

中文摘要

无线网状网络 (Wireless Mesh Network) 简称 WMN, 是一种新型的无线通信网络。无线 Mesh 网络具有自组织性和自愈的特点, 并有有效的移动用户管理和跟踪机制, 既是多跳的宽带无线网络, 又是高容量、高速率的分布式网络。它可以看作是无线局域网 (WLAN) 和移动自组网 (MANET) 网络的融合, 建网方便快捷, 成本低, 具有传统有线和无线网络系统无可比拟的优势和广阔的应用前景, 能为无线个域网、局域网、校园网甚至城域网提供无线宽带接入服务。无线 Mesh 网络是一种特殊的 WLAN, 作为一种新型网络结构形态, WMN 结构已被纳入到 802.11s 标准中。

无线 Mesh 网络中的每个节点都具有路由转发功能, 再加上网络中节点的频繁移动, 使得路由技术成为无线 Mesh 网络中的关键技术。本文对无线 Mesh 网络的路由算法进行研究。主要内容是提出一种多信道无线网状网络的路由量度算法 WCETTR (Weighted Cumulative Expected Transmission Time-Revision), 并对它进行了研究与仿真。以多跳多射频的无线 Mesh 网络体系结构为基础, 研究多个频率对网络性能的影响。将系统吞吐量、链路速率等参数作为新的路由准则, 利用多射频的特性, 提高网络利用率。本文所研究的是无线 Mesh 网络路由协议实现的基础。新的路由准则结合路由发现与维护等过程, 与硬件平台设计、链路层驱动和用户认证管理部分相配合, 将为提高无线 Mesh 网络系统的效率做好了准备。

关键词: 无线 Mesh; WLAN; 多信道; 路由量度

ABSTRACT

The Wireless Mesh Network (WMN) is a new type of wireless communication network. WMN is capable of self-organization and multi-hop routing, as well as its capability of mobile user management and tracing. It is a multi-hop broad bandwidth distributing wireless network with high capacity and high transmission rate. It can be considered as an integration of WLAN and MANET. Comparing with the traditional wired and wireless network, WMN has unparalleled advantages and is more convenient and low-cost. WMN has a wide range of potential applications for the Wireless Personal Area Network, LAN, even MAN, providing wireless broadband access service. WMN is a special WLAN. As a new type of network structure, Mesh is included into the coming 802.11s standards.

Nodes in Wireless Mesh Network could transfer data and for nodes' frequently moving route is an important part in Wireless Mesh Network. This article studies the routing algorithm in Wireless Mesh Network. Design of the WCETTR (Weighted Cumulative Expected Transmission Time-Revision) algorithm is the main part of this dissertation. Based on the system structure of multi-hop networks with multiple radios, a new standard for routing is put forward concerning system throughput and link data rate, etc. This improves the utilization and efficiency of WMN. All the completed work described here plays a basic and important role in the realization of Wireless Mesh routing protocols. The new should be standard with routing combined with routing discovery and routing maintenance processes, and cooperate with hardware platform, link layer driver and user authentication management work groups. It has made a preparation for the improvement of the whole Wireless Mesh Network system.

Keyword: Wireless Mesh; WLAN; Multi-Channel; Routing Metric

缩略字表

WMN	Wireless Mesh Network
WLAN	Wireless Local Area Network
MANET	Mobile Ad-Hoc Networks
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector Routing
DSR	Dynamic Source Routing
DSSS	Direct Sequence Spectrum Spread
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
Wi-Fi	Wireless Fidelity
AP	Access Point
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
MAC	Medium Access Controller
MC	Mesh Client
MR	Mesh Router
3G	3th Generation
WR	Wireless Router
WH	Wireless Host
QDMA	Quadrature Division Multi-Access
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector
CGSR	Cluster head Gateway Switch Routing
WRP	The Wireless Routing Protocol
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
MR-LQSR	Multi-Radio Link-Quality Source Routing
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector
SQOR	Selective Quality On-demand Routing
WCETT	Weighted Cumulative Expected Transmission Time
WCETTR	WCETT- Revision
ETX	Expected Number of Transmissions

ETT	Expected Transmission Time
QoS	Quality of Service
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
HWMP	Hybrid Wireless Mesh Protocol
MCRP	Multi-Channel Routing Protocol

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：陈东娅 日期：2009年9月3日

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：陈东娅 导师签名：王竹君 日期：2009年9月3日

第一章 绪论

无线网络，特别是基于 IEEE802.11 标准^[1]的无线网络，由于低廉的价格和组网的灵活，正经历着快速增长，无线 Mesh 网络（WMN）技术已成为下一代无线网络不可或缺的技术。它是不依赖于已有的基础设施布置大规模无线网络的重要解决方案，能使局域网快速简单的扩展到广域网中。该技术已成为无线通信领域的研究热点。一方面 WMN 被定义为移动 Ad Hoc 网络（Mobile Ad Hoc Network, MANET）的特例；另一方面 MANET 被称为最简单的 WMN。为此 IEEE802.11 工作组成立的 802.11s 工作组对 WMN 进行了标准定义，提出 WLAN Mesh 的网络结构，它结合了无线局域网（WLAN）和无线 Mesh 网络技术的优点，成为目前最流行的 WMN 标准^[2]。

作为未来无线城域核心网最理想的方式，“无线 Mesh 网络 and 智能天线、移动 Ad Hoc 网络以及超宽带技术一起，正在成为无线通信领域中压倒一切的技术，它们将很可能使 3G 网络技术落伍，甚至会影响 4G 的发展^[3]。”WMN 因其自身特点以及在家庭、企业和公共场所等诸多领域的广阔的应用前景，具有重要的理论意义和实际意义。

1.1 研究背景

1.1.1 无线局域网（WLAN）

随着通信技术的不断发展，通过无线方式为用户提供网络接入获得了巨大成功，下一步无线网络发展的目标是为用户提供更高的速率以支持各种宽带业务的接入，特别是 Internet 的接入。基于 IEEE802.11 的无线局域网技术（WLAN）就是这一发展过程中的典型。通过大规模在城市公共环境内安装无线局域网接入点（Access Point, AP），为用户方便地提供 Internet 浏览、E-mail、移动办公等业务。

WLAN 有两种组织形式：中心结构网络（Infrastructure network）和 Ad Hoc 网络（Infrastructure less network）。中心结构网络由包含固定有线网关的网络组成，在无线覆盖范围内移动主机与基站（固定有线网关）通信，并可在通信过程中移动。当移动主机离开原基站的无线覆盖范围后，可与另一个基站建立连接并通过

该基站继续通信。在这种组网和通信方式中，基站位置固定不动。GSM 系统即是采用这种网络组织形式。Ad Hoc 网络是无线网络的另一种组织方法。在 Ad Hoc 网络中所有节点都平等，它们之间都可能存在通信关系，同时每个节点还承担组网和为其它节点中继的义务。网络中的所有节点都像路由器一样参与路由的发现和维持。由于 Ad Hoc 网络采用扁平的网络结构，用户节点间通过无线自由组网，没有中心和集中控制单元，每个节点都要保留整个网络的路由信息表，传递和更新路由信息表会占去大量的无线资源，很难用于大规模组网^[4]。企业用户渴望拥有一个无线移动环境，使用 WLAN 能满足移动办公的需求。对于家庭用户 WLAN 除了提供灵活的网络接入，还可以整合电子产品。在公共热点地区，电信运营商充分利用 WLAN 技术成熟、免牌照、成本低、高传输速率等优点，提供公共无线接入服务。此外 WLAN 在展览、会议、旅游服务、零售行业、制造业和仓储业、金融证券等领域也得到广泛应用。

1.1.2 无线 Mesh 网络 (WMN)

无线 Mesh 网络是一种多跳、具有自组织和自愈特点的宽带无线网络结构，即高容量、高速率的分布式网络。它旨在探索无线移动通信与 IP 技术的结合，研究在小型区域范围内允许多个网络同时存在、不同网络自动区分、拓扑结构动态可变、具有多跳和动态路由能力的网络结构形式。无线 Mesh 网络可以看成是一种特殊的 WLAN，除移动性较低外，本质上是 Ad Hoc 网络。目前主要观点认为 WMN 是由无线链路连接路由器和终端设备的静态无线网络，是 Internet 的无线版本。

基于无线 Mesh 网络的多点对多点优势，可以把它看成是新型的解决“最后一公里”瓶颈问题的分布式网络，是无线局域网 (WLAN) 和移动自组网 (MANET) 网络的融合，建网方便快捷、成本低，具有传统有线和无线网络系统无可比拟的优势，能为无线个域网、局域网、校园网甚至城域网提供无线宽带接入服务。

作为新型的宽带无线接入系统，无线 Mesh 网络的核心指导思想是让网络中的每个节点都能发送和接收信号，从而使传统的无线网络的扩展性低和健壮性差等诸多问题迎刃而解^[4]，并且无线 Mesh 网络实现了灵活组网，代表无线网络技术的一大跨越，有极为广阔的应用前景。

1.2 研究现状与发展趋势

北电网络发布了 Mesh 网络架构，宣称在今后它和传统电信网络结合，形成互补的无缝漫游网络；美国 SkyPilot 公司将智能天线技术应用于无线 Mesh 网络，使频谱再利用，提高了频谱利用率；Mesh Networks 公司开发的相关无线硬件和智能路由软件，不仅可以构建无线 Mesh 网络，还可支持诸如机笔记本电脑等移动设备，且这些设备可以自由加入或退出网络，当两个或更多设备退出网络范围时，可以组成自己的微型网。

目前比较主流的无线 Mesh 路由协议主要包括两种类型：经典型和改进型。经典型是直接将 Ad Hoc 路由协议应用于无线 Mesh 环境。目前比较主流的经典 Mesh 路由协议包括 AODV 协议，DSR 协议和 DSDV 协议等。改进型是指针对无线 Mesh 网络的特点，在现有 Ad Hoc 路由协议基础上改进得到新无线 Mesh 路由协议。如微软公司提出的 MR-LQSR 协议^[5]、Tzi-cker 等提出的 Hyacinth 协议。这些协议的共同点是通过将经典 Ad Hoc 协议从单信道扩展到多信道，通过增加信道来提高网络带宽和提升吞吐性能。

无线 Mesh 网络拥有很高的研究价值，而路由问题正是无线网络研究的核心内容。开发能在两个节点间提供高质量高效率通信的路由协议是无线 Mesh 网络设计的关键。网络节点的移动性使网络拓扑结构不断变化，需要有专门应用于无线 Mesh 网络的路由协议。随着对无线网络研究的不断深入，单径路由协议的研究已相对成熟。但简单的单径路由协议还不能满足负载平衡、路由可靠性、QoS 等更高层次的路由要求，而多径路由恰恰是解决这些问题很好的途径。从现阶段研究来看，无线网络中关于多径路由的研究还很少，主要是因为多径路由尤其是分布式的多径路由，加上无线网络的动态拓扑实现会更复杂。相对于单径路由协议，多径路由的无线网络路由算法研究协议有很多优势，可以提高网络中的路由质量。目前无线网络中的很多路由协议和算法还不成熟，所以对无线网络的多径路由问题进行研究，是近两年无线网络研究的热点。

1.3 本文研究工作和结构安排

采用何种策略进行路由选择使网络吞吐量最大是目前 WMN 研究的关键问题。本文主要分析现有的无线 Mesh 网络路由选择策略和路由协议，在此基础上综合考虑跳数、信道质量、链路间的多信道必然干扰以及潜在干扰，通过对现有的路由量度算法进行改进，基于 802.11 的多信道无线 Mesh 网络的路由，提出一种全新的路由量度 WCETTR。仿真表明该算法比 WCETT 算法在网络吞吐量性能方面有显著的提高。

全文分为六章，具体安排如下：

第一章：作为绪论，介绍本文的研究背景和意义，阐述研究内容和主要创新点，简述论文的总体组织结构。

第二章：无线局域网的研究，介绍 IEEE802.11 标准，分析 WLAN 的技术特点与优势，并总结 WLAN 的应用领域，最后对 WLAN 的发展趋势进行了展望。

第三章：无线 Mesh 网络的研究，介绍无线 Mesh 网络的结构特点，分析 WMN 与 WLAN 研究的联系与区别，并对 WMN 的应用和发展现状以及网络的关键技术进行研究。

