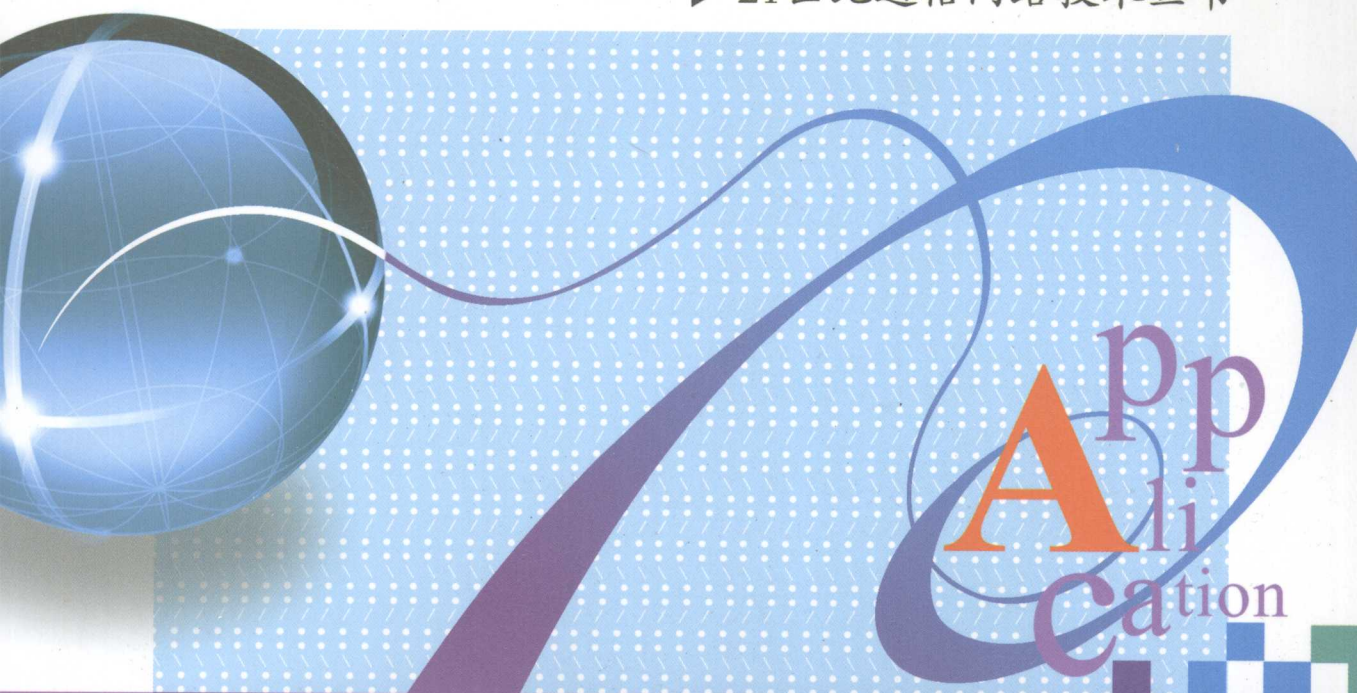


► 21世纪通信网络技术丛书



网络通信与工程应用系列

无线网状网： 架构、协议与标准

Wireless Mesh Networking:
Architectures, Protocols and Standards

[中] Yan Zhang [德] Jijun Luo [中] Honglin Hu 著

郭 达 张 勇 彭晓川 译



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



Auerbach Publications
Taylor & Francis Group

21 世纪通信网络技术丛书
——网络通信与工程应用系列

无线网状网：架构、协议与标准

Wireless Mesh Networking:
Architectures, Protocols and Standards

[中]Yan Zhang [德]Jijun Luo [中]Honglin Hu 著

郭 达 张 勇 彭晓川 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

近年来,无线网状网技术得到了长足的发展,随着标准化工作的推进,越来越多的无线网状网产品出现并投入商用。本书从架构、协议、标准3个方面介绍了无线网状网技术,阐述了无线网状网的开放性问题,研究了多种应用场景中的关键问题,此外还介绍了新出现的标准。本书从无线网状网的基本概念、协议、系统集成、性能分析技术、仿真、实验和未来发展方向等方面进行讨论,前后对照说明了路由、安全、频谱管理、MAC、跨层优化、负载均衡、多媒体通信、MIMO和智能天线等具体问题。

本书适合作为计算机、通信及电子工程专业的本科生、研究生及相关领域的研究人员的参考书。

Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards YAN ZHANG, JIJUN LOU and HONGLIN HU ISBN:0-8493-7399-9

Copyright©2007 by Auerbach

Authorized translation from the English language edition published by Auerbach, a division of Taylor & Francis Group LLC.; All rights reserved.

