

## 基于本地信任系统的可靠动态源路由协议<sup>\*</sup>

孙玉星<sup>1</sup>, 谢立<sup>2</sup>, 陈一飞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(南京审计学院 信息科学学院, 江苏 南京 211815)

<sup>2</sup>(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210093)

通信作者: 孙玉星, E-mail: scholar\_syx@yahoo.com.cn

**摘要:** 移动 Ad hoc 网自组织、移动性等特性为组网带来便利的同时也增加了路由管理的难度. 针对现有可靠路由算法解决问题具有局限性以及获取链路评价信息低效等问题, 在 DSR(dynamic source routing)协议基础上提出了基于本地信任系统的可靠路由协议(reliable routing protocol based on local trust system, 简称 TR-DSR). TR-DSR 协议选择路由时, 综合考虑路由上各节点和各链路的可靠信任度, 并在路由建立过程中利用这些信息, 在确保找到可靠路由的基础上降低寻路开销. 同时, 为了防止自私节点对信任系统评价正确性的影响, 提出了基于 GTFT(generous tit for tat)策略的激励节点推荐响应行为的 DFR(decide forwarding recommendation)算法. 仿真实验结果表明, 在节点频繁移动和存在大量自私节点的网络中, 该协议的性能优势明显, 验证了 TR-DSR 协议的可靠性.

**关键词:** 可靠路由; 移动自组织网络; 信任系统; 动态源路由协议; 激励策略

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

中文引用格式: 孙玉星, 谢立, 陈一飞. 基于本地信任系统的可靠动态源路由协议. 软件学报, 2013, 24(5): 1098-1110. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4271.htm>

英文引用格式: Sun YX, Xie L, Chen YF. Reliable dynamic source routing protocol based on local trust system. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(5): 1098-1110 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4271.htm>

### Reliable Dynamic Source Routing Protocol Based on Local Trust System

SUN Yu-Xing<sup>1</sup>, XIE Li<sup>2</sup>, CHEN Yi-Fei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Information Science, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

Corresponding author: SUN Yu-Xing, E-mail: scholar\_syx@yahoo.com.cn

**Abstract:** The features of mobile ad hoc network such as self-organization, mobility bring the convenience of network, but also increase the difficulty of routing management. To solve the limits of the existing reliable route protocol and its inefficient access to link information, according to DSR (dynamic source routing) protocol, a reliable routing protocol based on local trust system (TR-DSR) is proposed. TR-DSR completely considers and uses the reliability of each node and each link to find reliable routes. Moreover, the system also reduces overhead routing during this process. Meanwhile, to reduce the impact of selfish nodes to improve the correctness of the trust system, the DFR (decide forwarding recommendation) algorithm based on GTFT (generous tit for tat) strategy which motivates response to recommendation requests, is provided. Simulation results indicate that in more challenging situations of high mobility and selfish nodes, TR-DSR can improve the performance significantly and prove the reliability of TR-DSR.

**Key words:** reliable route; mobile ad-hoc network (MANET); trust system; dynamic source routing (DSR); incentive strategy

移动 Ad hoc 网络中, 无论是按需路由协议还是表驱动路由协议, 在进行路由选择时都主要考虑“最短路径”这一约束条件. 但移动 Ad hoc 网络拓扑结构多变, 该约束条件造成所选路径可靠性低, 因此, 采用传统路由协议

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60673154, 61100197); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(12KJD520005, 11KJB520007)

收稿时间: 2011-12-15; 修改时间: 2012-03-19; 定稿时间: 2012-05-31

存在无法有效控制拥塞现象和节约资源等问题<sup>[1]</sup>.很多学者致力于移动 Ad hoc 网络中可靠路由算法的研究,其目的是通过提高所选路由稳定性减少网络重路由的次数,从而提高网络性能.

目前,关于移动 Ad hoc 网络可靠路由协议的研究内容以链路质量为例,主要从预测与检测两个角度入手.

从链路稳定性预测角度的研究内容主要是对链路生存时间、链路存活概率、链路稳定性进行预估,以便路由时选择更可靠的路径.文献[2]直接采用链路存活时间判断该链路是否强连接,选择路由时优先考虑这些链路.文献[3]通过周期性的监控信号强度对链路的存活时间进行预估.文献[4]设计了一种链路存在概率模型,对未来链路存在概率做出预估.文献[5-8]运用模糊逻辑控制策略,通过节点间距离和节点移动速度对链路的生存时间进行预测.文献[9,10]使用 GPS(global positioning system)来获取节点的移动速度和运动方向,将其作为移动预测的依据.文献[11,12]使用 GPS 预测每一跳的 LET(link expiration time),然后根据路径上的最小 LET 确定路径 RET(route expiration time),最终帮助选择路由.文献[13]在 AODV(on-demand distance vector)协议的基础上,使用总重量 TWR(total weight of the route)选择最佳路由,其中,TWR 综合了节点移动速度与加速度、移动方向和链路质量等因素.

从链路稳定性检测角度的研究内容主要是解决如何评价链路质量.测量链路质量的方法较多,常用的有:ETX(expected transmission count)算法<sup>[14]</sup>通过节点周期性发广播分组,测量链路丢分组率进而估计链路质量;ETT(expected transmission time)算法<sup>[15]</sup>通过端到端的吞吐率估计选路由;WCETT(weighted cumulative ETT)算法<sup>[16]</sup>使得 ETT 算法适用于多 radio mesh 网络;文献[17]提出了基于灰色关联分析的评估方法,融合 PRR(packet reception ratio)和 RNP(required number of packet)两种指标来评价链路的可靠性;文献[18]采用强化学习方法,最大限度地减少数据包的平均预期成本.这些算法通常采用离线方式或在线方式收集链路可靠性信息.文献[19]中,在组网期间,所有节点在 1 跳范围内持续发送 hello 消息,统计 hello 成功率.文献[20]对 hello 消息接入信道的过程进行调度,以降低由于探测分组碰撞造成的能量浪费.文献[19,20]获取链路可靠性信息的方法本质上是离线的(off line).与之不同,文献[14]设计了在线(on line)方法,在数据传输的同时发送探测消息 Probe,实时跟踪链路质量的变化.离线的方法仅仅在组网阶段进行探测,信息不能反映实时链路质量,而在线的方法又存在探测分组和正常的数据分组竞争信道、互相干扰的问题.

综上所述,现有可靠路由协议存在下面两个方面的问题.一方面,目前还没有可靠的路由算法可以综合考虑节点的客观因素与主观因素评价链路的可靠性.目前的可靠路由协议是针对某些客观问题,例如链路质量、能量<sup>[21]</sup>、QoS<sup>[10,22]</sup>的修缮,对于某些节点主观问题,例如由于节点降低转发报文比率的自私行为造成不稳定的问题没有涉及.另一方面,目前在获取链路质量信息时主要采用离线或在线方式,但无论是离线还是在线都将可靠路径的选择和数据的传输看成两个独立的过程.在选择稳定路由过程中,可靠路由协议将发送大量的额外探测消息来收集链路质量,增加了各节点的能量资源消耗,降低了报文传输速率以及整个网络的吞吐量,而且存在反应链路质量实时性差的问题.