第四章：无线 Mesh 网络路由协议研究，介绍 WMN 的路由特点，根据单信道和多信道路由协议的分类法则，分别对现有 WMN 的路由算法研究的路由协议进行介绍和分析。

第五章：根据问题的引出，详细介绍本文基于 802.11 的多信道无线 Mesh 网络路由算法—WCETTR，并对该算法仿真以及对仿真结果进行分析。

第六章：对全文总结，并对今后工作方向做了展望。

第二章 无线局域网

WLAN (Wireless Local Area Network) 即无线局域网, 是无线通信技术和计算机网络结合的产物。它以无线多址信道为传输介质, 实现短距离内无线网络通信^[6]。凭借其可靠、标准化、成本低和灵活性强等特点, 可实现移动办公, 方便用户随时连接网络, 维护更容易, 应用愈来愈广泛。虽然全球的宽带无线接入领域面临很大挑战, 但 WLAN 的发展给整个无线通信产业注入勃勃生机。

2.1 WLAN的IEEE 802.11标准

目前 WLAN 标准有: IEEE 制定的 IEEE802.11 标准^[1]、ETSI 制定的 HiperLAN 标准、美国家用射频委员会制定的 HomeRF 标准^[7]。其中 IEEE802.11 标准定义了无线局域网物理层 (PHY) 和媒体访问控制层 (MAC) 的协议规范, 允许无线局域网及无线设备制造商在一定范围内建立无线网络的互联互通。

(1) IEEE 802.11

IEEE 802.11 标准在物理层有两个 RF 和一个红外线传输。RF 传输采用扩频调制技术: 直接序列扩频 (DSSS) 和跳频扩频 (FHSS)。DSSS 采用 BPSK 和 DPSK 调制技术, 支持 1Mb/s 和 2Mb/s 数据速率。FHSS 用 2~4 电平 GFSK 调制技术, 支持 1Mb/s 数据速率, 有 22 组跳频图案、79 个信道。红外线传输工作在 850~950nm 段, 峰值功率 2W, 采用 4 或 16 电平 pulse-positioning 调制, 支持数据速率 1Mb/s 和 2Mb/s。

(2) IEEE 802.11b

IEEE 802.11b 是 IEEE 802.11 的扩展, 采用 DSSS 技术和补偿编码键控 (CCK) 调制, 物理层分 PLCP 和 PMD 子层。PLCP 是为写入 MAC 子层准备的通用接口, 提供载波监听和无干扰信道评估; PMD 负责无线编码。IEEE 802.11b 实行动态传输速率。

(3) IEEE 802.11a

IEEE 802.11a 是 IEEE 802.11 的补充, 采用正交频分复用 (OFDM) 扩频技术和 QFSK 调制来提高传输速率和整体信号质量。IEEE 802.11a 和 IEEE 802.11b 采

用 CSMA/CA 协议,物理层不同: 802.11b 工作在 2.4000~2.4835GHz 频段; 802.11a 工作在 5.15~8.825GHz 频段, 数据传输速率达 54Mb/s。

(4) IEEE 802.11g

802.11g 是混合标准, 有两种调制方式: 802.11b 中采用 CCK 和 802.11a 中采用 OFDM。它在 2.4GHz 频段提供 11Mb/s 传输速率, 5GHz 频段提供 54Mb/s 传输速率。

(5) IEEE 802.11i

IEEE 802.11i 对 MAC 层修改与整合, 定义了严格的加密格式和鉴权机制来改善 WLAN 安全, 包括 Wi-Fi 保护访问和强健安全网络两项内容。

(6) IEEE 802.11e/f/h

IEEE 802.11e 对 MAC 层协议改进, 支持多媒体传输和所有 WLAN 无线广播接口的服务质量以保证 QoS 机制; IEEE 802.11f 定义访问节点间的通讯, 支持 IEEE 802.11 接入点互操作协议; IEEE 802.11h 用于 802.11a 的频谱管理技术。

(7) 中国 WLAN 规范

2003 年中国宽带无线 IP 标准工作组颁布了 WLAN 的标准: 原则上采用 IEEE802.11/IEEE802.11b 标准, 充分考虑和兼顾 WLAN 设备产品互联互通, 给出技术解决方案和规范要求。国家标准的出台大大促进 WLAN 的发展, 形成更完善有序的无线网络环境。

2.2 WLAN 的技术特点与优势

与其它接入技术相比, WLAN 技术特点与优势体现在:

(1) 灵活性: WLAN 利用电磁波发送和接收数据, 通信范围不受环境限制, 网络传输范围拓宽。

(2) 便捷性: WLAN 组建、配置和维护较容易, 免去网络布线。

(3) 保密性: WLAN 中所有接入网络的合法用户设备的 ID 号码都记录在网管中心, 设置数据加密方案, 即使信号被监听也难理解内容。

(4) 经济节约性: 尽管无线局域网硬件投资比有线高, 但它减少布线费用, 在需要频繁移动和变化的环境中投资回报有保证。

(5) 抗干扰性: WLAN 采用无线扩频技术, 降低误码率, 提高抗多径干扰能力, 使无线设备同频使用, 不受外界信号干扰。用户可选择不同频道, 大大降低通信内容泄漏的机率。

(6) 易扩展性: WLAN 组成多种拓扑结构, 根据需要灵活选择。

(7) 大容量性: 无线网络支持 2.4GHz 频带下 13 个子信道, 每个信道占有 22MHz 带宽, 同时拥有 3 个完全独占的子信道, 每个子信道内依据 11 位随机码元对各基站用户编码分址, 多用户频道复用。

(8) 兼容性: 提供低价位的全兼容方案, 同国际标准兼容, 和获得 Wi-Fi 认证的无线产品互操作, 和 Ethernet 及 Token Ring 网络无缝连接, 保证原有投资。

(9) 高吞吐量: 802.11n 同时使用多个信道实现 100Mb/s 的最大吞吐量。

(10) 移动性: WLAN 建成后, 在信号覆盖区域内都可接入网络, 真正实现随时随地随意接入。

2.3 WLAN的应用

WLAN 广泛应用于以下领域:

(1) 接入网络信息系统: 电子邮件、文件传输和终端仿真。

(2) 难以布控有线局域网络架设的环境如城市建筑群、校园和工厂。

(3) 频繁变化的场所: 商家、野外勘测、军事和银行等。

(4) 需快速建立局域网: 使用可移动设备网络连接时, 无线工作站安装在中心区域, 任意节点的计算机可接入。

(5) 用于远距离信息传输: 如在林区火灾、虫害等信息传输; 公安交通管理部门。

(6) 专门工程和高峰时间的临时局域网: 商业展览、建设地点所需的短期安装, 空运和航运公司高峰时间所需的额外工作站。

(7) 流动工作者得到信息的区域: 需要在区域流动时得到信息的医生、零售商、白领等无固定工作场所的网络使用者。

(8) 办公室和家庭办公室 (SOHO) 用户: SOHO 用户需要方便快捷安装小型网络。

(9) 有线网络的延展：将服务范围扩展到电缆连接的区域外，无线宽带可作为网桥，连接不同地域的有线局域网^[8]。

(10) 高速专用线路的替代品：在楼宇间安装无线宽带设置迅速，无须按月支付。

2.4 WLAN的发展趋势

无线通信网络技术将向接入多元化、网络一体化、应用综合化的宽带无线网络发展，并逐步实现和宽带固定网络的有机融合。在以下行业中 WLAN 将有更大发展：

(1) 教育行业

科研教学网络需求大，学生流动性大，如果扩大接入有线网络节点数量，采用 WLAN 最佳。

(2) 石油工业

无线网提供从钻井台到压缩机房的数据链路以显示和输入重要数据。海上钻井平台使用 WLAN，费用低、效率高、质量好。

(3) 零售行业

采用 WLAN，借助条形码阅读器进行库存管理和数据采集加工，可依据客流快速实现对 POS 终端和计算机的重设。

(4) 医护管理

利用 WLAN，医生和护士在设置计算机专线的病房、诊室或急救中会诊查房，可实时记录医嘱、传递处理意见、查询病历和检索药品。

(5) 工厂车间

应用 WLAN，技术人员在任何地方检修、更改设计、讨论工程方案，并查阅档案、发出指令、请求技术支持。

(6) 展览和会议

WLAN 使工作人员在极短时间内得到网络服务、获得资料，也可使用移动计算机互通信息、传递稿件和制作报告。

(7) 金融服务

银行和证券、期货交易通过无线网络支持将各机构相连，迅速传递到计算机、报价服务系统和交易大厅的显示板，交易者迅速利用信息管理直接交易，避免不准确信息和时间延误造成损失。

(8) 旅游服务

旅馆采用 WLAN，可随时随地为顾客服务。登记和记账系统一建立，顾客无论在区域内任何地点活动，都可更新记账系统，不必等待核算结果。

(9) 移动办公系统

办公环境中使用 WLAN，可使计算机移动，在网络范围内实现计算机漫游，及时查阅资料获取信息。管理人员可在任何地点发布指示、通知事项、联系业务，随时随地移动办公。

第三章 无线Mesh网络

在实际应用中，多数 WLAN 网络在有效距离内有“盲区”，这些区域呈现出较低的信号质量。由于存在干扰物体或信号强度较低的缘故，该区域中的用户网络通信质量受到严重影响。“点到多点”的 WLAN 是有中心的主从网络，整个网络对于 AP 的依赖性很强，单个故障特别是 AP 发生故障就可轻易使整个网络瘫痪。针对上述问题，一种新型的网络结构形态——无线 Mesh 网络应运而生。

3.1 无线Mesh网络的网络结构与特点

无线 Mesh 网络（Wireless Mesh Network）简称 WMN，是新型的无线通信网络，具有自组织性和自愈的特点，并有有效的移动用户管理和跟踪机制，是多跳的宽带无线网络，也是大容量、高速率的分布式网络。它可看作是无线局域网（WLAN）和移动自组网（MANET）网络的融合，建网方便快捷、成本低，具有传统有线和无线网络系统无可比拟的优势，能为无线个域网、局域网、校园网甚至城域网提供无线宽带接入服务。

3.1.1 WMN与WLAN的联系与区别

在拓扑结构上，WLAN 是典型的点对多点网络，而且采取单跳方式，因而数据不可转发；WMN 无网络基础设施，是多跳无线网络，可以通过 WR 对数据不断转发，实现网络自形成、自伸缩、自愈和自诊断等。

在网络设备上，WLAN 的 AP 负责终端设备的接入；WMN 所有节点均能承担本地接入与其他节点的信息转发功能，具有路由器和中继器功能。

在路由协议上，WLAN 固定路由；WMN 则采用动态路由，路由冗余和自愈能力强。

在 WLAN 中，两个彼此相邻的设备不能直接通信，必须借助 AP 接入与转发；WMN 的典型情况下，两个彼此相邻的设备可以直接通信。

3.1.2 WMN的网络结构

无线 Mesh 网络是由网状路由器（mesh router）和网状客户端（mesh client）

两种网络实体组成。除了有传统无线路由器的网关/中继功能外,无线 Mesh 路由器还有支持 Mesh 网络的路由功能。为进一步提高 Mesh 网络的灵活性,Mesh 路由器通常多个使用相同无线访问技术或不同无线访问技术的无线接口。与传统无线路由器相比,无线 Mesh 路由器以低很多的传输能量实现相同覆盖范围的多跳通信。网状客户端既是业务的使用者也是业务的提供者。客户端节点通过其它相邻客户端节点或路由器以多跳的方式实现骨干网的接入,从而增强网络的覆盖能力。无线 Mesh 网络的架构根据节点功能分为三类^[9] :

(1) 基础结构/骨干无线 Mesh 网络

这种无线 Mesh 网络由 Mesh 路由器为连接到它们上的客户端形成基础结构。除了最常用的 IEEE 802.11 技术外,无线 Mesh 网络的基础结构可使用不同的无线电技术。Mesh 路由器在自己之间形成一个自组织、自愈合的 Mesh 网络。Mesh 路由器通过网关功能与 Internet 相连,为传统客户端提供骨干网,并使无线 Mesh 网络通过 Mesh 路由器的网关/网桥功能与现有的无线网络融合。有以太网接口的传统客户端通过以太网链路 with Mesh 路由器连接。对于与 Mesh 路由器使用相同无线电技术的传统客户端,可直接与 Mesh 路由器通信。如果使用不同的无线电技术,客户端必须通过与 Mesh 路由器有以太网连接的基站通信。

