

# 基于 EDCA 的无线网络服务质量研究综述

管懿轩<sup>1</sup> 李晓娟<sup>1,2\*</sup> 关永<sup>1,3</sup> 宋家东<sup>4</sup> 王瑞<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>(首都师范大学信息工程学院 北京 100048)

<sup>2</sup>(高可靠嵌入式系统北京市工程研究中心 北京 100048)

<sup>3</sup>(北京成像理论与技术高精尖创新中心 北京 100048)

<sup>4</sup>(机械工业信息中心 北京 100823)

<sup>5</sup>(轻型工业机器人与安全验证北京市重点实验室 北京 100048)

**摘要** 随着实时音频、视频等越来越多的新应用部署到无线网络上,针对应用特点,探索基于分布式的信道访问控制机制的无线网络 QoS,对确保无线网络应用具有重要意义。传统 EDCA 机制是 IEEE 802.11e 协议在 DCF 机制基础上的服务质量支持扩展,但其静态参数无法适用于复杂多变的网络环境。为满足实际应用中的服务质量需求,对 EDCA 机制特点进行研究,分析基于参数集的发送机会、竞争窗口以及虚拟碰撞机制的优势和局限性,介绍具有代表性的相关研究成果,总结提高网络性能的改进算法,对未来 EDCA 机制的发展难点和研究方向进行展望。

**关键词** 服务质量 网络性能 IEEE 802.11e 协议 静态参数 吞吐量

**中图分类号** TP393

**文献标志码** A

**DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2022.12.002

## REVIEW OF QUALITY OF SERVICE IN WIRELESS NETWORK BASED ON EDCA MECHANISM

Zan Yixuan<sup>1</sup> Li Xiaojuan<sup>1,2\*</sup> Guan Yong<sup>1,3</sup> Song Jiadong<sup>4</sup> Wang Rui<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>(College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

<sup>2</sup>(High Reliability Embedded System Beijing Engineering Research Center, Beijing 100048, China)

<sup>3</sup>(Beijing Imaging Theory and Technology High-Tech Innovation Center, Beijing 100048, China)

<sup>4</sup>(Machinery Industry Information Center, Beijing 100823, China)

<sup>5</sup>(Beijing Key Laboratory of Light Industrial Robots and Safety Verification, Beijing 100048, China)

**Abstract** As more and more new applications such as real-time audio and video are deployed to wireless networks, exploring wireless network QoS based on distributed channel access control mechanism is of great significance to ensure wireless network applications according to the application characteristics. The traditional EDCA mechanism is an extension of IEEE 802.11e protocol based on DCF mechanism, but its static parameters cannot be applied to the complex and changeable network environment. In order to meet the QoS requirements in practical applications, this paper studied the characteristics of EDCA mechanism, analyzed the advantages and limitations of sending opportunities, competitive windows and virtual collision mechanism based on parameter sets, introduced representative related research results, summarized improved algorithms to improve network performance, and looked forward to the development difficulties and research directions of EDCA mechanism in the future.

**Keywords** Quality of service Network performance IEEE 802.11e Static parameters Throughput

收稿日期:2020-05-12。国家重点研发计划项目(2017YFB1301104);首都师范大学交叉科学院科技创新服务能力建设-基本科研业务费(科研类)项目(025195305000)。管懿轩,硕士生,主研领域:形式化验证。李晓娟,教授。关永,教授。宋家东,工程师。王瑞,教授。

## 0 引言

无线网络成为全球通信必不可少的组成部分,其广泛应用和快速发展使得用户更加关注网络的协议设计以及性能体现。IEEE 于 1997 年颁布 802.11 协议,定义了开放式系统互联模型的物理层和介质访问控制层(MAC),采用带有冲突避免的载波监听多路访问算法(CSMA/CA)和二进制退避访问控制,随后分别颁布 802.11b 和 802.11a 两个版本<sup>[1]</sup>。但传统 802.11 协议对网络数据只提供尽力而为服务,且无线网络与有线网络相比信道速率较低,在数据发送过程中具有较高出错率等性质,使得无线局域网难以保证音视频等多媒体业务的服务质量(Quality of Service, QoS)。

为保障不同业务对网络性能的 QoS 需求,IEEE 颁布了 802.11e 协议,提出混合协调功能机制(Hybrid Coordination Function, HCF),并在此基础上实现了基于竞争的增强分布式信道访问机制(Enhanced Distributed Channel Access, EDCA)和基于无竞争的混合控制信道访问机制(HCF Controlled Channel Access, HCCA)<sup>[2]</sup>。HCCA 较 EDCA 相比更为复杂,属于集中式控制方法,具有可扩展性差等缺点。EDCA 属于分布式控制方法,在网络健壮性等方面体现良好,增强了 MAC 级 QoS 保障,对不同业务类型提供了优先级区分的信道接入传输服务<sup>[3]</sup>,因此分布式 EDCA 机制成功应用于多领域并发挥了重要作用。国内外学者大都基于 EDCA 进行研究,提出了多种改进方案和服务质量保证策略。

本文旨在分析基于 EDCA 的 QoS 实现工作机制及其相关算法模型,从功能和特性两个维度综述 EDCA 可行的优化设计,总结当前研究存在的优缺点,对提高网络性能的不同角度文献进行归类分析,准确把握该领域最新研究进展,对未来发展方向和研究热点进行总结与展望。

## 1 信道访问控制机制

### 1.1 分布式协调控制机制

IEEE 802.11 协议定义了两种媒体访问控制机制,其中一种为基于竞争的分布式协调控制机制(Distributed Coordination Function, DCF)<sup>[4]</sup>。节点发送数据前首先监听信道,若空闲且等待一个分布式帧间间隔

