

增强 Ad Hoc 网络稳定性的移动问题解决策略

何晖¹, 王换招¹, 李昊², 梅涛¹, 郝旻¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 黄河水利委员会黄河上中游管理局, 710021, 西安)

摘要: 针对移动自组织网络中网络通信稳定性较低的问题, 提出了增强网络稳定性的移动问题解决策略. 该策略通过检测节点的相对移动速率, 计算节点间链路的稳定性, 得到网络中通信路径的稳定度, 从而选择稳定度高的路径进行通信. 该策略针对节点移动可能导致的通信可靠性约降低问题, 利用检测移动速率预测节点运动趋势这一创新方法提高了系统数据传输的可靠性. 实验结果表明, 该策略利用节点移动预测的方法可以有效选择可靠性更高的数据链路, 与传统方法相比, 通信延迟时间约降低1%, 吞吐量约提高5%.

关键词: 移动自组织网络; 稳定性; 移动性

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0006-06

Strategy to Enhance the Communication Stability in Mobile Ad Hoc Network

HE Hui¹, WANG Huanzhao¹, LI Hao², MEI Tao¹, XI Min¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Xi'an 710021, China)

Abstract: A mobility problem-solving strategy (MSEN) to enhance network stability is proposed to address the low stability of communication in Mobile Ad Hoc network. The strategy obtains the stability of communication routes by detecting the relative rates, and computing the stability of links among nodes. Routes with high stability will be preferred to improve network reliability. The strategy focuses on the problem of stability declining caused by mobility of nodes, and uses the creative method of moving direction prediction to raise the stability of the network. Simulation results show that the method selects the communication link with higher stability. Comparisons with traditional methods show that the performance of communication delay time is reduced by about 1%, and the throughput is increased by about 5%.

Keywords: mobile Ad Hoc networks; stability; mobility

在移动 Ad Hoc 网络^[1]中, 由于节点随机移动, 导致网络中通信链路不稳定, 降低了网络通信的可靠性. 目前, 节点移动问题的解决策略主要是进行节点移动模型的设计, 并利用模型对节点运动方式进行评估, 从而提高路径选择的准确性. 但是, 由于网络环境复杂多样, 利用一种固定的移动模型描述节点的运动方式存在较大困难^[2], 同时这种移动模型不能准确模拟节点的移动行为, 因此无法准确地对

路径选择进行指导.

文献[2]提出了随机移动模型(Random way point model), 该模型利用随机过程模拟节点的移动. 算法假设在网络中按照给定的分布算法分布着一定数量的路标节点, 当移动节点在网络中随机移动时, 它不断探测距离自己最近的路标节点, 通过探测到的路标节点完成自己的通信任务. 该模型存在的缺陷是算法需要固定的路标节点, 而这些节点可

能成为系统瓶颈,限制了该模型的推广和使用。

社区移动模型^[3]将节点活动区域进行划分,根据不同的应用需求设计不同的移动模型。整个网络划分为多个块,块内解决该块节点的移动性问题,块间通过其他算法实现通信。当区域间存在不同的应用需求时,该算法具有一定的灵活性,但当节点的移动范围比较大时,该策略的应用将受到一定的限制。

文献[4]提出了基于人们日常生活行为数据库的代理节点移动模型,该模型基于人们日常生活的各种行为统计得到各类行为的分类统计特征,并通过特征分析指导网络中节点的移动。算法的主要特征是将节点的移动与人们的日常生活结合起来,让节点的移动过程模拟人们的日常生活行为,使节点的移动更加真实。该模型的主要缺点是节点数量增加可能带来性能严重下降,同时节点资源消耗较大。

还有其他一些增加传输可靠性的方法,如动态备份多径路由(DBR)协议^[5]。该协议采用洪泛方式建立最短的主路径,并利用周期性发送的 HELLO 包为主路径上的链路按需构建局部备份路径。DBR 协议降低了备份路径建立过程中的控制负载,但协议增加了节点的负担,并且适用范围有限。

