

一种利用信道侦听的 IEEE 802.11 自适应优化算法*

毛建兵⁺, 毛玉明, 冷甦鹏, 白翔

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 610054)

Adaptive Optimization Scheme for IEEE 802.11 Based on Channel Sensing

MAO Jian-Bing⁺, MAO Yu-Ming, LENG Su-Peng, BAI Xiang

(National Key Laboratory of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

+ Corresponding author: E-mail: maojb99@gmail.com, <http://www.uestc.edu.cn>

Mao JB, Mao YM, Leng SP, Bai X. Adaptive optimization scheme for IEEE 802.11 based on channel sensing. *Journal of Software*, 2010,21(8):1968–1981. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3637.htm>

Abstract: In this paper, an adaptive optimization scheme for DCF (distributed coordination function) is proposed to enhance the network performance. The scheme is based on the channel sensing result for network state information and thus it is named CSB (channel sensing backoff). The key idea to approach optimal performance dynamically in the proposed scheme is that the transmission attempt from the DCF is filtered by an adjustable probability P_T , which is dynamically adapted to reflect the current channel competing level among the network stations. Unlike other proposals for the DCF optimization, CSB does not need to perform complex on-line estimation of the number of active stations in the network, and can make adaptive tuning always toward a certain optimization object under various network states. Detailed performance evaluation of the scheme is carried out through NS-2 simulation. Simulation results show that the scheme can effectively adapt to both network size and packet length changes in the network, and simultaneously achieve performance improvements in several aspects including system throughput, collision probability, delay, delay jitter, fairness and so on.

Key words: IEEE 802.11 DCF; wireless network; MAC scheme; channel sensing; adaptive optimization

摘要: 提出一种适用于 DCF(distributed coordination function)机制的自适应优化算法.该算法基于网络节点侦听信道得到的网络状态信息进行相关参数的自适应调整以获得最优的网络性能,称为 CSB(channel sensing backoff)算法.算法采用了对节点的信道接入请求以概率参数 P_T 进行过滤的方法控制节点竞争接入信道的激烈程度.不同于已有的 DCF 机制优化方法,CSB 算法的特点在于,在优化调整过程中不需要进行计算复杂的网络节点数量估计,并且可以在不同网络状态下始终围绕确定的优化目标进行参数优化调整.仿真实验结果表明,算法能够针对网络节点数量和分组大小改变等网络状态变化作出自适应的网络优化调整,并获得了系统吞吐量、碰撞概率、延迟、延迟抖动、公平性等多方面的性能改善.

关键词: IEEE 802.11 DCF;无线网络;MAC 机制;信道侦听;自适应优化

中图分类号: TP393 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60802024 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2005AA123820, 2005AA121122 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2008-08-06; Accepted 2009-03-05

近年来,受无线 Internet 接入不断发展的推动,基于 IEEE 802.11 标准^[1]的无线网络得到了广泛应用。IEEE 802.11 MAC 协议提供了两种信道接入协调机制,分别是基于轮训方式的点协调机制 PCF(point coordination function)和基于竞争方式的分布式协调机制 DCF(distributed coordination function)。在 PCF 机制下,节点的信道接入时间由一个网络中心控制点进行统一分配安排,节点不具备信道接入的主动权;在 DCF 机制下,网络中各个节点以 CSMA/CA(carrier sense multiple access/collision avoidance)方式竞争地接入信道,每个节点都具有信道接入的主动权。与 PCF 相比,DCF 具有实现容易、操作灵活、组网便捷等优点,因此在实际网络中应用最为普遍。

在 DCF 中,节点竞争的激烈程度由二进制指数退避算法(binary exponential backoff,简称 BEB)控制和调节。为避免节点之间的信道接入冲突,节点在竞争窗口大小限定的范围内随机选取一个值作为信道接入前的退避等待时间。当节点信道接入遭遇碰撞后,竞争窗口大小扩大为原来的 2 倍,使得节点在再次接入信道之前可能选取一个更大的值作为退避等待时间,从而达到减小信道竞争冲突的目的。已有研究表明,基于 DCF 的网络其性能主要受 BEB 退避算法工作方式的影响^[2]。IEEE 802.11 DCF 的 BEB 退避算法在应用中主要存在以下几个方面的问题:

(1) 信道利用率低下。节点之间无法合理协调竞争以最大化地有效利用信道资源进行数据传输。过于激烈的竞争或是过于保守的竞争都将导致信道可利用资源的浪费。

(2) 节点之间竞争接入信道机会的不公平性。在较短的一段时间里,网络中存在某些节点过多地占用信道,而其他节点需要等待较长时间才能接入信道的不公平现象。

(3) 自适应调整能力差。尽管 BEB 退避算法采用了指数后退的方式调整节点竞争接入信道的频率,但是这种调整仅根据节点自身发送遭遇碰撞这一单一信息进行,未能完全真实地反映网络当前的拥塞情况。

针对上述几个方面的问题,本文提出了一种基于信道侦听的 IEEE 802.11 DCF 自适应优化算法,称为 CSB(channel sensing backoff)算法。算法不改变 DCF 现有的工作方式,而是通过对节点发起的信道接入请求以概率参数 P_T 进行过滤的方法对节点竞争接入信道的激烈程度进行二次控制和调节。根据节点侦听信道获得的网络拥塞信息,调节概率参数 P_T 的大小,使得网络能够始终工作在最优状态下。与已有文献提出的优化方法不同,CSB 算法的显著特点在于不需要对网络中参与信道竞争的活跃节点数量进行复杂的估计,并且能够根据事先确定的网络优化目标,以当前网络拥塞状态为基础,自适应地调节网络参数。利用 NS-2,我们对 CSB 算法进行了仿真分析。结果表明,CSB 算法获得了接近理论最优值的网络吞吐量性能,并且能够自适应地进行网络参数调整以跟踪网络状态的变化,有效地改善了网络的碰撞概率、传输延迟、延迟抖动、公平性等多方面的性能。

1 研究背景与动机

针对 IEEE 802.11 DCF 的优化改进这一问题,已有文献提出了不少增强 DCF 性能的方法设计。Bianchi 在文献[3]中通过建立节点退避过程状态的二维 Markov 链模型,得到了 DCF 性能的数学模型分析,并指出了调整节点的竞争窗口设置与优化 DCF 的吞吐量性能之间的关系。与 Bianchi 的方法不同,Cali 等人在文献[4]中提出了一种可以近似分析标准 DCF 性能的 p -persistent DCF 机制,并基于 p -persistent DCF 的分析结果对标准 DCF 进行了优化调整,提出了一种优化的 IEEE 802.11 机制。Bianchi 的 Markov 链模型分析方法得到了学术界的广泛认同,并在后续文献的研究中被不断扩展和完善^[5,6]。从文献[3,4]的研究结果中我们可以获得两个方面的关键信息:其一,DCF 的性能与网络中活跃节点数量密切相关。随着节点数量的增加,网络的性能呈急剧下降的趋势。尽管如此,这种性能的下降却可以通过 BEB 的参数调整获得一定程度上的改善^[3,4]。其二,DCF 的优化设置除了与节点数量相关以外,还与信道上碰撞发生时的信道占用时间相关。因此,DCF 的优化改进设计需要同时考虑网络中活跃节点的数量以及碰撞的信道占用时间,并应具有随着这两方面要素的改变而调整相关参数的动态自适应能力。

根据网络中活跃节点的数量这一信息在优化设计过程中的使用情况,我们可以将现有 DCF 的优化改进方法归纳为存在显著区别的两类:一类以获得网络中当前的活跃节点数量为基础,根据节点数量信息进行确定性的参数优化调整^[3,4,7-12];另一类则不需要知道活跃节点的数量,通过寻求非节点数量直接相关的网络信息进行

优化调整^[13-21].通常在实际网络中,我们无法显然地获得网络中活跃节点的数量,而往往只能借助于节点侦听到的网络信息对节点数量进行估计.文献[22,23]对网络中活跃节点数量的估计进行了研究,分别提出了基于 Kalman 滤波设计和基于 SMC(sequential Monte Carlo)技术的估计方法.尽管这些方法可以取得较为准确的节点数量估计,但是却付出了巨大的计算复杂度代价,并且由于假设条件苛刻,实现上存在较大的困难.文献[12]指出,基于精确节点数量估计的优化方法无法适应复杂多变的无线网络,为此提出了一种只需粗略估计节点数量并根据归属的区间范围进行竞争窗口调整的 DOOR(dynamic optimization on range)优化方法.

