



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
电子与信息工程系列

ACCESS CONTROL AND NETWORKING OF AD HOC NETWORKS

# 无线自组网组网与接入控制

● 沙学军 何晨光 吴玮 叶亮 编著



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
电子与信息工程系列

ACCESS CONTROL AND NETWORKING OF AD HOC NETWORKS

# 无线自组网组网与接入控制

● 沙学军 何晨光 吴玮 叶亮 编著



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内容简介

本书主要介绍自组网的基本概念和组成及其在组网、接入控制等方面的理论与实现技术。全书分为7章,第1章介绍自组网的整体概念、网络架构和应用场景,重点是传输层和网络层关键技术的研究概述;第2章主要介绍和研究自组网的接入控制方法与发展方向;第3章主要介绍节点之间的连接保障技术——路由方法的研究现状和进展;第4~7章分别针对性地介绍和研究路由算法、变化种类及其改进方法,网络稳定性控制方法与研究进展,MAC协议接入控制等具体技术。本书内容简洁明了,在介绍现有研究成果的基础上,对每个研究问题都进行新方法的研究介绍,对于相关研究具有一定参考意义。

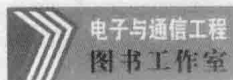
本书可以作为通信与信息系统学科无线通信领域研究生的教学参考书,也可供相关科研、教学人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无线自组网组网与接入控制/沙学军等编著. —  
哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.9  
ISBN 978-7-5603-6072-0

I. ①无… II. ①沙… III. ①无线电通信-通  
信网-通信技术 IV. ①TN915

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第131209号



责任编辑 李长波  
封面设计 刘洪涛  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
版 次 2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-6072-0  
定 价 44.00元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# “十二五”国家重点图书 电子与信息工程系列

---

## 编 审 委 员 会

顾 问 张乃通

主 任 顾学迈

副 主 任 张 晔

秘 书 长 赵雅琴

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 钢 邓维波 任广辉 沙学军

张钧萍 吴芝路 吴 群 谷延锋

孟维晓 赵洪林 赵雅琴 姜义成

郭 庆 宿富林 谢俊好 冀振元

# 序

## FOREWORD

教材建设一直是高校教学建设和教学改革的主要内容之一。针对目前高校电子与信息工程教材存在的基础课教材偏重数学理论,而数学模型和物理模型脱节、专业课教材对最新知识增长点和研究成果跟踪较少等问题,及创新型人才的培养目标和各学科、专业课程建设的全面需求,哈尔滨工业大学出版社与哈尔滨工业大学电子与信息工程学院的各位教师策划出版了电子与信息工程系列精品教材。

该系列教材以“寓军于民,军民并举”为需求前提,以信息与通信工程学科发展为背景,以电子线路和信号处理知识为平台,以培养基础理论扎实、实践动手能力强的创新型人才为主线,将基础理论、电信技术实际发展趋势、相关科研开发的实际经验密切结合,注重理论联系实际,渗透学科前沿技术,反映电子信息领域最新知识增长点和研究成果,因材施教,重点加强学生的理论基础水平及分析问题、解决问题的能力。

本系列教材具有以下特色:

(1) **强调平台化完整的知识体系。**该系列教材涵盖电子与信息工程专业技术理论基础课程,对现有课程及教学体系不断优化,形成以电子线路、信号处理、电波传播为平台课程,与专业应用课程的四个知识脉络有机结合,构成了一个通识教育和专业教育的完整课程教学体系。

(2) **物理模型和数学模型有机结合。**该系列教材侧重在经典理论与技术的基础上,将实际工程实践中的物理系统模型和算法理论模型紧密结合,加强物理概念和物理模型的建立、分析、应用,在此基础上总结牵引出相应的数学模型,以加强学生对算法理论的理解,提高实践能力。

(3) **宽口径培养与专业特色需求兼备。**结合多年来有关科研项目的科研经验及丰硕成果,以及专业教学中的丰富经验,专业课教材在编写过程中,在兼顾电子与信息工程毕业生宽口径培养的基础上,突出军民兼用特色,在满足一般

重点院校相关专业理论技术需求的基础上,也满足军民并举特色的要求。

电子与信息工程系列精品教材是哈尔滨工业大学多年来从事教学科研工作的各位教授、专家集体智慧的结晶,也是他们长期教学经验、工作成果的总结与展示。同时该系列教材的出版也得到了兄弟院校的支持,提出了许多建设性的意见。

