

差错信道下无线局域网 EDCAF 接入延时分析

程 远 张 源 高西奇

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要: 该文研究了差错信道下无线局域网加强分布协调功能(EDCAF)的接入延时性能。利用马尔科夫模型的分析结果,提出了差错信道下针对不同优先级业务的接入延时分析模型并通过仿真验证了分析结果的准确性。仿真结果表明, IEEE 802.11 EDCAF 通过为不同优先级业务配置不同的接入参数满足各类应用的服务质量(QoS)需求。

关键词: 无线局域网; IEEE 802.11; 加强分布协调功能(EDCAF); 接入延时; 优先级; 差错信道

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1769-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01073

Wireless LAN EDCAF Access Delay Analysis under Error-Prone Channel

Cheng Yuan Zhang Yuan Gao Xi-qi

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The access delay of Enhanced Distributed Coordination Function (EDCAF) in WLAN under error-prone channel is studied. Utilizing the Markov chain model, a model for analyzing the access delay of different priority traffic under error-prone channel is proposed, and the accuracy of the model is verified with simulation. Simulation results show that IEEE 802.11 EDCAF meets the Quality of Service (QoS) of different applications by setting different accessing parameters.

Key words: Wireless Local Area Network(WLAN); IEEE 802.11; EDCAF (Enhanced Distributed Coordination Function); Access delay; Priority; Error-prone channel

1 引言

IEEE 802.11 标准定义了分布协调功能(DCF)和可选择的点协调功能(PCF)两种媒体接入控制协议。基于中心控制的 PCF 复杂度较高且不能有效支持突发分组业务,因而很少被实际系统采用。DCF 是一种基于冲突避免的载波侦听多点接入(CSMA/CA)协议,在媒体接入控制层对尽力而为型的业务具有很好的鲁棒性;但 DCF 对延时要求很严格的实时业务并不十分有效。为满足不同业务的服务质量(QoS)需求, IEEE 802.11 标准化组织制定了支持多媒体业务的 IEEE 802.11e 协议^[1]。IEEE 802.11e 中采用混合协调功能(HCF)实现媒体接入控制,包括竞争方式的加强分布协调功能(EDCAF)和非竞争方式的轮询控制接入。

近年来,许多文献研究了 IEEE 802.11 DCF 和 EDCAF 的系统性能^[2-5]以及如何满足各种优先级业务的 QoS 需求。Bianchi 在文献[2]中首次利用马尔科夫模型分析 DCF 的系统吞吐量。文献[3,4]用不同

方法研究了 DCF 的接入延时性能。文献的分析中,作者仅考虑了回退过程的延时,而忽略了每次重传数据包引入的延时。文献[5]利用马尔科夫模型分析了有延时限制的单一非饱和业务的吞吐量。通过配置不同的接入参数,文献[6,7]研究了 IEEE 802.11 EDCAF 不同优先级业务的吞吐量。在分析模型中,作者考虑了仲裁帧间隔(AIFS),初始竞争窗口以及传输机会(TXOP)等参数,从而适用于不同优先级业务的吞吐量性能分析。在文献[8]中,作者重点研究了 EDCAF 的延时抖动以及 AIFS 取值对性能的影响。以上研究均基于理想信道的假设,然而,实际信道中的衰落和噪声也是导致分组的传输错误和重传的重要原因。因此,研究差错信道下 EDCAF 的接入延时性能具有重要的理论和实际意义。

本文利用马尔科夫模型的分析结果,提出了一种分析差错信道下不同优先级业务的接入延时性能模型并通过仿真验证了分析模型的准确性。文章其余部分组织如下:第 2 节描述了 EDCAF 的基本原理;第 3 节中用马尔科夫模型导出了分组发送概率;第 4 节提出了差错信道下 EDCAF 接入延时分析模型;第 5 节给出了仿真结果并验证了分析模型的可靠性;最后是对全文的总结。

