

# 多速率移动自组网中交叉层优化的性能分析<sup>\*</sup>

林丛 向勇 崔鹤鸣

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘要** 由于严格分层的协议无法很好地适应移动自组织网络(Mobile Ad hoc Network, MANET)的动态变化,交叉层设计与优化近年来成为 MANET 的一个研究热点。针对 802.11b 标准支持的多速率通信,分别在网络层和 MAC 层实现了两种多速率控制方案,并通过仿真实验详细分析了这两种速率控制方案的性能。实验结果表明,在网络层引入物理层提供的多速率信息作为路由选取标准,可有效提高网络吞吐率,降低端到端延迟;同时,在 MAC 层使用高速率转发中继,对网络层路由进行局部优化,可以进一步改善对拓扑动态变化的适应性。

**关键词** 交叉层,多速率,移动自组织网络,路由选择,中继节点

## Performance Analysis of Cross-layer Optimization in Multi-rate Mobile Ad Hoc Networks

LIN Cong XIANG Yong CUI He-ming

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Cross-layer design and optimization in mobile ad hoc networks(MANET) have been the focus of several research efforts in recent years, due to the fact that some inherent issues of MANET cannot be handled well by traditional layered network protocol. The characters of cross-layer processing in 802.11b multi-rate MANET were studied in different protocol layers. Using network simulator NS-2 in implementing two types of cross-layer multi-rate control at network layer and MAC layer respectively. Simulation result shows that the combination of routing strategy at network layer and multi-rate information at physical layer can effectively optimize throughput and the average end-to-end packet delay. Moreover, employing relay node at MAC layer to locally optimize route selection may also improve performance of MANET in dynamic scenarios.

**Keywords** Cross-layer, Multi-rate, Mobile ad hoc network, Route selection, Relay node

### 1 引言

随着传统 TCP/IP 协议在 Internet 的发展过程中获得巨大成功,其分层设计思想也成为现代通信系统中协议设计的指导思想。协议分层的优势在于,它极大地降低了网络系统设计的复杂性,并且更易于管理和维护,增强了网络的鲁棒性。然而,严格分层的协议限制了信息在层间传递的灵活性,因而无法在移动自组织网络(MANET)中高效运行。

MANET 是由一组无线可移动的节点在不需网络基础设施支持的情况下组成的多跳动态网络。由于节点的移动、无线信道的共享以及能量有限等特性所带来的问题广泛存在于网络协议的不同层次上,因此需要进行综合考虑,才能达到网络的最佳性能。

为了解决上述问题,提出了交叉层协议设计和优化的概念。Srivastava 等人将交叉层设计定义为冲破原有协议栈构架的协议设计<sup>[1]</sup>,原来不相邻的层之间可以直接通信或者共享信息,使网络性能得到垂直优化。

本文选取交叉层设计中的信道速率优化,考察物理层多速率特性对上层协议性能的影响。首先在网络层实现了多速率路由协议 MR-AODV,尝试找到一条全局较优的高速链路,较为有效地提升了系统的吞吐率。另外,考虑到 MAC 层对于信道变化的响应比网络层更为及时,在 MAC 层实现了另一个多速率路由局部改善方案 RMAC,利用高速率中继转

发来替代网络层找到的低速链路,并对这两种多速率方案的性能特征和适用场景进行详细对比分析。

本文后续章节内容安排如下:第 2 节介绍多速率通信的背景以及交叉层优化的相关工作。第 3 节详细描述两种交叉层优化方案的设计与实现。第 4 节通过仿真实验对原有分层协议以及两种交叉层优化方案 MR-AODV 和 RMAC 进行性能的比较和分析。最后给出结论和进一步的工作。

