

摘要

随着无线通信特别是移动通信的发展，互联网的普及，以及计算机和外设的不断增加，结合了无线通信和互联网优点的无线局域网（WLAN, Wireless Local Area Network）以其移动性、灵活性、可伸缩性和经济性的优点得到了迅速的发展。但是，作为无线通信网络的一个重要组成部分，无线局域网不可避免的存在着无线信道不可靠、容易产生干扰和噪声、频率资源有限等问题。而且，无线局域网虽然可以支持站点的移动，但对大范围移动的支持机制还不完善，也还不能支持高速移动。即使在小范围的低速移动过程中，性能还要受到影响。因此，如何充分利用有限的传输介质资源、提高系统对站的移动性的支持一直是无线局域网的研究方向。

作为无线局域网的应用协议之一，IEEE 802.11 系列标准应用最广泛、研究最多。其 MAC 层的协议规定了两种访问机制，即分布式协调功能（DCF, Distributed Coordination Function）和点协调功能（PCF, Point Coordinated Function）。当前对于 IEEE 802.11 MAC 协议的研究中，大部分基于 DCF 提高系统的 QoS (Quality of Service) 及信道利用率等，对 PCF 的研究不多。但是，PCF 可以为时间敏感的业务提供高的 QoS 保证，可以很好的实现为不同的业务提供不同的服务。

论文研究介绍了无线网络媒体（信道）访问控制协议，分析比较了无线资源管理中各种信道分配技术及算法，深入研究了 IEEE 802.11 MAC 协议，提出了一种适用于 PCF 机制的信道分配算法，并基于该算法优化了 IEEE 802.11 MAC 协议。提出的算法中，信道的分配根据业务对时延的要求分部有序的使用，这有利于实时业务在没有信道可用的时候抢占非实时业务使用的信道，在充分使用信道的前提下实现针对不同的业务满足其业务要求。对于 IEEE 802.11 MAC 协议的优化中，评估当前使用信道的性能，在信道性能低的情况下，根据节点的访问机制在提出的信道分配算法的基础上进行信道切换。通过各种仿真场景实验结果的对比分析表明，优化系统的吞吐量、延迟得到了不同程度的改善，并且系统在高速移动的环境下体现出良好的性能。

关键词：无线局域网（WLAN），IEEE 802.11，信道分配，QoS

Abstract

With the development of wireless communications and the popularization of the internet, the computer and peripheral equipment increase ceaselessly. Wireless Local Area Network (WLAN) develops rapidly with mobility, agility, flexibility and inexpensiveness. However, as an important part of wireless communications networks, it has the problems such as wireless channel's fallibility, engendering interference and noise easily and the finite of frequency resource inevitably. Furthermore, although it supports the mobility of the stations, the stations can't mobile in large scale and high speed situation. How to use the finite medium resource and support station's mobility is always the research orientation of WLAN.

At present, IEEE 802.11 is applied and studied widely. Its MAC protocol has two access mechanisms, which are Distributed Coordination Function and Point Coordinated Function. Based on DCF, the current researches emphasize on improving Quality of Service and channels' utility. PCF is studied not enough. However, it can guarantee delay sensitive services and affords different services for different services.

This paper introduces wireless network medium access control protocol in detail, analyzes various channel allocation techniques and algorithm. Moreover, it investigates IEEE 802.11 MAC protocol deeply. It put forward a kind of channel allocation algorithm for PCF mechanism and improves the protocol. In the proposed algorithm, the channel is orderly used from different part based on services' request for time. When there is no idle channel, it let real-time services go off with channels of other services and the system fulfills different services' QoS. In the improved protocol, if the channel utilization is low, the using channel is changed on a basis of the proposed algorithm. The various simulation results indicate that the system's throughput and delay are all improved dramatically. Furthermore, the system performs well in high speed mobile conditions.

Key words: Wireless Local Area Network (WLAN), IEEE 802.11, Channel Allocation, QoS

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，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，也不包含为获得重庆邮电大学或其他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谢意。

学位论文作者签名：翟詠詠 签字日期：2017年6月6日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆邮电大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆邮电大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：翟詠詠 导师签名：孙安芝
签字日期：2017年6月6日 签字日期：2017年6月8日

第一章 绪论

信息技术的飞速发展，使得人们对网络通信的需求也随之不断提高，希望打破不同的地域或客观条件的制约，能够“实现任何人（Whoever）在任何时候（Whenever）的任何地方（Wherever）与任何人（Whomever）进行任何方式（Whatever）的通信”的目标。作为个人通信的一个重要组成部分，无线局域网已经掀起了移动计算的新浪潮，在现实及未来的社会生活中将得到广泛的应用，包括：在移动工作环境下，向移动计算机用户提供访问信息网络资源的服务；应用于临时组网和难以布线的场合；可作为有线局域网的无线延伸（补充），也可作为 LAN 的无线互连（替代）。

1.1 选题背景

1.1.1 无线局域网简介

顾名思义，无线局域网（Wireless Local Area Networks, WLAN）就是在局部区域内以无线（No Wire or Wireless）媒体或介质（Medium）进行通信的无线网络。这是广义的概念，具体来说^[1]，它指的是采用无线传输媒介的计算机局域网络，是计算机网络通信子网（Subnet）的一部分，是计算机网络技术和无线通信技术结合的产物。WLAN 能在几十米到几公里范围内支持较高的数据速率（如 2Mb/s 以上），可以采用微蜂窝（Micro cell）、微微蜂窝（Pico cell）结构，也可以采用非蜂窝（如 Ad Hoc）结构。

无线局域网利用空中的电磁波（Airwave）代替传统的缆线进行信息传输，可以作为传统有线网络的延伸（Extend）、补充（Complementary）或替代（Alternate）。相比较而言，无线局域网具有移动性、灵活性、可伸缩性和经济性等方面的优点。无线局域网可用于物理布线困难或不适合进行物理布线的地方，如危险区和古建筑等场合，节省了缆线及其附件的费用；省去布线工序，可快速组网，可以节省人员费用，并能将网络快速投入使用，提高了经济效益；对于临时需要网络的地方，无线局域网可以低成本的快速实现；对于需要频繁重新布线或更换地方的场合，无线局域网可以节省长期费用。但是，无线局域网并非完美无缺，也有许多面临的

题需要解决，这些局限性实际上也是无线局域网必须克服的技术难点，主要包括它的可靠性、带宽与系统容量、兼容性、覆盖范围、干扰、安全性、节能管理、多业务与多媒体、移动性及小型化、低价格等。这是无线局域网能够实用并普及的关键所在。

无线局域网主要是无线计算机通信网络，无线局域网的历史首先是无线计算机网的历史。无线通信的历史非常悠久，但无线计算机通信的历史却并不长，尤其是充分发挥无线通信的“可移动”特点的无线计算机通信则是近 10 年才出现的事情。无线局域网的发展有两方面的动因，即应用需求驱动和技术驱动，这些分别导致了无线局域网产品标准和技术标准的标准化活动的活跃。

最早出现的无线局域网可认为是夏威夷大学于 1971 年开发的、基于封包式技术的 Aloha Net，它采用无线电台替代电缆线的原因是为了克服由于地理环境因素而造成的布线困难。1979 年，瑞士 IBM Rueschlikon 实验室的 Gfeller 首先提出了无线局域网的概念。他采用红外线作为传输媒体，用以解决生产车间里的布线困难，避免大型机器的电磁干扰。1980 年，加利福尼亚惠普实验室（HP Palo Alto Labs）的 Ferrer 从事了一个真正意义上的无线局域网项目的研究。在这个项目中，传输媒体为 900MHz 频段的无线电波，用声表面波器件（SAW Devices）实现了直接序列扩频（Direct Sequence Spread Spectrum）调制，传输速率可达 100kb/s，媒体访问控制（Medium Access Control, MAC）层的接入方式为载波侦听多址接入（Carrier Sense Multiple Access, CSMA），这是现有的 IEEE 802.11 系列标准中 MAC 协议的基础。但是，这二者由于传输速率过低及没有获得需要的频段，最终都没有投入使用。

1985 年，FCC（[美国]联邦通信委员会）颁布的电波法规为无线局域网的发展扫清了道路。它为无线局域网系统分配了两种频段：一种是专用频段，这个频段避开了比较拥挤的用于蜂窝电话和个人通信服务的 1~2GHz 频段，而采用更高的频率；另一种是免许可证的频段，主要是 ISM 频段，它在无线局域网的发展历史上发挥了重要作用。此后几年，许多无线局域网产品陆续上市，这些产品可以认为是第一代无线局域网产品，它们大都采用了扩频技术。

20 世纪 80 年代末期，IEEE 802 委员会在 IEEE 802.4L 任务组下开始了无线局域网的标准化工作，并于 1990 年 7 月接受了 NCR 公司的“CSMA/CD（Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection）无线媒体标准扩充”的提案，成立了独立的 IEEE 802.11^[2]任务组，负责制定无线局

域网物理层及媒体访问控制协议的标准。1991年5月, IEEE发起成立了无线局域网的专题研究小组。1997年6月26日, IEEE 802.11标准制定完成, 并于1997年11月26日发布。生产厂家在IEEE 802.11标准和联盟协议的基础上, 实现产品的标准化。从1998年开始, 许多厂商相继推出了基于IEEE 802.11标准的无线局域网产品, 它们属于第二代无线局域网设备。第二代无线局域网设备大都工作在2.400~2.4835GHz频段, 传输速率为1~2Mb/s。

1992年, 由苹果公司领导成立了一个叫WINForum的工业联盟组织, 并最终从FCC处获得了用于个人通信系统的1.890~1.930GHz频段的20MHz带宽, 进行语音的同步传输和数据的异步传输。同时, 欧洲也成立了关于高速无线局域网(HiperLAN^[3])的标准化组织, 它获得了5.15~5.35GHz和17.1~17.3GHz两个200MHz频段, 1997年完成了HiperLAN 1标准的制定。由于IEEE 802.11速率最高只能达到2Mb/s, 因此在不断研究后于1999年9月又提出了IEEE 802.11a和IEEE 802.11b标准, 传输速率分别可达54Mb/s和11Mb/s。2002年通过了IEEE 802.11g标准, 它允许通过的最大传输速率为54Mb/s, 但仍工作于2.4GHz频段, 与IEEE 802.11b标准兼容。同时, HiperLAN-2标准也已制定完成, 与IEEE 802.11a类似, 工作于5GHz频段, 最大传输速率为54Mb/s。其中, 符合IEEE 802.11b标准的产品已经较为普及, 可以将它们归为第三代无线局域网产品, 而将符合IEEE 802.11a、HiperLAN 2和IEEE 802.11g标准的产品称为第四代无线局域网产品。

1.1.2 研究现状

无线局域网有很多局限性, 前面几代无线局域网的发展, 主要体现在带宽或传输速率的提高上。从标准上看, 主要是在物理层的改进或扩充方面, 如IEEE 802.11的最大传输速率只有1~2Mb/s, 可以采用红外线方式、直接序列扩频方式或跳频(FH)方式; IEEE 802.11b的最大传输速率有11Mb/s, 采用直接序列扩频方式, 并与IEEE 802.11兼容; IEEE 802.11a、IEEE 802.11g及HiperLAN 2的最大传输速率可达54Mb/s。

在克服无线局域网其他局限性方面也得到了相应的完善和发展, 这些分别体现在许多标准草案上。从有关无线局域网的标准任务组及其研究范围和目标等方面看, 无线局域网有以下几方面的研究现状和发展趋势: (1)宽带(高速)化; (2)(快速)移动性支持; (3)多媒体(Quality of Service,

QoS) 保证; (4) 安全性; (5) 可靠性; (6) 小型化; (7) 大覆盖; (8) 节能; (9) 经济性。

在无限局域网数据链路层的 MAC 协议标准的制定方面, 1997 年正式发布的 IEEE 802.11 标准只提供尽力而为 (Best Effort) 的服务质量, 对具有时延和带宽约束的实时业务支持很差, 不满足 QoS 的要求。为此, IEEE 802.11 成立了 E 工作组 (TGe), 负责具有 QoS 加强功能的 IEEE 802.11 MAC 协议的制定工作。TGe 陆续发布了 802.11e 协议草案, 该草案对 MAC 层协议进行了修改和增强, 加入了 QoS 的相关内容, 希望能为高品质视频、语音和多媒体在 WLAN 中的应用提供服务保证。

但是, IEEE 802.11e 对于 QoS 的支持只是在接入信道之前, 并没有研究在信道分配之后是否可以进一步满足系统的 QoS 要求。而且, 协议并没有考虑由于无线信道的不可靠性和用户的移动性导致传输信道性能下降的问题。

对于无线局域网 MAC 协议的研究与改进, 大部分文章^[4,5,6,7,8]是针对 IEEE 802.11 MAC 协议改善系统的 QoS, 但都没有从信道分配的角度进行研究。

在文献 [4] 中, 提出了基于 QoS 保证和公平性的分布式调度程序。其中, AP 设有 Master Scheduler 和 Slave Scheduler, STA 只有 Slave Scheduler. MS 根据它收到的信息为 SS 分配时隙, 然后每一个 SS 再将其分配到的时隙分配给它的连接。MS 分配带宽时是基于数据单元的优先级, 优先级是根据数据单元超时之前的剩余时间和信道误差计算的。

文献 [5] 和文献 [7] 集中在分析实时传输的性能方面保证 QoS。文献 [5] 调整了 CFP 重复间隔时间值之类的参数达到更好的性能。文章提出, 如果一个语音用户保持沉默, 它的传输时间并不分配给其他语音或数据用户, 而这并不影响呼叫的传输。并且, 系统可以通过改变一个呼叫在轮询列表中的次数为语音呼叫提供不同的延迟需求。文献 [7] 考虑到公平调度的问题, 在最初的 MAC 协议中引入某些优先权队列方案 (例如改变退避的值)。它提出了一个调度包传输的完全分布式算法, 其原则是根据流的权值为不同的流分配带宽。

文献 [6] 提出了恶意突发方案为实时传输提供 QoS 保证。实时节点通过发送能量脉冲竞争接入信道, 持续的时间是在信道变为空闲之前它经历的延迟的函数。文献 [8] 在 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 的基础上提出了一种基于工作时间的许可控制方法以提供参数化的 QoS 服务。文章提出, 根据每个业务流的参数计算可以得到这个业务流的保证

速率。当一个新业务流到来时，计算出它的保证速率。然后根据保证速率，分析系统接收新业务流之后是否能支持每个业务的保证速率，以此判断是否允许新的业务流。

文献[1]关于 WLAN 接入协议的发展趋势的分析指出，设计 WLAN 的接入机制时，要考虑到作为 3G、4G 系统无缝切换而对接入机制产生的新要求。文献[9]针对三种蜂窝访问网络（GSM、GPRS、UMTS）和 WLANs 结合的网络进行统一的分级资源管理的研究。基于各种网络之间的无缝结合及 WLANs 本身的优点，文章认为无线资源管理应该尽量利用 WLANs 的资源。因此，随着移动通信系统的快速发展，要实现 WLAN 与移动通信网之间的互融互通以及资源的相互利用，必然要求 WLAN 能支持多媒体业务和用户的移动性。

1.2 论文的主要研究内容及组织结构

1.2.1 论文的主要研究内容

论文在参与研究重庆市科委攻关和自然科学基金项目“支持 4G 的无线网络资源预分配及优化技术研究”背景下，充分研究及对比分析了各种无线媒体访问控制协议。论文以 IEEE 802.11 MAC 协议的 PCF 机制为基础，针对无线信道资源的有限性，考虑到 WLAN 对实时业务的 QoS 保证以及节点移动性的支持，借鉴信道分配技术及资源预留的思想在移动通信系统中的成功应用，提出了一种适用于 IEEE 802.11 MAC 协议的 PCF 机制的信道分配并基于此方法优化了协议。该算法在满足不同业务的 QoS 要求的前提下，充分利用有限的信道资源，并可在信道使用过程中实现信道再分配及信道变换。作者的主要工作包括以下几个方面：

- 1) 详细分析了各种无线媒体访问控制协议及发展趋势，重点研究了目前 WLAN 普遍应用的 IEEE 802.11 MAC 协议。
- 2) 介绍了无线资源管理的相关知识，研究对比了各种信道分配技术及其算法。
- 3) 在研究 IEEE 802.11 MAC 协议的 DCF 和 PCF 机制的基础上，提出了一种适用于 PCF 机制的信道分配算法，并基于此方法优化了协议。
- 4) 在仿真软件 OPNET 中，对 IEEE 802.11 MAC 层的 PCF 机制进行了扩展，加入新的信道分配及基于此方法对协议的优化。通过将其仿真结

果与标准 IEEE 802.11 MAC 协议的仿真结果相比较，验证了该算法所提供的良好性能。

1.2.2 论文的组织结构

论文的第二章分类研究介绍了无线媒体访问控制协议及其发展趋势。第三章介绍了无线资源管理及各种信道分配技术，分类别研究了几种主要信道分配算法。第四章在 IEEE 802.11 MAC 层的 PCF 机制的基础上提出了信道分配及基于此方法的对 IEEE 802.11 MAC 协议的优化。第五章介绍了 OPNET 仿真软件，给出了使用此软件仿真本文提出的算法的过程，并分析对比仿真结果。第六章总结本文的工作，分析存在的问题以及后续的工作。

第二章 无线网络媒体（信道）访问控制协议

网络的性能（吞吐量、时延等）主要取决于 MAC 子层的接入协议，而且系统的频谱利用率、系统容量、小区结构、设备的复杂度和成本等也受 MAC 协议的影响。所以，选择适当的 MAC 子层规范，根据网络业务特征有效的配置信道资源，提高无线资源的使用效率，提高系统的容量和传输质量，是无线网络研究的重要课题。随着现代社会对通信业务要求的不断提高，网络的业务类型越来越趋向多样化。为提高相应的 QoS 保证，优化网络性能，这就对 MAC 层的接入机制提出了更高的要求，各种接入方式正处于不断的改进和融合之中。

2.1 MAC 协议的分类

MAC 协议可以分为以下三类^[1]：

1. 固定分配（Fixed Assignment）。固定（预）分配类的 MAC 协议是把共享的一条信道分割成若干个相互独立的子信道，每个子信道又分配给一个或多个用户专用。四种基本的固定分配多址技术是频分多址（FDMA）、时分多址（TDMA）、码分多址（CDMA）和空分多址（SDMA）。因此，固定分配信道接入也称为信道分割（Partition or Division）。通常可将这几种固定分配多址方式组合，形成混合多址。

2. 随机分配（Random Assignment）或竞争（Contention）类。随机竞争类 MAC 协议使用的传输媒体一般是广播式信道，连接在这条信道上的终端都可以向信道发送广播信息。如果终端需要发送信息，它以某种方式竞争信道的使用权，一旦得到使用权就以某种规则发送（可以立即发送，也可以退避后发送）。所有的终端都能接收到发自任意一个终端的信息，如果检测到是发给自己的就接收下来，否则丢弃。这类协议有 Aloha 系列、CSMA 系列等。

