

基于IEEE 802.11p的车载自组网MAC层接入算法RLBSA

何 晋¹, 陈思洋², 朱西平^{2,3}

(1. 成都信息工程大学教务处 成都 610225; 2. 成都信息工程大学信息安全工程学院 成都 610225;

3. 电子科技大学通信抗干扰国家级重点实验室 成都 611731)

【摘要】基于多业务的p-persistent模型提出实时侦听的自适应算法(RLBSA)。该算法针对VANET4种优先级设置提出利用计算信道冲突/空闲比来优化信道的利用率, 即当信道空闲较多时, 节点根据自适应策略增加发送概率; 而信道冲突较多时, 则降低发送概率。该算法解决了在多种优先级业务并存的条件下需要对各个优先级发送节点数量进行估计的问题, 且可以根据网络负载自适应调整刷新发送概率的时长, 克服了需要预先根据网络密度设置侦听周期长度的弊端。仿真结果表明该算法可以很好解决当网络中存在大量高优先级数据时AC3业务的冲突问题, 同时低优先级数据也能保证其访问信道的机会。

关键词 公平性; p-坚持模型; 吞吐量; 车载自组网

中图分类号 TP301 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.006

RLBSA Algorithm for VANET MAC Layer Based on IEEE 802.11p

HE Jin¹, CHEN Si-yang², and ZHU Xi-ping^{2,3}

(1. Teaching Affairs Office, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225;

2. Information Security Engineering College, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract A real-time listening based self-adaptive algorithm (RLBSA) is proposed in this paper to enhance the channel utilization rate according to the collision/idle ratio computed for four priorities of vehicular ad-hoc network (VANET). The nodes increase the transmission probability when the channel is relatively idle and decrease when channel is relatively busy. RLBSA has no need to know the number of nodes which can hardly be acquired by using mathematical method. Moreover, RLBSA can regulate the adjustment period of transmission probability according to the network load other than the fixed period which needs to be previously set. The simulation shows that RLBSA can successfully handle the collision problem of high priority data and the starvation of low priority data in the scenario with high node density.

Key words fairness; p-persistent model; throughput; VANET

IEEE 802.11p协议作为美国IEEE正式颁布的VANET协议, 其MAC层性能对车载自组网的实际部署有着重要的影响。IEEE 802.11p协议采用的EDCA(enhanced distributed coordination access)机制虽然能够很好地区分支持不同优先级业务的QoS, 但在某些通信条件下也存在诸多限制。如文献[1-2]指出EDCA的核心DCF(distributed coordination function)机制的广播性能较差, 当节点密度较大时, 极易产生包碰撞。文献[3]则指出EDCA中高优先级数据将抢占大部分带宽, 而低优先级数据则可能面临被饿死的困境, 提出了QATC(QoS-supporting adaptive transmission control)算法。针对DCF以及

EDCA的弊端, 研究人员亦作出不少研究。如文献[4]提出了p-persistent模型, 将窗口退避模型转化为发送概率模型, 以发送概率优化为目的, 提高网络整体吞吐量。文献[5]则针对IEEE 802.11e中的EDCA机制提出了多业务的p-persistent模型。目前, 大多数基于p-persistent模型的算法都需要对节点数量进行估计, 而数学估计方法过于繁琐, 不利于提高算法效率^[3]。

本文针对DCF、EDCA机制以及基于二者算法的弊端, 提出了RLSBA算法, 该算法基于多业务的p-persistent模型, 通过实时侦听信道状态, 计算冲突/空闲比与发送概率, 在提高系统吞吐量的同时降低节点间的碰撞概率, 保障不同优先级业务下的公

收稿日期: 2014-09-01; 修回日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61071100); 四川省科技支撑计划(2013GZ0028); 四川省教育厅科技计划重点项目(15ZA0182)

