

► 21世纪通信网络技术丛书

App
li
cation

网络通信与工程应用系列

无线 Mesh 网络应用技术

柴远波 郑晶晶 主编

李伟 刘盛 刘超 王鸿运 副主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
网络通信与工程应用系列

无线 Mesh 网络应用技术

柴远波 郑晶晶 主编

李伟 刘盛 刘超 王鸿运 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述了无线 Mesh 网络的技术及主要应用。书中既包含基本概念的介绍,又包括一些前沿技术的介绍,分以下几部分:无线 Mesh 网络概述、无线 Mesh 网络协议栈和网络架构、无线 Mesh 网络的媒体接入控制、无线 Mesh 网络的信道分配策略、无线 Mesh 网络路由协议、无线 Mesh 网络路由测度、无线 Mesh 网络的应用、无线 Mesh 网络的安全问题。

本书既可以作为学习无线 Mesh 网络的入门书籍,也可以作为本科生的选修课程教材,还可以作为学术硕士或专业硕士的课程教材,或作为设计课程的辅助参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无线Mesh网络应用技术 / 柴远波, 郑晶晶主编. —北京:电子工业出版社, 2015.1

(21世纪通信网络技术丛书. 网络通信与工程应用系列)

ISBN 978-7-121-25477-2

I. ①无… II. ①柴… ②郑… III. ①无线网 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第024699号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 张 京

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 14.5 字数: 371.2 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

印 次: 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言



无线 Mesh 网络（Wireless Mesh Network, WMN）也称为无线网状网或无线多跳网，是一种新型的无线网络架构，是无线终端接入 Internet 的一种非常具有竞争力的解决方案。无线 Mesh 网络和 GSM 蜂窝网络、WLAN 一样，都是一种网络的组织形式，但又与有控制中心的网络系统有着明显的区别。从 1960 年到 1970 年期间，传统的有线网络得到了飞速的发展，有线网络中的 Internet 网络取得了巨大的成果并得到了较为广泛的应用。同样，无线 Mesh 网络以其本身的一些巨大优势有望成为未来无线网络的发展方向。目前，无线 Mesh 网络技术已经受到越来越多的科研院校和行业研究者的关注。

本书主要讲述了无线 Mesh 网络的技术及主要应用。书中既包含基本概念的介绍，又包括一些前沿技术的介绍。其宗旨是通过本书的学习，使读者能够理解什么是无线 Mesh 网络，并能懂得它与其他无线网络的区别、网络的定义、结构和组成、网络的协议及主要应用等基本内容，也能了解无线 Mesh 网络面临的安全威胁及未来无线 Mesh 网络的发展方向。

本书共 8 章，其中第 1 章主要介绍无线 Mesh 网络的起源、与其他网络的区别，以及标准化进程。第 2 章主要介绍无线 Mesh 网络的协议栈和网络结构。第 3 章主要介绍无线 Mesh 网络的媒体接入控制方法，其中介绍 802.11 的 MAC 层接入机制及无线 Mesh 网络中的单信道和多信道媒体接入控制方法。第 4 章主要介绍多信道环境下无线 Mesh 网络的信道分配策略和无线 Mesh 网络的跨层设计的思想。第 5 章主要介绍网络中的路由协议。第 6 章主要介绍无线 Mesh 网络的路由协议中路由度量值的设计方法。第 7 章主要介绍无线 Mesh 网络的主要应用。第 8 章介绍目前无线 Mesh 网络面临的安全威胁及解决方案。

