

支持优先级服务的 IEEE802.11 无线局域网性能分析^{*})

郑 凜 何建华 杨宗凯 程文青

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉430074)

摘 要 在无线局域网(WLAN)中实现优先级服务需要媒体接入控制(MAC)层的支持。IEEE802.11标准的 MAC 层基于分布式协调功能(DCF),不支持优先级服务。通过改变 MAC 协议参数,可对服务进行区分,但目前的研究尚未揭示 MAC 层协议参数与各优先级服务质量的数量关系,故而无法得到可商用的支持优先级服务的解决方案。本文提出一种分析模型,对无线站点的回退过程进行建模,从理论上解决了 IEEE802.11 MAC 层协议参数与服务质量的定量关系问题。基于 OPNET 的仿真实验验证了分析模型的正确性。

关键词 无线局域网,优先级,性能评估

Performance Evaluation of IEEE 802.11 Wireless LAN Supporting Multi-Priority Services

ZHENG Lin HE Jian-Hua YANG Zong-Kai CHENG Wen-Qing

(Dept. of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Support from medium access control(MAC)layer is necessary for providing QoS in wireless local area networks(WLAN). In IEEE 802.11 the MAC protocol is based on distributed coordination function(DCF), which doesn't support QoS. Services can be differentiated via varying the MAC protocol parameters. However, the quantitative relationship between QoS and protocol parameters is not uncovered. Then it is difficult for commercial use. This paper proposes an analytical model modeling the backoff process of the wireless station. Through the analytical model, the above problem is settled. The validation of the model is provided by OPNET simulations.

Keywords Wireless LAN, QoS, MAC, Performance evaluation

1 引言

IEEE802.11无线局域网(WLAN)技术近年来迅速发展,显示了良好的市场前景。如何在 WLAN 上提供服务质量(QoS)已成为研究热点之一。基于 WLAN 的无线共享信道特性,在 WLAN 上提供 QoS 必需得到媒体接入控制(MAC)层的支持。IEEE802.11标准在 MAC 层上的接入协议以分布式协调功能(DCF)为基础^[1],没有提供对多优先级服务的支持。已有部分研究提出了对现有 DCF 协议的分析和改进策略^[2~8]。改进的基本思路是通过针对不同优先级的站点配置不同的 MAC 层协议参数以达到区分不同优先级服务的目的。仿真结果表明,这些策略可以使得配置不同参数的站点享有不同的 QoS。但是上述研究均未能给出 MAC 层协议参数与站点 QoS 之间的定量关系,从而无法有效地进行接入控制,阻碍了其商用发展。

造成以上现象的主要原因是缺乏对多优先级情况下的 DCF 协议的理论分析模型。在文[2]中,Bianchi 提出一种对 DCF 协议进行理论分析的理论模型,可较为准确地分析该协议的性能。但是这种模型仅仅针对单优先级服务的情况,且在建模过程中,忽略了回退冻结阶段的影响,影响了模型的精确性。文[3]提出了几种通过改变 MAC 参数来区分不同优先级的机制,但仅仅利用仿真来验证这些机制的可行性,对不同优先级站点所获得的服务不能进行有效控制。为了解决此问题,Veres 在文[4]中提出一种分布式的接入控制机制,采用一个虚拟的 MAC(VMAC)模块,在系统运行期间实时模拟 MAC 层协议的运行,通过模拟结果评估实际系统中用户的 QoS,进而实现接入控制。这种方法本质上仍然基于仿真,效率不高且

缺乏可扩展性。本文在上述研究的基础上,提出一种新的理论分析模型。通过对 DCF 协议回退过程的建模,推导出 WLAN 的 MAC 层协议参数与无线站点 QoS 之间的定量数学关系。利用该模型,可有效评价支持 QoS 的 WLAN 性能,实现灵活准确的接入控制。

