



安辉耀 王新安 李 挥 著
苏金树 彭 伟 况晓辉

移动自组网中的先进路由 算法与路由协议



科学出版社
www.sciencep.com

移动自组网中的先进路由 算法与路由协议

安辉耀 王新安 李 挥 苏金树 彭 伟 况晓辉 著

本书由 863 计划(No. 2007AA01Z218)、
中国博士后基金(No. 20080440121)及
深圳市科技基金(FG200805230238A,
南科院 2008040)资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了移动自组网中的路由协议的特点、发展现状,集中研究与探讨了几个先进路由算法及路由技术,包括 QoS 路由技术、可扩展的多路径路由算法、可靠性多路径路由算法、多路径流量分配算法和安全广播路由算法等关键技术和热点问题,全书共分 16 章。

本书可作为计算机专业本科生和研究生教材,也可以作为从事相关研究和开发的专业技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

移动自组网中的先进路由算法与路由协议/安辉耀等著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025716-1

I. 移… II. 安… III. ①移动通信-计算机网络-路由选择-算法 ②移动通信-计算机网络-路由协议 IV. TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 175928 号

责任编辑:余 丁 王向珍 / 责任校对:钟 洋
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 10 月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—3 000 字数:345 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

网络通信技术是当前科技领域中最有活力、发展最快的高新技术,它的兴起改变了人类的生活形态,带给人们更多元、更方便的生活方式,其影响不只局限在工作以及传递信息,在休闲娱乐方面,通信与网络也开创出一片天地。

过去的几十年里,网络通信技术的发展日新月异,取得了巨大的进步,从简单语音业务到综合数据业务,从传统的有线电话到无线系统,从固定通信系统到移动通信系统,从 GSM、GPRS 到 3G 等,时刻影响着世界经济发展和科学技术进步。今后通信技术还会进一步的发展和演进,全球正在迅速向着移动信息时代迈进。未来移动通信将为无处不在的互联网提供全方位的、无缝的移动性接入。正是网络通信技术令人眩目的革新速度推动着信息时代的发展,不断改善着人类社会的生活质量。

当前,我国正在实施科技创新、科技兴国的伟大战略。这一宏伟的事业呼唤一大批富有才智、充满激情的青年科学技术人才投入到发展的洪流中来。移动自组网技术是目前网络通信领域的一项新兴技术,也是研究的热点与难点。自组网的思想将会把所有能想到的网络组合在一起,从而实现世界通信网络的大统一。安辉耀博士一直致力于跟踪网络与通信技术的进展,同时整理和传播了大量网络与通信技术的知识。我作为他的老师,为他的专著写序,甚感喜悦。

网络与通信是新经济时代的助推器。发展网络通信技术的关键在于培养高素质的人才,安辉耀博士等所著的《移动自组网中的先进路由算法与路由协议》必将有助于促进我国网络与通信事业的发展与通信领域专业人才的培养。

期待本书早日出版,使广大读者受益。



2009年9月

前 言

无线电通信的发展已有一百多年的历史,在这过程中,产生了不少新的学科,同时它又在不断地与其他学科进行综合,从而不断地涌现出一系列的通信方式,在不断适应社会需求的同时,自身也得到不断地发展。无线电通信百年来开发出不少新技术、新装备,但直至今日没有哪一种技术被否定掉,而是各得其所地发展起来,只是应用领域不同而已。

最近十几年,无线通信经历了巨大变化,无线通信及其应用已成为当今信息科学技术最活跃的研究领域之一。无线通信的快速增长及其在各行各业中的广泛应用,在许多方面改变着人们通信联络的方式。无线传播正在赋予通信一种与众不同的特征——移动性。这种移动性可以帮助实现人类的美好愿望——在任何时间、任何地点与任何人的个人通信,使得人们的生活更加便捷、更加丰富多彩。

移动自组网(MANET)是由移动节点通过分布式协议自组织起来的一种无线通信网络。对于一些没有固定基础设施、没有有线网络和管理中心的地方,移动自组网可能是唯一可选的通信工具。它具有部署方便、灵活的特点,具有广阔的应用前景。然而移动性容易导致拓扑改变,可能中断现有的路径,而单路径路由算法很难快速地适应拓扑改变,有效地发现和维持路径。因此,传统的单路径路由协议很难适用于移动自组网的动态环境。

