

SCWGF:802.11 DCF 竞争窗口增长因子 自适应调整算法

姚 程,俞能海,王 松

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系,多媒体计算与通信教育部-微软重点实验室,安徽合肥 230027)

摘 要: 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)性能的分析和改进是 MAC(Medium Access Control)中一个重要的研究领域.本文在该协议的基础上提出了一种竞争窗口增长因子自适应调整算法—SCWGF(Self-adaptive algorithm of adjusting Contention Window's Growth Factor),通过理论分析得到不同竞争节点数下竞争窗口增长因子的最优解和最优冲突时间占用率,提出了使用自适应算法使竞争窗口增长因子收敛到最优解,仿真结果表明 SCWGF 提高了网络的饱和吞吐量.

关键词: 802.11 DCF; 竞争窗口; 增长因子; 饱和吞吐量

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 10-2134-05

SCWGF:A Self-Adaptive Algorithm of Adjusting Contention Window's Growth Factor for 802.11 DCF

YAO Cheng, YU Neng-hai, WANG Song

(Department of Electronic and Information Science, MOE-Microsoft Key Laboratory of Multimedia Computing and Communication, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: The performance analysis and improvement of 802.11DCF(Distributed Coordination Function) is a crucial research domain of MAC(Medium Access Control). This paper presents SCWGF(Self-adaptive algorithm of adjusting Contention Window's Growth Factor) based on 802.11 DCF. Firstly, we obtain the optimal contention window's growth factor and optimal collision occupation ratio through theoretical analysis. Self-adaptive algorithm of adjusting contention window's growth factor convergent to the optimal one was proposed. Simulation result illustrates that saturated throughput can be improved.

Key words: 802.11 DCF; contention window; growth factor; saturated throughput

1 引言

IEEE802.11^[1,2]是目前应用最广泛的无线局域网标准,IEEE802.11包括了物理层和媒体访问控制(Media Access Control,MAC)的规范,其物理层定义了数据传输信号特征和传输方式,而媒体访问控制层定义了分布式协调功能(Distributed Coordination Function,DCF)和点协调功能(Point Coordination Function,PCF).对于具有点协调器的无线网络,点协调器采用基于轮询的集中控制算法协调各节点获取信道的访问权,而DCF多用于无基础设施的Ad Hoc网络,是一种基于带冲突避免的载波侦听多路访问机制(Carrier Sense Multi-Access/Collision Avoidance,CSMA/CA)的随机接入方式,无线节点在竞争窗口中随机选取退避时隙,并在节点检测到冲突时使用

二元指数方式增大竞争窗口.本文着力于DCF的性能研究.802.11无线网络的性能与退避机制密切相关,目前有很多文献对退避机制做了改进.文献[3]提出了一种根据网络拥塞状况来自适应调整最小竞争窗口的退避算法,改善了网络的饱和吞吐量.文献[4]的思想是网络中的节点在退避时隙值减为0时并不立即接入信道,而是与所处退避阶段*i*相关的概率 $p(i)$ 来竞争信道的使用权,通过自适应地调整不同退避阶段下接入信道的概率 $p(i)$ 来提高网络的吞吐量.802.11协议规定当竞争窗口增长到最大值后就重置为最小值,在网络碰撞较为频繁的情况下节点的竞争窗口可能又要经过若干次退避而到达较大的值,降低了网络的性能,因此文献[5]提出了一种慢窗口递减的退避方法.文献[6]通过动态调整最小竞争窗口提高了网络的性能.文献[7]通过改

收稿日期:2008-12-02;修回日期:2009-04-23

基金项目:国家自然科学基金“未来移动通信系统基础理论与技术研究”(No. 60496310)

进选择时隙的概率分布提高了网络的饱和吞吐量.文献[8]提出了竞争窗口线性增长的退避方式,增长的系数和竞争节点的数量有关.文献[9]所提出的思想是:无线 mesh 网络中的每个节点根据自己所需的带宽来调整最小竞争窗口的大小,从而实现了数据流的 QoS (Quality of Service),而且减轻了拥塞.文献[10]所提出的指数递增指数递减算法(Exponential Increase Exponential Decrease, EIED)的思想是当节点成功发送数据后将当前竞争窗口大小除以递减参数作为下一轮退避使用的竞争窗口大小,相反,当节点检测到碰撞后将当前的竞争窗口大小乘上递增参数,不过文章中并没有研究如何根据网络的状况来调整这些参数.由此可见,针对性地调整退避算法中的参数可以提高网络的性能.但到目前为止,还没有文献致力于研究如何调整竞争窗口增长因子使网络的饱和吞吐量达到最优.

