

# 一种适用于移动 Ad hoc 网络的自适应多跳路由协议<sup>\*</sup>

向学哲

(华南师范大学计算机学院 广州 510631)

**摘要** 跨层优化多径路由协议以跨层优化为手段,使用物理层,MAC 层和网络层的信息做路由决策并在多条路径上同时传递数据包。实验表明,该协议拥有以往的多径路由协议在网络吞吐量和端到端延迟的优势,而且延长网络寿命并降低网络中传输比特信息所需消耗的能量。

**关键词** Ad hoc 网络,多跳路由,跨层优化

## An Adaptive Multi-hops Routing Protocol in Mobile Ad hoc Networks

XIANG Xue-Zhe

(Computer School, South China Normal University, Guangzhou 510631)

**Abstract** As a cross-layer design, EMRPC uses information from physical, MAC and network layers to make its decision and transmits data packets in multiple paths simultaneously. The results show this algorithm has the advantage in network throughput and delay. At the same time, it prolongs the network life and reduces the expended energy to transmit bit information.

**Keywords** Ad hoc networks, Multi-hops routing, Cross-layer optimization

### 1 引言

自从无线网络在 20 世纪 70 年代产生后,它在计算机领域里日趋流行,尤其是近年来无线移动通信网络的发展更快。目前存在的无线移动网络有两种,第一种是基于网络基础设施的网络,典型应用为无线局域网。第二种为无网络基础设施的网络,称之为自组织网(Ad hoc)。这种网络没有固定路由器,网络中的节点可随意移动并能以任意方式相互通信。每一个节点都能实现路由器的功能而在网络中搜寻、维护到另一节点的路由。

多跳路由是目前移动 Ad hoc 网络中研究热点。在源节点和目标节点间采用多跳而不是一跳的方式来传输数据可以增加网络容量和降低传输能量的消耗,但是也会带来新的挑战,如:如何在源节点和目标节点间寻找一条或者多条最优的路径。路由协议在多跳 Ad hoc 网络中起着举足轻重的作用。与单径路由协议相比,多径路由协议同时在多条路径上传输数据包,因此可以更充分地利用网络的能量和带宽。当前对 Ad hoc 网络中多径路由协议的研究主要集中在减小端到端延迟,提高网络吞吐量和路径的鲁棒性上<sup>[4]</sup>。

能量在 Ad hoc 网络中是稀缺资源。常用的判断路径优劣的标准,如跳数,延迟或者鲁棒性,常常导致过度使用中心节点,更快耗尽其能量;最终导致网络被分割和目标节点不可达。所以,如何降低网络中传输信息所需消耗的能量,在时间和空间的尺度上均衡分布网络能量消耗成为延长网络和节点寿命的关键的因素。由于多径路由协议将数据包分散在多条路径中传输,可以在一定程度上缓解中心节点的负担。然而这样并不能实现能量均衡的最优化<sup>[2]</sup>。

本文提出一种基于能量均衡的跨层优化多径路由协议—EMRPC (Energy-aware Multipath Routing Protocol with

Power Control)。EMRPC 是一个以时间和空间尺度上的能量均衡为基本目标的多径路由协议。作为跨层优化路由协议,它使用网络层,MAC 层和物理层的信息来做为路由选择的判据;而在传统的 OSI 分层协议中,这些信息被限制在分割的层内而不能在层与层之间共享。通过在网络层,MAC 层和物理层之间共享信息,实现能量均衡和带宽充分利用。

### 2 相关概念

**定义 1(多径路由)** 无线 Ad hoc 网络中的节点集合  $V$  和节点间的双向链路集合  $E$  构成了一个双向图  $G=(V,E)$ 。对于  $V$  中任意两个节点  $S$  和  $D$ ,寻找  $N$  个有向序列  $\langle V_1^i, \dots, V_n^i \rangle$  满足:

- 1)  $V_1^i = S, V_n^i = D, \forall i; 0 \leq i \leq N$
- 2)  $(V_j^i, V_{j+1}^i) \in E; \forall i, j; 0 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n-1$
- 3)  $V_j^i \neq V_k^j; \forall i, j, k, l; 1 \leq i, j, k, l \leq n, i \neq k, j \neq l$

所得  $N$  个有向序列为源节点  $S$  到目的节点  $D$  的  $N$  条互不相交的数据链路称为多径路由。

**定义 2(能量消耗功率)** 假设发射节点与接收节点之间的距离均匀分布,则使用功率控制时的平均消耗能量是没有功率控制时的  $p = \frac{1}{a+1} p'$  ( $a=2, 3, 4, 5, 6$ ),其中  $a$  是路径损耗指数,  $p'$  为没有功率控制时的能量消耗功率,  $p$  为有功率控制时的能量消耗功率。