2009-08-10 收到, 2010-03-19 改回

国家科技重大专项(2009ZX03003-005, 2008ZX03003-005)和国家 973 计划项目(2007CB310603)资助课题

通信作者:程远 chengyuan@seu.edu.cn

2 IEEE 802.11 EDCF

IEEE 802.11 EDCF的最大特点是在不同类型业务的接入过程中实现优先级区分,更好地满足业务的QoS需求。在EDCF中,每个节点通过接入参数的配置提供4种优先级业务的接入服务。按照优先级从高到低,依次为语音业务、视频业务、尽力而为业务和背景业务。节点为每种业务设置独立的接入分类(Access Category, AC)和退避计数器,每个AC都拥有自己的退避参数集,包括AIFS,最小竞争窗口和最大竞争窗口等。如果第*i*类业务(1≤*i*≤4)的优先级比第*j*类(1≤*j*≤4)业务高,那么必满足AIFS_{*i*} ≤ AIFS_{*j*}和CW_{*i,min*} ≤ CW_{*j,min*},且两个不等式不能同时取等号。AIFS_{*i*}和CW_{*i,min*}分别代表第*i*类业务的AIFS和最小竞争窗。AIFS和最小竞争窗取值越小,退避耗时越短,其优先级越高,业务可以获得更多的接入机会。

下面对EDCF的基本接入方式做简要的描述。当节点的第*i*类业务数据队列有数据包等待发送时,节点开始监听信道状态;当信道空闲时间达到AIFS_{*i*}后,节点进入退避阶段,否则将继续监听信道。当节点进入退避阶段后,若信道处于空闲状态,第*i*类业务的退避计数器以时隙为单位递减至零后开始发送数据包;若数据信道忙,则直到信道重新空闲长达AIFS_{*i*}后,计数器继续递减计数。在某一节点内,若不同类型业务的计数器同时递减到零,节点将发送优先级最高的业务数据;而其它业务队列视其发生了一次碰撞。

EDCF中采用与DCF类似的离散指数退避算法。当第*i*类业务进入退避状态后,节点在[1,CW_{*i*}]内均匀地选取一个整数作为退避计数器的初值,CW_{*i*}称为第*i*类业务的竞争窗。第1次选择计数器初值时,令CW_{*i*}=CW_{*i,min*},CW_{*i,min*}称为第*i*类业务的最小竞争窗或初始竞争窗。当分组数据发生碰撞或由信道衰落及噪声引起传输差错时,竞争窗加倍,直到最大值CW_{*i,max*}=2^{*m_i*}CW_{*i,min*},其中*m_i*为最大退避阶数。节点成功发送分组或者重传次数超过限制时,CW_{*i*}将被重置为CW_{*i,min*}。

3 系统模型

本文的研究系统是由*n*个节点组成的直接序列扩频单跳无线局域网,节点能够实时监听信道且不存在隐藏节点。系统假设包括:每个业务流的缓存足够大且发送队列始终非空;分组长度固定;分组碰撞相互独立且在到达最大重传次数前不会被丢弃。

根据协议中定义的指数退避算法,节点中第*i*

类业务的竞争回退过程可以用图1所示的马尔科夫模型描述。图中状态变量*s*(*i*,*t*)和*b*(*i*,*t*)分别表示第*i*类业务的退避阶数和退避计数值。令*b_{i,j,k}*=lim_{*t*→∞} P{s(*i*,*t*)=*j*, *b*(*i*,*t*)=*k*}代表马尔科夫链的稳态概率,*p_i*表示第*i*类业务的分组发送失败概率,*p_{i,b}*表示任意时隙内信道中有分组传输的概率,*L*表示最大重传次数并且假定*L*大于*m_i*,令*W_{i,0}*=CW_{*i,min*}。由链式准则,可以得到稳态方程如下:

$$b_{i,j,0} = p_i^j b_{i,0,0}, \quad 0 \leq j \leq L \tag{1}$$

$$b_{i,j,k} = \frac{b_{i,j,0} (W_{i,j} + 1 - k)}{(W_{i,j} + 1)(1 - p_{i,b})}, \quad 0 \leq j \leq L, 1 \leq k \leq W_{i,j} \tag{2}$$