2 分析模型

IEEE802.11 MAC 层协议以分布式协调功能(DCF)为基础。DCF 的协议参数主要有:初始冲突窗口(用 W 表示),最大回退阶数(用 m 表示),冲突窗口倍乘指数(用 ρ 表示)等。通过对不同的站点设置不同的协议参数,可以实现服务的区分。不失一般性,设系统中共有 N 个不同的服务级别。每种服务订购的信道带宽不同。订购第 i 种服务的站点数目为 n_i , $i \leq N$ 。 i 较小的站点拥有更高的优先级被接入信道。相应地,将第 i 种服务的站点在回退机制中的参数 W, ρ, m 记为 W_i, ρ_i 和 m_i , $1 \leq i \leq N$ 。同时假设,每个站点都有足够的数据需要发送,即系统处在一种饱和的状态。

模型分析及推导分为两部分。第一部分对多服务类别情况下的无线站点回退过程进行分析和建模。第二部分利用第一部分所得到的分析模型和结果,计算出订购第 i 种服务的站点的饱和吞吐量,并进一步通过推导得出结论:当以初始冲突窗口 W 作为实现服务区分的唯一参数时,不同服务类型的无线站点的饱和吞吐量和其对应的 W 成近似反比关系。

在分析中所使用的时隙概念(slot time),是广义时隙,而非严格的系统时隙。在一个广义时隙中,系统只能处在下面三种状态之一:回退激活态,此时所有站点的回退计数器都在正常计数,每逢系统时隙的开始处便减1;成功发送态,此时给定

^{*})国家自然科学基金资助(No. 60202005)。郑 凜 博士研究生,主要研究方向为无线网络的服务质量。何建华 副教授,主要研究方向为无线网络与多媒体传输。

站点成功发送分组,其它站点的回退计数器冻结;分组冲突态,此时信道上发生分组冲突,所有站点的回退计数器均冻结。显然,每个状态所持续的时间并不相等。在后文中,如无特别指出,时隙均指广义时隙。

2.1 理论分析模型

设一个订购第 i 种服务的站点在任何一个时隙发送一个分组的概率为 τ_i ,信道上该站点发送的分组出现冲突的概率为 p_i 。若能求解 τ_i 和 p_i ,则分析模型即可得出。

设 $b(i, t)$ 为在时刻 t ,一个订购第 i 种服务的给定站点的回退计数器的值。由于每个站点的回退计数器的值依赖于分组此前的传输(即一个分组经历了多少次重传),因此随机过程 $b(i, t)$ 并非马尔可夫过程。定义 $s(i, t)$ 为订购第 i 种服务的站点在时间 t 所处的回退阶数,取值范围为 $[0, \dots, m_i]$,它也是个随机过程。

