

摘要

随着无线通信技术的发展，提供移动 Internet 访问的无线网络正逐步改变着人们的日常生活。目前正在商业化的无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 是一种单跳的无线接入网，覆盖范围较小，对有线网络有着严重的依赖性，部署成本仍然较高。为了扩大无线接入网的覆盖范围、进一步降低部署成本，无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Network, WMN) 应运而生。WMN 是一种多跳无线网络，它具有网状的拓扑结构，终端通过多跳无线中继接入 Internet。近年由于移动计算技术的进一步发展、便携式笔记本以及各种手持通信设备的普及，无线 Mesh 网络再度成为研究的热点。MAC 层协议和网络层协议对整个无线 Mesh 网络的性能有着非常重要的影响。本文围绕着无线 Mesh 网络的 MAC 层协议和网络层协议进行了研究，研究的侧重点包括多径路由协议、多射频接口多信道条件下的信道分配、为提高空间复用度进行的功率控制以及移动终端的切换等问题。论文的主要研究内容包括以下四个方面：

(1) 由于传输的多跳性、无线信道的不可靠性、带宽的有限性和时变性等无线 Mesh 网络特性，使得传统路由协议，如路由信息通讯协议 (Routing Information Protocol, RIP) 和开放最短路径优先协议 (Open Shortest Path First, OSPF)，并不能适应无线 Mesh 网络。尽管传统的 Ad hoc 网络路由协议可以直接移植到无线 Mesh 网络中，但无线 Mesh 网络路由协议应该根据自身的特殊性遵循不同的设计准则。传统的 Ad Hoc 路由协议是单径路由协议，导致网络传输率较低，延迟增加，网络负载不平衡，甚至造成网络拥塞，无法很好地支持 QoS。多路径路由协议与单路径相比，在有效使用带宽、对付拥塞和突发流量、降低传输延迟、负载均衡以及增加传输可靠性方面具有明显的优势。但是，并不是路径数目越多效果越好，多径路由协议中的路径数目有个最优值。本文通过计算机仿真，对目前应用最广、也是最经典的两种多径路由协议：动态源路由多路径 (Dynamic Source Routing Multi-Path, DSR-MP) 协议和 Ad-Hoc 按需多路径距离矢量路由 (Ad-Hoc On-Demand Multi-Path Distance Vector Routing, AOMDV) 协议进行了研究。将这两种路由协议分别在移动 Ad Hoc 网络和无线 Mesh 网络环境下进行了仿真试验，仿真结果充分证明基于多径路由的无线 Mesh 网络在数据分组传输率、延迟、路由开销等方面具有明显的优势，完全能够满足无线宽带接入的需求。同时，基于无线 Mesh 网络结构的特殊性，在按需路由协议中，选择源路由协议能使无线 Mesh 网络取得更佳的性能。因此，本文工作具有很强的工程应用价值。

(2) 多信道技术不但提高了网络的空间复用度，增加网络同时通信节点对，同时减少了信道干扰。因此，采用多信道技术是提高网络容量的最有效方法。理论分析表明，与将一个固定带宽的信道分为几个子信道相比，系统采用两个射频接口和固定带宽的多个信道时，网络容量能达到 Kumar 公式的最大理论值。跨层反馈机制通过在协议栈的各层之间传输特定的信息来协调协议栈各层之间的工作过程，使之与无线通信环境的动态特性和不稳定性等相适应。基于以上分析结果，本文提出了多接口多信道无线 Mesh 网络跨层设计分布式信道分配算法 MCCA-AODV。该算法采用跨层设计的方法，将按需路由和信道分配过程结合起来，不但降低信道分配协议的计算复杂度。同时，采用按需路由协议减少了网络所需要的可用信道数，该算法仅给路由协议带来很小的额外开销。为了消除不同活动路面上邻居节点的同频干扰，本文提出了两跳干扰模型，能够避免不同路面上的邻居节点分配到的信道相同的情况。计算机仿真试验表明，与单信道相比，MCCA-AODV 能显著提高网络的吞吐量，降低延迟。

(3) 对于不同的无线通信系统，功率控制所起的作用不尽相同，主要有两个方面：一是可以降低节点能耗，延长网络寿命，另一方面的作用在于提高网络空间复用度，提高网络的容量。在无线 Mesh 网络中，由于 Mesh 路由器采用专业线路供应电力，不存在节能的问题，采用功率控制机制主要是为了降低对邻近结点的干扰，提高信道的空间复用度，最终提高整个网络的容量。针对无线网格骨干网中采用相同的发射频率造成的信号干扰严重问题，提出了一种新的功率控制 MAC 协议。该协议通过控制接收节点发送控制帧的功率，使得对整个数据发送和接收过程真正产生干扰的节点才能正确接收到该控制帧，从而延迟发送过程，避免信号干扰。该协议能够有效提高无线网格骨干网中无线接入点的空间复用度。理论分析表明，无线接入点的空间距离越短，空间复用度提高率越大，该协议越有利。通过模拟试验，与 IEEE802.11 标准的 MAC 协议相比，该协议明显提高了网络中并行的互不干扰的数据发送过程数量，显著提高了整个网络的吞吐量。

(4) IEEE 802.11 标准的 MAC 层协议提供了移动终端的切换算法，支持终端设备的移动通信，但它并没有提供移动终端的无缝切换算法。当终端设备从当前的接入点覆盖小区移动到另一个接入点小区时，由于通信的暂时中断会对系统的性能造成一定的影响。目前的切换算法包括硬切换和平滑切换等，硬切换丢报率非常大。平滑切换算法能够降低丢报率、减少切换延迟，但该算法要求数据包从当前的接入点通过无线 Mesh 网络中的多跳路由器转发到将要连接的接入点上，必将产生一定的切换延迟和数据丢失。从切换延迟和丢包率两个方面考虑，本文提出了基于中继路由器的存储转发平滑切换算法，主要是解决平滑切换中由于转发跳数过多引起的数据包丢失和切换延迟问题。通过在中继路由器上缓存数据

包，然后在移动终端切换时转发到新的接入点，缩短了数据包的转发路径。仿真试验表明，与硬切换相比，能明显降低丢报率，与传统的平滑切换相比，能显著改善切换过程中的丢包率和延迟。

关键词：无线 Mesh 网络，多路径路由协议，IEEE802.11 MAC 协议，跨层设计，信道接入控制，多信道，控制帧，功率控制，中继路由器，平滑切换

ABSTRACT

With development of wireless communication techniques, wireless networks change people's daily life dramatically by providing mobile Internet access. Wireless Local Area Network (WLAN), working as the last-hop connection to Internet, has come into market nowadays. Since WLANs is single-hop network and strongly depends on wired network, so the coverage of WLAN is very small due to the limited transmission range, and the cost of deployment is too expensive. To extend the coverage of wireless access networks and reduce the deployment cost, Wireless Mesh Network (WMN) is introduced. WMNs are multi-hop wireless networks, Mesh Clients access Internet by connecting to Mesh Routers. With the development of mobile computing technologies and the popularity of notebook PCs and PDAs, WMN has become the hot topic of research again. MAC and network layer protocols have great effect on the performance of WMN. MAC and network layer protocols in WMN are examined in this thesis. The focuses of the thesis are multiple path routing protocol, cross-layer design for distributed channel assignment over multi-Radio multi-Channel WMN, power control to improve spatial reuse, and mobile terminal hand-off. The main contributions of the dissertation are follows:

(1) Because of the characteristics of wireless mesh network, such as multi-hop transmission, unreliable wireless channel, bandwidth limitation and time variation, traditional routing protocols such as routing information protocol and open shortest path first were not suitable to wireless mesh network. Although traditional ad-hoc routing protocols could be used in wireless mesh network, but its routing protocol must obey different designment rules based on its distinct characteristics. Traditional ad-hoc routing protocols were single path routing protocols, which suffered from low transmission efficiency, increasing delay time and unbalanced network load, even arousing network congestion. Single path routing protocol could not support QoS of wireless mesh network.. Compared with single path routing protocols, multiple path routing protocols had more advantages: efficient use of bandwidth, resolving congestion and burst flow, reducing transmission delay, balancing network load and improving reliability of transmission. But, more paths could bring more search time which will increase the cost of the routing protocols. So, the number of path in multi-path routing had the optimum value Two most broad ly applied and most

prominent multi-path routing protocols: dynamic source routing multi-path and ad-hoc on-demand multi-path distance vector routing are studied by computer simulation. The simulation is carried out in ad-hoc network and wireless mesh network. The simulation result proves that wireless mesh network based on multi-path routing protocol have a lower overhead, lower packet loss rate and lower latency, so the wireless mesh network can satisfy wireless broadband access. At the same time, based on the distinct characteristics of topological structure of wireless mesh network, source on-demand routing protocols can improve its performance greatly.

(2) Multiple channel technology could improve spatial reuse of network, increase simultaneous communication node pair, and reduce channel interference. So, multi-channel technology was the most effective approach to improve network capacity. Theoretic analysis showed that, compared with system with a certain bandwidth which was divided into several sub-channels, the capacity of system with two radio interfaces and several channels could reach maximum theoretic values of Kumar formula. Cross-layer feedback mechanism could coordinate each layer of protocol stack by exchanging information along all layers, which could adapt to dynamic property and unreliability of wireless communication environment. Based on above analysis, an efficient distributed channel assignment algorithm using cross-layer approach for multi-radio multi-channel wireless mesh networks is proposed. This scheme seeks to assign distinct channel to each node along the same route, subject to a channel availability constraint. Nodes in two-hop neighborhood which belong to two different routes are assigned distinct channel too. Thus, interference along neighboring nodes which belong to same route and different route can be reduced. The proposed scheme combines channel assignment with reactive routing protocol. This scheme exhibits significantly lower communication, computation complexity than existing channel assignment schemes. Simulation results show that this proposed scheme can improve performance of the multi-radio multi-channel wireless mesh networks greatly.

(3) Power control had different function to different wireless communication system. Power control had two main functions: the first one is to reduce energy consumption and prolong life of network, the second one is to improve spatial reuse and network capacity. In the wireless mesh network, mesh routers were offered electric power by special electric circuit, the main function of power control is to reduce interference with neighboring nodes and improve network capacity by

improving spatial reuse. In order to resolve the problem that access point in wireless mesh backbone network using the same frequency channel to transmit packets could cause serious signal interference, a new power control MAC protocol was proposed. This protocol could control transmitted power of control frame sent by receiving node. Thus, only those neighboring access points that really affected the forthcoming data reception could receive the control frame, and then delayed their transmission to avoid interference. The proposed protocol can improve spatial reuse of access point. Theoretical analysis shows that, the spatial reuse improvement ratio increases more greatly with the distance between access points become more shorter. Simulation studies shows that compared with IEEE802.11 standard MAC protocol, the proposed protocol can allow more concurrent transmission which can't interfere with each other, and it improves network throughput greatly.

(4) IEEE 802.11 standard MAC protocol supports mobile terminal handoff in mobile communication, but it can not support smooth handoff of mobile terminal. When a terminal moves from the coverage of current wireless access point to another, the temporary breakage of communication had effect on the performance of the system. Recently, the handoff algorithms include hard handoff and smooth handoff. The hard handoff had high packet loss rate and the smooth handoff could lower packet loss and reduce handoff latency. Smooth handoff required that packets must be forwarded from old access point to new access point through multi-hop routers over wireless mesh network, this would induce handoff latency and data loss. Considering handoff latency and data loss, a relay-router buffering-and-forwarding scheme is proposed to support smooth handoff in the infrastructure wireless mesh networks. Our proposal is based on buffering packets at intermediate relay routers in the packets forwarding route and neighboring relay routers working in promiscuous mode which can overhear the packet transmission from neighboring relay routers to APs. With the help of relay routers, the forwarding path of buffered packets is shortened greatly. The relay routers selection is based on multipoint relays of OLSR protocol. Simulation results show that this scheme improves the data availability and results in reducing the packet loss significantly.

Keywords: wireless mesh network, multi-path routing protocol, IEEE802.11 MAC protocol, cross-layer design, channel access control, multiple channels, control frame, power control, relay router, smooth handoff

缩 略 语

WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网
MANET	Mobile Adhoc Network	移动自组织网络
WSN	Wireless Sensor Network	无线传感器网络
WMN	Wireless Mesh Network	无线 Mesh 网络
AP	Access Point	无线接入点
NLOS	Non Line of Sight	非视距传输
VPN	Virtual Private Network	虚拟专用网
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多入多出
WDS	Wireless Distribution System	无线分布式系统
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access	移动宽带无线接入
STA	Station	无线终端
FHSS	Frequency-hopping Spread Spectrum	跳频扩频
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	直接序列扩频
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying	差分二进制相移键控
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	差分正交相移键控
CCK	Complementary Code Keying	补码键控
LLC	Logic Link Control	逻辑链路层
MAC	Medium Access Control	介质访问子层
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection	载波侦听冲突检测
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	载波侦听冲突避免
NAV	Network Allocation Vector	网络分配向量
DCF	Distributed Coordination Function	分布式协调机制
PCF	Point Coordination Function	点协调机制
RTS	Request To Send	请求发送
CTS	Clear To Send	允许发送
CP	Contention Period	竞争周期
CFP	Contention Free Period	非竞争周期
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线保真
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	微波存取全球互通
RIP	Routing Information Protocol	路由信息通讯协议

OSPF	Open Shortest Path First	开放最短路径优先
DSR	Dynamic Source Routing	动态源路由协议
AODV	Ad-Hoc On-Demand Distance Vector	Ad-Hoc 按需距离矢量
DSR-MP	Dynamic Source Routing Multi-Path	动态源路由多路径
AOMDV	Ad-Hoc On-Demand Multi-Path Distance Vector	Ad-Hoc 按需多路径距离矢量
RREQ	Route Requests	路由请求分组
RREP	Route Replies	路由应答分组
RERR	Route Error	路由错误
RTT	Round-Trip Time Latency	往返时间延迟
QoS	Quality of Service	服务质量
MPLS	Multi-Protocol Label Switching	多协议标签交换技术
CBR	Constant Bit Rate	固定比特率
IFS	Inter Frame Spacing	帧间间隔
CW	Contention Windows	竞争窗口
BER	Bit Error Rate	比特误码率
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SINR	Signal Interference Noise Ratio	信号干扰噪声比
OSI	Open Systems Interconnection	开放式系统互联
BSS	Basic Service Set	基本服务集
IBSS	Independent Basic Service Set	独立基本服务集
ESS	Extend Service Set	扩展服务集
RSSI	Received Signal Strength Indication	信号强度

符号说明

符号类型	示例
求最小值	$\min(\cdot)$
求最大值	$\max(\cdot)$
概率密度分布函数	$f(\cdot)$
累积分布函数	$F(\cdot)$
期望值	$E(\cdot)$
集合	V
元素	v
子集关系	\subset
元素属于集合	\in
求和	\sum
n 次方	$(\cdot)^n$

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得北京邮电大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 孙国军 日期： 2018年7月18日

本论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

保密论文注释：本学位论文属于保密在__年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名： 孙国军 日期： 2018年7月18日

导师签名： 王士林 日期： _____

第一章 绪论

随着大量新的无线通信技术不断涌现，无线网络由于其接入灵活、成本低廉以及易于扩展等特性近年来得到了飞速发展。无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)、移动自组织网络(Mobile Adhoc Network, MANET)以及无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)等形式的无线网络在近几年已经得到了广泛的研究^[1-4]，特别是 WLAN 已经进入商业化推广阶段。无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Network, WMN)^[5-6]作为一种能够提供更大范围无线接入的新技术已经成为了新的研究热点。

1. 1 研究背景

计算机网络自上世纪 60 年代的 ARPANET 到今天的 Internet 已经经历了半个世纪的发展变迁。如今的 Internet 上承载着各式各样的信息，不仅是人们获取各种信息的重要来源，也是人们沟通交流的重要媒介，它已成为生产、生活不可或缺的组成部分。目前的 Internet 访问还主要依靠有线接入，但是随着无线通信技术的发展，实现灵活便捷的移动接入已不再是梦想。

各大电信运营商已经推出了以 WLAN 技术为基础的无线宽带接入业务，众多企业、学校内部也建立了自己的无线局域网。WLAN 是单跳无线网络，终端通过无线接入点(Access Point, AP)接入有线网络。由于无线信号传输的范围十分有限，所以 WLAN 所能覆盖的范围较小，且只能架设在有线网络的边缘，因此部署成本仍然较高。

无线多跳网络能够通过多个站点的中继传输来提供更大范围的无线网络覆盖，降低网络部署成本。MANET 和 WSN 是无线多跳网络的典型代表。MANET 最初是为军事用途而设计的，它不依赖于任何固定基础设施，十分适用于战争、救援等特殊的紧急场景。这种网络具有移动性、临时性、多跳性、动态性、自组织性、分布性和开放性等特征。MANET 网络中不存在任何站点对整个网络进行集中管理，每个站点自主地管理自身的各项功能，站点间的交互往往需要通过站点之间的相互协作才能完成，任何一个站点都可以随时自由地加入或者退出网络。MANET 相关研究集中在移动、定位、节能及自组织等特殊需求上。随着电子感应技术的发展，传感器在生产、生活、科研以及军事等各种领域都有着广泛的应用。传感器可以被散布于所监控范围之内，用以收集各点的信息。WSN 正是希望利用廉价便捷的无线多跳技术，实现对大量传感器站点所收集数据的汇集。如何组织 WSN 中规模庞大的站点、如何合理利用站点上极其有限的能量以

及计算资源，如何实现大量的数据聚集是 WSN 研究中最关心的问题。

本论文的研究对象 WMN 也是一种多跳无线网络，它与 MANET 和 WSN 的设计初衷不同。WMN 是一种高容量高速率的分布式网络，可以看成是传统的无线局域网 WLAN 和 MANET 的融合，且发挥了两者的优势。WMN 所希望提供的是高质量的 Internet 接入服务，因此需要能够承载 Internet 上所提供的各种业务。WMN 具有网状的拓扑结构，终端通过多跳无线连接实现与 Internet 互通。WMN 的构成可以分为 Mesh 路由器、Mesh 终端以及 Mesh 网关，Mesh 路由器构成了 WMN 的主干，位置较固定，有稳定的电源供给；Mesh 终端通过 Mesh 路由器接入网络，在特殊情况下 Mesh 终端也可以作为路由器给其他站点提供到 WMN 的连接；Mesh 网关是 WMN 与 Internet 的连接点，可视为与有线网络相连的特殊路由器。WMN 是一种非常适合于覆盖大面积开放区域，包括室外和室内的无线网络解决方案。最适合部署于大学园区、体育场馆、公共场所、住宅小区接入以及需要监控的公共场所这类希望提供便捷低廉的“Last mile”(最后一英里)Internet 访问网络的区域。

1. 2 WMN 的组成及体系结构

无线 Mesh 网络利用多跳无线网状结构为移动用户提供到 Internet 的宽带接入。它是 WLAN 与 MANET 的结合，与 WLAN 不同的是 WMN 是多跳的无线网络，站点之间可以对等地进行直接通信，不再需要通过 AP 转发，且能够提供更大的覆盖范围；相对于 MANET 来说，WMN 由于具有固定且电源充足的主干路由器，所以对移动性和能耗问题的考虑较少。为了让 WMN 真正成为有线网络的重要扩展甚至替代部分有线网络，提高网络的通信能力与通信质量才是 WMN 研究所需解决的问题。下面首先介绍 WMN 的组成，然后按体系结构对 WMN 进行分类。

1. 2. 1 WMN 的组成部件

WMN 中各站点间通过多跳无线连接形成网状拓扑，按站点的功能可分为 Mesh 路由器、Mesh 终端和 Mesh 网关三类。

1、**Mesh 路由器(Mesh Router)**是具有路由功能的 Mesh 站点。它具有一个或多个无线收发器，构成 WMN 的主干网络，负责终端的接入和数据的转发。

2、**Mesh 终端(Mesh Client)**是用户直接使用的设备，通过 Mesh 路由器访问 Internet。某些 Mesh 终端也具备路由功能，在特殊情况下能够为其他不能直接接入 WMN 的终端提供路由转发。Mesh 终端设备具有多样性，可以是普通 PC，笔

笔记本电脑、PDA、IP 电话等等。

3、Mesh 网关(Mesh Gateway)是 WMN 与有线网络的连接点，提供路由和网关功能。WMN 中可以有多个网关，数据流可以选择通过最合适的网关来获得与有线网络之间的通信。

1. 2. 2 WMN 的体系结构

无线 Mesh 网络根据节点功能的不同分为三类：骨干网 Mesh 结构，客户端 Mesh 结构，混合网络结构。

(1) 骨干网 Mesh 结构

骨干网 Mesh 结构是由 Mesh 路由器组成一个可以自配置和自愈的链路来作为骨干网，并通过 Mesh 路由器的网关功能与 Internet 相连，从而为客户端提供接入服务，如图 1-1。骨干 Mesh 网络结构是一种典型的多级结构，分为上下两层。下层的客户节点可以通过 Mesh 路由器接入到上层 Mesh 结构的网络中，实现网络节点的互连通信。Mesh 路由器提供路由选择和中继功能，为客户节点提供一条顺利连接到网关节点的无线链路。网关节点通过路由选择和管理控制等功能为移动终端选择与其他网络节点通信的最佳路径。这种结构的优点是可以兼容市场上已经有的设备，降低系统成本，提高了网络覆盖率和可靠性，缺点是任意两个终端节点之间不能直接通信。

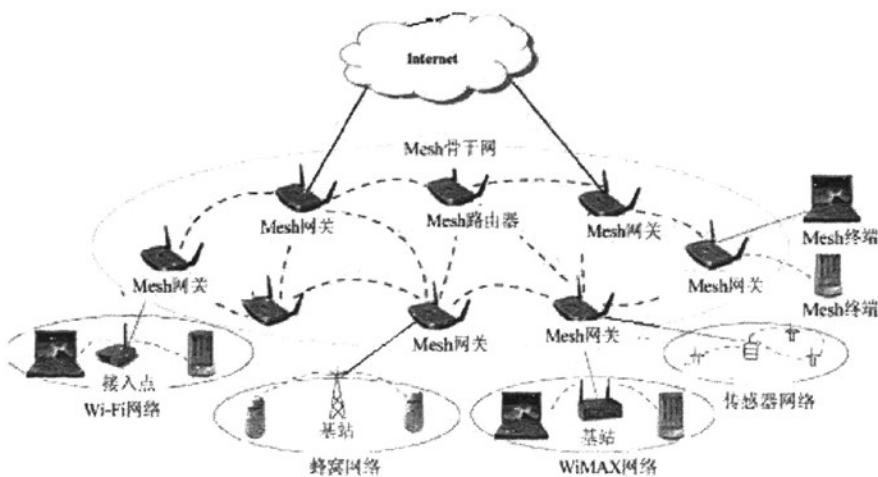


图 1-1 骨干网 Mesh 结构

(2) 客户端 Mesh 结构

客户端 Mesh 结构中的所有节点都是对等的关系，每个节点都包含相同的 MAC、路由、管理和安全等协议，既可以接入网络，也可以转发其他节点的消息。网内的节点能够形成任意网状的拓扑结构，节点也可以任意移动，网络的拓

扑结构会动态的发生变化。在这种环境下，由于节点的无线通信覆盖范围有限，两个无法直接通信的用户终端可以借助其他终端的分组转发功能进行数据通信，而不需要借助其他基础设施。客户端 Mesh 结构如图 1-2 所示。

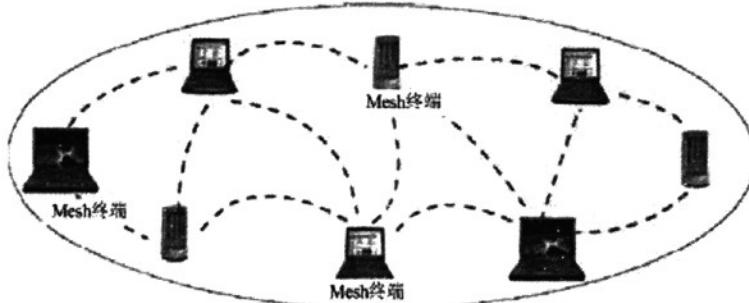


图 1-2 客户端 Mesh 结构

(3) 混合 Mesh 网络结构

如图 1-3 所示，在混合结构中，客户端节点增加了具有转发和路由功能的 Mesh 设备，之间可以实现无线互连。由于客户端具有路由能力，为 WMN 增强了连接性，并扩大了覆盖范围。这是无线 Mesh 网络最常见的组网结构，也是最有普遍研究意义的结构。

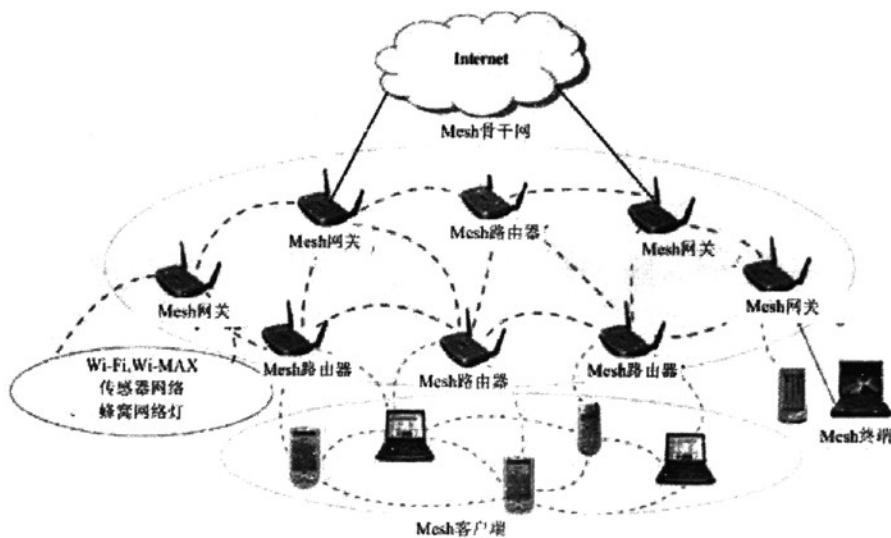


图 1-3 混合 Mesh 结构

1. 3 WMN 的特点及关键技术

无线 Mesh 网络作为新一代的宽带无线接入技术，与传统的 WLAN 相比具有许多无可比拟的优势，主要包括自配置、自愈合、高带宽、高利用率等。除此之

外，采用标准的 802.11b/g 制式，可广泛地兼容无线客户终端。无线 Mesh 网络还提供更好的移动漫游能力，以及端到端的安全连接等等。当然，作为一种新兴的组网技术，无线 Mesh 网络还存在不完善的地方。

1. 3. 1 WMN 的优势和不足

(1) 无线 Mesh 网络的优势

与传统的 WLAN 相比，WMN 的优势在于：

- 快速部署和易于安装：安装 Mesh 节点非常简单，将设备从包装盒里拿出来，接上电源就行了。用户可以很容易增加新的节点来扩大无线网络的覆盖范围和网络容量。无线 Mesh 网络的配置和其他网管功能与传统的 WLAN 相同，用户使用 WLAN 的经验可以很容易应用到无线 Mesh 网络上。
- 非视距传输(NLOS)：利用无线 Mesh 技术可以很容易实现 NLOS 配置，因此在室外和公共场所有着广泛的应用前景。无线 Mesh 网络能够非视距传输的特性大大扩展了无线宽带的应用领域和覆盖范围。
- 健壮性：无线 Mesh 网络比单跳网络更加健壮，因为它不依赖于某一个单一节点的性能。每个节点都有一条或几条传送数据的路径，如果最近的节点出现故障或者受到干扰，数据包将自动路由到备用路径继续进行传输，整个网络的运行不会受到影响。
- 结构灵活：在无线 Mesh 多跳网络中，设备可以通过不同的节点同时连接到网络，因此不会导致系统性能的降低。无线 Mesh 网络还提供了更大的冗余机制和通信负载平衡功能。
- 高带宽：无线通信的物理特性决定了通信传输的距离越短就越容易获得高带宽，因为随着无线传输距离的增加，各种干扰和其他导致数据丢失的因素随之增加。因此选择经多个短跳来传输数据将是获得更高网络带宽的一种有效方法，而这正是无线 Mesh 网络的优势所在。

在无线 Mesh 网络中，一个节点不仅能传送和接收信息，还能充当路由器对其附近节点转发信息，随着更多节点的相互连接和可能的路径数量的增加，总的带宽也大大增加。此外，因为每个短跳的传输距离短，传输数据所需要的功率也较小。既然多跳网络通常使用较低功率将数据传输到邻近的节点，节点之间的无线信号干扰也较小，网络的信道质量和信道利用效率大大提高，因而能够实现更高的网络容量。比如在高密度的城市网络环境中，无线 Mesh 网络能够减少使用无线网络的相邻用户的相互干扰，大大提高信道的利用效率。

(2) 无线 Mesh 网络的不足

尽管无线 Mesh 联网技术有着广泛的应用前景，但也存在一些影响它广泛部

署的问题，无线 Mesh 网络目前存在的不足：

- 互操作性：目前影响无线 Mesh 技术迅速普及的一个重要障碍就是互操作性，无线 Mesh 网络现在还没有一个统一的技术标准，用户现在要么就只能使用某一个厂商的无线 Mesh 产品，要么面临如何与各种不同类型的嵌入式无线设备接口的问题，这个问题目前是影响无线 Mesh 技术推广使用最重要的原因。想彻底解决互操作性问题，最终还需要业界制定统一的无线 Mesh 技术标准。
- 通信延迟：既然在 Mesh 网络中数据通过中间节点进行多跳转发，每一跳至少都会带来一些延迟，随着无线 Mesh 网络规模的扩大，跳接越多，积累的总延迟就会越大。一些对通信延迟要求高的应用，如话音或流媒体应用等，可能面临无法接受的延迟过长的问题。目前解决这一问题主要是通过增加 Mesh 节点以及合适的网络协议。
- 安全：与 WLAN 的单跳机制相比，无线 Mesh 网络的多跳机制决定了用户通信要经过更多的节点。而数据通信经过的节点越多，安全问题就越变得不容忽视。Internet 本身即是使用 Mesh 方式进行通信的典型，它的安全隐患是众所周知的。尽管有线网络中使用的各种端到端安全技术，如虚拟专用网（VPN）同样可以用来解决无线 Mesh 的安全问题。但正如 Internet 一样，无线 Mesh 网络的安全是一个不容忽视的问题。

1. 3. 2 WMN 与其他通信网络的区别

无线 Mesh 网络作为多跳无线网络，与蜂窝移动通信系统、移动 Ad Hoc 网络和无线局域网 WLAN 之间相比也存在一些差别。

(1) 与蜂窝移动通信系统的区别

- 可靠性提高：在 WMN 中，链路为网格结构，如果其中的某一条链路出现了故障，节点便可以自动转向其他可接入的链路，因而对网络的可靠性有了很大程度的提高；但是在采用星型结构的蜂窝移动通信系统中，一旦某条链路出现故障，可能造成大范围的服务中断。

- 传输速率大大提高：在采用 WMN 技术的网络中，可融合其他网络或技术（如 Wi-Fi、UWB 等），速率可以达到 54Mbit/s，甚至更高。而目前正在发展的 3G 技术，其传输速率在高速移动环境中仅支持 144kbit/s，步行慢速移动环境中支持 384kbit/s，在静止状态下才达到 2Mbit/s。

- 降低成本：在 WMN 中，大大节省了骨干网络的建设成本，而且 AP、IR 等基础设备比起蜂窝移动通信系统中的基站等设备便宜得多。

(2) 与移动 Ad Hoc 网络的区别

WMN 与 Ad Hoc 网络均是点对点网络。Ad Hoc 网络中的移动节点都兼有独

立路由和主机功能，不存在类似于基站的网络中心控制点，节点地位平等，采用分布式控制方式。WMN 把 Ad Hoc 网络技术应用到移动节点同时又使移动节点可通过 IAP 连接到其他网络，因此可以把 WMN 看成是 Ad Hoc 网络技术的另一种版本。但 WMN 与移动 Ad Hoc 网络的业务模式不同，对于前者，节点的主要业务是来往于因特网网关的业务，而对于后者，节点的主要业务是任意一对节点之间的业务流。虽然人们对 Ad Hoc 网络的研究已经有相当长的时间，但是主要还是在理论上，而且主要应用在军事上，还未进行大规模的商用。

(3) 与 WLAN 的区别

从拓扑结构上讲，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。WLAN 可在较小的范围内提供高速数据服务（802.11b 可达 11Mbit/s, 802.11a 可达 54Mbit/s），但由于典型情况下 WLAN 接入点的覆盖范围仅限于几百米，因此如果想在大范围内应用 WLAN 的这种高速率的服务模式，成本将非常高。而对于 WMN，则可以通过 WR 对数据进行不断转发，直至把它们送至目的节点，从而把接入点的覆盖服务延伸到几公里远。WMN 的显著特点就是在大范围内实现高速通信。

1. 3. 3 WMN 的关键技术

无线 Mesh 网络的带宽有限，以及复杂的时变信道特性和开放的通信环境，导致节点的信号互相干扰，要提供保证服务质量的服务，必须采用有效的网络管理和组网技术，提高链路容量和网络传输效率。WMN 的组网技术包含了几个主要的方面：网络配置和部署，功率控制，移动性管理和接入控制，以及路由协议设计等。

(1) 网络配置和部署

为了使 WMN 具备良好的可扩展性、容错性、自调节能力，大的覆盖范围和网络容量，需要对网络配置和部署进行研究。

首先，需要对移动性较弱，组成骨干网的 Mesh 路由器的部署位置进行规划，一方面在保证不出现无线信号覆盖盲区的前提下，Mesh 路由器需要量尽可能地低以降低成本；另一方面，在热点区域，提供多条路径以增加用户接入数。可以结合多入多出(MIMO)和方向性天线技术等来进一步提高网络传输能力。

Mesh 路由器能提供各种异构网络的接入服务，因此，如何分配 Mesh 路由器的多个无线接口以保证各个网络之间的连通性，是 WMN 应该解决的问题。此外，在 WMN 中，采用多电台多信道的方法可以用来增加网络的吞吐量，但在无线多跳的环境下，多信道的通信方式也面临更多的亟待解决的问题：文献[7]中提到多信道 WMN 在信道间分布式业务分配，信道协调使用及广播支持等方面存在着

问题，并对多信道有关协议进行了设计和实现。

(2) 功率控制

在 WMN 中，对 Mesh 路由器虽然没有能量限制，但也需要功率控制，目的是保证 WMN 的连通性，控制网络干扰，提高频率复用率。适当的传输功率可以减小无线信道信号间干扰，提高频谱复用效率。

与 Mesh 路由器不同，Mesh 客户端一般是移动节点，节点的能量有限。因此，设计网络协议需要考虑功率的有效性。比如，一些 Mesh 客户端可能是 IP 电话或者是一个传感器，因此，功率效率是要考虑的一个因素。对于一些 WMN 应用，实现功率控制将优化网络的连接性，提高网络性能。

(3) 移动性管理和接入控制

WMN 移动性管理包含两方面的含义：位置管理和移动切换管理。位置管理主要用于解决位置注册，而移动切换管理包括切换初始化，建立新连接，以及在切换过程中的数据流控制，以提供用户的无缝连接服务。在蜂窝网中，移动性管理由基站，移动交换中心和位置数据库进行集中式管理；而在 Ad hoc 网络中，移动性管理与路由协议紧密结合，可看作是一种分布式的方案。WMN 因同时具有多跳和移动性低的特点，其移动性管理需要充分结合上述两种网络的移动性管理技术。

接入控制是指保证用户使用各种无线传输技术，均可以有效接入 WMN；尤其是在局部热点地区，当节点数量较多、负载较重的情况下，如何控制新节点的接入来保证已接入节点的服务质量。

(4) 路由协议设计

WMN 采用多跳中继实现网络接入，这使得路由协议设计可以参考 Ad hoc 网络的路由协议设计方法。但与之相比，两者还存在差别。一方面，WMN 由接入点（Access Point, AP）、Mesh 路由器、Mesh 网关等构成的，节点的移动性相对较弱；另一方面，WMN 中的大部分数据业务都是用户节点发送给网关节点，而 Ad hoc 网络主要提供节点到节点之间的业务传输模式。此外，WMN 在功耗限制方面要求相对较弱。研究 WMN 的路由协议，也可以参考在因特网中所采用的路由技术，例如自治域内和域外使用不同的路由协议。

1. 4 WMN 的研究现状及相关标准

开展对 WMN 组网技术的研究，主要有两种方法。一种是采用仿真方法开展研究工作，例如，基于 NS-2 和 OPNET 的仿真软件，建立 WMN 网络协议模型和业务传输模型，进行协议的设计和性能分析。与此同时，基于 WMN 网络结构抽象出更小的网络结构模型、业务模型及关键技术，实现一个实用的实验网络，

即 WMN 试验床，对一个 WMN 进行测试、性能分析，这也是目前许多国外研究机构正在进行的研究工作。

1. 4. 1 WMN 的研究现状

目前，国际上有很多公司、大学以及研究机构都开展了关于无线 Mesh 网络的研究项目，搭建了一系列的实验床。它们都提出了自己关于无线 mesh 网络的解决方案，并研制出了相应的设备。较有影响力的 WMN 研究项目有：RoofNet^[8-9]是美国麻省理工学院 MIT 所开展的研究项目，这是一个基于 IEEE802.11 的非统一部署的城域 WMN 网络。Hyacinth 项目是纽约州立大学所研究的基于 IEEE802.11 的多信道 WMN^[10-11]，提出了用 IEEE802.11a/b/g 技术构建的多信道 WMN 体系结构。该项目主要研究无线接口、信道分配以及路由问题。乔治亚工学院宽带与无线网络实验室架设了 WMN 试验床 BWN-Mesh，该研究组的目标定位在与多种网络互联的 WMN 的传输层、路由以及 MAC 协议上^[12]。Microsoft Research Lab (MSR) 的 WMN 研究项目 Microsoft WMN 关注于自组织邻居场景^[13]，利用 MCL (Mesh Connectivity Layer) 软件模型实现了 Ad Hoc 路由与链路质量测量。Intel 网络体系结构实验室的 Intel WMN 项目开发了低成本、低功耗的访问点原型，用于进一步研究 WMN 上的流量特征、动态路由与配置、QoS (Quality of Service) 以及安全等问题。美国 PacketHop 公司的 WMN 项目是一个运行在 IEEE802.11 多模式宽带 Radio 上的三层解决方案，由 SRI 国际实验室开发。Tropos Networks 使用运行在 IEEE802.11 标准的软硬件基础之上的三层网络操作系统 Tropos Sphere，利用蜂窝 Wi-Fi 网络结构实现了架构式 Mesh 网络-MetroMesh。

