

文章编号:1000-582X(2010)10-088-06

## 能量高效与移动预测的路由算法分析

朱 斌<sup>1</sup>, 曾孝平<sup>1</sup>, 廖红云<sup>2</sup>, 陈 礼<sup>1</sup>, 韦 耿<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆金美通信有限责任公司, 重庆 400035)

**摘 要:**传统的无线移动自组网路由协议无法实现能量均衡消耗,也不能很好的适应网络拓扑动态变化,为此提出了一种新的基于能量高效与移动预测的按需路由算法。该路由算法在路由发现时排除不稳定链路,让能量较多的节点优先参与路由请求分组的转发,同时通过预测链路连接时间采用主动式局部路由修复策略,在路径实际失效之前就完成修复工作。仿真实验表明,和传统的 AODV 协议相比,文中提出的算法在路由控制开销略有增加的情况下,提高了分组平均投递率,降低了数据分组端到端平均时延,同时能够实现网络中的能量高效,延长了网络寿命,因此具有较强的实用性。

**关键词:**移动自组网;路由协议;能量高效;移动预测

**中图分类号:** TN915

**文献标志码:** A

## On-demand routing algorithm based on load balancing and mobility prediction in wireless mobile Ad hoc network

ZHU Bin<sup>1</sup>, ZENG Xiao-ping<sup>1</sup>, LIAO Hong-yun<sup>2</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, WEI Geng<sup>1</sup>

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Jinmei Communication co. ltd., Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The traditional routing protocol for wireless mobile ad hoc networks is unable to achieve balanced energy consumption and could not adapt to the dynamic topology changes well. A novel on-demand routing algorithm is proposed based on load balancing and mobility prediction. The proposed routing algorithm excludes the unstable links in routing discovery, and allows the node with more energy forward the routing request packet preferentially. In addition, it adopts the active local routing recovery strategy by predicting the link connection time, and finishes the repair work before the link being actually failure. The simulation experiments demonstrate that, comparing with the traditional AODV protocol, with slight increase of the routing control overhead, the proposed algorithm increases the average packet delivery ratio, decreases the average end-to-end delay of the data packets, and achieves load balancing in the network and prolong the life-span of the network, which shows the proposed algorithm is highly practical.

**Key words:** mobile Ad hoc networks; routing protocols; load balancing; mobility prediction

**收稿日期:** 2010-05-27

**基金项目:** 重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC, 2008BB2313); 重庆大学“211 工程”三期资助项目(No. S-09102); 重庆市重大科技专项(CSTC, 2009AB2146)

**作者简介:** 朱斌(1981-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事无线移动自组织网络、无线传感器网络方向研究, (Tel)13594154704; (E-mail)zb@ccee.cqu.edu.cn。

曾孝平(联系人), 男, 重庆大学教授, 主要从事神经网络、通信信号处理、无线移动自组织网络方向研究, (E-mail)zxp@ccee.cqu.edu.cn。

无线移动自组网(mobile ad hoc network, MANET)是由一组带有无线收发装置的移动节点所组成的移动通信网络,采用分布式控制管理,可以不依赖预先存在的网络基础设施而快速展开,具有无中心、自组织、自修复等特点,在救灾抢险、军事战备等需要建立临时通信网络的领域具有广泛的应用前景。

目前,MANET 中的路由协议可以分为先应式路由协议和按需路由协议两类。先应式路由协议虽然在节点发送数据时延时较小,但由于维护了过多无通信需求的节点间的路由状态,因此会产生大量多余的网络路由开销。而按需路由协议只有当节点需要通信时才建立路由,不需要频繁的交换路由信息,大大节省了网络资源,因此更能适应移动自组网的需要,在 MANET 中得到了更广泛的应用。

