

# 无线 Mesh 网中一种基于综合准则的 DSR 扩展路由方法

沈 强<sup>1</sup>, 方旭明<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学移动通信省重点实验室, 四川成都 610031; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘 要:** 无线 Mesh 网(Wireless Mesh Network: WMN)是一种新型的分布式宽带无线网络结构,相对于典型的移动 Ad hoc 网络,该网络由于具有节点移动性小、不受电池动力限制等特点,从而导致传统的移动 Ad hoc 路由协议不再适用。为了满足 WMN 多媒体业务传输的性能要求,WMN 路由必须满足负载均衡、路由容错与网络容量等目标。本文首先介绍了当前几种已有的 WMN 路由协议,在此基础上,提出了一种适用于 WMN 的基于综合准则的动态源路由(Dynamic Source Routing: DSR)扩展路由方法,该方法综合考虑了投递率、剩余带宽以及节点负载等因素。分析与仿真结果表明,该算法极大地提高了网络吞吐量,并且达到了负载均衡的设计目标。

**关键词:** WMN; 路由协议; 跨层设计; 负载均衡

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 04-0614-07

## An Integrated Metrics Based Extended Dynamic Source Routing Protocol in Wireless Mesh Networks

SHEN Qiang<sup>1</sup>, FANG Xu-ming<sup>1,2</sup>

(1. Provincial Key Laboratory of Mobile Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Wireless Mesh Network(WMN) is a new distributed broadband access network. Compared with the typical mobile Ad hoc network, it is with less mobility and usually not powered by the battery. Therefore, the traditional mobile Ad hoc routing protocols are no longer suitable for WMN. In order to meet the performance requirements of multimedia traffic transmission, the routing protocol designed for WMN must be taken into account the combination of load balance, fault tolerant and throughput, etc. This paper firstly introduces typical structures and characteristics of WMN, and several relevant WMN routing protocols. Then a method of integrated metrics based Extended Dynamic Source Routing (EDSR) protocol is proposed. The analysis and simulation results show that the proposed EDSR protocol improves the throughput of WMN significantly, which reaches the target of load balance simultaneously.

**Key words:** wireless mesh networks; routing protocol; cross-layer design; load balance

### 1 引言

无线 Mesh 网(Wireless Mesh Network, WMN)是一种新型的宽带无线网络结构,即一种大容量、高速率的分布式无线网络。在网络拓扑上,WMN 与移动 Ad hoc 网络相似,但总体来说,网络节点的移动性较弱,一般不用电池作为动力,拓扑变化也较小。在单跳接入时,WMN 可以看成是一种特殊的无线局域网(WLAN)。也有学者认为,WMN 与移动 Ad hoc 网络的最大区别在于节点承载的业务模式上的差异,对于前者,主要是来往于因特网网关的业务,而对于后者,则主要是节点间的业务流<sup>[1]</sup>。

目前,WMN 的组网机制作为一种可以解决“最后一公里”网络接入瓶颈问题的方案,已经正式列入到 IEEE 802.11s 的标准制定工作中,相关标准组<sup>[2]</sup>提出了 AODV 与 OLSR 等传统路由协议作为 WMN 的基线路由协议。

WMN 有多种结构,图 1 是一种基于 802.11 标准的典型结构。该网络结构分为三层,最低一层为“终端用户层”,由用户终端设备组成,包括手机、笔记本电脑、PDA 等设备,构成标准 802.11 接入网;“终端用户层”之上是“无线 Mesh 层”,由无线 Mesh 接入点(Mesh Access Point: MAP)和超网节点(Super Gateway: SGW)构成,终端用

收稿日期:2005-11-04;修回日期:2006-12-02

基金项目:东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(No. N200608);华为研发基金(No. YBNP2004015);西南交通大学科研基金(No. 2005B02)

户可以通过该层接入核心网络,终端用户之间也可以通过该层进行数据交互;无线 Mesh 网的第三层为“核心网络层”,主要提供各种网络互连服务。

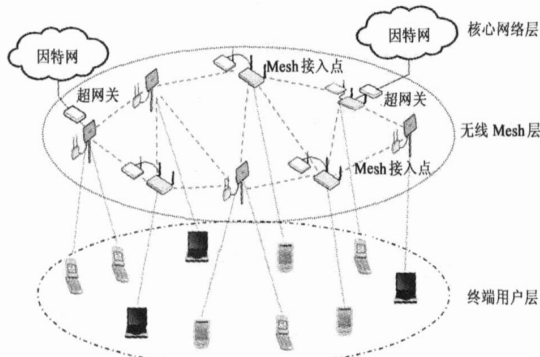


图 1 WMN 典型结构

WMN 的路由协议性能需求与一般的移动 Ad hoc 网络路由协议有很大区别,因为 WMN 主要承载因特网业务,所以更注重 QoS 保证问题。传统的移动 Ad hoc 网络路由协议基本上都是以最短跳数为准则,大量研究表明<sup>[3,4]</sup>,该准则并不能满足 WMN 在网络吞吐量与 QoS 保证上的要求,因此需要为 WMN 研究和设计新的路由协议。本文主要研究 WMN 的路由问题,通过一定的路由算法,提高 WMN 的网络吞吐量与负载均衡等能力,并通过网络整体性能的提升来达到满足用户 QoS 保证的需求。

