

MANET 中基于动态拓扑的多路径自适应流量分配算法

安辉耀^{1,2}, 卢锡城², 彭伟², 彭宇行²

(1. 北京大学 信息科学与技术学院, 北京 100871; 2. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 移动自主网络中的大多数多路径路由方案几乎没有考虑流量分配和负载均衡问题。显然, 无论路径质量好坏给每条路径分配相同的负荷, 会大大降低多路径路由机制的性能, 最后会大幅增加网络的通信开销和节点的处理开销。围绕这些问题, 提出了一个基于动态拓扑的多路径自适应动态流量分配方案, 根据路径质量的权重来动态地给多条路径分配数据流量的比例。大多数情况下仅用局部的信息做路由决定, 因此大大减少网络开销。在 OPNET 模拟平台中实现了这个协议, 结果表明, 该方案对于 MANET 网络来说的确是一个可行的方法。

关键词: 自适应; 路径权重; 动态流量分配; 多路径路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2006)07-0020-07

Adaptive traffic distributing based on dynamic topology for multipath routing in MANET

AN Hui-yao^{1,2}, LU Xi-cheng², PENG Wei², PENG YU-hang²

(1. School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to circumvent these problems that led to impose both communications overhead on the network and processing overhead on node in most MANET multipath routing schemes proposed so far when the same size load was distributed into the various paths regardless of the qualities, a scheme called adaptive dynamic traffic distributing multipath routing (ADTDMRP) was proposed, which distributed by proportioning flows among multiple paths dynamically based on the weight value of each path. It made routing decisions using only “local” information at the most of time and thus reducing the network overhead. By implementing the algorithm on the OPNET modeler, the results demonstrate that adaptive dynamic traffic distributing multipath routing is indeed a viable alternative to MANET routing approach.

Key words: adaptive; path weight value; dynamical traffic distribution; multipath routing

1 引言

MANET^[1]网络是由若干无线移动节点组成, 不依赖于建设好的基础设施, 不存在集中式的网络管理的新型网络系统, 其广泛的应用前景使得它成为

目前网络领域的研究热点。它的节点是任意、动态地移动的, 它们之间的链接状况可以随时间变化而变化。这种网络具有资源有限、网络拓扑变化频繁的特性。因此, 对于这种网络来说提供 QoS 服务保障是比较困难的。目前, Internet 中大多数提出的

收稿日期: 2005-06-06; 修回日期: 2006-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60433040, 90104001); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2005CB321801, 2003CB314802)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60433040, 90104001); The National Basic Research Program of China (973Program) (2005CB321801, 2003CB314802)

QoS 路由方案需要在路由器间周期性交换 QoS 的状态信息, 大大增加了网络的通信开销和中心路由器的处理开销。而且, 过时的 QoS 状态信息导致这些 QoS 路由机制的性能剧烈降低。因此, 这些方案不能直接应用于 MANET 网络路由中。近年来人们研究了大量针对 MANET 的路由协议。但这些路由协议大多是基于单路径的。相对而言, 单路径是否最优并不很重要, 因为 MANET 网络是高度时变的, 如果花费太多的代价去寻找最优路径, 那么可能该路径还没有使用就可能已经失效了。在单路径环境中, 自适应的路由方式可能产生振荡现象。因此, 单路径很难通过路由对网络拥塞进行控制。MANET 的基本结构是平面式的, 即所有节点都是对等的, 都肩负终端与路由器两项功能, 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节点与目标节点之间存在多条路径, 因而可以通过多条路径传送业务流, 减少拥塞, 并消除可能的“瓶颈”问题。针对这种特性, 国内外的专家学者就 MANET 网络的多路径技术的研究提出了不少的方案^[2~24], 其目标是在源一目标对之间建立多条路径, 将网络流量分布到多条路径上, 来实现网络负载均衡, 充分利用网络资源。但是, 目前已有的协议大都没有考虑如何在动态变化的多路径之间分配网络负载, 将直接影响到路由效率。因此如何进行动态流量分配是多路径中要解决的关键问题。论文提出一种基于自适应动态流量分配的多路径路由算法, 它从 MANET 路径的动态信息得到各条路径的权重, 根据权重自适应地动态分配数据流量到各条路径中。本文的结构如下: 第 2 节阐述多路径模型及权重计算; 第 3 节介绍基于自适应动态流量分配多路径路由算法; 第 4 节模拟及性能评价; 最后, 第 5 节进行总结。

