

移动 Ad Hoc 网络中路由自愈的实现

秦丹阳, 马琳, 沙学军, 徐玉滨

(哈尔滨工业大学 通信技术研究, 哈尔滨 150001, qindanyang@hit.edu.cn)

摘要: 针对由于路由不稳定导致通信质量变差, 建立了一种高效的适用于无线链路中断时路由重构的自愈模型, 基于最优搜索方程提出了一种限制下一跳节点搜索区域的自愈方法, 旨在提高移动 Ad Hoc 网络的抗毁性, 在路由损毁时维持数据持续传输的同时减小链路重构所需的开销和时延, 以实现网络路由的快速自愈. 基于 NS-2 的仿真结果表明, 本文所提出的路由自愈方法对移动 Ad Hoc 网络的开销有较为明显的改善, 有效的避免了网络节点的移动、RF 传播条件变化、节点被毁等原因造成网络结构上的损伤, 减少频繁路由寻找耗费的能量, 从而实现了移动 Ad Hoc 网络的抗毁性以及路由的可用性.

关键词: 移动 Ad Hoc 网络; 路由自愈; Eikonal 方程; 传输方程; 射线法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0046-05

Realization of route self-healing for MANET

QIN Dan-yang, MA Lin, SHA Xue-jun, XU Yu-bin

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, qindanyang@hit.edu.cn)

Abstract: Aimed at the node mobility and shared wireless links in Mobile Ad Hoc Network (MANET), this paper proposes a route self-healing technique for source-initiated routing protocols by restricting the route-required zone on forward nodes in order to reduce the overhead and time delay during route maintenance and allow continuous packet forwarding for fault resilience. The NS-2 based simulation shows that the throughput is improved and the overhead is decreased for source-initiated routing with route self-recovery in the case of highly dynamic environments and heavy traffic loads, which proves that the proposed protocol is more robust and stable than other protocols.

Key words: MANET; route self-healing; Eikonal equation; transmission equation; beam method

移动 Ad Hoc 网络 (Mobile Ad Hoc Network)^[1] 是一种不依赖于任何基础设施的分布式网络, 网络中的移动节点通过无线信道自组, 建立动态、多跳的网络结构, 从而允许人们和装置在没有预先存在通信基础设施的环境中进行无缝的互联互通^[2-3]. 移动 Ad Hoc 网络中的每个节点具有足够的智能连续侦听和寻找其他临近节点, 动态确定数据分组的最佳传输路径, 并把分组逐跳的转发到网络中的任何其他节点. 然而节点的移动、

信道的干扰和能源消耗等因素使得移动 Ad Hoc 网络的拓扑结构具有动态变化的特性, 这给高性能路由协议的设计带来很大的挑战^[4-5]. 本文针对这种路由不稳定将导致通信质量变差的不足, 建立了一种高效的适用于无线链路中断时路由重构的自愈模型. 对下一跳节点的最优搜索方案通过最小化代价泛函来实现, 并通过定义 Hamiltonian 函数将搜索方程简化为 Eikonal 方程和传输方程的形式, 基于射线法获得该一阶非线性偏微分方程的解. 为了能够在实际通信过程中实现这种最优搜索, 本文提出了把对下一跳节点搜索范围约束在一个指向目的节点的扇形区域的自愈模型, 使得当源节点到目的节点的路径发生中断时整个路径无需通过全网广播重新查找路由, 而是从当前中断节点之上游节点开始, 基于一个预先

收稿日期: 2008-09-02.

基金项目: 国家基础研究发展计划资助项目 (2007CB310606);
新一代宽带无线移动通信网科技重大专项
(2009ZX03004-001).

作者简介: 秦丹阳 (1983—), 女, 博士研究生;
沙学军 (1966—), 男, 教授, 博士生导师.

设定的张角查找合适的路径以修复断开的链路,从而在路由损毁时能够维持数据传输并减少频繁发起路由寻找耗费的能量,以实现 MANET 的抗毁性以及路由的可用性。

1 路由自愈的最优搜索模型

最优搜索理论是关于如何以一种“最佳”的方式寻找某个事先已确定的对象的理论.该理论可以帮助研究人员计算出针对搜索空间的各个区域中搜索资源的每一种分配方法所对应的成功探测到搜索目标的概率是多大^[6].

