

Mobile Ad Hoc Networks
Architectures and Routing Techniques

移动自组织网络

体系结构与路由技术

许 骏 邱静怡◎著



科学出版社

移动自组织网络

体系结构与路由技术

许 骏 邱静怡 著

本书出版得到广东省重大科技专项和应用型科技研发重大项目
(2017B030306020, 2015B010131013) 资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍作者及其团队在移动自组织网络研究领域所做的工作,注重学术研究与工程实践相统一。全书分为5章,第1章介绍移动自组织网络体系结构、研究内容、应用现状与发展趋势;第2~4章以快速应急体系和大范围动态监控为应用背景,围绕大规模、实用化、高可信的短距离泛在互联无线网络若干关键问题,从多角度、不同层面深入讨论移动自组织网络体系结构与路由技术,通过建模、仿真与测试,对协议算法性能与效率进行验证评估;第5章介绍移动自组织网络实验环境与仿真平台,重点讨论车载自组网和智能终端自组网等典型应用。

本书可供计算机、电子信息与通信工程等相关专业科技人员参考,也适合高等学校计算机科学与技术及相关专业的研究生和本科高年级学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

移动自组织网络:体系结构与路由技术/许骏,邱静怡著. —北京:科学出版社,2019.11

ISBN 978-7-03-062085-9

I. ①移… II. ①许… ②邱… III. ①移动通信-通信网-网络体系结构 ②移动通信-通信网-路由选择 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第176359号

责任编辑:孙露露 王会明 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:武守友

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年11月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2019年11月第一次印刷 印张:14 1/4 彩插:1

字数:271 000

定价:113.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135763-2010

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



许 骏

博士，教授，博士生导师，享受国务院特殊津贴专家，曾获全国优秀教师奖章和广东省杰出教师奖。长期从事计算机、通信与自动控制技术研究，主要研究领域为计算机网络与分布式系统、计算机控制系统与机器人技术。拥有在高校领导国家重点学科建设和在高新技术企业(集团)担任总工程师的跨界工作经历。现任华南师范大学二级教授、广东高校计算机网络与信息工程技术研究中心主任，广州市电子行业协会副会长，中国人工智能学会智能信息网络专业委员会副主任。近年来带领团队主要从事云计算、大数据和人工智能技术研究，主持国家自然科学基金、广东省重大科技专项和应用型科技研发重大项目，作为专家组组长兼首席专家，牵头负责广东省“粤教云”工程，在云计算关键技术及新一代通用云操作系统与行业云整体解决方案研究方面取得重要进展。合著出版《面向服务的网格计算——新型分布式计算体系与中间件》等学术专著 6 部，主编出版《计算机系统原理与应用》等高校教材 6 部。



邱静怡

博士，广东外语外贸大学信息科学与技术学院教师。本科毕业于南京理工大学计算机通信工程专业，获工学学士学位；研究生毕业于中山大学计算机软件与理论专业，获工学硕士学位；2012年6月在华南师范大学获理学博士学位，研究方向为计算机网络及应用。近年来主要从事计算机网络与分布式系统研究，作为团队核心成员，承担了国家自然科学基金项目“对等科研协作网络研究”和广东省重大科技专项计划项目“云计算若干关键技术及产业化与‘粤教云’工程”；作为项目负责人，主持完成了“移动自组织网络路由协议若干关键问题研究”和“智慧课堂无线终端密集接入和组播技术研究”等广东高校优秀青年创新人才培育项目。参与计算机网络技术省级实验示范中心建设。多项成果获国家发明专利，发表学术论文多篇，出版《计算机网络》等高校教材。

