

基于频率域多目标 MANETs 可信路由决策研究

罗俊海^① 郑龙^② 范明钰^①

^①(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

^②(国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘要: 移动Ad-hoc网络(MANETs)具有开放的媒质, 动态的拓扑结构, 分布式的合作和受限的网络能力等基本特点。网络中移动节点具有匿名性和高度自治的特点, 网络通讯依靠在通信路径上的中间节点转发数据包, 实现无线传输范围外节点间的正常通信。该文提出了一种独特的MANETs中基于频率下多目标可信路由决策算法, 它和现在大多数路由算法都是在时间域下使用单一约束参数选择路由的方式截然不同。利用概率理论分析安全和可信路由, 基于概率密度函数的时频相互转化, 减小计算复杂度, 解决MANETs中节点间缺乏物理安全以及在低信任水平和节点相互勾结扰乱网络操作情况下, 发现可信安全路由难的问题。实例分析证明了此算法的可行性。

关键词: 移动自组织网络; 可信路由; 频率域

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1602-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00505

Research on MANETs Trusted Routing Decision Based on Multi-objective in Frequency Domain

Luo Jun-hai^① Zheng Long^② Fan Ming-yu^①

^①(College of Computing Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

^②(College of Information Systems & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Mobile Ad-hoc Networks (MANETs) have their fundamental characteristics, such as open medium, dynamic topology, distributed cooperation, and constrained capability. Due to the anonymous and self-organization nature of mobile nodes in the network, intermediate nodes on a communication path are expected to forward packets of other nodes so that nodes can communicate beyond their wireless transmission range. In this paper, a trusted routing selection algorithm based on multi-objectives in frequency-domain for MANETs is proposed. It is distinctly different with most of routing algorithms that select routing based on a single-objective in the time-domain. The proposed algorithm tries to analyze the secure and trusted routing based on probability theory to reduce the computation complex with the mutual transformation of probability functions between time-domain and frequency-domain. It solves the problem of finding secure and trusted routing for MANETs in the case of the lack of physical security, untrustworthy scenario and low trust levels among nodes in MANETs and malicious nodes colluding with one another to disrupt the network operation. Extensive analysis is carried out to evaluate the design of the algorithm.

Key words: Mobile Ad-hoc NETWORKS (MANETs); Trusted routing; Frequency-domain

1 引言

目前大多数路由协议都是使用单一约束参数选择路由, 还没有出现同时满足多约束条件的路由选择算法^[1,2]。然而, 由于 MANETs 的特性和现有的 MANETs 路由协议是假设网络内部的所有节点都是可信的, 没有考虑会受到攻击的问题, 所以现有

协议非常容易遭到主动和被动的攻击, 基于最小跳数的路由不一定是可靠和最安全的, 因为网络拓扑的变化与多个因素有关, 如电池容量、数据流量、链路稳定性和节点移动速度等^[3]。这些因素存在着相互之间的关系, 在进行路由决策时仅考虑其中任何一种参数都不能满足可靠性需要。实际上, 同时满足多约束的路由选择是没有精确的数学模型, 多个约束条件的输入同时又具有不确定性。已有的路由协议都是使用单一路由进行数据传输, 由于 MANETs 的拓扑容易变化, 单一路径可能容易中

2009-04-10 收到, 2010-04-20 改回

国家 863 计划项目(2009AA01Z435)资助课题

通信作者: 罗俊海 junhai_luo@126.com

断。当单路径出现故障时, 这些路由协议需要重新启动路由发现过程, 这浪费了时间, 将会消耗更多的资源。为解决这些问题, 需要随着时间的变化、网络动态拓扑和节点间的可信动态的选择最优路径路由协议^[4,5]。

根据概率论^[6]和路由决策性问题^[7], 在 MANETs 环境下, 基于频率域和概率理论, 研究了节点之间的可信关系, 用来建模节点之间的动态信任关系。本文采用 Laplace 变换^[8], 进行时间域和频率域相互转换, 减小时间域计算复杂度问题, 能够发现在最短传输时间内, 最可信的完成节点之间的交易, 同时也考虑了网络的最小的传输开销和最大传输流的问题。

