

IEEE 802.11 无线局域网标准研究*

李浩^a, 高泽华^a, 高峰^b, 赵荣华^c

(北京邮电大学 a. 信息与通信工程学院; b. 电子工程学院; c. 光通信与光电子学研究院, 北京 100876)

摘要: 介绍了 IEEE 802.11 全系列标准, 研究了 IEEE 802.11 系列各标准的发展轨迹和相互关系, 建立了该系列标准的层次模型。研究并分析了 IEEE 802.11、IEEE 802.11a、IEEE 802.11b、IEEE 802.11g 和 IEEE 802.11n 这几种常见标准, 并对相应物理层和媒质访问控制层的关键技术作了重点分析。

关键词: 无线局域网; IEEE 802.11; IEEE 802.11a; IEEE 802.11b; IEEE 802.11g; IEEE 802.11n

中图分类号: TN925.93; TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)05-1616-05

Research on IEEE 802.11 wireless local area networks standards

LI Hao^a, GAO Ze-hua^a, GAO Feng^b, ZHAO Rong-hua^c

(a. School of Telecommunication Engineering, b. School of Electronic Engineering, c. Institute of Optical Communication & Optoelectronics, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper introduced all the IEEE 802.11 series standards, and researched their developing histories and relations. Established the layer model of the IEEE 802.11 series standards. Researched and analyzed ordinary standards such as IEEE 802.11, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g and IEEE 802.11n, especially their corresponding technologies on physical layer and media access layer.

Key words: wireless local area networks(WLAN); IEEE 802.11; IEEE 802.11a; IEEE 802.11b; IEEE 802.11g; IEEE 802.11n

0 引言

IEEE 802.11 系列标准是无线局域网(WLAN)中应用最广泛的标准,从推出至今,走过了十几年的发展历程,如今已日趋成熟,应用越来越广,成为了无线网络中的宠儿。本文从发展历程的角度入手,介绍了 IEEE 802.11 全系列标准,建立了 IEEE 802.11 系列标准的层次模型,并对 IEEE 802.11 以及 IEEE 802.11a/b/g/n 几种常见的 IEEE 802.11 标准进行了研究和分析。

1 无线网络分类

无线网络可以分为无线广域网(wireless wide area network, WWAN)和无线局域网。两者的区别主要在于数据传输范围不同(但界限并不十分明显)。无线网络工作在开放系统互连(open system interconnection, OSI)参考模型的下三层,即通信子网层,如图 1 所示。WLAN 只包括物理层和数据链路层的功能;WWAN 还包括网络层的功能^[1]。

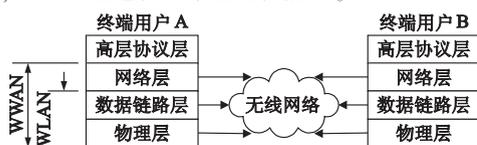


图1 无线网络逻辑结构

WLAN 的两个典型标准是 IEEE 802.11 系列标准和 Hi-perLAN 系列标准。本文只介绍 IEEE 802.11 系列标准。

2 IEEE 802.11 系列标准

1990 年,IEEE 802 标准化委员会成立了 IEEE 802.11 WLAN 标准工作组。经过十几年的发展,IEEE 802.11 逐渐形成了一个家族,其中既有正式标准,又有对标准的修正案。IEEE 802.11 标准依靠修订案来进行更新。

2.1 已经发布的标准、修正案和操作规程建议

a)IEEE 802.11—1997 在 1997 年 6 月获得通过,定义了 2.4 GHz ISM(industrial scientific medical)频段的物理层(PHY)和媒质访问控制层(MAC)规范。需要说明的是,除了 IEEE 802.11F 和 IEEE 802.11T 这两个操作规程建议及 IEEE 802.11—2007 标准之外,以下所有标准都是对 IEEE 802.11 的修正案。IEEE 802.11F 和 IEEE 802.11T 之所以将字母 F 和 T 大写,是因为它们不是标准,只是操作规程建议。

b)IEEE 802.11a 在 1999 年 9 月获得通过,定义了 5 GHz 频段高速物理层规范。

c)IEEE 802.11b 在 1999 年 9 月获得通过,是 2.4 GHz 频段的高速物理层扩展。

d)IEEE 802.11c 在 1998 年 9 月获得通过,修订了 IEEE 802.1D 的 MAC 层桥接标准,加入了与 IEEE 802.11 无线设备相关的桥接标准,目前已经是 IEEE 802.1D—2004 的一部分。

e)IEEE 802.11d 在 2001 年 6 月获得通过,在 PHY 层加入了必要的需求和定义,使其设备能根据各国的无线电规定作调整,从而能在不适合 IEEE 802.11 现有标准的国家和地区中使