2 多路径模型及路径权重计算

如图 1 所示的一个简单网络拓扑, 对于一个源一目标对, 假设在它们之间有 n 条跳数最小的路径, p^{\min} 表示跳数最小的路径集。用 p^{alt} 表示可选路径集。因此, 所有可用的路径集为 $p = p^{\min} \cup p^{\text{alt}}$ 。这里, 源 s 和目标 d 由 n 条非交叉的路径 p_1, p_2, \dots, p_n 相连, 并且假定源 s 来说已知路径 p_k 的带宽容量为 c_k 。论文中, 假设源 s 的数据流以平均速度 λ 到达, 且平均流保留时间是 $1/\mu$, 流到达按泊松分布, 流的暂留时间为指数分布。为了简单起见, 假定每个流消耗 1 单

位的带宽。换句话说, 路径 p_k 能在任何时间供给 c_k 条流。所以, 要研究的问题是如何沿着这 n 条路径传送数据流使得整体的阻塞概率最小, 吞吐率最大。论文的思想是根据源和目标间不同路径的权重(路径质量的一个重要的衡量标准)来调整这些路径中所分配的流量(和因此产生的负荷)。即根据路径质量权重的大小按比例分配流量到各条路径中, 来解决流量分配平衡问题。

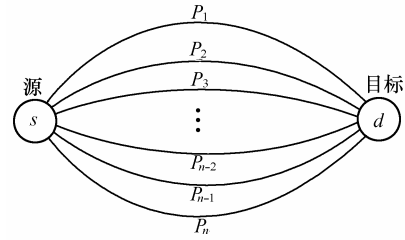


图 1 一组源-目标的非交叉路径模型

由于延时参数是网络状况的一个重要参数, 因此, 这里选择延时参数近似地作为路径可靠性的权值。在前面路由算法介绍中知道, 路径需求消息(RREQ)和路径回答消息(RREP)中的路径质量参数 $P_{l_i}(D(l_i^j), BW(l_i^j), C(l_i^j))$ 都包含了延时参数。对于任意节点, 可以得到 2 个相对于目标节点的最小延时值, 一个是 RREQ 消息的延时时间, 另一个是 RREP 的延时时间, 这里取两者的平均值, 设从源节点到目标节点第 k 条路径的传输延时为该路径的长度, 其大小为源节点收到的 RREP 消息累计延时的一半, 记为

$$l(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=s}^d D(l_i^j)$$

定义 1 有效链路: 如果把从源节点到目标节点的最短延时称为最短长度, 记为 $l_{\min}(s, d)$; 那么对于链路 (i, j) , 若 $l_{\min}(j, d) < l_{\min}(i, d)$, 则称它为有效链路。把通过链路 (i, j) 到目标节点的最短长度称为有效链路长度, 即