在设计 WMN 路由协议时,必须考虑路由判据、负载均衡、路由容错、网络容量以及 QoS 保证等因素。最近,不少学者和研究机构都纷纷提出自己的路由协议,其中,多射频链路质量源路由(Multi-Radio Link-Quality Source Routing:MR-LQSR)协议<sup>[4]</sup>是一种多信道 WMN 路由协议,它采用一种新的路由性能判据,即加权的累计期望传输时间(Weighted Cumulative Expected Transmission Time:WCETT)。WCETT 综合考虑了带宽等链路性能参数以及最小跳数,该协议能在吞吐量与延时之间获得平衡。可预测无线路由(Predictive Wireless Routing Protocol:PWRP)协议<sup>[5,6]</sup>是另一种应用于“Wi-Fi 蜂窝网络户外系统”的路由协议,该协议通过比较数据误包率及其他网络状态参数来选择特定环境下的最优路径。此外,单收发器多信道路由(Multi-Channel Routing Protocol:MCRP)协议<sup>[7]</sup>支持在同一区域中同时使用互不干扰的多信道资源,该协议在网络层完成信道管理工作,MAC 层不需作任何修改。因为利用了多信道资源,网络的性能得到了极大的提升。传统 DSR 路由<sup>[8,9]</sup>与 ETX<sup>[10]</sup>判据相结合的路由协议对吞吐量的提升十分有限,高吞吐率路由协议(SrcRR)协议<sup>[11]</sup>是在分析其弊端的基础上提出的。该协议通过多方面的改进,使网络吞吐量得到了极大的提高。射频感知路由(Radio Aware Routing Protocol:

RARP)协议<sup>[12]</sup>在 ETX 判据的基础上提出了射频感知路由判据,该判据考虑丢包率的同时还增加了对数据传输率的感知。仿真表明,该判据更能适应实际的网络环境。另外,文献[13]提出了一种基于物理层干扰、分组成功率和数据传输速率的跨层路由设计方案。该方案还根据下一跳的状态,优化了分组传输的功率,使网络吞吐量达到最大化,即解决了最小值-最大值问题:使干扰最小化,容量最大化。

现有的一些 WMN 路由协议虽然已经改变了以往以最短跳数作为路由判据的原则,但是基本上仍停留在单路由判据的研究阶段。与此同时,跨层思想虽然已经顺利引入到 WMN 路由中,但主要停留在纯理论和技术分析阶段,还没有相应的协议实现。为此,本文提出了一种基于综合准则的 DSR 扩展路由算法(Extended Dynamic Source Routing:EDSR),该算法通过跨层设计为路由层提供路径剩余带宽、投递率与网络负荷等信息,从而实现了多准则路由方法。

本文其余内容安排如下:第 2 节对基于综合准则的 DSR 扩展路由方法进行了介绍;第 3 节给出该方法的仿真结果,并对结果进行了分析;最后,第 4 节对全文进行了总结。

## 2 基于综合准则的 DSR 扩展路由方法

基于综合准则的 DSR 扩展路由方法以 DSR 路由为基础,综合考虑了投递率、剩余带宽以及节点负载等状态信息。与其他大部分路由协议(如 MR-LQSR<sup>[4]</sup>)均采用周期性发送探测包的方法获取网络状态信息不同,本方法通过对网络交互信息的统计来获取路由质量消息,节省了宝贵的无线带宽资源。以下分别从协议栈、路由发现、路由维护以及路由决策等方面对本方法进行介绍。

### 2.1 EDSR 协议栈

EDSR 在协议层中的位置如图 2 所表示。该方法以 DSR 协议为基础进行跨层设计,协议需要采集 MAC 层的相关信息,所以在 EDSR 与 MAC 之间新增加了跨层实体(包括参数调用模块与参数采集模块)。参数采集模块负责收集邻节点到本节点的链路状态信息,如剩余带宽和投递率等信息;参数调用模块为路由协议提供获取各种统计信息的接口。