由于存在估计活跃节点数量方面的困难,因此研究与节点数量没有直接关系的优化方法显得更为必要,这也是本文研究需要解决的问题.为了避免成功传输节点重置竞争窗口为最小值所引起的碰撞概率增加,样 SD-DCF(slow CW decrease DCF)^[13]采用了简单地将竞争窗口大小的重置改变为减半的方法,在一定程度上改善了 DCF 的吞吐量性能.与 SD-DCF 类似,文献[14]提出的 DIDD(double increment double decrement)机制也采用了减半竞争窗口的调整方法.作为 SD-DCF 更一般化的扩展,Wang 等人在文献[15]中提出了 GDCF(gentle DCF)机制,节点只有在连续完成 c 个成功传输后才能将竞争窗口大小减半.与 GDCF 仅考虑以节点自身信道竞争接入成功与否的反馈信息进行参数调节不同,文献[16]在其 GBEBwR 算法中进一步将 GDCF 中参数的调节与节点侦听到的其他节点传输的相关信息关联起来,以获得公平性性能的改善.Kwon 等人在文献[17]中提出的 FCR 机制采用了让网络中的其他节点避让前一次成功接入信道节点的方法减少竞争冲突的发生.FCR 牺牲了节点之间信道接入机会的公平性,需要额外借助 SCFQ(self-clocked fair queueing)算法来改善这一不足,因而增加了算法的复杂性.文献[18]提出了不同退避阶段采用互不重叠的竞争窗口区间的方法来降低碰撞概率.尽管上述这些算(方)法都在一定程度上改善了 DCF 的性能,但是它们都存在如下共同的问题:(1) 没有相应的机制使得算法在执行过程中能够自适应地调整以跟踪网络节点数量以及碰撞传输占用信道时间的改变;(2) 没有明确网络工作在什么条件下才处于最优的工作状态,以及如何向着最优工作状态的目标调整退避相关的参数设置.

以信道上相邻两次信道接入之间的平均空闲时隙数作为判断网络是否工作在最优状态下的依据,文献[19,20]分别提出了一种根据侦听到的信道空闲时间长度对竞争窗口进行优化调节的方法.Bononi 等人在文献[21]中提出的 AOB(asymptotically optimal backoff)机制则以信道时隙利用率作为判断网络是否工作于最优状态的依据.在 AOB 机制下,节点利用一个与信道时隙利用率关联的概率形式对退避过程结束后的信道接入请求进行过滤,以控制网络中节点竞争接入信道的频繁程度.与文献[19-21]不同,我们在 CSB 算法中采用了信道的空闲时间与碰撞占用时间的比值作为判断网络是否工作在最优状态下的依据.文献[4]基于 p -persistent DCF 的研究表明,当节点竞争信道产生的空闲时间开销与碰撞占用时间开销平衡时,信道的利用率达到最优,系统获得最大的吞吐量.通过研究,我们将该优化条件进一步扩展应用于标准 IEEE 802.11 DCF 的优化,利用信道的空闲时间与碰撞占用时间的比值大小所反映的网络状态信息,在不需要估计网络中活跃节点数量的条件下自适应地动态调整节点接入信道发起传输的概率,实现网络性能的优化.

2 CSB 算法的提出

2.1 DCF退避算法的近似优化条件

考虑一个有 n 个节点的网络,任意时刻节点队列中总是有数据在等待发送,网络中没有隐藏终端存在.以 $s(t)$ 表示节点在时刻 t 的退避阶段, $b(t)$ 表示节点在时刻 t 的退避计数器取值.假设节点在不同退避阶段接入信道发送时产生碰撞的概率相互独立并且大小一致,Bianchi 在文献[3]中建立了状态 $\{s(t), b(t)\}$ 的二维 Markov 链模型.基于该模型,Bianchi 给出了系统的吞吐量性能分析以及竞争窗口参数的优化设置.以 τ 表示节点在一个时隙里接入信道发送的概率, p 表示发送产生碰撞的概率. τ 与竞争窗口 W 和碰撞概率 p 之间的关系可以表示为^[3]

$$\tau = 2(1-2p) / [(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)] \quad (1)$$

其中: $p=1-(1-\tau)^{n-1}$; m 为最大竞争窗口设置 W_{\max} 允许的最大退避阶数,并且有 $W_{\max}=2^m W_{\min}$, $W_{\min}=W$.以 T 表示离散时刻 t 与 $t+1$ 之间的时间,其事件发生存在 3 种可能:

- (1) 信道空闲;

- (2) 两个或是更多节点同时发送产生碰撞;
- (3) 某一个节点成功完成数据发送.

以 p_{idle}, p_{col} 和 p_{suc} 分别表示这 3 种事件的概率; T_{idle}, T_{col} 和 T_{suc} 分别表示这 3 种事件发生时对应的时间 T 的大小. 于是, 系统的归一化吞吐量 S (以信道速率为基准, 下同) 为

$$S = E[T_{valid}] / E[T] = p_{suc} E[P] / (p_{idle} T_{idle} + p_{col} E[T_{col}] + p_{suc} E[T_{suc}]) \quad (2)$$

其中, T_{valid} 为时间 T 内有效信道利用部分的时间长度, P 表示每次数据帧传输中有效载荷部分需要的信道传输时间. p_{idle}, p_{col} 和 p_{suc} 的计算分别为 $p_{idle} = (1-\tau)^n, p_{suc} = n\tau(1-\tau)^{n-1}, p_{col} = 1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1}$.

可以看出, 在给定 $T_{idle}, T_{col}, T_{suc}$ 和 P 的条件下, 系统的吞吐量性能与节点数量 n 和发送概率 τ 相关. 对系统进行优化, 以获得的系统吞吐量 S 最大为目标, 利用公式(2)可以得到最优的发送概率 τ_{opt} , 有^[3]:

$$\tau_{opt} = \frac{\sqrt{[n + 2(n-1)(E[T_{col}^*] - 1)] / n - 1}}{(n-1)(E[T_{col}^*] - 1)} \approx \frac{1}{n\sqrt{E[T_{col}^*] / 2}} \quad (3)$$

其中, $E[T_{col}^*] = E[T_{col}] / T_{idle}$. 根据公式(1), 可以进一步获得最优的竞争窗口设置 W_{opt} ,

$$W_{opt} = (1 - 2p_{opt})(2 - \tau_{opt}) / \{ \tau_{opt} [(1 - 2p_{opt}) + p_{opt}(1 - (2p_{opt})^m)] \} \quad (4)$$

其中, $p_{opt} = 1 - (1 - \tau_{opt})^{n-1}$. 这样, 通过理论模型分析, 我们可以获得使系统性能达到最优的参数设置条件. 尽管如此, 该优化条件也存在以下一些缺点: (1) 公式(1)中, τ 与 W 的关系的得出建立在假设节点队列中始终有数据需要发送的网络模型之上, 这个假设并不符合通常的实际网络情况. 因此, 在非饱和网络条件下无法利用公式(4)获得 W_{opt} . (2) 计算 τ_{opt} 需要确定网络中有数据发送需求的活跃节点的数量. 由于 DCF 的分布式随机信道接入特性, 要获得网络中活跃节点的数量并不是一件容易的事情. 为了克服上述两个缺点, 我们需要进一步寻求更好的优化条件.

定义信道虚拟传输时间段 $T_{virtual}$ 为信道上连续两次成功传输之间的时间间隔. 如图 1 所示, 在一个虚拟传输时间段内, 信道将可能经历空闲、节点传输碰撞以及节点成功传输这 3 种历程.

