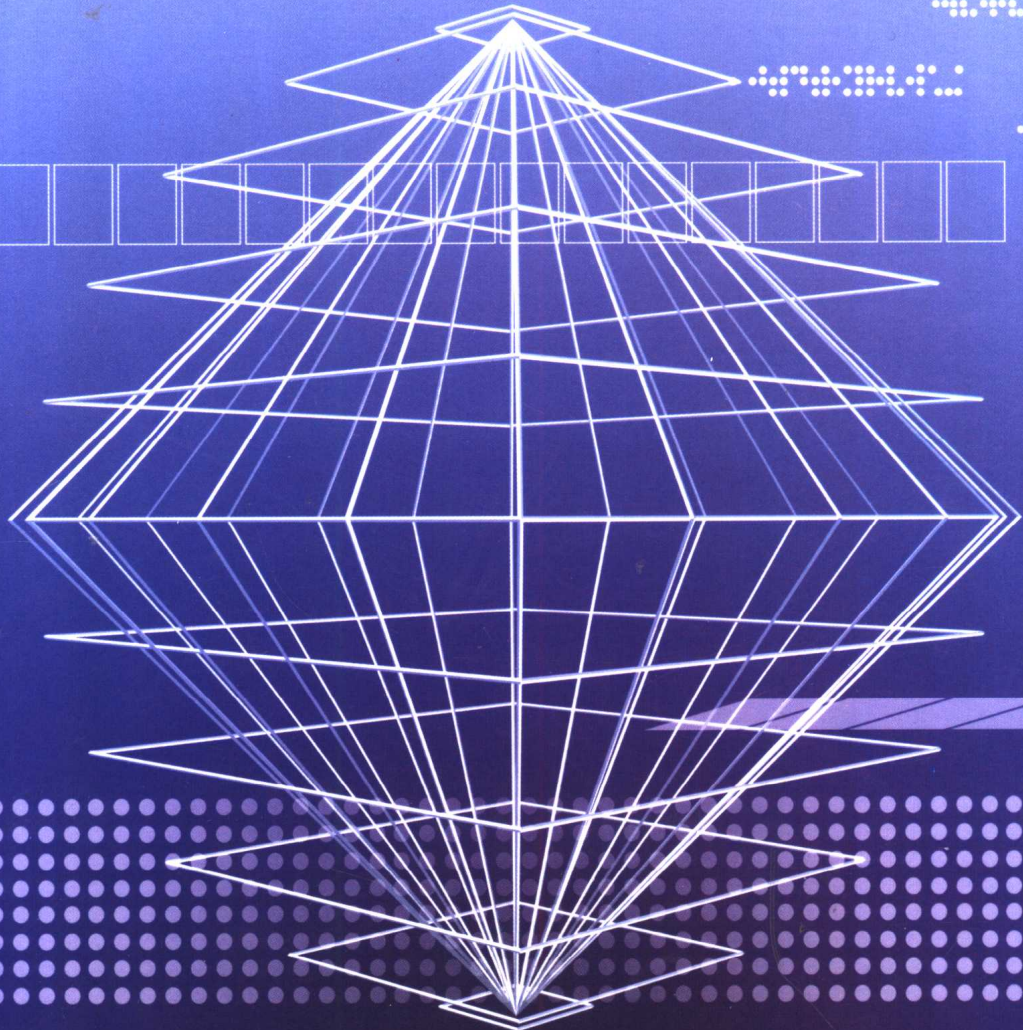


面向 21 世纪 高等学校 教材

Ad Hoc

移动无线网络

王金龙 王呈贵 吴启晖 龚玉萍 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

面向 21 世纪高等院校教材

Ad Hoc 移动无线网络

王金龙 王呈贵
吴启晖 龚玉萍 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是一本专门介绍目前发展很快的 Ad Hoc(不用固定基础设施、可自组织的)网络的技术书籍。Ad Hoc 涉及了移动通信、网络及计算机软硬件等方面的技术,属于综合性的信息系统。

全书共 12 章,系统地介绍 Ad Hoc 网络的体系结构、媒体访问控制层(MAC)协议、路由协议、组播、服务发现、功率控制、网络安全、超宽带以及 Ad Hoc 的应用等方面的内容。

本书内容新颖、实用性强,可用做通信和计算机网络类专业本科高年级学生和研究生的教材,也可供相关专业的教师和科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

Ad Hoc 移动无线网络/王金龙等编著. —北京:国防工业出版社,2004.5

ISBN 7-118-03386-3

I . A . . . II . 王 . . . III . 移动通信 - 通信网
IV . TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 125696 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 509 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

