

## 摘要

无线局域网 WLAN(Wireless LAN)是计算机网络技术与移动通信技术相结合的产物,具有有线网络无法比拟的移动、灵活性,真正实现了人们随时随地自由接入网络的需求。随着无线局域网的广泛应用,越来越多的语音、视频等多媒体实时业务希望 WLAN 可以像有线网络一样提供服务质量(QoS)的保障。2005年,IEEE 802.11小组提出了具有服务等级区分的IEEE 802.11e协议,为实时业务的服务质量保障做出了补充。

本文首先对IEEE 802.11 MAC层协议以及IEEE 802.11e协议进行了深入地分析和研究。其中着重研究了IEEE 802.11e协议的增强型分布式协调访问机制(EDCA),EDCA依据不同的业务类型引入4种访问类别AC(Access Category)以区分优先级,利用为不同优先级的AC分配不同的TXOP(Transmission Opportunity)来满足不同业务流传输的需求。但是EDCA机制中各项参数都是采用静态设置的方式,没有考虑到信道负载状况以及误码等影响因素,极易导致信道吞吐量的不公平现象。针对这一问题,本文提出了一种TXOP的动态调节机制:根据当前每个类别的传输情况,针对网络中上行流与下行流方向的不均衡状况,定期更新AP的TXOP最大持续时间。对于移动节点的TXOP,引入速率自适应机制,根据各个节点传输速率的不同,调整相应类别的TXOP最大持续时间。

利用NS模拟器对所提出的TXOP动态调节机制进行了仿真,结果表明:在网络重负载、趋于饱和的环境中,吞吐量、丢包率以及时延等性能都有较好的改善,并且TXOP动态调节机制还保证了上行流与下行流之间的公平性,较好的实现了QoS的保障。

**关键词:** 无线局域网 服务质量 IEEE 802.11e 传输机会

## Abstract

Wireless Local Area Network (WLAN), based on a combination of the computer network technology and the wireless communication technology, has such advantages as mobility, flexibility and expansibility in contrast to the wire LAN and meets requirements for accessing the Internet anytime and anywhere. As WLAN is used widely, WLAN should offer QoS guarantees as the wire LAN does to meet requirements for multi-media real-time services such as Video and VoIP services. To achieve the goal, IEEE 802.11e<sup>TM</sup> was published in Nov. 2005, and provided guidance to implement QoS Guarantees.

This paper is to analyze and study the IEEE 802.11 MAC layer protocol and the IEEE 802.11e standard deeply, focusing on the Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) mechanism of the IEEE 802.11e standard. The IEEE 802.11e provides several configurable parameters for four Access Categories (AC) to achieve differentiated service in the EDCA mechanism, and distributes different TXOP (Transmission Opportunity) according to Access Categories (AC) with different priority levels to meet different requirements for service flow transmission. Since the parameters configuration of EDCA are performed in static mode, the change in the amount of services load and error rate performance are not considered in the setup processes of each station. Unfortunately, the adoption of a unique value of TXOP maximum duration for all stations, included the AP, results in an unfair behavior. To solve the problem this work proposes a mechanism capable of tuning the TXOP maximum duration at the AP, in order to dynamically change its channel resources, according to the current traffic conditions of each specific AC. The proposed mechanism aims to define dynamic rules for TXOP maximum duration adjustment in multi-rate IEEE 802.11e networks in order to improve system efficiency and provide better QoS provision.

Simulation experiments show that the dynamical TXOP mechanism allows to enhance delay, loss rate and throughput performance under saturation network conditions and to maintain fairness between upstream and downstream channel access times.

**Key Words: WLAN QoS IEEE 802.11e TXOP**


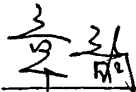
## 南京邮电大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得南京邮电大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名:  日期: 08.10.14

## 南京邮电大学学位论文使用授权声明

南京邮电大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外,允许论文被查阅和借阅,可以公布(包括刊登)论文的全部或部分内容。论文的公布(包括刊登)授权南京邮电大学研究生部办理。

研究生签名:  导师签名:  日期: 08.10.14

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

从 1969 年 ARPANET 网络开始投入运行, 到迄今为止不足四十年的时间里, 网络已经对人类社会的进步与发展产生了巨大的推动作用和深远的影响。近年来, 作为信息资源交流共享的主要平台, 有线接入网络得到了迅猛发展。然而随着便携式计算机、PDA、智能手机等移动智能终端设备的逐渐成熟, 人们不再满足于足不出户的固定式网络接入, 希望能够随时随地自由接入 Internet, 享受安全并且高效的服务。于是移动信息处理成为了网络发展的新焦点。

无线局域网 WLAN (Wireless LAN) 是 20 世纪 90 年代计算机网络技术与移动通信技术相结合的产物, 它满足了人们对于宽带无线接入网络的迫切要求, 同时, 通信网络所承载的业务也在不断地丰富。除了传统 Internet 应用如 FTP、电子邮件、DNS 应用等, 各种多媒体方面的应用也在不断涌现, 像视频点播、远程教学、远程医疗、网上直播、大型网络互动游戏、VoIP, IPTV 等等。在以往的有线局域网中, 由于丰富的带宽资源和高效的信息传输, 人们对网络的服务质量(QoS)没有太多的关注。而在无线网络中, 有限的带宽资源与复杂多变的信道特性导致的高误码率, 限制了那些对带宽、时延有较高要求的视频、语音等多媒体实时业务在 WLAN 中的应用。于是提高网络服务质量(QoS)成为了直接影响无线局域网进一步发展的关键问题。为此, IEEE 802.11 协议小组历经多年, 终于在 2005 年 11 月发布了 IEEE 802.11e 协议, 为无线局域网提供了服务质量保障。

## 1.2 研究意义

IEEE 802.11e 协议是 IEEE 802.11 协议 MAC 层增强的 QoS 机制。原有的 IEEE 802.11 协议定义了两种 MAC 机制: 分布式协调功能 (DCF) 和点协调功能 (PCF)。DCF 虽然易于实现, 市场应用广泛, 然而它对所有站点都使用相同的接入参数, 使得所有业务流的优先级相同, 并不能提供 QoS 保障。PCF 提供的是无竞争的服务, 属于中央控制, 不包括接入控制算法, 在网络负载大的情况下, 无法满足端到端的 QoS 需求。

IEEE 802.11e 协议定义了一种新的混合协调功能 HCF, 包括 EDCA 和 HCCA 两种信道访问机制: EDCA 是 DCF 的增强版, 提供了不同优先级的 QoS。EDCA 区分了不同的业务类型: 背景流、普通数据、语音、视频。依据不同的业务类型引入 4 种访问类别 AC (Access Category)

对应于 8 种不同的用户优先级 UP (User Priority), 利用为不同的业务流分配不同的 TXOP (Transmission Opportunity) 来满足不同的业务流对于传输的要求; HCCA 类似于 PCF, 经过协商后能够提供参数化的 QoS。HCCA 能够基于每个站点的特定业务需求提供无竞争的保证服务, 但它是集中式的, 计算复杂, 每次有新的业务流接入必须重新计算调节, 从而限制了市场需求。

由于 IEEE 802.11e 协议中 EDCA 机制的各项参数都是采用静态设置的方式, 没有考虑到信道负载状况与误码等影响因素, 从而造成碰撞过多、退避频繁和误码丢包等问题, 极易导致信道吞吐量的不公平现象以及时延性能的明显恶化。本文研究主要是基于增强型分布式协调访问机制 (EDCA)。

### 1.3 论文主要内容及章节安排

本文在深入分析和研究 IEEE 802.11 MAC 层协议以及 IEEE 802.11e 协议的接入机制的基础上, 针对 IEEE 802.11e 中固定参数值 TXOP 引发的吞吐量的不公平现象, 提出一个动态分配 AP 的 TXOP 值的算法, 根据当前每个类别的传输情况, 利用上行方向与下行方向丢包数的差值判定当前网络上行方向与下行方向的不均衡状况, 定期更新 AP 的 TXOP 最大持续时间。对于无线移动站点的 TXOP, 引入了速率自适应机制, 根据各个站点传输速率的不同, 调整相应类别的 TXOP 最大持续时间 (TXOPLimit)。如果站点的速率大则赋予一个相对较小的 TXOPLimit 值, 相反, 如果站点的速率小则赋予一个较大的 TXOPLimit 值。

最后, 利用 NS2 模拟器对所提出的 TXOP 动态调节机制进行仿真。根据产生的数据结果生成图形, 较为直观的反映算法的性能差异和改进效果。

论文组织如下:

第二章, 对 IEEE802.11 协议的 MAC 层介质访问机制进行了讨论;

第三章, 对 IEEE 802.11e 协议 MAC 层增强技术进行了研究, 重点分析了 IEEE 802.11e 协议规定的必须实现的增强型分布式协调访问机制 (EDCA);

第四章, 针对固定 TXOP 值引发的上行流方向与下行流方向吞吐量的不均衡, 提出根据当前的网络传输条件, 动态分配 AP 的 TXOP 最大持续时间的算法;

第五章, 使用 NS2 模拟上述算法并分析了仿真结果;

第六章, 最后总结全文并对未来的研究进行了展望。

## 第二章 无线局域网 IEEE 802.11 MAC 层协议

### 2.1 无线局域网概述

#### 2.1.1 无线局域网的特性

无线局域网(Wireless Local Area Network)是计算机网络与无线通信技术相结合的产物。无线局域网是在不采用传统电缆线的同时,提供传统有线局域网的所有功能。无线局域网不是用来取代有线局域网,而是用来弥补有线局域网的不足,以达到网络延伸的目的。

与有线局域网相比,无线局域网主要具有以下一些优点<sup>[25]</sup>:

- ◇ 移动性:无线局域网的设置允许用户在任何时间、任何地点访问网络数据,不需要指定明确的访问地点,因此用户可以在网络中漫游。
- ◇ 灵活性:由于没有线缆的限制,用户可以随心所欲地增加工作站或是重新配置工作站。
- ◇ 高宽带:无线局域网使用的无线频率可以处于开放频段,例如 2.4GHz 的 ISM 频段,最大带宽可达 11MHz。
- ◇ 成本低:使用无线局域网可以避免安装线缆的高成本费用、租用线路的月租费以及当设备需要移动而增加的相关费用。

然而无线局域网并非完美无缺,仍存在一些重要的问题亟待解决,这些局限性实际上也是无线局域网所必须克服的技术难题<sup>[26]</sup>。

- 可靠性:无线局域网采用无线信道进行通信,而无线信道是一个不可靠的信道,存在各种干扰和噪声。从而引起信号的衰落和误码,进而导致网络吞吐性能的下降和不稳定。
- 覆盖范围:无线局域网的低功率和高频率限制了其覆盖范围。
- 安全性:无线局域网的安全性有两个方面的内容,一个是信息安全,一个是人员安全。由于无线电波不可能局限于网络设计的范围内,所以存在着被窃听和被恶意干扰的可能性。

### 2.1.2 无线局域网的网络结构<sup>[29]</sup>

完整的网络结构自上而下一共应有七个层次。由于无线局域网基于计算机网络与无线通信技术，而在计算机网络结构中，逻辑链路控制（LLC:Logical Link Control）层与其之上的应用层对不同的物理层的要求可以是相同的，也可以是不同的。因此，WLAN 标准主要是针对物理层和介质访问控制层，涉及到所使用的无线频率范围、空中接口通信协议等技术规范与技术标准。

无线局域网由站点 STA(Station)、无线介质 WM(Wireless Medium)、基站 BS(Base Station)或接入点 AP (Access Point) 和分布式系统 DS(Distribution System) 等几部分组成。无线局域网物理结构如图 2.1 所示。站点也称主机或终端，是无线局域网的最基本的组成单元。无线局域网中的站点之间可以直接相互通信，也可以通过基站或接入点进行通信。无线介质是无线局域网站点与站、站与接入点之间通信的传输介质。无线接入点类似蜂窝结构中的基站，是无线局域网的重要组成单元。其基本功能是完成其他移动站点对分布式系统的接入访问和同一 BSS (Basic Service Set) 中的不同站点之间的通信联络。分布式系统是用来连接不同 BSS 的通信信道。无线分布式系统通过 AP 间的无线通信取代有线电缆来实现不同 BSS 的连接。

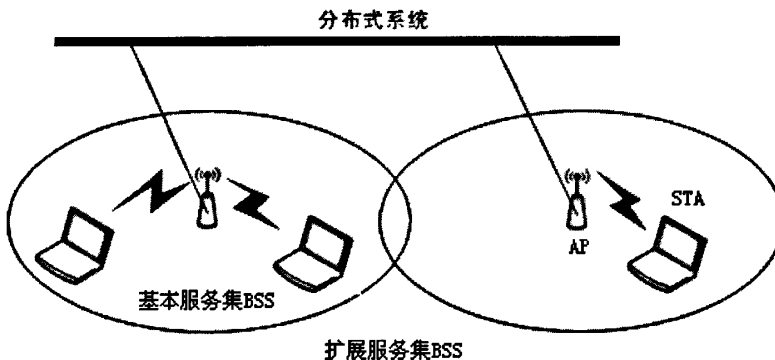


图 2.1 无线局域网物理结构图

无线局域网的拓扑结构可从几个方面进行分类：从物理拓扑分类看，有单区网和多区网之分；从逻辑上看，WLAN 的拓扑主要有对等式、基础结构式和线形、星形、环形等；从控制方式方面来看，可分为无中心分布式和有中心集中控制式两种；从与外网的连接性来看，主要有独立 WLAN 和非独立 WLAN。

一般地，WLAN 有两种网络类型：对等网络和接入结构网络。

对等网络：由一组具有无线接口卡的计算机组成。这些计算机以相同的工作组名、

ESSID(Extended Service Set ID)和密码等对等的方式相互直接连接, 在 WLAN 的覆盖范围之内, 进行点对点及点对多点之间的通信。

接入结构网络: 在接入结构网络中, 具有无线接口卡的无线终端以无线接入点 AP 为中心, 通过无线网桥 AB、无线接入网卡 AG、无线接入控制器 AC 和无线接入服务器 AS 等将无线局域网与有线网络连接起来, 可以组建多种复杂的无线局域网接入网络, 实现无线移动节点的接入。

### 2.1.3 无线局域网的网络服务质量

服务质量 QoS (Quality of Service) 是对通信网络承载各种通信业务时的业务性能的集中体现。对用户而言, 表现为用户对业务的质量的要求; 对网络而言, 最终表现为网络的性能。这些业务性能决定了用户对业务的满意程度; 从技术角度而言, 是指为保证所提供的业务的服务质量到达相应的标准而采取的一系列措施的技术的总称。

由于不同的业务对网络的性能要求不同, 例如电子邮件对网络的差错率、丢包率以及安全性有很高的要求, 而语音、视频会议等互动式应用则要求网络提供高吞吐率和低时延的服务, 所以各种具体应用对网络的服务质量期望值也不同。一般用 QoS 参数来衡量这些期望值, 主要包括以下一些指标:

- ◇ 网络时延: 指数据包在网络的两个节点之间传送的平均往返时间。所有实时业务都对时延有一定要求, 如 VoIP 业务, 一般要求网络时延小于 200ms, 当网络时延大于 400ms 时, 通话质量将变得无法忍受。
- ◇ 时延抖动: 指时延的变化。有些业务, 如流媒体业务, 可以通过适当的缓存来减少时延抖动对业务的影响, 而有些业务则对时延抖动非常敏感, 如语音业务, 稍许的时延抖动就会导致语音质量迅速下降。
- ◇ 吞吐量: 就是网络的有效带宽, 定义为物理链路的比特率减去各种传播技术带来的额外开销, 即每秒钟传输的用户数据的字节数, 它是在某个时间间隔内测试得到的。每个传输方向有各自的吞吐量。
- ◇ 丢包率: 指在网络传输过程中丢失报文的百分比, 用来衡量网络正确转发用户数据的能力。不同业务对丢包的敏感性不同, 在多媒体业务中, 丢包是导致图像质量恶化的最根本原因, 少量的丢包就可能使图像出现马赛克现象。



## 2.1.4 无线局域网协议体系<sup>[26][27]</sup>

目前无线局域网标准主要有：美国 IEEE 的 802.11 系列标准、欧洲 HiperLAN1/HiperLAN2 标准、HomeRF 协议体系和蓝牙(Blue Tooth)协议体系。美国 IEEE 的 802.11 系列标准和欧洲 HiperLAN1/HiperLAN2 标准是无线局域网标准的两大主要阵营，其中 IEEE 的 802.11 系列标准在我国占主导地位。

IEEE 802.11 标准于 1997 年 6 月公布，是第一代无线局域网标准。它支持 1Mbps 和 2Mbps 的两种数据传输速率，工作在 2.4GHz ISM 开放频段。IEEE 802.11 标准协议主要位于 ISO 协议的物理层和 MAC 层。随着高速无线数据传输业务的发展，IEEE 802.11 工作组又发布了 IEEE 802.11a、IEEE 802.11b 和 IEEE 802.11g 标准，将最大无线传输速率提高到 11Mbps 和 54Mbps。

尽管 IEEE 802.11a 和 802.11g 能够提供最高 54Mbps 的物理信道的传输速率（实际吞吐率是这个极限速率的一半左右），这足以满足用户传输小容量数据和浏览网页的需要，但与千兆有线网络相比，无线网络对于一些视频、语音等需要高 QoS 保障的多媒体业务应用尚存在着严重的带宽不足，这将严重影响用户将来的业务应用发展。

随着无线局域网应用越来越广泛，人们开始期望无线局域网能够像有线网络一样，提供服务质量保障。然而，由于无线信道速率低、出错率高并且冲突难以检测，无线局域网一直难以提供服务质量保证。为此，IEEE 802.11 协议组历经多年，终于在 2005 年 11 月发布了 IEEE 802.11e 协议，为无线局域网提供了 MAC 层的 QoS 保障。IEEE 802.11e 标准是对原来 IEEE 802.11 标准的 MAC 层增强协议，它提出了两种新的 MAC 层接入机制——增强型分布式协调访问机制 EDCA 和混和协调功能控制信道访问机制 HCCA，引入了业务等级的概念，增加了一些新的 QoS 参数和帧结构，增强了 WLAN 的 QoS 性能。

## 2.2 IEEE 802.11 协议

无线局域网 MAC 层和以太网 MAC 层协议非常相似，都是在一个共享媒体之上支持多个用户共享资源，发送者在发送数据前先进行网络的可用性检测。换句话说，无线局域网的所有终端用户只共享一个信道，如果有一个终端用户在发送信号，那么其它的终端用户就不能发送信号，否则就会发生冲突。

