

# 高能量节点驱动的按需距离矢量路由协议

焦臻桢<sup>1,3</sup> 田克<sup>2,3</sup> 张宝贤<sup>3</sup> 钟果<sup>4</sup> 李晓<sup>1</sup> 张岩<sup>1</sup>

(中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011)<sup>1</sup>

(北京邮电大学网络与交换国家重点实验室 北京 100876)<sup>2</sup>

(中国科学院研究生院计算与通信工程学院 北京 100049)<sup>3</sup> (四川电视台 成都 610015)<sup>4</sup>

**摘要** 无线自组织网络中的按需距离矢量路由协议(AODV)没有考虑到能量消耗的均衡性和网络生命期的问题。针对AODV的这一缺点,提出了一种高能量节点驱动的AODV协议(HN-AODV)。此协议将高能量节点驱动的策略应用于按需路由发现过程,尽量选择能量较高的节点来承担转发任务,以此来平衡网络能耗。仿真结果显示,HN-AODV在基本不降低数据传输性能的前提下,显著提高了网络生命周期。这种高能量节点驱动的方案同样可以运用在其它类似的反应式路由协议中。

**关键词** 无线自组织网络,高能量节点驱动,AODV改进,网络生命期

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## High Energy Node Driven On-demand Distance Vector Routing Protocol

JIAO Zhen-zhen<sup>1,3</sup> TIAN Ke<sup>2,3</sup> ZHANG Bao-xian<sup>3</sup> ZHONG Guo<sup>4</sup> LI Xiao<sup>1</sup> ZHANG Yan<sup>1</sup>

(Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)<sup>1</sup>

(State Key Lab of Networking & Switching Tech., Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)<sup>2</sup>

(CCCE, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)<sup>3</sup>

(Sichuan TV Station, Chengdu 610015, China)<sup>4</sup>

**Abstract** We designed a High energy Node driven Ad hoc On-demand Distance Vector routing protocol(HN-AODV) for wireless ad hoc networks. The design objective is to prolong the network lifetime. To achieve this goal, in our protocol design, the path to reach a destination is biased towards those paths constituent of nodes with high energy for balancing energy consumption in the network. Our protocol embeds this high energy node driven feature into the on-demand path discovery process of an existing routing protocol AODV. Detailed protocol design descriptions were provided. Simulation results show that our protocol can greatly prolong the network lifetime as compared with AODV. Moreover, our idea can also work well with other existing on-demand routing protocols for wireless ad hoc networks.

**Keywords** Wireless ad hoc networks, High energy node driven, Improved AODV, Network lifetime

## 1 引言

在无线自组织网络中,因网络节点通信半径的限制,节点间是通过多跳转发的机制进行数据交互的。各节点可以同时充当数据接收节点和网络的路由节点。由于可以不依赖于任何固定基础设施,其支持快速部署的特性非常适用于战场、紧急事故和临时突发场合等。而在这些应用场景中,对于节点的能量十分敏感,因此在设计无线自组织网络的网络协议时,要考虑到节点能量的因素。节点的能量耗尽,不仅会使单个节点不能继续工作,而且整个网络的生命期也会受到影响。

现有的无线自组织网络路由协议一般从端到端投递率、端到端传输时延等特性出发来考虑路由协议的设计,其结果往往导致流量分布不均匀,某些热点区域内的节点能量迅速耗尽,致使网络性能下降,甚至网络瘫痪。所以,通过改进路

由协议来均衡全网能耗、最大限度利用有限的节点能量、延长网络生命周期(即从网络开始运行到网络中第一个节点的能量耗尽所经历的时间)已成为目前的研究热点问题之一。

本文提出了一种高能量节点驱动的按需距离矢量路由协议(High energy Node driven Ad hoc On-demand Distance Vector, HN-AODV),此协议是在按需距离矢量路由 AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)<sup>[1,2]</sup>的基础上改进了能耗的均衡性。高能量节点的思想来源于目的端驱动路由选择策略,目的端驱动的思想来源于 Shaikh 等人提出的目的端多播(DDMC)算法<sup>[3]</sup>和由田克等人提出的目的端驱动按需组播路由算法(D-ODMRP)<sup>[4]</sup>。DDMC 协议设计了一个生成低开销的组播树的算法,基本思想是在建立树的结构时,优先那些经过目的节点较多的路径,这有助于减少整个组播树上节点的数量;D-ODMRP 中也使用了类似的算法,使无线自组织网