我相信:这套教材的出版,对于推动电子与信息工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

哈尔滨工业大学教授 张乃通  
中国工程院院士



2010年11月于哈工大

# 前 言

## PREFACE

无线通信发展过程中,从点对点的通信模式到有中心节点的组网模式,通信与覆盖能力有了极大的增强,然而有中心节点的组网模式在特定环境下表现出不足,尤其在灵活和抗毁能力上,对此,在结合点对点的优势和网络逻辑中心节点基础上,出现了自组织网络,即自组网。虽然自组网的出现最早是针对特种用途,但是随着技术的发展,特别是5G网络模式和业务的发展,自组网作为民用领域一种重要的组网补充模式,作用正逐渐显现。

从网络结构角度看,自组网的优势在于组网灵活,不依赖特定的中心节点,业务传输与控制方式多样化;组网上既可以实现分层逻辑节点,也可以完全扁平化。在组网模式上,逻辑结构可以等效为有中心和完全平等的无中心模式。

从链路层上看,可以实现在节点不改变上下行配置下,实现用户间、中心节点与用户节点间的有效传输。为了提升传输有效性,在接入控制上的协议和方法有多种,针对不同实际场景和应用环境,如何进一步设计或优化协议方法,是一个具有理论意义和实际工程价值的重要问题。

从组网链路上看,由于各个节点之间没有中心节点之间的固定联系,因此,如何有效地建立并维护节点之间的链路,对于组网是否成功具有重要影响。

从接入控制上看,由于自组网随机性、时变性更强,接入控制更加复杂,因此需要适应性更强的接入控制方法。此外,网络仍然具有鉴权、抗攻击等问题,需要网络层和高层解决。

针对以上具体情况,本书将分析研究重点放在多节点/多跳路由、单播/多播算法、网络连接修复和动态接入控制四个方面。

目前的路由协议可以从宏观上分为静态、动态和混合式路由方法,对此本书在第4章针对动态与静态路由的研究现状,重点分析研究不同路由的修复、备份和邻域更新方法,在前几种研究基础上,探索了不同的改进方法,提升了路由可靠性,降低了维护开销;对于如何提升多播/组播效率,第5章进行了相关模型的分析与改进研究,研究如何利用多波束进一步提升系统的传输效率,建立相关模型并设计优化原则;针对组网中业务过载等突发情况带来的网络稳定性问题,第6章从拥塞检测入手,针对业务均衡、业务控制两方面分析优化了稳定性控制的方法;第7章针对动态网络环境,考虑到组网和接入的高效性,针对5G系统的一个重要应用环境——传感器网络,对网络结构进行简化和子网合并的分析研究,有效地减小了网络的动态组网开销,提升了组网与接入效率。

本书共分为7章,第1章由沙学军、叶亮撰写,第2章由沙学军、何晨光撰写,第3章由何晨光、吴玮撰写,第4章由吴玮、叶亮撰写,第5章由吴玮、何晨光撰写,第6章由叶亮、吴玮撰写,第7章由何晨光、叶亮撰写,全书由沙学军统稿。

本书第3、4章的部分研究工作,得到了国家973计划课题(2007CB310606)“资源复用与抗干扰机理”的资助,第5~7章的部分研究工作得到了国家973计划课题(2013CB320003)“异构网络协同信号处理理论与方法”和国家自然科学基金课题(61171110)“单载波与多载波协同的时频联合抗衰落与抗干扰机理”的资助。

由于作者水平所限,书中不妥或疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作者

2016年1月



# 目 录

## CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 无线自组网发展概述	2
1.2 无线自组网的特点	5
1.3 无线自组网的基本结构	7
1.4 无线自组网的应用	8
1.5 无线自组网的主要研究问题	10
本章参考文献	14
第 2 章 无线自组网的接入控制协议	16
2.1 竞争类 MAC 协议	16
2.2 分配类 MAC 协议	24
2.3 混合类 MAC 协议	35
本章参考文献	44
第 3 章 无线自组网的路由协议	46
3.1 主动式路由协议	47
3.2 反应式路由协议	56
3.3 混合路由协议	64
3.4 多路径路由协议	86
3.5 多目标路由协议	102
本章参考文献	109
第 4 章 动态路由的控制方法与改进	111
4.1 动态路由协议与可靠性改进方法	111
4.2 本地路由自适应修复算法(LRASR)	119
4.3 递归式备份多路由(AODV-SRM)协议	140
4.4 邻域状态自适应更新算法(NSSAU)	155
4.5 逐跳路由稳定性判定协议(AODV-NS)	176
4.6 动态路由的效率改进	182
本章参考文献	200