为建立分析模型,假设每个服务类别的站点所传输的分组发生冲突或不成功传输的概率 p_i 不依赖于站点的 $s(i, t)$

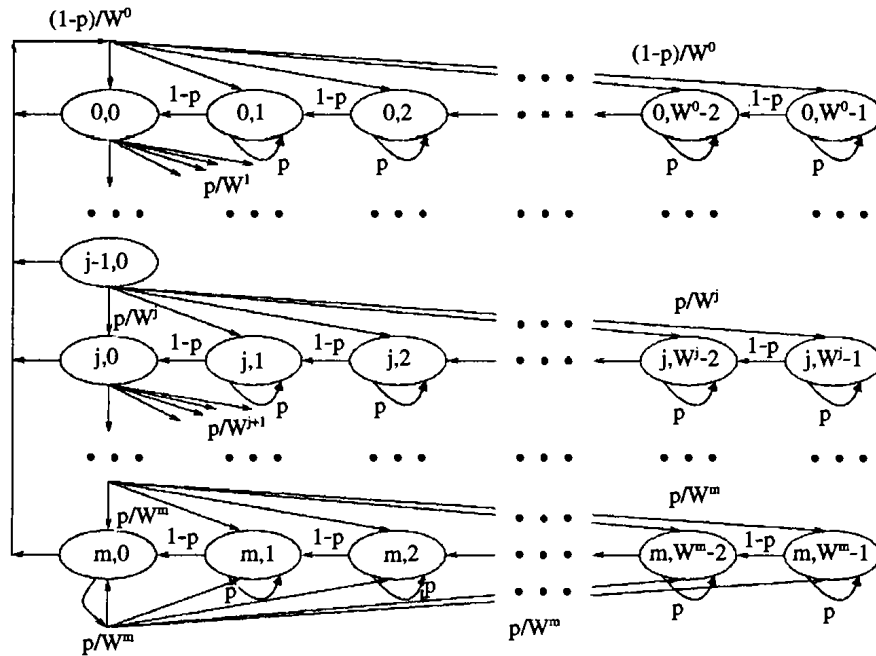


图1 回退窗口的马尔可夫链模型

公式(1)共有五项,将包括回退过程的冻结状态在内的各种情况涵盖在内,且能够支持多优先级服务的情况。其中第一项对回退激活态建模,表明在每个时隙开始时回退计数器减1的概率;第二项等式描述了回退计数器冻结的情况;第三项等式表明成功传输分组之后,发送新分组时从回退阶数0开始,其回退计数器初始值为一个均匀分布在 $(0, W_i^0 - 1)$ 内的随机数。最后两个等式描述了在一次不成功传输之后的情况。

记 $b_{i,j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(i, t) = j, b(i, t) = k\}$, $i \in [1, N]$, $j \in [0, m_i]$, $k \in [0, W_i^j - 1]$ 为马尔可夫链的稳态分布。则可推出以下关系:

$$b_{i,j,k} = \begin{cases} p_i b_{i,0,0}, & j \in [0, m_i - 1]; k = 0 \\ \frac{p_i}{1 - p_i} b_{i,0,0}, & j = m_i; k = 0 \\ \frac{W_i^j - k}{W_i^j (1 - p_i)} b_{i,j,0}, & j \in [0, m_i]; k \in [1, W_i^j - 1] \end{cases} \quad (2)$$

由归一化条件可求 $b_{i,0,0}$,

$$1 = \sum_{j=0}^{m_i} \sum_{k=0}^{W_i^j-1} b_{i,j,k} = \sum_{j=0}^{m_i} b_{i,j,0} + \sum_{j=0}^{m_i} \frac{b_{i,j,0}}{1 - p_i} \sum_{k=1}^{W_i^j-1} \frac{W_i^j - k}{W_i^j} = \frac{b_{i,0,0}}{1 - p_i} + \sum_{j=0}^{m_i} \frac{(W_i^j - 1) b_{i,j,0}}{2(1 - p_i)} \quad (3)$$

值(此假设随着站点数目和冲突窗口的增加而更趋精确)。 $b(i, t)$ 和 $s(i, t)$ 构成一个二维随机过程,可简化为一个离散时间的马尔可夫链 $(s(i, t), b(i, t))$, 见图1。由于各优先级的站点情况类似,因此表示服务类别(优先级)的下标在图中被省略。 W 的上标表示回退阶数 j , 根据 DCF 协议,有 $W^j = \rho^{\min(j, m)} W$ 。

对于第 i 种服务,简记 $P\{S(i, t+1) = j_1, b(i, t+1) = k_1 | s(i, t) = j_0, b(i, t) = k_0\}$ 为 $P\{j_1, k_1 | j_0, k_0\}$ 。则由图1可得非空的单步状态转移概率为:

$$\begin{cases} P\{j, k | j, k+1\} = 1 - p_i, & k \in [0, W_i^j - 2]; j \in [0, m_i] \\ P\{j, k | j, k\} = p_i, & k \in [1, W_i^j - 1]; j \in [0, m_i] \\ P\{0, k | j, 0\} = (1 - p_i) / W_i^0, & k \in [0, W_i^0 - 1]; j \in [0, m_i] \\ P\{j, k | j-1, 0\} = p_i / W_i^j, & k \in [0, W_i^j - 1]; j \in [1, m_i] \\ P\{m_i, k | m_i, 0\} = p_i / W_i^{m_i}, & k \in [0, W_i^{m_i} - 1] \end{cases} \quad (1)$$

$$b_{i,0,0} = \frac{2(1 - \rho_i p_i)(1 - p_i)^2}{1 + W_i^0 + p_i(2\rho_i p_i - \rho_i - 2 - W_i^0) + p_i(1 - \rho_i W_i^0)(\rho_i p_i)^{m_i}} \quad (4)$$