作者简介: 何晋(1978-), 男, 副教授, 主要从事无线网络与通信、模式识别与智能系统等方面的研究。

平性。

1 p-persistent模型

1.1 单业务p-persistent模型

为了解决二进制退避算法带来的诸多弊端与限制,文献[4]提出了一种新的基于竞争窗口概念模型,称之为p-persistent模型。该模型的核心思想是:一个节点以服从几何分布的概率 p 进行数据发送,以 $(1-p)$ 概率进行退避。其中 p 服从:

$$p = \frac{1}{E[B]+1} \quad (1)$$

式中, $E[B]$ 表示平均退避时间,可进一步写成:

$$E[B] = \frac{E[CW]-1}{2} \quad (2)$$

式中, $E[CW]$ 为竞争窗口,因此联立式(1)和式(2)可以得到 p 的表达式为:

$$p = \frac{2}{CW+1} \quad (3)$$

为了评估信道在不同网络吞吐量下的负载情况,文献[4]进一步提出虚拟传输时间(virtual-transmissiontime, VT)概念,将其定义为连续两个成功传送的数据包间隔,如图1所示。

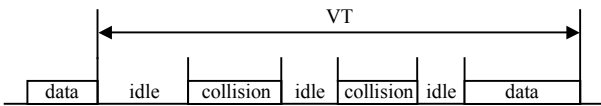


图1 虚拟传输时间划分示意图

从图1可以看出,一个虚拟传输时间内包括了空闲时间、冲突时间以及一次成功传输时间,而吞吐量可以表示为:

$$\text{Thr} = \frac{E[L]}{E[VT]} \quad (4)$$

式中, $E[L]$ 与 $E[VT]$ 分别为一次成功传输的数据长度以及平均虚拟传输时间。式(4)表明当数据长度 L 固定时,要使吞吐量最大化,就必须使平均虚拟传输时间最小。根据图1可以有如下定义^[4]:

$$E[VT] = E[N_c]E[\text{coll}] + (E[N_c]+1)E[\text{idle}] + E[\text{suc}] \quad (5)$$

式中, $E[N_c]$ 表示平均碰撞次数,进一步有^[6]:

$$\begin{cases} E[\text{coll}] = T_c + T_{\text{sifs}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{difs}} \\ E[\text{suc}] = T_s + T_{\text{sifs}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{difs}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, T_c 与 T_s 表示一次冲突及一次成功传输所需时间;后3项分别表示IEEE 802.11中的SIFS、ACK以及DIFS时间。根据p-persistent模型,上述所有变量均可以由发送概率 p 表示,且可以得到 $E[VT]$ 关于 p 的表达式,因此最大化Thr的问题转化为了求合适的

p 值,使得 $E[VT]$ 最小化。

1.2 多业务p-persistent模型

假设某个网络中存在 K 类优先级数据,网络中的各个节点只选择一种优先级业务进行发送,并且第 i 个优先级数据的发送节点数量为 N_i ^[7],则式(4)可以进一步表示为:

$$\text{Thr} = \frac{E[L]}{E[TV]} = \sum_{i=1}^K \text{Thr}_i = \sum_{i=1}^K \frac{E[L_i]p(i)}{E[VT]} \quad (7)$$

式中, $P(i)$ 表示优先级为 i 的业务被成功发送概率。则 $E[N_c]$ 及 $E[\text{idle}]$ 可分别表示为:

$$E[N_c] = \frac{1 - \prod_{i=1}^K (1-p_i)^{N_i}}{\sum_{i=1}^K \left[N_i p_i (1-p)^{N_i-1} \prod_{j=1, j \neq i}^K (1-p_j)^{N_j} \right]} - 1 \quad (8)$$

$$E[\text{idle}] = \frac{\prod_{i=1}^K (1-p_i)^{N_i}}{1 - \prod_{i=1}^K (1-p_i)^{N_i}} \delta \quad (9)$$