### 2 背景及相关工作

针对 MANET 中存在的若干问题,已有一些研究工作从交叉层设计的角度提供了相应的解决方案。Carneiro 等将应用交叉层设计所研究的问题归纳为 3 类<sup>[2]</sup>:第一类,服务质量问题,涉及到带宽、延迟、吞吐量等诸多综合性能指标,需要网络协议各层交叉协作。第二类,移动性问题,如节点移动带来的信道质量变化可导致 TCP 对于网络拥塞的错误判断,需要传输层及时地获取 MAC 层的链路状态信息。第三类,无线链路自适应问题,如网络层可根据物理层提供的误码率、通信速率等信息制定自己的路由策略等。其中,第三类问题中如何利用物理层多速率特性来改善无线自组织网络的性能,是交叉层设计研究的一个重要方向。

目前主流的 802.11b 标准支持 1, 2, 5.5 和 11Mbps 4 种信道速率,通信双方可以根据当前信道质量的好坏,在 4 种速率之间自动切换。多速率特性的引入可以有效地提高网络的

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(60273010),清华信息科学与技术国家实验室基础研究基金。林丛 硕士研究生,主要研究方向为自组织网络 MAC、路由协议;向勇 博士,副教授,主要研究领域为计算机网络;崔鹤鸣 硕士研究生,主要研究方向为自组织网络 QoS 路由协议。

吞吐率,增加网络总容量。为了充分利用这一特性,提出了许多交叉层设计方案。

基于接收方的速率自适应协议 RBAR (Receiver Based Auto Rate)<sup>[3]</sup>是一个典型的利用交叉层信息的多速率 MAC 协议。其核心思想是在 RTS/CTS 帧交换期间,接收节点根据物理层得出信噪比值,选择数据帧传输速率。FAR<sup>[4]</sup>在此基础上,对 MAC 控制帧也进行了速率自适应。由于 MAC 层直接利用了从物理层获取速率信息,它们具有更高的吞吐率。然而,它们仅适用于单跳通信环境。

对于多跳环境,Awerbuch 等<sup>[5]</sup>提出了一种新的网络层路由度量标准——媒体占用时间 MTM (Medium Time Metric),包括信道的争用时间和分组传输时延。由 MAC 层计算发送一个分组所需的 MTM,然后路由层把 MTM 作为选路标准,一条路由的代价是组成该路由的所有链路的 MTM 之和。进一步的研究工作还包括在网络层加入对 MAC 层排队时间的计算<sup>[6]</sup>和对于分组大小的考虑<sup>[7]</sup>。但是网络层的路由协议并不能及时地对信道质量的变化做出响应,各层之间信息更新的迟滞性较为严重。

更深入的交叉层优化是把一部分路由工作移到网络层之下,在下层引入中继节点来获得局部的高速率链路<sup>[9-11]</sup>。Yongho 等在网络层和 MAC 之间加入一个多速率子层 MAS (Multi-rate Aware Sublayer)<sup>[8]</sup>,当 MAS 发现有高速率中继节点能达到下一跳时,则对网络层透明地实现从该节点中继。MAS 使用链路速率的倒数和作为中继节点的选取标准。另一种多速率协商机制 rDCF (relay-enabled DCF)<sup>[9]</sup>把中继节点的选择直接并入 MAC 层,把来源和目的之间的两点协商扩展为带中继节点的三角协商方式。其不足是协商机制相对复杂,控制开销较大。

基于中继的 MAC 协议 RBMAC (Relay Based MAC)<sup>[10]</sup>,是对上述三角协商机制的一个简化。由源和目的两点负责协商速率,中继节点直接转发数据,有效地控制了协商开销。另外,RBMAC 改进了中继选取标准,以链路延时为考察目标,使得中继的使用和选取更为准确和灵活。

基于上述前人成果,本文分别实现了网络层多速率路由协议 MR-AODV 以及 MAC 层多速率路由方案 RMAC,考察不同层次上交叉层优化对于网络性能的影响,以及在不同层次上进行多速率路由选择的优缺点。