在商业应用方面，加拿大北电网络 Nortel 推出了 WMN 的商业解决方案^[14]。该方案由无线接入点、无线网关和网络管理系统 3 个主要的网络元素组成。该网络是基于 WMN 的构架模式，它包括一个具有智能天线、综合路由器、适应性路由机制以及安全容量机制的点到点的结构。无线接入点采用智能天线，具有两个无线接口，能够支持 2.4GHZ 的接入链路和 5GHZ 的主干传输链路。用户采用 IEEE802.11b/g 设备接入网络，主干传输采用 IEEE802.11a 链路。该网不受网线限制，可以随时建立和拆除，它允许用户在一定范围内任何时候都可以访问网络，不需要指定明确的接入地点，用户可在网络中漫游^[15]。MeshNetwork 提出的 WMN 方案采用 QDMA (Quadrature Division Multiple Access) Radio 平台用以推进 Mesh 技术的商业化，并提供了可供客户端安装的 Mesh 模式软件以及硬件防火墙等安全措施。

国内包括北京大学、清华大学、中国科技大学、北京邮电大学、西南交通

大学等高校的相关研究组也在近年来开发了 WMN 的研究。它们主要定位在 WMN 的网络管理、部署实例、路由协议和 MAC 协议等方面。华为等一些通信设备商也在进行 WMN 相关设备的研发。

1. 4. 2 WMN 的相关标准

由于无线接入与移动性这两个特殊属性，在设计 WMN 时，传统的基于单跳网络的协议机制和标准无法满足网络的设计要求或性能要求。工业标准化组织积极致力于为 WMN 制定新的标准，其中 IEEE 802.11、IEEE 802.15、IEEE 802.16 和 IEEE 802.20 等建立了为 WMN 制定新标准的子工作小组，对已有的标准进行扩展。这些标准有一个共同的特征，即均认同了无线网络的共同技术发展趋势——对网状网络结构的支持。

(1) IEEE 802.11s 标准

IEEE802.11 WLAN 工作组于 2004 年初成立了 Mesh 任务组^[15]，编号为 802.11s，主要研究支持无线分布式系统(Wireless Distribution System, WDS) 的协议，以实现 WLAN 在多个 AP 之间通过自配置多跳的方式组网，最终目标是突破传统 AP 功能上的限制，使之具有无线路由器的功能，将业务流转发给邻近的 AP，并进行一系列的多跳传输。这种方式决定了 WMN 具有较高的可靠性、较大的伸缩性和较低的投资成本等特点，而且业务可以自动绕过故障节点、自行调节来实现流量负载平衡。802.11s 任务组于 2004 年 7 月召开了第一次会议，并发布了征求意见稿，协议的第一份草案已于 2006 年 12 月发布，2007 年 3 月发布了修改草案 IEEE P802.11s™/D1.01。

(2) IEEE802.16a 标准

IEEE802.16 标准^[16]于 2001 年 12 月发布时，因为仅支持 10~66 GHz 的工作频段，只能提供可视范围内的承载服务，市场应用受到很大限制。经过进一步完善，IEEE 在 2003 年 1 月又发布了新的扩展协议 IEEE 802.16a。IEEE 802.16a 引入了新的物理层技术，如利用 OFDM 来抵抗多径效应等，并对 MAC 层做了进一步的强化，工作频段也扩展到 2 ~11GHz 的许可频段和非许可频段支持非可视（NLOS）的接入方式。

802.16a 标准为了支持 Mesh 模式，对 MAC 层规范中的帧结构和消息进行修改。802.16a 定义了 MAC 层的两种网络拓扑结构：点对多点和网状网，其中，网状结构是为了解决覆盖问题，每个用户单元都是网络设施的一部分，通过多跳路由来实现网络的全覆盖。由于 IEEE802.16a 中增加了 Mesh 网络拓扑结构，相应的 MAC 层功能都做了相应的修改以支持 Mesh 网络结构，这是 802.16a 标准与 802.16 标准的一个重要区别。IEEE 802.16a 具有很强的市场竞争力，真正成

为可用于城域网的无线接入手段。

(3) 其它工业标准

IEEE802.15^[17]和 IEEE802.20^[18]也在 MAC 层或者网络层进行了协议扩展，提供对 WMN 的支持。

IEEE802.15 提供了简单、低耗能无线连接的标准，是 IEEE 工作组针对无线个域网 WPAN 开发的，正发展成为包括便携式和移动计算设备的 PAN 或短距离无线网络的标准。其中，IEEE802.15.1~802.15.5 分别在 MAC 层或者网络层都对 WMN 提供相应的支持。

IEEE 802.20 即移动宽带无线接入(Mobile Broadband Wireless Access, MBWA)工作组成立于 2002 年 12 月，致力于为移动用户开发一个标准，支持在 3GHz 频带可靠地进行高速无线数据传输。在室内外环境中支持 WMN 结构。与 IEEE 802.16e 相同，802.20 也需要为无线移动宽带接入定义一种新的空中接口，但二者在工作频段、支持高速移动性等方面有所不同。

1. 5 IEEE 802.11 标准

IEEE802.11^[19]是 IEEE 国际标准组织于 1997 年制定的用于无线局域网通信的标准。该协议系列目前包括 IEEE802.11a/b/g/n 等，802.11a 标准利用 5GHz 的频率传输，其速率可达到 54Mbps；802.11b 标准利用的则是 2.4GHz 的频段，最高速率为 11Mbps；802.11g 同样采用 2.4GHz 频段，其传输速率进一步达到了 54Mbps；目前正在制定的 802.11n 将利用 MIMO 技术达到更高的速率。IEEE802.11 架构下的安全(IEEE802.11i)、服务质量保证(IEEE802.11e)等标准已经出台，形成了一个较为完善的体系。此外，针对 WMN 体系结构而设计的 IEEE802.11s 标准也正在制定中。

IEEE802.11 定义了物理层和媒介接入层的通信标准，将通信设备分为无线终端(Station, STA)和无线接入点(Access Point, AP)两类。无线终端是用户手中的通信设备，如笔记本电脑、手机等，是 WLAN 的基本组成单元；AP 是 WLAN 和有线网络的连接点。

1. 5. 1 工作模式

IEEE802.11 中为终端定义了两种工作模式—Infrastructure 模式和 Ad hoc 模式。

(1) Infrastructure 模式又称为架构式模式，工作于该模式下时，网络中至少包括一个无线接入点以及一系列无线终端。无线终端直接与 AP 通信，通过 AP

接入有线网络，这一工作模式主要用于 WLAN 中。这种工作模式下，即使两个终端在彼此的传输范围之内，也必须通过 AP 转发才能通信。

(2) 在 Ad hoc 工作模式下，不需要 AP 等基础设施，无线终端之间可以实现多跳互连。无线终端之间是对等的关系，能够直接通信。该模式被广泛应用于组建 MANET 等不依赖于基础设施的无线多跳网络。

1. 5. 2 物理层技术

IEEE802.11 的物理层规定了数据传输信号的特征和调制方法。IEEE802.11 可以使用无线电波和红外线作传输介质，使用无线电波作为传输介质时，根据扩频方式可以分为跳频扩频(Frequency-hopping Spread Spectrum, FHSS)和直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)。

(1) 跳频扩频(FHSS)是把 2.4~2.4835GHz 的频带分为若干个跳频信道，每个信道可使用的带宽为 1MHz。在传输中，无线电收发器按一定的规律不断在信道之间跳变。采用二元高斯移频键控(Gaussian Frequency Shift Key, GFSK)时基本速率为 1Mbps；使用四元 GFSK 时速率为 2Mbps。只有收发双方按这个规律通信，其他的干扰不可能按同样的规律进行干扰。

(2) 直接序列扩频(DSSS)将 2.4GHz 的频带分成 11 个信道(欧洲标准为 13 个信道)，每个信道占用 22MHz，每 2 个相邻信道的中心频率间隔是 5MHz，其中 1、6 和 11 信道频率没有重叠。DSSS 支持 1Mbps、2Mbps、5.5Mbps 和 11Mbps 的速率，可以采取差分二进制相移键控(Differential Binary Phase Shift Keying, DBPSK)、差分正交相移键控(Differential Quadrature Phase Shift Keying, DQPSK)、补码键控(Complementary Code Keying, CCK)三种调制方式。DSSS 具有抗同频干扰性好、抗衰落性能好以及抗多径干扰能力强的优点。

不同的调制方法在信噪比变化的条件下对误码的处理能力不同^[20]。为了在有噪音的环境下能够获得较好的传输速率，802.11b 采用了动态速率调节技术，允许用户在不同的环境下使用不同传输速度来减小环境的影响。在理想状态下，用户以 11M 的全速运行，当用户移出理想的 11M 速率传送范围或者受到干扰时，传输速度自动按序降低为 5.5Mbps、2Mbps、1Mbps。同样，当用户回到理想环境中时，连接速度也会反向增加直至 11Mbps。传输速率自动调节机制是在物理层实现的。对用户和其它上层协议是透明的。

1. 5. 3 介质访问 (MAC) 层

IEEE802.11 的数据链路层由逻辑链路层(Logic Link Control, LLC)和介质访问子层(Medium Access Control, MAC)构成。无线链路具有的带宽较低等特点使

得采用 802.3 有线局域网的载波侦听/冲突检测机制(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CD)开销较大。IEEE802.11 虽然同样采用了载波侦听的方法，但是对于冲突的解决则采用了冲突避免机制，该机制被称之为载波侦听冲突避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)。

CSMA/CA 的工作流程是：当无线终端需要发送数据时首先侦听网络状态一段时间，若在此期间信道为空则发送，否则等待直至信道空闲达到所规定的时间。接收端若成功地收到数据包则发送人 ACK 帧，发送端成功收到 ACK，则本数据帧发送完成，否则发送端将等待一段时间后重传该数据包。

IEEE802.11 的载波侦听可以通过物理层载波侦听和 MAC 层的虚拟载波侦听机制完成。物理载波侦听是终端对物理层的空中接口进行载波监听，当接收到的信号强度超过一定的阀值时，就可判断是否有相邻的终端在该信道上发送数据。MAC 层虚拟载波侦听机制则是通过显式地通知邻居站点所要占用的时间来实现信道的预留。当终端检测到正在信道中传送的 MAC 帧头部的“持续时间”字段时，就调整自己的网络分配向量 NAV(Network Allocation Vector)，从而将自己的发送延迟到此传输完成之后。IEEE802.11 的冲突避免方式又分为分布式协调机制(Distributed Coordination Funciton, DCF)和点协调机制(Point Coordination Function, PCF)两类。

(1) 分布式协调机制 DCF 是 IEEE802.11MAC 协议中最重要和最基本的接入方式，它采用 CSMA/CA 与二进制指数回退机制来支持用户终端的异步数据通信。它试图让各个终端通过竞争来公平和高效地利用无线信道资源。DCF 包含基本访问机制与可选的 RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send)访问机制。

(2) 点协调机制 PCF 是在 DCF 的基础上实现的一种可选机制，它利用一个称为点集中协调者(Point Coordinator)的站点来提供无竞争状态的服务。PCF 机制实质上是轮询操作，通过集中控制终端数据帧的传送以消除有限时间段内的竞争。它使用访问优先权机制辅助的虚拟载波监听，即通过在信标管理帧(Beacon)中发布信息来设置各个终端的网络分配向量 NAV，从而决定各个终端对信道的访问控制。PCF 只在有基础设施的无线接入网络里才使用，由访问点 AP 来实现。DCF 和 PCF 并不相互排斥，它们可以交替使用。这种情况下。终端的接入方式可以在竞争周期(Contention Period, CP)期间工作在 DCF 模式下，而在非竞争周期(Contention Free Period, CFP)期间切换到 PCF 模式下。

1. 5. 4 基于 IEEE802.11 的 WMN

WMN 只是一种网络结构，并不限定所采用的通信技术，底层的通信技术可

以采用 Wi-Fi, WiMax, UWB 等各种无线通信技术。目前的研究集中在基于 Wi-Fi 技术(IEEE802.11)的 WMN 和基于 WiMax 技术(IEEE802.16)的 WMN 上。

IEEE802.11 协议规定了站点有 Infrastructure 和 Ad hoc 两种工作模式, 能够构建无线多跳网状网络, 且自然而然地支持架构式 WMN 和对等式 WMN 的体系结构。即将推出的 IEEE802.11n 协议将采用 MIMO 技术把传输速率提升至 100Mbps 以上, 从而使 IEEE802.11 协议具备支持局域网络主干传输的能力。此外, 由于 IEEE802.11 协议已经得到了广泛的认同, 配套协议也相当完善, 利用它来构建 WMN 很自然地成为了当前研究的热点。基于 IEEE802.11 的 WMN 中, 主干路由器之间采用 IEEE802.11 标准进行通信, 终端接入则可以兼容 Bluetooth, UWB, Zigbee 等多种无线通信协议。但是利用 IEEE802.11 的 Ad hoc 工作模式所组建起来的无线多跳网络所能达到的传输性能很差^[21], 难以满足用户对 Internet 接入网的传输质量需求。IEEE802.11 标准在支持 WMN 的网络层和 MAC 层方面都存在很多不足之处。因此基于 IEEE802.11 协议的 WMN 还有很多问题值得研究。

IEEE802.11 技术随着 WLAN 的推广已被人们所熟知, 它所提供的 Ad hoc 接入模式能够实现无线站点间的网状连接, 适用于建立 WMN。其配套的安全、服务质量保证等标准已日臻完善。从兼容性角度看, 基于 IEEE802.11 的 WMN 将更加容易普及, 因此本论文的研究将定位在基于 IEEE802.11 的 WMN 上。

1. 6 论文的主要研究内容和结构安排

在相关学者研究的基础上, 本论文对基于 802.11 的无线 Mesh 网络 MAC 层和网络层协议方面涉及的技术分别进行了探讨, 以期对 MAC 层和网络层的协议进行适当的改进, 充分挖掘无线 Mesh 网络的潜能, 进一步提高无线 Mesh 的性能。主要研究内容如下:

第一章简要介绍了无线 Mesh 网络的研究背景以及网络组成部件、体系结构, 阐述了与蜂窝移动通信系统、移动 Ad Hoc 网络、无线局域网相比存在的差别, 指出了无线 Mesh 网络存在的优势和不足之处, 以及相关的关键组网技术。分析了现阶段国内外学者、研究机构和企业在无线 Mesh 网络领域的研究进展, 以及工业标准化组织积极为无线 Mesh 网络新制定的标准情况, 并详细介绍了 IEEE802.11 标准所涉及物理层、MAC 层技术。提出了本论文的研究主题是基于 802.11 标准的无线 Mesh 网络的 MAC 层和网络层技术。最后说明了本论文的研究内容和结构安排。

第二章主要研究了无线 Mesh 网络的多路径路由协议。无线 Mesh 网络作为移动 Ad hoc 网络的一种特殊形态, 传统的 Ad hoc 网络路由协议可以直接移植到

无线 Mesh 网络中。多路径路由协议是无线 Mesh 网络路由协议的研究趋势，能够满足未来应用的需求，而且实现成本低，算法简单实用。但是，多路径路由协议中的路径数目并不是越多越好，有一个最优路径数目。动态源路由协议 DSR 和 Ad-Hoc 按需距离矢量路由协议 AODV 是 Ad-Hoc 路由协议中最著名、应用最广的两个单径路由协议，扩展得到的相应的多径路由协议分别为动态源路由多路径协议 DSR-MP 和 Ad-Hoc 按需多路径距离矢量路由协议 AOMDV。本章简要介绍了 DSR-MP 和 AOMDV 协议的原理，通过仿真分析了在两种多跳无线网络：混合无线 Mesh 网络和移动 Ad Hoc 网络中这两种多径路由协议的性能。通过仿真结果，论证了无线 Mesh 网络的性能优于移动 Ad Hoc 网络，同时，对于趋于静态的无线 Mesh 网络，采用源路由协议更符合无线 Mesh 网络结构的特点。

第三章主要研究了多接口多信道无线 Mesh 网络跨层分布式信道分配技术。目前，信道分配的很多算法复杂程度都很高，运算开销大，因此，有些学者提出了将路由建立过程和信道分配过程相结合的跨层设计信道分配算法。但是，这些算法主要是解决为同一条活动路由中的各个节点分配不同的信道的问题，没有考虑到属于不同的活动路由的邻居节点信道分配问题，信道分配过程中控制报文的广播范围问题，以及可用信道数目有限等问题。本章介绍了多信道分配技术中所涉及到的信道分配方案、分配准则和分配方式等问题，阐述了无线 Mesh 网络跨层设计的原则与方法。提出了多接口多信道无线 Mesh 网络跨层分布式信道分配算法—MCCA-AODV 协议，将信道分配过程与 Ad-hoc 距离矢量按需路由(Ad-hoc On Demand Distance Vector, AODV) 协议的路由建立过程结合在一起。采用跨层设计方法，通过路由控制报文传递信道分配信息能够显著降低信道分配协议的计算复杂度。同时，AODV 协议的按需路由特性可以减少网络所需要的可用信道数量，在路由控制报文中加入少许的字段仅仅给路由协议带来很小的额外开销。MCCA-AODV 协议采用了两跳干扰模型，不但解决了属于不同路由的邻居节点的干扰问题，而且将控制报文的广播限制在了活动路由路径上的节点两跳范围内。最后通过仿真实验证明了该算法能够显著提高无线 Mesh 网络的性能，并且可用信道越多，性能越优越。

第四章主要研究了无线 Mesh 网络 MAC 层的功率控制技术。在无线 Mesh 网络中采用功率控制技术的主要目的是通过调整发送结点的信号发射功率来提高信道的空间复用度，同时降低对邻近结点的干扰，最终提高整个网络的容量。本章介绍了三种功率控制机制：网络层功率控制机制，链路层（包括单信道、双信道、多信道接入协议功率控制机制）功率控制机制和混合功率控制机制。重点阐述了 MAC 层功率控制的理论依据，从而提出了一种新的基于 CTS 分组的功率控制 CTSPC (CTS Power Controlled) MAC 协议。CTSPC 协议中，CTS 分组的发送

功率大小是基于接收到的 RTS 分组的功率进行调整，这样，只有那些真正对接收节点造成信号干扰的节点才会收到 CTS 分组，从而延迟接入信道，避免干扰。本章最后从理论上论述了该协议能显著提高空间复用度，并通过仿真实验证明了该协议能极大地改善网络的性能。

第五章主要研究了无线 Mesh 网络中移动终端的切换技术。当终端设备在无线 Mesh 网络中移动时，为了满足“任何地方、任何时间、任何方式”都能进行信息交互的目标，关键是要解决漫游和移动终端的切换问题。IEEE802.11 标准提供了对移动切换的支持，MAC 层的切换采用了硬切换的方法，造成了严重的丢包现象。IEEE802.11f 标准提出了 IAPP 协议，该协议采用平滑切换的方法减少了丢包率。基于存储转发的平滑切换算法都是将旧接入点的数据通过网络转发到新接入点上，进而转发给移动终端。由于移动通信中无线信道的时变性、信号衰减等原因，从旧接入点到新接入点的转发过程不可避免会引起数据包的丢失和延迟。基于平滑切换的原理和无线 Mesh 网络拓扑结构相对稳定性特点，本章提出了基于中继路由器的存储转发平滑切换算法。通过优化链路状态路由协议选定的中继路由器将发往接入点的数据包缓存起来，当移动终端成功切换到新的接入点后中继路由器将缓存的数据包转发到新接入点。中继路由器缩短了缓存数据包的转发跳数，与传统的存储转发平滑切换相比，不但降低了切换延迟，而且显著减少了丢包率。

第六章对全文主要研究内容和已取得研究成果进行总结，并对未来研究方向进行了展望。

1. 7 参考文献

- [1] Wiliam Stallings, Wireless communications & networks (2nd Edition), Prentice Hall,Cambridge University Press,2005
- [2] Dharma Prakash Agrawal,Qing-An Zeng,Introduction to wireless and mobile systems,Thomson Learning,2003
- [3] S.Sesay, Z.Yang,J. He,A Survey on Mobile AdHoc Wireless Network,Information Technology Journal,2004,3(2):168-175
- [4] IanF.Akyildiz,Wellan Su,Yogesh Sankarasubramaniam,Erdal Cayirci,A survey on sensor networks,IEEE Communication Magazine,2002,40(8):102-114
- [5] Raffaele Bruno,Marco Conti,and Enrico Gregori,Mesh networks:Commodity multihop ad hoc networks,IEEE Communications Magazine,March 2005,43(3):123-131
- [6] Ian F.A kyildiz,Xudong Wang,Weilin Wang,Wireless mesh networks:a

- survey,Computer Networks,2005,47(4):445-487
- [7] Kyasanur P,Jungmin S, Chereddi C, et al. Multichannel mesh networks: challenges and protocols.IEEE Wireless Communications, 2006,13(2):30-36.
- [8] D.Aguayo,J.Bicket,S.Biswas,D.S.J.De Couto,R Morris/MIT Roofnet Implementation.<http://pdos.cs.mit.edu/roofnet/design>.
- [9] John Bicket,Daniel Aguayo,Sanjit Biswas,Robert Morris,Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network,In:Proceedings of ACM11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom'05),Aug.28-Sep.2 2005,Cologne Germany,pp.31-42
- [10] Hyacinth:An IEEE802.11-based Multi-channel Wireless Mesh Network.<http://www.ecsl.cs.sunysb.edu/multichannel>.
- [11] A.Raniwala,K.Gopalan,T.Chiueh,Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks,ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review,2004,8(2):50-65
- [12] BWN lab wireless mesh networks research project.<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/mesh>.
- [13] Microsoft Mesh Networks.<http://research.microsoft.com/mesh>
- [14] Nortel Mesh Networks,<http://www.nortelnetworks.com/solutions/wrlsmesh/index.html>
- [15] J.Hauser,Dennis Baker,W.Steven Conner, Draft PAR for IEEE 802.11 ESS Mesh,IEE Document Number:IEEE 802.11-03/7759r2
- [16] IEEE 802. 16 Standard Group. IEEE 802.16™: Broadband Wireless Metropolitan Area Networks. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>
- [17] IEEE 802. 15 Standard Group. IEEE 802.15™: Wireless Personal Area Networks [EB/OL]. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>
- [18] IEEE 802. 20 Standard Group. IEEE 802.20 Mobile Broadband Wireless Access (MBWA) . <http://www.ieee802.org/20/>
- [19] IEEE802.11 WGANSI/IEEE Std 802.11:Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY)Specifications,1999
- [20] J.Proakis,Digital Communications,40 Edition,New York:McGraw-Hill,2001
- [21] D.Aguayo,J.Bicket,S.Biswas,G.Judd,R.Morris,Link-level measurements from an 802.11b mesh network,In:ACM Annual Conference of the Special Interest Groupon Data Communication(SIGCOMM'04),Aug.2004,pp.121-13

第二章 无线 Mesh 网络多路径路由协议的研究

2. 1 引言

与传统的有线固定网络和单跳(蜂窝型)无线网络不同, 无线 Mesh 网络的节点之间通过多跳数据转发机制进行数据交换, 需要路由协议进行分组转发。在这种多跳的网络环境下, 路由协议的主要作用是监控网络拓扑结构变化, 交换路由信息, 产生、维护和选择路由, 并根据选择的路由转发数据, 以提供网络的连通性。然而, 由于主机的移动性、网络拓扑结构的可变性、传输的多跳性、无线信道的不可靠性、带宽的有限性和时变性等无线 Mesh 网络特性, 使得无线 Mesh 网络路由协议的研究面临着巨大的挑战, 路由协议成为无线 Mesh 网络的一个非常重要的研究问题^[1-2]。对于传统的路由协议, 如路由信息通讯协议(Routing Information Protocol, RIP)和开放最短路径优先协议(Open Shortest Path First, OSPF), 并不能适应无线 Mesh 网络, 这主要是基于以下几个原因:

(1) 无线 Mesh 网络的拓扑结构处于动态变化中, 主要是由于新的 Mesh 路由器的加入, 已有 Mesh 路由器的故障失效或者移位等。传统路由协议是为固定有线网络设计出来的, 这些网络具有固定的拓扑结构, 通常没有考虑网络结构的动态变化。因此如果在无线 Mesh 网络中直接使用传统的路由协议, 当网络拓扑结构变化后, 它们需要花费很长的时间才能到达收敛状态, 而此时拓扑结构可能在达到收敛状态之前又发生了变化。同时, 由于网络拓扑结构的动态变化, 有通信需求的节点需要不断地来重新获取路由。这使得在传统的路由协议中, 各节点交换的路由信息量大大增加, 容易计算出大量过时路由并且耗费大量的网络资源, 甚至无法实现信息的传输。因此, 当网络的拓扑结构发生变化时, 传统路由协议重新路由所需的网络开销是巨大的。

(2) 有限的无线信道带宽, 是传统路由协议难以应用于无线 Mesh 网络的另一个重要的原因。由于无线网络比有线网络的带宽资源低得多, 若考虑多址接入、干扰及衰落等因素, 则带宽更显缺乏。而传统路由协议, 都需要定期发送路由来更新报文, 而不管网络拓扑结构是否发生变化, 这将大量消耗有限而宝贵的无线网络资源, 使网络的性能急速下降。

(3) 无线 Mesh 网络中的单向信道和冗余链路的存在, 给传统路由协议应用于无线 Mesh 网络带来了困难。无线传输信道与有线传输信道具有不同的特性。由于在无线 Mesh 网络中一个 Mesh 路由器的广播可能覆盖周围的数个 Mesh 路由器, 因此无线 Mesh 网络会产生许多冗余链路。冗余的链路需要传统路由协议

发送更多更大的路由更新报文。无线 Mesh 网络中 Mesh 路由器间的无线信道可能存在单向信道，而传统路由协议设计中常常必须以双向链路作为设计前提，而没有考虑到单向信道的存在，由此它们计算出来的路由难以准确反映无线 Mesh 网络的拓扑结构。

2. 2 移动 Ad hoc 网络路由协议

无线 Mesh 网络是移动 Ad hoc 网络的一种特殊形态，它继承了 Ad hoc 网络的特点，具有自配置、自组织与自管理等特性，所以部分传统的 Ad hoc 网络路由协议在无线 Mesh 网络中仍然可用。路由协议作为 Ad hoc 网络的关键技术之一，最近几年有了很大的进展，针对各种应用背景人们提出了许多新的 Ad hoc 网络路由算法^[3-6]，它们主要可以分为如下三类：主动式路由、反应式路由、综合式路由。

(1) 主动式路由

主动式路由算法中，各个节点事先建立并维护到所有目的节点的路径，例如 DSDV^[7]，WRP^[8-9]，FSR^[10]，OLSR^[11-12]，TBRPF^[13]等协议。DSDV 算法脱胎于 Bellman-Ford 算法^[14]，是一种带有明显的有线网络路由协议痕迹的协议。协议中，每个节点维护到网络其他节点的路由信息。当网络拓扑有改变时，受影响的节点向整个网络扩散新的拓扑信息，以便网络上的每个节点都能掌握整个网络完整的拓扑信息。为了适应 Ad Hoc 网络高动态的环境，同时减少控制分组所需要的开支，人们对有线网络上的主动式路由算法进行了改进。例如 WRP 采用一种增量式的拓扑更新方式，从而避免完全更新拓扑所需的控制消息传输量，并且它只是将更新发送到紧邻的邻节点。当新的节点进入网络时，其他节点收到它的 Hello 分组时，把它加入自己的路由表，同时将自己的完整路由表回送给它。FSR 也是一种主动式的链路状态协议，它根据网络节点到自己的距离远近而实行不同速率的拓扑更新，近处更新快，远处更新慢。OLSR 协议则在每个节点上建立多点中继拓扑结构，一方面减少了控制分组中的链路数量，一方面又减少了分发控制分组的节点数目，最终也减少了网络所要传输的控制消息。在 TBRPF 协议中，拓扑控制分组通过一种树型结构来完成分发，并且节点可以综合采用完全方式和增量方式来更新邻节点信息和网络拓扑信息，以达到减少控制冗余的目的。由于要为网络中每个节点建立路由项，主动式路由协议的存储量和计算量都比较大，伸缩性不是很好。

(2) 反应式路由

在主动式算法中，即使对于没有通信要求的节点，也要建立和维护其路由项，为了避免这种不必要的开支，反应式路由算法只有在信源节点确实需要向某个节

点发送数据时，才开始建立到该目的节点的路径。这类协议包括 DSR^[15]、AODV^[16-17]、TORA^[18-19]等协议。DSR 采用源路由方式，每个数据分组的首部携带分组要经过的每个节点的地址序列表。其优点是中间节点不必维护最新的路由信息就能够为数据分组选路，因而无需周期性广播路由和邻节点检测机制。AODV 本质上是 DSDV 协议和 DSR 的一种组合，它具有 DSR 的路由发现和路由维护的按需工作机制，同时也采用 DSDV 的逐跳路由，分组序列号以及周期性 HELLO 机制。TORA 可以发现从源节点到目的节点的多条路径，只有在所有路径均失效时才需要重新搜索路由。

(3) 综合式路由

为了将主动式路由和反应式路由等算法的优点结合起来，目前出现了一些综合性的路由算法，例如 CEDAR^[20]、ZRP^[21-23]、Terminode Routing^[24]等路由算法。CEDAR 协议通过一种分布式方式主动构造网络的核心结构：按照不同的频率和范围，利用单播确认式广播技术来扩散链路带宽消息，高带宽、稳定链路扩散范围大；低带宽、不稳定链路扩散范围小，然后在核心结构上按照需要逐段建立满足服务质量要求的路径。ZRP 将网络按跳数分成不同的区域，在离节点近的区域内采用主动式路由算法，而对区域外的节点则采用反应式路由。在 Terminode Routing 中，对于近处节点采用主动式算法(一种距离矢量协议)来发送分组，而对于远处节点则采用基于位置的路由算法。

2. 3 WMN 路由协议

尽管传统的 Ad hoc 网络路由协议可以直接移植到无线 Mesh 网络中，但无线 Mesh 网络在很多方面都与 Ad hoc 网络存在着差异，无线 Mesh 网络路由协议的设计应该根据自身的特殊性遵循不同的设计准则。目前，已经展开了关于无线 Mesh 网络路由协议的研究。

2. 3. 1 WMN 路由协议的特点

由于无线 Mesh 网络在移动性、能量约束、业务模式等方面同传统的 Ad Hoc 网络不同，与传统的 Ad Hoc 网络路由协议相比，无线 Mesh 网络的路由协议具有特殊性。

(1) 移动性：不同类型的网络节点具有不同的移动性。Mesh 路由器一般具有很小的移动性，而 Mesh 客户终端则可为固定节点或移动节点。在设计无线 Mesh 网络路由协议时，可以弱化移动性对该协议的影响。

(2) 能量约束：不同类型的节点具有不同的能量约束。Mesh 路由器通常不

以电池为动力，所以不需要考虑能量约束。而 Mesh 移动终端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自于因特网网关的业务，而 Ad hoc 网络主要业务是任意一对节点之间的业务流。这样，在网络规模较大、网络业务较多负载较重的情况下，网关节点可能会成为制约整个网络性能的瓶颈。所以在设计无线 Mesh 网络路由协议时需要考虑到这种业务量问题，一方面可以在网络规模扩大时在适当位置增加无线 Mesh 网关节点数目，另一方面可以设计出具有较好性能的路由选择协议来适应无线 Mesh 网络的这种业务流特点，达到负载平的目的。假如条件允许，可以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。

2. 3. 2 WMN 路由协议的设计准则

由于无线 Mesh 网络具有其特殊性，在设计无线 Mesh 网络路由协议时，必须考虑以下因素：

(1) 路由判据：许多已有的 Ad hoc 网络路由协议均以最小跳数作为路由判据。研究表明，在大多数情况下，该路由判据的性能并不是最优的^[25-26]。例如两节点之间选择跳数最小的路径，由于干扰冲突、通信距离等因素的影响，使该路径的链路质量恶化，从源节点到目的节点的端到端的吞吐量、误码率等性能将变得非常差。为解决因路径质量差而影响网络吞吐量等性能的问题，要求无线 Mesh 网络采用一种新的路由判据，而且该判据能正确反映出链路质量对各指标的影响。这种判据可以是跳数，但要能综合考虑到链路质量问题；也可以是时延，但也要考虑到跳数等问题。总之要综合考虑到网络各方面的性能影响，找到尽可能好的路由判据，能在跳数、时延、吞吐量等方面达到一个平衡，使得转发路径最优^[27]

(2) 负载均衡：在无线 Mesh 网络中，所有节点通过路由协议共享网络资源。因此，无线 Mesh 网络路由协议必须满足负载均衡的这一要求。如当网络中某些节点发生拥塞，并成为整个网络的瓶颈节点时，新的业务流应能“绕过”该节点。可以从两个方面来解决该问题：通过路由发现机制在业务流建立阶段“绕过”网络中的拥塞区；利用路由维护机制在链路发现拥塞时，自动选择其他路径进行数据传输。此外，以节点往返时间延迟 RTT(Round-Trip Time Latency) 作为性能判据在一定程度上达到负载均衡的目的。但由于 RTT 受链路质量影响，并不对所有情况都有效。总之，路由判据需要在一定程度上满足负载均衡的要求。

(3) 路由容错：无线 Mesh 网络中，路由发生错误时，需要尽快完成路由重建，以避免服务中断。一般有两种重建方法：一种是利用缓存路由进行数据发送；

另一种是通过重新执行路由查找过程实现路由重建。在无线 Mesh 网络中，由于 Mesh 路由器移动性小，路由错误往往是由数据冲突造成的，并非实际链路断裂造成。有两种方法可以解决该矛盾：利用跨层设计机制，在 MAC 层，对因冲突而发送失败的数据包进行二次处理；通过对节点增加路由缓存功能，对暂时不能发送的数据包进行缓存，待无线信道质量变好时再次尝试发送。

(4) 网络容量：随着网络规模的增大，利用广播机制进行路由查找的方法会消耗很多网络资源。同时，由于大规模网络中建立路径时将花费较长时间，使端到端的延时变大，一旦路径建立起来，由于拓扑发生变化又需要消耗很大的网络资源进行路由重建。针对无线 Mesh 网络的业务流主要是往来于因特网的特点，一方面可以在网络规模扩大时在适当位置增加无线 Mesh 网关节点数目，增大网络容量；另一方面要设计出具有高效的路由选择协议，尽可能降低路由查找的资源耗费，如可以改进广播机制，将广播限制在一定的范围；再如在路径失效时尽可能的减少由源端发起的路由重建，尽量由断点处发起路由重建，这样也能在一定程度上降低端到端的延迟。

(5) 网络服务质量(QoS)：无线网状网的业务流主要是接入因特网的业务，随着网络多媒体(网络流媒体如网络电视、在线直播等)、VOIP、视频会议等对实时性要求很高的业务的应用，人们对接入网的带宽以及实时性等要求逐渐提高。如何在无线 Mesh 网络中为接入用户提供网络 QoS 保证是一个新的极具挑战性的研究课题。目前，在有线网络中的 QoS 保障机制如 MPLS(多协议标签交换技术)、RSVP(资源预留协议)、DiffServ(区分服务)等研究正在如火如荼地进行，但在无线网络上，如何实现 QoS 保障，如何将 MPLS、RSVP、DiffServ 等优秀的 QoS 保障机制引入到无线网状网络当中，迄今仍很少见到过相关资料。

2. 3. 3 WMN 路由协议的衡量指标

无线 Mesh 网络的路由协议性能的衡量指标与 Ad Hoc 网络的路由协议一样，主要包括以下几个方面：

(1) 端到端数据吞吐率及延迟：数据传输的速率与延迟情况是每个路由协议必须考虑的重点，要怎样找出最佳路径？是频宽最大，还是延迟最小，或是连接最稳定？考虑愈多可能会使路由协议愈加复杂，但可以显著改善传输品质。

(2) 路径获取时间：虽然表驱动普遍比按需表现的好，但前者必须付出更多的代价，后者如果经过适当的设计，例如将较常用的路径缓存，或是固定某些特定路径，都可以改进路径建立的时间。

(3) 投递乱序率：实时数据对这个部分的要求较为严格，而一般数据则没有影响。如何和上层的 TCP 合作也是 IP 路由的工作。

(4) 路由协议的效率：即完成路由任务的控制信息与用户数据信息的比率。尤其是在控制信息与数据信息共享同一信道的情况下，该性能将直接影响到整个系统效率的高低。用最简单的方法、最小的控制开销做到最完整、最强大的功能是所有路由协议共同努力的目标。

2. 3. 4 WMN 路由协议的研究趋势

目前，无线 Mesh 网络路由协议的设计主要有以下几种思路和研究趋势

(1) 多判据路由

典型路由判据包括：期望传输次数（Expected Transmission Count, ETX）、RTT 和数据对延迟时间(Packet-pair Latency, Pkt Pair) 三个路由判据与最小跳数(Hop Count, HOP)^[25]。当节点完全静止时，ETX 获得最好的性能。RTT 与 Pkt Pair 由于冲突的影响，性能稍差。但在网络节点移动时，HOP 则优于其他三种判据。这是因为节点移动时，ETX 不能及时反映出链路质量的变化。研究表明，以 ETX 为判据的路由协议在无线 Mesh 网络中加入移动节点时性能还不够完善，需要提出更优的性能判据。同时，由于单一的路由判据很难反映出链路质量对各性能指标带来的影响，所以在制定路由判据时，应使用多路由准则来解决。