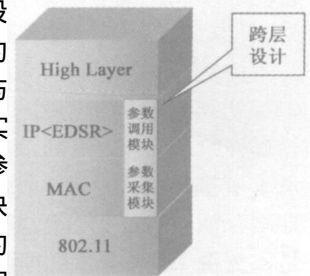


图 2 协议栈结构

### 2.2 EDSR 协议原理

#### 2.2.1 路由发现过程

当某节点需要获得到达另一节点的路由时,该节

点发起一路由发现过程,并在整个路由发现过程中扮演源节点的角色.路由发现流程如图3所示.由图可知,源节点将通过以下步骤获得路由:

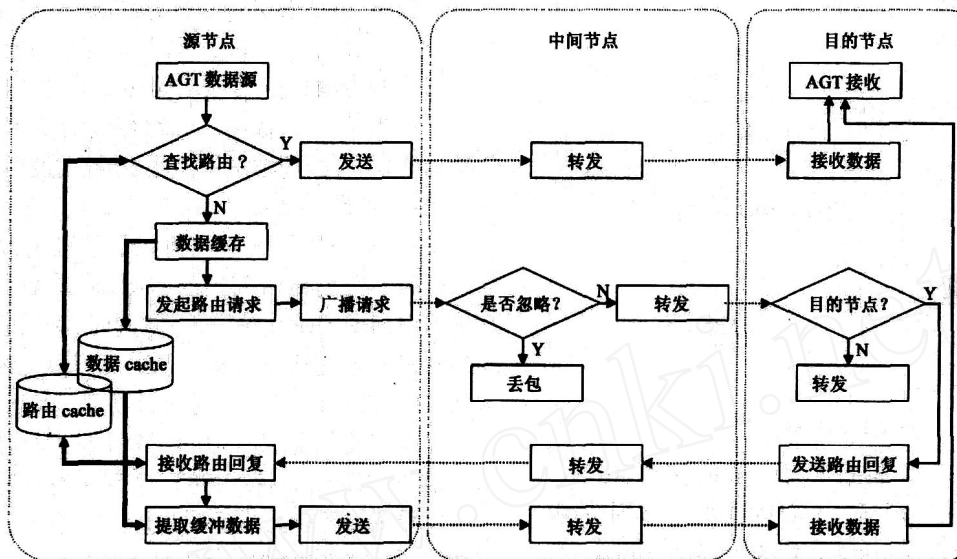


图3 路由发现过程

(1) 源节点发送路由请求. 该请求包括该广播路由请求的生命周期 TTL(一般为跳数限制)、包序号与目的地址等信息. 该路由请求的 EDSR 包头含有路径质量的结构体, 用于存放路径质量信息. 路径质量的结构体如图4所示, 图中 *Min. Bw*, *Max. Load*, *PDR* 分别为路径中最小节点剩余带宽, 最大节点负荷以及路径的投递率.

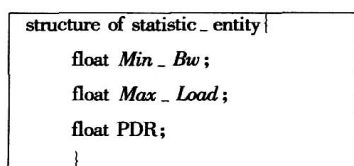


图4 路径质量结构

(2) 中间节点收到该路由请求后, 首先更新该路由请求所携带路径质量的结构体, 然后判断本节点是否应该忽略该路由请求. 判断的项目包括包序号、路径优劣、节点自身资源是否过载与 TTL 是否到期等.

(3) 中间节点判断是否能进行缓存回复. 若从缓存中找到到达目的节点的路径, 则判断是否应该把该路径返回给源节点. 判断的依据为缓存路由是否比路由请求所携带的路径更好, 若是, 则返回该路径; 否则, 放弃缓存回复. 通过判断, 最后决定是转发该路由请求还是回复源节点, 或者丢弃该请求.

(4) 目的节点收到路由请求后, 首先更新路径质量的结构体, 再调用相关过程进行路由回复. 路由回复时, 把路由请求的路径和路径质量信息复制到路由回复数据包中, 通过路由回复把路径质量信息(如最小剩余带宽、最大投递率与网络负荷)捎带回源节点. 当目

的节点连续收到多个路由请求时, 如果通过 2.2.3 节的路由决策函数验证了当前路由请求所携带的路径比已转发过的路径更优, 节点将再次进行路由回复, 否则丢弃该路由请求.

(5) 源节点通过路由回复即可获得所需路径与路径质量信息. 节点将路径以及路径质量信息添加到路由缓存中, 并查看数据缓存中是否有数据需要发送.

在路由回复阶段, 其他节点听到回复消息, 可以从消息中提取有用路径, 并把相关信息添加到自身的路由缓存中.

该路由请求方法一方面考虑了路由判据信息的收集, 另外一方面, 在判断是否转发该路径或者是否从缓存回复时, 新增加了路径优劣判断. 该判断由 2.2.3 节的路由决策函数所决定, 我们称本设计为基于路由决策的路由发现机制.

### 2.2.2 路由维护

当路径中的链路失效时, 链路上游节点发起路由维护过程. 此时上游节点进行如下操作:

(1) 从路由缓存中删除失效链路.