基础结构/骨干无线 Mesh 网络是最常用的类型。路由器上一般使用两种无线电技术,分别对应骨干通信和用户通信。Mesh 骨干通信可通过使用包括定向天线在内的远距离通信技术。

(2) 客户端无线 Mesh 网络

Client Meshing 提供客户端设备间的对等网络。在这种架构类型下客户端节点构成了实际网络以完成路由和配置功能,同时为客户提供终端用户应用。因此在这种网络中不需要 Mesh 路由器。在客户端无线 Mesh 网络中,发向网内节点的数据包通过多个节点转发到目的地。客户端无线 Mesh 网络通常使用无线电技术的设备,与基础结构无线 Mesh 网络相比,对终端用户设备要求增加,必须有路由和自配置等额外的功能。

(3) 混合无线 Mesh 网络

是上面两种网络的结合,Mesh 客户端与其他 Mesh 客户端直接 Mesh 通信的同

时, 可以通过 Mesh 路由器访问网络。而基础结构提供了与其他网络的互联 (如 Internet, Wi-Fi, WiMAX、蜂窝网、传感器网络等); 客户端的路由能力在无线 Mesh 网络中提供了更好的连通性和更大的覆盖范围。混合架构将是最有应用前景的方案。

3.1.3 WMN 的特点

与传统无线接入技术相比, WMN 有新的结构和技术上的特点^[10] :

(1) 多跳路由

WMN 采用 MANET 式的多跳路由技术, 与传统单跳无线网相比, 无线链路更短、发射功率更小、节点间干扰更少和频率重用效率更高, 可在不牺牲信道容量的前提下获得更高的系统容量, 扩展现有无线网络的覆盖范围; 同时可在不具有视距无线链路的用户之间提供非视距连接。

(2) 网状结构

WMN 具有网络结构灵活、易于部署和配置、容错以及网状连接多点到多点通信等特点, 使得 WMN 初始部署成本相当低, 并可根据需要逐步扩容。自组织自愈能力使 WMN 不用网络管理员手工配置网络, 可以自动发现新节点、完成配置过程, 自动维护网络正常运行, 在出现节点、链路故障时也可自动调整完成网络自愈。

(3) 多种类型的网络接入

在 WMN 中, 既支持无线终端接入骨干网, 又支持无线终端间的对等网络通信。此外把 WMN 技术与其他无线网络集成, 向终端提供各种多媒体业务。

(4) 移动性以及能耗限制与节点类型相关

WMN 中 Mesh 网关和路由器静止不动, 而 Mesh 终端既可移动也可固定。同时前者采用外接电源, 没有能耗限制; 而移动 Mesh 终端由电池供电, 要采用有效的节能机制。这样 WMN 中的 MAC 协议以及路由协议需要针对 MR 和 MC 分别设计和优化。

(5) 与现有的无线网络具有兼容性及互操作性

通过 WMN 给现有的无线网络终端用户提供无线接入业务。基于现有网络技术或标准的 WMN, 在支持原标准上与这些标准兼容, 还与其他无线网络有互操作

性。

与传统无线接入技术相比, WMN 有以下优点:

(1) 可靠性提高

WMN 采用网状拓扑结构, 避免了点对多点星形结构的缺陷, 如 802.11 WLAN 和蜂窝网等由于集中控制方式而出现的业务汇聚、中心网络拥塞以及干扰、单点故障, 可靠性大大增强, 不需要额外的可靠性投资成本。

(2) 碰撞减轻

无线 Mesh 网络可减轻业务执行时碰撞现象的发生。WMN 中提供多个可选路径, 业务在执行过程中受路径碰撞的影响会降低; WMN 还提供碰撞保护机制, 若未经认证的无线链路执行 Mesh 业务引起碰撞时, 系统将自动对此碰撞与链路标识, 并将此链路上执行的业务转移到可选链路中。另外在无线 Mesh 网络节点中的可选链路与本身链路的夹角为钝角或为相反方向, 为减轻链路间的干扰创造了条件, 通常同一方向的可选路由或可选链路处于雨天天气条件下的几率要大于方向相差较大的可选路由或链路, 因而呈钝角关系的路由或链路受天气因素的影响大大降低, 这从侧面减轻了业务执行时发生碰撞的可能性。

(3) 简化链路设计

WMN 通常只要较短的单跳无线链路, 所以不用安装天线塔, 天线安装在屋顶、电线杆和路灯灯柱上, 这样降低天线的成本, 同时降低发射功率, 也将随之减小不同系统射频信号间的干扰和系统自干扰, 简化了无线链路设计。

(4) 网络覆盖范围增大

在 WMN 中, 由于 Mesh 路由器和网状结构多跳路由转发机制, 终端用户可在很大范围内任何地点接入网络或与其他节点联系, 与传统的网络相比, 接入点的覆盖范围得到延伸, 频谱利用率大大提高, 系统容量得到增大, 网络的覆盖范围大大扩展。

(5) 维护方便、扩展性强

由于 WMN 本身的特点, 只要在需要的地方加上 Mesh 路由器等少量无线设备, 即可与已有的设施组成无线宽带接入网; 扩展 WMN 规模只要在 WMN 边缘增加 Mesh 路由器即可。在网络规模较大负载较重情况下适当增加 Mesh 网关节点便可

有效实现负载平衡。WMN 的路由选择特性使链路中断或局部扩容和升级不影响整个网络运行，因此提高了网络的柔韧性和扩展性。

(6) 可测量性

无线 Mesh 网络是对等网络，网络中的每个节点对等，这样连接到共同节点的链路数目就会减少，因而需要信道分配的无线链路数目也会随之减少，增加了网络的可测量性。另外对于网络带宽的配置可通过对接入点 AP 的配置完成，而且通过运行在节点和接入点上的无线 Mesh 路由（WMR）协议对不同业务进行带宽的匹配，来实现不同业务间带宽的平衡。

(7) 投资成本低、风险小

WMN 无需基站等大型基础设施，初建成本低，AP 和 Mesh 路由器一旦投入使用，位置基本固定不变，网络资源利用率高。WMN 具有可伸缩性、易扩容、自动配置和应用范围广等优势，对于投资运营商来说，短期内即可收回成本获得盈利。

3.2 无线 Mesh 网络的应用与发展

WMN 的研究开发以实际应用需求为驱动力，应用场景和应用范围相当广泛，有着不可替代的作用和优势。WMN 可以和 802.11 WLAN 以及 3G 等各种无线接入技术相结合，实现家庭网络、社区网络、企业网络以及城域网络内的多层次多范围的无线应用^[11]。

3.2.1 无线 Mesh 网络的应用

(1) 宽带家庭网络互联

目前宽带家庭网络互连大多采用 802.11 WLAN 来实现，在 WLAN 中 AP 的放置现场勘察仍会产生覆盖不到的盲区。为消除盲区，可在家庭互连网络中采用 WMN 技术，放置多个小型室内 MR，以多跳 Mesh 网络互连家庭内部数字设备可以有效的消除盲区，同时还能大大提高网络的容错性，减少由于访问产生造成的网络拥塞。

(2) 社区网络互联

采用 WMN 技术形成一个社区无线多跳网络，可以在社区内用户家庭间共享

若干个 Internet 接入设备,不必在每个用户家庭安装,大大减少社区用户上网的费用,提高网络资源利用率。同时社区 WMN 可以容许社区用户家庭无需通过远端服务提供商网络,就能在社区本地相互访问,共享社区内网络资源。

(3) 企业网络互联

目前 802.11 WLAN 已经在企业办公室写字楼中广泛应用,但这些 WLAN 或者相互没连接,或者采用不经济的有线以太网方式相连。采用 WMN 技术通过 MR 将 WLAN 互连,一方面可以解决 WLAN 网络间连通性问题,另一方面相对采用有线互连方式还可以节约成本,灵活部署。

(4) 城域网络互联

通过 WMN 网络,整合其他无线接入技术可以形成一个城域大范围、多层次、多样化接入方式的无线接入网络,使得城域无线接入网络的覆盖广度深度都大大增加。

(5) 智能交通系统网

WMN 应用于汽车、火车等交通工具里,结合外边交通路线沿线的 MR 为乘客在行进中提供方便的接入信息服务,也为司机提供信息交流。还能用于交通路线的系统监控。

(6) 楼宇自动化无线网

在建筑物里的电力、电梯、空调等设备可以通过 MR 采用 WMN 组成无线网络进行管理,大大减小以往有线方式和 Wi-Fi 方式组网的成本。

此外校园网、医院、旅游休闲场所应用、快速部署和临时网络应用、灾难恢复、大楼商场安全监控系统、军事应用以及不宜破坏地形外貌的场合等领域都是 WMN 应用的重点地区,在这些地区部署 WMN 相比较于有线网和传统无线网有着无可比拟的优势。WMN 还可以与 WLAN 结合,将位于同一较大区域的多个 WLAN 通过 WMN 方式连接,一方面可以实现 WLAN 间的互通,另一方面可以使多个无线局域网共享网络出口。通过将 WMN 和其他无线接入技术结合,形成一个层次化的宽带无线接入网络。无线 Mesh 网络既是 WLAN 的延伸,又可以作为 3G 的补充,解决接入网的瓶颈问题。因此无线 Mesh 网络技术将给宽带领域带来重大变革。

3.2.2 无线Mesh网络的发展现状

美国 Mesh Networks 公司开发了相关的无线硬件和智能路由软件, 构建的无线 Mesh 网络支持诸如手机和笔记本等移动终端, 这些终端可以自由接入或退出网络, 当两个或更多终端离开网络范围时, 还可以组成自己的微型网。

无线 Mesh 网络作为一种新的宽带无线接入方式已引起业界的关注, 它将会对用于驻地用户宽带接入网络的 DSL 技术和电缆技术带来竞争压力。很多公司已开始将无线 Mesh 技术用于宽带网络接入, 并且相关的无线路由器产品开始商用^[12]。如诺基亚公司推出的无线路由器可以安装在屋顶上, 其产品目前已获得很多运营商的青睐, 他们将借此建立以用户为基础的高速无线网络。无线 Mesh、智能天线和超宽带技术的融合将会更深刻地影响无线网络的未来。

3.3 无线Mesh网络的关键技术研究

无线 Mesh 网络中的关键技术成为 WMN 的主要研究课题^[13]:

(1) 多址接入技术 QDMA

正交分割多址接入技术是 Mesh Networks 公司的专利技术, 专门为广域范围内通信最优化以及移动 Mesh 网络系统设计。QDMA 使用直接序列扩频 (DSSS) 调制技术。由于 QDMA 在 MAC 子层使用多信道方式, 因此与单信道相比更能适用于高密度的无线 Mesh 网络终端设备。QDMA 可在较广的移动通讯范围内提供较强纠错能力, 增强抗干扰能力, 提高信号灵敏度, 在高速移动环境下可提供达 6Mbps 的峰值数据传输速率。QDMA 内置定位技术能不依赖于全球定位系统 (GPS) 对通信设备精确定位, 误差不超过 10 米。

无线 Mesh 网络的物理层也可采用正交频分复用 (OFDM) 技术。OFDM 技术是将高速数据流进行串/并变换, 分配到传输速率相对较低的若干个正交子信道中, 在每个子信道上进行窄带调制和传输。OFDM 结合分集、时空编码、干扰和信道间干扰抑制以及智能天线技术, 最大程度提高系统性能, 使无线 Mesh 网络性能得到进一步优化^[14]。

(2) 天线技术

天线的使用是无线 Mesh 宽带网络中的重要问题, 因为每个节点必须和多个节

点通信, 很简单的方式就是采用全向天线, 但这样覆盖范围有限、有干扰, 导致频谱利用率下降, 网络容量减小。美国 SkyPilot 公司将智能天线技术应用于无线 Mesh 网络, 允许频谱重复使用, 大大提高了频谱利用率, 同时减小干扰。在 IEEE 802.16a 宽带无线接入标准中也建议把智能天线技术应用到无线 Mesh 宽带接入网络中。

(3) 信道资源分配与管理技术

无线宽带接入系统的频谱资源有限, 必须使信道资源尽可能充分地为用户利用。采用集中式调度方式, 就由 MR 收集所有 Mesh 终端设备的资源请求信息, 分别为它们分配一定数量的带宽资源。采用分布式调度方式, 网络中所有节点的信道资源需要相互协调, 从而实现带宽的动态分配。