到稿日期:2010-01-12 返修日期:2010-04-21 本文受国家自然科学基金(60970137),中科院知识创新工程重大课题(KZCX1-YW-14-4-1)资助。

焦臻桢(1983-),男,硕士生,主要研究方向为无线自组织网络协议,E-mail:jiaozhenzhen@gmail.com;田克(1976-),博士生,主要研究方向为无线多跳网络协议等;张宝贤(1971-),教授,博士生导师,主要研究方向为无线多跳网络协议等;钟果 工程师,主要研究方向为无线网视传输、IP 多媒体子系统;李晓 研究员,博士生导师,主要研究方向为无线网络协议等;张岩 副研究员,主要研究方向为无线网络协议。

络中承担组播任务的节点尽量减少。目的端驱动的方法简单有效,提高了组播协议的转发效率。

本文将首先简介 AODV 及其有关均衡能耗改进的研究现状,之后详细介绍 HN-AODV 的协议机制,最后将给出仿真结果和结论。

## 2 AODV 及其有关均衡能耗的改进

### 2.1 AODV 概述

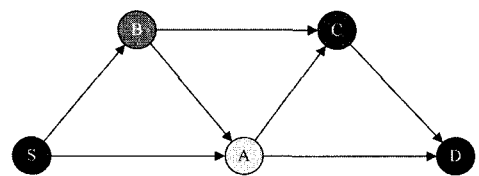
AODV 是无线自组织网络中具有代表性的按需单播路由协议。当节点需要发送信息但又不存在到目的节点的有效路径时,AODV 会进行路由发现过程。源节点首先广播一个路由请求报文(RREQ)。当中间节点收到该分组后,通过检查报文中的源节点地址和广播 ID,判断自己是否已收到过该 RREQ 来决定丢弃或转发该报文。若自己就是目的节点或者存在到达目的节点的路径,则会生成一个路由响应回复报文(RREP),并沿着反向路径单播返回源节点。当 RREP 回到源节点时,就完成了端到端的路由建立过程,数据可通过已建立的路由发送给目的节点。在路由维护阶段,节点通过周期性广播 HELLO 报文监视一跳范围内的链路状态。节点若在数据传输过程中发现链路中断,则产生路由出错报文(RERR)。如果断链处的上游节点与目的节点距离小于一个预设的最大值,则启动本地修复过程,否则由源节点重启路由发现过程。另外,AODV 采用节点维护序列号来避免路由环路,以保证路由的有效性。

### 2.2 现有 AODV 改进方案

AODV 协议没有考虑到节点的能量状况,从而使网络中节点所承担的转发任务不均衡,一部分节点异常繁忙而另一部分节点相对空闲。这种负载的不平衡性致使网络能耗的不均,从而导致网络的生命周期降低。网络的生命周期是指网络从布设到有一个节点能量耗尽所经历的时长。

现有的均衡能耗的改进方法,很多都从改进路由发现过程入手,力求使路由的建立避开低能量节点。以 RREQ 报文的改进为例,文献[5]提出了均衡无线传感器网络能耗的 AODV 改进方案,此方案中节点优先回应来自能量值较高的节点转发来的 RREQ 报文;文献[6]中,作者提出了基于能量和链路状态的 AODV 路由请求转发机制,此方案中低能量节点在转发 RREQ 报文时进行较多的延迟。

这些方法都存在一些问题。考虑如图 1 所示的网络中,S 为源节点,D 为目的节点,网络中节点颜色的深浅代表其剩余能量的高低。节点 A 能量较低,节点 C 能量较高。当目的节点 D 先后收到节点 A 和节点 C 转发来的 RREQ 时,采用优先回应来自高能量节点转发来的 RREQ 报文的机制,目的节点 D 会选择优先回应来自 C 的 RREQ。但此 RREQ 可能是 C 转发自 A 的,不仅没有节约 A 的能量,反而增加了整条链路的消耗。采用低能量节点延迟转发 RREQ 的方式可以解决这一问题,但也存在问题:诸如只考虑了节点能量情况但对节点周围的邻居情况考虑不足,则会导致不能反映网络和节点的时变特性。仍然考虑图 1 所示的网络,在一些只以节点自身能量为延迟依据的方法里,当中间节点 A、B 的剩余能量值都较低且很接近时,它们都会选择一个较大的 RREQ 转发延迟,这会给 RREQ 的转发带来不必要的时延。