式中, δ 表示一个时隙时间,即aSlotTime。根据文献[7-10],考虑将不同优先级的业务按比重进行带宽分配,以实现对不同业务流QoS的区分化支持。设 i 与 j 优先级的带宽分配比重为 $r_{i,j}$,联立式(7)可得^[8]:

$$r_{i,j} = \frac{\text{Thr}_i}{\text{Thr}_j} = \frac{E[L_i]p(i)/N_i}{E[L_j]p(j)/N_j} = \frac{E[L_i]p_i(1-p_j)}{E[L_j]p_j(1-p_i)} \quad (10)$$

因此,在有多个优先级业务的网络中求取系统的最大吞吐量即可转化为以下两个问题的求解:

- 1) 求取 p 值以满足式(10)给出的带宽分配比重。
- 2) 求取 p 值以满足式(4)给出的系统总吞吐量并使其最大化。

上述问题的核心与单业务的p-persistent模型一致,即求各个业务的最优传输概率 p 。尽管有诸多文献给出了多种 p 值计算方法,但是绝大多数方法都是基于知道通信范围内发送不同优先级业务的节点密度 N 为前提,并且当利用非线性方程组求解时也无法获得唯一解。另有文献的算法设计虽然回避了 N 值估计,但是各个节点的发送概率会产生相互依赖,且算法复杂,成本开销较大。

2 RLSBA算法

2.1 RLBSA理论分析

在VANET中同时存在多个优先级业务且节点数量不一,综上所述,RLBSA的核心任务是求得发

送各个优先级业务节点的发送概率 p ,使得 $E[VT]$ 能够最小化,进一步最大化系统吞吐量。1.1节表明,当节点数量固定后 $E[VT]$ 是一个关于 p 的函数,而通过该函数对 p 求导来获取 $E[VT]$ 极值的方法过于复杂,并且由于VANET拓扑变化频繁而剧烈,对于某些参数的实时性要求很高,因此,基于上述方法并不能有效地解决 p 值求取问题。而文献[6]回避了直接利用 $E[VT]$ 函数求解发送概率,而使用一个虚拟传输时间段里面的平均数据冲突占用时长与平均空闲时长提出了一个近似优化解:

$$E[\text{idle}_{\text{total}}] = E[\text{coll}_{\text{total}}] \quad (11)$$

式中, $\text{idle}_{\text{total}}$ 与 $\text{coll}_{\text{total}}$ 两个参数分别为一个虚拟传输时间段内总的空闲时间长度与总的冲突时间长度。

结合图1得到:

$$(E[N_c] + 1)E[\text{idle}] = E[N_c]E[\text{coll}] \quad (12)$$

文献[11]通过数学证明了该近似优化条件的有效性,即通过式(12)求得的发送概率 p 等同于使用 $E[VT]$ 函数求解发送概率,即当 p 满足式(12)时,网络有最佳信道利用率且系统有最大吞吐量。

文献[12-14]在多优先级业务如采用EDCA机制的网络中也将该近似优化条件进行了扩展,并指出该近似优化条件的实际意义在于:当节点的发送概率过大,会造成信道的严重冲突,数据碰撞概率大大提高,导致信道带宽被无效使用;而如果节点的发送概率过小,又会导致信道利用率偏低,造成频段较大程度的浪费,因此当一段时间内信道总的冲突时间等于总空闲时间的时候,信道利用率达到一种平衡状态。

2.2 发送概率自适应调整策略

根据式(11)和式(12),将 $\eta = E[\text{coll}_{\text{total}}]/E[\text{idle}_{\text{coll}}]$ 是否等于1作为判断条件调整发送概率 p 是整个RLSBA算法的核心,但是在具体实施过程中还需要考虑怎样调整 p 使其能快速适应网络的变化,进而能够有效地使得信道的冲突空闲比快速趋近1。因此,文献[3]提出了一种调整策略,即:

$$p' = \frac{p_i \sqrt{\eta}}{1 - p_i + p_i \sqrt{\eta}} \quad (13)$$

式中, p' 为调整后的发送概率。前提是需要预先人为设置侦听周期,当达到一个周期后执行该算法。该方法的弊端在于对于不同节点密度的网络适应性较差,无法根据通信密度自动调节发送概率调整周期。因此本文提出通过设置碰撞次数上限来调整发送概率刷新周期,即当网络中碰撞次数达到设定上限后,节点计算这段时间内的冲突空闲比,再根据