2 频率域可信关系

当时域可信概率密度函数 $f_i(t)$ 服从连续分布的时, 频率域可信概率密度函数 $f_i(s)$ 为

$$f_i(s) = \Phi[e^{-sT}] = \int_0^{\infty} e^{-st} f_i(t) dt \quad (1)$$

其中 $\Phi(\bullet)$ 为 Laplace 变换。同理, 当时域可信概率密度函数 $f_i(t)$ 服从离散分布时, 频率域可信概率密度函数 $f_i(s)$ 为

$$f_i(s) = \Phi[e^{-sT}] = \sum_{\text{all } t} e^{-st} f_i(t) \quad (2)$$

同样, 通过 Laplace 变换和概率理论可得到频率域可信概率分布函数 $F_i(s)$

$$F_i(s) = f_i(s) / s \quad (3)$$

2.1 直接串联关系

假设网络中有 x_1, x_2, \dots, x_n 个网络移动节点, 如果其中一个连接出问题, 那么将导致整个路由失败。只有所有网络连接都成功的时候, 那么整个路由成功^[9]。它的可信关系如图 1 所示。

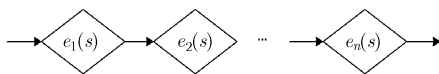


图 1 直接串联拓扑结构

假设每一个网络连接的可靠密度函数为 $e_i(s), i = 1, 2, \dots, n$, 他们相互独立, 那么很容易得到频率域串联结构的可信概率密度函数 $f_i(s)$

$$f_i(s) = \prod_{i=1}^n e_i(s) = e_1(s) \cdot e_2(s) \cdots e_n(s) \quad (4)$$

2.2 多路径选择关系

如果当其中一条路由不可用时, 节点可以选择其它路由和另外节点进行交易时, 就形成了多路径路由选择^[10], 它的频率域可信关系如图 2 所示。

假设可信概率密度函数 $e_i(s), i = 1, 2, \dots, n$, 相互

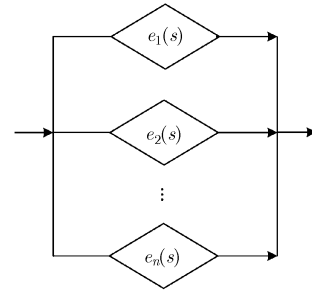


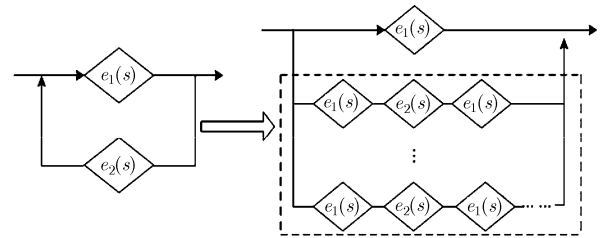
图 2 多路径拓扑结构

独立, 那么可以得到多路径选择结构的频率域可信关系的概率密度函数:

$$\begin{aligned} f_i(s) &= \prod_{i=1}^n e_i(s) = e_1(s) \cdot e_2(s) \cdots e_n(s) \\ &= \sum_{i=1}^n x_i(s) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} x_i(s)x_j(s) \\ &\quad + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} x_i(s)x_j(s)x_k(s) - \cdots + (-1)^{n-1} \prod_{i=1}^n e_i(s) \quad (5) \end{aligned}$$

2.3 推荐反馈关系

在 MANETs 中, 当节点得到其它节点的信任推荐时, 将重新形成新的信任, 从而构成了推荐反馈的, 推荐反馈的频率域可信关系如图 3(a)所示。根据该结构的传输函数和级数理论^[11], 可以把推荐反馈结构变成多路径选择关系的等价结构, 如图 3(b)所示。