(2) 多信道路由

在无线 Mesh 网络中，使用多信道的方式有多种，如单收发器多信道、多收发器多信道等方式。使用多信道来进行数据转发和接收，一个节点可以在同一时间同时接受和发送数据而不会产生冲突。现有的无线 Mesh 网络案很多采用这种多信道的方式，科研结果和实践证明，与单信道路由相比，多信道方式能有效减小数据冲突率，大大地提高无线 Mesh 网络的网络吞吐。并且使用多收发器多信道可以在不需要修改 MAC 协议的基础上提升网络性能。

(3) 多径路由

多径路由就是在源节点与目的节点之间选择多条路径进行数据传输。多径技术可以很好地避免单径时的网络震荡影响，在充分利用带宽等网络资源的同时实现负载均衡、路由迂回和容错等。在其中某条链路因为信道质量恶化不能正常工作时，其他链路可以继续使用，因此，也可以在路由故障时，避免路由重建等操作。多径路由优良性能的代价是设计比较复杂，尤其对于仅靠路由表驱动的路由协议。采用多径技术后数据包到达的顺序可能得不到保证。此时，上层协议是否需要作相应的改动等问题还有待研究。由于多径路由可以很好地满足负载均衡与路由容错这一特点，所以它的研究是个热点。

(4) 分级路由

分级路由主要解决 Ad hoc 网络路由协议在网络规模变大时网络性能降低的

问题。通过分级技术，在簇内与簇间使用不同的路由，分别发挥其优点，从而实现大规模无线 Mesh 网络路由协议。若所有的数据业务都需要通过簇头转发，则簇头将成为整个网的瓶颈。若数据业务不通过簇头转发，该路由的设计变得更加复杂。

(5) 跨层路由

路由协议与 MAC 协议之间的跨层设计是另一个研究课题，以往的研究都集中在网络第三层上，结果并不理想。可以从第二层提取一些参数信息作为路由判据，仅仅在 MAC 层与路由层之间进行数据交换也许还不够，还可以考虑合并 MAC 与路由层之间的一些功能。研究表明，跨层设计可以使路由协议收集到节点底层的实际数据传输情况，做出正确的路径选择，对网络性能的提高有很大的意义。

(6) QoS 路由

如何为用户提供 QoS 保证是当前路由研究的热点问题。特别是对于实时业务，如何提供 QoS 支持更是迫切需要解决。QoS 路由的主要思想是首先需要选择满足用户各种 QoS 要求的到达目的节点的路径；其次，在路径建立后，若当前路径已经不能满足用户 QoS 需求，则节点需要寻找新的路由。

(7) 基于地理的路由

基于地理的路由需要依靠 GPS 或类似的定位设备，从而增加了成本与复杂性，并且获得目的节点的位置信息给网络带来很大开销。

2. 3. 5 WMN 路由协议的研究现状

目前一些公司如 Tropos、BelAir 、Firetide 、LocustWorld 和 Strix 提出的解决方案在实现方法与采用的路由协议上都存在一定的差别，它们均采用私有的路由协议，且互不兼容^[28]。

(1) 支持多射频的链路质量源路由

MR-LQSR (Multi-Radio Link-Quality Source Routing)协议^[26]是微软公司研发的多信道无线 Mesh 网络路由协议，采用一种新的路由性能判据，称为加权累进计传输时间 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。因此该协议能在吞吐量与延时之间获得一种平衡。MR-LQSR 是在传统的 DSR 路由协议的基础上进行改进的，但它又不同于 DSR 协议。该协议不但需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。MR-LQSR 协议假设无线 Mesh 网络中所有的 Mesh 路由器均为静态节点。假设每个节点有多个不同且互不干扰的无线收发器。

(2) 可预测的无线路由协议

PWRP(Predictive Wireless Routing Protocol)是 Tropos 公司开发的应用于“Wi-Fi 蜂窝网络户外系统”的私有路由协议^[29]，它通过比较数据包错误率及其他网络条件来选择在特定环境下的最优路径。该协议是基于传统的有线网络(如因特网)路由协议 OSPF 改进的，针对 Wi-Fi 无线网格小区应用而设计。它选择可达到最大吞吐量的路径来传输到达有线网关的业务，通过选用性能最佳的路径，减小了射频干扰、路径故障以及业务载荷等因素的影响。适用于大规模网络，具有路由开销小等优点。

(3) 基于链路质量选择路由的协议

该协议是 SRIKRISHNA 于 2004 年 1 月申请的 Mesh 路由专利^[30]，该协议以到达因特网接入点的路径质量为判据选择最优路径。所有节点接收来自接入点的路由数据包，该数据包记录了到达接入点的路由信息。在一段时间(T1)后，节点将收集在此 T1 时间内节点间的数据传输成功率，并以此作为路由选择的判据，具有最大数据传输率的路由将被选中，所有节点继续接收来自接入点的路由数据包。在 T2(T2>T1, T2 足够长)时间内，若某路由拥有更大的数据成功传输率，则该路由将作为第二次路由选择时选中。在第二次选择的路由中，若某路由能带来最大的吞吐量，它将被第三次选中。最佳路由将在第三次选择中产生。

(4) 其他路由协议

LocustWorld 公司的 MeshAP 方案采用 AODV 路由协议。MeshNetwork 公司开发的是混合 Ad hoc 路由协议，该协议结合先应式路由与反应式路由的优点，称为 MSR(MeshNetworks Scalable Routing)^[31]。

2. 4 WMN 多路径路由协议

2. 4. 1 多路径路由协议的优势

传统的 Ad Hoc 路由协议是单径路由协议，没有考虑公平性，它们倾向于把重的负载分布到源—目的对的最短路径的 Mesh 路由器上。同时，它们在路由发现阶段只获取一条路径，无法很好地获取整个网络的拓扑信息，从而无法有效地利用网络的有效信息，进而导致路由开销增加；而且，数据发送一般只利用一条路径，无法并行或并发地发送数据，导致网络传输率较低，延迟增加，网络负载不平衡，甚至造成网络拥塞，无法很好地支持 QoS^[32]。无线 Mesh 网络的结构是平面式的，即所有结点都是对等的，都肩负接入点与路由器两项功能，只有性能上的差异，没有功能上的不同。这种平面式结构的最大优点之一是源结点与目的结点之间存在多条路径，因而人们提出了多路径路由方法，通过多条传送业务流

来减少拥塞，并消除“瓶颈”问题。多路径路由协议与单路径相比，在有效使用带宽、对付拥塞和突发流量、降低传输延迟、负载均衡以及增加传输可靠性方面是有效的。

(1) 能加快传输速度，减少延时。在多条路径之间分配资源进行传输，其传输性能明显优于单路径。

(2) 防止断裂，增加稳定度。单路径中如果断裂，传输将失败，必须重新进行路由发现，多路径算法中当有路径断裂时，其他路径可以照常传输，可以将资源重新分配给稳定的路径而不是重新进行路由发现。

(3) 减少对带宽的要求。资源在多条路径之间分配，能有效的减少对带宽的限制。

多路径路由的目标是在源—目的对之间建立多条路径，要求更多的 Mesh 路由器来承担路由任务，能有效地均衡负载。同时，它作为单个最短路径的替代而被提出用来分布流量，减轻拥塞。在多路径路由中，流量通过多条路径分流传输到目标。换句话来说，多路径路由是用多条好的路径来代替单条最好的路径。不但可以加快传输速度，减少延时，而且能够避免单路径由于链路断裂导致的传输失败，增加网络的稳定性。同时，多路径也可以减少对带宽的要求。

2. 4. 2 多路径路由协议分类

按照同时使用的路径数量，多路径路由可分为两大类：一类是在同一时刻对于每个源—目的对只能在一个连接上发布流量，当这条路径中断时，可以用其他备用路径来发送数据，我们称之为备份多路径；另一类是同时使用两条或两条以上的路径来传输流量，我们称之为并行多路径。

多路径路由根据节点的相关性可以分为三类^[33]：节点不相关多路径路由(Node-Disjoin tablet)，也可以称为完全不相关路由，路由之间没有共用的节点或者链路。链路不相关多路径路由(Link-Disjoin tablet)，路由之间没有共用的链路，但是可能有共用的节点。相关多路径路由(Non-Disjoin tablet)，路由之间既有共用的节点，也有共用的链路。在这三种路由类型中，节点不相关路由的容错能力最强，链路不相关路由的容错能力次之，相关路由的容错能力最差。在链路不相关多路径路由中，如果共享的节点由于移动等原因发生中断的话，那么该节点所连接的所有路径便都失败了，而节点不相关路由由于链路的独立性，则不会产生连锁反应。一般在网络分布密度相对较大的情况下，采用节点不相关多路路由，但在在节点密度相对稀疏的网络环境中，会采用链路不相关多路路由。一般相关多路路由是不宜采用的。

2. 4. 3 典型的多路径路由协议

目前的多路径路由一般都是在单路径路由(如 DSR 和 AODV)的基础上扩展而来的。基于 DSR 的多路径路由协议有 MP-DSR, MSR^[34]和 SMR^[35], 在 MSR 的基础上, [36]提出了另外一种多路径路由算法, 称为 RSR(Redundant Source Routing), 并专门探讨 TCP 在 Ad hoc 网络中的稳定性。基于 AODV 进行改进得到的多路径路由算法有 AOMDV^[37]等。AOMDV 对 AODV 进行了改进以得到多条路径, AODV-BR 建立了一个网状结构以提供可替代的路由。除此之外还有很多关于多路径路由协议的研究。

2. 4. 4 最优路径数目确定

在相关的多路径路由文献中, 一般只是确定如何发现多路径路由, 但是对路由的数目却没有明确的选择。实际上, 并不是路径数目越多效果越好, 因为搜索到路径越多, 各条路径之间的长度相差太大, 无益于提高传输质量, 路由开销也会相应的增加, 因此路径数目的选择有个相对的最优值。

在多路径路由中, 假设源节点 S 和目的节点 D 之间的路由有 $k-1$ 个中间节点, 包含 k 条无线链路。设定 L_i 为路由中第 i 条链路。其生命值设为 X_{Li} , 这里

假设 $X_{Li} (i=1, 2, \dots, k-1)$ 为独立同分布的指数变量, 设其概率密度为 $f(t) = \frac{1}{l} e^{-\frac{t}{l}}$,

其均值为 l 。只要整条路径中的任一链路发生中断, 则该条路由便失败了, 该条路由的生命值为 P , 由 k 条无线链路组成, 随机变量 X_p 通过下式表示:

$$X_p = \min(X_{L1}, X_{L2}, \dots, X_{Lk}) \quad (2-1)$$

由概率知识可知, X_p 也是服从指数分布的一个随机变量 $f_{X_p}(t) = \frac{k}{l} e^{-\frac{k}{l} t}$, 其均值

为 $\frac{l}{k}$ 。根据上述链路失败行为的假设, 下面把多路径路由技术中两个路由发现过程的时间间隔作为统计量。

假设源节点 S 到目的节点 D 之间有 N 条路由。其中第一条记为 P_1 , 剩余的 $N-1$ 条分别记为 P_2, P_3, \dots, P_N , 路由 P_i 的长度记为 k_i , 设定一个随机变量 T , 在 T 时间后, 没有路由可用, 则

$$T = \max(X_{P1}, X_{P2}, \dots, X_{PN}) \quad (2-2)$$

T 表示两个成功的路由发现之间的时间。考虑 N 个独立同分布的指数分布变量, $X_{P1}, X_{P2}, \dots, X_{PN}$, 其中 X_{Pi} 的概率密度分布函数为:

$$f_{X_{Pi}}(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (\lambda_i = k_i/l, i=1, 2, \dots, N) \quad (2-3)$$

其中 k_i 为路径 P_i 的跳数, 即该路径无线链路的条数。由于 X_{Pi} 的分布是相对独立的, 因此, T 的累积分布函数 $F_T(t)$ 为:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= P[T \leq t] \\
 &= P[\max\{X_{P1}, X_{P2}, \dots, X_{PN}\} \leq t] \\
 &= P[(X_{P1} \leq t) \cap (X_{P2} \leq t) \cap \dots \cap (X_{PN} \leq t)] \quad (2-4) \\
 &= \prod_{i=1}^N F_{X_{Pi}}(t)
 \end{aligned}$$

由(2-3)式可得 $F_{X_{Pi}}(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$ ，将其代入(2-4)中，对(2-4)的两边同时对 t 求导，由此便可得 T 的概率密度分布函数，下面是其表达式：

$$\begin{aligned}
 f_T(t) &= \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) (1 - e^{-\lambda_3 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_N t}) \\
 &\quad + \lambda_2 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) (1 - e^{-\lambda_3 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_{N-1} t}) \\
 &\quad + \lambda_N e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) (1 - e^{-\lambda_3 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_{N-1} t}) \quad (2-5)
 \end{aligned}$$

根据(2-5)式，来求 T 的期望值 $E(T)$

$$E(T) = \int_0^{+\infty} t f_T(t) dt \quad (2-6)$$

当然该值的结果同 λ_i 值相关，即同 k_i 相关。例如当 $N=2$ 时，可以求出 T 的期望值为：

$$\begin{aligned}
 E(T) &= \int_0^{+\infty} t \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + t \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (1 - e^{-\lambda_1 t}) dt \\
 &= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \\
 &= \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2)}
 \end{aligned}$$

下面我们对 $E(T)$ 进行计算分析，考虑三种跳数比较有规律的情况下，来考察路径的数目同路由发现时间的期望值 $E(T)$ 之间的关系，然后通过试验来确定最优的路径数目。

情况 1：假设源节点 S 和目的节点 D 之间有 N 条路径，其路径的长度均相等。这是假设的“最好”的情况，N 条不相关最短路径存在于给定的源节点和目的节点之间。即 $k_1 = k_2 = k_3 = \dots = k_N = k$ 。

情况 2：假设源节点 S 和目的节点 D 之间有 N 条路径，其路径的长度是递增的。且每条路径的长度递增 1，设定最初的路径是最短的一条。即 $k_1 = k$ ， $k_2 = k+1$ ， $k_3 = k+2$ ， \dots ， $k_N = k+N-1$ 。

情况 3：假设源节点 S 和目的节点 D 之间有 N 条路径，其路径的长度是递

增的。且每条路径的长度递增 2，设定最初的路径是最短的一条。即 $k_1=k$ ， $k_2=k+2$ ， $k_3=k+4$ ，…， $k_N=k+2(N-1)$ 。

由于 l 为常量，在试验过程中设定为 1，设定最短路径长度 k 为 3，取 N 值范围为 1~7，试验结果如图 2-1 所示：

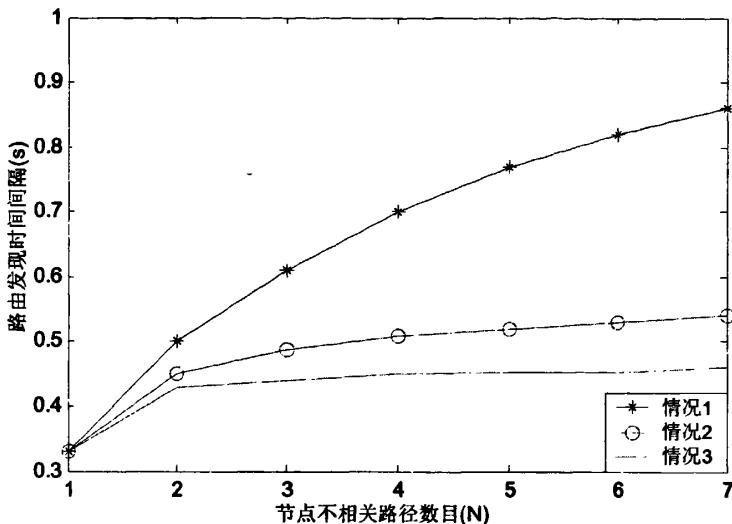


图 2-1 路由发现时间

从图 2-1 可以得出如下结论：

(1) 随着 N 值的增大，即随着多路径路由路径数目的增加，路由发现的间隔时间 T 的期望值 $E(T)$ 也随着增加，而且所有 N 条不相交路径的长度即跳数相等的情况下，路由发现间隔时间的增长最明显。

(2) 当 $N>3$ 时，从情况 2 和情况 3 的曲线可以看出，这种增长的趋势已经很缓慢，由于情况 1 比较具有特殊性，因此选取多路径路由时，一般取 3 条就足够了。

(3) 在实际运用中，多路径路由的数目还同节点的分布密度有着很大的关系。路径数目越多，搜索的难度也就上升。基于上述分析，从效率和开销折中考虑选取 3 条路径。在下一节对协议的实现中我们根据以上分析为依据，选取多路径路由的条数为 3。

2. 5 基于混合 WMN 的 MP-DSR 和 AOMDV 协议研究

大多数多径路由协议都是在单径路由协议的基础上演变而来。动态源路由协议 (Dynamic Source Routing, DSR) 和 Ad-Hoc 按需距离矢量路由协议 (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing, AODV) 是 Ad-Hoc 路由协议中最著名、应用最广的两个单径路由协议，扩展得到的相应的多径路由协议分别为动态源路由

多路径 (Dynamic Source Routing Multi-Path, DSR-MP) 协议和 Ad-Hoc 按需多路径距离矢量路由 (Ad-Hoc On-Demand Multi-Path Distance Vector Routing, AOMDV) 协议。目前 DSR 和 AODV 协议运用于无线 Mesh 网络的研究已经广泛展开^[26]。但是，还没有 DSR-MP 和 AOMDV 协议在无线 Mesh 网络环境中的性能研究。

2. 5. 1 MP-DSR 协议

MP-DSR 协议是 DSR 协议的多路径版本，MP-DSR 协议的运行过程与 DSR 协议相似，都包括路由发现和路由维护过程。文献[15]对 DSR 协议的路由控制报文和运行过程等内容进行了详细的描述。

在 MP-DSR 协议中定义了主源路由的概念，也就是在路由发现过程中第一个到达目的节点的路由请求分组 (Route Requests, RREQ) 所经过的路由。主源路由确定了源节点和目的节点之间的最短路径。当洪泛广播的 RREQ 分组经过不同的路径到达目的节点后，对于其中包含有与主源路由链路不相交的 RREQ 分组，目的节点或者存在到目的节点路由的中间节点分别回应路由应答分组 (Route Replies, RREP)。源节点将收到的 RREP 分组中的所有冗余路由信息保存在路由存储器中。当主源路由中断时，则使用所存储的最短备份路由，该过程持续进行，直到所有的路由均中断为止，这时将初始化一个新的路由发现过程^[38]。

为了优化 MP-DSR 协议，节点维护一个路径缓存或者是链路缓存。路径缓存存储到目的节点的完整路径，链路缓存存储与每个链路相关的信息。链路缓存的优点在于当中间链路失效后，可以建立到目的节点的替代路径。节点在转发或者侦听数据分组或者控制分组的过程中，将收到的有用信息进行缓存。

3. 5. 2 AOMDV 协议

AOMDV 协议是 AODV 协议的多路径版本，是在 AODV 路由协议基础上扩展而成的。文献[16]对 AODV 协议的路由控制报文和运行过程等内容进行了详细的描述。AOMDV 协议尽可能地使用 AODV 协议已有的有效路由信息。因此，计算多路径所需要的额外开销非常少。

为了在 AOMDV 协议中实现多径功能，对 AODV 进行了一系列的扩展^[39]。AOMDV 协议计算多条开环、链路不相交的路径。AOMDV 协议采用广告跳数来建立目的节点序列号单调递增特性。一个节点对于目的节点的广告跳数表示从该节点到目的节点的多条有效路径的最大跳数。最大跳数确定以后，同一个目的节点序列号的广告跳数可以保持不变。AOMDV 协议只允许认可那些跳数小于最大跳数的候选路由。这个不变性对于保证路由开环是必要的。为了找到节点不相交的路径，每个中间节点不马上拒绝重复的 RREQ 分组。每个来自源节点方向的不同邻居节点的

RREQ 分组都代表了一个节点不相交的路径。这是因为节点不能广播重复的 RREQ 分组，因此任何两个来自同一个源节点方向的不同邻居节点到达某个节点的 RREQ 分组不可能通过相同的节点。为了得到多个链路不相交的路径，目的节点回复 RREQ 分组的时候不考虑它们的第一跳。为了保证 RREP 分组第一跳的链路不相交，目的节点仅仅回复那些通过唯一邻居的 RREQ 分组。第一跳之后，RREP 分组沿着反向路径传输，这些路径是链路不相交的。每个 RREP 分组的轨迹可能会在某个中间节点交叉，但是每个都有不同的反向路径来到达源节点，这就保证了链路的不相交。

3. 5. 3 仿真环境设置

为了研究混合无线 Mesh 网络中 MP-DSR 和 AOMDV 协议的性能，采用 NS-2 仿真器进行试验。仿真过程将在节点移动速度不同的情况下进行，性能指标是取 50 次仿真的平均值。

在仿真中，物理层采用全向天线；MAC 层是基于 IEEE802.11 协议标准的分布协调功能(DCF)；业务类型采用基于 UDP Agent 的固定比特率(Constant Bit Rate, CBR)模型；节点移动模型采用随机移动模型。在混合无线 Mesh 网络拓扑结构中，共有 66 个节点。其中，有 16 个为 Mesh 路由器，保持静止，而只有 50 个 Mesh 客户端随机移动。仿真开始时，Mesh 路由器均匀分布在所有的客户端节点之中；传播模型为双径传播模型。其余的仿真参数配置见表 2-1。为了与 Ad-Hoc 网络结构中 MP-DSR 和 AOMDV 协议的性能进行比较分析，混合无线 Mesh 网络和 Ad-Hoc 网络在仿真中采用了相同的仿真环境和参数配置，只是在 Ad-Hoc 网络结构中，所有终端节点都随机移动，总数为 66 个。

表 2-1 仿真参数配置

仿真参数	设定值
节点通信范围/(米)	250
节点移动范围/(米 ²)	1000×1000
节点最大移动速度/(米/秒)	0, 5, 10, 15, 20
节点暂停时间/(秒)	10
仿真时间/(秒)	900
最大连接数	20
分组大小/(Bytes)	512
传输速率/(数据包/秒)	4

选择以下指标作为性能评价指标。

(1) 分组传输率：目的节点正确收到的数据分组占源节点总共产生的数据分组的比例。

(2) 端到端平均延时：数据分组从源节点产生后，经过一定的时间段被目的

节点接收，这段时间的平均值称为端到端的延时，通常取所有分组的平均值。

(3) 路由开销率：每个数据分组要发送到目的节点都需要一定数量的控制分组，总的控制分组数量占总的数据分组数量的比例称为路由开销率，或者是网络开销率

2. 5. 4 仿真结果分析

仿真实验结果如图所示，图 2-2，图 2-3，图 2-4 分别表示路由协议的分组传输率、端到端平均延时、路由开销率在不同移动速度下的变化情况。为了便于区分，在无线混合 Mesh 网络环境下的协议分别表示为 DSR-MP(Mesh)，AOMDV(Mesh)。

(1) 分组传输率

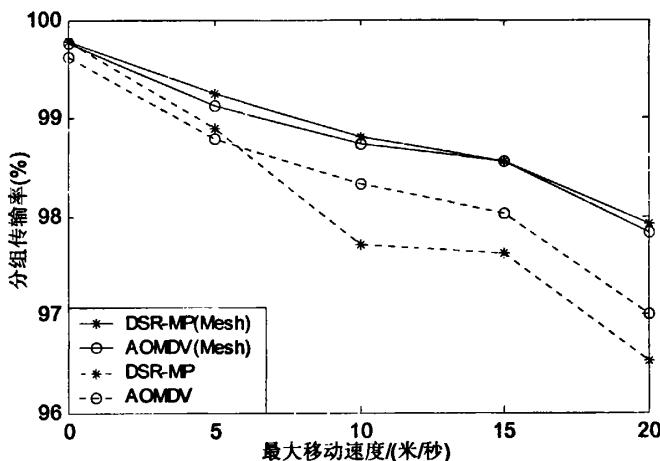


图 2-2 分组传输率

从图 2-2 可以分析得知，在节点完全处于静止的情况下，四种路由协议的分组传输率都很高，都在 99% 以上，原因是即使在完全静止的条件下，路由收敛的速度较慢，在计算出最短路由之前某些数据报文由于等待超时而被丢弃。随着移动速度的增加，所有路由协议的分组传输率都开始下降。

DSR-MP(Mesh) 和 AOMDV(Mesh) 协议与在 Ad-Hoc 网络环境中的 DSR-MP 和 AOMDV 协议相比，在静态环境和动态环境中都具有较高的分组传输率。而且，DSR-MP(Mesh) 协议的分组传输率适应动态环境的能力比在 Ad-Hoc 网络结构中明显增强。在节点静止，低速和高速移动的情况下，DSR-MP(Mesh) 协议的分组传输率不但大于 AOMDV(Mesh) 协议，而且明显大于 AOMDV 协议。当节点静止时，DSR-MP(Mesh) 的分组传输率为 99.78%，AOMDV(Mesh) 和 AOMDV 的数据分组传输率分别为 99.76%，99.62%。随着 Mesh 客户端最大移动速度的增大，当到达 20 米/秒时，分组传输率逐渐降低，DSR-MP(Mesh) 协议为 97.92%，AOMDV(Mesh) 和 AOMDV

协议分别为 97.83%，97%。

DSR-MP(Mesh) 和 AOMDV(Mesh) 协议的网络结构采用了静止的 Mesh 路由器，实际上是为 Mesh 客户端提供了半静态的路由器。半静态的路由功能由 Mesh 路由器提供的静态路由部分和由 Mesh 客户端提供的动态路由部分组成，这样，Mesh 路由器降低了链路中断的概率，因而减少了总的分组丢失量。DSR-MP(Mesh) 和 AOMDV(Mesh) 协议较低的数据分组丢失率可以保证中间节点较高的分组转发率。与没有静止的 Mesh 路由器的网络结构相比，具有静止 Mesh 路由器的多径路由协议的数据分组成功传输率得到了显著提高。然而，随着节点移动速度的增加，即使是源节点的数据分组发送率保持恒定不变，数据分组的丢失率也会逐渐变大，而成功传输率逐渐降低。

虽然 DSR-MP 协议的路由建立速度比 AOMDV 协议慢，但是一旦路由建立后，静止环境中链路状态不发生改变。DSR-MP 采用路由缓存技术，当链路失效时，优先使用缓存中的路由信息而不是开始新的路由重建过程，而且 DSR-MP 只在源节点才使用多径功能。这样，当源节点突然发现到邻居的链路中断后，它使用缓存的路由信息建立替代的链路，并不开始新的路由发现过程。而 DSR-MP 协议按源路由的方式进行数据传输，也就是每个数据报文都带有到达目标节点的逐跳路由信息，所以只要链路状态不改变或者存在有效的替代路由，数据就会以最快的方式到达目标节点。然而，在高移动性的情况下，缓存中的路由信息很快过时而造成路由失效，数据分组的丢失率随着移动速度的增大而增加。对于 DSR-MP(Mesh) 协议，由于静止的 Mesh 路由器降低了高速移动环境下缓存路由的失效概率，保证了部分链路的有效性，使得 DSR-MP(Mesh) 协议适应动态环境的能力得以增强。

AOMDV 协议的每个节点都按需维护一个路由表，数据到达后还要在路由表中进行路由选择。因此，在链路状态不发生改变的静止环境或者移动性低的情况下，DSR-MP 和 DSR-MP(Mesh) 协议的分组传输率大于 AOMDV 和 AODV(Mesh) 协议。而随着节点移动性的增强，链路失效的概率增大，AOMDV 路由建立速度快的优势表现出来，所以在节点移动性强、链路改变频繁的情况下 AOMDV 协议的分组传输率大于 DSR-MP。

(2) 端到端平均延时

端到端的延时主要由路由建立所需要的时间长度决定。对于单路径路由协议 DSR 和 AODV，由于 AODV 协议的路由回复与 DSR 协议的路由回复机制的不同，AODV 协议采用广播的方式进行路由回复，而 DSR 协议采用单播的路由回复方式，需要 MAC 层更长的处理时间。同时，随着移动性的增强，采用 DSR 协议的源节点缓存的路由将很快过时而变成无效路由，这将激发更多的路由发现过程。所以

AODV 协议在节点移动性强、链路改变频繁的情况下建立路由的速度更快。在静止环境中，以及在节点低速移动的情况下，DSR 协议的端到端延时小于 AODV 协议。在移动性强的环境中，AODV 协议的端到端延时明显小于 DSR 协议，而且，二者差距随着移动速度的增大而增大。但是，对于多径路由协议而言，从仿真试验结果(如图 2-3)可以看出，在静止环境和动态环境中，DSR-MP 和 DSR-MP(Mesh)协议的端到端平均延时都小于 AOMDV 和 AOMDV(Mesh)协议。这四种协议的端到端平均延时随着节点最大移动速度 V_{max} 的增大而逐渐增加。

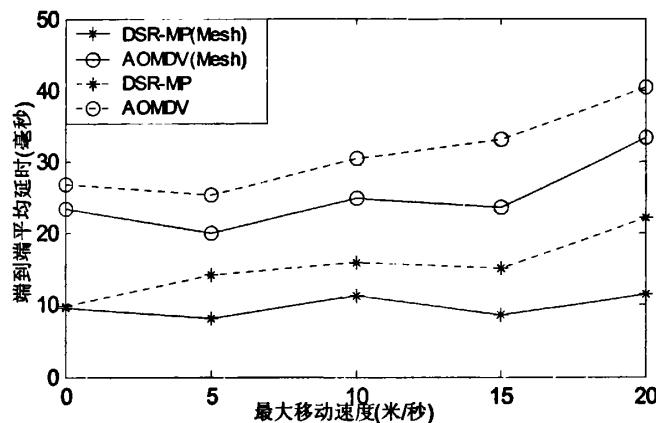


图 2-3 端到端平均延时

DSR-MP 协议在源节点采用多径功能，从源节点到目的节点存在多条备份路径。DSR-MP 协议中的所有备份路径的链路都不相交，因此，即使是在高度移动性的环境中，从源节点到目的节点始终存在有效路由。并且，DSR-MP 协议的源路由特性能保证分组快速发送到目的节点。AOMDV 协议在每个节点使用多径功能，中间节点在转发分组时都要进行路径的选择，从而增加了网络的延时。因此，随着节点最大移动速度 V_{max} 的增大，采用源路由的 DSR-MP 协议的端到端平均延时一直小于 AOMDV 协议。当 $V_{max}=0$ 米/秒，DSR-MP 协议的端到端平均延时为 9.8 毫秒，AOMDV 协议为 26.9 毫秒；当 $V_{max}=20$ 米/秒，DSR-MP 协议为 22.2 毫秒，AOMDV 协议为 40.5 毫秒。

混合无线 Mesh 网络中存在静止的 Mesh 路由器，对于 DSR-MP(Mesh) 和 AOMDV(Mesh) 协议，由于距离节点最近的 Mesh 路由器能够回应 RREP 分组，使得这两种协议在无线 Mesh 的结构中减少了端到端的延时。DSR-MP(Mesh) 和 AOMDV(Mesh) 协议的端到端平均延时都小于 DSR-MP 和 AOMDV 协议。由于静止的 Mesh 路由器提高了 DSR-MP 协议中备份路径的有效概率，在这四种协议中，DSR-MP(Mesh) 的延时最小，当 $V_{max}=0$ 米/秒时为 9.5 毫秒；当 $V_{max}=20$ 米/秒时为 11.6 毫秒。

(3) 路由开销率

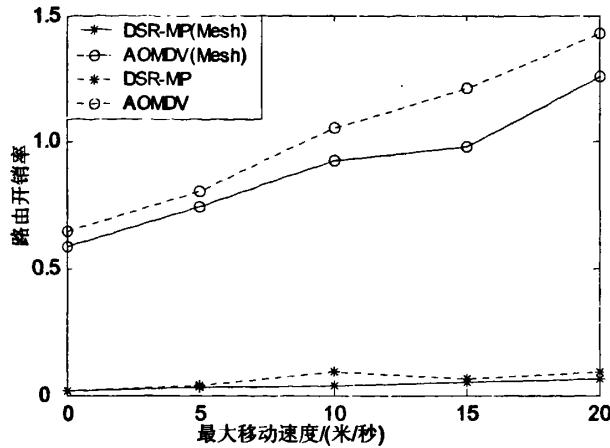


图 2-4 路由开销率

从仿真试验结果（如图 2-4）可以看出，DSR-MP 和 DSR-MP(Mesh) 协议的路由开销总是低于 AOMDV 和 AOMDV(Mesh)，这四种路由协议中，DSR-MP(Mesh) 协议的路由开销最小，AOMDV 最大。

DSR-MP 协议通过有效利用缓存技术降低了路由控制分组。DSR-MP 协议利用多种机制来缓存路由信息，包括采用混杂监听模式，以及在转发分组时不断学习，获得大量的路由信息，从而可以减少路由发现过程。Mesh 客户端缓存的路由中包含静止的 Mesh 路由器，因而在一段时间内该路由将保持稳定，同 Ad-Hoc 网络中 DSR-MP 协议相比，大大提高了路由的稳定性，这使得 DSR-MP(Mesh) 协议大大降低了路由开销，平均每十个数据分组才产生一个路由控制分组。

AOMDV 协议在建立多路径的同时还在进行路由的维护，这样就产生了更多的路由控制报文。AOMDV 协议优先采用的是更新的路由而不是过时的路由，这就造成了更多的请求分组 RREQ 频繁地在整个网络中传播。随着网络移动性的增强，链路中断概率增加，AOMDV 协议频繁调用路由发现过程，路由开销也就逐渐变大。静止 Mesh 路由器的存在降低了路由开销，AOMDV(Mesh) 平均每两个数据分组才会产生一个路由控制分组，而 AOMDV 平均每个数据分组都会产生一个路由控制分组。

2. 6 本章小结

无线 Mesh 网络的平面式结构的最大优点之一是源结点与目的结点之间可能存在多条路径，通过多条路径传送业务流能够减少拥塞，并消除“瓶颈”问题。多路径路由协议与单路径相比，在有效使用带宽、对付拥塞和突发流量、降低传

输延迟、负载均衡以及增加传输可靠性方面是有效的。但是，并不是路径数目越多越好，本章详细分析了多径路由中最优路径数目的确定方法。从效率和开销折衷考虑取 3 条路径为最优。

混合无线 Mesh 网络结构中静止的 Mesh 路由器，为 Mesh 客户端提供了半静态的路由功能，提高了动态网络环境中路由的有效概率。本文研究了两种应用最为广泛的 Ad-Hoc 多径路由协议 DSR-MP 和 AOMDV，分析比较了它们在混合无线 Mesh 网络和 Ad-Hoc 网络结构中的性能。通过 NS-2 仿真试验可以看出，具备静止 Mesh 路由器的混合无线 Mesh 网络环境中的 DSR-MP 和 AOMDV 协议的性能明显优于 Ad-Hoc 网络环境，并能够显著提高 DSR-MP 的分组传输率。因此，在无线 Mesh 网络中，采用多径源路由协议十分有效。

2. 7 参考文献

- [1] David B Johnson. Routing in Ad hoc Networks of Mobile Hosts. Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. December 1994
- [2] Elizabeth M Royer and Chai-Keong Toh. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. IEEE Personal Communications, Vol.6, No.2, pp.46-55, April 1999
- [3] Rohit Dube, Cynthia D. Rais, Kuang-Yeh Wang and Satish K. Tripathi. Signal Stability based Adaptive Routing (SSA) for Ad-Hoc Mobile Networks. In IEEE Personal Communications, February 1997.
- [4] S. Ramanathan and M. Steenstrup. A survey of routing techniques for mobile communications networks. ACM Baltzer Mobile Networks and Applications, 1(2):89-103, 1996
- [5] E.M.Royer and C.K. Toh, A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks, IEEE Personal Communications, April 1999, pp46-55
- [6] C.K.Toh. Associativity Based Routing For Ad Hoc Mobile Networks. Wireless Personal Communications Journal, Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems, 4(2):103-139, March 1997.
- [7] C.E. Perkins and P. Bhagwat, Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers, Proc. of ACM SIGCOMM, London, UK (1994) pp. 234-244.
- [8] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves. A routing protocol for packet radio

- networks. in Proc. IEEE Mobicom'95, Nov. 1995, pp86-95.
- [9] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves, An efficient routing protocol for wireless networks. in Proc. ACM Mobile Networks Applicat, 1(2):183-197, 1996.
- [10] A. Iwata, C-C. Chiang, G. Pei, M. Gerla, and T. Chen, Scalable Routing Strategies for Ad Hoc Wireless Networks. IEEE JSAC Special Issue on Wireless Ad Hoc Networks, 17(8):1369-1379, August 1999.
- [11] P. Jacquet, P. Muhlethaler, and A. Qayyum. Optimized link state routing (OLSR) protocol. Internet Draft, draft-ietf-manet-olsr-01.txt, February 7 2000, Work in progress.
- [12] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link-State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, October 2003.
- [13] R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding. RFC 3684, Feb. 2004.
- [14] A. Tanenbaum. Computer Networks. Prentice Hall Inc. Third Edition, 1996.
- [15] D.B.Johnson, D.A.Maltz, Y.Hu, The dynamic source routing protocol for mobile ad-hoc Networks (DSR). <http://tools.ietf.org/IETF,2004>
- [16] C. E. Perkins, E. M. Royer, and S. R. Das. Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-07.txt>,
- [17] Nov 2000. IETF Internet Draft (work in progress).
- [18] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing(AODV). RFC 3561, July 2003.
- [19] V. Park and M.S. Corson, Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Functional Specification. IETF MANET Internet Draft, drab-ietf-MANET-tora-spec-03.txt, November 2000
- [20] M.S. Corson and A. Ephremides, A Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. ACMBaltzer WirelessNetworks, I(1):61-81, February 1995
- [21] R. Sivakumar, P. Sinha, and V. Bharghavan. CEDAR: A Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing Algorithm. IEEE JSAC, Special Issue on Ad Hoc Networks, 17(8):1454-1465, 1999.
- [22] Z. J. Haas. A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks. in Proc. IEEE ICUPC'97, 1997, pp562-566.
- [23] Z.J.Haas, M.R.Pearlman, and P.Samar. Zone Routing Protocol(ZRP). IETF

- Internet Drag,draft-ietf-manet-zrp-04.txt, January 2001.
- [24] M.R.Pearlman and Z.J.Haas. Determining the Optimal Configuration for the Zone Routing Protocol. IEEE JSAC, 17(8):1395-1414, August, 1999.
 - [25] L. Blazevic, L. Buttyan, et al. Self-organization in Mobile Ad Hoc Networks: The Approach of Terminodes. IEEE Commun. Mag., June 2001, pp166-75.
 - [26] R.Draves, J.Padhye, B.Zill. Comparisons of routing metrics for static multi-hop wireless networks. ACM Annual Conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM) , August 2004 ,133-144
 - [27] R.Draves, J. Padhye, B.Zill. Routing in multi-radio,multi-hop wireless mesh networks. ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(MOBICOM) ,2004 ,114-128
 - [28] Y.Yan, J.Wang and R.Kravets.Designing Routing Metrics for Mesh Networks.In Proceedings of the IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks(WiMesh), IEEE Press,2005
 - [29] Raffaele Bruno, et al. Mesh networks :Commodity Multi-hop Ad hoc Networks. IEEE Communications Magazine ,March 2005,43(3):123-131
 - [30] 802.11s tackles mesh networks,<http://www.nwfusion.com/newsletters/wireless/> 2004/0621wireless1.html
 - [31] Srikrishna Devabhaktuni,et al.Selection of routing paths based upon path quality of a wireless mesh network. Patent No US2004008663,Jan 15 2004
 - [32] MeshNetworks Co, System and Method for Providing Wireless Telematics Store and Forward Messaging for Peer-to-Peer and Peer-to-Peer-to-Infrastructure a communication network,Patent No US6580981B1,Jun 2002
 - [33] Satyabrata Chakrabarti, Amitabh Mishra.QoS Issues in Ad Hoc Wireless Networks.IEEE Communications Magazine ,2001,39(2) :142-148.
 - [34] StePhen Mueller, Rose P.Tsang,Dipak Ghosal. MultiPath Routing in Mobile Ad Hoc Networks:Issues and Challenges.2004
 - [35] Lei Wang,Yantai Shu,Miao Dong,Lianfang Zhang,Adaptive Multipath Source Routing in Ad hoc Networks,IEEE ICC'98,HelsinkiFinland,June 2001.
 - [36] Sung Ju lee, Mario Gerla,Split Multipath Routing with Maximally Disjoin tablet Paths in Ad hoc Networks,ICC2 001,pp:3201-3205,June 2005
 - [37] C.Chen,L.Wang,L.Liu and W.Wu.Simulation Study of TCP Behavior over Redundant Source Routing in Ad hoc Networks,in WCNC2004, pp:1258-1263, March2004

- [38] M.K. Marina and Das,S.R.On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks.Network Protocols Ninth International Conference on ICNP 2001,2001,pp:14-23
- [39] A.Nasipuri, R.Casta, S.R.Das, Performance of multi-path routing for on-demand protocols in mobile Ad-hoc networks.Mobile Networks and Applications,2001, 6(4):339-349.
- [40] X.Li, L.Cuthbert. Node-disjointness based multi-path routing for mobile Ad hoc networks. In:Proceedings of the ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad-hoc, Sensor and Ubiquitous Networks. Venezia, Italy, 2004. 23-29.