介质访问控制（MAC）层最主要的功能是控制媒体访问，此外，还要支持认证、能量管理等。IEEE 802.11 的 MAC 层规定了两种媒体访问控制机制，即分布式协调功能（DCF），

Distributed Coordination Function) 和点协调功能 (PCF, Point Coordination Function)。其中, DCF 是最基本的也是最主要的控制机制。

DCF 是基于竞争的分布式信道访问机制, 通过 CSMA/CA、Backoff 和指数退避等机制提供尽力而为的服务。PCF 机制是可选的, 建立在 DCF 的基础之上。DCF 既可用在中心式网络中, 也可以用于 Ad Hoc 网络。而 PCF 是在 DCF 的基础上的一种可选机制, 它除了可以提供异步数据服务外还可以提供延迟受限的服务, 但它只能用在带有基础设施的网络中。由于 PCF 在站点比较少时的性能略差, 而且实现复杂, 目前的大部分芯片都不支持这一机制。

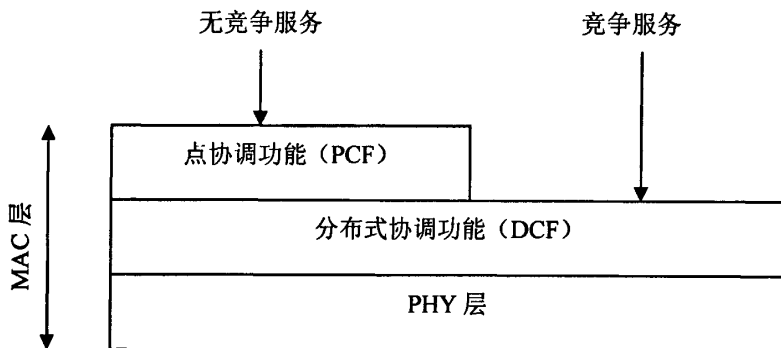


图 2.2 IEEE 802.11 MAC 层业务模型

### 2.2.1 分布式协调功能 (DCF)

分布式协调功能 (DCF) 采用了带有冲突避免的载波侦听多路访问协议 (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)。CSMA/CA 协议的设计目的就是为了解决尽量降低共享同一无线信道的多个无线节点间的碰撞概率。站点发送数据前, 先探测得知信道的忙闲状态。这一方法能协调多个用户对共享信道的访问, 很大程度上避免出现因争抢信道而大家都无法通信的情况。它对所有用户都一视同仁, 在所有业务都共享竞争同一信道的情况下, 对这些不同业务类别没有任何优先级的规定。

#### 1. 载波侦听机制 CSMA/CA

在网络中, 如果各个节点都能够根据网络状况协调自己的行为, 就能使信道的利用率大大提高。载波侦听多路访问协议 (CSMA, Carrier Sense Multiple Access) 就是基于这种考虑而实现的。

CSMA 的工作过程如下: 节点在发送数据之前首先要侦听信道, 如果发现信道空闲, 则

立即发送数据；如果发现信道处于忙状态，则不发送。这样就大大减少了碰撞次数。但是，碰撞仍会发生。例如，当信道由忙转为空闲时，如果有多个节点同时在侦听，这些节点就会同时发送数据而发生碰撞。

无线信道的主要特点就是在发送时不能同时侦听，无法进行冲突检测。为此，采用的方法是带有冲突避免的载波侦听多路访问（CSMA/CA）。

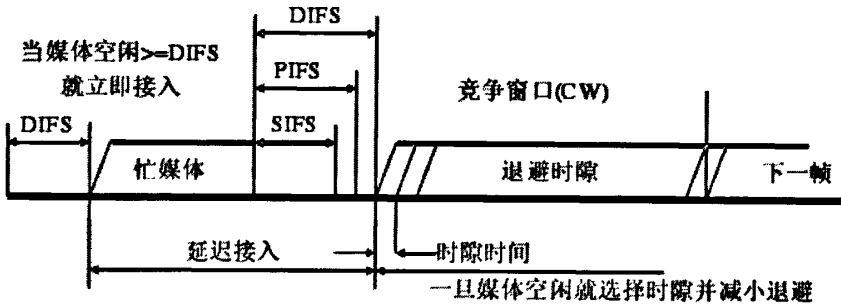


图 2.3 CSMA/CA 基本访问方法

CSMA/CA 的冲突避免是通过在 CSMA 的基础上增加了退避定时器（BackoffTimer）和竞争窗口（CW，Contention Window）机制来实现的，如图 2.3 所示。

竞争窗口 CW (Contention Window) 初始值为  $aCW_{min}$ 。每发生一次冲突，竞争窗口就会成倍增长，直至  $aCW_{max}$ 。竞争窗口越大，选择相同的随机退避时间的可能性就较小，退避定时器机制解决碰撞的能力就越大。但是，竞争窗口越大，退避时间可能就越长，从而导致不必要的延迟。因此，当数据传输成功或者连续重传多次失败后，CW 值被重新设置成  $aCW_{min}$ 。由于 CW 值是以  $aCW_{min}$  为初始值，以 2 为指数增长后减 1，因此这个机制也称为二进制指数退避（Binary Exponential Backoff）。

$$\text{退避时间 Backoff Time} = \text{Random}() \times aSlotTime \tag{2.1}$$

(退避时间=随机整数\*时隙时间)

其中：Random() 表示  $[0, CW]$  范围内的随机整数，满足  $aCW_{min} \leq CW \leq aCW_{max}$

aSlotTime 为物理层的特征值。

CSMA/CA 退避规程的具体机制如下：节点在发送数据之前，首先要侦听信道是否空闲，若信道闲，则该节点在侦听到信道连续空闲 DIFS 时隙后可以发送；若信道忙，则等待到当前的数据传输结束后，产生一段随机的退避时间 Backoff Time 作为退避定时器的初值。这个退避时间是从 0 到竞争窗口 CW 之间选取一个随机数。如果在某一个退避时隙期间没有媒介活动的报告，则退避规程将退避定时器减去一个时隙。如果在退避时隙期间有节点

发送数据，退避规程将挂起，退避定时器对该时隙不计数。当信道重新空闲 DIFS 时，允许重新开始退避规程，继续倒计时，直到定时器的值为 0，该节点就开始发送数据。如图 2.4 所示。

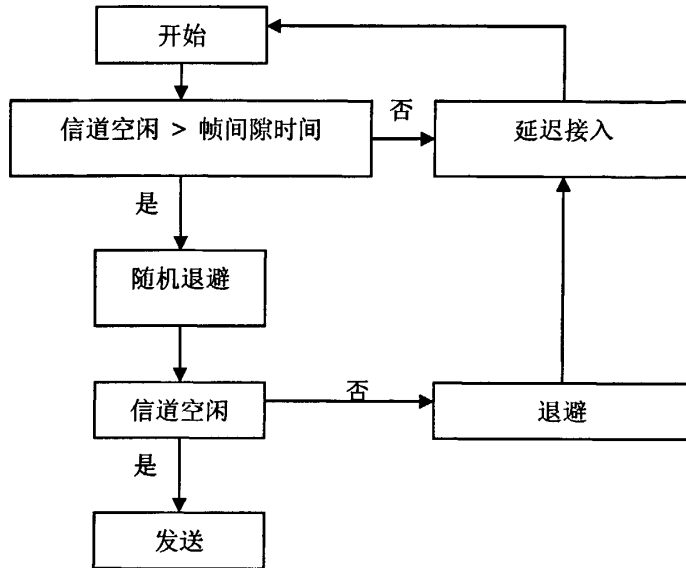


图 2.4 CSMA/CA 机制退避流程

## 2. 帧间间隔

在上面机制的描述中，已经出现了两种时间间隔，分别是 DIFS 和 SIFS。它们都是 IEEE 802.11 标准中规定的帧间间隔 IFS (InterFrame Space)，即连续两个帧之间的时间间隙。所有使用载波侦听功能的 STA 只有在检测到信道空闲时间大于 IFS 后，才认为信道空闲。802.11 MAC 层定义了 4 种不同的 IFS，以提供对无线媒介访问的不同优先级。从时间上由短到长依次为：

- 1) SIFS (短帧间间隔, Short Interframe Space)：这个最短的等待时间是为控制信息定义的，例如：数据帧的应答或轮询应答；
- 2) PIFS (集中协调功能帧间间隔, PCF Interframe Space)：这是介于 DIFS 和 SIFS 之间的时间参数。只能够由工作于 PCF 模式的 STA，在 CFP 起始时间企图获得信道访问权时使用；
- 3) DIFS (分布式协调功能帧间间隔, DCF Interframe Space)：这个参数指示最长的等待时间和访问媒体的最低优先级。工作于 DCF 模式的 STA 使用 DIFS 来发送 MPDU 和管理帧；

4) EIFS (扩展帧间间隔, Extended Interframe Space): 它只在传输出现错误时用到。

在同样的竞争信道条件下, 采用的帧间间隔越短, 就越有可能尽早的发送出数据, 相当于给数据赋予了较高的优先级。例如, 发送 ACK 包所采用的帧间间隔是 SIFS, 发送普通数据包采用的帧间间隔是 DIFS, 由于发送 ACK 包时只需等待 SIFS, 而发送数据时节点必须至少等待 DIFS 间隔才能发送, 并且 DIFS 大于 SIFS, 因此, ACK 包总能够优先于数据包得到发送。

### 3. 显式 ACK 确认

为了增强 CSMA/CA 对异步业务传输的可靠性, IEEE 802.11MAC 在 CSMA/CA 的基础上使用 MAC 层确认机制, 也就是 CSMA/CA+ACK。接收方在收到发送方发来的数据、并通过 CRC 校验数据没有发生任何错误之后, 需要等待一个 SIFS 时间间隔, 然后直接向发送方发送一个应答帧 (ACK, Acknowledgement)。如果在一定的时间内, 发送方没有收到返回的 ACK, 发送方将重传数据帧, 重传的帧也必须和其它帧一样参加竞争。重传的次数是有限制的, 当到了规定次数重传仍不成功的话, 发送方 MAC 会向上层报告, 由上层来决定应对措施。应答帧帮助保证了 MAC 层数据帧的正确接收, 这对于较容易出错的网络环境 (例如无线链路) 尤其重要。

### 4. RTS/CTS 机制<sup>[5]</sup>

RTS/CTS 机制的提出, 主要是为了解决无线局域网中存在的隐藏终端问题。

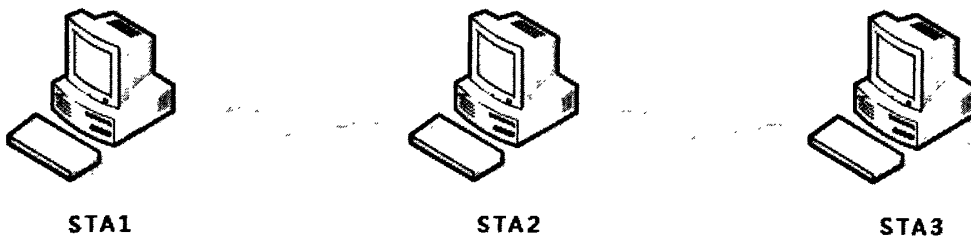


图 2.5 隐藏终端问题

观察图 2.5。图中有 3 个无线终端, 假设信号传播的范围只能到达相邻的终端。无线终端 1 和无线终端 3 都在无线终端 2 的覆盖范围内, 因此终端 1 和 2、终端 3 和 2 都可以通信。但是终端 1 和 3 都不在对方的覆盖范围内, 不能收到来自对方的信号。当无线终端 1 和 3 都有数据要发给 2 时, 如果它们同时都检测到信道空闲, 就会同时向终端 2 发送数据帧, 这样就会导致在终端 2 发生冲突。这就是无线网络中的隐藏终端 (Hidden Terminal)

问题。

为了解决这个问题，802.11 标准中定义了两种帧：RTS 帧和 CTS 帧。发送方在侦听到信道连续空闲 DIFS 之后，首先发送 RTS (Request To Send)。RTS 帧和其它数据帧的优先级是相同的。RTS 帧中包括一个叫做 Duration 的域，这个域存储的是从发送方完成 RTS 发送一直到收到完整的 ACK 所经历的时间。RTS 和 CTS 都是广播帧，收到这个 RTS 的每个节点都会根据 Duration 域来设置它的 NAV (Network Allocation Vector)。NAV 是每个节点都要维护的一个向量，它指定了节点可以试图访问信道的最早时间。

数据的接收方在收到 RTS 帧以后，等待 SIFS 时间间隔，再发送一个 CTS (Clear To Send) 帧进行应答。CTS 帧也包括 Duration 域，它的这个域存储的是从接收方完成 CTS 发送一直到发送方收到完整 ACK 所经历的时间。所有接收到这个 CTS 的节点必须再次调整它们的 NAV。收到 CTS 的节点集合和收到 RTS 的节点集合不一定相同。因此，在发送方和接收方的接收范围内的所有节点都会被通知，它们在访问信道之前必须等待更长的时间。

最后，发送方在收到 CTS 之后，等待 SIFS 间隔发送数据。接收方在接收到数据帧之后再等待 SIFS 间隔，用 ACK 帧进行应答。至此传输过程完成，这时每个节点的 NAV 表明信道空闲，并准备开始下一个传输周期。如图 2.6 所示。

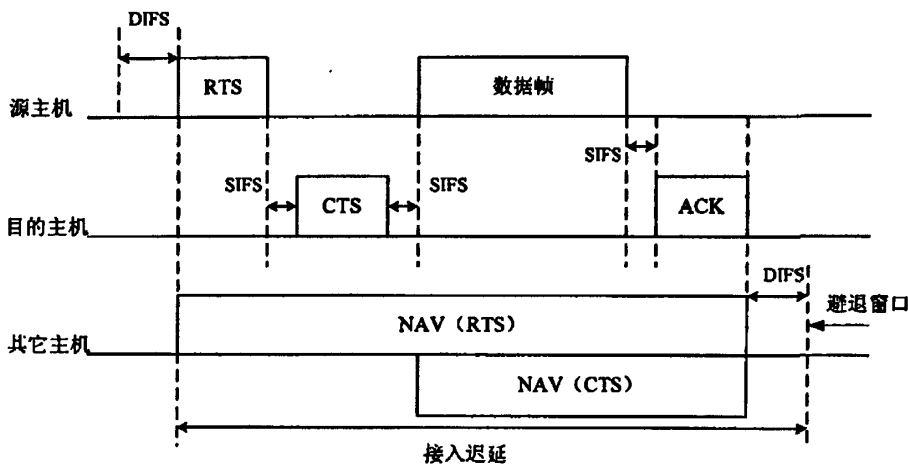


图 2.6 带 RTS/CTS 机制的 DCF 工作过程

使用 RTS/CTS 机制的一个好处是，能够快速地从碰撞中恢复。由于 RTS 和 CTS 都是很短的帧，因此，在发送了 RTS 之后，发送方只需等待较短的时间，就可以判定能否收到 CTS，进而判断是否需要重传。而在没有该机制时，发送方必须至少等待传输整个数据帧以及 ACK

的时间。数据帧的长度通常是 RTS/CTS 帧长的几倍甚至几十倍。

使用 RTS/CTS 也有不利的因素，它可能会导致不可忽略的额外开销，从而带来带宽的浪费和较高的延迟。因为如果数据帧的长度较小，比如小于 100 字节，传输 RTS/CTS 的开销会高于传输数据的开销，造成吞吐率的下降、通信延迟的增加。因此，标准中规定了一个参数，称为 RTS 阈值 (Threshold)，对于超过 RTS 阈值长度的数据帧采用 RTS/CTS 机制，而对于没有超出 RTS 阈值长度的数据帧则只采用基本的不带 RTS/CTS 的 DCF 机制。

### 2.2.2 点协调功能 (PCF)

上述 DCF 分布式协调功能中，由于各 STA 在发送数据前需要对信道进行争用，因此 DCF 无法对时延敏感的业务提供 QoS 保障。因此，802.11 协议定义了点协调功能 (PCF) 来保证 STA 以一定的优先权接入到无线信道中。

STA 的优先权由点协调器 (PC) 来协调。对于一个多区网，PC 与 AP 的功能可以由同一主机来完成。BSS 内的所有主机都要遵守 PCF 媒体访问规则。PCF 发起数据传输的等待时间间隔为 PIFS，PIFS 介于 SIFS 和 DIFS 之间，因而 PCF 比 DCF 的优先级高。

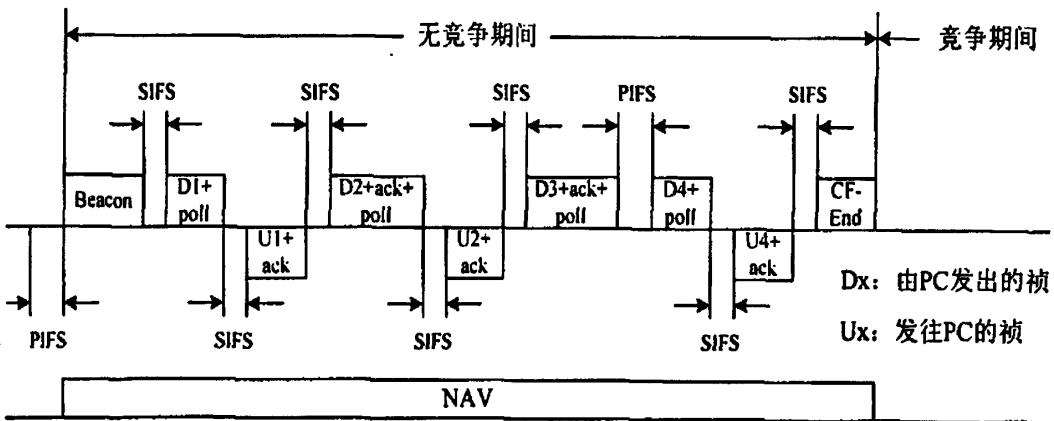


图 2.7 PCF 方式下帧的传输

PCF 的传输时间被划分为重复的周期，即交替出现的竞争周期 (CP) 和非竞争周期 (CFP)。CP 和随后的 CFP 一起组成超帧。在 CFP 阶段采用 PCF 机制接入无线信道，在 CP 阶段则使用 DCF 机制传输数据。超帧由信标帧 (Beacon) 开始。信标帧是一种管理帧，它维持 STA 内本地定时器的同步，并负责传送协议相关的参数。PC 周期性的产生信标帧，下一个信标帧到来的时间被称为目标信标帧传输时间 (TBTT)，每个信标帧中都携带该信息。