本书原版由Taylor & Francis Group出版集团旗下的Auerbach出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由电子工业出版社独家出版并限在中国大陆(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)发行与销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2007-3243

图书在版编目(CIP)数据

无线网状网:架构、协议与标准/[中]张彦,[德]罗济军,[中]胡宏林著;郭达,张勇,彭晓川译. —北京:电子工业出版社,2008.6

(21世纪通信网络技术丛书·网络通信与工程应用系列)

书名原文:Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards

ISBN 978-7-121-06881-2

I. 无… II. ①张…②罗…③胡…④郭…⑤张…⑥彭… III. 无线电通信—通信网 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第083427号

策划编辑:王春宁

责任编辑:宋兆武

印刷:北京市天竺颖华印刷厂

装订:三河市金马印装有限公司

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:787×1092 1/16 印张:24.25 字数:620千字

印次:2008年6月第1次印刷

印数:5000册 定价:59.00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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广的前沿通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术有了广阔的用武之地。正是固定电话网、移动通信网和因特网,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列: <移动通信前沿技术系列>、<3GPP LTE 新技术项目系列>和<网络通信与工程应用系列>。

<移动通信前沿技术系列>是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,如软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD-SCDMA;cdma2000 移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX, WiFi, ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;ad hoc 技术等。

<3GPP LTE 新技术项目系列>是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

<网络通信与工程应用系列>是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的,如无线网状网、WLAN、无线传感器网络、B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各研究院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员。

本套丛书从 2008 年上半年开始将陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信分社

译者序

以蜂窝移动网络技术为核心的移动通信发展到今天,无疑已经取得了巨大的成功。近年来,多跳无线网络渐渐浮现出来,从早期的 ad hoc 用于军事领域,到今天的无线网状网(Wireless Mesh Network, WMN)走向商用,无线网状网已成为人们关注的新技术。越来越多的厂商研发出无线网状网的产品,国际标准化组织也推出了无线网状网的标准,许多大学和科研机构积极参与无线网状网的研究工作。目前我国,已经有基于 Wi-Fi 的无线网状网投入民用,以网状网技术为核心的无线城市也在部署中。无线网状网具有自组织、自愈等特点,因此易于快速部署,可单独组网,也可与蜂窝网络协作组网。目前,以蜂窝技术为主导的国际标准化组织(如 3GPP 等)也在系统的演进中加入了网状网组网方式,以及多跳中继的方法,如 LTE 和 IMT Advanced。无线网状网技术是一种非常有潜力的技术,同时,无线网状网技术也存在着一些问题,很多方面还不成熟。目前,这个领域的研究相当活跃。

本书译自 CRCpress 出版的“Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards”分为 3 大部分,共 16 章。第一部分为架构部分,分为 3 章。第 1 章引出无线网状网,并介绍了多射频无线网状网;第 2 章讨论多射频多信道网状网;第 3 章讨论基于目前热门的 WLAN 技术——IEEE 802.11 的网状网技术。第二部分为协议部分,也是全书的主体部分,分为 8 章。第 4 章介绍无线网状网中的路由;第 5 章介绍网状网中的 MAC;第 6 章研究无线网状网的安全问题;第 7 章从容量和覆盖等多方面讨论无线网状网中的扩展性问题;第 8 章讨论网状网中的负载均衡;第 9 章介绍网状网中的跨层优化方法;第 10 章探讨在网状网中进行多媒体通信的要点;第 11 章介绍网状网中的多天线技术。第三部分研究网状网的标准化和支撑技术。第 12 章介绍基于 WLAN 的网状网标准化 802.11s 的相关内容;第 13 章介绍 WiMAX 中网状网模式的基本原理;第 14 章介绍网状网中的认知无线电和动态频谱管理;第 15 章对无线网状网进行案例研究,主要针对火灾应急的网状网使用场景,另外还进行了市场分析;第 16 章讨论公共安全和灾难救助场景中网状网的要求和相关问题。

