

# IEEE 802.11 DCF 在捕获效应下的饱和性能分析

蔡保国<sup>1,2</sup> 缪学宁<sup>2</sup> 彭开志<sup>1,2</sup> 王耀国<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨, 150001; 2. 武汉船舶通信研究所通信专业部, 武汉, 430079)

**摘要:**研究了捕获效应对分布式协调功能(Distributed coordination function, DCF)饱和性能的影响。通过捕获概率的推导以及信道状态与节点状态同步变化的证明,提出了一种改进的时隙分析模型。利用这一模型,分析了IEEE 802.11 DCF 在捕获效应下的饱和性能,导出了其归一化饱和吞吐量和平均接入时延的闭合表达式,并对饱和状态与平均接入时延之间的关系进行了阐释。理论分析与仿真结果表明,该时隙分析模型可有效提高IEEE 802.11 DCF 机制的饱和性能的理论估计精度。

**关键词:**捕获效应; 分布式协调功能; 时隙分析模型; 归一化饱和吞吐量; 平均接入时延

**中图分类号:** TP393.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)06-0824-06

## Saturation Performance Analysis of IEEE 802.11 DCF Under Capture Effect

Cai Baoguo<sup>1,2</sup>, Miao Xuening<sup>2</sup>, Peng Kaizhi<sup>1,2</sup>, Wang Yaoguo<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China;

2. Data Communication Department, Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan, 430079, China)

**Abstract:** The impact of capture effect on the saturation performance of distributed coordination function (DCF) is studied. On the basis of the inference of capture probability and the validation of the channel states and the node states synchronously transiting, an improved slotted analytical model is proposed. Making use of the proposed model, the saturation performance of IEEE 802.11 DCF under capture effect is analyzed, and the close-form expressions of its normalized saturation throughput and average access delay are presented. Furthermore, the relation between saturation state and average access delay is illustrated. Theoretical analysis and simulation results show that the slotted analytical model can efficiently improve the precision in theoretical estimate of saturation performance of IEEE 802.11 DCF mechanism.

**Key words:** capture effect; distributed coordination function(DCF); slotted analytical model; normalized saturation throughput; average access delay

分布式协调功能(Distributed coordination function, DCF)是IEEE 802.11 标准<sup>[1]</sup>的基本接入方案,其核心内容包括截断的二进制指数退避(Binary exponential backoff, BEB)算法和载波监听多址接入/冲突避免(Carrier sense multiple access/collision avoidance, CSMA/CA)机制两部分。

DCF 的饱和性能分析一直是近年来的研究热

点。Bianchi 在文献[2]中提出了饱和状态下节点退避过程的二维马尔可夫链分析模型,目前该模型已成为研究IEEE 802.11 MAC 协议及其各种改进协议性能的常用方法。不过,该模型假设帧可被无限次重发,这与IEEE 802.11 标准明显不符;针对这一不足,文献[3]建立了有限重传条件下节点退避过程的二维马氏链模型,并用于对数据帧的平均服

务时延、丢帧率以及平均丢弃时间等进行了分析;文献[4]考虑到节点当前阶段接入信道的概率与前一阶段信道状态之间的关系,提出一种包含前一阶段信道状态在内的三维马氏链分析模型,改进了节点状态和信道状态的概率计算方法,有效提升了DCF饱和吞吐量的理论分析精度;Bianchi等人在文献[5]中借助基本的条件概率推导,提出一种新的不依赖于马尔可夫链模型、可适应各种不同退避机制的 $\tau$ 、 $p$ 计算方法,并通过修正文献[2]中时隙模型存在的退避冻结处理缺陷<sup>[6]</sup>,重新计算了归一化饱和吞吐量并对数据帧的平均接入时延进行了分析;文献[7]重点研究了信道从忙态转变为空闲时不同节点接入信道概率的不均匀性问题。针对DCF中存在的退避冻结以及异常时隙现象,提出一种基于退避减少思想的时隙模型,实现了所有竞争节点在退避意义上的同步,进一步提高了DCF饱和性能分析的质量;阮加勇等人在文献[2]基础上提出一种平均回退窗计算方法并用于分析DCF的平均接入时延<sup>[8]</sup>;文献[9]将节点的多次退避过程描述成一个排队网络模型,它能够直观地反映出DCF的退避冻结、退避重传等特点。