本文提出的基于本地信任系统可靠路由协议 TR-DSR(local trust system based reliable DSR(dynamic source routing))选择路由时能够综合考虑路由上各节点和各链路主观与客观的可靠信任度,在减少移动以及链路质量不稳定造成路由不可靠的同时,避免了节点自私行为对路由稳定性的影响.为了抵御拒绝响应推荐请求的自私行为,该本地信任系统采用 DFR(decide forwarding recommendation)算法实施基于 GTFT(generous tit for tat)策略的激励节点推荐响应行为,进而确保本地信任系统评价的正确性.

本文第 1 节介绍基于本地信任系统的可靠路由协议 TR-DSR 所使用的完整路由可靠性评价指标.第 2 节阐述本地信任系统组成、信任信息处理方法和间接推荐激励算法.第 3 节描述 TR-DSR 的路由过程.第 4 节通过模拟实验对 TR-DSR 进行性能分析.第 5 节总结全文并介绍今后工作的重点.

## 1 完整路由可靠性评价指标

假设 Ad hoc 网络中存在一条路由,如图 1 所示:节点  $S$  的报文经过节点  $V_1, V_n$  传到节点  $D$ .该路由的可靠性取决于两个因素:路由上所有链路(如  $SV_1, V_i V_{i+1}, V_n D$ )的链路质量可靠性以及中继节点  $V_i$  报文转发服务的可

可靠性.

本协议采用可靠性指标 ESC(expected send count)来评估路由的可靠性.路由可靠性指标 ESC 是其所有链路的可靠性指标 ESC 之和.链路的可靠性指标 ESC 是指,为了确保链路下一跳节点转发上一跳节点所发来的数据包,上一跳节点所需发送数据包的次数.

链路  $V_i V_{i+1}$  的可靠性指标 ESC 取决于数据包传递时经过的链路  $V_i V_{i+1}$  投递成功率和节点  $V_{i+1}$  的转发率.假设  $V_i$  到  $V_{i+1}$  的投递成功率为  $d_{i,i+1}$ 、节点  $V_{i+1}$  的转发率为  $f_{i+1}$ ,则链路  $V_i V_{i+1}$  上,报文一次成功转发率为  $d_{i,i+1} \times f_{i+1}$ .  $P_{i,i+1}$  为从  $V_i$  到  $V_{i+1}$  一次传输不成功的概率,则  $P_{i,i+1} = 1 - d_{i,i+1} \times f_{i+1}$ .根据重传规则,定义  $S_{i,i+1}(k)$  为从  $V_i$  到  $V_{i+1}$  用  $k$  次才能成功传送一个分组的次数,  $S_{i,i+1}(k) = P_{i,i+1}^{(k-1)} \times (1 - P_{i,i+1})$ .从  $V_i$  到  $V_{i+1}$  成功传输一个分组所需次数为

$$\sum k \times S_{i,i+1}(k) = 1/(1 - P_{i,i+1}) = 1/(d_{i,i+1} \times f_{i+1}).$$

链路  $V_i$  到  $V_{i+1}$  的可靠性指标 ESC 为

$$ESC_i^{i+1} = 1/(d_{i,i+1} \times f_{i+1}) \quad (1)$$

多跳路径如图 1 所示,将各条链路的 ESC 值加起来评估一个分组在该路径上成功传递需要传递的次数,即路由的可靠性指标 ESC 为

$$ESC_s^d = ESC_s^1 + ESC_n^d + \sum_{i=1}^{n-1} ESC_i^{i+1} \quad (2)$$

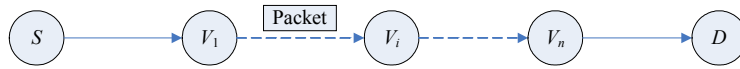


Fig.1 Packet forwarding process

图 1 报文转发过程

## 2 TR-DSR 的本地信任系统

基于本地信任系统的可靠路由协议 TR-DSR 是在 DSR 路由协议中采用本地信任系统评价链路的稳定性,在选择路由时能够避免选择包含不可靠节点和链路的路由,从而提高路由的可靠性,减少重新路由的次数,提高网络传输效率.因此,本地信任系统评估的正确性是 TR-DSR 得以有效实施的关键.

### 2.1 本地信任系统框架

根据实际信任度评价的需要,本协议建立如图 2 所示的本地信任系统.该系统由监听模块、信任度管理模块、信任度交换模块组成.

本地信任系统通过监听模块获取与邻居节点的链路质量信息以及邻居节点的报文转发行为情况,并将该信息传递给信任度管理模块进行信任度计算,从而为可靠路由提供依据.信任度管理模块计算、更新该节点与其所有邻居节点之间的链路质量可靠性信任度(投递成功率的信任度)以及所有邻居报文转发可靠性信任度(即转发率的信任度),并根据公式(1)计算出链路可靠性指标 ESC.信任度交换模块将最新链路可靠性指标 ESC 通知被评价的邻居节点,同时负责接收邻居节点对自己的评价信息,为可靠路由选择做好准备.

该信任系统采取本地直接信任关系为主、间接信任关系为辅的方式,其优势有以下几点:

- (1) 可实施性强:适应移动 Ad hoc 网络自身特点,邻居节点在直接通信距离范围内的,可以从直接观察中获得它信任度的第一手数据.
- (2) 降低通信量:该系统只需要进行少量间接信任度信息的计算和更新,避免了复杂的二手信任度的传递分发过程,减少了由此带来的巨大网络通信资源消耗.
- (3) 节省存储空间:每个节点只保持其邻居节点的信任度,与总体信任关系中保存网络中所有节点的信任度值相比,节省了存储空间.

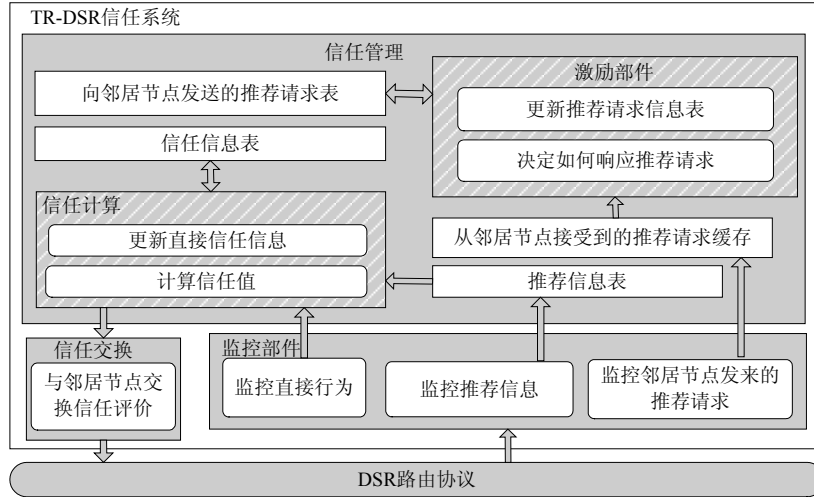


Fig.2 Local trust system framework of TR-DSR protocol

图 2 TR-DSR 协议本地信任系统框架

2.2 节点直接信任度计算

节点的直接信任度计算是指节点通过监听其邻居节点发送和接收的所有报文,采用简单贝叶斯统计方法计算出关于节点间链路稳定性(投递成功率)与报文转发可靠性(转发率)的信任度.在简单贝叶斯统计模型中,假定投递成功率 $\theta_1$ 和转发率 $\theta_2$ 的先验分布都符合Beta( $\alpha, \beta$ )分布,因为Beta分布是共轭先验分布,并且可以看作是多次伯努利实验后的后验分布.如果并不知道一次伯努利实验中成功的概率,那么 $\theta$ 的先验分布是0~1的均匀分布,观察 $\alpha+\beta$ 次通信伯努利实验,结果发现通信成功了 $\alpha$ 次,通信失败了 $\beta$ 次.此时, $\theta$ 的后验分布可以用贝塔分布来描述,其概率密度分布函数如下:

$$f(\theta|\alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1} du} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}, 0 \leq x \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (3)$$