本书由黄河科技学院无线与移动通信创新团队成员编写。本书由柴远波和郑晶晶主编，李伟负责编写第 1、2 章；郑晶晶负责编写第 3、4 章；刘超负责编写第 5、

6 章；王鸿运负责编写第 7、8 章。郭晓伟、汤亚广三名 2011 级通信班的学生负责本书的文字编辑工作。

本书既可以作为学习无线 Mesh 网络的入门书籍，也可以作为本科生的选修课程教材，还可以作为学术硕士或专业硕士的课程教材，或作为设计课程的辅助参考书。

本书在编写过程中参考了有关作者的文献，引用了无线 Mesh 网络在不同环境下应用的一些技术资料，并得到了黄河科技学院师生的热情支持，在此一并表示感谢。

由于时间的关系，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录



第 1 章 无线 Mesh 网络概述	1
1.1 无线 Mesh 网络的起源	1
1.2 移动 Ad hoc 网络向无线 Mesh 网络的演进	4
1.3 无线 Mesh 网络的定义	9
1.4 未来网络中 Mesh 网的地位	9
1.5 Mesh 的形式	10
1.5.1 自组织纯粹 Mesh 网络	11
1.5.2 接入 Mesh 网	13
1.6 无线 Mesh 网络的特点	14
1.7 Mesh 与其他网络的对比	15
1.7.1 与传统的无线局域网 (WLAN) 相比	15
1.7.2 无线 Mesh 网络与蜂窝网络的主要区别	17
1.7.3 无线 Mesh 网络与移动 Ad hoc 网的主要区别	17
1.8 标准化进程	18
1.8.1 IEEE 802.11s Mesh 网络	18
1.8.2 IEEE 802.15 Mesh 网络	23
1.8.3 IEEE 802.16 Mesh 网络	26
小结	31
参考文献	31
第 2 章 无线 Mesh 网络协议栈和网络架构	33
2.1 概述	33
2.2 分层通信协议	34
2.2.1 应用层	34
2.2.2 传输层	36

2.2.3	路由层	38
2.2.4	MAC 层	40
2.2.5	物理层	41
2.3	无线 Mesh 网络结构	42
2.3.1	无线骨干型 Mesh 网络结构	42
2.3.2	客户端型 Mesh 网络结构	44
2.3.3	混合型 Mesh 网络结构	44
2.4	IEEE 802.11s 无线 Mesh 网络及其组网技术	45
2.4.1	IEEE 802.11s 无线 Mesh 网络	45
2.4.2	IEEE 802.11s Mesh 组网技术	46
2.5	IEEE 802.16 无线 Mesh 网络及其组网技术	48
2.5.1	IEEE 802.16 无线 Mesh 网络	48
2.5.2	IEEE 802.16 WiMAX 的 Mesh 组网技术	48
2.5.3	IEEE 802.16 Mesh 组网技术	49
2.6	IEEE 802.11s 和 IEEE 802.16 无线 Mesh 网络的区别	50
	小结	52
	参考文献	52
第 3 章	无线 Mesh 网络的媒体接入控制	54
3.1	WMN 网络中的物理层/MAC 层属性	54
3.2	发射功率控制	57
3.2.1	功率控制的研究背景	57
3.2.2	功率控制的意义和作用	58
3.2.3	功率控制技术分类	59
3.2.4	网络层功率控制机制	59
3.2.5	链路层功率控制机制	59
3.2.6	混合功率控制机制	61
3.3	802.11b/a/g MAC 协议	61
3.3.1	IEEE 802.11s 协议	62
3.3.2	基于 802.11 的 WLAN MAC 协议	63
3.4	IEEE 802.11 MAC 层接入机制概述	66
3.4.1	DCF 接入机制	66
3.4.2	PCF 接入机制	71
3.5	802.11 DCF 接入机制的缺陷	74
3.6	单信道 MAC 协议	74
3.7	多信道 MAC 协议	77

3.7.1	多信道 MAC 协议分配方案	79
3.7.2	多信道 MAC 协议接入方式	80
3.7.3	单接口多信道协议分析	81
3.7.4	多接口多信道协议分析	83
小结		86
参考文献		87
第 4 章	无线 Mesh 网络的信道分配策略	90
4.1	概述	90
4.2	蜂窝网络与 WMN 中的信道分配策略之比较	92
4.3	连接图	94
4.4	冲突图	95
4.5	多射频冲突图	96
4.6	信道分配中的限制与面临的挑战	96
4.7	多信道关键问题	98
4.7.1	多信道隐藏终端问题	98
4.7.2	多信道广播问题	99
4.7.3	多信道网络模型和网络拓扑分析	102
4.8	无线 Mesh 网络信道分配算法	103
4.8.1	信道分配的限制和挑战	103
4.8.2	信道分配算法的分类	104
4.9	跨层设计原理	112
4.9.1	开放式系统互联模型	113
4.9.2	跨层设计对各层的要求	114
4.9.3	WMN 跨层设计原则与方法	116
小结		118
参考文献		118
第 5 章	无线 Mesh 网络路由协议	120
5.1	无线自组织网络相关路由协议简介	120
5.1.1	先验式路由协议	123
5.1.2	反应式路由协议	125
5.1.3	混合式路由协议	130
5.1.4	基于地理位置路由协议	132
5.2	按需距离矢量路由协议 AODV	133
5.2.1	关键问题	134
5.2.2	算法描述	135