捕获效应<sup>[10]</sup>是无线通信中的常见现象,它使得节点在信道发生碰撞时仍有可能保持正常通信,可在一定程度上提升网络性能。上述文献[2~9]采用不同时隙分析模型对IEEE 802.11 DCF的饱和性能进行了研究,但均忽略了捕获效应的影响;尽管文献[11,12]考虑了捕获效应对DCF性能的影响,但其研究重点主要集中在对捕获效应的影响例如捕获概率的分析上,缺乏对DCF理论分析模型的必要研究,其所采用的时隙分析模型略显粗糙。

结合捕获效应的简化分析以及信道状态与节点状态变化的同步性证明,本文提出一种基于捕获概率且能够实现节点同步退避的时隙分析模型。借助这一模型,对单跳无线局域网(Wireless local area network, WLAN)环境下的DCF饱和性能进行了理论分析,并在最后通过数值计算与计算机仿真进行了验证。

## 1 IEEE 802.11 DCF 捕获概率模型

由于请求发送/允许发送(Request to send/clear to send, RTS/CTS)接入模式应用较为普遍,本文仅对其展开研究。为了便于比较,下文沿用文献[3]的假设条件,即信道无传输差错,且不考虑隐藏终端问题。设节点数目为 $n$ ,且每个节点均处于饱和状态,即任一节点随时都有数据帧需要发送。

令任一节点在任一时隙内的传输概率为 $\tau$ ,任一节点在传输过程中发生碰撞的条件概率为 $p$ 。将接收节点的捕获概率记为 $P_{\text{capture}}$ 。

### 1.1 捕获概率分析

为了研究捕获效应对DCF饱和性能的影响,首先必须确定碰撞时接收节点的捕获概率 $P_{\text{capture}}$ 。为了简化分析,不考虑同时存在多个捕获的情形。易知 $k(k \in [0, n])$ 个节点同时发送的概率为

$$P_k = C_n^k \tau^k (1 - \tau)^{n-k} \quad (1)$$

由文献[2]可知,一般情况下 $\tau \ll 1$ 且 $n\tau < 1$ ,故 $\frac{P_{k+1}}{P_k} \approx \frac{(n-k)\tau}{k+1} < \frac{1}{k+1}$ ,若不考虑3个及3个以上节点同时发送的情形,则全连通网络条件下捕获效应出现的条件为<sup>[13]</sup>

$$R_i \geq 1.78d \quad (2)$$

式中: $R_i(R_i \in [0, R_{\text{tr}}])$ 表示干扰距离(距接收节点较远的发送节点到其的距离); $d(d \in [0, R_{\text{tr}}])$ 表示接收距离(距接收节点较近的发送节点到其的距离); $R_{\text{tr}}$ 表示无干扰情况下的最大接收距离。如图1所示,图中 $A$ 为接收节点, $B$ 为发送节点, $C$ 为干扰节点。不难发现,当干扰节点 $C$ 位于阴影区域时,捕获效应就会出现。

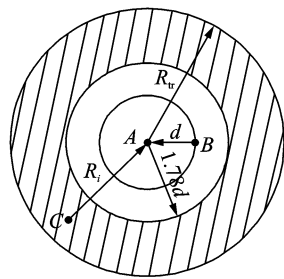


图1 捕获效应示例

假设发送节点在以接收节点为圆心、 $R_{\text{tr}}$ 为半径的圆形区域内均匀分布,则接收距离 $d$ 的概率密度函数为

$$f(d) = \frac{2d}{R_{\text{tr}}^2} \quad (3)$$

由 $R_i \leq R_{\text{tr}}$ 可得

$$d \leq \frac{R_{\text{tr}}}{1.78} \quad (4)$$

从而有

$$P_{\text{capture}} = \int_0^{\frac{R_{\text{tr}}}{1.78}} \frac{2x}{R_{\text{tr}}^2} \left[ 1 - \left( \frac{1.78x}{R_{\text{tr}}} \right)^2 \right] dx \approx 0.158 \quad (5)$$

### 1.2 IEEE 802.11 DCF 时隙分析模型

IEEE 802.11 DCF 采用截断二进制指数退避

算法,算法中的退避窗口  $CW_i(i \in [0, R])$  可表示如下

$$CW_i = \min(2^i CW_0, CW_{\max}) \tag{6}$$

式中:  $R$  表示最大重发次数;  $CW_0$  表示初始退避窗口大小;  $CW_{\max}$  表示最大退避窗口大小。

显然,共享信道只可能处于 3 种状态:空闲状态、成功状态和碰撞状态。当信道处于空闲状态时,所有节点均处于退避状态;当信道处于成功状态时,仅有单一节点参与发送,而其他节点均处于被动收听状态;当信道处于碰撞状态时,至少有两个节点同时处于发送状态,而其他节点也处于被动收听状态。此时,若考虑捕获效应,则节点发送/接收有可能成功。