(Distributed Inter-frame Spacing, DIFS)后仍空闲,则节点发送数据帧,否则等待忙状态结束后启动退避机制。DCF 定义了基本模式和 RTS/CTS<sup>[5]</sup>两种数据传输模式,为减小节点竞争产生碰撞的概率,采用二进制指数退避算法<sup>[6]</sup>,当节点进入退避过程时启动退避计数器,并在区间 $[0, CW]$ 上随机选取一个整数作为其初始值,  $CW$  是动态变化的竞争窗口值,范围定义在最小竞争窗口( $CW_{min}$ )和最大竞争窗口( $CW_{max}$ )之间。退避计数器在每经过一个空闲时隙后减 1,当减为 0 时节点发送数据帧<sup>[7]</sup>。若有两个或两个以上计数器同时减为 0 且在发送数据后产生碰撞,此时节点的竞争窗口值将更新如式(1)所示,随后退避计数器的值重新初始化。

$$CW_{new} = 2 \times (CW_{old} + 1) - 1 \quad (1)$$

### 1.2 增强分布式信道访问机制

EDCA 对 CSMA/CA 算法进行拓展,提供了区分业务方式的参数化 QoS 保证<sup>[8]</sup>,在保留传统分布式信道竞争的情况下,定义了 8 种业务类别(Traffic Category, TC)和 4 种基于 IEEE 802.1D 的访问类别(Access Category, AC)<sup>[9]</sup>,其优先级顺序分别是音频(AC\_VO)、视频(AC\_VI)、尽力而为服务流(AC\_BE)和背景流(AC\_BK),且分别对应不同的仲裁帧间间隔(Arbitration Inter-Frame Space, AIFS)<sup>[10]</sup>。8 种 TC 分别映射至 4 种 AC 以接入无线媒体,为各业务类型提供不同的业务等级。EDCA 业务流分类如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 EDCA 业务流分类

优先级	UP	接入类别	描述
低 ↓ 高	1	AC_BK	背景流
	2	AC_BK	背景流
	0	AC_BE	尽力而为服务流
	3	AC_BE	尽力而为服务流
	4	AC_VI	视频
	5	AC_VI	视频
	6	AC_VO	音频
	7	AC_VO	音频

EDCA 机制为访问类别设置了四种参数: $CW_{min}[AC]$ 、 $CW_{max}[AC]$ 、AIFS、发送机会限制(TXOP limit)。分别决定了最小最大竞争窗口值、延迟接入时间和业务可连续占用信道的的时间限制,利用这四种参数达到了支持基于优先级的 QoS 目的<sup>[12]</sup>,其基本访问机制如图 1 所示。

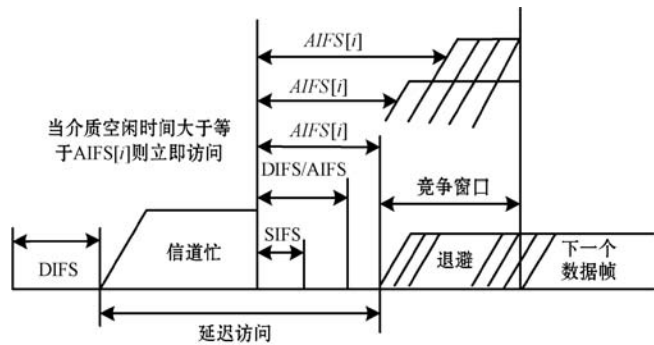


图 1 IEEE 802.11e EDCA 基本访问机制

(1) 竞争窗口 ( $CW_{min}$ 、 $CW_{max}$ )。竞争窗口值决定数据帧的退避时间,当节点等待了一段 AIFS 后,退避计数器将随机设置为  $[1, CW + 1]$  区间的任意一个整数<sup>[13]</sup>。节点首次发送数据帧时竞争窗口值为  $CW_{min}$ ,当发送失败导致数据重传时,窗口值变为原来的两倍,直至等于  $CW_{max}$  则不再增大,且重传达到最大次数后将丢弃该帧。

(2) 仲裁帧间间隔(AIFS)。IEEE 802.11 协议规定,所有节点必须在持续检测信道空闲一段指定的时间后才能发送数据帧,这段时间称为帧间间隔(Inter-Frame Space,IFS)。为支持 QoS 保证,802.11e 协议根据不同业务类型定义了不同 AIFS,且高优先级业务的 AIFS 小于低优先级业务,其计算公式如式(2)所示<sup>[14]</sup>。

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN \times aSlotTime \quad (2)$$

信道空闲一段 AIFS 后业务发送数据帧,具有较小 AIFS 的高优先级业务提前接入信道,若未收到确认帧或发生碰撞则认为发送失败,信道忙时退避计数器停止计数,直至再次空闲 AIFS 后重新开始,该过程如此重复直至发送成功或达到重传限制<sup>[15]</sup>。系统根据业务类型分别设置接入时延和退避窗口值,使队列从开始退避等待发送数据到成功传输的历时和产生碰撞的概率不同,实现了良好的区分服务。

(3) 发送机会(TXOP)。EDCA 机制为避免过多信道竞争,提出了一种无竞争突发模式,若站点获得介质访问权限且不止一组数据帧等待发送,则在 TXOP limit 之内站点可独自占用信道连续发送多个数据帧,无须再次竞争信道<sup>[16]</sup>,且每次发送只需等待 SIFS 而不是更长的 AIFS。数据帧在 TXOP 间隔内发送完毕或间隔结束,信道再次进入竞争状态,该模式不仅提高了系统吞吐量和信道利用率,也降低了发生碰撞的概率。

TXOP 结束连发数据帧具有三个条件:(1) 在发送数据帧的过程中产生碰撞或出现其他错误;(2) 获得发送机会的 AC 缓存队列中数据帧发送完毕;(3) 剩

余的 TXOP limit 不够传输一个数据帧。

TXOP limit 是由支持 QoS 的接入点在信标帧的 EDCA 参数集中发布,其传输过程如图 2 所示。

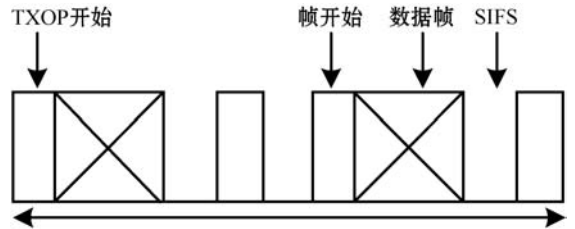


图 2 TXOP 传输过程

### 1.3 DCF 与 EDCA 对比分析

DCF 机制将时间域的划分与帧格式紧密联系在一起,确保某个时刻只有一个站点发送数据,其优点是能够保证各站点之间进行公平竞争。但随着具有 QoS 功能站点数目的增多,数据接入信道之后产生频繁碰撞且发送率降低,因此对实时信息等业务无法提供正常的 QoS 保障。EDCA 机制在 DCF 的基础上实现了服务质量支持扩展,提出了访问类别和四种参数标准,满足了各类业务的不同服务需求。两种机制的具体对比分析如表 2 所示。