以 AODV (ad hoc on-demand distance vector)<sup>[1]</sup>和 DSR (dynamic source routing)<sup>[2]</sup>为代表的按需路由协议大多以最少跳数作为路由选择的标准。在 MANET 中,移动节点依靠电池来提供能量,能量决定了节点的生命期。最少跳数路由没有考虑节点和网络的能耗及寿命问题,会过度的消耗部分节点的能量,导致其较早地退出网络。一些节点因此而缺乏中继节点无法再通信,从而影响了网络的连通性,缩短了网络寿命。所以网络中节点能量损耗的公平性即网络能量高效,受到越来越多的关注,需要在路由协议设计中更多的加以考虑。Singh 等人<sup>[3]</sup>提出了 5 种功率感知路由的度量指标,以代替传统的最少跳数指标,延长网络和节点的寿命。文献[4]以节点能量消耗速率(drain rate)作为度量尺度,选取寿命最长的路径建立路由。在 DSR 路由协议的基础上,Kyungtae Woo 等人对其路由发现过程进行改进,提出了 LEAR 算法<sup>[5]</sup>,在多条能量充足的路径中选择最短路径,提高了协议的能量均衡消耗性能。

在 MANET 中由于节点之间相互独立运动,链路可能频繁地发生断裂。当 1 条路径上的任何 1 个链路断裂时,该路径即失效。目前的按需路由协议均是在当前路径已经失效后,才重新启动路由发现过程寻找替代路径。在重路由操作过程中路径已经断裂,必然引起分组传输延迟甚至丢失,严重地降低了网络的运行性能。因此,当网络应用需要可靠的连接来保证一定的服务质量的时候,如何选择 1 条稳定的路径进行路由,保证可以长时间进行通信,降低网络拓扑的动态变化对数据传输的影响,成为 MANET 路由协议研究的 1 个热点问题。文献[6]

使用导频信号估计链路的稳定性,如果节点从某一邻居节点收到的导频信号数目超过给定门限,则认为它们之间链路稳定,在路由时尽量选择稳定的链路。

文献[7]提出了一种备份节点建立机制,备份节点记录一部分到达目的节点的可替换路由,当链路出错时可以利用备份节点进行快速重连。文献[8]使用接收到的信号功率来估计链路断裂的时间,在路径失效之前就发送告警信号到源节点触发重路由操作,降低链路失效带来的影响。

提出了一种新的基于能量高效与移动预测的按需路由算法 EEMPR(energy efficiency and mobility prediction based routing)。该算法以 AODV 路由协议为基础,在路由发现阶段使用节点移动信息对每条链路的连接时间进行预测,排除不稳定的链路,同时考虑节点剩余能量情况,让能量较多的节点优先参与路由请求分组的转发,实现能量的均衡消耗;而在路由维护阶段,采用主动式局部路由修复策略,在路径实际失效之前就完成修复工作,避免链路断裂所带来的数据分组传输延迟及丢失。仿真实验表明,该算法既能够实现网络中的能量高效,延长网络寿命,又尽可能的避免了链路断裂,适应了拓扑结构的动态变化,提高了分组投递率,降低了数据分组端到端平均时延,具有较强的实用性。

## 1 关键技术

### 1.1 能量高效算法

AODV 路由协议在路由发现阶段,源节点采用全网络洪泛方式发送路由请求(RREQ)报文。这种方式仅仅以路由新旧程度和最少路由跳数路径作为路由选择的标准,在洪泛路由过程中,无论节点的当前状态如何,每个节点参与路由建立的机会均等。这样会让具有较少剩余能量的节点加入路由,参与数据的传输,在高业务量的情况下,导致其能量很快耗尽,从而可能引起网络的分离。同时全网络范围内的洪泛会引起路由请求(RREQ)分组的“广播风暴”,影响数据的传输,给网络带来无线资源和能量的极大浪费<sup>[9]</sup>。

笔者在路由发现过程中采用能量高效算法,根据节点剩余能量的多少来决定路由请求分组的转发,使剩余能量值较低的节点以较大的延迟接入到路由中。

当 1 个中间节点收到 RREQ 后,它不再立即转发该请求分组,而是首先查询自己的剩余能量  $E_r$ ,然后根据  $E_r$  值的大小来决定转发延迟时间  $T_d$  的长

短,  $E_r$  越大则  $T_d$  越短, 在延时结束后再进行 RREQ 转发。转发延迟时间  $T_d$  的计算方法如下

$$T_d = (E_0/E_r - 1)T_c. \quad (1)$$

在式(1)中,  $E_0$  为节点的初始能量值,  $T_c$  为转发延迟常量。  $T_c$  的大小设置应综合考虑网络延时、吞吐率、丢包率等网络性能, 选择一个合适的值。如果  $T_c$  太小, 则会降低剩余能量权重对于延迟时间的影响, 从而不能对不同剩余能量的节点产生区别, 而影响路由的选择; 如果  $T_c$  太大, 则会由于路由建立的时间太长而影响数据分组的传输, 降低网络吞吐率。