前 言

移动自组织网络 (mobile ad hoc network, MANET) 是一种在没有固定基础设施的条件下, 由系统中的通信节点通过分布式协议互联的网络系统, 具有无中心、节点对等、多跳 (multihop), 以及自发现 (self-discovering)、自配置 (self-configuring)、自组织 (self-organizing) 和自愈 (self-healing) 等特点, 能自动快速部署独立的通信网络或有效延伸已有通信网络的覆盖范围, 在民用和军事方面均有广泛的应用前景, 一直是计算机网络与分布式系统的研究热点。《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》将自组织网络技术列为信息技术领域重点发展的三大前沿技术之一。随着 P2P 计算 (peer-to-peer computing, 对等计算) 等具有明显自组织特征网络的出现, 自组织网络的概念逐渐宽泛化, 已扩展到各种具有自组织特性的网络新理念、新技术和新设施的研究与试验中。自组织网络与传感器技术相结合形成的无线传感网络, 将深刻影响人与自然的交互方式, 极大扩展现有网络功能和人类认识世界的能力。随着工业互联网的兴起, 移动自组织网络可望成为工业互联网平台企业无线网络的主导技术, 也是无人机集群、机器人集群信息传递的关键技术。

笔者接触移动自组织网络源起北京清华园。2002—2004 年, 笔者在清华大学计算机科学与技术系从事博士后研究, 专业方向为计算机网络与分布式系统, 参与了合作导师史美林教授主持的相关科研项目。2005 年春, 笔者从清华大学博士后出站, 回到广州工作, 任广州电子集团公司总工程师。笔者认为, 学术界和工业界人才双向交流很重要, 这是笔者职业生涯第三次走出“象牙塔”, 在总工程师岗位上负责企业集团技术创新工作。网络与通信是广州电子集团公司的主导产业和重点发展领域, 必须重视前沿及共性关键技术研究, 为此笔者牵头组织实施了“移动自组织网络与无线传感网络”等省市重点科技项目。尽管一年多以后笔者又重返学术界, 受聘华南师范大学特聘教授、教育信息技术学院院长, 领导国家重点学科建设, 但校企产学研合作从未间断, 并且至今仍兼任广州市电子行业协会副会长。从事高技术研究的团队需要有一定的规模, 单靠高校难以做到, 行之有效的途径是产学研合作, 借助企业平台弥补高校资源的不足, 利用高校优势帮助企业提升技术创新能力。笔者认为, 高校在选择科研课题时应尽可能面向产业界的应用需求, 加强与产业界的密切合作, 形成应用需求拉动的项目研究组织模式。理由很简单: 如果不了解行业产业的应用需求, 很难发现有价值的科学问题, 技

术攻关发力点就拿不准，也很难实施科技成果转化；如果不重视应用基础研究，缺乏理论指导，技术难题就看不透。正是基于这样的认识，2008 年笔者团队联合广州电子集团公司共同承担了广东省科技计划项目“移动自组织网络体系结构与先进路由技术研究”，2009 年校企再度合作，共同组建广东高校计算机网络与信息系统工程技术研究中心，获广东省教育厅立项建设，移动自组织网络是该工程技术研究中心两个重点研究方向之一。

邱静怡博士是笔者到华南师范大学工作后招收的第一位博士研究生，研究方向为计算机网络及应用，攻读博士学位期间对移动自组织网络路由技术及协议算法进行了比较系统、深入的研究。她博士毕业后到广东外语外贸大学信息科学与技术学院工作，同时担任广东高校计算机网络与信息系统工程技术研究中心兼职研究员。邱静怡与笔者的团队一直保持着紧密的科研合作，她作为团队核心成员，参与了笔者主持的国家自然科学基金项目“对等科研协作网络研究”和广东省重大科技专项计划项目“云计算若干关键技术及产业化与‘粤教云’工程”，在自组织网络与对等协作网络研究方面取得重要进展，“一种移动自组织网络及其组播路由方法”等多项成果获国家发明专利，并在教育智能终端产品中实际应用。此外，邱静怡还主持完成了“移动自组织网络路由协议若干关键问题研究”和“智慧课堂无线终端密集接入和组播技术研究”等广东高校优秀青年创新人才培育项目。这些研究工作为本书写作打下了良好基础。