5.3 无线 Mesh 网络路由技术	138
5.3.1 无线网络的特点	138
5.3.2 无线 Mesh 网络路由协议设计要点	139
5.3.3 无线 Mesh 网络路由协议的衡量指标	140
5.3.4 无线 Mesh 网络路由协议的分类	141
5.4 HWMP 路由协议简介	144
5.4.1 HWMP 路由的运行	145
5.4.2 HWMP 路由的性能分析	146
5.5 多射频链路质量源路由协议	147
5.6 机会路由	148
5.6.1 机会路由的基本概念	148
5.6.2 机会路由的研究现状	149
5.6.3 机会路由影响因素及其面临的挑战	153
小结	155
参考文献	156
第 6 章 无线 Mesh 网络路由测度	159
6.1 概述	159
6.2 无线 Mesh 网络中的路由测度	161
6.3 改进预期传输次数测度	167
6.4 有效传输数量测度	168
6.5 路由测度的最新发展	170
小结	172
参考文献	173
第 7 章 无线 Mesh 网络的应用	175
7.1 国内外研究与发展现状	176
7.2 无线 Mesh 网络的应用领域	176
7.3 用户侧 Mesh 网络的应用	179
7.3.1 多跳蜂窝网络	179
7.3.2 网络社区	182
7.3.3 办公室或大学室内网络	184
7.4 网络侧或回程网的应用	184
7.5 联合用户和网络侧的 Mesh 网应用	185
7.5.1 车辆自组织网络 (VANET) 的概念	185
7.5.2 基于 VANET 的智能化管理	186
7.5.3 车辆自组织网络 (VANET) 应用示例	189

7.6 无线传感器网络	192
7.6.1 无线传感器网络的特点	192
7.6.2 应用范围	193
7.6.3 无线传感器网络应用示例	193
7.7 无线城市	197
7.8 无线 Mesh 网络未来应用展望	199
小结	200
参考文献	201
第 8 章 无线 Mesh 网络的安全问题	203
8.1 概述	203
8.2 无线 Mesh 网络的安全目标及面临的挑战	204
8.2.1 无线 Mesh 网络的安全目标	204
8.2.2 面临的特殊安全挑战	206
8.3 安全问题及当前的应对措施	206
8.3.1 WMN 面临的主要安全问题	206
8.3.2 无线 Mesh 网络特有的认证机制	209
8.3.3 安全的媒体访问控制	211
8.3.4 对 DoS 攻击的防御	212
8.3.5 嵌入式安全方案与系统级监控	214
8.3.6 集成问题	214
8.4 信任关系	214
8.4.1 无线 Mesh 网络域信任管理模型	215
8.4.2 信誉模型分析	216
小结	218
参考文献	218

| 第 1 章

无线 Mesh 网络概述



无线 Mesh 网也称无线网状网 (Wireless Mesh Networks, WMN), 是一种新型的宽带无线网络, 具有不同于传统无线网络的特点, 在灵活组网、提高网络覆盖率、增加网络容量、减少前期投资等诸多方面都显现出较大的优势, 尤其适合在缺乏有线网络资源情况下实现宽带无线接入和覆盖。目前无线 Mesh 网已得到国际学术界和工业界的广泛关注, 正在得到越来越广泛的应用。

无线 Mesh 网络究竟是什么样的网络? 它的优势体现在哪些方面? 本章将详细地介绍无线 Mesh 网络的起源与演进过程, 无线 Mesh 网络在未来网络中的地位, 无线 Mesh 网络的工作形式、特点, 与现在一些主流的无线通信网络的主要区别及标准化进展, 使读者对无线 Mesh 网络有一个基本的了解, 为学习后续章节中的技术内容做好必要的准备。

1.1 无线 Mesh 网络的起源

无线 Mesh 网络的出现和发展与西方发达国家, 特别是美国, 在 20 世纪 80 年代 Internet 和无线局域网的兴起和应用直接相关。个人计算机的应用和 Internet 的出现, 使人们的信息交流和信息应用变得极其方便和容易, 极大地改变了人们的社会活动和生活状况, 促进了社会飞速发展和进步。但是, 已经有的城市建设布局和建筑物不可能为 Internet 的需要而任意更改和重建。建设布局不能改, 城市建筑不能破坏, 给 Internet 的覆盖和应用造成极大困难。因此, 无线通信和无线覆盖具有极好的应用前景。

早期及现在的通信系统的接入是靠线缆完成的。最下一级的机局到用户端都是通过模拟电缆实现通信的, 这简称“最后一公里”技术。后来, 人们对移动通信的需求越来越大, 模拟无线通信系统也相继投入使用。数据在交换局通过线缆传到基站发射塔发射, 用户直接接收, 是一点对多点的模式 (如图 1.1 所示), 这是无线通信系统的雏形。但是随着用户数量的剧增, 频谱资源严重缺乏, 为了解决供需的矛盾, 出现了空间资源的复用——数字蜂窝移动