第 5 章 Ad Hoc 多播路由协议 .....	205
5.1 多播协议 .....	205
5.2 Ad Hoc 网络多播路由协议 .....	208
5.3 MAODV 协议 .....	211
5.4 ODMRP 协议 .....	217
5.5 MAODV 和 ODMRP 性能的比较 .....	221
5.6 MAODV 协议在 Linux 系统下的实现 .....	225
本章参考文献 .....	231
第 6 章 网络业务稳定性控制方法 .....	233
6.1 网络拥塞及拥塞控制方法 .....	233
6.2 Ad Hoc 网络拥塞检测方法 .....	247
6.3 网络拥塞控制路由协议 .....	259
6.4 基于拥塞检测的速率自适应 MAC 协议 .....	271
6.5 业务均衡路由算法 .....	286
本章参考文献 .....	308
第 7 章 无线传感器网络 MAC 协议 .....	314
7.1 无线传感器网络 MAC 协议研究现状 .....	315
7.2 无线传感器网络 MAC 协议设计的区别和限制 .....	320
7.3 无线传感器网络 MAC 协议设计目标 .....	324
7.4 SMAC 协议 .....	325
7.5 基于缓冲区队列时延的动态占空比算法 .....	333
本章参考文献 .....	345

随着电子信息技术惊人的发展,人类社会已经进入了信息化时代,人们依靠通信进行信息传递、思想交流、知识传播。任何人在任何地点、任何时间以任何方式与其他任何人进行通信已经逐渐成为可能。

从 1897 年意大利电气工程师伽利尔摩·马可尼(Guglielmo Marchese Marconi)成功演示了无线电报开始,到 1901 年无线电波成功横跨大西洋,无线通信技术便揭开了长达一百多年的发展历史。1979 年,美国贝尔实验室研制的先进移动电话系统(Advanced Mobile Phone System, AMPS)在芝加哥投入使用,建成了最早的依赖于模拟系统的蜂窝移动通信网,同时也意味着第一代公众移动通信技术的产生。虽然模拟蜂窝通信技术满足了一部分用户的需求,但价格昂贵,用户规模很小,7 年间总共发展不到 600 万用户。直到欧洲推出采用数字技术的第二代移动通信技术 GSM(Global System for Mobile communication)移动通信体系后,蜂窝通信系统才得以在全世界普及开来。由于蜂窝通信系统的设计初衷是电话业务的应用,所以系统中的数据速率和时延是由语音通话需求决定的。随着用户规模和网络规模的不断扩大,出现了频率资源接近枯竭、语音质量不能达到用户满意的标准、数据通信速率太低、无法满足移动多媒体业务的需求等问题,促使支持语音和多媒体数据通信的第三代、第四代移动通信技术得以产生。从有线走向无线,从语音走向数据,从窄带走向宽带,从语音通信走向宽带多媒体业务,如今信息技术正在向第五代移动通信技术迈进。全球的无线覆盖,高达 100 Mbit/s 的传输速率,高质量的多媒体业务将使人们不受时间、地点的限制,可以自在地利用移动通信网络获取和传递信息。

作为目前移动通信网络的典型代表,无线蜂窝网络和无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)都采用集中式的控制方式,也就是说,这类网络需要有预先架设的基础设施才能运行,比如无线蜂窝网络需要有基站和移动交换中心等固定设施的支持,而 WLAN 则往往需要借助于预先部署的接入点(Access Point, AP)以及有线骨干网等。对于这类网络而言,移动用户间所有的信息交互、业务管理、跨区切换等功能都需要采用中心仲裁的方式来解决。此外,用户在享受网络连接和各种业务服务时也会受到技术本身带来的区域限制。因此,为了能够在更大范围内向更多用户提供更优质的服务,往往需要大量的固定设施作为支撑(基站、骨干网等)。尽管建立和维护这些基础设施需要花费大量的时间和付出巨大代价,但截至 2010 年底,仅我国无线通信网络的基站数量就已经超过了 125 万座。由此可以看出,传统的移动通信网络对固定基础设施的依赖程度是如此之大。然而,对于某些没有预先架设基础设施或已有设施遭到损毁而失去效用的特殊场合,这类网络便失去了作用。比如,2011 年 3 月 11 日,日本本州岛仙台港以东 130 km 处发生了里氏 9.0 级地震并引发强