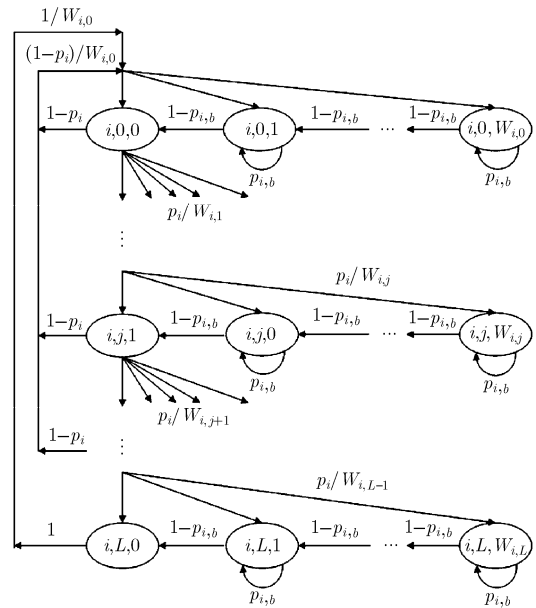


图1 第*i*类业务的竞争状态转移图

其中

$$W_{i,j} = \begin{cases} 2^j W_{i,0}, & 0 \leq j \leq m_i \\ 2^{m_i} W_{i,0}, & m_i < j \leq L \end{cases} \tag{3}$$

利用归一化准则 $\sum_{j=0}^L \sum_{k=0}^{W_{i,j}} b_{i,j,k} = 1$, 将式(1)和式(2)代入可得

$$b_{i,0,0} = \frac{1}{\sum_{j=0}^L \left(1 + \frac{1}{1 - p_{i,b}} \sum_{k=1}^{W_{i,j}} \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j} + 1} \right) p_i^j} \tag{4}$$

记第*i*类业务流在任意时隙内的分组发送概率为τ_{*i*}。节点仅当退避计数器递减至零时才能发送分组,因此,第*i*类业务的分组发送概率等于集合{i,j,0}(0≤*j*≤*L*)中所有状态概率之和,即

$$\tau_i = \sum_{j=0}^L b_{i,j,0} = \frac{1 - p_i^{L+1}}{(1 - p_i) \sum_{j=0}^L \left(1 + \frac{W_{i,j}}{2(1 - p_{i,b})} \right) p_i^j} \tag{5}$$

得到分组发送概率表达式后, 还需要找到 τ_i 与分组发送失败概率 p_i 之间的关系。差错信道下分组发送失败是由传输错误和碰撞冲突两者引起的。令 $p_{i,e}$ 和 $p_{i,c}$ 分别表示第 i 类业务的传输差错概率和碰撞概率。假定每个节点产生 N 个不同的业务流。令 $n_i (i=0, \dots, N-1)$ 表示系统中第 i 类业务的业务流总数, 业务的优先级随 i 增大而提高。由于分组碰撞包括与其它节点的低优先级和同优先级分组发生碰撞以及与其它所有高优先级分组发生的碰撞。于是, $p_{i,c}$ 表示为

$$p_{i,c} = 1 - \left[\prod_{h=0}^{i-1} (1 - \tau_h)^{n_h-1} \right] (1 - \tau_i)^{n_i-1} \left[\prod_{h=i+1}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \right] \quad (6)$$

分组发送失败概率 p_i 表示为

$$p_i = p_{i,c} + p_{i,e} (1 - p_{i,c}) \quad (7)$$

需要指出的是, 在每个节点内部采用了虚拟的碰撞处理机制, 即当不同优先级业务的分组在同一时隙内计数器递减到零, 节点选择优先级最高的业务分组发送, 其余分组重新进入退避阶段且竞争窗加倍。因此, 信道处于忙状态的概率 $p_{i,b}$ 为

$$p_{i,b} = 1 - \prod_{h=0}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \quad (8)$$

给定传输错误概率 $p_{i,e}$ 后, 将式(6), 式(7)和式(8)代入式(5), 用数值解法可以求出分组发送概率 τ_i 。

4 接入延时分析

本节给出差错信道下 EDCA 的接入延时分析模型。该模型不仅考虑了信道差错引起的重传延时, 而且对延时的分析更精确, 结果更符合实际情况。定义分组接入延时为分组进入发送队列到分组成功接入信道的时间间隔。由 EDCA 退避过程可知, 接入延时由两个方面的原因造成: 退避过程的接入延时和分组重传的传输延时。下面, 首先考虑退避过程的接入延时。根据第 3 节的分析结果, 第 i 类业务的分组在第 k 次发送成功的概率 $P_{i,k}$ 为

$$P_{i,k} = \frac{p_i^{k-1} (1 - p_i)}{1 - p_i^{L+1}} \quad (9)$$

令 $D_{i,k}$ 表示分组第 k 次竞争的接入延时, $F_{i,j}$ 是表示退避计数器每递减 1 的过程中随机冻结时间的随机变量, 其中 i 表示业务类型。每次竞争的接入延时包含信道忙导致的计数器冻结时间和计数器本身的递减时间两部分。于是有 $D_{i,k} = \sum_{j=1}^{w_{i,k}} F_{i,j} + w_{i,k} \sigma$, 其中 $w_{i,j}$ 表示 $[1, W_{i,j}]$ 之间均匀分布的随机变量, σ 为一个时隙长度。计数器递减过程中, 信道将处于 4 种状态之一: 空闲、有分组发生碰撞以及