1.1 最优搜索理论模型

由于问题的相似性,本文尝试在移动 Ad Hoc 网络结构框架下来考虑当路由链路失效时自愈节点对下一跳节点的最优搜索问题.其解就是找到一种对于搜索时间的最优分配方法,使得成功探测到搜索目标的可能性达到最大值,或者使得成功探测到目标所需代价的期望值达到最小值.在搜索开始时目标节点的位置不能被精确确定,但是可以由一个探测概率函数来加以刻画,通过选择适当的变量使得在一个固定时刻发现目标节点的概率达到最大化,从而使针对随机运动目标节点的搜索达到最优.考虑到 MANET 的网络特性,最优搜索方案可以通过最小化成本泛函来实现.

设 $X(t) \in \mathbf{R}^n$ 为目标节点在时刻 t 的位置, $S(t) \in \mathbf{R}^n$ 为自愈节点在时刻 t 的位置,联合概率密度 $f(x, t, S)$ ^[7] 可由下式来定义:

$$f(x, t, S) dx = \text{Prob}[x \leq X(t) \leq x + dx |$$

沿着 $S(\tau) (0 \leq \tau \leq t)$ 搜索不成功].

显然, t 趋于 0 时联合概率密度 $f(x, t, S)$ 趋于初始概率密度 $f_0(x)$. 在时刻 t 的探测概率如式(1)所示:

$$b_i = 1 - \int_D f(x, t, S) dx. \quad (1)$$

其中的积分区域 D 是目标节点所在的区域,也就是说 D 是搜索空间 $\mathbf{R}^n$ 的子集,且目标节点位于其中的概率大于 0,二维情况下联合概率密度函数所满足的搜索方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{d^2}{dx^2} (a_{11}f) + 2 \frac{d^2}{dx dy} (a_{12}f) + \frac{d^2}{dy^2} (a_{22}f) \right] - \\ \frac{d}{dx} (b_1 f) - \frac{d}{dy} (b_2 f) - \psi(x, y, t, S) f, \\ f(x, y, 0, S) = f_0(x, y). \end{cases} \quad (2)$$

目标节点在时间区间 $[t, T]$ 上的存活概率 $u(x, t, T, Z)$ 定义为

$u(x, t, T, Z) = \text{Prob}[\text{目标节点在 } [t, T] \text{ 未被探测到} | \text{给定初始位置 } X(t) = x(t \leq \tau \leq T)]$.

不难注意到 $f(x, t, Z)$ 依赖于当前目标节点的位置,而 $u(x, t, T, Z)$ 依赖目标节点的初始位置且当 $t \rightarrow T$ 时,一定有 $u(x, t, T, Z) \rightarrow 1$ 成立.由此可以推导出一般情况下的搜索方程组,如式(3)所示:

$$\begin{cases} u_t + \frac{1}{2} \sum c_{ij} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + \sum a_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = b(x, t, z) u, \\ f_t = \frac{1}{2} \sum \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (c_{ij} f) - \sum \frac{\partial}{\partial x_i} (a_i f) - b(x, t, z) f. \end{cases} \quad (3)$$

设方程的解具有式(4)所示的形式,其中函数 $\phi(x, y, Z)$ 和 $g_n(x, t, Z)$, $n = 0, 1, 2$ 是待定的未知函数.

$$f(x, t, Z) = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n g_n(x, t, Z) \right] e^{\frac{-\phi(x, y, Z)}{\varepsilon}}. \quad (4)$$

由此得到 $f(x, t, Z)$ 的各阶导数(微分)的表达式,代入搜索方程(3)中,所得结果形式恰好符合 Eikonal 方程和 m 阶传输方程的形式,分别如式(5)~(6)所示:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \sum_i a_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j} c_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_m}{\partial t} = & \sum_{i,j} \left[\frac{c_{ij}}{2} \left(\frac{\partial^2 g_{m-1}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{2 \partial g_m}{\partial x_i} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \frac{g_m \partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \right. \\ & \left. \frac{2 \partial c_{ij}}{\partial x_i} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \frac{2 \partial c_{ij}}{\partial x_j} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} g_m - \frac{\partial^2 c_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} g_{m-1} \right] + \\ & \sum_i \frac{\partial g_m}{\partial x_i} - \left(b + \sum_i \frac{\partial a_i}{\partial x_i} \right) g_m. \end{aligned} \quad (6)$$

这里 Eikonal 方程和传输方程同电磁场和电磁波中波动方程的渐近解相类似,可由“射线法”求解^[8].