本书是在项目研究技术报告的基础上修改、充实而成的，力求学术研究与工程实践相统一，即由应用需求凝练科学问题，技术创新成果回归实际应用。能否实现这一写作初衷，心中无数，笔者清楚书中的一些看法和观点未必高明，但都是实践之后的真实体会，就像农夫在秋后与朋友一起谈论耕耘与收获。笔者在写作本书的过程中参阅了大量国内外文献资料，借鉴吸收了同类研究的最新成果，并尽可能详细注明这些文献的出处，以方便读者查阅，在此对这些文献的作者表示感谢。

感谢清华大学计算机科学与技术系史美林教授将笔者带入计算机网络与分布式系统前沿研究领域，导师的谆谆教诲，常常使我如沐春风，清华园的博士后研究经历给笔者留下的不只是美好回忆，而且真正成为不断滋润笔者人生的精神源泉。感谢清华大学计算机科学与技术系向勇副教授的大力支持，笔者与向勇副教授的科研合作非常愉快并富有成效，从 2003 年开始一直持续至今，共同承担了多项国家、省级科技计划项目，在车载自组织网络和分布式 workflow 系统研究方面取得重要进展，本书 5.2 节有关车载自组织网络的部分内容引用了合作项目的技术资料。感谢项目合作单位广州电子集团公司、广州无线电研究所提供项目研究试验条件。感谢广州市电子行业协会会长庞铁高级工程师对项目研究工作的关心和支持，笔者与庞铁高级工程师曾经在广州电子集团公司共事两年，当时他任集团

公司董事长兼总经理，笔者任集团公司总工程师，这是笔者职业生涯中的一段重要经历，将倍加珍惜并永远铭记这段美好时光。感谢广州无线电研究所许德兴所长对项目研究的支持与配合，笔者担任广州电子集团公司总工程师期间，由于工作关系，与许所长接触颇多，合作很默契。在重返高校工作后，笔者与许所长还共同主持了两项省、市科技计划项目，兄弟般的情谊弥足珍贵。笔者指导的硕士研究生潘逵、张卫刚、李永健、涂朝鑫、陆颖、朱二华等参加了项目研究工作，他们的学位论文选题均与移动自组织网络相关，笔者欣赏年轻人的勤奋与才华、成绩与潜力、谦虚与务实，他们的出色表现让笔者认识到“教学相长”的真谛，体会到教师职业的价值与乐趣。

由于笔者的学识与能力有限，加上计算机网络技术发展很快，对于一些新概念和新技术的理解可能并不准确，在某些问题上只能说是一孔之见或挂一漏万，不妥和错误之处在所难免，诚恳期待各位专家和读者朋友不吝赐教，对此深为感激。

许 骏

2018 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 移动自组织网络起源与发展	1
1.2 移动自组织网络体系结构	3
1.3 移动自组织网络应用现状	5
1.4 主要研究内容	9
第 2 章 移动自组织网络路由技术	16
2.1 路由度量	16
2.2 多路径路由	18
2.2.1 链路不相交多路径路由协议	19
2.2.2 节点不相交多路径路由协议	21
2.3 机会路由	23
2.4 拓扑控制	26
2.5 能量管理	28
2.6 服务质量	30
2.6.1 多径策略 QoS 路由协议	31
2.6.2 核心节点策略 QoS 路由协议	32
2.6.3 其他 QoS 保障策略	32
2.7 组播路由	33
2.7.1 泛洪路由	33
2.7.2 基于树型的组播路由	34
2.7.3 基于网格的组播路由	37
2.7.4 可靠组播路由	39
2.8 延迟容忍网络路由	41
2.8.1 基于复制的延迟容忍路由	42
2.8.2 基于知识的延迟容忍路由	44
第 3 章 单播路由协议算法	49
3.1 AODV 路由协议	49
3.1.1 路由协议相关术语及报文格式	49
3.1.2 路由建立与维护	53