PCF 通过无竞争轮询表(Contention Free Polling List)来实现对主机的轮询。在无竞争轮询表中存放所有 CF Aware 主机的 MAC 地址。当该表非空时, PC 应在每一个 CFP 时期轮询表中的下一个主机, 如果在当前 CFP 期间 PC 没有足够时间轮询所有的 CF Aware 主机, 则会在下一个 CFP 时期到来后, 继续对下一个主机的轮询。每个 STA 被 PC 轮询后发送数据, 因而不会发生冲突。

PC 通过发送 CF-Poll 帧轮询有数据要发送的 STA, STA 接收到轮询帧以后给出确认。若 PC 在等待了一个 PIFS 的时间后没有收到 STA 的响应, 可以继续轮询其他的 STA, 一直到 CFP 的结束。PC 通过发送一个特殊的控制帧 CF-End 来指示 CFP 的结束。当被轮询的主机有帧要发送时, 它就在 SIFS 之后发出该帧, 这被称为 CF\_Burst, 此时该主机忽略本机的 NAV 信息, 而不是把它清零。若该主机发送的帧的目的地址不是 PC 时, 则数据帧的接收和确认都遵循 DCF 规则。

### 2.2.3 IEEE 802.11 协议 QoS 的局限性

在 802.11 标准的实际使用中, PCF 很少使用, 而是作为一个可选项, 有些产品供应商并不提供 PCF 功能。现有的 AP 往往工作在 DCF 方式下, 这直接导致 BSS 中的站点处于无线媒体的随机竞争过程中, 各种数据流获得相同的服务, 没有任何优先级之间的差别。

#### 1. DCF 的 QoS 局限性

DCF 模式没有任何措施来支持 QoS。所有的数据业务都是以先进先出, 提供尽力而为的服务方式进行的。同一个 BSS 内的所有 STA 以相同的优先级来竞争无线信道。其中 AP 与其它 STA 具有同等的级别, 但是 AP 的吞吐量却要高的多。同样, 也没有区分各种数据流对于 QoS 的不同要求。当 BSS 内的 STA 数量增加时, 冲突的概率在不断增大, 使得数据的延时、吞吐量都急剧恶化。

802.11 的 DCF 作为一种典型的 CSMA/CA 访问机制, 其访问可分为 3 步: 侦听、竞争、避让。当 DCF 侦听到网络空闲长达 DIFS 后, 并非直接发起介质访问, 而是在等待一个避让时间(Backoff Time)后向网络发起访问, 其中节点通过公式(2.1)来获得避让时间。

可以看到, DCF 的竞争是通过避让实现的, 而避让时间又是由 CW 决定的。每一次竞争过程中避让时间最短的节点获得介质访问权, 这也是所有基于避让机制的本质。但同时可以看到, DCF 是一种 Best-effort 的服务, 对于有带宽和时延需求的数据 DCF 无法提供 QoS 保证。在 DCF 模式下, 所有的节点和数据流通过一个随机的避让算法以相同的概率访问信道。随着网络中节点和数据量的增加, 数据帧的冲突概率增加, CW 也随之增加, 带



来的是数据时延的增加、吞吐量和网络利用率的下降。

## 2. PCF 的 QoS 局限性<sup>[28]</sup>

尽管 PCF 的推出目的在于给 WLAN 提供实时业务的服务，但是由于它固有的三个缺陷使得它对 QoS 的支持力度不够：

1) 随着流量负载的增加，PCF 中低效复杂的中心轮询调度机制降低了 PC 中高优先级业务的性能。因此，在家庭网络中，就用点到点的通信方式来连接 TV 和计算机。但是标准规定，PCF 下的所有通信都必须通过 AP 来传递，这就降低了无线局域网的带宽的性能。

2) 不可预知的信标帧延迟：在 TBTT 时刻，PC 安排信标帧的发送，但是信标帧的发送是通过 PIFS 竞争媒体的，此时必须保证媒体处于空闲状态才能准时发送，否则就会导致紧随其后的 CFP 中的实时业务的延迟。在 802.11 中即使一个站点知道 TBTT 即将到来，它仍然会发送帧，从而严重影响了紧随其后的 CFP 中的实时业务。

3) 轮询站点发送 MSDU 的持续时间是未知的不可控制的：当 PC 轮询一个站点时，站点可以发送任意帧长的数据（最大 2304 字节），这样 MSDU 的发送时间将是任意的不受 PC 控制的，这严重妨碍了 PC 为别的站点提供 QoS 的可操作性。

## 第三章 IEEE 802.11e 的研究和分析

### 3.1 概述

IEEE 802.11 协议标准对具有时延和带宽约束的实时业务无法提供令人满意的支持服务,不能满足 QoS 的要求。为此 IEEE 802.11 工作小组专成立了 e 小组,致力于 MAC 层研究及标准化工作,以实现多媒体业务的服务质量的支持。该小组于 2005 年 11 月发布了可以改善无线局域网视频及音频质量的新标准——802.11e<sup>[4]</sup>标准,802.11e 标准中包含一系列的技术,用于对流量进行优化排序,防止数据包发生冲撞和延时,有效地改善在无线局域网中的音频和视频的服务质量。IEEE 802.11e 协议是 IEEE 802.11 MAC 层增强的 QoS 机制,它主要是对 802.11 协议的 MAC 层功能进行改进,不涉及硬件结构,这也给 802.11e 的应用带来了方便。

IEEE 802.11e 协议中对业务进行了优先级划分,不同优先级的业务有不同的访问无线信道的优先权,使得高优先级的业务可以优先接入信道。IEEE 802.11e 协议定义了四种传输类别,一般分为语音、视频、尽力而为的服务和背景流。数据包进入相应类别的队列,从而获得了不同的优先级别。其中,语音数据包的优先级最高,视频次之。

IEEE 802.11e 定义了一种新的混合协调功能 HCF (Hybrid Coordination Function) 以实现 MAC 层的 QoS 增强。HCF 包括两种信道访问机制:EDCA(Enhanced Distributed Channel Access)和 HCCA(HCF Controlled Channel Access),EDCA 是增强的分布式信道访问机制,是由 DCF 改进而来;HCCA 是 HCF 受控信道访问机制,是由 PCF 改进而来。在无中心站点时,采用 EDCA 工作方式,提供区分优先级的 QoS 服务;当有中心站点存在的情况下,竞争接入方式和无竞争接入方式交替进行,提供资源预留型的接入传输方式。HCF 与 802.11 规定的 DCF 以及 PCF 的关系如图 3.1 所示。

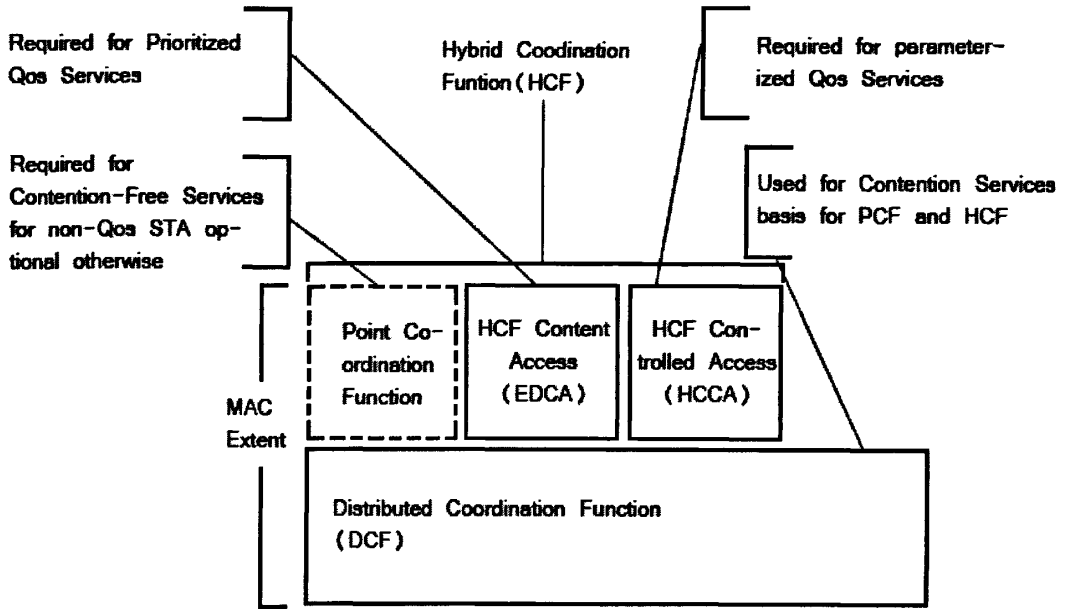


图 3.1 IEEE 802.11e MAC 参考模型

### 3.2 IEEE 802.11e 中的常用术语<sup>[29]</sup>

IEEE 802.11e 是 IEEE 802.11 标准的 MAC 层增强协议，其中增加了许多与 QoS 相关的概念。

- QSTA: 具有 QoS 功能和 HCF 协调功能的 IEEE 802.11 中的 STA，包括 IEEE 802.11 到 WM 的 PHY 接口部分的内容，QSTA 在与 BSS 连接时可以作为 STA 使用。
- QAP (QoS AP): 一种用 QoS 设备来实现接入功能的 AP。QAP 用不同的业务标识区别不同 QSTA 中的业务，提供至少 4 类 AC 来区分用户 QoS 业务的优先级，并且支持 HCF。QAP 功能是 AP 功能的超集，QAP 能够作为 STA 的 AP 功能。
- QBSS: 支持具有 QoS 的 LAN 应用的 BSS，通过 QoS 设备在 WM 中通信来实现。
- QIBSS: 一个或多个站点支持 QoS 功能的独立的 BSS。QIBSS 中的 QSTA 可以只使用根据 MIB 中定义的 AC 参数的 HCF 竞争机制来区分的数据业务。
- AC (Access Category): 接入类别。使用一套 EDCA 信道接入参数的用于竞争 TXOP 的 DCF 变量，每一个 QSTA 可以用 4 个 AC 来支持 8 个用户优先级。
- CFB (Contention Free Burst): 一套帧变换序列，由 SIFS 分隔、由单个 WSTA 初始化。CFB 是由 WSTA 在接收到一个 QoS 轮询帧后（例如，在 CP 中的 CAP 内）或获取 EDCA 竞争时初始化。CFB 存在于 TXOP 内。

- CFP(Content Free Period): 在基本业务组 PCF 或 HCF 处于激活状态时的时间周期, 是点协调器(PC)或混合协调器(HC)分配的传输权, 允许无线媒体 BSS 成员间的帧无竞争交换。
- CP (Contention Period): 基本业务组 PCF 或 HCF 处于激活状态时的时间周期, 在无线媒体中通过使用 CSMA/CA 来确定传输权, 或者由 QSTA 通过 HC 来分配传输权。
- HCF(Hybrid Coordination Function): 合并与增强基于竞争和基于轮询的接入方法, 为 QSTA 提供具有优先级和参数的 QoS 接入 WM 的协调功能, 并继续支持非 QoS 站的尽力而为的传输。HCF 向上兼容 DCF 及选择性包括 PCF 部分内容, 它支持统一的帧格式和交换序列, QSTA 在 CP 和 CFP 周期都可以使用它。
- HC: 点协调器, 作为 QoS 功能的一部分, 实现帧交换和定义在 HCF 功能的 MSDU 处理。HC 工作在 CP 和 CFP, HC 实现带宽管理包括给 QSTA 的 TXOP 的分配和控制竞争时隙间隔。HC 由 QAP 来配置。
- TXOP (Transmission Opportunity): QSTA 具有开始向 WM 传输权的时隙时间。TXOP 通过开始时间和最大周期来定义。在 EDCA 规则下的 CP 中, 每一个 TXOP 开始于媒体确定空闲开始时或在 QSTA 从 HC 收到 QoS 的 CF 轮询帧。在 EDCA 周期, TXOP 限制在 QBSS 范围, TXOP 由信标帧来限制, 而轮询 TXOP 周期由包括 QoS 的 CF 轮询帧功能的帧头来规范。在每一个 TXOP 限制期内, 发送什么内容由获得 TXOP 的 QSTA 的 MAC 实体来决定。
- TC(Traffic Category): 业务种类是具有不同用户优先级的 MSDU, 与链路上的其它 MSDU 相关, 可以在高层实体上显示出来。提供业务种类只是意味着 MAC 实体支持在 MAC 数据业务内的 QoS, MAC 实体为使用 Traffic Category Identifier (TCID) 值的 MSDU 确定优先级。
- TID(Traffic Identifier): 一种可以被高层实体用来区分 MSDU 和 MAC 实体的标识符, 它可以支持 QoS 功能。IEEE 802.11e 中有 16 种可能的 TID 值, 其中 8 个识别 UP, 另外 8 个识别业务流 (TSID)。
- TS(Traffic Stream): 业务流是一组在特定业务规范 (TSPEC) 中为 MAC 传递 QoS 参数的 MSDU, 业务流只对 MAC 数据业务中支持 QoS 的 MAC 实体有意义。一个 WSTA 可以同时支持 8 个来自 HC 的业务流和 8 个发往 QSTA 的业务流。由于具体实现中的限制, 它实际支持的数量会少于理论值。一个 HC 可以同时支持与相连 WSTA 间的 8 个下行和上行业务流, 同样, 它实际支持的数量会少于理论值。

- TSPEC(Traffic Specification): 一种用来描述由 WSTA 和 HC 协商产生的业务流的 QoS 特性的业务规范。业务规范常常包括用户优先级, 选择性地包括目标的定量、限制、业务属性(如 MSDU 的大小, 到达速率)、业务特性(如固定和可变的数据速率、最大传递时延、最大时延抖动等)和其它 MAC 链路选项(如确认机制)。

### 3.3 增强型分布式协调访问机制(EDCA)

增强型分布式协调访问机制(EDCA)是对原 802.11 标准中分布式协调功能 DCF 的扩展, 也是基于竞争的方式来访问信道。它定义了四种访问类别 AC(Access Category), 使用 8 种用户优先级 UP(User Priority)来接入无线媒体, 为不同的业务类型提供不同的业务等级, 使得那些实时业务有较高的优先级接入信道, 见表 3.1。

表 3.1 业务优先级与接入类别关系表

优先级	UP	AC	业务类型
<p style="text-align: center;">low</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">high</p>	1	AC_BK	Background
	2	AC_BK	Background
	0	AC_BE	Best Effort
	3	AC_BE	Best Effort
	4	AC_VI	Video
	5	AC_VI	Video
	6	AC_VO	Voice
	7	AC_VO	Voice

#### 3.3.1 IFS 机制

EDCA 中使用的是一个新的参数: 仲裁帧间间隔 AIFS(Arbitration IFS)。AIFS 是工作于 EDCA 模式的 QSTA 要获得传输机会时, 必须等待的信道空闲时间。相对于 DCF 中的参数 DIFS,  $AIFS \geq DIFS$ , AIFS 不是一个固定值, 而是根据不同的访问优先级有所区别。较高的优先级就对应了较短的平均等待时间和避让时间, 也就是说较高优先级下, AIFS 相应就较小。从而保证高优先级的服务能得到较好的满足。AIFS 值由以下公式给出:

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime \tag{3.1}$$

其中  $AIFSN[AC]$  是等待信道空闲时的时隙个数。对于不作为 AP 的 QSTA 而言,  $AIFSN[AC]$  最小值为 2。对于 AP (QoS AP),  $AIFSN[AC]$  的值一般建议为 1。  $AIFSN[AC]$  取值通过 QAP 发送的 beacon 帧和探测响应帧告知关联在该 QBSS 中的 STA 或 QSTA(QoS STA)。

对于语音访问类的数据, AIFS 值应该设置的小一些; 对于电子邮件和 FTP 类的数据, AIFS 值应该设置的大一些。语音要求延迟时间短, 小的 AIFS 值意味着语音数据能够比其它对时延不太敏感的数据更快地开始下一个阶段的网络竞争。

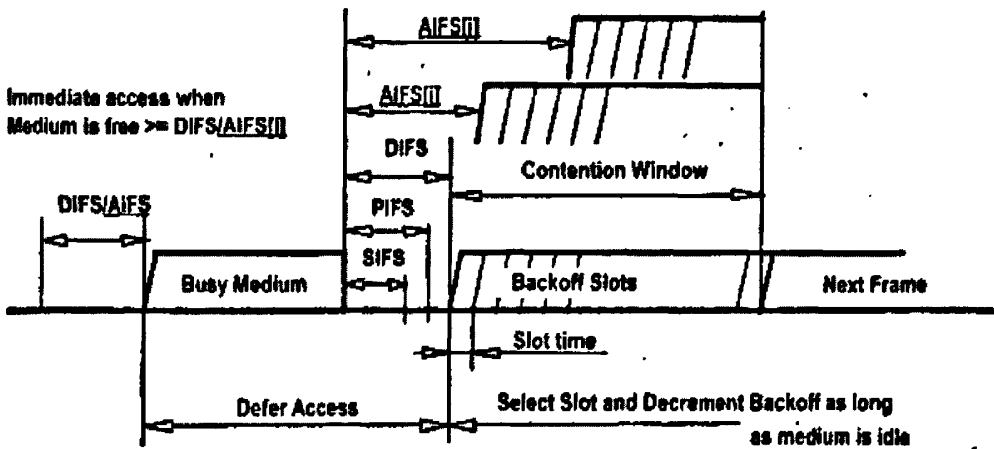


图 3.2 各类 IFS 之间的关系

### 3.3.2 竞争窗口 (CW) 机制

EDCA 接入方式采用的是带冲突避免的载波侦听多址协议 (CSMA/CA), 因此与 DCF 类似, 在 EDCA 方式下, 如果信道空闲, 无线站点在发送数据前必须等待一个 AIFS 的时间间隔, 若在此 AIFS 的时间间隔之后发现信道空闲, 接着开始退避过程。在等待了一个 AIFS 后, 每个退避过程将计时器设置成  $[1, CW+1]$  之间的一个任意数, 取代了 DCF 中的  $[0, CW]$ 。

传统的 DCF 中, 在计数器减到 0 之前如果检测到信道忙, 则只有等待 DIFS 时间并检测到信道空闲以后才继续进行递减计数。EDCF 和传统的 DCF 不同的是, 在 AIFS 期间检测到信道空闲以后, 在 AIFS 周期结束前的最后一个时隙间隔的开始时刻退避计数器减 1, 而传统的 DCF 则在 DIFS 结束后的第一个时隙的开始时刻减 1。传送失败后改变 CW 的策略也有所不同。传统的 DCF 中是将 CW 简单的加倍, 而 EDCF 则根据一个坚持因子 (PF—Persistence Factor) 来修正原先的 CW, 也即在 DCF 中  $PF=2$ 。DCF 的 CW 和 EDCA