表 2 DCF 与 EDCA 对比分析

机制比较		DCF 机制	EDCA 机制
参数选择	退避计数器取值范围	$[0, CW]$	$[1, CW + 1]$
	帧间间隔	DIFS	AIFS
	竞争窗口大小设置	$CW_{min} \leq CW \leq CW_{max}$	不同问类别具有各自 CW 值
机制特点	是否提供 QoS 保证	否	是
	是否提供区分服务	否	是
	采用协议	CSMA/CA 算法	CSMA/CA 拓展
	发送机会	站点发送一个数据帧,发送成功后重新竞争信道	在 TXOP limit 内可连续发送多个数据帧
	网络状况	保持稳定的网络环境	提高了网络性能
应用模式	服务模式	对网络数据提供尽力而为的服务	对不同业务类型提供特殊的服务需求
	应用范围	适用对性能要求不高的网络	适用对性能要求较高且需保证 QoS 的网络
相同点	退避方式	二进制指数退避方式	
	接入特点	基于竞争的接入方式	
	重传机制	当 $CW = CW_{max}$ 时, $CW$ 不再增大,且重传达到最大次数后丢弃数据帧	

## 2 EDCA 机制分析

接入控制机制能够保证新业务不会降低已接入业务的服务质量,且能够最大程度利用网络资源。EDCA 提供了区分业务的 QoS 保证,但对于接入信道方面只考虑部分因素,当网络规模扩大或网络拓扑处于频繁变化时,该机制设置的静态参数无法根据实际状况动态调整使系统性能实现最优。因此,参数自适应变化成为提高网络性能且保证服务质量得到最大体现的挑战性问题。

### 2.1 TXOP 算法研究

站点发送 MAC 服务数据单元(MAC Service Data Unit, MSDU)检测信道状态,DCF 机制只能发送一个 MSDU,成功传输后便失去信道使用权,若继续发送则必须重新竞争<sup>[17]</sup>。TXOP 算法的特点是站点获取信道使用权后可无竞争地传输同一业务中的多个数据帧,站点中其他业务存在待发数据也无法占用所获得的发送机会,只能等待 TXOP limit 结束后站点退出信道进行下一轮竞争。

与 DCF 中由物理层决定的固定参数不同,EDCA 通过管理实体和支持 QoS 的接入点分配参数。高优先级的访问类别具有较小 AIFS 和 CW[AC],因而随机选择的时隙值较小,获得连发数据帧的机会变大<sup>[18]</sup>,但低优先级 AC\_BE 和 AC\_BK 的 TXOP 值为 0,只能传输请求发送/允许发送帧和普通数据帧,使其更晚进入退避状态,造成信道访问概率减小。EDCA 参数具有各自优势,竞争窗口值的确定给各优先级业务提供不同的接入时延,AIFS 参数为业务流提供良好的区分服务,但它们并不能降低数据在高负载网络中频繁产生碰撞的概率。而 TXOP 算法的连发机制减少了各站点竞争信道的次数并利用一次竞争连续发送多帧,一定程度上改善了网络整体性能。

但随着网络负载加重,固定的 TXOP limit 难以适应网络变化,当缓存队列中数据较多无法全部发送时须等待下一次发送机会,极易造成数据分组丢失等情况,且无线网络较有线网络相比更易发生难以预知的错误,若无法提供一种合理有效地接入控制机制,不仅难以保证新接入业务的服务质量,还会严重影响已有的网络性能。因此改进 TXOP 算法是 EDCA 机制的一个重要研究方向。

### 2.2 基于竞争窗口的动态退避问题

接入机制表现为根据不同优先级业务的服务质量

需求定义 EDCA 参数,使业务在竞争信道使用权时具有各自优势,其经典参数设置如表 3 所示<sup>[19]</sup>。但对于网络性能而言,这些优势往往是以损害低优先级业务为代价,而动态改变竞争窗口可最大限度地避免此类问题产生,现有的 QoS 控制方法主要是改进退避算法<sup>[20]</sup>。

表 3 EDCA 经典参数设置

参数	AC_VO	AC_VI	AC_BE	AC_BK
$CW_{min}$	3	7	15	15
$CW_{max}$	7	15	1 023	1 023
AIFSN	2	2	3	7

合理地定义竞争窗口值有利于提高网络质量,若  $CW_{min}$  取值较小,当访问类别数量增多,信道竞争就越激烈,碰撞概率也逐渐变大;若  $CW_{min}$  取值较大,当网络负载较轻时会产生不必要的延时,造成信道资源浪费和利用率下降。EDCA 机制规定各优先级业务的竞争窗口值只能以  $CW_{min}$  开始并以二进制退避的方式增大,这意味着一个站点要经过无数次碰撞才能获得发送机会,最终无法对实时多媒体业务提供 QoS 保障。为进一步提高网络质量,研究人员开始提出动态调整竞争窗口的改进算法。

### 2.3 虚拟碰撞及其管理机制

拥有 4 个退避实例的节点根据 802.11e 定义的 8 个优先级分别对应 4 种接入类别,若退避实例中有多个节点要求在同一时刻发送分组,则等级最高的退避实例获得信道使用权,其余分组按发生了一次冲突处理,这种机制称为虚拟碰撞<sup>[21]</sup>,属于节点内部竞争机制,目的是减少发生在节点间的真实碰撞。当节点内部同时发送多个队列产生虚拟竞争,此时调度器选择高优先级队列发送,若与节点外部队列的优先级相同才发生真正碰撞,因此,该机制极大地减小了真实碰撞的概率。

传统 STA(普通站点)利用 DCF 机制接入介质,而 QSTA(支持 QoS 站点)利用 EDCA 机制接入介质。对传统 STA 而言,发送分组时会与其他 STA 产生物理层的外部竞争,且可能产生碰撞。对 QSTA 而言,分组发送过程分为两个步骤:

(1) 同一 STA 内的访问类别竞争信道,属于内部竞争,可能产生碰撞,且退避过程与 DCF 机制类似。

(2) 在第一步中获得信道使用权的访问类别与网络中其他 QSTA 竞争信道,可能产生外部冲突。EDCA 机制竞争信道过程如图 3 所示<sup>[22]</sup>。