本文首先通过理论计算得到在基本接入方式和 RTS/CTS(Ready To Send/ Clear To Send)接入方式中对于不同的竞争节点数量,竞争窗口增长因子(Contention Window's Growth Factor, CWGF)的最优解,在此基础上提出了一种自适应调整竞争窗口增长因子的算法 SCWGF,通过计算冲突时间占用率进行动态调整,提高了网络的饱和吞吐量.

2 802.11DCF 二元指数退避机制(BEB)和两种接入方式

2.1 二元指数退避机制(BEB)

在 BEB(Binary Exponential Backoff) 机制中,每个需要发送数据的节点都要在竞争窗口(contention window, CW)中按均匀分布随机选择一个退避时隙值 T_{backoff} ,当信道空闲时退避计数器开始计数,每过一个时隙, T_{backoff} 自减 1,当 T_{backoff} 递减到 0 后延时 DIFS(Distributed Coordination Interface Space)开始传输数据,而 T_{backoff} 值没有递减到 0 的节点将计数器挂起,等待信道空闲时再将其唤醒继续递减.节点在 T_{backoff} 减至 0 时开始发送数据帧或者 RTS 请求,如果在基本接入方式下没有接收到 ACK 或者在 RTS/CTS 模式下没有接收到 CTS 则认为碰撞发生,将竞争窗口加倍,并在新的竞争窗口中重新选择退避时隙值,竞争窗口在碰撞发生时变化公式如下:

$$CW_i = \begin{cases} 2^i CW_{\min}, 0 \leq i \leq m \\ 2^m CW_{\min}, i > m \end{cases} \quad (1)$$

其中 i 是退避阶段, m 是最大退避阶段.

2.2 基本接入方式

对于基本接入方式,当节点退避结束并检测到信道空闲时,发送节点延时一个 DIFS 后开始发送数据帧,如果在 SIFS(Short Interface Space)时间内收到 ACK,表明

目的节点成功接收到数据帧,发送节点将竞争窗口重置为最小值.如果在 ACK timeout 时间内没有收到接收节点的确认帧时,发送节点就认为碰撞发生,并按照二元指数退避机制将竞争窗口加倍进入新的退避阶段.

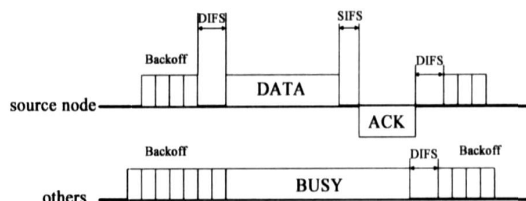


图1 DCF基本接入方式数据帧发送示意图

2.3 RTS/CTS 接入方式

不同于基本接入方式,在 RTS/CTS 接入方式中,节点的退避时隙值经退避计数器减为 0 后延时 DIFS 发送 RTS 帧,然后等待接收到目的节点回复的 CTS 帧后延时 SIFS 才开始发送数据. RTS/CTS 方式主要用于解决隐藏终端问题,RTS 和 CTS 帧的长度一般都小于数据帧,因而检测到冲突的时间也较短,能够有效降低碰撞发生的概率,但占用了额外的带宽.