针对现有各种算法的不足,本文提出了一种增强网络稳定性的移动问题解决策略 MSEN(Mobility Problem-Solving Strategy to Enhance Network Stability)。该策略通过检测节点在网络中的相对移动速率,计算节点间通信链路的稳定程度,进而计算通信路径的稳定度,通过优先选择稳定度高的通信链路进行数据传递,从而提高整个网络的可靠性。该策略针对移动 Ad Hoc 网络独立组网,具有自组织、动态拓扑、无约束移动、多跳路由^[6]等众多特点,适应性较强。

1 节点移动速率检测机制

在实际的 Ad Hoc 网络环境中,节点的随机移动不可避免,导致网络环境不断变化,这种网络变化直接影响通信链路的效果,从而降低网络通信的可靠性。如果能够获取节点运动的方式,则能在很大程度上预测通信链路的质量,提高网络通信的成功率。

获取节点运动方式时,一种行之有效的方法是获取两移动节点之间的相对运动情况,并利用相对位置的变化预测节点间的通信链路质量,但如何有效地检测网络中节点的相对移动速率是需要考虑的问题。

根据网络中节点相对移动情况的分析,节点相

对移动速率检测可以做如下描述:检测节点 P_c 的位置相对固定,被检测节点 P_t 相对检测节点 P_c 移动。那么,节点相对速率检测就是度量节点 P_t 相对移动速率的过程。

为了有效地检测 Ad Hoc 网络中被检测节点的相对移动速率,本节设计了如图 1 所示的节点相对移动速率机制。

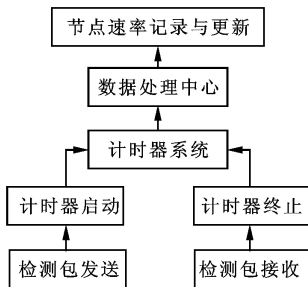


图1 节点移动速率检测

当检测节点 P_c 准备获取被检测节点 P_t 的移动速率时,节点 P_c 就向节点 P_t 发送检测数据包(Detect Packet, DP),这是一种数据量很小的控制包,包含源节点标识、地理位置信息和发送时间等信息。节点速率检测过程与节点邻居发现过程相似,检测数据包类似于邻居发现过程中的 Hello 包。

节点相对移动速率检测过程如图 2 所示。检测节点 P_c 在起始时刻 t_1 向邻居节点发送 DP 包,当邻居节点 P_t 收到检测包后(记为时刻 t_2),生成 RDP 包进行回复;假设节点 P_t 继续移动,在时刻 t_3 ,节点 P_c 收到回复包,然后第二次向节点 P_t 发送 DP 包,节点 P_t 在时刻 t_4 时行回复,节点 P_c 在时刻 t_5 收到相应的回复,至此一次检测过程结束。

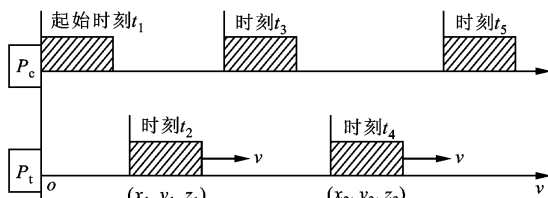


图2 节点速率检测示意图

上述检测过程结束时,所记录的各种数据都汇集到数据处理中心,处理中心负责数据的分析和处理。处理中心首先检查计时器系统的发送起始时刻是否与返回的响应包中记录的发送时刻一致,如果两者时间一致,说明当前所返回的检测响应包就是正确的响应包。通过 2 次 RDP 包的发送时间记录,可以获得时间差 ΔT ;根据被检测节点 2 次检测过程中的位置信息,可以得到节点移动的相对距离 S ;

根据节点移动距离 S 和时间差 ΔT , 可以得到节点相对移动速率.

假设通过 GPS 定位系统, 可以相对比较容易地获得网络中各个节点在任何时刻的地理位置信息. 由于利用了相对固定的节点作为检测节点, 因此对某一节点的相对运动速度可通过如下方法进行测算. 当节点 P_i 在时刻 t_2 第 1 次收到邻居节点发送的检测数据包 DP, 此时节点 P_i 对应的地理位置为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, 在进行响应的过程中节点 P_i 仍然以速率 v 在随机移动; 当节点 P_i 在时刻 t_4 第 2 次收到检测包, 对应的地理位置可以表示为 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 然后回送响应包, 在时刻 t_5 , 检测节点 P_c 收到节点 P_i 返回的响应数据包, 至此节点 P_i 相对移动速率检测过程完成. 通过如下过程可以获得相应的数据.