通信系统，大大缓解了用户业务与系统资源之间的矛盾。在蜂窝移动技术成熟并大量普及后，才真正解决了移动通信的频谱资源缺乏和接入用户数不足等问题。但是从投资的角度看，蜂窝移动技术只适合人口密集、有永久用户业务的区域。对用户移动性较大、不适合建立大功率基站的应用场合，如对于军事通信中的战场临时通信需求，蜂窝网络就显得力不从心了。在这样的特殊环境下 Ad hoc 网络就应运而生了。

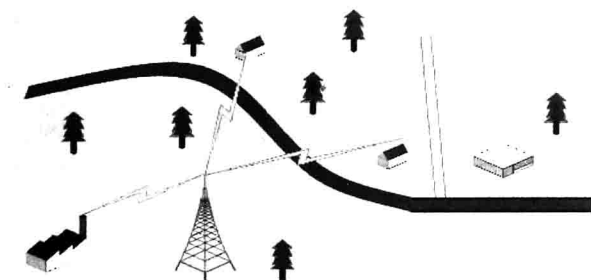


图 1.1 传统模拟通信系统

冷战时期，军用的移动通信技术很少在民用通信领域中使用。随着 20 世纪 80 年代冷战的结束，在军用技术解密后转向民用的“军转民”大潮流下，原来军用的 Ad hoc 网络系统也被慢慢转变为民用系统，民用移动通信继续得到长足的发展，令 80 年代后期军用移动通信技术和民用通信技术相互平行发展。近 20 年来，网络应用越来越普及，人们生活上已经不能离开移动通信。Ad hoc 网络技术在 21 世纪之初成为移动网络的新热点。整个无线网络行业为之疯狂，但是，过了几年的狂热期后，大家开始冷静下来，开始思考移动 Ad hoc 网络一些深层次的问题。例如，除了军事通信应用之外，在民用领域，它的真正价值在哪里？如何将这一投入无数人力与物力的技术应用到人们的日常生活领域？军事通信与民用通信的应用区别在哪里？移动 Ad hoc 网络技术能否直接应用于民用？与此同时，无线局域网（Wireless, Local Area Network WLAN, Wi-Fi）的发展已进入技术成熟期，它有效延伸了因特网的覆盖范围，赋予了用户一定的移动性。模拟无线 Mesh 网络架构如图 1.2 所示，一些没有取得移动通信网络运营牌照的运营商也期望通过布置热点地区接入点（Access Point, AP）将原本并没有用于商业网络的 WLAN 技术推向市场。但是，客观地说，WLAN 的商业化进程在很多地区并不成功。除商业运作和业务等原因之外，WLAN 在技术上的缺陷也是显而易见的。WLAN 无法做到像蜂窝网络一样无处不在的信号覆盖！

一般认为，移动 Ad hoc 网络由于其应用环境和技术成本等原因，不适合直接应用到民用通信领域，在通信网络中，最大的民用通信业务应该是包括 VoIP 业务在内的因特网业务。而民用通信用户的移动性行为远低于军事通信用户，所以为了能够实现无线通信中无处不在的（Ubiquitous）通信目标，需要基于移动 Ad hoc 网络的技术基础，开发出一种完全适用于民用通信的无线多跳网络技术，于是 WMN 技术就随着这一需求而出现了。