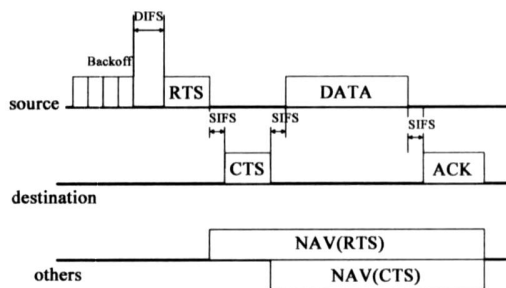


图2 RTS/CTS接入方式数据帧发送示意图

3 SCWGF 理论分析

3.1 竞争窗口增长因子(CWGF)

对于 802.11DCF,当碰撞发生时,由公式(1)可见节点的 CWGF 始终是 2.而对于碰撞频繁的网络选择更大的 CWGF 可以减少碰撞. SCWGF 中某个节点的竞争窗口增长因子是关于竞争节点数 n 的函数 $c(n)$,这里的 n 应该为发送和接收节点一跳范围内的所有节点数,这里我们只研究单跳网络, n 为所有发送队列不为空的节点数量.

$$CW_i = \begin{cases} c(n)^i CW_{\min}, 0 \leq i \leq m \\ c(n)^m CW_{\min}, i > m \end{cases} \quad (2)$$

同理, i 为退避阶段, m 为最大退避阶段,有 n 个竞争节点的单跳网络的吞吐量就等于 n 个节点单跳网络的饱和吞吐量,这里利用文献[11]的二维离散时间 Markov 模型,来分析竞争窗口增长因子 $c(n)$ 和饱和吞吐量的关系,下式为单步转移概率:

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k+1\} = 1, k \in [0, W-2], i \in [0, m] \\ P\{0, k | i, 0\} = (1-p)/W_0, k \in [0, W_0-1], i \in [0, m] \\ P\{i, k | i-1, 0\} = p/W_i, k \in [0, W_i-1] \\ P\{0, k | m, 0\} = 1/W_0, k \in [0, W_0-1] \end{cases} \quad (3)$$

以 $b_{i,k}$ 表示节点处于竞争退避阶段为 i , 窗口大小为 k 这一状态的稳态概率, p 表示节点在某一时刻发送的数据帧发生碰撞的概率, p_s 表示节点在某个时刻发送数据帧的概率, p_c 为数据帧成功发送的概率, p_c 为整个网络数据帧发生碰撞的概率, p_{idle} 为信道空闲的概率.

由状态转移关系易得:

$$b_{i,0} = p^i b_{0,0}, 0 < i < m \quad (4)$$

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad (5)$$

由 $p b_{m-1,0} = (1-p) b_{m,0}$ 可得:

$$b_{m,0} = \frac{p}{1-p} b_{m-1,0} \quad (6)$$

而将式(4)到式(6)及其 $W_i = c(n)^i W_{\min}$ 代入 $b_{i,k}$ 可得:

$$b_{0,0} = \frac{2(1-pc(n))(1-p)}{(1-pc(n))(W_{\min}+1) + pW_{\min}(1-(pc(n))^m)} \quad (7)$$

某个时刻节点发送数据帧的概率 p 为在所有退避阶段退避时隙值减至 0 的概率:

$$p = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{2(1-pc(n))}{(1-pc(n))(W_{\min}+1) + pW_{\min}(1-(pc(n))^m)} \quad (8)$$

对于一个节点在某时刻发送的数据帧发生碰撞的概率 p 等于全概率事件扣除没有节点发送数据帧和只有该节点发送数据帧的概率.

$$p = 1 - (1-p)^n - (1-p)^{n-1} = 1 - (1-p)^{n-1} \quad (9)$$

对于有 n 个竞争节点组成的单跳网络, 数据帧被成功发送的概率为

$$p_s = C_n^1 (1-p)^{n-1} = n(1-p)^{n-1} \quad (10)$$

信道空闲的概率为:

$$p_{idle} = (1-p)^n \quad (11)$$

整个网络的冲突概率为:

$$p_c = 1 - p_s - p_{idle} = 1 - (1-p)^{n-1} [1 + (n-1)] \quad (12)$$

由文献[11]可知, 在基本接入方式和 RTS/CTS 接入方式下, 发生一次冲突的平均时间 T_s 和成功发送一个数据帧的平均时间 T_c 为:

$$T_c = \begin{cases} H + E[P] + DIFS + \dots, \text{Basic} \\ RTS + SIFS + \dots + CTS + DIFS + \dots, \text{RTS/CTS} \end{cases} \quad (13)$$

$$T_s = \begin{cases} H + E[P] + SIFS + \dots + ACK + DIFS + \dots, \text{Basic} \\ RTS + SIFS + \dots + CTS + SIFS + \dots + H + E[P] + \dots \\ SIFS + \dots + ACK + DIFS + \dots, \text{RTS/CTS} \end{cases} \quad (14)$$