Ad Hoc 网络是一种不依赖于固定基础设施的、自组织的无线网络，其组网方便、快捷，不受时间和空间限制，既可应用于救援、会议、战场、探险、远距离或危险环境中的目标监控等场合，还可用于蜂窝末端网络的扩展。

Ad Hoc 网络具有无线传输、高度的动态拓扑、无中心、多跳路由等特点，这使得许多问题变得复杂而难以实现。固定有线网络和蜂窝网络中使用的各种协议和技术无法直接应用于 Ad Hoc 网络。因此，自提出之日起，Ad Hoc 网络就引起了各方面的巨大关注和广泛兴趣，直到现在，Ad Hoc 网络中还存在着许多亟待解决的问题。已出现的研究成果形式大都是公开发表的论文，其论述的是有关 Ad Hoc 网络的某一方面的内容，在国内外有关的专著和教材还比较缺乏。本书拟在填补这一空白，为从事 Ad Hoc 网络研究的工程科研人员、本科高年级学生、研究生及教师提供一本有参考价值的教材和参考书。

本书作为一部 Ad Hoc 著作，在内容上力求做到全面和系统，并初步形成理论体系；同时，尽量提供最新的相关研究成果，并将无线传输的特点与网络相结合，不但实用、而且具可读性。以上是本书的特点。

全书由 12 章组成。第 1 章介绍 Ad Hoc 网络的发展历史、体系结构及有关的基本概念；第 2 章到第 9 章按照 Ad Hoc 网络的层次结构，分别对链路自适应技术、MAC 接入协议、单播路由协议、组播、运输层协议、安全、服务发现、跨层设计等进行了讨论；第 10 章介绍了可用于 Ad Hoc 网络的蓝牙技术；第 11 章介绍了超宽带技术，它是未来 Ad Hoc 网络可能采用的候选传输技术；第 12 章以几种典型的 Ad Hoc 网络应用为例，初窥 Ad Hoc 网络技术给人们的生活带来的影响及其在现代军事通信中的重要作用，展望了 Ad Hoc 网络的应用前景。

本书第 1 章由王金龙编写，第 3 章、4 章、5 章、6 章、9 章由王呈贵编写，第 2 章、10 章、11 章由吴启晖编写，第 7 章、8 章、12 章由龚玉萍编写。王呈贵校阅了全书初稿，王金龙对全书进行了统稿和审定。在编写过程中，我校研究生范永辉、王春霞、邱松、崔丽等做了许多工作，在此表示感谢。

由于作者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 Ad Hoc 网络引论	1
1.1 Ad Hoc 网络概述	1
1.1.1 Ad Hoc 网络的产生背景	1
1.1.2 Ad Hoc 网络的发展历史	1
1.1.3 Ad Hoc 网络的定义	1
1.1.4 Ad Hoc 网络的特点	2
1.1.5 Ad Hoc 网络的应用	3
1.2 Ad Hoc 网络的体系结构	4
1.2.1 结点结构	5
1.2.2 网络拓扑	5
1.2.3 协议栈	7
1.2.4 Ad Hoc 网络的跨层设计	8
1.3 Ad Hoc 网络的关键技术	11
1.4 小结	12
参考文献	12
第 2 章 Ad Hoc 网络中的链路自适应技术	14
2.1 概述	14
2.2 自适应编码调制	14
2.2.1 自适应编码	15
2.2.2 自适应调制	15
2.2.3 自适应编码调制	16
2.3 自适应帧长控制与自适应重传机制	18
2.3.1 帧长自适应	18
2.3.2 自适应冗余重传	19
2.4 功率控制	20
2.4.1 传统的功率控制	20
2.4.2 Ad Hoc 网络中的功率控制	21
2.5 多天线技术	21
2.5.1 动态天线分集	22
2.5.2 智能天线	22
2.5.3 多入多出	25
2.6 混合 ARQ	27
2.6.1 传统的 ARQ 技术	27