第三章 多接口多信道无线 Mesh 网络跨层信道分配算法

3. 1 引言

现有的无线网络基本采用单信道网络结构, 但这种技术限制了整个网络的数据传输速率与网络容量。因为根据无线信道的特点, 当一个节点与另一个节点传输数据的时候, 为了避免冲突, 两个节点的所有邻节点都不能够进行传送数据, 这就极大地限定了整个网络的容量。尽管现有的 IEEE 802.11a/b/g 与 IEEE 802.16 协议在物理层上有了很大的提高, 也采取了一些有效的功率控制等方法^[1], 但仍然不能从根本上满足今天人们对网络带宽日益增大的需求。IEEE 802.11a/g 标准标称的带宽 54Mbit/s, 但这只是在峰值时的速率, 而在真正应用的过程中, 由于用户接入的时候会发生多用户冲突、包错误等, 因此真正的可以达到的带宽几乎只是标称值的一半。另外, 随着接收双方通信距离的增大, 数据传输速率会显著下降。无线 Mesh 网络是一个多跳的网络, 由于多跳的原因, 数据在收发的过程中与相邻节点冲突可能性的增加。如果网络中仅使用一个信道, 那么每一个节点仅需要一个无线接口, 一条链路两端节点在传输时, 其无线信号覆盖范围内的其它节点均不能传输(如图 3-1 所示)。另外, 又由于隐藏终端与暴露终端的问题, 因此网络吞吐量会大幅度下降。幸运的是, IEEE 802.11b/g 标准和 IEEE 802.11a 标准分别提供 3 个和 12 个没有交迭的正交信道, 在相邻的节点可以同时使用。如果能够同时使用多个信道(如图 3-2 所示), 就能够实现高容量的传输。



图 3-1 单信道数据传输



图 3-2 多信道数据传输

在无线 Mesh 网络中使用多个正交的信道进行传输, 显然可以提高网络的吞吐量。对于单接口多信道无线 Mesh 网络, 如果两个节点的接口不在同一个信道上, 则它们无法通信。为了减少接口间信道同步导致的开销, 通常一个接口在某个信道上停留较长的时间传输多个报文。这样, 报文在经过多跳路径时, 每一跳都会被延迟, 除非下一跳是在相同信道上。因此, 在使用单接口的情况下, 如果相邻跳使用不同的信道, 多跳路径上报文端到端的传输延时将会增加。否则, 如果大多数“跳”都使用相同信道, 则相邻跳间的干扰导致多跳路径端到端的带宽

下降。在这两种情况下，吞吐量都会显著受到影响。同时，单接口多信道无线 Mesh 网络还会造成使用某一信道的节点集与使用不同信道的节点集的分割。如图 3-3 所示。在此环境下，若要实现节点间跨信道的通信，则要求网络中每一个节点具有信道切换的能力。信道切换要求节点间精确的同步，任一节点能够实现按时在特定信道上发送或接收数据。如果不对 MAC 层协议进行修改，很难实现这种精确的同步。

对于多接口多信道无线 Mesh 网络，由于每个节点可以使用多个接口在不同的正交信道上并发地发送和接收报文，多跳路径上端到端的传输延时大大降低，端到端的带宽将会增加，整个网络的吞吐量得到显著提高，如图 3-4 所示。然而，正交的信道数目是有限的，这就需要在多接口多信道无线 Mesh 网络中合理地分配信道，使得网络的吞吐量最大化。

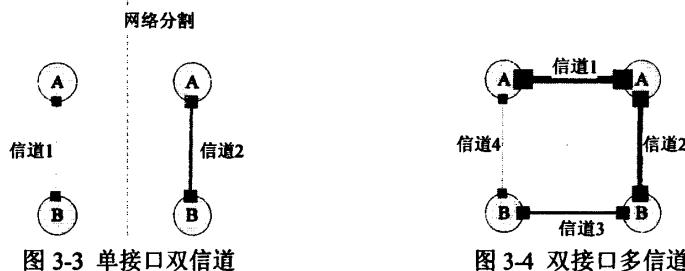


图 3-3 单接口双信道

图 3-4 双接口多信道

3. 2 无线 Mesh 网络的容量分析

网络容量是衡量通信网络的一个重要参数，影响网络容量的因素主要有信道增益、节点的发射功率、信道间干扰和噪声干扰等，相应提高网络容量的途径有变速率、功率控制、方向天线、多信道和干扰消除技术等等。采用多信道技术，不但提高了网络的空间复用度，增加网络同时通信节点对，同时减少了信道干扰，能显著提高网络容量。因此，采用多信道技术是提高网络容量的最有效方法。为了求出无线 Mesh 网络的容量公式^[2]，我们采用了文献[3]描述的两种静态网络模型：静态任意网络模型和静态随机网络模型。

对于静态任意网络模型，网络中节点位置和业务模式可以受约束，可用协议模型和物理模型规定节点间成功传输的条件。在此网络模型中，任意网络节点优化放置，业务类型优化配置，传输距离优化选择，按照协议模型规定的成功传输条件，可以得到的网络容量为 $\Theta(W\sqrt{n})bit \cdot m/s$ ， W 是节点传输速率， n 表示网络中的节点数目。 $bit \cdot m/s$ ，表示 1 秒时间内被传输 1 米距离的比特。静态随机

网络模型与任意网络模型间的区别在于，节点是独立同分布的，这种变化能够减少边界效应的影响。在随机网络模型中，根据协议模型规定的节点成功传输的条件，得到每个节点的吞吐量 $\lambda(n) = \Theta(\frac{W}{\sqrt{n \log n}}) bit/s$ ，相应的整个网络容量是

$\Theta(\frac{W\sqrt{n}}{\sqrt{\log n}}) bit \cdot m/s$ 。按照以上结论，可以发现随机网络的容量 $\Theta(\frac{W\sqrt{n}}{\sqrt{\log n}})$ 小于任意网络的容量 $\Theta(W\sqrt{n})$ ，这是由于随机网络在业务类型上添加了限制条件。

在这两种网络模型中，即使将网络带宽划分为几个子信道协调合作通信，网络最大容量也不变^[3]。在多接口多信道的无线网络中，无线网络接口的数量通常小于系统的信道数量，文献[4]分析了这种情况下网络的容量。定义网络节点数为 n ，系统信道数为 c ，每个节点的无线接口数为 m ， $1 \leq m \leq c$ ，以 (m, c) 表示网络系统。定义两种信道模式：

信道模式 1：固定带宽 W 的信道分为几个子信道

信道模式 2：系统具有几个信道，每个信道具有固定带宽 W

网络容量与 c/m 值有关^[4]，信道模式 1 下 c/m 值对网络容量的影响如图 3-5 和图 3-6 所示。

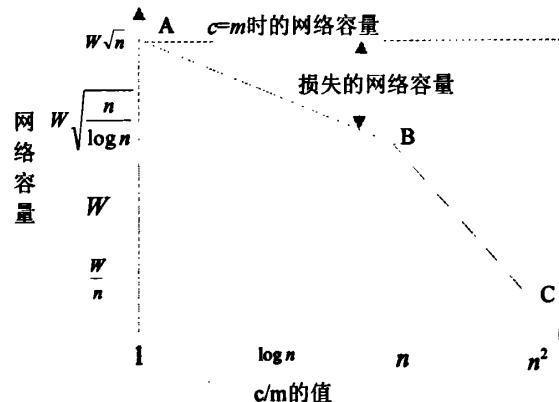


图 3-5 任意网络 c/m 值对网络容量的影响

(1) 静态任意网络：

- 当 $\frac{c}{m} = O(n)$ 时，网络容量为 $\Theta(W\sqrt{\frac{nm}{c}}) bit \cdot m/s$ (图 3-5 中的 A-B 段)。相

对于 $c=m$ 情况下，网络容量降低系数为 $(1 - \frac{m}{\sqrt{c}})$

- 当 $\frac{c}{m} = \Omega(n)$ 时，网络容量为 $\Theta(W\frac{nm}{c}) bit \cdot m/s$ (图 3-5 中的 B-C 段)。当

$\frac{c}{m} \geq n$ 时, $\frac{nm}{c} \leq \sqrt{\frac{nm}{c}}$, 这种情况下的网络容量下降更严重。

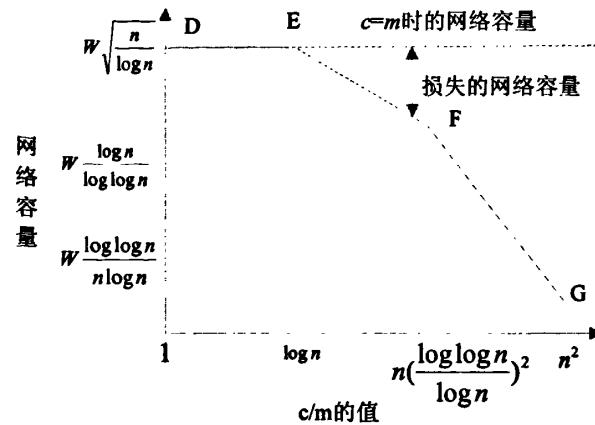


图 3-6 随机网络 c/m 值对网络容量的影响

(2) 静态随机网络:

- 当 $\frac{c}{m} = O(\log n)$ 时, 网络容量为 $\Theta(W\sqrt{\frac{n}{\log n}}) bit \cdot m/s$ (图 3-6 中的 D-E 段)。

相对于 $c=m$ 情况下, 网络容量没有降低。因此, c 很小的常用网络, 单网卡足以达到系统的最大容量。

- 当 $\frac{c}{m} = \Omega(\log n)$ 且 $\frac{c}{m} = O(n(\frac{\log\log n}{\log n})^2)$ 时, 网络容量为 $\Theta(W\sqrt{\frac{nm}{c}}) bit \cdot m/s$

(图 3-6 中的 E-F 段)。网络容量有点降低, 但可以看出此段网络容量与图 3-5 的 A-B 段部分重叠, 这说明随机模式并不一定降低容量。

- 当 $\frac{c}{m} = \Omega(n(\frac{\log\log n}{\log n})^2)$ 时, 网络容量为 $\Theta(W\frac{nm\log\log n}{c\log n}) bit \cdot m/s$ (图中的 F-G 段)。比第二种 2 情况下的网络容量下降很多, 而且比任意网络的第 2 种情况下的网络容量也小。

信道模式 2 与信道模式 1 的 c/m 值对网络容量的影响图完全一样, 只是将相应网络容量值的 W 改为 Wc , 即在多接口多信道网络系统中, 静态任意网络容量为 $\Theta(Wc\sqrt{n}) bit \cdot m/s$, 静态随机网络容量为 $\Theta(\frac{Wc\sqrt{n}}{\sqrt{\log n}})$ 。并且考虑网卡切换时延的情况下, 如果节点装备两个网卡, 则其网络容量能达到 Kumar 公式的最大理论值。从这可以看出, 信道模式 2 能将网络容量的最大值提高 c 倍。

多信道系统通过对系统通信频率的分割和协调通信, 提高网络系统的容量。

多信道系统的 RTS-CTS 握手阶段和通信阶段是完全独立分开的，不会造成通信节点的信道冲突。很多研究^[4-7]都证明了多信道对网络容量的重要贡献。

3. 3 IEEE802.11 标准 MAC 层信道接入机制

IEEE802.11 标准主要工作在 ISO 协议的最低两层（PHY 层和 MAC 层），其中，MAC 层功能较复杂，主要包括 MAC 数据业务接口、MAC 控制状态机、MAC 管理业务接口、MAC 管理业务机和分布式业务接口等功能模块。其中，MAC 控制状态机提供分布式协调功能（Distributed Coordination Function, DCF）和点协调功能（Point Coordination Function, PCF），提供异步的、无连接的接入控制，从而有效地利用无线媒体进行通信。分布式协调功能 DCF 是 IEEE802.11 最基本的媒体接入方法，其核心是载波检测多址接入/冲突避免（CSMA/CA）机制，它包括载波检测（CS）机制、帧间间隔（IFS）、和随机退避（Random back-off）规程。DCF 规定了两种接入方式：基本接入方式和 RTS/CTS 方式。

3. 3. 1 DCF 的 RTS/CTS 接入机制

CSMA/CA 的冲突避免功能是通过随机指数退避过程实现的。无线节点准备发送帧前如果检测到信道忙，于是节点就一直等待，直到信道空闲了 DIFS 时间，然后再计算随机退避时间。当信道空闲了 DIFS 时间后，节点用退避时间定时器记录消耗的退避时间，一直到信道重新忙。如果信道重新忙，且定时器没有超时，节点就冻结该定时器。当定时器时间减到零的时候，节点就开始发送帧。经过 DIFS 空闲时间后的退避时间称为竞争窗口（Contention Windows, CW），这种竞争信道方式的优点在于提高了节点之间接入信道的公平性。

无线网络 IEEE802.11 标准的 MAC 层采用了信道预约机制^[8]，该机制使用特殊的控制帧：请求发送（Request To Send, RTS）帧和允许发送（Clear To Send, CTS）帧。当发送节点有排队的数据帧需要发送时，该节点首先发送 RTS 帧。当接收节点接收到 RTS 帧后，就向发送节点回送 CTS 帧来表示响应。发送节点在收到确认的 CTS 后，发送数据包，接收节点正确接收到数据包后，用 ACK 确认，如图 3-7 所示。RTS 和 CTS 帧中包含有发送节点需要占用信道来发送数据帧的持续时间值，所有监听到该 RTS 或者 CTS 的邻居节点在此期间不会发送数据。一旦发送节点成功接收到 CTS，表明信道预约已经完成，可以开始安全地发送数据帧了。邻居节点通过读取 RTS 或者 CTS 中的发送持续时间值来更新自己的网络分配矢量 NAV（Network Allocation Vector）。NAV 表示目前的发送完成所需要持续的时间。使用 NAV 来判断信道“闲/忙”的载波侦听方法称为虚拟载波侦听。

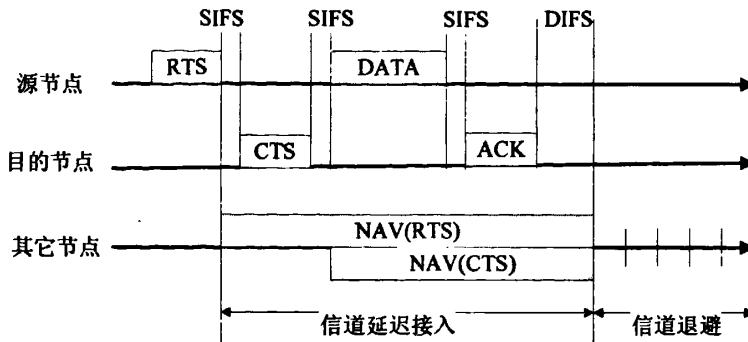


图 3-7 RTS/CTS 方式下的发送过程

3. 3. 2 载波侦听技术

在无线网络中，节点在发送数据之前，首先侦听所在信道是否空闲，如果信道忙（即信号强度超过其载波侦听门限）时，节点就等待信道空闲后才发送，否则立刻发送。虽然载波侦听的机制能够有效避免发送端的冲突，但是载波侦听的工作方式加重了暴露终端问题。例如当某节点发送数据时，其邻近区域的其它节点由于载波侦听机制而无法发送数据。因此整个网络的空间复用率较低，有些原本可以及时发送的消息被载波侦听所抑制，从而限制了网络的吞吐量。目前，在单信道的条件下，无线网络的暴露终端问题无法解决。为了缓解暴露终端问题，当前相关的研究主要集中在控制载波侦听范围方面。在实际的网络中，无线信号在各个方向的衰减程度都不一样。在理论分析中，可以采用理想化的双径传播模型（如 Two-ray Ground 模型）来描述节点的信号传输范围和载波侦听范围。为了使得载波侦听区域能够覆盖干扰接收方接收的区域，载波侦听距离通常是最大数据传输距离的两倍多^[9]。在网络仿真器 NS-2 中的 Two-ray Ground 模型的缺省传输范围约为 250 米，载波侦听范围约为 550 米。

下面分析载波侦听对多跳网络的影响。如图 3-8 所示，数据业务从节点 1 出发，沿着 2、3、4 三个节点最终传向节点 5。图中较大弧度的虚线表示节点 1 在发送时所影响的载波侦听范围， R_{CS} 表示相应距离。根据上面讨论，在较好的信道传播环境下，载波侦听距离通常大于最大传输距离的两倍。图中节点 2 与节点 3 都处于此范围内，所以在节点 1 向节点 2 发送分组 P_1 期间，节点 3 被载波侦听机制抑制，无法向节点 4 转发分组，只有节点 4 可以不受影响地同时向节点 5 发送分组 P_1 。不难发现：在给定时刻，该网络中平均每三条链路只允许一条处于活动状态。由此可见，载波侦听所引发的稀疏的链路并发传输特性是制约网络吞吐量的一个重要因素。在此环境下，要提高网络的吞吐量，一种办法是提高单个链路的传输速率，这时虽然端到端的通信通过并发的稀疏链路，但由于每跳链

路传输速率较高，端到端的吞吐量仍然得到提高。另一种提高网络吞吐量的办法是在网络中采用多个正交的信道进行通信，这样端到端的通信链路由多个正交的信道构成，端到端的并发的稀疏链路情况将得到改善，从而提高端到端的吞吐量。但这需要信道分配策略的支持。

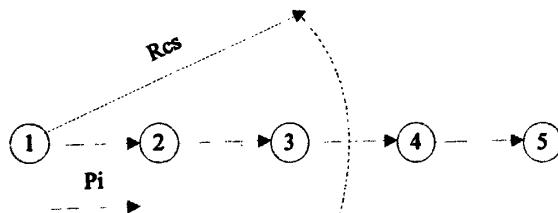


图 3-8 载波侦听

3. 3. 3 RTS/CTS 公共分组控制域

公共分组控制域是 RTS/CTS 控制分组的公共部分，RTS/CTS 控制分组都包含公共分组控制域。如图 3-9 所示为公共分组控制域的结构图，图中各个域的含义如下：

Protocol Version	Type	Subtype	To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	WEP	Order
------------------	------	---------	-------	---------	-----------	-------	---------	-----------	-----	-------

图 3-9 公共分组控制域

Protocol Version(2bits)：协议版本，目前的协议版本为 0

Type(2bits)：字段类型，用来区分控制分组和数据分组。在控制分组中将其置为 01

Subtype(4bits)：控制分组的子类型，如 RTS、CTS、ACK

To DS(1bits) 和 From DS(1bits)：这两个标志位用于 IBSS 与 Infrastructure BSS 之间的通信。在 IBSS 中，这两个标志位置为 0

More Frag(1bits)：指示是否还有分段。这个标志位仅用在对数据分组进行分段发送的时候，在控制分组中永远置为 0

Retry(1bits)：重传标志，指示数据分组是否重传，在控制分组中置为 0

Pwr Mgt(1bits)：用来指示发送节点的发送功率状态

More Data(1bits)：在 Infrastructure BSS 中，当节点经过一段时间的“睡眠”期后，作为接入点的基站可能缓存了一些发送给本节点的数据分组。在接入点将一个数据分组发送给本节点时，若接入点的缓存中还由本节点的数据，就将此位置为 1。在 IBSS 的控制分组中，将其置为 0

WEP(1bits)：指示数据分组是否经过加密。在控制分组中将其置为 0

Order(1bits)：当使用按严格的顺序发送数据包的机制时，此标志位置为 1

3. 3. 3 RTS 分组报头结构

RTS 分组由通信源节点产生并发送，是源节点请求一次通信的开始。如图 3-10 是 RTS 分组报头结构示意图，图中各个域的含义如下：

Frame Control	Duration	RA	TA	FCS
---------------	----------	----	----	-----

图 3-10 RTS 分组报头结构

Frame Control (2bits): RTS 的公共分组控制域部分，其中的 Subtype 字段填充为 1011，代表 RTS 分组

Duration (2bits): 指示本次数据传输所占用信道的时间。这里 Duration 的值为发送 CTS、DATA、ACK 帧所需时间及最大传输延迟的总和，其中包括发送分组前节点侦听信道的时间 SIFS。

RA(6bits): 通信的目的节点地址

TA(6bits): 通信的源节点地址，即本地地址

FCS(4bits): 校验字段

3. 3. 4 CTS 分组报头结构

CTS 分组由通信目的节点产生并发送，用来确认与源节点的通信。如图 3-11 是 CTS 分组报头结构示意图，图中各个域的含义与 RTS 相同，其中，Frame Control 的 Subtype 项填充 1100 表示 CTS 分组：

Frame Control	Duration	RA	FCS
---------------	----------	----	-----

图 3-11 CTS 分组报头结构

3. 4 跨层设计原理

无线信道同有线信道相比，具有很大的动态特性。由于无线信道的物理特性（信道传播的开放性和信道参量变化的时变等）使无线信道成为一种非常不稳定的媒介，增加了无线通信网络设计的难度。跨层反馈机制通过在协议栈的各层之间传输特定的信息来协调协议栈各层之间的工作过程，使之与无线通信环境相适应，从而使系统能够满足各种业务的不同需求。

跨层设计思想过去主要用于系统设计和软件设计^[10]，真正应用到通信网络协议设计^[11]，特别是无线通信网络协议设计还只是近几年的事。最近几年来，跨层设计思想开始得到广泛研究，在 WLAN^[12-13]、无线多跳网络^[14]、Ad hoc 网络^[14-15]以及无线通信系统的 QoS 保证^[16]和系统优化设计等方面业取得了一定的成果。

3. 4. 1 开放式系统互联模型

开放式系统互联模型是 1984 年由国际标准化组织 (ISO) 提出的一个参考模型^[17]。作为一个概念性框架，它是不同制造商的设备和应用软件在网络中进行通信的标准。现在此模型已成为计算机间和网络间进行通信的主要结构模型。目前

使用的大多数网络通信协议的结构都是基于 OSI 模型的。OSI 将通信过程定义为七层，即将连网计算机间传输信息的任务划分为七个更小、更易于处理的任务组。每一个任务或任务组则被分配到各个 OSI 层。每一层都是独立存在的，因此分配到各层的任务能够独立地执行。这样使得变更其中某层提供的方案时不影响其他层。

OSI 模型共分七层，从下到上依次是：物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层、应用层，如图 3-12 所示。

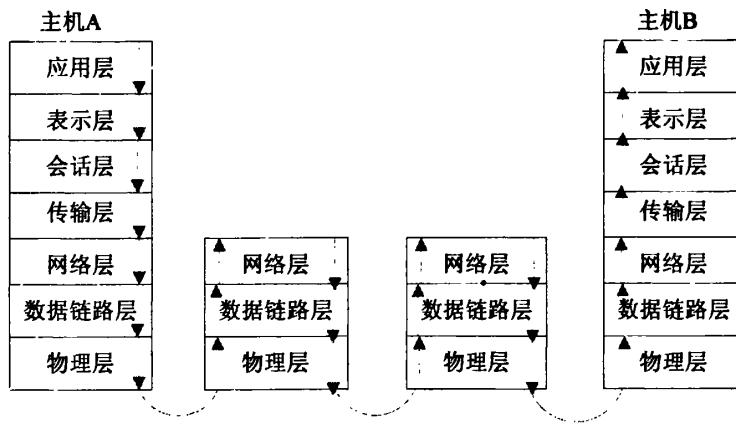


图 3-12 OSI 的典型七层体系结构

各层的功能如下：

(1) 物理层：物理层是 OSI 的第一层，它虽然处于最底层，却是整个开放系统的基础。物理层规定了激活、维持、关闭通信端点之间的机械特性、电气特性、功能特性以及过程特性。该层为上层协议提供了一个传输数据的物理媒体。

(2) 数据链路层：数据链路层在不可靠的物理介质上提供可靠的传输。链路层是为网络层提供数据传送服务的，这种服务要依靠本层具备的功能来实现。链路层应具备如下功能：链路连接的建立，拆除，分离，帧定界和帧同步。数据链路层将本质上不可靠的传输媒体变成可靠的传输通路提供给网络层。数据链路层分成了两个子层，一个是逻辑链路控制，另一个是媒体访问控制。

(3) 网络层：网络层为建立网络连接和为上层提供服务。网络层具备以下主要功能：路由选择和中继；激活，终止网络连接；在一条数据链路上复用多条网络连接，多采取分时复用技术；差错检测与恢复；排序，流量控制；服务选择；网络管理

(4) 传输层：传输层是第一个端到端，即主机到主机的层次。传输层负责将上层数据分段并提供端到端的、可靠的或不可靠的传输。此外，传输层还要处理端到端的差错控制和流量控制问题。

(5) 会话层：负责管理主机之间的会话进程，即负责建立、管理、终止进程

之间的会话。会话层还利用在数据中插入校验点来实现数据的同步。

(6) 表示层：负责对上层数据或信息进行变换以保证一个主机应用层信息可以被另一个主机的应用程序理解。表示层的数据转换包括数据的加密、压缩、格式转换等。

(7) 应用层：负责为操作系统或网络应用程序提供访问网络服务的接口。

3. 4. 2 跨层设计对各层的要求

从跨层设计的角度看，有必要考虑层与层之间的依赖关系，加强层与层之间的信息交互和共享，从而使网络性能得到整体优化，图 3-13 所示为各层间跨层信息交互示意图。

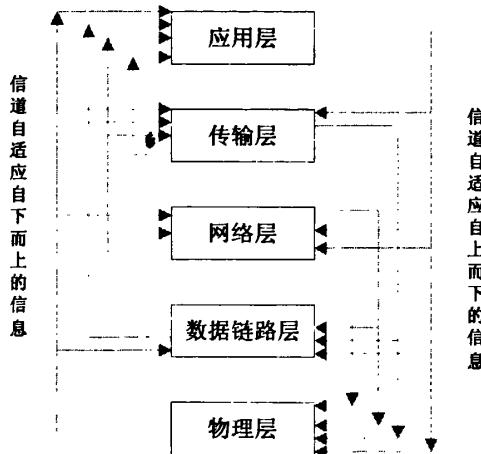


图 3-13 无线 Mesh 网络各层间跨层信息交互示意图。

(1) 物理层设计对跨层设计的要求

对于跨层设计来说，物理层主要的角色是向数据链路层(特别是 MAC 子层)、IP 协议(路由协议)、传输控制协议(TCP/UDP 等)等提供本层的状态参数，如信噪比(SNR)、误码率(BER)和数据传输速率等，作为其他协议层优化设计的依据。

对于物理层自身的设计，跨层设计方法主要体现在按照 MAC 协议、路由协议、TCP 协议和应用层业务的 QoS 需求实施功率控制(提高或降低发送功率)和自适应调制解调控制(选择自适应调制器中星座参数等)。例如，在无线环境下，路径衰耗、多径、共道干扰、节点移动等均会导致接收器 SNR 的变化，从而导致 BER 的变化。SNR 越低，调解器解码越困难。通常，较高的数据传输速率对应着效率更高的编码方案和较低的 BER，所以需要在速率和 BER 之间寻求平衡。如果用户业务需要较高的 QoS，物理层可以在 SNR 满足 BER 要求时，选择较高传输速率的调制方案。对于吞吐量性能来说，通常，高速多跳链路优于单跳低速链路。在物理

层设计上，现有 WLAN 和 Adhoc 网络物理层跨层设计技术基本可沿用。

(2) 链路/MAC 协议设计对跨层设计的要求

这里同样分为两个方面：链路/MAC 层状态信息的共享和 MAC 协议自身的跨层设计。

对于链路/MAC 层，向其他协议层提供的状态信息主要包括前向纠错(FEC)方案信息、媒介空闲/忙信息，以及剩余带宽信息等。

随着多媒体业务 QoS 保证机制的提出，对于 MAC 层，需要区分接入业务的类型，采取优先级或预留信道资源的调度机制。这种机制必须依据其上协议层的业务建模信息，以及物理层的信道状态信息等。同时，为了达到跨层设计的目的，MAC 协议层有可能还需要向物理层发出速率选择指令或功率控制指令。在链路层和 MAC 协议的设计上，现有 WLAN 和 Ad hoc 网络物理层跨层设计技术仍可沿用。

(3) 路由协议设计对跨层设计的要求

研究表明，采用传统的最短路径准则设计无线多跳网络的路由协议不足以构造良好的路由，即传输延时、吞吐量和可靠性等性能无法达到理想的指标^[18]。原因在于最短路径准则没有考虑到其下层物理信道特性的变化对 MAC 层接入性能的影响等因素，造成所选路径无法适应底层性能的变化，也可能造成传输层性能的较大波动。此外，就无线信道的特点而言，即使信道环境在通信期间没有产生变化，最短路径也未必意味着最优路径。在同样的 BER 条件下，传输距离越长，所支持的数据传输速率就越低，也就意味着长距离的最短路径比短距离的非最短路径的传输速率或吞吐量低。无线 Mesh 网络的主要业务是因特网业务，吞吐量是衡量其 QoS 的一个重要指标。这一点与 Ad hoc 网络有很大的不同，所以适用于 Ad hoc 网络设计的方法不完全适用于的设计。因此，需要为无线 Mesh 网络设计一种新的能满足无线 Mesh 网络业务 QoS 需求的路由准则，准则中要能体现网络剩余带宽、BER、丢包率、分组延时等参数。此外，在路由维护过程中，路由协议可以主动根据相关链路的状态，全部或局部调整路由，这样就可以大大降低由于链路中断而实施路径维护的开销。

(4) TCP 协议设计对跨层设计的要求

在无线 Mesh 网络中，节点的移动可能导致通信链路的中断，从而导致数据包丢失。按传统的 TCP 机制，这将判决为因 TCP 拥塞导致的结果，从而频繁触发 TCP 超时重传机制，导致 TCP 性能下降。这在分层协议设计的原则下是不可避免的，因为 TCP 协议层无法判定数据包丢失的真正原因。如果对 TCP 协议实施跨层设计，TCP 层就可以通过检测物理层 SNR 的变化，判定是由于拥塞或移动性导致的数据包丢失，从而分别采用不同的窗口控制和包重传机制。研究表明，科学的跨层设计机制使 TCP 会话的完好率(good put)改善 75%^[18]。此外，有了跨层控制

机制, TCP 协议还可以将 ACK 消息跨层传递给 MAC 层实施流控制, 实现多个 TCP 流的公平调度。

(5) 多媒体业务 QoS 保证对跨层设计的要求

在无线 Mesh 网络中, 随着数据、音频和视频等多媒体业务的不断加入, 终端用户所承载的业务类型、业务流量、优先级等都随之而变, 而其中的 QoS 参数, 如吞吐量、传输时延、时延抖动、丢包率、误码率等也将时变。因此, 有效的多媒体业务 QoS 保证机制需要根据用户业务不同的 QoS 需求, 提供动态的端到端的 QoS, 而且, 必须允许多个具有不同需求的业务的 QoS 都能同时得到保证, 并且保证要求较低的业务不会对敏感业务产生消极影响。

另一方面, QoS 保证机制涉及到的所有协议层, 也就是说, 每个协议层相应参数的设置都涉及到 QoS 能否能得到保证。从应用层的角度讲, 可以粗略分为非实时业务和实时业务。对于非实时业务, 在传输层可以采用 TCP 协议, 它可以根据接收器窗口大小和网络拥塞情况自适应地调整业务流速率; 对于实时业务, 因其对延时要求比较高, 到达接收器时超出预先确定的期限的数据包将毫无利用价值, 因此在传输层常采用 RTP/UDP 协议。在网络层, 特别是在中, 路由选择与链路跳数、链路稳定性等有关。这些参数同样对 QoS 产生影响。链路层对各个业务流优先级的设置、调度以及信道选择等也会影响端到端的 QoS(如延时等)。在物理层选择不同的调制方式和传输功率, 也会使得 QoS 中的误码率、吞吐量、发送速率等发生变化。由于多媒体业务对以上所述 QoS 参数的要求不同, 所以各层选择的策略也不同。因此, 如何综合利用各层之间的依赖关系和交互信息, 有效地实现多媒体业务的动态 QoS 保证, 成为跨层设计的重要目的之一。

从跨层设计的角度看, 有必要考虑层与层之间的依赖关系, 加强层与层之间的信息交互和共享, 从而使网络性能得到整体优化。

3. 4. 3 WMN 跨层设计原则与方法

无线 Mesh 网络的跨层设计要求打破传统 OSI/RM(open systems interconnection/reference model)参考模型中严格分层的束缚, 在层与层之间进行信息传递和共享, 针对各层相关模块/协议的不同状态和要求, 在整体框架内, 利用层与层之间的相互依赖和影响, 对网络性能进行整体优化。值得一提的是, 文献[19]比较全面地阐述了无线网络跨层设计的基本思想与原则, 指出跨层设计就是充分合理利用现有网络资源(包括码字、传输功率、信道、调制方式、天线分集、调度策略、路由等), 达到系统总吞吐量最大化、总传输功率最小化、QoS 最优化等最终目的, 其制约瓶颈在于系统所允许的最大传输功率、最大延迟等, 并提出了 4 种有效的设计方法: 分析、最佳管理、游戏理论和动态编程。这

些方法均可为无线 Mesh 网络的跨层设计所借鉴。

在具体设计无线 Mesh 网络协议之前，首先要明确两个问题：在满足特定 QoS 的前提下，在哪些协议层上实施跨层设计代价最低；需要联合优化和设计哪些参数。有时候复杂性与网络可伸缩性是一对矛盾，需要进行综合权衡。

一般来说，无线 Mesh 网络协议跨层设计可以通过两种方法来实现^[20]：第一种方法，在对某一协议层进行优化时，不仅考虑本层的相关参数，同时也把其他协议层的相关参数考虑进来。例如，网络层可以把物理层的信道质量参数作为路由选择的判据，从而优化路由算法；同时，网络层也可以把传输层的链路拥塞信息作为其路由算法中的另一重要判据，从而有效控制链路拥塞，优化网络性能。第二种方法，把依赖关系密切的两个或多个协议层合并为一体。例如，在对无线 Mesh 网络进行跨层优化设计时，为充分利用 MAC 层和网络层的交互信息，可把 MAC 协议和路由协议合并到一个协议中进行设计。图 3-13 为跨层设计理论模型^[21]。

跨层涉及必须遵循一定的准则^[22]，其中最重要的一条就是，跨层设计必须依据可靠的、可长期利用的参考结构模型。因特网成功的一个里程碑式的标志就是它采用了分层结构，而无线 Mesh 网络号称“因特网的无线版本”，因此，在对无线 Mesh 网络的网络性能进行优化时，仍然可以沿用传统的分层结构模型，并且在一定程度上可以满足要求。虽然从对通信系统进行资源管理和整体优化的角度讲，不同协议层之间有跨层信息交互的必要，但是，不必要的跨层信息交互可能会对整个系统的性能产生消极影响，甚至将严重威胁系统的稳定性。如在网络层的路由选择中，为控制链路的拥塞，有必要把传输层的链路拥塞信息考虑到网络层的路由选择判据中来，采用不同的路由选择，从而对链路拥塞进行控制，避免某些链路出现“瓶颈效应”；另一方面，由于网络层根据传输层的拥塞信息而选择了其他链路，有可能使得原本不拥塞的链路拥塞情况比原本拥塞的链路的拥塞情况更严重，如不加以限制，有可能造成路由选择算法出现“死循环”，从而影响系统稳定性。