3. 按需分配（Demand Assignment）类。按需分配类 MAC 协议也称预约类或无竞争类 MAC 协议，如 Token Ring、PRMA、DAMA 等。这类协议的原理是，网络按某种循环顺序询问每个终端是否有数据发送，如果有则立即发送，否则网络立即转向询问下一个终端。根据询问方式的不同，这类协议又可分为集中（Centralized）式控制和分布（Distributed）式控制

两种类型。在集中式控制协议中，存在一个控制中心，由它完成对网络中各终端的询问控制；在分布式控制协议中，各终端自行按照某种确定的规则（如令牌）管理询问控制过程。

一个实际的 MAC 协议，通常以上多种协议的综合。评价 MAC 协议的性能指标或设计 MAC 协议需要考虑的技术要求主要有吞吐率、延迟、公平性和稳定性等。理想的 MAC 协议应该具有尽可能小的延迟，尽可能高的吞吐率，公平性和稳定性高，可伸缩性（Scalability）以及支持多媒体（QoS）业务等特性。

2.2 无线媒体 MAC 协议

WLAN 是传输媒体为无线的 LAN，无线媒体有着与有线媒体不同的特性，这将会对无线 MAC 协议带来许多新的挑战。无线媒体是一个开放的、共享的广播媒体，多个节点可以采用前述的媒体访问机制同时访问媒体。

当前，无线 MAC 协议面临的主要问题表现在以下几个方面。

(1) 资源有限。无线媒体的信道和带宽资源有限，设计 MAC 协议时要考虑充分利用信道和带宽资源。

(2) 信道为时变信道。无线信道为衰落信道，信道特性随时间变化，从而引起传输质量、传输容量和连接性（如用户数）的动态变化。由于信道的时变性，就需要 MAC 协议具有尽量大的吞吐量。

(3) 半双工操作。在无线系统中，当一个节点发送数据时，由于许多发射信号能量会泄漏到接收通道，形成自干扰，因此，在发送时很难进行接收侦听。大部分系统为半双工操作，上行链路和下行链路需要时分复用或者频分复用，发送端的碰撞检测 CD (Collision Detection) 很难实现，一般改变碰撞避免 CA (Collision Avoidance) 机制。

(4) 突发信道错误。由于信道的时变特性和信号强度的变化，无线传输过程中很容易发生错误。而且，如果节点遭受衰落，就会产生长的突发错误。

(5) 依赖位置的载波侦听。在自由空间中，信号强度随距离的平方而减小。因此，载波侦听是接收机相对于发射机位置的函数。

(6) 鲁棒性。鲁棒性表现在两个方面，即对抗信道衰落的信道鲁棒性和网络鲁棒性。（这里的“鲁棒性”，是指在对抗信号衰落时，信道和网络仍能维持稳定工作的生命力）信道衰落使两节点间链路出现短时不稳定，但不能因此产生系统不稳定行为。

(7)对 PHY 层透明。MAC 协议要支持多种物理层，而不同的物理层有不同的设计和传播特性，MAC 协议需要定义一套新的接入机制，并能与不同的物理层相接。

(8)公平性。无线信道容量有限，带宽公平共享变得很关键，短期和长期公平性都很重要。但接入的公平性与 QoS 有一定的矛盾。

(9)低功耗（节能）。无线网络的一个重要特点就是支持移动终端，移动终端一般靠电池供电，而无线设备的电池能量是有限的。收发信机的功耗对整个移动终端的工作时间有重大影响。

(10)对移动性的支持。有些 MAC 协议可以直接支持终端的移动，既能支持越区切换也能支持漫游。但也有一些 MAC 协议是建立在终端不移动或慢速移动的基础上的。如果在不支持移动的 MAC 协议中有移动的终端出现，则会产生“插入终端（Insert Terminal）”问题。

此外，无线 MAC 协议还要求能建立没有先验知识的对等（Peer to Peer）连接。

2.2.1 固定分配类 MAC 协议

面向语音的固定分配类 MAC 协议主要有 FDMA、TDMA、CDMA^[1]。FDMA 是把系统总的频带分成若干个子频带，而把每个子频带再分配给每个用户。TDMA 把每个频分信道分成若干时隙，然后把每个时隙再分配给每个用户。CDMA 给每个用户分配一个伪随机码进行扩频，这些码具有优良的自相关和互相关性能；在接受端，这些码序列用来把所需用户信号变换为原来的带宽，其他用户的信号仍然是带宽信号；在这一过程中，如果有窄带干扰，则将受到抑制。TDMA 和 CDMA 通常用 FDMA 来将它们的频带分成小的频道，然后再进行时分或码分。

1. 频分多址（FDMA, Frequency Division Multiple Access）。采用频分多址时，所有用户能够同时发射信号，各信号工作于不同频率的信道上。这些频道互不交叠，其宽度应能传输一路信息，而在相邻频道之间无明显的串扰。在高低两个频段之间应留有一段保持频带，其作用是防止同一部设备的发射机对接收机产生干扰。

2. 时分多址（TDMA, Time Division Multiple Access）。在时分多址系统中，不同的用户通过按照预先分配好的顺序占用信道的办法来共享同一频带。每个用户占用一个周期性重复的时隙，因此可以把一个信道看作每个帧都会出现的特定时隙。各个用户的发射相互连成一个重复的帧结

构。

3. 码分多址 (CDMA, Code Division Multiple Access)。在 CDMA 系统中, 所有用户都使用同一载频, 并且可以同时发射。每个用户都有其自己的伪随机码, 且与其他用户的扩频码几乎是正交的。接收机用相关检测得到需要的码字, 其他码字由于不相关就作为噪声处理。为了检测出有用信号, 接收机需要知道发射机所使用的码字。

2.2.2 随机竞争 MAC 协议

面向数据的随机竞争 MAC 协议分为两大类^[1]: 一类是基于 ALOHA 的无线随机 MAC 协议, 协议中各用户终端不需经过协调各自发送自己的竞争分组; 另一类是基于载波侦听 (CSMA) 的无线随机 MAC 协议, 协议中各用户终端在发送自己的分组之前需要侦听信道。前者多用于广域网中, 后者常用于局域网中。

1. 基于 ALOHA 的无线随机 MAC 协议

最简单的随机接入协议是 ALOHA 协议或纯 ALOHA 协议。当一个站点要发送信息分组 (可带有纠错编码) 时, 并不需要注意信道是否空闲, 只要直接发射信息就行了。当然, 由于用户随机发射, 当几个用户的发射在时间上有重叠时, 就会发生碰撞 (冲突)。如果发射端在发射后的一段时间 (比从接收端接收到确认的来回延迟要长) 内没有收到确认, 就认为发送的分组发生了冲突, 需经过一个随机延迟后再发。

L.G.Roberts 在 1975 年提出了时隙 ALOHA 协议, 它把时间轴分成许多时隙, 每个时隙的长度为一个分组的长度, 用户仅在时隙的开始时刻发送分组。D.Raychaudhui 提出了 AREJ-ALOHA 多址技术, 它把每个用户要传输的分组排成一列发送, 每个分组有自己的分组头, 如果发生碰撞, 则只重发碰撞损失的分组。将时隙 ALOHA 与 TDMA 相结合, 构成了预约 ALOHA (R-ALOHA)。在 R-ALOHA 协议中, 时隙分为竞争 (Contention) 期和非竞争 (Contention-Free) 期。在竞争期内, 用户用非常短的分组来预约即将来到的非竞争期, 非竞争期用来传输长的信息分组。分组预约多址 PRMA (Packet Reservation Multiple Access) 也是一种将时隙 ALOHA 和 TDMA 相结合的协议, 适用于在无线信道里传输可变的混合语音分组和数据分组业务。

2. 基于 CSMA 的无线 MAC 协议

基于 ALOHA 的竞争协议效率低的原因是碰撞和重发。为了解决

ALOHA 碰撞问题，提高吞吐量，采用在发送数据前先监听信道或称先听后说（Listen Before Talk）的 CSMA 协议，它是对 ALOHA 协议的另一类简单改进。

CSMA 协议的基本操作如下图所示。用户 1 连续两次先监听信道（空闲）后发送，用户 2 在用户 1 第二次发送时监听信道（发现忙），采用一定的退避（Back Off）算法延迟后再处理。

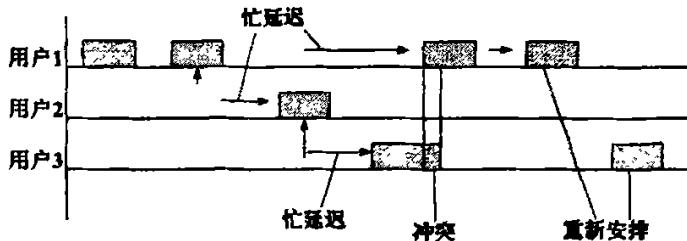


图 2.1 CSMA 协议基本操作

CSMA/CD 是用于有线以太网的 MAC 协议。在这个协议中，假设每个发送站点都同时在监测信道。当某个发送站点检测到信息碰撞，就会自动停止发送信息分组，并发送一个干扰分组迫使冲突的另一个站点停止发送。CSMA/CD 通过在碰撞情况下停止发送减少了干扰时间，而同时发/收的另一个优点是信息不需要接收方确认。

在 CSMA/CA 中，每个工作站都会在传输之前监测它附近的介质，如果发现附近的介质有载波在传输，那么这个工作站就会延迟传输。

MAC 协议吞吐率不高的原因主要是碰撞或冲突的存在，业务越重，碰撞越严重。可以通过分时隙（Slotting）、碰撞检测（CD）或碰撞避免（CA）等方法，改变重传（Repeat Transmission）对列的长度或调整重传的时间，进而改变重传的概率，缓解进一步的碰撞。解决碰撞的一种更为有效的方法就是采用冲突分解算法 CRA（Collision Resolution Algorithm）或竞争分解算法（Contention Resolution Algorithm）。

CRA 的核心是碰撞后分组如何重传，可由 $1/2$ 概率，分组到达碰撞节点的时间，节点的标号（ID）等多种方法来决定。但这些方法都属于分裂算法。常用的有树形算法（Tree Algorithm）和先到先服务 FCFS（First Come First Service）算法。

树形分解算法的工作过程为：在系统发生碰撞后，不涉及冲突的所有节点停止竞争，同时 CRA 协议开始工作。将碰撞节点的集合根据它们的 ID 等参数分成子集，其中一个子集在碰撞后的第 1 个时隙传输。如果再发生碰撞，再分为更小的子集。如果节点竞争成功，则将其从等待集合中去

除，算法对相邻树枝进行处理。算法对每个树枝进行处理，动态的调整指配区间（Allocation Interval）的长度和起始时刻，尽力保证先到分组最先传输成功。

3. 有中心的（Centralized）随机无线 MAC 协议

ISMA（Idle Sense Multiple Access）协议要求网络中设置一个中心站，但不要求设置专用辅助信道，载波检测和碰撞检测都由中心站完成。当信道空闲时，中心站周期性的广播很短的信道空闲信令 IS（Idle Signal）。某站如有数据帧等待发送，则需监测信道，如果收到了 IS，方可开始发送。为了避免碰撞，所有站点当监测到 IS 后，均以概率 p 发送数据帧，否则以概率 $1-p$ 退避。如果两个或两个以上的站点发送，就会发生碰撞。中心站无法解码任意发送信息，则重新广播 IS。当中心站接收到一个信息时，它就会广播带确认的 IS（ISA）用于对前一个发送信息的确认，同时也是下一轮传输的 IS。在 R-ISMA 中，站点发送预约包 RP（Reservation Packet）以响应 IS。当中心站收到一个预约请求，它就向那个站点发送一个轮询信令 PS（Polling Signal），只有被轮询的站点才能发送数据包。

数字/数据检测多址（DSMA）协议是一种有中心的基于 CSMA 方式的随机接入协议。在 DSMA 协议中，中心站在其控制信道中发送一个表明上行信道状态（忙或空）的标志，移动站或外围站在准备接入前，先监测这个标志。如果信道是空的，则在下一个时隙进行发射；否则延迟。一旦中心站检测到发射已经开始，它就会把标志置成忙，直到发射结束。

随机地址轮询 RAP（Randomly Addressed Polling）协议是一个基于竞争的接入协议。在竞争期内，各站点选择一个相互正交的伪随机（Pseudo-Random）数（码）同时发送。在中心站有一个可以并行解码竞争请求的 CDMA 接收机（通常用硬件实现）。在竞争阶段，此接收机可同时实现对多个发送信号的解码接收。保留 RAP（R-RAP）采用保留机制对 RAP 协议进行了改进，用来支持流业务（Stream Traffic）。GRAP 也是对 RAP 的改进，它采用超帧结构，新来者只允许在最后的 GNR 帧发送。在前一超帧中使用码字 r 发送成功的站点在 Gr 帧中发送。R-GRAP 是 R-RAP 和 GRAP 相结合的协议，它允许站点在超帧中的特殊帧中保留特殊的码字。

资源拍卖多址访问 RAMA（RAMA）协议是一种采用确定的接入算法获得资源分配的随机接入协议，每个节点用一个由几位数字（ b -bit）构成的号码 ID 来惟一识别，冲突分解就是基于对这一 ID 的一个符号一个符号的传送。在竞争阶段，每个节点一个符号一个符号的发送此 ID，中心节点（BS）向所有的节点广播它收到的符号。如果这个符号与节点传输的符号

不匹配，它就退出竞争。经过拍卖过程后，每个节点都分配到一个信道。不断重复这个过程，直到没有节点申请信道或者没有空闲信道。

2.2.3 混合 MAC 协议

21 世纪是信息化时代，信息时代的主题是多媒体（Multiple-Media）。多媒体就是多种媒体，主要有语音（Audio）、视像（Video）、数据（Data）等。还可以分为电路交换业务和分组交换业务、面向连接的业务和面向非连接的业务、实时业务和非实时业务、突发业务与连续业务、窄带业务和宽带业务等等。

对于一个通信系统，不同的业务有不同的要求。例如，语音业务可以忍受较高误码率和分组丢失率，但对时延却有严格的要求；分组数据可以容许时延，但对误码率和分组丢失率非常敏感。对于支持多媒体的通信系统，其 MAC 协议也必须是支持多媒体的。支持多媒体的 MAC 协议必然是多种 MAC 协议的综合，或者是对不同业务有保证（Guaranteed）的 MAC 协议。通常采用受控的办法、按需分配（Demand Allocation）的办法和预约的办法等来实现。

目前的通信网有两种类型，即以语音为主的移动通信系统和以 IP 分组业务为主的 Internet 网络。对于前者，已逐渐开始支持数据业务，特别是 IP 业务。第三代甚至第四代的移动通信系统基本上都是以 IP 为核心，但同时支持语音业务。对于后者，IP QoS、VoIP 等都是在 IP 网络中支持多媒体和语音的重要研究方向和研究内容。

1. 在面向语音业务的网络中增加数据业务

在面向语音的网络中，采用的 MAC 协议主要是用于电路交换业务的固定分配方案，如 FDMA、TDMA 和 CDMA 等。由于这类系统投资大，覆盖面广，升级困难，因此，在这类系统中增加数据功能要充分利用现有基础设施、终端和频带等。

(1) 在 FDMA 模拟蜂窝网络中增加数据业务。真正的 FDMA 模拟蜂窝系统现在已经停用，但从技术原理上讲，实现在 FDMA 系统中传输数据仍有一定的意义。CDPD 系统是实现这一目标的系统。

CDPD 系统利用在每个小区内移动用户暂时还未用到的信道来传输数据，速率最高可达 19.2kb/s。CDPD 系统支持信道跳跃技术，允许一个移动数据终端在会话期间从一个信道转换到其他信道。CDPD 系统采用的 MAC 协议是 DSMA 协议。

(2)在 TDMA 系统中增加数据业务。TDMA 系统的典型代表是 GSM 系统。为了在 GSM 系统中传输数据业务，并充分利用 GSM 的原有空中接口和基础设施，提出了 GPRS 技术。GPRS 系统采用与 GSM 系统相同的物理帧格式和调制技术，利用 GSM 网络中暂时没有使用的时隙来传输数据，并通过有线网络传输到增加的分组交换网中。TDMA 帧格式的灵活性使得可以分配多个时隙来支持更高的传输速率，因此，GPRS 系统可以支持高达几百 b/s 的数据速率。在 TDMA 系统中传输数据业务时使用的 MAC 协议与 CDPD 类似，只不过是把信道换成时隙而已。

(3)在 CDMA 系统中增加数据业务。与 FDMA 和 TDMA 系统不同，CDMA 系统中所有用户同时使用所有的带宽-时间资源，语音接入和数据接入的原理和过程都一样，不需要改变接入方式。但通过语音的静默检测和语音插空技术，可以提高数据传输速率。

2. 在面向数据业务的网络中增加语音业务

在面向数据业务的无线网络中大都采用基于竞争的分组通信协议。要使这些协议支持语音业务，需要解决时延和在重负荷时的低吞吐率两个问题。

(1)语音业务的 QoS。在分组通信中，PSTN 语音用户的 QoS 指的是保证 64kb/s 的 PCM（或 32kb/s 的 ADPCM）编码数据速率和 100ms 左右的最大时延，也称为有线业务的语音质量。由于无线信道的特点以及切换时造成的掉话等原因，使得移动电话的 QoS 比有线语音质量要低。移动电话 QoS 的目标就是有线业务的语音质量。

(2)VoIP (Voice over IP)。在面向数据的分组交换环境下，通常采用“尽力而为”的方式，接入方式以竞争接入最为典型，这样，业务的 QoS 就无法得到保证。为了在 IP 网络中传输语音，近年来对 VoIP 的研究日益深入。在低速率的无线网络中，VoIP 意义不大；但在高速的无线网络（如 WLAN）中，VoIP 将非常有价值。

3. 有保证（Guaranteed）的 MAC 协议

轮询协议（Polling Protocol）是一类有保证的协议，确保信道带宽的浪费最小，或者说确保有最高的信道利用率，但不一定能支持 QoS 和多媒体。在轮询协议中，信道测试由控制握手来实现，成功的握手可以确保在节点和 BS/AP 之间存在优良的信道。

自由令牌 MAC 协议 DTMP (Disposable Token MAC Protocol) 将上述协议中的轮询-请求-轮询-数据 (poll-request-poll-data) 周期修改为轮询-数据 (poll-data) 周期。在 DTMP 协议中，当 BS 向某节点发出轮询时，

同时表明 BS 是否有数据向该节点发送。如果 BS 表明没有向该节点发送的数据，而且该节点也没有数据要发送，则保持静默。如果 BS 有数据要向该节点发送，则该节点发送一个短的信息，然后 BS 就发送数据。当该节点有数据要发送时，它就在对轮询的响应中发送数据。这种协议多用于 TDD 系统。