由于在 RREQ 的传递过程中, 中间节点只会在第一次收到该分组时进行处理, 以后又收到同样的分组则丢弃, 所以可以推知能量较多的节点有更高的优先级参与路由转发, 剩余能量较少的节点参与路由建立的机会被限制。这种路由选择机制平衡了网络中节点的能量消耗, 有效的延长了节点的生存时间。虽然和 AODV 相比, 路由跳数可能会偏大, 但是整条路径能量更充足, 延长了网络寿命, 从全局角度看提高了网络传输效率。

## 1.2 链路连接时间预测模型

在 MANET 中, 假设所有的节点处于 1 个自由空间传播模型当中, 则接收信号的强度仅为传送距离的函数。假设所有节点的设备性能参数相同, 均配置一台收发信机, 忽略信道间相互干扰以及地形、天气等因素的影响, 则所有节点的有效传输距离一致。若两节点之间的距离不大于有效传输距离, 可认为二者在此时能够保持连接。当节点间距离大到一定程度时, 接收到的信号强度低于节点接收器的接收灵敏度, 信号不能被正确接收, 则认为 2 个节点之间的链路断裂。

设节点  $i$  的位置为  $(x_i, y_i)$ , 速度为  $v_i$ , 移动方向为  $\theta_i$ ; 节点  $j$  的位置为  $(x_j, y_j)$ , 速度为  $v_j$ , 移动方向为  $\theta_j$ , 那么以当前时刻为基准, 可以预测节点  $i, j$  之间链路能保持连接的最小持续时间  $LET_{i,j}$  (link expiration time) [10] 为

$$LET_{i,j} = \frac{\sqrt{(a^2 + c^2)r^2 - (ad - bc)^2} - (ab + cd)}{a^2 + c^2}, \quad (2)$$

在式(2)中:  $a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j$ ;  $b = x_i - x_j$ ;  $c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j$ ;  $d = y_i - y_j$ 。对于已保持连接的 2 节点, 当方向与速度都一致时,  $LET_{i,j}$  为无穷大, 即可以一直保持连接。

假设每个节点都带有全球定位系统 GPS (global position system) 设备, 节点移动模型为

Random waypoint 模型。基于以上模型, 如果通过 GPS 获得链路两端节点的坐标、运动速度和方向, 采用上面的公式就能够对每条链路的连接时间进行预测; 如果移动速度和方向为瞬变量, 则无法预测。为了给节点提供预测的依据, 对 AODV 协议中的路由控制分组, 包括路由请求 (RREQ) 分组和邻居节点探测分组 (HELLO) 进行了扩展, 将节点通过 GPS 得到的移动信息作为附加的字段添加到控制分组中, 而其它路由控制分组保持不变。附加的移动信息包括运动速度、运动方向、经度和纬度。为了与原 AODV 协议区分, 用 RREQe 和 HELLOe 分别表示扩展后的路由请求分组和邻居节点探测分组, 而路由应答分组不作扩展, 仍然用 RREP 表示。

## 2 EEMPR 协议描述

提出的 EEMPR 协议是一种按需路由协议, 由 AODV 协议发展而来, 使用扩展后的路由控制分组。EEMPR 协议根据业务需求建立和维护路由, 包括路由发现和路由维护 2 个阶段。

### 2.1 路由发现阶段

当源节点需要发送数据而又没有到目的节点的有效路由时, 为了找到通往目的节点的路径, 它启动一个路由发现过程。源节点将包含自身移动信息的 RREQe 分组向邻居节点广播。

中间节点对收到的 RREQe 的处理流程如图 1 所示。当某一节点  $j$  收到邻居节点  $i$  发给它的 RREQe 后, 首先判断该 RREQe 是不是一个新收到的分组。