(a) 推荐反馈拓扑

(b) 推荐反馈等价拓扑

图 3 推荐反馈拓扑结构

根据多路径选择的原理, 可以得到推荐反馈结构的频率域可信概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_i(s) &= \prod_{i=1}^n e_i(s) = e_1(s) \times [e_1(s) \times e_2(s) e_1(s) \\ &\quad \cdot \{ [e_1(s)]^3 \times [e_2(s)]^2 \} \times \cdots \times \{ [e_1(s)]^m \times [e_2(s)]^{m-1} \} \quad (6) \end{aligned}$$

3 多目标路由决策

3.1 有限生成图

正如上文所描写的, 节点之间的信任是动态的, 本文扩展了第 2 节的研究, 引入频率域生成图和概率分布解决信任动态性问题。详细地描写了数据传输时间(不考虑节点本身的处理时间)、传输开销和

数据流之间的概率密度函数之间的关系。

图 4 是一个 5 个节点 MANETs 网络拓扑图，其中节点 4 是一个恶意节点，不转发节点 3 的数据包，因此，源点和目的节点之间数据交易的路由有 {node2, node3, node5}，{node2, node4, node5} 和 {node2, node4, node3, node5} 3 条。

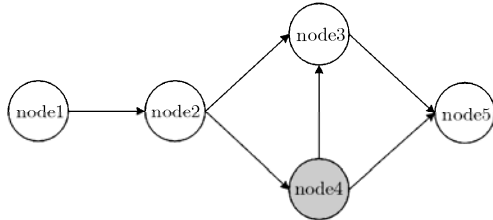


图 4 网络拓扑

基于 MANETs 网络时间域路由协议，本文给出了图 4 的有向图 $G = (V, E, T)$ ，源节点为 $e_s(s)$ ，目的节点为 $e_d(s)$ ，如图 5 所示。 $V = \{v_i\} i = 1, 2, \dots, n$ 为 MANETs 中的有限移动节点； $E = \{e_{ij}\} i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$ 表示节点之间的无线路由； $T = \{t_{ij}\} i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$ 表示节点之间的传输时间，本文不考虑节点本身处理数据的时间延迟。在时间域，变量 t 的概率密度函数 $f(t)$ 可能是连续的，也可能是离散的。

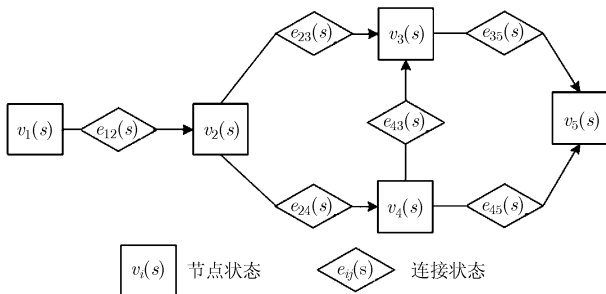


图 5 频率域生成图

由于 MANETs 节点之间的动态性，只是发现最短传输时间的路由决策没有什么实际意义。决策者常常希望能够发现在最短传输时间内，最可信的完成节点之间的交易，同时也考虑了网络的最小的传输开销和最大传输流的问题。假设传输开销是满足时间上的线性函数，其定义为 $W = w(t) = at + b$ ，其中， a 和 b 是常量， t 为随机变量。那么 W 的概率密度函数为

$$g(w) = f(w^{-1}(t)) \left| (w^{-1}(t))' \right| = \frac{1}{a} f\left(\frac{w-b}{a}\right) \quad (7)$$

同理，传输流 q 也是随机变量，它的概率密度函数是

$$h(q) = f(q^{-1}(t)) \left| (q^{-1}(t))' \right| = \frac{1}{c} f\left(\frac{q-d}{c}\right) \quad (8)$$