Acampora 提案提出了用于智能天线系统的轮询协议。协议分三个阶段工作：轮询阶段、请求阶段和数据传输阶段。在轮询阶段，通过用独特码（Unique Code）向所有节点轮询，BS 首先识别出所有的活动节点。没有数据发送的节点保持静默，活动节点如果有数据要发送，就用其独特码回复。然后，BS 广播此独特码以使每个节点都知道活动节点的号码和次序。在请求阶段，所有活动节点按次序向 BS 发送请求。在数据传输阶段，BS 轮询节点来传送数据。

4. 混合接入（Hybrid Access）的 MAC 协议

混合接入协议实际上是吸收了具有随机机制的统计（Statistical）接入协议和具有轮询机制的确定（Deterministic）接入协议优点的综合协议。根据在 BS/AP 上实现的基于调度（Scheduling）和预约（Reservation）的策略，可将混合接入协议分为随机预约接入 RRA（Random Reservation Access）类和按需分配 DA（Demand Assignment）类两类协议。

2.3 用于 WLAN 中的 MAC 协议

MAC 协议的选择与设计非常复杂，需要综合考虑网络的结构、节点的数量、业务的类型与要求以及物理层的限制等多方面的因素。由前面的分析可知，WLAN 首先是一种无线网络，而且是一种以突发数据业务为主（同时也可支持多媒体业务）的分组无线网络，带宽有限，信道环境恶劣，还要支持有中心结构和分布式结构两种类型的网络拓扑，同时还要求具有节能、公平、安全等多方面的功能。随机接入 MAC 协议适合于强突发性业务。ALOHA 是一种简单的随机接入协议，当业务量较重时，容易发生业务流碰撞。而载波侦听多址访问 CSMA 技术使整个信道带宽为所有用户共享，只有当信道空闲时，才允许用户发送信息，这种方式降低了碰撞发生的概率。而 CSMA/CA 将时间域的划分与帧格式紧密联系起来，保证某一时刻只有一个终端发送，实现了网络系统地集中控制。目前，主流的 WLAN 系统是 IEEE 802.11x 系统和 HiperLAN2 系统，蓝牙系统、HomeRF 系统也都有不少应用。这些 WLAN 系统的 MAC 协议，大都是以随机接入

为主的混合 MAC 协议。

2.3.1 IEEE802.11x 的 MAC 协议

在 IEEE 802.11x 无线网络中，MAC 层功能较复杂，它主要包括 MAC 数据业务接口、MAC 控制状态机、MAC 管理业务接口、MAC 管理业务机和分布式业务接口等功能模块，如下图所示。此外，MAC 层的 MIB (Management Information Base) 也包含在 MAC 的管理功能中，它主要用来存放 MAC 的管理信息。

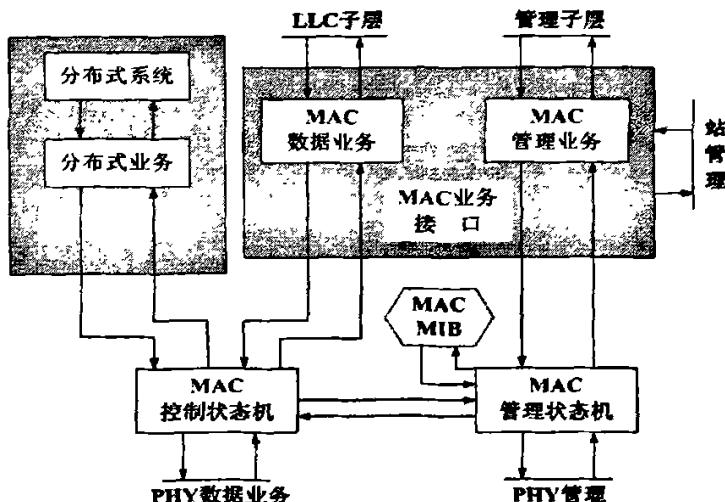


图 2.2 MAC 功能模块结构

由上图可知，MAC 业务接口从高层或从主机管理实体接收业务请求，根据具体的请求业务分配到 MAC 的数据业务或 MAC 管理业务，MAC 数据业务和 MAC 管理业务解释接收到的业务请求，通过相应的信息告知状态机（控制状态机和管理状态机），状态机激发物理层进行有关的业务活动；或者是一个相反地过程。

AP 提供了 MAC 和分布式系统地接口，主要提供分布式业务。分布式业务从分布式系统接收业务请求，并将有关的请求传到 MAC 控制状态机。与之相反，分布式业务也从 MAC 控制接收指示（Indications）并将其传到分布式系统。

MAC 控制状态机提供分布式协调功能 DCF (Distributed Coordination Function) 和点协调功能 PCF (Point Coordination Function)，提供异步的、无连接的接入控制，从而有效的利用无线媒体进行通信。

MAC 管理状态机主要提供：MAC、MIB 的存取，联结（Association），

认证（Authentication）与加密，电源与节能管理以及时间同步等业务。这些业务用来为主机的管理服务。

本文算法的提出是基于 IEEE 802.11 的 MAC 协议，对于其接入机制的详细分析研究在第四章中阐述。

2.3.2 HiperLAN2 的 MAC 协议

HiperLAN2 是另一类 WLAN 技术标准，由欧洲的 ETSI 制定。它工作在 5GHz 频段上，采用 OFDM 作为物理层，因而可以有效对抗多径干扰，提高数据速率。此外，由于采用和 IEEE 802.11a 相同的物理层，因此它们可以共享一些相同的部件，从而在较大的范围内降低系统成本。HiperLAN2 技术的主要特点包括高传输速率、面向连接、QoS 支持、自动频率分配、安全支持、移动性支持等。

HiperLAN2 的 MAC 协议是一个基于 TDD 的动态 TDMA 多址方案，采用的时隙结构在 HiperLAN2 中称作 MAC 帧。所谓动态即是由接入点配置无线资源并动态调整 MAC 帧各部分的结构比例，动态分配信道，以达到资源的最佳利用。

HiperLAN2 MAC 的信道接入协议基于信道检测机制，是一种预约与冲突分解相结合的接入协议。对于一个节点，当有分组到达时，如果在一定的时间（1700 bit）内信道被检测为空闲，则立即发送信息。否则，如果发现信道为忙，正有分组传送，则节点同步在该分组的结束时刻，并将时间轴划分为时隙，通过确定优先级（Prioritization）、消除（Elimination）和同意（Yield）这三个冲突分解阶段接入信道。如下图所示：

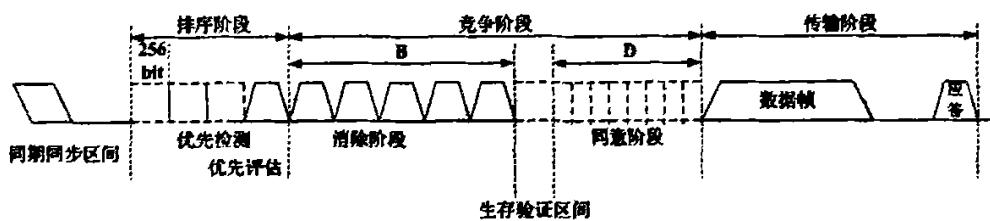


图 2.3 HiperLAN2 的信道接入过程

2.3.3 其他 WLAN MAC 协议

1. GSMA (Global Scheduling MA) 协议。GSMA MAC 协议是一种无冲突的预约多址方式，适宜于高速数据总线，它基于时分双工的概念。

2. 在 Ad Hoc 网中的使用方向性天线的 MAC 协议。带有方向性天线的 MAC (D-MAC) 协议很简单, 与 IEEE 802.11MAC 协议类似, 都在 Data 后立即发送 ACK, 但 D-MAC 协议是以方向性天线发送。有两种形式的 D-MAC 协议: 一种是方向性的 RTS (DRTS), 另一种是混合方向性 RTS 和全向 RTS。

3. HomeRF MAC 协议。由无绳电话技术 DECT (Digital Enhanced Cordless Telephone) 和 WLAN 技术相互融合构成 HomeRF 采用的共享无线应用协议 SWAP (Shared Wireless Access Protocol) 为 TDMA+CSMA/CA 方式, 适用于小范围内的多种传输业务类型, 并且能够与公众交换电话网 PSTN 和互联网进行交互式操作。

2.4 小结

本章分析介绍了 MAC 协议的分类, 从固定、随机、混合三类介绍各种类别的无线 MAC 协议, 最后分析了 IEEE 802.11x、HiperLAN 等 WLAN 应用的 MAC 协议。

第三章 无线资源管理及信道分配

与有线局域网相比，无线局域网的传输媒质为无线电波或光，这使无线信道的传输误码明显增高。即使没有分组冲突，分组丢失率也会显著增大；由于电磁波的频率资源有限，使得 WLAN 的传输速率和通信容量受到限制；由于无线信道存在着衰落，因此会出现许多影响通信的问题。因此，如何高效的管理使用有限的无线资源成为衡量 WLAN MAC 协议的一个重要部分。

3.1 概述

从无线局域网的通信机制来看，无线计算机通信的传输介质与移动通信系统的相同，并且随着计算机无线网络通信与移动通信的发展，无线局域网与移动通信系统支持的业务越来越一致，所以无线计算机通信的资源管理与移动通信系统的无线资源管理基本相同。并且，由于无线计算机通信的历史并不长，尤其是充分发挥无线通信的“可移动”特点的无线计算机通信则是近 10 几年来才出现的事情，因此主要从移动通信系统方面介绍和研究无线资源管理及信道分配。

3.2 无线资源管理

无线局域网是采用无线传输媒介的计算机局域网络，是计算机网络通信子网（Subnet）的一部分，是计算机网络技术和无线通信技术结合的产物。鉴于其有限的介质资源，如何充分、高效的利用无线资源为用户提供高质量的服务一直是研究的热点。

无线资源管理负责空中接口资源的使用，保证移动用户的 QoS 要求，维持系统预规划的覆盖区，为系统提供大容量。从移动通信系统方面来说，无线资源管理的目标是在有限的频谱带宽的条件下，为网络内无线用户终端提供服务质量保证，其基本出发点是在网络话务量分布不均匀、信道因衰落和干扰而起伏变化等情况下，灵活分配和动态调整无线传输部分和网络的可用资源，尽量提高无线频谱利用率，防止网络阻塞和保持尽可能小的信令负荷。其中，所说的话务量是针对过去及现有的移动通信系统来说

的，对于无线局域网及下一代移动通信系统，则应是多媒体信息量。

对于无线局域网资源管理的研究，大部分都是充分利用系统的资源[10,11,12,13,14]。文献[10]针对独立的管理各自使用的资源的多个 WLAN 之间的公共资源的使用问题，提出使用一个独立于所有的 WLAN 的 RRB(Radio Resource Broker) 将多个 WLANs 使用的资源进行协调管理，提高资源的利用率。文献[11]针对 HiperLAN2 中大量负载的情况下移动终端信道数的分配问题，提出分配给移动终端的信道数根据负载量进行设定。其主要思想是在接入尝试的时候进行限制，而不是使移动终端通过了接入尝试，却在分配资源的时候产生冲突。文献[12]提出定义一个使用率，通过动态改变使用率的大小控制数据帧的传输。文献[13]分析了 UPMA (User-dependant Perfect-scheduling Multiple Access) 协议中节点竞争到资源却没有数据包需要传输的情况，通过设置一个节点一次传输包的数量的门限值以及在节点的最后一个包里加入结束标志防止了信道垄断和资源浪费。文献[14]将 max-min 公平方案应用到多媒体无线网络的资源分配方法中去，分实时多媒体传输和非实时数据传输两种情况进行资源分配。

文献[15]指出，资源分配算法的核心在排队和时序安排上，简单的说，这种机制用来控制选择将哪些组发送到呼出链路上。几种主要的排队和时序安排规则如下：

(1)先进先出排队。分组被放置在一个单个队列中，按照其到达的先后顺序获得服务。

(2)公平排队。分组被划分成流并被分配到各自流专用的队列。这些队列以循环方式得到服务，空队列就被跳过。公平队列也成为基于流的排队。在优先级相同的情况下，WFQ 算法演化为公平排队算法。

(3)优先排队。首先对分组进行划分并放入具有不同优先级的队列。对于某一队列中的分组，只有当更高优先级的队列都空时，才从头部开始进行发送。同一优先级队列内部的分组采取先进先出的原则。

(4)加权公平排队。分组被划分成流并被分配到各自流专用的队列。依据相应流的所需带宽分配给每个队列一定分额的输出带宽。这种方法通过区分可变长度的分组，可以防止大分组的流比较小分组的流获得更大的带宽分配。

(5)基于等级的排队。分组被划分成不同的服务等级并分别被分配到指定了服务等级的队列。系统分配给每个队列不同分额的输出带宽，且以循环方式服务，跳过空队列。这种算法不利于动态调整。

3.3 信道分配

信道是信源和信宿之间信息传递的通路，它是通过传输媒体或传输介质来实现的。所谓“信道分配^[16]”（Channel Allocation）是指在固定分配或动态分配的基础上，以最有效的利用可用无线频谱资源的方式，把信道分配到系统的小区或分层级上。根据不同特点和应用方式，可对信道分配策略进行不同的分类。最普通的就是根据信道与小区的关系，可以把信道分配策略分为固定信道分配策略（FCA）、动态信道分配策略（DCA）和混合信道分配策略（HCA）^[16]。

在 FCA 方案中，整个服务区域被分为一定数量的小区，每个小区根据一定的信道复用形式配置一定数量的信道，相当于在一个小区群的不同小区间对信道完全隔离，这种配置方式要求满足一定的信号质量。FCA 的呼叫接入控制策略为：当有新的呼叫要求接入，如果相对应的小区里存在空闲信道，就接受一个呼叫。FCA 的信道分配策略是：以一定的方式在配置给本小区固定信道中选择一个信道给呼叫。FCA 不存在信道重分配过程。FCA 方案非常简单，但是，它们不能随着业务条件和用户分布的变化自动调整。

在 DCA 方案中，所有的信道资源放置在中心存储区中，表示信道的完全共享。一旦有新的呼叫要求，则在满足 CIR_{min} （最小载波干扰比）门限的信道中按一定的算法选择合适的进行分配。DCA 的呼叫接入控制策略与 FCA 区别不大。DCA 的信道分配策略为全局性策略，而信道重分配也是 DCA 的一大特点。DCA 有极好的业务自适应性和高度灵活性，弥补了 FCA 的不足，但计算和控制复杂度也很高。当系统负荷很高时，DCA 的效率不如 FCA。

HCA 方案将所有的信道分为两个部分：一部分信道固定配置给某些小区，即部分信道隔离；另一部分信道则保留在中心存储区中，为系统中的所有用户所共享，即部分信道共享。HCA 是 FCA 与 DCA 的折衷，故称为混合分配。

常用的固定信道分配方案（FCA）有：均匀固定信道分配方案（UFCA）、非均匀信道分配方案（NUFCA）、静态信道借用分配方案（SBFCA）、简单信道借用分配方案、混合信道借用方案（HB，包括简单混合信道借用 SHCB、信道排序借用 BCO、直接信道锁定借用 BDCL、偏向共享 SHB、带重分配的有序信道分配方案 ODCA 等）。

至于 DCA 的分类，国内外的文献中出现了很多种不同的看法。总体上来说，根据其功能可以分为：小区信道指派的慢速 DCA，呼叫接入阶段的接纳控制（CAC）DCA，进行信道调整的快速 DCA。而按照控制方式，则包括集中/中心控制式 DCA 和分布控制式 DCA。在集中控制式 DCA 方案中，信道通过中心控制器从中心存储区分配给呼叫临时使用，其策略有局部优化动态分配策略和全局信道复用优化策略。在分布控制式 DCA 方案中，信道的确定是在移动终端 MS 和/或基站进行，而不是集中由移动交换中心 MSC 来控制，其策略有呼叫更新式分配策略和干扰自适应式信道分配策略。

HCA 将可用信道数量分为固定集和动态集。固定集由分配给小区的规定信道构成，一般情况下，小区首先使用这些信道分配给信道呼叫。动态集为整个系统所有小区共享。当某小区有呼叫要求到达时，若这个小区没有空闲规定信道，则从动态信道集中选择一个信道分配给呼叫。从动态集中选择信道可以用前面提到的任何一种 DCA 方案。HCA 主要的方案包括：信道重排序 HCA 和呼叫到达无可用信道时排队（代替阻塞）的 HCA 方案。

一般来说，信道分配的性能评价指标主要有以下五种：呼叫阻塞概率、通信中断概率（包括通信过程中业务质量下降引起的通信终止概率和越区切换失败概率）、信道分配延时（即分配方案的执行时间）、信道利用率、方案实施中的信令业务负荷。在选择信道分配方案时，总体目标是获得较高的信道利用率、较令人满意的系统服务质量、尽可能短的搜寻时间以及采用尽可能简单的算法。所以在确定一个系统采用何种信道分配方案时，必须综合考虑以上几个对性能有影响的因素，但对不同的系统，其具体要求不尽相同，这时必须有所侧重。因为在系统的通信服务质量与信道分配算法执行的复杂性之间存在着矛盾，而且它与信道搜寻时间和信道利用率也有关系。因此，任何一种方案的提出总是不同矛盾折衷的结果，无所谓全局最优化的解决方案。

3.4 不同类别的信道分配算法

3.4.1 固定信道分配技术

在简单的 FCA 策略中，为每个小区分配相同数量的信道。如果系统的通信量的分配是统一的，这种标准的信道分配是有效的。在这种情况下，

系统全部的平均阻塞概率与一个小区内的呼叫阻塞概率相同。但是，由于系统的通信量会由于时间和空间的波动而不均匀，统一的信道分配会使得某些小区有高的阻塞，而其他小区却有大量的剩余信道，这就导致了低的信道利用率。因此，可以通过信道的不均匀分配^[17,18]或信道借用（Channel Borrowing）方案^[19]来根据负载调整小区的信道数。

在不均匀的信道分配中，分配给每个小区的信道数依赖于此小区预期的传输任务。因此，负载重的小区比负载轻的小区分配更多的信道。在文献[17]中提出了不均匀紧密模式分配（Nonuniform Compact Pattern Allocation）的算法，它根据每个小区的通信量为其分配信道。所提出的方法试图在最小化整个系统的平均阻塞概率的情况下为小区分配信道，文献[18]中的算法使用了相似的不均匀信道分配技术。

在信道借用方案中，已用完所分配信道的接收小区为了接入新的呼叫可以从它的邻近小区借用空闲的信道。如果要借用的信道不干扰小区现有的呼叫，那么它就可以被小区借用。信道被借用之后，其他小区禁止使用它。因此，这种借用有一定损失，并且应当借用尽量短的时间及借用小区最有空闲的信道。一旦呼叫结束后，借用的信道归还给它最初分配的小区。在某些应用中，当呼叫使用本小区的信道后，结束信道借用，将借用的信道释放并归还给它最初分配的小区。

信道借用方案分为简单借用和混合借用两种。在简单信道借用方案中，一个小区最初分配的任何信道可以被邻近的小区临时借去使用。在混合信道借用策略中，分配给每个小区的信道分为两个子集，A（标准或本地信道）和B（非标准或可借用信道）。子集A只用于最初分配的小区，而子集B允许借给邻近的小区。在文献[19]中，分类分析介绍了各种信道分配算法。

