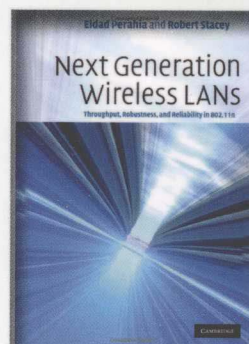


CAMBRIDGE



国际先进通信技术译丛

下一代无线局域网

802.11n的吞吐率、 强健性和可靠性

Next Generation Wireless LANs:
Throughput, Robustness,
and Reliability in 802.11n

【美】Eldad Perahia 著

【美】Robert Stacey

罗训 赵利 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

国际先进通信技术译丛

下一代无线局域网

802.11n的吞吐率、
强健性和可靠性

Next Generation Wireless LANs:

Throughput, Robustness,
and Reliability in 802.11n

【美】Eldad Perahia 著

【美】Robert Stacey

罗训 赵利 译

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

下一代无线局域网 : 802.11n 的吞吐率、强健性和可靠性 / (美) 佩拉亚 (Perahia, E.), (美) 斯泰西 (Stacey, R.) 著 ; 罗训, 赵利译. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2010.9

(国际先进通信技术译丛)

ISBN 978-7-115-23376-9

I. ①下… II. ①佩… ②斯… ③罗… ④赵… III. ①无线电通信—局部网络 IV. ①TN925

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第121727号

内 容 提 要

本书全面描述了 802.11n 的协议原理、实现细节和关键新功能, 对 802.11n 的吞吐率、强健性和可靠性方面的增强功能(如 MIMO、40MHz 信道以及分组聚合等)进行了深入讨论, 并给出了与先前版本 802.11 协议族的兼容问题和互操作性的总结。

本书适合于无线局域网的设计、组网和工程技术人员以及相关领域(蜂窝通信系统、城域无线网)的工程技术人员阅读, 也可用作高等院校相关专业师生的参考资料。

国际先进通信技术译丛

下一代无线局域网——802.11n 的吞吐率、强健性和可靠性

◆ 著 [美] Eldad Perahia Robert Stacey

译 罗 训 赵 利

责任编辑 韦 毅

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京鑫正大印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 19.75

字数: 470 千字

印数: 1—3 000 册

2010 年 9 月第 1 版

2010 年 9 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2009-5703 号

ISBN 978-7-115-23376-9

定价: 65.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

版 权 声 明

Next Generation Wireless LANs: Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n, 1st edition (ISBN 978-0-521-88584-3) by Eldad Perahia and Robert Stacey, first published by Cambridge University Press 2008

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Posts & Telecommunications Press 2010

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Posts & Telecommunications Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2009-5703

译者序

我们使用计算设备的环境与方式在最近 10 年内发生了许多深刻的变化,这些变化包括笔记本电脑和智能手机等移动设备得到广泛普及,在一些用户群体中,甚至超过了人均一部的水平;计算设备多媒体功能的增强使得用户所能接入到的以及网络所能提供的媒体内容爆炸性地增长;基于互联网的云计算促进了各种资源的互相连接与融合;主干网和最后一千米部署的光纤把宽带接入家家户户;无论是办公、居家还是旅行,无线都日益成为用户所追求的体验。所有这些变化直接或间接地对 802.11 的性能提出了更高的要求,促使这一诞生于 20 世纪 90 年代的标准不断发展。802.11n 的公布就是这一过程中最近的里程碑。

作为绝大部分无线局域网所采用的技术,802.11 系统和设备的部署非常广泛。对这样一个标准进行重大的性能升级,而且同时还要保持与传统设备的共存与兼容性,其复杂性和挑战性可想而知。本书是迄今为止唯一一本详细讲解 802.11n 物理层和媒体接入控制层的著作,涵盖对标准文本的权威解读和标准由来的全面讨论。本书首先是读者深入学习了解和管理 802.11n 网络的参考手册。更重要的是,身为 802.11n 标准提议、演进和最终定稿的见证人,作者在书中花费了大量篇幅讲解“为什么”、“怎么做”和“哪些没有被选择”这些在协议文本中完全看不到的内容。这对于深入理解一个复杂的标准规范,尤其是 802.11n 这样的标准大有裨益。本书体现了不可多得的来自最权威作者的观点,有助于读者从系统架构的角度,培养自己思考和参与制定标准的能力。本书对理解和设计目前的许多无线基础设施建设的热门技术,如无线城市、固定移动融合、高速数据终端应用等具有指导意义。书内丰富的网络实例和模拟结果也使它成为一本不可多得的案头必备书。

本书最终得以出版,离不开合作者的专业精神和朋友们热情帮助。赵利博士对本书物理层部分有关章节的翻译和审阅工作做出了很大贡献。黄铭峰协助完成了大量的文字和图表编辑工作。黎家亮对初稿进行了审阅并给出了许多中肯的意见和建议。需要感谢的还有彭鹏、李墩、汪腾、钟静、骆佳、胡迪、黄乐知等,谢谢你们!