3.2	跨层优化 AODV 路由协议	55
3.2.1	简单跨层 AODV 路由协议	56
3.2.2	动态跨层 AODV 路由协议	62
3.2.3	协议算法仿真及结果分析	64
3.3	单向链路 AODV 路由协议	69
3.3.1	单向链路及其对网络通信的影响	69
3.3.2	单向链路处理策略	70
3.3.3	协议算法设计与实现	71
3.3.4	协议算法仿真及结果分析	74
3.4	分簇路由协议	78
3.4.1	网络分簇及其算法	78
3.4.2	分簇算法设计与实现	80
3.4.3	典型分簇路由协议	86
3.4.4	基于权重的动态分簇算法	88
第 4 章	组播路由协议算法	98
4.1	组播技术	98
4.1.1	组播容量分析	98
4.1.2	资源分配与调度	100
4.1.3	接入控制	101
4.1.4	链路稳定性预测	102
4.2	典型组播路由协议	104
4.2.1	组播路由协议	104
4.2.2	可靠组播路由协议	116
4.2.3	单向链路组播路由协议	142
第 5 章	移动自组织网络的应用	155
5.1	网络实验环境与仿真平台	155
5.1.1	移动自组网实验环境	155
5.1.2	ODMA 组网技术及设备	156
5.1.3	天线技术及设备	159
5.1.4	自组织网络测试平台	159
5.2	车载自组织网络	161
5.2.1	现状及发展趋势	161
5.2.2	核心问题与关键技术	165
5.2.3	同步机制信道接入 MAC 协议	167
5.2.4	基于地理位置的路由协议	169

5.2.5	基于电子地图的路由协议	171
5.2.6	面向城市道路交通场景的路由协议	173
5.2.7	车载自组网示范应用系统	179
5.3	智能终端自组网	184
5.3.1	WLAN 高密接入问题与对策	185
5.3.2	教育应用场景智能终端自组网	186
5.3.3	智能终端自组网路由协议	186
参考文献		189
后记		205

第 1 章 绪 论

在无线网络通信技术领域，需要使用固定基础设施的移动通信技术已被广泛应用，但它不能适应某些特定环境及紧急事件，如自然灾害区域、偏远地区、临时会议及军事战场等。为了提供各种特定场景的通信服务，必须建立一个不依赖固定基础设施、可以迅速部署及灵活配置的移动网络通信系统，移动自组织网络（以下简称移动自组网）应运而生，为移动通信技术提供了一个新的发展空间。近年来，移动自组网受到高度关注，被认为是一种极具吸引力的未来移动通信网络架构^[1]。

移动自组网是一种在没有固定基础设施的条件下，由系统中的通信节点通过分布式协议互联的网络系统，具有无中心、节点对等、多跳，以及自发现、自配置、自组织、自愈等特点，能自动、快速地部署独立的通信网络或有效延伸已有通信网络的覆盖范围，在民用和军事方面均有广泛的应用前景，一直是计算机网络通信领域的研究热点。目前，国际或区域性的移动自组网学术会议日渐增多。我国也特别重视移动自组网技术，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》将自组织网络技术列为信息技术领域重点发展的三项前沿技术之一。

近年来，随着 P2P（peer to peer，点对点）等具有明显自组织特征网络的出现，自组织网络的概念逐渐宽泛化，已扩展到各种具有自组织特性的网络新理念、新技术和新设施研究与试验中。自组织网络与传感器技术相结合形成的无线传感网络（wireless sensor network，WSN），将深刻影响人与自然的交互方式，极大地扩展现有网络的功能和人类认识世界的能力。