$$al(i, j) = l(i, j) + l_{\min}(j, d) \quad (1)$$

定义 2 若记 \bar{l}_i 为与节点 i 相接的所有有效路径的平均长度, 则有效链路 (i, j) 的权重为

$$w_{e(i, j)} = \exp \left[\frac{-k * al(i, j)}{\bar{l}_i} \right] \quad (2)$$

其中, k 为分配参数, 根据与节点相连的链路数来确定取值, 一般取 3.0~3.5。

那么, 节点 i 的点权为节点 i 所邻接的各有效链路权重之和

$$w_n(i) = \sum_j w_e(i, j) \quad (3)$$

得到各路径的权值为

$$w_{p_k} = \prod_{i=1}^n w_{e(i)} * \prod_{j=s}^d w_{n(j)}$$

权重越大的路径, 其可靠性越大, 这是对每条路径进行流量分配的基础。

3 自适应动态流量分配路由算法

基于第 2 节的多路径模型, 下面将介绍一个理论的自适应路由方案。

这个方案可以被看成 2 个阶段: 1) 基于路径权重的比例流量分配路由; 2) 流量分配比例的计算。按比例流路由阶段是一个周期变长的循环。在每个循环中, 流入的流量由选出的一组合合格路径集来传送。每条路径被选择的频率由确定的比例决定。大量的循环形成一个周期, 最后根据它检测到的权重给每个路径计算出一个新的流量分配比例。下面将详细地描述这 2 个阶段。

3.1 流量比例计算

根据第 2 节的路径权重计算得到所有路径的权重, 并按照路径权重值的大小顺序排列, 那么确定使用的 n 条路径一般是指排在前列的 n 条路径。显然, 流量分配比例与路径权重成正比, 也就是说, 权重值大的路径分配的流量比例大, 权重值小的路径具有比较差的性能, 可能根本不会被使用。这里, 设 r_{p_k} 为分配到路径 p_k 的流量比例, 显然 $r_{p_k} > r_{p_{k+1}}$, 因为具有较高失败率的路径所分配的块数不可能比具有较低失败率的路径所分配的块数多。

对于每条路径的流量比例分配, 应考虑几种情形, 对于流量小的会话, 根本不需要使用多条路径来传输流量, 如果使用多条路径, 其所花费的开销过大, 反而得不偿失, 那么就选择其中的最优路径来传输数据, 也就是选择第一条路径来传输流量, 那么这条路径的传输比例就是 1。对于流量较大的会话, 单路径可能不能满足会话的需求, 就使用多路径来传输流量。分配给各路径的流量比例计算如下:

$$r_{p_k} = \frac{w_{p_k}}{\sum_{k=1}^n w_{p_k}}$$

显然, 由于 MANET 的移动性, 网络拓扑容易发生变化, 其路径状况也会经常改变。所以, 对于路径权值的计算也应该经常更新。

在本算法中, 所有节点采用分布式推进方法交换信息, 每个节点保留它能侦听到的相邻节点 IP 地址。每个节点规则地广播一个 HELLO 消息。HELLO 消息包括下列几个域: {节点 i 地址, 相邻节点 j 地址, 链路 (i, j) 状态参数 $P_{ij}(D(l_i^j), BW(l_i^j), C(l_i^j))$ }。当节点 i 收到相邻节点 j 返回的 HELLO 消息时, 可得到链路 (i, j) 的延时参数, 以这个参数更新节点中记录的路由状态信息的延时参数, 从而更新路径权重, 保证路径权重能动态更新。当一个节点 i 接连三次没有收到其邻居 j 的 HELLO 消息时就认为它们之间的连接中断了, 其链路延时为无穷大, 权值就变为 0。

显然, 每发生一个变化马上进行权值更新的代价十分巨大且不必要。这里, 设置一个时间间隔, 即观察周期。在每个观察期结束时重新计算流量比例 $\{r_{p_k}, p_k \in P\}$ 。一个观察周期由 η 个循环组成, η 是一个用来控制统计流量的健壮性和稳定性的可配置的系统参数, 主要由网络拓扑变化情况和负荷稳定程度来确定, 如果变化较慢则设置的值大一些, 变化快, 则设置的值相对小一些, 流量分配愈正确, 观察周期愈稳定, η 的取值范围一般为 1~3 之间。在每个观察周期内, 如果不是网络状况发生巨变, 每条路径分配的流量比例是相对稳定的, 等一个周期结束, 才利用更新的权重重新计算流量比例。如果在一个观察周期内网络发生重大变化, 例如大多数路径都中断了, 那么这时必须重启路径发现程序, 触发权重计算过程, 重新计算各路径的流量分配比例。