我要特别感谢我的妻子荆然。翻译工作完全在业余时间进行,占用了许多本来应该属于家庭的夜晚和周末时光。她的理解和支持是我完成这一工作的巨大动力和必要条件。

尽管译者尽力保证书的质量,但囿于个人的水平和能力,书中仍然难免有遗漏和错误之处。在希望读者见谅之余,也请不吝时间,提交反馈到网上的勘误表,网址是 www.cs.uic.edu/~xluo/802_11/。译者在这个网址还维护了一个中英对照的术语表,以针对解决同一英文术语在不同中文地区,甚至国内的多种译著中译法不一致的问题。读者也可以给译者发送电子邮件,邮箱地址是 xun.luo@ieee.org。

我衷心希望这本书能对您理解与应用 802.11n 有所助益。

罗 训

2010 年 4 月于美国加州圣迭戈

下一代 无线局域网

如果您一直在寻找一条无需在整个标准文档中跋涉而可以快速了解 802.11n 的途径,那么本书就是最佳之选。本书全面综述了 802.11n 的基本原理、实现细节以及主要增强特性。对于许多这样的特性,作者描述了它们被选入标准的出发点和沿革。本书给出了主要增强特性——吞吐率、强健性以及可靠性(例如 MIMO、40MHz 信道以及分组聚合)——的详尽讨论,以及与传统系统间兼容性与共存性的清晰总结。本书也涉及了一些深入的主题,如波束成型技术和快速链路适应。书中包含了大量的 MAC 与 PHY 示例以及模拟结果,来展现新特性所带来的好处。本书是一本理想的 WLAN 设备设计人员以及采用了新标准的系统管理员的参考手册。本书也为无线通信领域的研究生和研究人员提供了非常有用的、关于 802.11n 技术的提炼信息。

关于作者

Eldad Perahia 是英特尔公司无线标准与技术组的成员,802.11 超高吞吐率研究组的组长,802.11 与 802.19 标准间的协调人。在加入英特尔公司之前,Perahia 博士在思科公司领导 802.11n 设计工作。他在加州大学洛杉矶分校获得电子工程博士学位,并在无线通信的多个领域共拥有 14 项专利。

Robert Stacey 是英特尔公司无线标准与技术组的成员。他是 802.11 高吞吐率任务组(TGn)的成员,也是多个成为 802.11n 草案标准基础的提案的主要作者。他在无线通信领域拥有多项已提交的专利申请。

关于译者

罗训,高通公司首席科学家研发部的高级工程师。在加盟高通之前,2006—2008 年间他在美国摩托罗拉实验室担任高级工程师,而且是摩托罗拉公司在多个无线标准组织的代表。他是 IEEE 通信领域多个会议和杂志的审稿人,以及会议的专业委员会成员。他还是 IEEE 高级会员,IEEE 计算机学会的杰出讲员,并在业余时间担任 IEEE 圣迭戈分会的副会长以及计算机协会的会长。他在伊利诺伊大学芝加哥分校获得计算机科学博士学位。

赵利,微软公司 Windows 核心网络组的工程师,在无线通信领域具有多年的研究经历。她是 IEEE 和 IEE 通信和计算机领域多个会议和杂志的审稿人,并曾担任 IEEE 多个会议的专业委员会成员。她还是 IEEE 会员,并在华盛顿州立大学获得电子工程博士学位。

802.11 标准第 1 版的制定过程长达 7 年，最终于 1997 年经批准生效。但对这一新技术的最初应用很缓慢，部分原因在于当时需要“无线自由”的设备还为数不多。

短短几年后，笔记本电脑的日益普及给 802.11 带来了真正的机遇。在这一进程中，需要更频繁联网的用户群体获得了快速增长。这些用户不仅需要在家里和办公室通过以太网线联网，而且也需要在两处之间的地点联网：旅店、机场、会议中心、餐馆、公园等。802.11 提供了成本低而且简单的方案，使得用户所需要的笔记本电脑移动性成为现实。

然而单有技术本身还远远不够，尤其是在网络设备行业，来自多个厂商的设备之间的互操作性几乎总是市场成功的关键。Wi-Fi 联盟（其前身为成立于 1999 年的 WECA）承担起了为各厂商提供互操作性认证的工作。

在 IEEE 802.11 工作组所提供的技术、Wi-Fi 联盟认证的互操作性以及不断增长的笔记本电脑用户所带来的市场需求的基础上，Wi-Fi 市场具备了迅速发展的条件，事实也证明了这一点。2007 年，基本上每一台新笔记本电脑的 Wi-Fi 功能都成为标准配置。更重要的是，有别于其他“成功”的无线技术，Wi-Fi 设备被广泛而频繁地应用。这样的应用印证了价格低廉、部署容易和管理方便的可互操作的 Wi-Fi 网络的强大功能。

自然而然地，人们开始接着问：“除此之外，我们还可以怎样利用 Wi-Fi 呢？”一个“所有设备，无处不在”的答案慢慢地浮现出来。不只是笔记本电脑，现在所有的移动设备，甚至一些固定设备都配置了 Wi-Fi。而使用 Wi-Fi 的应用也非常广泛，包括数据、语音、游戏、音乐、视频、定位、公共安全、车辆技术等。2007 年，Wi-Fi 设备的出货量超过 3 亿。部分分析师预期，到 2012 年，Wi-Fi 设备的每年出货量将超过 10 亿。