本书由信息产业部级重点实验室北京邮电大学 PCN&CAD 中心组织翻译,译者从事无线网状网和移动通信的研究,具有丰富的理论基础和实践经验。其中,郭达负责第 1 章和第 10 章,张勇负责第 3 章、第 15 章和第 16 章,彭晓川负责第 7 章,罗伟负责第 8 章和第 9 章,彭海兰负责第 2 章和第 4 章,魏翼飞负责第 5 章和第 14 章,侯宾负责第 6 章,胡萍负责第 11 章,由磊负责第 13 章,蔡杰负责第 12 章的翻译。郭达和彭晓川负责全书的统稿和校对。

感谢北京邮电大学宋俊德教授、宋梅教授在本书翻译过程中给予的指导,感谢电子工业出版社宋梅编辑对本书翻译工作的支持,感谢郝懿同学和李晋同学的耐心帮助与支持。

由于时间仓促、译者水平有限,以及目前无线网状网技术的迅速发展中存在许多问题没有解决,书中难免有翻译疏漏甚至错误之处,恳请读者批评和指正。

郭达 张勇 彭晓川 等

E-mail: bjguoda@gmail.com bjzhangyong@gmail.com pengxiaochuan@gmail.com

作者简介

张彦 (Yan Zhang), 新加坡南洋理工大学电子工程学院博士。2004 年 8 月至 2006 年 5 月, 在新加坡国立信息与通信技术研究所 (National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 从事研究工作。从 2006 年 8 月开始, 参与挪威 Simula Research Laboratory (<http://www.simula.no/>) 的研究。

张 (Zhang) 博士是网络安全国际期刊的编辑, 目前也是《无线网络和移动通信》的编辑 (Auerbach 出版社, CRC 出版, Taylor & Francis 小组)。他还参与了以下书籍的编写:《无线网络和移动通信中的资源、移动性和安全管理》、《无线网状网: 架构、协议与标准》、《无线 PAN、LAN 和 MAN 中的毫米波技术》、《分布式天线系统: 未来无线通信的开放架构》、《无线网状网的安全》、《无线城域网 WiMAX 及其演进》、《无线 QoS: 技术, 标准与应用》、《宽带移动多媒体: 技术与应用》、《物体互联: 从 RFID 到下一代普遍网络系统》、《无线安全研究手册》。

作者还担任国际会议 IEEE PCAC'07 副主席; 国际会议 ITNG 2007 副主席, 方向为无线和移动网络中移动性和资源管理; 协办 PDCS 2006, 负责其中无线网状网方向的研究; 参加多个国际会议, 担任技术程序组成员, 包括 IEEE AINA 2007, IEEE CCNC 2007, WASA'06, IEEE GLOBECOM'2006, IEEE WoNGen'06, IEEE IWCMC 2006, IEEE IWCMC 2005, ITST 2006 和 ITST 2005。研究方向包括无线网络和移动计算中的资源、移动性、能源和安全管理。作者是 IEEE 和 IEEE ComSoc 会员。

E-mail: yanzhang@ieee.org

罗济军 (Jijun Luo), 1999 年在中国山东大学获工学硕士学位, 2000 年在德国慕尼黑科技大学获理学硕士学位。2000 年加入 Siemens, 并在德国亚琛工业大学攻读工学博士学位。迄今已经发表了 100 多篇科技论文, 合著了 3 本书, 拥有多项专利。其技术成果包括无线系统设计、无线协议、系统架构、无线资源管理、信号处理、编码和调制技术等方面的创新。该作者在国际学术和研究活动中表现活跃, 担任 IEEE Transactions on Vehicular Technology, IEEE Communications Magazine, IEEE Wireless Communications Magazine, EURASIP Journals, Frequenz 等学报杂志的审稿人, 还被推举为 IEEE 和欧洲研究组织举办的高等技术会议的分会主席和审稿人。目前领导欧洲研究项目, 在国际工业标准化组织中表现活跃。主要研究方向为传输技术、无线资源管理、软件无线电重配置和无线系统设计, 是 IEEE 会员。