由于无线 Mesh 网络采用无线传输媒质, 因此存在隐藏终端和暴露终端的问题。在 WLAN MAC 协议基础上, 要解决单信道方式下的隐藏终端等问题, 可采用 MACA 协议、控制信道和数据信道分裂的双信道方案和基于定向天线的 MAC 协议等。解决多种业务和多优先级业务的公平接入信道问题, 以提高系统的综合接入能力和 QoS, 如对 WLAN 802.11e 的改进和扩展。

MAC 多信道 MAC 方案可采用多信道技术——FDMA、TDMA、CDMA、QDMA、SDMA 和以上混合, 消除干扰和隐藏终端等问题。

(4) 路由选择技术

无线 Mesh 网络是多跳网络, 具有动态拓扑的特点, 路由算法具有健壮性, 一方面能快速同步于网络拓扑结构的变化, 并适应网络规模的不断扩展; 另一方面当某个节点或某个路径发生故障时, 可通过快速的恢复过程重新找到路由。在任意的源节点和目的节点间有可能存在多条路径, 选择哪条路径成为关键问题, 将直接影响系统的性能。

无线 Mesh 网络的路由协议可以参考 Ad Hoc 网络的相关协议。评价网络层的路由协议性能, 应该综合考虑多个指标, 最终达到整个网络全局性能的最优化。

第四章 无线Mesh网络路由协议研究

好的无线 Mesh 网络路由协议应满足以下要求^[15]：(1) 分布式运行方式；(2) 提供无环路路由；(3) 按需进行协议操作；(4) 安全性；(5) 提供设备“睡眠”操作特性；(6) 对信道的支持。

无线 Mesh 网络路由协议的目标是快速、准确、高效、可扩展性好^[16]。快速指的是查找路由时间要尽量短，减小引入的额外时延；准确指路由协议要适应网络拓扑的变化，提供准确的路由信息；高效含义比较复杂，一是提供最佳路由，二是维护路由的控制信息尽量少，以降低路由协议的开销，三是路由协议应根据网络的拥塞状况和业务的类型选择路由，避免拥塞并提供 QoS 保证；可扩展性指路由选择协议要能适应网络规模增长的需要。

4.1 无线Mesh网络路由的特点

在无线 Mesh 网络路由协议设计中要考虑自身的特点。通过无线 Mesh 网络与移动 Ad Hoc 对比分析，无线 Mesh 网络路由具有以下特点：

(1) 移动性

不同类型的网络节点具有不同的移动性。WR 具有很小的移动性，而 WH 则可以为固定节点或者移动节点。在设计无线 Mesh 网络路由协议时，可以弱化移动性对路由协议的影响。

(2) 能量约束

不同类型的节点具有不同的能量约束。WR 通常不以电池为动力，所以不需要考虑能量约束。而 WH 则需要运行一种能量使用效率较高的路由协议。

(3) 业务模式

无线 Mesh 网络节点的主要业务是来往于因特网网关的业务，而对于移动 Ad Hoc 网络主要业务是任意一对节点之间的业务流。条件允许时可在接入点到任意节点之间使用先应式路由机制，从而降低这些业务的传送时间。

4.2 单信道WMN路由协议的分析

传统的无线 Mesh 路由协议都是单信道路由协议，并且根据路由发现过程的不同可以分为两大类^[17]：表驱动（Table-driven）路由协议和按需（On-demand）路由协议。

4.2.1 表驱动路由协议

表驱动路由协议也称先应式路由协议，每个节点需要维护一张或多张路由表以记录该节点到其它节点的路由。为了维护网络拓扑和路由信息的一致性，所有节点都要以定期或触发的方式更新路由表。本节介绍三种典型的表驱动协议：DSDV、CGSR 和 WRP。主要区别在于每个节点维护了不同数量的表，并当网络拓扑变化时更新信息，在网络中具有不同的传输方式。

(1) DSDV

目的地址带序列号的路径矢量路由协议 DSDV（Destination-Sequenced Distance-Vector Routing）^[18]是基于经典的 Bellman-Ford 路由机制的路由表算法，它的改进主要在于避免在路由表中形成路由环路。

算法中每个节点维护一张包括网络内所有可能目的节点和到它们路径的跳数值的路由表。每条记录带有一定的序列号标记，该序列号由目的节点分配，这一序列号使移动节点可以区分过时的路由和最近的路由，从而避免路由环的形成。

路由表的更新信息定期在全网内传播，为了缓解可能因更新造成的潜在通信压力，使用两种路由更新的数据格式：一种数据格式叫做“full dump”，它包括所有最新的路由信息，并可加在网络协议单元里完成多播。这种协议格式在偶发的移动和改变时很少使用；另一种数据格式叫做“incremental”，用于传递从上个“full dump”以来的网络改变信息。

移动节点还维持一个添加表，用于存储在更新路由信息数据包里携带的数据。在新的路由广播数据包里包括以下信息：到目标节点的跳数、到目标节点的该记录的序列号以及用于广播的最新序列号，节点总是采用带有最新序列号的路由信息。当两个更新信息有相同序列号时，将选用量寸较小即跳数目小的那条路由。移动节点同时保持更新的周期。通过以一定时间间隔传递更新消息来减少网络通信量，以及预计网络流量。

(2) CGSR

簇头网关交换路由协议 CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing) 与 DSDV 协议不同之处在于网络编址和网络组织方案的差异。这种网络是自发组织成簇的多跳互连节点的集合。在一簇节点中自发选出一个簇头节点, 用以控制一组节点, 实现簇内节点的码分结构、信道接入、路由以及带宽分配等。

CGSR 将 DSDV 作为下层协议, 本身采用的是簇头——网关的路由协议。网关节点是在两个或者更多簇头通信范围内的节点。某节点发出的一个数据包首先被送到相连的簇头, 再由簇头送到往目标方向去的相邻网关处, 再到下一个簇头。以此类推直到目标节点所在的簇头收到数据包, 传给目标节点为止。使用这种方法, 每个节点要维护一个“簇头元表”以存储相对于每个目标节点的簇头。这个表周期地在网络上用 DSDV 的方法广播, 节点相应更新。

除此之外每个节点还必须维护一个路由表, 用于决定到每个目标的下一跳地址。当发送一个数据包时, 节点将根据其簇头表和路由表决定路由上离目标最近的簇头。下一个节点将检查其路由表, 寻找到上述簇头所需的路由方式, 并转发出去。

(3) WRP

无线路由协议 WRP (Wireless Routing Protocol)^[19]也是一种表驱动路由协议, 目的是在所有网络节点中维护路由信息。网络中的每个节点需要维护表: 距离表、路由表、线路花费表以及信息重传列表 (MRL)。MRL 的每个记录包含更新信息的序列号, 一个重传计数标志是否响应的标志量, 以及更新报文中的更新信息。

移动节点通过更新信息传送来通知其它节点链路的改变。更新信息仅在相邻节点间传递, 并且包含一串更新信息: 目标地址、距离以及目标地址的前一个节点。当一个节点收到其它邻居节点发来的更新信息时, 它将向其它邻居节点转发改更新消息。

节点间通过互相确认数据或其它数据传递来确认邻居节点的存在, 当一个节点在一定时间期限内没有数据发送时, 它必须发送“HELLO”数据包到其它节点, 以表明它们间链路仍然有效。否则其它节点将认为到该节点的链路中断, 继而发出错误的更新信息。当其它节点接收到新节点发出的“HELLO”数据时, 将更新路由表, 并向该节点转发自己的路由表信息。

WRP 对于避免形成环路有新颖之处。在 WRP 中路由节点间相互通知路由距离和紧邻目标节点的上一跳信息，可避免计数到无限的问题，使最后不形成环路，路由收敛更快。

4.2.2 按需 (On-Demand) 路由协议

按需路由协议也称反应式路由协议。在按需路由协议中，并不是每个节点都要维护最新的路由信息，路由只在需要时才创建。当源节点需要发送数据到目的节点时，源节点才启动路由发现机制寻找到达目的节点的最佳路径。这里介绍三种典型的按需路由协议：AODV、DSR 和 TORA。

(1) AODV

按需即离向量路由 AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)^[20]是一种对等的、基于目的的反应式路由协议，主要包括路由发现和路由维护两个过程。它采用目的节点产生的序列号避免路由环路的产生，并根据需要来创建路由并维护广播数量的最大值。

路由发现过程：

- 1) 源节点没有到达目的节点的已知路由时，广播一个路由请求报文。
- 2) 接收到该请求的中间节点反向记录下指向源节点的目的向量，然后重新广播该请求报文。
- 3) 当路由请求报文到达目的节点时，目的节点利用记录在报文中的反向目的向量为路由发送路由响应报文。
- 4) 如果中间节点知道最新的指向目的节点的路由，它就代替目的节点直接发送路由响应报文。
- 5) 当路由响应报文返回源节点时，每个中间节点相应产生“正向”目的向量，源节点就可以沿着新建立的路由开始发送数据。

AODV 的目的向量算法仍可能产生路由环。AODV 采用由目的节点产生的序列号来保证路由时效性。每个路由请求报文都标记源节点可从目的节点获得的最大序列号。当且仅当中间节点记录的指向目的节点的路由序列号大于等于请求报文中的序列号并且该路由仍有效时，中间节点才可代替目的节点发送路由响应报文至源节点。如果是由目的节点发送路由响应报文，则该报文中的序列号反映了

目的节点所知的最新的拓扑变化。

路由维护过程:

1) 节点发现某条链路失败时发出主动的路由响应报文到使用该链路的每个邻居节点, 将报文中距离设为无穷大并将序列号加 1。

2) 该路由由响应报文将到达所有使用到这条失败链路的源节点, 从而在源节点引发新的路由发现过程。

3) 目的节点检测到与其相连的链路发生错误时, 将序列号加 1, 但不产生主动的路由响应报文。

(2) DSR

动态源路由 DSR (Dynamic Source Routing)^[21]是一种对等的、基于拓扑的反应式自组织路由协议。特点是采用积极的缓存策略以及从源路由中提取拓扑信息。

路由发现过程:

1) 源节点没有到达目的节点路由时, 广播一个路由请求报文。

2) 每个收到该报文的中间节点附加上自己的 ID 然后重新广播。

3) 当路由请求到达目的节点或者某个知道某条到达目的节点路由的中间节点时, 目的节点可以确定一条到达目的节点的完整源路由。

4) 目的节点或中间节点将所得的源路由包含在路由响应报文中, 然后沿着反向路由发送至源节点或者附带在目的节点路由请求报文中。

5) 源节点收到路由响应报文后, 将源路由存入缓存并添加到每个数据报的头部, 中间节点根据数据报头中的源路由转发数据报。

在 DSR 中结合了许多基于积极缓存和拓扑信息分析的优化措施。如果设置节点的网络接口工作在混杂模式下, 通过监听邻居节点使用的路由, 节点还可能获得更多的拓扑信息。通过这些方式节点将越来越多的“感兴趣”的网络拓扑信息存入缓存以提高路由查找的命中率。高的缓存命中率意味着可减少进行路由发现过程的频率, 节约网络带宽。

路由维护过程:

1) 数据报的传输过程中如果发现链路失败, 可以由中间节点使用缓存中的可用路由来代替原头部中含有失败链路的路由, 并且发送路由错误报文至源节点。

2) 中间节点监听路由错误报文以删除失败路由, 以减小缓存错误路由信息的影响。

3) 如果路由失败, 由源节点重新开始一次新的路由发现过程。

4) 如果节点发现数据报头部的源路由中包括自己 ID, 可以主动发送路由响应报文告知源节点存在更短路由。

3. TORA

临时顺序路由算法 TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm) 是一种基于链路反转概念的高度自适应、高效、可扩展的分布式路由选择算法, 由早期的链路反转算法基础上发展而来, 为每个目的节点构造基于目的的有向无环图。如果链路变化导致某个节点失去其所有的输出链路, 则该节点反转部分或全部输入链路的方向。主要特点是控制信息被限制在拓扑变化点附近的一组非常少的节点中, 因此节点需要维护邻近节点的路由信息。TORA 包括三个基本功能: 路由创建、路由维护和路由删除。每个节点包含五个相关参数: 链路失败的逻辑时间、用于定义新的参考层的唯一的节点 ID、反应指示比特、传播排序参数、节点 ID。