2.4 GHz 802.11b 11Mbit/s DSSS/CCK PHY 和基于竞争的基本 802.11 MAC 为一个规模宏大的产业奠定了基础，但急速增长的 Wi-Fi 市场对技术的能力提出了挑战。很快，更高的安全性（802.11i，即被 Wi-Fi 联盟认证的 WPA/WPA2TM）和服务质量（802.11e，即被 Wi-Fi 联盟认证的 WMMTM 和 WMM Power Save）就被定义、认证和部署了。

同样很快地，更大的数据密度需要更高的数据速率以支持众多新颖而刺激的设备和应用。以 5GHz 频带上的 OFDM 为基础的 802.11a 可以提供 54Mbit/s 的数据速率，但它并未得到大量的支持。原因是它需要两个无线模块来保持与 2.4GHz 802.11b 设备的后向兼容性，而两个无线模块的成本一般都很高。802.11g 获得了真正的成功。它同样提供 54Mbit/s 的数据速率，但以 2.4 GHz 频带上的 OFDM 为基础，并且可以与 802.11b 后向兼容。

802.11g 的成功使 Wi-Fi 的使用达到新的高度，也再次提高了对技术的要求——因为用户想要的更多了。幸运的是，技术的发展永不停步。2002 年 IEEE 802.11 工作组开始定义下一代的 PHY 与 MAC 特性，这些特性的定义最终成为 802.11n 的一部分。802.11n 将会在 PHY（包括 MIMO 技术与 40MHz 信道）以及 MAC（包括更有效率的数据聚合和确认）中以强制特性和可选特性的形式来定义各种机制，为用户提供更高的数据速率、更远的覆盖距离以及更好的可靠性。

有趣的是，802.11n 能够同时运行于 2.4 GHz 与 5 GHz 频带。由于种种原因，包括 2.4 GHz 频带越来越拥挤，5GHz 频带下的可用信道数随着 DFS 和 TPC 技术的引入得以扩展，对高吞吐率 40MHz 信道的需求增加，以及双频无线模块的价格下降，可以预见 5 GHz 上的 Wi-Fi 运行会比 802.11a 被引入时更加普及。

802.11n 标准的制定还未完成，起码在 2009 年中之前不大可能得到 IEEE 的批准生效^①。直至 2006 年 8 月，根据 Wi-Fi 联盟的条例，在技术标准被批准生效前，是不能对 802.11n 产品进行认证的。但有些厂商认为市场等不及 802.11n 的批准生效，并开始推出标准前产品。因为这些产品并非建立在对 802.11n 标准的统一解读之上，它们之间的互操作常常不能达到期望的性能水平。对于 Wi-Fi 联盟来说，这些产品会对 Wi-Fi 产生不利影响。Wi-Fi 联盟决定，解决这一问题的唯一方法就是按照标准前的草案认证 802.11n 的基本特性。这样的做法并非没有先例。2003 年的 WPA 认证是在 802.11i 批准生效前开始的，而 2004 年的 WMM 认证也是在 802.11e 批准生效前开始的。2007 年 6 月 26 日，Wi-Fi 联盟开始了对 802.11n 2.0 草案的认证。

这最终被证明是一个对工业界和用户都正确的决定。对 802.11n 2.0 草案产品的 Wi-Fi 认证非常成功，在 5 个月内，超过 150 个产品通过了认证。与 802.11g 刚推出后的同期相比，被认证的产品数量明显多出很多。Wi-Fi 联盟的认证确保了在 802.11n 标准批准生效前推出的数量众多的产品之间的互操作性。考虑到在 Wi-Fi 联盟决定开始认证后，传出了 802.11n 标准批准生效可能会推迟一年以上的消息，提前认证的决定就显得尤其重要了。Wi-Fi 联盟所面临的下一个挑战将会是确保从 Wi-Fi 认证的 802.11n 2.0 草案过渡到最终审批通过的标准之间的后向兼容性。

标准规范从来都不是最容易理解的文档。因为长时间多次经过不同工作组和编辑人员的修订，802.11n 标准尤其难以理解。标准草案，例如 802.11n 草案 2.0，更是难以解读，因为很多条款仍然在完善过程中。而这一过程中常会牵涉技术和政治观点的方方面面，只有那些全职参加 IEEE 802.11 工作组工作的人们才能洞知其详。

像本书一样的书很有价值，因为它们提供了相关细节和背景，使得读者可以回答以下问题：“最终标准可能是怎样的？它的工作原理又是什么？” Eldad 和 Robert 应该为接受这个挑战而接受祝贺。

Andrew Myles 博士
Wi-Fi 联盟董事会主席
2007 年 12 月 6 日

① 译者注：802.11n 标准已于 2009 年 9 月经 IEEE 批准生效。这一标准被称为 IEEE 802.11n-2009。

前 言

参与 802.11n 标准制定一段时间后,我们在 2006 年 12 月于旧金山举办的 IEEE Globecom 会议上开设了一个关于 802.11n 物理层 (PHY) 和媒体接入控制 (MAC) 层的一日课程。我们的目的是提供一个标准草案的高水平综述,因为当时对于没有深入参与协议制定的人们来说,所能得到的 802.11n 细节资料是很少的。那个课程之后,剑桥大学出版社的 Phil Meyler 联系了我们,并让我们考虑把这个课程扩展成一本书。