使用Beta分布的优势在于,只要Beta分布的两个参数值随着观测值不断变化,即可完成先验分布向后验分布转化过程.在评价节点间链路稳定性时,通信成功是指节点某次数据帧在发送后,在确认周期内从其邻居节点获得对该数据帧的确认信息.在评价报文转发可靠性时,通信成功是指节点收到数据帧确认信息后,在报文转发周期内侦听到该邻居节点转发了该数据帧.在评价节点间链路稳定性时,通信失败是指节点某次数据帧在发送后,在确认周期内未能从其邻居节点获得对该数据帧的确认信息.在评价报文转发可靠性时,通信失败是指节点收到数据帧确认信息后,在报文转发周期内未能侦听到该邻居节点转发了该数据帧.

2.2.1 信任度参数的更新

以两个相邻节点*i,j*为例,在初始化阶段,分别以参数( $\alpha_i=1, \beta_i=1$ ), ( $\alpha_j=1, \beta_j=1$ )初始化节点*i*对链路(*i,j*)的稳定性以及节点*j*报文转发可靠性的Beta分布.每隔一个时隙,节点*i*使用该时隙中所观测到的第一手信息更新链路(*i,j*)的稳定性以及节点*j*报文转发可靠性的Beta分布.假定前*n-1*次时隙后,两分布的参数分别为( $\alpha_{i,n-1}, \beta_{i,n-1}$ )和( $\alpha_{j,n-1}, \beta_{j,n-1}$ ).第*n*次时隙间,节点*i*所观测到的链路(*i,j*)上,数据帧发送次数为*S<sub>i</sub>*次,收到确认帧的次数为*a<sub>i</sub>*次;节点*i*向节点*j*发送报文次数为*S<sub>j</sub>*次,节点*i*观测到的节点*j*转发节点*i*的报文次数为*a<sub>j</sub>*次.第*n*次时隙后,两分布的参数分别更新如下:

$$\alpha_{i,n} = u_i \alpha_{i,n-1} + a_i \quad (4)$$

$$\beta_{i,n} = u_i \beta_{i,n-1} + S_i - a_i \quad (5)$$

$$\alpha_{j,n} = u_j \alpha_{j,n-1} + a_j \quad (6)$$

$$\beta_{f,n} = u_f \beta_{f,n-1} + S_f - \alpha_f \tag{7}$$

其中,权值  $0 \leq u_l \leq 1, 0 \leq u_f \leq 1$  是过去经验的贴现因子,即可以控制过去经验对后验分布的影响程度.

### 2.2.2 信任度与置信度计算

该本地信任系统信任度计算方法使用 OTMF(objective trust management framework)<sup>[23]</sup>处理方法,在更新分布参数之后,节点  $i$  获得关于对链路( $i,j$ )的稳定性以及节点  $j$  报文转发可靠性的 Beta 后验分布.节点  $i$  需要根据后验分布计算信任度与对该信任度的置信度:

- $t_i^{i,j}$ : 节点  $i$  对链路( $i,j$ )的稳定性的信任度,  $0 \leq t_i^{i,j} \leq 1$ ;
- $t_f^{i,j}$ : 节点  $i$  对节点  $j$  报文转发的信任度,  $0 \leq t_f^{i,j} \leq 1$ .

信任度  $t$  与 Beta 后验分布的数学关系是:信任度是 Beta( $\alpha, \beta$ )的数学期望,即 Beta 分布的峰值所在位置,因此,

$$t_i^{i,j} = E(\text{Beta}(\alpha_{l,n}, \beta_{l,n})) = \frac{\alpha_{l,n}}{\alpha_{l,n} + \beta_{l,n}} \tag{8}$$

$$t_f^{i,j} = E(\text{Beta}(\alpha_{f,n}, \beta_{f,n})) = \frac{\alpha_{f,n}}{\alpha_{f,n} + \beta_{f,n}} \tag{9}$$

置信度  $c$  是用于反映信任度  $t$  的可靠性的属性,其值介于[0,1],当置信度  $c$  接近 1 时,则意味着信任度  $t$  是可信的,因为有足够多的观测信息支持这一论断;当置信度  $c$  接近 0 时,则意味着信任度  $t$  是不可信的,因为缺乏充分的观测信息支持这一结论:

- $c_l^{i,j}$ : 用于评价统计计算结果  $t_i^{i,j}$  的可靠性,为  $t_i^{i,j}$  的置信度,  $0 \leq c_l^{i,j} \leq 1$ ;
- $c_f^{i,j}$ : 用于评价统计计算结果  $t_f^{i,j}$  的可靠性,为  $t_f^{i,j}$  的置信度,  $0 \leq c_f^{i,j} \leq 1$ .

置信度计算方法如下:

$$c_l^{i,j} = 1 - \sqrt{12}\sigma(\text{Beta}(\alpha_{l,n}, \beta_{l,n})) = 1 - \sqrt{\frac{12\alpha_{l,n}\beta_{l,n}}{(\alpha_{l,n} + \beta_{l,n})^2(\alpha_{l,n} + \beta_{l,n} + 1)}} \tag{10}$$

$$c_f^{i,j} = 1 - \sqrt{12}\sigma(\text{Beta}(\alpha_{f,n}, \beta_{f,n})) = 1 - \sqrt{\frac{12\alpha_{f,n}\beta_{f,n}}{(\alpha_{f,n} + \beta_{f,n})^2(\alpha_{f,n} + \beta_{f,n} + 1)}} \tag{11}$$

### 2.3 间接信任信息处理

当节点  $B$  从图 3(a)位置移动到图 3(b)位置时,其邻居节点  $A$  通过 Hello 消息发现节点  $B$ ,而邻居节点  $A$  对通向节点  $B$  的链路稳定性以及节点  $B$  转发报文的可靠性的信任度信息一无所知或该类信息已超时,会发生获取间接推荐通信.