收稿日期: 2008-08-24; 修回日期: 2008-10-15 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60602005)

作者简介: 李浩,男,湖北武汉人,硕士,主要研究方向为无线局域网(luplihao@gmail.com);高泽华,男,副教授,博士,主要研究方向为无线通信网、光网络;高峰,男,博士研究生,主要研究方向为无线通信网;赵荣华,男,教授,硕士,主要研究方向为光通信、智能交通系统、射频识别。

用^[2]。

f) IEEE 802.11e 在 2005 年 9 月获得通过,定义了 MAC 层 QoS 功能。

g) IEEE 802.11F 在 2003 年 6 月获得通过,定义了 IAPP (inter-access point protocol),以实现不同供应商的接入点 (access point, AP) 间的互操作性。它是一个实验用的操作规程建议,于 2006 年 2 月 3 日被 IEEE 802 执行委员会批准撤销。

h) IEEE 802.11g 在 2003 年 6 月获得通过,是 2.4 GHz 频段比 IEEE 802.11b 更高速率的物理层扩展,它对 IEEE 802.11b 后向兼容。

i) IEEE 802.11h 在 2003 年 9 月获得通过,主要是为了克服欧洲卫星、雷达在 5 GHz 的干扰而提出的。它在 IEEE 802.11a 的基础上增加了动态频率选择 (DFS) 和发送功率控制 (TPC)^[3]。

j) IEEE 802.11i 在 2004 年 6 月获得通过,是对 MAC 层在安全性方面的增强,与 IEEE 802.1X 一起,为 WLAN 提供认证和安全机制^[4]。

k) IEEE 802.11j 在 2004 年 9 月获得通过,是专门针对日本 4.9 ~ 5 GHz 无线应用所作的修订^[5],融合了日本对 802.11a 标准的扩展规则。

已经发布的标准和修正案的发展轨迹及层次模型如图 2 所示。其中,IEEE 802.11a 和 IEEE 802.11b 是两种互不兼容的高速物理层扩展。从修正案之间的关系来看,IEEE 802.11h 和 IEEE 802.11j 主要是在 IEEE 802.11a 的基础上进行修改,使之适应各国和地区的需要;IEEE 802.11g 主要是在 IEEE 802.11b 的基础上进行修改,满足更高速率的需要。

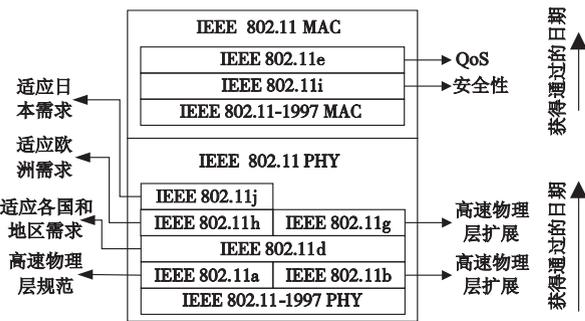


图2 已经发布的IEEE 802.11标准和修正案的发展轨迹和层次模型

2.2 制定过程中的修正案和操作规程建议

a) IEEE 802.11k 在无线电资源管理方面进行修订,为 WLAN 信道选择、漫游服务和传输功率控制提供标准。

b) IEEE 802.11l (11L) 字样与安全规范的 (11i) 容易混淆,并且很像 (111),因此被放弃并列使用。

c) IEEE 802.11m 主要是对 IEEE 802.11 家族规范进行维护、修正、改进,以及为其提供解释文件。802.11m 中的 m 表示 maintenance。

d) IEEE 802.11n 致力于将 WLAN 的传输速率从 54 Mbps 增加到 108 Mbps 以上,甚至超过 500 Mbps。

e) IEEE 802.11o 被保留而不被采用。

f) IEEE 802.11p 是针对汽车无线通信的特殊环境 (wireless access for the vehicular environment, WAVE) 而出炉的标准,工作于 5.9 GHz 频段,目前还只是一项对 IEEE 802.11 的