本书在分析移动自组网特性及已有算法的基础上,应用跨层设计思想,集中研究了移动自组网中的几个先进路由算法及路由技术,包括 QoS 路由技术、可扩展的多路径路由算法、可靠性多路径路由算法、基于动态拓扑的多路径流量分配算法和安全广播路由算法等。主要内容包括以下几个方面:

1) QoS 路由技术研究

在移动自组网中支持一定要求的服务质量(QoS)变得越来越必不可少,而且有限的资源和网络拓扑及传输环境的动态变化更增加了在这种网络中对提供 QoS 服务的需求。但是,这种网络的特性使得 QoS 支持成为一个十分复杂的过程,QoS 支持包含着应用层、传输层、网络层、媒体访问控制(MAC)层、物理层等网络基础设施。本书讨论了与 QoS 相关的各种的技术,并列出了为移动自组网提供 QoS 服务将要面临的问题和挑战。

2) 可扩展的多路径路由算法研究

平面式结构的移动自组网在节点数目增多时的路由开销增加很快,可扩展性较差。作者引进分簇的方法来提高网络的可扩展性。一方面利用基于簇的层次结

构动态处理网络拓扑变化,减少路由管理开销和路由维护的代价;另一方面利用多路径并发传输增大了吞吐率,可以实现拥塞避免和负载平衡,优化网络带宽的使用,提高共享信道的利用率。

(1) CBMRP 算法——基于簇的多路径算法。

算法的基本思想是采用单层簇结构来处理网络拓扑变化,采用分布式推进、逐段查找的方式进行路径查找。该算法的优点是分簇结构简单、部署方便,在规模较小的网络中采用分布式逐段查找方式查找路径可以减少泛洪时引起的通信开销。

(2) CMDSR 算法——基于簇的动态源多路径路由算法。

算法基于 DSR 算法,将网络分成两级簇(单元簇和中心簇)层次结构,以提高网络的可扩展性,同时将路由发现功能迁移到中心簇层来实现,以防止类似 DSR 路由发现过程的泛洪,实现路由查找开销最小化。CMDSR 能够有效地处理节点数量增大和节点密度增大的问题。此外,CMDSR 通过选择可靠的路径和发送端到端的可靠性软保证的方法提高了可靠性。

(3) CQMRP 算法——基于簇的动态源多路径路由算法。

在有着众多节点的大规模网络中,控制报文泛洪会导致过多的通信开销。这些开销在战场环境下是无法忍受的。CQMRP 运用分簇的层次结构在众多的路径中高效地搜索出多条路径,并且在多路径中分配流量。它不仅确保快收敛,同时还能够提供多重保障来满足众多 QoS 的约束。

3) 基于动态拓扑的多路径流量分配算法研究

针对移动自组网动态拓扑的特点,采用跨层设计的方法,深入研究了基于流量控制的多路径路由问题,通过实现负载均衡来提高多路径的性能。

(1) 自适应动态流量分配算法。

目前多路径路由算法中,一般是将负载平均分配到各条路径中,但因各路径性能不同,质量不一,会降低传输综合性能。本书提出了一个基于自适应动态流量分配的多路径路由方案,根据路径质量权重动态地给多条路径分配数据流量,且大多数情况下仅用局部的信息做路由决定,因此减少了网络开销,降低了网络拥塞的可能性。

(2) 基于重用的蚂蚁寻优多路径流量分配算法。

自适应动态流量分配算法是一个开环控制系统,要真正实现最佳流量分配难度很大。本书提出了基于重用的蚂蚁寻优多路径流量分配算法,它利用蚂蚁算法作为流量分配的最优解搜索策略,由于蚂蚁算法具有正反馈机制,因此可以使流量分配过程具有较高的搜索速度;针对拓扑变化有一定相关性的特点,把前一次的流量分配结果重用作为初始流量分配解,并依据初始流量分配解构造蚂蚁算法的初始信息素,克服蚂蚁算法缺乏初始信息素的缺点,进一步提高其搜索效率。