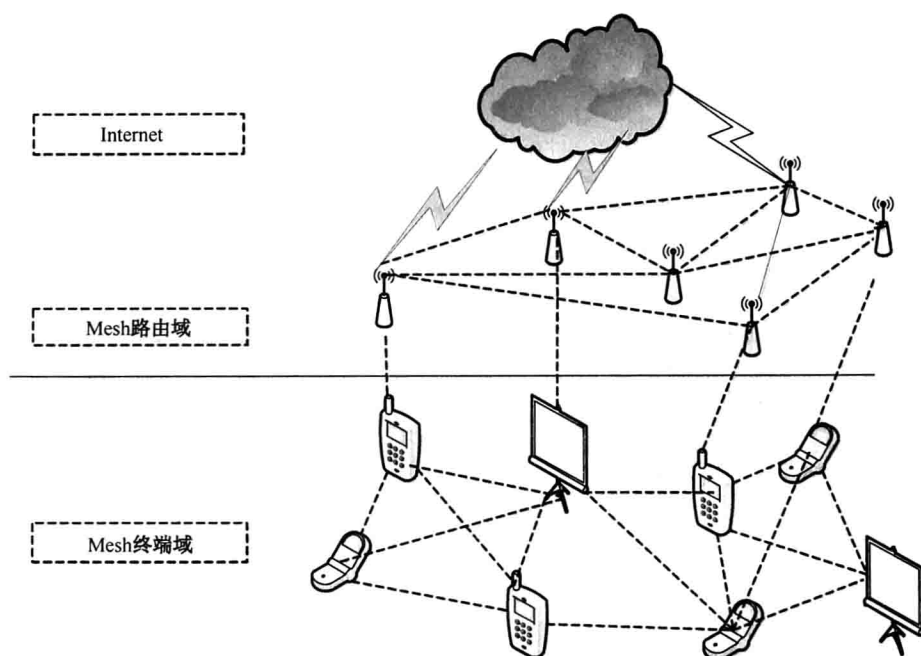


图 1.2 无线 Mesh 网络架构

2000 年年初，业界的几个重要事件引起了人们的特别关注，其中之一是美国 ITT 公司将其为美国军方研发的战术移动通信系统的一些专利技术转让给 Mesh Networks 公司，该公司借此开发了一系列具有自主知识产权的无线多跳网络民用产品——WMN 全套技术产品，并在市场上获得了极大的成功。与此同时，诺基亚、北电网络、Tropos、SkyPilot、Radiant Networks 和 Firetide 等多家公司开发的 WMN 产品相继问世。从此，WMN 进入了快速发展时期，同时也给移动 Ad hoc 网络本身的发展注入了新的活力。其间，摩托罗拉公司极为看好 Mesh Networks 公司的发展，于 2005 年成功地将其收于麾下。

WMN 本质上属于移动 Ad hoc 网络，其结构示意图如图 1.3 所示，它与后者的最大区别在于前者的用户终端相对来说移动性较低，WMN 一般不是作为一个独立的网络形态存在的，而是因特网核心网的无线延伸。通常会有有一个或多个网关节点（Gateway，也称为 Neighborhood Access Point，邻居接入点）与因特网高速相连，家庭或办公室等用户通过自身的无线接入点与网关节点相连。对于网关节点信号覆盖之外的区域，用户节点负责来往业务的中继或转发，从而实现大范围的廉价和快速信号覆盖。显然，这种方式的组网省去了网络建设初期昂贵的基础设施建设投资，与传统的点到多点方式的无线接入相比有很多优点。

由此可见，WMN 的出现并不是偶然的，也不是孤立的，现在 WMN 的热点问题中的 MAC 协议、路由协议、移动 TCP 等很多都是在 802.11 MAC 协议、移动 Ad hoc 网络的路由协议和传输控制协议等基础上发展起来的，并且仍在不断改进和完善之中。

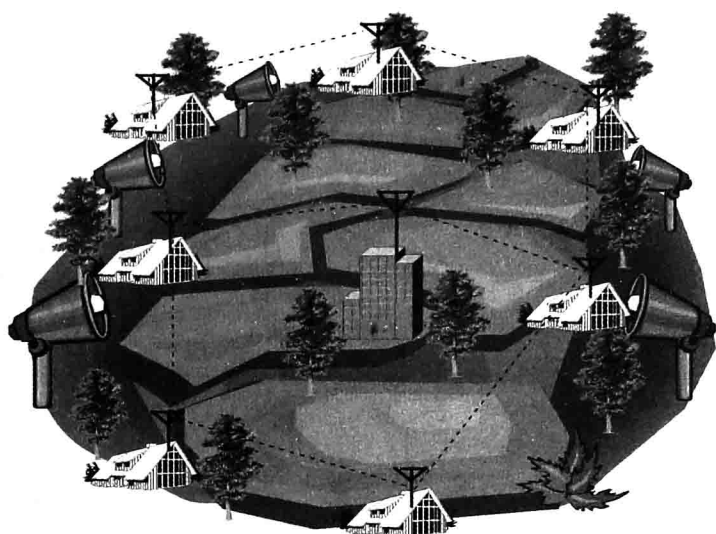


图 1.3 WMN 结构示意图

1.2 移动 Ad hoc 网络向无线 Mesh 网络的演进

如前所述，移动 Ad hoc 网络和 WMN 技术的发展始终与一些成熟的技术与标准（如 WLAN）紧密结合在一起，同时，又与 WiMAX 结合在一起，从而构成大规模的可伸缩性无线网络。一般认为，下一代无线网络（或 4G 无线网络）不再是一种全新的单一结构的网络技术，而是多种无线网络技术的融合，是一种多级网络形态。图 1.4 所示为无线网络向下一代网络演进示意图，图中左边为现有的网络技术形态。移动终端用户通过蜂窝通信网（如 GSM、GPRS、3G 等）的 BTS（基站收发器）接入 PSTN（公共电话交换网），再接入基于 IP 的分组核心网，或通过 WLAN 的无线 AP 直接接入基于 IP 的分组核心网。而图 1.4 右边为下一代无线网络形态，其中各种网络结构并存。在分层结构的底层可以有移动 Ad hoc 网络形式的无线传感器网络、简单的无线簇结构或星形结构网络、WLAN、移动终端等，再通过蜂窝接入网、其他宽带无线接入网、Ad hoc（或 Mesh）中继节点而构成第二级无线网络，最终接入第三级 IP 网络之中。