2.6.2	混合 ARQ.....	28
2.7	自适应资源分配.....	31
2.7.1	无线 Ad Hoc 网络中基于 QoS 的资源分配.....	31
2.7.2	自适应链路调整.....	32
2.7.3	多媒体分组无线网络自适应链路控制协议.....	36
2.8	小结.....	38
	参考文献.....	39
第 3 章	Ad Hoc 网络的 MAC 接入协议.....	40
3.1	概述.....	40
3.1.1	在协议栈的位置.....	40
3.1.2	需要解决的主要问题.....	40
3.1.3	MAC 协议设计要求.....	43
3.2	Ad Hoc 网络中 MAC 协议的分类.....	44
3.3	几种典型的 Ad Hoc 信道接入协议.....	45
3.3.1	基于单信道的 Ad Hoc 信道接入协议.....	45
3.3.2	基于双信道的信道接入协议.....	60
3.3.3	基于多信道的信道接入协议.....	62
3.4	小结.....	67
	参考文献.....	67
第 4 章	Ad Hoc 网络的单播路由协议.....	69
4.1	路由协议.....	69
4.2	两类典型的自适应路由协议.....	71
4.2.1	距离矢量路由算法 (DVA).....	71
4.2.2	链接状态路由算法 (LSA).....	71
4.3	Ad Hoc 网络的路由协议.....	72
4.4	主动路由协议.....	75
4.4.1	WRP 协议.....	75
4.4.2	DSDV 协议.....	76
4.4.3	WRP 和 DSDV 小结.....	79
4.5	按需路由协议.....	79
4.5.1	DSR 协议.....	79
4.5.2	AODV 协议.....	81
4.5.3	TORA 协议.....	84
4.5.4	ABR 协议.....	88
4.5.5	几种按需路由协议的比较.....	92
4.6	基于位置的路由协议.....	93
4.6.1	基本原理及问题.....	93
4.6.2	位置服务.....	93
4.6.3	转发策略.....	96
4.7	其它的分级路由协议.....	100

4.7.1	CGSR (簇头网关交换协议)	100
4.7.2	CEDAR (核心提取的分布 Ad Hoc 路由)	101
4.7.3	ZRP (区域路由协议)	101
4.8	小结	101
	参考文献	103
第 5 章	Ad Hoc 网络的组播路由协议	106
5.1	组播传送基础	106
5.1.1	组播的概念	106
5.1.2	组播协议	107
5.1.3	组播报文的路由	109
5.2	Ad Hoc 网络的组播传送	109
5.2.1	概述	109
5.2.2	基于树的组播路由	110
5.2.3	基于格网的组播路由	117
5.2.4	无状态的组播路由	124
5.2.5	混合的组播路由	126
5.2.6	似然组播路由	128
5.2.7	比较	128
5.3	小结	129
	参考文献	130
第 6 章	Ad Hoc 网络的传输层协议	131
6.1	传输层协议	131
6.1.1	面向连接的传输协议	131
6.1.2	TCP	134
6.2	Ad Hoc 网络中的传输层协议	138
6.2.1	传输层需要解决的问题	138
6.2.2	Ad Hoc 网络使用 TCP 的问题	140
6.2.3	Ad Hoc 网络中的传输层设计	144
6.3	小结	161
	参考文献	161
第 7 章	Ad Hoc 网络的服务发现	163
7.1	服务发现简介	163
7.2	固定网络中的服务发现	164
7.2.1	服务定位协议(SLP)	165
7.2.2	Jini	166
7.2.3	Salutation 协议	168
7.2.4	通用即插即用协议(UPnP)	168
7.2.5	服务发现协议的总结	169
7.3	蓝牙中的服务搜索协议 SDP	170
7.3.1	服务记录的数据结构	170

7.3.2	服务搜索协议 SDP	171
7.3.3	服务搜索应用规范(SDAP)	173
7.4	Ad Hoc 网络中的服务发现	173
7.4.1	现有方案的缺陷和解决措施	173
7.4.2	Ad Hoc 网络中服务发现的结构	174
7.5	几种 Ad Hoc 网络中的服务发现方案	177
7.5.1	基于按需组播路由协议(ODMRP)的服务发现协议	177
7.5.2	JESA 服务发现协议(JSDF)	179
7.5.3	Konark 服务发现协议	181
7.5.4	Ad Hoc 网络服务发现协议的总结	185
7.6	小结	186
	参考文献	186
第 8 章	Ad Hoc 网络的跨层设计	187
8.1	Ad Hoc 网络中的节能机制	187
8.1.1	Ad Hoc 网络中 MAC 层节能机制	189
8.1.2	Ad Hoc 网络中 2.5 层节能机制	194
8.1.3	Ad Hoc 网络中网络层节能机制	196
8.2	Ad Hoc 网络的 QoS	198
8.2.1	概述	198
8.2.2	Ad Hoc 网络的 QoS 服务模型	199
8.2.3	Ad Hoc 网络的 QoS 路由协议	204
8.2.4	Ad Hoc QoS 的信令	215
8.2.5	Ad Hoc QoS 的 MAC 协议	219
8.3	小结	224
	参考文献	224
第 9 章	Ad Hoc 网络的安全	226
9.1	安全入门	226
9.1.1	安全的概念	226
9.1.2	密码学	226
9.1.3	机密性	227
9.1.4	认证	228
9.1.5	密钥的安全管理	230
9.1.6	PGP 简介	232
9.2	Ad Hoc 网络的安全	236
9.2.1	概述	236
9.2.2	Ad Hoc 网络中的安全威胁	237
9.2.3	Ad Hoc 基本机制的防范	237
9.2.4	Ad Hoc 网络中安全机制的防范	242
9.2.5	Ad Hoc 网络的入侵检测 IDS	251
9.3	小结	255