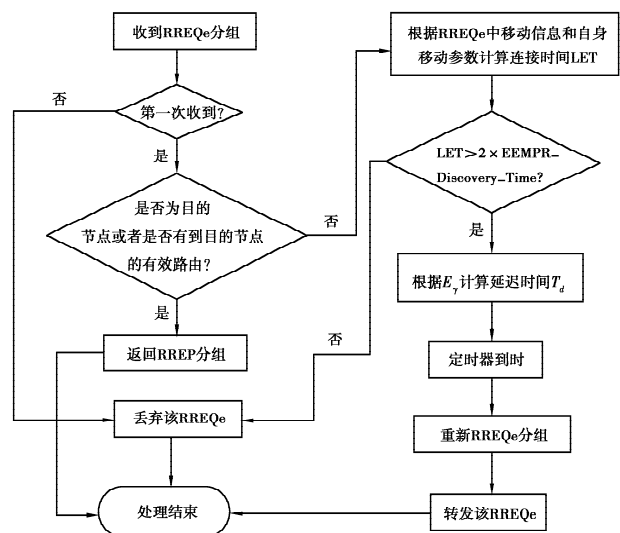


图 1 中间节点对 RREQe 的处理流程图

若不是,则丢弃不作处理。若是而且自己本身不是目的节点,则提取出 RREQe 分组中包含的节点  $i$  的移动信息,将其中的经度、纬度参数转换为节点坐标。节点  $j$  查询自己的移动参数,将其和节点  $i$  的参数一起代入到式(2)中计算,从而预测出节点  $i$ 、 $j$  之间链路能保持连接的最小持续时间  $LET_{i,j}$ 。若  $LET_{i,j}$  小于 2 倍的路由发现时间 (EEMPR \_Discovery\_Time),则丢弃该路由请求分组。系数 2 的设置是为了保证在路由发现阶段结束之前就会失效的链路不会进入路由,同时保证进入路由的链路有足够的连接时间来进行可能出现的主动式局部路由修复。这样在路由建立阶段就避免了不稳定的链路进入路由,增强了路由的可靠性。若  $LET_{i,j}$  的大小满足要求,则执行能量高效算法。首先查询自己的剩余能量  $E_r$ ,然后根据式(1)来计算转发延迟时间  $T_d$  的大小。转发延迟时间到了以后,节点  $j$  将 RREQe 中附加的节点  $i$  的移动信息用自己的当前信息更新,然后将 RREQe 转发出去。

如果目的节点或者具有有效的到达目的节点路由的中间节点收到 RREQe(“有效”指的是该路由条目的目的节点序列号大于或者等于 RREQe 中的目的节点序列号),则该节点以单播的方式向源节点回复一个路由应答分组(RREP)。源节点收到 RREP 后,路由建立过程结束。通过 RREQe 和 RREP 在网络中的传播就建立起了源节点和目的节点之间的双向路由,数据通信可以开始。如果路由发现周期结束仍然没有收到关于目的节点的 RREP,则发送关于该目的节点的 RERR。

## 2.2 路由维护阶段

原始的 AODV 路由协议采用 HELLO 消息机制检测链路中断情况,对有效路由进行维护。具有有效路由的节点通过广播一个  $TTL=1$  的 RREP 包,即 HELLO 消息,来通知邻居节点自己的存在。若节点在一定周期内未收到有效路由中相邻节点的 HELLO 消息,便认为该链路已经中断。中断链路的上游节点向目的节点发起本地路由修复,如果修复失败,则发送 RERR 至相关路由的源节点,由源节点重新启动路由发现过程。

提出的 EEMPR 算法在路由维护阶段,通过扩展后的邻居节点探测分组(HELLOe),进行主动式局部路由修复策略。具有有效路由的节点周期性地广播一个 HELLOe 消息,HELLOe 中附加了节点当前最新的移动信息。收到 HELLOe 的邻居节点提取其中的信息,然后根据自己当前的移动参数计算出节点之间链路能保持连接的最小持续时间 LET,据此预测出启动路由修复过程的时刻:路由修复过程将在等待 ( $LET - EEMPR\_Discovery\_Time$ ) 后启动。

根据这个时刻设置 1 个定时器 (Timer),定时时间到则触发路由修复程序。EEMPR \_Discovery\_Time 是完成路由发现过程需要的时间,一般来说略大于路由修复时间,这样可以保证有足够的时间在路径断裂前完成路由修复工作。路由修复过程由中间节点向目的节点发起,总体上步骤与前述路由建立过程相似。路由修复过程结束后,将当前进行的数据通信切换到新路径上。