1.2 最优搜索方程化简求解

考虑到 Eikonal 方程是一阶非线性偏微分方程,这里定义 Hamiltonian 函数为

$$H(x, p, t) = \sum_i a_i p_i + \sum_{i,j} \frac{1}{2} c_{ij} p_i p_j, \quad (7)$$

则方程(5)可以写成

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + H\left(x, \frac{\partial \phi}{\partial x}, t\right) = 0. \quad (8)$$

微分方程组(9)可以看作是空间 (x, p) 中从点 (x_0, p_0) 发出的一条射线,如果 $x(t)$ 和 $p(t)$ 满足此方程组,则由式(6)可以得到式(10),这个方程的解至少在局部上也是式(6)的解.沿着方程组(9)产生的射线方向上,原搜索方程被化简为一个常微分方程,解这个常微分方程便可以得到原方程的最优解.

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i}, & x_i(0) = x_{i_0}, \\ \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, & p_{i_0}(0) = p_{i_0}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= -H(x, p, t) + \sum_i p_i \frac{dx_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} c_{ij} p_i p_j, \\ \phi(0) &= \phi_0. \end{aligned} \quad (10)$$

2 移动 Ad Hoc 网络中路由自愈的实现

本文中移动 Ad Hoc 网络的原始路由由协议采用 AODV 协议. 首先假定在通往目的节点的一条路由损毁或失效后, 新的重构路由不可与原路由的出入过大, 以求在不通知原路由其它节点当前路由失效的前提下, 局部对失效路由修复以使得开销及对其他业务的影响保持最小^[9].

2.1 路由发现与维护

当一个节点需要一条路由到达一个新目的节点的时候, 该节点广播一条“路由请求”RREQ 控制消息来寻找一条到达该目的节点的路由. 当该条消息到达目的节点, 或者到达一个具有一条“足够新的”到达该目的节点的中间节点的时候, 就可以确定一条路由. 对于网络中的其它节点, 特别是源节点而言, 失效路由的自愈过程是透明的. 因此, 完成本地路由重构以后, 就不必再向上游节点报告路由错误和路由变更消息.

由前文中所建立的数学模型可知, 射线法是解决以最小代价获得最优搜索问题的关键, 因而本文中所设计的路由自愈技术的实现也基于此法, 并将其扩展成为一个扇形区域以增大成功率. 在实际通信过程中, 接收信息的方向和传送方向是可知的, 这里假定网络中的节点在路由建立后, 信息传送方向彼此可知, 网络各节点依照地理方向来建立基准, $\vec{\theta}_i$ 是第 i 跳节点与其上游节点的矢量夹角, 即为有方向的夹角, 如图 1 所示, 定义西偏南为正, 西偏北为负, 该做法的好处在于可以通过如式 (11) 所示的矢量夹角的叠加使得网络中任意节点 i 与目的节点 D 之间的矢量夹角 $\vec{\gamma}_i$, 所得结果的正、负分别代表目的节点在节点 i 的东偏北 $|\vec{\gamma}_i|$ 、东偏南 $|\vec{\gamma}_i|$, 下脚标号可以通过协议多跳转发跳数 searchipcn 计数器 (Hop Count) 来获得.

$$\vec{\gamma}_i = \sum_{j=i}^N \vec{\theta}_j. \quad (11)$$

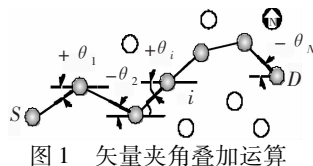


图1 矢量夹角叠加运算

2.2 路由重构区域的计算

在本文所设计的路由自愈模型中, 发起节点将广播带有其与目的节点 D 矢量夹角 $\vec{\gamma}_A$ 以及预设的重构区域张角 α_0 信息的 RRREQ 报文, 如图 2 所示. 节点 B 接收到来自于节点 A 的 RRREQ 后, 将据此信息并结合自身与上游节点间的矢量夹角 $\vec{\theta}_B$ 按照式 (12) 来计算出 $\angle BAD$, 即 α 值. 如前文所述, 图 2 中由于节点 A 位于节点 B 的西偏南, 因而矢量夹角 $\vec{\theta}_B$ 为正值, 而经过矢量夹角的叠加可知节点 A 位于目的节点 D 的西偏北, 故矢量夹角 $\vec{\gamma}_A$ 为负值. $\alpha \leq \alpha_0$ 意味着收到 RRREQ 报文的节点处于重构区域内, 此时该节点需要在写入其与目的节点 D 矢量夹角 $\vec{\gamma}_B$ 的信息后转发 RRREQ 信息; $\alpha > \alpha_0$ 则意味着节点 B 不在扇形转发区域内, 此时节点 B 将丢弃 RRREQ.