烈海啸。作为通信产业最为发达的国家之一,日本移动通信网络出现大面积的故障,灾区周围几乎所有的移动电话都因通信基站的损毁而陷入了瘫痪,其中青森县、岩手县、宫城县、福岛县等 20 余个受灾严重的区域在震后长时间对外通信完全中断。由此可见,在没有基础设施支持的环境中实现端到端的有效通信连接将成为移动通信网络的重要研究内容。作为移动通信网络的重要分支,Ad Hoc 网络便由此产生并迅速成为移动通信领域的关键组成部分。

“Ad Hoc”来自于拉丁语,意思是“*For the specific purpose only*”,翻译成中文即“为某一特别的目的,临时的”。Ad Hoc 网络是由一组带有无线收发装置的移动终端组成的一个多跳的临时性的自组织网络,其中没有任何的控制中心或基础通信设施,因此 Ad Hoc 网络也称为无线自组网。Ad Hoc 网络中所有节点的地位平等,无需任何中心节点对网络进行控制、管理。因此,任何一个终端的损坏,不会影响网络的通信,抗毁性较强。各个节点不仅具有普通移动终端的功能,而且还能为其他节点转发数据。当需要通信的两个节点间的距离大于直接通信的距离时,中间节点为它们转发数据,从而实现相互通信。有时两个节点间距离过远,则数据需要经过多个中间节点的转发才能到达目的节点。基于快速灵活组网、建造成本低、维护开销小、环境适应性和结构健壮性强等特点,Ad Hoc 网络可以被广泛地应用于战场部署、临时会议召开、野外科考、矿区作业以及灾后救援等有着特殊需求的通信环境中。

## 1.1 无线自组网发展概述

与普通移动通信网络相比,无线自组网具有许多极具优势和应用潜力的特点,比如不依赖于预设的基础设施、自组织开展、部署灵活等。然而,这些优点却为 Ad Hoc 网络相关技术的研究带来了新的问题。除了需要面对与传统移动通信网络一样的带宽资源和供电能力受限、无线链路连接脆弱以及传输质量无法保证等问题外,拓扑结构的频繁变化、多跳通信的固有本质以及缺少中心控制机构的协调和管理等特点也制约了 Ad Hoc 网络的快速发展。

Ad Hoc 网络的产生最早起源于与军事应用相关的战术网络,主要用以满足战场环境下的抗毁性通信需求。军事作战的动态部署意味着战场环境下的通信无法通过预先架设的固定设施来实现。此外,无线信号极易受到环境的干扰,当通信频率超过 100 MHz 时,视距传播在战场环境很难实现。针对这些问题,Ad Hoc 网络以一种无需依赖于预设基础设施并能够提供超视距连接的无线移动分布式多跳网络结构,在现代军事通信史上留下了辉煌的印记。

早在 1968 年,美国夏威夷大学便启动了名为“ALOHA”的研究计划,用以实现分散在夏威夷各个群岛上的用户通过无线信道对位于主岛上的中央计算机进行访问,如图 1.1 所示。作为最早使用无线广播技术的分组交换计算机网络,ALOHA 打破了传统点对点的线路连接模式而进入点对多点的广播时代。然而,此时的计算机终端是静止的,且通信范围也局限在一跳以内。尽管如此,ALOHA 技术的实现却为 Ad Hoc 网络奠定了技术基础。

1972 年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了分组无线网络(Packet Radio Network, PRNET)的研究项目,该项目以带宽共享、路由存储转发等无线分组交换技术为基础,采用了最小中心控制无线广播网架构,结



合 ALOHA 和载波侦听多址访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA) 信道接入协议用以支持广播信道的动态共享。此外,多跳存储转发路由技术的采用打破了传统无线信号覆盖的局限性,从而实现更大范围内用户间的通信。