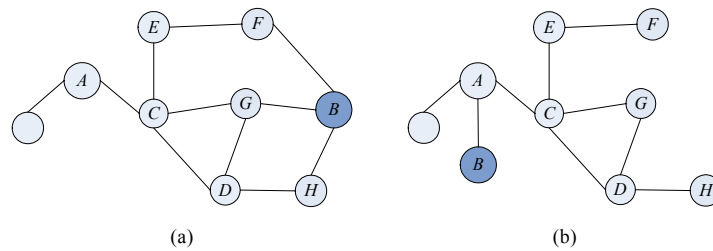


Fig.3 Node moving view

图 3 节点移动示意图

#### 2.3.1 间接信任度计算

为便于将多个源头收集的间接信任信息融合起来,间接推荐过程中所传递的信息并非是某节点对其邻居节点转发报文行为的信任度值和对某一链路的稳定性的信任度值,而是某节点对其邻居节点转发报文行为和与该邻居节点之间链路稳定性的信任度计算参数对( $\alpha_l, \beta_l$ ),( $\alpha_f, \beta_f$ ).

假定节点  $u$  在 ad hoc 网络中广播了对节点  $v$  的链路稳定性,报文转发行为可靠性的间接推荐请求之后,有  $s$

个不同节点响应了节点  $u$  的请求.根据节点  $u$  所接收到的  $s$  个  $\langle(\alpha_i, \beta_i), (\alpha_f, \beta_f)\rangle$  对的产生时间排序,最新的参数对排前面,次新的参数对排第二,依此类推,最后得到如下序列:

$$\{(\alpha_{i,1}, \beta_{i,1}), (\alpha_{f,1}, \beta_{f,1}); (\alpha_{i,2}, \beta_{i,2}), (\alpha_{f,2}, \beta_{f,2}); \dots; (\alpha_{i,s}, \beta_{i,s}), (\alpha_{f,s}, \beta_{f,s})\}.$$

将多源头收集的间接信任信息融合的过程就是将多源头收集的多个参数对融合形成一个参数对的过程. $s$  个参数对汇总方式如下:

$$\alpha_i = \sum_{i=1}^s w_i \alpha_{i,i}, \beta_i = \sum_{i=1}^s w_i \beta_{i,i}, \alpha_f = \sum_{i=1}^s w_i \alpha_{f,i}, \beta_f = \sum_{i=1}^s w_i \beta_{f,i} \quad (12)$$

其中,  $0 \leq w_s \leq w_i \dots w_1 \leq 1$  为权重,决定了各参数对对最终参数对的影响.参数对越新,其权重就越大;参数对越旧,其权重就越小.

节点  $u$  融合了  $s$  个节点的间接推荐后,获得的参数对分别决定了与节点  $v$  的链路的稳定性以及节点  $v$  转发报文可靠性的 Beta 分布状况.根据第 2.2.2 节介绍的信任度计算方法即可计算出对节点  $v$  的间接信任度,此处不再赘述.

### 2.3.2 激励部件

广泛地获取间接信任信息有助于信任系统做出更准确的评价,需依赖于网络中各节点积极响应间接推荐请求.但移动 Ad hoc 网络节点存在间接推荐的自私行为,即享受其他节点的间接推荐服务但不为其他节点提供间接推荐服务.为了抵御该自私行为,本地信任系统使用 GTFT 策略激励节点的推荐响应行为,并对突发性自私行为又具有较好的合作恢复能力,从而确保信任评价的准确性<sup>[24]</sup>.GTFT 策略形式化如下:

$$f_i^n = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ \min(f_{-i}^n + g, 1), & n > 0 \end{cases} \quad (13)$$

所有节点都采取 GTFT 策略,节点  $i$  采取单方面降低其响应推荐请求行为概率  $f_i^0 = p$ , 其对手  $f_{-i}$  即  $f_i$  的所有邻居节点将根据 GTFT 策略作出响应:

- a) 如果偏离行为与合作行为差异小,概率  $p \geq 1-g$ ,则对手将容忍该偏离行为;
- b) 如果偏离行为与合作行为差异大,概率  $p < 1-g$ ,则将被视为不合作行为,对手将以概率  $p+g$  提供响应服务.

由于在激励响应推荐请求问题中,节点  $i$  的博弈对手是其所有的邻居节点,GTFT 激励策略的正确实施需做到:1) 所有邻居节点都要以概率  $\min(f_i^n + g, 1)$  响应节点  $i$  的推荐请求;2) 所有邻居节点对节点  $i$  的相同推荐请求处理方式相同;3) 需避免邻居节点之间的协商,以减少额外的通信负担.

为了实现所有邻居节点实施同一比率的响应策略,激励部件需要保持该节点与其邻居节点的时钟同步,采用 802.11 中定义的 TSF(timing synchronization function)实现时钟同步.时间被分为离散的时间片,在当前时间片结束时,激励部件统计上一时间片间接推荐请求响应行为的比率,确保当前时间片推荐请求转发比率符合 GTFT 策略要求.每个时间片长度为  $T^r$ ,发送间接推荐请求与收到该请求的应答之间时长最大为  $RRT_{\max}$ ,其中,  $T^r \geq RRT_{\max}$ ,以确保在进行响应请求比率统计时,上一个时间片中的所有未被响应报文都因超时而不会再被响应.为节省带宽,对响应方式做了改进,如果该节点准备响应该请求就转发该请求,否则不转发该请求.

**命题 1.** 激励部件不能仅在时间片结束时,决定对当前时间片内收到的间接推荐请求的响应比率.

证明:如果激励部件对当前时间片内收到的间接推荐请求的响应比率决定是在时间片结束时作出的,会造成与假设前提的悖论.假定间接推荐请求传递的最多跳数为  $l$ ,那么  $RRT_{\max}$  如下:

$$RRT_{\max} = 2 \times l \times t_{\text{tran}} + l \times T^r \quad (14)$$

其中,  $t_{\text{tran}}$  为每条链路传递间接推荐请求/应答所需时间.由上式可得  $RRT_{\max} \geq T^r$ ,与前提假设相违背.  $\square$

因此,每个时间片被均分成  $m$  个时隙  $t_s^p$  ( $0 < s \leq m$ ),其中,上标表示第几个时间片,下标表示该时间片中的第几个时隙,每个时隙需判断响应比率.当  $m$  足够大时,每当接收到推荐请求时,可及时判断是否响应该请求,并转发该请求.

假定在时隙  $t_1^1$  里由节点  $j$  向节点  $i$  发送的间接推荐请求报文集合为  $Rin_{i,j}^1$ , 在时隙  $t_1^1$  里由节点  $i$  转发的节点  $j$  发来的间接推荐请求报文集合为  $Rout_{i,j}^1$ , 直到时隙  $t_1^2$  节点  $i$  向其邻居节点  $j$  应答的上一个时间片内节点  $j$  发来的间接推荐请求报文集合为  $Q_{i,j}^2$ . 节点  $i$  的邻居节点  $v$  在第  $n$  个时间片中第  $k$  个时隙时, 判断对其邻居节点  $i$  的间接推荐请求响应比率为  $R_{v,i}^{n,k}$ .

$$R_{v,i}^{n,k} = \sum_{s=1}^k \left| \sum_{j \in N(i)} Q_{i,j}^s \right| / \left| \sum_{s=1}^m \sum_{j \in N(i)} |Rin_{i,j}^{s-1}| \right| + g, \quad 0 < k \leq m \quad (15)$$

其中,  $||$  表示集合中元素的个数,  $N(i)$  表示节点  $i$  的所有邻居节点.