修订草案,以支持智能交通系统 (intelligent transportation systems, ITS) 的应用。

g) IEEE 802.11q 由于会与 IEEE 802.1Q 虚拟局域网中继 (VLAN trunking) 混淆,被保留而不被采用。

h) IEEE 802.11r 致力于进行快速切换 (fast BSS transition, FBT) 的研究,目的是为了研究实现支持时延敏感业务的快速切换技术^[6]。

i) IEEE 802.11s 是一个 IEEE 802.11 无线网状网 (wireless Mesh network, WMN) 的修订草案。它建立在现有的 IEEE 802.11a/b/g 和 IEEE 802.11i 的基础上,同时具有自动发现、自动配置和自愈的功能。

j) IEEE 802.11T 定义了测试 IEEE 802.11 WLAN 的量和方法和方法。

k) IEEE 802.11u 增加了一些特性,以提高 WLAN 与其他网络 (如 GSM、Edge、EV-DO 等) 的交互性。

l) IEEE 802.11v 是无线网络管理标准。

m) IEEE 802.11w 受保护的管理帧的标准,致力于改进 IEEE 802.11 的 MAC 层以增加管理帧的安全性。

n) IEEE 802.11x 常常被用于表示 IEEE 802.11 系列标准,而且 IEEE 802.11x 容易与基于端口的网络接入控制标准 IEEE 802.1x 混淆,因此被保留而不被采用。

o) IEEE 802.11y 致力于使大功率的 WLAN 设备能够在美国的 3 650 ~ 3 700 MHz 频段工作,这个频段中已经存在多种无线设备。

p) IEEE 802.11z 致力于直接链接设置 (direct link setup, DLS) 的研究。

3 几种常见的 IEEE 802.11 标准

3.1 IEEE 802.11—1997^[7]

IEEE 802.11—1997 是最初的 IEEE 802.11 标准,工作于 2.400 0 ~ 2.483 5 GHz 的 ISM 频段。它主要用于解决办公室局域网和校园网中用户与用户终端的无线接入,业务主要限于数据访问,最高传输速率根据调制方式的不同分为 1、2 Mbps。在 IEEE 802.11—1997 中,物理层主要定义了红外线 (infrared, IR)、直接序列扩频 (direct sequence spread spectrum, DSSS) 和跳频扩频 (frequency hopping spread spectrum, FHSS) 三种传输技术;MAC 层主要引入了带冲突避免的载波侦听多址接入 (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) 协议和请求发送/允许发送 (ready to send/clear to send, RTS/CTS) 协议等。这些技术和协议是后续标准的基础,尤其是 DSSS、CSMA/CA 和 RTS/CTS。

3.1.1 物理层

IEEE 802.11—1997 物理层采用 IR、DSSS 或 FHSS 技术。最高传输速率根据调制方式的不同分为 1 和 2 Mbps 两种。

1) IR PHY 采用接近可见光的 850 ~ 950 nm 信号。它无须对准,依靠反射和直视红外能量进行通信。红外辐射不能穿透墙壁,穿过窗户时也有显著衰减。这种特性使 IR PHY 仅限于单个物理房间中。使用 IR PHY 的多个不同局域网可在仅有一墙之隔的相邻房间中毫无干扰地工作,且不存在被窃听的可能。IR 传输一般采用基带传输方案,主要是脉冲调制方式。

IR PHY 定义了两种调制方式和数据速率:基本接入速率和增强接入速率。基本接入速率是基于 1 Mbps 的 16-PPM 调制;增强接入速率是基于 2 Mbps 的 4-PPM 调制。

2) DSSS PHY 把要传送的信息直接由高码速的扩频码序列编码后,对载波进行伪随机的相位调制,以扩展信号的频谱。而在接收端,用相同的扩频码序列去进行解扩,把展宽的扩频信号还原成原始信息。在扩频传输中用得最多的扩频码序列是伪噪声码序列,它具有伪随机的特点。DSSS PHY 采用差分二进制移相键控(DBPSK)和差分四进制移相键控(DQPSK)来分别提供 1 和 2 Mbps 的数据速率。

3) FHSS PHY 它是用伪随机码序列去进行频移键控调制,使载波工作的中心频率不断地、随机地跳跃改变,而干扰信号的中心频率却不会改变。只要收、发信机之间按照固定的数字算法产生相同的伪随机码,就可以把调频信号还原成原始信息。FHSS PHY 也有 1 和 2 Mbps 两种速率。前者采用二值的高斯频移键控(2-GFSK),后者采用四相高斯频移键控(4-GFSK)。