(2) 查看数据包发送过程中最大路由错误数, 若超过指定值, 则丢弃该包. 该操作防止目的节点不是本网络内节点的数据包在网络内被循环转发, 从而导致网络瘫痪.

(3) 查看源节点是否允许中间节点改变原有路径. 从路由缓存中查找到达目的节点的路径, 如果找到, 则使用该路径发送数据包. 若没有找到则重新发起路由请求, 获得到达目的节点的路由. 同时, 节点还需要查看 IFQ 队列中是否有使用该链路的数据包, 若有则仍需

要对其进行最大路由错误数以及是否可以改变原有路径等处理。

(4) 创建路由错误消息,并发送给源节点,所有上游节点依次处理并转发该消息。

(5) 源节点收到该路由错误消息后,从路由缓存中删除失效链路。下次数据发送时,查看缓存中是否还有其他到达目的节点的路径,若没有则再次发起路由发现过程。

在发送路由错误消息过程中,路径附近的邻节点可以侦听到该错误消息,虽然该消息目的节点不是本节点,但是节点仍然需要对该错误消息进行处理,从而保证节点缓冲区数据的即时性。

### 2.2.3 路由决策函数

在判断路径好坏时需要对各种路径质量信息进行整合。通过路由发现,可获得最小带宽、包投递率与路径上节点的最大负荷。EDSR 选用的决策函数为这 3 个参数的加权平均:

$$COST(Min. Bw, Max. Load, PDR) = \alpha \cdot Min. Bw + \beta \cdot Max. Load + \gamma \cdot PDR$$

其中,  $Min. Bw$  为路径中节点最小剩余带宽,  $\alpha$  为其加权因子;  $Max. Load$  为路径中节点最大负荷,  $\beta$  为其加权因子;  $PDR$  为路径投递率,  $\gamma$  为其加权因子,  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $\gamma$  满足  $|\alpha| + |\beta| + |\gamma| = 1$ 。  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $\gamma$  的取值应由具体的应用决定。需要指出的是,由于路由的目标是要选择网络负荷小的路径,所以  $\alpha$  的取值为负。另外,路径最小带宽、最大负荷与投递率的表达式如下:

$$Min. Bw = \min(Bw_1, Bw_2, \dots, Bw_i, \dots, Bw_{n-1})$$

其中,  $n$  为路径长度,  $Bw_i$  为节点  $i$  的剩余带宽情况。本文中,假设所有 MAP 的基本数据带宽相同,所以  $Bw_i$  取节点  $i$  剩余带宽与基本数据带宽的比值。实际场景中,如果 MAP 基本数据带宽不同,可以给  $Min. Bw$  乘一个

加权因子以反映该节点基本数据带宽情况。剩余带宽估计的方法可以参考文献[14,15],本文采用文献[15]提出的基于 NAV(网络分配矢量)统计的带宽估计方法:

$$Max. Load = \max(Load_1, Load_2, \dots, Load_i, \dots, Load_n)$$

其中  $Load_i$  为节点  $i$  的负荷。本文中,  $Load_i$  为节点  $i$  发送队列中等待发送的数据包个数与最大等待数据包个数的比值。具体应用中,可根据具体情况对节点负荷的表征内容做适当的调整;

$$PDR = \prod_{i=1}^{n-1} pdr_{i,i+1}$$

其中,  $pdr_{i,i+1}$  表示节点  $i$  到节点  $i+1$  的投递率。传统的分组投递率的统计方法是根据发送数据后是否正确收到 ACK 判断发送是否成功。但是,该计算方法获得的是网络层数据投递率信息。为了更好地反映网络冲突状况,本文选用 MAC 层的帧投递率反映当前的网络状态。结合 MAC 理论分析,确定以下统计规则:

- (1) 当 MAC 层完整的收到邻居节点发送的帧时,认为成功接收到一个帧;
- (2) 当 MAC 层发生冲突时,造成不能正确接收某邻居节点发送的完整帧,则认为发生帧丢失;
- (3) 当 MAC 收到的数据校验和发生了错误则认为发生帧丢失。

### 2.3 EDSR 与 DSR 协议设计对比

EDSR 具有以下突出的特点:基于路由决策的路由发现机制、多准则的路由决策机制与跨层设计。为了便于对比,表 1 给出了 EDSR 与 DSR 的特点与对比分析结果。DSR 与 AODV 协议的对比,可以参考文献[16]。通过该文献的分析可知,DSR 在 MAP 移动性小的网络环境下的投递率、网络延时以及协议开销均比 AODV 小,所以接下来本文主要就 EDSR 与 DSR 的性能进行对比分析。