E-mail: jesse.luo@ieee.org

胡宏林 (Honglin Hu), 2004 年 1 月在中国科技大学获通信与信息系统博士学位。2004 年 7 月至 2006 年 1 月, 在德国慕尼黑 Future Radio, Siemens AG Communications 工作。从 2006 年 1 月起, 就职于上海无线通信研究中心 (也称无线通信国际合作研究中心), 其间还在中科院上海微系统与信息技术研究所担任副教授。胡宏林博士的主要工作是国际标准化与其他合

作活动,是 IEEE、IEEE ComSoc 和 IEEE TCPC 会员。此外,还担任 IEEE WirelessCom 2005, IEEE ICC 2006, IEEE IWCMC 2006, IEEE ICC 2007, IEEE/ACM Q2SWinet 2006 等国际会议的技术程序委员会成员。从 2006 年 6 月开始,担任 John Wiley & Sons 无线通信和移动计算栏目的编辑。

E-mail: hlhu@ieee.org

张彦 (Yan Zhang), 新加坡南洋理工大学电子工程学院博士, 2004 年 8 月至 2006 年 2 月在新加坡国立信息通信技术研究所 (National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 从事研究工作。从 2006 年 8 月开始, 参与新加坡 Stimulus Research Laboratory (http://www.stimuluslab.com) 的研究。

张 (Zhang) 博士是新加坡安全网络联盟的创始人, 目前也是《无线网络和移动通信》的编辑 (Auerbach 出版社, CRC 出版, Taylor & Francis 小组)。他还参与了以下书籍的编写:《无线网络和移动通信中的资源、移动性和安全管理》,《无线网络: 架构、协议与标准》,《无线 LAN 和 WLAN 中的毫米波技术》,《分布式无线系统: 未来无线通信的开放架构》,《无线网络的安全》,《无线城域网 WMAN 及其演进》,《无线 QoS: 技术、标准与应用》,《宽带移动通信: 技术及应用》,《物理层》,《从 RFID 到下一代移动通信系统》,《无线安全研究手册》。

张彦还担任国际会议 IEEE PCAC07 副主席, 国际会议 ITNG 2007 副主席, 方向为无线移动通信网络中移动性和资源管理, 例如 PDCT 2006, 以及其中无线网络方向的研究。参加多个国际会议, 担任技术程序委员会成员, 包括 IEEE AINA 2007, IEEE CCNC 2007, WASA'06, IEEE GLOBECOM'2006, IEEE WQON'06, IEEE IWCMC 2006, IEEE IWCMC 2005, ITST 2006 和 ITST 2005。研究方向是无线网络和移动通信中的资源、移动性、能源和安全管理。他是 IEEE 和 IEEE ComSoc 会员。

E-mail: yanzhang@ieee.org

廖晓军 (Jian Liao), 1999 年在中国科技大学获学士学位, 2000 年在新加坡国立理工大学获理学硕士学位, 2000 年加入 Siemens, 并在新加坡国立理工大学获工学硕士学位。迄今已发表了 100 多篇科技论文, 合著了 3 本书, 拥有多项专利。其技术成果包括无线系统架构、无线协议、系统架构、无线资源管理、信号处理、编码和调制技术等方面的创新。该作者在国际学术和研究活动中表现活跃, 担任 IEEE Transactions on Vehicular Technology, IEEE Communications Magazine, IEEE Wireless Communications Magazine, EURASIP Journals, Preprints 等杂志的审稿人, 担任 IEEE 和欧洲无线通信学会的编委技术会议的分委会主席和审稿人。目前领导欧洲研究项目, 在国家工业标准制定中起着关键作用。主要研究方向为移动通信, 无线资源管理, 软件无线电, 无线系统架构和无线系统架构设计, 是 IEEE 会员。

