

信息与通信网络技术丛书

无线Ad Hoc网络 移动模型大全

**The Encyclopedia of Wireless Ad
Hoc Network Mobility Model**

郭丽芳 李鸿燕 李艳萍 李瑞莲 ◎ 编著

国内权威的Ad Hoc网络移动模型参考书，
集全面和经典为一体



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

信息与通信网络技术丛书

无线Ad Hoc网络 移动模型大全

The Encyclopedia of Wireless Ad
Hoc Network Mobility Model

郭丽芳 李鸿燕 李艳萍 李瑞莲 ◎ 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

无线Ad Hoc网络移动模型大全 / 郭丽芳等编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2014. 6
(信息与通信网络技术丛书)
ISBN 978-7-115-34032-0

I. ①无… II. ①郭… III. ①无线电通信—移动网—
网络模型—文集 IV. ①TN929.5-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第294906号

内 容 提 要

本书概要介绍了无线 Ad Hoc 网络移动模型, 内容可以分为两个部分: 第一部分简要介绍了当前无线 Ad Hoc 网络研究所涵盖的一些主要问题, 第二部分主要阐述用于无线 Ad Hoc 网络的一些经典的移动模型。尽管到目前为止已经提出的无线 Ad Hoc 网络的移动模型有上百种, 但是主要可分为这样几类: 个体移动模型、群组移动模型以及基于社区的移动模型。本书重点介绍的是第一类——个体移动模型。这一类是在无线 Ad Hoc 网络相关问题的研究中使用最多的移动模型。

本书可供计算机、网络通信专业相关方向的高年级本科生、研究生、教师学习和参考, 也适合无线 Ad Hoc、无线传感器网络技术以及相关领域的科研和工程技术开发人员阅读与参考。

◆ 编 著 郭丽芳 李鸿燕 李艳萍 李瑞莲

责任编辑 李 强

责任印制 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京鑫正大印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 27.25

字数: 651 千字

印数: 1—1 500 册

2014 年 6 月第 1 版

2014 年 6 月北京第 1 次印刷

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



前言

移动 Ad Hoc 网络 (Mobile Ad Hoc Network, MANET) 又称为移动自组织网络, 或者称为移动多跳分组无线网络, 也有文献简称为无线 Ad Hoc 网络, 或简称为 Ad Hoc 网络, 本书称为无线 Ad Hoc 网络。无线 Ad Hoc 网络是一种移动通信和计算机网络相结合的网络, 属于移动计算机网络的一种, 用户终端可以在网内随意移动并保持通信。无线 Ad Hoc 网络是一种自治、多跳的分布式网络, 整个网络没有固定的基础设施, 能够在不能利用或不便利用现有网络基础设施 (如基站、访问接入点, 即 Access Point, 简称为 AP) 的情况下, 提供终端之间的相互通信。由于终端的发射功率和无线覆盖范围有限, 因此距离较远的两个终端如果要进行通信就必须借助于其他节点进行分组转发, 这样节点之间构成了一种无线多跳网络。

无线 Ad Hoc 网络中的移动终端具有路由和分组转发的功能, 可以通过无线连接构成任意的网络拓扑。移动自组织网络既可以作为单独的网络独立工作, 也可以以末端子网的形式接入现有网络, 如 Internet 和蜂窝网。由于无线 Ad Hoc 网络可在无基础设施的情况下进行通信, 从而弥补了无网络通信基础设施可使用的缺陷。无线 Ad Hoc 网络的特点是组网灵活性强、支持移动性、易于迅速展开、系统整体抗毁能力强以及系统成本低。

移动模型用于描述移动用户的行为模式, 包括他们的位置、速度、方向以及加速度的变化。根据实际移动轨迹来研究用户的移动性是最为准确的, 但是在研究中要依赖实际运行并记录用户每一次的移动轨迹来反映用户的移动规律是比较困难的, 所以多数研究选用合适的移动模型以代表现实节点的移动特点。移动模型被广泛应用于无线 Ad Hoc 网络的相关路由协议、算法的性能评价中。例如, 目前针对无线 Ad Hoc 网络已经提出的 MAC 协议、路由协议、广播算法、组播算法在不同的移动模型中可获得不同的分组投递率、平均端到端延迟和平均跳数等, 这些协议针对不同的移动模型及其所代表的应用场景各有优劣。

根据移动用户的特点, 可将移动模型中用户的移动性分成两大类: 自主移动和受控移动。自主移动代表了一种随机的、不受控制的移动, 比如, 战场上士兵追击敌人, 车辆在马路上行驶, 用户在商场购物等; 而受控移动代表了一种受控的、有目的的移动, 比如, 移动传感器和移动机器人等。在本书中重点介绍自主移动的节点行为。在不同场合下, 节点自主移动的具体特点有着显著差异, 需要建立相应的移动模型加以描述。通常, 节点的自主移动一般具有以下特点: 时间相关性、空间相关性和地理环境相关性。研究者们最初提出的一些移动模型, 如随机游走 (Random Walk) 模型、随机路点 (Random Waypoint, RWP) 模型、随机方向 (Random Direction) 模型等, 统称为随机移动模型。这些模型与实际环境中节点的真实

移动特征存在着差距,但是由于其原理简单,易于实现和便于理论分析的特点,得到了广泛的应用。在随机移动模型中,节点的速度和方向经常出现骤变,不符合真实环境中节点移动的时间相关性,为此研究者们提出了平滑移动模型,如高斯-马尔科夫(Gauss-Markov)模型、平滑随机(Smooth Random)模型等。在上述两大类移动模型中,移动节点相互独立,节点之间没有关联性,因而统称为个体移动模型。为了满足节点移动的空间相关性,人们提出了基于群组的移动模型,参考点(Reference Point)模型是这类移动模型的典型代表。上述移动模型没有考虑地形的限制作用,不具有地理环境相关性,没有考虑真实环境地形对节点移动和空间分布的制约,因此又称为理想移动模型。对于某些具体的应用场合,只依靠理想移动模型研究网络协议的性能较实际情况存在较大的误差。真实环境移动模型则解决了这个问题,如障碍物(Obstacle Mobility, OM)模型、基于图(Graph-Based)的移动模型、基于区域图(Area Graph-Based)的移动模型等。