其中 d 和 c 是常量。

(1) 图 5 中 $e_{ij}(s)$ 表示节点 i 和节点 j 之间路由频率域可信概率密度函数。例如 $e_{ij}(s) = \exp(1/2)\sigma_{ij}^2 s^2 - \mu_{ij}s$ ，可以看出它服从正态分布，它的反 Laplace 变换为 $e_{ij}(t) = f_{ij}(t) \sim N(\mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ 。由于信任的动态性，很困难确切地获得连续的概率分布，所以根据质量分析和经验评估来得到离散的概率密度分布。例如，在采样时间为 3, 4 和 5 的时候，节点 i 和 j 之间出现的概率为 0.4, 0.1, 0.6，那么它的可信离散概率密度为

$$e_{ij}(s) = 0.4e^{-3s} + 0.1e^{-4s} + 0.6e^{-5s} \quad (9)$$

(2) 由于 $t = w^{-1}(t) = (w-b)/t$ 和 $g(w) = (1/a) \cdot f((w-b)/a)$ ，可得传输开销的频率域概率密度函数为

$$\begin{aligned} e_{w_{ij}}(s) &= \int_0^\infty e^{-sw} g_{ij}(w) dw = \int_0^\infty e^{-sw} \frac{1}{a} f_{ij}\left(\frac{w-b}{a}\right) dw \\ &= \int_0^\infty e^{-s(at+b)} \frac{1}{a} f_{ij}(t) a dt \\ &= e^{-sb} \int_0^\infty e^{-sat} f_{ij}(t) dt = e^{-sb} e_{ij}(as) \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 同理，可以得到传输流的频率域概率密度函数为

$$e_{q_{ij}}(s) = \Phi[e^{-s(ct+d)}] = \Phi[e^{-sct} e^{-sd}] = e^{-sd} e_{ij}(cs) \quad (11)$$

3.2 多目标路由决策

在上面描写的基础之上，在这里分析了 MANETs 多目标路由决策的问题。

(1) 在预先指定的传输时间、开销和流的情况下，最可信的完成交易路由，那么该模型用数学公式表示为

$$\begin{aligned} P(p^*) &= \max \left[\alpha \Phi^{-1} \left[\frac{f_p(s)}{s} \right] \Bigg|_{t=i_a} + \beta \Phi^{-1} \left[\frac{f_{wp}(s)}{s} \right] \Bigg|_{w=w_a} \right. \\ &\quad \left. + \gamma \Phi^{-1} \left[\frac{f_{qp}(s)}{s} \right] \Bigg|_{q=q_a} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\alpha + \beta + \lambda = 1$ ， α ， β 和 γ 分别为权值， $\Phi^{-1}(\bullet)$ 为反 Laplace 变换。

(2) 在预先指定的可信情况下，最短传输时间、最小开销和最大流的路由，那么该模型用数学公式表示为

$$V(p^*) = \min \left[\frac{\left[\Phi^{-1} \left(\frac{f_p(s)}{s} \right) \Bigg|_{p=p_a} \right]^\alpha \left[\Phi^{-1} \left(\frac{f_{wp}(s)}{s} \right) \Bigg|_{p=p_w} \right]^\beta}{\left[\Phi^{-1} \left(\frac{f_{qp}(s)}{s} \right) \Bigg|_{p=p_q} \right]^\gamma} \right] \quad (13)$$

其中

$$F_p(s) = \frac{f_p(s)}{s}$$

$$f_p(s) = \prod_{(i,j) \in E_p} e_{ij}(s) = e_{i_1}(s) \times \dots \times e_{i_j}(s) \times \dots \times e_{j_n}(s)$$

$$f_{wp}(s) = \prod_{(i,j) \in E_p} e_{wij}(s) = e^{-s \sum b_{ij}} \prod_{(i,j) \in E_p} e_{ij}(a_{ij}s)$$

$$f_{qp}(s) = \prod_{(i,j) \in E_p} e_{qij}(s) = e^{-s \sum d_{ij}} \prod_{(i,j) \in E_p} e_{ij}(c_{ij}s)$$

基于上面两个目的, p^* 正是所找到的 MANETs 多目标可信路由。 $P(p^*)$ 中发现的路由 p^* 为在指定的时间 t_a , 传输开销 w_a 和流 q_a 的情况下的最可信情况路由。 $V(p^*)$ 中发现的路由 p^* 为在指定的可信传输概率为 p_a , p_w 和 p_q 下完成数据交易的路由。 E_p 为路由上的移动节点。