此外，采用跨层设计的系统的鲁棒性及可扩展性都需要认真考虑^[22]。因为跨层设计涉及到多个协议层，对某一协议层的改变，可能会对系统其他层产生影响，甚至需要对整个系统协议栈进行重新设计。在对系统进行跨层设计的过程中，必须权衡系统性能优化及其采用的跨层设计结构模型之间的关系，在没有有效、可靠、扩展性强、科学的跨层设计参考结构模型之前，所有意在通过跨层设计来达到性能优化的工作都应该三思而后行。毕竟，性能优化只是近期的阶段性目的，而这种参考模型的设计，从长远目的来讲，才是最重要的。

3. 5 多信道分配和接入技术

3. 5. 1 信道分配问题

多信道无线 Mesh 网络信道分配的目标就是把每个网络接口和无线信道绑定起来。这不同于蜂窝网，因为蜂窝网相邻的基站是通过有线连接的，而无线 Mesh 网络的节点只能通过无线链路进行通信。如果简单地给其接口分配一个空闲的信道，将不能保证无线 Mesh 网络是相连相通的，因为网络节点只有共享同一个信道才能建立起一条虚链路，进而实现互通。另一方面，为了减小干扰，应该使享有共同信道的节点数最小。信道分配的算法要考虑以下几个约束：

- (1) 可用的正交信道数是固定的
- (2) 在同一时刻无线 Mesh 网络节点所能使用的信道数不超过该节点的接口数
- (3) 通信链路两端的节点须分配同一信道
- (4) 分配同一个信道且互相干扰的链路上期望负荷的和不能超过该信道的容量。假如在一个区域使用信道 i 且互相干扰的链路有 k 条，为 e_1, e_2, \dots, e_k ，其中任一条链路(不妨设为 e_1)使用信道 i 传送数据时，其它 $k-1$ 条链路(e_2, \dots, e_k) 均不能传输数据。设链路 e_k 上期望的负荷为 $E(f(e_k))$ ，信道 i 容量为 C ，那么， $E(f(e_1))+E(f(e_2))+\dots+E(f(e_k)) \leq C$ 。

基于以上约束，多信道无线 Mesh 网络采用分布式信道分配算法。

3. 5. 2 多信道 MAC 协议分配方案

针对无线多跳网络，目前已经提出了很多的多信道分配方案。我们根据网络接口卡在信道之间的切换频率^[23]，将现有的多信道 MAC 协议分为以下三种：

(1) 静态分配方案

静态的信道分配方案主要是指给每个网络接口卡分配一个永久的信道，或者网络接口卡在信道之间的切换频率很小。静态的信道分配还可以进一步作如下的划分：

- 公共信道：这种信道分配方法的主要思想是所有的节点都分配相同的信道集合。假设每个节点配置有两块网络接口卡，则每个节点的网络接口卡都分配相同的两个信道，即所有的节点都被分配相同的信道集合。这种方法的优点是能够很好的维护网络的连通性，但是由于每个网络接口卡被固定的分配信道，网络中还会剩余大量的信道闲置，网络的容量远不是最优的。

- 可变信道：在这种分配方案中，不同节点的网络接口卡可能为被分配不同的信道集合。由于采用了不同的信道集合，两个彼此都在对方通信范围的邻居节

点，可能会由于彼此切换到不同的信道不能通信。如果信道的分配不很好的组织，网络连通性会大大降低，网络的分割在所难免。

在网络接口卡切换延时较大和网络接口卡数目与可用信道数目相同时，静态的信道分配方案有着得天独厚的优势。所以在网络接口卡数目与可用信道数目相同时，信道分配问题很自然的就简化成静态的信道分配。在静态的信道分配方案下，在传输范围内的两个节点的网络接口卡如果分配有相同的信道，则可以进行通信，不需要各个节点在数据传输之前进行显式协商。合理的运用静态信道分配，能够控制网络中的通信拓扑，因为在相同传输范围的两个节点，如果没有分配相同的信道，则不能直接进行通信。

(2) 动态分配方案

如果网络接口卡能分配网络中的任意信道，能够快速的从一个信道切换到另一信道，我们称之为动态的信道分配。在动态分配方案下，如果在通信范围内的两个节点需要通信，必须先通过协商以保证两个节点在一定的时间范围内切换在相同的信道。动态的信道分配在每个节点仅配有少量网络接口卡的情况下，能很好的利用网络中的可有信道，不会造成信道的闲置。

动态信道分配方案的核心和挑战主要在于节点通信之前的协商过程。假设节点 A 切换了其网络接口卡上的信道，节点 A 的所有邻居节点都需要及时的知道该节点的切换信息。如果所有的网络接口卡都在动态的切换，为了避免在传输每个包之前都要进行协商，邻域节点之间需要能够知道彼此的信道切换顺序。目前主要有两种方法来实现这种信道切换信息的共享，第一种是网络接口卡周期性的切换到一个公共信道，交换彼此未来的信道切换信息；还有一种就是通过伪随机数列来控制信道的切换。但这两种方法都需要节点之间精确的时间同步，比较难于在实际中实现。所以，虽然动态分配方案有着很好的灵活性，但是很难应用在实际的网络当中。

(3) 混合分配方案

将动态和静态信道分配相结合就可以形成混合的信道分配策略。在混合信道分配方案中，允许一些网络接口卡采用静态信道分配，而剩余的网络接口卡采用动态的信道分配。采用静态信道分配的网络接口卡一样可以分为公用信道和可变信道两种方案。混合的信道分配方案很好的继承了静态信道分配和动态信道分配方案各自的优点，不仅不需要各个节点在数据传输之前复杂的协商，同时也有着很好的灵活性。

当前比较流行的混合分配方案是采用静态分配的网络接口卡工作在公有信道进行传输控制，而其它的网络接口卡在剩余可用信道之间进行切换^[24]。在传输数据报文之前，会先在控制信道上面进行协商 (RTS-CTS) 即将进行的数据传输将

采用的信道，等协商完成之后，双方在先前协商好的信道上面进行传输。由于所有节点都共享公用信道，所以能很好的保证网络的连通性。但这种方案最大的缺点就是公用的控制信道在可用数据信道较多时，容易成为性能的瓶颈。所以在可用信道数目较多时，这种方案就不太适合。

3. 5. 3 多信道 MAC 协议接入方式

单信道无线网络的媒介基本接入机制为 CSMA/CA，即载波侦听加上 RTS/CTS 预约信道。多信道的接入也是基于 CSMA 和 RTS/CTS 预约，不同于单信道的是具有控制信道的多信道系统可以在进行信道分配的同时完成信道的预约，节点可直接接入有使用权的信道。多信道接入，按系统有无单独的用于传输公共信息以控制调节信道分配及接入的控制信道，分为无控制信道接入和有控制信道接入。

(1) 无控制信道接入

无控制信道接入方式由于没有控制信道传输控制报文，节点得到信道的使用权后，为了避免信道的冲突，节点接入信道时必须进行载波侦听，其过程类似于单信道的 CSMA/CA。多信道的载波侦听不能解决多信道隐藏终端问题，接入时延比较大，导致端到端的传输时延增加，并且信道冲突的概率仍然比较大。

(2) 有控制信道接入

在有控制信道接入方式中，多信道系统可单独开辟专门用于传输控制报文的控制信道，因为所有节点都可同时侦听控制信道，路由信息、节点的信道信息、节点预约信道的信息等控制报文都可通过控制信道传输给网络各节点，从而节点可以根据网络信道的具体情况选择信道和接入时机。引入控制信道，节点可在公共的控制信道协调信道分配和预约。节点在控制信道获得某个数据信道使用权的同时，邻节点也在控制信道获知此数据信道使用权已交给某个节点，重新设置自己的 NAV 以避免冲突使用此数据信道。因此，获得数据信道使用权的节点可以立即接入信道传输数据，并且不会产生冲突。相对于无控制信道情况，有控制信道接入不但没有增加端到端的传输时延，还减少信道的冲突，而且简化了信道的协调分配机制。

3. 5. 4 多信道 MAC 协议研究现状

针对无线多跳网络，目前已经提出了很多的多信道分配方案。按照前面的分类方式，下面我们重点介绍几种多信道无线 Mesh 网络 MAC 协议。

(1) 动态信道分配(DCA) 多信道 MAC 协议

动态信道分配(DCA) 多信道 MAC 协议^[24]是有专用的控制信道、2 个射频的多信道 MAC 协议。在 DCA 多信道 MAC 协议中，假定有 1 个控制信道，N 个数据信道，

每个信道具有相同的带宽。控制信道用来解决信道的冲突和为每个终端分配信道的问题；数据信道用来传输数据。每个终端有两个半双工的收发器，即控制收发器和数据收发器：控制收发器在控制信道上与其他终端交换控制信息，得到接入数据信道的权力；数据收发器动态地切换到一个数据信道上传输数据。每个终端设备包括两个数据结构：CUL 和 FCL。CUL 称为信道使用表。每个表的条目 CUL[i] 保存着邻居节点和它本身的一个记录。CUL[i] 有三个域：CUL[i].host 是它的邻节点号、CUL[i].ch 是 CUL[i].host 使用的信道、CUL(i).rel_time 是信道释放的时间。每个节点分布式地保存一个 CUL 表，实时更新。但由于网络延时，记录的信息可能不准确；FCL 为空闲信道表，是依据 CUL 动态计算出来的。DCA 多信道 MAC 协议是一种简单的多信道 MAC 协议，它提高了网络的吞吐量，降低了网络时延，通过使用专用的控制信道，使路由发现、路由维护、地址解析等广播信息有效地传输。

(2) MMAC 多信道 MAC 协议

MMAC (MULTI-CHANNEL MAC) 多信道 MAC 协议^[25]是没有专用控制信道、1 个射频的多信道 MAC 协议。在 MMAC 协议中，每个节点配置一个半双工收发器且是同步的。每个节点维持一个 PCL (Perferable channel list) 表。表中的数据记录了这个节点可以使用的最优信道。基于这个信息，信道分成三个状态：高优先 (HIGH) 表示此信道在当前的信标内正在被节点使用。如果信道在这个状态，则节点在下一次传输的时候，优先选取这个信道作为数据信道。这样，发送端就不用调节射频到新的频率，延迟减小。中优先 (MID) 表示此信道在节点传输范围内还没有被使用。低优先 (LOW) 表示此信道已经被至少一个邻节点选取。在节点初始化时，PCL 表中所有的信道都置为 MID 状态，如果在源端与目的端协商了一个信道，在双方的 PCL 表中将相应的信道记录为 HIGH 状态。通过动态改变信道的状态，实现信道的选择。由于没有专用控制信道，每个节点在每个信标周期的开始，都在公共信道上监听，通过发送或接收控制信息，实现控制信道的信息传输。MMAC 多信道 MAC 协议采用单射频的方式进行工作，因此信道利用率较高。但由于使用了同步，且对同步的要求较为严格，实现起来较复杂，同时，对广播数据支持较差。

(3) 基于主信道分配的 (PCAM) 多信道 MAC 协议

PCAM 多信道 MAC 协议是有专用控制信道、3 个射频的多信道 MAC 协议。在 PCAM 协议中^[26]，每个节点配置三个半双工收发器。其中主收发器和第二收发器用来传输数据，第三收发器用来传输和接收广播消息。在特殊情况下，第三收发器也可用来传输数据。第二个收发器主要用作发送数据，它的信道分配是不固定的。这种机制可以实现数据信号与控制信号的分离，且路由信息比数据优先级高。

该方案广播数据支持性较好，路由发现、路由维护等信息能够较好的传送。节点通过广播信道发送路由请求和接收路由信息。能够避免隐藏终端的发生，减小网络时延，为信道性能最差的情况和最低要求进行保守设计。但由于每个节点的网络接口卡过多，因此成本高、信道利用率低。本文将提出一种基于跨层的设计方法。

3. 6 多接口多信道 WMN 跨层分布式信道分配算法

无线 Mesh 网络越来越广泛地运用在企业、学校和城市区域等地方，作为宽带骨干网络提供接入服务。无线 Mesh 网络最主要地设计目标就是网络容量。众所周知，多跳无线网络中的无线信号干扰严重限制了网络的容量。用于提高整个多跳无线网络容量的最有效的技术就是采用多信道。事实上，邻居节点采用正交信道进行发送可以将无线信号的干扰降低到最小。

IEEE802.11b/g 和 IEEE802.11a 标准分别定义了 3 个和 12 个互不重叠的正交信道。在多个无线接口的无线 Mesh 网络中采用多信道可以显著提高网络的吞吐量^[5-6]。对于多接口多信道无线 Mesh 网络而言，最主要的设计问题是信道分配问题，也就是如何合理地给每个无线接口分配信道。两个邻居节点必须分配了相同信道才能进行通信，因此，为了保证网络的连通性，必须合理地对信道进行分配。很多文献都展开了对信道分配算法的探讨和研究，文献[5]提出了集中信道分配和路由算法，文献[6]提出了基于负载自适应路由和信道分配算法。

目前，关于信道分配的很多算法主要是解决信号冲突问题，并没有考虑到信道间的干扰问题。然而，同频信道间的干扰同样会造成数据包的丢失或者接收错误，从而使整个网络的吞吐量下降。文献[27]提出了 Ad Hoc 网络中将先验式路由协议和信道分配相结合的 MAC 协议，但该算法要求活动路由上的节点数和可用信道数相同，而且信道分配信息是在全网广播，增加了网络负载。这里提出一种新的基于跨层设计方法的分布式信道分配算法—MCCA-AODV 协议，不但解决了信道间干扰和信号冲突问题，而且避免了可用信道数小于活动路由上的节点数问题，同时，信道分配信息仅由活动路由的两跳邻居节点获得，解决了网络开销问题。该算法将信道分配过程和 Ad-hoc 距离矢量按需路由（Ad-hoc On Demand Distance Vector, AODV）协议^[28]的路由建立过程结合在一起。采用跨层设计方法，通过路由控制报文发送信道分配信息能够显著降低信道分配协议的计算复杂度。同时，AODV 协议的按需路由特性可以减少网络所需要的信道数量，在路由控制报文中加入少许的字段仅仅给路由协议带来很小的额外开销。

为了消除信号干扰和信道冲突，MCCA-AODV 协议为活动路由中的每个节点依次分配不同的信道。由于可用的信道数目受限制，当同一条路由上的节点数目大

于可用信道数时, MCCA-AODV 协议在将所有的信道分配完毕后, 余下的节点将按照相同的信道分配顺序依次进行。因此, MCCA-AODV 协议能保证同一条路由上的相邻 k 跳节点分配不同的信道, k 的大小由可用信道数决定。

3. 6. 1 网络模型和干扰模型

用无向图 $G=(V,E)$ 来表示无线 Mesh 网络, V 是所有网络节点的集合, E 是所有无线链路的集合。分别用 R_t 和 R_i 来表示每个无线 Mesh 路由器中无线射频接口的传输范围和干扰范围, R_i 大约是 R_t 的两倍左右。对于任何两个节点 u , $v \in V$, 当且仅当满足条件: $d(u,v) \leq R_t$ 时, 两个节点 u , v 间才存在无向边 $e(u,v) \in E$ 。其中, $d(u,v)$ 代表节点 u 和 v 的距离。假设系统中有 K 个正交信道 (采用 IEEE802.11a 标准协议, $K=12$; 采用 IEEE802.11b/g 标准协议, $K=3$)。用 C 表示可用的信道集合, $C=\{c|c$ 是系统中可用的信道}, $|C|=K$ 。

文献[29-31]都提出了不同的干扰模型用于描述传输过程的成功与否。发送端节点和接收端节点在各自的干扰范围内协商一个空闲的公共信道用于互相之间的通信, 这样, 在干扰范围内的其它节点将不再使用该信道进行数据的发送或者接收。MCCA-AODV 协议使用两跳节点干扰模型, 在该模型中, 两跳范围内的节点将彼此互相干扰。也就是说, 模型中两跳范围内的节点不能使用同一个信道同时进行数据的发送或者接收。MCCA-AODV 协议的干扰模型符合 IEEE802.11 标准^[30]。

利用一个射频接口持续监测所有的信道是不可取的, 会引起信道间的频繁切换。每个无线 Mesh 路由器配置两个射频接口可以解决此问题, 一个射频接口分配一个固定的信道用于监测, 另一个射频接口则按照信道分配算法分配一个有效的信道进行数据的发送。在 MCCA-AODV 协议中, 每个无线 Mesh 路由器的其中一个射频接口分配一个专用的控制信道, 专门用于信道监听, 负责控制报文的发送或者接收。另一个射频接口则利用分配的信道进行数据的发送或者接收。MCCA-AODV 协议中采用的信道分配算法是基于发送端设计的。

3. 6. 2 问题描述

MCCA-AODV 协议中定义一个节点的干扰范围为该节点的两跳邻居。如果两跳范围内的节点分配不同的信道, 那么节点间的干扰问题将得到显著改善。为了避免冲突和消除干扰, 在 MCCA-AODV 协议中, 活动路由上的两跳邻居节点将被分配不同的信道。

定义节点 v 的两跳邻居节点集为 $N(v)=\{n \in V | d(v,n) \leq 2\}$, $d(v,n)$ 是节点 v , n 之间的跳数。发射节点集为 $V_t \subset V$, 接收节点集为 $V_r \subset V$ 。同一个节点不能同时作为发射节点和接收节点。对于指定的接收节点 $v(r,i) \in V_r$, 发送节

点 $v(t, j) \in \mathcal{V}$ ，它们在彼此的干扰范围内。如果发送节点 $v(t, j)$ 正在某个信道进行发送，而接收节点 $v(r, i)$ 也在相同的信道上接收数据，但是发送节点 $v(t, j)$ 不是把数据发送给接收节点 $v(r, i)$ ，而是其它的接收节点，那么发送节点 $v(t, j)$ 发射的信号将在接收节点 $v(r, i)$ 处引起干扰。

在干扰模型中，假设节点 u 正向节点 v 发送数据。节点 v 在信道 c 上接收从节点 u 发送来的信号，接收信号强度为 $P_u^k(v)$ 。节点 v 能否成功接收数据取决于接收信号的信号干扰噪声比 (Signal Interference Noise Ratio, SINR)，如公式 3-1 所示。式中， N 是噪声信号的强度， $P_n^k(v)$ 是接收节点 v 收到的来自其它正在同时发送信号的节点 n 的干扰信号强度， β 是接收节点的接收功率门限。如果信号干扰噪声比 SINR 大于给定的门限值，接收节点就能够成功接收到信号

$$\frac{P_u^k(v)}{N + \sum_{n \neq u, v} P_n^k(v)} \geq \beta \quad (3-1)$$

3. 6. 3 AODV 协议原理

AODV 路由协议是一种按需的改进的距离向量路由协议，具有按需路由协议的特点即在 AODV 路由协议中，网络中的每个节点在需要进行通信时才发送路由分组，而不会周期性地交互路由信息以得到所有其它主机的路由；同时具有距离向量路由协议的一些特点，即各节点路由表只维护本节点到其他节点的路由，而无须掌握全网拓扑结构。AODV 路由协议中有三种类型的消息控制帧：路由请求 (Route Request, RREQ)，路由应答 (Route Reply, RREP) 和路由错误 (Route Error, RERR) 消息。AODV 协议的运行包括两个阶段：路由发现和路由维护。

(1) 路由发现：

在源节点需要与其它节点通讯但是又没有相应的路由信息时发起路由发现过程。源节点通过对邻节点广播路由请求(RREQ)来发起路由发现过程。RREQ 报文格式如图 3-14 所示：

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop count
						RREQ ID	
						Destination IP Address	
						Destination Sequence Number	
						Originator IP Address	
						Originator Sequence Number	

图 3-14 RREQ 报文格式

<Originator IP Address, RREQ ID> 对唯一确定一个 RREQ。每个邻节点收到的 RREQ 通过广播再发送到它的邻节点，并将跳数递增 1。注意到节点可能从不同的邻节点接收到许多重复的路由广播报文。当一个中间节点接收到一个 RREQ，如果与以前接收到的 RREQ 中的源地址和广播 ID 相同，节点就认为是已经接收过的冗余的 RREQ，就会丢弃该 RREQ，不再进行广播。

随着 RREQ 的传播，网络中会自动建立到达源节点的反向路径。一个 RREQ 最终会到达一个拥有到达目地地址的路由的节点(也可能就是目标节点)。如果节点有一条到达目标节点的路由条目，就开始确认该条目是否已经过时，方法是比较条目中的目标序列号和 RREQ 中的目标序列号，如果 RREQ 中的目标序列号比路由条目中的大，那么节点就不使用该条目，并且节点对该 RREQ 重新广播。相反，只有 RREQ 中目标序列号小于或者等于路由条目的目标序列号时，节点才能够使用该条目来进行路由回复。

当收到请求的中间节点或目地节点有一条“足够新”的路由到达目的地时(“足够新”的意思是这条路由对应的目的序列号大于或等于 RREQ 中的目的序列号)，中间节点或目地节点以单播的方式向源节点返回一个 RREP 分组，RREP 沿着刚建立的逆向路径传输回源节点，RREP 报文格式如图 3-15 所示：

Type	R	A	Reserved	Prefix Sz	Hop count
Destination IP address					
Destination Sequence Number					
Originator IP address					
Lifetime					

图 3-15 RREP 报文格式

在 RREP 沿反向路径返回时，沿着该路径的节点在它们的路由表中建立前向路由记录以指向 RREP 来源的节点

(2) 路由维护：

在数据传输过程中，当中间节点检测到一条正在传输数据的活动路由的下一跳链路断开或者节点收到去往某个目的地节点的数据报文，而节点没有到该目的地节点的有效路由时，中间节点向源节点单播或多播路由错误消息 RERR，源节点收到 RERR 后就知道存在路由错误，并根据 RERR 中指示的不可达目的地重新找路。

在 AODV 路由协议中，节点可以通过周期性地广播本地 HELLO 消息来提供邻居节点间的连接性信息，周期性的 HELLO 消息可以用来检测链路失效。

3. 6. 4 信道分配算法

为了 AODV 路由的发现和维护过程中控制报文的交互，无线 Mesh 网络中的每个路由器专门指定了一个射频接口，并在该射频接口为所有的 Mesh 路由器分配

一个公共的控制信道。信道分配过程就是为每个无线 Mesh 路由器的另一个射频接口分配数据信道，数据信道是系统中可用信道集除去控制信道的部分集合，用 $C_{available}$ 表示。因此，对于 IEEE802.11b/g 标准， $|C_{available}|=2$ ；对于 IEEE802.11a 标准， $|C_{available}|=11$ 。为了利用 AODV 协议为反向路径中的每个节点分配信道，需要对 AODV 协议的控制报文和控制报文的转发过程进行适当的改进。

(1) 路由应答报文 RREP 的改进

当源节点 S 需要与目地节点 D 进行通信但是又没有相应的路由信息时发起路由发现过程，假设第一个路由请求报文 RREQ 已经被目地节点 D 成功接收并准备回应 RREP 报文。RREP 报文将通过已经建立的反向路径发送回源节点 S。为了利用 AODV 协议为反向路径中的每个节点分配信道，对 RREP 报文进行了修改，增加了部分字段。修改后的 RREP 报文格式如图 3-16 所示：

Type	R	A	Reserved	Prefix Sz	Hop count
Destination IP address					
Destination Sequence Number					
Originator IP address					
Lifetime					
RREP ID					
CFL	CUL		TTL		

图 3-16 修改后的 RREP 报文格式

- CFL (Channel Free List) (8bits): 空闲信道列表中包含未被分配的信号索引 (Index) 号。对于 IEEE802.11a 标准，CFL 取值范围为 {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11}，对于 IEEE802.11b/g 标准，CFL 取值范围为 {1, 2}。
- CUL(Channel Used List)(8bits): 信道使用列表中包含已经被分配的信号索引 (Index) 号。
- TTL(Time To Live) (8bits): 用于控制 RREP 的广播范围。当目地节点广播 RREP 时，设定 TTL 值为 2。
- RREP ID: 与 RREP 中的目地地址唯一确定一个 RREP 报文。

(2) RREP 报文的转发

在 MCCA-AODV 协议中，目地节点向源节点回应 RREP 报文，RREP 报文沿反向路径转发时，目的节点和反向路径中的每个中间节点都向其一跳邻居节点广播 RREP 报文。具体的转发过程如图 3-17 所示。

在图 3-17 中，源节点 S 的路由请求报文 RREQ 沿着实线箭头方向传递到目地节点 D，每个中间节点 A, B, C 建立了到源节点 S 的反向路径。当第一个 RREQ 到达目地节点 D 后，目地节点 D 向所有的一跳邻居节点 (C, E) 广播路由应答报文 RREP。RREP 报文的转发步骤：

- 当反向路径上的节点 C 收到 RREP 报文后，TTL 值保持不变 (TTL 的初始

值为 2)，并继续向一跳邻居节点 (B, D, H, I) 广播该 RREP 报文。

- 当其它一跳邻居节点 (节点 E) 接收到 RREP 报文后，TTL 值减 1，然后继续广播。节点 E 的邻居节点 (D, F) 接收到广播的 RREP 报文后，首先根据<目地地址，广播 ID>判断是否是重复的 RREP 报文，如果是重复的就直接丢弃。图 3-17 中，由于节点 D 收到 RREP 报文后直接丢弃，节点 F 接收到 RREP 报文后，TTL 值减 1，这时 TTL 值为 0，RREP 报文不再继续转发。

- 节点 C 收到来自节点 D 的 RREP 报文后，向一跳邻居节点 (B, D, H, I) 广播，节点 D 判断出是重复的 RREP 报文，直接丢弃。节点 B 是反向路径上的节点，收到 RREP 报文后 TTL 保持不变。节点 I, H 接收到 RREP 报文后，TTL 减 1，节点 H, I 再分别向其一跳邻居节点广播。节点 I 的一跳邻居节点为 C, J，节点 C 将该重复的 RREP 报文丢弃，节点 J 接收 RREP 报文，TTL 减 1 后变为 0，RREP 不再广播。

通过上述过程，RREP 报文将沿着反向路径依次转发到源节点 S，并在每个中间节点建立到目地节点 D 的前向路径用于数据包的发送。

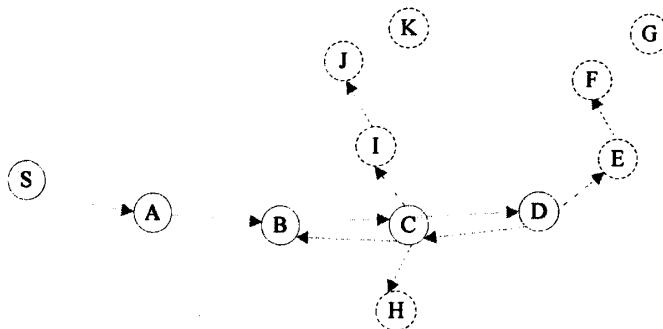


图 3-17 RREP 报文的转发

(3) 信道分配详细过程

上一节说明了 RREP 报文沿反向路径从目地节点转发到源节点的详细过程，本节将说明在 RREP 的转发过程中如何给反向路径的每个节点，以及该节点的两跳邻居范围的所有节点分配信道的。以图 3-17 为例来说明信道分配的详细过程。

- 目地节点 D 在广播 RREP 报文前，首先从空闲信道列表 CFL 中随机选择一个信道索引号，并将该索引号对应的信道作为该节点的发送信道。然后，将该信道索引号从 CFL 中移动到信道使用列表 CUL 中（将该信道索引号从 CFL 中删除，并添加到 CUL 中）。假设系统采用 IEEE802.11a 标准， $CFL = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ 。目地节点 D 的发射信道随机选取为信道 3，这时 $CFL = \{1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ ； $CUL = \{3\}$

- 节点 D 广播 RREP 报文，节点 C, E, F 接收到报文后，通过 CUL 获取节点 D 已经分配的发射信道。这样，节点 E, F 在将来的信道分配过程中将会避

免被分配相同的信道。

- 节点 C 收到 RREP 报文后，随机从 CFL 中选择一个信道，并将其对应的信道索引号移动到 CUL 中。假设为节点 C 分配的信道为 6，则 $CFL = \{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11\}$; $CUL = \{3, 6\}$ 。在信道分配过程中，信道使用列表 CUL 中的信道索引号将按序存储。
 - 节点 C 的信道分配完毕后，广播 RREP 报文。节点 H, I, J, B 都会获取节点 C 的发射信道。节点 H, I, J 在将来的信道分配过程中将会避免被分配相同的信道。

按照相同的方法，直到 RREP 报文到达源节点 S。这样，反向路径上的所有节点都将被分配到信道。信道分配结果如图 3-18 所示。

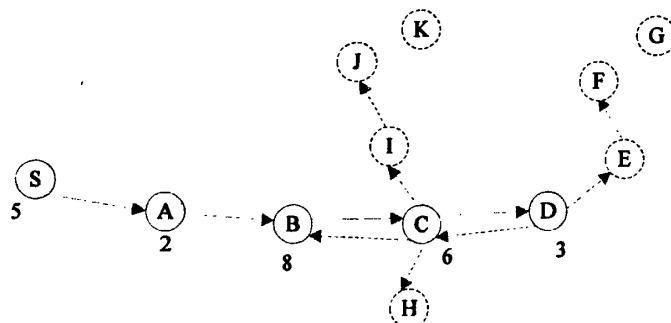


图 3-18 信道分配结果

这里，路由上的节点数为 5，小于可用信道数 11，因此每个节点都能被分配到不同的信道。当可用信道数小于节点数时，比如为系统提供 3 个可用信道。初始时 $CFL=\{1, 2, 3\}$; $CUL=\{\emptyset\}$ 。当 RREP 报文到达节点 B 并为节点 B 分配完信道后，这时的 $CFL=\{\emptyset\}$; $CUL=\{2, 1, 3\}$ 。由于节点还未分配完毕，另 $CFL=CUL=\{2, 1, 3\}$, $CUL=\{\emptyset\}$ 。为了满足两跳范围内的节点所分配的信道不同要求，在为余下节点的信道分配过程中，信道索引号的选取按照先进先出（FIFO）的方法选取。这时的信道分配结果如图 3-19 所示。

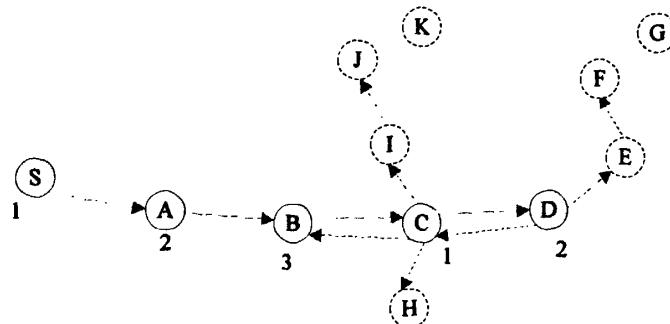


图 3-19 信道分配结果

(4) 信道干扰和信号冲突的解决

从以上的信道分配过程可以看出，MCCA-AODV 协议可以避免信道干扰和信号冲突。如图 3-17 所示，假设节点 H 有数据要发送节点 J 时发起路由发现过程。在为节点 J, I, H 分配信道时，由于它们都知道节点 C 分配了信道 6，那么这些节点将会分配除信道 6 以外的其它信道。当节点 C 向节点 D 发送数据，同时，节点 I 向节点 J 发送数据时，节点 C 的信号发送不会在节点 J 处产生干扰，避免信号冲突的发生。

3. 6. 5 信道接入过程

源节点收收到 RREP 报文后就开始接入数据信道开始数据发送，活动路路上的所有节点始终驻留在控制信道上。这里，数据信道的接入机制仍然采用 IEEE802.11 标准的分布式协调功能（Distributed Coordination Function, DCF）机制。为了在收发节点间协调一个公共的数据信道进行数据的收发，需要将 DCF 的控制帧 RTS 进行适当的修改，在 RTS 帧的报头结构中添加了如下字段：

SEI (Send Enabled Index) 字段 (4bit): 发送可用信道索引号。取值为路由发现过程中分配的信道索引号。

信道接入过程如下：

- (1) 处于空闲状态的节点驻留在控制信道上。
- (2) 当节点要发送数据时，它首先在控制信道上向接收节点发送 RTS 帧。RTS 帧中包含有发送节点将要发送数据分组所在的信道信息。
- (3) 接收节点接收到 RTS 帧后，根据 RTS 中的信道信息切换到发送节点的发送信道上。切换完成后向发送节点发送 CTS 帧。
- (4) 发送节点收到 CTS 帧后，就通过协商好的信道向接收节点发送数据分组。

3. 6. 6 信道分配算法性能分析

(1) 仿真环境设置

利用 NS-2.28 仿真工具来分析 MCCA-AODV 协议的信道分配算法，并与单信道情况下的性能进行比较。为了分析系统中可用信道数对系统性能的影响，在仿真中，数据信道数分别为 5 和 10。在仿真建模中，无线 Mesh 网络采用 25 个静态的无线 Mesh 路由器，随机分布在 1600 米×1600 米的平面区域内。每个路由器采用 2 个射频接口，一个用于控制信道，一个用于数据信道，网络中所有节点的采用相同的控制信道。射频接口的传输范围为 250 米，干扰范围为 550 米。无线 Mesh 路由器之间的无线链路速率为 2Mbps，数据发送速率为 40Kbps～

320Kbps。采用双径传播模型，仿真时间为 8000 秒。

(2) 仿真结果和分析

为了评价信道分配算法，仿真采用两个指标来衡量该算法的性能：聚合吞吐量 (Aggregate Throughput)，平均延迟 (Average Delay)。仿真结果如图 3-20，图 3-21 所示。

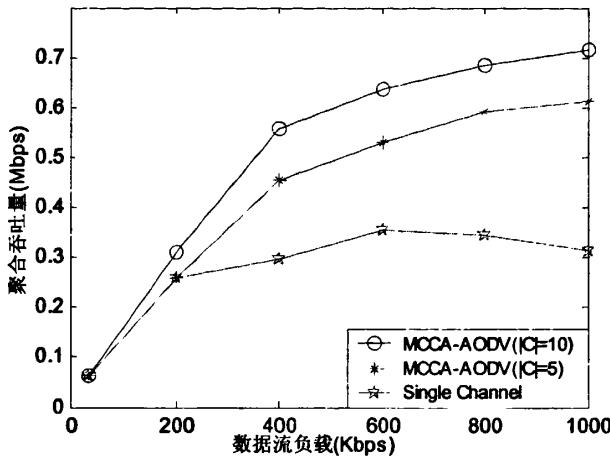


图 3-20 聚合吞吐量

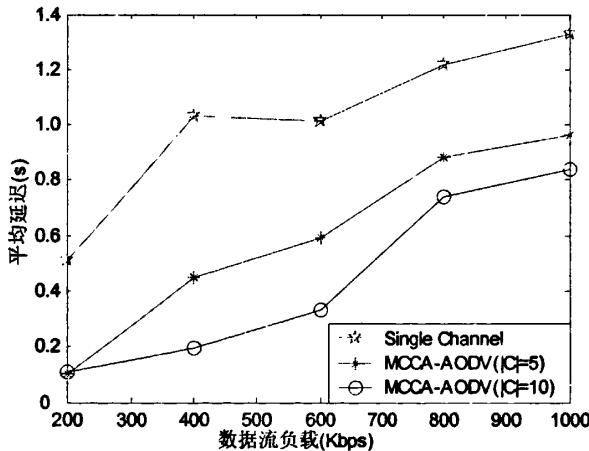


图 3-21 平均延迟

图 3-20 为系统中可用信道数分别为 5, 10, 以及单信道情况下网络的聚合吞吐量。从图 3-20 可以看出，多信道的新能明显优于单信道，而且网络聚合吞吐量随网络中可用信道数的增加而增加。如图所示，采用 MCCA-AODV 协议时的聚合吞吐量为单信道的 3 倍左右。图 3-21 为采用不同信道数时的平均延迟情况。平均延迟随着数据流负载增大而增大，但是，采用多信道比采用单信道的延迟要低，而且，可用信道数越多平均延迟就越小。

3. 7 本章小结

在无线 Mesh 网络中采用多接口多信道技术，为每个节点的射频接口分配不同的正交信道，网络中能够同时通信的节点对增加，使整个网络的吞吐量得到显著提高。然而，正交的信道数目是有限的，这就需要在无线 Mesh 网络中合理地分配信道，使得网络的吞吐量最大化。AODV 按需路由协议使网络中的每个节点在需要进行通信时才发送路由分组，而不会周期性地交互路由信息以得到所有其它主机的路由，各节点路由表只维护本节点到其他节点的路由，而无须掌握全网拓扑结构，减少了网络开销。采用 AODV 路由协议控制分组的为活动路由的每个节点分配信道，降低了算法的复杂度。本章提出的用 AODV 协议按需为活动路由上的节点分配信道的跨层分布式信道分配算法，提高了信道的使用率和分配效率。属于不同活动路由的相邻节点，由于路由建立时间不同，又可能造成分配相同信道的情况，本章提出的两跳干扰模型能够避免这种情况的发生。同时，跨层设计方法通过在协议栈的各层之间传输特定的信息来协调协议栈各层之间的工作过程，使之与无线通信环境相适应，从而使系统能够满足各种业务的不同需求。

3. 8 参考文献

- [1] M.Zawodniok, S.Jagannathan. A distributed power control MAC protocol for wireless ad hoc networks.2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol.3, 21-25 March 2004 ,pp.1915 — 1920
- [2] Matthias Grossglauser and David N.C.Tse.Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks.IEEE/ACM Transactions On Networking,Vol.10,No.4 ,August 2002
- [3] P. Gupta and P. R. Kumar.The Capacity of Wireless Networks. IEEE Transactions on Information Theory, vol.46, no.2, 2000.
- [4] P. Kyasanur and N.H.Vaidya. Capacity of Multi-Channel Wireless Networks: Impact of Number of Channels and Interfaces. Proc.of IEEE MobiCom, 2005, pp.43-57
- [5] A.Raniwala, K.Gopalan, and T.Chiueh.Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multi-Channel Wireless Mesh Networks. ACM Mobile Computing and Communications Review, vol.8, no.2, pp.50–65, April 2004
- [6] Raniwala and T. Chiueh.Architecture and Algorithms for an

- IEEE802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network.Proc.of IEEE INFOCOM 2005, vol. 3, pp. 2223-2234.
- [7] J. Tang, G. Xue, and W. Zhang. Interference-Aware Topology Control and QoS Routing in Multi-Channel Wireless Mesh Networks. Proc. of ACM MobiHoc'05, 2005, pp.68-77.
- [8] 刘乃安. 无线局域网(WLAN)——原理、技术与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 261-266
- [9] J. Padhye, S. Agarwal, and V. N. Padmanabhan. Estimation of Link Interference in Static Multi-hop Wireless Networks. Proc. of the Internet Measurement Conference, October 2005, pp.305-310.
- [10] S. Leue,P.Oechslin. Formalizations and algorithms for optimized parallel protocol implementation. 1994 International Conference on Network Protocols.Piscataway: IEEE Press, 1994. 178-185.
- [11] Xiaofeng Xu,Mihaela van der Schaar,S Krishnamachari, et al. Adaptive Error Control for Fine-Granular-Scalability Video Coding.ICME2003,July 2003,1:669-72
- [12] T.K.Chiew, P.Ferre,D.Agrafiotis, et al.Cross-layer WLAN Measurement and Link Analysis for Low Latency Error Resilient Wireless Video Transmission.ICCE2005,Jan 2005,177-178
- [13] K.Kyamakya,V.D.Nguyen. Cross-layer optimization,Especially Combination of Channel Estimation and Position Determination in Multihop Wireless Networks(cellular and ad hoc).IEEE VTC2003-Fall,Oct 2003,3:1537-1543
- [14] Li Xu ,Bao yu Zheng. Study on Cross-layer Design and Power Conservation in Ad Hoc Network ,PDCAT2003.Aug 2003,324-328
- [15] Xia Gao ,Gang Wu,T.Miki.End-to-End QoS Provisioning in Mobile Heterogeneous Networks.IEEE Wireless Communications,June 2004,11:24-34
- [16] DE Comer 等, 用 TCP/IP 进行网络互连, 电子工业出版社, 1998
- [17] L.Iannone,R.Khalili,K.Salamatian, et al. Cross-layer Routing in Wireless Mesh Networks. 1st International Symposium on Wireless Communication Systems,2004.Mauritius: Computer Society Press,2004. 319-323.