本书系统地介绍了无线 Ad Hoc 网络目前所涉及的一些热点研究问题,重点介绍了一些广为使用的个体移动模型。其目的是为无线 Ad Hoc 网络的设计者、研究人员、院校师生以及所有对此感兴趣的读者全面与系统地掌握和理解无线 Ad Hoc 网络各种移动模型的特点,移动模型的建模、设计等提供一些帮助。

本书的编写安排如下。

第一部分:综述,包含第 1 章和第 2 章。在第 1 章重点介绍了目前针对无线 Ad Hoc 网络研究的一些热点问题,如拓扑控制、路由、服务质量、安全性及能耗管理等。第 2 章重点介绍了移动模型的分类、节点的移动性对无线 Ad Hoc 网络的影响、移动模型的度量指标以及移动模型对无线 Ad Hoc 网络的影响。第二部分:个体移动模型,包含第 3 章到第 12 章。

本书由太原理工大学的郭丽芳老师主持编写。太原理工大学的李艳萍老师负责本书第 1 章的 1.1~1.4 节和第 4 章的编写。太原理工大学的李鸿燕老师负责本书第 1 章 1.5~1.9 节和第 5 章的编写。太原理工大学的李瑞莲老师负责本书第 2 章和第 3 章的编写。郭丽芳老师完成本书剩余部分的编写工作,并负责全书的统稿。另外,还有一些老师对本书提出了有益意见,作者在此一并表示感谢。

本书的出版还受到了“太原理工大学 2012 年校青年基金(项目编号:No. 2012L089)”、“太原理工大学人才引进经费(项目编号:No. tyut-rc201171a)”和山西省自然科学基金(项目编号:No. 2013011016-1)等项目的一些资助,在此作者也表示感谢!

由于作者水平有限,本书难免有缺陷甚至错误,非常欢迎读者给予指正。作者联系邮箱:guolif@gmail.com。

目 录

第 1 章 无线 Ad Hoc 网络概述 1

1.1 简介 1

1.1.1 无线 Ad Hoc 网络的研究 现状及发展趋势 1

1.1.2 无线 Ad Hoc 网络的特点 1

1.1.3 无线 Ad Hoc 网络的体系 结构 3

1.1.4 无线 Ad Hoc 网络中的 问题 5

1.2 移动性 8

1.2.1 引言 8

1.2.2 节点移动性的分类 9

1.2.3 节点的自主移动性研究 9

1.2.4 节点的受控移动性研究 10

1.3 拓扑控制 12

1.3.1 引言 12

1.3.2 拓扑控制的分类 14

1.3.3 拓扑控制问题的研究 方法 15

1.3.4 拓扑控制的实现机制 17

1.3.5 现有的拓扑控制算法 18

1.4 路由 28

1.4.1 单播路由协议概述 28

1.4.2 无线 Ad Hoc 网络的典型 单播路由协议 31

1.4.3 组播路由协议概述 47

1.5 服务质量 (QoS) 54

1.5.1 引言 54

1.5.2 QoS 模型架构 55

1.5.3 QoS 和 MAC 57

1.5.4 QoS 路由协议简介 74

1.6 安全性 77

1.6.1 引言 77

1.6.2 密码技术 78

1.6.3 无线 Ad Hoc 网络的协议 攻击概述 79

1.6.4 无线 Ad Hoc 网络的路由 协议攻击分类 81

1.6.5 无线 Ad Hoc 网络的安全 路由协议 83

1.6.6 无线 Ad Hoc 网络的密钥 管理 86

1.7 能耗管理 92

1.7.1 引言 92

1.7.2 无线 Ad Hoc 网络节点的 能耗 92

1.7.3 无线 Ad Hoc 网络主要节 能策略 94

1.8 应用 100

1.8.1 移动多媒体通信系统 100

1.8.2 移动 P2P 技术在无线 Ad Hoc 网络中的应用 104

1.9 小结 107

参考文献 109

第 2 章 移动模型的特点 115

2.1 简介 115

2.2	移动模型的分类	117
2.3	节点的移动性对 MANET 路由 协议的影响	119
2.3.1	路由协议描述	119
2.3.2	移动模型描述	119
2.3.3	不同移动场景的设置	122
2.3.4	仿真结果及分析	123
2.4	移动模型的度量	126
2.4.1	移动性度量	127
2.4.2	图的连通性度量	128
2.4.3	基于移动模型的各种分 析及基础单元的分析	129
2.5	移动模型对 MANET 的影响	139
2.5.1	移动模型及其仿真方法	140
2.5.2	确定最优路径序列的 算法	142
2.5.3	仿真	144
2.5.4	跳数最少的移动路径	148
2.5.5	稳定的移动路径	150
2.5.6	路由寿命与跳数之间的 权衡	152
2.6	小结	154
	参考文献	155

第 3 章 随机路点 (Random Waypoint, RWP) 模型

3.1	简介	157
3.2	RWP 模型的特点	157
3.3	RWP 模型的随机过程	159
3.3.1	无暂停时间	160
3.3.2	有暂停时间	162
3.3.3	仿真结果	164
3.4	RWP 模型中的一些分布	168
3.4.1	过渡长度	169
3.4.2	持续时间	172
3.4.3	空间节点分布	175
3.4.4	移动方向	178
3.4.5	小区的切换率	180