参考文献	256
第 10 章 蓝牙 Ad Hoc 网络	258
10.1 蓝牙概述	258
10.1.1 蓝牙产生的背景	258
10.1.2 蓝牙的技术特点	259
10.1.3 蓝牙系统的功能单元	260
10.1.4 蓝牙系统的应用	262
10.2 蓝牙协议栈	264
10.2.1 蓝牙协议体系结构	264
10.2.2 蓝牙核心协议	265
10.2.3 电缆替代协议	269
10.2.4 电话控制协议	269
10.2.5 选用协议	270
10.3 蓝牙 Ad Hoc 网络	271
10.3.1 蓝牙 Ad Hoc 网络的拓扑结构	271
10.3.2 蓝牙微微网	272
10.3.3 蓝牙散射网	278
10.3.4 蓝牙自组织网的构建	280
10.3.5 蓝牙自组织网的路由选择	281
10.3.6 蓝牙 Ad Hoc 网络的服务发现	282
10.3.7 蓝牙自组织网络的安全	282
10.4 蓝牙 Ad Hoc 网络与 Ad Hoc 网络	283
10.5 蓝牙小结	284
参考文献	284
第 11 章 超宽带 Ad Hoc 网络	285
11.1 超宽带系统概述	285
11.1.1 超宽带系统产生的背景	285
11.1.2 超宽带系统的技术特点	286
11.1.3 超宽带系统的应用	288
11.2 超宽带系统的系统组成	289
11.2.1 超宽带系统收发信机的结构	289
11.2.2 脉冲序列产生	291
11.2.3 脉冲调制	291
11.2.4 多子带调制	292
11.3 超宽带系统的关键技术	294
11.4 超宽带 Ad Hoc 网络	296
11.4.1 TH-CDMA 多址接入	297
11.4.2 MAC 设计	299
11.4.3 路由选择	301
11.5 小结	302

参考文献	302
第 12 章 Ad Hoc 网络的应用和发展前景	304
12.1 移动办公	304
12.2 家庭区域网络	305
12.3 无线传感器网络	306
12.4 无线个域网	307
12.5 紧急和灾难场合	309
12.6 军事应用	309
12.7 无线网状网	311
12.8 FleetNet——车载 Ad Hoc 网络	313
12.9 移动蜂窝网络的末端扩展	315
12.10 IEEE 802.16 无线城域网	317
12.11 小结	318
参考文献	318
缩略语	320

第 1 章 Ad Hoc 网络引论

1.1 Ad Hoc 网络概述

1.1.1 Ad Hoc 网络的产生背景

随着信息技术的不断发展，人们对移动通信的需求越来越强。近年来，移动通信技术得到了飞速发展和普及。蜂窝移动通信系统、无线局域网（IEEE 802.11^[1]和 HiperLAN^[2]）、蓝牙技术（Bluetooth）^[3]、家庭无线网（HomeRF）^[4]等移动通信新技术也纷纷涌现。这些技术的出现，极大方便了人们的生活，同时也推动了无线通信技术的发展。

无线通信网络按照其组网控制方式一般分为两类：一类是集中式控制的，即有中心的。这一类无线网络的运行要依赖预先部署的网络基础设施。典型的例子有：蜂窝移动通信系统，其依靠基站和移动交换中心等基础设施的支持；基于接入点（access point）和有线骨干网模式工作的无线局域网。但对于某些特殊场合，不可能有这种预先部署的固定设施可以利用。比如，战场上部队快速展开和推进、发生地震或水灾后的营救、野外科学考查、偏远山区、临时会议等。在这种情况下，就需要一种能够临时快速自动组网的移动通信技术。这也形成了另一类无线通信网络技术，即 Ad Hoc 网络通信技术。

“Ad Hoc”一词来源于拉丁语，意思是“专用的、特定的”。Ad Hoc 网络通常也可称为“无固定设施网”或“自组织网”。由于组网快速、灵活，使用方便，目前 Ad Hoc 网络已经得到了国际学术界和工业界的广泛关注，并正在得到越来越广泛的应用，已经成为移动通信技术向前发展的一个重要方向，并将在未来的通信技术中占据重要地位。