在 RTS/CTS 接入模式下,节点碰撞只可能发生在 RTS 帧的传输阶段。由于 RTS 帧的接收时间很短,因此可以假设在接收过程中接收功率基本保持不变。又信道无传输差错,因此接收失败完全由碰撞产生,且接收到的 RTS 帧要么全对要么全错,不存在部分正确部分错误的情况。例如,不可能出现接收节点正确接收到 RTS 帧的物理层头部但其余部分接收错误的情形(此时接收节点需等待信道空闲  $EIFS = SIFS + DIFS + CTS$  时间后才能竞争信道,其中 EIFS 为扩展帧间间隔(Extended interframe space, EIFS), SIFS 为最短帧间间隔(Short interframe space, SIFS), DIFS 为分布式协调功能帧间间隔(DCF interframe space, DIFS), CTS 表示 CTS 帧(包括物理层头部)的传输时间。需要说明的是,在下文中用 RTS 表示 RTS 帧(包括物理层头部)的传输时间,其他与此类似。下面证明信道状态与节点状态变化的同步性。

**命题 1** 饱和状态下,IEEE 802.11 DCF 机制下的信道状态与节点状态是同步变化的。

**证明** 只需证明在各种信道状态下节点状态是同步变化的即可。图 2 给出了节点在不同信道状态下的时序图(除空闲状态外,对于每一种信道状

态,上方为发送节点的时序图,下方为接收节点的时序图)。

图中,  $\delta$  表示传播时延,  $\sigma$  表示时隙长度。  $CTS = PLCP\text{Preamble} + PLCP\text{Header} + CTS\text{Frame}$ , 其中 PLCP Preamble 和 PLCP Header 分别表示物理层(Physical layer, PHY)层头部中的前导序列和物理层汇聚协议(Physical layer convergence procedure, PLCP)头的传输时间,二者之和即为 PHY 层头部的传输时间, CTSFrame 表示传输原始 CTS 帧(不包括 PHY 头部)所需时间。 RTS、ACK 与 CTS 的结构类似,其中 ACK 表示传输确认帧(Acknowledgement, ACK)所需的时间;而 DATA 则表示包含了 MAC 头部和 PHY 头部在内的数据帧所需的传输时间。当信道处于空闲状态时,所有节点的状态显然是同步变化的。下面证明信道处于成功状态和碰撞状态时节点状态变化的同步性。

当信道处于成功状态时,收发节点都将在 RTS + CTS + DATA + ACK + 3SIFS + DIFS +  $4\delta$  时间后进入退避状态,不过二者的退避稍有区别。发送节点的退避计数器取值可能为 0,而接收节点的退避计数器值是冻结值,其不小于 1。因此,发送节点可能连续发送数据,直到随机退避计数器取值不为 0 为止。在这一过程中,发送节点与接收节点的状态变化始终保持同步。

当信道处于碰撞状态时,发送节点在发出 RTS 帧后将等待  $CTS\_Timeout = SIFS + CTS + \sigma$  时间以接收相应的 CTS 帧,而其它节点则处于被动收听状态。若某个接收节点成功接收到发送给它的 RTS 帧,则接下来的处理与信道处于成功状态相同(碰撞情形 1);若相应的接收节点未能正确接收到 RTS 帧,则其在信道空闲 DIFS 时间后即可开始竞争信道(碰撞情形 2)。显然,在碰撞情形 1 中,所有节点的状态变化都是同步的。在碰撞情形 2 中,接收节点在等待 RTS + DIFS +  $\delta$  时间后将解除冻结继续退避,而发送节点需要再等待 SIFS + CTS +  $\sigma$  时间才能开始新的退避过程。可见,接收节点等待 RTS +  $\sigma$  + DIFS +  $\delta$  时间后可能开始发送 RTS 帧,由于 SIFS + CTS < RTS,因此发送节点与接收节点状态仍将趋向同步。证毕。