3.5	RWP 模型的连通性	182
3.5.1	连通性的理论估计	183
3.5.2	联通时期的长度	185
3.5.3	连通性概率的实验 示例	185
3.5.4	联通时期的平均长度	187
3.6	RWP 模型的缺陷	188
3.6.1	平均节点速度衰减问题 分析	189
3.6.2	模型改进及仿真	194
3.6.3	模型的另类改进	198
3.7	小结	198
	参考文献	199

第 4 章 随机游走 (Random Walk, RW) 模型

4.1	简介	201
4.2	RW 模型的特点	203
4.3	RW 模型的静态分布	203
4.3.1	稳态时的链路分布	204
4.3.2	连续时间的稳态分布 估计	207
4.3.3	仿真结果	212
4.4	RW 模型的局限性	213
4.5	RW 模型的变体	214
4.5.1	概率型 RW 模型	214
4.5.2	相关 RW 模型	215
4.6	小结	219
	参考文献	219

第 5 章 随机方向 (Random Direction, RD) 模型

5.1	简介	221
5.2	RD 模型的特点	222
5.3	RD 模型的分布问题和特性	222
5.3.1	RD 模型的节点空间概率 分布	222
5.3.2	RD 模型的特性	227
5.4	基于 RD 模型的路由稳定性	241
5.4.1	在 RD 模型中链路的可用	

性及链路的持续时间	242	7.5.4 在无竞争情况下支持移动性的路由	286
5.4.2 多跳路径	248	7.5.5 在有竞争情况下支持移动性的路由	287
5.5 小结	250	7.6 小结	289
参考文献	251	参考文献	290
第 6 章 随机旅行 (Random Trip, RT) 模型	252	第 8 章 高斯-马尔科夫 (Gauss-Markov, GM) 模型	291
6.1 简介	252	8.1 简介	291
6.2 RT 模型的特点和举例	254	8.2 GM 模型的特点	291
6.2.1 RT 模型的特点	254	8.3 GM 模型分析	294
6.2.2 RT 模型举例	256	8.3.1 GM 模型的移动跟踪	294
6.3 RT 模型的平稳性和收敛性	262	8.3.2 GM 模型的参数估计	296
6.3.1 平稳分布	263	8.3.3 仿真结果与比较	299
6.3.2 应用实例	263	8.3.4 GM 模型与随机路点 (RWP) 模型的比较	303
6.4 小结	269	8.4 小结	303
参考文献	269	参考文献	304
第 7 章 平滑随机移动 (Smooth Random Mobility, SRM) 模型	270	第 9 章 半马尔科夫平滑 (Semi-Markov Smooth, SMS) 模型	305
7.1 简介	270	9.1 简介	305
7.2 SRM 模型的特点	270	9.2 SMS 模型的特点	305
7.3 SRM 模型中的节点速度及方向	271	9.3 SMS 模型中的数学建模	307
7.3.1 节点间的速度与方向控制	271	9.3.1 SMS 模型的更新过程	307
7.3.2 节点的速度与方向变化之间的相关性	275	9.3.2 SMS 模型的半马尔科夫过程	308
7.4 SRM 模型中的一些统计量	276	9.3.3 SMS 模型的随机特性	309
7.4.1 移动节点间的首达时间	278	9.3.4 平稳状态分析	318
7.4.2 移动节点间的相遇时间	279	9.4 SMS 模型中的一些仿真结果	322
7.4.3 移动节点间的内部相遇时间	280	9.4.1 空间节点的分布	323
7.4.4 移动节点间的联络时间	280	9.4.2 节点的平均速度	326
7.5 SRM 模型的性能分析	285	9.4.3 节点的移动过程	327
7.5.1 仿真环境	285	9.5 SMS 模型的一些应用	328
7.5.2 首达时间和相遇时间的仿真结果	286	9.5.1 路由性能	328
7.5.3 联络时间及相遇间隔时间的仿真结果	286	9.5.2 网络的连接性	330
		9.5.3 可适用于群移动模型	331
		9.6 小结	332

参考文献	332	12.1.3	交通流的基本参数	378
第 10 章 流体流动 (Fluid Flow, FF) 模型	334	12.2	车载移动模型	378
10.1 简介	334	12.2.1	高速公路移动 (Freeway Mobility, FM) 模型	379
10.2 FF 模型的特点	334	12.2.2	曼哈顿网格移动 (Manhattan Grid Mobility, MGM) 模型	381
10.2.1 经典的 FF 模型的特点	334	12.2.3	LWR (Lighthill-Whitham-Richards) 模型	382
10.2.2 动态的 FF 模型的特点	335	12.2.4	车辆跟驰移动 (Car-Following Mobility, CFM) 模型	383
10.3 FF 模型的应用	335	12.2.5	城市交通流仿真器	390
10.3.1 应用于蜂窝无线网络	336	12.2.6	VanetMobiSim 模型	392
10.3.2 应用于无线自组织网络	345	12.2.7	车载移动模型对无线 Ad Hoc 网络的影响	395
10.4 小结	353	12.3	有障碍存在的移动 (Obstacle Mobility, OM) 模型	403
参考文献	353	12.3.1	障碍构建	404
第 11 章 无仿真边界 (Boundless Simulation Area, BSA) 移动模型	354	12.3.2	基于 Voronoi 棋盘型格局的人行道	404
11.1 简介	354	12.3.3	节点移动性的变化	407
11.2 BSA 移动模型的特点	354	12.3.4	仿真环境及结果	408
11.3 BSA 移动模型的评测	356	12.4	在社区范围内的带有障碍物的移动 (Community-based Obstacle Mobility, COM) 模型	416
11.4 BSA 移动模型的应用	357	12.4.1	COM 模型的特征	417
11.4.1 区域路由协议 (ZRP)	357	12.4.2	移动控制原则	417
11.4.2 使用 BSA 移动模型对 ZRP 进行仿真	358	12.4.3	暂停时间原则	419
11.4.3 网络连接的稳定性	360	12.4.4	仿真场景及结果分析	420
11.5 小结	369	12.5	小结	422
参考文献	369	参考文献		423
第 12 章 地域受限移动 (Geographic Constraint Mobility, GCM) 模型	371			
12.1 简介	371			
12.1.1 车载移动模型的框架和特征	372			
12.1.2 车载移动模型的分类	377			