的 CW 关系如下式所示：

$$CW_{new}[AC] = (CW_{old}[AC] + 1) \times PF - 1 \quad (3.2)$$

不同的 AC 具有不同的 CW。对于某个 AC 所对应的竞争窗口  $CW[AC]$ ，其取值范围为  $(CW_{min}[AC], CW_{max}[AC])$ 。在典型参数中，音频数据的  $CW_{min}[AC]$  具有最小值，并且它的  $CW_{max}[AC]$  等于视频数据的  $CW_{min}[AC]$ ，这样保证了在任何情况下音频数据都具有最高的优先级。

$$\text{退避时间 } Backoff[AC] = rand(1, CW[AC]) \times SlotTime。 \quad (3.3)$$

由式(3.3)可以看出，优先级越高， $CW[AC]$  越小，该 AC 的退避时间就越小，从而保证了该类别可以以较高优先级接入信道。

图 3.3 显示了具有 4 个传输队列的 IEEE 802.11e MAC，每个队列作为独立的竞争实体，都有自己的 AIFS 和退避计时器。每个类别独立竞争信道，独立启动退避过程。如果多个类别的退避计时器同时达到 0，即多个队列同时完成退避时，在同一物理节点不同的类别存在虚拟冲突，可通过节点内的调度器解决。选择具有最高优先级的帧传输，其它的帧再次进入退避状态。

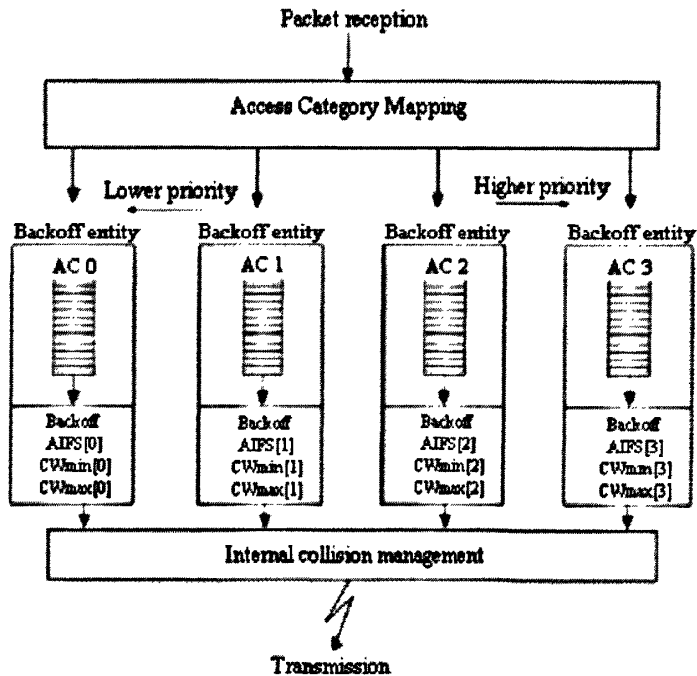


图 3.3 同一站点 4 个不同 AC 的发送队列

此外  $CW_{min}$  和  $CW_{max}$  也是 QAP 通过 beacon 帧或其它帧通知该 QBSS 中的 STA 或 QSTA，并且各个 AC 的  $CW_{min}$ 、 $CW_{max}$  都具有一定的关系。AIFS、 $CW_{min}$  和  $CW_{max}$  应该结合在一起进行设置。这样，高优先等级的数据在大多数情况下都可以获得访问网络的权限。为高优先等级数据设置的 AIFS 值与  $CW_{max}$  值相加的和应该大于低优先等级数据设置的 AIFS 值与  $CW_{min}$  值相加的和，这样低优先等级的数据就不会完全被封锁。

### 3.3.3 TXOP 机制

此外 EDCA 机制还引入了一个很重要的概念 TXOP (Transmission Opportunity), TXOPLimit 是指 QSTA 竞争到信道后可以占用信道的最大时间。TXOP 作为一个准备发送数据的站的时间间隔，与其开始时间及最大持续时间有关。TXOP 可以是 EDCA-TXOP (通过竞争产生) 或者 Polled-TXOP (由 HCF 授权的)。一旦 QSTA 竞争到信道并成功发送一帧后，如果仍然有数据帧要发送，则该 QSTA 只需等待 SIFS 间隔后便可继续发送下一个数据帧，直到达到 TXOP 的限制值或没有数据帧要发送时结束，此时 QSTA 开始新的下一轮的竞争。如图 3.4 所示。

一个访问类别的 TXOP 用于定义一次发送的最大长度，如果要发送的数据太大不能在 TXOP 限制内发送，这个站点就把这个数据分多次发送。每个 AC 声明 TXOP 的间隔限制， $TXOPLimit[AC]$  不应超过传送最大尺寸数据帧的时间。由于语音数据包很短，所以对于语音数据的 TXOP 限制很小。对于 FTP、电子邮件和网络数据来说，应该设置较大的 TXOP 限制，这样当发送数据的时候，就不需要把数据分多次发送了。

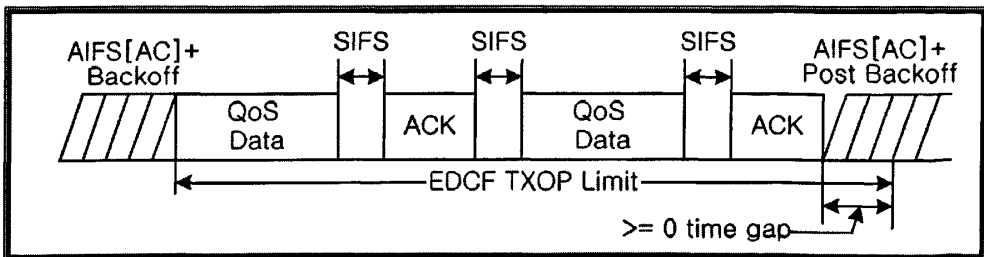


图 3.4 TXOP 限制期内的数据传输

AIFS、 $CW_{min}$ 、 $CW_{max}$  以及 TXOP 统称为 EDCA 参数。EDCA 参数中还定义了一个最大 MSDU 生存时间，一旦某个帧到达 MAC 层的时间超过了该 AC 的生存时间，就丢弃该数据，



这一特性有时很有用，因为对于一些实时业务来说，过时的数据没有意义。表 3.2 中给出了 QSTA 的 EDCA 参数的默认取值。

表 3.2 EDCA 参数表

AC	CWmin	CWmax	AIFSN	TXOPlimit
AC_BK	aCWmin	aCWmax	7	0
AC_BE	aCWmin	aCWmax	3	0
AC_VI	$(aCWmin+1)/2 - 1$	aCWmin	2	6,016 ms
AC_VO	$(aCWmin+1)/4 - 1$	$(aCWmin+1)/2 - 1$	2	3,264 ms

其中背景流和尽力而为的业务的 TXOP 的最大持续时间均为 0。最大持续时间为 0 表明这两类业务在竞争到信道时，除了可能的 RTS/CTS 帧交换外，每次只能发送一个 MSDU 或 MMPDU。

### 3.4 HCCA 机制

HCCA (HCF controlled channel access) 有点类似于 802.11 中的 PCF 机制，它同 PCF 一样，工作于具有 CP 和 CFP 的超帧之中，它增强了提供给 QoS 站点的基于竞争和基于轮询的访问无线媒体的方法以便进行优先级和参数化的 QoS 业务传输。HCCA 是由位于 QAP 内部的 HC (Hybrid Coordinator) 来进行调度的，HC 负责轮询的管理。由于 AP 的高优先级，HC 可以方便地把媒介访问权分配给自己或其它的 QSTA。无论什么时候，当 HC 想要发送 MSDU，并且在检测到无线媒体持续处于空闲状态的时间超过 PIFS (PIFS 小于 DIFS) 时，就给自己安排 TXOP 用于 MSDU 发送。这样就使得 HC 的优先级大于 EDCA。然而，HCCA 与 802.11 的 PCF 也有很大的不同：HCCA 既可以工作在 CP 也可以工作于 CFP。

在 CP 中，每个 TXOP 的开始基于两种情况，1) 在 EDCA 的规则下，确定媒体可以使用。例如等待 AIFS+退避过程，退避最早结束的站点获得 TXOP；2) 站点接收到 HC 的一个特定的轮询帧 QoS (+) CF\_poll 帧。在无线媒体处于空闲状态持续 PIFS 时 HC 发出的 QoS (+) CF\_poll 帧，且该帧无需回退过程。由于 PIFS<DIFS<AIFS，因此 HC 可以使用它的高优先级媒体访问机制在 CP 中发出 QoS (+) CF\_poll 帧以便指定被轮询的站点获得 TXOP。

在 CPF 中, 每个 TXOP 的开始时刻和最大持续时间由 HC 在使用 QoS (+) CF\_poll 帧时所规定。在 CFP 中站点不去通过竞争获得对媒体的控制。所以仅当 HC 发出了 CF\_end 帧, 此时 CFP 结束。

HCCA 作为 802.11e 的一个组成部分, 它需要随时获得需要轮询站点的及时信息, 这有点类似于 802.11 的轮询表, 但是由于 802.11e 除了考虑哪一个站点需要轮询外还需要考虑每个站点中的每个业务的服务优先级。802.11e 引入了“可控竞争”的概念, 即 CC, 它允许站点向 HC 请求以便获得轮询 TXOP 的分配, 从而不必通过 EDCA 机制获得 TXOP。当开始一个 CC 过程时, 首先 HC 产生并广播一个子类为 CC 的控制帧, 它包括优先级掩码, 一次 CC 过程中最大允许的请求站点个数及持续时间。这里优先级掩码参数对站点最为重要, 它表示了 HC 目前所支持的业务优先级的种类, 使用 8 个比特表示对应于 8 个优先级服务, 比特位是 1 表示支持对应于该位的优先级服务, 反之则不支持。当需要请求轮询 TXOP 的站点收到 CC 帧后, 该站点通过 CC 的响应预约请求帧 (RR) 响应 HC 的 CC 帧, RR 帧中同样包含有优先级掩码, 定义同 CC 帧一样, 它指出了站点业务需要获得何种优先级服务, 当 HC 收到这样的 RR 帧后, 就可以合理的给该站点分配 TXOP 的最大持续时间和其它必要的参数。

接入点能够通过使用传输规范 (TSPECs) 控制网络工作量, 一个接入点能够要求每一个站点为每一个访问类发送一个传输规范请求。这个请求将具体说明这个站点为每一个访问类申请的数据量以及可以承受多长时间的延迟。如果一个接入点计算它从各个站点收到的请求超过了网络的容量, 它将拒绝这些请求。如果一个申请遭到拒绝, 提出申请的站点就不再发送那种访问类的数据, 并且必须把这种访问类的数据结合到优先等级低的数据中。

由于 802.11e 引入了 TXOP 的机制, 所有的数据传输必须获得一个 TXOP 才可以发送, 而 TXOP 最大持续时间正是该数据传输的时间, 它由信标帧和 QoS (+) CF\_poll 帧所提供, 而这两个帧完全由 HC 所控制和发布, 可以认为整个数据的发送时间完全由 HC 所掌握, 所以信标帧在 802.11 情况下的延迟以及轮询站点发送 MSDU 的持续时间是未知和不可控制的缺陷在 802.11e 中得到了克服。

EDCA 和协调功能的节点 (PCF 和 HCCA) 以同一方式共存, 它们均允许在同一个 (Q) BSS 内共同操作。当一个 PC 在一个 BSS 内运作时, 轮流使用 PCF 和 DCF 访问方法, 即 CFP 紧跟着是 CP。当一个 HC 在一个 QBSS 内运作时, 在每个超帧里有一个 CFP 和一个 CP, 终端将把这个 HC 视为是一个 PC, 它仅在 CP 期间使用 DCF 访问方法。HCCA 访问方法 (基于轮询和竞争) 在整个超帧过程均同时运作。在发送一对帧交换序列的时间间隔里, 并行操

作允许基于竞争和基于轮询的访问方法轮流使用。

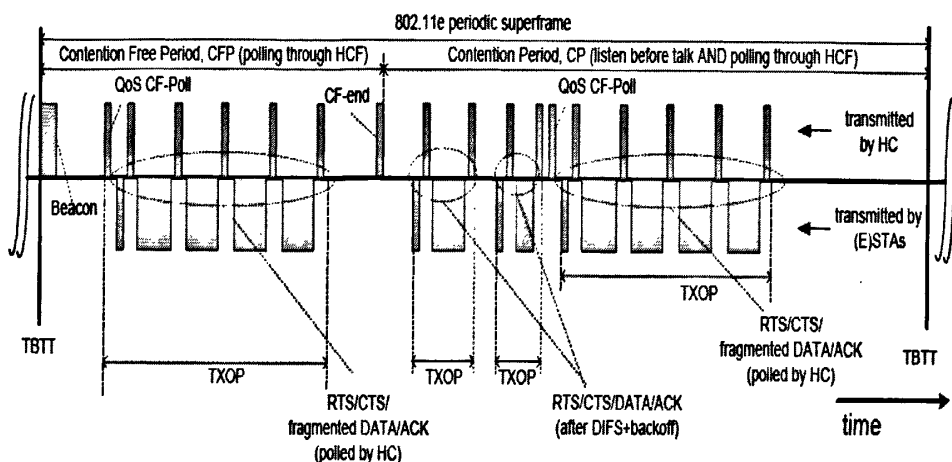


图 3.5 IEEE 802.11e 的超帧结构

### 3.5 EDCA 与 HCCA 的比较

总体上来说，EDCA 改进了 DCF，提供了不同优先级 AC，并且提供了 TXOP 来增加传输率，而且基于市场来说，由于 EDCA 是分布式的结构，并且易于实现，可能会成为市场主流。但是 EDCA 难以基于业务流提供保障。而 HCCA 则能够基于每个站点的特定业务需求提供无竞争的保证服务。但是 HCCA 是集中式的，市场前景不好。另外，尽管 QAP 对请求资源的决定是基于每个独立业务流的，但是 HCCA 的 TXOP 的分配是基于每个 QSTA 的，这样，每个 QSTA 还必须提供把 TXOP 分配给其独立业务流的方法。

### 3.6 IEEE 802.11e 的其他 QoS 机制

为了提高效率，IEEE 802.11e 还提出了其他可选的 QoS 机制，主要包括：DLP, Block ACK, No ACK, Piggyback 和 APSD 技术。可选技术能够在特定的网络环境中发挥出比较好的效果，减轻负载，增加网络利用率。

#### ● 直接链路传输 DLP

DLP (Direct Link Protocol) 是指在同一 QAP 联系的在基本服务集合 BSS 中，两个 QSTA 站点能够直接传输数据，这样不借助 QAP 的直接传输提高了信道利用率。但是，实现直接发送功能需要 QAP 和 WSTA 共同支持，QAP 可以跟踪 WSTA 是否希望直接发送，以便参与

管理直接通信。直接通信的过程包含了三个步骤：

- 1) 登记：WSTA2 向 QAP 发送一个请求，提出希望参加直接通信，并且说明自己具备直接通信的能力。
- 2) 位置发现过程：通过与 QAP 的管理帧的交换来实现，它包括以下 2 个步骤：
  - 设 WSTA1 为发送 WSTA，它有发往 WSTA2 的业务流，如果 WSTA1 的 WARP 中没有 WSTA2 的入口，它必须向 QAP 发送一个查询 MMPDU，来确定具有特定 MAC 地址的 WSTA 是否可以进行了直接通信。
  - QAP 收到 WSTA1 的位置发现请求帧后，发现请求的地址与 WSTA2 对应，同时，WSTA2 希望也具有直接通信的能力，QAP 就会向 WSTA1 返回一个标志成功的响应帧。
- 3) 直接协商过程：在成功进行位置发现过程之后，由两个 WSTA 间的管理作用帧交换完成。WSTA1 向 WSTA2 发送一个直接协商请求 MMPDU，选择它希望使用的数据速率和功率等级。WSTA2 向 WSTA1 发送一个直接通信建立应答 MMPDU，它用同样的数据速率接收响应，包含同样的事务标记。

#### ● Block ACK

Block ACK (Block Acknowledgement) 是指在获得信道使用权后，QSAT 站点能够无需竞争，连续发送多个数据帧(帧间间隔一个 SIFS 时隙)，只接受一个 ACK。该机制减少了 ACK 以及等待时间，大幅增加了信道利用率。

#### ● NO ACK

NO ACK (No Acknowledgement) 是指对于某些应用，IEEE 802.11e 允许不收发 ACK。该机制对于一些特殊业务如非常关注于延时但对丢包不甚敏感的业务很有用。

#### ● Piggyback

Piggyback 是指在轮询帧或 ACK 帧中捎带数据，以此来减少网络负载。

#### ● APSD

APSD (Automatic Power Save Delivery) 是指缩短周期、重复执行低功耗模式的节能方式。

### 3.7 IEEE 802.11e 的 QoS 小结

IEEE 802.11e 主要关注于 MAC 层方案，提出了 HCF 访问方式，主要考虑通过区分服务和轮询结合的方式提供服务质量保障。其中 HCCA 能够通过轮询，基于每个站点的特定业

务需求提供无竞争的保证服务。但是由于它是集中式的服务，实现复杂且扩展性不强，一般应用于某些特定的网络。

EDCA 则改进了 DCF，提供了基于不同优先级 AC 的区分服务，分布性和扩展性很强，应用前景较为广泛。然而，EDCA 难以基于业务流提供保障，而且如果没有合适的接入控制策略，EDCA 无法调节控制网络状态，保障服务质量。由于 EDCA 是基于竞争的接入，接入控制算法有其复杂性和相关性，IEEE 802.11e 协议中并没有为 EDCA 指定接入算法，而是让用户根据组网情况自定义算法。同时在传输时间上也具有不确定性，因为只是统计意义上的分级，并不能在任何时刻给优先级高的数据流以资源保证，尤其是在流量大的时候，由于冲突很频繁，即使优先级高的数据流也将遭受很大的时延，尽管它的平均时延比优先级低的数据流要小。所以 EDCA 只能在一定程度上保证 QoS，对于会话型等实时性较强的业务的 QoS，仍然缺乏有效的支持。