4 实例分析

本节将用实例方法定性分析频率域可信关系和多目标决策路由来检测该模型的正确性和可靠性。

4.1 可信关系分析

定义 1 对于任意的概率分布, 它的随机变量的任意阶原点矩成在, 那么频率域函数可以描写成级数的形式:

$$f_T(s) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{s^n}{n!} \right) E(T^n) \quad (14)$$

定义 2 任何频率域函数 s 的 n 阶导数, 当 $s = 0$, 它等于时间域随机变量 T 的 n 阶原点矩和 $(-1)^n$ 的乘积, 即

$$f_T^n(s)|_{s=0} = (-1)^n E(T^n) \quad (15)$$

定义 3 在 n 个节点的 MANETs, 节点之间的频率域相邻矩阵^[12,13]为 $[A_{ij}]_{n \times n}$, $i = 1, 2, \dots, n, i \neq j$, 即

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & \dots & v_j & \dots & v_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & e_{12} & e_{13} & 0 & & & & 0 \\ 0 & 0 & e_{23} & 0 & & 0 & & e_{2n} \\ 0 & 0 & 0 & e_{34} & & & & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & & e_{ij} & & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中 $A_{ij} = \begin{cases} 0, & i \text{ 和 } j \text{ 没有连接} \\ e_1, & \text{节点 } i \text{ 通过 } e_1 \text{ 和节点 } j \text{ 直接连接。} \\ e_2 \times e_3, & e_2 \text{ 和 } e_3 \text{ 串联连接} \end{cases}$

图 5 的频率域相邻矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & e_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_{23} & e_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{35} \\ 0 & 0 & e_{43} & 0 & e_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

实际相邻矩阵描写了任意节点之间的所有相互连接的路由。所以, $A^2 = AA = [A_{ij}^2]_{n \times n}$, 其中 $A_{ij}^2 = \sum_{k=1}^n A_{ik}A_{kj}$, 同理可以得到 $A^r = AA^{r-1} = (A_{ij}^r)_{n \times n}$, $r = 1, 2, \dots$ 。

4.2 算法实现

基于频率域多目标 MANETs 可信路由决策算法步骤如下:

- (1) 根据 MANETs 生成图, 发现所有从源节点到目的节点的路由, 得到节点相邻矩阵 A 。
- (2) 计算所有路由的频率域的密度函数和分布函数。
- (3) 反 Laplace 变换, 得到时间域概率分布函数曲线图(可能是连续或离散概率分布曲线)。
- (4) 基于需求窗 $[w_{upper}, w_{lower}]$, 与每一个路由的可信概率分布图进行比较, 得出最佳路由。

4.3 实例分析

为了更好的描写在频率域多目标 MANETs 可信路由决策, 以图 5 为实例对可信、网络开销和传输时间 3 个目标进行算法分析。设

$$e_{12}(s) = 0.3e^{-s} + 0.5e^{-2s} + 0.2e^{-3s}$$

$$w_{12}(t) = 2t + 1$$

$$e_{23}(s) = 0.2e^{-s} + 0.3e^{-2s} + 0.2e^{-3s} + 0.3e^{-4s}$$

$$w_{23}(t) = t^2 + 1$$

$$e_{24}(s) = 0.1e^{-s} + 0.5e^{-2s} + 0.2e^{-3s} + 0.2e^{-4s}$$

$$w_{24}(t) = 4t$$

$$e_{35}(s) = 0.3e^{-s} + 0.2e^{-2s} + 0.2e^{-3s} + 0.3e^{-4s}$$

$$w_{35}(t) = 3t + 2$$

$$e_{45}(s) = 0.2e^{-s} + 0.2e^{-2s} + 0.4e^{-3s} + 0.2e^{-4s}$$

$$e_{43}(s) = 0.5e^{-s} + 0.5e^{-2s}$$

- (1) 相邻矩阵如公式(16)所示。
- (2) 分别求出 3 条路由, 即 $p^1 = \{e_{12}, e_{23}, e_{35}\}$, $p^2 = \{e_{12}, e_{24}, e_{45}\}$ 和 $p^3 = \{e_{12}, e_{24}, e_{43}, e_{35}\}$ 的可信概率密度函数和分布。