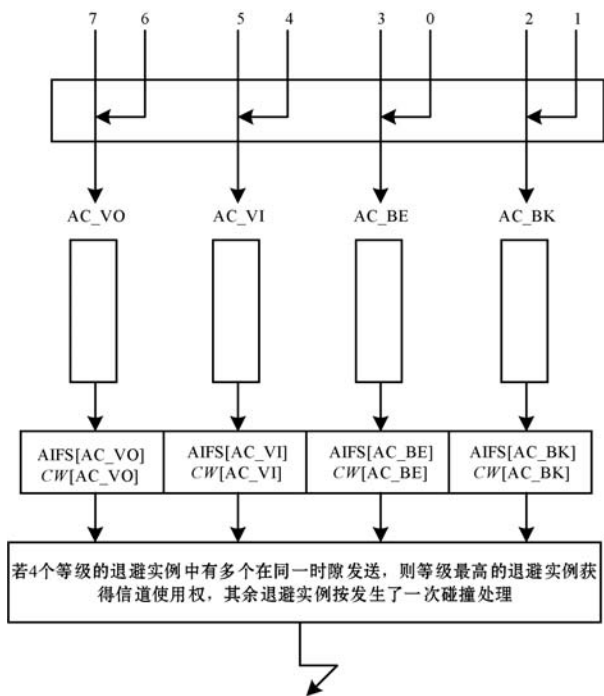


图 3 EDCA 机制竞争信道

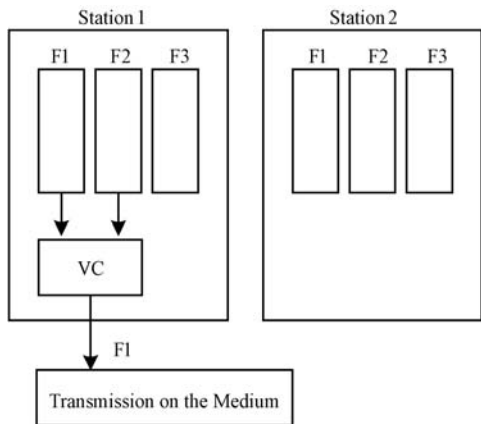
EDCA 定义了两种碰撞类型:一种是经典碰撞(真实碰撞),发生在两个(或多个)节点中的两种(或多种)访问类别同时尝试访问媒体时。另一种是内部冲突(虚拟碰撞),表现为某节点中不同队列的退避过程在同一时隙内结束,优先级最高的队列获得访问介质权,而其他队列竞争窗口加倍,类似于真实碰撞<sup>[23]</sup>。因此,碰撞管理机制有以下四种情况,如图 4 所示(不显示第四种情况):

(1) VC · RC: 虚拟碰撞(Virtual Collision, VC)在某个节点内产生,且在介质上发生真实碰撞(Real collision, RC),如图 4(a)所示。

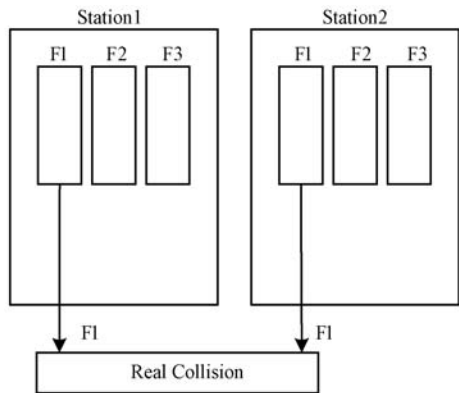
(2) VC · nRC: 虚拟碰撞在某节点内产生,但介质上没有发生真实碰撞,如图 4(b)所示。

(3) nVC · RC: 虚拟碰撞没有在某节点内产生,但在介质上发生真实碰撞,如图 4(c)所示。

(4) nVC · nRC: 不发生碰撞,节点中的队列成功接入介质。



(b) VC · nRC 情况



(c) nVC · RC 情况

图 4 碰撞管理机制情况

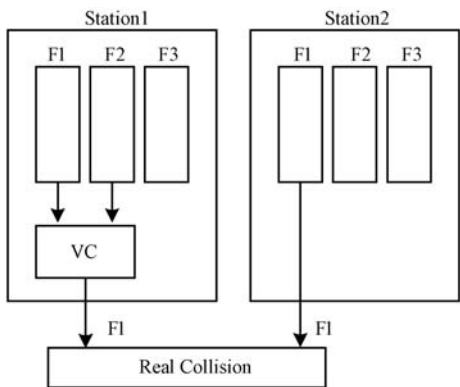
碰撞管理机制可以有效地保护和提高介质使用率,但该机制仍存在缺点。当某节点同时具有 AC\_VO 和 AC\_VI 两种访问类别且发生虚拟碰撞时,具有较高优先级的 AC\_VO 访问媒体,而 AC\_VI 竞争窗口加倍。同时这两种访问类别具有相同的 AIFS 和较低的竞争窗口范围,这将使它们之后频繁地产生虚拟碰撞。

### 3 EDCA 建模与参数改进

目前在分析 EDCA 性能的大量文献中,以研究网络饱和与非饱和情况为重点。网络随着节点数目的增加最终会处于饱和状态,不合理的参数设置和有限的网络资源都会在一定程度上影响网络整体效率。因此,无线网络性能的研究热点是饱和情况下的网络状态。

#### 3.1 马尔可夫理论模型

假设网络中存在  $n$  个站点,信道为非理想状态且不存在隐藏终端,可用一个二维的随机过程表示信道中业务的退避状态, $s(i, t)$  表示业务  $i$  在  $t$  时刻的退避阶数, $b(i, t)$  表示业务  $i$  在  $t$  时刻的退避计数器值,类似于文献[24]的模型,随机过程可表示为  $\{s(i, t) = j, b(i, t) = k\}$ 。其中退避阶数  $j$  的取值如式(3)所示, $m$



(a) VC · RC 情况

为最大重传次数,  $m_0$  为最大退避阶数。

$$j = \begin{cases} [0, m] & m < m_0 \\ [0, m_0] & m_0 < m \end{cases} \quad (3)$$

分析 EDCA 性能的 Markov 模型状态转移如图 5 所示。  $P_i$  为业务  $i$  在给定间隙发送数据帧的概率,  $P_{ic}$  为业务  $i$  发送数据帧产生碰撞的概率,  $P_s$  为某时刻节点成功发送数据帧的概率,  $P_{ib}$  为业务  $i$  退避时检测信道忙的概率。