TORA 使用 QRY 和 UPD 分组进行路由创建。路由创建算法初始时将目的节点的高度 (传播排序参数) 设为 0, 其它所有节点高度设为 NULL。源节点广播一个带有目的节点 ID 的 QRY 分组, 具有非 NULL 高度值的节点使用带有自己高度值的 UPD 分组响应。收到 UPD 分组的节点将自己的高度值设为比发送 UPD 分组节点的高度值大 1。具有较大高度值的节点视为上游节点, 较小高度值的节点视为下游节点。

AODV、DSR 和 TORA 都是按需路由协议, 在需要时才发起路由发现过程, 采用了类似的路由发现机制, 但具体的实现过程有差别。DSR 的特点是使用源路由, 即发送者完全知道经过哪些中间节点最后到达目的节点: 这些路由存储在一个缓存中, 数据包在它的包头携带所需的源路由信息。所以 DSR 的 RREQ 包头比 AODV 大, 因为 DSR 的包内必须包括该条路径上所有的节点信息, 而 AODV 只需要目标节点地址。同样 RREP 也是 DSR 的大, DSR 的 RREP 需要包含所有路由节点的地址。因此 DSR 非常依赖源路由和路由缓存技术。

DSR 在缓存中对每个目的节点可以有 multiple 路由, 但 AODV 使用传统的路由表,

通常每个目的节点只有一条路由记录，并且它们在维护路由信息上采用完全不同的机制。TORA 从源节点开始为每个节点指定参考层和相对高度，利用这些参数为节点建立逻辑关系，并根据高度值来建立路由。

4.3 多信道WMN路由协议的分析

为充分利用无线资源以提高网络容量，新的路由协议都提出了对多信道的利用^{[15][16][17]}。下面主要介绍以下路由协议：混合路由协议（HWMP）、多信道路由协议（MCRP）和多射频链路质量源路由协议（MR-LQSR）。

4.3.1 混合路由协议HWMP

混合路由协议 HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)^[22]是 802.11s 为使无线 Mesh 网络中的设备能相互通信而采用的默认路由协议。

如果网络中没有根节点，采用按需路由方式：用 Route Request (RREQ) 和 Route Reply (RREP) 机制建立源节点和目的节点间的路由。RREQ 附加一个 metric 消息以获取源节点和目的节点路径的质量。RREQ 中的 metric 初始值为 0。每个中间节点根据它和相邻节点间的链路质量来更新 RREQ 中的 metric 值。Source 每个节点能收到多条来自不同路径的同一 RREQ 消息，节点根据携带的 metric 判断源节点和自己间的最优路径，并对自己的路由表更新，继续将 RREQ 广播出去。由于在无线网络中链路质量不稳定性，在通信过程中对路径的质量也可能改变。为保证通信的连续性，在通信过程中源节点通过周期性 RREQ/RREP 探测网络中链路质量的改变。对于目的节点返回的最优备选路由，源节点进行缓存，如果当前链路发生质量下降就可立即查找缓存的路径继续保持通信连续。

如果 Mesh 网络中有根节点，采用树分层路由方式。对于网络的根节点，该节点首先广播通知相邻节点自己存在。收到根广播消息后，其它节点通过 RREQ 和 RREP 机制在路由表中维护着到自己到根节点的路由。当节点 S 需要向目的节点 D 发送数据时，首先在自己路由表中查找到节点 D 的路由。如果路由表中有到达节点 D 的路由并且路由有效，节点 S 就沿该路由发送数据。如果路由表中有到达节点 D 的路由或路由失效，节点将直接通过到根节点的路由将数据包发送到根节点，然后由根节点对该数据包转发。

在对多信道网络支持方面的假设：如果节点采用多收发器多信道模型，该点在所有接口上收到同一条 RREQ 消息。对于这些来自不同接口的 RREQ 消息，节点通过判据参数的比较找出最优接口并将该接口设置为反向路径接口。

4.3.2 信道路由协议 MCRP

信道路由协议 MCRP (Multi-Channel Routing Protocol)^[23]是在 AODV 基础上提出的单收发器多信道路由协议。

该协议只有一个收发器，即节点在某时刻只能工作在一个信道上，为提升网络性能和路由发现的概率，部分节点要在数据传输时信道切换。但是信道切换将带来“盲区问题”。为避免“盲区问题”，对节点的信道切换进行限制：在同一条路径上的连续两个节点不能同时为切换节点，其中一个节点必须只工作在某个特定信道上；一个节点进行信道切换时，必须立即通知其邻节点；节点的信道切换不能过于频繁，比如不允许根据单个数据包进行信道切换；无论节点有多少可用信道，节点只能在有限信道之间进行信道切换。

(1) 节点状态

在 MCRP 中，每个节点有 4 种可行状态，：

- a. 自由状态：节点没有任何数据流业务，并且可以自由地进行信道切换。
- b. 锁定状态：节点在某个信道上有一条数据流业务。
- c. 切换状态：节点为多条的交叉点，并且多数据流工作在不同的信道上，此节点在多个信道之间切换。
- d. 硬锁定状态：该节点的上游或下游节点为切换状态。节点处于某数据流中，但节点不能切换到其它信道上。

(2) 路由发现过程

当一个节点需要发送数据时，将通过广播路由请求 RREQ 发起路由发现过程。在多信道网络中，节点将工作在不同信道上，RREQ 消息必须在所有信道上进行广播。假设网络有 n 条信道，节点 S 想要发现节点 D 。节点 S 初始化在信道 1 上，那么 S 将在 n 条信道上分别广播 RREQ，再返回到原工作信道 1。当一个中间节点收到该 RREQ 后，它同样遍历所有信道将该 RREQ 广播出去，广播结束后中间节点将返回原工作信道。由于 RREQ 在所有信道上进行广播，无论 D 是任何工作信

道上都将收到此消息。RREQ 消息被转发时，中间节点将和 AODV 一样设置一条到达源节点 S 的反向路径。

(3) 信道负载均衡

MCRP 把节点周围数据流的数目作为冲突的衡量准则。为获得邻居节点的相关信息，MCRP 使用“HELLO”消息。节点周期性地所有信道上广播“HELLO”消息和自身的状态，节点维护着一个数据流表，记录节点与邻节点各信道上数据流的数目。

(4) 信道切换

通过路由发现，源节点获得到达目的节点的路由，即可发送数据。MCRP 为每条数据流分配公共信道，节点在公共信道上发送数据，不需要切换信道。但因为节点不断地在信道间切换，所以与切换节点的通信变得相对复杂。如果切换节点在某信道上逗留时间过长，另一信道上的发送节点多次发送失败后，将误判为该链路失败，导致包丢失。所以邻居节点必须清楚地知道切换节点当前的工作信道。为达到这个目标，切换节点可以使用 JOIN/LEAVE 消息广播自身的信道状态。假设切换节点 B 需要从信道 i 切换到信道 j ，在信道切换前 B 要在发送 LEAVE i 信道的消息。信道 i 的邻节点收到消息后，将清除所有以节点 B 为下一跳的数据报的 active 值。然后节点 B 切换到信道 j 上。切换完成后 B 要发送 JOIN j 信道的消息。信道 j 的邻节点收到该消息后，将设置所有以节点 B 为小一跳的数据报的 active 值。

4.3.3 多射频链路质量源路由协议 MR-LQSR

多射频链路质量源路由协议 MR-LQSR (Mufti-Radio Link-Quality Source Routing) ^[24]是在 DSR 基础上提出的多收发器多信道无线 Mesh 网络的路由协议。假设 WMN 中所有 MR 均为静态节点，每个节点有多个不同且互不干扰的无线收发器，可以同时进行收发操作。该协议能明显地增大网络吞吐量和提高网络性能。MR-LQSR 不但要获得路径中节点和其邻居链路相关状态信息，而且还要综合链路状态信息来评价链路质量的优劣，形成自身的路由准则，查找出最优路由。

MR-LQSR 协议采用新的路由性能判据，称为加权累计传输时间 WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time)。WCETT 综合考虑了带宽等

链路性能参数以及最小跳数等因素。该协议能在网络吞吐量与延时之间获得平衡。对于一条路径中的各个链路的期望传输时间 ETT (Expected Transmission Time) 给每个链路赋权值。链路的期望传输时间 ETT 是链路分组丢失率和链路带宽 B 的函数，其中 S 表示数据分组大小：

$$ETT = \left(\frac{S}{B} \right) \times ETX \quad (4.3.1)$$

期望传输计数值 ETX (Expected Number of Transmissions) 是链路上估计的重传次数。其中 p 为分组从 X 传输到 Y 不成功的概率，是通过网络测量统计得到的链路分组丢失率， $s(k)$ 为经过 k 次尝试之后成功传输的概率：

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k \times s(k) = \frac{1}{1-p} \quad (4.3.2)$$

MR-LQSR 量度综合考虑了跳数、链路质量和路径内信道间的干扰来进行路由选择。利用赋给链路的权值寻找到达目标节点的最优路径，路径的准则为加权累计 ETT——WCETT：

$$WCETT = (1-\beta) \times \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta \times \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (4.3.3)$$

第 1 项反映了该路径上各跳花费的总时间消耗，第 2 项反映了对吞吐率影响最大的一些跳的子集。其中：

$$X_j = \sum_{\text{第 } i \text{ 跳链路运行在信道 } j \text{ 上}} ETT_i \quad 1 \leq j \leq k \quad (4.3.4)$$

公式 4.3.4 表明一条路由上运行在信道 j 上的所有链路 i 的 ETT 总和。一条路由所用信道多样性越好，信道间的干扰就越少，吞吐量就更高。WCETT 量度可看作是延迟与吞吐量的折中。其中 β 为权值系数，是单个流吞吐量最大化与综合资源消耗最小化的平衡因子。 β 的选取会对路由的选择造成一定影响。 β 较大则对吞吐量的考虑较多，更偏重于频率分集の利用； β 较小则倾向于选择较短的路径。

假设从源节点到目的节点共有四条路由供选择，表 4.1 列出这四条路由在 β 值为 0.9、0.5 和 0.1 三种情况下的 WCETT 值：

表 4.1 β 值为 0.9, 0.5 和 0.1 三种情况下的 WCETT 值

Route 1	$\beta=0.9$	$\beta=0.5$	$\beta=0.1$
	23.1	27.5	31.9
Route 2	21.4	27	32.6
Route 3	19.3	24.5	29.7
Route 4	27	27	27

先比较路由 1 和 2, 这两条路由的跳数和使用信道数目都相同, 并且链路的 ETT 值比较接近, 当 β 值选为 0.9 时路由 2 的 WCETT 值比路由 1 的小, 表明路由 2 的吞吐量更高, 而当 β 选为 0.1 时路由 1 又比路由 2 佳。从这里看出 β 值的选取对路由选择的影响。因为测试环境规模的限制^[25], 只是经验性的给出以下结论: 当网络复杂比较大时, 随着 β 选取值的减少, 网络的吞吐量会增高。再比较路由 3 和 4, 虽然路由 3 的跳数最多, 但因为其链路质量相对较高, 所以 WCETT 值甚至比路由 1 和 2 还小, 而路由 4 虽然跳数最少, 但是因为链路质量相对较差, 并且整条路由都是采用信道 1 进行通信, 所以吞吐量要比路由 3 差。我们得出: 传统的采用跳数作为路由选择的量度不能保证选择吞吐量最高的路由。本文正是基于 WCETT 路由量度算法, 对其进行改进, 从而网络吞吐量得到进一步提高。

第五章 基于802.11的多信道无线Mesh网络的路由量度算法

本章对基于 802.11 的多信道情况下无线 Mesh 网络的路由量度算法进行分析。结合前面部分对路由协议的分析 and 现有协议的启示, 本文设计了一种基于多量度的路由选择准则——WCETTR (WCETT-Revision), 该算法充分考虑了多跳无线网络中的跳数、信道质量、链路间的多信道必然干扰以及潜在干扰, 仿真表明通过该算法选择的路由能显著提高网络吞吐量。