3.2 路径选择

在源一目标对之间可能有多条最小跳路径 p^{\min} 和可选路径 p^{alt} 。因此, 所有可用的路径为 $p = p^{\min} \cup p^{\text{alt}}$ 。但是, 其中一些路径的性能可能很差, 以至于根本不使用它们。这意味着可能只需要使用那些可靠的路径。对于一组合合格路径 p^{elg} , 这里使用加权轮询 (weighted-round-robin) 路径选择方式, 根据它的权重 $w_{p_k} = \prod_{i=1}^n w_{e(i)} * \prod_{j=s}^d w_{n(j)}$ 选出一条路径 $p \in p^{\text{elg}}$, 算法选择使用一个确定的算法来保证流量比例维持在一个尽可能小的时间窗之内。它采用确定的路径队列, 队列中的路径具有一定的特点, 即以一个与流量比例相近似的频率周期性地发布。它

通过生成一个路径队列来实现, 这些路径在尽可能小的时间窗内维持流量比例。这个队列由 WRR-Path Selection 快速地产生: 对于每个流入的数据, WRR-PathSelection 生成队列中的下一条路径, 数据流分布到这条路径中去。

图 2 说明了路径选择程序。程序中 n 表示合格路径集 P^{elig} 中的路径数, p_k 表示路径编码, w_{p_k} 代表路径 p_k 的权重, n_{p_k} 表示每个路径 p_k 被选择的次数,

l 表示最近选择的路径的运行长度, $w_k = \sum_{i=k}^n w_{p_i}$,

$N_k = \sum_{i=k}^n n_{p_i}$ 。它维护一个有序的路径表, 被选为这

个列表中的第一个路径必须满足以下 2 个条件: 1) 它的权重远大于它运行时间内记录的其余路径的权重 ($lw_1 < w_{p_0}$); 2) 它被选择的次数与所有其他路径被选择的次数的比值小于或等于它的权重与其余路径权重的比值 ($w_1 n_{p_0} < w_{p_0} N_1$)。否则这条路径的顺序将被延后且运行时间长度重设为 0, 然后返回到列表中的第一条路径。一个简单的 WRR-PathSelection 产生序列的例子如下: 这里假设当前合格路径集 P^{elig} 有 4 条路径 p_1, p_2, p_3, p_4 , 它们的权重分别为 $1/2, 1/4, 1/8, 1/8$ 。那么生成的路径队列为 $p_1 p_2 p_1 p_3 p_1 p_2 p_1 p_4 p_1 p_2 p_1 p_3$, 这个序列有这样的特性: 在每个大小为 2 的时间窗内有一个路径 p_1 , 在每个大小为 4 的窗口里有一个路径 p_2 。同样地, 一个 p_3 和一个 p_4 在所有大小为 8 的窗口里。假设直到最后 p_1 都是被选择的路径, 那么下一个被 WRR 路径选择器选择的处于不工作状态的路径将会是 p_3 。每当合格路径集 P^{elig} 发生改变, 就会产生一个新的序列, 以后到达的流将会按照新的序列传送。

```

1. PROCEDURE WRR-PathSelection ( )
2.   for  $k=1,2,\dots,n$ 
3.     If  $lw_{k+1} < w_{p_k}$  and  $lw_{k+1} n_{p_k} \leq N_{k+1}$ 
4.       break
5.     set  $w_{k+1} = w_{k+1} + w_{p_k} - w_{p_{k+1}}$ 
6.     set  $N_{k+1} = N_{k+1} + n_{p_k} - n_{p_{k+1}}$ 
7.     swap  $p_k$  and  $p_{k+1}$ 
8.     set  $k = 0$ 
9.     set  $n_{p_0} = n_{p_0} + 1$ ;  $N_{p_0} = N_{p_0} + 1$ 
10.    set  $l = l + 1$ 
11.    return  $r_0$ 
12. END PROCEDURE