(节点颜色的深浅代表其剩余能量)

图 1 示例网络

值得注意的是,现有的依靠改进路由发现过程来实现能耗均衡的方案中均忽略了一个问题:AODV 一旦在路由建立后,只有当链路中断时才进行新一轮的路由发现过程。但这种方案在某些业务量较大的场景中存在很大的弊端,在成功建立路由之后,转发节点的剩余能量可能会被持续的数据传输所耗尽。假设图 1 中源节点 S 成功建立起 S→A→D 的路由,此时节点 A 的剩余能量尚在一个安全范围内,但在之后持续的数据传输中 A 的能量被逐渐耗尽,这期间链路可能一直是稳定的,并没有机会开始新一轮路由发现过程来建立另一条绕开 A 节点的新路由。这种情况下,现有的仅改进路由发现过程的方法不能解决这一问题。

## 3 高能量节点驱动的 AODV

通过以上对现有针对 AODV 有关生命周期的改进方案的分析,本文提出了高能量节点驱动的 AODV(HN-AODV),主要从以下 3 个方面做了改进:

HELLO 报文和节点邻居表结构的改进:使邻居表包含一跳邻居的剩余能量信息,从而节点将能够获知其在周围一跳范围内的邻居节点中所处的相对能量地位(即所排顺位)。

RREQ 转发时延的计算方法:该方法依据节点自身的能量和地位来计算 RREQ 的转发时延。

节点能量感知的路由重发现:在数据传输过程中,根据节点的剩余能量来决定是否向源节点回送 RERR,以唤起新一轮路由发现过程的机制。

从协议运行的整个过程来看,每个节点周期性地在一跳范围内广播携带了能量信息的 HELLO 报文,与一跳邻居节点交换彼此的剩余能量信息,来建立包含能量信息的邻居表。在网络运行初期,节点能量充裕,依然按照 AODV 协议中的路由发现方法来建立路由。在之后的路由发现过程中,当节点转发 RREQ 报文之前,先检测自身剩余能量。若发现自身剩余能量低于初始能量的 40%,将采用 HN-AODV 中提出的新方法来计算 RREQ 转发时延。在数据传输阶段,节点周期性地监视自身的剩余能量情况。如果发现能量降至初始能量的 10%,节点将依照条件判断是否向源端回送 RERR 报文,以唤起新一轮的路由发现过程,从而尽量在高能量节点上建立新的路由。

### 3.1 HELLO 报文及邻居表

AODV 中,每个节点都维护一个邻居表以记录自己的一跳邻居节点,该邻居表的维护是通过 HELLO 报文在一跳范围的交互。节点处于已建立路由中的某条路径上时,就会开始间歇性广播 HELLO 报文,以获得链路连通性信息。

HN-AODV 在 HELLO 报文和邻居表的原有结构上,添加了能量信息域。节点发送 HELLO 报文时,将同时携带自身的剩余能量值。收到 HELLO 报文的节点在建立/更新自己的邻居表时也将同时建立/更新相应的能量信息表项。于

是,节点所维护的邻居表将始终记录其每个邻居节点在上一次 HELLO 报文交换时的剩余能量情况。通过该机制,可以让每个节点获知自身剩余能量在周围一跳范围内邻居节点的剩余能量值中所处的地位。

### 3.2 RREQ 转发时延

在 HN-AODV 中,RREQ 的转发时延是以能耗均衡为准则的。转发时延依据节点剩余能量的变化及其在一跳范围内节点的剩余能量中所处的地位来确定。具体算法描述如下。

在网络运行一段时间后,节点能量有所消耗,同时已获知周围邻居节点的能量情况。当网络中出现新的路由发现请求,节点在接收到 RREQ 报文并需要转发,且发现自身能量降至一个门限值以下时,节点将使用下面的公式计算 RREQ 的转发时延  $RREQDelay$ :

$$RREQDelay = (\exp(1/(E_r + K_1)) + (K_2^N - K_2) + \text{rand}(0,1)) \times T$$