无碰撞下的有差错传输和无差错传输; 状态概率依次记为 P_I , P_C , P_S 和 P_E , 对应于不同业务, 它们的概率分别表示为 $P_{i,C}$, $P_{i,S}$ 和 $P_{i,E}$, 则有

$$P_I = \prod_{h=0}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \quad (10)$$

$$P_{i,S} = (1 - p_{i,e}) n_i \tau_i \left[\prod_{h=0}^{i-1} (1 - \tau_h)^{n_h-1} \right] (1 - \tau_i)^{n_i-1} \cdot \left[\prod_{h=i+1}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \right] \quad (11)$$

$$P_{i,E} = n_i \tau_i p_{i,e} \cdot \left[\prod_{h=0}^{i-1} (1 - \tau_h)^{n_h-1} \right] (1 - \tau_i)^{n_i-1} \cdot \left[\prod_{h=i+1}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \right] \quad (12)$$

对 N 个业务流, 有 $P_S = \sum_{i=0}^{N-1} P_{i,S}$, $P_E = \sum_{i=0}^{N-1} P_{i,E}$ 。

由于信道 4 种状态概率之和为 1, 故有

$$P_C = 1 - \prod_{i=0}^{N-1} (1 - \tau_i)^{n_i} - \sum_{i=0}^{N-1} n_i \tau_i \left[\prod_{h=0}^{i-1} (1 - \tau_h)^{n_h-1} \right] \cdot (1 - \tau_i)^{n_i-1} \left[\prod_{h=i+1}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \right] \quad (13)$$

由于回退计数被冻结时, 信道可能处在分组成功传输, 分组发生碰撞冲突或传输差错 3 种情况之一。因此, 第 i 类业务计数器每递减 1 的平均冻结时间为

$$E[F_{i,j}] = P_C T_{i,C} + P_S T_{i,S} + P_E T_{i,E} \quad (14)$$

式(14)中 $T_{i,C}$ 和 $T_{i,S}$ 分别表示分组碰撞和分组成功发送所需的时间。显然, 对分组传输错误的用时 $T_{i,E}$ 有 $T_{i,E} = T_{i,S}$ 。式(15)给出了基本接入方式下 $T_{i,C}$ 和 $T_{i,S}$ 的表达式, 其中 R_C 为信道传输速率, L_H 表示分组中 MAC 层头和物理层头的比特数, L_P 表示分组中有效负荷长度, L_{ACK} 表示分组确认信息比特长度, $T_{i,AIFS}$ 与 $T_{i,SIFS}$ 表示第 i 类业务的 AIFS 和 SIFS 长度, δ 代表传输时延。

$$\left. \begin{aligned} T_{i,C} &= \frac{1}{R_C} (L_H + L_P) + T_{i,AIFS} + \delta \\ T_{i,S} &= \frac{1}{R_C} (L_H + L_P + L_{ACK}) + T_{i,AIFS} + \delta + T_{i,SIFS} + \delta \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由于 $F_{i,j}$ 仅取决于计数器递减过程中的信道状态, $F_{i,j}$ 与 $w_{i,j}$ 是相互独立的随机变量。对 $D_{i,k}$ 取期望, 得到第 k 次竞争的平均接入延时为

$$E(D_{i,k}) = E(w_{i,k}) \cdot E(F_{i,j}) + E(w_{i,k}) \sigma \quad (16)$$

$$E(w_{i,k}) = \begin{cases} \frac{2^k CW_{i,\min} - 1}{2}, & 0 \leq k \leq m_i \\ \frac{2^{m_i} CW_{i,\min} - 1}{2}, & m_i < k \leq L \end{cases} \quad (17)$$