4) 可靠性多路径路由算法研究

数据传输可靠性对多路径路由的性能具有重要的影响。本书研究了可靠性的两个重要问题:可靠多路径选择和可靠传输机制。根据跨层设计思想,提出了最大可靠性多路径选择算法和基于前向纠错编码(FEC)的多路径路由算法,提高了多路径传输可靠性。

(1) 最大可靠性多路径选择算法。

围绕两个关键问题进行研究:一是需要多少条路径以及如何选择这些路径;二是提出路径可靠性模型和虚拟独立多路径模型,利用模型对路径可靠性进行评估、选择、排队,选择适应多路径传输需要的虚拟非交叉多路径。

(2) 基于前向纠错编码的多路径路由算法。

多路径的并发传输会引起报文乱序和丢失,重传机制又会增加网络的开销。本书提出一种报文分割和 FEC 编码技术相结合的方式对数据传输进行控制,从而减少数据重传的次数,降低路由开销,利用 FEC 机制对数据进行差错恢复,提高传输可靠性。

(3) 最大传输可靠性多路径路由。

网络可靠性的增加直接影响网络中的动态 TCP 的长期吞吐量,并且是自组网中最重要的 QoS 参数,因此在设计自组网络协议时网络可靠性是最重要的因素。本书将证明如何计算网络可靠性的真实值 P_{succ} ,以及如何得到 P_{succ} 的泊松近似值。

(4) 最大传输效率多路径选择算法。

移动自组网 QoS 路由方案设计中的根本问题,是如何实现数据流被阻塞的机会最小化,最大化整体系统资源利用或者说最大化传输效率。由于许多因素的影响,实现多路径传输效率最大化是很复杂的问题。本书介绍了一种在给定的可靠性下实现最大效率的算法。

5) 安全广播路由算法研究

针对大规模移动自组网安全广播的密钥管理问题,首先提出了以链路稳定程度作为启发的簇生成算法,并对该算法进行了安全增强,提出了基于最大稳定链路数的安全簇生成算法,解决了大规模移动自组网在敌对环境下的安全簇生成问题,提高了网络的扩展性;然后在层次结构的基础上,提出了基于稳定簇的组密钥更新算法,进一步优化了组密钥更新效率,提高了广播通信的安全性。

本书是移动自组网方面的一部新作,在材料取舍、内容组织和讲授方式方面均具有鲜明特色,书中主要针对移动自组网的路由协议与路由算法进行了研究与探讨,全面系统地介绍了无线移动自组网路由协议的特点、发展、关键技术和研究热点等内容。本书的内容深入浅出,既有系统完整的理论阐述,又有紧密结合各种路由算法最新课题的实例分析。本书可作为通信工程和网络信息类相关专业高年级本科生和研究生的教材,并且对于工程技术人员也有很好的参考价值。

如果我们能够站得比较高,那是因为我们站在了巨人的肩膀上。本书的形成集合了许多人的智慧,成书过程中得到了众多人的巨大支持和帮助,我们将永志不忘!他们是中国科学院王阳元院士、杨芙清院士,国家自然科学基金委员会、中国博士后科学基金会、北京大学博士后办公室、北京大学信息科学技术学院、北京大学深圳研究生院、深圳市人事局及深圳市科技和信息局的领导和专家们。在写作过程中,作者参考了大量的文献、书籍、报刊,浏览了国内外不计其数的网站,谨此向原作者致谢。当然,还有很多朋友或给予我们热情的指点,或给予道义上和精神上的支持,在此一并致谢!