### 3 跨层优化多径路由协议基本思想及实现方法

EMRPC 的框架与 DSR (Dynamic Source Routing) 协议相似,但在路由生成、路由选择和路由维护上有本质不同。作为跨层设计协议,EMRPC 还在 MAC 层集成了功率控制机制。

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(编号:60473004),广东省博士启动基金,编号(06300907)。向学哲 讲师,研究方向:网络新技术,分布式计算。

### 3.1 路由生成过程

当源节点有数据要向目的节点发送时,首先检查路由缓存中是否已经包含到目的端的、未过期的路由,若有,则使用下一小节的路由选择标准来选择路由发送数据;否则,广播路由请求包发起路由发现过程。

当路由反馈包被发送回发起路由请求的源节点时,每一个转发该路由由反馈包的中间节点都会把它的当前状态写入包的数据段中,为源节点选择路由提供帮助。被送回源节点的信息包括:

1)物理层提供的中间节点和该节点的下一跳节点间的距离;2)MAC层提供的直到最近一次传输成功前的重传次数;3)网络层提供的当前队列长度;4)节点的剩余能量。

### 3.2 路由选择机制

与 DSR 只是简单地使用最短路径不同,EMRPC 使用了更复杂的路由选择机制以实现多径路由和能量均衡。

首先,EMRPC 使用公式(3.1)来计算各条路径的权重:

$$W = \sum_{i=1}^n (\alpha \times W_{energy}^i + \beta \times W_{queue}^i) \quad (3.1)$$

$W$  是路径权重, $W_{energy}^i$  和  $W_{queue}^i$  分别是节点  $i$  考虑能量和队列所得的权重。 $\alpha$  和  $\beta$  是用来平衡  $W_{energy}^i$  和  $W_{queue}^i$  的权重因子。 $W_{energy}^i$  和  $W_{queue}^i$  越小,该路径被使用的可能性越大。

$W_{energy}^i$  由公式(3.2)和(3.3)得到:

$$W_{energy}^i = (P_{tx}^i / E_{remain}^i + P_{tx}^{i+1} / E_{remain}^{i+1}) \times f(N_{re-trans}^i) \quad (3.2)$$

$$f(N_{re-trans}^i) = 1 + N_{re-trans}^i \quad (3.3)$$

公式(3.2)中的  $P_{tx}^i$  和  $P_{tx}^{i+1}$  分别是节点  $i$  的发射消耗能量和它下一跳节点的接收消耗能量。 $P_{tx}^i$  可以由两节点间距离使用电磁波传播模型,如从 Free Space mode 或者 Two-ray ground reflection model<sup>[2]</sup> 计算得到。 $1 + P_{tx}^i$  对于特定的物理层来说是一个相对固定的值。 $E_{remain}^i$  是节点  $i$  的剩余能量, $N_{re-trans}^i$  则是节点  $i$  在上一次成功传输前的重传次数。

$W_{queue}^i$  代表从节点  $i$  传送一个数据包到其下一跳节点  $i+1$  的能量消耗效率。可以看到该能量消耗效率是节点  $i$  与节点  $i+1$  之间的距离、两节点剩余能量和两节点间无线链路的拥塞状况相关。节点的剩余能量越大,两节点间的距离越短,链路越空闲,则所得到的权重越小,反之则越大。 $N_{re-trans}^i$  在一定程度上表征了节点之间链路的拥塞状况,信道越忙, $N_{re-trans}^i$  取值时间越大。

$W$  由公式(3.4)计算得到:

$$W_{queue}^i = \log(1 + N_{queue}^i) \quad (3.4)$$

公式(3.4)中的  $N_{queue}^i$  是当前节点  $i$  的队列长度。 $W_{queue}^i$  表征队列中的数据包对未来该路径性能的可能影响程度。队列长度越长,则数据包可能遭遇更长的延时,过多数据包消耗本节点的能量也可能使得能量消耗效率  $W_{queue}^i$  快速下降,因此队列长度越长,则  $W_{queue}^i$  越大,该路径被选中的可能性越小。

得到各条路径的权重后,EMRPC 对其进行排序,取最前的  $N$  条路径为传输路径,其后的另外  $N$  条路径作为候补路径。当前版本的 EMRPC 参考文[27]中的结论,将  $N$  设为 3。数据包在这  $N$  条路径中进行分配,权重越小的路径,就分到越多的数据包。这是因为权重越小的路径往往意味着该路径上有着更多的剩余能量,每一跳消耗的能量更低,路径周围的无线信道不是那么的拥塞和有更多的可利用带宽。因此在这样的一些最优或者次优的路径上同时传输数据包就能实现更高的能量消耗效率,更低的端到端延迟和更高的网络吞吐量。