令 $T_{i,B}$ 为第 i 类业务分组在成功发送前经历的所有退避过程总耗时, 对 $T_{i,B}$ 取期望, 得到

$$E(T_{i,B}) = E\left(\sum_{j=1}^L \left(P_{i,j} \sum_{k=1}^j D_{i,k}\right)\right) = \frac{1}{1-p_i^{L+1}} \sum_{j=1}^L (p_i^{j-1} - p_i^L) \cdot E(D_{i,j}) \quad (18)$$

利用上一节的计算结果和式(14), 式(16), 可以求得整个退避过程的平均接入延时。

接下来, 给出由于分组重传导致的接入延时项。令 R_i 表示第 i 类业务的分组被成功发送所经历的重传次数的随机变量, 于是有

$$E(R_i) = \sum_{k=1}^L \frac{k(1-p_i)p_i^k}{1-p_i^{L+1}} \quad (19)$$

分组重传的平均延时 $T_{i,R}$ 为 $T_{i,R} = E(R_i)(T_{i,C} + T_{i,ackout})$, 其中 $T_{i,ackout}$ 表示确认帧的超时时限。综上所述, 第 i 类业务分组的信道接入延时 $T_{i,D}$ 为整个退避过程中的平均接入延时和重传导致的接入延时之和, 即 $T_{i,D} = E(T_{i,B}) + T_{i,R}$ 。分析可知, 分组差错概率的增大将导致 $T_{i,R}$ 增加。

5 理论与仿真结果

本节给出了差错信道下 EDCF 的接入延时理论分析与仿真结果。本文以两种优先级业务为例研究了多业务场景下的不同类型业务的接入延时性能。信道传输速率 6 Mbps, 每种业务的最大重传次数均为 7, 其它仿真参数详见参考文献[1]。研究表明, 业务优先级越高, 接入延时越短; 高优先级业务的接入延时受信条件影响较小。

图 2 给出了理想和差错信道下, 两种业务接入延时性能曲线, 其中高优先级业务流数目固定为 10,

其最小竞争窗为 16, 低优先级业务流数量取 10 到 40, 最小竞争窗为 32。分析结果与仿真结果基本吻合, 验证了分析模型的准确性。从图中可以看出, 在业务流数量相同的条件下, 随着分组错误率的提高, 两类业务的接入延时均显著增加; 在相同的差错率下, 随着低优先级业务流的增加, 高优先级业务接入延时的变化比低优先级业务缓慢。这是因为, 高优先级业务受到最小竞争窗等参数的保护, 竞争接入受到的影响较小, 因而延时增加的幅度不大。由此可见, EDCF 实现了业务的优先级区分, 明显改善了高优先级业务的服务质量。

图 3 给出了低优先级业务初始竞争窗变化时两类业务的接入延时, 其中初始竞争窗从 16 增大到 128, 分组差错概率取值为 0.1。随着低优先级业务初始竞争窗的增大, 高优先级业务的接入延时显著减小, 而低优先级业务延时逐渐增大。同时, 信道存在传输误差时, 业务的延时要大于理想信道的情况。由仿真结果可以得到结论: 当优先级较高的分组由于碰撞或信道差错导致多次传输失败时, 调整低优先级分组的竞争窗可以改善高优先级业务的接入延时性能。

6 结束语

本文分析了差错信道下无线局域网 EDCF 的接入延时性能, 提出了优先级业务的延时分析模型并进行了仿真验证。研究表明, 业务的优先级越高, 接入延时越小。业务流数量和初始竞争窗的选择对各业务的接入延时也有着重要影响。本文的工作是基于饱和系统假设, 非饱和系统中 EDCF 的吞吐量, 接入延时等性能还有待探讨和研究。