写一本书来描述标准的想法非常吸引人。我们觉得一本书比一个课程能够提供更多机会来展示标准中的细节。本书可以对必将会被最广泛使用的无线技术之一进行详尽描述,从而弥补市场上同类图书的空白。标准本身表述了具备互操作性所需的细节,但它缺乏相关背景,例如为什么某些特定选项应该被实现,特定观点的由来,设计中所遇到的限制,或者它们所带来的好处。这些都是我们希望在本书中涵盖的内容。本书对各种特性所提供的好处,尤其是物理层的特性,都提供了量化的仿真结果。我们希望能提供足够的信息,确保读者能对物理层建模,并将仿真结果与我们的结果进行对比。最后,目前标准修订文档已将近 2 500 页,我们希望为大家打开一面可窥探那些最重要的方面的窗户,把焦点集中在标准对吞吐率和强健性的提高以及实现这些的基础之上。

本书分为 3 部分。第一部分涵盖物理层 (PHY)。这一部分以 802.11n 所基于并与之互操作的 802.11a/g OFDM 物理层的背景信息开始,进而概述 802.11n 增加吞吐率技术的关键——空间复用。之后详细介绍 802.11n 如何以空间复用和 40MHz 宽信道获得高吞吐率。随后就是关于增强强健性的细节,例如接收分集、空间扩展、空时块编码以及低密度奇偶校验码。

第二部分涵盖媒体接入控制 (MAC) 层。这一部分提供了关于最初的 802.11 MAC 和 802.11e 服务质量 (QoS) 增强的相关背景。它首先概述了为什么 MAC 需要改变来达到更高的吞吐率,随后是引入的各项新特性的细节介绍。由于已部署的 802.11 设备数量巨大,共存性和互操作性对于标准被顺利采用至关重要。关于这一点,本书对支持共存性和互操作性的特性进行了深入讨论。

第三部分提供了标准中两个更高层面的细节:传输波束成型和链路适应。这两方面的内容作为一章,该章同时涵盖了 PHY 与 MAC 的相关内容。

如果没有朋友和同事们的帮助,我们不可能完成本书。我们要感谢 Thomas (Tom) Kenney 和 Brian Hart 审阅本书的 PHY 部分,感谢 Solomon Trainin、Tom Kenney 以及 Michelle Gong 审阅本书的 MAC 部分。他们所给出的深入见解、建议和对本书的修改大大提高了本书的质量。

本书的目的之一是为读者提供 802.11n 标准中 PHY 特性的量化好处。如果没有 Tom Kenney 大量仿真的支持,这是不可能实现的。他开发了一个既能包括绝大部分 802.11n PHY

特性,又能模拟传统 802.11a/g 的 802.11n PHY 仿真平台。该平台包括了 802.11n 的所有信道模型。除此以外, Tom 还对接收机功能建立了模型,例如同步、信道估计和相位跟踪。仿真还考虑了信号损伤,例如放大器的非线性和相位噪声,从而使性能测量更具真实性。

仿真同时支持 20MHz 和 40MHz 信道宽度。利用对 40MHz 的仿真能力, Tom 生成了 5.1.5 节图 5.8 中描述 MCS 32, 以及 5.1.7 节图 5.9 中描述 40MHz 模式下的覆盖距离和吞吐率提升的有关结果。利用对 AWGN 信道以及 802.11n 信道模型的仿真能力, Tom 生成了 5.3 节中的图 5.12~图 5.15。通过设计仿真, 将发射机和接收机灵活设定到各种模式, 生成了 5.4 节图 5.18 中关于传统 802.11a/g 设备接收 GF 传输时表现的结果。Tom 还在仿真中并入了短保护间隔, 从而生成了 5.5 节图 5.20~图 5.22 中对时间同步误差敏感度的结果。

Tom 所设计的仿真可以选择任意数量的独立于空间流数量的发送和接收天线。他利用这个能力生成了 6.1 节图 6.2~图 6.4 中关于接收分集增益和 6.2 节图 6.5~图 6.6 中关于空间扩展性能的结果。Tom 还把空时块编码和低密度奇偶校验编码加入仿真中, 并生成了 6.3 节图 6.8~图 6.9、图 6.14~图 6.16 以及 6.4 节图 6.24 中的结果。

为了增加传输波束成型系统的模型准确性, 在模型中包括信道状态信息、波束成型权重值计算和链路适应这些因素非常重要。Tom 在仿真中加入了所有这些功能, 生成了 12.8 节图 12.11~图 12.16 中的瀑布曲线以及图 12.17 与图 12.18 中的吞吐率曲线。