### 3 协议设计与实现

本节首先介绍基本的速率自适应机制的实现,然后给出基于该机制的两种交叉层设计方案:一个是在网络层的实现,以传输延迟为选路标准的多速率 AODV<sup>[11]</sup>路由协议 MR-AODV,另一个是在 MAC 层使用中继节点转发的多速率 MAC 协议 RMAC。

#### 3.1 速率自适应

速率自适应机制可用于相邻两个通信节点之间的速率协商,其工作过程包括信道质量估计和速率选择两个阶段。在信道质量估计阶段,目的节点根据收 RTS 帧时物理层得到的接收信号强度,利用自由空间衰落模型<sup>[13]</sup>估算节点距离,并作为对两点之间信道质量的估计;距离越近,信道质量越好。在速率选择阶段,目的节点通过查表<sup>[12]</sup>获得与估算距离对应的通信速率。目的节点将选定的通信速率封装在 CTS 帧中,发回给源节点。此后源节点以选定后的速率和目的节点进行通信。

表 1 通信距离与可用速率的对应关系

速率(bps)	接收灵敏度(dBm)	通信距离(meter)
1M	-94	245
2M	-91	205
5.5M	-87	164
11M	-82	123

#### 3.2 MR-AODV 的实现

传统的 AODV 路由协议以最小跳数作为选择路由的尺度,然而最小跳数路由中通常含有大量低速率通信链路<sup>[13]</sup>,它们并不能很好地利用高速链路。MR-AODV 基于 AODV 路由协议,以链路速率参数作为选路标准,用路径上各条链路的传输延迟之和取代跳数作为路径的代价。为了准确比较网络层和 MAC 层实现多速率控制的差异,MR-AODV 借鉴并简化了 MTM<sup>[5]</sup>的思路,是一个仅在网络层实现多速率控制的方案。

假设一条编号为  $j$  的路径依次经过节点  $N_{j,0}, N_{j,1}, \dots, N_{j,m}$ ,路径上相邻节点  $N_{j,k}$  和  $N_{j,k+1}$  之间的通信速率为  $R_{j,k}$ ,数据分组的大小为  $P_j$ ,则整条路径的代价为

$$C_j = \sum_{k=0}^m \frac{P_j}{R_{j,k}}$$

最后,MR-AODV 选择的路径为

$$C = \min\{C_j | j \in Q\}$$

的路径,其中  $Q$  为可选路由集。

MR-AODV 协议针对原有 AODV 的 RREQ 作了两方面改进<sup>[14]</sup>:

- 增加路由代价 ( $C_j$ ) 扩展域;
- 增加对路由代价更低的 RREQ 的再次广播。

$C_j$  扩展域用在 RREQ 中,收集该 RREQ 所通过链路的  $C_j$  值。MR-AODV RREQ 算法如图 1 所示。节点在收到重复的 RREQ 时,并不立即丢弃,而是比较新收到的 RREQ 所确定到源节点的反向路径与前面获得的到达源节点的反向路径的  $C_j$  值;如果更低,则更新反向路由表,并以新的值再次广播 RREQ。

```

rev_rt = Find_RT(RREQ.orig)
if rev_rt == NULL
  Insert_RT(RREQ.orig.RREQ.cc)
  Forward(RREQ)
else if RREQ.seqno > rev_rt.dest_seqno ||
  RREQ.seqno == rev_rt.dest_seqno &&
  RREQ.cc < rev_rt.cc
  Update_RT(RREQ.orig.RREQ.cc)
else
  Discard(RREQ)
end if

```

图 1 MR-AODV RREQ 算法

#### 3.3 RMAC 的实现

考虑到 MR-AODV 将全部多速率控制工作都集中在网络层会带来灵活性的问题,作为对比,本文实现了第二种多速率控制方案 RMAC,将一部分速率控制工作移到 MAC 层,以便更多地利用交叉层的优势。

RMAC 是对 RBMAC<sup>[10]</sup>的改进。RBMAC 的基本原理是,网络层提供跳数最小的全局路由,MAC 层负责添加局部的高速中继节点。其工作过程分成中继监听、中继加入和中继转发 3 个部分。如图 2 所示,节点 S, D 是源和目的节点,由