第 1 章

无线 Ad Hoc 网络概述

1.1 简介

1.1.1 无线 Ad Hoc 网络的研究现状及发展趋势

到目前为止，无线 Ad Hoc 网络技术已经有 40 多年的发展历史，IEEE 802.11 标准委员会于 1991 年正式用 Ad Hoc 来描述这种特殊的无线移动通信网络。由于无线 Ad Hoc 网络最初是为军事通信应用而设计的，所以这种特殊的无线通信网络直到 20 世纪 90 年代后期才逐渐为人们所了解和关注。

无线 Ad Hoc 网络的前身是分组无线网络（Packet Radio Network, PRNET）。1972 年，美国 DARPA（Defense Advanced Research Project Agency）就启动了 PRNET 项目。PRNET 的研究目标是将数据分组交换技术引入无线环境中，开发军用无线数据分组网络。PRNET 是多跳网络，提供集中式和分布式的操作管理机制。正是由于 PRNET 的研制成功，人们才认识到多跳技术能够提高网络容量。PRNET 采用分布式体系结构，中心控制成分达到最低程度。PRNET 的成功证明了无线 Ad Hoc 网络思想的可行性。

1983 年，美国 DARPA 又开发了抗毁性自适应网络（Survivable Adaptive Network, SURAN）项目，主要解决 PRNET 遗留的问题和网络扩展性。SURAN 的主要研究目标是开发网络算法，采用这些网络算法使网络能够扩大到数万个节点。

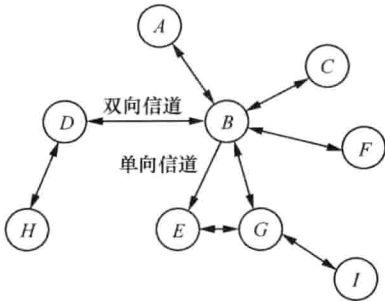
到了 20 世纪 80 年代后期和 90 年代初期，随着软硬件技术的快速发展，计算机网络和移动通信等技术逐渐成熟。为了使全球信息基础设施支持无线移动环境，1994 年，美国 DARPA 启动了全球移动信息系统（Global Mobile information system, GloMo）项目，对能够满足军事应用需要的、可快速展开、高抗毁性的移动信息系统进行全面深入的研究。

现在，无线 Ad Hoc 网络已经逐步走向成熟。由于无线 Ad Hoc 网络逐渐开始采用 TCP/IP 等标准的商用网络协议，加上其应用领域也逐渐从军事应用向民用扩展，越来越多的人参与到了对无线 Ad Hoc 网络技术的研究工作中。研究的方向涉及了无线 Ad Hoc 网络技术的方方面面，涵盖了信道技术、接入技术、组网、网络管理、服务质量、网络安全、节能等。

1.1.2 无线 Ad Hoc 网络的特点

无线 Ad Hoc 网络中，每个节点兼备路由器和主机两种功能：作为主机，节点需要运行

面向用户的应用程序；作为路由器，节点需要运行相应的路由协议，根据路由策略和路由表参与分组转发和路由维护工作。无线 Ad Hoc 网络中所有节点的地位平等，无需设置任何中心控制节点，具有很强的抗毁性。当通信的源节点和目的节点不在直接通信范围之内时，它们可以通过中间节点转发报文进行通信。有时节点间的通信可能要经过多个中间节点的转发，即报文要经过多跳才能到达目的地，这是无线 Ad Hoc 网络与其他移动通信网络的最根本区别。



典型的无线 Ad Hoc 网络如图 1.1 所示。在图中，节点 A 和 I 无法直接通信，但可以通过路径 $A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow I$ 进行通信。

无线 Ad Hoc 网络节点配备有无线发射机、无线接收机、天线（可能是全向的——广播、高定向的——点对点、易于操控，或者某些组合）。在一定时刻，根据节点的位置及其发射机和接收机的覆盖区域、发射功率等级、同频信道干扰程度，按照随机、多跳方式或者无线 Ad Hoc 网络方式，实现节点之间的无线连接。节点移动或者调整发射功率和接收参数，会使 Ad Hoc 拓扑随着时间的推移而变化。

从前面的描述中可以看到，无线 Ad Hoc 网络主要具有以下特点。

(1) 无中心

无线 Ad Hoc 网络采用无中心结构，所有节点的地位平等，即一个对等式网络，其中的节点可以随时加入和离开网络，任意节点的故障不会影响整个网络的运行。与有中心的网络相比，无线 Ad Hoc 网络具有很强的抗毁性。

(2) 自组织

无线 Ad Hoc 网络没有严格的控制中心，所有的节点通过分层的网络协议和分布式算法相互协调，无需人工干预和任何其他预先设置的网络设施，实现网络的自动组织和运行。无中心和自组织的特点使得无线 Ad Hoc 网络可以在任何时候、任何地点快速自动组网。

(3) 分布式操作

由于无线 Ad Hoc 网络节点不能够依靠固定基础设施或者中心管理，所以无线 Ad Hoc 网络节点必然是分布式的。由于当前的大多数通信系统，包括电信通信网络和部分 Internet 服务都是集中式的，所以对当前的网络功能必须重新设计才能够应用到分布式环境中。例如，这些功能包括寻址和认证。