我们衷心希望本书能为您提供对于 802.11n 标准及其所基于的技术的领悟和更深入的了解。

目 录

第1章 背景介绍	1	1.2.4 手持设备	7
1.1 IEEE 802.11 沿革	2	1.2.5 提案合并	8
1.2 高吞吐率与 802.11n 沿革	5	1.2.6 802.11n 修订草案	8
1.2.1 高吞吐率研究组	5	1.3 802.11n 的环境与应用	9
1.2.2 高吞吐率任务组 (TGn) 的成立	5	1.4 802.11n 的主要特性	12
1.2.3 提案征稿	7	1.5 各章综览	14
		参考文献	15

第一部分 物理层

第2章 正交频分复用	19	附录 3.1 802.11n 信道模型	41
2.1 背景知识	19	第4章 与传统 11a/g OFDM 设备 间的 PHY 互操作性	46
2.2 与单载波调制的比较	21	4.1 802.11a 分组结构回顾	46
参考文献	22	4.1.1 短训练字段	46
第3章 MIMO/SDM 基础	23	4.1.2 长训练字段	49
3.1 单入单出 (802.11a/g) 背景 知识	23	4.1.3 信令字段	50
3.2 多入多出基础知识	23	4.1.4 数据字段	51
3.3 空分复用基础知识	25	4.1.5 分组编码过程	52
3.4 MIMO 环境	26	4.1.6 接收过程	53
3.5 802.11n 传播模型	28	4.2 混合格式高吞吐率分组结构	55
3.5.1 脉冲响应	28	4.2.1 MF 前导码的非 HT 部分	56
3.5.2 天线相关性	30	4.2.2 MF 前导码的 HT 部分	61
3.5.3 多普勒模型	32	4.2.3 数据字段	66
3.5.4 物理层损伤	33	4.2.4 HT MF 的接收过程	72
3.5.5 路径损失	35	参考文献	77
3.6 线性接收机的设计	36	附录 4.1 20MHz 的基本 MCS 表	78
3.7 最大似然估计	39	第5章 高吞吐率	80
参考文献	40	5.1 40MHz 信道	80

5.1.1 40MHz 子载波的设计和 频谱掩模.....80	表格..... 109
5.1.2 40MHz 信道设计82	附录 5.3 物理层波形参数111
5.1.3 40MHz 混合格式前导码...82	
5.1.4 40MHz 数据编码86	
5.1.5 MCS 32: 高吞吐量复制 格式.....88	
5.1.6 在物理层 20/40MHz 与 传统的共存.....90	
5.1.7 使用 40MHz 的性能 改善.....90	
5.2 20MHz 的增强: 额外数据 子载波91	
5.3 MCS 的增强: 空间流和码率...92	
5.4 Greenfield (GF) 前导码96	
5.4.1 GF 前导码的格式.....97	
5.4.2 PHY 的效率.....98	
5.4.3 GF 的问题.....99	
5.4.4 前导码自动检测.....101	
5.5 短保护间隔.....103	
参考文献.....106	
附录 5.1 信道分配.....106	
附录 5.2 40MHz 的基本 MCS	
	第 6 章 强健性 112
	6.1 接收分集 112
	6.1.1 最大比合并基础知识... 112
	6.1.2 通过接收分集改善 MIMO 的性能..... 113
	6.1.3 选择分集 115
	6.2 空间扩展 115
	6.3 空时块编码 117
	6.3.1 Alamouti 方案的 背景知识 117
	6.3.2 额外的 STBC 天线配置... 119
	6.3.3 STBC 接收机和均衡... 120
	6.3.4 使用 STBC 的发送和 分组编码过程 123
	6.4 低密度奇偶校验码 125
	6.4.1 LDPC 编码过程 125
	6.4.2 有效的码率 133
	6.4.3 LDPC 编码增益 134
	参考文献 134
	附录 6.1 奇偶校验矩阵 135

第二部分 媒体接入控制层

第 7 章 媒体接入控制..... 141	
7.1 协议分层.....142	7.4.3 数据/ACK 序列的系统 开销与公平性 149
7.2 管理功能.....142	7.5 隐藏节点问题 150
7.2.1 信标.....142	7.5.1 网络分配向量 150
7.2.2 扫描.....143	7.5.2 EIFS 151
7.2.3 认证.....143	7.6 增强分布式信道接入 151
7.2.4 关联.....144	7.6.1 传输机会 152
7.2.5 重关联.....144	7.6.2 带 EDCA 的信道接入 时序 153
7.2.6 去关联.....144	7.6.3 EDCA 的接入参数 154
7.3 分布式信道接入.....144	7.6.4 再论 EIFS 154
7.4 数据/ACK 帧交换147	7.6.5 碰撞检测 154
7.4.1 分片148	7.6.6 QoS 数据帧 155
7.4.2 重复检测.....149	