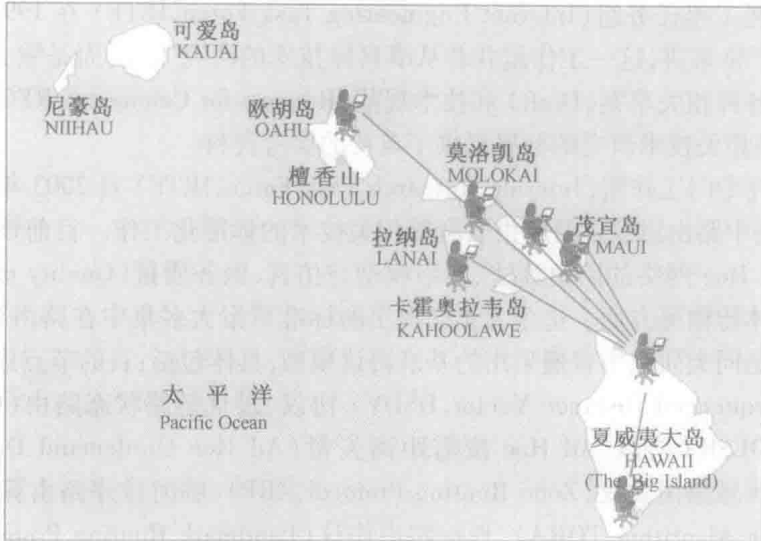


图 1.1 夏威夷群岛上的 ALOHA 研究

DARPA 在 1983 年又开展了高抗毁性网络(SURvivable Adaptive Network, SURAN) 的研究以解决 PRNET 项目中网络的扩展性、安全性、处理能力以及能量管理等开放性问题。该研究旨在提出相对成熟的无线分组协议,用以支持网络容量扩展至数以万计节点的程度,并同时支持小型低功耗无线通信设备的接入。SURAN 的研究取得了极大的成功。DARPA 在 1987 年采用数字直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 无线电成功地设计出低功耗分组无线电(Low-cost Packet Radio, LPR) 技术。此外,先进的网络管理技术得到了发展,基于动态分簇的分级网络技术被普遍采用以支持网络扩展。

20 世纪 80 年代末至 90 年代初,Internet 基础设施数量的增长与计算机变革为分组无线网络的最初思想提供了实现平台。为了能够使全球信息基础设施支持无线移动环境,美国国防部在 1994 年启动了全球移动(Global Mobile, GloMo) 信息系统项目,该项目旨在解决无线设备在任何时间、任何地点与以太网(Ethernet) 进行连接的问题。

美国陆军在 1997 年提出的战术互联网(Tactical Internet, TI) 是迄今为止规模最大的移动多跳分组无线网。该网络采用直接序列扩频、时分多址接入等技术实现了近万比特率的高速数据通信。

1999 年,美国国防部提出了一个全新的 Ad Hoc 网络研究计划,称为扩展沿海作战空间先期概念技术验证(Extending the Littoral Battle-space Advanced Concept Technology Demonstration, ELBACTD),该计划成功地采用飞行器作为中继节点实现了用户的超视距通信。

虽然直到 1991 年 IEEE 802.11 标准化委员会才正式采用 Ad Hoc 网络来描述这种自组织、多跳的对等无线移动网络,但是学术界普遍认为,现代 Ad Hoc 网络的研究是从 20 世纪 70 年代初期的分组无线网开始的。正如前文所述,Ad Hoc 网络早期的研究多带有浓厚的军事色彩,因此直到 20 世纪 90 年代,随着信息传播技术的不断发展,才使得越来越多的学者接



触到这种网络并开展了相关技术的研究。作为面向特殊应用场合的通信网络,Ad Hoc 网络有着自组织、无中心、多跳组网等不同于传统无线移动通信网络的特点。这些特点在极大拓展网络应用范围的同时,也为网络技术的发展提出了新的要求。

国际互联网工程任务组(Internet Engineering Task Force,IETF)在1997年成立了Ad Hoc 工作组。严格来讲,这一工作组并非从事具体技术的研究工作,而是致力于Ad Hoc 网络路由算法的各种相关草案(Draft)和技术规范(Request for Comments,RFC)的制定,为目前Ad Hoc 网络相关技术研究的开展提供了重要的参考资料。