在具体实现形式上，下一代无线网络将会包含图 1.5 所示的各种技术或标准。如许可证频段的 3GPP 家族（WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 系统）及非许可证频段的 IEEE 802.11 和 IEEE 802.16 家族的技术与标准。其中，IEEE 802.20 跨越了许可证频段和 IEEE 802 标准两大家族。

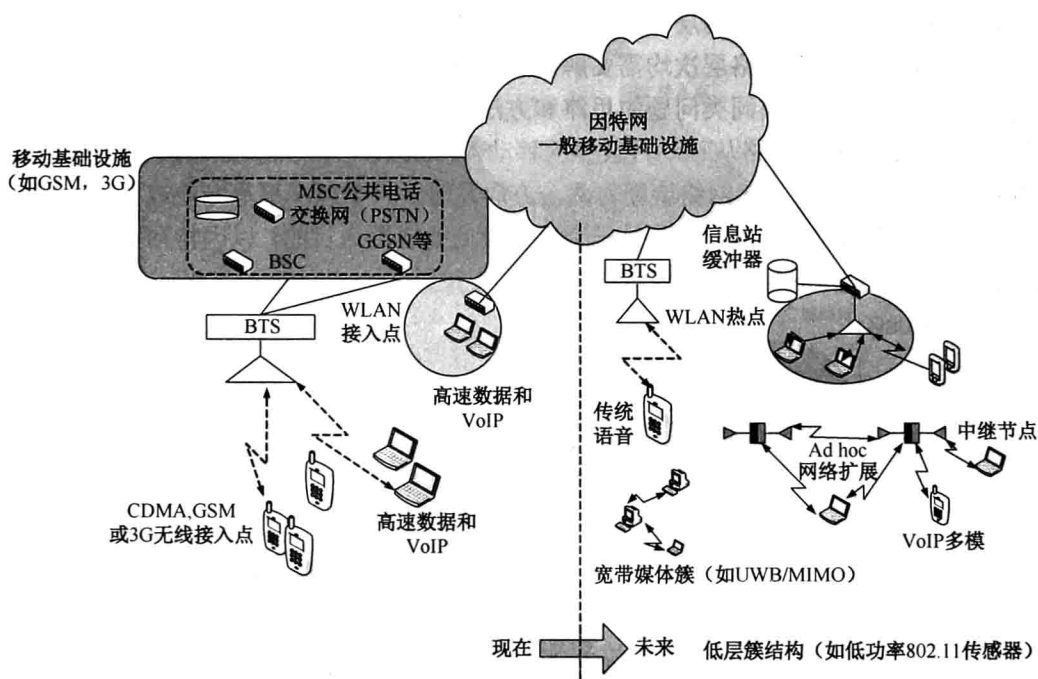


图 1.4 无线网络向下一代网络演进示意图

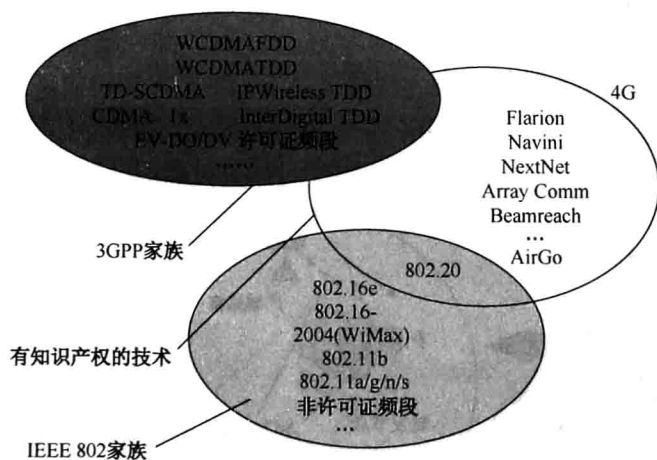


图 1.5 下一代无线网络技术标准

除了以上主流技术以外，下一代无线网络还包括一些非主流的具有自主知识产权的先进网络技术。虽然未来大统一的技术不可能出现，但从技术的发展趋势来看，各种无线通信与网络技术将互相渗透，逐渐走向融合，如图 1.6 所示。