其中 H 为帧头传输时延, $E[P]$ 为平均有效载荷传输时延, τ 为传播时延. 以 τ 表示一个时隙的长度, 则对于由 n 个竞争节点组成的网络的吞吐量为:

$$S = \frac{p_s E[P]}{p_s T_s + p_c T_c + p_{idle} \tau} \quad (15)$$

在最小竞争窗口 CW_{\min} 和竞争节点数 n 一定的情况下, 若要使 S 取得极大值, 则必须满足 S 对竞争增长因子 c 的偏导数为 0:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial c} \right|_{CW_{\min} = \text{constant}} = 0 \quad (16)$$

在 MATLAB 中使用迭代法可以解得竞争节点数 n 从 10 到 100 变化时竞争窗口增长因子在基本接入方式和 RTS/CTS 中的最优解. 其他参数如下: 时隙长度 $\tau = 20\mu s$, 最小竞争窗口 $CW_{\min} = 32$, 平均有效载荷 $E[P]$ 为 1000byte, T_c 在基本接入方式和 RTS/CTS 接入方式下分别为 0.001458s 和 0.000402s, T_s 分别为 0.001772s 和 0.002448s.

表 1(a) 竞争窗口增长因子最优解(10-50)

| n | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---------|-----|-----|-----|------|------|
| Basic | 8.3 | 9.0 | 9.9 | 10.3 | 10.6 |
| RTS/CTS | 3.4 | 4.4 | 4.8 | 5.0 | 5.2 |

表 1(b) 竞争窗口增长因子最优解(60-100)

| n | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---------|------|------|------|------|------|
| Basic | 10.9 | 11.1 | 11.3 | 11.5 | 11.6 |
| RTS/CTS | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 |

4 SCWGF 算法描述

4.1 最优冲突时间占用率的计算

冲突时间占用率在这里定义为在一时间窗内发生碰撞所消耗的时间和窗口长度的比值. 首先从理论上我们可以得到能使饱和吞吐量达到最大时的最优冲突时间占用率.

$$\text{ratio} = \frac{t_{\text{collision}}}{t_{\text{window}}} = \frac{p_c T_c}{p_c T_c + p_s T_s + p_{idle} \tau} \quad (17)$$

由 $(1-p)^n = 1-n$ 及 $(1-p)^{n-1} = 1-(n-1)$ 结合式(10)到式(12), 可以得到

$$\text{ratio} = \frac{t_{\text{collision}}}{t_{\text{window}}} = \frac{(n)^2 T_c}{(n)^2 T_c + n(1-n) T_s + (1-n) \tau} \quad (18)$$

由文献[11]可知获取最大饱和吞吐量情况下, 发送概率 p 的最优解为

$$\text{opt} = \frac{n + 2(n-1)(\frac{T_c}{T_c-1})}{(n-1)(\frac{T_c}{T_c-1}) - 1} \quad (19)$$

$$(n)_{\text{opt}} = \frac{n + 2(n-1)(\frac{T_c}{T_c-1}) - 1}{(\frac{T_c}{T_c-1})} \quad (20)$$

将式(20)代入式(18)可以得到冲突时间占用率的最优解 $\text{ratio}_{\text{opt}}$

4.2 SCWGF 算法流程

下面是 SCWGF 算法流程,该流程被周期性地执行,周期为 T_{period} :

```

ratiocurrent =  $\frac{T_{\text{collision}}}{T_{\text{period}}}$ 
if ( ratiocurrent - ratioopt > threshold )
    count = count + 1
if ( ratiocurrent - ratioopt < - threshold )
    count = count - 1
if ( count > increase . threshold )
    c = c + step , count = 0
if ( count < decrease . threshold )
    c = c - step , count = 0