获得  $R_{v,i}^{n,k}$  后, 需要节点  $v$  根据其在上一个时隙对节点  $i$  的间接推荐请求的转发情况, 决定在该时隙应转发的节点  $i$  的间接推荐请求个数  $Num_{v,i}^{n,k}$  如下:

$$Num_{v,i}^{n,k} = R_{v,i}^{n,k} \times \sum_{s=1}^k |Rin_{v,i}^s| - \sum_{s=1}^{k-1} |Rout_{v,i}^s|, \quad 0 < k \leq m \quad (16)$$

节点在时隙  $k$  确定了应转发的间接推荐请求个数  $Num_{v,i}^{n,k}$  后, 节点将依次转发从时隙 1 到时隙  $k$  中该节点收到并未转发的间接推荐请求. 为了确保所有邻居节点都采取相同的惩罚机制, 又能做到及时对是否转发请求作出判断, 在已知转发报文数目的前提下, 采用 DFR 算法完成对转发报文的选择, 具体算法如下:

算法. *Decide\_Forwarding\_Recommendation.*

Input:  $Num_{v,i}^{n,k}$ ,  $k$ ,  $n$ .

Begin

1: *Forward\_count* = 0.

2: for  $i=1$  to  $k$  do

3: if *Leave\_count*[ $i$ ] == 0 then

4: Continue.

5: Endif.

6: if *Leave\_count*[ $i$ ]  $\leq$   $Num_{n,k}^{j,i} - Forward\_count$

7: Forward all recommendation requisitions

8: *Forward\_count* = *Forward\_count* + *Leave\_count*[ $i$ ]

9: *Leave\_count*[ $i$ ] = 0

10: else

11: Find first ( $Num_{n,k}^{j,i} - Forward\_count$ ) ID small recommendation requirements

12: Forward these recommendation requirements

13: *Leave\_count*[ $i$ ] = *Leave\_count*[ $i$ ] - ( $Num_{n,k}^{j,i} - Forward\_count$ )

14: *Forward\_count* =  $Num_{n,k}^{j,i}$

15: Endif

16: if *Forward\_count*  $\geq$   $Num_{n,k}^{j,i}$

17: Break

18: Endif

19: Endfor

End

**命题 2.** DFR 算法保证节点  $i$  的所有邻居节点  $N(i)$  采用相同的比率  $r$  转发节点  $i$  的间接推荐请求等价于节点  $i$  将从所有邻居节点获得比率  $r$  的间接推荐请求响应服务.

证明: 由于已经保证节点  $i$  和其邻居节点  $N(i)$  的同步性, 即节点  $i$  与其所有邻居节点  $N(i)$  对时隙和时间片的

判断是一致的,因此,

$$\forall v_1, v_2 \in N(i), \forall s \leq m, \forall p: Rin_{i,v_1}^{t^s p} = Rin_{i,v_2}^{t^s p} \quad (17)$$

由上式可得:

$$\forall v_1, v_2 \in N(i), \forall k \leq m, \sum_{s=1}^k Rin_{i,v_1}^{t^s p} = \sum_{s=1}^k Rin_{i,v_2}^{t^s p} \quad (18)$$

在时间片  $n-1$  时隙  $m$  时,邻居节点  $N(i)$ 采用相同比率  $r$  转发节点  $i$  的间接推荐请求,那么节点  $i$  将在时间片  $n$  时隙  $m$  时收到邻居节点  $N(i)$ 对其请求的响应.DFR 算法所转发的请求报文分布在前  $k$  个时隙,其中,前  $k-1$  个时隙的节点  $i$  的请求报文全部被转发,并转发第  $k$  个时隙的节点  $i$  的请求报文中 id 最小的前  $l$  个请求报文.由公式(18)可得所有邻居节点  $N(i)$ 转发的节点  $i$  前  $k-1$  个时隙的所有请求报文内容一样,命题得证.  $\square$

由上述证明可知,DFR 算法使得邻居节点间无须协商即可采取相同比率响应某节点的推荐请求.

### 3 基于本地信任系统的可靠路由协议

基于本地信任系统的可靠路由 TR-DSR 在 DSR 路由协议基础上,对路由发现过程引入了由链路稳定性的信任度、节点转发信任度计算的链路可靠性指标,在路由选择时,除了考虑最小跳数以外,还更多地考虑链路的稳定性以及节点转发积极性,从而避免了选择经过常移动节点的路由.同时改进了 DSR 原有的路由发现机制,有选择性地丢弃路由请求分组,有利于发现多条可靠路由备选.TR-DSR 的路由发现过程分成路由请求发送、路由请求转发、路由应答发送、路由应答转发这 4 部分.

#### 3.1 路由请求发送

当源节点与目的节点通信时,需要找到一条到达目的节点的路由.如果该节点已有可用路由并且该路由有效,则节点可以直接利用该路由进行通信.如果没有到达目的节点的路由或路由因超时或链路中断等原因已经失效,则源节点将发起到目的节点的路由请求.该系统的路由请求与 DSR 的路由请求的区别在于,路由请求中所包含信息的路由请求消息的格式为  $\langle RReq,src,dst,req\_id,max\_ESC,trust\_node\_list \rangle$ ,其中, $src$  为源节点; $dst$  为目的节点; $req\_id$  为路由请求唯一标识; $max\_ESC$  是路由请求的源端希望路径中各条链路的可靠性度量 ESC 的上限; $trust\_node\_list$  用于存放请求消息所经历的节点列表信息,该列表中不仅包括所经历的所有中间节点,而且包括每个节点对下一跳节点的链路可靠性 ESC 指标与置信度信息.

#### 3.2 路由请求转发

当中间节点收到具有相同  $req\_id$  的路由请求消息时,不像 DSR 协议直接丢弃该路由请求,TR-DSR 对所经路径稳定性做出判断,再确定是否转发该路由请求消息.

**命题 3.** 中间节点转发路由请求中已知路由段 ESC 指标值最低的路由请求,即可找到最终 ESC 指标值最低的路由,即路由可靠性最高的路由.

**证明:**采用反证法.在求节点  $s$  与节点  $d$  之间的 ESC 指标值最低的路由过程中,存在经过节点  $v$  的不同路由.假设节点  $s$  和节点  $v$  之间存在两条不同的路由  $\pi_1, \pi_2$ ,其中,  $ESC(\pi_1) < ESC(\pi_2)$ .如果节点  $s$  与节点  $d$  间一定存在一条 ESC 指标最低路由  $\pi$ ,并且路由  $\pi$  包含  $\pi_1, \pi = \rho(\pi_1, \pi_3)$ ,那么肯定存在一条路由  $\pi' = \rho(\pi_2, \pi_3), ESC(\pi') < ESC(\pi)$ ,这与  $\pi$  是 ESC 指标最低路由相矛盾.因此,节点  $v$  转发经过  $\pi_2$  而来的路由请求肯定能够找到节点  $s$  与节点  $d$  之间的最终 ESC 指标值最低的路由,即路由可靠性最高的路由.  $\square$