路由量度是影响路由协议性能的关键参数, 因此路由量度的研究一直以来都是无线 Mesh 网络路由协议研究中的热点。如何选择最佳的路由是提高网络吞吐量的关键, 现有方法是通过寻找一种路由量度来衡量各条路由的优劣, 然后从中选择一条最佳的作为路由。传统的采用跳数作为路由选择量度的方法因为没考虑信道质量、链路的非对称性以及多信道环境下链路间的干扰, 不能满足多信道环境下的需要。为了提高网络吞吐量, 在考虑多信道路由量度选择策略时, 应该从两方面考虑:

(1) 路径自身的影响: 主要反映在所包含链路信道质量、非对称性、带宽以及路径长度上。一条路径包含的链路数量越少, 带宽越大, 信道质量越好, 这条路径端到端的时延就越少。同时因为无线链路的非对称性, 在路由选择时还要充分考虑链路传送数据的方向性。

(2) 路径间的影响: 主要表现在路径所包含链路间的信道干扰, 干扰越大网络中能同时通信的链路数就越少, 从而制约了网络的吞吐量。因此在选择路由时应选择信道多样性好、周围使用相同信道链路少的路径作为路由。

5.1 前期路由量度缺陷

文献[26]中表明: 在无线 Mesh 网络使用最小跳数作为路由量度不是很有效。某条路径上的跳数最小, 意味着该条路径上每一跳的长度被最大化, 等同于链路丢包率的最大化。如果一条最佳路由是使用最小跳数作为路由量度, 那么在一个密集的网络内, 该条路由的丢包率得不到保障。对此原来的解决方案是无视传输的错误, 例如使用 802.11b ACK 的丢包重传机制。丢包率不作为一个统计结果放入

链路质量的计算之内，只要发生丢包就调用重传机制。这使 802.11b 链路像没有丢包的链路。无限制重传机制导致的结果是降低了路径的吞吐量，同时由于重传会占用额外的信道时间，增加干扰概率。

我们用图 5.1 来描述最小跳数量度所存在的问题。

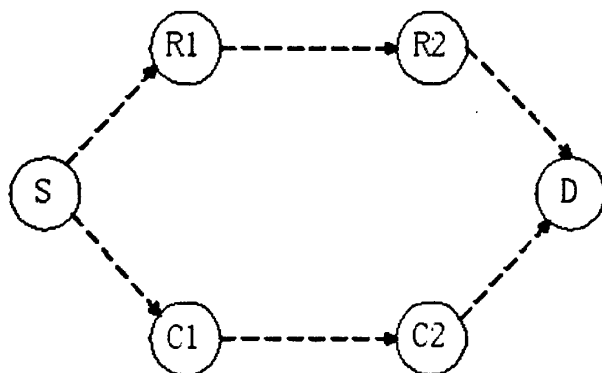


图5.1 WMN中最小跳数量度所存在的问题

假设 $R1$ 、 $R2$ 为网状路由器， $C1$ 、 $C2$ 为网状客户端。如果我们想在节点 S 和 D 间传输数据，按照最小跳数量度来计算，路径 $S \rightarrow R1 \rightarrow R2 \rightarrow D$ 与 $S \rightarrow C1 \rightarrow C2 \rightarrow D$ 具有相同的跳数，那么路由算法就选择路径 $S \rightarrow C1 \rightarrow C2 \rightarrow D$ 。但是 $R1$ 、 $R2$ 是稳定的且具有较小的移动性，它们间的链路质量要明显优于 $C1$ 和 $C2$ 间的链路质量。因此在 WMN 中，最小跳数量度就不能有效地选择出最佳路径，因为没有考虑数据包丢失率和链路带宽。

ETX 量度很好地考虑了丢包率对链路质量的影响，是无线 Mesh 网络路由量度研究中所提出的具有深远影响的路由量度，后续的路由量度大多数都基于 ETX 进行的改进。链路的 ETX 值越小，链路状况就越好；但 ETX 量度没有考虑每条链路上实际的数据传输速率。假设两个节点间有两条无线链路，其中一条链路的速率为 11Mbps，丢包率为 5%；而另一条链路的速率为 18Mbps，丢包率为 50%。那么即使 18Mbps 的链路有较高的丢包率，我们也更倾向于选择该条链路，因为在无限制重传机制下，它有较小的端到端延迟。但 ETX 却会倾向于选择 11Mbps 的链路，因为该条链路有较低的丢包率。此外 ETX 量度针对单信道网络设计，它无法发现信道多样性更好的路径。所以当无线 Mesh 路由器配置多个网卡时，ETX 会导致效率降低^[27]。

ETT 量度在 ETX 的基础上合理地引入了链路带宽 B , 从而实现了 ETX 的改进。但是 ETT 量度没有考虑一条路径上运行在相同信道上的链路间相互干扰, 即没有考虑一条路径上信道的多样性, 从而不能很好地利用无线 Mesh 网络中多信道的优势来实现对网络容量的提升。

WCETT 量度通过为路径上所有链路的 ETT 之和与瓶颈链路上的 ETT 分配合理的权值, 更加准确地反映了网络中的路径质量, 对上述量度进行重大改进。但该量度缺陷在于没有考虑流间干扰。当网络规模较大、非路由路径上的数据流对路由路径的干扰较大时, WCETT 不能捕获到该特点。

此外, WCETT 没有合理地考虑一条路径上不同信道的分配, 从而不能准确地评估两条多信道路径, 针对长路径更是如此。以图 5.2 中两条 3 个信道的五跳路径为例, 虚线下面数字代表所使用信道:

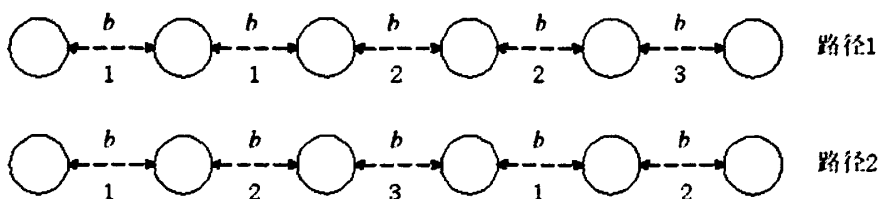


图5.2 两条多信道路径的比较

假设不同的信道相互正交, 且按照吞吐量 b 来看, 所有跳数均有相同的链路质量。使用 WCETT 来计算, 这两条路径具有相同的权值。假设每个节点的干扰区域为两跳范围以内, 在路径 1 中, 不仅第一跳和第二跳会相互干扰, 第三跳和第四跳也是如此, 所以其路径吞吐量只有 $b/2$ 。而路径 2 中任意两跳之间都不会相互干扰, 这样其路径吞吐量为 b 。因此尽管两条路径有相同的 WCETT 值, 但是路径 2 比路径 1 有更好的性能。

针对以上 WCETT 两点不足, 本文对路由量度算法进行了改进, 使得网络的吞吐量进一步提高。

5.2 WCETTR算法描述

本文算法基于如下假设:

- (1) 网络中所有节点都是静止不动的;

(2) 每个节点拥有一个或多个网卡，并且允许节点上的网卡工作在不同的信道上；

(3) 大小固定的探测包测得的前向和反向包成功发送率同样适用于其它大小的包；

(4) 探测包测得的前向和反向包成功发送率只反映信道质量，不反映其它节点对其干扰。

本文在路由量度设计中考虑了一条路经端到端的时延，主要表现在路由的跳数、链路带宽和信道质量上。此外还充分考虑了多信道环境下链路间的干扰。

5.2.1 期望传输时间和累积权期望传输时间的计算

在第四章中描述了利用赋给链路的权值寻找到达目标节点的最优路径，路径的准则为加权累计：

$$WCETT = (1 - \beta) \times \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta \times \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (5.2.1)$$

第 1 项反映了该路径上各跳花费的总时间消耗，第 2 项反映了对吞吐率影响最大的一些跳的子集。其中：

$$X_j = \sum_{i \geq j \leq k} ETT_i \quad (5.2.2)$$

第 i 跳链路运行在信道 j 上

其中 β 是在 $(0, 1)$ 间取值的可调参数。 X_j 是沿着路由路径信道 j 使用的次数。 $\max X$ 计算了路径上同一信道的最大使用次数。 ETT 代表单条链路上期望传输时间。等式右边第一项表明由 n 跳组成的路径的期望传输时间总和，也反映了这条路径的延迟。第二项表明路径上所有 k 个信道中具有最大传输时间的信道，即瓶颈信道。由于网络总吞吐量受制于瓶颈信道，第二项将被看作吞吐量的度量。

首先计算一条链路前向和反向包成功发送率。假设一条链路 $A \rightarrow B$ ，节点 A 周期性的发送探测包给 B （周期设为 $(1 + \tau)$ 秒， τ 为 $(0, 0.1)$ 之间的一个随机数，称为震荡时间，设置震荡时间 τ 是为了防止网络中所有节点同时发送探测包造成拥塞）。在 B 节点处设置一个长度为 s 的窗口，记录在过去 s 秒内 B 成功接收到来自 A 节点探测包的次数 c ，并用 c/s 作为 $A \rightarrow B$ 链路前向包成功发送率 pf 。反之 B 节点周期性的发送探测包给 A ，可求出 $A \rightarrow B$ 链路的反向包成功发送率 pr 。在

802.11 标准下，一次成功传送的定义是目的节点成功收到来自源节点的数据包，且源节点成功接收到来自目的节点的 ACK 包。从而得出发送一个包的失败概率 $p = (1 - pf \times pr)$ 。所以单跳链路的 ETX

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{r=1}^{\infty} r \times p^{r-1} \times (1-p) \\
 &= (1-p) \sum_{r=1}^{\infty} \frac{dp^r}{dp} \\
 &= (1-p) \frac{d \sum_{r=1}^{\infty} p^r}{dp} \tag{5.2.3} \\
 &= \frac{1}{1-p} \\
 &= \frac{1}{1-pf \times pr}
 \end{aligned}$$

其中 r 为失败发送后重传次数。由于 ETX 计算基于丢包率，因而它直接影响到路径的吞吐量。ETX 是方向敏感的链路参数，它对链路双向丢包率的测量值不同，体现了无线链路的非对称性。此外 ETX 的计算要有对链路丢包率的精确测量，链路测量的精确性直接影响到 ETX 性能。之后可得出单跳链路的期望传输时间 ETT:

$$ETT = \left(\frac{S}{B} \right) \times ETX \tag{5.2.4}$$

其中 S 为探测包大小为 1kb, B 为链路带宽。在不考虑信道干扰情况下，一条路由的积累期望传输时间为 $\sum_{i=1}^n ETT_i$ ，其中 n 为路由长度。

5.2.2 信道多样性及干扰量度的计算

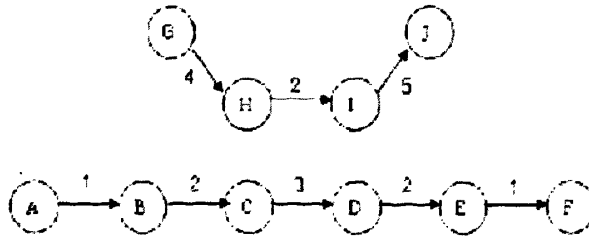


图5.3 信道多样性及链路间信道干扰

假设节点 A 有数据发往节点 F，图 5.3 中链路上所标数字为其所选用的信道。

首先只考虑路径 $A \rightarrow F$ 上信道间互扰的情况（假设干扰半径为有效发送半径的 2 倍）。链路 $A \rightarrow B$ 和 $E \rightarrow F$ 虽然都工作在信道 1 上，但它们不在对方的干扰范围内，可以同时通信；工作在信道 2 上的链路 $B \rightarrow C$ 及 $D \rightarrow E$ 因在对方的干扰范围内，所以在传送数据时这两条链路必然相互干扰。假设这两条链路的期望传输时间分别为 ETT_{bc} 和 ETT_{de} ，在只考虑路径内部干扰情况下，最大吞吐量量为理想情况下的 $\min(ETT_{bc}, ETT_{de}) / (ETT_{bc} + ETT_{de})$ 。下面给出只考虑路径内部干扰情况下的一条路由信道多样性及量度 N 的计算公式：

$$N = \max_{1 \leq n \leq N} \sum_{j \in \ln(i) \cap j \in R} ETT_j \times I(C(i) = C(j)) \quad (5.2.5)$$