表 1 EDSR 与 DSR 的特点对比

特点	改进位置	DSR	EDSR	作用
基于路由决策的路由发现机制	路由层(路由请求包转发)	中间节点只附加节点地址	中间节点附加节点地址与上游链路质量	源节点收到更多的路径(获得延时最短的路径与相对于路由决策算法最优的路径)
	路由层(路由请求包转发)	路由转发时,只进行包序号判断	包序号、节点负载、剩余带宽、投递率与路由优劣等判断	
	路由层(缓存回复)	有缓存回复	若缓存路径优于路由请求路径则进行缓存回复,否则直接转发	
多准则的路由决策机制	路由层(路由选择)	选择最小跳数路径	通过路由决策函数,选择相对最优路径	路由决策函数综合考虑了多因素对路由选择的影响,从而达到 WMN 网络负载均衡与高吞吐率的设计目标
跨层设计	MAC 层	无	采集 MAC 层剩余带宽与投递率	使路由协议更能感知网络实际传输状态,从而适应了无线网络环境的变化
	MAC 层	无	对 MAC 层数据包重传次数进行了优化(含该优化的 EDSR 称为 EDSR(MAC))	

具体仿真分为 EDSR 与 EDSR(MAC) 两种方案,其中 EDSR(MAC) 带 MAC 参数优化(重传次数的优化),

EDSR 无 MAC 参数优化。这里,EDSR 所体现出来的优化完全是通过路由协议的改进获得的;而 EDSR(MAC) 所

获得的优化是路由协议改进与 MAC 参数优化共同作用的结果. 以下将这两个方案与原 DSR 进行比较分析.

### 3 协议仿真与性能评价

#### 3.1 仿真场景设置

仿真时选用 Linux 下的 NS2 的 2.26 版本<sup>[17]</sup>, 且在 DSR 配置时选用了默认的路由缓存. 参考文献[18,19], 本文选用图 5 作为仿真拓扑, 假设该拓扑即为某高校的校园网, 节点 24 为超网关节点, 其他节点为 MAP.

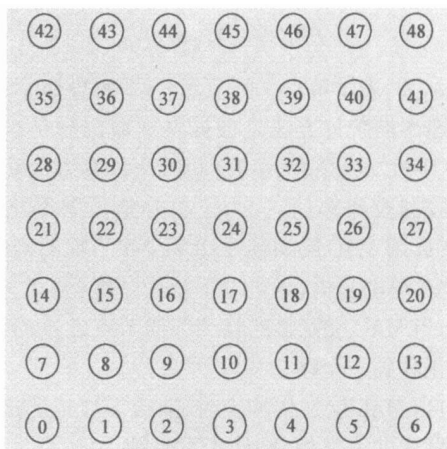


图 5 仿真拓扑

节点相对静态是无线 Mesh 网的基本特征, 所以本仿真主要针对静态网络. 当出现少量节点移动时, 可以使用原有的 DSR 相关机制进行处理. 另外, 假设每个节点通信范围仅覆盖最近的邻居节点, 比如节点 0 只能直接与节点 1 或节点 7 通信.

在仿真参数选择时, 尽量使用系统的缺省设置, 比如 802.11 的基本数据带宽为 2Mbits. 在包大小的选择上, 使用了 CBRGEN 业务发生器, 该发生器所产生的包大小即为 512 字节. 在路由决策参数配置时, 通过具体的仿真对比, 的取值为 0.4, 的取值为 -0.1, 的取值为 0.5. 另外, 本仿真分析主要针对恒比特的 UDP 业务进行分析. 由于协议主要目标是提高网络吞吐量, 所以仿真实现了网络吞吐量随负载变化的情况. 在本文中, 网络的吞吐量定义为网络中所有目的节点的数据接收率.

#### 3.2 指定业务模型分析

在随机指定两个收发对 (又称业务或连接) 的情况下对 EDSR 路由协议进行分析评价. 首先让业务 1 (6-24) 开始运行, 在运行了一段时间以后再启动业务 2 (0-48). 理想情况下, 业务 2 建立时, 路由协议所选择的路径应该绕开业务 1 所使用的路径. 一方面减少对业务 1 的干扰, 另一方面使自身也获得较稳定的路径.

由于 EDSR 在路由发现机制的改进, 源节点将收到多条路由回复 (至少不比原 DSR 少). 在路由失效时, 可

以很快的利用备份路径进行数据传输, 从而获得更高的吞吐量. 业务 1 的仿真结果如图 6 所示. 图中横坐标为仿真时间, 纵坐标为某时间下业务 1 的吞吐量.