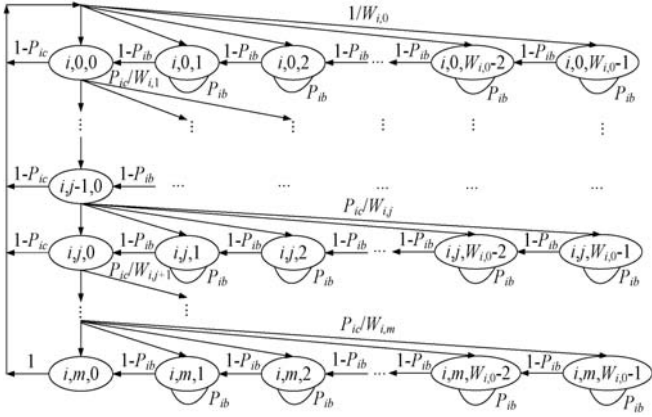


图 5 Markov 状态转移图

业务  $i$  退避时共有  $CW_{\min}$  种状态, EDCA 模型随机选取一种进入退避阶段。 Markov 模型表示某种特定状态为  $(i, j, k)$ , 若检测到信道忙则保持该状态不变。若检测到信道空闲, 则状态转移为  $(i, j, k-1)$ , 直到  $k$  减为 0 时发送数据帧。产生碰撞之后, EDCA 有概率地选择一种  $(i, j+1, k)$  状态重新退避。当状态转移为  $(i, m, 0)$  表示已达到最大重传次数, 则丢弃该数据帧。综合上述, 可将节点发包过程用 Markov 链的非空一步转移概率式(4)表示。式中:  $W_{i,j}$  为业务  $i$  在第  $j$  退避阶数时的竞争窗口值。

$$\begin{cases} P\{i, j, k | i, j, k+1\} = 1 - P_{ib} & k \in [0, W_{i,j} - 2]; j \in [0, m] \\ P\{i, j, k | i, j, k\} = P_{ib} & k \in [0, W_{i,j} - 1]; j \in [0, m] \\ P\{i, j, k | i, j-1, 0\} = P_{ic}/W_{i,j} & k \in [0, W_{i,j} - 1]; j \in [1, m] \\ P\{i, 0, k | i, j, 0\} = (1 - P_{ic})/W_{i,0} & k \in [0, W_{i,0} - 1]; j \in [0, m-1] \\ P\{i, 0, k | i, m, 0\} = 1/W_{i,0} & k \in [0, W_{i,0} - 1] \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中各等式含义如下:

- 1) 第一个等式表示信道连续空闲 AIFS 个间隔, 退避计数器以  $1 - P_{ib}$  的概率减 1, 且发送数据帧。
- 2) 第二个等式表示信道忙则保持原状态不变。
- 3) 第三个等式表示数据帧在发送过程中产生碰撞, 业务  $i$  转移到下一阶退避状态, 并在  $[0, W_{i,j}]$  之间随机产生一个数作为退避值。
- 4) 第四个等式表示数据帧发送成功, 下一个数据帧在  $[0, W_{i,0}]$  之间随机产生一个数作为退避值。

5) 第五个等式表示业务  $i$  在进行  $m+1$  次发送之后重新进入退避过程。

式(4)中  $W_{i,j}$  与  $W_{i,0}$  存在如式(5)所示关系<sup>[25]</sup>。

$$W_{i,j} = \begin{cases} 2^j W_{i,0} & j \in [0, m'] \\ 2^{m'} W_{i,0} & j \in (m', m) \end{cases} \quad (5)$$

## 3.2 饱和状态下的模型分析

目前针对 EDCA 机制分析最常用的模型是基于 Bianchi<sup>[26]</sup> 提出的 Markov 链, 其作用是分析理想信道条件下的 DCF 退避过程。该模型不考虑优先级顺序和重传次数, 而假设系统为饱和状态, 数据帧的碰撞概率相等且相互独立, 并将间隙划分为三类, 分别是空闲间隙、成功传送间隙和发生碰撞间隙<sup>[27]</sup>。

### 3.2.1 基于吞吐量和时延的研究

基于 Bianchi 模型的研究过程和分析思路, 许多文献对其进行了拓展。文献[28]在 Bianchi 模型的基础上利用离散时间 Markov 链进行建模, 分析出网络时延表达式, 提出了最小窗口自适应调整算法, 降低了冲突发生的可能性, 在吞吐量和帧延迟方面有了很大改善, 且吞吐量在理论上接近最大值。文献[24]分析了 EDCA 设置的不同优先级竞争窗口参数对于竞争信道是否提供了良好的区分服务, 并提出一种改进模型, 从饱和和吞吐率、饱和延迟以及帧丢失概率等方面研究所有优先级方案, 但缺点是该模型未考虑 AIFS 与 TXOP 机制。

针对 802.11e 协议分析, 大多以文献[24]对 Markov 链分析网络性能的研究模型为主。文献[29]采用平均碰撞概率算法进行等效处理, 提出了针对站点回退和传输的二维离散时间 Markov 过程模型以及 EDCA 饱和吞吐性能的精确数值模型, 且该模型支持扩展到更加复杂的访问机制中。Banchs<sup>[30-31]</sup> 提出了一种基于 AIFS 机制的 k-slot 思想, 利用二维 Markov 链模型对 EDCA 网络的吞吐量和延迟进行研究, 实验分析结果几乎与模拟一致, 所有情况下的误差都远低于 1%。文献[32]提出了基于 AIFS 区分的信道吞吐率分析模型, 实验结果表明该模型在吞吐率方面的准确性优于文献[24]的 Markov 链模型。同时还提出 DPS 即类似调整每类业务的发送概率, 结果表明几乎在各种场景下都能实现最大信道吞吐率。文献[33]提出了一种饱和和流量负载下的二维 Markov 链模型, 与现有分析模型相比, 该模型加入更多 EDCA 特征, 将每个退避阶段中竞争窗口值的变化单独考虑, 消除了部分局限性, 模型的理论分析结果与仿真结果吻合较好, 具有良好的精度。

传统 TXOP 算法规定节点发送数据失败后需让出

信道使用权,但这样不仅浪费信道资源,且降低了连发机制性能。文献[34]提出了改进的 TXOP 连发算法,使高吞吐量的应用程序在低吞吐量、延迟敏感的应用程序中运行时能保证更好的服务质量,但该算法没有根据网络状况动态调整参数,具有 TXOP 的固有缺点。文献[35]提出了一种 DA-TXOP 算法,在网络拥塞的状况下增大 TXOP 值,在负载较轻时减小 TXOP 值,即根据重传和碰撞次数动态调整发送机会值,仿真结果表明该算法较传统算法相比提升了吞吐量和信道利用率,使系统性能有了较大改善。文献[36]提出了改进算法 ETXOP,当站点获得发送机会时只发送少量数据帧,利用剩下的 TXOP limit 发送因碰撞导致重传或其他业务中的数据帧,该算法较好地实现了网络 QoS 需求。文献[37]利用博弈论方法确定 TXOP 值,即在该方法中,将节点看作“玩家”,“胜者”可发送数据帧直至 TXOP 达到最大。