2 次检测的时间间隔 $\Delta T = (t_4 - t_2)$, 其中忽略数据更新过程的时间消耗; 节点移动的相对距离

$S = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)^{1/2}$
所以, 目标节点 P_i 的相对移动速率可以表示为

$$v = \frac{S}{\Delta T} =$$

$$\frac{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)^{1/2}}{t_4 - t_2}$$

至此, 通过上述过程, 可以获得网络中被检测节点在当前时刻的相对移动速率.

2 MSEN 移动解决策略

在得到移动节点之间的相对移动速率后, 我们给出 MSEN 移动问题解决策略. 该策略通过得到的相对移动速率计算节点之间链路的稳定性, 进而计算网络中可用通信链路的稳定度, 通过优先选择稳定度高的路径进行通信来提高整个网络的可靠性. 该策略分为链路稳定度计算和路径稳定度计算两个阶段.

2.1 链路稳定度计算

网络中节点间链路的生存时间决定了对应链路的稳定程度, 网络中“链路的生存时间越长, 链路的稳定度越高”. 结合已有的研究, 选择如下值作为链路稳定的生存时间下限^[6]

$$T_{\text{thresh}} = 2r/v$$

式中: r 表示网络中节点的通信半径; v 表示节点之间的相对移动速率. 时间阈值 T_{thresh} 表示链路稳定必须持续的时间下限, 也就是说, 只有当链路的生存时间大于 T_{thresh} 时, 才可能认为链路是稳定的.

基于生存时间的链路稳定度以该时间阈值为依据, 首先获得网络中各条链路 l 的生存时间 E , 然后根据如下公式求得链路的稳定度

$$B = E/T_{\text{thresh}}$$

式中: B 表示当前链路的稳定性结果, 其数值越大代表链路的稳定度越高.

定义 1 链路稳定性 衡量网络中通信链路持续有效的性质. 假设网络中节点 i 和 j 之间存在通信链路, 记为链路 l_{ij} , 在某时刻 t_1 , 链路 l_{ij} 存在(链路有效), 如果在下一个检查时刻 t_2 , 链路 l_{ij} 仍然有效, 那么称链路 l_{ij} 在时间间隔 $t_2 - t_1$ 内稳定.



图3 链路稳定性示意图

如图3所示, 在网络中存在从节点 S_1 到节点 S_n 的某条链路是由其中的多条链路构成. 如果在某个检测时间间隔 ΔT 内, 节点 S_i 和 S_{i+1} 之间的链路持续有效, 则称链路 $l_{S_i S_{i+1}}$ 在 ΔT 内是稳定的.

网络中链路的生存时间与相应节点的生存时间及节点之间的相互移动相关. 由于相对移动可能导致节点之间的距离超过了有效的通信半径, 此时节点之间的链路不复存在; 当节点有限的能量不断降低, 不能满足当前环境下的通信要求时, 节点之间的链路也将消失. 因此, 可以通过节点之间距离和接收信号强度的变化来评估节点之间链路的生存时间.

在无线网络通信环境中, 当节点之间的距离相对较小时, 节点之间功率的变化符合自由空间散射模型. 2 个节点之间接收信号的强度 (Receive Signal Strength, RSS) 仅仅与节点之间当前距离相关, 节点之间距离越小, RSS 就越强; 反之, RSS 就越弱.

假设在网络中某个时刻 t , 节点 i 和 j 之间存在一条链路, 记为 l_{ij} ; 节点 i 接收到来自节点 j 的信号强度为 $R_{j,i}(t)$, 由对称性可知, 节点 j 接收到来自节点 i 的信号强度为 $R_{i,j}(t)$, 由于网络中所有节点均为同构的, 可以得到如下等式成立

$$R_{i,j}(t) = R_{j,i}(t)$$

所以, 时刻 t 节点 i 和 j 之间的接收信号强度可以简记为 $R(t)$.