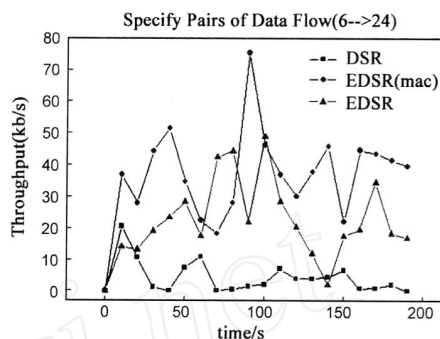


图 6 业务 1 网络吞吐量曲线

以 50s 与 100s 时网络吞吐量的变化为例, 我们发现: 在 50s 时, EDSR 的网络吞吐量是 DSR 的 3.82 倍, EDSR(MAC) 的网络吞吐量是 DSR 的 4.68 倍. 在 100s 时, EDSR 的网络吞吐量是 DSR 的 25.15 倍, EDSR(MAC) 的网络吞吐量是 DSR 的 23.81 倍. 可见, EDSR 与 EDSR(MAC) 在两个时间点吞吐量都有很大程度的提高. 但是, 在 50s 时 EDSR(MAC) 比 EDSR 更优, 而 100s 时 EDSR(MAC) 却比 EDSR 稍差. 这是由网络随机性造成的, 并不影响协议的评价.

在初始阶段, 由于 EDSR 最初选择的路径并非最短路径, 路径的增长将导致其对时延与网络冲突更加敏感, 因此路径稳定性稍差, 所以在网络开始阶段链路吞吐量比 DSR 稍低. 当路径因冲突等因素而断裂后, 由于 EDSR 路由发现机制的改进, 节点有更多的备份路由供路由恢复使用, 所以此时 EDSR 仍然可以稳定地进行数据传输. 在 EDSR 没有备份路由时, 将发起路由请求, 此时改进的路由发现机制表现出两面性: 一方面, 因网络转发路由请求的概率增大, 消耗网络资源增多, 使数据更容易发生碰撞. 此外, EDSR 的包头比 DSR 包头大, 碰撞概率也随之增大. 受该因素的影响, 在 140s 左右, EDSR 吞吐量有一个较大幅度的降低. 另一方面, 由于路由请求的转发次数增多, 收到路由回复的概率也随之增大, 使得在发生路由失效时, EDSR 具有更强的容错能力.

由于 EDSR(MAC) 在 EDSR 基础上增加了 MAC 重传次数的优化, 所以发生碰撞时, 节点会更多次尝试数据发送, 从而减少误认为路径断裂的可能, 因此极大提高了网络吞吐量. 尝试次数的增多必将导致个别数据包的传输延时增加, 并且会造成协议对链路断裂的反应变的迟钝. 从以下两方面来看, 这个代价还是值得的: 一方面, 重传的时间相对重新发起路由请求的时间来讲小很多, 所以系统整体性能还是提升了. 通常没有发生碰撞时, 节点的传输次数与未修改 MAC 重传次数时相同. 仅当发生碰撞时, 该参数修改才生效, 故出现

延时的数据包的数量是非常有限的. 另一方面, 一般认为无线 Mesh 网中 MAP 是准静态的, 即 MAP 移动的情况是非常小的, 故 MAP 间通信的中断绝大多数情况是因为碰撞造成的. 所以协议对链路断裂反应迟钝的次数也非常有限.

整个网络的端到端吞吐量统计如图 7 所示. 图中横坐标为仿真时间, 纵坐标为某时刻的网络吞吐量. 通过前边对二条业务的仿真分析可知, 整个网络的吞吐量较 DSR 有了很大的提高.

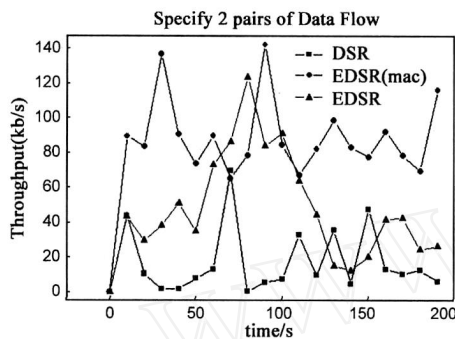


图 7 指定业务下网络链接吞吐量分析

### 3.3 随机业务模型分析

为了使协议的评价更具普遍性和统计意义, 仿真对协议进行了随机业务模型分析. 主要思想是: 在指定连接数的前提下, 随机地从节点中选择源节点和目的节点, 以随机时间开始仿真. 以下是二条连接和八条连接时的测试结果分析.

当随机选择二条连接时仿真结果如图 8 所示. 图中横坐标是数据发送速率 (包/秒), 纵坐标为不同数据发送速率对应的网络吞吐量.