由于无论站点的回退阶数为多少,只要回退计时器为0,就可传输分组。因此根据 τ_i 的定义可得:

$$\tau_i = \sum_{j=0}^{m_i} b_{i,j,0} = \frac{b_{i,0,0}}{1 - p_i} = \frac{2(1 - \rho_i p_i)(1 - p_i)}{1 + W_i^0 + p_i(2\rho_i p_i - \rho_i - 2 - W_i^0) + p_i(1 - \rho_i W_i^0)(\rho_i p_i)^{m_i}} \quad (5)$$

通常 τ_i 依赖于信道冲突概率 p_i 。为了求得 τ_i , 必需求取 p_i 。信道上发生冲突意味着在同一个时隙中,至少有两个站点在传输分组。为简化问题,假设系统处于稳定状态,即订购第 i 种服务的站点均以概率 τ_i 传输分组。于是我们可以得到:

$$p_i = 1 - (1 - \tau_i)^{n_i} \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - \tau_j)^{n_j} \quad (6)$$

公式(5)和(6)中共有 $2N$ 个未知参数: τ_i 和 p_i , 表示了一个非线性系统。它们的数值可通过求解由式(5)和(6)构成的 $2N$ 个方程得到。

2.2 饱和吞吐量

求得各优先级站点在饱和状态下的 τ_i 和 p_i 后,可进一步

推导它们所获得的服务质量。设 S_i 为订购第 i 类服务的站点的饱和吞吐量, P_{idle} 为信道空闲的概率, P_c 为信道上发生分组冲突的概率, P_{tr} 为在任一个时隙中信道上有且只有一个分组在发送的概率, $P_{tr}(i)$ 为一个指数隙内有且只有一个订购第 i 种服务的站点发送分组的概率。很显然 $P_c = 1 - P_{idle} - P_{tr}$ 。为计算 S_i , 对任意给定的时隙进行分析如下:

由共享信道性质, 各站点需要竞争信道, 且每个订购第 i 种服务的站点以概率 τ_i 发送分组。因此可得:

$$P_{idle} = \prod_{i=1}^N (1 - \tau_i)^{n_i} \quad (7)$$

$$P_{tr}(i) = \tau_i (1 - \tau_i)^{n_i - 1} \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - \tau_j)^{n_j} \quad (8)$$

$$P_{tr} = \sum_{i=1}^N n_i P_{tr}(i) \quad (9)$$

由于在一个时隙里, 订购第 i 种服务的站点成功发送的平均信息负荷为 $P_{tr}(i)L$ (L 为数据分组的长度, 为简化分析, 设为常数)。因此

$$S_i = \frac{P_{tr}(i)L}{P_{idle}\delta + P_{tr}T_i + P_cT_c} \quad (10)$$

其中, T_i 是由于成功传输一个分组导致信道忙的平均时间, T_c 是每个无线站点在一次冲突中监听到信道忙的平均时间。 σ 是一个空闲的系统时隙长度。基本接入的情况下, 可以得到:

$$\begin{cases} T_i = DIFS + \frac{L_h + L}{R} + SIFS + \frac{ACK}{R} \\ T_c = DIFS + \frac{L_h + L}{R} + SIFS \end{cases} \quad (11)$$