(4) 多跳路由

无线 Ad Hoc 网络中节点的发射功率和覆盖范围都是有限的。当节点要与其覆盖范围之外的节点进行通信时，需要中间节点的转发，即要经过多跳。与普通网络中的多跳不同，无线 Ad Hoc 网络中的多跳路由是由普通节点共同协作完成的，而不是由专用的路由设备完成的，这样节点的发射功率可以很低。因此，必须设计高效的无线多跳路由协议。

(5) 存在单向无线信道

无线 Ad Hoc 网络采用无线通信信道，地形或发射功率等因素使得无线 Ad Hoc 网络中可能存在单向无线信道。例如，车载终端的发送功率大于手持终端，手持终端可以收到来自车载终端的信号，而车载终端无法收到来自手持终端的信号，即存在从车载终端到手持终端的单向信道。这些单向信道为常规路由协议带来 3 个严重的影响：认知单向性、路由单向性和

汇点不可达。

(6) 带宽有限、链路容量易变

无线 Ad Hoc 网络采用无线传输技术作为底层通信手段,由于无线信道本身的物理特性,它所能提供的网络带宽相对于有线信道要低得多,并且无线信道的质量较差。此外,无线环境具有带宽有限、比特误码率高、链路质量和链路容量起伏波动等问题。考虑到多址访问、衰落、噪声、环境干扰等因素的影响后,无线通信的实际吞吐量常常比最大无线传输速率低得多。

(7) 移动性与网络拓扑动态性

无线 Ad Hoc 网络节点自由地任意移动,这必然导致网络拓扑动态变化。因此,网络拓扑可能随机、迅速、不可预测地变化,并且可能由双向链和单向链组成。移动首先限制了网络扩展性,必须开发更为合适的路由协议。

(8) 设备限制

假如不考虑诸如汽车、舰船以及战士之类的不同传达手段,那么剩下需要考虑的就是诸如传感器之类的手持设备,或者更小的设备。这些小设备受到设备本身的若干特性的限制,包括电池容量、设备的处理能力,这些限制还对协议设计和应用设计提出了一些要求。因此,最重要的系统设计优化准则可能是节能。

(9) 安全性差

无线 Ad Hoc 网络是一种特殊的无线移动网络,由于采用无线信道、有限电源和分布式控制等技术,它更加容易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务等网络攻击。另外,无线 Ad Hoc 网络由节点自身充当路由器,不存在命名服务器和目录服务器等网络设施,也不存在网络边界的概念,这就使得无线 Ad Hoc 网络中的安全问题非常复杂,传统网络中的许多安全策略和机制将不再适用。因此,信道加密、抗干扰、用户认证、密钥管理、访问控制和其他安全措施都需要特别考虑。

1.1.3 无线 Ad Hoc 网络的体系结构

无线 Ad Hoc 网络采用的是分布式控制方式,并且节点具有自组织功能。分布式控制就是将网络的控制功能分散到多个节点或全部节点中,而节点的自组织功能是指节点在网络拓扑结构变化的情况下可以自动地探测网络拓扑信息,动态确定传输路由和选择工作参数,从而实现网络的控制和管理。无线 Ad Hoc 网络的体系结构和设计方法应充分考虑网络的自组织特性和特殊的应用环境。

(1) 节点结构

无线 Ad Hoc 网络节点同时具有移动节点和路由器的功能,因此,就完成的功能而言,可以将节点分为主机、路由器和电台 3 个部分。其中,主机部分完成普通移动终端的功能,包括人机接口、数据处理等应用软件;路由器部分主要负责维护网络的拓扑结构和路由信息,完成报文的转发功能;电台部分为信息传输提供无线信道支持。

从物理结构上分,节点可以分为以下几类:单主机单电台、单主机多电台、多主机单电台和多主机多电台,如图 1.2 所示。手持机一般采用图 1.2 (a) 所示的单主机单电台的简单结构。对于需要在两个或多个网络互通的中继节点,可采用图 1.2 (b) 所示的单主机多电台的结构。作为复杂的车载台,一个节点可能包括通信车内的多个主机,这可以采用图 1.2 (c) 所示的结构,以实现多个主机共享一个电台或像图 1.2 (d) 所示的多个电台。

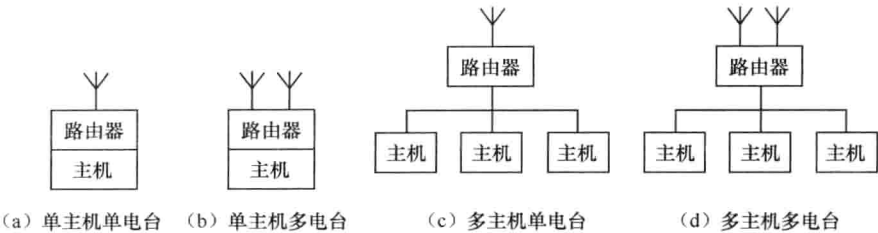


图 1.2 无线 Ad Hoc 网络的节点结构

(2) 网络结构

无线 Ad Hoc 网络一般采用分布式控制结构，即完全分布式网络结构和分层分布式控制网络结构。这两种网络结构又分别称为平面结构和分级结构。

平面结构的无线 Ad Hoc 网络如图 1.3 所示。网络中所有节点在网络控制、路由选择和流量管理上都是平等的，所以又可以称为对等式结构。平面结构网络的特点是比较简单，不需要任何结构维护过程，并且网络在源节点和目的节点之间一般存在多条路径，因此，一方面，可以选择一条最好路径传输分组，充分地利用网络带宽；另一方面，可以较好地实现负载平衡和选择最优化的路由。网络中所有节点对等，理论上不存在瓶颈，网络比较健壮。同时，平面结构中节点覆盖范围较小，相对较安全。其缺点是网络规模受限，可扩充性差。网络规模越大，路由维护和网络管理的开销就越大。当平面结构网络的规模增加到某个程度时，所有的带宽都可能会被路由协议消耗掉。