3.1.2 MAC 层

IEEE 802.11 无线媒体访问协议称为基于分布方式的无线媒体访问控制协议(distributed function wireless MAC, DFW-MAC),它支持自组织结构(Ad hoc)和基础结构(infrastructure)两种类型的 WLAN。它有两种方式,即分布协调功能(distributed coordination function, DCF)和点协调功能(point coordination function, PCF)。

DCF 是 IEEE 802.11 最基本的媒体访问方法,其核心是 CSMA/CA。它包括载波检测机制、帧间隔和随机退避规程。DCF 在所有站点(station, STA)上都进行实现,用于 Ad hoc 和 infrastructure 网络结构中,提供争用服务。DCF 有两种工作方式:a)基本工作方式,即 CSMA/CA 方式;b)RTS/CTS 方式。CSMA/CA 是基础,RTS/CTS 只是 CSMA/CA 之上的可选机制。

RTS/CTS 是一种握手协议,它实际上属于一种 CA 协议,主要用来解决隐藏终端的问题。隐藏终端位于准备接收的站点范围之内,但在发送站点的范围之外。如图 3 所示,站 A 正在向站 B 发送,站 C 不能听到 A 的发送,这时,C 侦听信道,错误地认为信道空闲,如果 C 发送,将干扰 B 的接收,对 A 来说,C 就是隐藏终端。在 RTS/CTS 协议中,如果站 A 向站 B 发送数据,则首先 A 向 B 发送 RTS 信号,表明 A 要向 B 发送若干数据,B 收到 RTS 后,向自己范围内的所有站点发出 CTS 信号,表明已准备就绪,A 可以发送,其余基站暂时按兵不动;然后,A 向 B 发送数据;最后,B 接收完数据即向范围内的所有站点广播 ACK 确认帧,这样,所有基站又可以重新平等侦听、竞争信道了。由于 RTS/CTS 需要占用网络资源而增加了额外的网络负担,一般只是在传送大数据帧时采用(重传大数据帧会耗费更多网络资源)。

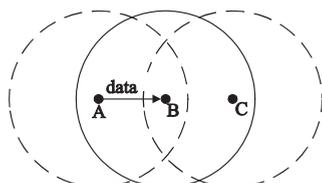


图3 站C是站A的隐藏终端

PCF 是可选的媒体访问方法,用于 infrastructure 网络结构中。它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。对于时间敏感的业务,如分组语音,就应使用提供无争用服务的点协调功能 PCF。

3.2 IEEE 802.11a^[8]

IEEE 802.11a 采用了与原始标准 IEEE 802.11 基本相同的核心协议,不过它的工作频率为 5 GHz,且 PHY 层采用的是正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术。这是一种多载波的高速扩频传输技术,其核心是将信道分成 52 个正交子信道,在每个子信道上用一个子载波进行窄带调制和传输,这样减少了子信道之间的相互干扰。每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽,因此每个子信道上的频率选择性衰落是平坦的,大大消除了符号间干扰。另外,由于在 OFDM 系统中各个子信道的载波相互正交,它们的频谱相互重叠,这样不但减小了子载波间的相互干扰,同时又提高了频谱利用率。

IEEE 802.11a 的调制方式有 BPSK、QPSK、16-QAM 和 64-QAM,还采用了编码率为 1/2、2/3、3/4 的卷积编码来实现前向纠错,最大数据速率为 54 Mbps,实际的净吞吐量在 20 Mbps 左右。数据速率可根据需要降为 48、36、24、18、12、9 或 6 Mbps。各速率下对应的调制参数如表 1 所示。

表1 取决于速率的调制参数

速率/ Mbps	调制 方式	编码率	每个子载波 的编码比特	每个OFDM符号 的编码比特	每个OFDM符号 的数据比特
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

采用 5 GHz 的频带让 IEEE 802.11a 受到的干扰更小。然而,高载波频率也带来了一些负面效果:IEEE 802.11a 的有效覆盖范围比 IEEE 802.11b 略微小一些;IEEE 802.11a 的穿透力不如 IEEE 802.11b,因为它更容易被路径上的墙壁或其他固体吸收。另一方面,在复杂的多径环境下(如室内办公室),OFDM 还是有其基础性优点的。并且更高的频率能够满足制作更小天线的需要,以此获得更高的射频系统增益来抵消高频段带来的缺点。由于处于不同的频段,IEEE 802.11a 不能与 IEEE 802.11b 进行互操作,除非使用了对两种标准都适用的设备。