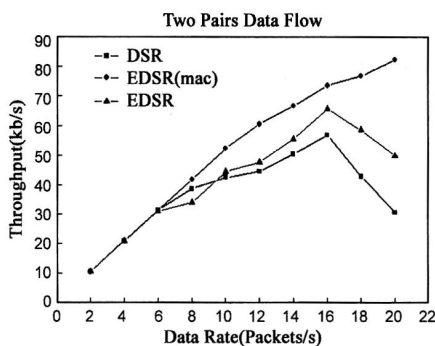


图 8 二条连接时网络吞吐量分析

以下分别对数据发送速率为 6 包/秒与 12 包/秒时网络吞吐量进行定量分析: 数据发送速率为 6 包/秒时, EDSR 的网络吞吐量是 DSR 的 0.99 倍, EDSR (MAC) 的网络吞吐量是 DSR 的 1.0 倍. 数据发送速率为 12 包/秒时, EDSR 的网络吞吐量是 DSR 的 1.07 倍, EDSR (MAC) 的网络吞吐量是 DSR 的 1.36 倍. 在数据发送速率为 6 包/秒时, 3 个协议十分相似, 甚至 EDSR 协议还比 DSR

协议稍差. 这是因为在数据发送速率较低时, EDSR 与 EDSR (MAC) 增加了协议开销, 其优势却没有得到充分发挥, 所以网络吞吐量比 DSR 稍差.

对于 EDSR 或 DSR, 随着在网络负荷的增大, 冲突加剧, 网络吞吐量将出现下降趋势. 所以在数据发送速率为 16 时, EDSR 与 DSR 吞吐量曲线均出现拐点. 由于 EDSR (MAC) 降低了链路失效的误判, 所以其拐点后移.

在数据发送速率较小时, 网络几乎没有冲突, 所以 3 种方案的吞吐量曲线基本吻合. 在发送速率大于 6 包/秒时, 3 种方案所对应的吞吐量曲线的趋势开始发生变化. 从总体走向上来看, EDSR (MAC) 优于 EDSR, EDSR 优于 DSR. 在数据发送速率为 7 包/秒时, EDSR 比 DSR 稍差, 这也是由网络具有很大的随机性造成的. 在理想情况下, 若网络没有冲突, 网络吞吐量应该是稳定上升的. 由于 EDSR (MAC) 增强了路由协议的容错能力, 所以该协议的吞吐量曲线在很大范围的数据发送速率下都几乎与该理想状态曲线重合.

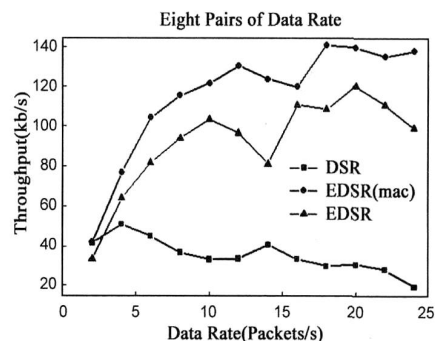


图 9 八条连接时网络吞吐量分析

当随机选择八条连接时, 仿真结果如图 9 所示. 这里观察数据发送速率为 6 包/秒与 12 包/秒时网络吞吐量的变化: 数据发送速率为 6 包/秒时, EDSR 的网络吞吐量是 DSR 的 1.83 倍, EDSR (MAC) 的网络吞吐量是 DSR 的 2.34 倍. 数据发送速率为 12 包/秒时, EDSR 的网络吞吐量是 DSR 的 2.9 倍, EDSR (MAC) 的网络吞吐量是 DSR 的 3.92 倍. 从吞吐量增加倍数的趋势来看, EDSR 与 EDSR (MAC) 协议在网络负荷较大的网络情况下能更好地发挥自身优势. 通过 3 种方案的结果分析可知, 随着网络负荷的增加, DSR 吞吐量进一步降低, 甚至趋近于 0. 此时 EDSR 与 EDSR (MAC) 的优势却越来越明显. 因为这两种方案均能很好的绕过一些正在使用的路径, 从而增加了网络吞吐量. 另外, 吞吐量的大幅度提高与具体的路径选择的分析均证明了 EDSR 协议具有负载均衡的作用.

## 4 结论

本文通过仿真实验证明了所提出的 EDSR 算法的合理性, 也验证了该算法对网络性能的提升能力. 通过

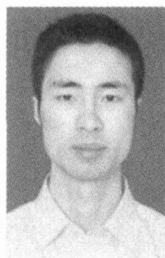
仿真实验,我们发现,EDSR 协议对网络冲突十分敏感,建立的数据流能自动绕开冲突区(热点)进行数据传输,满足了无线 Mesh 网负载均衡的要求;协议同时考虑了剩余带宽、投递率和网络负荷等对路由选择的影响,使网络吞吐量得到最大化;此外,该协议在 DSR 的基础上,应用数据流(Flow)传输机制,极大地减小了协议开销,通过修改 MAC 层的重传次数,使路由协议具有更好的容错能力,从而提高了协议对网络冲突的适应能力。