从技术发展角度看，移动 Ad hoc 网络也经历了单级平面的专用移动 Ad hoc 网络，再演进为与其他网络技术融合的多级商用化无线网络形态。如图 1.7 和图 1.8 所示，不过，网络节点的移动性特征和职能开始分化，网络层次越高，节点的处理能力越强，功率越充

足，移动性越低；反之，网络层次越低，节点的处理能力越弱，节能问题越严重，移动性越强。所以，虽然各个网络层次均需要解决类似的多址接入、路由和传输控制问题，但为了提高网络的性能，解决同类问题的思路和方法有很大的差异。这也是理论和工程界将移动性较弱的无线 Mesh 网络从移动性较强的移动 Ad hoc 网络中分离出来的主要原因。从此，传统意义上的移动 Ad hoc 网络就朝着两个方向发展：一个以军事等专业或行业应用为背景，仍沿着传统的技术路线发展；另一个以普通商业应用为目的，以因特网业务为上要传输内容，沿着无线 Mesh 网络（WMN）的方向发展。

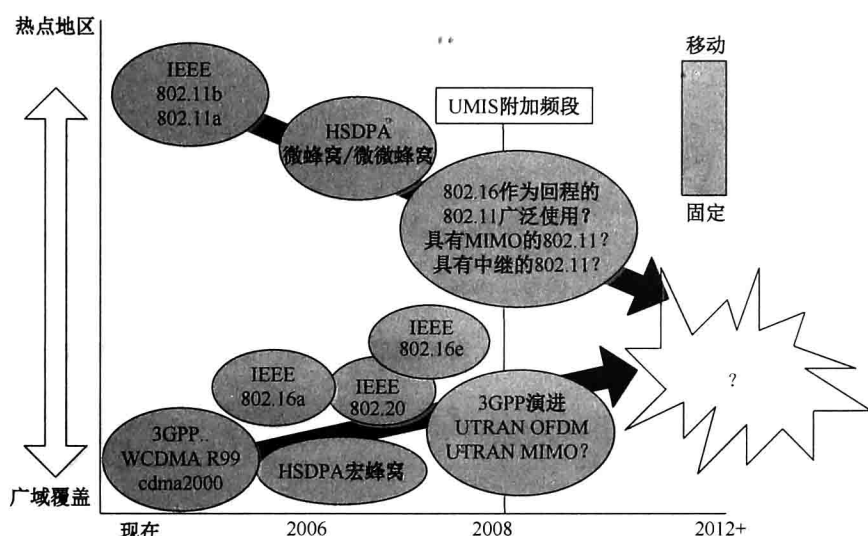


图 1.6 下一代无线通信网络技术的融合

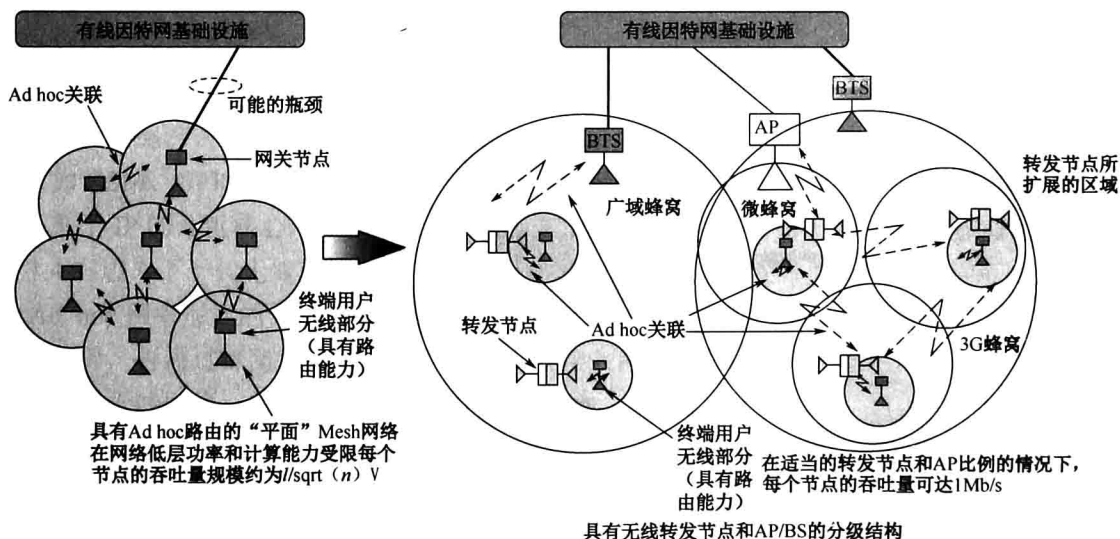


图 1.7 移动 Ad hoc 网络的演进

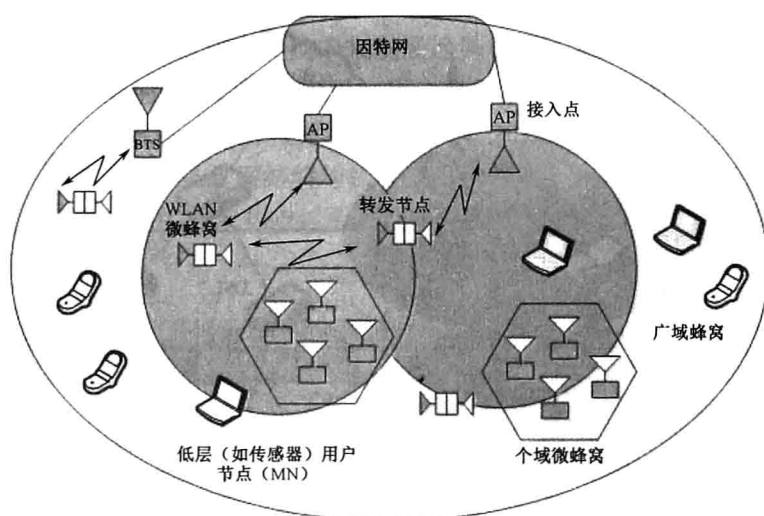


图 1.8 分级移动 Ad hoc 网络