结合命题 1 的证明,可建立如下的时隙分析模型

$$\begin{cases} T_s = T_1 + B_0 T_1 + B_0^2 T_1 + \dots + \sigma = \frac{T_1}{1 - B_0} + \sigma \\ T_c = \begin{cases} T_s & \text{碰撞情形 1} \\ RTS + DIFS + \delta + \sigma & \text{碰撞情形 2} \end{cases} \\ T_{free} = \sigma \end{cases}$$



图 2 节点在不同信道状态下的时序图

式中:  $T_1 = \text{RTS} + \text{CTS} + \text{DATA} + \text{ACK} + 3\text{SIFS} + \text{DIFS} + 4\delta$  表示一次完整传输所需的时间;  $B_0 = \frac{1}{CW_0}$ ;  $T_s$  表示成功时隙;  $T_c$  表示碰撞时隙;  $T_{\text{free}}$  表示空闲时隙。不难发现,该时隙模型具有一个显著特征:即每个时隙结束时退避计数器值将减1。

参照文献[5]的推导过程,结合(7)式可以得出

$$\begin{cases} \tau = \frac{1}{1 + \frac{1 - p(1 - P_{\text{capture}})}{1 - p^{R+1}(1 - P_{\text{capture}})^{R+1}} \sum_{i=0}^R p^i (1 - P_{\text{capture}})^i E[b_i]} \\ p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $b_i (i \in [0, R])$  表示第  $i$  次退避时退避计数器的取值,它在  $[0, CW_i - 1]$  内服从均匀分布;  $E[b_i]$  为其均值。上述方程组表征了一个以节点数目  $n$  为变量的非线性系统,容易证明其有唯一解,具体可用数值计算方法进行求解。

## 2 IEEE 802.11 DCF 饱和性能分析

### 2.1 饱和吞吐量分析

利用前一节建立的时隙模型,可以推导出 IEEE 802.11 DCF 机制的饱和吞吐量。考虑捕获效应时,归一化的饱和吞吐量  $S$  可表示为

$$S = \frac{[P_{\text{tr}} P_s + P_{\text{tr}} (1 - P_s) P_{\text{capture}}] E[P]}{(1 - P_{\text{tr}}) \sigma + P_{\text{tr}} P_s T_s + P_{\text{tr}} (1 - P_s) T_c} \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{tr}}$  表示在任一时隙信道上至少有一个节点传输的概率;  $P_s$  表示信道上任一传输无碰撞的概率;  $E[P]$  表示在一个成功时隙  $T_s$  内传输全部有效载荷所占用的时间。不难发现,上式中的分母正好等于前面时隙分析模型的期望值。  $P_{\text{tr}}$ 、 $P_s$  的表达式可参见文献[2],而  $E[P]$  可表示为

$$E[P] = \text{PAYLOAD} + \sum_{i=1}^{\infty} B_0^i \text{PAYLOAD} = \frac{\text{PAYLOAD}}{1 - B_0} \quad (10)$$

式中:  $\text{PAYLOAD}$  表示传输单个数据帧中的有效载荷所需时间,其在数值上等于  $\text{DATA}$  减去  $\text{MAC}$  头部和  $\text{PHY}$  头部的传输时间之和。结合式(7),可将  $T_c$  表示如下

$$T_c = \frac{P_{\text{capture}} T_1}{1 - B_0} + (1 - P_{\text{capture}}) \cdot (\text{RTS} + \text{DIFS} + \delta) + \sigma \quad (11)$$

将式(5,7,10,11)代入式(9)中即可求出归一化的饱和吞吐量  $S$ 。

### 2.2 平均接入时延分析

平均接入时延是指数据帧从进入  $\text{MAC}$  层本地缓存到成功发送出去所需要的时间。若不考虑被丢弃的数据帧,则数据帧的平均接入时延  $D$  可表示为

$$D = \frac{E[n] \text{PAYLOAD}}{BS} \quad (12)$$

式中:  $E[n]$  表示  $n$  个节点的  $\text{MAC}$  层本地缓存数据帧中被成功发送的个数;  $B$  表示信道带宽或数据传输速率;  $S$  为归一化饱和吞吐量。根据  $E[n]$  的定义不难得出

$$E[n] = n[1 - P_{\text{drop}}] \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{drop}}$  表示节点丢包概率。由于节点的碰撞只可能发生在  $\text{RTS}$  帧的传输过程中,故数据帧被丢弃的唯一原因是  $\text{RTS}$  达到最大重传次数后仍传输失败。结合文献[5]中的式(14),可得捕获效应下的丢包概率  $P_{\text{drop}}$  为

$$P_{\text{drop}} = \tau \frac{p^{R+1} (1 - P_{\text{capture}})^{R+1}}{\sum_{i=0}^R p^i (1 - P_{\text{capture}})^i} \sum_{j=0}^R (1 + E[b_j]) \quad (14)$$