其中 n 表示路由长度， $I(C(i) = C(j))$ 表示如果链路 i 和链路 j 使用相同信道，那么 $I=1$ ($i=j$ 表示链路其自身)，反之为 0。 $\ln(i)$ 表示链路 i 的干扰范围， R 为路由包含的全部链路。公式首先计算路由上每一条链路在其干扰范围内使用相同信道链路（此时仅考虑同在同一条路由上链路间的信道干扰）的 ETT 总和。因为路径中的瓶颈链路决定这条路径的吞吐量，所以从中选择一条具有 ETT 最大值的链路作为瓶颈链路来反映这条路径能获得的最大吞吐量，同时 N 还反映了一条路由的信道多样性。信道多样性越好，使用相同信道的链路就越少，从而瓶颈链路的 N 值就越小。本文衡量算法的标准是网络吞吐量，指的是单位时间内网络中所有发送接收节点对端到端吞吐量的总和^[28]。

之后考虑周围链路对路径 $A \rightarrow F$ 的影响，假设一路径 $G \rightarrow J$ ，链路 $H \rightarrow I$ 在 $B \rightarrow C$ 和 $D \rightarrow E$ 的干扰范围之内，如果在 $A \rightarrow F$ 传送数据时 $H \rightarrow I$ 也有数据传送，那么 $H \rightarrow I$ 将会和链路 $B \rightarrow C$ 以及 $D \rightarrow E$ 冲突，如果在 $A \rightarrow F$ 传送数据时 $H \rightarrow I$ 静默，那么 $H \rightarrow I$ 不会对 $B \rightarrow C$ 以及 $D \rightarrow E$ 产生干扰。所以本文将这样的外部干扰链路称为潜在的干扰链路。将路径信道多样性和干扰量度影响 N 改写如下：

$$N = \max_{1 \leq n \leq N} ((1 - \varepsilon) \times \sum_{j \in \ln(i) \cap j \in R} ETT_j \times I(C(i) = C(j)) + \varepsilon \times \sum_{k \in \ln(i) \cap k \in R} ETT_k \times I(C(i) = C(k))) \quad (5.2.6)$$

其中 ε 为权值系数。公式中第一项反映的是一条路由内部链路信道间干扰所造成的必然干扰，第二项反映的是非路由路径上链路对该路由的潜在干扰。通过改

变权值系数可分配潜在干扰在总干扰中的比重。公式反映了路径中瓶颈链路对路径吞吐量的影响，同时路由的信道多样性越好， N 值会越小；一条链路干扰范围内使用相同信道的链路越少， N 值也会越小。所以 N 同时反映了一条路由的信道多样性和这条路由所受的干扰。最后将以上两个公式结合可得路由量度：

$$WCETTR = (1 - \beta) \times \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta \times N \quad (5.2.7)$$

式中 β 为权值系数，关于 β 和 ε 的选取，将在仿真一节中研究。

下面对一个场景进行分析，如图 5.4 所示。

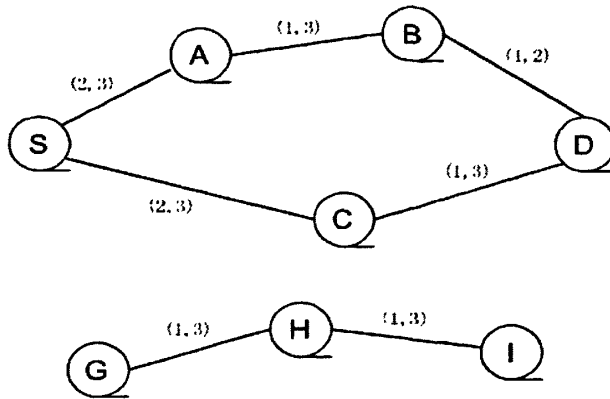


图5.4 场景分析拓扑结构

表 5.1 分别列写了两条路由的必然和潜在干扰链路， $\varepsilon=0.5$ 时的链路信道多样性和干扰量度以及 $\beta=\varepsilon=0.5$ 时的 WCETTR 和 $\beta=0.1$ 时的 WCETT 值。表中打星号的为瓶颈链路。

表5.1 不同算法的场景对比分析

路由	链路	必然干扰链路	潜在干扰链路	链路信道多样性和干扰量度	WCETTR $\beta=\varepsilon=0.5$	WCETT $\beta=0.1$
S-A-B-D	S-A	无	S-C	3	6	7.7
	A-B	B-D	C-D	4*		
	B-D	A-B	C-D	4*		
S-C-D	S-C	无	S-A	3	6.5	5.7
	C-D	无	A-B, B-D, G-H, H-I	7*		

根据 WCETT 路由量度算法选出的路由为 $S \rightarrow C \rightarrow D$ ，而根据 WCETTR 算法选出的路由为 $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D$ ，如果在这两条路由分别进行通信时周围链路都保持静默，则按照 WCETT 选择的路由具有更高的吞吐量，而当周围链路山数据流经时，因为信道冲突，路由 $S \rightarrow C \rightarrow D$ 的吞吐量降低，且链路 $C \rightarrow D$ 为瓶颈链路。所以本算法在高密度网络中，或者负载比较大的网络中拥有更好的性能。

5.3 仿真结果分析

本文采用 ns2 仿真工具^[29]先后对四种路由选择量度即最少跳数算法、ETX、WCETT 以及本文提出的 WCETTR 算法进行了仿真。本文沿用了[25]所采用的信道分配算法并将本文提出的路由选择量度 WCETTR 与 LQSR^[30]路由算法相结合。仿真的基本设置是：场景为 9×9 的正方形网格，在 100 个交点处随机选取 60 个节点作为网络拓扑；干扰半径设定为有效发送半径的 2 倍；每个节点配备 2 个 802.11a 网卡；节点数据传输方式采用 CBR，分组大小为 512 字节，发送速率为 3Mbps。

首先随机生成10种网络拓扑，对每种拓扑进行50次仿真，每一次仿真随机选取5对发送接收节点进行通信。通过仿真验证，在本文仿真环境下当WCETT算法 β 选取为0.1时，系统的吞吐量最大，所以对WCETT算法选取 $\beta=0.1$ 。这与[25]中经验性给出随着网络负载的增加， β 值的选取应减小一致。WCETTR算法的权值系数 $\beta=\varepsilon=0.5$ 。

仿真结果如图5.5所示。可看出通过WCETTR算法选取的路由比WCETT算法所选取的路由的网络吞吐量平均提高了27.1%，比ETX算法提高了153.6%，比最少跳数算法提高了360%。这里仅以WCETT算法作对比分析，因为WCETT算法仅考虑本条路由上信道间的干扰，如果存在两条路由A和B，假设它们长度相等并且信道质量相同，但是路由A比B的信道多样性略好，如果选用WCETT参数作为路由选择的标准，必选A。但如果路由A周围节点对其干扰很大，而B干扰较小，此时路由B的吞吐量很可能比A高；此外WCETT算法对于路由长度较长的信道多样性计算不准确，因为它认为一条路由中使用相同信道的链路必然相互干扰。WCETTR算法解决了上面两个方面问题，从而提高了网络的吞吐量。

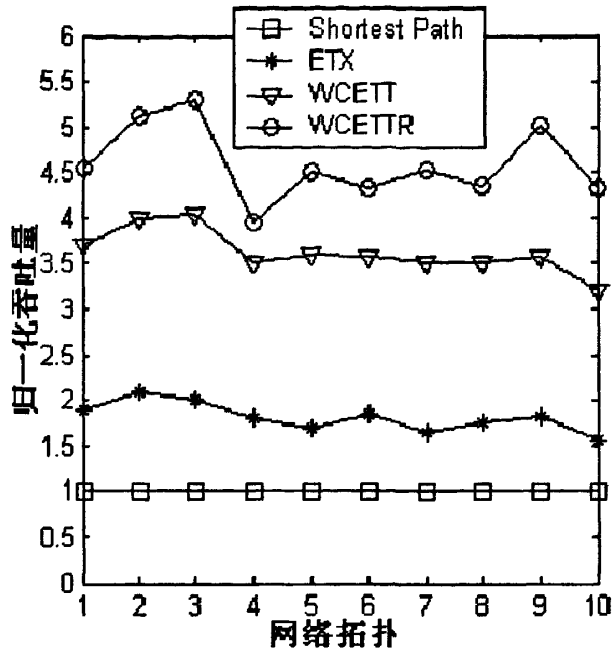


图5.5 吞吐量改进比较

下面分析在不同网络负载下， β 和 ϵ 参数的选取对系统吞吐量的影响。如图5.6所示，分别对网络同时发送接受节点数 P 为2、5和10三种情况下， β 和 ϵ 参数的选取对系统吞吐量的影响进行了仿真。图中括弧内的两个值分别为WCETTR算法的权值系数 β 和 ϵ ，这里对 β 和 ϵ 分别选取0.1、0.5和0.9之后排列组合得出9种情况，并分别仿真这9种取值下WCETTR算法对系统吞吐量的影响。为便于比较，选用WCETT算法求得的吞吐量作为归一化吞吐量。对于WCETT算法 β 值的选取，在三种网络负载下，从轻到重分别选取0.5、0.1和0.1。

(1) $P=2$ ，此时网络中只有两对节点进行通信，网络负载很低，链路间的干扰概率也很小，从而无论 β 和 ϵ 选取何值，对系统吞吐量的改进都较小，不能突出本算法的优越性。因为本算法考虑了路径的潜在干扰，但当网络负载很低时，这种潜在的干扰存在性也很低，不能保证选取的路由最优。

(2) $P=10$ ，此时网络负载很大，链路间的干扰几乎达到饱和，这种情况下链路间的潜在干扰成为必然干扰。因为本算法充分考虑了周围链路对路由的信道干扰影响，从而使吞吐量的改进非常明显。因为链路间的潜在干扰成为影响吞吐量的主导因素，所以 $\beta \times \epsilon$ 值越大，吞吐量的改进相对越高。

(3) $P=5$, 通过仿真可以看出在网络负载适中情况下本算法改进比较显著。因为网络中链路间的冲突存在但并不严重, 通过本算法能选择出受到干扰最小的路由。此时信道质量、路由长度、路由内部的干扰以及链路间的潜在干扰都成为制约吞吐量的主导因素, 所以当 $(1-\beta)$ 、 $\beta \times (1-\varepsilon)$ 、 $\beta \times \varepsilon$ 三个权值比较接近时, 吞吐量的改进最明显 (图中如e)。

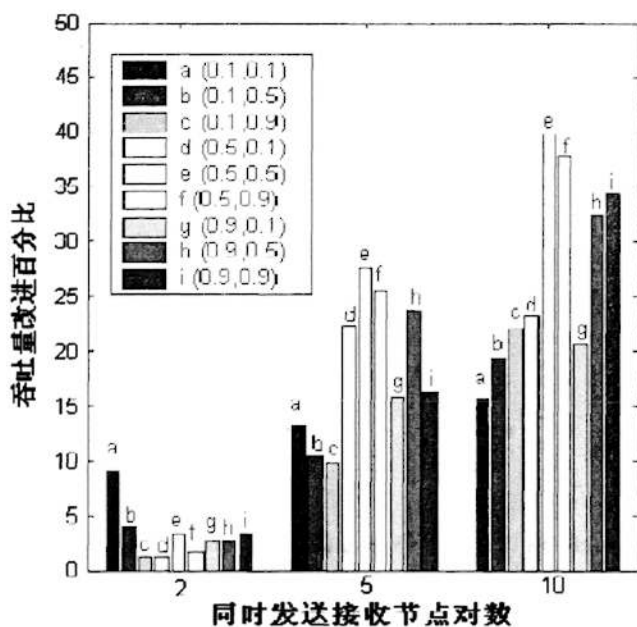


图5.6 β 和 ε 参数在不同网络负载下对系统吞吐量的影响

第六章 总结与展望

无线Mesh网络是新型的无线通信网络，具有自组织性和自愈的特点，并有有效的移动用户管理和跟踪机制，是一种多跳的宽带无线网络，也是一种高容量、高速率的分布式网络。它可以看作是无线局域网(WLAN)和移动自组网(MANET)网络的融合，建网方便快捷、成本低，具有传统有线和无线网络系统无可比拟的优势和广阔的应用前景，能为无线个域网、局域网、校园网甚至城域网提供无线宽带接入服务。