利用 Markov 链模型对 TXOP 算法进行改进是保证可靠服务质量的重要思路。文献[38]使用二维 Markov 链模拟节点排队系统,推导出吞吐量、帧丢失概率和端到端延迟的 QoS 性能度量,指出根据传输队列的状态灵活地调整 TXOP limit,数据结果表明该算法降低了时延和丢包率,满足了特殊的 QoS 需求,在性能方面优于 EDCA 原始方案。文献[39]提出了一种基于 Markov 链性能模型分析算法和动态调整 TXOP 参数设置的接纳控制算法 D-TXOP,对网络可承载的队列施行接纳控制,避免接入的业务量超过网络可承载量,仿真结果表明该算法提高了系统信道的有效利用率和吞吐量,达到了增强网络业务承载能力的目的。

改进竞争窗口的动态退避算法是提高各优先级业务传输性能的重要方向。文献[40]比较了 DCF 和 EDCA 模型,分析出各机制特点并提出了 AEDCF 机制,以冲突率  $f_{coll}$  作为参数反映网络状态,使节点中各业务以自适应的方式动态更新 CW 值,从而保证业务间的优先级关系,结果表明该算法降低了 50% 以上的碰撞率,特别在高流量负载的情况下其性能优于 EDCA。

### 3.2.2 基于区分服务的研究

DCF 机制的研究中多数以发送成功的竞争窗口值作为判断依据,其值越大表示负载越重。但在 EDCA 机制中,每种 AC 具有不同的竞争窗口范围和发送机会限制,且过大的 TXOP 会使低优先级业务出现“饿死”的情况<sup>[41]</sup>。因此,可根据重传次数和碰撞次数动态调整 TXOP 并判断网络拥塞情况。

文献[42]指出缺少对 TXOP 持续时间的有效配置会浪费带宽甚至会对网络性能产生消极影响,故提出

了根据接入点队列的平均分组数目动态调整算法。该算法在网络负载加重时有效地控制了高优先级业务的饱和峰值,提供了良好的区分服务,但无法保障普通站点的性能和分布式无线网络的 QoS 需求。文献[43]提出了一种快速解决碰撞算法 FCR,该算法将节点分为三种状态:数据传输成功状态、碰撞状态和延迟传输状态,通过修改竞争窗口值的增长算法,有效缓解了数据碰撞和空闲时隙浪费的问题,提供了保证网络质量的优先级区分服务。文献[44]提出了一种针对不同业务类型计算 AIFS 的算法,实现了对不同优先级业务的有效区分,一定程度上提高了系统吞吐量。

### 3.2.3 基于公平性的研究

802.11e 协议为不同业务定义了标准值,使低优先级队列在竞争接入信道时不断“让步”,因此 EDCA 的优先级分配并没有实现真正意义上的公平,针对该问题,已有相关研究从不同角度对其进行分析。文献[45]认为对各站点采用相同 TXOP 参数不能有效地区分实时业务,故提出最大持续时间算法 DTXOP,当下流业务(AP 向 STA 传输)小于上流业务时,减少接入点占用信道的的时间,提高了上下流之间接入信道时间的公平性。文献[46]指出合适的 TXOP 分配算法可使信道实现有效共享并且满足多媒体应用的 QoS 需求,因此提出了一种改进接入控制算法,当下流需求小于上流需求时能够有效地减少业务占用信道的的时间,实现了访问类别之间的公平。文献[47]提出了一种基于信道精确条件预测的动态 TXOP 分配算法,与标准 TXOP 方法相比更好地实现了带宽分配并提高了网络可靠性。Kim 等<sup>[48-49]</sup>认为节点速率对 TXOP 也会产生影响,故提出一种基于速率的调整算法,即数据速率较低的节点比数据速率较高的节点获得更多传输机会,确保两种速率下的节点所占信道时间的平均值相同,为队列获得了更多发送分组的机会。

在虚拟碰撞机制中,两个队列在节点内产生冲突使得低优先级队列的竞争窗口值加倍,高优先级队列接入信道,但如果其并未在介质上发生真实碰撞,增大低优先级队列的竞争窗口值是没有意义的,同时会产生以下 2 种问题:

1) 优先级倒置问题。持续的虚拟碰撞会导致某个队列的竞争窗口值最终等于或大于未发生虚拟碰撞的低优先级队列。

2) 不公平问题。EDCA 为每种优先级分配了一组特性,这些特性对于无线局域网中具有相同优先级的所有队列是一致的,即相同优先级的所有访问类别具有平等访问媒体的机会。但由于访问类别在虚拟碰



撞中产生不同的结果,导致相同优先级的访问类别无法实现平等的访问机会。

文献[19]和[50]提出了相似的改进算法,当发生图4(b)所示情况时,低优先级队列的竞争窗口保持不变;当发生图4(a)所示情况时,加倍虚拟碰撞中低优先级队列的竞争窗口。通过对两种机制建模并分析吞吐量和访问时延的变化情况,从实验结果可以看出,在不降低介质总利用率的前提下,改进算法有效地减小了访问类别之间的不公平性。

当数据帧发送成功或到达最大重传次数限制之后,访问类别的竞争窗口值重置为  $CW_{min}$ ,但一次成功的传输并不能判断当前网络状态,也不能断定碰撞概率已经减小。因此,文献[51]提出了一种竞争窗口重置算法,即窗口值在新一轮信道竞争之前不会立即重置为  $CW_{min}$ ,而是根据网络状态和队列的优先级顺序缓慢递减到  $CW_{min}$ 。实验结果表明,该算法性能优于 EDCA 机制,在相同优先级的应用程序之间实现了高度公平。文献[52-53]对 Markov 链理论模型进行分析,提出了解决不同优先级以及上下行信道之间的公平性问题和竞争窗口调整算法,通过仿真验证了该算法的有效性。