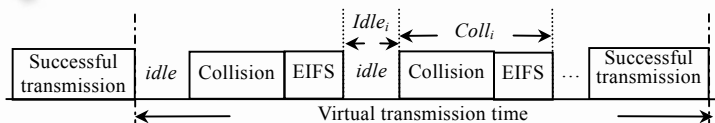


Fig.1 Virtual transmission time

图 1 虚拟传输时间段

以 N_c 表示一个虚拟传输时间段内发生碰撞的次数, $Idle_i$ 表示第 i 次信道发送前信道空闲的持续时间长度, $Coll_i$ 表示第 i 次传输碰撞的持续信道占用时间. 因此, 一个虚拟传输时间段内信道经历的平均空闲时间 $E[Idle_{total}]$ 和平均碰撞传输时间 $E[Coll_{total}]$ 分别为:

$$E[Idle_{total}] = E[\sum_{i=1}^{N_c+1} Idle_i] = (E[N_c] + 1)E[Idle] \quad (5)$$

$$E[Coll_{total}] = E[\sum_{i=1}^{N_c} Coll_i] = E[N_c]E[Coll] \quad (6)$$

其中, $E[Idle]$ 表示一次信道空闲的平均持续时间长度, $E[N_c]$ 和 $E[Coll]$ 分别有

$$E[N_c] = \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot P\{N_c = i\} = p_{col} / p_{suc} = [1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1}] / [n\tau(1-\tau)^{n-1}] \quad (7)$$

$$E[Idle] = T_{idle} \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot P\{idle\ slot\ num = i\} = T_{idle} p_{idle} / (1 - p_{idle}) = T_{idle} (1-\tau)^n / [1 - (1-\tau)^n] \quad (8)$$

定义 η 为虚拟传输时间段内平均的空闲和碰撞传输时间之比, 即 $\eta = E[Idle_{total}] / E[Coll_{total}]$, 代入公式(5)~公式(8), 有

$$\eta = E[Idle_{total}] / E[Coll_{total}] = (1-\tau)^n / \{ [1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1}] E[T_{col}^*] \} \quad (9)$$

由公式(3)可知, 当节点数 n 较大时, 发送概率 τ 通常很小. 因此, 可以取近似 $1-\tau \approx 1$, 并且利用泰勒(Taylor)公式, 有 $(1-\tau)^n \approx 1 + n\tau + n(n+1)\tau^2/2$. 于是, η 可进一步表示为

$$\eta = \frac{(1-\tau)^n}{[1-(1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1}]E[T_{col}^*]} \approx \frac{1}{[(1-\tau)^{-n} - 1 - n\tau]E[T_{col}^*]} \approx \frac{2}{n(n+1)\tau^2 E[T_{col}^*]} \quad (10)$$

将公式(3)给出的使得系统性能最优的发送概率 τ_{opt} 代入上式,系统工作在最优状态下的 η 为

$$\eta_{opt} \approx 2/[n(n+1)\tau^2 E[T_{col}^*]] = 2/\left[n(n+1)\left(n\sqrt{E[T_{col}^*]/2} \right)^2 E[T_{col}^*] \right] \approx 1 \quad (11)$$

这样,我们就得到了使得系统性能最优的另一个优化条件.与公式(4)相比, η_{opt} 最大的特点在于与节点数量 n 无关,并且适合作为不同条件下网络的一个确定的优化调整目标.我们给出如下结论:

引理 1. 当系统工作在吞吐量性能最大的最优状态下时,信道上的平均空闲时间 $E[Idle_{total}]$ 与平均碰撞传输时间 $E[Coll_{total}]$ 的比值 η 近似为 1.

引理 1 直观的物理意义在于:如果节点的发送概率过小,节点之间竞争信道过于保守,则导致信道上出现过多的空闲时间,信道利用不够充分;如果节点的发送概率过大,节点之间竞争信道过于激烈,则造成竞争碰撞的频繁发生,形成过多的无效信道占用.系统工作在最优状态下应达到二者之间的相互平衡.我们对 τ_{opt} 与 η_{opt} 的关系进行了数值验证.在图 2 中,取不同的 n 和 $E[T_{col}^*]$ 设置,分别作 $\log \eta$ 和 $\log 1/\eta$ 随 τ 的变化曲线,以曲线的交点确定 $\eta=1$ 的位置.可以看出,在不同的设置下, $\eta=1$ 对应的 τ 与 τ_{opt} 均吻合一致.

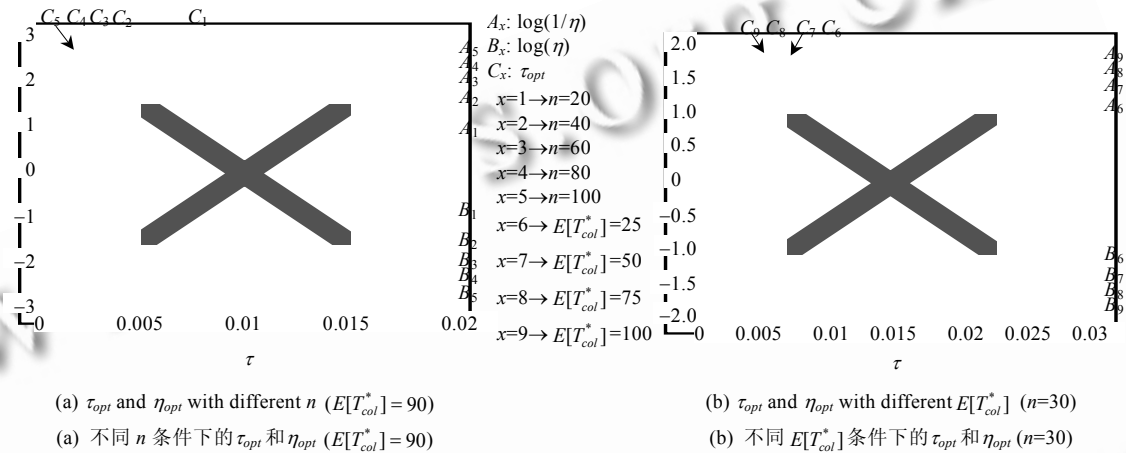


Fig.2 Validating the relationship between τ_{opt} and η_{opt}

图 2 τ_{opt} 与 η_{opt} 之间关系的验证

2.2 CSB算法的思想

根据引理 1 给出的优化条件,为了使得系统始终工作在最优状态下,我们需要利用 η 所反映的当前网络状态信息对节点的发送概率进行动态调整.由第 2.1 节的分析可知,节点的发送概率 τ 受竞争窗口参数 W 和碰撞概率 p 的影响.因此,一种方法是通过调整节点的竞争窗口大小改变节点的发送概率.但是,这种方法难以根据 η 确定调整幅度,并且存在调整滞后的现象.当节点发现网络中碰撞程度过于激烈或是信道利用不够充分时,节点可能已经对退避计数器进行了初始化赋值,退避过程已经进入了退避计数器递减阶段,因此,这时调整节点的竞争窗口大小无法及时得到反映,使得在此后的一段时间里网络将仍然经历过多的碰撞或是过多的空闲时隙.

另一种方法是,为了避免竞争窗口调整带来的滞后现象,受文献[21]的启发,我们将直接调整节点退避计数器递减到 0 后的信道接入发送概率.在文献[21]的 AOB 优化算法中,Bononi 提出了这样一种过滤节点信道接入发送行为的思想:在节点完成退避计数器的递减到 0 后,以概率 P_T 允许节点接入信道发送数据,而以概率 $1-P_T$ 阻止节点的信道接入发送行为,使得节点再次进入退避过程.特殊情况下,在 DCF 协议中,我们可以认为其始终有概率 $P_T=1$.通过调整概率 P_T ,我们可以控制节点竞争接入信道的激烈程度,使得系统满足最优工作条件 $\eta=1$.