在本书付梓之际,特别要感谢我的博士生导师卢锡城院士,本书的出版得到了他的大力支持,书中部分研究成果是我在攻读博士期间,在他的指导、关心下取得的。本书由我主持,并负责全书统稿和审校。此外,为本书做出贡献的还有王新安教授、李挥副教授、苏金树教授、彭伟副研究员及况晓辉副研究员。由于时间仓促,加之作者水平有限,其中缺点和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 移动自组网概述	1
1.1 引言	1
1.2 移动自组网的发展及特点	2
1.2.1 自组网的起源和定义	2
1.2.2 移动自组网的特点	4
1.3 移动通信系统的比较	4
1.4 自组网的分类	7
1.5 自组网的应用	9
1.5.1 应用范围	9
1.5.2 应用案例	13
1.6 自组网的挑战和主要研究问题	14
1.6.1 自组网的挑战	14
1.6.2 当前研究的主要问题	14
1.7 小结	16
参考文献	16
第 2 章 移动自组网中的路由	20
2.1 路由协议的质量要求	20
2.2 路由协议研究现状	21
2.3 自组网对传统单路径路由的挑战	26
2.4 多路径的模型	27
2.5 多路径可靠的传输层	29
2.6 多路径的数学模型	30
2.6.1 多路径模型	30
2.6.2 网络模型	31
2.7 多路径路由协议及分类	34
2.7.1 多路径路由协议分类	34
2.7.2 单路径和多路径的比较	36
2.8 多路径研究现状	36

2.8.1	多路径路由的研究成就	36
2.8.2	无线自组网的可靠传输	39
2.8.3	信息分发	39
2.8.4	连接分割	40
2.8.5	自组网的能量管理	40
2.9	多路径路由进一步需要解决的问题	41
	参考文献	43
第3章	移动自组网中的 QoS 问题	50
3.1	基于移动自组网的 QoS 所面临的问题	50
3.1.1	QoS 的参数	50
3.1.2	移动自组网 QoS 支持的问题与困难	50
3.2	折中原则	52
3.3	层次化观点中的 QoS	53
3.3.1	物理层中的 QoS 支持	53
3.3.2	基于 MAC 层的 QoS	53
3.3.3	网络层的 QoS 感知路由	55
3.3.4	关于传输层的 QoS 问题	59
3.3.5	应用层问题	60
3.3.6	层内设计方法	60
3.4	未来的挑战	63
	参考文献	64
第4章	移动自组网中的分簇算法	66
4.1	分簇算法的度量标准与工具	66
4.1.1	簇生成算法的评价标准	66
4.1.2	度量工具	67
4.2	典型分簇算法	67
4.2.1	最小标识符优先算法	68
4.2.2	最大连接度算法	68
4.2.3	改进的最小 ID 算法	69
4.2.4	基于权值的分簇算法	69
4.2.5	基于位置预测的分簇算法	69
4.2.6	基于节点移动性的分簇算法	70
4.2.7	基于链路稳定性的分簇算法	71
4.2.8	基于模糊规则的分簇算法	71
4.2.9	k-hop 分簇算法	74

4.2.10 被动分簇算法	75
4.2.11 其他分簇算法	76
4.3 自组网中分簇结构的应用	76
4.3.1 基于分簇结构的路由协议	76
4.3.2 基于分簇结构的网络管理	78
4.3.3 基于簇的资源分配和信道接入机制	80
4.3.4 基于分簇结构的功率控制	81
4.3.5 基于分簇结构进行泛洪广播	81
4.3.6 分簇结构在蓝牙散布网络中的应用	82
4.4 展望	83
参考文献	84
第 5 章 基于簇的路由算法	88
5.1 CBRP 的主要特点	88
5.2 CBRP 的术语	89
5.3 总体数据结构	90
5.4 链路/连接状态侦听机制及单向链路处理	91
5.4.1 链路/连接状态侦听机制	91
5.4.2 ARP 问题	93
5.4.3 IEEE 802.11 链路层技术	93
5.5 协议实现	93
5.5.1 簇构成	93
5.5.2 邻居簇的发现	94
5.5.3 路由机制	96
5.6 模拟环境及参数	101
参考文献	101
第 6 章 一种新的基于簇的多路径路由算法	104
6.1 簇生成算法	105
6.1.1 簇的初始化	106
6.1.2 簇的更新	106
6.2 主要数据结构	107
6.3 虚拟路由发现	107
6.4 反向链路标记	109
6.5 路由策略及流量分配	109
6.6 动态路径维护和修补	110
6.7 模拟与性能评估	110