采用以上主动式修复策略,可以在路径实际失效之前就完成修复工作,用找到的新路径代替即将失效的链路,数据的传输不受链路断裂的影响,从而避免了原始的 AODV 中被动式的路由修复算法所带来的数据分组传输延迟及丢失。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真环境和性能评估指标

以网络仿真软件 NS-2<sup>[13]</sup> 为平台进行仿真实验,100 个节点在  $4\ 000 \times 2\ 500\ m^2$  的矩形区域内随机分布,每个节点采用全向天线,无线传播模型为 FreeSpace 模型,传输范围为 200 m。节点移动模型为 Random waypoint 模型,从初始位置向 1 个随机选取的坐标位置移动,到达目的位置后的停留时间为 3 s,然后再随机选取目标位置继续移动。节点运动速度在  $(0 - V_{max})\ m/s$  之间随机选择, $V_{max}$  为最大移动速度。实验中源节点和目的节点随机产生,仿真时间为 500 s,应用层流量模型定义为 20 对 CBR 连接,发包速率为 4 packet/s,包长为 512 Bytes,MAC 层使用 IEEE 802.11 协议,在仿真结果中节点能量作了归一化处理。路由发现阶段由路由请求和路由应答两个过程组成,忽略其他的时间开销,在最坏的情况下每个过程所经过的跳数为网络直径传输跳数(取  $4\ 000/200=20$ ),每一跳的传输延时取  $30\ ms^{[1]}$ ,所以路由发现时间 (EEMPR \_Discovery\_Time) 设为  $2 \times 20 \times 30\ ms=1.2\ s$ ,转发延迟常量  $T_c$  设为 0.003 s。

将 EEMPR 路由协议和 AODV 路由协议在相同的条件下进行仿真,所有的仿真结果均是运行 20 次仿真实验后的统计平均值。为了比较 EEMPR 路由协议与 AODV 路由协议的性能,仿真实验中收集的性能评估指标包括

1) 分组平均投递率:目的节点路由层收到的数据分组与源节点路由层发送的数据分组的比率,该指标反映了网络中数据传输的可靠性。

2) 路由控制开销:完成所有实验数据分组传输所对应需要的路由控制分组字节之和(包括中间节点转发的控制分组),该指标反映了路由协议的工作效率。

3) 数据分组端到端平均时延:数据分组从源节

点开始发送到目的节点成功接收到所花时间的平均值,该指标反映了网络中数据传输的效率。

4)节点剩余能量:仿真结束时节点的剩余能量,该指标反映了各个节点的能量消耗情况。

### 3.2 仿真结果及性能分析

图 2 显示了节点最大移动速度  $V_{max}$  与分组平均投递率之间的关系。由图可以看出,随着节点最大移动速度的增大,网络拓扑动态变化导致 2 种协议的分组平均投递率都在下降,但 EEMPR 协议的投递率高于 AODV 协议。由于 EEMPR 协议通过移动预测方式选择连接相对稳定的链路建立路由,同时采用了主动式修复策略,从而避免了频繁的链路断裂,有效的降低了分组丢失率,随着  $V_{max}$  的增加性能优势更加明显。

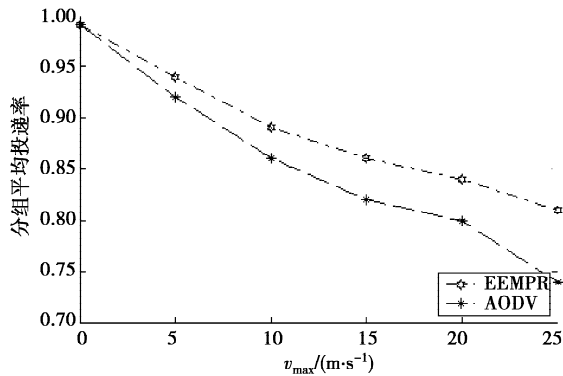


图 2 分组平均投递率

图 3 给出了节点最大移动速度与数据分组端到端平均时延之间的关系。当节点移动速度加大,2 种路由协议的端到端平均时延都有所增加,但新协议的时延明显小于原协议。AODV 协议在链路断裂后将经过该链路的数据分组缓存起来,待修复成功后再重新发送。而 EEMPR 协议由于对当前有效路由使用主动式修复策略,在路径实际断裂前把正在进行的数据分组传输切换到新的路径上,将路径失效对数据传输的影响降到最低,因此表现出了更低的端到端平均时延。