```

图 2 路径选择程序

4 模拟与性能评估

4.1 模拟环境

应用 OPNET 模拟器来实现提出的算法。在模拟中, 采用具有一定阈值的自由传播模型作为信道模型。在自由空间模型中, 信号天线的能量为 $1/r^2$, r 为移动主机之间的距离。在无线模型中采用无线局域网 802.11 的 DCF 作为 MAC 层协议, 它能够向网络层报告连接中断。假定物理层、链路层及其他层的参数都是固定不变的, 具体参数设置见表 1。

表 1 实验参数及其配置

参数	值	意义
N	50~500	网络节点数
DIM	3 000m×1 000m	区域大小
BW	10Mbit/s	邻居节点的共享带宽
T_d	10ms	物理层和传播延时
H_l	128bit	链路帧头的大小
L_q	500kbyte	链路层的队列大小
v_{\max}/v_{\min}	30/0 (m/s)	节点移动最大/最小速度
t_{\max}/t_{\min}	250/0 (ms)	发送报文的时间间隔

移动性模型采用无序的 waypoint 模型。在这个移动性模型中, 节点从物理位置中随机的选择一个节点作为目的地。以一个介于最大速度和最小速度之间的均匀速度向目的节点移动。到达目的节点后, 暂停一会后继续运动。将暂停时间设为 0~900s 来观察不同的移动性对于性能的影响, 0s 表示连续运动, 900s 表示没有运动。模拟的流量为固定比特流 (CBR)。随机地选择具有相同概率的 20 个源节点和 20 个目标节点。发送报文的时间间隔为 250ms, 在连续几次重发之后都收不到确认信息或者没有缓存来存放数据包时, 包将会被丢掉。为了给每个节点有足够的时间进行初始化, 启动时间设为 30s, 30s 之后产生流量、统计数据。每次会话的模拟时间为 4h。对于每个场景, 执行 10 次, 以不同的随机数种子结果取平均。

4.2 性能评价标准

试验选择一个普通的多路径路由算法-SMR 与提出的方案 ADTDMRP 进行比较, 主要根据下列评价标准来进行性能评估:

网络利用率: 会话有效利用的资源与网络资源的百分比;

平均端到端延时: 从源到目标所有生存下来的

数据报文端到端延时的平均值;

吞吐率: 单位时间传输报文流量的大小;

成功传输率 (SDR):

$$\text{成功传输率} = \frac{\text{收到的报文数}}{\text{原始报文数}};$$

负载平衡: 对于一个特定的 MANET 网络 $G=(V, E)$, 这里使用状态函数 $\text{CoV}(f) = \frac{f(v_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(v_i)}$ 作为负载平衡

的评价标准^[22], 这里 $f(v_i)$ 为节点 v_i 转发的数据分组数, $\text{CoV}(f)$ 越小, 负载平衡性能越好。

4.3 比较结果

图 3 说明了网络利用率情况, 显然, ADTDMRP 的网络利用率比 SMR 的高, 因为 ADTDMRP 根据路径质量合理分配流量, 根据路径稳定性选择路径使用频率, 充分利用了网络资源。会话量小于 1.2 的时候, 两者利用率都增加, 但是大于 1.2 时, SMR 的利用率反而减少, 这是因为 SMR 平均分配流量到各路径中, 当负载足够大的时候, 质量差的路径就可能拥塞, 质量好的仍可能出现“饥饿”状态。