本章主要对移动自组网的发展历程、特点和研究热点进行简要概述。

1.1 移动自组织网络起源与发展

移动自组网的起源可以追溯到 1968 年美国夏威夷大学的 ALOHA 网络研究计划和 1973 年美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Project Agency，DARPA）的分组无线网络（Packet Radio Network，PRNET）项目^[2]。ALOHA 网络研究最初是为了满足军事应用的需要，支持单跳分布式信道接入。PRNET 项目研究分组无线网络在战场环境中的数据通信应用，是移动自组网的第一代原型，但 PRNET 中的 PROP（packet radio organization packet，分组无线电组

织包)泛洪造成大量的控制数据包传输,影响了网络的可扩展性。DAPRA 在 1983 年启动了抗毁无线网络(Survivable Radio Network, SURAN)项目^[3],主要解决 PRNET 项目的遗留问题,研究开发能够适应战场快速变化环境的自适应网络算法。SURAN 是移动自组网的第二代原型。1994 年,美国 DARPA 启动了全球移动信息系统(Global Mobile Information Systems, GloMo)项目^[4],对能够满足军事应用需要、可快速灵活部署且具有高抗毁性的移动信息系统进行全面、深入研究,目的是解决移动、多跳和多媒体传输问题。1997 年,美国陆军开发的战术互联网(tactical Internet, TI)^[5]是迄今为止规模最大的移动自组网,它利用直接序列扩频的时分多址无线节点,使数据传输速率达到 10Kb/s 以上,各节点之间通信采用改进的互联网协议。

成立于 1991 年 5 月的 IEEE 802.11 标准委员会采用“Ad Hoc 网络”描述这种特殊的自组织、对等、多跳无线通信网络。互联网工程任务组(Internet Engineering Task Force, IETF)^①在 1997 年 6 月成立了移动自组网工作组,负责对具有数百个节点的移动自组网路由算法进行研究,并制定相应的技术标准。

由移动自组网的发展演变过程可以看出,它具有很强的军事应用背景。进入 21 世纪,美国 DARPA 还支持了多种移动自组网军事研究项目,例如未来作战系统(future combat system, FCS)^②、联合战术电台系统(joint tactical radio system, JTRS)^③和美国空军航空网特别工作组制定的《航空网络体系结构》^④,这些都与移动自组网相关。

20 世纪 90 年代以来,移动自组网研究从军事领域逐渐扩展到民用领域,从无线网络通信领域的一个分支逐渐发展到相对独立的研究领域,并迅速成为计算机网络通信领域的研究热点。许多国内外大学和科研机构都建立了移动自组网研究小组或专门实验室。Columbia 大学 INSIGNIA 项目组的主要研究方向为移动自组网路由服务质量(quality of service, QoS)保障,对移动自组网环境下支持 QoS 的框架进行了设计、实现和评估。Rice 大学 Monarch 项目组对移动网络通信框架进行研究,其目标是在任何时间、任何地点能够实现与移动节点、固定节点的无缝通信,主要研究内容包括移动自组网路由协议的设计与实现、网络性能评估、QoS 保障、安全协议和多播技术等^⑤。Cornell 大学无线网络实验室致力于无线通信协议和算法研究,其研究重点是路由协议、资源管理、介质访问控制

① 互联网工程任务组, <http://www.ietf.org>.

② 未来作战系统, <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/fcs.htm>.

③ 联合战术电台系统, <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/jtrs.htm>.

④ A View Of The Air Force In 2035, <https://defence.pk/pdf/threads/us-air-force-of-2035-future-operating-concept.397891/>.

⑤ The Rice University Monarch Project, <https://www.cs.rice.edu/~dbj/research.html>.