1. 简单信道借用方案

在简单借用策略（SB）中，正如FCA那样，一个初始的信道集被分配给一个小区。在所有最初分配的信道用完后，从邻近的小区借用一个可用信道。为了可以借用，信道必须与已经存在的呼叫不相冲突。尽管信道借用可以减少呼叫阻塞，但它会导致信道借出小区的冲突，并且会阻止这些小区将来的呼叫。

由于一个小区可借用的信道集中可能存在多个可用信道，因此从信道集中选择信道的方法对于信道借用方案的性能有重要的影响。所有方案的目标是减少由于信道借用所带来的锁定信道数，不同的是从候选信道中选择借用的信道的特定的方法。基于此，提出了许多从非邻近小区借用信道

的简单借用策略的改进，包括 SBR (Borrow from the Richest)、BA (Basic Algorithm)、BAR (Basic Algorithm with Reassignment)、BFA (Borrow First Available)。

在 SBR 方案中，借用候选的信道是最初分配给接收小区的某一个邻近小区可用信道。如果有多个邻近小区存在可借用信道，就从有最多可借用信道的小区借用。SBR 方案在选择借用信道时并没有考虑信道锁定的问题。

BA 是 SBR 策略的改进，它在选择候选信道借用时考虑了信道锁定的问题。这种方案试图将信道借用影响最厉害的小区将来的呼叫阻塞概率减到最少。与 SBR 一样，候选的借用信道是接收小区某一个邻近小区最初分配的可用信道。

在 BAR 方案中，当最初分配的信道变为空闲时，呼叫从借用的信道转移到最初分配的信道上。在某种意义上，与 BA 方案一样，选择特定借用信道的释放再一次将信道借用影响最严重的小区的将来呼叫阻塞的最大可能性较少到最小。

与借用时试图最优化不同，BFA 选择它发现的第一个候选信道。其中，最初信道分配的基本原理也不同。它并不是直接将信道分配给小区，而是将信道分为集合，然后每个集合按一定的重用距离分配给小区。这些集合顺序编号，当建立一个呼叫，以规定的顺序搜索信道集合寻找候选信道。

2. 混合信道借用方案

混合信道借用方案包括 SHCB (Simple Hybrid Channel Borrowing Strategy)、BCO (Borrowing with Channel Ordering)、BDCL (Borrowing with Directional Channel Locking)、SHB (Sharing with Bias)、ODCA (Ordered Channel Assignment Scheme with Rearrangement) 等。

SHCB 算法是一种简单的混合信道借用技术。每个小区的信道被分为 A, B 两个子集，A 子集中的信道只能被本小区的移动台使用，B 子集中的信道可以借给相邻小区使用。A 与 B 中信道数目的比例由各小区用户负载决定，并可以根据用户负载进行动态的调整。

在 BCO 算法中，不存在 SHCB 算法中硬性分割信道集合的做法，而是将所有信道按照优先级的顺序进行排序，排序最高的信道被分配给小区内移动台的概率最高，而排序最低的信道被相邻小区借用的概率最高。改进的 BCO 算法允许在高优先级的信道释放的时候，使用低优先级信道的移动台切换到高优先级信道上，以降低信道锁定的影响。

在 BDCL 算法中，借出的信道只在借出方向的相应小区内被锁定，在

其他小区仍然是可以使用的。方向性信道锁定可以降低信道锁定对系统性能的影响。并且在 BDCL 算法中也可以实现借用信道的归还，从而降低随后呼叫需要借用信道的概率。

在 CARB (Channel Assignment with Borrowing and Reassignment) 算法中，信道借用以及信道归还的准则都是要使相邻小区未来呼叫的阻塞率最低。ODCA (Ordered Dynamic Channel Assignment with Rearrangement) 算法则是 CARB 算法和 BCO 算法的结合。

SHB 是一种带并列扇区的信道借用方案。系统中的每个小区分为三个扇区，只有其中某一个扇区的初始呼叫可以从它邻近的两个小区借用信道。而且，捐赠小区的初始信道像 SHCB 一样分为两个子集 A 和 B。子集 A 的信道只能用于捐赠小区内，而子集 B 的信道可以借给接收小区。下图显示了 3 小区的 X 扇区的一个初始呼叫只能从小区 1 和 2 的子集 B 中借用信道。

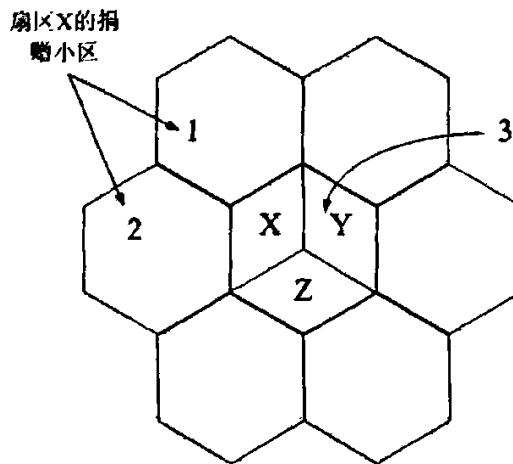


图 3.1 Sharing with Bias

ODCA 方案结合了 CARB 和 BCO 的优点提高了性能。在 ODCA 中，当一个呼叫请求服务时，小区的基站检查是否有最初分配的信道可用。就像在 BCO 中，如果有信道可用，用户将会按照定好的规则分配到一个信道。在这里，所有的信道根据与 CARB 方案一样的标准以预定的顺序编号，并且最小号的可用空闲信道总是挑选出来的。如果所有的初始信道忙，小区可以从邻近的小区借用一个非标准的信道。一旦分配了非标准的信道，更新所有由于分配的信道导致了冲突而受到影响的小区的可用列表。无论何时信道不再需要，相应的更新受到影响小区的可用列表。当标准信道可用时，调用信道再分配程序，保证有效的利用。如果小区使用了非标准信道，使用此信道的呼叫切换到最新释放的标准信道，并且更新必须的可用

列表。如果小区没有使用非标准信道，使用比最新释放的信道优先权低的标准信道的呼叫切换到最新释放的信道。

虽然根据信道分配的规则来看，信道借用技术是对固定信道分配算法的一种改进。但是由于在信道搜索过程中，信道搜索的集合不只局限于当前小区内所分配的信道，而是可能包含信道复用距离以内，也即一簇以内，所有小区所分配到的信道。因此在本质上，信道搜索已经是在整个信道集合中进行，只是分配给本小区的信道在本小区中以更高的概率被使用。所以，从某种意义上来说，采用信道借用技术的算法并非完全意义上的固定信道分配算法，而是一种动态信道分配算法。文献[20]则将其视为混合信道分配方案。

3.4.2 动态信道分配技术

按照信道分配时所依据的信息的不同，动态信道分配算法可分为通话独立的 DCA 和自适应 DCA，前者只基于当前的信道分配情况，而后者要同时使用当前以及过去的信道分配信息。此外，按照控制方式的不同，动态信道分配算法又可以分为集中控制式 DCA 和分布控制式 DCA^[19]。

集中控制式 DCA 由于能够获得系统内各个小区的信息，因此从理论上来说，可以实现一种接近最优的信道分配。但是它同时存在着许多不足，诸如算法复杂，系统开销太大。

分布控制式 DCA 就算法而言是简单易于实现的。在基于小区的分布控制式 DCA 中，信道选择由移动台所在区域的基站完成，每个基站对其控制范围内的可用信道进行记录。各基站之间通过定期交换这些信道记录来更新信道的可用性信息。基于小区的分布控制式 DCA 也叫以达到近似最优的信道分配，但是随之而来的代价是基站之间异常庞大的信息交换。

还有一种仅依靠信号强度测量的干扰自适应 DCA 也引起研究者们的关注。在这种算法中，基站将只利用本地的信道测量信息，而不与周边的基站进行信道信息交换。采用这种算法的系统具有自组织的特性，也正由于不需要信息交换，因此该算法适合与实时信号处理相结合。但是由于在信道分配时只有局部信息可以使用，因而新移动台的加入所产生的同信道干扰可能会导致正在通话的移动台的通信中断。

1. 最大紧致动态信道分配 (Maximum Packing DCA, MP-DCA)

MP-DCA 算法是一种理想的动态信道分配方案，对于新发起的呼叫或切换，系统只有在进行任何全局优化（包括系统范围的信道重新分配）后

都无法提供可用信道时，才会使呼叫阻塞或者切换失败，并且在进行优化时，信道重新分配的次数没有限制。MP-DCA 算法没有太多的实用价值，因为它不但要求掌握系统范围内所有正在使用的信道的信息，而且要进行整个系统范围内的信道重新分配。这样的全局优化是很难实现，执行这样的算法所需要的计算复杂度以及时间复杂度都是实际系统所不能忍受的。但是它为进行动态信道分配的解析分析提供了可能，进而可以获得满足信道复用约束时的系统性能界。

2. 局部紧致动态信道分配 (Local Packing DCA, LP-DCA)

LP-DCA 算法是一种基于小区的分布控制式 DCA 算法。每一个基站采用增广信道占用矩阵 (Augmented Channel Occupancy, ACO) 来分配信道。ACO 矩阵是基站通过小区间信息交换，获得相邻小区的信道分配信息并据此构造的。

MP-DCA 算法和 LP-DCA 算法说明了信道的重新配置可以提高信道利用率，此外，对周边的信道分配信息掌握的越全面，信道分配算法越可以更为有效的分配信道资源。然而当系统庞大时，基于整个系统的信道分配信息的搜集和信道重新配置所带来的系统开销以及决策时延都是不可想象的。对于基于小区结构的信道分配算法，可以通过获得复用距离内相邻小区的信道分配信息来进行局部的优化，从而获得一定的性能改进。而对于基于系统整体的信道分配算法，则需要在系统性能和系统开销之间寻找一个有效的折衷。

3.5 小结

本章从移动通信系统方面介绍了无线资源管理的目标，给出了作为资源管理算法的核心的排队和时序安排的几种主要规则，然后在介绍信道分配技术分类的基础上分析对比了它们的信道分配算法。正如本章一开始所说的那样，如何高效的管理使用有限的无线资源成为衡量 WLAN MAC 协议的一个重要部分。因此，需要将信道分配技术与 WLAN MAC 协议结合起来。

第四章 WLAN 信道分配技术与接入控制协议的优化

无线局域网现有的 MAC 协议标准有很多，但应用最广泛、研究最多的是 IEEE 802.11x MAC 协议。本章将在分析介绍 IEEE 802.11x MAC 协议的 DCF 和 PCF 两种机制的基础上，提出信道分配算法以及基于它对 IEEE 802.11x MAC 协议的优化。

4.1 IEEE 802.11 MAC 协议

4.1.1 DCF/PCF 协议原理

IEEE 802.11x 的无线媒体接入协议称为“基于分布式的无线媒体访问控制协议”(DFWMAC: Distributed Function Wireless MAC)。DFWMAC 支持 Ad Hoc 和 Infrastructure 两种类型的无线局域网。本文讨论的网络结构是 Infrastructure 类型的。

DFWMAC 的基础是 CSMA/CA。它有两种方式，即分布协调功能 DCF (Distributed Coordination Function) 和点协调功能 PCF (Point Coordination Function)，如下图所示。

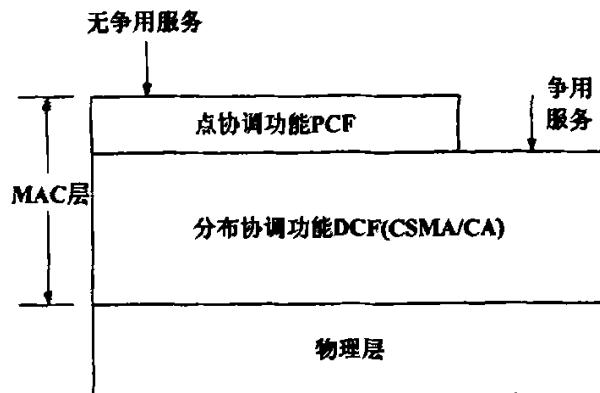


图 4.1 802.11x 的 MAC 层

DCF 是 IEEE 802.11 最基本的媒体访问方法，其核心是 CSMA/CA。它包括载波检测 (CS) 机制、帧间间隔 (Inter-Frame Space, IFS) 和随机退避 (Random back-off) 规程。基本的 CSMA/CA 机制较为简单，其过程是这样的：当检测到信道空闲期间大于某一 IFS 后立即开始发送帧；否则，

延迟接入直到检测到需要的 IFS，然后选择退避时间进入退避。退避结束后重新开始上述过程。每一个节点使用 CSMA 机制的分布接入算法，各个站通过争用信道来获取发送权。由上图可知，DCF 向上提供争用服务。

CSMA/CA 机制的 CA 协议的工作原理如下图所示：

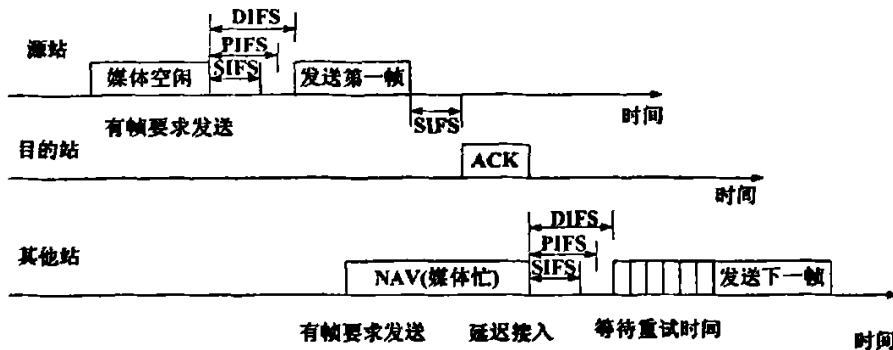


图 4.2 CSMA/CA 机制的 CA 协议

DCF 的另一种工作方式是 RTS/CTS 机制。IEEE 802.11 采用的 RTS/CTS 机制中，RTS/CTS 帧包含有“期间域”。“期间域”用来表明从 RTS 帧尾或 CTS 帧尾到 ACK 帧尾的 MPDU 所占用媒体的时间。源站在发送数据帧之前先发送一个短的“请求发送 (RTS)”控制帧，它包括源地址、目的地址和这次通信（包括相应的确认帧）所需的持续时间（期间域）。如果媒体空闲，则目的站就发送一个“允许发送 (CTS)”的响应控制帧，它也包括这次通信所需的持续时间（从 RTS 帧中将此持续时间复制到 CTS 帧中）。源站收到 CTS 帧后，就可发送其数据帧。

PCF 是可选的 (Optional) 媒体访问方法，用于 Infrastructure 网络结构中。PCF 使用集中控制的接入算法（一般在接入点 AP 实现集中控制），用类似于轮询的方法将发送数据权轮流交给各个站，从而避免了碰撞的产生。

PCF 建立在 DCF 基础上，由 BSS 内接入点 AP 的中心控制器—点协调器 PC (Point Coordinator) 来决定当前哪一个站有权发送数据。PCF 通过 DCF 以较高的优先级来竞争媒体，访问媒体的优先级别是以不同的 IFS 的长短来决定的。PCF 用较短的 PIFS，使 PCF 的业务优先访问媒体。PCF 不像 DCF 那样，每个站用 CCA (Clear Channel Assessment) 和随机退避来竞争信道，而是点协调器用信标帧 BF (Beacon Frame) 定义无竞争期 CFP (Contention-Free Period) 来获得信道，BF 是以一定规则间隔发送的定时信息帧。BSS 内的所有站在每一个 CFP 的开始，设置它们的网络配置矢量 NAV，告诉所有的站在该 NAV 内要延迟接入媒体。工作在 PCF 的 BSS

中的所有站都能够接收到 PCF 控制下发送来的所有的帧，也能够对点协调器发送的无竞争轮询 CF-Poll 做出响应。BSS 内能在非竞争期间工作的站点或对 PC 发出的轮询帧做出应答的站点称为无竞争清醒 (CF-aware) 站点。PC 也只对 CF-aware 站进行轮询。一旦 CF-aware 站被 PC 轮询，它就可以给任何站发帧，而不仅仅只对 PC 响应。CF-aware 站可以主动地请求 PC 的轮询。维持轮询表和决定轮询顺序的方法可以进行设置。被轮询站点在 CFP 内不使用 RTS/CTS，它只发送一个可达任何目的站点的 MSDU，且可以收到来自下一帧的确认应答。如果数据帧不被应答，则 CF-Pollable 站点将不重发该帧，除非它再一次被点协调器轮询或它决定在竞争期间重发。同样，点协调器也不对未确认帧进行重发，它在下一个 CFP 内根据注明在轮询表表头的站点识别号 (SID) 重发未应答的帧。

4.1.2 分组级信道模型

当前对于 DCF 协议的理论分析模型中，大部分是基于文献[21]中 Bianchi 提出的一种马尔可夫链的分析模型。在此主要介绍他的模型及理论分析方法。模型假定有 n 个固定数目的竞争节点。在饱和状态下，每一次成功传输结束后，每个节点立刻有一个可传输的包。而且，因为所有的包是连续的，每个包在传输之前需要等待一个随机的退避时间。

上文中已经介绍了 IEEE 802.11 MAC 协议的 DCF 方式的核心是 CSMA/CA 机制，CSMA/CA 采用离散时间 (Discrete-time) 退避算法，退避的最短时间间隔为一个时隙 (Slot Time) σ 。二进制退避算法是指：当终端检测到信道空闲时间 $\geq \text{DIFS}$ 或发生了碰撞时，按照均匀分布规则，从 $(0, W, -1)$ 中选取一个值作为退避时间。 W 是退避窗口，令 $W = CW_{\min}$ ，则 $W_i = 2^i W$ ， $i \in (0, m)$ ， i 为退避级数， m 代表退避算法可退避的最大退避级数 (Max Backoff Stage)。

令 $b(t)$ 表示一个节点的退避时间计数器的随机取值的统计过程， t 和 $t+1$ 分别表示两个连续的时隙，计数器在每个时隙的开始时刻减 1。由于每个节点的退避计数器的值也依赖于它的传输历史 (例如包队列的头包经历了多少次重传)，随机统计过程 $b(t)$ 是非马尔可夫过程的。令 $s(t)$ 表示节点在 t 时刻的退避等级的随机统计过程。此模型中假设在每一次传输尝试时，忽略经历的重传次数，每个包的碰撞概率 p 是恒定且相互独立的。 p 将作为条件碰撞概率，表示信道中传输的包发生碰撞的概率。这样， p 被假定为一个常量，就可以把二维统计过程 $\{s(t), b(t)\}$ 模拟成离散时间的 Markov

链, 如下图所示:

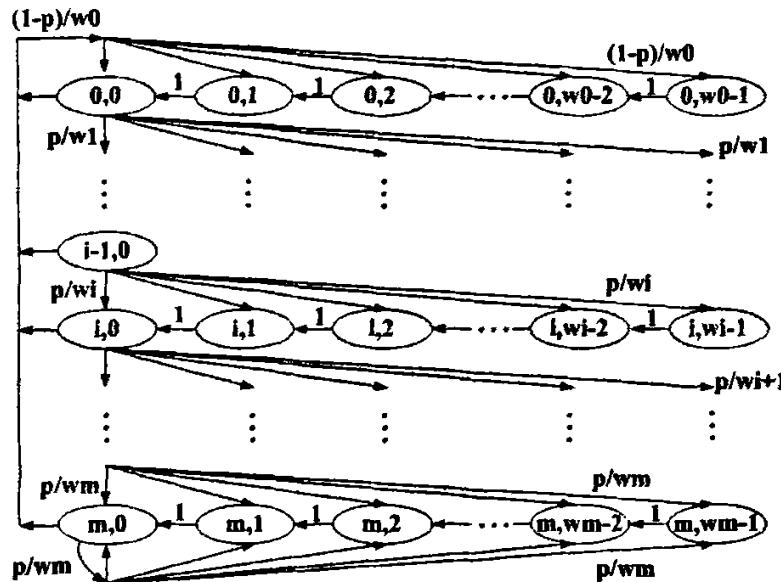


图 4.3 退避窗口大小的 Markov 模型

在此 Markov 链模型中, 一步转移概率为:

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k+1\} = 1 & k \in (0, W_i - 2) \quad i \in (0, m) \\ P\{0, k | i, 0\} = (1-p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) \quad i \in (0, m) \\ P\{i, k | i-1, 0\} = p/W_i & k \in (0, W_i - 1) \quad i \in (1, m) \\ P\{m, k | m, 0\} = p/W_m & k \in (0, W_m - 1) \end{cases} \quad (4.1)$$

其中, 表示方法 $P\{i_1, k_1 | i_0, k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\}$ 。第一个公式表示在每个时隙开始时刻, 退避计时器减 1 的概率为 1; 第二个公式表示在一个帧成功传输之后, 新的帧从退避级数 0 开始, 因此退避值是从 $(0, W_0 - 1)$ 中等概率的取一个值; 第三个公式表示一次不成功的传输后, 退避计时器的退避级数加 1, 退避值从 $(0, W_i)$ 中等概率的选取一个值; 第四个公式表示当退避级数已经达到最大时, 一次不成功传输之后, 退避计时器的取值方法。

令 $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1)$ 为该 Markov 链的稳态分布。根据状态转移图有:

$$\begin{aligned} b_{i-1,0} \times p &= b_{i,0} = p' \times b_{0,0} & 0 < i < m \\ b_{m-1,0} \times p &= (1-p) \times b_{m,0} \rightarrow b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} \times b_{0,0} \end{aligned} \quad (4.2)$$

由于 Markov 链的规律性, 对于每个 $k \in (1, W_i - 1)$, 有

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \times \begin{cases} (1-p) \sum_{j=0}^m b_{j,0} & i=0 \\ p \times b_{i-1,0} & 0 < i < m \\ p \times (b_{m-1,0} + b_{m,0}) & i=m \end{cases} \quad (4.3)$$

因为 $\sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0} / (1-p)$, 利用公式 (4.2) 可将公式 (4.3) 重写为

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \times b_{i,0} \quad i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1) \quad (4.4)$$

因此, 由公式 (4.2) 和 (4.4) 可知, 所有的 $b_{i,k}$ 值可表示为 $b_{0,0}$ 和条件碰撞概率 p 的函数。 $b_{0,0}$ 最终可由标准条件确定, 表示如下:

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \times \frac{W_i + 1}{2} \\ &= \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1-p} \right) + \frac{1}{1-p} \right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

由此可得

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (4.6)$$

定义 τ 为节点在任意一个随机选择的时隙中的传输概率, 由于不管退避级数是多少, 当退避时间计数器为 0 时开始传输, 那么

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (4.7)$$

应当注意, 当 $m=0$ 时, 也就是不考虑指数退避, 导致概率 τ 不依赖于 p , 并且 (4.7) 式变得非常简单, 如下式, 为常数退避窗口问题

$$\tau = \frac{2}{W+1} \quad (4.8)$$

然而, 一般情况下, τ 依赖于条件碰撞概率 p , 而它是未知的。为了得到 p 的值, 应当注意到一个传输的包发生碰撞的概率 p 就是在一个时隙内, 至少 $n-1$ 个剩余节点中的一个节点传输的概率。上述基本独立的假设意味着每个传输在相同的状态注意着系统, 也就是处于稳固状态。在稳固状态下, 每个剩余的节点以概率 τ 传输一个包。由此得出

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (4.9)$$

修改(4.7)式,使分子分母同时除以 $(1-2p)$,且由 $\frac{1-(2p)^n}{1-2p} = \sum_{i=0}^{n-1} (2p)^i$ 可得

$$\tau(p) = \frac{2}{1+W+pW \sum_{i=0}^{n-1} (2p)^i} \quad (4.10)$$

当 $p = \frac{1}{2}$ 时, $\tau(\frac{1}{2}) = \frac{2}{1+W+mW/2}$,因此 $\tau(p)$ 是一个连续函数,而且是一个连续单调递减函数, $\tau(0) = \frac{2}{W+1}$, $\tau(1) = \frac{2}{1+2^n W}$.

4.2 信道分配技术

在文献[1]接入协议的发展趋势的分析中提到,设计 WLAN 的接入机制时,要考虑到作为 3G、4G 系统无缝切换而对接入机制产生的新要求。并且,当前 WLAN 的接入协议对于移动用户或业务的支持性并不高,因此,本文在充分分析各种信道分配技术的基础上提出,借鉴信道分配技术在移动通信网中应用的优势,将信道分配技术融入到 WLAN 接入协议中。

从上文 3.4 节中对基于固定信道分配技术的算法和基于动态信道分配技术的算法的分析中可以看出,信道利用率的改善主要是从信道借用和信道的动态分配方面来进行。有些文章还提出通过改进帧结构或进行帧聚合的方法^[22],提高传输的 QoS 及信道资源的利用率或者减少帧的大小,降低传输开销,提高传输速率。对于提高系统服务质量的研究^[4,23],大多数是给各种业务制定不同的优先级,按照优先级进行信道的分配。这些方法都是基于分配信道前改善系统的资源利用率,并没有分析信道分配之后是否可以进一步改善系统的资源利用率。

在针对移动性提出的信道分配技术中,有些研究是利用信道预留技术实现切换^[24,25,26],但是预留的信道是专门用于切换使用的,在切换发生率较小时,系统的信道利用率并不高。而且,预留多少信道用于切换难以确定。另一些文章^[27,28,29]研究了为切换节点组织队列的算法,算法中设置了两个信道质量门限,切换门限和接收门限。其思想是当节点的信道质量低于切换门限时,就进入切换队列等待服务。如果信道质量低于接收门限时仍找不到合适的切换信道,则切换失败。这种方法就是提前申请切换的信道,但其仍然是基于预留专门的信道。还有些文章^[30,31,32]研究提出了信道

携带技术，其基本思路是节点在朝着特定方向移动并进入相邻小区时，其在原先小区使用的信道可以在新进入的小区中使用。信道携带技术在一定程度上减少了信道切换失败的发生，克服了热点地区信道资源缺乏的问题。但是，由于信道复用需要满足一定的信道质量条件，因此，信道携带技术在系统用户容量这一性能指标上是有一定的损失的。

基于以上的分析研究，本文针对不同业务有不同要求的特性，从信道利用率和业务的 QoS 要求方面进行信道分配技术的研究^[33]。并且，所提出的信道分配算法有利于实现下文的在充分利用信道的基础上的信道切换。信道分配技术的研究是以 IEEE 802.11 PCF 机制为基础的，根据需要传输的业务类型不同而采取相应的对策。当有新业务时，首先判断是实时业务还是非实时业务，然后依据各自的信道分配算法针对不同的情况扫描并分配信道。信道的扫描以及分配是根据需要传输的业务是实时业务还是非实时业务、是否有空闲信道以及是否有非实时业务正在使用信道来决定是进行信道分配、暂时等待还是抢占信道。

本文将系统处理的业务简单分为实时业务（如语音）和非实时业务（如数据传输）。其分配策略主要是针对同一小区内的用户，因此并未涉及切换用户的问题。本论文基于将固定的频率带宽分为 n 条等宽的信道，并从小到大分别标记信道的号码为 1, 2, 3, ..., n 。

对于新的实时业务，其信道分配算法首先扫描是否有空闲信道。如果有空闲信道，首先使用 1 和 N_r 之间的号码最小的空闲信道，否则才使用 $N_r + 1$ 信道。如果没有空闲信道，扫描是否有非实时业务正在使用信道。当有非实时业务正在使用信道时，新的实时业务按照下文描述的抢占非实时业务信道的算法抢占信道使用，否则等待，直到出现空闲信道。

而对于新的非实时业务，其信道分配算法首先扫描是否有空闲信道。如果有空闲信道，首先使用 N_{nr} 和 n 之间号码最大的空闲信道，否则才使用 $N_{nr} - 1$ 信道。在没有空闲信道的情况下，由于非实时业务的优先级较低，新的非实时业务只能等待空闲信道。实时业务和非实时业务信道分配算法的流程图如图 4.4 所示。

值得注意的是，这两个分配过程在实现时， N_r 始终表示分配给实时业务的信道号的最大值，近似表示实时业务使用的信道数。而 N_{nr} 始终表示分配给非实时业务的信道号的最小值，近似表示非实时业务使用的信道数。这有利于在信道扫描以及分配的两个算法中判断 N_r 和 N_{nr} 之间是否有空闲信道，有利于下文的信道抢占算法以及信道切换的实现。

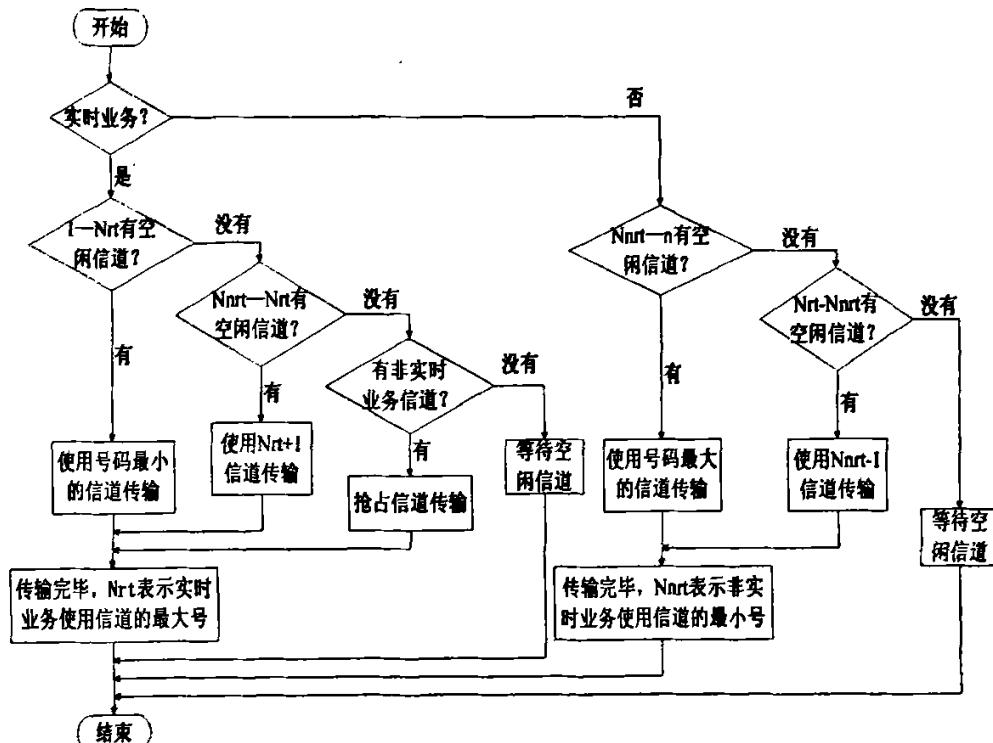


图 4.4 信道分配流程图

在信道抢占算法中，实时业务抢占的信道是传输的近似最新的非实时业务使用的信道，即 N_{rt} 当前表示的信道。这是因为本文在分配非实时业务使用的信道时，是尽量分配号码最大的空闲信道。非实时业务优先使用 N_{rt} 和 n 之间的空闲信道，否则才在可能的情况下使用 $N_{rt}-1$ 空闲信道。上文已经介绍， N_{rt} 始终表示分配给非实时业务的信道号的最小值。因此，在以上非实时业务的信道分配算法中， N_{rt} 也近似表示了最新的非实时业务使用的信道号。所以，抢占 N_{rt} 信道可以在一定程度上保证抢占非实时业务使用的信道不会过分延迟被抢占了信道的非实时业务。在信道被抢占后， N_{rt} 必须指向传输次新的非实时业务的信道，近似为当前非实时业务使用的信道号的最小值，以便于下一次信道抢占时使用。

在抢占信道的过程中，被抢占了信道的非实时业务暂时放入缓存中等待空闲信道，它的优先级低于实时业务但高于新的非实时业务。因此，当出现空闲信道而没有实时业务时，先传输缓存中的非实时业务再传输新的非实时业务。

4.3 IEEE 802.11 MAC 协议的优化

本论文基于以上对 IEEE 802.11 MAC 协议的分析研究, 针对无线信道的不可靠性和无线局域网目前还只能用于不移动或慢速移动的用户或业务这一问题, 在 DCF 和 PCF 混合接入机制的基础上将资源预留的思想加入到 IEEE 802.11 的 MAC 协议中。

DCF 和 PCF 的混合接入模式的工作方式中包含两部分: 无竞争期 CFP (Contention Free Period) 和竞争期 CP (Contention Period)。PCF 在 CFP 时期内控制 BSS 内的帧传输, DCF 在 CP 时期控制 BSS 内的帧传输, 两者交替控制媒体, 从而达到 DCF 和 PCF 共存的目的。下图为其工作模式图。

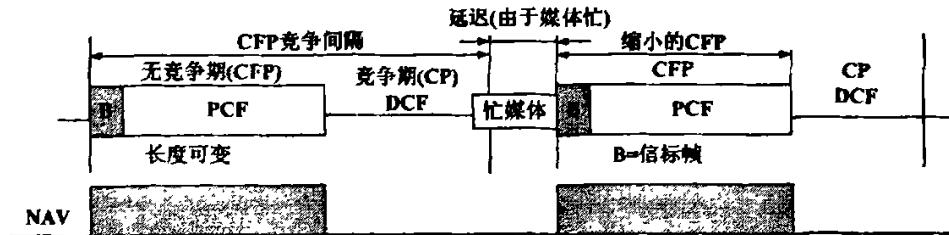


图 4.5 DCF 和 PCF 的混合接入模式结构

上图中的 CFP 是以信标 (Beacon) 开始的, 信标结束后为 PCF 机制开始, CFP 的长度由 PC 决定。所有 BSS 中的站点 (除 PC 外) 在 CFP 的开始时刻置 NAV。在 NAV 期间 (即 CFP 期间) 阻止非被轮询的站点占有媒体, 有效的防止碰撞。在 CFP 结束后, PC 传输 CF-End 或 CF-End-Ack 帧, BSS 中的站点接收这些帧, 复位 NAV。

当被轮询的站点有帧要发送时, 它就在 SIFS 之后发送帧 (这种情况称为 CF Burst), 这时该站点忽略掉本站点 NAV 的信息, 但不作清零处理。若它发出的帧的目的地址 DA 不是 PC 时, 即一般的站到站, 则数据帧的接收和确认遵循 DCF 规则。

PCF 通过无竞争轮询表 (Contention Free Polling List) 来实现对站点的轮询。无竞争轮询表用来存放所有 CF-Aware 站点的 MAC 地址。当该表非空时, PC 至少应在每个 CFP 期间轮询下一个表中的站点。如果在 CFP 中没有足够的时间轮询表中所有的站点, PC 就在下一个 CFP 中继续轮询下一个站点。如果在 CFP 开始时的 DTIM 指示某个有缓存业务的站点处于功率节省状态, PC 就先轮询这些站点并发出这些缓存帧, 然后才去轮询其他站点。虽然 PC 不轮询非 CF-Aware 站点, 但 PC 可以发送数据帧和管理帧给它们, 这些站点在 SIFS 间隔后回应 ACK 帧。

之所以选择 DCF 和 PCF 作为接入方式，是针对 2.2.3 节中分析的当前多媒体业务的出现以及各自的传输要求。一个通信系统中，不同的业务有不同的要求，而通过以上对 DCF 和 PCF 工作方式的分析中可以看到，DCF 接入模式让各个站通过竞争获得信道的使用权来传输业务，PCF 的轮询方法则可以很好的满足对于时间敏感的业务的需求。因此，在 DCF 和 PCF 混合接入模式的基础上研究、优化 IEEE 802.11 的 MAC 协议，可以实现对多媒体业务很好的支持，而且对于将来两种通信网（以语音为主的移动通信系统和以 IP 分组业务为主的 Internet 网络）的互融互通有积极的意义。

本文提出的 IEEE 802.11MAC 协议中应用的资源预留的思想是：由于移动及高速移动用户或业务的移动性，使原本就不稳定的无线信道通信性能变得更加恶劣。而无线通信介质是一种有限的介质资源，在网络负载较重的情况下，无线信道通信性能的下降使得重传加剧，碰撞频发，系统的数据传输速率降低。因此，本文提出在传输结束后，对于所使用的信道的性能进行评估，并将其与设定的门限值相比较。如果信道的性能高于门限值，则继续使用此信道；否则，针对 DCF 或 PCF 机制，进行信道预切换。在这里，进行的信道预切换是对于正在使用信道进行传输的节点来说的。也就是说，只有当节点在传输过程中由于移动等原因造成的所使用的传输信道的通信质量下降时，才考虑对此节点使用的信道进行切换。在 DCF 和 PCF 混合接入模式中，对于工作在 DCF 模式下的节点，由于在竞争期 CP 竞争信道使用，因此信道预切换要在非竞争期 CFP 进行。相反，对于工作在 PCF 模式下的节点，由于它们在非竞争期 CFP 使用信道传输，因此信道切换需要在竞争期 CP 进行。使用 PCF 机制的节点所切换的信道的选用方法使用上节中提出的信道分配策略。