## 第四章 动态分配 TXOP 极限值的算法

### 4.1 概述

TXOP (Transmission Opportunity) 是 802.11e 最重要的特性之一, TXOP 定义了 QSTA 有权在无线媒介上发送帧交互序列的时隙时间。TXOP 对于 QoS 的实现至关重要, 包括开始时间和最大持续时间 (TXOPLimit)。TXOP 可以是 EDCA-TXOP (通过竞争产生) 或者 Polled-TXOP (由 HCF 授权的)。轮询 TXOP 周期由包括 QoS 的 CF 轮询帧功能的帧头来规范。在 EDCA 模式中, TXOP 限制在 QBSS 范围, TXOP 由信标帧来限制, TXOPLimit 一般是默认的常数值。由于 EDCA 是基于竞争的, 因此各站点 TXOP 的开始时间由退避算法获得。

一旦 QSTA 竞争到信道并成功发送一帧后, 如果仍然有数据帧要发送, 则该 QSTA 将在 TXOPLimit 时间内获得 TXOP 的延续, 即该 QSTA 只需等待 SIFS 间隔后便可继续发送下一个数据帧, 形成连发的情形延时较低。而其他站点则至少需要等待 DIFS 时间间隔后方可竞争到信道。TXOP 在三种状况下停止, 此时 QSTA 开始新一轮的竞争: 第一, 数据帧传输完毕; 第二, 数据帧的传输出现了错误; 第三, 在 TXOP 的极限值范围内没有足够的时间再发送下一帧 (包括数据以及相应的 ACK)。

TXOP 的出现提高了无线网络的通信效率并降低了时延, 它使高带宽通信业务 (语音、视频) 具有对无线信道访问的最大权利, 保证了这些多媒体业务的实时性。

### 4.2 定值 TXOPLimit 的缺陷

TXOP 提高了语音、视频等多媒体实时业务的 QoS, 但是每个传输类别 AC 的 TXOPLimit 参数值采用静态设置, 并没有考虑到信道的负载情况以及误码等特征, 由此也引发了相应的不公平性。

在多速率的 IEEE 802.11e 网络中, 在一个给定 TXOP 期间内, 站点实际的有效吞吐量取决于站点的数据传输速率<sup>[7]</sup>。如图 4.1 所示。因此, 如果站点的 TXOP 值固定不变, 则吞吐量上的不公平就不可避免了。假设两个站点传输的帧具有相同的优先级, 但两个站点的传输速率不同, 则实际的吞吐量将不同。

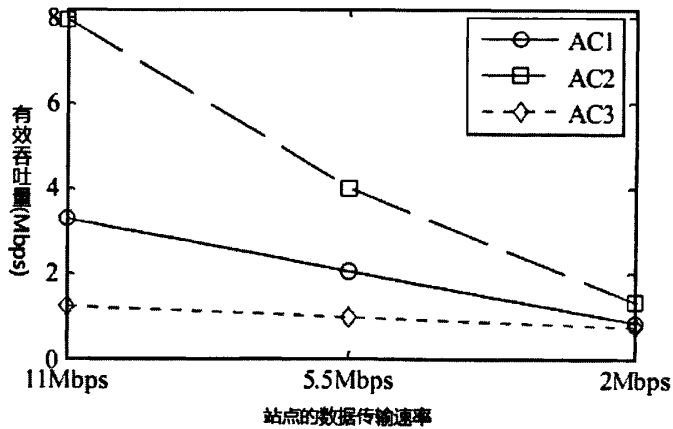


图 4.1 一个 TXOP 期内的有效吞吐量

一般所有的下行流方向的传输都要通过 AP，而下行流的优先级又高于上行流，在这种传输不对称的情况下，如果所有站点包括 AP 都使用静态值的 TXOP，那必然导致不公平性现象的发生。

如果网络中有  $N$  个无线站点，则对于每个 AC 来说就有  $N$  个上行流实体竞争信道，而只有一个下行流的实体 AP。由此 AP 要将来自有线网络的通信分发给这些无线站点，这将导致上行流方向与下行流方向吞吐量的不均衡。

### 4.3 算法描述

针对以上问题，许多研究者提出了相应的改进算法：使 AP 获得一个较大的 TXOPLimit 值，以提高下行流方向的吞吐量；或是让上行流方向的无线站点竞争信道。有的文章中假设下行方向的流体积要大于上行方向的<sup>[12]</sup>。虽然实际情况大多如此但并不是所有情况均如此，比如在一些情况下，上行传输的要求远远高于下行方向，此时无线站点所需的带宽资源将远大于 AP。

在 CP 期间合理有效的分配带宽资源能够提高多媒体传输业务的吞吐量、降低时延，特别是当网络处于负载较重、近乎饱和状态的时候。

本文提出一个动态设置 TXOPLimit 值的算法。根据当前无线信道的传输条件，动态改变信道资源，在 AP 中定期修改 TXOP 的极限值。与以往研究不同的是当上行方向的传输请求大于下行方向时，此算法也可以降低 AP 的 TXOPLimit 值以减少 AP 对信道的占用时间。

由于在网络服务质量中，丢包率是一个非常关键的因素，并且根据 IEEE 802.11e 标准可以很方便的获得，因此在算法中设定一个观察时间间隔，比如 100ms，将每一个观察

期内数据包丢失的总数作为一个衡量的标准。记  $L(\theta)$  表示第  $\theta$  个观察期内丢包的总数。

$$\text{定义: } L(\theta) = LD(\theta) - LU(\theta) \quad (4.1)$$

其中  $LD(\theta)$  表示第  $\theta$  个观察期内, 某个 AC 队列下行流丢包的总数。

$LU(\theta)$  表示第  $\theta$  个观察期内, 某个 AC 队列上行流丢包的总数。

当  $|L(\theta)|$  增大时, 也就是  $LD(\theta)$  与  $LU(\theta)$  的差异越来越大时, 说明上行流方向与下行流方向的不均衡性正在加大。因此更多的信道占有时间应分配给相应的上行流或下行流。

同时考虑到站点速率不同对有效吞吐量的影响, 引入一个移动站点速率自适应的 TXOP 调节机制。站点传输速率大的将被赋予一个相对较小的 TXOP 最大持续时间值。相反, 若传输速率小则赋予相对较大的 TXOP 最大持续时间值。

## 4.4 TXOP 值的动态调节

### 4.4.1 符号约定

为了以下叙述的方便, 现约定一些记号:

- $DTXOP_{AP}(\theta)$  : 表示第  $\theta$  个观察期内 AP 的动态 TXOPLimit 值
- $DTXOP_{STA}(i)$  : 表示移动 QSTA 站点 AC 队列  $i$  的动态 TXOPLimit 值
- $TXOP_i$  : 表示 AC 队列  $i$  的默认 TXOP 值
- $RATXOP_j$  : 表示  $j$  站点 AC 队列  $i$  的速率自适应 TXOP 值
- $AvgP_i$  : 表示任一站点 AC 队列  $i$ , 在默认值 TXOP 期间内传输数据包的平均值
- $t_{ij}(data)$  : 表示  $j$  站点 AC 队列  $i$  数据的传输时间, 包含了 MPDU 和 ACK 的传输
- $n$  : 表示站点总数
- $P_{ij}$  : 表示在  $TXOP_i$  内  $j$  站点 AC 队列  $i$  传输的数据包的数目

### 4.4.2 移动站点 TXOPLimit 值的速率自适应机制

前文中提到, 在一个给定 TXOP 期间内, 站点实际的有效吞吐量取决于站点的数据传



传输速率。因此，站点传输速率大的将被赋予一个相对较小的 TXOPLimit 值。相反，若传输速率小则赋予相对较大的 TXOPLimit 值。举例来说：有 3 个站点，A、B、C 站点的速率分别为 11Mbps、5.5Mbps、2Mbps，则由以上机制，C 站点的 TXOP 值将要大于 A、B 站点，A 站点速率最大，相应的其 TXOP 值也是三者中最小的。

基于以上机制，如果在速率自适应的 TXOP 时间段内，所有站点发送的数据包数目相同，那么就得到了吞吐量意义上的公平。

上述所指的相同数目的数据包来源于原默认值 TXOP 期间内，所有站点相同传输类别的数据包的平均值。

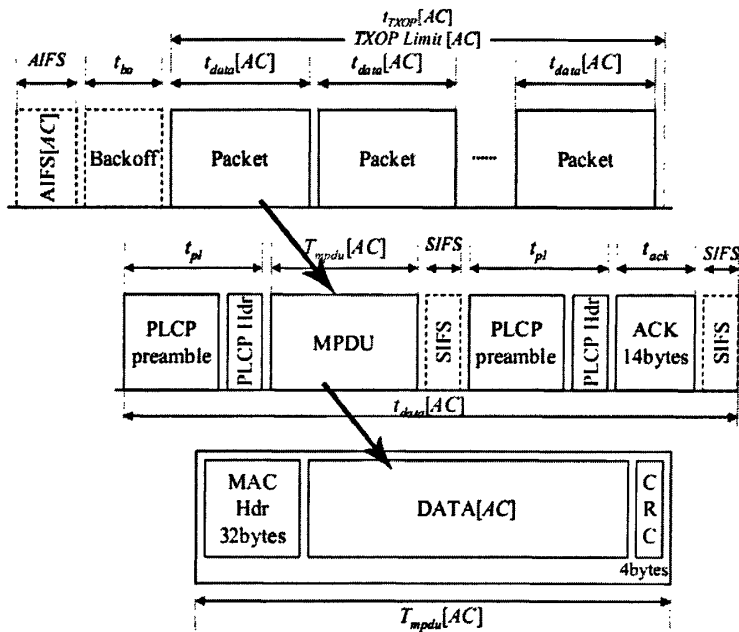


图 4.2 多速率 IEEE 802.11e 网络一个 TXOP 期内的成功传输

由图 4.2 我们可以得到：

$$t_j(data) = t_j(pl) + t_j(mpdu) + SIFS + t_j(pl) + t_j(ack) + SIFS \quad (4.2)$$

其中  $SIFS = 10\mu s$ ， $t_j(pl) = 96\mu s$  [2]；

$t_j(ack)$  为 14bytes 应答帧的传输时间；

$t_j(mpdu)$  表示 j 站点类别 i 的 MPDU 的传输时间；

可由以下方程得到

$$t_{ij}(mpdu) = \frac{(32 + Frame\_size < AC = i > + 4) \times 8}{rate_j} \quad (4.3)$$

其中  $rate_j$  表示 j 站点数据传输的速度；

$Frame\_size < AC = i >$  表示类别 i 的帧结构大小。

由式 (4.2) 求出的 j 站点类别 i 数据的传输时间  $t_{ij}(data)$ ，可以得到在 i 类别默认值

TXOP 期间内 j 站点 i 类别传输的数据包数目，即  $P_{ij} = \frac{TXOP_i}{t_{ij}(data)}$ ，又因为

$$TXOP_i \geq P_{ij} \times t_{ij}(data)$$

所以  $P_{ij}$  的值要向下取整，即

$$P_{ij} = \left\lfloor \frac{TXOP_i}{t_{ij}(data)} \right\rfloor \quad (4.4)$$

若求出  $P_{ij} < 1$ ，则 j 站点至少传输了一个数据包，所以当  $P_{ij} < 1$  时令  $P_{ij} = 1$

由方程 (4.4) 我们可以求出任一站点 AC 队列 i 在默认值 TXOP 期间内传输数据包的平均值  $AvgP_i$ ，即

$$AvgP_i = \left\lfloor \frac{\sum_j P_{ij}}{n} \right\rfloor \quad (4.5)$$

由方程 (4.2) (4.5) 可得 j 站点 AC 队列 i 的速率自适应 TXOP 值：

$$RATXOP_{ij} = AvgP_i \times t_{ij}(data) \quad (4.6)$$

#### 4.4.3 AP TXOPLimit 值的动态调节

下面将利用方程 (4.6) 所得到的移动站点的速率自适应 TXOPLimit 值，求得 AP 的动态 TXOPLimit 值。

本文将多媒体实时业务作为关注的重点，因此将针对语音、视频分别进行讨论：

##### (一) 针对语音通信的传输

语音通信一般是对称的，故可以得到：

$$DTXOP_{AP}(\theta) = N(\theta) \times DTXOP_{STA}(i) \quad (4.7)$$

其中： $N(\theta)$  表示第  $\theta$  个观察期内，语音通信所涉及的无线站点数；

$$DTXOP_{STA}(i) = \left\lfloor \frac{1}{n} \sum_j RATXOP_{ij} \right\rfloor \quad (4.8)$$

方程 (4.8) 中对网络中移动站点 AC 队列  $i$  的速率自适应 TXOP 值  $RATXOP_{ij}$  进行算术平均，得到的平均值向下取整即得移动 QSTA 站点 AC 队列  $i$  的动态 TXOPLimit 值  $DTXOP_{STA}(i)$ 。

根据方程 (4.7)，如果 BSS 中有  $N$  个涉及发送/接收的站点，则 AP 可获得近一半的信道资源，而不是默认值 TXOP 下只能得到的  $\frac{1}{N+1}$ 。这样可以使上行流方向与下行流方向语音通信保持平衡。这也正是语音通信的对称性所需求的。

## (二) 针对视频通信的传输

视频通信可以是对称的，如视频会议，也可以是不对称的，如流视频。这样一来就容易导致上行流与下行流之间的不均衡。利用前文中所提及的丢包差值  $L(\theta)$  判定当前信道的通信条件。

设  $\rho$  为  $|L(\theta)|$  的门限值，用以判定当前网络中上行流方向与下行流方向传输的均衡性。

- $|L(\theta-1)| < \rho$  时，第  $\theta$  个观察期内的 AP 的 TXOP 值只要在前一个观察期内 TXOP 值的基础上体现出业务流的实时变化即可。
- $|L(\theta-1)| \geq \rho$  时，说明上行流方向与下行流方向的不均衡性已达到需要修正的程度：
  - a)  $L(\theta-1) > 0$ ，即  $LD(\theta-1) > LU(\theta-1)$  时，说明 AP 对信道的占有时间应有所增加；
  - b)  $L(\theta-1) < 0$ ，即  $LD(\theta-1) < LU(\theta-1)$  时，说明移动站点对信道的占有时间应有所增加，相应的 AP 对信道的占有时间应减少。

通过上述分析，得到算法如下：

- $|L(\theta-1)| < \rho$ ，则有

$$DTXOP_{AP}(\theta) = DTXOP_{AP}(\theta-1) \times \frac{N(\theta)}{N(\theta-1)}$$

- $|L(\theta-1)| \geq \rho$ ，则有

$$DTXOP_{AP}(\theta) = DTXOP_{AP}(\theta-1) \times \frac{N(\theta)}{N(\theta-1)} + DTXOP_{STA}(i) \times \frac{L(\theta-1)}{\rho} \times \frac{N(\theta)}{N(\theta-1)}$$

$$\text{其初始条件为: } DTXOP_{AP}(0) = DTXOP_{STA}(i) \times N(0) \quad (4.9)$$

$$\text{其中 } DTXOP_{STA}(i) = \left[ \frac{1}{n} \sum_j RATXOP_j \right]$$

算法方程 (4.9) 中的  $\frac{N(\theta)}{N(\theta-1)}$  反映了固定类别中冲突实体数的动态改变, 对新业务的

接入可以产生一个实时反应。 $\rho$  是  $|L(\theta)|$  的门限值, 随着  $\rho$  增长,  $DTXOP_{AP}$  值的的增长趋势将逐渐减缓。AP 主要负责下行流的传输, 而移动站点传输的是上行流, 在算法的起始时刻, 设置为一种均衡的状态。随着时间的推移, 这种均衡状态也在不断的变化, 从而  $DTXOP_{AP}(\theta)$  的值也在定期的实时更新。上行方向与下行方向丢包的差值  $L(\theta)$  体现出了上行方向与下行方向之间的不均衡状况: 如果有  $LD(\theta-1) > LU(\theta-1)$ , 则  $L(\theta-1) > 0$ , 于是  $\frac{L(\theta-1)}{\rho} > 0$ , 根据方程 (4.9)  $DTXOP_{AP}(\theta)$  的值将有所增加, 也即 AP 对信道的占有时间

应有所增加; 如果有  $LD(\theta-1) < LU(\theta-1)$ , 则  $L(\theta-1) < 0$ , 于是  $\frac{L(\theta-1)}{\rho} < 0$ , 根据方程 (4.9)

$DTXOP_{AP}(\theta)$  的值将有所减小, 也即上行方向的需求高于下行方向, 此时应减少 AP 对信道的占有时间, 增加移动站点对信道的占有时间。

## 第五章 NS 模拟设计和仿真结果

目前,对网络技术、协议、性能的有效评估和研究,一般采用现场实验、数学分析、仿真模拟三种方法。仿真模拟通过建立网络设备和网络链路的统计模型,并模拟网络流量的传输,从而获取网络设计或优化所需要的网络性能数据。相比较而言,仿真模拟在网络研究中可节省资金,并且操作容易,结果可靠,接近实际。因此,仿真模拟在网络研究中得到了普遍的应用。NS2 是最流行的进行网络模拟的软件之一。

本章将在前文理论上,基于 NS2 软件和 Linux 操作系统环境,建立网络模型得到仿真结果并加以分析。

### 5.1 NS2 简介

#### 5.1.1 NS2 的起源与发展<sup>[22][31]</sup>

NS2 即“网络仿真器”(Network Simulation Version 2),是面向对象的、离散事件驱动的网络环境模拟器,主要用于解决网络研究方面的问题。NS2 起源于 1989 年 REAL 网络仿真器。REAL 仿真器起先是为了研究分组交换数据网络中的流量控制和拥塞方案的动态性。它提供给用户一种方法来描述这些网络并观察其行为。REAL 仿真器使用的是 C++ 语言。它提供源代码给用户,以便感兴趣的用户可以根据他们自己的目的修改仿真器,以达到特定要求。在此基础上,Lawrence Berkeley National Laboratory 的网络仿真研究组开发了 NS 的第一个版本。NS1 所使用的仿真描述语言是工具命令语言 Tcl 的扩展。在 NS1 改进的基础上,UC Berkeley 发布了 NS 版本 2。NS2 相对 NS1 来说有了重大的改变。比如 NS2 重新定义了对象结构,使用 MIT 的面向对象的 Tcl (Otc1) 代替了 Tcl 作为仿真配置的接口,Otc1 解释器的接口代码和主仿真器分离等。

NS2 是一个免费的软件,可以在 Windows/UNIX 上运行,并且所有的源代码公开,对于进行网络的研究和扩展非常方便,所以在学术界更多的采用 NS2 做模拟。