(media access control, MAC) 层协议、QoS 保障及安全算法等^①。Stanford 大学移动计算研究组主要关注增强网络节点之间合作通信的协议算法研究。加州大学洛杉矶分校无线自适应移动实验室的研究重点为移动自组网路由协议设计、实现和性能测试, 以及仿真平台的研究与设计^②。Illinois 大学移动环境实验室在移动自组网的 QoS 架构、协议和中间件等方面开展研究。Rutgers 大学无线信息网络实验室的研究方向为移动自组网路由安全协议。瑞士联邦支持的 Terminode 项目旨在研究和模拟大规模自组网环境, 内容包括跨层设计路由协议、移动管理、节点相互协作激励机制和安全策略等。加州大学圣塔芭芭拉分校的移动管理与网络实验室主要围绕路由、QoS 和多播技术等开展研究。美国 DARPA、朗讯通信公司、贝尔实验室等机构均在移动自组网研究和实验方面取得重要进展, 提出了多种路由方案建议, 并在此基础上构建实验网络^[6]。UCAN (unified cellular and ad hoc network architecture) 是美国贝尔实验室和加利福尼亚大学 Luo 等^[7]提出的一种支持多种通信模式的混合网络模型, 每个节点同时具备两种接口, 既支持 3G 蜂窝链路, 也支持基于 IEEE 802.11b 协议的点到点广播链路。也就是说, 用户终端与基站间交互的数据分组, 既可以通过用户终端与基站间的无线链路直接进行通信, 也可以先利用点到点的 IEEE 802.11b 广播信道多跳转发给代理用户, 再由代理用户与基站利用 3G 无线链路进行通信。实验结果显示, 基于 UCAN 的系统与 3G 通信系统相比, 单用户吞吐量提高 310%, 小区整体吞吐量提高 60%。

我国上海交通大学、北京理工大学、北京科技大学、中南大学、山东大学、国防科技大学等都设立了移动自组织网络实验室并取得一大批成果。例如, 国防科技大学 Zheng 等^[8]在分簇数据复制、域间路由系统研究领域取得重要成果; 北京理工大学刘玉龙和曹元大^[9]提出分布式网络环境中的主观信任模型; 山东大学秦志伟^[10]在移动自组网的信任任务调度研究方面取得进展; 中南大学谢铮等^[11]在 Ad Hoc 网络中的信任推荐及安全声誉等方面展开了相关研究。

1.2 移动自组织网络体系结构

移动自组网是由一组带有无线收发装置的移动终端节点组成的一个多跳临时性无中心网络^[1], 网络中的移动终端具备路由、寻址、安全、功率控制和带宽管理等网络功能, 而且终端之间的连接均为临时、按需建立, 在不可预知拓扑变化的移动网络结构中, 鲁棒性和灵活性是移动自组网的特色^[12]。移动自组网中的鲁棒性体现在用户终端都兼备独立路由和主机功能, 不存在网络中心控制节点, 不

① The wireless networks laboratory at Cornell university, <http://people.ecc.cornell.edu/haas/wnl/>.

② The UCLA wireless adaptive mobility laboratory, <http://www.cs.ucla.edu/NRL/Wireless/>.

同用户终端地位平等，网络路由协议通常采用分布式控制方式，路由容错能力强。移动自组网的灵活性则体现在可以在任何时刻、任何地点且不存在网络基础设施的情况下快速构建一个移动通信网络，典型的移动自组网拓扑结构如图 1-1 所示。