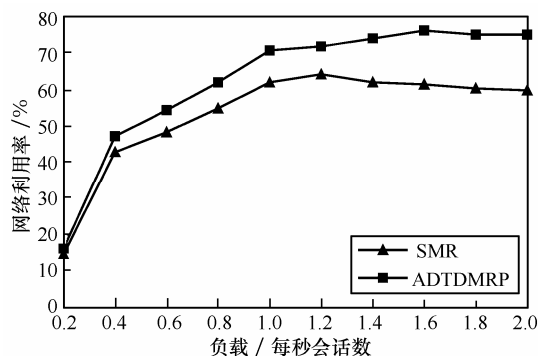


图 3 网络利用率比较

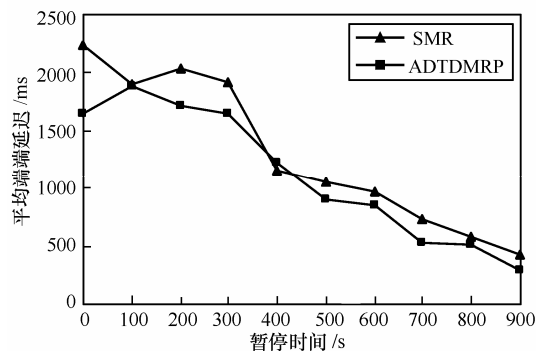


图 4 不同速度的平均端到端延时

图 4 显示平均端到端延时结果。ADTDMRP 的平均端到端延时比 SMR 稍微低一点。这证明根据路径质量进行合理的动态流量分配, 减少拥塞的可

能性从而减少端到端延时时间, 但在低于 300s 的暂停时间内这个提高是有限的。

图 5 和图 6 显示了节点在移动速度为 0m/s 和 10m/s 两种情况下的吞吐率, 显然, 移动速度为 0m/s 时, 吞吐率相对要大一些, 这是因为移动速度增加, 网络拓扑改变频率增大, 导致网络开销增大、吞吐率减少; ADTDMRP 的吞吐率相对 SMR 要大一些, 这是由于 ADTDMRP 对动态流量进行了合理分配, 减少了拥塞的可能性。

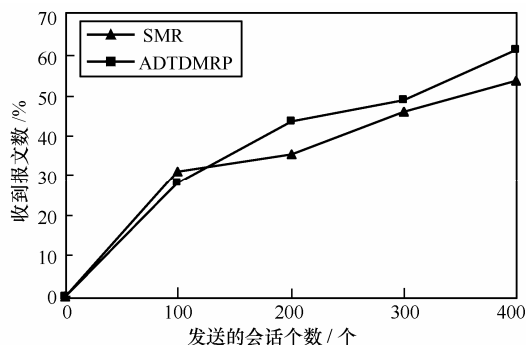


图 5 移动速度为 0m/s 的吞吐率

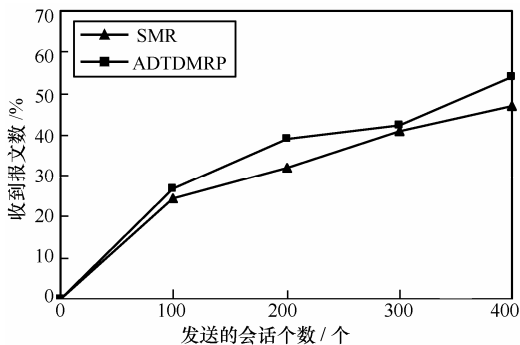


图 6 移动速度为 10m/s 的吞吐率

图 7 说明了 ADTDMRP 和 SMR 的成功传输率。它说明了移动速率设置为 0 到 30m/s 之间的任意值时, ADTDMRP 比 SMR 强。在低速率 (如 1m/s), 两者性能相近, 这是由于节点的移动相对稳定。

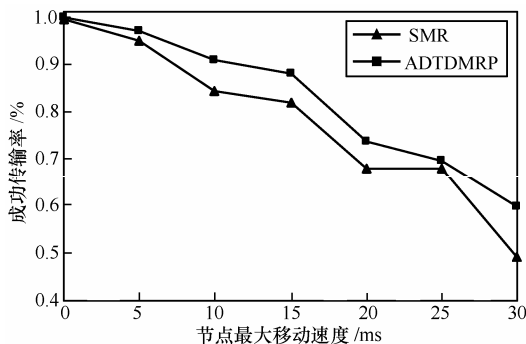


图 7 不同移动速度的报文成功传输率

图 8 给出了负载平衡的结果。ADTDMRP 的负载平衡比 SMR 好,这是因为 ADTDMRP 采用了流量动态分配来实时分布流量,这样就不会出现一些路径超载,而另外一些路径空载的情况。随着暂停时间减少,两者的网络负载 CoV 都减少。这表明移动性增加可能导致节点流量的负载平衡性好。移动性“热点”可能消除掉。