6.7.1	模拟模型	110
6.7.2	实验设计	113
6.7.3	性能评价标准	114
6.7.4	性能分析	114
6.7.5	比较结果	115
6.8	小结	120
	参考文献	121
第7章	基于簇的多路径动态源路由	123
7.1	簇的结构	123
7.2	簇生成算法	124
7.2.1	簇的初始化	124
7.2.2	簇的更新	124
7.2.3	中心簇(2-Server Cluster)的选择	126
7.3	路径可靠性评估模型	126
7.4	路径查找	126
7.5	路径选择	127
7.6	反向路径确认	128
7.7	路由策略及流量分配	128
7.8	动态路径维护和修补	128
7.9	模拟与性能评估	129
7.9.1	模拟模型及参数配置	129
7.9.2	性能评价标准	129
7.9.3	性能分析	130
7.9.4	比较结果	131
7.10	小结	136
	参考文献	136
第8章	大规模移动自组网中基于簇的 QoS 多路径路由协议	139
8.1	相关研究	139
8.2	簇的结构和模型	141
8.2.1	簇的结构	141
8.2.2	簇的生成	141
8.2.3	QoS 模型	142
8.3	CQMRP 协议	143
8.3.1	虚拟路径发现	143
8.3.2	反向连接标识	144

8.3.3	路由策略和流量分发	145
8.3.4	动态路径修复和维护	145
8.4	正确性证明	146
8.5	模拟	147
8.5.1	模拟模型与参数设置	147
8.5.2	性能度量标准	148
8.5.3	模拟结果	148
8.6	结论和展望	151
	参考文献	151
第9章	移动自组网中层次路由的簇开销	153
9.1	网络环境	153
9.2	层次路由概述	155
9.2.1	层次原则	155
9.2.2	分簇方法	155
9.3	通信开销	156
9.3.1	Hello 协议开销	158
9.3.2	定义和簇假设	158
9.3.3	簇形成	159
9.3.4	簇维护	160
9.3.5	流量开销	163
9.3.6	层次寻址	163
9.4	结论	164
	参考文献	165
第10章	最大可靠性多路径选择算法	167
10.1	相关研究	167
10.2	问题的提出	168
10.3	路径可靠性模型	170
10.4	最大可靠性多路径选择算法	171
10.4.1	虚拟多路径模型	171
10.4.2	多路径查找	171
10.4.3	多路径选择	172
10.5	模拟与性能评估	172
10.5.1	模拟模型及参数配置	172
10.5.2	性能评价标准	173
10.5.3	比较结果	173

10.6	小结	177
	参考文献	177
第 11 章	基于动态拓扑的多路径自适应流量分配	179
11.1	多路径模型及路径权重确定	179
11.2	自适应动态流量分配路由算法	180
11.2.1	流量比例计算	181
11.2.2	路径选择	182
11.3	模拟与性能评估	183
11.3.1	模拟环境	183
11.3.2	性能评价标准	183
11.3.3	比较结果	184
11.4	小结	187
	参考文献	187
第 12 章	基于重用的蚂蚁寻优多路径流量分配	189
12.1	典型的多路径模型及流量分配问题特点分析	190
12.1.1	多路径模型	190
12.1.2	流量分配问题特点分析	190
12.2	基于重用的蚂蚁寻优原理	191
12.2.1	蚂蚁寻优算法简介	191
12.2.2	基于重用的蚂蚁寻优基本原理	191
12.3	基于重用的蚂蚁寻优多路径流量分配	193
12.3.1	确定初始流量分配解	193
12.3.2	将初始流量分配解转换为初始信息素	193
12.4	实验	195
12.4.1	模拟模型及参数配置	195
12.4.2	性能评价标准	196
12.4.3	比较结果	196
12.5	小结	198
	参考文献	199
第 13 章	集成 FEC 的可靠传输多路径路由	201
13.1	差错控制的相关研究	201
13.2	分组级软件 FEC	202
13.3	集成 FEC 的多路径路由	203
13.3.1	FEC 基本原理	204
13.3.2	报文分割	204