### 3.3 非饱和状态下的模型分析

多媒体实时业务的应用效果体现了无线网络 QoS 的可靠性,且数据流传输具有非饱和性质。因此,文献[54]提出了一种分析非饱和条件下 EDCA 机制的服务质量模型,根据 Banchs<sup>[30]</sup>得到的饱和系统结果分析了节点的传播时延和发送概率,仿真验证了该模型在各种真实源模型下的准确性,包括音频、视频和数据流量的典型发送过程。文献[55]针对不同应用类型提出了一种将不饱和系统转化为等效饱和系统的流量分析模型,计算出发送器缓冲区中的排队延迟,分析了多种应用的回退延迟和丢包率,该模型较好地体现了 AIFS 等 EDCA 参数的功能。文献[56]分析了非饱和状态下的数据延迟,但其不足是采用了饱和状态下的近似结果计算业务利用率,导致仿真实验与分析结果相差较大。

## 4 未来研究方向

虽然现有的自适应参数调整算法大多可以有效地提高 EDCA 网络服务质量,但仍有问题亟待解决,例如保证高优先级业务竞争接入信道的同时不损害低优先级业务。笔者对该问题和其他问题进行分析并作为未

来研究方向。

1) 参数的动态变化:本文重点综述了关于 IEEE 802.11e 协议中“标准值”的改进策略,研究人员对参数集设置提出了动态调整算法。但由于网络具有多样性和变化性等特点,改进策略只适用于某一种特定的网络环境,在提高吞吐量的同时造成了网络时延变大等问题,因此难以有效地保障各类实时业务的服务质量。当网络状况逐渐复杂时,为保证队列成功接入信道且不影响当前的业务性能,需提供一种更加有效的接入控制算法来维持已有的网络质量。对于改进方案可尝试与更多的新型优化算法或模型综合考虑,使其逐渐符合未来的应用需求。

2) 虚拟碰撞机制解决策略:虚拟碰撞在提供业务区分服务的同时造成了优先级变化以及倒置的问题,这种情况在流量不对称时更容易产生。针对下一步研究方向,在保证管理机制运行良好的状况下,实行一种更加简便有效的调节策略,从而提高各站点间相同优先级业务的公平性,确保实时多媒体数据的 QoS 支持。

3) 公平性问题研究:影响网络整体性能的另一个重要因素是公平性问题。在实际条件下,吞吐量和公平性保持着一种相互制约的关系,若只考虑公平性而对所有业务类型“一视同仁”,则违背了 EDCA 机制提出的目的;若只考虑吞吐量因素,即高优先级业务优先原则,最终会耗尽低优先级业务竞争信道的可能性,严重影响网络业务公平。在下一步研究中,要保证所有节点的队列满足各自需求并遵循一定原则公平接入信道,才能使两种指标保持在相对平衡的状态。

## 5 结 语

EDCA 机制较 DCF 机制明显的改进是定义了一组参数集,提供了基于竞争的优先级 QoS 保证,但随着网络规模的不断扩大,协议中的参考值无法适应网络状况并满足业务需求,因此,针对参数的动态调整方式受到研究人员的广泛关注。本文由介绍 DCF 机制过渡到 EDCA 机制,详细阐述了其工作原理和各类参数设置,对比了两种机制的特点进而分析出 EDCA 机制存在的优势与不足。从多个方面的不同角度综述了研究者对 EDCA 的改进算法,总结出目前所存在的问题并给出下一步研究方向。该机制仍有大量的研究空间,其设计思想为未来无线网络带来了巨大的研究动力并将不断优化和促进网络发展。

## 参 考 文 献

[1] 赵青芝. 无线局域网 802.11e MAC 层 EDCA 机制研究



- [D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [2] Namazi M, Moghim N, Ghazvini M, et al. Dynamic TXOP assignment in IEEE 802.11e multi-hop wireless networks based on an admission control method[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(1):749–772.
- [3] Rashwand S, Mistic J. Stable operation of IEEE 802.11e EDCA; Interaction between offered load and MAC parameters[J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 10(2):162–173.
- [4] Vijay B T, Malarkodi B. Improved QoS in WLAN using IEEE 802.11e[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 89:17–26.
- [5] Sharon O, Alpert Y. The combination of QoS, aggregation and RTS/CTS in very high throughput IEEE 802.11ac networks[J]. *Physical Communication*, 2015, 15:25–45.
- [6] 张朝柱,黄文钰,尹冬梅. IEEE802.11 DCF 机制下的异构网络业务分析模型[J]. *软件学报*, 2019, 30(4):1136–1147.
- [7] 黄镇建,蔡群英. 多速率的无线网络性能异常现象分析及仿真[J]. *计算机应用与软件*, 2009, 26(10):203–204, 214.
- [8] Chen X, Akinyemi I, Yang S H. A control theoretic approach to achieve proportional fairness in 802.11e EDCA WLANs[J]. *Computer Communications*, 2016, 75(1):39–49.
- [9] 黄文钰. IEEE802.11 MAC 层信道接入技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [10] 顾洁,朱宗卫,徐友庆,等. NS-3 仿真环境中 IEEE 802.11 服务区分机制的研究[J]. *计算机工程*, 2019, 45(8):135–140.
- [11] 片兆斌,白光伟,王军元. 基于 IEEE 802.11e EDCA 的优先级可调机制[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(15):3531–3533, 3564.
- [12] Zhou X, Zheng C W. Priority access for QoS support in distributed wireless networks[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(6):1202–1211.
- [13] Erturk M A, Vollero L, Aydin M A. Optimal joint load balancing and EDCA configuration of IEEE 802.11 wireless hotspots[J]. *International journal of communication systems*, 2018, 31(2):1–19.
- [14] 王华,白光伟. 饱和状态下 IEEE 802.11e EDCA 机制的建模分析[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(13):104–107.
- [15] 王鹭. IEEE 802.11e 的 EDCA 机制及其改进算法研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [16] 李奥. 基于 NS-3/MATLAB 的 IEEE 802.11 服务区分与 M2M 通信研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [17] 温景容,甄岩,武穆清. IEEE 802.11e EDCA 在 Ad Hoc 网络中应用仿真分析[J]. *小型微型计算机系统*, 2010, 31(5):908–911.
- [18] Usman M F, Hussain A, Nadeem F. Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA through analytical model[J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2014, 21(2):101–113.
- [19] 李美桃,蒋阳,付存文,等. IEEE 802.11e EDCA 中虚拟碰撞问题的一种解决策略[J]. *北京联合大学学报(自然科学版)*. 2010, 24(2):90–92.
- [20] Tanigawa Y, Kim J O, Tode H. QoS-Aware retransmission with network coding based on adaptive cooperation with IEEE 802.11e EDCA[C]//*Proceedings of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conference*. IEEE, 2011:1–5.
- [21] Junior J R B, Lau J, Rech L D O, et al. Experimental Evaluation of the Coexistence of IEEE 802.11 EDCA and DCF Mechanisms[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications(ISC3)*. IEEE, 2018.
- [22] Koprivica M, Ilic M, Neskovic A, et al. Experimental evaluation of IEEE 802.11e EDCA QoS mechanism for voice over WLAN[C]//*2011 IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool*. IEEE, 2011:1–4.
- [23] Lee Y. Throughput analysis model for IEEE 802.11e EDCA with multiple access categories[J]. *Journal of Applied Research and Technology*, 2013, 11(4):612–621.
- [24] Xiao Y. Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(4):1506–1515.
- [25] Xiao Y. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCA under saturation condition [C]//*Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2004:20–24.
- [26] 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.
- [27] 周雯. IEEE 802.11e EDCA 中竞争窗口的动态退避算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
- [28] 朱颖,夏海伦,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.
- [29] Robinson J W, Randhawa T S. Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(5):917–928.
- [30] Banchs A, Vollero L. A delay model for IEEE 802.11e EDCA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(6):508–510.
- [31] Banchs A, Vollero L. Throughput analysis and optimal con-