如图 4 所示,中间节点  $j$  在接收从节点  $i$  传来的路由请求消息时,先检查是否接收过同样的路由请求,如果没有收到过,就进入路由可靠性指标检查;如果收到过,则判断该路由请求与已接受到的同样请求经历的路由相比是否更稳定.如果不是更稳定,就丢弃该路由请求消息;如果更稳定,就进入路由可靠性指标检查,即检查本节点缓存的节点  $i$  对链路  $(i,j)$  稳定性度量指标或对节点  $j$  报文转发可靠性是否小于  $max\_ESC$ ,如果不符合,则说明链路  $(i,j)$  或节点  $j$  不符合源端对路由可靠性要求,节点  $j$  将丢弃该路由请求;如果满足链路稳定性指标要求,则进行目标节点检查,如果节点  $j$  是目标节点则转向对路由请求消息的应答处理;否则,继续进行环路检查,如果没有通



过该检查则丢弃该路由请求消息,否则,节点  $j$  会以目标节点为索引检索自己路由缓存中是否有符合路由请求要求的未过时的路由信息,如果有则进行路由应答发送处理,如果没有则将该路由请求消息添加到路由请求表中,更新与  $req\_id$  相关的  $min\_Route\_ESC$ ,并广播该路由请求分组。

该路由请求转发过程既能找到路由可靠性最高的路由,又尽可能地降低了路由请求在网络中洪泛的程度,节省了网络的带宽,提高了路由性能。

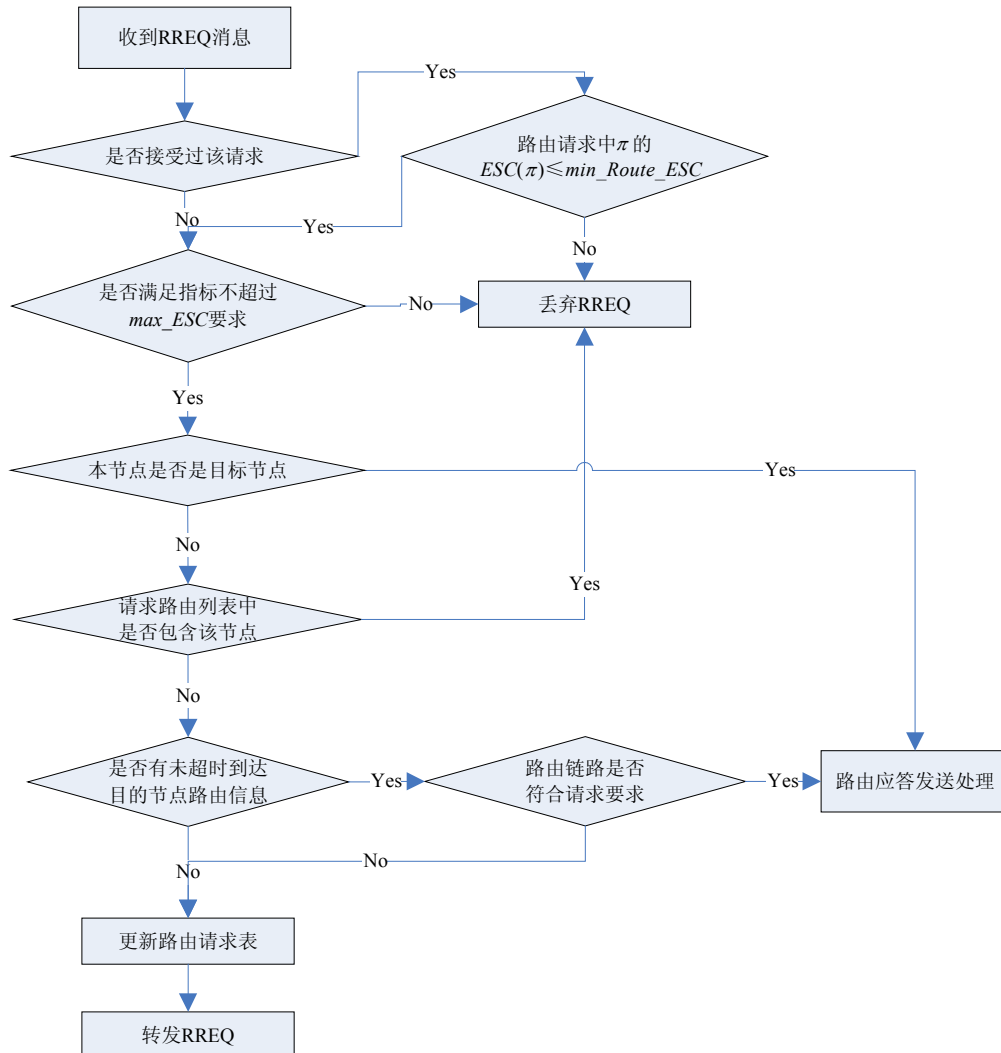


Fig.4 Process flow chart of RREQ packet

图 4 路由请求发送处理流程

### 3.3 路由应答发送与转发

当路由请求分组到达目的节点时,为了方便源节点获得多条路由以便选择最可靠的路由,目的节点将不做筛选完全响应路由请求.与 DSR 路由应答不同的是,目的节点不仅会将本节点的地址添加到路径中,而且会将上一跳到目的节点之间链路的 ESC 指标值以及置信度加入路径信息.在构建应答报文时,除了包括此路径上的所有节点以外,还保留从路由请求报文中获得的所有链路的 ESC 指标值与置信度,然后向源节点发送该路由应答分组,同时,将此路径保存于本节点的路由缓存中。

当中间节点收到路由应答消息时,会将其中最新以及路由 ESC 指标值最低的路由信息用于更新其路由缓存中的信息,并转发该路由应答消息,直到源节点.源节点在收到路由应答消息后,会将路由应答中包含的路径信息保存在路由缓存表中,对各条路由 ESC 指标值、置信度以及跳数综合判断.假定集合  $R$  是源节点找到的所有通往目的节点  $d$  的所有路径的集合,  $R = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ . 挑选路由算法基本思想如下:先预设路由 ESC 指标阈值  $\gamma$ , 然后挑选所有路由 ESC 指标小于等于阈值  $\gamma$  的路由生成集合  $R'$ , 如果  $|R'|=0$ , 即没有任何路由 ESC 指标能达到要求, 则将 ESC 指标阈值  $\gamma$  降低一个固定单位  $\zeta$  继续检测, 直到  $|R'|>0$ . 最终, 挑选  $R'$  集合中路由置信度值  $C(\pi)$  最高的路径, 即最可靠的路径形成一条新的路由, 用来发送已经缓存的和其后到达的发往该目的节点的数据分组. 如果多条路径置信度值相同或其间差异小于极小值  $\epsilon$ , 则选择跳数最少的路由. 至此, 完成了一次路由发现操作.