将式(13,14)代入式(12)即可求得  $D$ 。

### 2.3 饱和状态与平均接入时延的关系

需要指出的是,  $D$  不仅代表了饱和状态下数据帧的平均接入时延,还能反映饱和状态的实质。若设任一节点的数据帧到达时间间隔为  $t$ ,则只有在  $E(t) \leq D$  对所有节点都成立时,才能保证系统是饱和或趋向饱和的;若对于系统中的任一节点,都有  $E(t) > D$ ,则系统必定不能保持饱和状态;若系统中只有部分节点满足  $E(t) \leq D$ ,则系统也不是饱和的。因此,  $D$  是使系统维持饱和状态的数据帧平均到达时间间隔的最大值。

## 3 数值计算与仿真

为了检验理论分析精度,利用 QualNet<sup>[14]</sup> 平台进行仿真并将仿真结果与数值计算结果进行对比。仿真参数设置如下:仿真场景大小为  $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ ,所有节点随机分布于其中,节点通信半径约为  $450 \text{ m}$ 。随机选择一个节点作为目的节点,其余节点均向其发送固定比特率(Constant bit rate, CBR)数据包且始终处于饱和状态。仿真时间设为  $300 \text{ s}$ ,数据传输速率为  $1 \text{ Mbps}$ ,CBR 数据包大小为  $1024 \text{ B}$ 。其他重要参数按照文献[1]中基于直接序列扩频(Direct sequence spread spectrum, DSSS)物理层的DCF协议进行配置,具体如表1所

示。本节研究了不同节点数目条件下 DCF 的归一化饱和吞吐量和数据帧平均接入时延性能,重点分析了 DCF 性能的两种理论分析值(考虑捕获效应与不考虑捕获效应)与仿真结果之间的差异,其中所有仿真结果均为 10 次随机实验的平均值。

表 1 DCF 主要参数配置

参数名称	参数值
MAC 头部/bit	224
PHY 头部/bit	192
RTS 帧/bit	160+192
CTS/ACK 帧/bit	112+192
SIFS/ $\mu\text{s}$	10
DIFS/ $\mu\text{s}$	50
时隙 $\sigma/\mu\text{s}$	20
传播时延 $\delta/\mu\text{s}$	1
最小退避窗口 $CW_0$	32
最大退避窗口 $CW_{\text{max}}$	1 024
RTS 最大重传次数 $R$	6

表 2 分别列出了不同节点数目下考虑与不考虑捕获效应时  $\tau$ 、 $\rho$  的理论估算值(括号内为不考虑捕获效应时的结果)。可以看出,无论考虑捕获效应与否,随着节点数目的增加, $\tau$  值单调递减,而  $\rho$  值单调递增,这与节点密度增大导致竞争和碰撞加剧的实际相符。但同等条件下,考虑捕获效应比不考虑捕获效应时的  $\tau$  值偏大而  $\rho$  值偏小,这是因为捕获效应使得节点传输失败的概率有所降低,同时也在一定程度上提高了节点传输概率。

表 2 不同节点数目下的  $\tau$ 、 $\rho$  值

$n$	$\tau$	$\rho$
5	0.050(0.048)	0.155(0.178)
10	0.040(0.037)	0.260(0.290)
20	0.030(0.027)	0.368(0.402)
30	0.024(0.021)	0.429(0.466)
50	0.019(0.016)	0.505(0.546)
70	0.015(0.013)	0.555(0.600)
100	0.013(0.011)	0.608(0.659)

图 3 是归一化的饱和吞吐量随节点数目的变化曲线。图中分别给出了考虑和不考虑捕获效应时的理论估计值以及仿真值。从图中可以看出,随着节点数目的增加,3 条曲线均呈下降趋势,这是由于节点数目增加导致碰撞加剧所造成。此外,考虑捕获效应时的理论估计曲线与仿真曲线更加接近,这是因为在捕获效应下,尽管信道发生碰撞,但仍有一部分数据帧能被成功接收。同时,考虑捕获效应时的理论估计值略低于仿真值,这在一定程度上