```

其中 c 为竞争窗口增长因子,执行过程中当冲突时间占用率与最优冲突时间占用率之差大于一门限时, count 自加,反之,小于该门限的相反数时, count 自减,当 count 值超过竞争窗口增长门限时,将竞争窗口因子增加一个步长,反之,当 count 值降至竞争窗口降低门限时,将竞争窗口因子减少一个步长.在网络运行一定时间后, c 可以由初值收敛至最优解.

5 仿真结果及其分析

在 NS-2^[12] 仿真平台中搭建一个单跳无线网络, MAC 层使用协议为 802.11,传输模式为 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum),数据帧的有效载荷为 1000Byte,在节点数量 n 从 10 到 100 这 10 个网络场景中分别测试基本接入方式和 RTS/CTS 接入方式下 802.11 二元指数退避算法、文献[10]所提出的竞争窗口指数递增和指数递减(EIED)算法以及 SCWGF 算法所得到的网络饱和吞吐量并作比较.仿真参数如表 2 所示.

表 2 仿真参数

| 参数名 | 参数值 |
|----------------------|----------|
| 时隙长度 | 20μs |
| 数据包大小 | 1000Byte |
| 基本发送速率(basic rate) | 1Mbps |
| 数据发送速率(data rate) | 2Mbps |
| 路由协议 | DSDV |
| 最小竞争窗口 | 32 |
| SIFS | 10μs |
| DIFS | 50μs |
| EIED 算法递增指数(r_I) | 2 |
| EIED 算法递减指数(r_D) | 2 |

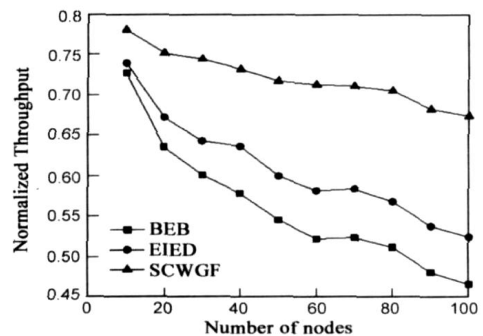


图3 基本接入方式饱和吞吐量比较

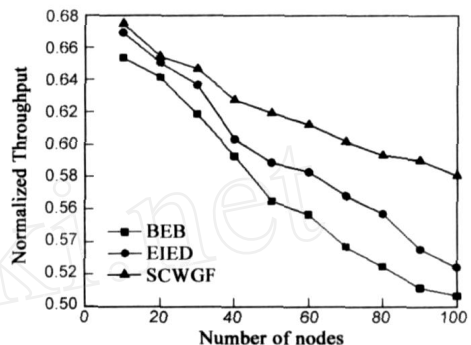


图4 RTS/CTS方式饱和吞吐量比较

EIED 算法的竞争窗口增长和递减的参数是固定的,从仿真结果可以看出在竞争节点数量增加的过程中,EIED 算法对饱和吞吐量的提高比较均匀,而本文所提出的 SCWGF 算法能够在竞争加剧的过程中自适应地调整竞争窗口增长因子从而在竞争节点数量较大时仍然能够使网络获得较高的饱和吞吐量,在最好情况下该算法能够比原有 802.11 的 BEB 算法提高 43%,比 EIED 算法提高 28%.

虽然 RTS/CTS 方式与基本接入方式相比检测到碰撞的时间短,但在网络碰撞频繁的情况下 RTS/CTS 方式在发送 RTS 和 CTS 帧花费的带宽开销急剧增大,因此基本接入方式的饱和吞吐量优于 RTS/CTS 方式,另一方面,数据包发生碰撞在 RTS/CTS 方式下对吞吐量的影响要小于基本接入方式,因此 EIED 和 SCWGF 算法通过减少碰撞对吞吐量的改善在基本接入方式下会比 RTS/CTS 方式更加显著.