式中,  $E_r$  代表节点当前剩余能量比(当前剩余能量值/初始能量值);  $N$  代表节点的剩余能量由高到低在一跳范围内所有节点中所排的顺位;  $K_1, K_2$  为常量,代表延迟增长系数,仿真实验里取  $K_1 = 0.4, K_2 = 1.1$ 。  $T$  为常量,仿真实验中设为 100ms。  $\text{rand}(0,1)$  表示 0 到 1 之间的一个随机数,用以避免各节点发送 RREQ 时发生冲突。

我们利用了指数函数和幂函数的特性来选择与节点剩余能量和剩余能量排位有关的两个分量  $\exp(1/(E_r + K_1))$  和  $K_2^N - K_2$ 。分量  $\exp(1/(E_r + K_1))$  代表了节点剩余能量  $E_r$  对延迟时间的影响。图 2 描绘了当  $E_r$  在 0 到 0.4 之间变化时函数值的变化趋势,随着  $E_r$  愈接近零值(电量耗尽),函数增长愈快。分量  $K_2^N - K_2$  代表节点剩余能量在一跳范围内所有节点中的地位给延迟时间带来的影响。图 3 显示了分量  $K_2^N - K_2$  的变化趋势,  $N$  值较大,代表了节点的邻居节点数量多且其能量所排顺位靠后,则可说明节点周围有许多能量更为充裕的可用备选转发节点。因此,节点会选择更长的延迟时间,以降低被选为转发节点的可能性,反之亦然。有两个值得注意的情况:首先是当  $N=1$  时,代表节点能量排在首位,此时  $K_2^N - K_2 = 0$ ,即该分量对最终延迟没有影响;其次是节点只有一个邻居的情况下,考虑到此唯一邻居是发送给节点 RREQ 报文的发送节点,那么无论此时  $N$  取 1 或 2 对网络都没有影响。由于节点的移动性,在上一次 HELLO 报文交换之后,节点通信范围内可能出现了新的节点尚未纳入其邻居表中,因此允许该节点继续发送 RREQ。

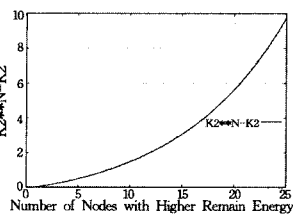
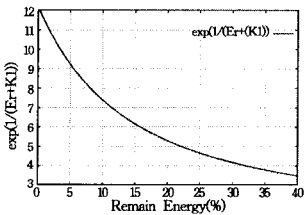


图 2 剩余电量对延时取值的影响 图 3 节点能量地位对延时取值的影响

### 3.3 能量感知的路由重发现

AODV 在完成路由发现过程后,只有当探测到转发链路中断时才发起新一轮的路由重发现过程。但如果网络中业务量较大且比较持续时,转发路径上的节点可能会由于连续的数据传输而耗尽能量,导致网络死亡。现有的依靠改进路由

发现过程来实现均衡网络能耗的方法不能解决这一问题。

HN-AODV 在数据传输过程中引入了能量感知的路由重发现机制,用以实时地监测自身剩余能量,并在能量较低时发起新一轮路由发现过程,使低能量节点的高能量邻居节点有更大的机会承担转发任务,从而起到邻居节点帮助转发的目的。当探测到节点剩余能量低于初始能量 10%,节点邻居节点数大于 2,且其自身剩余能量排在最后  $M$  位(仿真实验中  $M=2$ )时,则向源节点  $S$  回送 RERR 报文,唤起新一轮路由发现过程。设置邻居节点数大于 2 的原因是,如果节点的邻居数不大于 2,该节点可能是一个不可取代的节点。

例如,在图 1 所示的网络中,建立了一条端到端的路由  $S \rightarrow A \rightarrow D$ (此时节点  $A$  的能量高于其邻居节点  $B$ ),在数据传输的过程中节点  $A$  的能量逐渐消耗。当其能量低于 10% 时,节点向源端  $S$  回送 RERR 报文,唤起新一轮路由发现过程。在新一轮路由发现过程中节点  $B$  的能量较高,它将代替  $A$  承担转发数据的任务,以达到网络节点能量均衡的目的。