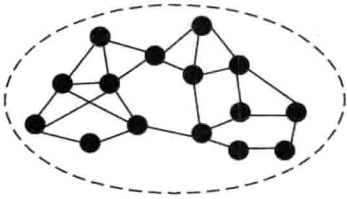


图 1.3 平面结构的无线 Ad Hoc 网络

分级结构的无线 Ad Hoc 网络被划分为簇 (Cluster)。每个簇由一个簇头 (Cluster-head) 和多个簇成员 (Cluster-member) 组成。这些簇头形成高一级的网络。在高一级的网络中，又可以分簇，再次形成更高一级的网络，直到最高级。在分级结构中，簇头节点负责簇间数据的转发，它可以预先指定，也可以由节点使用算法选举产生。

根据不同的硬件配置，分级结构的网络又可以分为单频率分级和多频率分级两种。这里的频率应理解为信道。

单频分级网络如图 1.4 所示，所有节点使用同一个频率通信。为了实现簇头之间的通信，要有网关节点的支持，网关节点是指同时属于两个簇的节点。簇头和网关节点形成高一级的网络，称为虚拟骨干网络。

多频分级网络如图 1.5 所示，不同级采用不同的通信频率。低级节点的通信范围较小，而高级节点要覆盖较大的范围。高级的节点同时处于多个级中，使用多个频率，用不同的频率实现不同级的通信。在图 1.5 所示的两级网络中，簇头节点有两个频率。频率 1 用于簇头和簇成员的通信，而频率 2 用于簇头之间的通信。

分级结构网络的优点在于簇成员的功能比较简单，不需要维护复杂的路由信息，这大大减少了网络中路由控制信息的数量；具有很好的可扩充性，网络规模不受限制。可以简单地通过增加簇的个数和网络的级数来增加网络的规模，簇头节点可以随时选举产生，分级结构也具有很强的抗毁性。

分级结构网络也有它的缺点。首先，维护分级结构需要节点执行簇头选择算法和簇

维护机制，增加了计算的复杂性。其次，作为集中转发点的簇头节点任务相对较重，可能成为网络的瓶颈。最后，簇间的路由不一定是最佳路由。比如，不同簇中但互为邻居的节点，在平面结构中可以直接通信，但分簇后要通过两个簇的簇头转发，这可能会增加报文的时延。

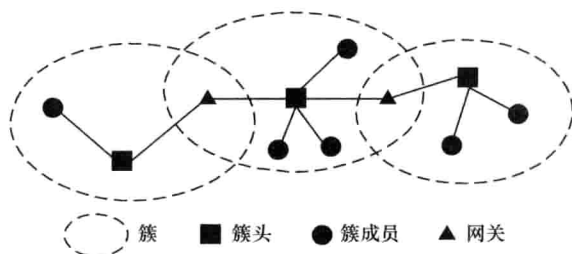


图 1.4 单频分级网络

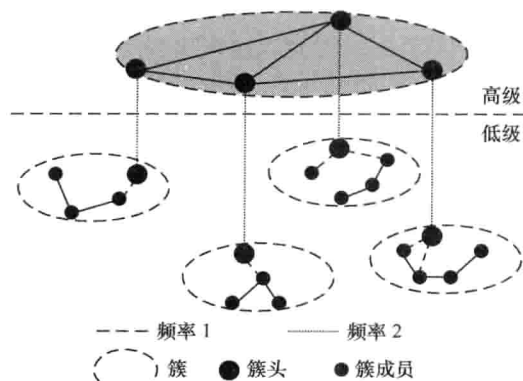


图 1.5 多频分级网络

总之，当网络的规模较小时，可以采用简单的平面结构；而当网络的规模较大时，宜采用分级结构。

1.1.4 无线 Ad Hoc 网络中的问题

近年来的多项研究已表明无线 Ad Hoc 网络能够满足人们将来通信的很多需求。无线短距离通信装置可以嵌入到很多产品中,几乎每个人都将携带一个无线交流器。这就给无线 Ad Hoc 网络提供了应用的可能性。但无线 Ad Hoc 网络仍有很多问题有待解决,所以无线 Ad Hoc 网络还面临着很多的挑战和问题。

(1) 消费者应用

无线 Ad Hoc 网络在消费者市场很有潜力，但是在这种可能性变成现实之前还有很多难点必须解决。只使用网络而不依靠其他传输来测定移动节点的位置非常困难。因此，消费者特别应该有目的地进行协作。目前对此还没有很好的解决方法，但是，假如电子兑现变得更加普遍，那么电子兑现可能就是一种解决方法。当前不存在移动 Ad Hoc 网络的覆盖范围问题，即使在移动 Ad Hoc 网络登陆大市场之后，其覆盖范围也是不规则的。这是一个真正的鸡与蛋的问题，这是因为节点密度太低根本不能形成网络的缘故，故可以先从小规模的个人 Ad Hoc 网络（Personal Ad Hoc Network，PAN）开始发展，它不需要与较大的网络交互。