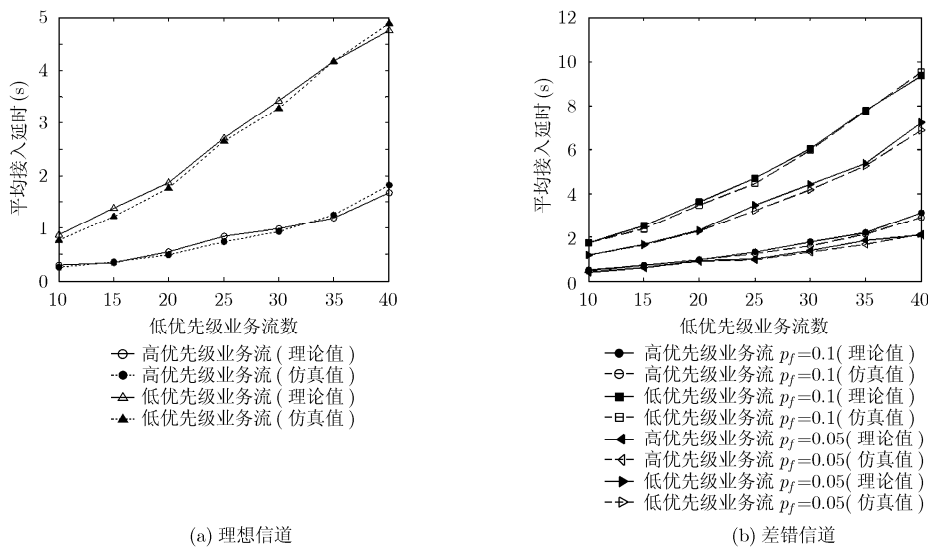


图 2 不同信道条件下的两业务接入延时性能

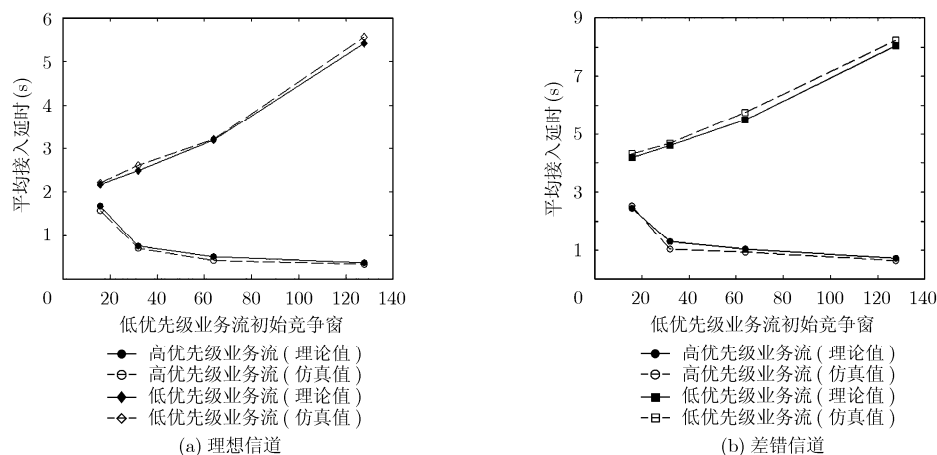


图3 两业务接入延时随初始竞争窗变化的性能曲线

参 考 文 献

- [1] IEEE 802.11e/D5.0, Draft supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems LAN/MAN specific requirements-Part II: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: MAC enhancements for quality of service (QoS) [S], Aug, 2003.
- [2] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 1265-1275.
- [3] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, and Vitsas V. IEEE 802.11 packet delay — A finite retry limit analysis[C]. IEEE GLOBECOM, San Francisco, USA, Dec, 2003: 950-954.
- [4] Li Y, Long K P, Zhao W L, and Wang C G. Analyzing the channel access delay of IEEE 802.11 DCF[C]. IEEE GLOBECOM, Saint Louis, USA, Nov, 2005: 2997-3001.
- [5] Lim J H, Yun J H, and Seo S W. Throughput model of IEEE 802.11e EDCA with consideration of delay bound constraint[C]. IEEE International Conference on Communications, Beijing, May, China, 2008: 235-240.
- [6] Fallah Y P, El-Housseini S, and Alnuweiri H. A generalized saturation throughput analysis for IEEE 802.11e contention-based MAC[J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 47(2): 235-245.
- [7] Inan I, Keceli F, and Ayanoglu E. Analysis of the 802.11e enhanced distributed channel access function[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(6): 1753-1764.
- [8] Huang C L and Liao W J. Throughput and delay performance of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) under saturation condition [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(1): 136-145.

程 远: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为无线网络的媒体接入技术、MAC 协议性能分析与优化设计。

张 源: 男, 1977 年生, 博士, 研究方向为无线网络技术。

高西奇: 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为空时无线通信理论与技术、宽带多载波传输与多址技术、现代信号处理在移动通信中的应用。