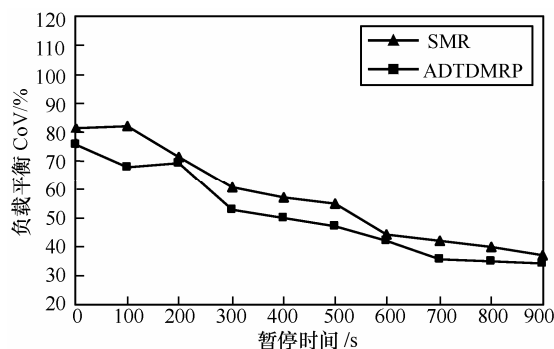


图 8 不同速度的网络负载平衡 CoV

5 结束语

论文提出一个 MANET 中基于动态拓扑的多路径自适应流量分配机制。它针对 MANET 资源不足以及移动性引起拓扑变化的缺点,由路径质量参数计算出路径的动态权重,然后根据路径权重来合理分配网络流量,使得网络资源充分利用,报文数据尽快有效地送达目标节点。通过对机制的性能进行研究和分析,结果表明,相对于普通的多路径路由机制,ADTDMRP 具有较低的路由开销、较高的分组成功传送率以及较好的负载均衡等。

参考文献:

- [1] JUBIN J, TORNOW J D. The DARPA packet radio network protocols [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1987, 75(1): 21-32.
- [2] PETER P P. Congestion Avoidance Using Multipath Routing and Power Control In Mobile ad hoc Network [D]. Adelaide, University of South Australia, 2002.
- [3] ALVIN V, WINSTON K G S, SV R. Cooperative packet caching and shortest multipath routing in mobile ad hoc networks[A]. *IEEE INFOCOM 2003*[C]. San Francisco, CA, USA, 2003. 260-269.
- [4] TSIRIGOS A, HAAS Z. Multipath routing in the presence of frequent topological changes[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(11): 132-138.
- [5] AN H Y, LU X C, PENG W. A cluster-based multipath routing for MANET[A]. *Proc of Med-Hoc-Net 2004*[C]. Bordum, 2004.405-413.
- [6] LOW S H. Multipath optimization flow control[A]. *Proc IEEE Int Conf Networks*[C]. Singapore, 2000. 39-43.
- [7] NELAKUDITI S, ZHANG Z L, TSANG R P. Adaptive proportional routing: a localized QoS routing approach[A]. *IEEE INFOCOM'00*[C]. Tel-Aviv, Israel, 2000.1566-1575.
- [8] PEARLMAN M R, HAAS Z J, SHOLANDER P, *et al.* On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc networks[A]. *ACM MobiHoc 2000*[C]. Boston, Massachusetts, USA, 2000.3-10.
- [9] WANG L, ZHANG L F, SHU Y T. Adaptive multipath source routing in wireless ad hoc networks[A]. *IEEE ICC 2001*[C]. Helsinki, Finland, 2001.867-871.
- [10] NASIPURI A, CASTANEDA R, DAS S R. Performance of multipath routing for on-demand protocols in mobile ad hoc networks[J]. *ACM/kluwer mobile networks and applications (MONET)*, 2001,6(4): 339-349.
- [11] NASIPURI A, DAS S R. On-demand multi-path routing for mobile ad hoc networks[A]. *IEEE ICCCN'99*[C]. Boston, MA, 1999. 64-70.
- [12] LEE S J, GERLA M. AODV-BR: backup routing in ad hoc network[A]. *IEEE WCNC 2000*[C]. Chicago, 2000. 1311-1316.
- [13] WANG L. Multipath source routing in wireless ad hoc networks[J]. *Canadian Conf Elec Comp Eng*, 2000(1): 479-483.
- [14] LEE S J, GERLA M. Split multi-path routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks[A]. *ICC'01*[C]. Helsinki, Finland, 2001. 3201-3205.
- [15] ZHANG L F, YANG W W. MSR: load balancing of multipath source routing in ad hoc networks[A]. *IEEE ICC 2002*[C]. New York, USA, 2002. 3197-3201.
- [16] LIANG Y B. Multipath fresnel zone routing for wireless ad hoc networks[A]. *WCNC 2005*[C]. New Orleans, LA, USA, 2005. 1958-1963.
- [17] 史景伦, 张凌. Ad hoc 网络中的一种独立多路径路由算法[J]. *计算机工程*, 2003, 21(29):14-15,22.
- [18] SHI J L, ZHANG L. An independent multipath routing algorithm for ad hoc networks[J]. *Computer Engineering*, 2003, 21(29):14-15,22.
- [19] 王海涛, 郑少仁. Ad hoc 网络中的多路径传输机制[J]. *中国数据通信*, 2003,7(5):57-62.
- [20] WNG H T, ZHENG S R. Multipath transmission mechanism in ad hoc networks[J]. *China Data Communications*, 2003,7(5): 57-62.
- [21] 郭晓峰, 陈跃泉, 陈贵海. 一种累计多路径的移动自组网络路由策略[J]. *软件学报*, 2004, 15(4):594-603.
- [22] GUO X F, CHEN Y Q, CHEN G H. An aggregated multipath routing scheme for ad hoc networks[J]. *Journal of Software*, 2004, 15(4): 594-603.
- [23] 陈跃泉, 郭晓峰, 曾庆凯等. AMR:一个基于网络最大流的 ad hoc 多路径路由算法[J].*电子学报*, 2004, 32(8):1297-1301.
- [24] CHEN Y Q, GUO X F, ZENG Q K, *et al.* AMR: a multipath routing algorithm based on maximum flow ad hoc networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(8):1297-1301.
- [25] 王辉, 俞能海. 无线 ad hoc 网络中多路径负载均衡性能分析[J]. *通信学报*, 2005, 26(11):30-37, 42.
- [26] WANG H, YU N H. Analysis of load balance performance of multipath in wireless ad hoc networks[J]. *Journal on Communications*, 2005,

