合可用性评价中.

参考文献(References)

[1] Tranenbaum A S. Computer networks [M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 1998

[2] 刘克胜,张维明. 通讯网可靠性指标系统分析与综合评估研究[J]. 计算机应用研究, 1994, 12: 7~10
Liu Kesheng, Zhang Weiming. Synthetical analysis for communication networks' reliability measures and integrated evaluation[J]. Study for Computer's Application, 1994, 12: 7~10 (in Chinese)

[3] 汤道宇. 局域网可用性研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2003
Tang Daoyu. The study of local area network availability[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[4] 金 星, 洪延姬. 计算机网络系统正常工作模式和故障模式分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23: 91~93
Jin Xing, Hong Yanji. Successful mode and failure mode analysis for computer networks with imperfect nodes[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23: 91~93(in Chinese)

[5] 王少萍. 工程可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003
Wang Shaoping. Engineering reliability [M]. Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[6] Chan W C. Modeling of data networks[J]. International Journal of Modeling & Simulation, 1993, 13: 355~363

[7] Hisham S Abdel-Ghaffar. Analysis of synchronization algorithms with time-out control over networks with exponentially symmetric delays [J]. IEEE Trans Communication, 2002, 50: 528~535

(上接第483页)
的流体分离情况会更加复杂,以上结论涉及到在其他攻角时,必须由计算来确定;②当攻角变化时,L 在划水过程中的作用会发生较大变化,在一定的攻角下,可与 D 有相同量级的作用效率,这时就必须考虑 L 对推进力的影响.

参考文献(References)

[1] Berger M A, Groot G, Hollander A P. Hydrodynamic drag and lift forces on human arm models[J]. Journal of Biomechanics, 1995, 28 (2): 125~133

[2] Schleihauf R E. Hydrodynamic analysis of swimming proprlsion, swimming III[R]. International Series of Sports Sciences, University Park Press, 1979

[3] Wood T C. Fluid dynamic analysis of the propulsive potential of the hand and forearm in swimming[R]. Master of Science Thesis, Dalhousie University Press, Halifax, NS, 1977

[4] Berger M A, Hollander A P, Groot G. Determining propulsive force in front crawl swimming: a comparison of two methods[J]. Journal of Sport Sciences, 1999, 17(2): 97~105

[5] Bixler B S, Riewald S. Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics[J]. Journal of Biomechanics, 2002, 35(8): 713~717

[6] Bixler B S, Schloder M. Computational fluid dynamics: an analytical tool for the 21st century swimming scientist[J]. Journal of Swimming Research, 1996, 11(1): 4~22

[7] 王新峰, 王连泽. 划水时手指张角的变化对游泳推进力影响的数值模拟[J]. 西安体育学报, 2004, 21(5): 56~58
Wang Xinfeng, Wang Lianze. Numerical simulation of influence of variation of fingers flare angle on propulsion in pull[J]. Journal of Xi' an Institute of Physical Education, 2004, 21(5): 56~58(in Chinese)

[8] 狄 建. 对游泳推进力基础理论的分析归纳与认知[J]. 体育科学, 2002, 22(1): 77~80
Di Jian. Cognition and analysis of the classified basic theories in swimming propulsion[J]. Sport Science, 2002, 22(1): 77~80(in Chinese)