$$\alpha = |\vec{\theta}_B + \vec{\gamma}_A|. \quad (12)$$

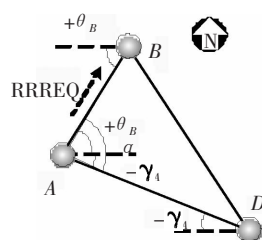


图2 路由重构矢量夹角

当一条活动路由中发生一条链路中断时, 若链路中断处离目的节点的距离不大于最大修复长度 MAX_REPAIR_TTL , 那么链路中断处的上游节点可以选择本地修复该中断链路. 为此, 上游节点将目的节点的序列号加 1, 然后向该目的节点广播一个 RREQ 分组. 本文将该 RREQ 分组中的 TTL 设为 $\max(MIN_REPAIR_TTL, 0.5 \times \#hops) + LOCAL_ADD_TLL$. 其中 $\#hops$ 表示到达当前不可交付分组的发送节点 (源节点) 的跳数. 因此, 本地修复操作常常是源节点所不知晓的, 而且总是使的 $TTL \geq MIN_REPAIR_TTL + LOCAL_ADD_TTL$. 然后本地修复初始化节点等待一个寻找周期时间以便接收相应分组 RREP.

2.3 路由自愈全过程

图 3 给出了基于最优搜索模型利用“射线法”求解代价最小解的下一跳节点搜索过程示意. 节点 F 检测到与 G 节点的连接失效将向其上游节点 A 广

播一个带有与目的节点矢量夹角信息的“路由重构请求”RRREQ (Route Recovery Request), 当节点 A 收到该信息后得知其与目的节点 D 的矢量夹角. 根据前文所建立的路由自愈最优搜索求解模型, 为了提高搜索成功率, 本文将最优求解的“射线法”扩展为一个以节点 A 为顶点, 节点 A 与目的节点 D 间连线为中轴的扇形区域. 扇形的张角是根据网络节点密度、能耗限制以及节点运动速度等预先设定的, 其取值范围为 $0 \sim 360^\circ$. 张角为 0° 时, 扇形区域退化为一指向目的节点的直线, 而当张角为 360° 时, 该重构模型便退化为传统路由修复中的全网广播. 不难得知张角设定值越大重构请求覆盖的区域就越大, 然而引入的开销也将随之增加. 位于扇形重构区域内的任何节点, 若本地缓存中没有到达目的节点 D 的有效路由, 将再次广播遵循相同定向区域原则的请求信息.