- [19] Z. Han. Cross-layer Resource Allocation in Multi-access Wireless Network: The Problems and One Solution. Technical Report of Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland,2003.1-30.
- [20] I.F.Akyildiz, X.D.Wang, W.L.Wang. Wireless Mesh Networks: A Survey. Computer Networks,2005,47(4):445-487.
- [21] A.J.Goldsmith, S.B.Wicker.Design Challenges for Energy constrained Ad hoc Wireless Networks. IEEE Wireless Communications,2002,9:8-27.
- [22] V.Kawadia, P.R.Kumar. A Cautionary Perspective on Cross-layer Design. IEEE Wireless Communications,2005,12(1):3-11.
- [23] Pradeep Kyasanur, Multichannel wireless networks: Capacity and Protocols, Ph. D. thesis, University of Illinois at Urbana Champaign, 2006.
- [24] Shih-Lin Wu,Chih-Yu Lin,Yu-Chee Tseng,et al.A New Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks, International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks(ISPAN),Dec 2000,p.232-237
- [25] Jungmin So and Nitin H. Yaidya,Multi-channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals using a Single Transceiver,Mobihoc,2004.
- [26] J. S. Pathmasutharam, A. Das, A. K. Gupta. Primary Channel Assignment Based MAC (PCAM)-A Multi-channel MAC Protocol for Multi-hop Wireless Networks. In Proceedings of IEEE WCNC, Atlanta, GA, 2004,2:1110-1115
- [27] M. X. Gong, S. F. Midkiff, and S. Mao.A Combined Proactive Routing and Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. Proceedings International Conference on Broadband Networks (BROADNETS), Boston, MA, October 3-7, 2005
- [28] C. E. Perkins and E. M. Royer.Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing. Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999, pp. 90-100.
- [29] R. Rajaraman. Topology Control and Routing in Ad Hoc Networks: A Survey. ACM SIGACT News, vol. 33, no. 2, pp.60-73, 2002.
- [30] V. S. A. Kumar, M. V. Marathe, S. Parthasarathy, and A.

- Srinivasan. End-to-End Packet-Scheduling in Wireless Adhoc Networks.
Proc. of SODA SIAM, 2004, pp.1021–1030.
- [31] S. Yi, Y. Pei, and S. Kalyanaraman, On the Capacity Improvement of Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas. Proc. of MOBIHOC'2003, pp.108-116.

第四章 无线 Mesh 网络 MAC 层功率控制技术研究

无线 Mesh 网络作为无线移动通信系统的一种特殊形式已经在民用和军事领域得到了广泛应用。在移动蜂窝通信系统中常用的功率控制机制同样可用于无线 Mesh 网络。功率控制主要是通过调整发送结点的信号发射功率，在保证一定通信质量的前提下尽量降低信号发射功率。在无线 Mesh 网络中采用功率控制技术的目的主要是通过调整发送结点的信号发射功率来提高信道的空间复用度，同时降低对邻近结点的干扰，最终提高整个网络的容量。无线 Mesh 网络对功率控制技术的要求是：

- (1) 分布式：要求功率控制算法能在各结点处分别运行。
- (2) 简单性：要适于实时执行，而且不能消耗过多的计算资源。
- (3) 灵活性：能快速跟踪信道的改变以及由于结点移动而造成的网络拓扑变化。
- (4) 健壮性：能适应各种不同的情况，特别是一些偶发事件。
- (5) 可扩展性：在各种网络规模条件下都能正常运行。

以上这些原则对我们进行功率控制设计提出了严格的要求，在进行功率控制算法的设计时，要充分考虑到各种因素，以保证算法的实用性、可靠性。

4. 1 功率控制的研究背景

对于无线通信系统而言，功率控制问题一直是一个重要的课题。但对于不同的系统，它所起的作用不尽相同。在最早出现的无线分组网中，节点一般都是采用专业线路进行电力供应，不存在能量受限方面的问题。此时，功率控制的主要目的是减小发送节点对邻近节点的干扰，使得在空间上相距较远的节点可以同时发送数据而不互相影响。这样在一个较大区域内可以有更多的节点同时发送数据，因此提高了信道的空间复用度，也提高了网络容量。

在一些发送代价较大的无线网络中，功率控制机制对节省网络能耗具有重要意义。比如在某些由配备车载移动电台的移动节点构成的无线网络中，如果电台最大信号发射功率为数十瓦，由于存在功率转换问题，电台满发射功率时，实际消耗的功率可达数百瓦，即使由车载蓄电池供电，这也是一个很大的功率消耗。实际情况经常是，接收节点因为离发送节点比较近或者电磁环境较好，信号只需要用比最大功率小得多的功率来发送就可以被对方接收到。此时，电台的功耗会比用最大功率发射时的功耗低得多，而且电台在接收信号时的功耗也仅是电台满发射功率时功耗的极小一部分。在这种情况下，采用功率控制机制能显著降低网

络能耗，延长网络的工作时间。

在无线 Mesh 网络中，由于 Mesh 路由器采用专业线路供应电力，不存在节能的问题，采用功率控制机制主要是为了降低对邻近结点的干扰，提高信道的空间复用度，最终提高整个网络的容量。功率控制作为提高无线 Mesh 网络性能的一种常用机制，其重要性日渐突出，已经成为无线 Mesh 网络应用中不可缺少的重要手段。

4. 2 功率控制的意义和作用

根据上节所述，概括起来说功率控制可以起到两个方面的作用：一是可以降低节点能耗，延长网络寿命，另一方面的作用在于提高网络空间复用度，提高网络的容量。

(1) 降低节点能耗，延长网络寿命

无线节点的能量消耗通常可以分为与通信有关的能量消耗和与计算有关的能量消耗。与通信有关的能量消耗是无线网络接口所消耗的能源，即节点在收、发分组以及作为路由器进行分组转发时所消耗的能量。与计算有关的能量消耗是指节点在处理分组和参与网管理执行网络协议算法等其他任务时消耗的能量，例如 CPU、内存等其他硬件，数据压缩、前向纠错算法等软件(程序)消耗的能量。随着技术的提高和发展，计算方面消耗将将会越来越小，通信方面的比例将会加大，研究表明通信方面的发射状态能耗最大^[1-2]，所以发射节点进行功率控制就显得非常重要。

我们知道无线信道对信号的衰减与传输距离成指数增长，因此减小节点的传输半径可以使发射节点的传输能量减少，大大地降低节点的能耗，延长了网络寿命。

(2) 提高网络空间复用度

采用功率控制，减少节点的传输半径可降低干扰，使同一邻居区域内存在更多的传输过程，减小了 MAC 层竞争冲突，提高通信质量，提高了信道的空间复用度，扩大了网络容量。考虑以上提到的 IEEE802.11 DCF 握手机制，以它作为网络 MAC 层协议，适当地调整控制信号和数据信号的发射功率，以节省能量。这样因为传输的半径变小，覆盖的周边节点数也变少了。而且在相同的条件下，可以同时建立比 IEEE802.11 标准更多的通讯对，这对于源节点与目的节点距离的很近的情况非常有利，如图 4-1 所示，信道利用率是 IEEE802.11 协议的 3 倍^[3]。

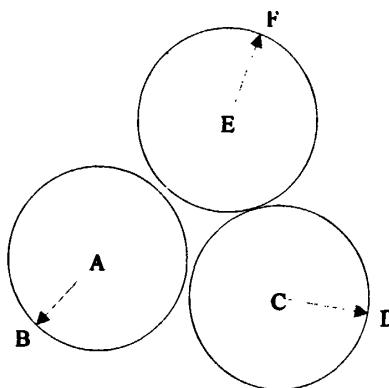


图 4-1 功率控制提高空间复用度

4. 3 功率控制技术分类

当前无线 Mesh 网络的功率控制技术研究主要集中在两个方面，即网络层的功率控制和链路层的功率控制。网络层的功率控制所关心的问题是如何通过改变发射功率来动态调整网络的拓扑结构和选路，使全网的性能达到最优。而链路层的功率控制主要通过 MAC 协议来完成，根据每个报文的下一跳结点的距离、信道状况等条件来动态调整发射功率。相对于网络层的功率控制，链路层的功率控制是一种经常性的调整，每发送一个数据报文都可能要进行功率控制，而网络层的功率控制则是在一个较长的时间内才进行一次，调整频率较低。使用时，也可以将这两种功率控制机制结合起来，用网络层的功率控制来调整网络拓扑结构和选路，而在发送报文时根据目的结点的远近调整发送所用的功率。

4. 3. 1 网络层功率控制机制

通常，在收发机参数及信道条件一定的情况下，结点的发射功率决定了结点的通信距离。当此通信范围内的结点数过多时，由于竞争的加剧导致冲突迅速增加，使整个网络的性能不能达到最优。而无线 Mesh 网络由于其使用环境的特殊性，结点分布的密度有时是无法预料的，这就需要一种机制来自动调节结点的发射功率，使其根据结点的分布情况自动调节发射功率。很显然，为了使网络内的任意一个结点都能与网络中的另一个结点进行通信，这个发射功率值不能太低。对于某一网络拓扑，结点的发射功率应该有一个最小门限，如果低于此门限值，则网络内会出现“孤岛现象”，即“孤岛”内的结点与外界其他结点不能连通，不能交互信息。

目前，对于网络中的结点到底应该用多大功率来发送的问题仍然是比较难以回答的。因为发送功率大，通信距离远，报文平均转发的次数就少，但这样会

使信道的空间复用度降低，使每个结点的有效带宽减小。而减小发射功率，能提高信道的空间复用度，增大结点的有效带宽，但报文的平均转发次数要增多。要回答这个问题就要在报文平均转发次数与信道空间复用度之间进行折衷。对于结点静止的无线网络，比如无线 Mesh 网络，理论分析得出最佳邻居结点个数为 6 时，网络性能最好。而对于结点移动性强的网络，应适当提高发射功率以增大邻居结点数目，因为这样能减少链路中断的次数，同一路由能维持更长的时间，所以能更好地提高网络性能。研究认为不存在一个适用于所有移动速率的最佳邻居数，结点的移动速率越高，邻居结点的个数应该越多。在结点位置已知，所有结点都用同一发射功率的条件下，已经有人提出了一种计算构成全连通网络所需发射功率最小值的集中式算法，并指出分布式算法也是可行的。

4. 3. 2 链路层功率控制机制

在链路层进行功率控制的目的是在给定最大发送功率的条件下，尽量提高信道的空间复用度。因为在最大发射功率一定的情况下，就已经决定了报文从源节点到目的节点的平均跳数。这个最大发送功率值可由网络层的功率控制机制根据网络拓扑情况来动态调整，或固定为一个常数。链路层的功率控制一般都通过 MAC 协议来完成。例如通过利用冲突避免类型协议中发送数据报文前交互 RTS/CTS 控制信息来提供有关链路的参数信息，并由此来进行功率调整。控制报文的交互为我们进行功率控制提供了极大的方便，可以在控制报文中带上发送功率或本结点的信噪比等参数，以便为对方进行功率控制提供参考依据。另一种方法是利用一个忙音信道发送忙音信号为功率控制提供必要的参考信息。

无线 Mesh 网络中的信道接入协议按具体的工作方式可分为单信道协议、双信道协议和多信道协议。可以使用功率控制机制来提高整个网络的容量。

(1) 单信道接入协议的功率控制

当某协议的控制报文和数据报文都在同一个信道上传送时，我们称之为单信道协议。在单信道功率控制协议中，控制报文可以用最大功率来发送，也可以根据目的节点的相关信息用相对较小的功率(最小必须功率加上一个冗余量)来发送。发送结点可以在控制报文(RTS)中带上发射功率等参数信息，接收结点可根据 RTS 的接收强度及其中所携带的参数信息来决定本结点发送响应报文(CTS 或 ACK)时所应该使用的功率。在 CTS 中还可向对方提供本结点的信噪比信息，为对方发送数据报文时选择发送功率提供参考依据。这个功率值应该在空间复用度和报文正确接收概率之间进行折衷，功率过大会降低信道的空间复用度，而功率过小会使报文到达对方时的差错概率增大，从而浪费带宽资源，而且报文重发也会消耗更多的能量。

(2) 双信道接入协议的功率控制

双信道接入协议通常有一个控制信道和一个数据信道，在控制信道上传送控制报文而在数据信道上传送数据报文。对于双信道接入协议，我们仍然可以采用功率控制机制，功率控制的目的是提高数据信道的空间复用度，最终提高整个网络的容量。控制信道上的控制报文，一般采用最大发射功率发送，而对于数据信道上的数据报文则根据控制信道上交互控制报文时所得到的信息用最小必须功率发送，数据信道上的 ACK 报文可以用最小必须功率发送，也可以用最大功率发送。

(3) 多信道接入协议的功率控制

当协议使用一个控制信道和多个数据信道时，我们称之为多信道协议。多信道接入协议可以由一个收发机来实现，也可以由多个收发机来实现。当使用一个收发机时，收发机在不同的信道上来回切换，但同一时刻只能在一个信道上接收或者发送。当使用多个收发机时，则同一时刻可在多个信道上同时接收或发送。多信道接入协议中，控制报文 RTS、CTS 都在控制信道上传送，数据报文和 ACK 在由多信道协议所决定的数据信道上传送。当结点没有数据要发时，则需有一个收发机停留在控制信道监听其他结点之间交互的控制报文。收发两端通过交互控制信息可在多个数据信道中选择一个合适的信道，并在切换到所选定的数据信道后发送数据报文及 ACK。多信道的好处是在同一时刻在同一通信区域内可以有多对结点同时通信（工作在不同的信道上），在网络负荷大时比单信道协议有更高的网络吞吐率。

4. 3. 3 混合功率控制机制

为了进一步提高功率控制协议的性能，可以将网络层功率控制机制与链路层功率控制机制结合起来形成混合功率控制机制。网络层功率控制负责调整节点发送广播或控制报文时的功率，以形成较为合适的网络拓扑，而当节点发送数据报文时，则根据目的节点的位置通过链路层功率控制机制使用较小的功率发送。

另一种路由选择算法是根据功率最优化原则和具体结点的不同情况来选择路由，尽量绕开瓶颈结点，使系统的平均工作时间大大提高。作为转发结点，当结点剩余能量较多时，结点可以为其他结点转发数据，而当剩余能量低于某一门限时，则可拒绝为其他结点转发数据包。作为源结点，当自己发送数据包时，则可选择距离最近的结点作为下一跳地址，发送功率可根据目的结点的远近来动态调整。

经研究表明，混合功率控制机制在达到最佳性能时所需要的邻居节点数目比仅采用网络层功率控制机制要少，而在吞吐量性能和能耗性能上都优于网络层

功率控制机制。

4. 3. 4 性能分析和比较

网络层功率控制的目的是通过调整网络的拓扑结构以提高网络性能。与不进行功率控制的协议(所有报文都用最大功率发送)相比,报文发送功率可能低于最大发射功率,每个结点的邻居数目也可能因之而减少,但每次功率调整后所有报文(控制报文/数据报文/广播报文等)都用相同大小的功率发送。而链路层功率控制的目的是根据收发结点的距离远近通过调整报文的发送功率提高网络性能。链路层功率控制并不影响网络拓扑结构。无论是采用网络层功率控制还是采用链路层功率控制都会在增大网络吞吐量的同时降低网络能耗,但网络层功率控制更侧重于提高网络吞吐率,而链路层功率控制根据实现方式不同,有的侧重于降低网络能耗,有的则侧重于提高网络吞吐率。采用采用混合功率控制机制后其性能比采用单一机制会有进一步提高。表 4.1 列出了网络层功率控制机制和链路层功率控制机制(单信道)及混合功率控制机制。

表 4.1 几种主要的功率控制机制性能比较

衡量指标	网络层功率控制	链路层功率控制	混合功率控制
最大吞吐量	高	较高	高
业务流转发跳数	可能会增加	不变	可能会增加
网络拓扑结构	改变	不变	改变
功率调整频率	秒级	毫秒级	毫秒级

4. 4 功率控制研究现状

在传输功率控制领域的研究集中在拓扑结构控制、确定最佳传输功率和对网络吞吐量的影响。

Gupta and Kumar 的理论研究^[4]证明使用最优化功率控制的理想媒介接入协议可将总的信道利用率提高 $O(\sqrt{\rho})$ 倍, ρ 是区域内节点的密度。Monks 等人^[5]还进行了模拟论证。两个研究得出一致的结论:假如每个节点都知道网络拓扑结构、节点间链路增益、接收节点处的噪声及邻居节点能容忍的发射功率上限,那么采用传输功率控制能有效提高网络吞吐量、节省能量。然而,对于分布式无线 Mesh 网络来说,直接利用这些结论是不可能的。实际上,节点不可能有全网的节点分布密度信息,最多也只有信道状况、节点分布密度和流量的局部情况;再者,这些研究都没考虑协调访问无线信道的机制。在一个实际的无线 Mesh 网络中,为正常运行,信道接入协议都需要有一个冲突避免结构。此外,因为网络拓扑结构和信道状况的变化(由于移动、连接失败或新节点加入网络),信道接入必须是分

布式的和自适应的。设计能达到上述目标要求的以个分布式的、动态的 MAC 协议是一个难题。

Karn 在 MACA 协议中，首次提出在 MAC 层采用功率控制来提高网络吞吐量。MACA 协议可被看作是一种单信道的、忙音多址访问(BTMA)^[6]的时间复用形式。在 BTMA 中，接收者只要接收到信号就在另一个信道发送“忙音”。用于告知邻居节点禁止传输，即使数据信道可用。相反，没有听到忙音的基站可以自由传输，即使在数据信道上有信号。也就是说是否传输与数据信道情况无关。这要求数据信道与忙音信道传输特性相同，BTMA 才有效。可是，为了避免相互干扰，两个信道要求在频率上是分开的，这样它们的特性也就不同了。此外，利用忙音还要有额外的硬件支持。与 BTMA 不同，MACA 是在同一信道上实现冲突避免机制(CTS/RTS 交互，相当于“忙音”的功能)和传输数据，这就解决了信道特性不一致的问题。并通过随机指数退避策略，使 RTS 分组之间的冲突(两个发送者同时传输)减至最少。MACA 协议中的自动功率控制机制概述如下：

(1) 每一次 RTS/CTS 交互，都会更新发送者到达接收者需要的功率值，以后发送分组的时候(包括本次对话中的数据分组)就可以将其发射功率调节到最有效的发射功率值。

(2) 因为 RTS 分组的主要目的只是为获得接收者的 CTS，所以可以降低发送功率来传输 RTS。这样可减少 RTS 分组之间冲突的概率。这在 IEEE802.11 MAC 协议中却不行。与 MACA 协议不同，IEEE802.11 MAC 协议在数据分组传输结束后还有一个 ACK 确认信号。为了避免 ACK 冲突(IEEE802.11 MAC 协议中这可导致整个序列的重传)，在 4 步(RTS-CTS-DATA-ACK)握手过程中 RTS 分组不能用最小功率发送。因为这样将造成隐藏终端，引起冲突而降低网络吞吐量。

(3) 在 MACA 中关于 CTS 分组有许多处理方法。CTS 分组可减少隐藏终端，因此需用高的功率发送。可是，用高功率传输 CTS 分组又降低信道的空间复用度。为了解决这个矛盾，MACA 提出解决 CTS 分组功率控制方案是基于反复试探，若节点传输 CTS 后没有得到一个应答(即一个数据分组)或收到一个重传的 RTS 分组，则用更高的功率重传 CTS。相反地，如果收到应答 CTS 的数据分组，则降低这对节点间下一 CTS 发射功率，使之略高于刚好到达传输发起者所需的最小功率等级。然而，这样也存在问题，CTS 功率控制基于反复试探且要花费时间才收敛。这种方法还能引起不必要的冲突，进而重传。反复重传降低了网络容量。再者，如果 CTS 的功率过低，就不能消除潜在的隐藏终端。当隐藏传输同时发送时，造成代价很高的数据冲突。PCACA 协议通过用最大允许功率等级发送 CTS 分组来应对这个问题。最大允许功率等级是指在不干扰正在进行的传输的情况下，所允许的最大功率等级。这样做可充分减少了隐藏终端数量，从而降低冲突的可能性，

提高网络容量。此外，通过及时分离并发的传输，PCACA 协议允许有同时进行的传输，这就增加了网络容量。

Wu 等人^[7]提出一个 Ad hoc 网络的信道接入机制，RTS/CTS 在数据信道上交互，在一个分开的信道上使用忙音来提高协议性能。忙音相当于给收发机增加了载波监听机制。Monks 等人[32]更进一步提出在 MAC 层使用类似的双信道技术的功率控制机制。它要求每个节点在忙音信道上，用忙音脉冲周期广播可接受功率等级。这与 BTMA 属于同样的问题。为了避免相互干扰，两个信道在频率上是分开的，忙音信道的功率等级信息不等于数据信道上的，协议要依赖于正确功率等级交互，这势必约束协议的正常运行。另外，增加忙音信道也是一个问题。这些情况促使了单信道冲突避免机制的发展应用。

Grossglauser 和 Tse^[8]的研究表明，从一段较长的时间范围观察，采用统一固定分配发送方式，节点越过全网的移动过程是遍历的，这样的 Ad hoc 网络中每个节点吞吐量稳定在一个常数。主要的思想是源节点尽可能的分发分组给不同的节点。当这些节点是目的节点的邻居节点时，就转发分组给最终的目的节点，这样保持期望的路径长度不变。但这个结果严格依赖移动模型，且只对能容忍长延迟的应用才有效。这就需要开发那种即使对延迟敏感应用的和不依赖移动模型的也能保持以较大网络吞吐量正常运行的协议与相关研究相比。

4. 5 MAC 层功率控制的理论依据

MAC 层是数据链路层的一个子层，决定节点如何接入共享的无线信道，并负责向上层提供可靠的点到点连接服务。在 MAC 层，采用功率控制，减少数据发射的冲突，避免重传，提高了信道的空间复用度，扩大了网络容量。

4. 5. 1 功率控制的理论依据

为了进行功率控制，有以下前提条件：

- (1) 一个节点可以选择用多大功率来发送分组，这要由物理层来提供支持。
- (2) 在接收到一个分组后，物理层可以向信道接入层报告该分组是以多大的功率被接收的。

设有一个源节点向一个目的节点发送一个分组，则有以下公式成立^[7]：

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n G_t G_r \quad (4-1)$$

公式(4-1)式中， P_t 是发送节点发送分组时传递给发射天线的功率， P_r 是分组到达接收节点混频器输入端的功率； λ 是载波波长； d 是源节点和目的节点

间的距离； n 是路径衰减系数。 G_t 是发送节点天线增益； G_r 是接收节点天线增益。通常情况下， λ 、 G_t 、 G_r 均为常数， n 的典型值根据空间环境的不同可设为 2 或 4(传输距离小于 100 米时 n 选为 2，否则取为 4)。由于无线 Mesh 网络中的各节点都是静止的，可将 d 和 n 看作常数。设源节点以功率 P_t 向目的节点发送 RTS 分组，目的节点收到 RTS 分组的功率为 P_r 。若源节点以功率 P_{data} 向目的节点发送数据，使得目的节点收到数据分组的功率为 P_s ，由式(4-1)，有下式成立：

$$P_s = P_{data} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n G_t G_r \quad (4-2)$$

公式(4-2)中，若接收节点的灵敏度为 P_s 。则由公式(4-1)和(4-2)，可推出：

$$P_{data} = \frac{P_t P_s}{P_r} \quad (4-3)$$

这样，知道了 P_t 、 P_r 和 P_s 以后，就可以计算出 P_{data} ，用此功率发送数据正好可以保证接收机正确接收的需要。

由公式(4-1)可知， P_r 正比于 d^2 或 d^4 ，可见当传输距离增大一倍，发射功率 P_t 要成幂级数倍增加，才能被正确接收。

4. 5. 2 相关术语定义

在深入探讨 IEEE802.11 标准 MAC 层功率控制之前，我们先定义几个概念，图 4-2 说明这几个概念的关系。

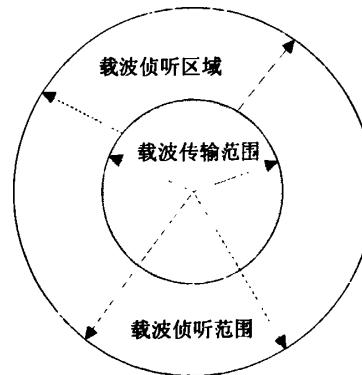


图 4-2 传输/侦听范围、侦听区域

节点的传输范围(Transmission Range)：处在发送节点的传输范围内的节点能够正确接收和解读数据分组。

节点的载波侦听范围(Carrier Sensing Range)：处在发送节点的载波侦听范围内的节点能够侦听到节点正在传输，但不一定能够正确接收和解读数据分组。一般情况下，载波侦听范围要比传输范围大一倍左右。

节点的载波侦听区域(Carrier Sensing Zone): 处在发送节点的载波侦听区域内的节点能够侦听到节点传输信号, 但不能够接收和解读信息。

图 4-2 中, 传输范围和载波侦听范围的大小受节点发射功率大小的制约, 而载波侦听范围则包括载波侦听区域。

4. 6 一种基于控制帧的功率控制 MAC 协议

文献[3,9]提出的功率控制 MAC 协议利用 RTS 和 CTS 的最大功率来调整 DATA 和 ACK 的发送功率。本文提出了一种新的基于 CTS 分组的功率控制 CTSPC (CTS Power Controlled) MAC 协议。CTSPC 协议则与此不同, CTS 分组的发送功率大小是基于接收到的 RTS 分组的功率进行调整, 这样, 只有那些真正对接收节点造成信号干扰的节点才会收到 CTS 分组, 从而延迟接入信道。

上一节定义了节点的传输范围(Transmission Range)和节点的载波侦听范围(Carrier Sensing Range), 我们分别用 TR 和 CSR 表示。此外, 我们新定义干扰范围 IR (Interference Rang), 指接收节点将会受到其它发送节点的干扰而导致接收数据分组的丢失的范围, 该参数不是一个确定值, 取决于发送节点和接收节点之间的距离。

接收节点要正确接收数据分组, 最小的接收功率必须大于接收门限, 用 $R_{x\text{Thresh}}$ 表示。对应的范围定义为传输范围 TR。 CSR_{Thresh} 用于节点判断信道是否忙, 本文用载波监听范围 CSR 来表示。在 NS-2 仿真器中, TR 和 CSR 是固定的, 分别为 250 米和 550 米。

4. 6. 1 空间复用度分析

根据双径传播模型 (two-ray ground reflection model), 电波在自由空间传播时, 接收端的功率为:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{d^4 L} \quad (4-4)$$

其中, P_t 为发送端天线发射功率; G_t , G_r 分别为发射天线、接收天线增益; $\lambda = h_t h_r$, h_t 为发射天线高度, h_r 为接收天线高度; d 为发射端与接收端的距离; L 为系统损耗因子, $L \geq 1$ 。

数据分组要被正确接收, 除了接收功率必须大于接收门限 RX_{Thresh} 外, 信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 也必须大于门限值, 用 SNR_{Thresh} 。在 NS-2 仿真器中, 门限值 SNR_{Thresh} 为 10。接收信号功率用 P_r 表示, 干扰信号功率用 P_i 表示, 发送节点和接收节点间的距离用 d_t 表示, 接收节点和发送干扰信号的节点间的距

离用 d_t 表示。忽略噪声干扰，由公式 (4-4) 得到信噪比 SNR：

$$SNR = \frac{P_r}{P_i} = \left(\frac{d_i}{d_t}\right)^4 \geq SNR_{Thresh} \quad (4-5)$$

由公式 (4-5)，得到干扰范围 IR：

$$IR = d_t = d_t (SNR_{Thresh})^{1/4} = 1.78d_t \quad (4-6)$$

从公式 (4-6) 可以看出，干扰范围 IR 与发送距离 d_t 成线性关系，随 d_t 的减小而线性减小。本文正是基于以上结果来提高无线 Mesh 网络的空间复用度。空间复用提高比例为：

$$\frac{S_{CSR}}{S_{IR}} = \left(\frac{550}{1.78d_t}\right)^2 \quad (4-7)$$

公式 (4-7) 中， $0 < d_t \leq TR = 250$ 。

由公式 (4-7) 可得到发送距离与空间复用提高率之间的关系图，如图 4-3 所示。从图中可以看出，当发送节点和接收节点之间的距离（传输距离 d_t ）小于 300 米时，采用 CTSPC 协议可以提高空间复用度，而 d_t 的最大值为 250 米。空间复用度提高率随传输距离 d_t 的减小而增大，因此，当无线接入点分布密度大，节点间的传输距离小时，使用 CTSPC 协议将更有利。

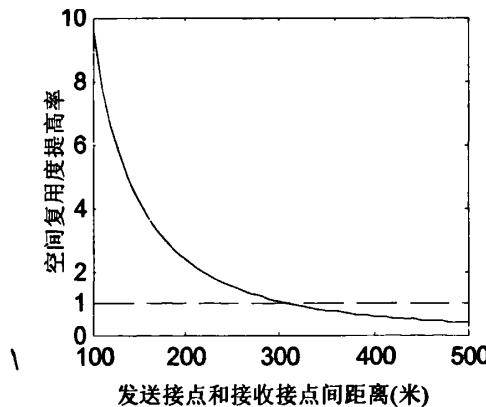


图 4-3 发送距离与空间复用度提高率关系图

4. 6. 2 功率控制协议模型

CTSPC 协议仍然采用基于 RTS/CTS 机制的虚拟载波监听技术。在 RTS 和 CTS 分组中，携带了该次发送过程将要占用信道时长的信息。该信息能被正侦听信道的其它终端读取，并用其对网络分配矢量（network assignment vector, NAV）进行更新。NAV 中包含了信道将持续忙的时间信息。因此，只要终端监听到 RTS 或者 CTS 分组的任意一个，它便能在发送前进行合理的延迟，从而有效地避免

冲突。

为了通知干扰范围 IR 内的发送节点延迟发送，避免对接收节点的干扰，利用虚拟载波监听过程中的 CTS 帧来实现。为了能够保证干扰范围 IR 内的所有发送干扰信号的节点都可以正确接收到 CTS 帧。下面将推导出计算 CTS 帧的最小发送功率 P_{cts} 的公式。

当接收节点收到发送节点发送的 RTS 帧时，在接收节点处，RTS 帧的接收功率 P_{rts} 可由公式（4-4）得到：

$$P_{rts} = P_t(d_t) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{d_t^4 L} \quad (4-8)$$

由此，可得到发送节点和接收节点间地距离 d_t 为：

$$d_t = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{P_{rts} L} \right)^{1/4} \quad (4-9)$$

由公式（4-6）和（4-9），干扰范围 IR 为：

$$IR = (SNR_{Thresh} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{P_{rts} L})^{1/4} \quad (4-10)$$

为了保证干扰范围 IR 内 CTS 帧的接收功率大于接收门限值 RX_{Thresh} ，由公式（4-4）得：

$$P_t(IR) = \frac{P_{cts} G_t G_r \lambda^2}{(IR)^4 L} \geq RX_{Thresh} \quad (4-11)$$

由公式（4-11），CTS 帧的发送功率 P_{cts} 为：

$$P_{cts} \geq P_t \left(\frac{RX_{Thresh}}{P_{rts}} \right) SNR_{Thresh} \quad (4-12)$$

公式（4-12）中， P_t 是用于发送 RTS、DATA、ACK 帧的缺省功率，门限值 RX_{Thresh} 和 SNR_{Thresh} 已知并取确定的数值。因此，根据 RTS 的接收功率就可以计算出 CTS 的最小发送功率。

4. 6. 3 功率控制协议描述

采用基于 RTS/CTS 控制帧的虚拟载波监听技术，数据分组的发送过程包括 RTS—CTS—DATA—ACK 四次握手。为了避免 DATA 帧和 ACK 帧的碰撞，DATA 帧必须被分割成更小的 DATA 帧来发送。假设发送节点进行信道竞争后，成功接入信道开始发送过程。CTSPC 协议的运行过程：

(1) RTS 帧携带了数据分组整个发送过程占用信道的时长信息。然而，只有那些正确接收到 RTS 帧的节点才能根据取得的时间值来更新网络分配矢量 NAV，不能正确接收 RTS 帧或者不能侦听到 RTS 帧的节点网络分配矢量 NAV 保持不变。

(2) 接收节点正确接收到 RTS 帧后开始发送 CTS 帧，CTS 帧携带了从 RTS 帧中取得的信道预留时长值。而 CTS 帧的发送功率根据公式（4-12）计算得到。

(3) 接收到 CTS 帧的节点利用 CTS 帧携带的信道预留时长值来设置各自的网络分配矢量 NAV。这样，接收到 CTS 帧的节点在此期间将延迟发送过程以免干扰正在数据分组的接收。

(4) 发送节点接收到 CTS 帧后就开始向接收节点发送 DATA 帧

(5) 接收节点收到 DATA 帧后向发送节点发送 ACK 帧

4. 6. 4 协议性能分析

我们用 NS-2 仿真器对 CTSPC 协议和 802.11 标准 MAC 协议进行仿真比较。仿真场景是一个边长为 L 的正方形，一共有 $32 \times 32 = 1024$ 个无线接入点，位置固定。

(1) 仿真环境设置

无线接入点的布置按两种方式排列。第一种方式是 1024 个节点按方正排列，在垂直方向和水平方向上，相邻节点的距离相等，本文称为节点空间距离 (Node Space Distance, NSD)。因为发送节点和接收节点间的距离决定了 CTSPC 协议的性能，因此该参数非常重要，本文将在 50 米到 250 米之间进行取值。模拟场景是边长 $L=32 \times NSD$ 的正方形。第二种情况是 1024 个节点随机分布在相同大小的正方形中。

假设节点的业务模式为随机业务模式，在这种情况下，节点首先通过比较到每个节点的距离来建立邻居列表。如果距离小于传输距离 TR ($TR=250$ 米)，那么就将该节点加入邻居列表中。邻居节点列表建立完成后，就从列表中随机选择一个节点作为目的节点进行发送。该发送过程在初始化之前先进行信道监听，看是否会干扰其它正在进行的发送过程。

为了验证业务负载对 CTSPC 协议性能的影响程度，本文将采用不同的业务负载进行模拟，并设定节点空间距离为 100 米。业务负载是指要求发送的节点占总节点的比例，取值为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1。

为了验证 CTSPC 协议能有效提高空间复用度，利用上述的模拟模型，计算在同一时刻最多允许同时存在多少个数据发送和接收过程（并行通信数量）而不会造成各节点间信号的干扰。并行通信数量越大，表明空间复用度越大，网络的容

量和吞吐量就大，MAC 协议的性能就越优越。

(2) 仿真结果和分析

仿真结果如图 4-4, 4-5, 4-6, 4-7 所示。在模拟过程中，每种情况都执行 10 次仿真过程，模拟结果取 10 次的平均值。

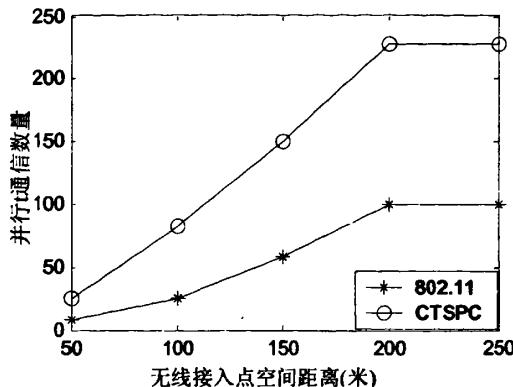


图 4-4 无线接入点按方正排列

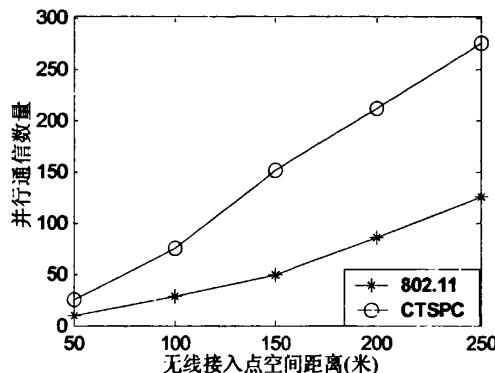


图 4-5 无线接入点随机排列

图 4-4 分别为 CTSPC 协议和 802.11 标准 MAC 协议中，当节点按 32×32 方正排列时允许同时存在的发送过程数量。无线接入点间的空间距离越大，相互间的信号干扰就小，并行发送过程数目就越大。当无线接入点按方正排列时，CTSPC 协议的空间复用度大于 802.11 标准 MAC 协议，性能更优。图 4-5 为无线接入点随机分布的情况，可以看出，即使节点随机分布，CTSPC 协议的性能仍然优于 802.11 标准 MAC 协议。

图 4-6 是在无线接入点按方正排列时，CTSPC 协议和 802.11 标准 MAC 协议在不同的业务负载下最多允许同时存在的通信节点对的数目。从图中可以看出，随着业务负载的增加，并行通信数量也增加，而且 PCCTS 协议优于 802.11 协议。

图 4-7 为无线接入点随机分布的情况。

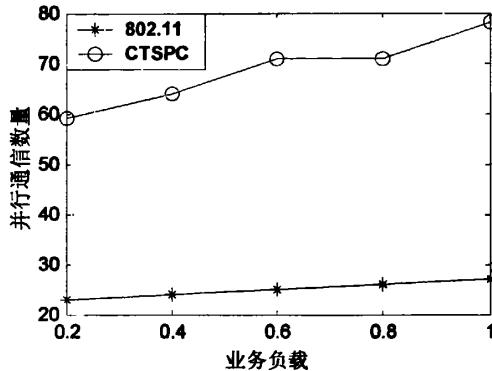


图 4-6 无线接入点按方正排列

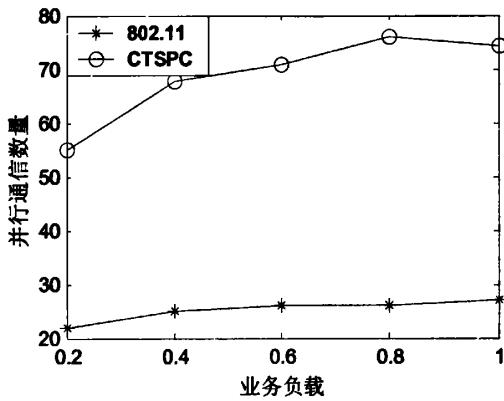


图 4-7 无线接入点随机排列

4. 7 本章小结

对于无线通信系统而言，功率控制问题一直是一个重要的课题。但对于不同的系统，它所起的作用不尽相同。概括起来说功率控制可以起到两个方面的作用：一是可以降低节点能耗，延长网络寿命，另一方面的作用在于提高网络空间复用度，提高网络的容量。无线 Mesh 网络中的 Mesh 路由器位置固定，采用专门的线路供电，研究功率控制的主要目的时提高网络的空间复用度，提高网络的容量。本文提出了基于 CTS 控制帧的功率控制 MAC 协议-CTSPC，能够有效提高无线网格骨干网络的吞吐量。在 CTSPC 协议中，接收节点通过接收到的 RTS 控制帧的接收功率来计算发送 CTS 控制帧所需要的功率，使得 CTS 控制帧除了能被发送节点接收到外，仅仅被那些真正会对整个数据发送接收过程产生干扰的节点正确接收，这些干扰节点就可以延迟发送，保证接收节点的正确接收。同时，通过功率控制协议 CTSPC，无线接入点的空间复用度提高了，网络中并行的通信过程增加了。

4. 8 参考文献

- [1] L.M.Feeney,M.Nilsson. Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment. Proceedings of IEEE Infocom,2001
- [2] Q.Li,J.Aslam,D.Rus. On Line Power Aware Routing in Wireless Ad hoc Networks. Proceedings of Mobicom2001,2001.
- [3] Jung, Eun-Sun, Vaidya,et al. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM, 2002,p36-47.
- [4] P.Gupta and P.R.Kumar.The Capacity of Wireless Networks. IEEE/ACM Transactions on Information Theory,46(2):388-404, March 2000
- [5] J.P.Monks,J.Ebert,A.Wolisz, and W.W.Hwu. A study of the Energy Saving and Capacity Improvement Potential of Power Control in Multi-hop Wireless Networks. In Proceeding of IEEE Conference on Local Computer Networks and Workshop on Wireless Local Networks,2001
- [6] S. Keshav. An Engineering Approach to Computer Networking. Addison-Wesley,2000
- [7] S.Wu,Y.Tseng, and J.Sheu.Intelligent Medium Access for Mobile Ad Hoc Networks with Busy Tones and Power Control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,18(9):1647-1657,2000
- [8] M.Grossglauser and D.Tse. Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks. In Proceedings of IEEE INFOCOM, April 2001
- [9] Gomez J, Campbell AT, Naghshineh M, et al. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In: Proceedings of the ICNP 2001, Washington, USA, 2001. 24-34.