E-mail: jessieliao@ieee.org

胡宏林 (Honglin Hu), 2004 年 1 月至中国科技大学获通信与信息系统博士学位, 2004 年 7 月至 2006 年 1 月, 在德国慕尼黑 Future Radio, Siemens AG Communications 工作。从 2006 年 1 月起, 就职于上海无线通信研究中心 (也称无线通信国际联合研究中心), 其间还在中科院上海微系统所信息通信技术研究所担任副教授。胡宏林博士的主要工作是国际标准制定和其他合

前 言

无线网状网 (Wireless Mesh Network, WMN) 是一种非常有前景的技术, 在未来无线网络中将发挥越来越重要的作用。WMN 具有动态自组织、自配置、自愈等特点, 能够快速部署, 易于维护、成本低、可靠性和可扩展性好, 还能增强网络容量、连通性能和恢复性能。由于具有这些优点, 国际标准化组织正在积极地进行网状网模式的标准化工作, 如 IEEE 802.11、IEEE 802.15、IEEE 802.16 和 IEEE 802.20。作为 ad hoc 网络的扩展, WMN 成为基于基础设施的无线网络的重要补充模式之一。研究和部署 WMN 的经验可为未来网络的演进提供技术支持和指导。

《无线网状网: 架构、协议与标准》是一本全面的技术指南, 包括无线网状网的概念介绍、基本技术、最新发展和开放问题, 主要侧重无线网状网的概念、有效协议、系统集成、性能分析技术、仿真、实验和发展趋势。本书研究了多种关键技术, 不同的应用场景和使用的标准, 如容量、覆盖、可扩展性、可靠性和认知性。本书参考了大量的文献, 包括路由、安全、频谱管理、媒体接入、跨层优化、负载均衡、多媒体通信、MIMO、智能天线等方面的内容, 并配有大量图表进行说明。本书还介绍了能有效提高无线网状网性能的特殊技术的细节。

全书分为 3 部分。

- 第一部分: 架构
- 第二部分: 协议
- 第三部分: 标准化与相关技术

第一部分主要介绍 WMN 技术基础, 对网络结构进行了分类。第二部分的主要内容为建立完整、安全、有效无线网络的技术要求, 包括路由、安全性、介质访问控制 (Medium Access Control, MAC)、可扩展性、负载均衡、跨层优化、多媒体通信和 MIMO (用于多天系统)。第三部分研究了标准化和网状网规范。例如, IEEE 802.11 WLAN 和 IEEE 802.16 WiMAX 中的网状网模式。此外, 还探讨了紧急情况下和公共安全中的网状网应用。

本书具有以下特点:

- 详细阐述了当前无线网状网的最新技术;
- 介绍了基础概念、技术、研究主题和未来发展方向;
- 用图表说明, 便于理解无线网状网;
- 前后文对照, 覆盖协议栈的不同层次;
- 详细阐述了能有效提高无线网状网性能的技术。

本书适合学生、教师阅读, 可作为大专院校教材, 也可作为无线网状网和移动通信方面的电信服务提供商、研究人员、科技工作者和工程师的参考书。

在这里我们感谢本书所有投稿人的辛勤工作, 他们为本书投入了大量的精力和时间。他们非常专业, 有合作精神。特别感谢 Richard O'Hanley、Kim Hackett、Catherine Giacari、Glenon

Butler 和 Taylor & Francis Group 的 Jessica Vakili 等人自始至终的支持, 以及他们的耐心和专业精神。我们也非常感谢 Suryakala Arulprakasam 在最终排版阶段的努力工作。最后还要感谢我们的家人和朋友在本书编写期间给予的鼓励、耐心和理解。

前言

Yan Zhang, Jijun Luo, Honglin Hu

本书是网络工程领域的一本教材, 也是网络工程领域的一本参考书。本书主要介绍网络工程的基本概念、基本理论、基本技术和基本应用。本书共分八章, 第一章介绍网络工程的基本概念, 第二章介绍网络工程的基本理论, 第三章介绍网络工程的基本技术, 第四章介绍网络工程的基本应用, 第五章介绍网络工程的基本设备, 第六章介绍网络工程的基本协议, 第七章介绍网络工程的基本安全, 第八章介绍网络工程的基本管理。本书可作为高等院校网络工程专业及相关专业的教材, 也可作为从事网络工程工作的工程技术人员和管理人员的参考书。