低速链路相连;中继节点 M 有高速率链路与 S 和 D 相邻。

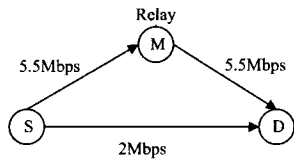


图 2 中继拓扑

中继监听阶段:当 M 监听到 S 和 D 的 RTS/CTS 交互之后,利用物理层得到的接收信号强度估算自己到 S 和 D 的通信速率,决定自己是否可以成为中继节点。如果是,则进入中继加入阶段。

中继加入阶段如图 3 所示。M 发送中继请求 RTR 给 S。中继请求里包括了源和中继的通信速率信息。S 在收到这个中继请求后,更新自己的中继列表。这个中继列表在 MAC 层维护,表项格式为:〈下一跳节点,中继节点,通信速率,有效时间〉。当 S 的数据下发至 MAC 层时,RBMAC 先查看中继列表。如果有可用中继条目,则在 MAC 层使用中继转发。

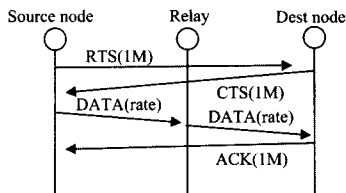


图 3 中继加入过程

中继转发阶段:S 和 D 使用 RTS/CTS 进行速率协商。协商成功后,S 把数据发给 M,M 再转发给 D,最后由 D 向 S 直接返回一个确认帧。中继转发过程如图 4。

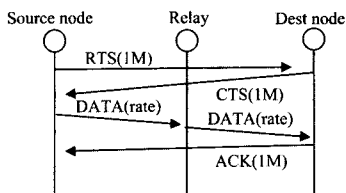


图 4 中继转发过程

RMAC 协议在上述 RBMAC 工作原理的基础上,对其进行了三点改进,使它对中继的选择更为准确和灵活。第一点是在中继的节点的选择上允许多个中继备选。RBMAC 选定一个中继之后,会一直使用它,直到通信结束或者中继失效。在 RMAC 中,高速节点在任何时候都有机会成为最新的中继节点。其优势是,当中继节点由于移动而使中继链路质量下降的时候,位置更好的节点能够及时代替当前的中继,从而保证了中继转发的持续高效。

第二点改进是,中间节点的 MAC 层在判断自己是否可以成为中继时,考虑了网络层的排队时间。对于排队时间  $T_q$ ,节点需要根据当前网络层队列中的分组数量和大小,以及每个分组可用的最大发送速率进行估算。队列已由分组全部发送完毕所需的时间,即为新来分组的排队时间。计算式为:

$$T_q = \sum T_i = \sum \left( \frac{L_{Data}^i}{data\_rate^i} + \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + L_{ACK} + L_{PHY}}{base\_rate} \right)$$

其中  $T_i$  是队列中第  $i$  个分组的发送时间,  $L_{Data}^i$  是第  $i$  个分组的长度,  $data\_rate^i$  是第  $i$  个分组的发送速率,  $base\_rate$  是发

送控制分组的基本速率。  $\frac{L_{RTS} + L_{CTS} + L_{ACK} + L_{PHY}}{base\_rate}$  是发送一个控制分组的时间常量,记为  $T_c$ 。排队时间可简化为:

$$T_q = N * T_c + \sum \frac{L_{Data}^i}{data\_rate^i}$$

其中  $N$  是队列中分组的个数。信道的争用时间并没有计算在内,因为它并不反映中继节点本身的负载情况。排队时间的加入使得 RMAC 比 RBMAC 能够更加准确地刻画当前节点的负载情况。

第三点改进是中继失效的处理。在 RMAC 中,如果使用某一个中继失败,重传的次数达到了某个上限,则将该中继标记为无效,改用原来没有中继的路径继续传输。这个改进保证了通信的连续性,同时降低了由无效中继产生的开销。