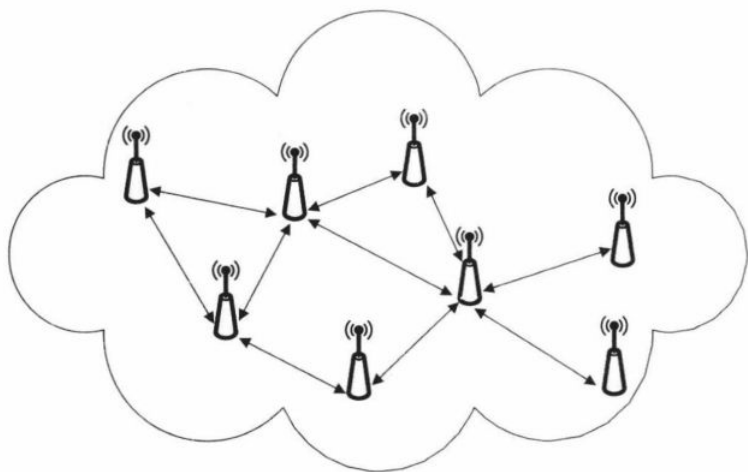


图 1-1 典型的移动自组网拓扑结构

与依赖基础设施的无线网络相比，移动自组网具有以下优点^[13]。

1) 不存在密集用户接入受限问题。移动自组网中的每个移动终端都具有路由功能，终端在加入网络时仅仅是周期性广播控制报文，告知邻居节点新加入终端的相关信息。当且仅当该终端需要发送报文时，才通过路由协议选择合适的路径进行报文传输。虽然在路由建立和维护过程中会增加一定的控制报文和延迟，但避免了网络的接入和认证过程，也就不会出现密集用户接入导致认证失败的问题。

2) 组网灵活。移动自组网不需要无线接入点（access point, AP）或基站子系统（base station subsystem, BSS）参与，能迅速部署和拆除，人为干预小且额外投资成本低。

3) 网络结构健壮。由于不需要集中控制、分级管理及分配机制，移动自组网特别适合动态无线网络环境，当网络中的一个或多个节点出现故障时，仍然能最大限度地保障整个网络的通信通畅。

4) 通信链路短。移动自组网中一跳范围内的终端节点通信，在其他无线网络中可能需要一个或者多个基站子系统（接入点）参与传输数据，路由代价更高。另外，多个无线接入点的同频干扰会降低无线网络实际可用带宽，但移动自组网不存在这种情况。

5) 支持多跳通信。由于移动终端发射功率的限制，无线覆盖范围有限。当与覆盖范围外的终端通信时，需要中间终端节点转发，即需要经过多跳通信。与一般通信网络的多跳不同，移动自组网中多跳路由过程不依赖专门的路由设备，由终端共同参与完成。当终端移动导致网络拓扑结构变化时，移动自组网能够自动

重构路由。图 1-2 展示了移动自组网的多跳通信功能，终端 A 要与终端 B 通信，但 B 不在 A 的通信范围内，于是便通过终端 C 作为中间终端与终端 B 通信，其中终端 C 充当路由器的角色。

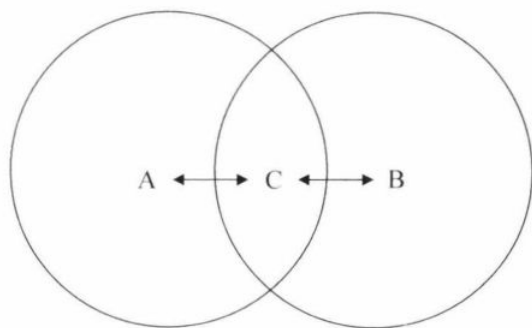


图 1-2 移动自组网多跳通信

6) 组网成本低。由于不需要额外投资建设固定基础设施，移动自组网的组网成本低廉。另外，移动自组网可以工作在免费频段，避免了网络流量成本。

7) 延伸已有通信网络的覆盖范围。移动自组网不仅可以用于没有基础设施或基础设施损坏等特殊场景的应急通信，还可以用于已有无无线网络扩大覆盖范围的有效补充。集成蜂窝与自组织中继 (integrated cellular and ad hoc relay, iCAR) 系统提供移动通信信号盲区的网络覆盖，实验证明，采用移动自组网实现信号盲区网络覆盖是延伸已有通信网络覆盖范围的一种有效方法^[14]。

移动自组网属于无基础设施的无线网络，无线传输是底层通信手段，无线信道的质量较差，多路访问、多径衰落、噪声和信号干扰等多种因素同时存在，因此，移动自组网终端通信的实际带宽与理论上的最大带宽值存在一定的差距，而且移动性导致网络拓扑结构动态变化，这些因素都使移动自组网的设计与实现存在挑战^[15]。