本书共分八章, 第一章介绍网络工程的基本概念, 第二章介绍网络工程的基本理论, 第三章介绍网络工程的基本技术, 第四章介绍网络工程的基本应用, 第五章介绍网络工程的基本设备, 第六章介绍网络工程的基本协议, 第七章介绍网络工程的基本安全, 第八章介绍网络工程的基本管理。本书可作为高等院校网络工程专业及相关专业的教材, 也可作为从事网络工程工作的工程技术人员和管理人员的参考书。

全书共分三大部分

● 第一部分: 绪论

● 第二部分: 网络工程基础

● 第三部分: 网络工程应用

第一部分: 绪论, 主要介绍网络工程的基本概念、基本理论、基本技术和基本应用。第二部分: 网络工程基础, 主要介绍网络工程的基本设备、基本协议、基本安全和基本管理。第三部分: 网络工程应用, 主要介绍网络工程的基本应用。

本书具有以下特点

- 注重基础, 突出应用。本书在介绍网络工程基本理论的基础上, 重点介绍网络工程的基本应用。
- 注重实践, 突出技能。本书在介绍网络工程基本理论的基础上, 重点介绍网络工程的基本技能。
- 注重创新, 突出发展。本书在介绍网络工程基本理论的基础上, 重点介绍网络工程的基本发展。
- 注重安全, 突出防护。本书在介绍网络工程基本理论的基础上, 重点介绍网络工程的基本安全。

本书共分八章, 第一章介绍网络工程的基本概念, 第二章介绍网络工程的基本理论, 第三章介绍网络工程的基本技术, 第四章介绍网络工程的基本应用, 第五章介绍网络工程的基本设备, 第六章介绍网络工程的基本协议, 第七章介绍网络工程的基本安全, 第八章介绍网络工程的基本管理。本书可作为高等院校网络工程专业及相关专业的教材, 也可作为从事网络工程工作的工程技术人员和管理人员的参考书。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第一部分 架 构

第 1 章 无线网状网：问题与解决方案	3
1.1 概述	3
1.2 无线 ad hoc 网络与无线网状网的比较	3
1.3 无线网状网的难题	4
1.3.1 吞吐量	5
1.3.2 吞吐量公平	6
1.3.3 可靠性和健壮性	7
1.3.4 资源管理	7
1.4 无线网状网的设计要点	8
1.4.1 网络结构设计要点	8
1.4.2 网络协议设计要点	9
1.5 多射频无线网状网设计要点	10
1.5.1 结构设计要点	11
1.5.2 媒体访问控制设计要点	11
1.5.3 路由协议设计要点	12
1.5.4 路由判据设计要点	12
1.5.5 拓扑控制设计要点	13
1.6 多射频无线网状网链路层解决方案	13
1.7 多射频无线网状网媒体访问控制协议	16
1.7.1 多信道 CSMA MAC	16
1.7.2 交错载波侦听多址接入	17
1.7.3 基于 TDMA 的两状态媒体访问控制方案	18
1.8 多射频无线网状网路由协议	19
1.8.1 多射频无线网状网的新路由判据	20
1.8.2 多射频链路质量源路由	21
1.8.3 负载感知干扰均衡路由协议	23
1.9 多射频无线网状网拓扑控制方案	24
1.9.1 拓扑控制协议的目标	24
1.9.2 骨干拓扑合成算法	24
1.10 开放性问题	26

1.11 总结	26
参考文献	27
第2章 多射频多信道网状网	29
2.1 概述	29
2.1.1 802.11 网状网架构	30
2.1.2 提升容量	30
2.1.3 举例	33
2.2 射频使用策略	35
2.3 信道分配和路由	37
2.3.1 信道分配的基础	38
2.3.2 公式和算法	40
2.3.3 局限性	41
2.3.4 路由判据	42
2.3.5 综合方法	43
2.4 开放性问题	44
参考文献	45
第3章 IEEE 802.11 无线网状网	47
3.1 引言	47
3.2 性能问题及原因	48
3.2.1 容量受限	48
3.2.2 数据流不公平性	50
3.3 高性能路由协议	52
3.3.1 链路质量感知路由	52
3.3.2 干扰感知路由	53
3.3.3 多径路由	53
3.3.4 差异感知路由	54
3.3.5 机会路由	54
3.4 多信道无线网状网	55
3.4.1 基于拓扑的信道分配	55
3.4.2 流量感知的信道分配	56
3.4.3 动态信道分配	56
3.4.4 信道间干扰	57
3.5 数据流公平性	58
3.5.1 公平性参考模型	58
3.5.2 隐式的基于速率的拥塞控制	59
3.5.3 显式的基于速率的拥塞控制	59
3.5.4 入口数据流节流	59
3.5.5 邻居区域 RED	60