上述预留资源思想的算法描述如下：

```
void Advance_Handoff ()  
{  
    float P, M;  
    //P 表示当前使用的信道的性能； M 表示评估信道性能的门限值//  
    int channel_num, Nrt, Nnrt;  
    //channel_num 表示节点使用的信道号； Nrt 表示当前实时业务占用的  
    //信道数加 1； Nnrt 表示当前非实时业务占用的信道数加 1//  
    int WLANC_CH_STEP_FOR_NO_OVERLAP, channel_count;  
    // WLANC_CH_STEP_FOR_NO_OVERLAP 表示两条信道不相重叠的  
    // 最少信道数； channel_count 表示系统信道数//  
    if (P < M)
```

```
{  
if ((节点工作模式为 PCF) && (节点处于 CP 期间))  
{  
if (业务是实时业务)  
{  
if (有空闲信道)  
{  
channel_num=Nrt;  
channel_num=channel_num+1;  
Nrt=channel_num;  
}  
else if (有非实时业务使用信道)  
{  
channel_num=Nnrt;  
Nnrt=Nnrt-1;  
Nrt=channel_num;  
}  
else  
不切换信道;  
}  
else  
{  
if (有空闲信道)  
{  
channel_num=Nnrt;  
channel_num=channel_num-1;  
Nnrt=channel_num;  
}  
else  
不切换信道;  
}  
}  
else if ((节点工作模式为 DCF) && (节点处于 CFP 期间))  
{
```

```
channel_num= (channel_num-1+
    WLANC_CH_STEP_FOR_NO_OVERLAP) %channel_count + 1;
}
}
```

4.4 小结

本章分析研究了 IEEE 802.11 MAC 协议的 DCF 和 PCF 两种机制，介绍了当前思想发展较成熟、应用较多的一种 DCF 协议马尔可夫链的理论分析模型。然后提出了应用于 IEEE 802.11 MAC 协议的信道分配算法以及基于它的对 IEEE 802.11 MAC 协议的优化。

第五章 仿真实现

本章使用 OPNET 仿真软件搭建仿真平台，首先介绍仿真场景和参数配置，然后按照 OPNET 的建模机制描述仿真过程，最后分情况进行了各种仿真实验并分析对比仿真结果。

5.1 仿真实验平台及仿真参数

目前，用于网络仿真的软件有很多，主要有 OPNET^[34,35] (Optimized Performance Network Engineering Tools)、NS^[36] (Network Simulator)、GloMoSim^[37] (Global Mobile Information System Simulator) 等。文献[38]分析对比了三种软件。其中，OPNET 采用离散事件驱动的模拟激励，效率更高；它的模型是面向对象的，构造的模型具有很好的继承性和可重用性；支持高级语言描述，可以很方便地实现复杂的通信协议；提供了一个比较齐全的基本模型库(包括网络设备和链路)。GloMoSim 是专门用于 Ad hoc 网络仿真的系统，它可以实现并行离散时间驱动仿真；支持应用于纯无线网络的协议；采用分层的方法。NS 的架构严格遵循 OSI 七层网络模型；软件配有仿真过程动态观察器，可以在仿真运行结束后，动态查看仿真的运行过程，观察跟踪数据；软件还有图形显示器，显示从仿真中得到的结果数据，直观而清晰。考虑到应用的环境、实现的功能、操作的方便性等方面，本文选用 OPNET 仿真软件实现仿真。以下从其网络物件层次关系方面的建模机制来介绍仿真的配置。介绍的顺序从高层到底层，即网络模型→节点模型→进程模型。

5.1.1 网络模型

本文的仿真模型中配置的仿真场景如图 5.1 所示。本文所有的仿真场景都以此为基础。其中，考虑到节点间的通信范围，场景大小设置为 $210m \times 210m$ ，使节点无论处于场景中的任何位置都能够通信。场景中配置了 15 个移动节点，以 DCF 开始命名的节点的工作模式为 DCF 机制，以 PCF 开始命名的节点的工作模式为 PCF 机制。场景中有一个 AP 点，所有节点处于一个 BSS 内。在移动的场景中还设定了四条移动路线图，模拟节

点的移动性。

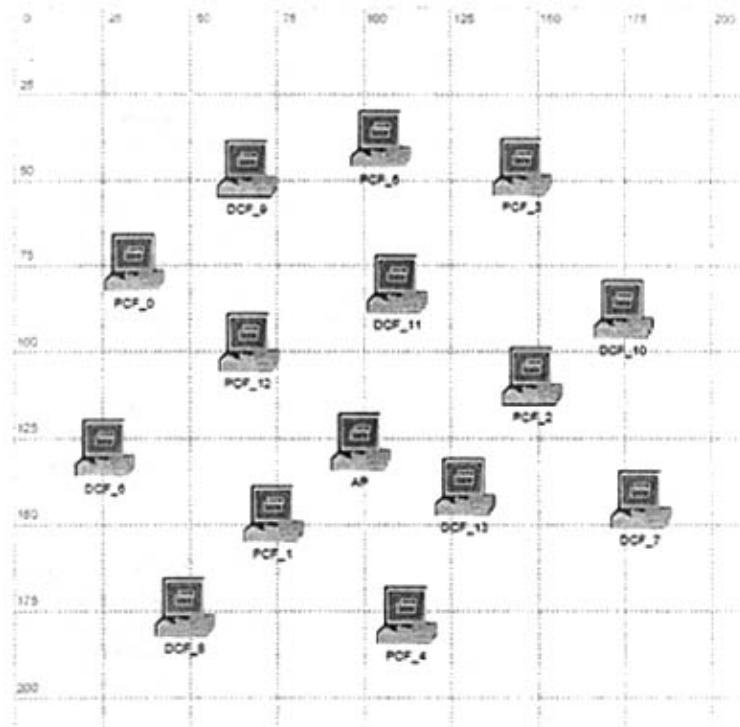


图 5.1 仿真场景

上图中节点的属性配置如图 5.2。其中, *model* 属性用来选择节点要使用的节点模型; *trajectory* 属性表示节点配置的移动轨迹; *Destination Address* 属性可固定的设置为某一节点的 Wireless LAN MAC 地址, 也可以设置为随机的目的地址或广播类型的。*Traffic Generation Parameters* 指定此传输源将产生的传输模式的参数, 其中, *Start Time* 指定用于产生随机开始时间的分布名称及其变量; *ON State Time* 指定用于产生“ON”状态时间的随机结果的分布名称及其变量, 包仅在“ON”状态产生; *OFF State Time* 指定用于产生“OFF”状态时间的随机结果的分布名称及其变量, “OFF”状态不产生包。*Packet Generation Arguments* 指定了包的产生速率和所产生的包大小的参数。其 *Interarrival Time* 参数指定了在“ON”状态下, 连续的包之间时间间隔产生的随机结果的分布名称及其变量; *Packet Size* 指定产生发送的包大小的随机结果的分布名称及其变量。*Segmentation Size* 决定分段的大小, 它必须在发送包之前创建。*Stop Time* 表示节点产生的传输将在什么时候结束, 如果选择了 *never* 则在仿真结束时停止产生传输。

Traffic Type of Service 表示指定的这个节点产生的数据包的服务类型的类别。

▪ Name	PCP_S
▪ model	vlan_station_addr_lv
▪ trajectory	trj_1
▪ Destination Address	Random
- Traffic Generation Parameters	(...)
Start Time (seconds)	constant (0.02)
ON State Time (seconds)	exponential (10)
OFF State Time (seconds)	exponential (90)
- Packet Generation Arguments	(...)
Interarrival Time (seconds)	exponential (1.0)
Packet Size (bytes)	exponential (1024)
Segmentation Size (bytes)	No Segmentation
Stop Time (seconds)	Never
▪ Traffic Type of Service	Interactive Multimedia (5)
▪ Wireless LAN	

图 5.2 节点属性

其中, *Wireless LAN* 的参数如下所示:

▪ Wireless LAN	
Wireless LAN MAC Address	S
- Wireless LAN Parameters	(...)
BSS Identifier	1
Access Point Functionality	Disabled
Physical Characteristics	OFDM (802.11a)
Data Rate (bps)	6 Mbps
- Channel Settings	(...)
Bandwidth (MHz)	Physical Technology Dependent
Min Frequency (MHz)	BSS Based
Transmit Power (W)	0.005
Packet Reception Power Th...	-95
Rts Threshold (bytes)	None
Fragmentation Threshold (...	None
CTS-to-self Option	Enabled
Short Retry Limit	7
Long Retry Limit	4
Max Receive Lifetime (secs)	0.5
Buffer Size (bits)	256000
- PCP Parameters	(...)
PCP Functionality	Enabled
CFP Beacon Multiple	1
CFP Offset	0
CFP Interval (secs)	0.01
Max Failed Polls	2
Beacon Interval (secs)	0.02
Roaming Capability	Disabled
Large Packet Processing	Drop

图 5.3 节点属性 2

由于 *Wireless LAN* 的参数较多, 在此只介绍论文仿真中涉及到的参数。*BSS Identifier* 指定节点属于哪一个 BSS; *Access Point Functionality* 用来确定节点是否为所在 BSS 的接入点; *Physical Characteristics* 和 *Data Rate* 配置物理层的技术及数据帧的传输数据速率; *Channel Settings* 指定无线发射机和接收机使用的频带; *PCF Parameters* 指定工作在 PCF 模式下的 *Wireless LAN MAC* 协议所使用的参数, 其中, *PCF Functionality* 表示是否为 PCF 模式, *CFP Beacon Multiple* 参数表示一个 CFP 周期期间有几个信标帧, *CFP Offset* 设置初始 CFP 的偏移量, *CFP Interval* 表示 CFP 的最大持续时间, *Max Failed Polls* 指 AP 持续轮询没有有效确认的节点的最大次数, *Beacon Interval* 指发送信标帧的时间间隔。本文的参数配置基本如图所示, 只是在 *name*、*trajectory*、*Traffic Type of Service*、*Wireless LAN MAC Address*、*PCF Functionality* 等参数的配置方面加以区分。

5.1.2 节点模型

仿真场景中各个节点配置的节点模型如下所示:

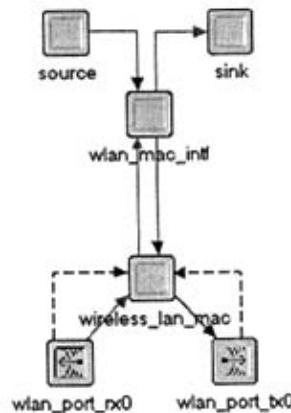


图 5.4 节点模型

其中, *source* 处理机简单模拟包的发送, 它仿效了一种 on-off (active-inactive) 传输产生模型, 包只在 on 状态下产生; *sink* 处理机简单模拟包的接收, 它接收了来自任意 *source* 处理机的包后, 不管它们的内容或格式是什么就将其丢掉。*wlan_mac_intf* 处理机是 MAC 层和高层之间的一个接口, 它负责接收从高层到达的包并确定它们的目的地址。然后, 这些信息发送到 MAC 层。*wireless_lan_mac* 处理机实现 IEEE 802.11MAC 层的协议, 它的任务是接收来自高层的数据包, 将数据压缩成数据帧, 并

将这些帧以先进先出的顺序传输给无线发射机 `wlan_port_tx()` 发送到目的站。相反地, 它也将从无线接收机 `wlan_port_rx()` 接收到的数据帧传输到高层。无线发射机 `wlan_port_tx()` 从 MAC 层接收包并将其发送到物理媒介上; 无线接收机 `wlan_port_rx()` 接收从物理层到达的包, 并将其传输给 `wireless_lan_mac` 进程。

5.1.3 进程模型

本文大部分的工作都在 `wireless_lan_mac` 处理机的进程模型中, 所以在此只详细介绍此进程模型。其图如下:

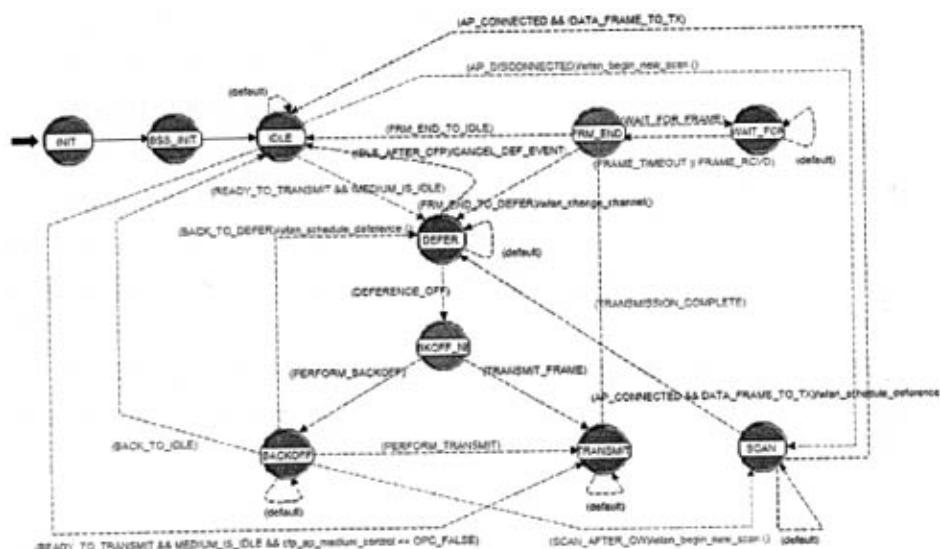


图 5.5 进程模型

上图中, 有限状态机在转移线的条件满足时进行状态的转移, 如果转移线有执行程序的定义, 那么在运行执行程序之后转移到下一个状态。各个有限状态机的功能介绍如下:

1. **INIT** 状态: 初始化进程模型;
2. **BSS_INIT** 状态: 调用一个自中断等待 mac 界面在寄存后转移到下一个状态;
3. **IDLE** 状态: 等待直到从上层或下层的包到达。在此状态中, 下面几种中断可能发生:
 - ①来自应用层的数据到达;
 - ②物理层接收到帧 (DATA、ACK、RTS、CTS);

- ③表明帧正在被接收的忙中断；
- ④表明接收到多于一个帧的冲突中断。

当来自应用层的数据到达时，将它插入队列中。如果收信机不忙，将延迟设为 DIFS，并将状态改为“DEFER”状态。如果站需要退避，就设置退避标志。对于接收到的帧中断（RTS、CTS、DATA、ACK 帧），如果其目的站是此站，便发送合适的响应，将延迟设为 SIFS，清除收信机忙的状态，并增强所有的数据传输。

4. DEFER 状态：延迟直到媒体可以传输。在此状态会发生的中断有：

- ①来自应用层的数据到达；
- ②接收到来自物理层的帧（DATA、ACK、RTS、CTS）；
- ③表明帧正在被接收的忙中断；
- ④表明接收到多于一个帧的冲突中断。
- ⑤延迟定时器超时（自中断）。

对于来自应用层的数据，将包排入队列。如果站由于媒体忙需要在延迟后退避，就设置退避标志。如果帧的目标是此站，就设置响应帧，并为 SIFS 设置一个延迟定时器。为 SIFS 设置一个延迟定时器，并不改变状态。如果收信机开始接收到多于一个帧，便将接收到的帧标志为无效帧并为 EIFS 设置延迟。

5. BKOFF_NEEDED 状态：决定正在试图传输的帧是否需要退避。当站准备传输帧时发现媒体忙或当站推断出冲突时需要退避，当站正在响应帧时不需要退避。如果需要退避，那么检查站在上一次尝试中是否完成了它的退避，如果没有就从同一点继续退避，否则为退避时隙数产生一个新的随机数。在一次成功的包传输之后，退避程序再一次执行一个竞争窗口时期。

6. BACKOFF 状态：处理随机退避。在这个状态中以下中断会发生：

- ①来自应用层的数据到达；
- ②接收到来自物理层的帧（DATA、ACK、RTS、CTS）；
- ③表明帧正在被接收的忙中断；
- ④表明接收到多于一个帧的冲突中断。

此状态将来自应用层的数据包放入队列，并且不要改变状态。如果帧的目的站是此站，那么准备合适的帧响应它，并设置 SIFS 延迟，如果需要更新 NAV 值，并重新调度延迟，改变状态为“DEFER”。如果是一个广播帧，检查 NAV 是否需要更新，调度自中断并改变状态来延迟。如果收信机开始接收帧（忙状态中断），那么设置一个标志表明收信机忙。若收到多于一个的帧，那么将接收到的帧标志为无效的并设置 EIFS 延迟定时器，

改变状态为“DEFER”。

7. TRANSMIT 状态: 在这个状态中以下中断会发生:

- ①来自应用层的数据到达;
- ②接收到来自物理层的帧 (DATA、ACK、RTS、CTS);
- ③表明帧正在被接收的忙中断;
- ④表明接收到多于一个帧的冲突中断。
- ⑤来自物理层的传输完成中断。

此状态将来自高层的数据包放入队列并且不改变状态。传输结束后, 将状态改变为 FRM_END, 不响应任何低层包的到达。为了准备传输帧, 在控制/数据帧中设置合适的字段, 如果接收到任何来自高层或低层的帧, 则不执行。

8. FRM_END 状态: 这个状态的目的是决定完成传输后的下一个非强制状态, 有三种情况:

①如果刚刚传输了 RTS 帧或 DATA 帧, 那么设置 `expected_frame_type` 变量来等待响应, 并且改变状态为 `Wait_For_Response`; 否则仅为下一次传输转为 DEFER。

②如果接收到期望的帧, 检查下一个要传输的帧是什么, 并设置合适的延时定时器。如果所有的数据段已被传输, 检查队列是否为空。若非空, 就基于门限值将包分段, 并决定是否发送 RTS。如果有数据需要传输, 在竞争信道前等待 DIFS 的时间, 如无需传输, 进入 IDLE 状态并等待从高层或低层到达的包。

③如果没有接收到期望的帧, 那么推断发生了碰撞, 设置退避标志。如果并未达到重新尝试的界限, 竞争信道, 重传帧。

如果没有期望的帧, 检查是否有其他的帧需要传输。

9. WAIT_FOR_RESPONSE 状态: 在传输后等待响应。需要确认的帧是 RTS 帧和 DATA 帧。在此状态中, 下列中断会发生:

- ①来自应用层的数据到达;
- ②接收到来自物理层的帧 (DATA、ACK、RTS、CTS);
- ③如果未接收到期望的帧那么帧超时;
- ④表明帧正在被接收的忙中断;
- ⑤表明接收到多于一个帧的冲突中断。

当数据从应用层到达时将包加入队列, 如果接收到非期望的帧就推断碰撞, 并增加重试计数的值。如果冲突表明来自收信机的中断就将接收到的帧标志为坏帧。

10. SCAN 状态：判断 SCAN 时期是否结束。在漫游情况下，如果能连接到新的可靠的 AP，就切换到新的 AP，否则切换信道。

5.2 仿真结果及其分析

在配置以上的仿真参数之后，本文分情况进行了仿真，从不同方面对比分析仿真的结果，研究提出的新算法以及基于它的对 IEEE 802.11 MAC 协议的优化的性能。在各仿真实验中，节点数、节点的位置如图 5.1 所示。对于各节点的接入机制的设置则根据不同的实验环境有所不同。其中，物理层技术均配置为 802.11a (OFDM)，数据速率为 54Mbps，仿真时间为 1 小时。对于移动情况下节点移动路线的配置，场景中节点 0、5、9、11、12 的移动路线相同，节点 1、4、6、8、13 的移动路线相同，节点 2、3、7、10 的路线相同，AP 点配置单独的移动路线。