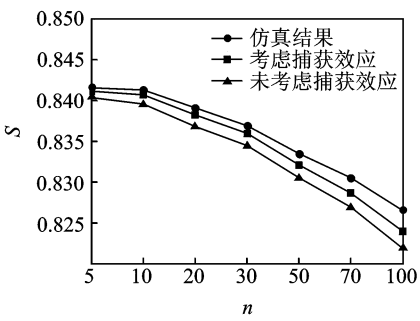


图 3 归一化饱和吞吐量性能

与忽略 3 个及 3 个以上节点同时发送的情形导致捕获概率估计值偏低有关。

图 4 给出了数据帧平均接入时延随节点数目的变化情况。随着节点数目的递增,3 条曲线均呈上升趋势,这是由于节点数目增加导致数据帧平均等待时间延长的缘故。考虑捕获效应时,饱和吞吐量的理论估计值比忽略捕获效应时的理论估计值大,即单位时间内传输成功的数据帧数目更多,这必然导致其平均接入时延变大,图中曲线印证了这一结论,考虑捕获效应时的数据帧平均接入时延估计值更加接近于仿真结果。同理,由于仿真得到的饱和吞吐量值最大,因此其数据帧平均接入时延曲线也稍高于两理论估计曲线。

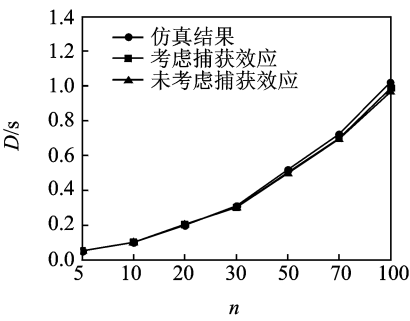


图 4 数据帧平均接入时延性能

4 结束语

本文针对捕获效应对 IEEE 802.11 DCF 性能的影响,结合捕获概率的近似估算以及信道状态与节点状态变化的同步性证明,提出一种基于捕获概率的时隙分析模型并用于对 IEEE 802.11 DCF 的归一化饱和吞吐量及数据帧平均接入时延性能进行了理论分析。此外,还阐述了饱和状态与平均接入时延之间的关系。通过数值计算与仿真实验的对比表明,该时隙分析模型可进一步提高 IEEE 802.11 DCF 饱和性能的理论分析精度。

参考文献:

[1] IEEE 802.11 Working Group. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. New York: IEEE, 2007.

[2] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.

[3] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. IEEE 802.11 packet delay-a finite retry limit analysis [C]//Proceedings of the IEEE GLOBECOM. San Francisco: IEEE Press, 2003:950-954.

[4] Foh C H, Tantra J W. Comments on IEEE 802.11 saturation throughput analysis with freezing of back-off counters [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(2):130-132.

[5] Bianchi G, Tinnirello I. Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8):765-767.

[6] Ziouva E, Antonakopoulos T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis [J]. Computer Communications, 2002, 25(2):313-321.

[7] Tinnirello I, Bianchi G. Refinements on IEEE 802.11 distributed coordination function modeling approaches [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3):1055-1067.

[8] 阮加勇,黄本雄,张帆. IEEE 802.11 DCF 延迟性能分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(4):27-29.

Ruan Jiayong, Huang Benxiong, Zhang Fan. Analysis of delay of IEEE 802.11 DCF in wireless networks[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Nature Science Edition, 2006, 34(4):27-29.

[9] Choi J, Yoo J, Kim C K. A novel performance analysis model for an IEEE 802.11 wireless LAN[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(5):335-337.

[10] Zorzi M, Rao R R. Capture and retransmission control in mobile radio[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(8):1289-1298.

[11] Kim J H, Lee J K. Capture effects of wireless CSMA/CA protocols in Rayleigh and shadow fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(4):1277-1286.

[12] Zoran H, Boris S. Capture effect in IEEE 802.11 basic service area under influence of Rayleigh fading and near/far effect[C]//Proceedings of IEEE PIMRC. Lisbon: IEEE Press, 2002:172-176.

[13] Xu K, Gerla M, Bae S. How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks [C]//Proceedings of the IEEE GLOBECOM. Taipei: IEEE Press, 2002:72-76.

[14] S. N. T. Inc. QualNet 4.5 programmer's guide [EB/OL]. [2011-10-10]. <http://www.qualnet.com/documentation>.