3.5.6 覆盖 MAC 层方法	60
3.6 其他问题	60
3.6.1 服务质量	60
3.6.2 拓扑规划	61
3.6.3 增强拓扑发现	61
3.6.4 长距离无线网状网	62
3.7 开放性问题	62
3.7.1 最大最小流分配	62
3.7.2 干扰感知多路由协议	63
3.7.3 基于方向性天线的网状网	63
3.7.4 安全路由协议	63
3.7.5 故障诊断	63
3.8 总结	63
参考文献	64

第二部分 协 议

第 4 章 无线网状网中的路由	71
4.1 概述	71
4.2 无线网状网的特性	72
4.3 路由协议的一般概念	72
4.3.1 路由协议的分类	72
4.3.2 二层路由	73
4.3.3 无线网状网中路由的需求	74
4.3.4 适合于负载均衡和容错的多路径路由	74
4.3.5 QoS 路由	74
4.4 路由判据	75
4.5 路由协议	76
4.5.1 ad hoc 按需距离矢量路由协议	76
4.5.2 动态源路由协议	78
4.5.3 最优链路状态路由协议	78
4.5.4 跨层路由方法	80
4.5.5 带宽感知路由	80
4.5.6 多射频链路质量源路由协议	81
4.5.7 无线网状网中其他基于拓扑的路由协议	81
4.5.8 基于位置的路由协议	82
4.6 适合 802.11s WLAN 网状网的路由	83
4.6.1 空中传播时间路由判据	83
4.6.2 混合无线网状网协议	84

4.6.3	射频感知最优化链路状态路由	85
4.6.4	可扩展性	86
4.7	路由和信道分配联合	86
4.7.1	负载感知路由和信道分配联合	87
4.7.2	基于 LP 的路由和信道分配联合	88
4.8	前景展望和开放性问题	90
	参考文献	90
第 5 章	无线网状网媒体访问控制	92
5.1	设计目标与面临的难题	93
5.2	传统无线 MAC 协议	94
5.2.1	Aloha 与时隙 Aloha	94
5.2.2	CSMA 与 CSMA/CA	95
5.2.3	IEEE 802.11 DCF 协议	95
5.2.4	IEEE 802.11e MAC 协议	96
5.3	WMN 的高级 MAC 协议	98
5.3.1	配置定向天线的网状网节点的协议	98
5.3.2	多信道 MAC 协议	100
5.3.3	同步网状网的无竞争 MAC 协议	104
5.4	802.11 工作组提出的高级 MAC 特征	105
5.4.1	网状网内拥塞控制	106
5.4.2	公共信道结构	107
5.4.3	网状网确定性的接入	108
5.5	折中和约束	109
5.6	总结和前景展望	110
	参考文献	110
第 6 章	无线网状网的安全	114
6.1	安全技术概述	114
6.2	网状网应用场景	116
6.2.1	单独管理域	117
6.2.2	网络基础设施的延伸	117
6.2.3	网状网联盟	118
6.2.4	公用网状网	118
6.3	网状网安全议题	118
6.3.1	安全挑战	119
6.3.2	WMN 的潜在攻击	119
6.3.3	认证	120
6.3.4	安全的 MAC 层	121
6.3.5	安全路由	123