6.1 本文所做的工作及创新之处

无线Mesh网络中的每个节点都有路由转发功能，再加上网络中节点的频繁移动，使得路由技术成为无线Mesh网络中的关键技术。本文对无线Mesh网络的路由算法进行研究，主要内容是提出基于802.11的多信道无线Mesh网络的路由量度算法WCETTR，并对它进行研究与仿真。以多跳多射频的无线Mesh网络体系结构为基础，研究多个频率对网络性能的影响，将系统吞吐量、链路速率等参数作为新的路由准则，利用多射频的特性，提高网络利用率。本文所研究的是无线Mesh网络路由协议实现的基础。新的路由准则结合路由发现与维护等过程，与硬件平台设计、链路层驱动和用户认证管理部分相配合，将为提高无线 Mesh 网络系统的效率做好了准备。本文做了以下工作：

(1) 首先介绍了无线Mesh网络的研究背景和意义，阐述研究内容和主要创新点，简述本文的总体组织结构。

(2) 对本文研究的前期基础无线局域网中IEEE802.11标准、技术特点与应用领域以及发展趋势进行了介绍。

(3) 对无线Mesh网络的结构特点、应用和发展现状以及关键技术进行了研究。

(4) 根据无线Mesh网络的单信道和多信道路由协议的分类法则，分别对现有WMN路由算法研究的路由协议进行了介绍和分析。

(5) 在经典路由算法WCETT的基础上进行改进，提出了基于802.11的多信道无线Mesh网络路由算法—WCETTR，其关键思想是充分考虑了跳数、信道质量、

链路间的多信道必然干扰以及潜在干扰。通过这种方法可以根据路由积累期望传输时间以及瓶颈链路对路径吞吐量的影响，选择出一条更优的路由，并通过合理的分配权值系数使得网络吞吐量最优。文中给出了WCETTR算法的适用环境，在ns2中完整仿真实现并对仿真结果进行了分析，即在网络负载较重这种情况下，性能改进最明显。该算法比WCET算法在网络吞吐量性能方面有显著的提高。由于实验条件的限制，本论文均是在网络仿真软件的特定环境下完成，并未与实际网络环境相结合，因此具体实用起来可能会出现各种不可预见的问题，投入广泛的实际应用还需做进一步完善。在今后的上作中，我们将考虑不同探测包大小以及发送速率对丢包率的影响，从而更加完善该路由选择量度算法。

6.2 进一步研究方向及建议

由于无线Mesh网络是一种新型的解决“最后一英里”问题的分布式网络，它与Internet的互联导致它要提供一定的QoS服务。当然这是系统问题，但它的路由协议应该能更好地支持QoS服务。同时由于无线Mesh网络中节点的移动性以及链路的易受干扰性，我们仍需致力于无线Mesh网络路由的研究^[31]。

目前WMN虽然有很多优势，发展潜力巨大，但其各方面的技术还不成熟，路由协议研究中还存在许多需要解决的问题，进一步的研究工作有：

(1) WMN跨层路由设计：WMN是拓扑结构相对较稳定的多跳无线网络，各节点相对静止，影响数据传输的是物理层、MAC层的无线冲突和干扰等问题。以往研究都集中在网络第三层上，由于不考虑到底层数据传输的情况，结果并不理想。所以在WMN路由协议的设计中还要考虑底层的情况，这也是无线多跳网与有线网最大的区别，增大了无线网络设计的复杂度。为了提高WMN的性能，路由协议与MAC协议之间的跨层设计是WMN的重要研究课题。

(2) 多参数优化及QoS问题：对Mesh网络多径的研究大多只注重某个性能参数，但兼顾多个性能参数找到最优的路由算法是未来多径路由的发展趋势。同时Mesh网络中的QoS支持是当前网络研究的热点，多径路由做为实现手段，在无线网络QoS支持中将起到日益显著的作用。因此把多参数优化与多径路由结合起来是下一步研究重点。

(3) 节点的功率控制问题：由于移动Mesh网络中的节点大多是便携式设备，所以节点的功率控制是非常重要的问题。路由的中间节点如果频繁的转发数据，将导致节点的能量大量消耗。这样容易引起因为节点能量耗尽而带来的路径断裂。如何在有效的能源情况下延长每个节点的工作寿命是Mesh网络中需要迫切解决的问题。

(4) 网络规模化的问题：随着通信技术的进一步完善，Mesh网络必然会朝着大规模方向发展。如何在大规模的网络中解决好多个用户间的数据交互、如何有效的利用系统资源、如何使网络中的节点能对网络拓扑作出快速准确的反应等问题都需要更深入的研究。

WMN可广泛应用于诸如家庭、校园、小区、企业、交通、医疗和城域网等领域组网和宽带接入。无线Mesh网络作为具有众多优点的技术，通过与其他无线网络技术相结合，必将在下一代宽带无线网络中发挥极其重要的作用。

参考文献

- [1] IEEE. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11-1999, Institute of Electrical and Electronics Engineers, August 1999.
- [2] Kimaya Sanzgiri, Bridget Dahill, Brian Neil Levine, Clay Shields, Elizabeth M. Belding-Royer. A secure routing protocol for ad hoc networks. In Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Network Protocols(ICNP), Paris, France, November 12-15, 2002:78-86.
- [3] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络. 北京: 人民邮电出版社. 2006.
- [4] I. Chlamtac, M. Conti, and J. J.-N. Liu, Mobile Ad Hoc Networking: Imperatives and Challenges, Ad Hoc Networks, Vol.1, No.1, July 2003:13-64.
- [5] Richard Draves, Jitendra Padhye and Brian Zill. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks[C]. In: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. Philadelphia: ACM press, 2004:14-128.
- [6] 杜渐. 无线局域网技术. 北京: 清华大学出版社. 2003:36-80.
- [7] 叶小荣, 增兴至, 刘乃安. 无线局域网. 北京: 电子工业出版社. 2005:78-137.
- [8] 刘刚. 无线局域网技术漫谈. 北京: 机械工业出版社. 2004:122-145.
- [9] Ian F, et al. Wireless mesh network: a survey[J]. Computer Networks, March 15, 2005, 47(4):445-487.
- [10] Raffaele Bruno, Marco conti, and Enrico Gregori, Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks, IEEE Communications Magazine, May 2005:123-131.
- [11] Ian F, et al. Wireless mesh network: a survey[J]. Computer Networks, March 15, 2005, 47(4):445-447.
- [12] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, Weilin Wang. Wireless mesh networks: a survey. Computer Networks, March 15, 2005.
- [13] 傲丹, 方旭明, 马忠建. 无线网格网关键技术及其应用. 电讯技术. Vol.1.42, No.2, 2005:16-22.
- [14] QDMATM and the 802.11b Radio Protocol Compared [EB/OL], online available at: <http://www.now wireless.com>, 2004.

- [15] 英春,史美林.自组网体系结构研究.通信学报.Vol.20, No.9, 1999.
- [16] 樊自甫,万晓榆.新一代宽带无线网络结构.通信世界. No.9,2003:42-44.
- [17] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih-Chun Hu and Jorieta Jetcheva.
A Performance Comparison of Multi-hop Wireless Ad Hoc Network Routing
Protocol. Proc. of ACM MOBICOM 1998, in Dallas-Texas, USA, October 1998.
- [18] C.P.P.Bhagwat. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector
Routing(DSDV)for Mobile Computers. ACM SIGCOMM Computer Communication
Review, Vol.24, No.4, August 1994:234-244.
- [19] Shree Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves. An Efficient Routing Protocol for
Wireless Networks. ACM Mobile Networks and Applications, Vol.1, No.2,
1996:183-197,
- [20] C.Perkins, E.Belding-Royer and S.Das. Ad Hoc On-demand Distance
Vector(AODV)Routing Protocol. RFC 3561, Internet Engineering Task
Force(IETF), July 2003.
- [21] D. B. Johnson and D.A.Maltz. Dynamic Source Routing in Ad-hoc Wireless
Networks. Mobile Computing, 1996:153-181.
- [22] Osama Aboul-Magd, Santosh Abraham, et al. Joint SEE-Mesh/Wi-Mesh Proposal
to 802.11 TGs. IETF Internet Draft, February 2006.
- [23] Jungmin So, Nitin Vaidya. A Routing Protocol for Utilizing Multiple Channels in
Multi-Hop Wireless Networks with a Single Transceiver. Technical Report. October
2004.
- [24] Richard Draves, Jitendra Padhye and Brian Zill. Routing in Multi-Radio,
Multi-Hop Wireless Mesh Networks[C]. In: Proceedings of the 10th annual
international conference on Mobile computing and networking. Philadelphia: ACM
press, 2004:88-114.
- [25] Richard Draves, Jitendra Padhye and Brian Zill. Routing in Multi-Radio,
Multi-Hop Wireless Mesh Networks[C]. In: Proceedings of the 10th annual
international conference on Mobile computing and networking. Philadelphia: ACM
press, 2004:35-96.
- [26] Richard Draves, Jitendra Padhye and Brian Zill. Routing in Multi-Radio,
Multi-Hop Wireless Mesh Networks[C]. In: Proceedings of the 10th annual
international conference on Mobile computing and networking. Philadelphia: ACM

- press, 2004:114-128.
- [27] Richard Draves, Jitendra Padhye and Brian Zill. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks[C]. In: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. Philadelphia: ACM press, 2004: 133-144.
- [28] Pham, P. P., Perreau. Performance analysis of reactive shortest path and multi-path routing mechanism with load balance. Proc. INFOCOM 2003:251-259.
- [29] 柯志亨.ns2 使用说明手册.Available from: <http://hpds.ee.ncku.edu.tw/~smallko/ns2/ns2.htm>
- [30] Charles E. Perkins .Ad Hoc Networking. Addison-Wesley 2001 .Chapter 3 pp.53-74,ISBN 0-201-30976-9.
- [31] 李曦.无线 Mesh 网络架构及发展现状研究.中国科技论文在线.2006.

致 谢

论文完成之际，谨向所有关心、爱护、理解、支持和帮助过我的老师、朋友和家人致以诚挚的感谢！

首先深深感谢我的导师江铭炎教授！江老师高尚的人品，渊博的知识，儒雅的学者风度无时无刻不在感染着我，激励我不断的进步。在这两年半的时间里，江老师一直对我悉心指导、言传身教，为学生营造了宽松的科研和学术相结合的研究氛围，使我不但在学术上取得了进步，而且锻炼和提高了开展科研工作的能力和实际动手能力。在论文撰写过程中，江老师严格要求，提出了许多宝贵的意见和建议，使得论文顺利完成。

感谢实验室的所有老师和同学，在这样一个充满智慧和朝气的大家庭中，彼此互相交流、愉快地工作和学习，使我收获良多。

最后，感谢我的亲人和朋友，他们在我多年的求学道路上一直无私地给予我默默的支持，这种无私的支持与奉献是我不断前进的动力和源泉！

陈东娅

在读期间研究成果

在硕士研究生期间取得的研究成果如下：

一、参加科研情况：

2009年曲阜师范大学教学改革立项项目“数字信号处理课程建设学改革研究”执行人；2009年济宁学院校级科研项目“基于流量状况的第三代移动通信技术与无线局域网交互的安全性研究”主持人、“基于PCA算法的智能评价系统开发”执行人；2009年获教育部高等学校《数字信号处理》骨干教师培训证书。

二、发表论文情况：

- [1]陈东娅.无线局域网(WLAN)技术的应用与发展[J].农业网络信息.2008,(7).
- [2]陈东娅.无线局域网(WLAN)的安全技术[J].科技信息.2008,(5).
- [3]陈东娅.无线局域网的WEP安全协议研究[J].今日科苑.2008,(3).
- [4]陈东娅.基于WAPI的WLAN安全实现[J].中国科技信息.2008,(4).
- [5]陈东娅.基于CAN总线的无线通信分析[J].农业网络信息.2008,(5).
- [6]陈东娅.WPA在WLAN安全实现中的研究[J].中国教育技术装备.2008,(4).
- [7]陈东娅.电子商务中的信息安全研究[J].商场现代化.2008,(3).
- [8]陈东娅.数字签名技术在电子商务中的应用研究[J].通信技术.2009,(5).
- [9]陈东娅.S100型掘进机行走部的改型设计[J].微型机与应用.2009,(8).
- [10]陈东娅.基于移动Agent的电子商务通信研究[J].电子技术.2009,(9).
- [11]陈东娅.PLC在矿井提升机控制系统中的应用研究[J].电子技术.2009,(9).