第五章 无线 Mesh 网络移动终端切换技术研究

5. 1 引言

随着 Internet 和无线通信技术的发展，人们进行网络信息交互的方式和能力也越来越丰富，如无线 PDA，智能移动终端等，这些技术和设备正把人们从传统的固定网络访问方式中解放出来，只能在办公室、家庭等固定场所才能进行的工作方式已成过去，而“任何地方、任何时间、任何方式”都能进行信息交互正是移动计算追求的主要目标。

“移动计算”作为现代计算机通信领域的一个新课题^[1-2]，利用了计算机技术和无线通信技术为用户提供了一种移动的计算环境和新的计算模式。移动计算技术可应用于以下几个方面：无处不在的工作范围，甚至是山谷、野外；随时随地办公，如汽车办公、产品销售、现场数据采集等。“移动计算”被认为是未来最有影响的四大技术方向之一，移动计算技术已成为研究的焦点。

无线通信中的移动可以分为三种类型：

(1) 无移动，包括两种情况。一种情况是静止不动；另一种情况是在同一个接入点的信号覆盖范围之内移动。

(2) 小区级移动，指移动终端从同一子网中的小区移到别的小区，称为越区切换。

(3) 子网级移动，指移动终端从一个子网移动另一个子网，也称为漫游。

基于 IEEE802.11 的无线局域网技术作为支持移动计算的手段之一，提供了一种链路层的移动计算解决方案^[3]。在最近几年，移动互联网发展很快，并在很多公司、学校、大型商场等得到了广泛应用。然而，目前这些应用还主要集中在简单的数据服务方面，如文件下载、WEB 网页浏览和收发电子邮件等，一些在有线网络下的多媒体应用如视频会议、VOIP 电话等在无线局域网下却不是很理想。这其中除了无线链路本身的缺陷外，如无线干扰、多径衰退等，缺乏 QoS 的支持是主要原因，特别是应用终端切换或者漫游引起的较高的延迟和丢包率使这个问题更加突出。因此，实现移动互联网的关键是要解决漫游和移动切换问题。

从计算机网络的角度上看，支持移动计算的技术方案主要有数据链路层方案和网络层方案。前者提供了对同质网络间的移动功能支持，而后者保证了用户跨不同子网和异构链路层技术之间的透明网络访问。

5. 2 移动 IP 协议

目前，随着 Internet 的广泛普及，用户产生了对移动终端移动性的需求，即希望主机在改变其所处的位置时无需中断已有的通信连接。TCP/IP 协议已经成为事实上的网络互连标准，在 IP 层加入对移动功能的支持可以使用户透明地进行网络访问。传统的 IP 技术无法支持移动终端的移动性，为此，IETF 定义了 Mobile IP^[4]。当移动节点从一个网络移动到另一个网络时，它就要执行移动 IP 切换。目前，在 IP 层主要利用移动 IPv4 或移动 IPv6 协议，但当移动结点距离家乡网络比较远且在微网内频繁移动时，移动 IP 开销会很大，为此现在又提出了针对这种情况的微移动 IP 协议，而把移动 IP 称为宏移动协议。

5. 2. 1 移动 IP 中的功能实体

在移动 IP 中定义了三种功能实体：

移动节点(MT)：一个可移动的主机或路由器，当它在切换链路时可以不改变 IP 地址而仍能保持正在进行的通信。

本地代理(Home Agent)：一个连接到移动节点本地网络的主机或路由器，它保存有移动节点的位置信息，当移动节点离开本地网络时能够将发往移动节点的数据包截获并转发给移动节点。

外地代理(Foreign Agent)：移动节点当前所在的外地网络上的一个主机或路由器，它能够把由本地代理送来的数据包转发给移动节点。

由于每一个子网内都必须同时具有本地代理和外地代理，所以通常把它们合起来通称为移动代理。

在移动 IP 中还有几个重要的概念：

转交地址(Care-of-address)：当移动节点漫游到外地网时，它从外地代理处获得一个转交地址并通知其本地代理。此后，移动节点的本地代理将把发给该移动节点原来地址的 IP 包接收下来并重新打包后发送到它的转交地址(通常是外地代理的 IP 地址)，再由外地代理转交到移动节点。

隧道(Tunnel)：当移动节点漫游到外地网时，由于其它主机并不知道它已漫游，故发给它的 IP 包仍然送至其本地网，移动节点的本地代理将把这些 IP 包接收下来并重新打包后发送到移动节点的转交地址。所谓移动节点的隧道，指传送这些重新打包后的 IP 包的由本地代理至转交地址的通道。在隧道的发送端，本地代理依据隧道协议把需传送的 IP 包重新封包，在隧道的接收端即外地代理完成拆包。

图 5-1 说明了各个功能实体之间的关系，图中的虚线指明了一个数据报文由

外部主机发给移动节点所经过的路径。

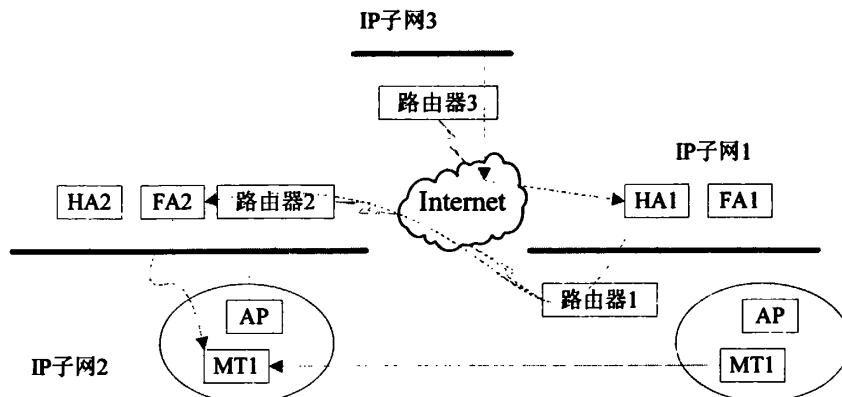


图 5-1 移动 IP 的网络构成

5. 2. 2 移动 IP 中的切换

移动 IP 是一种简单有效的网络层移动性解决方案，但它同时也带来 2 个问题：三角路由^[5]和切换。其中的切换问题是指从移动节点离开原先的外地网络开始，到本地代理接收到移动节点的新的注册请求为止的这段时间内，由于本地代理不知道移动节点的最新的转交地址，所以它仍然将属于移动节点的 IP 包通过隧道发送到原先的外地网络，导致这些 IP 包被丢弃，使得移动节点的通信受到影响，特别是切换频繁或者从移动节点到本地代理的距离很远时。

移动 IP 的切换工作过程如下：

(1) 代理搜寻(Agent discovery)：移动节点开机后，首先要确定自己是在本地网还是在外地网，这个过程称为代理搜寻。实现代理搜寻的方法有两种：由移动代理发送代理公告报文的方法和由移动节点发送代理征求报文的方法。前者由移动代理定期地发送代理公告广播报文，移动节点接收到该报文后判断自己处在何处。后者由移动节点主动发送代理请求广播报文，依据移动代理的应答报文移动节点判断自己处在何处。如果移动节点在外地网，它会从外地代理的代理公告或应答中获得转交地址，然后开始注册过程。

(2) 注册(Registration)：首先由移动节点向外地代理发出注册请求，外地代理会对注册请求消息作有效性检查，如果没有问题，则将该消息转发给移动节点的本地代理。本地代理收到注册请求消息后，绑定移动节点的 IP 地址和转交地址，并向外地代理发送注册应答消息指示注册成功。外地代理收到注册应答消息后，更新来访移动节点表，并将该消息转发给移动节点，移动节点收到成功的注册应答后就可以开始正常的报文发送与接收。

(3) 报文发送与接收：任何一个主机向移动节点发送的报文按照正常的路由

策略会被发送到移动节点的本地网，这时本地代理将截获这一报文，进行封装后通过隧道发送到移动节点的转交地址(通常是外地代理)，作为隧道出口的外地代理拆掉隧道封包后将报文转发给移动节点，移动节点要发送数据时则直接通过外地网的路由器发送。

5. 3 IEEE 802.11 对移动切换的支持

5. 3. 1 IEEE802.11 网络主要部件

IEEE802.11 网络包含 4 个主要的物理部件，如图 5-2 所示^[6]，它们是：

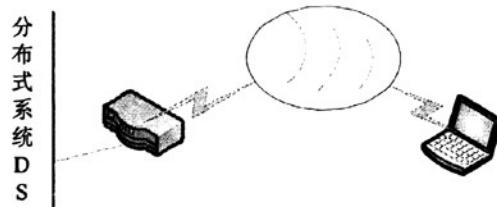


图 5-2 IEEE802.11 网络主要部件

(1) 分布式系统

当几个无线接入点（Access Point, AP）连接在一起构成一个更大的网络覆盖区域时，它们必须连接在一起以便跟踪终端节点的移动。分布式系统（Distribution System, DS）是 IEEE802.11 的逻辑部件，用来转发数据帧到其目的地。IEEE802.11 没有为分布式系统指定特定的技术方式，在很多商业化的产品中，分布式系统通常由桥接功能的引擎和分布式系统介质组成。这个分布式介质作为主干网络在 AP 之间进行帧的中继，因此，分布式系统可简称为主干网络。在几乎所有的商业化产品中，以太网通常作为主干网络技术来使用。

(2) 无线接入点 AP

IEEE802.11 帧要想通过分布式系统传送到其它地方，就必须进行类型转换，比如分布式系统是 IEEE802.3 以太网，则转换方式为 IEEE802.11 → IEEE802.3 帧。称之为无线接入点的 AP 就执行着无线一有线间的桥接功能，当然 AP 也含有其它功能，但桥接功能是最主要的。

(3) 无线媒体

为了把帧从一个终端节点传送到另一个终端节点，IEEE802.11 标准使用无线媒介并且定义了不同的物理层，比如为了支持 IEEE802.11 标准 MAC 层，从一开始定义的射频物理层和红外物理层，到基于新标准的 OFDM 物理层。

(4) 无线终端节点

建造网络的目的就是终端节点之间进行数据传送。我们通常把物理层和 MAC 层的接口规范符合无线介质特性的设备称为无线终端节点（Station, STA），比

如含有无线网络接口的计算设备，典型的终端节点一般是带有电池的膝上笔记本或者手持电脑等。

5. 3. 2 IEEE802.11 网络类型

在 IEEE802.11 标准中最基本的组成单元是基本服务集（Basic Service Set, BSS），它是由一组互相通信的节点组成。节点的通信在一个基本服务区域进行，并且该区域是由无线媒介的传播特性所决定。当节点处在这个基本服务区域时，它可以和 BSS 内的其它节点进行通信，基本服务集 BSS 一般分为 3 种类型：独立基本服务集（Independent Basic Service Set, IBSS）；基础设施服务集（Infrastructure BSS）和扩展服务集（Extend Service Set, ESS），如图 5-3 所示。

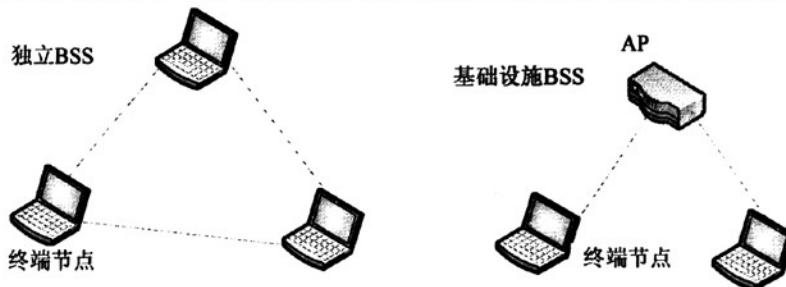


图 5-3 IEEE802.11 网络类型

(1) 独立服务集 IBSS

独立服务集 IBSS 没有中枢链路基础结构，它至少包含两个节点组成。在允许的范围内终端节点之间可以直接进行通信，但它不需要太多规划就能迅速建立，所以这类网络又称为自组网（Ad Hoc 网络）。

(2) 基础设施服务集

基础设施服务集（Infrastructure BSS）与独立服务集 IBSS 不同，它有一个无线接入节点 AP，AP 负责基础设施网络内所有通信，包括在同一个服务区内的节点之间的通信。在一个基础设施网络内，如果一个终端节点 STA 和另一个终端节点 STA 之间进行通信，则通信必须分两步：首先，发送方把数据发给 AP，然后 AP 把收到的数据包转发给目的终端节点 STA。因为所有的通信都经过 AP，所以基础设施网络的服务区域变为节点可以从 AP 进行数据传输的区域。尽管基础设施模式比 Ad Hoc 模式的节点直接通信占用了较多的传输资源，但是这种模式也有它自身的优点^[6]，如控制节点处于休眠模式等。

在基础设施网络模式中，终端节点 STA 必须和 AP 建立连接（associate）才能获得网络服务。连接过程是 STA 加入 IEEE802.11 网络的过程，包括信道搜索、加入、链路认证和连接等步骤，它在逻辑上相当于 STA 用网线与以太网的连接

过程。另外，在这类模式中，连接过程总是由 STA 主动发起的，AP 可以选择接收或者拒绝该连接，一个 AP 可以支持多个 STA 通信，STA 的个数受系统吞吐率大小控制。STA 的连接过程如图 5-4 所示^[7]。

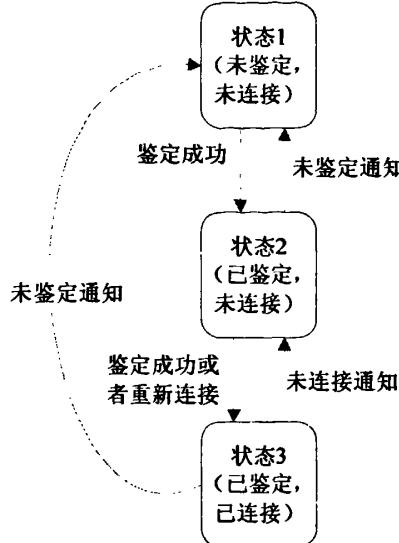


图 5-4 终端节点和 AP 连接过程状态转换图

(3) 扩展服务集 ESS

根据 IEEE 802.11 规范，在基础设施模式下，接入点 AP 和移动终端节点 STA 共同构成一个基本服务集 BSS。在这个 BSS 中，STA 必须和 AP 建立连接才能访问网络服务，然而一个 BSS 的网络服务覆盖范围有限，即一个 AP 覆盖小区大约为 100~200 米。单独一个服务集 BSS 在一个小的办公室或者家庭环境下已经足够了，但是它们却不能覆盖更大的网络区域。因此为了扩大网络覆盖范围，可以把多个 BSS 连接在一起共同构成一个扩展服务集（Extend Service Set，ESS）。多个 AP 可以通过一个主干无线 Mesh 网络相连，处于同一个无线 Mesh 网络的 STA 可以在一个 BSS 移动到另一个 BSS。为了提高网络的无线服务区域，802.11 通过分布式系统把多个 AP 互相连接起来的方法，构成一个扩展服务集，并且在实际网络环境中，类似于蜂窝电话系统，为了提供持续、不间断的 AP 覆盖区域，ESS 内的每个 BSS 覆盖区域是互相重叠的，如图 5-5 所示。在一个 ESS 内的节点，尽管它们不属于同一个 BSS，但互相之间仍可以通信。

IEEE802.11 标准提供了两种运作模式：特殊模式（Ad Hoc）和基础（infrastructure）模式。Ad Hoc 模式下的网络称为 Ad Hoc 网络（对等网络）^[8,9]，它覆盖的服务区称为 IBSS，对等网络用于一台无线终端和另外一台或者多台无线终端的直接通讯，该网络无法接入有线网络，只能独立使用。基础模式下的网络称为结构化网络，它由无线接入点、无线终端以及分布式系统组成，覆盖的区

域分 BSS 和 ESS。

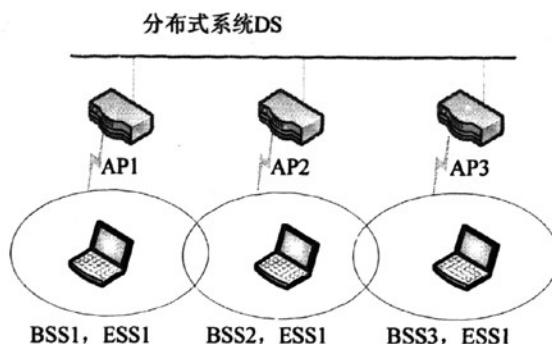


图 5-5 扩展服务集 ESS

5. 3. 3 IEEE802.11 切换类型

移动性是部署 IEEE802.11 网络的主要动机之一，终端节点 STA 和网络连接后可以移动并且可以在移动过程中同时进行数据传输。IEEE802.11 可以分为 3 种类型的移动方式或者切换类型^[6]：

(1) 无切换方式

当 STA 的移动没有超出所连接的 AP 覆盖区域时，不需要切换。这种类型可能时 STA 没有移动，或者 STA 只是在 AP 覆盖区域内移动

(2) 基本服务集内的切换

在一个基本服务集内，节点一直不断地监听从 AP 收到的信号强度(Received Signal Strength Indication , RSSI) 大小。并且 802.11 支持 ESS 内 MAC 层的切换。如图 5-5, ESS 内共有 3 个 AP, 开始时, STA 和 AP1 相连, 即处在 BSS1 内, 当 STA 移出 BSS1 的覆盖区域并且进入 BSS2 的覆盖区域, 即在 STA 和 AP2 建立了连接, 此时, 基于 BSS 的切换过程就发生了。重新连接以后, STA 在 AP2 继续数据的转发。

基于 BSS 的切换需要 AP 之间合作，例如在上述场景中，AP2 需要通告 AP1 其 STA 已经和自己相连等，但是 802.11 却没有规定 STA 在切换时 AP 之间的通信方式。

(3) 跨 ESS 切换

跨 ESS 切换是指终端节点从一个扩展集 ESS 移动到另一个扩展集 ESS，或者从一个子网切换到另一个子网。然而 802.11 并不支持此类切换，除非允许终端节点离开旧 ESS 后，在新的 ESS 重新连接。按照目前的 802.11 标准，当终端节点在扩展集 ESS 之间切换时，高层的连接肯定会中断，因此要保持连接不会中断，需要上层协议的支持。在上层采用移动 IP 协议可以保证跨 ESS 切换时上层连接不会中断。图 5-6 是跨 ESS 切换示意图，当节点从 ESS1 切换到不同网段

的 ESS2 时，连接发生中断。

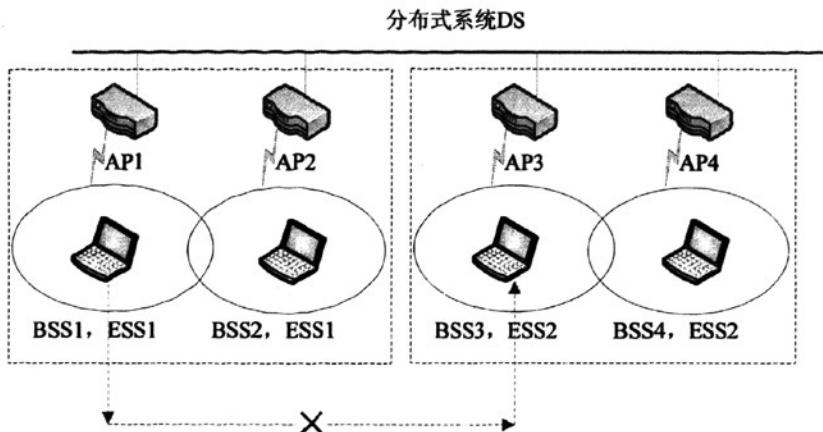


图 5-6 跨 ESS 切换

本论文讨论的切换过程是发生在 ESS 网络中的，因为 IEEE802.11 支持同一个 ESS 中不同 BSS 之间的移动终端切换，但不支持不同 ESS 之间的站点切换。

5. 3. 4 切换技术分类

从目前已有的文献看，主要有以下切换方法^{[10][11]}

(1) 硬切换(Hard-Handoff)

也称为数据包的非转发方式(No-Forward)。移动终端从当前的 AP 向另一个 AP 移动时，如果从当前 AP 收到收到的信号比较弱，而从新 AP 收到的信号比较强，则移动终端 STA 立即断开与旧 AP 的连接，再与新 AP 建立连接。这种方式是移动主机在切换到新的 AP 时，停止从旧的 AP 接收数据，立即从新的 AP 进行数据的收发。由于不对原来的连接状态或者上下文进行转发，因而切换过程相当快。但是，在切换期间发往旧 AP 的数据包就有可能丢失，它是以牺牲丢包率来获得较小切换延迟的。当移动终端 STA 不具备用两个信道与新旧 AP 同时通信的能力时，大多采用此类切换方式，如 TDMA 无线网络

(2) 平滑切换(Smooth-Handoff)

也称为数据包的转发方式(Forward)^[12-14]，为了降低硬切换的丢包率，当移动终端 STA 切换到新的 AP 时，新 AP 立即通告给旧 AP。旧 AP 收到通告信息后，根据通告信息中新 AP 的 MAC 地址，把自己缓存的发往移动终端 STA 的数据包转发到新 AP，由新 AP 向移动终端 STA 转发。之后新 AP 发送路由更新信息，以后数据就按照新路由进行数据传送。这种方式在一定程度上减少了丢包数量，但由于旧 AP 对数据包的缓存和转发，反而增加了切换延迟时间。

(3) 准软切换(semi-Soft Handoff)^{[15][16]}

这种切换是移动终端 STA 在跨越两个小区时有能力与两个 AP 同时进行通信，即移动终端 STA 切换到新的 AP 时并不与原有的 AP 断开连接，而是继续从新旧 AP 进行数据的传送，直到移动终端 STA 完全进入到新的 AP 后，才断开与旧 AP 的连接。它的特点是丢包率低和较小的切换延迟。

(4) 基于组播的切换(Multicast-basedHandoff)^[17]

移动终端 STA 在移动过程中，通过接收新 AP 发送的信标获知邻居 AP 的存在，并设法通告给新 AP，如移动终端 STA 通过当前所连接 AP 通告给新 AP 让其加入组播组，新 AP 在加入组播组后代表移动终端 STA 接收数据，但它并不向移动终端 STA 发送数据，只是把数据暂时缓存，直到移动终端 STA 切换完成以后，新 AP 才开始向移动终端 STA 发送数据。基于组播的切换方式具有丢包率低的特点，相对于平滑切换，不需要数据包的转发，切换延迟也较小。但是，这种方式需要维护一个组播树，在移动环境下，组播树的频繁变化，维护开销较大，限制了它的使用。

考虑到 AP 的切换机制，可以分为两种结构：基础结构（Infrastructure Topology），中心结构（Center Topology）。基础结构指的是由移动终端最终决定切换的目标 AP；中心结构是指把切换的选择权交给 AP。

5. 4 IEEE802.11 标准 MAC 层切换机制

对于一个正在通信的移动终端 STA，IEEE 802.11 标准的 MAC 协议并没有提供一个无缝切换（Seamless Handoff）算法，即 STA 在向另一个 AP 小区切换时，必须断开与当前的 AP 连接，之后 STA 向新 BSS 中的 AP 发送重新关联（re-associate）请求。根据 IEEE 802.11 标准，这个切换过程主要包括三个阶段，即发现新 AP 阶段、认证阶段和重新关联阶段。每个阶段都花费一定的时间且时间长短不容易控制，它和移动终端 STA 所处的周围网络环境及不同厂家的无线网络产品也有很大关系，例如，符合同一 IEEE 802.11 的无线网卡，厂家不同，切换时间相差很大^[18]，表 5-1 是各个厂家的无线产品切换时间长短对照。

表 5-1 不同厂家产品切换时间对照表

移动终端	无线接入设备	切换延迟时间(ms)
Lucent	Lucent	90~200
Cisco	Lucent	250~400
Lucent	Cisco	35~105
Cisco	Cisco	350~410

从表 5-1 可以看出切换延迟时间甚至高达 400ms，而且在切换过程中，STA 不能与 AP 进行数据的传送。结果，切换期间发往旧 AP 链路上的数据包就有可

能丢失,传输所要求的 QoS 就会受到影响。另一方面,这么长的切换时间对 VoIP、视频等实时应用的话音质量、视频图象质量也会造成严重影响。

5. 4. 1 切换准则

切换算法都有其不同的切换准则,这些算法根据不同的准则来选择各种参数作为切换判决的输入。判决参数主要包括接收信号强度、信噪比、业务负载、移动节点速度、新呼叫和切换的到达特性等。

基于信号强度的切换准则简单、直接,已被许多的算法广泛的采用。许多系统,都是干扰受限,信号强度在一定程度上体现了通信质量,并且能大致估计基站与移动台的距离。基于信号强度的准则可以细分为相对信号强度、具有门限规定的相对信号强度、具有滞后余量的相对信号强度等多种准则。相对信号强度准则总是选择具有最强接收信号的基站。具有门限的相对信号强度准则在移动站当前基站的信号足够弱且新基站的信号强于本基站的信号情况下才进行切换。具有滞后余量的相对信号强度准则仅允许移动台在新基站的信号强度比原基站信号强度强很多的情况下才进行切换。具有滞后余量和门限规定的相对信号强度准则仅允许移动台在当前服务基站的信号低于规定门限,并且新基站的信号强度高于当前基站给定的滞后余量时,才进行切换。信号概率统计准则预测两个基站下一次信号强度小于指定阀值的概率,当服务基站下一次信号测量数据小于指定的阀值的概率比新基站相应的概率大很多时,进行切换。

其次是基于信噪比的切换准则。在通信系统中信噪比是评价通信质量、系统容量和业务特性等方面的重要参数,基于信噪比更能体现切换的连续性和 QoS 保证。一般根据误码率 BER(或误块率 BLER)来确定目标信噪比。该准则缺点是信噪比有可能随着无线环境的改变而来回抖动。

图 5-7^[19]描述的是两个邻近 AP, AP1 与 AP2 之间的 SNR(信噪比)的变化。两条相交曲线以上的区域是当前 AP 与其它 AP 的覆盖区发生重叠的高概率区。当一个移动 STA 从 AP1 的覆盖范围移动进 AP2 的覆盖范围时,来自 AP1 的信号的 SNR 降低,来自 AP2 的信号的 SNR 提高。 $S_1(x)$ 表示在 x 点 AP1 的 SNR 的值, $S_2(x)$ 表示在 x 点 AP2 的 SNR 的值。切换过程的触发基于两个参数,切换门限 T_h ,滞后值 Δ ,两者都是正值。在任一点 x , STA 当前与之连接的 AP 是 AP1,当且仅当公式 5-1 成立时,该 STA 发起从 AP1 到 AP2 的切换:

$$\begin{cases} S_1(x) < T_h \\ S_2(x) - S_1(x) > \Delta \end{cases} \quad (5-1)$$

切换门限可以避免不必要的切换发生,滞后值则可以避免切换的乒乓效应发生。

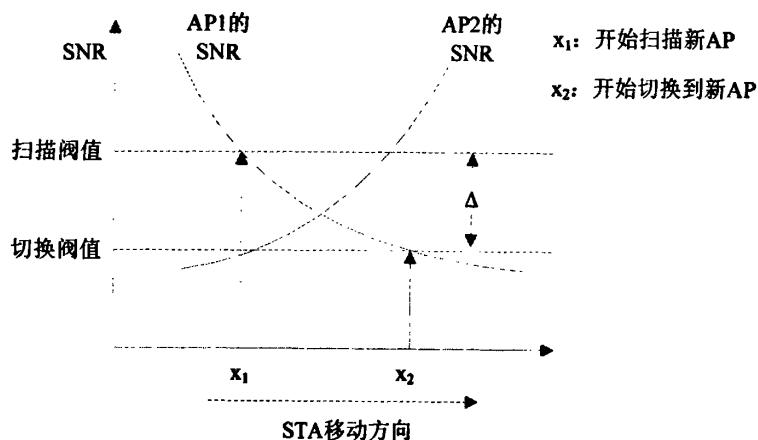


图 5-7 信噪比与切换的关系

5. 4. 2 切换逻辑过程

根据 IEEE802.11 协议规范，移动终端的切换主要有三个阶段^{[19][20]}，即扫描发现阶段、认证阶段和重新关联阶段，如图 5-8 所示。

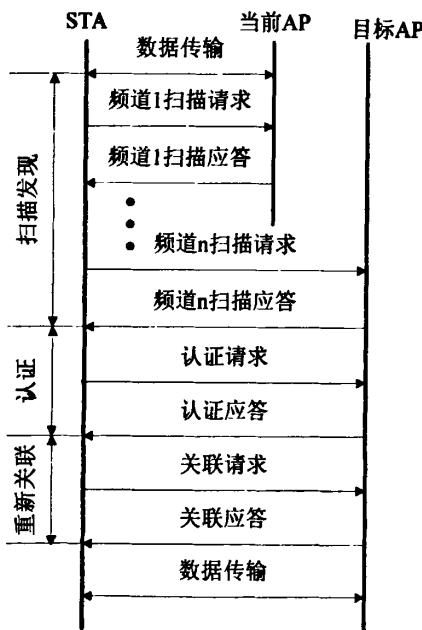


图 5-8 IEEE802.11 的 MAC 层逻辑切换过程

(1) 扫描发现阶段

在第一阶段即发现阶段(Discovery): 由于用户的移动性, 当站点移动到 AP 覆盖的边缘位置, 移动终端 STA 连接的当前 AP 的信号强度会减小而导致和当前 AP 通信中断, 或者收到当前 AP 信号的信噪比低于其预先设定的临界值, 这样就引发了切换的开始。STA 需要在当前的范围内发现新的潜在的 AP 与之关联。

发现 AP 的阶段也就是探测在当前范围可能存在的 AP 的阶段。这是通过 MAC 层扫描(scan)的功能来完成。这又有被动扫描和主动扫描两种方式。

被动式的扫描切换是 STA 被动接收周围 AP 周期地广播的信标帧信息来决定切换时机、请求切换和连接的，即在 802.11 协议下规定 AP 周期性地在本身工作的频道广播自身的情况表明自己的存在。具体就是当 STA 发现当前连接的信号越来越差且低过一定的阀值(threshold)时，将开始探测周围 AP 的信标帧；STA 一方面提取信标帧中的 AP 信息，另一方面同时又通过接收信号情况分析出某个 AP 的信号质量；通过二者获得待接入 AP 的参数，然后发送关联或重关联请求，请求切换到目标 AP 上，最后与旧的 AP 解除关联来完成切换。被动式扫描切换有固有的缺点，这是由它的扫描方式决定了的。被动扫描采用的方式是逐个地在各个频道内停留一个最大时间(由 channelTime 参数决定)，在这期间探测周围 AP 的信标帧。因为由 AP 管理的信标帧的发送周期是固定的，而且一般设置为 100ms。又因 802.11 的可用频道数为 12 个。显然，ChannelTime 不能小于信标帧的周期，否则将错过信标帧。所以最小的时间将为 1200ms。若第一次错过信标帧等到下次，将会是 1200ms 的整数倍时间。这个时间很难改变，所以用该扫描方式来快速切换时不现实的。

主动式的切换是由移动终端 STA 发起的，当 STA 发现连接质量越来越差且低于某一阀值时，就主动地发送探测帧，扫描全部频道，并且选择允许接入的最好 AP，进而发起切换过程。主动式切换是主要采用的切换形式。因为它由 STA 主动发起，简化了 AP 的管理信息量，并且不必等待 AP 的周期帧，发现自己的连接不好时即可马上发送探测帧，进行扫描、切换。

更具体的主动扫描步骤如下：

- 标准的信道竞争过程，用 CSMA/CA 获取无线信道的占用权；
- STA 发送一个包含自身 MAC 地址的广播探测帧；
- 探测定时器启动；
- STA 等待回复；
- 如果在 MinChannelTime（信道最小驻留时间）时间内没回复，就扫描下一帧；
- 如果在 MinChannelTime 内有一个或多个回复，STA 则在到达 MaxChannelTime（信道最大驻留时间）时停止接收探测回复，同时处理探测时间内接收到的所有回复；
- 在下一个频道重复前面 6 个步骤，直到频道扫描完。

(2) 认证阶段

第二阶段即为认证(Re-authenticate)，一个移动终端节点 STA 首先要通过网

络的认证，证明了自己的身份后才允许加入网络。STA 成功同步到所希望的 BSS 后，必须通过 MAC 层的认证。目前，IEEE 定义两种认证方式：开放系统认证(open system)和共享密钥认证(shared Key)。