13.3.3 流量分配及数据恢复	205
13.4 传输性能的理论分析	206
13.4.1 定性分析	206
13.4.2 定量分析	207
13.5 性能模拟	208
13.6 小结	209
参考文献	210
第 14 章 基于最大传输可靠性的多路径路由	212
14.1 网络可靠性	213
14.1.1 精确的 P_{succ}	214
14.1.2 P_{succ} 的泊松近似值	216
14.2 P_{succ} 的最大化	217
14.2.1 通过泊松近似值的 P_{succ} 的最佳化	219
14.2.2 通过常态近似值使 P_{succ} 最优化	221
14.3 模拟与性能评估	221
14.3.1 P_{succ} 无资源限制的最优化	223
14.3.2 受限的 P_{succ} 的最佳化	225
14.4 小结	227
参考文献	227
第 15 章 多路径路由的最大传输效率算法	231
15.1 传输效率 η	231
15.2 最大传输效率	231
15.3 正确性证明	234
15.4 模拟与性能评估	235
15.5 小结	237
参考文献	237
第 16 章 基于密钥管理的安全广播路由算法	240
16.1 问题描述	240
16.2 基于链路稳定度的簇生成算法	241
16.2.1 算法描述	241
16.2.2 簇首竞争原则	243
16.2.3 节点加入原则	243
16.2.4 算法分析	244
16.2.5 性能模拟	244
16.3 基于最大稳定链路数的安全簇生成算法	252

16.3.1	问题描述	252
16.3.2	生成算法	252
16.3.3	算法分析	255
16.3.4	性能模拟	257
16.4	基于稳定簇的组密钥更新算法	260
16.4.1	算法描述	261
16.4.2	算法分析	264
16.4.3	性能模拟	265
16.5	小结	269
	参考文献	269
	后记	271

第 1 章 移动自组网概述

1.1 引 言

20 世纪初,图灵先生设计了第一个理论计算机模型。1946 年第一台电子计算机 ENIAC 问世,人类从手工计算时代迈入计算机计算时代。人类在发明计算机的同时,还发明了计算机网络,发明了今天的 Internet。计算机网络正在或者将要彻底改变人类的生活方式,把人类带向空前灿烂的新时代——网络时代^[1]。

网络已经给我们带来了许多意外和惊喜:电子邮件(E-mail)可瞬间传递信息,电子商务使得人们在家中能够购买全世界的商品,Web 服务可以使人足不出户纵览天下。人们的生活、学习和工作已经离不开网络:网络可以看作最强有力的超级计算环境,包含丰富的计算、数据、存储、设备和仪器等各类资源,用户可以在任何地方登录,解决以前不能解决的问题;通过网络,人们可以使用能翻译、带图像的电话,可以上世界上任何一所大学的多媒体学校,可以浏览全球的数字图书馆等;通信、电子、多媒体和计算机等领域迅速融合,每个家庭和单位具有智能处理器的各类电器都可联入网络,可以通过计算机进行远程控制和指挥。因此,网络的功能包括高性能的科学并行计算、丰富多彩的多媒体应用、复杂多变的交易、电子商务等事务处理,以及管理、模拟、控制等智能应用。

网络用户与日俱增,网络应用将无处不在,科学的发展也将永无止境,人们对网络的要求与期望亦将越来越高。近十年来,随着通信技术、计算机技术和网络的发展以及进一步走向实用化,人们对具有移动性、无处不在、随时随地的数据访问和数据交换的需求越来越明显,且仍在不停地增加。因此,新的协议、标准和产品不断出现,不断发展。

移动性意味着需求简单,不需要任何预先通知,也不需任何基础设施就能快速部署,很少或几乎没有任何管理中心的支持。这种自组移动网络称为自组网络(Ad Hoc Network, AHN, 简称自组网)或者移动自组网络(Mobile Ad Hoc Network, MANET, 简称移动自组网)^[2]。移动自组网可以使用在由于时间或者资金限制等原因无法预先建立基础设施的任何方面,如历史古迹、灾难场所以及军事通信等。其他的领域也可能应用到自组网,如军事后勤管理、运输流量控制等方面。移动自组网具有移动性强、无固定网络拓扑、资源有限等特点,给网络通信带来了