- figuration of 802.11e EDCA[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(11):1749–1768.
- [32] 白翔,毛玉明,冷甦鹏,等. AIFS 区分的 IEEE 802.11e EDCA 吞吐率分析模型与自适应 MAC 算法[J]. *软件学报*, 2009, 20(4):779–794.
- [33] Xiong L, Mao G. Saturated throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(11):3047–3068.
- [34] Salhotra A, Narasimhan R, Kopikare R. Evaluation of contention free bursting in IEEE 802.11e wireless LANs[C]//*Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2005:107–112.
- [35] 谢信通,宋博,唐红,等. IEEE 802.11e EDCA 中 TXOP 机制的分析与改进[J]. *电子技术应用*, 2011, 37(12):118–121.
- [36] Majkowski J, Palacio F C. Enhanced TXOP scheme for efficiency improvement of WLAN IEEE 802.11e[C]//*Proceedings of IEEE 60th Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2004:1–5.
- [37] Ghazvini M, Movahedinia N, Jamshidi K. GTXOP: A game theoretic approach for QoS provisioning using transmission opportunity tuning[J]. *PLoS One*, 2013, 8(5):e62925.
- [38] Min G, Hu J, Woodward M E. A Dynamic IEEE 802.11e TXOP scheme in WLANs under self-similar traffic; Performance enhancement and analysis [C]//*Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2008:2632–2636.
- [39] 毛建兵,毛玉明,冷甦鹏,等. 支持 QoS 的 IEEE 802.11 EDCA 性能研究[J]. *软件学报*, 2010, 21(4):750–770.
- [40] Romdhani L, Ni Q, Turletti T. Adaptive EDCF: Enhanced service differentiation for IEEE 802.11 wireless ad-hoc networks[C]//*Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking*. IEEE, 2003:1373–1378.
- [41] Sun X, Zhu Q, Rui Y, et al. Throughput differentiation and optimization via TXOP in IEEE 802.11e EDCA networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 78(1):543–560.
- [42] Majkowski J, Palacio F C. Dynamic TXOP configuration for QoS enhancement in IEEE 802.11e wireless LAN[C]//*Proceedings of Software in Telecommunications and Computer Networks*. IEEE, 2006:66–70.
- [43] Kwon Y, Fang Y, Latchman H. Design of MAC protocols with fast collision resolution for wireless local area networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(3):793–807.
- [44] Chou C T, Shin K G, Shankar S N. Inter-frame space(IFS) based service differentiation for IEEE 802.11 wireless LANs [C]//*Proceedings of 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2003:1412–1416.
- [45] Gu D Q, Zhang J Y. QoS enhancement in IEEE 802.11 wireless local area networks[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2003, 41(6):120–124.
- [46] Andreadis A, Zamboni R. QoS Enhancement with dynamic TXOP allocation in IEEE 802.11e [C]//*Proceedings of IEEE International Symposium on Personal*. IEEE, 2007:1–5.
- [47] Ju K, Lee D, Chung K. Dynamic TXOP allocation to support QoS based on channel conditions in wireless networks [C]//*Proceedings of the 2012 8th International Conference on Computing Technology and Information Management (ICCM)*. IEEE, 2012:721–724.
- [48] Kim E K, Suh Y J. ATXOP: An adaptive TXOP based on the data rate to guarantee fairness for IEEE 802.11e wireless LANs[C]//*Proceedings of IEEE 60th Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2004:2678–2682.
- [49] Kim E K, Suh Y J. A rate adaptive transmission opportunity for fairness over IEEE 802.11e wireless LANs [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2007:4523–4528.
- [50] Masri M E, Abdellatif S. Managing the virtual collision in IEEE 802.11e EDCA[J]. *IFAC Proceeding Volumes*, 2009, 42(3):104–109.
- [51] Malli M, Ni Q, Turletti T, et al. Adaptive fair channel allocation for QoS enhancement in IEEE 802.11 wireless LANs [C]//*Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2004:3470–3475.
- [52] Lee J Y, Lee H S, Ma J S. Model-based QoS parameter control for IEEE 802.11e EDCA[J]. *IEEE Transaction on Communication*, 2009, 57(7):1914–1918.
- [53] Abeysekera B A H S, Matsuda T, Takine T. Dynamic contention window control to achieve fairness between uplink and downlink flows in IEEE 802.11 WLANs[C]//*Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2007:2109–2114.
- [54] Serrano P, Banchs A, Azcorra A. A throughput and delay model for IEEE 802.11e EDCA under non saturation[J]. *Wireless Personal Communications*, 2007, 43(2):467–479.
- [55] Liu J, Niu Z S. Delay analysis of IEEE 802.11e EDCA under unsaturated conditions [C]//*Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2007:430–434.
- [56] Engelstad P E, Østerbø O N. Non-saturation and saturation analysis of IEEE 802.11e EDCA with starvation prediction [C]//*Proceedings of the 8th International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. ACM, 2005:224–233.