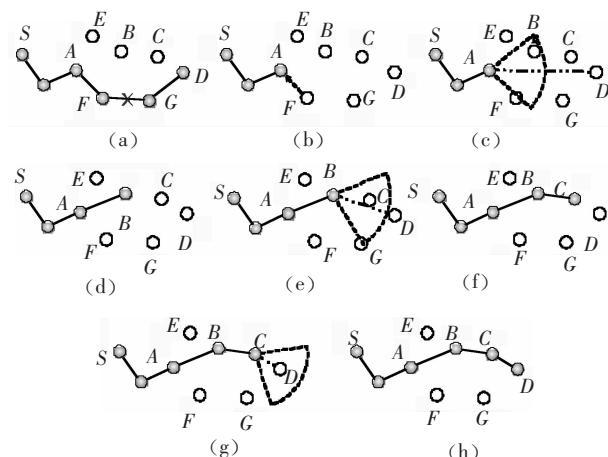


图3 路由自愈下一跳节点搜索过程示意

3 性能评价

仿真实验在 LINUX 环境下进行, 使用 NS-2 仿真平台^[10]对改进前后协议的性能进行仿真分析. 具体的缺省参数设置如下: 节点随即分布在 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 的范围内, 每个节点的无线接口带宽为 2 Mb/s , 无线发射范围为 250 m . 在仿真过程中有若干个节点同时产生业务, 采用恒定比特率 CBR (Constant Bit Rate) 数据流, 每个发送分组的长度为 512 bit . 本文采用 Random Way-point 运动模型, 仿真时间为 600 s . 为了能够有效的验证本文所设计的自愈协议的链路修复能力, 仿真时在当前链路中随机选取若干条进行人为中断, 实验过程中默认缺省链路失效率为 1 条/s . 本文通过对节点运动速率、源节点数量、数据包发送率以及链路失效率对数据包成功交付率、通信总开销以及平均时延影响的情况, 对比了采用传统 AODV 路由协议 (AODV-T) 和本文所提出的路

由自愈 AODV 协议 (AODV-SH) 的性能. 成功交付率定义为成功传输的数据包占总发送包的比例, 不同参数对其所产生的影响如图 4 所示.

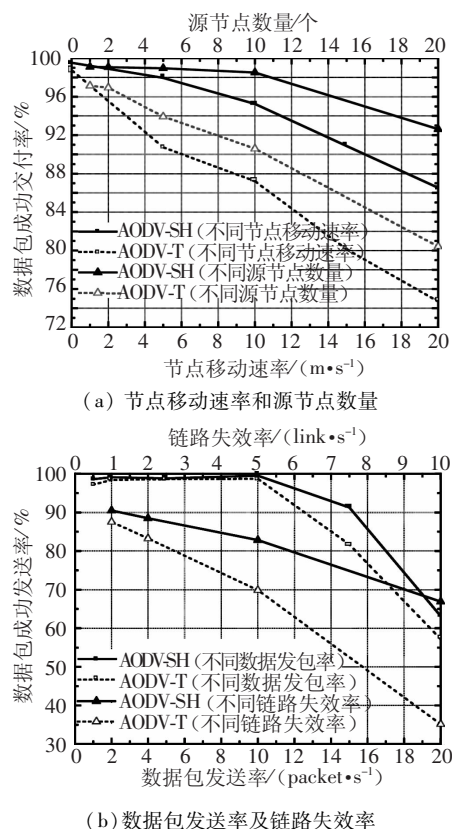


图4 不同参数对数据包成功交付率的影响

从图 4(a) 中可以看出, 数据成功交付率将随节点运动速度增大、源节点数量增加而下降, 但采用 AODV-SH 时下降的趋势弱于采用 AODV-T 的情况, 统计结果表明在网络节点移动速度在 20 m/s , 且当网络中同时有 20 个数据源节点发送数据时, 采用 AODV-SH 的数据成功交付率比采用 AODV-T 时分别提高了 15.82% 和 15.17% . 由图 4(b) 可以看出随着链路失效率的上升, 数据的数据成功交付率急剧下降, 但是采用 AODV-SH 时的下降趋势要优于采用 AODV-T. 当每秒钟有 5 条链路失效时, 采用 AODV-T 的数据成功交付率下降至 70% , 通信已经变得不再可用, 而采用 AODV-SH (不同链路失效率) 时却能保持在 80% 以上.

通信总开销是指一次通信过程中, 从源节点发起呼叫到源宿链路建立或通信失败, 源节点取消所有的寻路尝试过程中除数据包以外的所有信息. 采用 AODV-SH 和 AODV-T 时的对比情况如图 5 所示. 不难看出, 通信的总开销在两种协议下将随节点移动速度的上升、源节点数量的增加而增大, 这点很容易理解, 但是 AODV-SH 的曲线较 AODV-T 曲线较为平缓, 也就是说, AODV-SH 路由协议能够更好的适用于节点移动速度