## 4 模拟实验

### 4.1 模拟环境

本文使用网络模拟器 NS2.31,对比了三种多速率协议的性能,分别是 MR-AODV, RMAC 以及一种 1 跳范围内的多速率 AODV 路由协议,记为 MR-1Hop,它是 AODV 与相邻节点间速率自适应机制的简单结合。

分别选取简单拓扑、静态线性拓扑和动态随机拓扑 3 类模拟场景,针对协议的功能、运行特性以及对真实通信环境的模拟 3 个方面进行测试。在每一类场景下,为了保证比较的公平性,3 种协议均使用相同的预先随机生成的模拟场景进行测试,所有模拟均测试 10 次取平均。

### 4.2 简单拓扑结构

本模拟场景由 3 个静止节点组成,如图 2。节点 S 向 D 发送 CBR 数据流,分组大小为 1000 字节,共 2000 个。在不同的分组发生速率下(每秒 20 个分组—每秒 250 个)网络各性能指标的模拟结果如图 5。

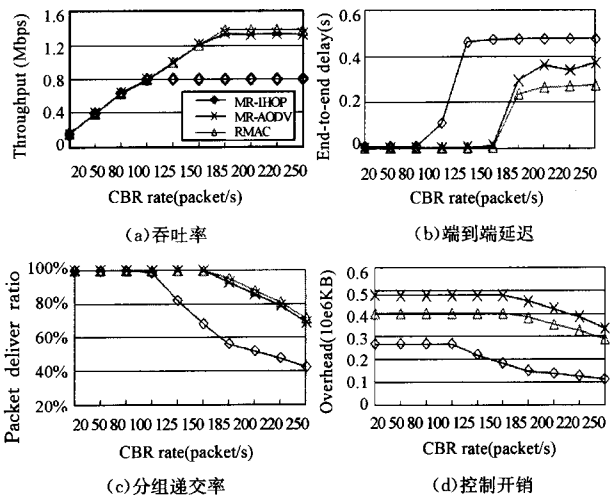


图 5 简单静态结构模拟结果

当分组的发生速度大于 100 之后,MR-1Hop 基本稳定在 800kbps,而 MR-AODV 和 RMAC 均接近 1400kbps。它们性能上的增益,来自于上层协议对物理层速率信息的获取。MR-AODV 在网络层找到高速的 S→M→D 路由代替 MR-1Hop 的 S→D 的 2Mbps 低速路由;RMAC 在网络层使用 S→D 路由,但在 MAC 层使用了节点 M 中继,分组的实际发送路线和 MR-AODV 相同,因此在吞吐率和分组递交率上两者相近,如图 5(a), (c)。

端到端延迟见图 5(b)。MR-1Hop 由于采用低速链路,故延迟最大,而 RMAC 相比于 MR-AODV 有接近 40%的提升。这是因为在 MR-AODV 中,节点 M 收到的分组,都要先由 MAC 层提交到网络层判断路由,在排队之后再下发至 MAC 层。这个来回增大了数据处理的延迟。而在 RMAC 中,节点 M 在 MAC 层完成网络层的路由转发功能,节省了分组提交到网络层的时间。

控制开销如图 5(d)。MR-1Hop 只涉及到两个节点的通信,故最小。RMAC 略小于 MR-AODV,因为 RMAC 的 MAC 层中继节点 M 并不引入任何额外控制开销。因此,MAC 层对于路由的局部优化,也可以节省部分自身的开销。

图 6 是在较高的分组发生率下 MR-AODV 和 RMAC 两种协议在节点 S 的网络层队列长度的对比。由于 RMAC 对于数据处理更为及时,平均队列长度较短,故其端到端延迟也较短。此结果验证了以上分析,同时说明,MAC 层参与网络层的选路,把一部分路由节点放到 MAC 层作为局部中继,可以有效地减少分组在网络层的滞留时间。