式(13)计算新的发送概率。在此基础上设置一个最晚调整周期,以免在网络过于稀疏,碰撞次数很难达到门限值时强制对其进行一次 p 值刷新。通过统计IEEE 802.11p原始MAC算法1 s内包碰撞次数,碰撞次数上限设置为100以内较妥,而强制刷新周期可以据此设为1~2 s。考虑当VANET的通信密度较大,即车辆节点以及分组发送频率都较高时,碰撞次数很快就能达到门限值,因此在这种情况下车辆节点能够很快进行自适应调整;而当网络不太繁忙时,分组的碰撞次数上升较缓,因此调整速率也会随之降低,以节约系统开销成本;当网络负载过轻时,车辆节点将按照最晚调整周期进行一次强制性发送概率调整。

2.3 算法描述

用 $\text{idle}(k)$ 表示当网络碰撞次数达到上限时该时间段内信道空闲以及冲突的时间总长。一般情况下,为了避免 $\text{idle}(k)$ 以及 $\text{coll}(k)$ 的抖动跳变,算法利用加权平均对上述两个变量进行处理^[3]:

$$\begin{cases} E[\text{idle}(k)] = aE[\text{idle}(k-1)] + (1-a)\text{idle}(k) \\ E[\text{coll}(k)] = aE[\text{coll}(k-1)] + (1-a)\text{coll}(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中, a 表示平滑因子。当 a 过大时,系统的历史信息保留较多,车辆节点对于发送概率的调整不能真实反映现有的网络状况;而 a 过小时, p 可能会出现较大的抖动,使得平滑效果变差,根据相关研究表明,当 a 取0.8时系统有较好的表现。当一个侦听时间段结束后,计算:

$$\eta = \frac{E[\text{idle}(k)]}{E[\text{coll}(k)]} \quad (15)$$

获得信道的空闲/冲突比值后,节点根据式(13)进行发送概率调整。在实际的应用当中,不能保证在经过多次调整后 η 能达到绝对的1。为了避免这样重复的计算浪费,应该将调整目标设立为以1为中心的区间,即 $[1-\varphi, 1+\varphi]$ 。当经过调整后的 η 若能属于 $[1-\varphi, 1+\varphi]$,则不进行后续调整而保持现有概率继续执行发送任务。根据相关数值分析,当 φ 取0.05,即当 η 属于 $[0.95, 1.05]$ 时系统误差属于可接受范围。假设系统经过调整后的发送概率为 p'_{k+1} ,则此时不再使用IEEE 802.11中的二进制退避机制,而是直接根据式(3)进行调整。经过变形后有:

$$CW_{k+1} = \frac{2}{p'_{k+1}} - 1 \quad (16)$$

在实际的应用中,有不同的优先级业务,因此存在差异化的初始发送概率 p 的赋值。设 r 为参考优先级,则各优先级初始化 p 值可由式(3)中给出的方法

得到:

$$p_i = \frac{p_r}{p_r + f(i,r) - p_r f(i,r)} \quad (17)$$

式中, $f(i,r) = \frac{E[L_i]}{E[L_r] r_{i,r}}$ 。当一个节点新加入一个局

域网时, 该网络的Provider可以在周期性的广播中夹带 p_r 信息以告知该节点当前网络不同优先级的发送概率。

设当前发送业务优先级为 i , 当网络碰撞次数达到上限或者超过2 s仍未达到上限时依次处理:

- 1) $E[idle(k)] = aE[idle(k-1)] + (1-a)idle(k)$;
- 2) $E[coll(k)] = aE[coll(k-1)] + (1-a)coll(k)$;
- 3) $\eta(k) = \frac{E[coll(k)]}{E[idle(k)]}$;

4) 判断 η , 如果 $\eta \in [1-\phi, 1+\phi]$, 则保持 p_i ; 否则对业务 $i, i \in [1, K]$ 计算:

$$p_i(k+1) = \frac{p_i(k)\sqrt{\eta(k)}}{1 - p_i(k) + p_i(k)\sqrt{\eta(k)}}$$

- 5) 设置竞争窗口 $CW_i = (\text{int})\left(\frac{2}{p_i(k+1)} - 1\right)$ 。

3 算法仿真与性能仿真

本仿真场景为边长900 m的双向四车道, 节点参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

参数	值
数据包长度/byte	1 500
时隙长度/ μs	13
SIFS/ μs	32
DIFS/ μs	58
传播时延/ μs	2
CW_{\min}	15
CW_{\max}	1 023
仿真时间/s	80
车辆速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10
冲突次数上限	50

主要研究在RLBSA算法下各个优先级带宽分配情况以及节点密度对于网络性能的影响。首先设置AC3为参考优先级, 文中统一用下标0~3表示AC0~AC3优先级。根据IEEE 802.11p对QoS的支持, 假设AC3到AC0的带宽分配为16:4:2:1, 因此令 $r_{0,3} = \frac{1}{16}, r_{1,3} = \frac{1}{8}, r_{2,3} = \frac{1}{4}, r_{3,3} = 1$, 设AC3业务的初始发送概率为0.01, 则根据式(17)可以依次计算出其余优先级业务的发送概率。

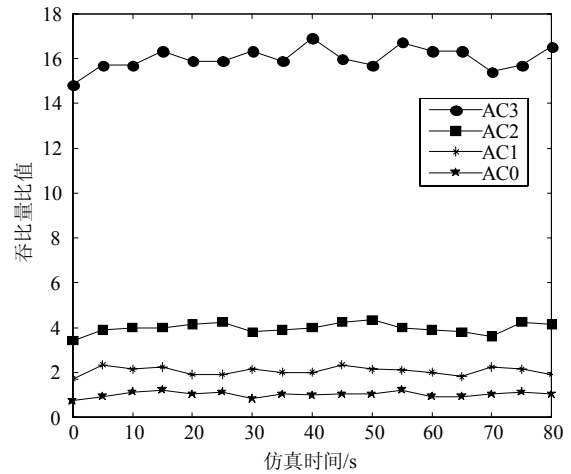


图2 各优先级业务带宽分配对比

该场景设置节点数量为80, 吞吐量比值如图2所示。各个优先级业务的吞吐量基本按照预设的比值在理论值附近波动, 尤其是采用RLBSA后可以明显看出即使在通信负荷较重时, 高优先级业务在享有大多数信道访问机会的同时低优先级业务的吞吐量也能够得到保证, 从而解决了IEEE 802.11p中低优先级业务常被饿死的情况。