实际上，目前实用化的移动 Ad hoc 网络技术承袭了很多 WLAN 标准中的技术，但 WLAN 本质上不是支持多跳网络的技术，所以现有的基于 WLAN 的移动 Ad hoc 网络需要对 802.11 协议和传统的 TCP/IP 协议族之类的技术标准作一系列改进，包括 MAC 层、网络层和传输控制层协议等。为此，IEEE IETF 最近专门成立了 802.11s 工作组，试图解决 802.11 a/b/g 等协议中不支持多跳网络环境等问题。

目前，无线多跳技术已得到广泛延伸，WMN 中的网关或网桥等设备使 WMN 与现有的蜂窝网、无线传感器网络、WLAN、WiMAX 和 WiMedia 等结合，使用户获得无处不在的网络连接。图 1.9 为期待中的 WiMAX 作为 Wi-Fi Mesh 拓扑回程的示意图。图中 Wi-Fi 为底层的 Mesh 网络，WiMAX 则负责更大范围的网络延伸与互联。图 1.10 为期待中的 WiMAX 作为 Mesh 拓扑内回程的示意图。在图中，对于 Mesh 拓扑连接，Wi-Fi 具有一系列优点，而 Mesh 拓扑之间的回程连接则由 WiMAX 提供。这样的网络连接具有较高的性价比。

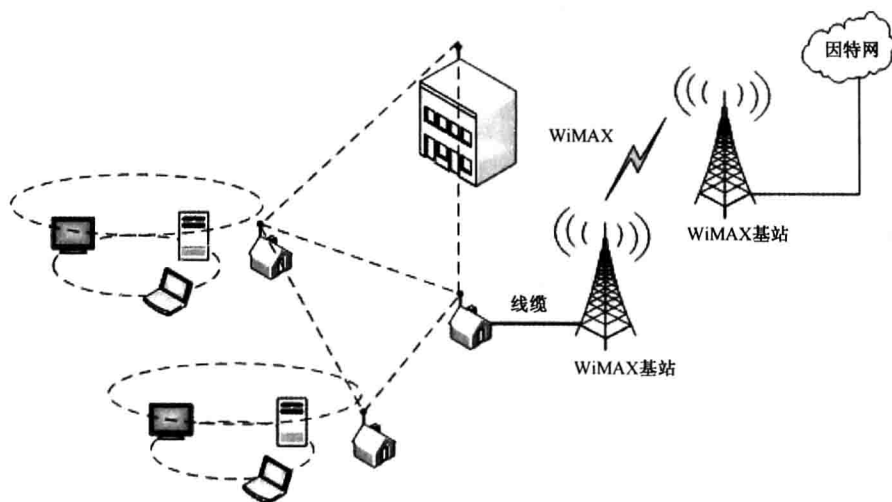


图 1.9 期待中的 WiMAX 作为 Wi-Fi Mesh 拓扑回程的示意图