由于节点的移动, 导致节点之间的距离发生变化, 节点间接收的信号强度也随之发生变化. 在 t_1 到 t_2 的时间间隔内, 接收信号强度的变化量为

$$\Delta R(t_2 - t_1) = R(t_2) - R(t_1), \quad t_2 \geq t_1$$

结合接收信号强度的变化时间, 可以得到如下

所示的信号强度变化率

$$D(\Delta R(t_2 - t_1)) = \frac{\Delta R(t_2 - t_1)}{(t_2 - t_1)}$$

通过对节点间信号强度变化量的分析,可以得到如下关系

$$\Delta R(t_2 - t_1) = \begin{cases} \geq 0, & \text{节点之间的距离减小} \\ < 0, & \text{节点之间的距离增大} \end{cases}$$

当信号强度变化量大于 0 时,说明在时间间隔 $t_2 - t_1$ 之后,节点之间的信号强度增大了,即 $R(t_2) \geq R(t_1)$,所以此时节点之间的距离相对减小,节点在相向移动.反之,当信号强度变化量小于 0 时,即满足 $R(t_1) > R(t_2)$,说明节点之间距离在增大,此时节点在朝相互远离的方向移动.

通常情况下,节点之间信号强度变化量与节点之间的距离相关,而节点间信号强度的变化率与节点之间的相互移动速率相关.

假设在时刻 $t_1 = 0$ 时,节点 i 和 j 之间建立初始链路;在时刻 t_2 时,节点 i 和 j 之间的信号强度变化量 $\Delta R_{i,j}(t_2 - t_1) = \Delta R_{i,j}(t_2)$. 不失一般性,记 $D(\Delta R_{i,j}(t))$ 为时间间隔 ΔT 内节点 i 和 j 之间信号强度变化率; $d_{ij}(t)$ 为时刻 t 节点 i 和 j 之间的距离; $v_{ij}(t)$ 为时刻 t 节点 i 和 j 之间的相对移动速率; r 为节点的通信半径.

如果 $\Delta R_{i,j}(t_2 - t_1) \geq 0$,则节点 i 和 j 在相互靠近,那么节点 i 和 j 从相距 $d_{ij}(t)$ 到相遇,所需的时间为

$$T_{11} = d_{ij}(t)/v_{ij}(t)$$

当节点 i 和 j 相遇之后,节点又开始朝相反的方向运动,直到节点间的距离超过节点之间的有效通信范围 r ,此时所需的时间为

$$T_{12} = r/v_{ij}(t)$$

结合上式可以得到,节点 i 和 j 之间链路的生存时间为

$$T_1 = T_{11} + T_{12} = d_{ij}(t)/v_{ij}(t) + r/v_{ij}(t)$$

同理,当 $\Delta R(t_2 - t_1) < 0$ 时,说明节点 i 和 j 在相互远离运动,此时可能持续的时间为

$$T_2 = r - d_{ij}(t)/v_{ij}(t)$$

综上所述,得到节点 i 和 j 之间链路的生存时间(Existence time)为

$$E_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{d_{ij}(t) + r}{v_{ij}(t)}, & \Delta R(t_2 - t_1) \geq 0 \\ \frac{r - d_{ij}(t)}{v_{ij}(t)}, & \Delta R(t_2 - t_1) < 0 \end{cases}$$

根据高性能通信网络理论^[7],有如下关系

$$\Delta R_{i,j}(t) = 1/[d_{ij}(t)]^2$$

综合上式可以得到

$$E_{i,j}(t) = \begin{cases} 2 \times \frac{r + (\Delta R_{i,j}(t))^{-1/2}}{|D(\Delta R_{i,j}(t)) \times (\Delta R_{i,j}(t))^{-3/2}|}, & \Delta R_{i,j}(t) \geq 0 \\ 2 \times \frac{r - (\Delta R_{i,j}(t))^{-1/2}}{|D(\Delta R_{i,j}(t)) \times (\Delta R_{i,j}(t))^{-3/2}|}, & \Delta R_{i,j}(t) < 0 \end{cases}$$

利用所获得的链路生存时间,根据链路稳定度的定义,就可以获得对应链路的稳定度.

2.2 路径稳定度计算

在获得节点之间链路的稳定度之后,给出网络中可用路径的稳定度.