最终,网络传输比特信息所消耗的能量被有效降低,网络寿命延长,在时间和空间的尺度上均衡消耗能量的目标得以实现<sup>[3]</sup>。

### 3.3 路由维护策略

由于在移动 Ad hoc 网络中,关于节点位置、剩余能量和可用带宽信息始终在或快或慢地变化着,为了实现能量均衡的最优,EMRPC 需要了解最新的而不是过时节点信息。

EMRPC 有两种机制来实现节点信息的及时更新。一种方法是使用 TCP 流的 ACK 包或者源节点和目的节点间存在的双向数据流,来捎回路径上节点的最新信息。这种方法几乎不给网络加入额外的负担,而且现实中的网络应用绝大部分都是基于 TCP 或者在两节点间存在信息交互因而存在双向数据流的。但是万一不存在 TCP 流或者双向数据流时,则不可以使用该方法。而且,备用路径上的信息更新也无法使用该方法。

在第一种方法无法奏效的时候,EMRPC 则使用方法二:定期在传输路径和备用路径上发送嗅探包(Sniffer Packet, SP)。SP 在去和回的路上分别两次收集各节点的信息。当源节点接收到返回的 SP 包时,包内的信息一可以用来更新路径的权重,二则用以决定下一次发送 SP 的间隔。如果 SP 包中的两份信息以及原先路由保留的信息变化不大,或者计算所得的权重和其他路径的权重相差较大,则下一次发送 SP 的间隔就被拉大,否则间隔被减小直到一个最小值。

当收到更新后的节点信息时,EMRPC 会重新计算各路径的权重并根据新的排名来选定传输路径和备用路径。

### 3.4 MAC 层的功率控制

为实现能量消耗效率的最优化,在 MAC 层使用功率控制机制是有必要的,因为功率控制会带来更高的吞吐量和更低的能量消耗。而在多径路由中集成功率控制以后,各条不相交路径可以靠得更近,使得传输路径变短,传输消耗总能量减小,从而产生更大的性能增益。在 EMRPC 中使用 iMAC<sup>[1]</sup> 协议来替代 802.11 的 MAC 层协议。限于篇幅,对 iMAC 协议见文[1]。

## 4 EMRPC 性能评估

### 4.1 仿真环境

用模拟实验来验证 EMRPC 协议的性能,比较的对象是 DSR 路由协议,使用的模拟实验环境是 NS-2 模拟器。仿真环境:数据包:512 字节;节点传输范围:250m;初始能量:100;模拟时间:300s;节点数:49;连接数:12;Mac 层协议:iMAC 协议<sup>[1]</sup>;节点队列长度:50;信道传输速率:2Mbps。通过改变 CBR 流中每秒的发包数和节点的运动速度,研究 EMRPC 在不同网络负载和运动模式下的网络寿命、能量效率和系统性能。

### 4.2 能量效率对比

从网络寿命(图 1)和传输每比特信息所需能量(图 2)来衡量 EMRPC 的能量效率。

图 1 是在不同网络负载下对比 EMRPC 和 DSR 的网络寿命。图中的纵轴是网络寿命,这里的网络寿命定义为网络中第一个节点耗尽能量的时间。图 1 中的横轴是每个 CBR 流每秒发出的数据包数,包数越大,则网络的负载就越重,网络的寿命就越短。横轴是每个节点在一次运动中止和另一次运动开始间的间隔时间。可以看到,在不同的网络负载下,EMRPC 起到负载分担的功能,使得节点的寿命得到延长。

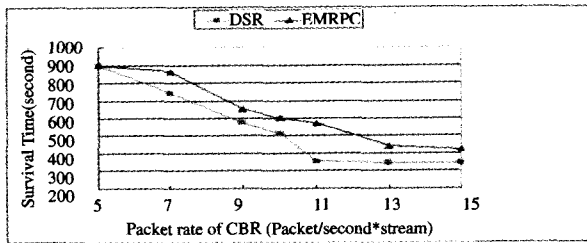


图1 网络寿命

图2显示EMRPC在降低能量消耗上的优势。纵轴的每一数据包平均消耗能量由网络总消耗能量除以成功传输的数据包数量得出,表征了网络协议在能量消耗上的效率。横轴是每个CBR流每秒发出的数据包数,纵轴是每个数据包成功传输所消耗的平均能量。可以看到,EMRPC在不同的网络负载下比DSR有35%~150%的性能增益。在CBR发包率10~15之间,可以观察到DSR的平均消耗能量有一个跳变,这是因为10包每秒已经是单条路径所能容纳的上限,额外的数据包不可避免引起更多冲突而导致更多无谓能量的消耗;EMRPC则可以很好地避免这种情况的发生,因为它可以把多加入的数据包很好地分配到网络的其他空闲路径上去,因此在图2的EMRPC曲线上观察不到类似DSR的跳变。图中两条曲线都随着网络负载增加而略呈上升趋势,这是因为在网络中引入更多的数据包不可避免地增加了数据包发送时的碰撞几率、重新传送次数和能量消耗。