7.7 块确认	155	9.2.1 数据流	178
参考文献	157	9.2.2 受控接入相	179
第 8 章 MAC 吞吐率提升措施 ..	158	9.2.3 轮询 TXOP	180
8.1 改进的原因	158	9.2.4 TXOP 请求	180
8.1.1 无 MAC 改进的吞吐率	158	9.2.5 使用 RTS/CTS	181
8.1.2 MAC 吞吐率提升措施	159	9.2.6 HCCA 的局限	181
8.1.3 MAC 效率增强后的 吞吐率	160	9.3 逆向协议	181
8.2 聚合	162	9.3.1 逆向帧交换	182
8.2.1 聚合 MSDU	162	9.3.2 逆向规则	183
8.2.2 聚合 MPDU	163	9.3.3 错误恢复	183
8.2.3 聚合 PSDU	165	9.4 PSMP	183
8.3 块确认	165	9.4.1 PSMP 恢复	184
8.3.1 立即与延迟块确认	166	9.4.2 PSMP 突发	185
8.3.2 初始化块确认会话	167	9.4.3 资源分配	185
8.3.3 块确认会话中的 数据传输	167	9.4.4 在 PSMP 下使用块 确认	185
8.3.4 终止块确认会话	168	参考文献	186
8.3.5 非聚合中的正常确认 策略	168	第 10 章 互操作与共存	187
8.3.6 重排序缓冲区操作	168	10.1 站点与 BSS 能力	187
8.4 HT 立即块确认	169	10.1.1 HT 站点 PHY 能力	187
8.4.1 聚合中的正常确认 策略	169	10.1.2 HT 站点 MAC 能力	188
8.4.2 压缩块确认	170	10.1.3 BSS 能力	188
8.4.3 全状态与部分状态块 确认	171	10.1.4 高级能力	188
8.4.4 HT 立即块确认 TXOP 序列	173	10.2 站点行为控制	188
8.5 HT 延迟块确认	174	10.3 20MHz 与 20/40MHz 运行	190
参考文献	175	10.3.1 信标发送	190
第 9 章 高级信道接入技术	176	10.3.2 20MHz BSS 运行	190
9.1 PCF	176	10.3.3 20/40MHz BSS 运行	191
9.1.1 建立 CFP	176	10.3.4 20MHz 中的空闲信道 评估	194
9.1.2 CFP 期间的 NAV	177	10.3.5 40MHz 中的空闲信道 评估	194
9.1.3 CFP 期间的数据传输	177	10.3.6 40MHz 传输中的信道 接入	195
9.1.4 PCF 的局限	178	10.3.7 20/40MHz BSS 中的 NAV 认定	195
9.2 HCCA	178	10.3.8 OBSS 扫描要求	195
		10.3.9 “不容许 40MHz” 信令	199

10.3.10 AP 上的信道管理	199
10.4 控制 40MHz 运行的字段	
小结	200
10.5 分相共存运行	201
10.5.1 基本操作	201
10.5.2 最小化实时服务中断	202
10.6 保护	203
10.6.1 存在 802.11b 站点时的	
保护措施	203
10.6.2 存在 802.11g 或者	
802.11a 站点时的	
保护措施	203
10.6.3 对 OBSS 传统站点的	
保护	204
10.6.4 RIFS 突发保护	204
10.6.5 绿野格式保护	204
10.6.6 RTS/CTS 保护	205
10.6.7 CTS-to-Self 保护措施	205
10.6.8 使用非 HT 或带非 HT	
响应的 HT 混合	
PPDU 的保护	206
10.6.9 使用 HT 混合格式 PPDU	

时的非 HT 站点后延	207
10.6.10 L-SIG TXOP 保护	207
参考文献	209

第 11 章 MAC 帧格式	210
11.1 帧的一般格式	210
11.1.1 “帧控制” 字段	210
11.1.2 “时长/ID” 字段	213
11.1.3 “地址” 字段	214
11.1.4 “序列控制” 字段	214
11.1.5 “QoS 控制” 字段	214
11.1.6 “HT 控制” 字段	216
11.1.7 “帧体” 字段	218
11.1.8 FCS 字段	218
11.2 各种帧类型的格式	218
11.2.1 控制帧	218
11.2.2 数据帧	223
11.2.3 管理帧	224
11.3 管理帧中的字段	228
11.3.1 非信息元素的字段	229
11.3.2 信息元素	230
参考文献	240

第三部分 传输波束成型

第 12 章 传输波束成型	243
12.1 奇异值分解	244
12.2 使用 SVD 进行传输波束	
成型	246
12.3 特征值分析	247
12.4 非均衡 MCS	251
12.5 接收机设计	253
12.6 信道探测	254
12.7 信道状态信息反馈	256
12.7.1 隐式反馈	256
12.7.2 显式反馈	259
12.8 使用传输波束成型带来的	
性能改善	265
12.9 性能下降	271

12.10 MAC 考虑	278
12.10.1 探测 PPDU	278
12.10.2 隐式反馈波束成型	279
12.10.3 显式反馈波束成型	282
12.11 隐式反馈与显式反馈的	
比较	284
12.12 快速链路适应	285
12.12.1 MCS 反馈	286
12.12.2 使用 HT 控制字段的	
MCS 反馈	287
参考文献	288
附录 12.1 非均衡 MCS	288