(2) 与其他网络互联

在实际的无线 Ad Hoc 网络应用中存在以下需求：移动终端要访问有线网络中的资源，如 Internet 上的 WWW 服务、FTP 服务；位于不同无线 Ad Hoc 网络的移动终端之间进行通信等。很多情况下，仅仅依靠独立无线 Ad Hoc 网络已经无法满足用户需求，无线 Ad Hoc 网络只有与其他网络实现互联互通才能真正发挥各个网络的潜能，进而提高移动用户的自主移动和信息获取能力。尽管从网络观点来看这是有利的，但是从边缘节点来看却是非常麻烦的，尤其是对于能量很宝贵的手持装置。

图 1.6 (a) 所示为多个同类无线 Ad Hoc 网络的互联举例，这为分散在不同地理位置上的工作小组或移动用户提供了协同通信和信息共享能力。图 1.6 (b) 所示为无线 Ad Hoc 网络与有线网络/无线网络的互联，这时的无线 Ad Hoc 通常作为末端子网使用，这种形式的互联主要用于满足无线 Ad Hoc 网络的移动终端访问有线网络资源的需求，且当无线 Ad Hoc 网络与非 TCP/IP 网络（如 X.25 网络）互联时，常常需要采用协议转换网关。图 1.6 (c) 所示为通过隧道方式进行网络互联，这种互联形式利用现有网络（如 Internet 或 GSM）作为信息传输系统，将位于不同地理位置的无线 Ad Hoc 网络通过隧道方式组成一个更大的“虚拟”无线 Ad Hoc 网络。

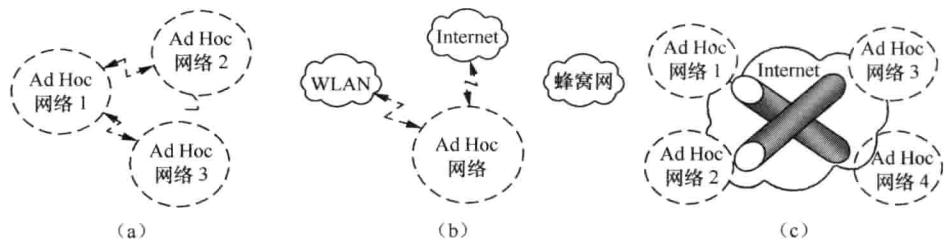


图 1.6 无线 Ad Hoc 网络互联的例子

此外，还可以组合以上 3 种互联方式，以便构成更为通用的网络互联形式。以上 3 种互联方式都是可行的，并已经在一些实际工程中得到应用。

在网络互联中，存在的问题是：无线 Ad Hoc 网络中的寻址和选择路由。Internet 中的 IP 地址是分级的，包括网络地址和主机地址。位于相同网络的主机具有相同的网络地址，从而简化了路由处理。路由信息可以聚集，每个路由表项可以处理具有相同网络地址的所有主机。在 Internet 中，可以使用一条路由到一个目的网络而不是该网络中的每个主机，并且在必要时可以使用默认路由。而无线 Ad Hoc 网络不具备这些特征，它一般作为相对独立的临时性网络存在，节点可以随时加入和离开网络，并且节点可以使用任何地址。因此，在无线 Ad Hoc 网络中不能通过网络地址来判断节点是否属于同一个网络（或是否属于无线 Ad Hoc 网络），即地址不再具有分级结构，也不再存在默认路由。路由只能通过目的主机来确定，并且为了减少周期性交互路由信息引入的开销，常常使用反应式路由，这使得节点事先无法知道到其他所有节点的路由。为了可以与 Internet 上的主机通信，无线 Ad Hoc 网络内的移动节点需要一个可以被 Internet 主机寻址的 IP 地址。也就是说，无线 Ad Hoc 网络中至少要有一个节点具有 Internet 可选择路由的 IP 地址，通常这个节点位于无线 Ad Hoc 网络的边缘，并作为无线 Ad Hoc 网络和 Internet 的网关节点。

目前，常用的解决方案有两种：①基于移动无线路由器的解决方法；②基于移动 IP 的网络互联方案。无线 Ad Hoc 网络使移动主机在网络内具有移动能力，而移动 IP 机制可以使移动主机在网络间无缝漫游。通过有机结合无线 Ad Hoc 网络技术和改进的移动 IP，可以使移动节点享用扩展的 IP 移动服务，而无需对 Internet 和中间传输网络做特殊要求。利用移动无线路由器来实现网络互联的方法已经在实践中得以应用，而基于修改的移动 IP 目前仍处于理论讨论和试验阶段。移动 IP 已经成为有线互联网的标准协议，可以预见，这种基于移动 IP 的互联方法将会在实际工程中得到更多的应用。

(3) 带宽有限

无线 Ad Hoc 网络与有线的固定连接相比，无线带宽是一种非常宝贵的资源。除了有效

数据传输速率较低以外,还引起了路由协议设计的问题,因为带宽必须尽可能多地留给真正的数据传输。另外,无线网络与有线网络不同的是,在传输范围内的节点间存在相互冲突,即空间依赖。

由于考虑到无线 Ad Hoc 网络带宽的有限性,所以对其带宽分配机制可从这几个方面考虑。①基于公平的带宽分配机制。该机制是使网络中节点之间公平地达到带宽分配。常见的公平指标有:最大/最小公平性准则、比例公平性准则及加权公平性准则等。②基于效率的带宽分配机制。带宽分配的效率是指网络的带宽只受链路容量的限制,没有被浪费,一般用网络的吞吐量衡量效率的高低,也有通过价格、效用函数、速率等指标最大化网络的效率,最终实现资源的有效分配的情况。这种机制在某种程度上失去了带宽分配的公平性,其效用函数的选择、价格的确定等是有待解决的问题。③基于公平与效率的带宽分配机制。它是将前两者兼顾考虑的分配机制。