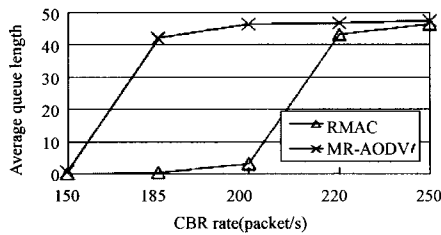


图 6 网络层平均队列长度

### 4.3 静态线性拓扑结构

本场景中,所有节点均分布在 X 轴的[0, 1000]米区间内,固定源节点坐标为 0,目的节点坐标为 1000。源向目的以每秒 50 个分组的速率发送 1000 个大小为 1000 字节的分组。它们之间随机分布的节点从 5 个逐渐增加到 23 个。结果如图 7。

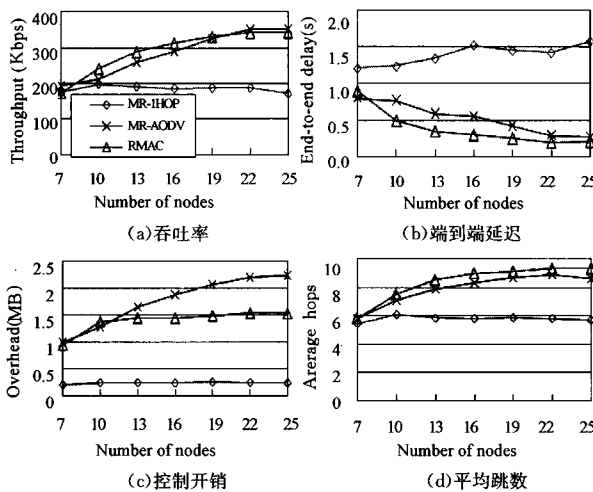


图 7 静态线性结构模拟结果

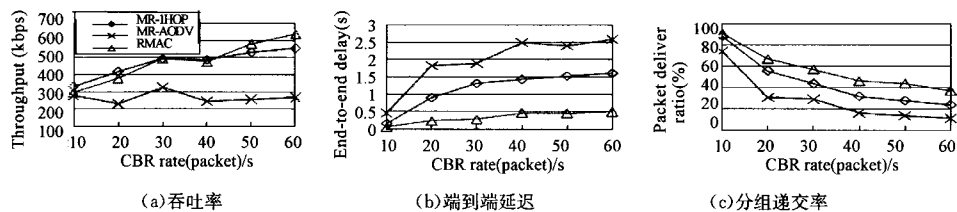


图 10 不同 CBR 速率下的动态随拓扑模拟结果。

随着源和目的之间的节点密度增大,可用的高速率链路逐渐增多。因此 MR-AODV 和 RMAC 的吞吐量逐渐增大,平均延迟减小,如图 7(a),(b)。而 MR-1Hop 由于只选取跳数最少的路径,因此节点的密度变化基本不对它造成影响。端到端延迟结果与简单拓扑类似,见图 7(c)。

平均跳数如图 7(d)。RMAC 略大于 MR-AODV 的原因是,MR-AODV 的最长路径是随着 RREQ 的传播逐步建立的,历时较长。在此过程中,有相当比例的分组仍然使用跳数少、速率低的路径。而 RMAC 会在路径上的多个局部同时添加中继,最长路径建立很快。这说明 MAC 层和路由层的协作,相比于路由层独立工作,能够在一定程度上缩短路由建立时间。

图 8 和图 9 是在不同节点密度下不同速率链路在网络中的比例。在只有 5 个中间节点的时候,3 种协议都是低速链路占有大部分比例。当中间节点数量增加到 23 个的时候,MR-AODV 和 RMAC 的最高速率的链路都占到了 50% 以上,说明了两种交叉层设计对于多速率特性的充分利用。