以 τ_f 表示节点发送行为受概率 P_T 过滤后的实际发送概率. 根据公式(9), τ_f 与 η 之间满足如下关系:

$$[1 - (1 - \tau_f)^n - n\tau_f(1 - \tau_f)^{n-1}] \cdot E[T_{col}^*] \cdot \eta = (1 - \tau_f)^n \quad (12)$$

应用泰勒公式, $1 - (1 - \tau_f)^n - n\tau_f(1 - \tau_f)^{n-1} \approx n(n-1)\tau_f^2/2$, $(1 - \tau_f)^n \approx 1 - n\tau_f + n(n-1)\tau_f^2/2$, 上式简化为

$$n(n-1)\tau_f^2 \cdot E[T_{col}^*] \cdot \eta = 2 - 2n\tau_f + n(n-1)\tau_f^2 \quad (13)$$

当节点数 n 较大时, 可以取近似 $n(n-1) \approx n^2$, 因此进一步有

$$n^2\tau_f^2 \cdot E[T_{col}^*] \cdot \eta = 2 - 2n\tau_f + n^2\tau_f^2 \quad (14)$$

令 $n\tau_f = \chi$, 解关于 χ 的方程, 得到如下结果:

$$\chi = \left[-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1)} \right] / (E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1) \quad (15)$$

当系统工作在最优状态时, 由引理 1 可知, 这时应该有 $\eta = 1$. 以 χ_{opt} 表示对应 $\eta = 1$ 时 χ 的取值:

$$\chi_{opt} = \left[-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] - 1)} \right] / (E[T_{col}^*] - 1) \quad (16)$$

联合公式(15)和公式(16), 进行如下变换:

$$\frac{\chi - \chi_{opt}}{\chi} = \frac{\tau_f - \tau_f^*}{\tau_f} = \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1)}}{E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1} - \frac{-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] - 1)}}{E[T_{col}^*] - 1} \right] / \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1)}}{E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1} \right] \quad (17)$$

其中: τ_f^* 表示 $\eta = 1$ 时的最优发送概率 τ_f , 分子部分 $\Delta = \tau_f - \tau_f^*$, 反映了节点当前的发送概率偏离最优值的偏移大小. 这样, 根据公式(17), 我们可以在无须知道网络中活跃节点数量的情况下调整节点的发送概率, 使得系统工作在最优状态下. 我们给出如下引理:

引理 2. 当系统工作在非最优状态时, 节点的发送概率需要进行如下 $\tau_f \rightarrow \tau_f'$ 形式的调整, 以使得系统工作在最优状态下:

$$\tau_f' = \tau_f \cdot \frac{-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] - 1)}}{E[T_{col}^*] - 1} / \frac{-1 + \sqrt{1 + 2(E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1)}}{E[T_{col}^*] \cdot \eta - 1} \quad (18)$$

证明: 由公式(17)进行等式变换易得. □

为了后面使用方便, 我们用函数 $U(E[T_{col}^*], \eta)$ 来描述公式(18) τ_f' 与 τ_f 的关系, 即有 $\tau_f' = \tau_f U(E[T_{col}^*], \eta)$.

2.3 CSB算法描述

以 T_{renew} 表示节点发送概率调整的周期时间, 为了适应不同信道速率的网络, 我们将 T_{renew} 设定为相对时间而不是绝对时间, $T_{renew} = N \cdot T_{virtual}$, 即一个更新周期包括 N 个信道虚拟传输时间段, N 的大小根据网络中活跃节点数量改变的频繁程度进行合理取值. 在每个周期时间 T_{renew} 内, 节点侦听信道以记录信道经历的空闲时间和碰撞传输时间. 以 $Idle(k)$ 和 $Coll(k)$ 分别表示第 k 个周期时间 T_{renew} 内节点记录到的信道空闲时间和碰撞传输时间. 为了避免系统状态瞬变导致的信息反映失真, 我们采用滑动平均的方式获得 $E[Idle(k)]$ 和 $E[Coll(k)]$:

$$E[Idle(k)] = \alpha E[Idle(k-1)] + (1 - \alpha) Idle(k) \quad (19)$$

$$E[Coll(k)] = \alpha E[Coll(k-1)] + (1 - \alpha) Coll(k) \quad (20)$$

其中, α 为平滑因子. 以 η_k 表示第 k 个周期时间 T_{renew} 内 η 的取值, $\eta_k = E[Idle(k)] / E[Coll(k)]$. 此外, 为了得到 $E[T_{col}^*]$, 还需要对周期时间 T_{renew} 内每次碰撞发生的平均信道占用时间进行计算. 以 $T_{col}^*(k)$ 表示第 k 个周期时间 T_{renew} 内的 T_{col}^* . 设第 k 个周期时间 T_{renew} 内发生碰撞的次数为 $c(k)$, 则该周期时间内的 T_{col}^* 可计算为 $T_{col}^*(k) = Coll(k) / (c(k) \cdot T_{idle})$. 同样, 对 $T_{col}^*(k)$ 取滑动平均, 有

$$E[T_{col}^*(k)] = \alpha E[T_{col}^*(k-1)] + (1 - \alpha) T_{col}^*(k) \quad (21)$$

CSB 算法并不改变 DCF 协议标准所采用的 CSMA/CA 基本机制, 而是在节点执行 CSMA/CA 后, 对节点发起的信道接入请求进行过滤, 实现根据网络的拥塞状态控制节点最终在信道上发起传输动作的频繁程度的目的, 如图 3 所示.

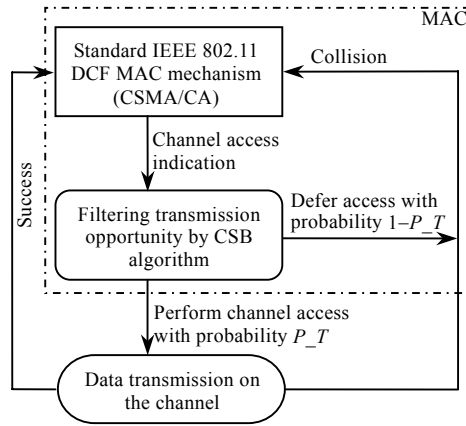


Fig.3 Architecture of collocation for CSB algorithm
图3 CSB 算法的配置结构

图3给出了CSB算法工作于节点MAC层的配置结构,算法设计工作于CSMA/CA模块和物理层模块之间,并且无须对上下关联的功能模块进行修改.过滤节点发送的概率 P_T 取决于节点侦听信道获得的网络拥塞程度信息.文献[10]指出,由于BEB退避算法设计让成功接入信道的节点重置竞争窗口为最小值 W_{min} ,而对于发生碰撞的节点则扩大竞争窗口为之前的2倍,这使得获得成功发送的节点将在接下来较短的时间里以更大的机率再次获得信道接入发送机会,而发生碰撞的节点将可能长时间得不到信道接入发送的机会,形成较大的数据传输时延.因此,BEB造成了节点之间竞争信道发送的短期不公平性问题(short-term unfairness)^[10].该问题的本质原因在于,处于不同退避阶段的节点由于退避计数器随机赋初值的范围不同,使得节点执行退避后接入信道发送的机会存在较大的差异.为了克服这种不公平性,设计概率 P_T 为如下形式:

$$P_T(j) = \begin{cases} 2^j \varphi, & j = 0, 1, 2, \dots, m \\ 2^m \varphi, & j = m + 1, m + 2, \dots, L \end{cases} \quad (22)$$

其中 j 表示节点数据传输的第 j 次退避, L 为最大重传次数(本文中假设 $L > m$), φ 为一个与退避阶段无关的参数.算法通过改变参数 φ 实现对概率 P_T 的调整,为了保证发送概率在算法的调整范围之内,通常设置较小的 m 使得 $P_T(m) < 1$.第 k 个周期时间 T_{renew} 内的参数 φ 取值以 φ_k 表示.后面我们将证明采用公式(22)形式的 P_T ,节点在不同退避阶段接入信道发送的概率基本一致.