$$f(p^1) = (0.3e^{-s} + 0.5e^{-2s} + 0.2e^{-3s}) \otimes (0.2e^{-s} + 0.3e^{-2s} + 0.2e^{-3s} + 0.3e^{-4s}) \otimes (0.3e^{-s} + 0.2e^{-2s} + 0.2e^{-3s} + 0.3e^{-4s})$$

$$F(p^1) = 0.018e^{-3s} + 0.087e^{-4s} + 0.212e^{-5s}$$

$$\begin{aligned}
 &+ 0.393e^{-6s} + 0.607e^{-7s} + 0.788e^{-8s} \\
 &+ 0.913e^{-9s} + 0.982e^{-10s} + e^{-11s} \\
 F(p^2) &= 0.006e^{-9s} + 0.012e^{-10s} + \dots \\
 &+ 0.992e^{-33s} + 1e^{-34s} \\
 F(p^3) &= 0.0045e^{-14s} + 0.009e^{-15s} + \dots + 0.994e^{-39s} + 1e^{-40s}
 \end{aligned}$$

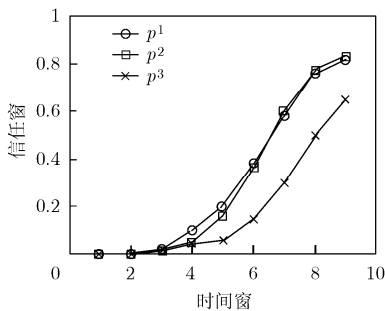
(3)分别划出传输时间,网络开销和可信之间的曲线图,如图 6 所示。它们描写了每个路由的状态信息和对比信息。根据可信窗、网络开销窗和传输时间窗,决策出最佳路由。

假如预先指定两组传输时间和开销分别为 $t \leq 6, w \leq 14$ 和 $t \leq 9, w \leq 20$, 其中 $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$ 。可以得到表 1 所示的结论。

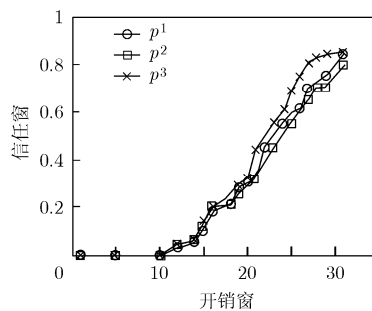
表 1 多目标可信路由决策实例分析

预定窗		计算与分析	路由决策
传输时间 t_a	传输开销 w_a		
$t \leq 6$	$w \leq 15$	$p_1 > p_2 > p_3$ $0.324 > 0.316 > 0.306$	p_1
$t \leq 9$	$w \leq 20$	$p_2 > p_1 > p_3$ $0.881 > 0.765 > 0.601$	p_2

另外,在 NS2 环境中进行了仿真实验。仿真过程中,将本方法和 AODV 协议进行了比较研究,



(a) 传输时间窗下的可信路由决策



(b) 传输开销窗下的可信路由决策

图 6 多目标可信路由决策实例分析

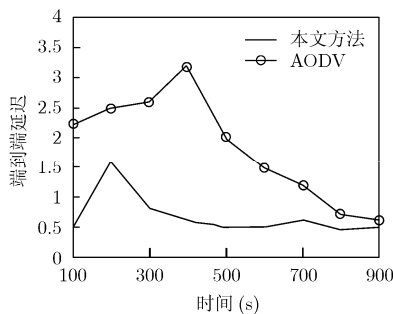


图 8 AED 比较

AODV 协议重新发现路由协议比较频繁,产生较高的路由故障、负载和拥塞,本方法的数据转发率比 AODV 协议高,平均端到端延迟(AED: Average End-to-end Delay)比 AODV 小,分别如图 7 和图 8 所示。