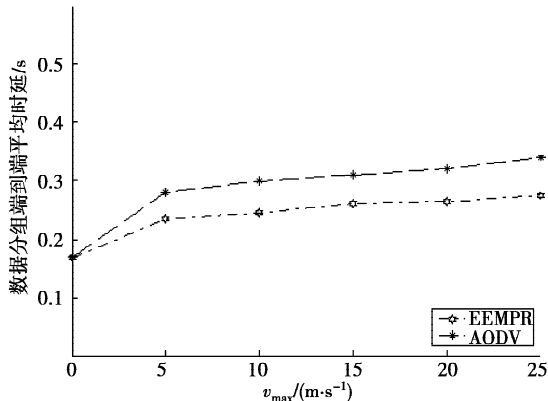


图 3 数据分组端到端平均时延

图 4 显示了节点最大移动速度与路由控制开销之间的关系。随着节点移动速度增大,路径断裂的可能性也增大,导致路由修复的次数增加,所以路由控制开销变大。由于 EEMPR 协议在路由建立时对链路连接时间做了限制,有时可能会没有满足条件的传输路径存在而导致路由重建,在一定程度上增加了路由开销。同时,EEMPR 协议扩展了路由控制分组,这也加大了路由控制开销。但相对于 AODV 协议,EEMPR 协议的路由控制开销的提高比例并不大,在图 4 中,当  $V_{max}$  为 25m/s 时,EEMPR 协议控制开销增加了 4.19%,这在实际应用中是可以接受的。

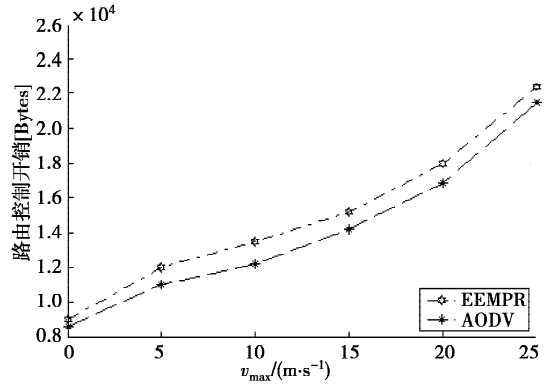


图 4 路由控制开销

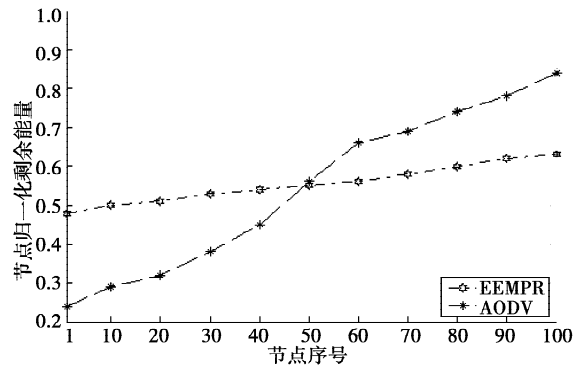


图 5 节点的归一化剩余能量

图 5 显示了仿真结束时 100 个节点各自的归一化剩余能量,按由小到大的顺序排列。由图 5 可以看出,EEMPR 协议由于采用了能量高效算法,限制了能量较少的节点参与路由和数据传输的机会,所以和 AODV 协议相比,较好的实现了能量的均衡消耗,节点剩余能量水平相差不大,延长了网络寿命。

## 4 结 语

提出了一种基于能量高效与移动预测的按需路由算法 EEMPR。该算法在路由发现阶段排除不稳定链路,同时考虑节点剩余能量情况,让能量较多的节点优先参与路由请求分组的转发;在路由维护阶段,通过预测链路连接时间采用主动式局部路由修

复策略,在路径实际失效之前就完成修复工作。通过在 NS-2 平台上的仿真实验表明,和传统的 AODV 协议相比,EEMPR 算法在路由控制开销略有增加的情况下,能够适应拓扑结构的动态变化,尽可能的避免链路断裂,提高了分组平均投递率,降低了数据分组端到端平均时延,同时能够实现网络中的能量高效,延长了网络寿命。