缩略语表	293
------	-----

第 1 章

背景介绍

随着 IEEE 802.11 设备的涌现,无线局域网在过去 10 年经历了空前的发展。回溯历史,应该从 1888 年 Hertz 发现无线电波说起,之后是 Marconi 于 1894 年进行的长距离无线收发的初步实验。随后的一个世纪里,无线电通信和雷达技术,包括对扩频技术的开发,被证实具有非常重要的军事价值。第一个基于分组的无线网络 ALOHANET 诞生于 1971 年。它由夏威夷大学的研究人员建造,是一个由分散在 4 个岛屿上的 7 台计算机以及 1 台中央计算机组成的星形双向通信网络。

1985 年,当美国联邦通信委员会 (FCC) 允许在工业、科学和医用 (ISM) 无线电频带上进行实验性的商业扩频技术应用时,商用无线局域网 (WLAN) 的发展到达了一个里程碑。好几代基于专有技术的 WLAN 设备,包括 Bell Labs 的 WaveLAN 等,被研发出来使用这些频带。这些初期的产品十分昂贵,只有在难以铺设有线网络时才会被部署使用。

半导体技术的发展和 IEEE 802.11 对 WLAN 的标准化使 WLAN 技术的成本大大降低,其应用也日益广泛。随着 WLAN 的商业价值越来越高,1999 年 Wi-Fi 联盟 (WFA) 成立,通过严格的测试认证各厂商 802.11 产品的互操作性。自 2000 年开始,通过 Wi-Fi 认证的集成电路 (IC) 的出货量在 2006 年达到每年 2 亿片 (ABIresearch, 2007)。如图 1.1 所示,到 2012 年,预计年出货量将超过 10 亿片 (ABIresearch, 2007)。

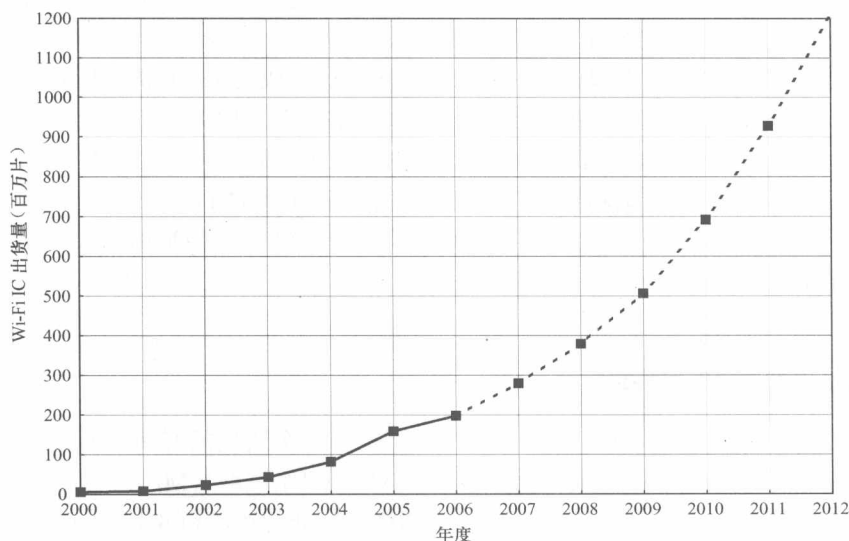


图 1.1 Wi-Fi IC 出货量 (来源: ABIresearch (2007))

如此大而持续的增长,主要归功于 WLAN 相对于有线网络的好处。对于已有的住宅和企

业来说,铺设网络电缆可能需要凿开墙壁、地板或天花板,不仅施工不便,而且成本高昂。相反,在这些环境中提供无线网络连接,常常简单到只需要安装一个接入点。也许更重要的是,随着大量的笔记本电脑和掌上设备的涌现,人们希望在任何地方都能够有网络连接,而不是仅限于有网线接口的地方。在会议室里和坐在客厅沙发上的网络连接就是两个体现 WLAN 灵活性的典型例子。

建立在由蜂窝电话网络所带来的移动便捷的基础上,如今 WLAN 可以在公共无线网络中以很低的费用甚至免费提供互联网接入。2005 年,Google 在不花费市政开支的情况下,为旧金山部署了覆盖该市的免费 Wi-Fi 网络。在咖啡馆、机场、酒店等场所提供互联网接入的小规模 Wi-Fi 网络也如雨后春笋般成长起来,这些网络被称为热点。此外,当这些网络与虚拟专用网(VPN)结合起来使用时,员工也可以从几乎任何地方安全地接入公司内部网络。

现在绝大部分的 WLAN 产品和系统都是基于 802.11b、802.11g 和 802.11a 标准修订版本的。这些修订版本对原版 802.11 PHY 的吞吐率进行了提升。随着 802.11n 标准的制定,WLAN 技术继续向前发展。由贝尔实验室的 Foschini (1996)提出的多入多出概念提供了更高的数据速率。2004 年,Atheros 展示了以与 20MHz 设备几乎相同的成本生产 40MHz 设备的方法。大概在同一时期,FCC 和 ETSI 在 5GHz 频带上实施了新规定,允许将额外的 400MHz 无需授权的频谱用于商用 WLAN。这些进展为 802.11n 广泛运行于 40MHz 模式铺平了道路。一旦有了频谱,增加信道宽度就是在成本上最有效增加数据速率的方法。