关于系统性能指标的解释，本文根据文献[39]中的分析定义。其中，负载表示从高层接收的总比特数据量；吞吐量表示作为分组的目的节点，移动站将接收的数据从 MAC 层送往高层的所累积的总比特数；媒体接入延迟表示分组在高层队列停留的时间，也即从高层分组到达队列的时刻和移出队列被传输时刻之间的时间间隔；延迟表示媒体接入延迟和传输延迟的总和。

对于仿真结果的分析，正如前文第二章所说的那样，评价 MAC 协议的性能指标或设计 MAC 协议需要考虑的技术要求主要有吞吐率、延迟、公平性和稳定性等。理想的 MAC 协议应该具有尽可能小的延迟，尽可能高的吞吐率，公平性和稳定性高，可伸缩性以及支持多媒体业务等特性。文献[1]中也指出，WLAN MAC 协议最理想的情况就是能够在网络负荷轻的时候提供低网络时延，在网络负荷重的时候提供高的吞吐量。因此，本文主要基于系统的负载，结合系统的丢包率分析系统的吞吐量、延迟、媒体接入延迟。

在系统趋于稳定时，各个实验中系统的丢包率统计如下表所示（其中实验 5.1-实验 5.7 依次对应下文介绍的七种仿真实验）。

表 5.1 各个实验的丢包率

实验	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7
标准 IEEE 802.11 MAC 协议丢包率	4552 bits/sec	4241 bits/sec	4172 bits/sec	4079 bits/sec	4403 bits/sec	7248 bits/sec	19039 bits/sec
改进的 IEEE 802.11 MAC 协议丢包率	4056 bits/sec	4635 bits/sec	4536 bits/sec	4211 bits/sec	7880 bits/sec	36986 bits/sec	81953 bits/sec

5.2.1 节点不移动

在节点不移动的仿真实验中，本文分 DCF、PCF 节点共存和纯 PCF 节点两种情况进行了仿真。

1. DCF 节点和 PCF 节点共存

此实验中，各节点的接入机制配置如图 5.1 所示。仿真实验后的负载、吞吐量、延迟、媒体接入延迟对比如下：

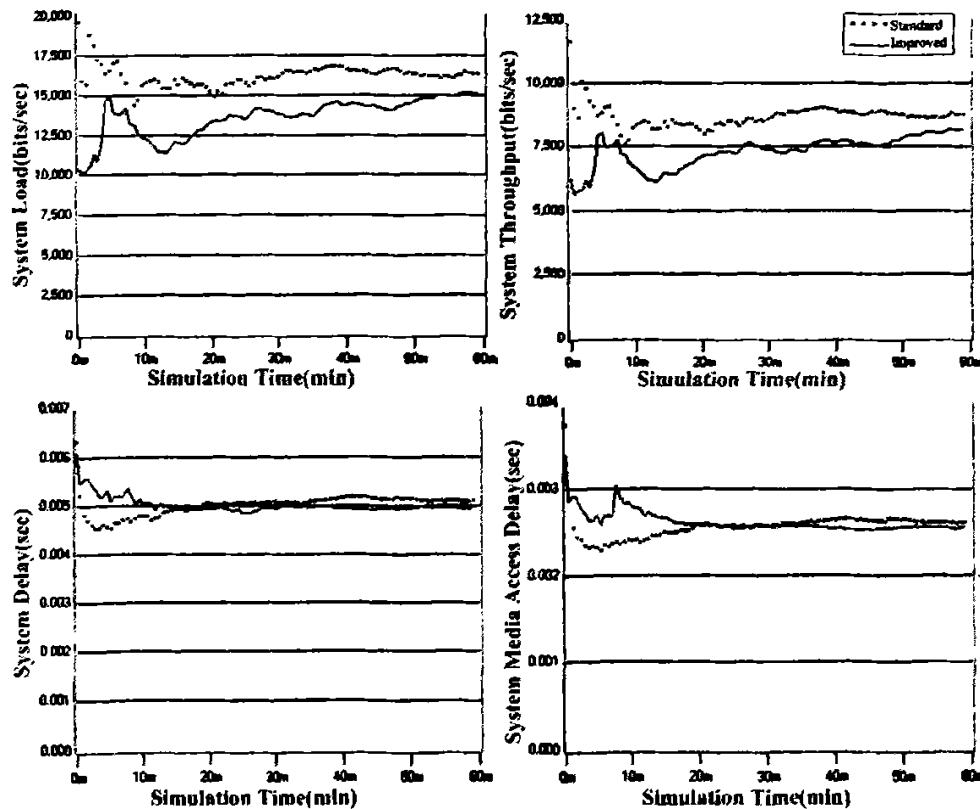


图 5.6 节点不移动 (DCF 节点和 PCF 节点共存) 仿真结果对照

由上图可以看出，在此实验中，优化协议的系统负载低于标准协议的负载，这导致优化协议的吞吐量较低。而且，优化协议的系统延迟及媒体接入延迟均低于标准协议的系统延迟及媒体接入延迟。结合表 5.1 中实验 1.1 的两个系统的丢包率统计结果分析可得，系统稳定后，在优化协议的系统中，由于本论文给出的信道分配算法是以区分业务对时延的要求为基础，因此系统的媒体接入延迟和延迟低于标准协议的媒体接入延迟和延迟。并且，在节点固定的情况下，算法近似完全利用可用信道，因而与标

准协议系统相比，优化协议系统的丢包率较低。

2. 纯 PCF 节点

在此试验中，图 5.1 仿真场景中的 DCF 节点的接入机制改为 PCF。因此，系统只设置了 CFP，并没有 CP。仿真结果如下所示：

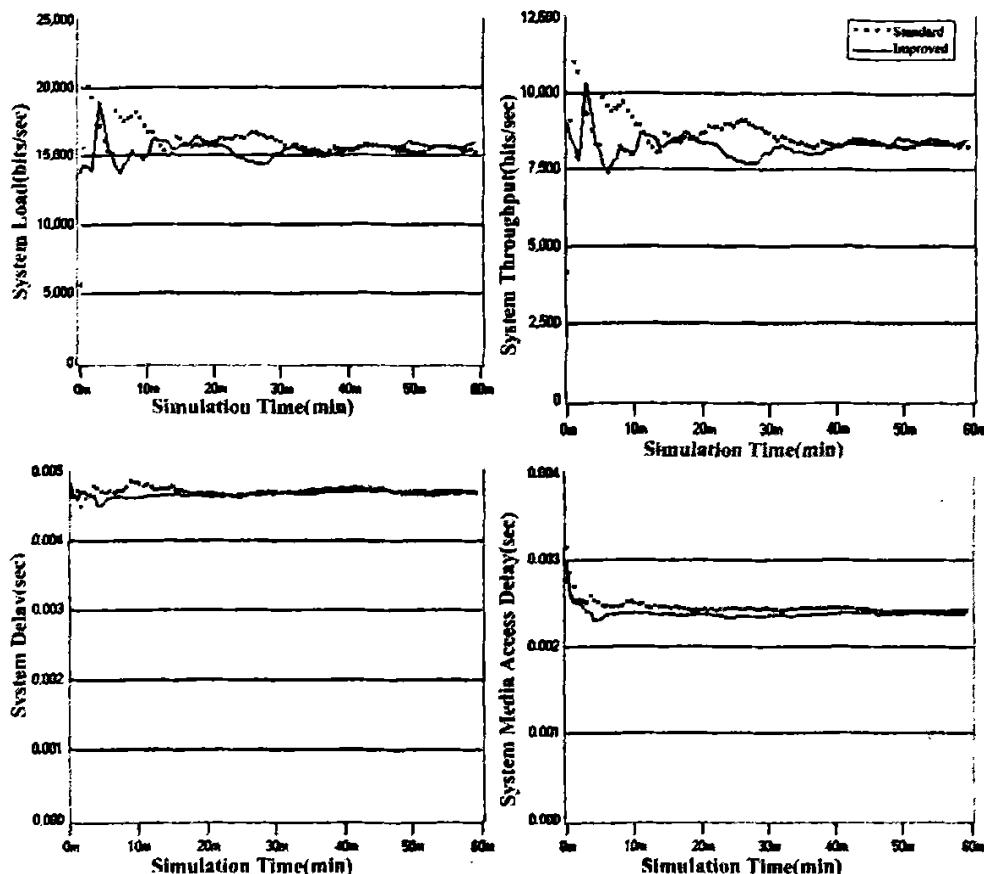


图 5.7 节点不移动（纯 PCF 节点）仿真结果对照

由上图可知，在全 PCF 节点的方针实验中，系统稳定后，优化协议的系统负载和吞吐量由较低变为与标准协议的大致相等。优化协议的系统延迟与标准协议的相等，但优化协议的媒体接入延迟略低。分析可知，在系统负载较低时，系统的延迟和媒体接入延迟都有所改善。随着负载增大，吞吐量增加，延迟和媒体接入延迟也增大，但影响并不严重。

5.2.2 非 AP 节点移动

在非 AP 节点移动的仿真实验中，AP 点固定不动，其他节点按照随机设置的路线移动。其中，根据移动节点的移动特点分两种情况进行仿真实

验。实验中，移动节点的速度设置为 40km/h，节点的接入机制设置如图 5.1 所示。

1. 非 AP 节点间断性移动

此实验中，移动节点在移动过程中，移动到每一点时停留 4 分钟。仿真结果如下：

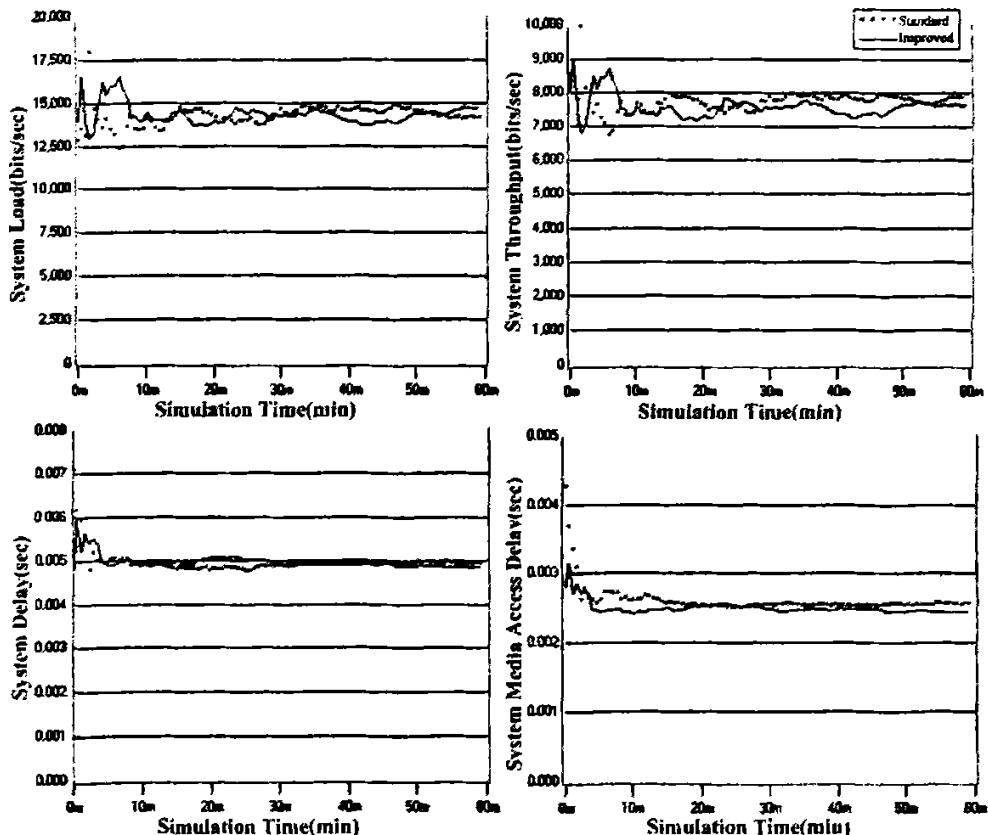


图 5.8 非 AP 节点间断性移动仿真结果对照

上图中，系统稳定后，在优化协议的系统负载与标准协议的近似相等的情况下，两个系统的吞吐量也近似相等。优化协议的系统延迟和媒体接入延迟都低于标准协议的。结合表 5.1 中此实验的丢包率对比可知，在节点间断性移动的情况下，优化的协议对于系统的延迟和媒体接入延迟有所改善，但对系统的丢包率略有影响。

2. 非 AP 节点连续移动

在此实验中，移动节点移动到每一点时并不停止而是继续移动。即在仿真的 1 小时中，除了 AP 外的其他节点一直处于移动状态中。仿真结果如下：

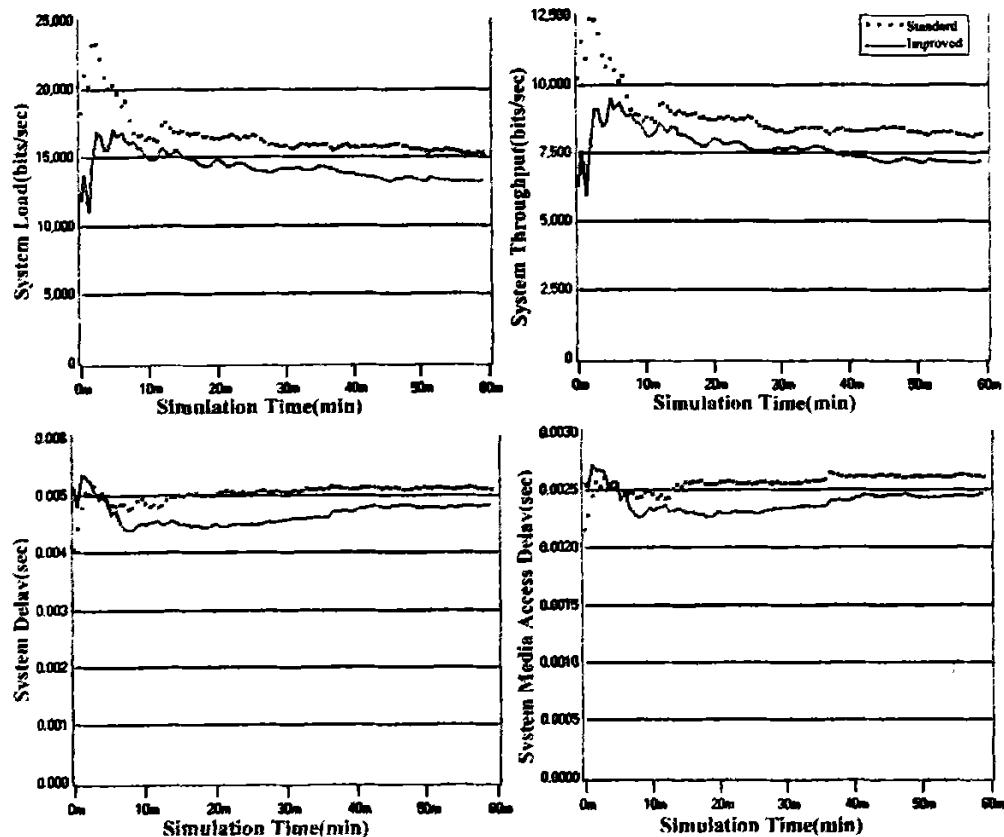


图 5.9 非 AP 节点连续移动仿真结果对照

从上图可以看出，在系统稳定后，优化协议系统的负载低导致了吞吐量也低，但优化系统的延迟和媒体接入延迟明显低于标准协议的延迟和媒体接入延迟。由此可知，在移动节点连续移动的情况下，优化的协议对于系统的延迟和媒体接入延迟有较好的改善。但是，由前文所述本论文的优化协议的思想可知，协议的优化是偏重业务对时延的要求以及传输中的业务的传输质量的保证。因此，系统的负载较低，进而影响到系统的吞吐量。

5.2.3 所有节点移动

对于仿真场景中所有节点移动的情况，本文也是根据节点的移动特点分节点间断性移动和连续移动两种情况进行仿真实验。节点的移动速度也都设为 40km/h。由于在实际的仿真实验中，AP 点大范围的移动会造成 AP 点与其他节点的通信中断（尽管场景设置已经考虑到通信范围的问题），因此 AP 点的移动范围局限于图 5.1 中场景的中心位置。此节实验中，各节点的接入机制设置如图 5.1 所示，但是在节点连续移动的实验中，对于

所有节点为 PCF 的情况进行了仿真。

1. 节点间断性移动

在此实验中，所有节点移动，在移动到每一点时停留 4 分钟然后继续移动。

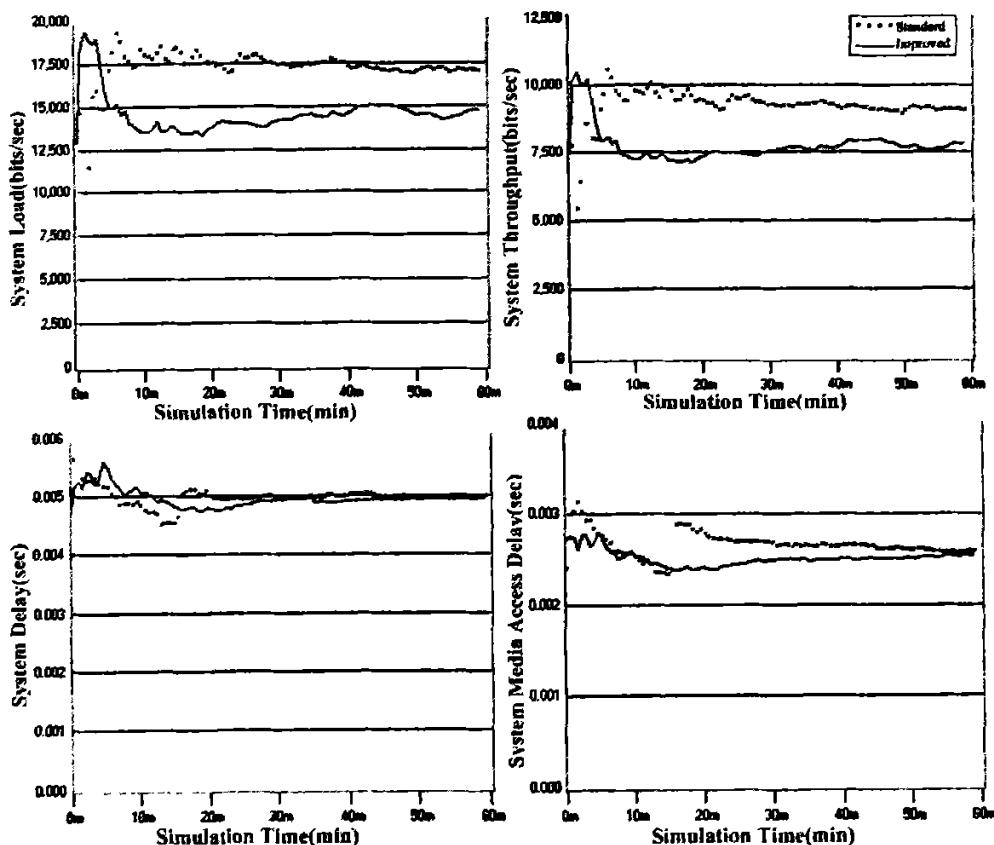


图 5.10 所有节点间断性移动仿真结果对照

由上图可知，系统稳定后，优化协议系统的负载和吞吐量低于标准协议系统的负载和吞吐量。优化协议的延迟由较低变为趋于与标准协议的延迟相等，媒体接入延迟也由低于标准协议的媒体接入延迟变为略低于它。结合系统的丢包率（优化协议的丢包率在 34 分钟之前与标准协议的相等，之后高于标准协议的丢包率）分析可得，在优化协议的丢包率不高于标准协议的丢包率的情况下，系统稳定后，优化协议的系统负载和吞吐量较低，但延迟和媒体接入延迟低于标准协议的。而在丢包率增大后，优化系统的延迟和媒体接入延迟增大，但系统的负载和吞吐量有所增加。由此可知，在系统出现突发情况下，优化协议的系统体现了较好的性能。