#### 5.1.2 NS2 仿真原理概述

NS2 是一个离散型事件仿真器,其核心部分是一个离散事件模拟引擎。NS2 中有一个

“调度器”(Scheduler)类,负责记录当前时间,调度网络时间队列中的事件,并提供函数产生新事件,指定事件发生的时间,处理分组(Packet)的延时以及充当定时器。在一个网络仿真器中,典型的时间包括事件到达,时钟超时等。仿真时钟的推进由事件发生的时间量确定。仿真处理过程的速率不直接对应着实际时间。一个事件处理可能又会产生后续的事件,仿真器就是不停地处理一个个事件,直到所有的事件都被处理完或某一特定的事件发生为止。

NS2 针对网络仿真,已经做了大量的模型化工作。NS2 对网络系统中一些通用的网络实体已经进行建模。相对于一般的离散型的仿真器来说,NS2 的优势就在于它有非常丰富的构件库,NS2 的构件库支持各种类型的网络,包括广域网、局域网、移动通信网等,同时还实现了多种网络协议,如 TCP、UDP、FTP 以及 MAC 层和物理层的多类协议。如图 5.1 所示。而且 NS2 构件库中的这些对象易于组合,易于扩展。用户可以利用这些已有的对象,进行少量的扩展,组合出所要研究的网络系统模型,然后进行仿真。这样就大大减轻了进行网络模拟研究的工作量,提高了效率。

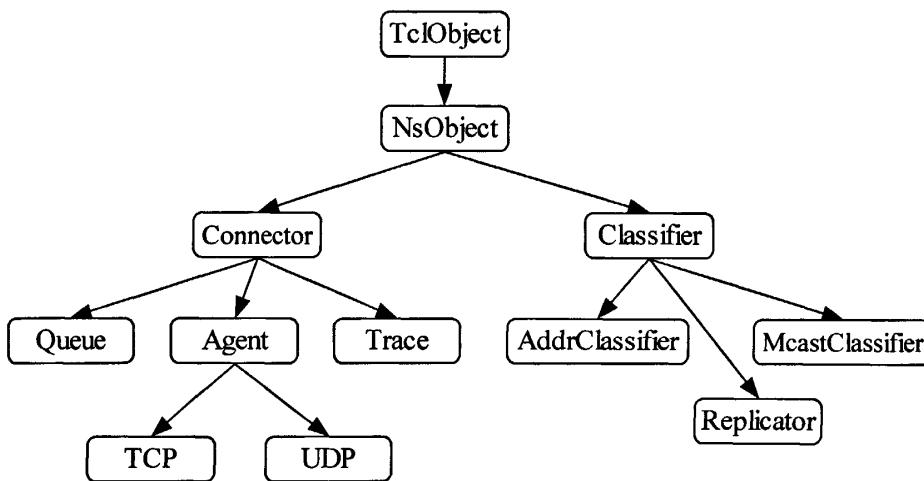


图 5.1 NS2 构件库

NS2 构件库使用两种面向对象的语言编写的: C++和 Otcl (Object Tcl)。C++程序运行速度快,是强制类型语言,便于实现复杂的数据类型和算法; Otcl 虽然运行速度慢,但是易于修改,不需要编译,适用于模拟配置。所以 NS2 中的构件一般都由相关的两个类来实现的,一个在 C++中实现,一个在 Otcl 中。这种方式被称为分裂对象模型。构件的主要功能通常在 C++中实现。Otcl 中类主要提供 C++对象面向用户的接口。用户可以通过 Otcl 来访问对应的 C++对象成员变量和函数。C++对象和 Otcl 对象之间通过 TclCL 的机制来关联的。因为 NS 中 C++类和 Otcl 类一一对应,两边的类的继承关系通常也保持一致,因此,

NS 中包含了一个 C++ 类的层次结构和一个 Otc1 类的层次结构, 如图 5.2 所示。这样使 NS 仿真性能更强更灵活。一方面, C++ 是高效的编译执行语言, 使用 C++ 实现功能的仿真, 可以使仿真过程执行获得较好的性能。另一方面, 用 Otc1 进行仿真配置, 可以在不必重新编译的情况下随意修改仿真参数和仿真过程, 提高了仿真的效率。

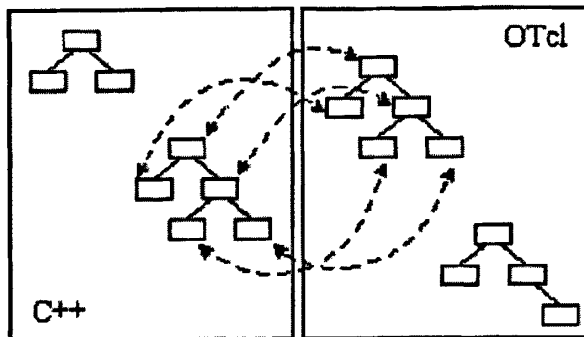


图 5.2 分裂对象模型

## 5.2 模拟方法及过程

进行模拟前, 首先要分析模拟涉及哪个层次。NS2 模拟分两个层次: 一是基于 Otc1 编程的层次, 利用 NS2 已有的网络元素实现模拟, 无需对 NS2 本身进行修改, 只要编写 Otc1 脚本即可; 另一个是基于 C++ 和 Otc1 编程的层次, 如果 NS2 中没有所需的网络元素, 就需要首先对 NS2 扩展, 添加所需要的网络元素, 这就需要利用前面所提到的分裂对象模型, 添加新的 C++ 类和 Otc1 类, 然后再编写 Otc1 脚本。整个模拟过程如图 5.3 所示。

如果用户已经完成了对 NS2 的扩展, 那么进行一次模拟的步骤大致如下:

(1) 开始编写 Otc1 脚本。配置模拟网络拓扑结构, 此时可以确定链路的基本特性, 如时延、带宽和丢失策略等。

(2) 建立协议代理 (Agent), 包括端设备的协议绑定和通信业务量模型的建立。

(3) 配置业务量模型的参数, 从而确定网络上的业务量分布。

(4) 设置 Trace 对象。Trace 对象能够把模拟过程中发生的特定类型的事件记录在 trace 文件中。NS2 通过 trace 文件来保存整个模拟过程。模拟完成之后, 用户可以对 trace 文件进行分析研究。

(5) 编写其它的辅助过程, 设定模拟结束时间, 至此 Otc1 脚本编写完成。

(6) 用 NS2 解释执行刚才编写的 Otc1 脚本。

(7) 对 trace 文件进行分析, 得出有用的数据。也可以用 Nam 等工具观看网络模拟运行的过程。

(8) 调整配置拓扑结构和业务量模型，重新进行模拟过程。

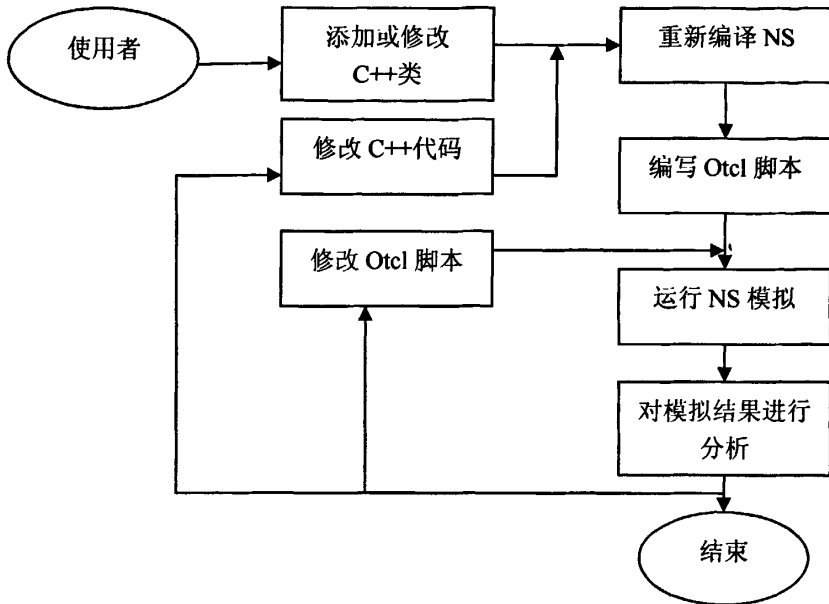


图 5.3 NS2 网络模拟过程

### 5.3 NS2 的无线网络模拟

无线网络这一模块最初是由卡内基·梅隆大学 (CMU) 的 Monarch 工作组引入到 NS2 中的。主要包括了 MobileNode (移动节点) 的工作机制、路由机制和用来构造 MobileNode 的网络协议的各个网络构件, 这些构件主要包括 Channel (信道)、Network Interface (网络接口)、Radio Propagation Model (无线信号传输模块)、MAC 协议、Interface Queue (接口队列)、Link Layer (链路层) 和 Address Resolution Protocol (ARP、地址解析协议) 等。

由 CMU/ Monarch 引入的无线模块可以进行纯无线网络(包括无线局域网和多跳的 ad-hoc 网络) 的仿真, 进一步扩展后的无线模块还可以支持无线和有线网络的联合仿真以及移动 IP (MobileIP)。

无线模块以 MobileNode 为核心, 并通过一些附加的特性来支持 Ad-hoc 网络和无线局域网。MobileNode 类是 Node 类的派生类, 它对 Node 类作了一些功能(如移动、在无线信道上收发等)的扩展, 这样它可以用来创建移动, 无线的模拟环境。MobileNode 由 C++和 Otcl 共同实现, C++负责实现主要功能(包括节点移动、周期性的位置更新、维护拓扑边界



等)；而 Otc1 负责设定 MobileNode 的各个网络构件(如 Classifier, LL, Mac, Channel 等)。

### 5.4 模拟场景的设置及仿真结果分析

#### 5.4.1 场景 1：移动站点 TXOP 速率自适应机制

一、 模拟场景设置：

模拟场景拓扑结构图如图 5.4 所示：

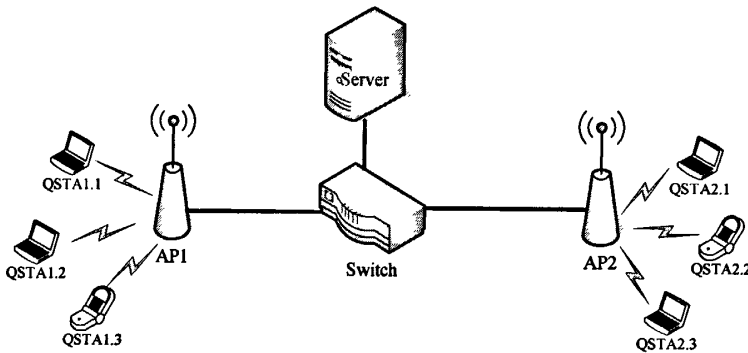


图 5.4 多速率移动节点模拟场景

根据实际的无线局域网覆盖范围，将本场景中 AP 的覆盖范围设置为 20 米。QSTA1.1-QSTA1.3 在 AP1 的覆盖范围内移动。QSTA2.1-QSTA2.3 在 AP2 的覆盖范围内移动。其中 QSTA1.1 以及 QSTA2.1 的传输速率为 11Mbps，QSTA1.2 以及 QSTA2.2 的传输速率为 5.5Mbps，QSTA1.3 以及 QSTA2.3 的传输速率为 2Mbps。AP1、AP2 与 Switch 之间的传输带宽为 100Mbps。Server 与 Switch 之间的传输带宽为 100Mbps。模拟持续时间为 60 秒。

仿真中 EDCA 参数值见表 5.1。移动节点的速率自适应 TXOP 值 (RATXOP) 由第四章 4.4.2 节的方程 (4.6) 给出。

表 5.1 EDCA 参数值表

Type	AC	AIFS	CWmin	CWmax	TXOP Limit(ms)	Rate (Kbps)
AC_BK	0	7	31	1023	0	600
AC_BE	1	3	31	1023	0	200
AC_VI	2	2	15	31	6,016	300
AC_VO	3	2	7	15	3,264	32

## 二、 仿真结果分析

下面将着重分析语音以及视频多媒体实时业务在默认值 TXOP 与速率自适应值 RATXOP 两种状态下的传输状况，通过吞吐量、时延、丢包率等 QoS 性能参数的对比，考察 TXOP 速率自适应机制对于多媒体实时业务网络服务质量的改进。

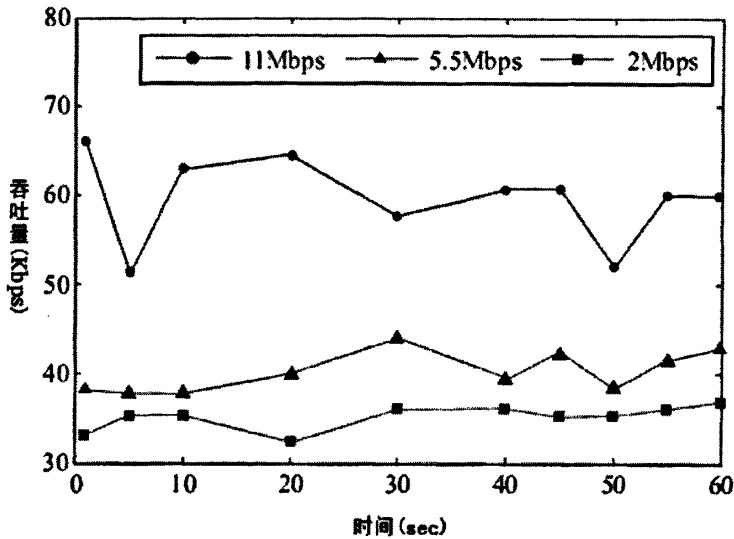


图 5.5-a 默认值 TXOP 状态下语音通信的吞吐量

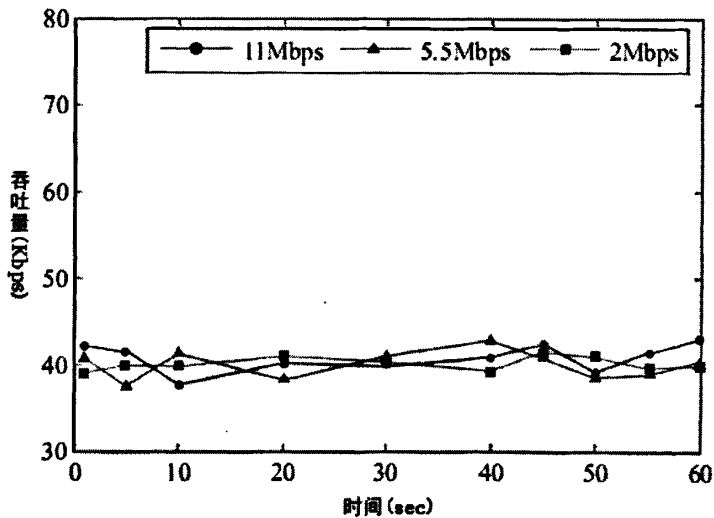


图 5.5-b RATXOP 状态下语音通信的吞吐量

图 5.5 为语音通信在两种 TXOP 状态下的吞吐量。在默认值 TXOP 状态下，由于站点

的传输速率不同，高速率（11Mbps）站点的吞吐量要远远高于其他两种速率的站点。如图 5.5-a。但是在 RATXOP 状态下，TXOP 的值是随着当前站点的速率适时更新的，因此各站点的吞吐量较为相当。如图 5.5-b。

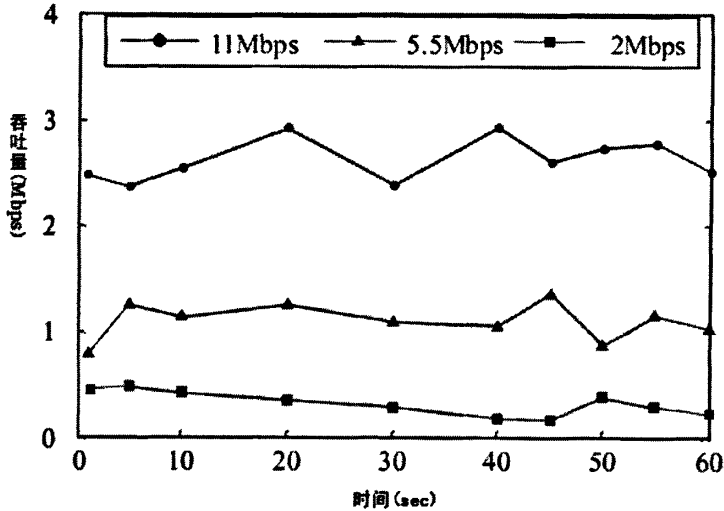


图 5.6-a 默认值 TXOP 状态下视频通信的吞吐量

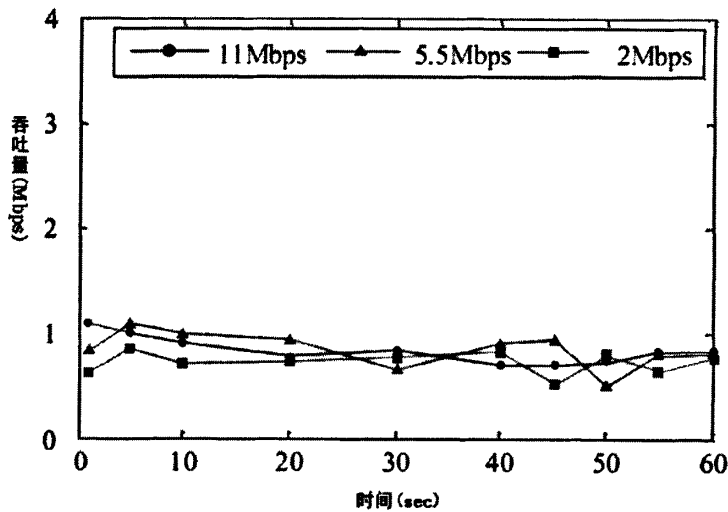


图 5.6-b RATXOP 状态下视频通信的吞吐量

图 5.6 为视频通信在两种 TXOP 状态下的吞吐量。与语音通信相类似，在默认值 TXOP 状态下，不同速率的站点间吞吐量的差异很大，而在 RATXOP 状态下，这种差异明显变小。以上分析显示在默认值 TXOP 下，尽管是同类别的数据传输，由于站点的传输速率不

同，速率为 11Mbps 站点的吞吐量要远远高于其他两种速率的站点。而当站点使用速率自适应的 RATXOP 值时，不同速率站点间的吞吐量差异比使用默认值 TXOP 值时小了很多。就吞吐量而言是提高了网络的公平性。

与此同时本文也对不同速率的站点语音、视频数据包传输过程中端到端的时延进行了模拟，其中图 5.7 为两种 TXOP 状态下语音数据包端到端的时延，图 5.8 为两种 TXOP 状态下视频数据包端到端的时延。