互联网研究专门工作组(Internet Research Task Force,IRTF)自2003年起就一直致力于Ad Hoc 网络中路由协议以及路由安全等相关技术的标准化工作。目前该工作组的主要研究集中在Ad Hoc 网络的路由算法、网络模型与仿真、服务质量(Quality of Service,QoS)保障以及多媒体传输等方面。迄今为止已提出的标准草案大多集中在路由算法方面,这些公开的算法也是同类研究中普遍采用的基准协议模型,具体包括:目的节点序列号距离矢量(Destination Sequenced Distance Vector,DSDV)协议、最优链路状态路由(Optimized Link State Routing,OLSR)协议、Ad Hoc 按需距离矢量(Ad Hoc On-demand Distance Vector,AODV)协议、区域路由协议(Zone Routing Protocol,ZRP)、临时按序路由算法(Temporally Ordered Routing Algorithm,TORA)、地标路由协议(Landmark Routing Protocol,LANMAR)以及鱼眼状态路由(Fisheye State Routing,FSR)协议等。

Ad Hoc 无线网络与计算联盟(Ad Hoc Wireless Networking & Computing Consortium,WNCC)是由美国佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology,GIT)的移动多媒体和高速网络实验室(Mobile Multimedia and High-Speed Networking Lab)倡导组织的一个工业界联盟。该联盟集中了世界范围内的知名企业参与Ad Hoc 网络面向应用的研究,具体包括家庭无线网、蓝牙以及本地与远端的网络和通信系统等。目前,联盟成员主要有加拿大的北电网(Nortel Networks)、阿尔卡特-朗讯(Alcatel-Lucent Technologies)、微软研究中心(Microsoft Research)、美国的里兰电讯(RadioLAN)、贝尔南方(Bellsouth)、电商(Electronic Business Automation System,EBASys)以及NextGen科技等。主要从事的研究包括:Ad Hoc 网络单播路由、多播路由;低能量移动系统的研制;业务搜索与位置跟踪;高速移动Ad Hoc 多媒体网络以及普适环境和位置敏感性计算等。

除了上述研究机构外,许多国内外高等院校、科研机构、企业都开展了针对Ad Hoc 网络的研究,在巩固已有成果的同时不断挑战新的技术难题。

美国加利福尼亚大学圣克鲁兹分校(University of California Santa Cruz,UCSC)提出了一种在扁平网络结构中进行点对点传输的无线Internet网关(Wireless Internet Gateways,WINGs)。通用电话电子公司(General Telephone & Electronics corporation,GTE)网间互联工作组采用基于分簇技术的分级网络架构开展了多媒体移动无线网络(Multimedia Mobile Wireless Network,MMWN)项目。美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(University of California Los Angeles,UCLA)的通信网络研究实验室(Network Research Lab,NRL)是该领域较为著名的研究机构,在Mario Gerla教授的领导下,NRL在Ad Hoc 网络的路由协议、QoS保障、接入算法以及功率控制方面取得了丰富的研究成果。目前,该实验室主要从事Ad Hoc 模式下的个人网络(Personal Network,PN)相关技术以及泛在网络连接方面的研究。加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校(University of California Santa Barbara,UCSB)的Elizabeth M. Belding



教授所领导的移动管理与网络实验室(Mobility Management and Networking Laboratory, MOMENT)致力于 Ad Hoc 网络的多媒体支持、节点部署、网络性能监测、QoS 保障以及可伸缩性与自适应技术等方面的研究。伊利诺伊大学(University of Illinois)的移动网络(Mobile NETwork, MONET)实验室在 Ad Hoc 网络的 QoS 架构设计和跨层方法研究方面有较为突出的成绩,并且该实验室在对该领域内相关算法的软、硬件仿真方面做出了一定的贡献。弗吉尼亚理工大学(Virginia Tech, VT)关键技术与应用科学中心(Institute for Critical Technology and Applied Science, ICTAS)的 Christopher L. Barrett 教授所领导的无线移动技术研究小组,在 Ad Hoc 网络协议设计、跨层优化算法、网络安全以及网络规划等方面进行了深入的研究。康奈尔大学(Cornell University)的 Zygmunt J. Haas 教授所领导的无线网络实验室(Wireless Networks Laboratory, WNL)主要研究方向集中在 Ad Hoc 网络的构造、定向接入协议以及广播调度算法等方面。

除了以上对 Ad Hoc 网络技术探索开展较早的研究机构外,其他机构对该领域相关技术的研究也紧随其后。例如,加拿大瑞尔森大学(Ryerson University)的无线网络与通信技术实验室(Wireless Networks and Communications Research Lab, WINCORE Lab)、芬兰赫尔辛基大学(University of Helsinki)的信息技术研究实验室、瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH Zurich Switzerland)的先进无线移动通信网络实验室的 Ad Hoc 网络技术小组等都是该领域较为活跃的研究组织。