2. 节点连续移动

在此实验中，所有节点连续运动 1 小时。仿真结果如下：

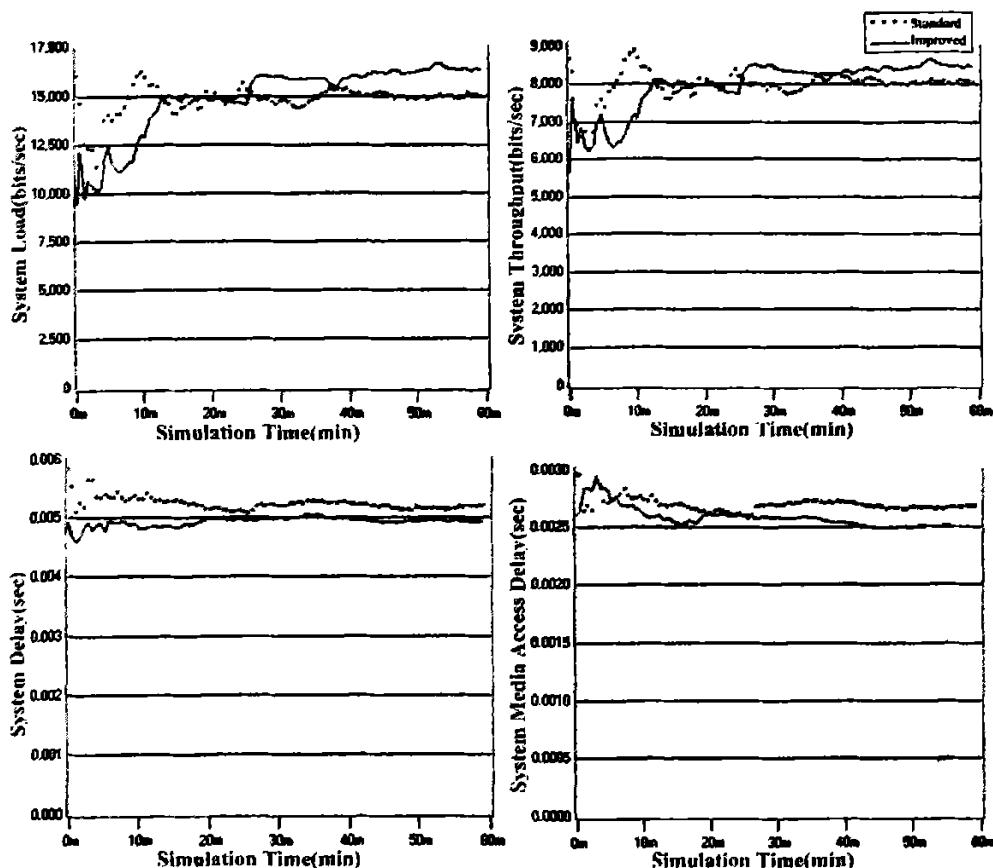


图 5.11 所有节点连续移动仿真结果对照

从图中可以看出，系统稳定后，优化协议的负载和吞吐量高于标准协议的，但延迟和媒体接入延迟较低。由表 5.1 中此实验的丢包率对比可以看到，优化协议的丢包率高于标准协议的。因此，优化协议的系统吞吐量及延迟的改善是以牺牲丢包率为代价的。

在实验 5.6 的基础上，本论文对节点全为 PCF 机制的情况进行了仿真。场景中除了将 DCF 节点的接入机制改为 PCF 外，各节点的配置都和实验 5.6 相同。仿真结果如下：

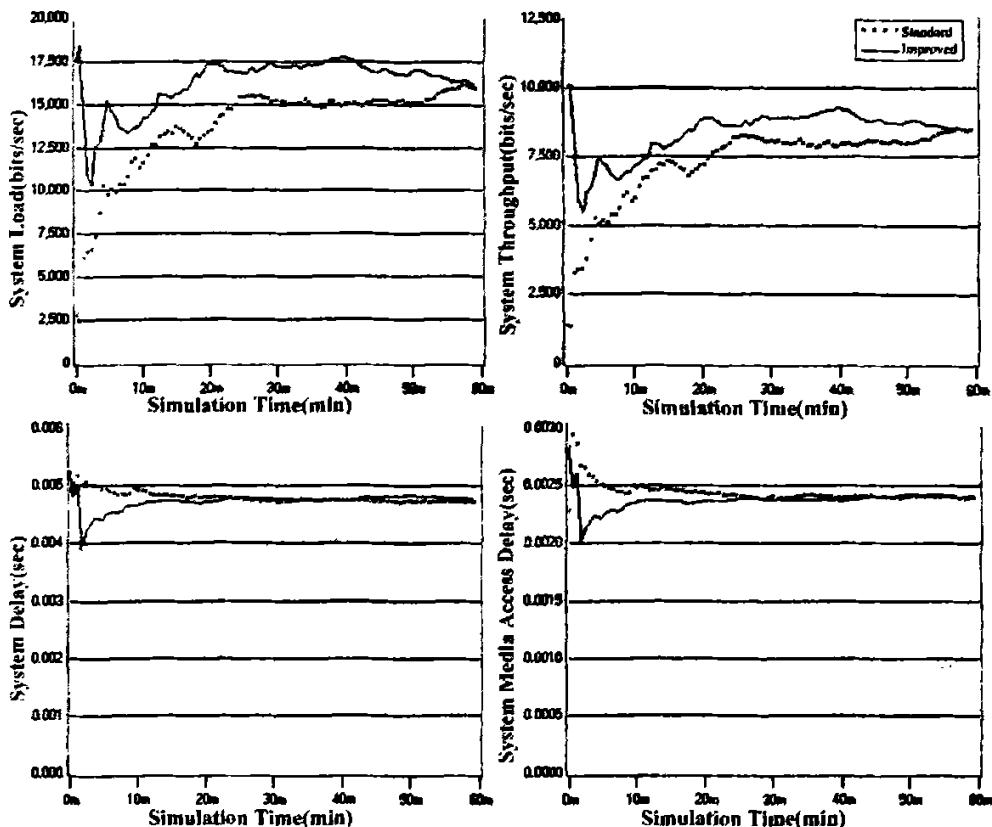


图 5.12 纯 PCF 节点连续移动仿真结果对照

从上图可以看出, 系统稳定后, 优化协议的负载和吞吐量高于标准协议的, 延迟和媒体接入延迟从低于标准协议变为与标准协议的大致相等。由此分析可知, 在负载不高的情况下, 优化协议的延迟和媒体接入延迟得到了较好的改善。随着系统传输中的节点的信道切换及负载增大, 系统的延迟有所增加, 但影响并不严重。

综合分析对比以上 7 个仿真实验的结果可知, 相对于节点固定的无线局域网系统而言, 本论文的信道分配算法以及基于它对 IEEE 802.11 MAC 协议的优化对于节点移动系统的性能改善更加明显。对比 DCF 和 PCF 节点共存以及纯 PCF 节点两种场景, 优化的协议在系统负载低的情况下对于纯 PCF 节点系统的延迟和媒体接入延迟的改善较明显, 在负载高时并不明显。而对于 DCF、PCF 节点共存的系统, 优化的协议在负载高时对延迟和媒体接入延迟的改善也较明显。在节点间断性移动的情况下, 优化的协议在 AP 点不移动的系统中体现的性能优势高于优化的协议在 AP 点移动的系统中体现的优势。

从 7 个实验的仿真结果以及前文所述评价 MAC 协议性能的指标和评

价观点可以看出，在各种仿真情况下，对于 IEEE 802.11 MAC 协议的优化都体现了良好的性能，因此优化的协议具有稳定性。尽管信道分配算法及对协议的优化偏向对实时业务延迟的改善，但从各个实验的系统延迟来看，这并未对非实时业务造成严重的影响。

5.3 小结

本章介绍了计算机仿真的相关知识及所使用的仿真软件 OPNET，然后从 OPNET 的建模机制方面描述了仿真的流程以及仿真参数的意义和实际的参数配置。最后，研究了本文提出的信道分配算法及基于它的对 IEEE 802.11 MAC 协议优化的仿真结果，并将其与标准的 IEEE 802.11 MAC 协议的仿真结果进行比较，证明了算法及对协议优化的有效性。

第六章 总结及展望

6.1 论文总结

随着无线局域网（WLAN）的广泛应用以及与移动通信系统等其他无线通信系统相融合的发展趋势，对于 WLAN 的接入协议的研究与优化一直是无线局域网的研究热点之一，其中尤其以 IEEE 802.11 MAC 协议的研究应用最多。但大多数针对其 QoS 进行的协议优化并未从信道分配的角度进行研究。

本论文以参与研究重庆市科委攻关和自然科学基金项目“支持 4G 的无线网络资源预分配及优化技术研究”为背景，简单介绍了无线局域网的相关知识，深入分析对比了各种无线媒体协议及信道分配算法，研究了 IEEE 802.11 MAC 协议的 DCF 和 PCF 两种机制，考虑到无线信道资源的使用问题，提出一种以 PCF 机制为基础的信道分配算法，并针对无线信道的不可靠性以及节点的移动性优化了协议。通过 OPNET 仿真软件仿真的各种实验表明，算法及协议的优化有以下优点：

1. 在系统最大能力下保证了实时业务对时延的要求；
2. 降低了系统的延迟和媒体接入延迟；
3. 支持高速移动系统。

6.2 研究展望

尽管仿真结果显示了本论文的算法及协议优化带来的性能优势，但仍有许多有待于进一步研究的工作：

1. 在理论方面，应讨论研究 BSS 之间以及 BSS 和其他无线通信网络之间通信、漫游、切换的情况。而且，本论文对于业务种类的区分只是简单分为实时业务和非实时业务，考虑到实际应用中各种业务的具体要求都有所不同，需要进一步划分各种业务。
2. 在仿真实验方面，应该仿真系统不同节点数的情况，测试优化协议所能支持的小区节点数。在任务配置方面，本论文只是配置了 ON—OFF 模型以及 ToS (Type of Service) 简单模拟业务的产生，应当配置实际的业务及相应的业务要求进行仿真实验。

致 谢

在本论文完成之际，我要衷心感谢我的导师刘宴兵教授。本论文从选题、开题、写作直到顺利完成，都离不开刘老师悉心的指导。从刘老师身上，我学到了严谨和精益求精的治学态度，兢兢业业、认真负责的工作精神，这将是我今后学习工作所遵循的准则。在生活中，刘老师也给予我无微不至的关怀，使我深深的感受到作为一个导师、作为一个长者应有的风范。再次向刘老师表示诚挚的谢意！

感谢重庆邮电大学王国胤教授、吴渝教授、唐红教授、邓亚平教授、赵军教授、李秉智教授、汪林林教授、甘玲教授等老师对我的教育和培养！感谢百忙之中审阅本论文的专家、教授以及各位答辩老师，谢谢你们的批评指正！

感谢在学习和生活中帮助过我的所有同学！

感谢我的家人对我的支持和鼓励！

谢谢！

瞿琮琮

2007.5.5

参考文献

- [1] 刘乃安.无线局域网 (WLAN) —原理、技术与应用 [M].2004 年 1 版. 西安:西安电子科技大学出版社,2004: 226-282
- [2] IEEE-802.11 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. 1999
- [3] HiperLAN Type2, Data Link Control (DLC) Layer: Part 1: Basic Data Transmission Functions, Broadband Radio Access Networks (BRAN) [S]. ETSI TS 101 761-1, Nov. 2000
- [4] Qiu Qiang, Lillykutty Jacob, R.Radhakrishna Pillai, B.Prabhakaran. MAC Protocol Enhancements for QoS Guarantee and Fairness over the IEEE 802.11 Wireless LANs [C]. Computer Comm. & Networks, Proc. 11th Int. Conf. Oct. 2002: 628-633
- [5] Veeraraghavan, M., Cocker, N., Moors, T. Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs [C]. IEEE INFOCOM 2001. 2001, 1: 488-497
- [6] J. L. Sobrinho, A. S. Krishnakumar. Quality-of-Service in Ad Hoc Carrier Sense Multiple Access Wireless Networks [J]. Jl. Select. Areas In Communications. August 1999, 17(8): 1353-1368
- [7] Nitin Vaidya, Anurag Dugar, Seema Gupta, Paramvir Bahl. Distributed Fair Scheduling in a Wireless LAN [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing. 2005, 4(6): 616-629
- [8] Chun-Ting Chou, Sai Shankar N, Kang G. Shin. Achieving per-stream QoS with distributed airtime allocation and admission control in IEEE 802.11e wireless LANs [C]. INFOCOM 2005. March 2005, 3: 1584-1595
- [9] George T.Karetsos, Sofoklis A.Kyriazakos, Evangelos Groustiotis. A Hierarchical Radio Resource Management Framework for Integrating WLANS in Cellular Networking Environments [J]. IEEE Wireless Communications. Dec 2005, 12(6): 11-17
- [10] Yasuhiko Matsunaga, Randy H. Katz. Inter-Domain Radio Resource Management for Wireless LANs [J]. Resource Management in Wireless Networking. 2005, 16: 122-141
- [11] Hyun-Ho Choi, Gyung-Ho Hwang, Dong-Ho-Cho. Adaptive Random

- Access and Resource Allocation Scheme Based on Traffic Load in HiperLAN Type2 System [J]. IEEE Commun. Letters. Apr 2003, 7(4): 192-194
- [12] S.W. Kim, B.-S. Kim, Y. Fang. MAC protocol for resource allocation in hotspot microcell [J]. Electronics Letters. October 2004, 40(22): 1426-1428
- [13] Jing Liu, Jiandong Li, Lei Zhou, Guanghui Zhang. An Enhanced User-dependent Perfect-scheduling Multiple Access Protocol for Wireless Packet Network [C]. Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. March 2005, 1: 769-774
- [14] Anjlika Malla, Mona El-Kadi, Stephan Olariu, Petia Todorova. A Fair Resource Allocation Protocol for Multimedia Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. January 2003, 14(1): 63-71
- [15] 张宇, 朱光喜, 熊健. B3G 无线资源分配策略 [J]. 计算机与数字工程. 2006, 34(4): 39-42
- [16] 彭木根, 王文博. 3G 无线资源管理与网络规划优化 [M]. 2006 年 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 2006
- [17] M.Zhang, T.-S. Yum. The Non-Uniform Compact Pattern Allocation Algorithm for Cellular Mobile Systems [J]. IEEE Trans. on Vehicular Tech. 1991, 40: 387-391
- [18] S.-H. Oh et al. Prioritized Channel Assignment in a Cellular Radio Network [J]. IEEE Trans. on Commun. 1992, 40: 1259-1269
- [19] I.Katzela, M.Naghshineh. Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication Systems: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Personal Communications. June 1996, 3: 10-31
- [20] Channel Assignment Schemes [EB/OL]. <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/cellplan/dca.htm>
- [21] Giuseppe Bianchi. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. March 2000, 18(3): 535-547
- [22] Seongkwan Kim, Youngsoo Kim, Sunghyun Choi, Kyunghun Jang, Jin-Bong Chang. A High-Throughput MAC Strategy for Next-Generation

- WLANs [C]. Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'05) . 2005, 1: 278-285
- [23]Huei-Wen Ferng, Hsin-Jung Lin, Wei-Chung Teng, Yi-Chou Tsai, Cheng-Ching Peng. A Channel Allocation Scheme with Dynamic Priority for Wireless Mobile Networks [C]. IEEE VTC 2004-Fall. Sept. 2004, 2: 1143-1147
- [24]R.Ramjee, R.Nagarajan, D.Towsley. On optimal call admission control in cellular networks [J]. Wireless Networks. March 1997, 3(1): 29-41
- [25]F.A.Cruz-Perez, D.Lara-Rodriguez, M.Lara. Fractional channel reservation in mobile communication systems [J]. IEEE Electronics Letters. 1999, 35(23): 2000-2002
- [26]H. Beigy, M. R. Meybodi. Multi-threshold guard channel policy for next generation wireless networks [J]. Lecture Notes in Computer Science. 2003, 2869: 755-762
- [27]Narrainen, R.P. Takawira, F. Performance analysis of soft handoff in CDMA cellular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Nov 2001, 50(6): 1507-1517
- [28]X.Wu, D.Ghosal, B.Mukherjee. Benefits of queued handoff in a multi-tier architecture [C]. GLOBECOM'00. 2000, 3: 1396-1401
- [29]Q-A.Zeng, D.P.Agrawal. Performance analysis of a handoff scheme in integrated voice/data wireless networks [C]. Proc. IEEE VTC 2000 Fall. September 2000, 4: 1986-1992
- [30]Junyi Li, Ness B. Shroff, Edwin K. P. Chong. Channel Carrying: A Novel Handoff Scheme for Mobile Cellular Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking. February 1999, 7: 38-50
- [31]X.Ling, S.Jiang, K.C.Chua. Effects of Channel Carrying Strategies on Handoffs in DCA-based Mobile Cellular Networks [C]. Proc. of IEEE PIMRC 2000. 2000, 2: 787-791
- [32]Shengming Jiang, Xinhua Ling, Kee-Chaing Chua. Performance of Channel Carrying for Handoff in a DCA Cellular Network [J]. Wireless Personal Communications. 2003, 25: 241-262
- [33]翟琮琮,刘宴兵.一种新的固定带宽无线接入网的信道分配[J].微计算机信息. 2007, 23(193):142-144

- [34]陈敏.OPNET网络仿真[M].2004年1版.北京:清华大学出版社,2004
- [35]孙屹,孟晨.OPNET通信仿真开发手册[M].2005年1版.北京:国防工业出版社,2005
- [36]徐雷鸣,庞博,赵耀.NS与网络模拟[M].2003年1版.北京:人民邮电出版社,2003
- [37]GloMoSim Tutorial[EB/OL]. <http://pcl.cs.ucla.edu/slides/workshop99/Jaytut-pw99/>
- [38]潘磊. MANET仿真软件的分析与研究[J].广东通信技术.2005, 25(2): 40-44
- [39]陈敏, 韦岗. IEEE 802.11无线局域网OPNET建模与性能测试[J]. 计算机工程. Nov, 2004, 30(21):14-16