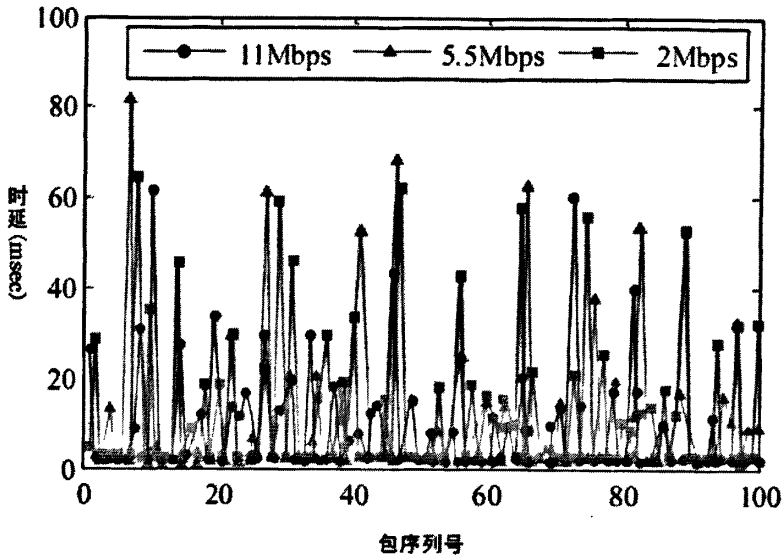


图 5.7-a 默认值 TXOP 状态下语音通信的时延

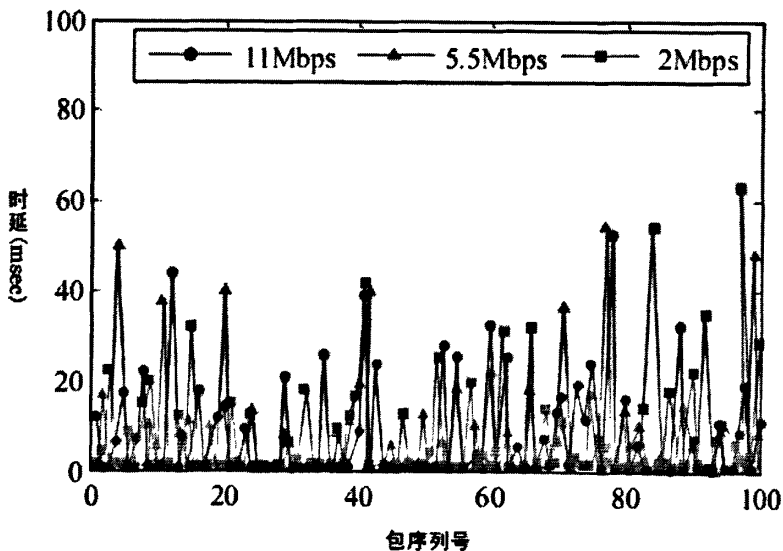


图 5.7-b RATXOP 状态下语音通信的时延

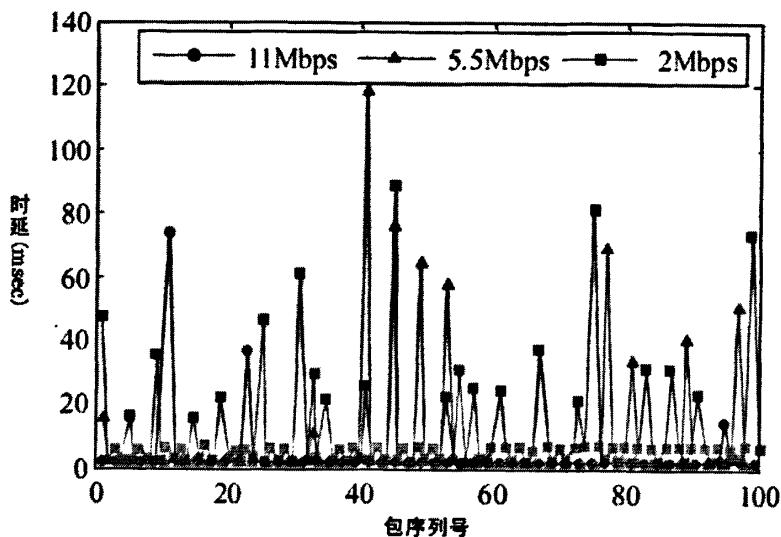


图 5.8-a 默认值 TXOP 状态下视频通信的时延

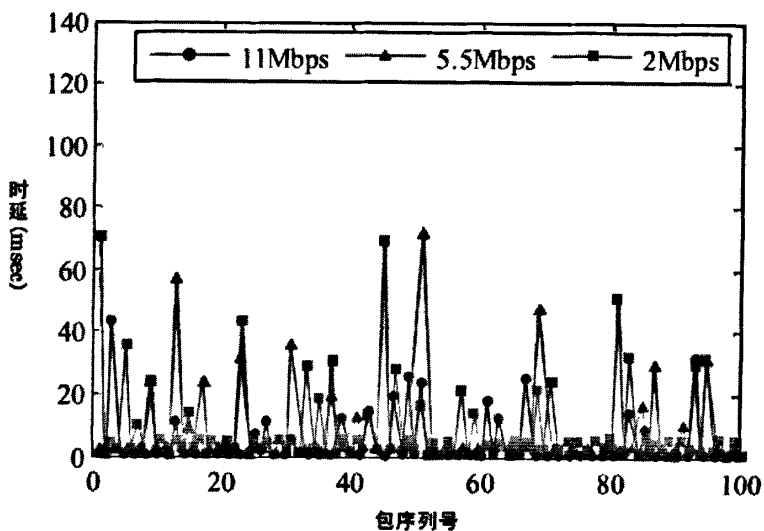


图 5.8-b RATXOP 状态下视频通信的吞吐量

如图 5.7-a 和图 5.8-a 所示，当 TXOP 是默认值时，速率快的站点数据传输较快，同时时延较短，以 11Mbps 的速率传输数据的站点其平均时延基本是小于其他两种速率的站点。

观察图 5.7-b 以及图 5.8-b，可以很明显的看出：如果移动站点采用速率自适应的 RATXOP 值时，以三种速率传输相同的数据包，与默认值 TXOP 状态下相比时延差异明显变小。这也正是归功于文中所提出的 TXOP 速率自适应机制，低速率站点赋予较大的 RATXOP 值而高速率站点则赋予较小的 RATXOP 值。

在网络服务质量保证方面，还有一个重要的性能指标——丢包率。在同样的模拟场景下，得到了移动站点分别采用默认 TXOP 值和 RATXOP 值，以不同速率传输语音、视频数据包时的丢包率。其中图 5.9 为两种 TXOP 状态下语音数据包的丢包率，图 5.10 为两种 TXOP 状态下视频数据包的丢包率。

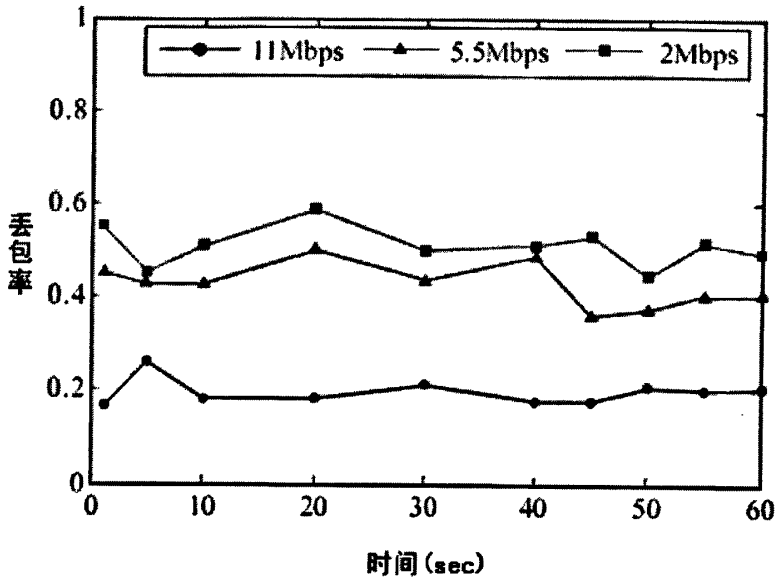


图 5.9-a 默认值 TXOP 状态下语音数据包的丢包率

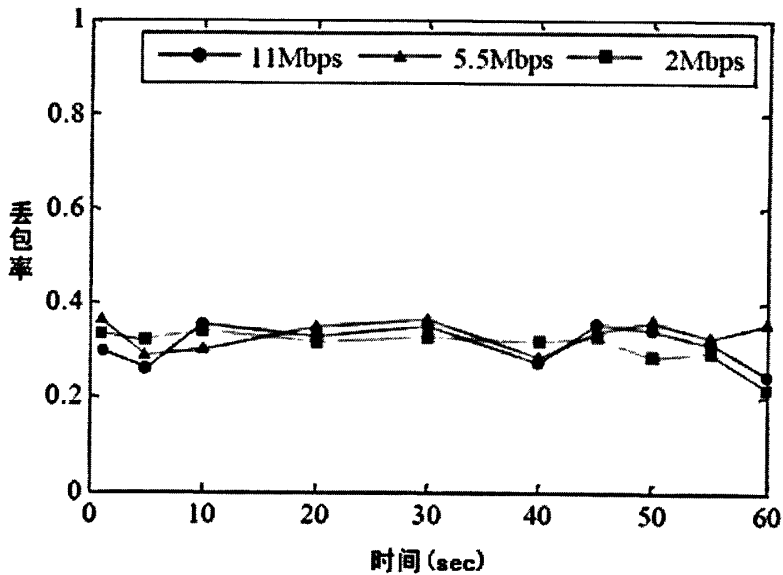


图 5.9-b RATXOP 状态下语音数据包的丢包率

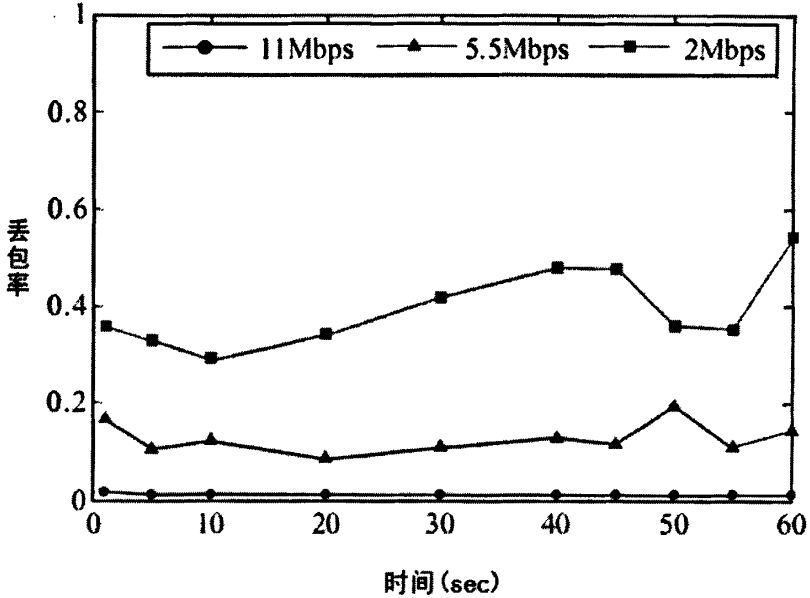


图 5.10-a 默认值 TXOP 状态下视频数据包的丢包率

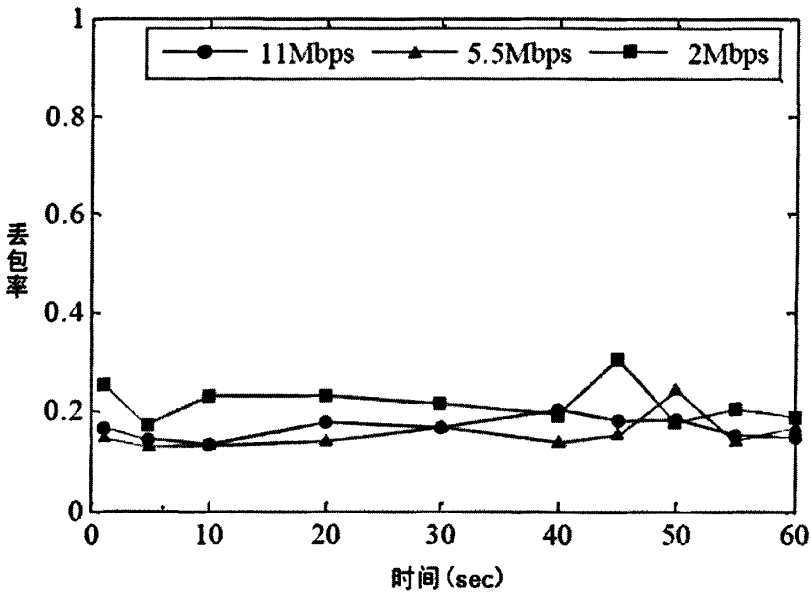


图 5.10-b RATXOP 状态下视频数据包的丢包率

对比图 5.9 和图 5.10 可以发现，如果采用的是默认 TXOP 值，无论是传输语音还是视频数据包，高速率站点的丢包率明显低于其余两类站点。但是如果采用文中提出的速率自适应机制，则三种速率的站点丢包率相差无几，差异明显小于默认 TXOP 值的情况。

通过以上仿真结果的分析,无论是丢包率、吞吐量还是端到端的平均时延,移动站点的 TXOP 速率自适应机制都体现出了较好的公平性,提高了网络的服务质量。

#### 5.4.2 场景 2: AP TXOP 值的动态调节机制

##### 一、 模拟场景设置:

本场景基于 IEEE 802.11b, 在一个 BSS 中, 有一个 AP 及六个移动站点共享一个无线信道, 假设六个站点与 AP 的最大距离不超过 20M, 并都以 11Mbps 的速率传输数据。AP 通过一个 10BaseT 的 Switch 与服务器相连。如图 5.11 所示。

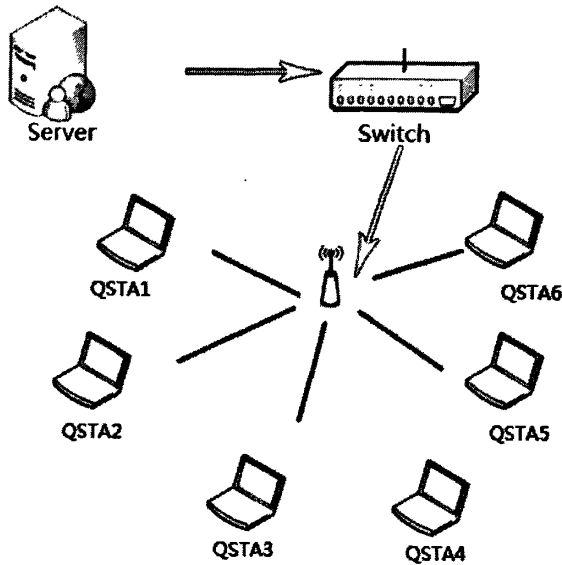


图 5.11 仿真模拟场景示意图

该 WLAN 中既含有语音、视频等多媒体实时业务, 也含有像 FTP 类的背景流传输, 它们对 QoS 的需求也不尽相同。见表 5.2。所有的传输都建立在服务器与无线站点之间。起始/停止时间的具体设置见表 5.3。本场景选择了一种均衡状态。每个传输基本都是对称的, 有差不多的上行/下行流。

表 5.2 各传输类型的特征

Traffic	Protocol	Bit rate	Packet Size
VoIP	UDP/CBR	32Kbps	80bytes
Video	UDP/CBR	300Kbps	1464bytes
FTP	TCP/FTP	---	1500bytes



表 5.3 上行/下行传输信息

QSTA	Upstream traffics	Downstream traffics	Start time	Stop time
1	VoIP, Video, FTP	VoIP, Video, FTP	10	160
2	VoIP, Video, FTP	VoIP, Video, FTP	10	160
3	VoIP, Video, FTP	VoIP, Video, FTP	10	160
4	VoIP, Video, FTP	VoIP, Video, FTP	10	160
5	VoIP, Video, FTP	VoIP, Video, FTP	60	160
6	VoIP, Video, FTP	VoIP, Video, FTP	110	160

## 二、 仿真结果分析

本文分两种情况进行模拟实验，一是对所有的传输类别使用标准的默认 TXOP 值，见表 3.2，二是采用本文提出的动态调节机制，根据当前无线信道的传输条件，动态改变信道资源，在 AP 中定期修改 TXOP 的值。

通过对 VoIP 和 Video 上行方向与下行方向的有效吞吐量和时延进行分析，考察 AP 的 TXOP 动态调节机制在保证无线局域网上行方向与下行方向公平性方面的改善。

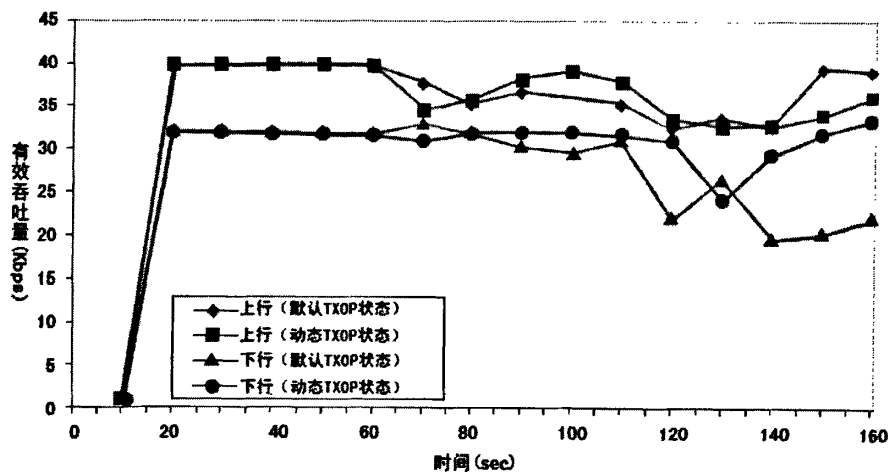


图 5.12 VoIP 的有效吞吐量

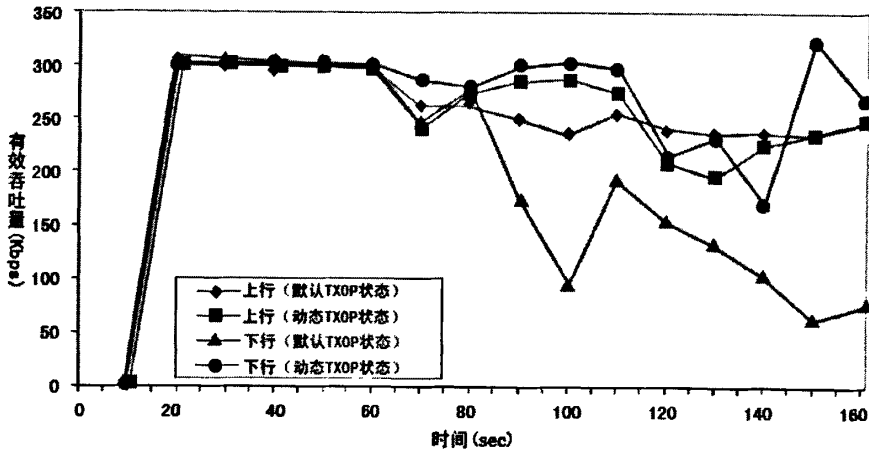


图 5.13 Video 的有效吞吐量

图 5.12 和图 5.13 分别为 VoIP 及 Video 传输的有效吞吐量。根据传输状况可分为三个时间段进行分析：

第一个时间段：10-60s，此时有 4 个站点有服务请求，VoIP、Video 以及 FTP 三个服务队列均有数据传输。此时 VoIP、和 Video 都有较平稳的吞吐量，不管有没有对 AP 的 TXOP 值进行动态调节。