一般来说,产品发展会比标准化工作滞后,产品也会在标准公布后才上市。有趣的是,2003 年,Boardcom 在最终版本公布前便根据 802.11g 修订版本的一个草案推出了芯片组。有了这一先例可循,各厂商在 2005—2006 年争先恐后地推出挂着“n-前期版”和“n-草案版”头衔的产品以抢先占领市场。这些产品大部分都基于专有技术的 MIMO 实现或者 802.11n 1.0 版草案,所以不太可能与 802.11n 的最终标准相兼容。

2007 年初,经过重大改进和说明,802.11n 草案演进成为 IEEE 802.11n 2.0 版草案。为了维持已有市场的成长和预防互操作性上可能出现的问题,IEEE 打破惯例,在继续制定最终标准的同时对公众发布了 802.11n D2.0。这样,WFA 就可以从 2007 年 5 月起对 802.11n D2.0 的产品进行互操作性测试和认证了。经 WFA 认证的 802.11n D2.0 产品为消费者提供了“n-前期版”和“n-草案版”产品所不能保证的互操作性。这些举措大大促进了新技术的标准化和认证流程。

1.1 IEEE 802.11 沿革

IEEE 802.11 工作组为多个物理层(PHY)制定了一个通用的媒体接入控制(MAC)层以标准化无线局域网。作为 IEEE 802 局域网(LAN)和城域网(MAN)标准家族的一员,802.11 与 802.1 标准的架构、管理、联网以及 802.2 标准的逻辑链路控制(LLC)相关联。802.2 LLC 和 802.11 MAC 与 PHY 合起来组成开放系统互连(Open System Interconnection, OSI)参考模型的数据链路层和物理层,如表 1.1 所示。

表 1.1 OSI 参考模型 (Zimmerma,1980;Teare,1999)

OSI 参考模型层	描述	举例	层类别
应用层	与实现了通信组件的应用程序交互	Telnet, FTP, SMTP	应用
表示层	应用于应用层数据的编码与转换功能	Quick Time, MPEG, GIF, JPEG, TIFF	
会话层	建立、管理与终止通信会话	ZIP, AppleTalk, SCP, DECnet Phase IV	
传输层	从会话层接收数据, 并将数据分段以进行网络传输	TCP, UDP	数据传输
网络层	定义网络地址	TP, IPv6	
数据链路层	在物理网络链路上传输数据	802.2LLC	
物理层	电气、物理、流程与功能规范	802.11PHY	

802.11 标准的最初版本完成于 1997 年。受以太网（被标准化为 802.3）巨大市场成功的影响，802.11 MAC 采用了相同的简单分布式接入协议——载波侦听多址（CSMA）。当使用 CSMA 时，一个想要发送的站点首先侦听媒体一段定长时间。如果媒体在这段时间内被侦听为“空闲”，则站点被允许发送。如果媒体被侦听为“繁忙”，则站点需要将发送后延。最初的（共享媒体）以太网使用 CSMA 的一个变体，称其为带碰撞检测的载波侦听多址（CSMA/CD）。当检测到媒体处于“空闲”状态并发送时，站点能够收到自己的发送信号并进行碰撞检测。如果检测到碰撞，相碰撞的两个站点都会回退一段随机长度的时间然后重新发送。随机化的回退时长会减小再次发送碰撞的概率。

当使用无线时，站点就无法再用同样的方法检测到与自身发送信号的碰撞了，因此 802.11 使用 CSMA 的另一个变体，称其为带碰撞避免的载波侦听多址（CSMA/CA）。在使用 CSMA/CA 时，如果站点侦听到媒体处于繁忙状态，就会在媒体再次处于“空闲”后后延一段随机长的时间。因为在无线局域网上发生碰撞所带来的性能损失比有线局域网的大很多，这种在另一个站点的发送后总是回退一段随机时长的做法提高了性能。在有线局域网上的碰撞可以由电信号检测出来，因此近乎实时。而无线局域网上的碰撞是在整个帧发送完成后没有得到远端站点的确认或其他形式响应的情况下才能被推断出来。

毫无疑问，能让所有节点都被一致实现的分布式接入协议的简易性，对以太网被迅速采用为业界局域网标准功不可没。同样地，802.11 接入协议的简单性、其与以太网的相似性，以及能让所有节点都被一致实现的特性，是 802.11 得以击败其他更加复杂、使用集中式协调接入协议的 WLAN 技术，例如 HyperLAN，而被采纳为业界无线局域网标准的重要原因。

最初的（1997）802.11 标准包括 3 种 PHY：红外线（infrared, IR）、2.4GHz 跳频扩频（FHSS）以及 2.4GHz 直接序列扩频（DSSS）。1999 年制定了两个标准修订：基于 DSSS 以增加 2.4GHz 上数据速率的 802.11b 以及在 5GHz 上建立一个新的 PHY 的 802.11a。802.11b 使用补码键控（CCK）对 DSSS 进行增强，使得数据速率可以达到 11Mbit/s。具有了高数据速率的优势，IEEE 802.11b 设备取得了巨大的市场成功，而 IR 和 FHSS PHY 的市场则没有成长起来。