目前,无线 Ad Hoc 网络带宽分配机制的研究趋势及存在的问题如下。

① 带能量约束的无线 Ad Hoc 网络带宽分配机制。无线 Ad Hoc 网络节点能量直接影响其网络寿命,已提出的多种带宽分配机制大多没有较好地考虑其能耗问题。

② 分簇结构的无线 Ad Hoc 网络带宽分配机制。通过分簇技术可将具有相同性质的节点组成簇,利用簇中节点的协同合作可以提升网络的可扩展性、优化网络的整体性能,并能很好地解决相关的资源管理问题。

③ 面向 QoS 的无线 Ad Hoc 网络带宽分配机制。随着多媒体的广泛应用及无线 Ad Hoc 网络在商业应用的进展,在语音、视频等对数据流的实时性要求较高的多媒体应用业务中,用户对延迟、丢包等的要求都是不容忽视的问题。

④ 支持资源预留的无线 Ad Hoc 网络带宽分配机制。资源预留可在资源难以满足所有应用需求的条件下保证部分作业的服务质量,是资源管理和分配的重要手段。

(4) 扩展性

动态网络拓扑可能缺乏累加性引起了直接扩展性问题。缺乏累加导致路由表更大。节点移动甚至是一个更大的问题。因为节点移动会使路由信息发生变化,而为了维护路由表就必须将控制信息发送到网络中。当节点相互之间快速移动的时候,还必须发送更多的控制信息。控制信息的增多减少了有效带宽,这就限制了网络扩展性。所发送的控制信息的数量依赖所使用的具体算法,并且影响某些其他问题,如收敛时间长,或者时延太大。

网络扩展性不仅受到节点移动的影响,而且还受到具体应用的时延要求的影响。因此,只要带宽、收敛、时延问题是可控制的扩展,那么就是可扩展的。

(5) 电池能量极其有限

大多数无线 Ad Hoc 网络设备都是小体积的手持式装置,其电池供电能力极其有限。例如,在传感器应用中,电池甚至决定一个设备应用的寿命。因此,电池能量的应用也是要研究的关键问题之一。

首先,分组转发功率很大。因此,这就对移动节点将自己作为中间节点转发起了限制作用。但是,转发节点实际是必须的,因为如果没有有效的转发节点,那么无线 Ad Hoc 网络就不能工作。在消费者应用中,这个问题还会导致节点试图获取免费的网络服务,而自己不会提供转发服务。

通过改变发射功率可以控制电池的使用。尽管使用较小的发射功率会引起多跳的问题,但是

可以节省能量。多跳网络使得路由算法更加苛刻,其操作需要消耗更多的功率,这又是无线 Ad Hoc 网络的另一个主要的功率消耗问题。

按需发送路由信息,或者不要频繁地发送路由信息也可以节省能量。路由更新频率与电池能量使用之间的平衡考虑是工程设计的主要部分之一,因为无线 Ad Hoc 网络路由协议的路由更新频率较低,常常导致时延变长。通过开发其他技术来控制能量的使用,如采取休眠方式等,也不失为好的途径。

(6) 安全性

无线 Ad Hoc 网络的许多特点使得其在所有层次上都存在特别脆弱的安全问题。无线 Ad Hoc 网络使用开放媒介,网络拓扑的动态变化性,以及协作算法和缺乏集中式基础设施等使得固定网络机制无法应用到无线 Ad Hoc 网络环境中去,故无线 Ad Hoc 网络面临以下几方面的安全性问题。

① 无线链路使无线 Ad Hoc 网络容易受到链路层的攻击,包括被动窃听和主动假冒、信息重放和信息破坏。无线媒介使得无线 Ad Hoc 网络在面对从被动窃听到主动干扰范围内的许多攻击时显得非常脆弱。无线 Ad Hoc 网络没有一定的保护机制会很难防御这些攻击,因此任何一个节点都需要为防御直接攻击和间接攻击做准备。

② 无线 Ad Hoc 网络的节点是自治的,能够独立地到处随机游动,这就使得自己变成比较容易被捕捉的目标。与固定网络相比较,被捕捉的节点更难被检测出来,这是因为无线 Ad Hoc 网络的协作特性而使得攻击造成的损害可能非常严重。例如,节点在敌方环境(如战场)漫游时缺乏物理保护,使网络容易受到已经泄密的内部节点(而不仅仅是外部节点)的攻击,采用分布式的网络体系结构可以提高无线 Ad Hoc 网络的生存能力。

③ 无线 Ad Hoc 网络的拓扑和成员经常改变,节点间的信任关系经常变化,与移动 IP 相比,无线 Ad Hoc 网络没有值得信任的第三方证书的帮助,在节点间建立信任关系成为无线 Ad Hoc 网络安全的核心问题。

总之,无线 Ad Hoc 网络中的信息能够在终端用户完全不知情的情况下被窃听、被篡改。所发送的信息可能正在经过多个不可信赖的节点。无线 Ad Hoc 网络的协议是相互协作、共同完成的,这使得整个无线 Ad Hoc 网络更加脆弱,尤其是目前的设备还没有性能良好的认证机制来对某个特定用户的特定设备进行认证。由于无线 Ad Hoc 网络包含成百上千个节点,因此需要采用具有扩展性的安全机制。

1.2 移动性

1.2.1 引言

无线 Ad Hoc 网络的特点决定了其一般应用在一些应急、临时场合中,如战场、灾难救助等。在这些应用场合中,一般地形较为复杂、情况变化较快,对网络通信的性能要求也较高,为保证网络高效、稳定的运行,必须对网络进行运行前的静态规划和运行中的动态拓扑重构。由于难以得到实际的网络运行数据,静态规划只能通过模拟仿真来完成。在模拟仿真过程中,采用的节点移动模型是否符合实际环境,将会直接影响到静态规划结果是否合理。节点移动会受到任务类型和地理环境的影响与制约,并且会影响网络通信的性能,这种影响