1.3 移动自组织网络应用现状

移动自组网不依赖固定基础设施，能自动、快速地部署独立的通信网络或有效延伸已有通信网络的覆盖范围，在民用和军事领域均有广泛的应用前景。在民用领域，移动自组网广泛应用于抢险救灾通信、信息家电互联、机器人集群通信、无线传感网络与大范围动态监控等场景，也是物联网中实现物品智能识别和管理的关键技术。在军事领域，移动自组网因其特有的无须架设网络设施、可快速部署及抗毁性强等特点，已成为数字化战场通信的首选技术，并发展为战术互联网的核心技术，可提高军用通信网络的可靠性和生存性。国外许多著名高校及科研机构纷纷设立移动自组网研究项目，并认为这是一种极具吸引力的未来移动通信

系统网络架构。近年来,移动自组网技术在两个方向得到发展与延伸:一个是军事和特定行业应用方向,产生了无线传感器网络;另一个是民用的接入网方向,出现了无线网格网(wireless mesh network, WMN)。具有动态组网以及高可靠性的移动自组织技术在集群智能系统中的作用也至关重要,例如集群无人机之间的信息传递就是基于个体之间的自组织网络实现的。按涉及领域不同,移动自组网应用可以分为以下几类。

(1) 军事应用

由于起步早、研究经费充足,移动自组网技术在军事领域的应用最为成功,较好地满足了信息战和数字化战场环境的需要,各种移动自组网设备广泛应用于单兵、车载、指挥控制等不同的场合。美国 DARPA 支持的小型部队作战态势感知系统项目,其目标是开发一种为徒步士兵提供态势感知信息的无线通信系统。2002 年,该项目成果展示了挑战环境下徒步士兵保持通信联络的能力,电台测距精度达到 4m。美国陆军使用单信道地面及机载无线通信系统、高频增强定位系统及数字电台等构成异构无线网络,用于装备“斯瑞克”旅战斗队,支持指挥与控制、数据库共享及态势分析等军事应用^①。

(2) 应急通信应用

移动自组网无须依赖预先架设的网络基础设施就可以快速自动组网,具有很强的抗毁性和灵活性,特别适合突发性、临时性通信应用场景。移动自组网应急通信系统主要用于解决各种应急条件下的可视化指挥、控制和通信问题。当发生突发事件时,在事发现场缺乏网络基础设施或网络基础设施已被毁坏的条件下,迅速组建一个灾害救援指挥通信网络,及时、迅速、准确、安全地传输现场实时信息,为处置各类突发事件提供有力的通信保障^[16]。

在灾害救援现场,固定的通信网络设施可能无法正常工作,移动自组网能够在这些恶劣和特殊环境下提供通信服务。例如,当警察或消防队员在事发现场执行紧急任务时,可以通过移动自组网方式快速部署现场应急通信指挥网络,以保障通信指挥的畅通。在偏远沙漠或野外森林,可能无法依赖固定或预设的网络设施进行通信,此时可以利用移动自组网技术构建临时通信网络,此类场景中的大部分应用如点对点消息、音视频会议等数据通信都发生在本地网络,如建立地震救援移动视频会议系统^[17]。在危险事发区域,可以部署移动机器人群体,这些机器人构成自组织网络实现相互通信和协调行动。

在灾害救援过程中,需要大量车辆运送物资到灾区,而灾区的道路往往遭到严重损坏,交通驾驶安全问题非常突出。此外,救援车辆之间也迫切需要一种安全、便携的通信协作方式。为此,可以利用移动自组网技术在车辆之间组建灵活

^① 美国“斯瑞克”旅战斗队, <https://baike.baidu.com/item/%E6%96%AF%E7%91%9E%E5%85%8B/1806130>。