26(11):30-37, 42.

- [22] KUI W, HARMS J. On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks[J]. Journal of Communication Software and Networks, 2002,4(1): 48-58.

- [23] 安辉耀, 卢锡城. 移动自主网络多路径技术研究进展[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28 (2):4-9.

AN H Y, LU X C. A review of routing protocol for mobile ad hoc networks[J]. Computer Engineering & Science, 2006, 28 (2):4-9.

- [24] 安辉耀, 卢锡城, 彭伟等. MANET 中基于簇的多路径动态源路由[J]. 计算研究与发展, 2006, 43 (3):381-388.

AN H Y, LU X C, PENG W, *et al.* A cluster-based multipath dynamic source in MANET[J]. Journal of Computer Research and Development, 2006,43 (3):381-388.

作者简介:



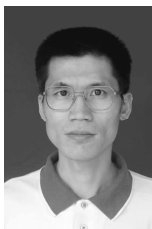
安辉耀 (1972-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 北京大学讲师, 主要研究方向为移动网络、信息安全、微电子等。



卢锡城 (1949-), 男, 江苏靖江人, 院士, 国防科技大学计算机学院教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机体系结构、计算机网络和并行分布式系统。



彭伟 (1973-), 男, 四川绵阳人, 博士, 国防科技大学计算机学院副研究员, 主要研究方向为网络技术和智能算法。



彭宇行 (1963-), 男, 湖南茶陵县人, 博士, 国防科技大学计算机学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为流媒体技术和网络应用。

(上接第 19 页)



洪帆 (1942-), 女, 湖北武汉人, 华中科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机安全与保密、安全计算模型和分布式环境下的访问控制。



崔国华 (1947-), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数据库存储安全、网络通信中的 PKI 技术、安全模型与安全策略。