较大、源节点数量较多的环境。

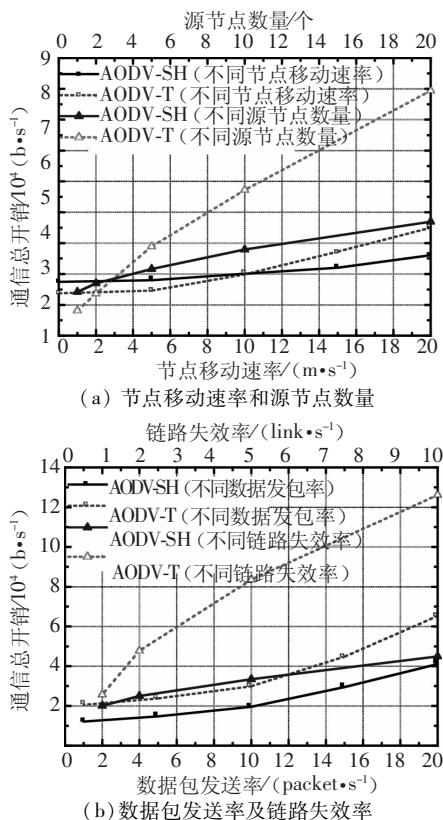


图5 不同参数对通信总开销的影响

在语音通信等实时业务中,平均时延成为更为关键的指标,仿真结果如图6所示。

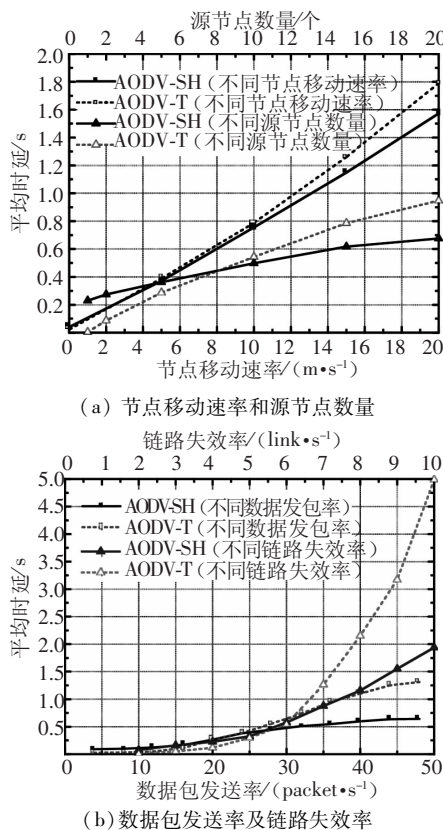


图6 不同参数对平均时延的影响

图6(a)中的曲线对比表明在高速移动节点所

组成的网络中,AODV-SH协议更加利于实时业务的开展.从图6(b)中可以看到当数据包发送率低于20 packet/s时,采用AODV-SH的时延比采用AODV-T时的要大,而发包率在20~25 packet/s时二者基本一致,大于25 packet/s时,AODV-SH的优越性才得以体现.这充分说明了AODV-SH算法对高动态、多源节点、大数据量以及中断较为频繁的网络通信有着更好的适应性.

4 结 论

仿真结果表明,本文设计的路由自愈AODV协议比原始AODV路由协议在数据包成功交付率以及总路由开销等性能方面获得了显著的提升,另外,平均时延对网络容量与节点运动状态敏感度较低的优势同时提高了MANET的健壮性和抗毁能力.

参考文献:

- [1] KUMAR S, BASAVARAJU T G, PUTTAMADAPPA C. Ad Hoc Mobile Wireless Network[M]. New York: T&F Group, 2008.
- [2] MOHAPATRA P, KRISHNAMURTHY S. Ad Hoc Networks: Technologies and Protocols[M]. California: Springer, 2005.
- [3] FORDE T, DOYLE L. Ad Hoc innovation: distributed decision making in Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 131-137.
- [4] 刘卫国, 宋翰涛. 移动分组无线网络路由协议设计和优化方法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2002, 5: 34-37.
- [5] ANQUSWAMY R, THIAGARAIAN M. Systems methodology and framework for problem definition in mobile ad hoc networks [C]//2008 IEEE International Systems. Canada: Inst. Of Elec. And Elec. Eng, 2008: 443-449.
- [6] PETER M, RICHARD M. Optimal search[J]. Econometrica, 1985, 53(4): 923-944.
- [7] SUWANSANTISUK W, WIN M Z. Multipath aided rapid acquisition: optimal search strategies[J]. Information Theory, 2007, 53(1): 174-193.
- [8] JEONG W K, WHITAKER R T. A fast iterative method for Eikonal equations[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2007, 30(5): 2512-2534.
- [9] PERKINS C E, BELDING-ROYER E M, DAS S R. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing [R/OL]. <http://pdos.csail.mit.edu/decounto/papers/aodv.ps>, 2003.
- [10] BERKELEY U. The Network Simulator ns-2 [CP/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 1998.

(编辑 张 宏)