以 $\tau_{backoff-0}$ 表示在一个时隙里节点退避计数器递减到0的概率, $\tau_f(k)$ 表示节点在第 k 个周期时间 T_{renew} 内的信道接入发送概率 τ_f .由于概率 P_T 的过滤作用,有

$$\tau_f(k) = \tau_{backoff-0} \cdot P_T \quad (23)$$

在不同退避阶段,退避计数器递减到0的概率不同,以 $\tau_{backoff-0}(j)$ 表示第 j 退避阶段退避计数器递减到0的概率 $\tau_{backoff-0}$, $\tau_f(k, j)$ 表示第 j 退避阶段的发送概率 $\tau_f(k)$.代入公式(22),式(23)可以重写为如下形式:

$$\tau_f(k, j) = \tau_{backoff-0}(j) \cdot P_T(j) = \begin{cases} \tau_{backoff-0}(j) \cdot 2^j \varphi_k, & j = 0, 1, 2, \dots, m \\ \tau_{backoff-0}(j) \cdot 2^m \varphi_k, & j = m + 1, m + 2, \dots, L \end{cases} \quad (24)$$

下一节将证明上式与退避阶段 j 无关.这样,令 $\Gamma = \tau_{backoff-0}(j) \cdot 2^j$, $\tau_f(k)$ 可以表示为

$$\tau_f(k) = \tau_f(k, j) = \Gamma \cdot \varphi_k \quad (25)$$

根据引理2,第 k 个周期时间 T_{renew} 结束后,需要作如下发送概率的调整:

$$\tau_f(k+1) = \tau_f(k) \cdot U(E[T_{col}^*(k)], \eta_k) = \Gamma \cdot \varphi_k \cdot U(E[T_{col}^*(k)], \eta_k) \quad (26)$$

于是,第 $k+1$ 个周期时间 T_{renew} 内 φ 的取值应为 $\varphi_{k+1} = \varphi_k \cdot U(E[T_{col}^*(k)], \eta_k)$. CSB算法的工作流程总结如下:

- (1) 根据公式(19)计算第 k 个周期时间 T_{renew} 内的平均信道空闲时间 $E[Idle(k)]$.

- (2) 根据公式(20)计算第 k 个周期时间 T_{renew} 内的平均碰撞传输时间 $E[Coll(k)]$.
- (3) 根据公式(21)计算第 k 个周期时间 T_{renew} 内每次碰撞传输的平均信道占用时间 $E[T_{col}^*(k)]$.
- (4) 计算 $\eta_k = E[Idle(k)]/E[Coll(k)]$.
- (5) 计算 $U(E[T_{col}^*(k)], \eta_k)$.
- (6) 更新过滤节点发送行为的概率 P_T 的参数 φ : $\varphi_{k+1} = \varphi_k \cdot U(E[T_{col}^*(k)], \eta_k)$.

3 CSB 算法数学模型

本节将给出 CSB 算法的数学模型分析.分析采用 Bianchi 在文献[3]中分析 DCF 时提出的离散 Markov 链分析方法.与文献[3]相同地,假设节点发送队列中始终有数据在等待发送,并且发送产生碰撞的概率与退避阶段无关.以 $s'(t)$ 和 $b'(t)$ 分别表示节点退避过程在时刻 t 所处的退避阶段和退避计数器取值.取时刻 t 为退避计数器执行递减动作的离散时刻,状态 $\{s'(t), b'(t)\}$ 的离散 Markov 链模型如图 4 所示.

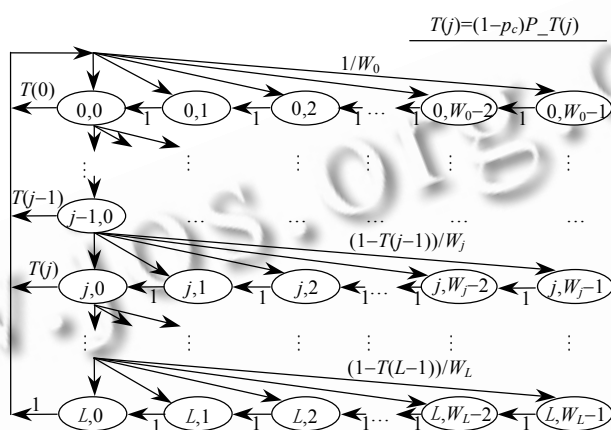


Fig.4 Markov chain model for the backoff procedure of the node using CSB algorithm
图 4 CSB 算法下节点的退避过程状态 Markov 链模型

为了简洁,采用二元组 $\{j, k\}$ 对应表示 $\{s'(t), b'(t)\}$ 所代表的状态.模型中考虑节点的退避重传次数为 L ,当数据被重传 L 次后,无论传输成功与否,节点都将转入发送队列中下一个数据的退避过程(post-backoff process)^[1].节点数据发送产生碰撞的概率以 p_c 表示,第 j 次退避的竞争窗口大小为 W_j ,Markov 链模型中状态的非空一步转移概率为

$$\begin{cases} P\{j, k | j, k+1\} = 1, & j \in (0, L), k \in (0, W_j - 2) \\ P\{0, k | j, 0\} = (1 - p_c)P_T(j)/W_0, & j \in (0, L-1), k \in (0, W_0 - 1) \\ P\{j, k | j-1, 0\} = 1/W_j - (1 - p_c)P_T(j-1)/W_j, & j \in (1, L), k \in (0, W_j - 1) \\ P\{0, k | L, 0\} = 1/W_0, & k \in (0, W_0 - 1) \end{cases} \quad (27)$$

以 $b_{j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s'(t)=j, b'(t)=k\}$ 表示 Markov 链中状态 $\{j, k\}$ 的稳态概率.根据 Markov 链的概率转移特性,我们有如下系统平衡方程:

$$\begin{cases} b_{j,k} = \left[\sum_{i=0}^{L-1} (1 - p_c)P_T(i)b_{i,0} + b_{L,0} \right] (W_j - k) / W_j, & j = 0, 0 \leq k \leq W_0 - 1 \\ b_{j,k} = [1 - (1 - p_c)P_T(j-1)]b_{j-1,0} (W_j - k) / W_j, & 1 \leq j \leq L, 0 \leq k \leq W_j - 1 \end{cases} \quad (28)$$

这样,所有状态的稳态概率 $b_{j,k}$ 都可以通过 $b_{0,0}$ 进行表示.利用归一化条件,得到 $b_{0,0}$ 的计算表达式为

$$\sum_{j=0}^L \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{j,k} = 1 \Rightarrow b_{0,0} = \left\{ (W_0 + 1) / 2 + \sum_{j=1}^L \left[\prod_{i=0}^{j-1} [1 - (1 - p_c)P_T(i)] (W_j + 1) / 2 \right] \right\}^{-1} \quad (29)$$

当节点处于第 j 退避阶段时,退避计数器递减到 0 的概率 $\tau_{backoff-0}(j)$ 可以表示为

$$\tau_{backoff-0}(j) = b_{j,0} / \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{j,k} = 2 / (W_j + 1), 0 \leq j \leq L \quad (30)$$

将 $\tau_{backoff-0}(j)$ 代入公式(24),有

$$\tau_f(k, j) = \frac{2}{W_j + 1} \cdot P_{-T}(j) = \begin{cases} 2(2^j W_{\min} + 1)^{-1} \cdot 2^j \varphi_k \approx 2\varphi_k / W_{\min}, & j = 0, 1, 2, \dots, m \\ 2(2^m W_{\min} + 1)^{-1} \cdot 2^m \varphi_k \approx 2\varphi_k / W_{\min}, & j = m + 1, m + 2, \dots, L \end{cases} \quad (31)$$

因此,前面我们说 $\tau_f(k, j)$ 与退避阶段 j 无关.节点发送行为受 P_{-T} 过滤后的实际发送概率 τ_f 可以表示为

$$\tau_f = \sum_{j=0}^L [b_{j,0} \cdot P_{-T}(j)] = \sum_{j=0}^L \left[b_{j,0} \left(\sum_{k=0}^{W_j-1} b_{j,k} \right)^{-1} \cdot P_{-T}(j) \cdot \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{j,k} \right] \approx \frac{2\varphi}{W_{\min}} \quad (32)$$

利用 $\tau_f p_c$ 可以表示为 $p_c = 1 - (1 - \tau_f)^{n-1}$.采用与文献[3]类似的方法,利用公式(2),我们可以得到网络采用 CSB 算法时的系统吞吐量 S .分别取 $\varphi=0.03$ 以及满足 $\tau_f = \tau_{opt}$ 的最优 φ ,图 5 给出了不同网络节点数量条件下的模型分析结果与仿真结果比较.其中,协议详细参数设置说明在下一节给出.可以看出,模型分析结果能够很好地反映实际网络的吞吐量性能,并且 φ 在取最优值时系统吞吐量大小几乎不受节点数量变化的影响.