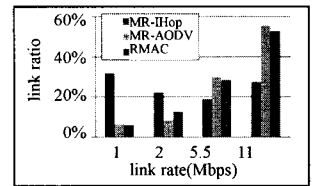
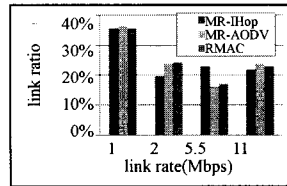


图 8 5 个节点时的链路比例 图 9 23 个节点时的链路比例

### 4.4 动态随机拓扑结构

动态随机拓扑模拟场景大小为 1000m×1000m,节点最大运动速度为 5m/s,停顿时间 60s,其中随机分布着 5 个 CBR 流,每个流在 0~50s 内随机启动,持续 3min,模拟时间 5min。首先固定节点总数为 80,调整分组产生速率,从每秒 10 个到每秒 60 个。结果如图 10。

MR-AODV 在动态环境下性能不如基于相邻节点的速率自适应协议 MR-1Hop,因为 MR-AODV 在网络层维护一条很长的路由,路由上任何一个节点移动断开,整条路径都要重新建立,网络的性能受到路由频繁失效的很大影响,这也说明把全部的速率控制工作集中在网络层难以对网络的动态变化做出及时反应。而 RMAC 则几乎在所有情况下都表现出较好的适应性,特别是负载较重的时候。分组产生率从 40 增加 60 的过程中,MR-1Hop 对于吞吐率有 10% 的提升,而 RMAC 的提升却达到了 30%。在延迟方面也只有 MR-1Hop 的 1/3。RMAC 对于性能的提升是由于,在网络层,RMAC 使用的是跳数最少的路由,故重建代价也最小;在 MAC 层,RMAC 使用的中继节点具有 3.3 节中的三点改进特性,这为它在动态环境下的适应提供了有效的支持。中继失效时,多中继备选的特性使得 RMAC 会在局部选择更好的中继,即使没有这样的中继,失效处理特性仍可保证 RMAC 沿最少跳数

的路径传输,不至于重建路由。这种交叉层优化既能发挥物理层提供的多速率优势,又在一定程度上保存了网络层路由维护的灵活性,同时在 MAC 层增加了对动态环境的及时响应。

固定分组发生速率为每秒 40 个,节点数量在 20~100 之间变化时,模拟的结果如图 11。在节点数量大于 50 之后, RMAC 在吞吐率方面的优势开始显现。其余同之前的模拟有类似的结论。

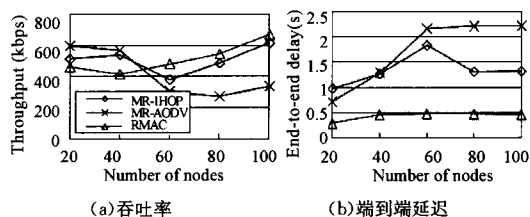


图 11 不同节点数量下动态随拓扑模拟结果

**结束语** 本文讨论了多速率环境下移动自组织网络中交叉层优化对网络性能的影响。分别设计实现了位于网络层和 MAC 层的两种多速率交叉层路由方案 MR-AODV 和 RMAC,并详细分析了简单拓扑、静态线性拓扑和动态随机拓扑等不同场景下,在不同层次上实现多速率路由功能时的吞吐率、端到端延迟、分组递交率和协议控制开销等性能特征。在网络层制定路由策略,可以综合物理层多速率以及 MAC 层信道状态等交叉信息进行路由的全局优化,故能有效地提高网络吞吐率,降低端到端延迟,保证路由的准确性和易维护性。但是要达到这一目标,网络层需要更为准确的路由度量指标,并且由于网络层本身存在着迟滞性,会影响到路由的灵活性。而在 MAC 层通过添加中继,对网络层路由信息做进一步局部优化,能够保证对动态环境的及时响应,减小转发分组在层间的滞留时间,因此特别适用于节点密度高、负载较大的动态网络环境。

后续工作包括更好地实现网络层和 MAC 层在建立路由方面的跨层合作,网络层需要综合更多的下层提供的信道、拥塞状况等信息,以提供更准确的路由选择。MAC 层同样需要更为准确的判据,以保证及时从上层提供的路由中作出最佳选择。