#### 4 性能分析

本节通过在 Visual C++ 中的仿真对 TR-DSR 的性能进行评估. 在仿真中, 50 个节点随机分布在  $1000m \times 1000m$  的方形区域内, 每个节点的传输半径设定为 250m. 网络中, 节点以恒定的速率每秒发送 4 个报文, 报文长度为 512 字节, CBR(constant bit rate)流的条数为 20. 网络中, 节点运动的仿真方式如下: 一个节点先选定某一位置以恒定速率  $v$  移动到该位置, 等待一段暂停时间, 暂停时间为 0s, 然后随机选择一个新位置. 在该实验中, 所有节点保持 5m/s 的匀速运动. 模拟主要验证随着网络中自私节点增大, TR-DSR 和 DSR-EXT, DSR 路由协议的各方面性能. 自私节点比率分别为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%. 自私节点以恒定的转发率  $f=0.2$  转发所接受的报文. 为了有效地评估各路由协议的性能, 主要收集了以下评价指标:

- (1) 平均端到端包延时(average end-to-end delay): 平均数据包发送时间与数据包接收时间的间隔.
- (2) 报文投递率(packet delivery ratio): 收到数据包与发送数据包的比例.
- (3) 控制开销(control overhead): 全网发送的控制比特与数据比特的比例.
- (4) 重路由由时间间隔(average rerouting interval): 平均两次路由发现的时间间隔.
- (5) 端到端吞吐量(end-to-end throughput): 目的节点在单位时间内接收到数据量.

图 5 中显示, 随着自私节点的增加, 在 DSR-EXT, DSR 路由协议中, 平均端到端的延迟急剧增大. 这是因为随着自私节点的增多, 自私节点丢弃报文的行为造成网络传输的中断, 影响了网络的端到端延迟性能. 而 TR-DSR 路由协议中采用本地信任系统对邻居的转发行为进行评价, 选择路由时避免选择经过自私节点的路由, 所选路由的链路稳定性和转发报文的可靠性高, 减少了数据包重传次数, 因此, 端到端的延迟并未受到严重的影响.

图 6 中显示, 在 DSR-EXT, DSR 路由协议中, 由于这两种协议无法避免选择经过自私节点的路由, 因此随着自私节点的增加, 其平均报文投递率急剧下降. 而 TR-DSR 路由协议能够避免选择经过自私节点的路由, 减少转发过程中丢包的可能性, 提高了报文的投递率, 因此, 平均报文投递率维持在一个较高水平.

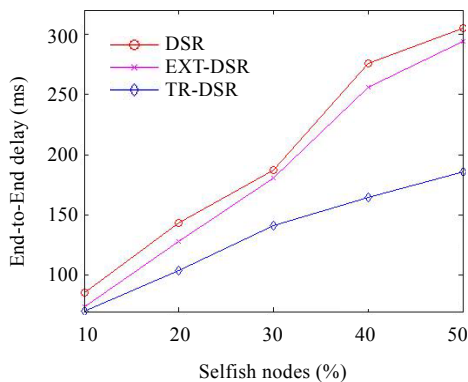


Fig.5 End-to-End delay vs. selfish nodes ratio  
图 5 端到端延时 vs. 自私节点比率

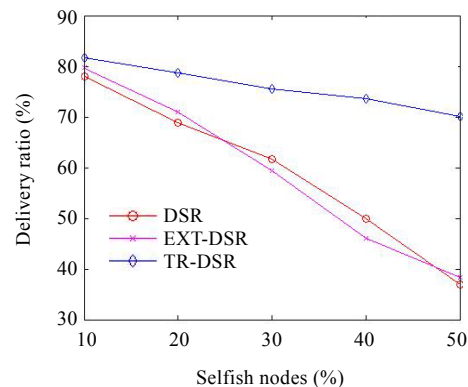


Fig.6 Delivery ratio vs. selfish nodes ratio  
图 6 报文投递率 vs. 自私节点比率

由图 7 可以看出,自私节点的丢包行为导致网络传输的中断,DSR-EXT,DSR 路由协议中不得不通过频繁路由来解决传输中断的问题,增加了网络中的控制开销.由于 DSR-EXT 在建立路由的过程中需要传递 EXT 信息,因此,DSR-EXT 协议的控制开销比 DSR 协议要大.虽然 TR-DSR 协议寻找路由以及间接信任信息处理的控制开销要大于 DSR-EXT,DSR 协议,但是通过本地信任系统建立周围的链路质量和邻居节点转发行为的信任度评价,并且在建立路由的过程中参考该评价信息,增加了路由的可靠性.另外,采用路由缓存技术减少了重路由的次数,从而降低了平均的控制开销比率.

由图 8 可以看出,随着自私节点的增加,在 DSR-EXT,DSR 协议中,自私节点导致传输中断.这两种协议没有任何机制来抵御该问题,只能频繁更换路由,试图将报文传到对端,因此,DSR-EXT,DSR 协议重路由的时间间隔越来越短.而由于 TR-DSR 协议采用信任机制,提高了所选路由的可靠性.同时,源端的路由缓存技术也降低了重路由次数,因此,即使自私节点增加重路由,时间间隔依然能够保持较长的水平.

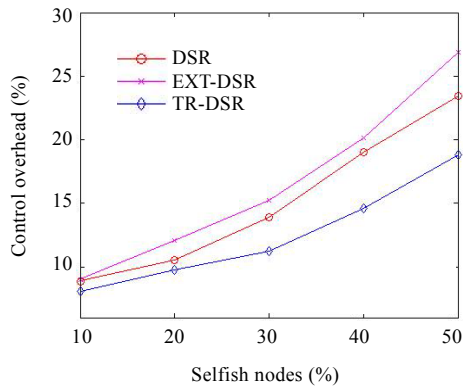


Fig.7 Control overhead vs. selfish nodes ratio

图 7 控制开销 vs. 自私节点比率

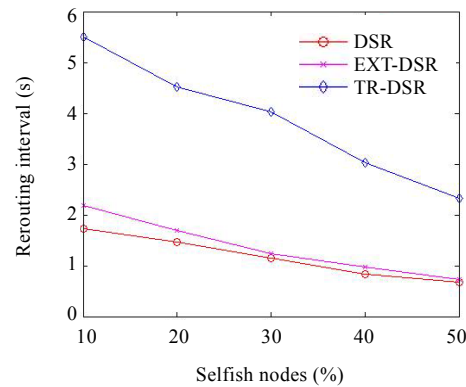


Fig.8 Rerouting interval vs. selfish nodes ratio

图 8 重路由时间间隔 vs. 自私节点比率

由图 9 可以看出,由于没有抵御自私节点的机制,DSR-EXT,DSR 协议的端到端吞吐量会随着自私节点的增加而急剧下降.TR-DSR 协议由于采用信任机制,所选路由能够避开自私节点,提高了所选路由的可靠性;但随着自私节点的增加,所选路由会集中路过某些节点,因此,端到端的吞吐量也会受到一些影响.