考虑另一种情况,假设图 1 中节点  $B, C$  不存在,剩余能量排在最后 2 位,则节点  $A$  是源节点  $S$  到目的节点  $D$  的唯一路径。如果节点  $A$  在其能量低于 10% 时便无条件发出 RERR 报文,再一次的路由重发现过程仍然会将  $A$  设为转发节点,这样的路由重发现没有意义。

## 4 仿真与分析

为验证 HN-AODV 协议的性能,本文在无线网络仿真平台 GloMoSim<sup>[7]</sup> 上进行了仿真实验,并与 AODV 进行了比较。

### 4.1 仿真环境

GloMoSim 使用 PARSEC 提供可扩展的并行离散事件仿真,是一种仿真效率较高的仿真平台。在仿真中设置了 50 个移动节点,随机分布在  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  的矩形区域内。每个节点的无线带宽设为 2Mbit/s,无线传输模型采用双径地面反射模型,MAC 层协议采用 IEEE 802.11。数据流采用 CBR 业务,包长度为 512bit,发送间隔为 0.25s,最大连接数为 20。节点的无线发射半径均为 250m。节点使用 Random Waypoint 移动模型<sup>[8]</sup>。此移动模型的移动机制为:节点以固定速率向区域内一个随机选定的位置移动,当运动到此位置后停留一段时间,随后又随机选择另一位置继续匀速运动。仿真中设置停留时间为 0s,节点的最大移动速度分别为 0m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s。网络中每个节点的初始能量均为 80J,发射功率为 200mW,接收功率为 100mW,在能量低于 30J 时启动高能量节点驱动机制。每次仿真实验时间为 500s。

### 4.2 仿真结果分析

图 4 所示为在不同节点移动速度下采用 HN-AODV 和 AODV 的网络中的数据包包递率的对比。可以看出,HN-AODV 在数据包投递率这一性能指标上与 AODV 基本持平。

图 5 对比了在不同节点移动速度下采用 HN-AODV 和 AODV 的网络中数据包的平均端到端延迟。在路由发现中延迟 RREQ 转发的方法普遍会给网络的端到端延迟带来额外的增长。从图 5 可以看出,当节点最大移动速度在 15m/s 以下时,改进后的协议端到端延迟并不高于 AODV。这是因为采用 HN-AODV 计算出的延迟,在网络运行的多数情况

(下转第 103 页)

性。本方案需要删除成员时,需要处理的数据量仍然较大。今后我们将在此方案的基础上进一步改进多秘密共享方案。

### 参考文献

[1] Shamir A. How to share a secret [J]. Communications of the ACM, 1979, 22(11): 612-613  
 [2] Harn L. Efficient sharing(broadcasting) of multiple secrets[J]. IEE Computers and Digital Techniques, 1995, 142(3): 237-240  
 [3] Heidarvand S, Villar J L. Public verifiability from pairings in secret sharing schemes[C]//SAC 2008, LNCS 5381: 294-308  
 [4] Tartary C, Pieprzyk J, Wang Huaxiong. Verifiable multi-secret sharing schemes for multiple threshold access structures[C]// Inscrypt 2007, LNCS 4990: 167-181  
 [5] 甘元驹, 谢仕义, 等. 对安全有效的  $(t, n)$  多秘密共享认证方案的改进[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1642-1644  
 [6] 贺军, 李丽娟, 李喜梅. 一种新的可验证多秘密共享方案[J]. 计算机工程, 2009, 35(9): 119-120  
 [7] 庞辽军, 裴庆祺, 等. 基于 ID 的门限多重秘密共享方案[J]. 软

件学报, 2008, 19(10): 2739-2745  
 [8] 步山岳, 于坤, 王汝传. 一种基于 NTRU 算法的秘密共享方案[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(10): 1986-1987  
 [9] 刘锋, 何业锋, 程学翰. 动态的  $(t, n)$  门限多秘密共享方案[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 241-245  
 [10] 王天成, 张建中. 一个动态门限多重秘密共享方案[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(33): 75-76  
 [11] 殷凤梅, 侯整风. 可选子密钥的门限多秘密共享方案[J]. 计算机应用, 2007, 27(9): 2187-2188  
 [12] IEEE. Standard specifications for public-key cryptographic techniques based on hard problems over lattices(version D12), (October 2008)[OL]. <http://grouper.ieee.org/groups/1363/lattPK/draft.html>  
 [13] 步山岳, 张有东, 王汝传. NTRU 公开密钥体制快速实现算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(5): 216-220  
 [14] 祝建华, 崔国华, 等. 一种可信多重密钥共享认证方案[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(4): 635-638  
 [15] 李锋, 李大兴. 一种改进的多重密钥共享的门限方案[J]. 计算机工程, 2008, 34(5): 11-13