6.3.6	密钥管理和通信安全	125
6.3.7	入侵检测	127
6.3.8	WMN 的其他安全技术	127
6.4	具体的提议	127
6.4.1	系统提议	127
6.4.2	认证协议	129
6.5	总结和开放性问题的	135
	致谢	135
	参考文献	135
第 7 章	无线网状网的扩展性	139
7.1	概述	139
7.2	相关工作	141
7.3	可扩展的密集城市区域无线网状网	142
7.3.1	网络架构与假设	142
7.3.2	最优化的 AP 部署方案	144
7.3.3	密集城市区域无线网状网的数值实例	147
7.4	可扩展的基于环的广域无线网状网	149
7.4.1	网络架构及假设	149
7.4.2	无线冲突域和无线感知域	149
7.5	跨层吞吐量分析	151
7.5.1	基于环的多跳 WMN 中的信道活动	151
7.5.2	MAC 吞吐量	154
7.6	基于环的网状网单元中的最佳覆盖和容量	156
7.6.1	问题阐述	156
7.6.2	超结构混合整数非线性规划最优化方法	156
7.6.3	基于环的 WMN 实例	157
7.7	开放性问题	159
7.7.1	服务质量	160
7.7.2	跨层设计	160
7.7.3	协作通信	160
7.8	总结	161
	致谢	161
	参考文献	161
第 8 章	无线网状网中的负载均衡	164
8.1	概述	164
8.2	无线网状网中的网关负载均衡	165
8.2.1	基于移动边界的负载均衡	166
8.2.2	基于分区主机的负载均衡	168

8.2.3	基于概率分割的负载均衡	169
8.3	无线网状网中的中央负载	170
8.3.1	最短路径路由和中央负载	171
8.3.2	无线网状网负载均衡中基于环的路由策略	172
8.3.3	均匀节点分布下的平均路径长度分析	179
8.4	无线网状网中的其他负载均衡解决方案	179
8.4.1	ad hoc 负载均衡路由	180
8.4.2	ad hoc 按需距离矢量负载均衡	180
8.5	开放性问题	182
8.6	总结	182
	致谢	183
	参考文献	183
第 9 章	无线网状网中的跨层优化	185
9.1	概述	185
9.1.1	无线网状网	185
9.1.2	章节组织	186
9.2	结构性考虑——全 IP 无线网络	186
9.3	跨层优化	187
9.3.1	使用跨层信息的优点与需求	187
9.3.2	链路调度中的跨层信息合并	188
9.4	链路调度优化算法	188
9.4.1	背景信息	188
9.4.2	问题阐述	189
9.5	联合功率控制和多速率分配	190
9.5.1	传输功率值离散情形	191
9.5.2	复合函数：最大化吞吐量并最小化功率	191
9.6	带舍入的 LP 近似	192
9.6.1	确定性舍入	193
9.6.2	随机舍入	193
9.7	随机舍入分析	195
9.8	使用非独立随机舍入提升性能	196
9.9	使用连续优化来解决整数时隙分配问题	197
9.10	数值分析	197
9.10.1	仿真拓扑	197
9.10.2	仿真结果	198
9.11	开放性问题	200
9.11.1	不确定性条件下的调度	200
9.11.2	分布式链路调度	201
9.11.3	优化分解	201

9.12 总结	201
致谢	201
参考文献	202
第 10 章 无线网状网中的多媒体通信	205
10.1 概述	205
10.2 多媒体的特性和服务质量的要求	205
10.2.1 通信需求	205
10.2.2 鲁棒性问题	206
10.2.3 感知质量评价	207
10.3 协议和开放性问题	207
10.3.1 网络容量	208
10.3.2 网络时延	209
10.3.3 切换	209
10.3.4 网络路由	210
10.4 新的多媒体应用	212
10.4.1 流媒体服务	212
10.4.2 交互式语音服务	213
10.4.3 车辆间通信	215
10.4.4 实时多玩家游戏	217
10.5 总结	218
参考文献	218
第 11 章 无线网状网中的多天线技术	225
11.1 概述	225
11.2 多天线技术概述	225
11.2.1 波束赋形和天线零陷	226
11.2.2 分集和空时编码	227
11.2.3 空间复用技术	228
11.3 无线网状网概述	229
11.3.1 无线网状网的特点	229
11.3.2 无线网状网中的挑战和解决方案	230
11.4 无线网状网中的多天线技术	231
11.4.1 增加容量和吞吐量	231
11.4.2 提高路由性能	232
11.4.3 改善能量效率	233
11.4.4 其他性能改善	235
11.5 总结和讨论	236
参考文献	236