1.1.2 Ad Hoc 网络的发展历史

Ad Hoc 网络的前身是分组无线网（packet radio network）^[5,6]，对分组无线网的研究源于军事通信的需要。早在 1972 年，美国的 DARPA 就启动了分组无线网项目 PRNET^[5]，研究在战场环境下利用分组无线网进行数据通信。在此之后，DARPA 于 1983 年启动了高残存性自适应网络 SURAN（survivable adaptive network）项目，研究如何将 PRNET 的研究成果加以扩展，以支持更大规模的网络。1994 年，DARPA 又启动了全球移动信息系统 GloMo（globe mobile information systems）项目，旨在对能够满足军事应用需要的、高抗毁性的移动信息系统进行全面深入的研究。成立于 1991 年的 IEEE802.11 标准委员会采用了“Ad Hoc 网络”一词来描述这种特殊的自组织对等式多跳移动通信网络，Ad Hoc 网络就此诞生。IETF 将 Ad Hoc 网络称为 MANET（移动 Ad Hoc 网络），在本文这两个词可以混用。

1.1.3 Ad Hoc 网络的定义

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自治系

统。移动终端具有路由功能，可以通过无线连接构成任意的网络拓扑，这种网络可以独立工作，也可以与 Internet 或蜂窝无线网络连接。在后一种情况中，Ad Hoc 网络通常是以末端子网（树桩网络）的形式接入现有网络。考虑到带宽和功率的限制，MANET 一般不适于作为中间承载网络，它只允许产生于或目的地是网络内部结点的信息进出，而不让其它信息穿越本网络，从而大大减少了与现存 Internet 互操作的路由开销。Ad Hoc 网络中，每个移动终端兼备路由器和主机两种功能：作为主机，终端需要运行面向用户的应用程序；作为路由器，终端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。在 Ad Hoc 网络中，结点间的路由通常由多个网段（跳）组成，由于终端的无线传输范围有限，两个无法直接通信的终端节点往往通过多个中间节点的转发来实现通信。所以，它又被称为多跳无线网、自组织网络、无固定设施的网络或对等网络。Ad Hoc 网络同时具备移动通信和计算机网络的特点，可以看作是一种特殊的移动计算机通信网络。图 1-1(a)中给出了 Ad Hoc 网络的一种典型的物理网络结构，图 1-1(b)是其逻辑结构，图中终端 A 和 I 无法直接通信，但 A 和 I 可以通过路径 A-B-G-I 进行通信。

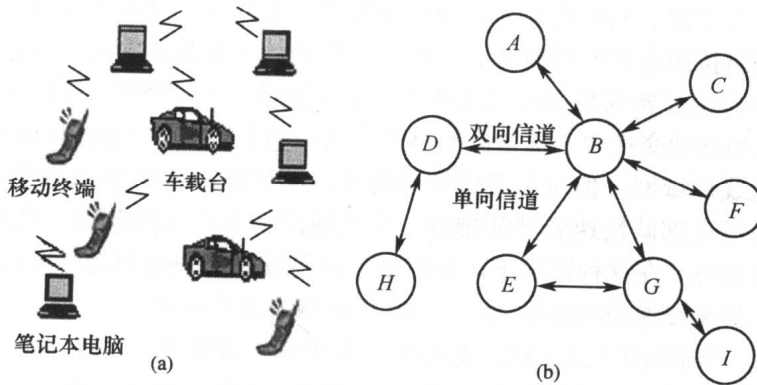


图 1-1 典型的 Ad Hoc 网络的物理结构和逻辑结构

1.1.4 Ad Hoc 网络的特点

与其它传统通信网络相比，Ad Hoc 网络具有以下显著特点。

1) 无中心和自组织性

Ad Hoc 网络采用无中心结构，网络中没有绝对的控制中心。所有结点的地位平等，即是一个对等式网络，各结点通过分层的网络协议和分布式算法协调彼此的行为。结点可以随时加入和离开网络。任意结点的故障不会影响整个网络的运行，与有中心网络相比，具有很强的抗毁性。

无中心和自组织特点使得 Ad Hoc 网络可以实现快速自动组网。

2) 动态变化的网络拓扑

Ad Hoc 网络中，移动终端能够以任意可能的速度和移动模式移动，并且可以随时关闭电台，加上无线发送装置的天线类型多种多样、发送功率的变化、无线信道间的互相干扰、地形和天气等综合因素的影响，移动终端间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化，而且变化的方式和速度都难以预测。在网络拓扑图中，这些变化主要体现在结点和链路的数量及分布的变化。而对于传统有线网络，网络的拓扑结构较为稳定。

3) 多跳路由

由于结点发射功率的限制,结点的覆盖范围是有限的。当要与其覆盖范围之外的结点进行通信时,需要中间结点的转发。即要经过多跳。与普通网络中的多跳不同,Ad Hoc 网络中的多跳路由是由普通结点共同完成的,而不是由专用的路由设备(如路由器)完成的。反过来,如果可以使用多跳路由,结点的发射功率可以很低,从而达到节省电能延长电池工作时间的目的。