IEEE 802.11a 产品于 2001 年开始销售,比 IEEE 802.11b 的产品还要晚,这是因为产品中 5 GHz 的组件研制太慢。由于相对便宜的 IEEE 802.11b 已经被广泛采用,IEEE 802.11a 没有被广泛采用,再加上 IEEE 802.11a 的一些弱点和一些地方的规定限制,使得它的使用范围更窄了。随着与 IEEE 802.11b 后向兼容的 IEEE 802.11g 产品的出现,IEEE 802.11a 产品的带宽优势也被削弱了。IEEE 802.11a 设备厂商为了应对这样的市场匮乏,对技术进行了改进,现在的 IEEE 802.11a 设备技术已经与 IEEE 802.11b 在很多特性上都很相近了。虽然 IEEE 802.11a 设备初期成本较高,但它还是被认为对要求大容量、高可靠性的企业级应用非常重要。

3.3 IEEE 802.11b^[9]

IEEE 802.11b 也工作在 2.4 GHz 频段。它最大的贡献就是在 IEEE 802.11 的 PHY 层基础上增加了 5.5 和 11 Mbps 两个新的高速接入速率。为了达到这两个速率,IEEE 802.11b 采用了补码键控(complementary code keying, CCK)。CCK 是以互补码为基础的一种 DSSS 方式。互补码有良好的自相关性,利用这种特性,信号的带宽可以获得扩频处理增益。IEEE 802.11b 还有两种数据速率和调制方式:基本接入速率是基于 1 Mbps 的 DBPSK 调制,扩展速率是基于 2 Mbps 的 DQPSK 调制,与 IEEE 802.11 DSSS 系统是兼容的。自适应速率选择机制确保当站点之间距离过长或干扰太大、信噪比低于某个门限时,传输速率能够从 11 自动降到 5.5 Mbps,或者根据 DSSS 技术调整到 2 和 1 Mbps。它支持的范围在室外为 300 m,在办公环境中最长为 100 m。除了以上三种调制方式之外,IEEE 802.11b 还为潜在的增强性能提供了一个可选的分组二进制卷积码(packet binary convolutional coding, PBCC)。

IEEE 802.11b 的产品早在 2000 年初就登陆市场。2.4 GHz 的 ISM 频段为世界上绝大多数国家通用,因此,IEEE 802.11b 得到了广泛的应用。Wi-Fi 联盟,当时叫做无线以太网联盟(Wireless Ethernet Compatibility Alliance, WECA),为了给 IEEE 802.11b 取一个更能让人记住的名字,便雇用了著名的商标公司 Interbrand,创造出了 Wi-Fi 这个名字。其创意灵感来自于大众耳熟能详的 Hi-Fi(high fidelity),运用 Wi-Fi 则可以从文字上展现无线保真(wireless fidelity)的效果。但实际上,Wi-Fi 仅仅是一个商标名称而已,并没有任何含义。如今,随着 IEEE 802.11 系列标准的出台,并逐渐成为世界上最热门的 WLAN 标准的时候,Wi-Fi 已经不单只代表 IEEE 802.11b 这一种标准,而被人们广泛用于代表整个 IEEE 802.11 系列标准。

3.4 IEEE 802.11g

IEEE 802.11g 也工作在 2.4 GHz 频段。由于运用了 OFDM 调制技术,IEEE 802.11g 也可以实现 6、9、12、18、24、36、48 和 54 Mbps 的传输速率。如果采用 DSSS、CCK 或可选 PBCC 调制方式,IEEE 802.11a 也可以实现 1、2、5.5 和 11 Mbps 的传输速率。由于它仍然工作在 2.4 GHz 频段,并且保留了 IEEE 802.11b 所采用的 CCK 技术,可与 IEEE 802.11b 的产品保持兼容。高速率和兼容性是它的两大特点。

IEEE 802.11 的物理帧结构分为前导信号(preamble)、信头(header)和负载(payload)^[10]。根据对帧的不同部分所采用的调制方式不同,IEEE 802.11g 规定了调制方式的可选项与必选项^[11]:

a) 采用 OFDM 调制方式为必选项,分别对 preamble、header、payload 进行 OFDM 调制,以保证其优越的性能,这种帧结构的调制方式也称为 OFDM/OFDM 方式。OFDM 方式下的 IEEE 802.11g 设备不能与 IEEE 802.11b 设备兼容,但可以共存,不过它需使用一种保护机制来解决冲突问题。为了让 OFDM 方式下的 IEEE 802.11g 设备与 IEEE 802.11b 设备不发生冲突,保护机制采用了 RTS/CTS 机制,其原因类似于隐藏终端的问题。当使用保护机制时,欲发送 OFDM 数据的 IEEE 802.11g 站点,都要向 AP 发送使用 CCK 调制的 RTS 帧,AP 收到 RTS 后向整个网络广播 CCK 方式的 CTS,以通知其余站点在此期间处于退避状态,欲发送数据的站点收到 CTS 后就开