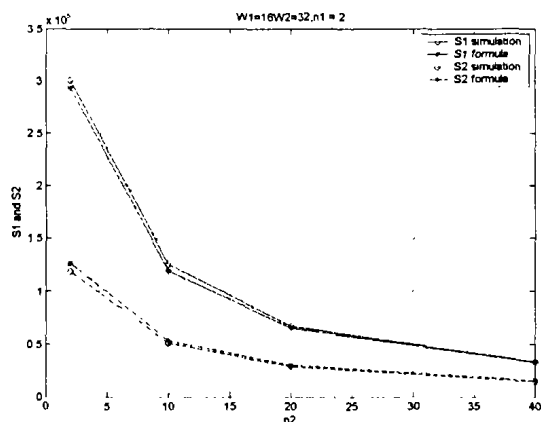
在 RTS/CTS 机制的情况下,

$$\begin{cases} T_i = DIFS + \frac{RTS}{R} + SIFS + \frac{CTS}{R} + SIFS + \frac{L_h + L}{R} + SIFS + \frac{ACK}{R} \\ T_c = DIFS + \frac{RTS}{R} + SIFS \end{cases} \quad (12)$$

式(11)和(12)中, R 表示信道速率。DIFS、SIFS、RTS、CTS 分别为名称所对应控制帧的长度(单位比特)。L_h 为数据分组首部的长度。至此, 求得了各优先级所获得的饱和吞吐量。

进一步, 由式(8)和(10), 有

$$\frac{S_i}{S_j} = \frac{P_{tr}(i)}{P_{tr}(j)} = \frac{\tau_i(1-\tau_i)^{n_i-1}}{\tau_j(1-\tau_j)^{n_j-1}}, i \neq j, i, j \in [1, N] \quad (13)$$



(a) $n_1=2$

又由式(6)可得, 当站点数目较大时, τ_i 和 W_i 有近似反比关系。从而,

$$\frac{S_i}{S_j} = \frac{P_{tr}(i)}{P_{tr}(j)} = \frac{\tau_i(1-\tau_i)^{n_i-1}}{\tau_j(1-\tau_j)^{n_j-1}} \approx \frac{W_j}{W_i}, i \neq j, i, j \in [1, N] \quad (14)$$

式(14)表明, 若仅仅使用 W , 即初始冲突窗口, 作为区分不同优先级服务的控制参数, 则在站点数目较大的时候, 不同服务类别的站点所得到的带宽和其初始冲突窗口的大小成近似反比关系。

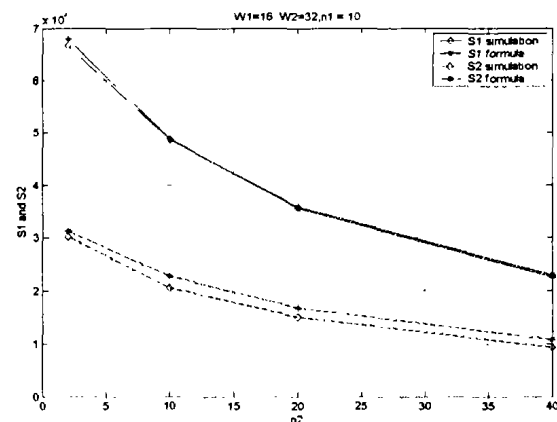
3 仿真结果

为验证所提出的分析模型的正确性, 我们使用 OPNET 进行了实验仿真。实验中所采用的参数与文[9]中的相同, 具体数值列于表1中。

表1 实验中采用的系统参数

MAC 首部长度	272 比特
PHY 首部长度	128 比特
ACK 长度	112 比特
信道速率	1 Mbps
分组长度	8000 比特
传输时延	1 μ s
时隙长度	50 μ s
SIFS 长度	28 μ s
DIFS 长度	128 μ s