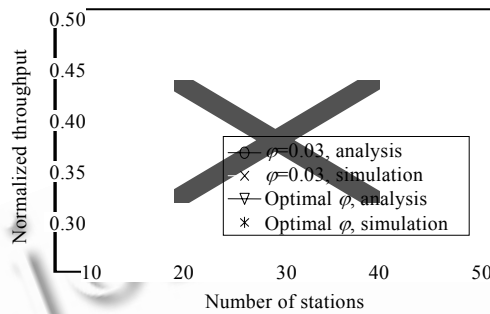


Fig.5 Validation of model analysis

图 5 模型分析验证

4 CSB 算法性能分析

本节我们将对 CSB 算法性能进行仿真分析.仿真工具采用广泛使用的 NS-2^[24].仿真中,DCF 协议相关各项参数设置遵从 IEEE 802.11 标准规范^[1],详见表 1.默认采用基本模式传输,并且节点的发送队列中始终有数据等待发送.CSB 算法的参数 α 和 N 分别取值为 $\alpha=0.8$ 和 $N=50$.我们主要从以下几个方面对算法性能进行评价:系统吞吐量、碰撞概率、节点之间的公平性、数据传输延迟及其抖动.其中,碰撞概率为信道上发生节点竞争接入信道冲突的概率,传输延迟定义为数据从到达节点发送队列的队头开始直到其被节点传输后离开节点队列的持续时间,而延迟抖动的计算取延迟时间 D 的标准差^[25],即 $Jitter(D) = \sqrt{E[D^2] - (E[D])^2}$.

Table 1 IEEE 802.11 DCF parameter settings

表 1 IEEE 802.11 DCF 参数设置

Parameter	Value	Parameter	Value
MAC header	272 bits	SIFS	10 μ s
PHY header	192 μ s	W_{\min}	32
RTS	160 bits	W_{\max}	1 024
CTS	112 bits	Retry limit	7
ACK	112 bits	Packet size	1 000 bytes
DIFS	50 μ s	Channel basic rate	2 Mbit/s
aSlotTime	20 μ s	Channel data rate	11 Mbit/s

公平性性能评价用于反映协议及算法所存在的短期不公平性问题.以 x_i 表示节点 i 在 T_w 时间内成功完成传输的数据个数,我们采用关于 x_i 的 Jain's 公平性指数^[26]作为公平性的度量,其定义如下:

$$J(x) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / \left(n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \quad (33)$$

T_w 时间设置为 $T_{virtual}$ 的 ω 倍. ω 称为公平性指数计算的窗口大小,其设置应该与网络中的节点数量 n 相关^[19]. 因此,我们设置 $\omega = \zeta \cdot n, \zeta \in \mathbf{Z}^+$. 在仿真时间范围内,取平均的 Jain's 公平性指数 $J = E[J(x)]$,并以此作为衡量协议和算法公平性的度量. J 的取值范围在 0,1 之间,并且取值越接近于 1,说明公平性越好^[26].

4.1 场景设置

- 仿真场景 1. 考察算法对网络节点数量改变的动态适应性能. 设置节点数量 $n=30$,当仿真时间持续到 20s 时,在网络中新增加 30 个同类型节点;当仿真时间进行到 40s 时,新增加的 30 个节点离开网络;仿真运行到 60s 时结束.
- 仿真场景 2. 考察算法对节点传输数据大小改变的动态适应性能. 数据大小的改变将导致信道碰撞的持续时间 T_{col} 的改变,从而触发算法进行优化调整. 设置网络节点数量 $n=50$,数据大小 500bytes. 当仿真时间持续到 20s 时,改变数据大小为 1 500bytes;当仿真时间进行到 40s 时,数据大小恢复为 500bytes;仿真运行到 60s 时结束.
- 仿真场景 3. 考察算法在不同节点数量的网络环境中的性能. 设置网络节点数量 n 为 [10,100] 范围内的值,在算法工作平稳后分析网络的各项性能指标. 作为对比,我们同时还对已有的 AOB 算法和 SD-DCF 机制进行仿真.

4.2 仿真结果及分析

图 6 给出了用场景 1 设置得到的 CSB 算法在网络节点数量变化情况下的自适应性能仿真结果. 其中,图 6(a) 和图 6(b) 分别描绘了随着时间的变化,系统吞吐量和碰撞概率的变化情况. 图中数字标注的是理论计算得到的最优结果. 作为对比,我们同时也在图中描绘了标准 DCF 协议的仿真结果. 吞吐量和碰撞概率的统计每 0.2s 进行一次. 从图 6(a) 的结果来看,CSB 算法的采用使网络获得了接近理论最优值的吞吐量性能. 尽管在 20s 和 40s 时刻,网络中节点数量发生了激烈的变化,但是由于 CSB 算法的自适应调节作用,使得采用 CSB 算法的网络能够始终工作在最优状态下,系统吞吐量并没有像 DCF 那样在 20s 时刻出现较大幅度的下降. 本质上,CSB 算法通过调节节点的发送概率减小了信道上碰撞发生的机率,提高了信道的有效利用率. 由图 6(b) 可以看出,采用了 CSB 算法以后,信道上的碰撞概率远低于采用标准 DCF 时的结果,并且节点数量的增加也没有造成碰撞概率的激增. 图 6 的结果验证了 CSB 算法能够很好地适应网络节点数量的改变进行网络优化.

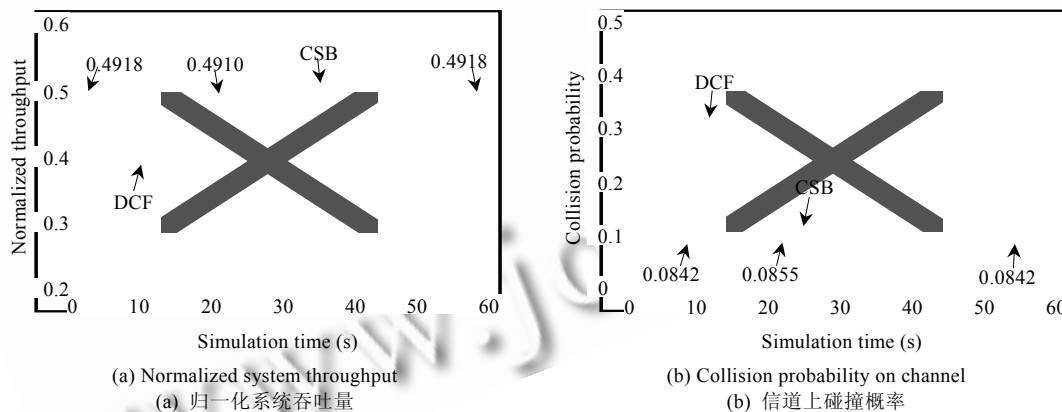


Fig.6 Adaptation of CSB algorithm when node number changes in the network

图 6 CSB 算法在网络节点数量变化情况下的自适应性

图 7 给出了用场景 2 设置得到的 CSB 算法在数据大小改变情况下的自适应性能仿真结果. 其中,图 7(a) 和图 7(b) 分别描绘了随着时间的变化,系统吞吐量和碰撞概率的变化情况. 吞吐量和碰撞概率的统计同样每 0.2s 进行一次. 图中数字标注的是理论计算得到的最优结果. 从图 7(a) 系统吞吐量变化的结果来看,CSB 算法不仅取得了接近理论最优值的吞吐量性能,并且能够根据节点传输的数据大小改变所引起的网络状态变化自适应地

调节参数,以保证网络始终工作在最优状态下,达到获得最大吞吐量性能的目的.当仿真时间进行到 20s 时,数据大小的改变使得每次信道竞争碰撞将带来更大的信道占用时间开销,因此,适当地降低信道上的碰撞概率可以提高网络的吞吐量性能,如图 7(b)所示.当仿真时间进行到 40s 时,数据大小恢复后,CSB 算法即时作出调整以保持系统始终工作在最优状态下.图 7 的结果验证了 CSB 算法能够很好地适应网络中数据大小的改变,进行网络优化.