第二个时间段：60-110s，这一时段有新的流进入了网络，传输条件开始变得恶劣，网络状态近乎饱和。此时对 AP 的 TXOP 值进行适时的动态调整就体现出了优势，尤其是下行方向的数据传输。不仅如此，对 AP 的 TXOP 值进行动态调节还使得上行方向与下行方向的有效吞吐量较为均衡。

第三个时间段：110-160s，网络负载过重，信道资源已不足以保证所有的流进行传输，此时吞吐量明显下降，特别是视频。然而即使在这样一个状况下对 AP 的 TXOP 值进行动态调节，仍就取得了较好的结果，使得进程在停止前能坚持较长的一段时间。

由此可见，AP 的 TXOP 动态调节机制对于保障语音、视频上行流与下行流方向吞吐量的公平性要优于 EDCA 机制中默认的 TXOP 机制。

同时，本文对于数据包的时延问题也做了相应的分析，如图 5.14 以及图 5.15 所示。

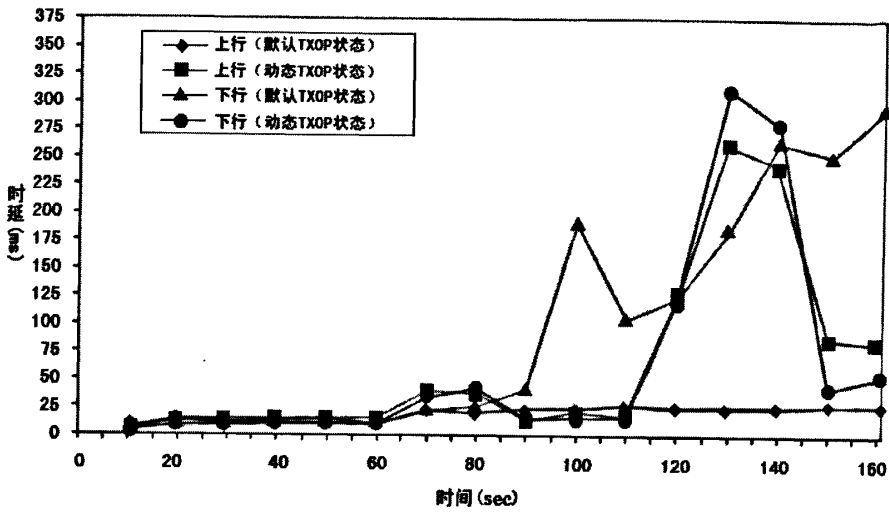


图 5.14 VoIP 数据包的时延

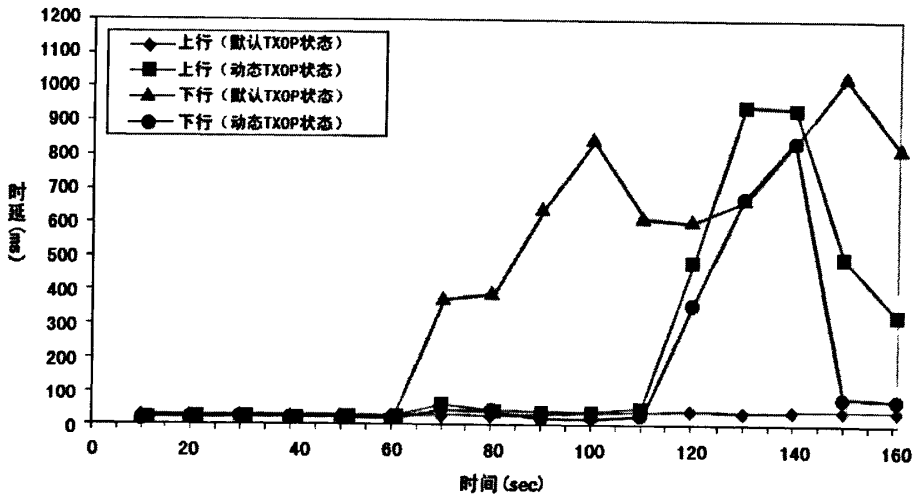


图 5.15 Video 数据包的时延

在时延方面，AP 的 TXOP 值进行动态调节后对网络性能的改进表现得较为明显。事实上，使用默认的 TXOP 值，上行流的 QoS 保证还可以，其中 VoIP 的时延控制在 50ms 以下，Video 的时延控制在了 100ms 以下。相反，在下行方向，到了 90 秒以后，VoIP 包的时延突然上升接近 200ms，此时网络近乎饱和。视频传输也有同样的现象，时延甚至达到了 800ms。

然而对于 AP 的 TXOP 动态调节机制，无论是 VoIP 还是 Video 传输，两个方向上都有较好的时延，即使有较多的站点竞争信道使得 QoS 保障降低时，优势还是很明显的。网络趋于饱和的时间要迟于默认 TXOP 值的情况，大约在 120 秒左右。

这里还有一点需要注意的是，在一个相对短的短期后，随着通信量的增长，网络状态开始恢复，此时的时延又迅速的降低到了一个可接受的值。然而在默认 TXOP 值状态下则没有发现这样的回落。

最后，分析一下上行与下行的平均吞吐比率。较为理想的状态是在单位值 1 附近。如图 5.16 所示，一般在网络轻负载时均可以满足。但是当网络通信量逐渐增加的时候，就只有对 AP 的 TXOP 值采用动态调节机制才能较好地保证上行流与下行流之间吞吐量的平衡。

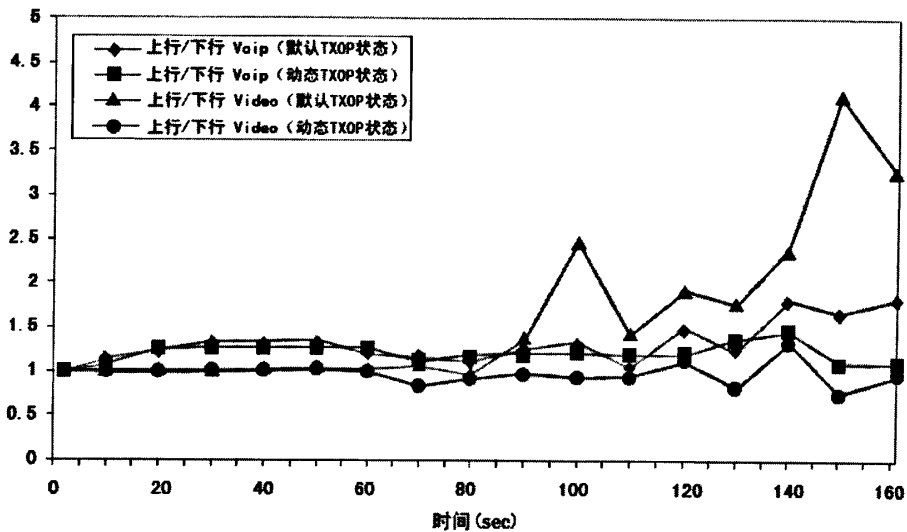


图 5.16 上行/下行平均吞吐比率

## 第六章 总结与展望

无线局域网的广泛应用,使得人们真正实现了随时随地自由地接入 Internet。与此同时,随着无线网络流量的剧增,业务类型逐步由单一的数据传输向数据、语音、流媒体等多业务种类转变,这就对无线局域网网络服务质量(QoS)提出了更高的要求。IEEE 802.11e 协议是 IEEE 802.11 协议 MAC 层增强的 QoS 机制,旨在保障语音、视频等多媒体实时业务的网络服务质量。IEEE 802.11e 协议定义了一种新的混合协调功能 HCF,包括 EDCA 和 HCCA 两种信道访问机制:EDCA 是 DCF 的增强版,提供了不同优先级的 QoS;HCCA 类似于 PCF,经过协商后能够提供参数化的 QoS。尽管 HCCA 能够基于每个站点的特定业务需求提供无竞争的保证服务,然而它是集中式的,每次有新的业务流接入必须重新计算调节,因此市场需求不大。

EDCA 区分了不同的业务类型:背景流、普通数据、语音、视频。依据不同的业务类型引入 4 种访问类别 AC 对应于 8 种不同的用户优先级 UP。每一种 AC 都独立工作,在一个站点内运用一组 EDCA 的信道访问参数竞争 TXOP(发送机会)。TXOP 是指 QSTA(带 QoS 功能的终端)竞争上信道后可以在 TXOP 限制时间内一直使用信道。一旦 QSTA 竞争上信道并成功发送一帧后,如果仍然有数据帧要发送,则该 QSTA 将在 TXOP 限制时间内获得 TXOP 的延续。即该 QSTA 可以只等待 SIFS 就发送接下来的一个数据帧,形成连发的情形,延时很低。当达到 TXOP 时间限制或者没有数据帧要发送时 TXOP 结束,开始新的竞争。

由于 IEEE 802.11e 协议中 EDCA 机制的各项参数都是采用静态设置的方式,没有考虑到信道负载状况与误码等影响因素,极易导致信道吞吐量的不公平现象。针对这一问题,本文首先对 IEEE 802.11 MAC 层协议以及 IEEE 802.11e 协议进行了深入地分析和研究。基于 EDCA 机制,提出了一种 TXOP(Transmission Opportunity)动态调节机制:根据当前每个类别的传输情况,利用上行方向与下行方向丢包数的差值判定当前网络上行与下行方向的不均衡状况,定期更新 AP 的 TXOPLimit 值。对移动站点的 TXOP,引入了速率自适应机制,根据各个站点传输速率的不同,调整相应类别的 TXOPLimit 参数值。如果站点的速率大则赋予一个相对较小的 TXOPLimit 值,相反,如果站点的速率小则赋予一个较大的 TXOPLimit 值。

利用 NS2 模拟器对所提出的 TXOP 动态调节机制进行了仿真模拟,结果表明:在网络重负载、趋于饱和的环境中,吞吐量、丢包率以及时延等性能都有较好的改善,并且 TXOP

动态调节机制还保证了上行流与下行流之间的公平性，较好的实现了 QoS 的保障。

虽然本文提出的 TXOP 动态调节机制可以在重负载的状况下延迟网络进入饱和状态的时间，但是当网络流量进一步增加、负载过重的情况下，必须引入一个较好的接入控制机制以减少网络的拥塞，保证高优先级传输类别的网络服务质量。因此在下一步的研究中，将考虑接入控制机制与 TXOP 动态调节机制相结合；考虑更多的网络传输环境，比如上行与下行方向不均衡的状态；考虑实际信道的情况，将噪声加入到分析中来，考虑噪声对于 TXOP 设定以及公平性的影响。

## 参考文献

- [1]. IEEE Std 802.11-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) specifications. 1999
- [2]. IEEE Std 802.11b-1999, Supplement to Part II: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. September 1999
- [3]. IEEE Std 802.11e--2005 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition). 2005
- [4]. IEEE Std 802.11e, IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements Part II: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications: Amendment 8: Medium Access Control(MAC) Quality of Service Enhancements. 2005
- [5]. V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker and L. Zhang. MACAW: A media access protocol for wireless LANs. August 1994
- [6]. Q. Ni. Performance analysis and enhancements for IEEE 802.11e wireless networks. IEEE Network. July 2005
- [7]. Ilenia Tinnirello, Sunghyun Choi. Temporal Fairness Provisioning in Multi-Rate Contention-Based 802.11e WLANs. The Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'05). 2005
- [8]. J. Majkowski and F. C. Palacio. Dynamic TXOP configuration for QoS enhancement in IEEE 802.11e wireless LAN. The International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (Soft COM). 2006
- [9]. Vasilios A. Siris and Costas Courcoubetis. Resource Control for the EDCA Mechanism in Multi-Rate IEEE 802.11e Networks. The IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'06). 2006
- [10]. H. Zhai, J. Wang and Y. Fang. Providing Statistical QoS Guarantee for Voice over IP in the IEEE 802.11 Wireless LANs. IEEE Wireless Communications, Vol. 13, No. 1, pp: 36-43, February 2006

- [11]. A. Andreadis, G. Benelli and R. Zambon. Evaluation of QoS Support for Multimedia Traffics in IEEE 802.11e. The International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (Soft COM). 2006
- [12]. Sai Shankar N. Multimedia Wireless Local Area Networks. Emerging Wireless Multimedia: Services and Technologies, Editors Apostolis Salkintzis and Nikos Passas, Wiley. July 2005
- [13]. Qianhua Deng, Anni Cai. A TXOP-based Scheduling Algorithm for Video Transmission in IEEE 802.11e Networks. The 6<sup>th</sup> International Conference on ITST telecommunications Proceedings. 2006
- [14]. Suzuki. T, Fukushi. N, Noguchi. A, Tasaka. S. Effect of TXOP-Bursting and Transmission Error in Application-Level and User-Level QoS in Audio-Video Transmission with IEEE 802.11e EDCA. The 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: 11-14 . Sept 2006. Helsinki, Finland
- [15]. Haitao Wu , Xin Wang , Qian Zhang , Xuemin (Sherman) Shen . IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) throughput Analysis. IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the IEEE ICC 2006 proceedings
- [16]. Nan Guo, Chen Chen, Chang-xing Pei. Dynamic TXOP Assignment for Fairness (DTAF) in IEEE 802.11e WLAN under Heavy Load Conditions. Proceedings of the Seventh International Conference on Parallel and Distributed Computing. 2006
- [17]. Lamia Romdhani , Christian Bonnet . Performance Analysis and Optimization of the 802.11e EDCA Transmission Opportunity (TXOP) Mechanism. The Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing , Networking and Communications. 2007
- [18]. Nicola Cranley , Mark Davis . Video Frame Differentiation for Streamed Multimedia over Heavily Loaded IEEE 802.11e WLAN using TXOP. The 18<sup>th</sup> Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications . 2007
- [19]. S. McCanne and S. Floyd. NS network simulator. URL:<http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [20]. Sven Wietholter, Christian Hoene. An IEEE 802.11e EDCF and CFB Simulation Model for NS-2. URL: [http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e\\_ns2/](http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/)
- [21]. NS-2. URL: <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>



- [22]. Yinjun Zhu . Simulation of a wired-cum-wireless topology running with MobileIP. 2004
- [23]. Y. Xiao. QoS Guarantee and Provisioning at the Contention-Based Wireless MAC Layer in the IEEE 802. 11e Wireless LANs. IEEE Wireless Communications, Vol. 13, No. 1, pp: 14-21, February 2006
- [24]. NS2 教学手册. <http://140.116.72.80/~smallko/ns/ns2.htm>
- [25]. 金纯. IEEE 802.11 无线局域网. 北京: 电子工业出版社. 2004
- [26]. 方昉. 无线局域网 MAC 层 QoS 技术研究. 西安电子科技大学硕士学位论文, pp:1-10. 2007
- [27]. 于宏毅. 无线移动自组织网. 北京: 人民邮电出版社. 2005
- [28]. 王骅. 无线局域网 MAC 层 QoS 机制综述. 计算机科学 Vol. 34, No. 8. 2007
- [29]. 刘乃安. 无线局域网 (WLAN) 原理、技术与应用. 西安电子科技大学出版社. 2004
- [30]. 徐雷鸣. NS 与网络仿真. 北京: 人民邮电出版社. 2003
- [31]. 于斌. NS2 与网络模拟. 北京: 人民邮电出版社 . 2007
- [32]. 刘昕, 雷维礼. IEEE 802. 11e 中的优先级. China Academic Journal Electronic Publishing House. 1994-2007
- [33]. 王澄, 龚玲, 杨宇航. IEEE 802. 11e 基于竞争的信道访问机制性能分析. 计算机工程 Vol. 32, No. 6, 2006
- [34]. 李凌云, 钟丽, 姜丽丽, 姜余振. 无线局域网 MAC 层 QoS 研究. 微电子学与计算机, Vol. 23, No. 10, 2006

## 发表论文

硕士期间发表的论文为：

1. 金栩，桂灿亮. 手持移动灌溉系统的设计和调度研究. 宜春学院学报（自然科学版）  
2007年5月
2. 邱中华，金栩. 基于进化博弈论研究一类监察博弈. 南京邮电大学学报（自然科学版）  
2006年10月

## 致 谢

值此论文结束之际，首先我要感谢我的恩师章韵副教授在我的整个研究生学习期间给予我的关心、支持和鼓励。章老师渊博的学识、严谨的治学态度、丰富的研究经验、敏锐而深刻的学术洞察力对我的学习和研究工作有着重要的影响，必将令我受益终生。

感谢在学习期间所有为我们授课的老师，特别感谢陈建新博士在论文工作中给予的指导和帮助。

感谢潘强，傅道坤，钱琛，卢翠玲等同学在学习和生活中对我的关心和帮助。本论文的顺利完成与他们的协助以及主楼 912 实验室的和谐氛围密不可分。与他们共同走过的人生岁月将是我最为宝贵的记忆财富！

深深感谢我的父母，他们无微不至的关怀、无私的奉献和辛勤的汗水才有我的成长与进步。感谢我的爱人，他的理解、支持与激励是我不断前行的动力。谨以此文献给他们，以表我的感激之情！

最后，衷心地感谢各位教授、专家在百忙之中审阅本文，提出宝贵的意见和建议！

向所有曾经关心、帮助和鼓励我的朋友致以最诚挚的谢意！