所有认证都是单播帧，因为认证发生在两个站点之间。在 ESS 中，认证发生在移动终端 STA 和 AP 之间；在 IBSS 中，认证发生在任意两个 STA 之间。开放系统认证是 802.11 的缺省认证机制，整个认证过程以明文方式进行。一般而言，凡是使用开放系统认证的客户端都能被成功认证，因此开放系统认证只适合安全要求较低的场合。开放系统认证整个过程只有两步，即认证请求和响应，请求帧中并没有包含涉及认证的任何与客户端相关的信息，而只需在帧体中指明所采用的认证机制和认证事务列号。另一种认证机制是共享密钥认证，这是可选的。用户关注的两个主要问题：一是网络闯入者不能用相似的无线局域网设备存取用户的网络资源；二是空中传输数据不被偷听。

目前商业化的无线网络都有专门的 AAA 服务器提供认证、计费和账户管理等功能，如文献[21]中 IAPP 的认证过程是首先 AP 把移动终端的认证请求发送给认证服务器，服务器把经过认证的移动终端相关信息发送给 AP。一般情况下，AAA 服务器距离 AP 很远，如果每次切换的时候，认证处理过程都经过 AAA 服务器，势必增加切换的延迟。为了缩短每次切换时的认证时间，Sangheon Pack 等人提出了一种提前认证的(Pre-Authenticate)快速切换模型^[22]，即移动终端进入一个 AP 的访问区域时，不但和当前的 AP 执行认证过程，而且邻近的 AP，也执行和该移动终端有关的认证。这样，当移动终端切换到一个新的 AP 时，与该 AP 有关的认证信息已经存在，省去了再与认证服务器进行认证处理的时间，相应的切换延迟也进一步缩短然而基于认证服务器的方法不是很通用，很多用户在自己的网络内并不希望增加新的网络实体，只要求在移动终端和 AP 之间执行该过程。

(3) 重新关联阶段

前两步通过以后，便进入重新关联阶段(Re-Associate)阶段继续数据的传送。

5. 4. 3 切换具体步骤

作为一种链路层的切换，目前 IEEE802.11 标准主要使用硬切换方法，即没有采取什么措施，直接断开与旧 AP 连接，再与新 AP 建立连接。从图 5-8 可以看出具体切换步骤如下：

- (1) 移动终端在当前小区发现从 AP 收到的信号强度低于门限值，启动信道扫描过程，分为主动扫描或被动扫描(SCAN)；
- (2) 选择收到的信号强度 RSSI 最大的 AP 并发起加入操作(JOIN)；

- (3) 移动终端向新 AP 发起链路认证请求(Authenticate Request);
- (4) 新 AP 向移动终端发送认证响应帧(Authenticate Response);
- (5) 如果认证通过, 则移动终端向新 AP 发起重新连接请求(re-Associate Request);
- (6) 新 AP 向移动终端发回连接响应(re-Associate Response);
- (7) 如果连接成功, 则进行数据的收发。

5. 4. 4 切换问题分析

从切换连接过程可以看出, 移动终端在切换时并没有考虑在旧 AP 链路上的数据帧, 因此这些数据帧就有可能丢失。丢包问题是切换所遇到的主要问题之一。

切换引起的另一个问题是延迟问题。影响 MAC 切换的延迟包括三个部分: 探测延迟、认证延迟和重新关联延迟。探测延迟, 指移动终端主动扫描时所发送的探测消息, 或被动扫描时等待信标帧的广播消息, 把这个过程中所需要的时间称为探测延迟。认证延迟, 包括两认证帧的交换, 认证所包含的帧的个数取决于 AP 的认证方式。重新关联延迟, 指重新关联帧的交换过程, 移动终端节点收到成功认证消息后, 向 AP 发送重新关联的请求消息, 接收到 AP 的重新关联响应帧后完成切换。理想的主动扫描切换总时间^[23]如公式 5-2 所示:

$$H_d = S_d + A_d + R_d \quad (5-2)$$

公式 5-2 中, H_d 为切换总时间, S_d 为扫描时间, A_d 为认证时间, R_d 为重新关联时间。

但是, 实际的切换延迟与移动终端 STA, 接入点 AP 的缓冲数据队列的长度和数据的传输速率有关系, 因此, 时间的切换延迟时间为:

$$H_d = S_d + A_d + R_d + C_t \quad (5-3)$$

终端节点在移动, 物理上就存在一个移动速度的问题。这在切换过程也不是一个简单的因素, 而是一个对切换的成功与否、网络性能等有重要影响的问题。试想, 如果 AP 的覆盖区域比较小, 而且终端移动的速度又很快, 那么终端将很快移出覆盖范围, 根本无法完成切换, 造成无线网络不可用的极端情况。另外, 因为通信双方的相对高速移动会在信号传输上产生多普勒频移问题, 频移过大也会影响信号的正确接收。关于终端的移动速度问题, 文献[24]中给出了一个结论:

$$V_{\max} < \frac{R}{T_{\max}} \left(1 - \sqrt{\frac{Thresh_{\min}}{Thresh_{\max}}} \right) \quad (5-4)$$

公式 5-4 中, V_{\max} 为最大移动速度, T_{\max} 为最大的切换时间, R 为 AP 的

信号覆盖范围, Thresh_{\min} 为终端开始切换时的相对新 AP 的信号阀值, Thresh_{\max} 为切换完成时的阀值, k 是与物理信号的功率、调制方法相关的系数。由公式可以看出, 最大的移动允许速度与最大切换时间是成反比的关系。

5. 4. 5 IEEE802.11f 标准中的 IAPP 协议

为了降低切换所引起的丢包率问题, 一些文献或标准草案^{[12][21]}提出了基于无线局域网的平滑切换方法, 也称为转发方法, 如由 Lucent 带头起草的 IEEE802.11f 中的 IAPP(Inter-Access-Point-Protocol)协议^[21], 平滑切换步骤如图 5-9。

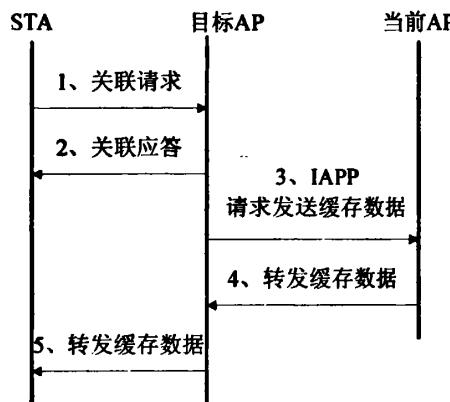


图 5-9 平滑切换过程

(1) 移动终端 STA 首先向新 AP 发起的重新连接请求, 在请求帧中除了包含其它的连接信息外, 还包括旧 AP 的 MAC 地址; 同时, STA 把新 AP 作为自己的缺省网关;

(2) 新 AP 收到重新连接请求帧后, 除了向 STA 发出响应外, 还在自己的设备信息表(SIB)中添加该 STA 的相关表项, 以便 AP 收到发向 STA 的数据后进行转发。

(3) 新 AP 通过有线分布式网络(DS)向旧 AP 发出通知消息, 告诉旧 AP 移动终端已经移动到自己的 AP 小区。通知消息中含有旧 AP 的 MAC 地址。

(4) 旧 AP 从新 AP 收到通知消息以后, 一方面在 SIB 表中删除 STA 的相关信息, 另一方面检查在数据缓冲区和重传缓冲区中是否有发往 STA 的帧, 如有, 就把这些帧转发到新 AP.

(5) 新 AP 收到转发来的数据帧后, 立即发向 STA.

(6) 最后, 新 AP 向有线网络中广播一个重定位信息帧, 类似于地址解析帧 ARP, 之后网关节点便按新路径向 STA 传输数据。从平滑切换的过程上看, 新 AP 收到重新连接请求帧后, 新旧 AP 之间有一个交互过程, 即 STA 与新 AP 连接成功以后并不能立即接收数据, 需要等到旧 AP 把数据转发来以后才能收到数

据，因而增加了切换延迟。所以说这种切换方式相对于硬切换来说，是以增加切换延迟换取低丢包率的。例如采用 IAPP 方式的整个切换延迟甚至高达 100ms^[25]，这对实时应用 VoIP 是很不利的。

硬切换和基于转发的平滑切换在丢包率和切换延迟方面各有千秋，综合利用二者的长处，提供一种既能达到降低切换延迟，又能减少丢包率的目的，即快速又平滑的无缝切换方法，是 IEEE802.11 无线网络通信服务质量(QoS)对切换的必然要求。

5. 5 基于中继路由器的存储转发平滑切换算法

骨干无线 Mesh 网络可以看着普通的无线局域网结构，它采用无线接入点(AP)以 Ad Hoc 方式相连，AP 之间通过无线方式进行通信。骨干无线 Mesh 网络使用固定不动的路由器在无线网关和终端节点之间进行数据转发，无线接入点(AP)既可以提供接入服务，也提供路由功能，我们通常也称为无线路由器。终端节点(STA)通过 AP 接入无线 Mesh 网络，当 STA 从一个 AP 移动到另一个 AP 时，它将无线连接切换到距离最近的 AP。在无线 Mesh 网络中，为了提供满足 Qos 要求的各种应用服务，STA 必须能够有效地在 AP 之间进行切换。但是，IEEE802.11 标准中定义的切换本身是硬切换，在切换过程中，终端节点 STA 必须停止与当前接入点 AP 的通信，直到 STA 切换成功到新 AP 后，才继续和新 AP 通信。因此，在硬切换过程发送到旧 AP 的数据包将不在转发到 STA，从而造成数据的丢失。

延迟和数据包丢失是切换过程中不可避免的两个最主要的问题，为了减少切换延迟、消除数据包的丢失，很多专家学者进行了不懈的努力，提出了很多解决方案。杨仁忠^[11]研究了 MAC 层的切换机制，提出了基于 AP 预先转发的 802.11 无线局域网切换机制，缩短了切换时间，降低数据包丢失。Sangheon^[22]分析了 MAC 层预先估计和预先认证的算法，证明了 802.11b MAC 层切换延迟可以缩短。但是，这些算法都要求切换过程中的数据全部缓存在旧 AP 中，当移动终端成功切换到新 AP 后，缓存在旧 AP 的数据通过分布式系统转发给新 AP，进而发送给移动终端。可以看出，从旧 AP 到分布式系统再到新 AP，将会延长数据转发的时间。同时，在多跳的无线 Mesh 网络中，采用无线传输，将不可避免地造成数据包的丢失，并使延迟更严重。有的算法^[11]要求新旧 AP 在互相的传输范围内，这样，新旧 AP 之间可以直接进行数据包的交换，但这又要求两个 AP 必须在相互的传输覆盖范围内，不但需要增加 AP 的数量，而且还会造成干扰。

这里提出一种基于中继路由器的存储转发算法，数据包缓存在选定的一组中继路由器上，当移动终端成功切换完成后，这些缓存的数据包将从中继路由器上

直接转发到移动终端，缩短了数据包转发的无线距离。该算法采用优化链路状态路由协议（Optimized Link State Routing, OLSR）^[26]，中继路由器就是 OLSR 协议中的多点中继（MultiPoint Relay, MPR）。该算法最大的优点是缩短缓存数据包的转发跳数，从而显著降低了切换造成的数据包丢失、减少了切换延迟。

5. 6. 1 优化链路状态路由协议 OLSR

OLSR 路由协议是由 IETF MANET(Mobile Ad hoc NETwork)工作组为无线移动 Ad Hoc 网提出的一种标准化的表驱动式优化链路状态路由协议。它主要采用两种控制消息分组，HELLO 分组和 TC(Topology control)分组。这两种控制消息分组中都包含序列号，通过对序列号的比较，节点可以很容易的分辨出控制消息分组是否为最新的，而不会受到分组重传的影响。

(1) HELLO 消息和多点中继节点的选择

HELLO 消息用于建立一个节点的邻居表，报文中可以包括邻居节点的地址以及本节点到邻居节点的延迟或开销，OLSR 采用周期性地广播 HELLO 分组来侦听邻居节点的状态，节点之间无线链路状态包括：非对称链路，对称链路，一般链路和失效链路；邻居状态有：对称邻居、多点中继节点(MultiPoint Relays, MPR)邻居和非邻居。HELLO 分组只在一跳的范围内广播，不能被转发。HELLO 分组同时也用于向邻居节点通告本节点的多点中继节点 MPR 的选择。所以在邻居通告完成之后，每个节点再分别计算自己的 MPR，再在后面交互的 HELLO 分组中包含各自的 MPR 信息。

每个节点在自己的一跳邻居节点之中选择一部分节点作为多点中继站 MPR。节点在从自己的一跳邻居节点中选择 MPR 时，必须选择和自己存在双向对称链路的节点。计算原则是：节点与 MPR 之间必须是双向对称链路，节点所发送的分组通过 MPR 的中继，能够到达所有对称的两跳邻居节点。如果能够满足这一点，那么 MPR 就能有效地进行 TC 分组的转发，同时，应该使 MPR 的数量尽量的少。采用这种对称链路策略形成的路由避免了数据分组在单向链路上传送时如何获得分组接收确认的问题。

与 Ad Hoc 动态变化的网络拓扑结构相比，在无线骨干 Mesh 网络中，由于无线 Mesh 路由器都处于固定静止状态，整个网络的拓扑结构一旦建立就基本上不会改变。因此，在无线骨干 Mesh 网络中，MPR 和它的邻居节点(MPR Selector)基本上是固定不变的。

(2) TC 分组的转发

与 HELLO 消息相反，TC 分组必须被广播到全网。每个 MPR 节点使用 TC 控制消息声明链路状态信息，MPR 节点并不发布与所有邻节点相连的链路信息，

而只发布它与部分邻居的链路子集，这些邻居是它的多点中继选择节点(MPR Selector, MS)，也就是节点只发布与它的 MPR Selector 间的链路。通过这种方式，压缩了 TC 控制分组的长度。每个节点根据收到的 TC 分组和自己的邻居信息来计算出网络的拓扑图。

只有被选为 MPR 的邻居节点才负责转发 TC 控制消息。为了使得全网的节点建立起一张完整的网络拓扑图，必须将包含网络拓扑消息的 TC 分组洪泛到全网。同时，考虑到无线链路带宽的局限性，又必须对广播分组数量进行控制，OLSR 协议不再采用传统的链路状态路由协议中的方法(每个节点的邻居节点无选择性地转发 TC 分组)，而是在该节点的邻居节点中选择一部分节点作为转发 TC 分组的中继节点来减小控制分组的泛洪(Flooding)范围。全网范围内都只有选定的中继节点才转发控制分组，其它邻节点收到该节点发送的控制分组时，只进行处理而不转发。这样就显著地减少了网络中广播的控制分组数量。这些被选中的节点称为多点中继站 MPR。

如图 5-10 所示，节点 A 周期性地发送 TC 分组，在 TC 分组中就包含了将该节点 A 选为 MPR 的邻居节点地址(称为 MPR selector)，当节点 B 和节点 C 收到节点 A 发送的 TC 分组时，节点 B 和节点 C 首先判断自己是不是属于节点 A 的 MPR，节点 B 和节点 C 都发现自己属于节点 A 的 MPR，分别表示为 MPR1 和 MPR2，它们再根据 TC 分组中的序列号来判断该 TC 分组是否是最新的，如果是，则转发该 TC 分组，否则丢弃该分组；而其他的两个邻居节点都发现自己不属于节点 A 的 MPR，则不转发该 TC 分组。

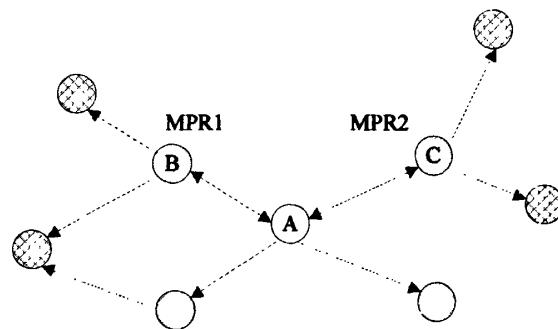


图 5-10 节点的两跳邻居节点和 MPR

(3) 路由的建立

OLSR 逐跳查找路由，它要求节点周期地发送 TC 分组来发布 MPR Selector 信息，以帮助其它节点建立到它的路由。需要根据与邻节点的链路变化率，增加或减小发送 TC 分组的时间间隔。OLSR 协议根据选择的 MPR 集来计算到所有目的节点的路由，即 MPR 用于组成给定节点到网络中任意目的地路由。网络中每个节点周期性地广播它的 MPR Selector 的信息。每个节点收到这一 MPR

Selector 后，计算并更新自己到达每个已知节点的路由。因此，路由就是通过从源到目的节点的 MPR 的逐跳节点序列。

5. 6. 2 骨干无线 Mesh 网络模型

骨干无线 Mesh 网络如图 5-11 所示，由多个静止的无线 Mesh 路由器（Wireless Mesh Router, WMR）组成，其中，把提供接入服务的路由器称为 AP，把提供中继转发功能的路由器称为中继路由器（Relay Router, RR），整个网络通过 WMR 连接到一个或者多个无线网关上，提供对 Internet 的访问。网络利用 Ad Hoc 路由协议实现数据业务在无线网关和移动终端节点之间的相互发送，在本文采用 OLSR 协议。如图 5-11 所示，终端节点 STA 当前连接的无线接入点为 AP1，当它移动时可能引起 AP 之间的切换，可能的移动路径和发生切换的 AP 包括：AP1 → AP2, AP1 → AP3, AP1 → RR2, AP1 → RR1。在骨干无线 Mesh 网络中，一旦 OLSR 路由建立完毕，MPR 就选定了并且一直保持不变。图 5-11 中，假设 RR1、RR2 和 RR3 为 OLSR 协议选定的 3 个 MPR。

无线 Mesh 网络在无线网关通过高速无线链路接入 Internet，主要的数据流业务是从无线网关到各个移动终端节点，因此，无线网关中包含到所有节点的路由。无线网关不但提供到 Internet 的接入服务，而且还负责管理所有移动终端节点 STA 和与之相连的接入点 AP 的绑定关系。当终端节点移动发生切换后，无线网关需要更新它的绑定信息。

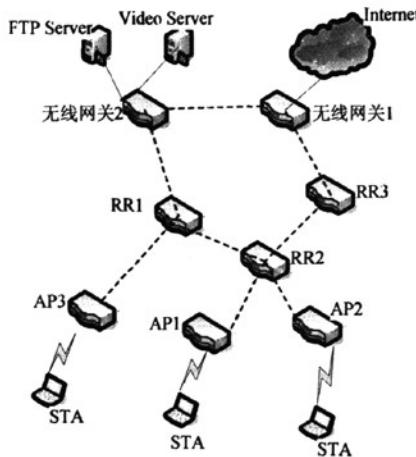


图 5-11 骨干无线 Mesh 网络模型

5. 6. 3 中继路由器中数据包的缓存

在骨干无线 Mesh 网络中，数据包通过多跳无线中继路由器从无线网关转发到终端节点，由于无线传输的特性，所有中继路由器都工作于混听模式，可以监

听到来自邻居节点的无线传输。因此，中继路由器可以监听到邻居节点的数据包发送，如果在邻居节点的传输范围内，就可以将数据包接收下来并将其缓存。同时，多跳路径的中继路由器检查通过它进行转发的数据包的包头，确定该数据包的目的地址。如果该数据包的目的地址是中继路由器的一跳邻居无线接入点，就将该数据包缓存下来。

如图 5-11 所示，AP1 是 STA 当前的接入点并进行通信。数据包的转发路径为：无线网关 1→RR3→RR2→AP1→STA。当 RR2 通过无线链路将数据包转发到 AP1 时，RR2 检查包头，它的目的地为 AP1，于是将该数据包缓存到缓存器中。由于 RR1 工作在混听模式，如果 RR1 在 RR2 的传输范围内，就可以监听到从 RR2 转发到 AP1 的数据包，从而将这些数据包缓存。

5. 6. 4 接入点注册和数据包转发

当终端节点 STA 远离正在连接的 AP 而移动到另一个 AP 附近时，STA 的连接点从以前连接的旧 AP 切换到新 AP。与新 AP 成功连接后，新 AP 首先向无线网关发送注册请求（Registration Request）消息，无线网关成功收到注册请求消息后回应注册应答（Registration Reply）消息通知注册成功。网关中的注册信息包含移动终端 STA 的位置信息和向移动终端 STA 发送数据包的路由信息，在同一个无线 Mesh 网络中移动的 STA 将在同一个无线网关中。

成功发送了注册请求消息并收到注册应答消息后，新 AP 开始发送转发通知（Forwarding Notification）消息到中继路由器上，中继路由器回应确认（Acknowledge）消息表明成功接收到转发通知消息。确认消息触发中继路由器从缓存器中取出数据包向新 AP 转发。如图 5-11 所示，中继路由器 RR2 和 RR1 缓存了从无线网关 1 转发到 AP1 的数据包，如果终端节点 STA 的接入点从 AP1 切换到 AP2，那么 RR2 中缓存的数据包将很快转发到 AP2 中，如果 STA 的接入点从 AP1 切换到 AP3，那么 RR1 中缓存的数据包将很快转发到 AP3 中。

在传统的存储转发平滑切换算法中，旧 AP 中缓存的数据包通过多跳网络转发到新 AP。在图 5-11 中，采用传统的存储转发平滑切换算法，数据包缓存在 AP1 中，当 STA 从 AP1 切换到 AP3 时，数据包的转发路径为：AP1→RR2→RR1→AP3。而基于中继路由器的存储转发平滑切换算法可以显著减少转发的跳数，当 STA 从 AP1 切换到 AP3 时，数据包的转发路径为：RR1→AP3，从而可以在很大程度上改善了切换延迟和丢包的现象。

5. 6. 5 切换算法性能分析

(1) 仿真环境设置

利用 OPNET 仿真工具来分析基于中继路由器的存储转发平滑切换算法，并与传统的硬切换、存储转发平滑切换算法相比较，仿真环境如图 5-11。在仿真建模中，无线 Mesh 网络采用 8 个静态的无线 Mesh 路由器。每个路由器的传输范围为 250 米，无线 Mesh 路由器之间的无线链路速率为 2Mbps，数据发送速率为 320Kbps，数据包大小为 1024bytes。终端节点的移动速度为 2.5 米/秒。中继路由器的缓存大小为 125 个数据包。

(2) 仿真结果和分析

为了评价基于中继路由器的存储转发平滑切换算法，仿真采用两个指标来衡量该算法的性能：切换延迟（Handoff Delay），包丢失数量（Number of Packet Loss）。仿真结果如图 5-12，图 5-13 所示。

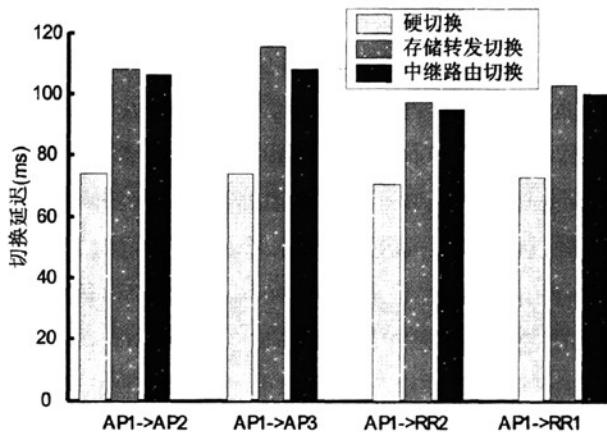


图 5-12 切换延迟

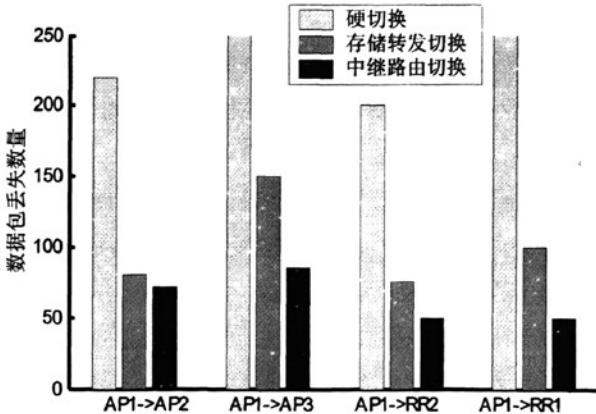


图 5-13 数据包丢失数量

图 5-12 为硬切换、存储转发切换和中继路由切换的平均切换延迟时间情况。如图所示，当 STA 从 AP1 分别切换到 AP2，AP3，RR2，RR1 时不同切换算法的切换延迟时间。从仿真结果可用看出，在这 4 中切换场景中，硬切换的延迟时间最

短。与传统的存储转发平滑切换算法相比，基于中继路由器的存储转发平滑切换算法的切换延迟得到了一定的改善，这是因为基于中继路由器的算法缩短了缓存数据包的转发路径。

图 5-13 硬切换、存储转发切换和中继路由切换的数据包丢失情况，如图所示，当 STA 从 AP1 分别切换到 AP2, AP3, RR2, RR1 时不同切换算法的数据包丢失数量情况。从仿真结果可用看出，在这 4 中切换场景中，硬切换的丢包数量最多。由于无线传输介质的时变性、不稳定性、衰减以及信道冲突等原因，数据包转发的跳数越多，丢失的几率就越大。因此，与传统的存储转发平滑切换算法相比，基于中继路由器的存储转发平滑切换算法的数据包丢失情况得到了显著的改善。表 6-2 为不同切换场景下数据包的转发路径。

表 6-2 不同切换场景下数据包的转发路径

切换方向	切换算法	
	中继路由算法	存储转发算法
AP1→AP2	RR2→AP2	AP1→RR2→AP2
AP1→AP3	RR1→AP3	AP1→RR2→RR1→AP3
AP1→RR2	RR2	AP1→RR2
AP1→RR1	RR1	AP1→RR2→RR1

5. 6 本章小结

移动终端从同一子网中的小区移到别的小区，会发生越区切换。“随时随地在线”是移动计算追求的主要目标，减少数据包丢失，降低切换延迟是切换过程中需要解决的主要问题，也是影响无线通信服务质量（Qos）的关键问题之一。硬切换的切换速度快，但丢包率非常大；存储转发平滑切换丢包率低，但切换延迟时间增大。对于存储转发平滑切换算法，旧无线接入点（AP）上缓存的数据包需要通过多跳无线 Mesh 网络转发到新的无线接入点（AP），无线信道的动态时变特性和衰减效会造成数据包转发过程中出现数据丢失和数据错误。本章提出的基于中继路由器的平滑切换算法将数据包缓存在选定的中继路由器上，缩短了缓存数据包转发的路径，进一步提高了数据转发的成功率，并减少了切换延迟。

5. 7 参考文献

- [1] 胡凯、阚志刚、宋京民等，网络计算新技术，第 1 版，北京：科学出版社，2001, 7, pp. 1-2.
- [2] George H.Froman and John Zahorjan.The Challenges of Mobile Computing.IEEE Computer,April 1994.

- [3] Jim Geier(美)著,王群等译,无线局域网,第1版,北京:人民邮电出版社,2001,4,pp.8-12
- [4] C. Perkins. IP Mobility Support for IPv4, IETF RFC 3344, Aug,2002
- [5] C. Perkins. Route Optimization in Mobile IP, draft-ietf-mobileip-optim-10.txt, Internet Draft, IETF, Nov. 2000
- [6] Matbew S. Gast. 802.11 Wireless Networks, The Definitive Guide, 第1版,北京:清华大学出版社(O'REILLY),2002,11, pp. 10-22.
- [7] Jim Geier(美)著,王群等译.无线局域网,第1版,北京:人民邮电出版社,2001,4, pp. 77.
- [8] 王金龙,王呈贵,吴启晖等 Ad Hoc 移动无线网络.第一版.北京:国防工业出版社出版,2004.05, pp. 1-12
- [9] J. Li, J. Jannotti, R. Karger, et al. A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing. In Proc. ACM MobiCom 2000, August 2000,pp.120-130
- [10] Pierre Reinbold,Olivier Bonaventure.A Comparison of IP Mobility Protocols.<http://www.infonet.fundp.ac.be/doc/articles/Reinbold-SCVT2001.pdf>,Mar,2002.
- [11] 杨仁忠、侯紫峰.基于 AP 预先转发的 802.11 无线局域网切换机制研究.计算机研究与发展, 41(8), 2004, 8, pp. 1376-1381
- [12] Ramon Caceres,Venkata NP.Fast and Scalable Wireless Handoff in Support of Mobile Intenret Audio.Mobile Networks and Applications 3,1998,pp.351-363.
- [13] C.Perkins and K.Y.Wang.Optimized Smooth Handoffs in Mobile IP.in Proc of the 4th IEEE Symposiumon Computer and Communications(ISCC'99),June 1999.
- [14] C.Blondia,N.Vanden Wijngaert,G.Willems.Performance Analysis of Optimized Smooth Handof in Mobile IP.in Proceedings of the 5th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems,pp.22-29,2002
- [15] A.T.Cambell, S.Kim, J.Gomez, et al. draft-ietf-mobileip-cellularip-OO.txt,IETF mobile IP Working Group Document, December 1999.
- [16] AG Valko.Cellular IP:A New Approach to Internet Host Mobility.ACML Computer Communication Review,Jan.1999.

- [17] Jayanth Mysore vaduvur Bhargavan.A New Multicasting-based Architecture for Internet Host Mobility. Proceedings of the 3rd annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking,pp.161-172, 1997
- [18] Arunesh M,Minho S,et al.An Empirical Analysis of the IEEE802.11 MAC Layer Handoff Process. <http://www.es.umd.edu/~waa/pubs/handoff-lat-acm.pdf>,May,200
- [19] A.Mishra,M.Shin,W.Arbaugh.An Empirical Analysis of the IEEE802.11 MAC Layer Handoff Process.ACM SIGCOMM Computer Communication Review,33(2):93-102,April 2003
- [20] IEEE.Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications.IEEE standard 802.11, 1999
- [21] IEEE.Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution System Supporting IEEE802.11 Operation.IEEE Draft802.11f/D3,Jan 2002
- [22] Sangheon Pack,Yanghee Choi.Fast Inter-AP Handoff using Predictive-Authentication Scheme in Public Wireless LAN Networks 2002,Aug 2002.
- [23] IEEE.802.11i Part11:Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications Amendment 6:Medium Access Control(MAC) Security Enhancements.New York:IEEE Standard,July 2004.
- [24] Yong Liao, Lixin Cao. Practical schemes for smooth MAC layer handoff in 802.11 wireless networks. WOWMOM'06, 2006, pp.181-190
- [25] V.Kumar,Choi,et al.Fast Handoff Scheme in Wireless LAN for Real-Time System.The Third IEEE WLAN Work shop,Sept 2001
- [26] T. Clausen, P. Jacquet. Optimized link state routing protocol. IETF RFC 3626, October 2003.

第六章 总结与展望

6. 1 全文总结

从 RPARNET 到今天的 Internet，人们的生活方式已随着互联网技术的飞速发展发生了巨大的改变，随时随地的 Internet 访问成为人们越来越迫切的需要。无线网络技术的诞生使灵活便捷的移动 Internet 访问成为可能。但是目前相对比较成熟的 WLAN 技术仅能实现单跳无线接入，其信号覆盖范围较小且只能布设在有线网络附近，因此还不能满足人们对更大范围的无线网络覆盖的需求。无线 Mesh 网络期望利用无线多跳技术实现更大范围的无线接入网络覆盖。但是现有的组网技术并不能很好地支持无线多跳网络，相邻链路间的信道竞争、动态时变的无线信道等都会造成无线 Mesh 网络性能的下降。如何提高无线 Mesh 网络的网络容量、降低延迟，使其真正能够承载各式各样的 Internet 接入网业务是科研人员所面临的重大挑战。本文主要研究了基于 IEEE802.11 标准的无线 Mesh 网络 MAC 层和网络层协议，主要工作总结如下：

- (1) 研究了无线 Mesh 网络中的多径路由协议。
 - 深入研究了无线 Mesh 网络中路由协议的设计原则和衡量指标，分析了多径路由协议中的最优路径数目。
 - 研究了两种经典的多径路由协议：动态源路由多路径协议 (DSR-MP) 和 Ad-Hoc 按需多路径距离矢量路由协议 (AOMDV) 在混合无线 Mesh 网络中的性能。通过仿真分析了这两种多径路由协议分别在混合无线 Mesh 网络和移动 Ad Hoc 网络下的分组传输率、端到端平均延时、路由开销率，论证了 DSR-MP 协议在混合无线 Mesh 网络中具有比 AOMDV 协议更优越的性能。说明在趋于静态的无线 Mesh 网络中，采用源路由协议更能满足无线 Mesh 网络的业务需要。
- (2) 提出了多接口多信道无线 Mesh 网络中基于跨层设计的分布式信道分配算法。
 - 设计了将路由建立过程和信道分配过程相结合的跨层分布式信道分配算法，不但降低了算法的复杂度和网络开销，而且提高了系统可用信道的使用率。
 - 对路由建立过程中控制报文的广播进行了改进，提出了两跳干扰模型，能避免在不同时间建立的多条活动路由中属于不同路径的邻居节点间的干扰。将控制报文的广播跳数限制在 2 跳范围内，不但满足设计要求，

也减轻了网络开销。

- 当路由上的节点数大于系统可用信道数时，为了避免信道随机分配带来的同一条路径上的节点被分配相同信道的问题，提出了按序分配算法。
- 仿真分析了无线 Mesh 网络中采用多接口多信道技术能够显著提高网络的性能。

(3) 提出了骨干无线 Mesh 网络中一种基于控制帧的功率控制 MAC 层协议—CTSPC，研究了功率控制的理论依据。

- 从理论上证明了采用功率控制能够提高无线 Mesh 网络中信道的空间复用度，CTSPC 协议在网络节点密度较大的情况下更优越。
- 提出了基于 CTS 帧的功率控制协议模型，通过控制接收节点发送控制帧的功率，使得对整个数据发送和接收过程真正产生干扰的节点才能正确接收到该控制帧，从而延迟发送过程，避免信号干扰。该协议能够有效提高无线网格骨干网中信道的空间复用度。
- 仿真分析了 CTSPC 协议和标准的 802.11MAC 协议的性能，证明了 CTSPC 协议能改善无线 Mesh 网络的性能。

(4) 提出了基于中继路由器的存储转发平滑切换算法，研究了 OLSR 协议的原理。

- 无线多跳网络采用平滑切换算法时，旧无线接入点(AP)中缓存的数据需要转发到新接入点(AP)中，基于中继路由器的存储转发平滑切换算法能够缩短数据转发的跳数，进一步降低丢报率，减少延迟。
- 提出了中继路由器的选择方法。基于 OLSR 协议的原理，可以选择 MPR 节点作为中继路由器。
- 仿真分析比较了基于中继路由器的平滑切换算法和 802.11f 标准中的 IAPP 协议提出的平滑切换算法的性能，本文提出的平滑切换算法能进一步减少切换过程中数据包的丢失，减小切换延迟。

6. 2 研究方向展望

无线 Mesh 网络的应用前景是广阔的，但是无线 Mesh 网络的相关研究仍然任重而道远。要让无线 Mesh 网络代替 WLAN 真正成为 Internet 最重要的无线接入网，在提高其传输性能方面还有许多问题需要进一步深入研究。本文的研究工作仅仅是一个探索阶段，这些工作还需要不断地深化和完善，还有大量的工作要做。

(1) 无线 Mesh 网络的业务流主要是接入因特网的业务，随着网络多媒体(网络流媒体如网络电视、在线直播等)、VOIP、视频会议等对实时性要求很高的业

务的应用，人们对接入网的带宽以及实时性等要求逐渐提高。采用多径路由协议能够改善无线 Mesh 网络对带宽的要求，提高网络吞吐量，降低延迟。如果将多径路由协议和多信道技术相结合，必将大大提高无线 Mesh 网络的接入性能和传输性能，基于多信道的多径路由协议将是一个很值得研究的课题。

(2) 在多接口多信道无线 Mesh 网络中，为每个射频接口分配不同的正交信道，可以避免信道间的冲突和干扰，整个网络的吞吐量能够得到显著提高。按需路由协议可以在网络需要发送数据时才建立从源节点到目地节点的路径，减少了网络维护路由的额外开销。将信道分配和按需路由协议相结合的跨层设计分配算法，仅为活动路由上的节点分配节点，提高了有效信道的使用率，能在最大程度上为同一路经上的不同节点分配不同的信道。跨层设计由于打破了原来的分层结构，破坏系统的可移植性。因此在今后的研究中，应该考虑跨层设计与现有系统的融合和互操作问题。

(3) 本文提出的基于控制帧的 MAC 层功率控制协议，能够提高无线 Mesh 网络中信道的空间复用度。但该算法在 Mesh 路由器分布密度大的情况下最有效，比较适合城市环境下的应用。在今后的研究中，应该考虑更多的具有代表意义的应用场景。

(4) 移动终端在不同的无线接入点的切换是实现移动互联网的关键技术，数据包的丢失和切换延迟是设计切换算法时需要解决的主要问题。本文提出的基于中继路由器的切换算法中，触发移动终端切换的准则是信噪比 SNR，没有考虑接入点的负载因素。在今后的研究中，还需要进一步完善。

致 谢

在北京邮电大学攻读博士学位的经历令我终生难忘。衷心感谢我的导师沈树群教授，能够师从沈老师，我感到非常荣幸。沈老师渊博的知识和严谨的治学作风不仅在这三年给予我很多的教导和启迪，在今后的日子里也会对我大有裨益；沈老师宽厚的人品和淡泊名利的为人风范是我今后在工作中效仿的楷模。三年的北邮生活，沈老师不仅在学业上严加督促，精心指导，而且在生活上也给予我无微不至的关怀，在此谨向沈老师致以最诚挚的谢意。

感谢实验室的同学们在学习和生活给予的无私帮助。他们是闫文忠博士、赵志高硕士、朱玉洁硕士、张雷硕士、黄莹莹硕士、邹义平硕士、任淑娟硕士等。

特别感谢我的妻子、女儿、父母、岳母和哥哥，是他们的理解、默默地支持和伟大奉献给予我勇往直前的动力，使我顺利完成学业。

感谢所有关心、帮助和支持我的老师、同学、领导、同事、朋友和亲人！

税国军

2008年6月10日