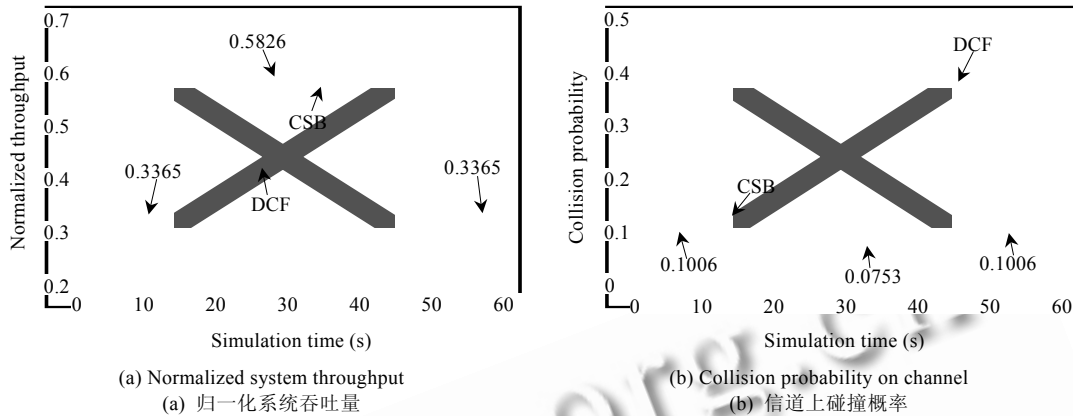


Fig. 7 Adaptation of CSB algorithm when packet size changes in the network

图 7 CSB 算法在网络数据大小变化情况下的自适应性

图 8 给出了用场景 3 设置得到的网络仿真结果.图 8(a)是不同节点数量网络的系统吞吐量仿真结果,图 8(b)是对应的节点平均传输延迟仿真结果.可以看出,随着节点数量的增加,DCF 和 SD-DCF 均出现了吞吐量的急剧下降;而 AOB 和 CSB 由于对节点发送概率的控制,避免了节点数量增加带来的信道竞争加剧,因此吞吐量得到了很好的保持.但是,由于 AOB 对发送概率的控制比较保守,其吞吐量性能比 CSB 要低.图 8(c)显示的结果可以说明这个问题.采用 AOB 时信道上的碰撞概率要低于采用 CSB 时的结果,过于保守的控制使得信道没有得到充分的利用.与其他 3 种算法(协议)相比,CSB 算法对不同节点数量的网络都有更好的适应能力和性能表现.

取公平性指数计算的窗口大小为节点数量的 5 倍,即 $\xi=5$,我们得到不同节点数量网络的公平性指数仿真结果,如图 8(d)所示.可以看出,与 SD-DCF 和 DCF 随着节点数量的不断增加公平性性能越差不同,CSB 在节点数量越多的情况下有更好的公平性表现,并且极大地优于 AOB 算法的公平性.采用 SD-DCF 时,节点之间的公平性最差,这是因为没有重置竞争窗口导致节点当前信道接入受前一次信道接入的影响.CSB 取得了相对最好的公平性,节点在不同退避阶段接入信道的机会相当,从而有效避免了某些节点在短时间内多次获得优先信道接入机会情况的发生.取节点数量 $n=50$,我们改变 ξ 的大小,得到不同时间范围内的公平性指数,结果如图 8(e)所示.当 $\xi=10$ 时,采用 CSB 算法,网络的公平性指数就已经达到了 0.9,并且随着 ξ 的增加,公平性指数越来越接近 1,公平性性能比另外三者要好得多.图 8(f)给出了节点数据传输延迟抖动的对比结果.较小的抖动表明节点可以提供更平稳的数据传输服务,有利于在网络中传输流类型的业务数据.可以看出,CSB 在这方面也有更好的表现.

图 8(g)是当节点数量 $n=50$ 时设置不同数据大小仿真得到的系统吞吐量变化曲线.由于我们在优化时考虑了不同数据大小带来的碰撞信道占用时间的影响,因此,CSB 算法可以适应各种不同数据大小网络的优化.同样,设置节点数 $n=50$,图 8(h)对比了两种传输模式下的系统吞吐量性能.可以看出,为了获得更好的吞吐量性能,DCF 在传输较大的数据时应该选择 RTS/CTS 模式,而在传输较小的数据时则应该选择基本模式.但是,CSB 算法下这种选择不再必要,采用基本模式总是可以获得更好的吞吐量性能,这是因为与碰撞传输引入的信道占用开销相比,RTS/CTS 帧传输将带来更大的信道占用开销.最后,我们仿真了竞争窗口 W_{\min} 和 W_{\max} 对 CSB 算法的影响,如图 8(i)所示.可以看出,采用 CSB 算法时,竞争窗口的变化几乎不会对系统吞吐量性能产生影响.这是由于 CSB 算法在调整过程中并没有引入与 W_{\min} 和 W_{\max} 相关的参数,因此其对网络的优化不受 W_{\min} 和 W_{\max} 的影响.