## 参考文献

[1] Srivastava V, Motani M. Cross Layer Design: A survey and the road ahead[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(12): 112-119  
 [2] Carneiro G, Ruela J, Ricardo M. Cross Layer Design in 4G Wire-

less Terminals[J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2004, 11(2): 7-13  
 [3] Holland G, Vaidya N H, Bahl P. A Rate-adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks[C]// ACM MOBICOM'01. Rome, 2001  
 [4] Li Z, Das A, Gupta A K, et al. Full Auto Rate MAC Protocol for Wireless Ad hoc Networks[J]. IEEE Proceedings Communications, 2005, 152(3): 311-319  
 [5] Awerbuch E, Holmet D, Rubens H. High Throughput Route Selection in Multi-Rate Ad Hoc Wireless Networks[G]. Wireless on Demand Network Systems. Berlin: Springer, 2004: 253-270  
 [6] Yang G, Xiao M, Chen H, et al. A Novel Cross-layer Routing Scheme of Ad hoc Networks with Multi-rate Mechanism[C]// Proc. of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2005  
 [7] 王炫, 李建东, 张文柱. 支持多速率传输的动态 ad hoc 路由协议[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1907-1911  
 [8] Yongho S, Jaewoo P, Yanghee C. Multi-rate Aware Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks[C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. 2003: 1749-1753  
 [9] Zhu H, Cao G. rDCF: A Relay-enabled Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(9): 1201-1204  
 [10] Zeng W, Tan H, Suda T. A Relay Based MAC Protocol to Support Multi-rate Feature in Mobile Ad hoc Networks[C]// Proc. of The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. 2005: 145-154  
 [11] Perkins C, Royer E B, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[S]. RFC3561. 2003  
 [12] Goldsmith A J, Chua S G. Variable rate variable power M-QAM for fading channels. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10): 1218-1230  
 [13] Takai H, Kleinrock L. Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1984, 32(3): 246-257.  
 [14] 李东生, 向勇, 史美林, 等. 基于交叉层设计的能量负载平衡自组网路由技术[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(10): 1771-1775  
 [15] Yang Ning, Sankar P, Lee Jungsik. Improving ad hoc network performance using cross-layer information[C]// Proc. of IEEE International Conference on Communications. 2005: 2764-2768  
 [16] Barrett C, Marathe A, Marathe M V, et al. Characterizing the Interaction between Routing and MAC Protocols in Ad-hoc Networks[C]// Proc. of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing. 2002: 92-103

(上接第 38 页)

格中非常重要的一部分。对于网格文件系统的深入研究必将对网格技术的完善与发展起着极大的推动作用。

## 参考文献

[1] Foster I, Kesselman C. The Grid 2[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 224-262  
 [2] WLCG website. <http://lcg.web.cern.ch/LCG/>  
 [3] 于传松. 高能物理与网格计算. 核电子学与探测技术, 2004, 24(6): 563-567  
 [4] 田敬, 代亚非. P2P 持久存储研究. 软件学报, 2007, 18(6): 1379-1399

[5] Abadie L, Badino P, et al. Storage Resource Managers: Recent International Experience on Requirements and Multiple Co-Operating Implementations // 24th IEEE Conference on Mass Storage Systems and Technologies (MSST 2007). 2007: 47-59  
 [6] 刘爱贵, 程耀东, 许冬, 等. 可扩展网格文件访问接口的设计与实现. 计算机工程, 2007, 33(20): 259-261  
 [7] Szeredi M. Filesystem in Userspace. <http://fuse.sourceforge.net>  
 [8] Norcott W, Capps D. IOzone Filesystem Benchmark. URL: <http://www.iozone.org/>  
 [9] 程耀东, 刘爱贵, 陈刚, 等. 高能物理网格数据管理关键技术研究. 计算机应用研究, 2007, 24(10): 20-22