实验中, 服务类别数 N 设为 2。为了观察站点数目对公式准确性的影响, 实验采用了多组站点数目, 分别为, $n_1 = [2, 10]$ 和 $n_2 = [2, 10, 20]$ 。尽管上一节所提出的分析模型能够定量刻画 W, m 等参数对服务区分程度的影响, 但由于篇幅所限, 这里仅仅给出将初始冲突窗口 W 作为区分服务的控制参数时的实验结果, 接入机制采用基本接入机制。设置 $m_1 = m_2 = 4, \rho_1 = \rho_2 = 2$, 两个服务类别的初始冲突窗口设置为 $\{W_1 = 16, W_2 = 32\}, \{W_1 = 32, W_2 = 48\}$ 和 $\{W_1 = 32, W_2 = 64\}$ 。在图 2 ~ 图 4 中给出了几组典型结果。为了便于比较, 图中同时给出了通过分析模型计算所得到的结果。从图中可以看出, 分析模型的计算结果和计算机仿真结果相当吻合。另外, 从图 5 可以看出, S_1 与 S_2 的比值约等于 W_1 与 W_2 比值的倒数, 从而验证了式(14)。利用这个性质可以简单地计算和估计各个站点能够获得的带宽, 从而设计灵活简单的接入控制机制以保证站点所订购的服务质量。



(b) $n_1=10$

图2 仿真结果和分析模型理论计算结果的比较: 站点获得的平均带宽 S_1 与 S_2 ($W_1=16, W_2=32$)

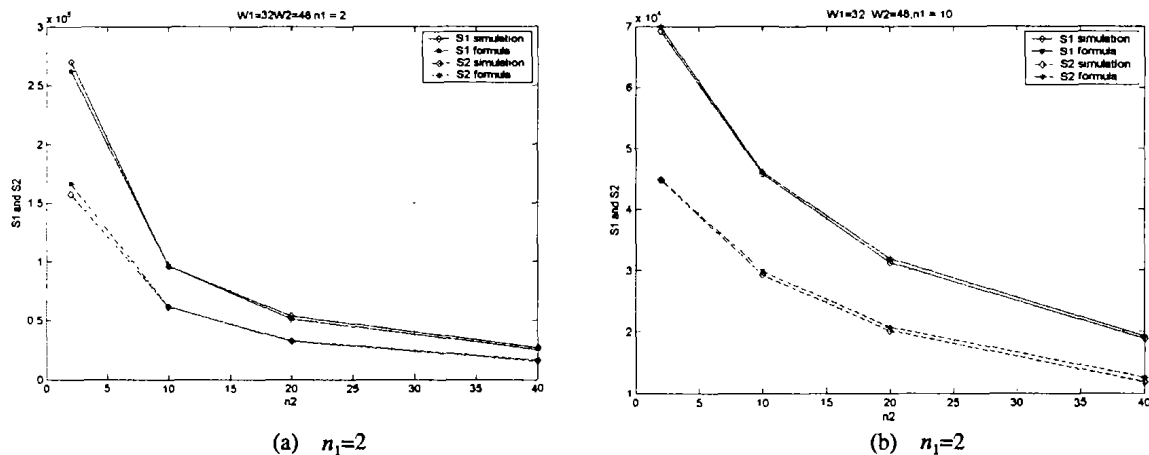


图3 仿真结果和分析模型理论计算结果的比较: 站点获得的平均带宽 S_1 与 S_2 ($W_1=32, W_2=48$)