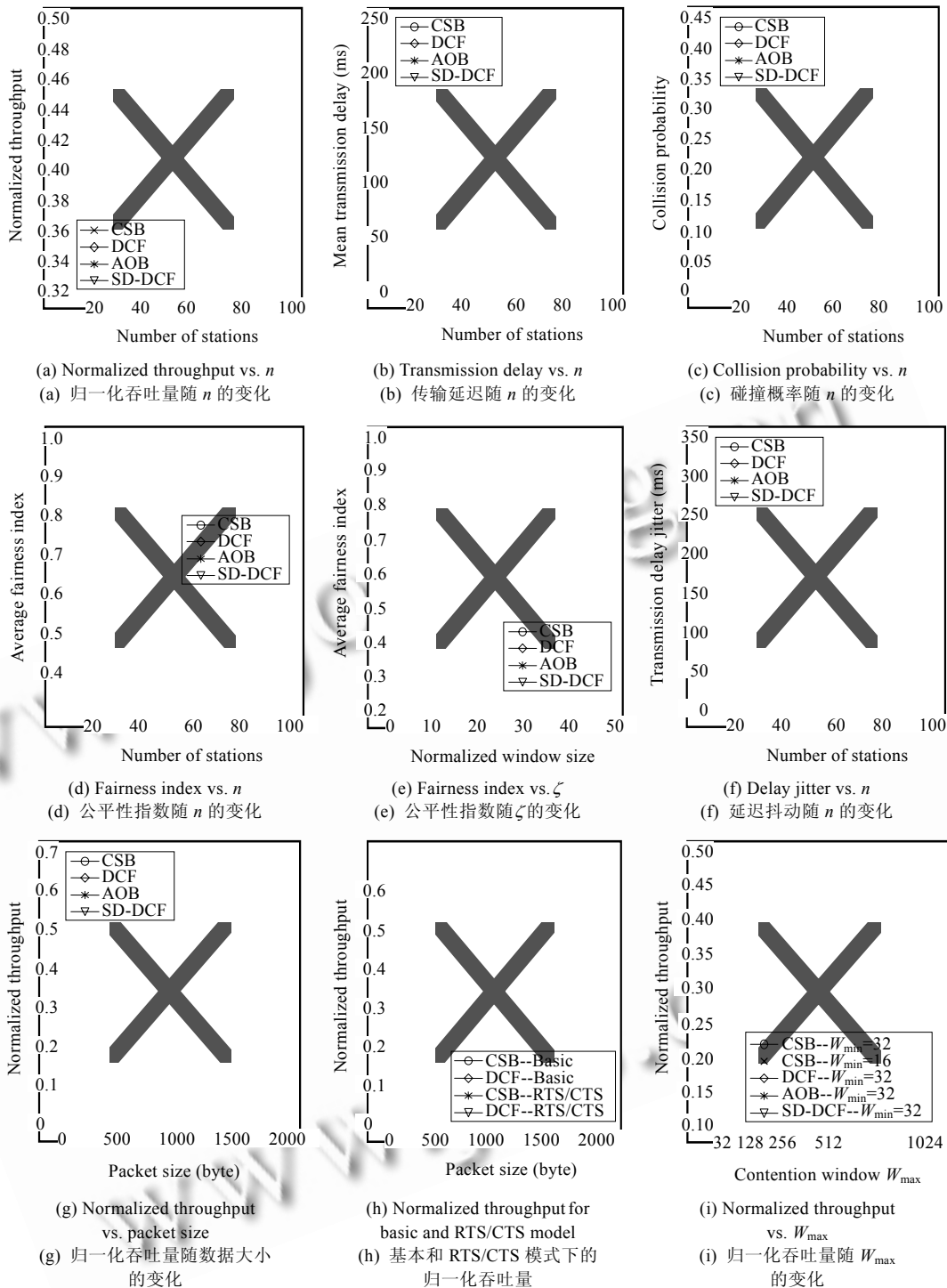


Fig.8 Simulation results of the 3rd network scene

图 8 场景 3 下网络仿真结果

5 结束语

基于竞争方式的分布式协调信道接入机制 IEEE 802.11 DCF,系统的性能与网络中参与信道竞争的活跃节点数量相关.通常的DCF优化方法需要对活跃节点数量进行估计,计算复杂度大;或者没有明确的网络优化状态目标,不能适应网络状态的动态变化.本文提出了一种无须进行活跃节点数量估计的自适应优化算法 CSB.从 Bianchi 关于 IEEE 802.11 DCF 的模型分析研究出发,我们导出了一种与网络中活跃节点数量无关的系统性能优化条件.利用该优化条件,根据侦听信道获得的当前网络拥塞程度信息,我们可以得到使得网络能够工作在最优状态下的发送概率调整.在不改变 DCF 基本工作方式的条件下,通过对 CSMA/CA 的信道接入请求进行过滤的方法对节点接入信道的频繁程度进行控制.算法设计还同时考虑了改善 DCF 的短期不公平性问题.大量的仿真对比实验结果表明,CSB 算法取得了接近理论最优的系统吞吐量性能,并且能够自适应地进行参数调整以适应网络状态的动态变化,同时还有效地改善了网络的碰撞概率、传输延迟、延迟抖动以及公平性等多方面的性能.在下一步的工作中,我们将考虑如何在 CSB 算法中引入多优先级业务支持的问题.

References:

- [1] IEEE 802.11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std. 802.11, 2007.
- [2] Kwak BJ, Song NO, Miller LE. Performance analysis of exponential backoff. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005,13(2): 343–355. [doi: 10.1109/TNET.2005.845533]
- [3] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000,18(3):535–547. [doi: 10.1109/49.840210]
- [4] Cali F, Conti M, Gregori E. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2000,8(6):785–799. [doi: 10.1109/90.893874]
- [5] Cantieni GR, Ni Q, Barakat C, Turletti T. Performance analysis under finite load and improvements for multirate 802.11. *Computer Communications*, 2005,28(10):1095–1109. [doi: 10.1016/j.comcom.2004.07.023]
- [6] Yin J. The analysis of performance of IEEE 802.11 MAC protocol using Markov chain. *Int'l Journal of Computer Science and Network Security*, 2007,7(12):27–37.
- [7] Liu JS. Design and performance evaluation of a distributed transmission control protocol for wireless local area network. *IEICE Trans. on Communications*, 2006,E89-B(6):1837–1845. [doi: 10.1093/ietcom/e89-b.6.1837]
- [8] Ibrahim M, Alouf S. Design and analysis of an adaptive backoff algorithm for IEEE 802.11 DCF mechanism. In: Boavida F, Plagemann T, Stiller B, Westphal C, Monteiro E, eds. *Proc. of the Networking 2006*. LNCS 3976, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 184–196.
- [9] Chen WT. An effective medium contention method to improve the performance of IEEE 802.11. *Wireless Networks*, 2008,14(6): 769–776. [doi: 10.1007/s11276-006-0012-7]
- [10] Anouar H, Bonnet C. Optimal constant-window backoff scheme for IEEE 802.11 DCF in single-hop wireless networks under finite load conditions. *Wireless Personal Communications*, 2007,43(4):1583–1602. [doi: 10.1007/s11277-007-9329-5]
- [11] Taifour M, Nait-Abdesselam F, Simplot-Ryl D. RC-MAC: Reduced collision MAC for bandwidth optimization in wireless local area networks. In: Segovia J, Zitar RA, eds. *Proc. of the 2007 IEEE/ACS Int'l Conf. on Computer Systems and Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2007. 195–202.
- [12] Li HW, Wu JP, Ma H, Zhang PY, Luo SX. Performance optimization for IEEE 802.11 based on the range of contention station number. *Journal of Software*, 2004,15(12):1850–1859 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1850.htm>
- [13] Ni Q, Aad I, Barakat C, Turletti T. Modeling and analysis of slow CW decrease for IEEE 802.11 WLAN. In: Ke G, Niu ZS, eds. *Proc. of the 14th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 1717–1721.
- [14] Chatzimisios P, Vitsas V, Boucouvalas AC, Tsoufa M. Achieving performance enhancement in IEEE 802.11 WLANs by using the DIDD backoff mechanism. *Int'l Journal of Communication Systems*, 2007,20(1):23–41. [doi: 10.1002/dac.811]

- [15] Wang CG, Li B, Li LM. A new collision resolution mechanism to enhance the performance of IEEE 802.11 DCF. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2004,53(4):1235–1246. [doi: 10.1109/TVT.2004.830951]
- [16] Wang X, Giannakis GB. CSMA/CCA: A modified CSMA/CA protocol mitigating the fairness problem for IEEE 802.11 DCF. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006,(2):1–12.
- [17] Kwon YG, Fang YG, Latchman H. Design of MAC protocols with fast collision resolution for wireless local area networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2004,3(3):793–807. [doi: 10.1109/TWC.2004.827731]
- [18] Minooei H, Nojumi H. Performance evaluation of a new backoff method for IEEE 802.11. Computer Communication, 2007,30(18): 3698–3704. [doi: 10.1016/j.comcom.2007.07.003]
- [19] Heusse M, Rousseau F, Guillier R, Duda A. Idle sense: An optimal access method for high throughput and fairness in rate diverse wireless LANs. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005,35(4):121–132. [doi: 10.1145/1090191.1080107]
- [20] Tian XJ, Chen X, Ideguchi T, Fang YG. Improving throughput and fairness in WLANs through dynamically optimizing backoff. IEICE Trans. on Communications, 2005,E88-B(11):4328–4338. [doi: 10.1093/ietcom/e88-b.11.4328]
- [21] Bononi L, Conti M, Gregori E. Runtime optimization of IEEE 802.11 wireless LANs performance. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2004,15(1):66–80. [doi: 10.1109/TPDS.2004.1264787]
- [22] Bianchi G, Tinnirello I. Kalman filter estimation of the number of competing terminals in an IEEE 802.11 network. In: Matta I, ed. Proc. of the 22nd IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2003. 844–852.
- [23] Vercauteren T, Toledo AL, Wang XD. Batch and sequential Bayesian estimators of the number of active terminals in an IEEE 802.11 network. IEEE Trans. on Signal Processing, 2007,55(2):437–450. [doi: 10.1109/TSP.2006.885723]
- [24] VINT Group. UCB/LBNL/VINT network simulator (version 2). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [25] Raptis P, Vitsas V, Chatzimisios P, Paparrizos K. Delay jitter analysis of 802.11 DCF. Electronics Letters, 2007,43(25): 1472–1474. [doi: 10.1049/el:20071771]
- [26] Jain R. The Art of Computer Systems Performance Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1991. 36–37.

附中文参考文献:

- [12] 李贺武,吴建平,马辉,张培云,罗世新.基于竞争终端个数区间的 IEEE 802.11 性能优化.软件学报,2004,15(12):1850–1859. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1850.htm>



毛建兵(1981—),男,四川乐山人,博士,主要研究领域为无线局域网,无线自组织网络,无线网络系统性能优化。



毛玉明(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为宽带通信网,网络体系结构与协议分析,网络管理系统与协议。



冷甦鹏(1973—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线自组织网,传感器网络,无线宽带网络,下一代无线网络。



白翔(1977—),男,博士,工程师,主要研究领域为无线局域网,支持 QoS 的接入控制协议与算法。