定义 2 路径稳定性 衡量网络中整条通信路径的有效性.网络中节点 S_1 和 S_n 之间存在通信链路 $S_1 S_i S_{i+1} \cdots S_n (i=2, \dots, n-1)$,如图 3 所示,由多条链路 $S_i S_{i+1} (i=2, \dots, n-1)$ 构成,如果每一条链路在时间间隔 $S_i S_{i+1} (i=2, \dots, n-1)$ 内稳定,则称通信路径 $S_1 S_i \cdots S_n$ 在时间间隔 ΔT 内稳定.

结合 Ad Hoc 网络中节点结构相对简单、节点可用能量有限等特点,本节利用当前路径中所有链路稳定度的最小值这一简单方法计算网络中路径的稳定度.

假设如图 3 所示,当前路径为 $S_1 S_n$,其中各条链路的稳定度依次为 $B(l_{s_1 s_2})$, $B(l_{s_2 s_3})$, $\dots$, $B(l_{s_{n-1} s_n})$,那么,当前路径的稳定度取如下值

$$B(S_1 S_n) = \min\{B(l_{s_1 s_2}), B(l_{s_2 s_3}), \dots, B(l_{s_{n-1} s_n})\}$$

由于当前路径中稳定度最小的链路可能是最不稳定的,或者是最近就会发生变化的链路,选择所有链路稳定度的最小值能够比较准确地描述当前路径的稳定性.同时,该方法计算过程简单,比较适合 Ad Hoc 网络环境.基于所获得的各条链路的稳定度,结合上式即可获得当前路径的稳定度.通过比较路径的稳定度,选择稳定度相对较高的路径作为候选路径,可以有效地提高网络的通信质量.

3 仿真结果

本文对 MSEN 策略的评估采用 OPNET 14.5 仿真平台,选用无线局域网 802.11 的 DCF(distributed coordination function)作为 MAC(media access control)协议,它能向网络层报告连接中断.

本文的仿真场景为稀疏节点场景.节点均匀分布在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的范围内,采用 Random Way-

Point 移动模型^[8],节点以速率 v 向随机选择的目的地位置运动,速率 v 在 $[0,5]$ 中随机取值(单位为 m/s);部分恶意节点以较大的速率($v>10\text{m/s}$)随机运动。网络传输速率为 10Mb/s ,仿真时间为 $1\,200\text{s}$ 。

通过对 AODV^[9]、改进的 AODV^[10](增强对移动问题的解决)以及 MSEN 策略的协议在相同的仿真场景中进行实验,获得 3 种协议的网络通信延迟时间和吞吐量等数值,并对相应的性能参数进行了比较分析。

3.1 通信延迟时间

由于网络中存在恶意节点,它们相对移动速率比较大,网络的拓扑不够稳定,链路变化的频率相对较高,可用的通信路径随时都有可能发生变化,从而导致重复的路由建立过程,通信延迟时间不可避免地有所增大,实验结果如图 4 所示。

实验结果表明,基于 MSEN 策略的移动性模型能够对网络中发生变化的链路进行稳定性判断,不可信的节点间对应的链路不被采用,协议的反应灵敏度较高,能够对链路的变化做出迅速的调整,适应性较强。与传统方法相比,通信延迟约降低 1%。

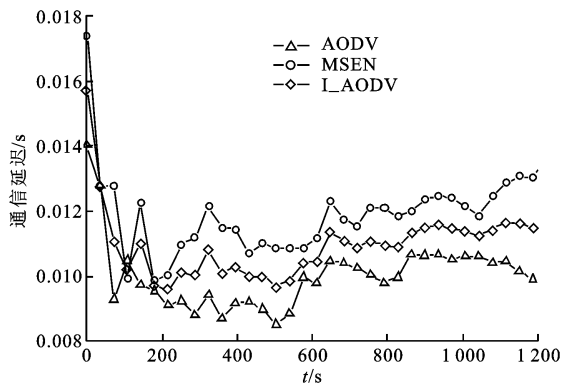


图 4 3 种算法的通信延迟对比

3.2 吞吐量

吞吐量指在不丢包的情况下,单位时间内网络所能够传输的数据量。由于节点的随机移动,导致网络拓扑结构的动态变化,对应的吞吐量势必受到相应的影响,实验结果如图 5 所示。