#### 参考文献:

- [ 1 ] PERKINS C E, MROYER E, DAS S. Ad-hoc on-demand distance vector (AODV) Routing[S]. RFC 3561, 2003.
- [ 2 ] JOHNSON D. The dynamic source routing for mobile Ad hoc networks [EB/OL]. [2004208209]. IETF Internet Draft. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>.
- [ 3 ] SINGH S, WOO M, RAGHAVENDRA C. Power-aware routing in mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of Int'1 Conf. on Mobile Computing And Networking, Mobicom'98. [s. l.]: IEEE,1998;181-190.
- [ 4 ] DONGKYUN K, GARCIA L, ACEVES J J, et al. Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2(2): 161-173, 2003.
- [ 5 ] KYUNGTAE W, CHANSU Y, DONGMAN L, et al. Non-blocking, localized routing algorithm for balanced energy consumption in mobile ad hoc networks[C]//9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. [s. l.]: IEEE,2001;117-124.
- [ 6 ] TOH C K. Associativity-based routing for Ad-Hoc

- networks [J]. Wireless Personal Communications, 1997, 4(2): 1-36.
- [ 7 ] WANG Y H, CHUANG C C. Ad hoc on-demand backup node setup routing protocol[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2003, 20(5): 821-843.
- [ 8 ] GOFF T N B, GHAZALEH A B, PHATAK D S, et al. Preemptive routing in ad hoc networks[C]//7th Int. Conference on Mobile Computing and Networking. [s. l.]: IEEE,2001; 43-52.
- [ 9 ] 于宏毅. 无线移动自组织网[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005.
- [10] SU W, GERLA M. IPv6 flow handoff in ad-hoc wireless networks using mobility prediction[C]. IEEE GLOBECOM. 1999; 271-275.
- [11] 肖百龙,郭伟,刘军,等. 移动自组网路由局部修复算法的研究[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(8): 1383-1389.
- XIAO BAI-LONG, GUO WEI, LIU JUN, et al. Research on local route repair algorithm in mobile ad hoc networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2007,44(8): 1383-1389.
- [12] 胡甜,周颖,赵保华. 无线 Ad hoc 网络中的负载均衡广播路由算法[J]. 通信学报, 29(7):129-134, 2008.
- HU TIAN, ZHOU HAO, ZHAO BAO-HUA. Load-balanced broadcast routing in wireless Ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(7):129-134.
- [13] Network Simulator-NS2 [EB/OL]. [2007-05-20]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

(编辑 侯 湘)

#### (上接第 75 页)

- [ 8 ] 中国工程建设标准化协会. CECS 159 : 2004 矩形钢管混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [ 9 ] 福建省建设厅. DBJ13-51-2003 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州: 福建省建设标准, 2003.
- [10] Eurocode 4, 1994. Design of composite steel and concrete structures, Part. 1: General rules and rules for buildings (together with United Kingdom National Application Document)[S]. DD ENV 1994-1-1; 1994, British Standard Institution, London W1A2BS.
- [11] 李珠, 郭秀华, 张文芳, 等. 中国国家大剧院分析中钢管混凝土柱的简化分析[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 34-38.
- LI ZHU, GUO XIU-HUA, ZHANG WEN-FANG, et al. Simplified analysis of concrete filled tubular columns in the structural analysis of national grand theatre of China[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 34-38.
- [12] 陈麟, 张素梅, 陈洪涛, 等. 钢管混凝土空间框架的刚度分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(2):22-26.
- CHEN LIN, ZHANG SU-MEI, CHEN HONG-TAO,

- et al. Stiffness analysis for concrete-filled steel tubular space frame[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture 2001, 34(2):22-26.
- [13] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [14] 张建辉. 方钢管混凝土框架柱的抗震性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- ZHANG JIAN-HUI. Study on seismic behaviors of concrete filled square steel tubular frame columns[D]. TianJin: Tianjin University, 2004.
- [15] 王文达, 韩林海, 陶忠. 钢管混凝土柱—钢梁平面框架抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3):48-58.
- WANG WEN-DA, HAN LIN-HAI, TAO ZHONG. Experimental research on seismic behavior of concrete filled CHS and SHS columns and steel beam planar frames [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3):48-58.

(编辑 陈移峰)