目前,EDSR 尚有一些地方需要改进,比如新增存储转发、增强链路失效判断、MAC 速率控制、多径数据传输等,这也是我们下一阶段研究工作的重点。

#### 参考文献:

- [1] 方旭明,马忠建. 无线 Mesh 网络的跨层设计与关键技术[J]. 西南交通大学学报. 2005,40(6):711-719.  
FANG Xuming, MA Zhongjian. Theory and key technologies of cross-layer design in wireless mesh networks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(6):711-719. (in Chinese)
- [2] Intel, Motorola, Tropos, et al. Corp. Simple Efficient Extensible Mesh (SEE-Mesh) Proposal [S]. IEEE Document Number: 11-05/0562r1, 2005.
- [3] R Draves, J Padhye, B Zill. Comparisons of routing metrics for static multi-hop wireless networks [A]. In Proc. ACM SIGCOMM '04 [C], Portland: ACM Press, 2004. 133-144.
- [4] R Draves, J Padhye, B Zill. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks [A]. In Proc. ACM SIGMOBILE '04 [C]. Philadelphia: ACM Press, 2004. 114-128.
- [5] Tropos Corp. Metro-Scale Mesh Networking with Tropos MetroMesh Architecture [OL]. www.tropos.com/pdf/tropos.metro-scale.pdf, 2005.
- [6] Tropos Corp. Creating Capacity Using Superior Routing: The Metro-Scale Mesh Networking Facts [OL]. www.tropos.com/pdf/Routing.Capacity.pdf, 2005.
- [7] J So, N Vaidya. A Routing Protocol for Utilizing Multiple Channels in Multi-Hop Wireless Networks with a Single Transceiver [R]. Technical Report, 2004.
- [8] D Johnson, D A Maltz. Dynamic source routing algorithm for mobile wireless networks [A]. In Proc IEEE INFOCOM '97 [C]. Washington DC: IEEE Computer Society, 1997. 1405-1413.
- [9] D Johnson, D A Maltz, Y C Hu. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks [OL]. http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt, 2005.
- [10] D De Couto, D Aguayo, J Bicket, R Morris. High-throughput path metric for multi-hop wireless routing [A]. In Proc. ACM MOBICOM '03 [C], San Diego: ACM Press, 2003. 134-146.
- [11] D Aguayo, J Bicket, R Morris. SrcRR: A High Throughput Routing Protocol for 802.11 Mesh Networks (DRAFT) [OL]. pdos.csail.mit.edu/~rtm/srcrr-draft.pdf, 2005.
- [12] G Kulkarni, A Nandan, M Gerla, M Srivastava. A Radio Aware Routing Protocol for Wireless Mesh Networks [R]. NESL Technical Report: TR-UCLA-NESL-200503-12, 2005.
- [13] L Iannone, R Khalili, K Salamatian, S Fdida. Cross-layer routing in wireless mesh networks [A]. In Proc. ISWCS '04 [C]. Mauritius: Computer Society Press, 2004. 319-323.
- [14] C Sarr, C Chaudet, et al. A node-based available bandwidth evaluation in IEEE 802.11 Ad Hoc networks [A]. In Proc SaNSO '05 [C]. Fukuoka: IEEE Press, 2005. 68-73.
- [15] L Chen, W B Heinzelman. QoS-aware routing based on bandwidth estimation for mobile Ad Hoc networks [J]. IEEE Journal on Areas in Communications, 2005, 23(3): 561-572.
- [16] C E Perkins, E M Royer, S R Das, et al. Performance comparison of two on-demand routing protocols for Ad Hoc networks [J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(1): 16-28.
- [17] NS2. 26 Sources Original Documentation [OL]. http://ip.lip6.fr/ns-doc/ns26-doc/html/index.htm, 2005.
- [18] J Jun, M L Sichitiu. The nominal capacity of wireless mesh networks [J]. IEEE Commun Mag, 2003, 10(5): 8-14.
- [19] J Jun, Capacity of Wireless Mesh Networks [OL]. http://www4.ncsu.edu:8030/~jjun/, 2005.

#### 作者简介:



沈强 男, 1981 年 12 月出生于四川乐山, 2004 于西南交通大学获得学士学位。2004 年至今, 在西南交通大学通信与信息系统专业硕博连读。现为西南交通大学和美国佛罗里达大学联合培养博士研究生。主要从事无线 Mesh 网路由与切换、无线网跨层设计等研究。  
E-mail: q.shen@hotmail.com



方旭明 男, 1962 年出生于上海, 通信与信息方向工学博士, 四川成都西南交通大学信息科学与技术学院教授, 博导, 移动通信省重点实验室副主任, 通信工程系主任。长期从事下一代无线通信网络, 移动 Ad hoc 网络, 无线 Mesh 网络, 无线局域网的研究工作。  
E-mail: xmfang2002@163.com