从图中可以看出,MSEN 移动性模型能够对网络的变化做出适时的调整,网络的吞吐量虽然也受到节点移动性的影响,但是其值仍然比没有提供移动性支持的网络环境要高(约提高 5%),这与策略设计的初衷相互吻合。

4 结 论

本文提出了一种 Ad Hoc 网络路由策略 MS-

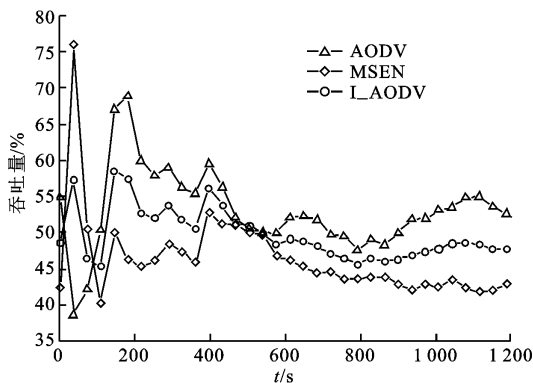


图 5 3 种算法的吞吐量对比

EN,该策略通过检测和利用单向链路以提高网络的连通性能,同时采用降低控制信息量、减少洪泛包的产生和转发次数的方法来降低控制开销。仿真结果表明,本文的路由策略能够明显降低网络控制开销,同时路由功率和吞吐量指标与已有协议相比只有很小的降幅。下一步工作的重点是在实际测试平台上实现本文提出的路由策略,并进行性能分析。

参考文献:

- [1] CONTI M, GIORDANO S. Multihop Ad Hoc networking: the theory [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45 (4): 78-86.
- [2] 张晖,董育宁,杨龙祥,等. 移动 Ad Hoc 网络中基于稳定性的 QoS 路由算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(1):1-6.
ZHANG Hui, DONG Yuning, Yang Longxiang, et al. Survey on Qos routing algorithms based on stability in mobile-Ad Hoc networks [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(1):1-6.
- [3] MUSOLESI M, HAILES S, MASCOLO C. An Ad Hoc mobility model founded on social network theory [C]// Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York, USA: ACM, 2004: 20-24.
- [4] LENDERS V, WAGNER J, MAY M. Analyzing the impact of mobility in Ad Hoc networks [C]// Proceedings of the Second International Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: from Theory to Reality. New York, USA: ACM: 2006, 39-46.
- [5] 杨文静,杨新宇,董翊勇. 移动 Ad Hoc 网络中提高路由稳定性的动态备份多径路由[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(12):16-21.
YANG Wenjing, YANG Xinyu, DONG Chiyong. Dynamic backup multipath routing for improving route

- stability in mobile Ad Hoc networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(12): 16-21.
- [6] MUNDINGER J, BOUDEC J L. Analysis of a robust reputation system for self-organised networks [J]. European Transactions on Communication, 2005, 16(5): 375-384.
- [7] ZHENG Qunwei, HONG Xiaoyan, LIU Jun. An agenda based mobility model [C]//Proceedings of the 39th Annual Simulation Symposium. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 188-195.
- [8] TOH C K. Associativity based routing for Ad Hoc mobile networks [J]. Wireless Personal Communications Journal; Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems, 1997, 4(2): 103-139.
- [9] WALRAND J, VARAIYA P. High-performance communication networks [M]. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- [10] BROCH J, MALTZ D A, JOHNSON D, et al. A performance comparison of multi-hop wireless Ad Hoc network routing protocols [C]// Proceedings of MOBICOM. New York, USA; ACM, 1998: 85-97.
- [11] MARINA M K, DAS S R. On-demand multipath distance vector routing in Ad Hoc networks [C]// Proceedings of International Conference on Network Protocols. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2001: 14-23.
- [12] YU Xinhao, YU Ouyang. A link-state-aware Ad Hoc on-demand distance vector (AODV) routing protocol for mobile Ad Hoc networks [C]// Proceedings of the International Conference on Communication Technology. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 1-4.
- (编辑 武红江)