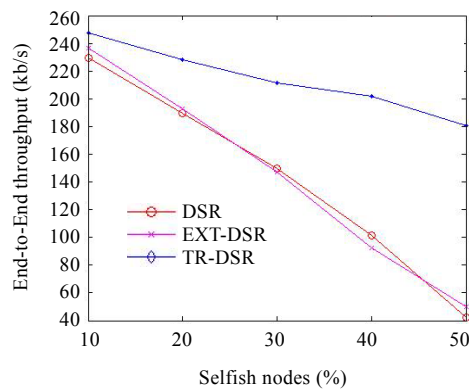


Fig.9 End-to-End throughput vs. selfish nodes ratio

图 9 端到端吞吐量 vs. 自私节点比率

## 5 结束语

本文提出了基于本地信任系统的可靠路由协议 TR-DSR.该协议区分报文未被转发的主观与客观原因,使

用本地信任系统,综合链路质量的稳定性和邻居节点报文转发可靠性两个因素来评价链路的稳定性.本地信任系统仅在缺乏链路质量和报文转发行为认知时才发起具有激励机制间接推荐请求,大幅度降低了信任系统的网络开销.该协议解决了现有可靠路由协议针对某些客观问题修缮的局限性以及链路质量获取的低效性. TR-DSR 协议选择路由时,综合考虑路由上各节点报文转发的可靠性和各链路质量的稳定性,并在路由建立过程中利用这些信息,在确保找到可靠路由的基础上降低寻路开销.实验结果表明,该方法在提升所寻路由可靠性的同时,也缓解了节点私自行为对路由稳定性的影响.该协议在获取信任信息后如何主动实施合理惩罚措施,将成为后续研究的重点.

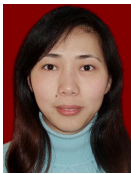
#### References:

- [1] Goldsmith AJ, Wicker SB. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002,9(4):8–27. [doi: 10.1109/MWC.2002.1028874]
- [2] Dube R, Rais CD, Wang K, Tripathi SK. Signal stability based adaptive routing (SSA) for ad-hoc mobile networks. *IEEE Personal Communications*, 1997,4(1):36–45. [doi: 10.1109/98.575990]
- [3] Paul K, Bandyopadhyay S, Mukherjee A, Saha D. Communication-Aware mobile hosts in ad-hoc wireless network. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Personal Wireless Communication*. Washington: IEEE, 1999. 83–87. [doi: 10.1109/ICPWC.1999.759590]
- [4] McDonald AB, Znati T. A path availability model for wireless ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE WCNC*. Washington: IEEE, 1999. 35–40. [doi: 10.1109/WCNC.1999.797781]
- [5] Zhao CX, Wang GX. Fuzzy-Control-Based clustering strategy in MANET. In: *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Washington: IEEE, 2004. 1456–1460. [doi: 10.1109/WCICA.2004.1340883]
- [6] Yan Y, Li D, Xue D. Slot assignment of spatial TDMA in ad hoc radio networks using fuzzy set theory. In: *Proc. of the IEEE 6th Circuits and Systems Symp. on Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication*. Washington: IEEE, 2004. 497–500. [doi: 10.1109/CASSET.2004.1321934]
- [7] Gao XM, Zhang XM, Shi D, Zou FF. Fuzzy logic mobility prediction routing algorithm for mobile ad hoc networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2009,20(12):3205–3212 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3411.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03411]
- [8] Rochi MHB, Dana A, Ziyadee M. A new source routing mechanism in mobile ad-hoc network. In: *Proc. of the IEEE 13th Int'l Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT)*. Washington: IEEE, 2011. 948–952.
- [9] Su W, Lee S, Gerla M. Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks. *Int'l Journal of Network Management*, 2001, 11(1):3–30. [doi: 10.1002/nem.386]
- [10] Bitra S, Shahram J, Hamed A. A high performance scalable QoS routing protocol for mobile ad hoc networks. *Int'l Journal of Computer Technology and Applications*, 2011,2(2):332–339.
- [11] Meghanathan N. Comparison of stable path selection strategies for mobile ad hoc network. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Networking, Int'l Conf. on Systems and Int'l Conf. on Mobile Communications and Learning Technologies (ICNICONSMCL 2006)*. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 67–72. [doi: 10.1109/ICNICONSMCL.2006.65]
- [12] Fatemeh R, Hassan T. Enhanced reliable on-demand routing protocol. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computer Science and Information Technology*. Washington: IEEE, 2010. 342–346. [doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5564517]
- [13] Yu X, Guo HQ, Wong WC. A reliable routing protocol for VANET communications. In: *Proc. of the 7th Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conf. (IWCMC)*. Washington: IEEE, 2011. 1748–1753. [doi: 10.1109/IWCMC.2011.5982800]
- [14] De Couto DSJ, Aguayo D, Bicket J, Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In: *Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003)*. New York: ACM, 2003. 134–146. [doi: 10.1145/938985.939000]
- [15] Bicket J, Aguayo D, Biswas S, Morris R. Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network. In: *Proc. of the 11th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*. New York: ACM, 2005. 31–42. [doi: 10.1145/1080829.1080833]

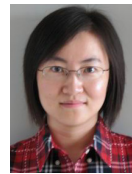
- [16] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In: Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2004). New York: ACM, 2004. 114–128. [doi: 10.1145/1023720.1023732]
- [17] Hong L, Wu C, Zhang GQ. Link reliability assessment based on grey relational analysis for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 29th Chinese Control Conf. Washington: IEEE, 2010. 4236–4240.
- [18] Abhijeet AB, Mohammad N, Tara J, Bhaskar DR. Adaptive opportunistic routing for wireless ad hoc network. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2012,20(1):243–256. [doi: 10.1109/TNET.2011.2159844]
- [19] Chin K, Judge J, Williams A, Kermode R. Implementation experience with MANET routing protocols. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002,32(5):49–59. [doi: 10.1145/774749.774758]
- [20] Keshavarzian A, Uysal-Biyikoglu E, Herrmann F, Manjeshwar A. Energy efficient link assessment in wireless sensor networks. In: Proc. of the 23rd Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington: IEEE, 2004. 1751–1761. [doi: 10.1109/INFCOM.2004.1354586]
- [21] Gourav K, Puja R. Reliable-AODV. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computer and Communication Technology (ICCCCT). Washington: IEEE, 2011. 568–573.
- [22] Dana A, Babaei MH. A fuzzy based stable routing algorithm for MANET. Int'l Journal of Computer Science Issues, 2011,8(1): 1694–1814.
- [23] Li R, Li J, Liu P, Chen HH. An objective trust management framework for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 65th Vehicular Technology Conf. (VTC 2007). Washington: IEEE, 2007. 56–60. [doi: 10.1109/VETECS.2007.24]
- [24] Sun YX, Zhao YF, Li Y, Xie L. On incentive strategies for trust recommendations in wireless ad hoc networks with probability game. Computer Science, 2011,38(4):65–71 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [7] 高雪梅,张信明,史栋,邹丰富. 移动 Ad Hoc 网络模糊逻辑移动预测路由算法. 软件学报, 2009,20(12):3205–3212. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3411.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03411]
- [24] 孙玉星,赵燕飞,李娅,谢立. 基于概率博弈的无线自组网信任推荐激励策略的研究. 计算机科学, 2011,38(4):65–71.



孙玉星(1977—),女,江苏南京人,博士,副教授,主要研究领域为网络安全,信任信誉系统.  
E-mail: scholar\_syx@yahoo.com.cn



陈一飞(1977—),女,博士,主要研究领域为机器学习,数据挖掘.  
E-mail: yifeichen91@nau.edu.cn



谢立(1942—),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为信息安全,并行分布式计算.  
E-mail: xieli@nju.edu.cn