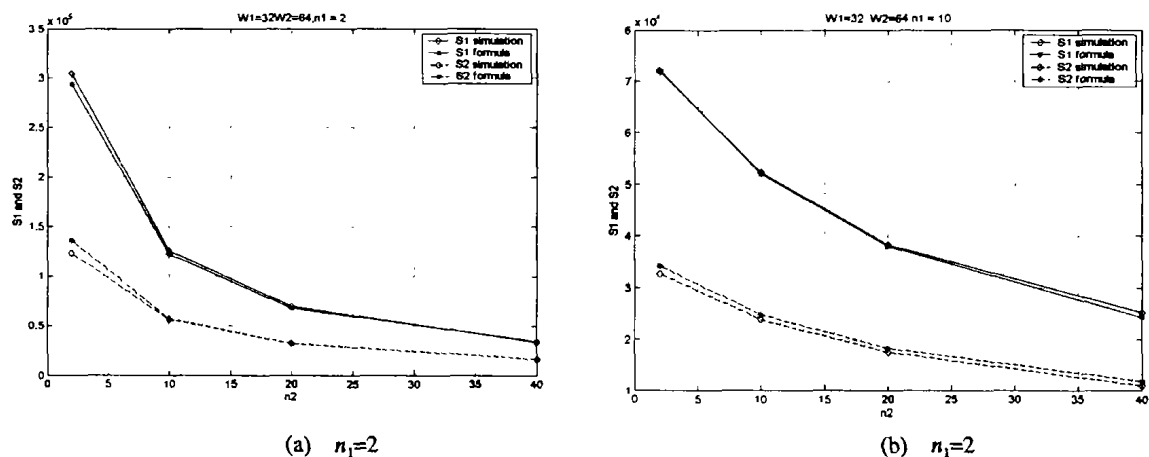


图4 仿真结果和分析模型理论计算结果的比较: 站点获得的平均带宽 S_1 与 S_2 ($W_1=32, W_2=64$)

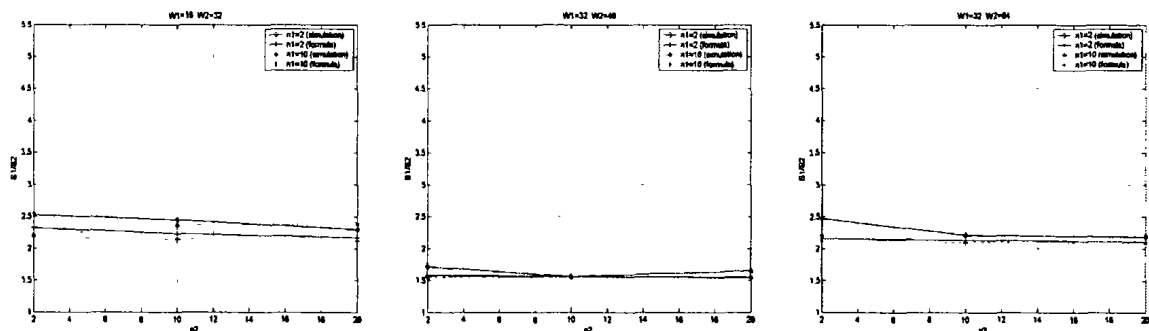


图5 仿真结果和分析模型理论计算结果的比较: 站点获得的平均带宽 S_1 与 S_2 的比值 (从左至右分别为: $W_1=16, W_2=32; W_1=32, W_2=48; W_1=32, W_2=64$)

结论 本文提出一种支持多优先级服务的改进 DCF 协议的理论分析模型, 解决了 MAC 层协议参数与不同优先级站点所获得的服务质量之间的定量关系问题, 通过仿真实验, 证明了模型的正确性。通过该模型, 可准确控制各优先级所获得的服务质量, 从而为设计支持多优先级服务的接入控制机制奠定了基础。特别地, 通过分析模型, 可推导出, 当仅仅通过设置不同的初始冲突窗口来区分不同优先级时, 订购不同服务的站点所能够获得的饱和吞吐量与其初始冲突窗口成近似反比关系。这一特性对设计简单灵活的接入控制机制和相对严格的带宽保证机制具有重要的实践意义。

参考文献

- 1 IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, Nov. 1997
- 2 Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed

- Coordination Function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18: 535~547
- 3 Aad I, Castelluccia C. Differentiation mechanisms for IEEE802.11. IEEE INFOCOM, 2001. 209~218
- 4 Veres A, Campbell A T, Barr M, Sun L H. Supporting service differentiation in wireless packet networking using distributed control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19: 2081~2093
- 5 Doufexi A, et al. A comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a wireless LAN standards. IEEE Communications Magazine, May 2002. 172~180
- 6 Crow B P. Performance evaluation of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol; [M. S. thesis]. Dept. Electrical and Computer Eng., Univ. Arizona, Tucson, AZ, 1996
- 7 Ho T S, Chen K C. Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs. In: Proc. IEEE PIMRC, Taipei, Taiwan, Oct. 1996. 392~396
- 8 Bianchi G. IEEE 802.11-Saturation Throughput Analysis. IEEE Communications Letters, 1998, 2: 318~320