在我国,Ad Hoc 网络相关技术的研究起步较晚,在 20 世纪 90 年代才逐渐出现。迄今为止,尽管能够赋予实际应用的系统不多见,但对该领域技术的研究已经在我国多所高等院校、实验室以及研究所普及开来,并在小规模的实验环境中搭建了效果良好的 Ad Hoc 网络演示平台。目前,清华大学、哈尔滨工业大学、东南大学、中南大学、北京邮电大学、中国科学院、中国科技大学、北京理工大学、电子科技大学、上海交通大学、南京邮电大学、北京航空航天大学以及西安电子科技大学等多所国内高等院校和研究院在 Ad Hoc 网络相关技术的研究中投入较大的力量,且在路由算法、拓扑控制、MAC(媒体接入控制)接入、网络融合、节能管理、结构设计、广播调度以及安全管理等多个方面取得了较为突出的成果。

## 1.2 无线自组网的特点

无线自组网是由一系列带有无线收发装置的节点动态形成的多跳的临时的自治性网络系统。网络中的任意节点可在任意时刻移动,运动完全自主。网络节点能够动态地、随意地、频繁地加入和退出网络,不需要预先通知。因此,无线自组网的网络拓扑结构变化迅速,并且受网络规模和网络节点移动的影响。

当两个节点在彼此的传输范围之内时,可直接进行通信;当两个节点在彼此的传输范围之外时,则必须通过中间节点进行转发,因此,Ad Hoc 网络是一个多跳的无线移动网络。

在 Ad Hoc 网络中,网络节点同时具备主机和路由的功能。作为主机,节点要运行相关的协同应用程序;作为路由,它需要运行相关的路由协议,进行路由发现和路由维护等操作,并对发送给其他节点的分组进行转发。因此,无线自组网具有以下特点:

### (1) 无中心

无线自组网没有严格的控制中心,各节点地位平等,组成一个对等式网络,网络中的节



点可以任意地加入和离开网络,而且其加入、离开或者任何节点的故障都不会影响整个网络的正常运行。与有中心的网络相比,无线自组网具有很强的抗毁性。

### (2) 自组织

相对于常规的通信网络而言,无线自组网最大的特点就是不需要预先构架网络基础设施来支持,因此可以在任何时间、任何地点快速地建立起一个通信网络,以实现移动节点的信息交互。这种网络临时结构的形成不需要外部参与,可依据现有情况完全自主,并随环境的变化自适应地自我调整。

### (3) 多跳路由

在传统的有中心的移动通信网络中,路由协议采用的是集中管理和维护的方式,移动节点不需要管理路由。而在 Ad Hoc 网络中,节点能够直接通信的距离有限。当它需要与通信范围以外的节点进行通信时,就需要有中间节点为其转发数据。由于 Ad Hoc 网络中的节点既可以作为终端,又可以作为路由器,因此,Ad Hoc 网络中的多跳路由是由网络中的各个节点组成的,而不是像传统的固定网络由专门的路由器、交换机来实现的。源节点和目的节点之间的数据包通常需要经过多跳传递给对方。有时,中间节点会为多个源节点转发数据。网络中的每个节点扮演着不同角色,它们可以是服务器、终端,也可以是路由器。

### (4) 分布式控制

为了在网络中实现网内成员之间的通信,就要解决无线资源的使用、路由发现等控制问题。由于无线自组网的无中心性,因此网络节点必须采用分布式控制的方式。集中式控制中,控制中心协调支配网络节点的通信互联;而分布式控制则是每个成员按照预先约定的协议,根据自己掌握的信息与自身能量独自计算和管理。当前大多数的通信系统都是集中式管理的,所以对当前的网络功能必须重新设计后才能应用到分布式环境中。

### (5) 动态的网络拓扑结构

Ad Hoc 网络中,网络节点可以任意移动,节点开、关机,节点加入或者离开网络,再考虑到信道之间的相互干扰、无线收发装置功率的变化、地形等因素,Ad Hoc 网络的拓扑结构随时可能发生变化,且难以预测。具体表现为无线信道有向边的增加和消失、网络节点的增加和消失、网络拓扑结构的分割和合并等情况。移动限制了网络的扩展性,因此必须开发更为合适的路由协议。