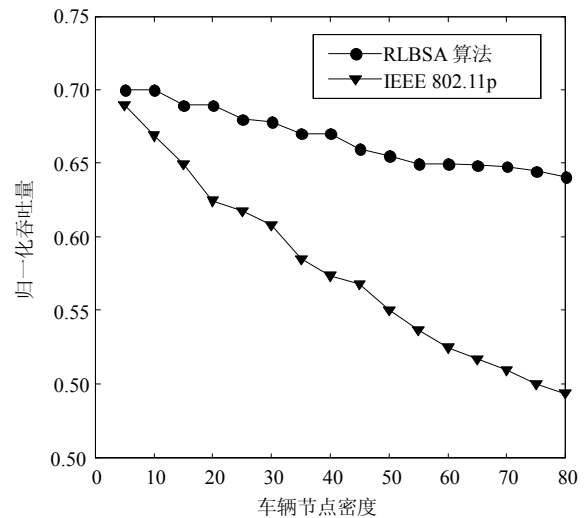


图3 网络吞吐量随节点密度变化对比

图3展示了当节点密度较小时, 采用改进算法的网络吞吐量与采用IEEE 802.11p的网络吞吐量非常接近, 但随着节点密度增加, RLBSA算法明显地降低了业务吞吐量对于节点密度的敏感性, 而与之相对的IEEE 802.11p协议则产生了大幅的下降。因此RLBSA算法可以有效优化在高节点密度下网络的吞吐量指标。

图4的仿真场景采用AC3单业务流作为分析条件; 图5则采用混合优先级业务。两张对比图分析了RLBSA以及IEEE 802.11p机制下节点冲突次数情况的对比。

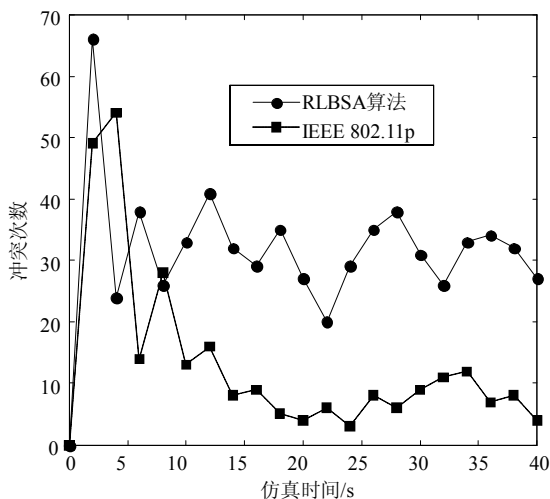


图4 冲突次数对比

从图4看出,当仿真开始时,由于发送概率未及时调整,因此与IEEE 802.11p算法接近,但是随着仿真的继续,发送概率 p 被不断优化调整,在第4 s过后,采用RLBSA算法的AC3业务流冲突次数开始显著小于IEEE 802.11p协议且逐渐趋稳。表明了即使在城市环境下当VANET存在饱和AC3数据业务时,也能很好地控制数据冲突概率,使得网络的整体性能得到保证。

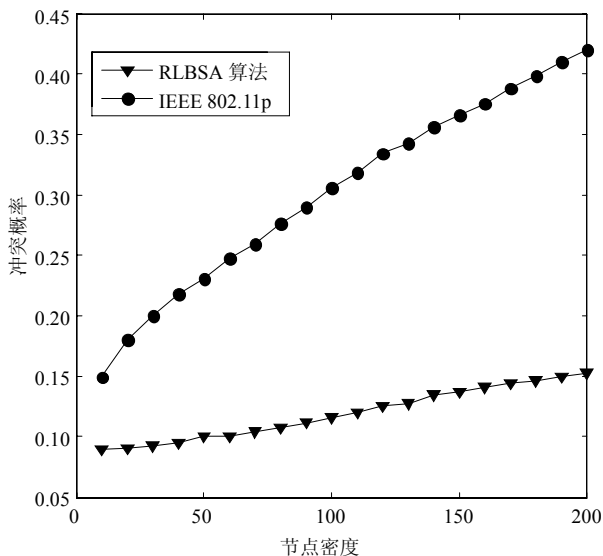


图5 不同节点密度对冲突概率的影响

图5则表明随着节点密度的增加,采用RLBSA算法的冲突概率呈缓慢上升趋势,在节点密度最大处其冲突概率为0.15左右,而采用IEEE 802.11p协议的车辆节点的冲突概率明显高出RLBSA算法,在最大节点密度处的冲突概率高出RLBSA算法近4倍。由此可以看出,RLBSA算法可以随着网络情况的变化及时作出自适应调整,并将网络冲突概率限制在较小的范围内。