5 结束语

MANETs 的路由安全问题比 Internet 网络更弱。动态的拓扑,使得容易干扰节点之间交换的路由刷新信息。路由算法需要多个节点之间合作,有些不可信节点可能拒绝合作,终止路由转发,引起网络通讯中断。现有的 MANETs 路由协议是假设网络内部的所有节点都是可信的,没有考虑会受到攻击的问题,所以现有协议非常容易遭到攻击。另外,大多数已有的路由协议都没有考虑路由和节点的信誉度以及环境的不确定性问题,选择路由的唯一参数是最小路径长度,导致单一参数约束的路由对 MANETs 环境不是很有效。针对该网络的特点给出了频率域多目标可信路由决策选择算法,解决利用概率论在时间域计算上的复杂性问题,传输时间、开销和路由可信的最优选择。该算法考虑了 MANETs 网络的不确定性,根据环境不同自适应选择若干路由组合,然后采用多路径进行数据传输。仿真实验表明文中给出的路由协议在包传输率和端到端延迟等方面优于 AODV 协议。该研究使多参数路由选择难已解问题得到了一个较好的解决。

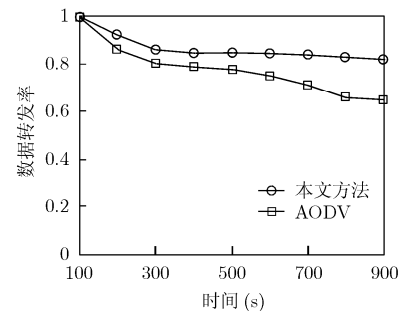


图 7 EPFR 比较

参考文献

- [1] Prayag N, Sanjay Kumar D, and Sudip M, *et al.* Security in mobile Ad-hoc networks using soft encryption and trust-based multi-path routing [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(4): 760-769.
- [2] Vasantha V and Manimegalai D. Mitigating routing misbehaviors using subjective trust model in mobile Ad hoc networks [C]. *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications*, Sivakasi, Tamil

- Nadu, India, December 13–15, 2007: 417–422.
- [3] Neeraj N, Patel R B, and Bhat V K. Trust aware routing with load balancing in ad hoc network using mobile agent [C]. 15th International Conference on Advanced Computing and Communications, Guwahati, India, December 18–21, 2007: 454–459.
- [4] Wang Kun, Wu Meng, and Shen Su bin. A trust evaluation method for node cooperation in mobile ad hoc networks [C]. 5th International Conference on Information Technology, Nevada, USA, April 7–9, 2008: 1000–1005.
- [5] Bounpadith, Hidehisa N, and Nei K, *et al.* A study of a routing attack in OLSR-based mobile ad hoc networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2007, 20(11): 1245–1261.
- [6] Satyanarayana A. Unified formula for analysis of some network reliability problems [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1982, R-31(1): 23–32.
- [7] Kannhavong Bounpadith, Nakayama Hidehisa, and Nemoto Yoshiaki, *et al.* A survey of routing attacks in mobile Ad hoc networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(5): 85–91.
- [8] Katsuhiko O. System Dynamics (Fourth Edition) [M]. New Jersey, Prentice Hall, August 23, 2003: 350–480.
- [9] Andel Todd R and Yasinsac Alec. Adaptive threat modeling for secure Ad hoc routing protocols [J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2008, 197(2): 3–14.
- [10] Zouridaki Charikleia, Brian M L, and Marek H. Byzantine robust trust establishment for mobile Ad hoc networks [J]. *Telecommunication Systems*, 2007, 35(3–4): 189–206.
- [11] Zheng Long and Zhou J L. Optimization of military transportation path based on generalized cut set algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(11): 4–9.
- [12] Zheng Long, Liu Xue, and Zhou Jing lun. Frequency-domain reliability analysis and modeling of networked control systems [C]. Third International Workshop on Feedback Control Implementation and Design in Computing Systems and Networks, Annapolis, Maryland, USA, June 6, 2008: 35–40.
- [13] Carlos R H and Thomas K. A mutual network synchronization method for wireless Ad hoc and sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(5): 633–645.
- 罗俊海: 男, 1980 年生, 博士, 研究方向为无线通信与信息安全。
郑 龙: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为最优算法和运输网络。
范明钰: 女, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息安全。