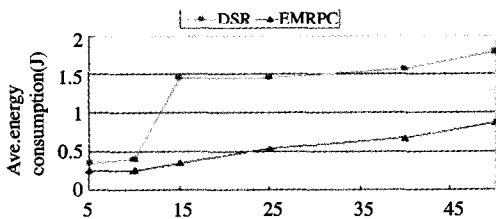


图2 传输每一数据包的平均消耗能量

### 4.3 网络性能对比

从网络吞吐量(图3)和端到端延迟(图4)两方面衡量EMRPC在网络性能上的表现。网络吞吐量是在整个仿真过程中,目的节点正确接收到的数据包的总数。网络吞吐量由两个因素决定:一是带宽复用率,同一时间网络中能容纳越多的发送-接收对,则带宽的利用率越高;另一个是节点的能量储备,枢纽节点过早地消耗光自身的能量将会导致路径中断和目标节点不可达。

图3表明了在不同的路由协议下的网络吞吐量,从实验数据分析得到,使用EMRPC协议的网络和使用DSR协议的网络相比,端到端吞吐量平均提高了3.9%,所以EMRPC协议在实现网络的负载分担的同时,对网络的吞吐量的提高也是有帮助的,但是这个提高比较微弱,主要是因为EMRPC协议中需要不断更新路由来实现自适应,这样会增加网络额外开销,在一定程度上对网络中数据流的吞吐量产生了负面的

影响。

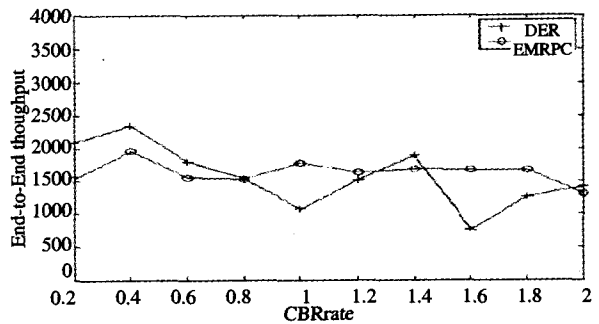


图3 网络吞吐量

图4显示在动态环境下,两种协议的平均端到端延迟性能,实验结果显示,EMRPC协议的平均端到端延迟比DSR协议平均减少了21.7%。而且可以发现,当网络的负载不断增大,网络中的“繁忙”节点逐渐增多时,EMRPC协议和DSR协议相比,平均端到端延迟减少量也不断增大。

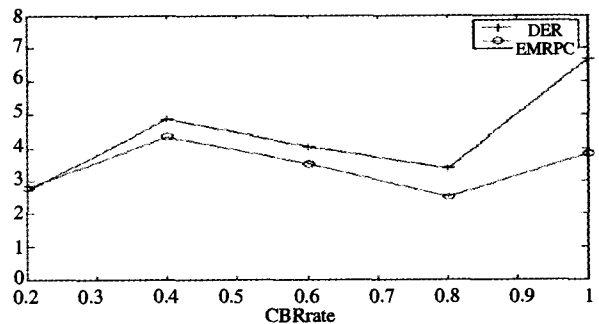


图4 端到端延迟

**结论** 基于能量均衡的跨层优化多路由协议以跨层优化为手段,使用物理层、MAC层和网络层的信息做路由决策并在多条路径上同时传递数据包,实现能量消耗在时间和空间尺度上的均衡。仿真结果表明,该协议不仅拥有以往的多路由协议的优点,同时通过实现网络中的负载分担,减少了繁忙节点的负荷,从而延长了整个网络的寿命,并降低了网络中传输信息的能量开销。在下一阶段的工作中,我们希望能进一步研究节点的移动性对EMRPC协议的具体影响,使得EMRPC在动态环境下具有更好的稳定性。

### 参考文献

- 1 Agarwal S. Distributed Power Control in Ad-hoc Wireless Networks[J]. In: IEEE International Symposium on Mobile Radio communications, 2001. 900~916
- 2 Chakrabarti S, Mishra A. QoS Issues in Ad Hoc Wireless Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(2):142~148
- 3 Krizman K. Wireless position location: Fundamentals, implementation strategies, and sources of error[J]. IEEE Vehicular Technology conference, 1997(5):919~923
- 4 Abolhasan M. Review of routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2:16~22