4 结束语

IEEE 802.11p虽然能够支持对于QoS的区分化服务,并能在一定程度上保证其有效性,但是其采用的EDCA机制以及EDCA的核心二进制退避算法却导致了当网络负载较高时存在的两个较为突出的缺陷:在网络中存在大量高优先级数据时其数据的冲突概率将大大增加,而低优先级数据却面临被饿死的情况。本文基于p-persistent模型以及QATC算法提出了适用于IEEE 802.11p的RLBSA算法并优化了发送概率 p 的自适应调整策略。RLBSA算法可以根据不同优先级业务预设带宽的分配比例进行相关业务流的发送,在保证高优先级业务的QoS的同时保证低优先级的数据也能按照较为稳定的概率获得信道接入机会,提高业务间的公平性。下一步将针对不同应用场景下发送概率自适应调整的优化值继续深入研究,对碰撞次数上限、最晚调整周期等技术参数的选择开展实验,提高业务间的公平性和系统的吞吐量,提高算法的可用性,实现对业务的精细化管理。

参考文献

- [1] CHEN Xian-bo, REFAI H H, MA Xiao-min. Saturation performance of IEEE 802.11 broadcast scheme in ad hoc wireless LANs[C]//VTC 2007-Fall: Proceedings of IEEE 66th Vehicular Technology Conference. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007.
- [2] 袁涛. 基于IEEE 802.11p的车载自组网MAC层关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
YUAN Tao. Research on key technologies of medium access control in vehicular ad hoc networks based on IEEE 802.11p[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [3] 毛建兵. 无线局域网随机信道接入控制机制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
MAO Jian-bing. Researchs on random medium access control schemes in wireless local area networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
- [4] FREDERICO C, MARCO C, ENRICO G. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(6): 785-799.
- [5] XIAO Y. Performance analysis of priority schemes for IEEE802.11 and IEEE802.11e wireless LANs[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2005, 4(4): 1506-1515.
- [6] IEEE Std. 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]//IEEE Computer Society. New York: IEEE, 2007.
- [7] LONG Ke-ping, LI Yun, ZHAO Wei-liang, et al. p-RWBO: a novel low-collision and QoS-supported MAC for wireless

- ad hoc networks[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(9): 1193-1203.
- [8] GE Ye, HOU J C, CHOI S. An analytic study of tuning systems parameters in IEEE 802.11e enhanced distributed channel access[J]. Computer Networks, 2007, 51(8): 1955-1980.
- [9] ZHONG Fan. Throughput and QoS optimization for EDCA-based IEEE 802.11 WLANs[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 43(4): 1279-1290.
- [10] LI Bo, ROBERTO B, FANG Yong. Achieving optimal performance by using the IEEE 802.11 MAC protocol with service differentiation enhancements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(3): 1374-1387.
- [11] RAFFAELE B, MARCO C, ENRICO G. Optimal capacity of p-persistent CSMA protocols[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(3): 139-141.
- [12] HU R Q, ZHA Wei, QIAN Yi, et al. An adaptive p-persistent 802.11 MAC scheme to achieve maximum channel throughput and QoS provisioning[C]//WCNC 2006: Proceedings of IEEE WCNC 2006. New York: IEEE, 2006.
- [13] ZHA Wei, HU R Q, QIAN Yi, et al. An adaptive MAC scheme to achieve high channel throughput and QoS differentiation in a heterogeneous WLAN[C]//ACM International Conference Proceeding Series: Proceedings of the 3rd International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks. New York: ACM, 2006.
- [14] 白翔, 毛玉明, 冷甦鹏, 等. QoS区分的自适应 p-persistent MAC算法对信道利用率的动态优化[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 608-619.
- BAI Xiang, MAO Yu-ming, LENG Su-peng, et al. QoS differentiation based adaptive p-persistent MAC scheme for dynamic optimization of the channel utilization[J]. Journal of Software, 2009, 20(3): 608-619.

编辑 税红