4) 无线传输

Ad Hoc 网络采用无线传输技术,由于无线信道本身的特性,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。考虑到竞争共享无线信道产生的冲突、信号衰减、噪声和信道之间干扰等因素,移动终端获得的实际带宽远远小于理论上的最大带宽,并且会随时间动态变化。传统的共享广播式信道是一跳共享的,而 Ad Hoc 网络中结点的发送功率受限,广播信道是多跳共享的:一个结点的发送,只有其一跳相邻结点可以听到,而此范围之外的其它结点察觉不到。这一特征一方面提高了信道的空间重用度,另一方面使得报文的冲突与结点所处的地理位置相关。此外,地形或发射功率等因素使得 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(如图 1-1(b)中结点 B 到结点 E 的无线链路)。

5) 移动终端的便携性

移动终端具有携带方便、轻便灵巧等优点,但也存在固有缺陷,如能源受限、内存较小、CPU 处理能力较低和成本较高等,从而给应用的设计开发和推广带来一定难度,同时显示屏等外设的功能和尺寸受限,不利于开展功能较复杂的业务。考虑到成本和易于携带,移动结点不能配备太多数量的发送接收器,并且结点一般依靠电池供电。因此,如何高效地使用结点的电能和延长结点的工作时间是一个十分突出的问题。

6) 安全性差

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、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、剥夺“睡眠”等网络攻击。另外,Ad Hoc 网络由结点自身充当路由器,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 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、访问控制和其它安全措施都需要特别考虑。

1.1.5 Ad Hoc 网络的应用

Ad Hoc 网络的许多优良特性为它在民用和军事通信领域占据一席之地提供了有利的依据。首先,网络的自组织性提供了廉价并且快速部署网络的可能。其次,多跳和中间结点的转发特性可以在不降低网络覆盖范围的条件下减少每个终端的发射功率,从而降低了天线和相关发射/接收部件的设计难度和成本,从而为移动终端的小型化、低功耗提供了可能。从共享无线信道的角度来看,Ad Hoc 网络降低了信号冲突的几率,提高了信道利用率。从用户的角度看,低功率的无线电波产生的电磁辐射较少,对用户身体健康的影响较小。另外,网络的鲁棒性、抗毁性满足了某些特定应用的需求。总的来说,它的应用可以归纳为以下几类。

1) 军事应用

军事应用是 Ad Hoc 网络技术的主要应用领域。因其特有的无需架设网络设施、可快速展开、抗毁性强等特点，它是数字化战场通信的首选技术，并已经成为战术互联网的核心技术。为了满足信息战和数字化战场的需要，美军研制了大量无线自组织网络设备，用于单兵、车载、指挥所等不同的场合。美军的近期数字电台 NTDR 和无线互联网控制器等通信装备都利用了 Ad Hoc 网络技术。

2) 传感网络

传感网络是 Ad Hoc 网络技术的另一领域。传感器的发射功率很小，大量地理分散的传感器通过 Ad Hoc 网络技术组成网络，可以实现传感器之间以及与控制中心之间的通信。传感网络中，结点不仅能够协作转发来实现通信，还可以监测本地环境的变化，收集和處理相关的传感信息，这种网络具有非常广阔的应用前景。

3) 紧急和突发场合

在发生了地震、洪水、火灾或遭受其它灾难后，固定的通信网络设施很可能无法正常工作。而 Ad Hoc 网络能够在这些恶劣和特殊的环境下提供通信支持，对抢险和救灾工作具有重要意义。此外当警察或消防队员紧急执行任务，而常规通信网络又无法保障时，可以通过 Ad Hoc 网络来保障通信指挥的顺利进行。

4) 偏远野外地区

偏远或野外地区的通信通常无法依赖固定或预设的网络设施进行。Ad Hoc 网络技术具有单独组网能力和自组织性，是这些场合实现通信的最佳选择。

5) 临时场合

Ad Hoc 网络的快速、简单组网能力使得它适用于临时场合的通信，比如会议、庆典、展览会等，并可以免去布线和部署网络设备的工作。

6) 个人通信

Ad Hoc 网络技术可以用于个人域网络 (PAN) 来实现 PDA、手机、掌上电脑等个人通信设备之间的通信，并可以构建虚拟教室和讨论组等崭新的移动对等应用 (MP2P)。考虑到电磁波的辐射问题，个人域网络通信设备的无线发射功率应尽量小，这种情况下 Ad Hoc 网络的多跳通信特点将再次展现它的独特优势。