6 结束语

本文通过理论分析得出了竞争窗口增长因子在不同竞争节点数下的最优解,并提出竞争窗口增长因子自适应调整算法 SCWGF,仿真结果显示 SCWGF 能够根据网络的碰撞状况自适应调整竞争窗口增长因子,降低了碰撞概率,并且在基本接入方式和 RTS/CTS 两种接入方式下饱和吞吐量都得到了提高.

参考文献:

[1] IEEE std. 802.11-wireless LAN medium access control

- (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. 1997
- [2] B P Crow, I Widjaja, J G Kim, P sakai. IEEE 802. 11 wireless local area networks [J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(9): 116 - 126.
- [3] 朱颖, 夏海轮, 武穆清. 一种最小竞争窗口自适应调整的 802. 11 退避算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 961 - 965.
Zhu Ying, Xia Hai-lun, Wu Mu-qing. A self-adaptive minimum contention window adjusting backoff algorithm in IEEE 802. 11 DCF[J]. Journal of Electronic and Information Technology, 2008, 30(4): 116 - 126.
- [4] Jain-Shing Liu, Chun-Hung Richard Lin. Performance improvements with a P-persistent Enhanced DCF for WLANs [A]. Proc. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Grand Hyatt Melbourne, Melbourne, Australia, 7 - 10 May 2006. 3. 1151 - 1155.
- [5] Q Ni. Modeling and analysis of slow CW decrease for IEEE802. 11 WLAN [A]. Proc. IEEE PIMRC 03 [C]. Beijing, 2003. 1717 - 1721.
- [6] Yong Peng, Haitao Wu, Shiduan Cheng, Keping Long. A new self adapt DCF algorithm [A]. Proc IEEE GLOBECOM 2002 [C]. Taipei, Taiwan, R. O. C, 2002. 1. 87 - 91.
- [7] Chen YuZhong, Kai CaiHong, Geng YanHui, Li Feng. Performance analysis and improvement of IEEE 802. 11 WLAN[A]. Proc IEEE 10th Asia-Pacific Conference on Communications and 5th International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications [C]. Beijing, China, 2004. 147 - 151.
- [8] Weir Tzu Chen. An effective medium contention method to improve the performance of IEEE 802. 11[J]. Wireless Networks. Dec, 2008, 14(6): 769 - 776.
- [9] Lei Zhang, Gaofeng Wang, Wanli Dong. Adaptive contention window adjustment for 802. 11-based mesh networks [A]. Proc. IEEE WICOM (2008) [C]. Dalian, China, 2008. 12 - 14.
- [10] Song N O, Kwak B J, Song J. Enhancement of IEEE 802. 11 distributed coordination function with exponential increase exponential decrease backoff algorithm [A]. Proc. IEEE VTC2003[C]. Florida, US, 2003. 2775 - 2778.
- [11] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802. 11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2000, 18(3): 535 - 547.
- [12] The ns Manual [DB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation>, 2007 - 1 - 14.

作者简介:



姚程男, 1984 年 10 月生于福建省宁德市, 硕士研究生. 研究方向为路由、MAC 协议.
E-mail: superyc@mail.ustc.edu.cn



俞能海男, 1964 年 11 月生于安徽省无为县, 教授, 博士生导师, 中国科学技术大学信息处理中心主任, 主要研究方向为网络协议、多媒体通信、互联网信息检索.
E-mail: ynh@ustc.edu.cn

(上接第 2124 页)

- [8] 王晓东. 计算机算法设计与分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 218 - 268.
Wang Xiao-dong. Computer Algorithm Design and Analysis [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 218 - 268. (in Chinese)
- [9] 王兵山. 离散数学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004. 263 - 281.
Wang Beng-shan. Discrete Mathematics [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2004. 263 - 281. (in Chinese)
- [10] Fragouli C, Boudec J Y L, Widmer J. Network coding: an instant primer [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1): 63 - 68.
- [11] P A Chou, Y Wu, K Jain. Practical network coding [A]. Proceedings of Allerton Conference on Communication, Control and Computing [C]. Monticello, 2003. 473 - 482.