### (6) 带宽有限、链路容量易变

由于无线信道本身的物理特性,其容量明显低于有线信道。无线环境具有带宽有限、误码率高、链路质量和链路容量波动等问题。另外,无线信道是一种共享媒介,由于竞争无线信道产生的碰撞、信号衰落、噪声、环境干扰等因素的影响,移动终端能得到的实际带宽容量常常比由理论得出的最大带宽容量低很多。在 Ad Hoc 网络的多跳数据传输过程中,受无线信道质量的影响更明显。传统的 Internet 协议并没有考虑到这些因素,因此必须修改后才能应用于 Ad Hoc 网络中。

### (7) 特殊的无线信道特征

Ad Hoc 网络采用无线信道通信,易受发射功率、传输模式和环境因素的影响,加上实际带宽小,所以两个节点间可能会存在单向链路,即一个节点可以向另一个节点发送报文,但反向则不能传输。





### (8) 低安全性

Ad Hoc 网络采用无线信道传输的方式。无线网络比有线网络的安全性要差很多。无线传输容易被窃听,遭到主动入侵、拒绝服务、信息阻塞、信息伪造等方式的攻击。如果使用复杂的加密算法,那么会耗费终端的大量能量,对于 Ad Hoc 网络终端这种能量受限设备,使用复杂的加密算法是得不偿失的。另外,Ad Hoc 网络的节点需要选择其他中间节点为自己转发数据包,如果这些中间节点中存在敌意节点,那么所发送的数据很容易被敌意节点截获造成失密,因此,Ad Hoc 网络中的安全性问题很复杂,传统网络中成熟的安全策略和机制不适合使用在 Ad Hoc 网络中,需要针对 Ad Hoc 网络的特点设计安全策略。

## 1.3 无线自组网的基本结构

无线自组网一般有两种结构:平面结构和分级结构。

平面结构采用全分布式控制,所有节点地位平等,不存在任何的等级与层次差异,又可称为对等式结构,如图 1.2 所示。在用户较多时,平面结构式网络存在控制开销大、路由经常出现中断、处理能力弱等缺点。平面结构式网络的结构较简单,不易产生瓶颈效应,具有良好的鲁棒性。在数据通信中,通过源节点与目的节点之间存在的多条路径,不仅可以均衡负载,还可以针对不同的业务提供不同的路由。但由于网络规模受限,每一个节点都需要知道到达所有其他节点的路由,维护这些动态变化的路由信息需要大量的控制开销。平面结构的节点覆盖范围小,安全性较高,因此广泛适用于中小型网络。

分级式结构中,网络节点被划分成簇,每个簇由簇头和簇成员组成。这些簇头构成高一层次的网络,在高一层的网络中,可以再一次分簇,形成更高层次的网络。分级结构中,簇头节点负责簇间数据的转发和簇内节点的管理。分级式结构最大的优点就是可扩充性好,网络规模不受限制,路由和控制开销小,易实现移动式管理和网络的局部同步。在分级结构中,采用分级路由算法,簇内采用主动路由算法,节点维护到簇内其他节点的完整路由信息,簇间采用按需路由协议来减小通信和路由开销,因此很大程度上提高了网络的性能。

分级结构式网络又可分为单频分级和多频分级两种,如图 1.3 所示。单频分级网络中,所有节点使用同一个频率通信,为实现簇头之间的通信,要有网关节点的支持。在多频分级网络中,不同级采用不同的通信频率进行通信。低级节点的通信范围较小,而高级节点要覆盖较大的范围,高级节点同时处于多个级中,有多个频率,用不同的频率实现不同级的通信。

在有中心节点的蜂窝网络中,资源的分配比较容易实现,因为各个节点可以直接或者借助基站获得其他节点的带宽要求。如果将网络分为基于簇的分级结构,就可以将蜂窝网络中使用的方法扩展到 Ad Hoc 网络。在每个簇内,簇头可以控制节点的业务接入请求并合理分配带宽。此外,在分级结构中采用分级路由算法,簇内采用主动路由算法,节点维护到簇内其他节点的完整路由信息,簇间使用按需路由协议减小通信和路由开销。因此将网络划分为簇可以在很大程度上提高 Ad Hoc 网络的性能,具有重要的意义。虽然如此,平面结构的性能问题仍然是 Ad Hoc 网络的基本问题。