7) 商业应用

使用 Ad Hoc 网络技术来组建家庭无线网络、无线数据网络、移动医疗监护系统和无线设备网络，开展移动和可携带计算等。

8) 其它应用

Ad Hoc 网络具有很多优良特性，它的应用领域还有很多，这需要我们进一步去挖掘。比如它可以用来扩展现有蜂窝移动通信系统的通信模式和覆盖范围，实现地铁和隧道等场合的无线覆盖，实现汽车和飞机等交通工具之间的通信，用于辅助教学和构建未来的移动无线城域网和自组织广域网等。

1.2 Ad Hoc 网络的体系结构

网络的各层及其协议的集合，称为网络的体系结构，即网络的体系结构就是网络及其部件所应完成的功能的精确定义。

体系结构对于网络协议和各功能模块的设计起着至关重要的作用，并且在很大程度上决定网络的规划和整体的性能。

由于 Ad Hoc 网络的独特性，传统的体系结构和现存的大量协议在 Ad Hoc 网络中不再适用。Ad Hoc 网络的体系结构^[9,10]和设计方法应充分考虑网络的动态自组织特性和特殊的应用环境。

1.2.1 结点结构

Ad Hoc 网络的结点同时具有移动终端和路由器的功能，因此结点通常包括主机、路由器和电台三部分。其中主机部分（外置计算机或嵌入式计算机）完成移动终端的功能，包括人机接口、数据处理等；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（无线接口）提供无线传输功能。从物理结构上分，结点可以分为以下几类（图 1-2）：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。手持机一般采用单主机单电台结构，复杂的车载台可能包括通信车内的多个主机，它可以采用多主机单/多电台结构，以实现多个主机共享一个或多个电台。多电台使结点具有更大的灵活性和自适应能力，不仅可以使使用多个电台来构建叠加（overlay）网络，还可以作为网关结点来互联多个 Ad Hoc 网络以及接入其他网络。

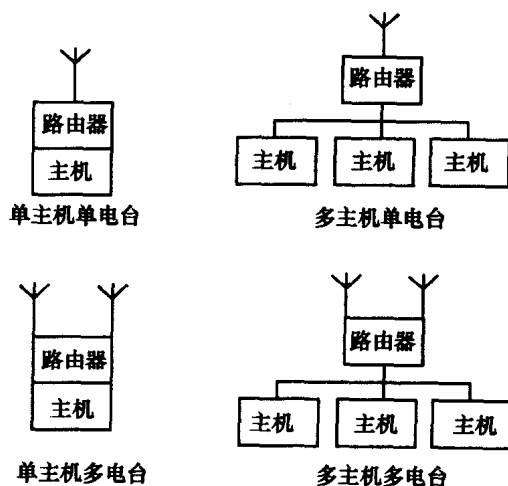


图 1-2 Ad Hoc 网络结点的几种物理结构

1.2.2 网络拓扑

由于结点的能力通常相同并可以移动，特别是在战场环境中，中心控制结点易被发现和易遭摧毁，使得 Ad Hoc 网络不适合采用集中式控制结构，因此，Ad Hoc 网络一般有两种结构：平面结构和分级结构。

平面结构（拓扑图）如图 1-3 所示，其中所有结点的地位平等，所以又可以称为对等式结构。

在分级结构中，网络被划分为簇（cluster）。每个簇由一个簇头（cluster-header）和多个簇成员（cluster member）组成。这些簇头形成了高一级的网络。在高一级的网络中，又可以分簇，再次形成更高一级的网络，直至最高级。在分级结构中，簇头结点负责簇间数据的转发，它可以预先指定，也可以由结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被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。信道的区分可采用各种多址技术，如 FDMA、TDMA、CDMA 等。

单频分级网络如图 1-4 所示，其中所有结点使用同一个频率通信。为了实现簇头之间的通信，要有网关结点（同时属于两个簇的结点）的支持。簇头和网关形成了高一级的网络，称为虚拟骨干。

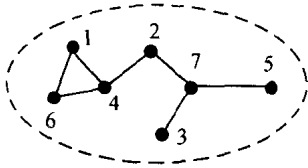


图 1-3 平面结构

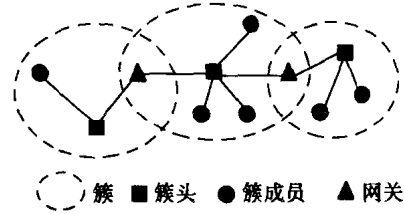


图 1-4 单频分级结构

多频分级网络如图 1-5 所示，不同级采用不同的通信频率。低级结点的通信范围较小，而高级结点要覆盖较大的范围。高级的结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。在图 1-4 所示的两级网络中，簇头结点有两个频率。频率 1 用于簇头与簇成员的通信，而频率 2 用于簇头之间的通信。分级网络的每个结点都可以成为簇头，所以需要适当的簇头选举算法，算法要能根据网络拓扑的变化重新分簇。