始发送 OFDM 数据,这样就避免了因 IEEE 802.11b 站点错误地将 OFDM 信号视为噪声而争用信道所产生的冲突问题。

b) 采用 CCK 调制方式作为必选项,分别对 preamble、header、payload 进行 CCK 调制,保障与 IEEE 802.11b 后向兼容,这种帧结构的调制方式也称为 CCK/CCK 方式。

c) 采用 CCK/OFDM 的混合调制方式为可选项,preamble 和 header 用 CCK 调制方式传输,而 payload 用 OFDM 技术传送,也可以保障与 IEEE 802.11b 的兼容。但由于 preamble 和 header 使用 CCK 调制,增大了开销,网络吞吐量比 OFDM/OFDM 方式有所下降。

d) 采用 CCK/PBCC 的混合调制方式为可选项,preamble 和 header 用 CCK 调制,而 payload 用 PBCC 调制。PBCC 技术与 IEEE 802.11b 兼容。采用 CCK/PBCC,IEEE 可以工作于较高速率上并与 IEEE 802.11b 兼容,最高数据传输速率是 33 Mbps,比 OFDM 或 CCK/OFDM 的传送速率低。

IEEE 802.11g 的帧结构调制方式与速率以及兼容性的关系如表 2 所示。

表2 IEEE 802.11g的帧结构调制方式与速率以及兼容性

帧结构调制方式	载波方式	可选或必选项	支持的传输速率/Mbps	是否与IEEE 802.11b兼容
OFDM	多载波	必选	6、9、12、18、24、36、48、54	不可以(但可共存)
CCK	单载波	必选	5.5、11	可以
CCK/OFDM	多载波	可选	6、9、12、18、24、36、48、54	可以
CCK/PBCC	单载波	可选	5.5、11、22、33	可以

IEEE 802.11g 在相同的 2.4 GHz 频段采用了与 IEEE 802.11b 相同的调制技术 CCK,因此,IEEE 802.11g 设备在采用 CCK 调制时与 802.11b 设备具有相同的距离范围。IEEE 802.11g 虽然也采用了与 IEEE 802.11a 相同的调制技术 OFDM,但由于 IEEE 802.11a 设备是工作在更高的 5 GHz 频段,在传输时较之 IEEE 802.11g 设备在采用 OFDM 调制时有更多的信号损耗,也就是说当 IEEE 802.11g 设备采用 OFDM 调制时有比 IEEE 802.11a 设备更远的距离范围。

IEEE 802.11g 还处于草案阶段的时候就已经有厂商开始生产其产品了。早在 2003 年初,市面上就已经有 IEEE 802.11g 产品出售了。紧接着,越来越多的兼容性 WLAN 设备陆续被推出,IEEE 802.11a/b/g 的双频三模网络设备已经很普遍了。

3.5 IEEE 802.11n

IEEE 802.11n 标准还没有得到正式批准,目前还在修订中,不过已经有多个版本的草案出台。在 2008 年 5 月,IEEE 802.11n 的草案 4.0 版本获得通过。IEEE 802.11n 采用了多种先进技术。在物理层,综合采用了 OFDM 调制和多人多出(multiple input multiple output, MIMO)等先进技术并加以融合,使传输速率可以达到 108 Mbps,甚至高于 500 Mbps;智能天线技术使无线网络的传输距离大大增加;独特的双频带工作模式(包含 2.4 和 5 GHz 两个工作频段)保障了与以往 IEEE 802.11a/b/g 等标准的兼容。在 MAC 层,进一步优化了数据帧结构,提高了网络吞吐量。

OFDM 技术已经在 IEEE 802.11a 中有所介绍,这里不再赘述。MIMO 指的就是无线通信链路的发端和收端都使用多副天线。MIMO 系统的特点是将多径效应变为有利因素。它有效地使用随机衰落及多径时延扩展,在不增加频谱资源和天