(上接第 93 页)

下,给整个路由发现过程中带来的额外延迟是极小的,对最终的网络端到端延迟几乎不会带来影响。在节点最大移动速度超过 15m/s 时,HN-AODV 较 AODV 端到端延迟有所增加,这是因为节点移动导致的链路失效情况增多,重复的路由发现使节点能量迅速下降,剩余能量比值  $Re$  的减小导致  $RREQDelay$  计算公式中分量  $\exp(1/(E_i + K_i))$  带来的延迟增大,从而略微增加了网络端到端延迟。

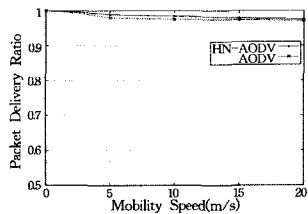


图 4 不同速率下的网络包投递率比较

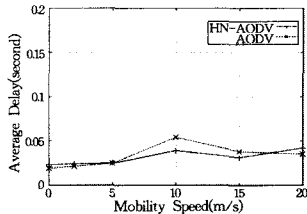


图 5 不同速率下的网络平均端到端延迟比较

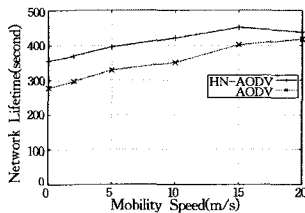


图 6 不同速率下的网络生命期比较

图 6 对比了在不同节点移动速度下采用 HN-AODV 和 AODV 的网络的生命周期。可以看到,使用 HN-AODV 的网络的生命期最高可提高 26.3%,平均提高约 17%。这是由于 HN-AODV 使能量相对较低的节点在路由建立过程中被尽量避开;同时照顾到了数据传输过程中能量消耗较大的节点,由其邻居节点分担其转发任务,从而延长了这些节点的存活时间,进而均衡了网络的能耗,延长了网络生命周期。

从以上分析可见,HN-AODV 在基本不损失 AODV 转发性能的前提下显著延长了网络生命周期。

**结束语** 本文提出了无线自组织网络中的一种高能量节

点驱动的 AODV 协议(HN-AODV)。HN-AODV 改进了 AODV 的 HELLO 报文和邻居表结构。提出了计算路由发现过程中 RREQ 报文的转发延时的新方法,在数据传输过程中加入了节点能量感知的路由重发现机制,使得能量充裕的邻居节点可帮助低能量节点承担数据转发任务。使用这些方法,HN-AODV 相对于 AODV 改进了节点能耗的均衡性,从而延长了网络生命周期。这种高能量节点驱动的方案同样可以运用在类似的反应式路由发现协议中。仿真结果显示,HN-AODV 协议相对于 AODV,在保证良好端到端转发延时和端到端投递率的基础上,均衡了网络能耗,延长网络生命周期达 26.3%。

### 参考文献

[1] Perkins C E, Royer E M. Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing[C]// Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications(WMCSA). 1999: 90-100  
 [2] Perkins C E, Royer E M, Das S R. Ad Hoc On-demand Distance Vector(AODV) Routing[S]. RFC3561  
 [3] Shaikh A, Shin K. Destination-driven routing for low-cost multicast[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 373-381  
 [4] Tian K, Zhang B, Mouftah H, et al. Destination-driven On-demand Multicast Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). 2009  
 [5] 刘雯雯, 马锐, 许海滨. 均衡无线传感器网络能耗的 AODV 改进方案[J]. 计算机工程, 2008, 34(22): 143-147  
 [6] 郝聚涛, 赵晶晶, 李明禄. 基于能量和链路状态的 AODV 路由请求转发机制研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(7): 68-70  
 [7] UCLA Parallel Computing Laboratory and Wireless Adaptive Mobility Laboratory. GloMoSim: A Scalable Simulation Environment for Wireless and Wired Network Systems[D]  
 [8] Bai F, et al. The IMPORTANT Framework for Analyzing the Impact of Mobility on Performance of Routing for Ad Hoc Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(4): 383-403