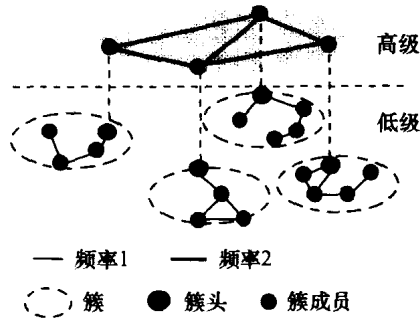


图 1-5 多频分级结构

平面结构的网络比较简单，网络中所有结点是完全对等的，原则上不存在瓶颈，所以比较健壮。它的缺点是可扩充性差：每一个结点都需要知道到达其它所有结点的路由。维护这些动态变化的路由信息需要大量的控制消息。文献[14]认为，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。

在分级结构的网络中，主要有如下的优点。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 簇头结点可以随时选举产生，分级结构 also 具有很强的抗毁性。

假设一个簇中的平均结点数为 N ，网络分级数为 M ，那么，网络中的总结点数为 N^M 。使用平面状态路由，结点需要维护 $O(N^M)$ 条纪录，而使用分级路由，结点最多只需要维护

$O(N \times M)$ 条记录, 并且只有处于最高簇中的结点需要维护 $O(N \times M)$ 条记录数, 因为它同时属于 M 个级别簇, 在每个簇中需要维护 N 条记录。

分级结构的主要缺点如下。

- ① 需要簇头选择算法和簇维护机制。
- ② 簇头结点的任务相对较重, 可能成为网络的瓶颈。
- ③ 簇间的路由不一定是最佳路由。

这些问题都是在设计分簇网络结构时需要特别考虑的问题。但是从实施资源管理和提供服务质量保障的角度出发, 分级结构有较大优势, 体现在下面几个方面。

① 分级结构有较好的可扩展性。

② 分级结构使路由信息局部化, 减少了路由协议的开销, 提高了系统的吞吐量, 并且容易实现网络的局部同步。

③ 分级结构中结点的定位要比平面结构简单。在平面结构中, 想知道一个结点的位置, 需要在全网中执行查询操作。而在分级结构中, 簇头知道所属簇成员的位置, 只需查询相应的簇头就可以获得结点的位置信息。

④ 分级结构结合了无中心和有中心模式, 可以采用两种模式的技术优势。每个簇都有控制中心, 基于有中心的 TDMA、CDMA 和轮询等接入技术都可以在分级的网络中使用, 并且基于有中心控制的路由、功率控制、移动性管理和网络管理等机制也可以移植到 Ad Hoc 网络中。

美军在战术互联网中使用近期数字电台 NTDR (near term digital radio) 组网时采用的就是图 1-4 所示的单频分级结构, 每个簇由一部 NTDR 电台充当簇头, 簇内成员位于簇头的无线电传输范围内, 并且同属一个战斗单位。

总之, 当网络的规模较小时, 可以采用简单的平面式结构; 而当网络的规模增大时, 应采用分级结构。

1.2.3 协议栈

根据 Ad Hoc 网络的特征, 参照 OSI 的经典 7 层协议栈模型和 TCP/IP 的体系结构, 可以将 Ad Hoc 网络的协议栈划分为 5 层, 如图 1-6 所示。

考虑到 TCP/IP 协议已经成为事实的网络互联标准, Ad Hoc 网络的体系结构应基于 TCP/IP 体系结构 (美军近期数字电台明确采用 TCP/IP 体系结构), 并需要根据 Ad Hoc 网络的特点进行必要的简化、修改和扩充。例如, 必须修改路由协议以适应网络拓扑的动态变化; 修改 TCP 来提高其在无线传输环境下的性能。此外, 还要考虑与有线骨干网的无缝连接, 兼顾网络的效率与抗毁性等。

在协议栈中, 各层的功能描述如下。

1) 物理层

功能包括信道的区分和选择、无线信号的监测、调制/解调等。由于多径传播带来的多径衰落、码间串扰, 以及无线传输的空间广播特征带来的结点间的相互干扰, 使 Ad Hoc 网络传输链路的每带宽容量低。因此, 物理层的设计目标是以相对低的能量消耗, 克服无线媒体的传输损伤, 获得较大的链路容量。

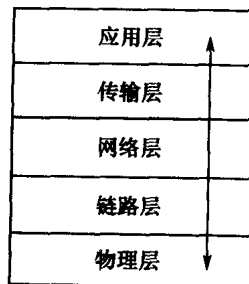


图 1-6 传统分层协议栈