

一种适合分级 Ad hoc 网络的动态信誉评估模型

于尧 李喆 刘军 刘翠香 郭磊

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘要: 该文针对分级结构 Ad hoc 网络的特点和安全需求, 提出一种动态信誉评估模型。该模型根据节点的角色和功能划分信誉关系, 结合节点之间的关联性建立信誉评价机制, 利用相关节点的信誉信息更新各角色节点的信誉。该模型由簇首节点监管全簇信誉, 缓解信誉计算收敛慢的问题。仿真结果表明, 与传统的信誉评估模相比, 该文提出的信誉评估模型能更实时地、准确地反映出分级 Ad hoc 网络节点的安全状况。

关键词: 分级 Ad hoc 网络; 动态信誉评估; 节点角色; 关联性

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1469-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00720

A Feasible Dynamic Reputation Evaluation Model in Hierarchical Ad hoc Networks

Yu Yao Li Zhe Liu Jun Liu Cui-xiang Guo Lei

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In this paper, a dynamic reputation evaluation model is proposed to meet the characteristic and security requirement in hierarchical Ad hoc networks. In this model, the reputation relationship is defined with the consideration of related nodes' roles and function, and the reputation evaluation mechanism is built based on the correlation among nodes to evaluate and update reputation information of nodes with different roles. The cluster reputation is monitored by the cluster head in this model to solve the slow convergence speed issue in traditional reputation calculation. Simulation results show that, compared to traditional reputation evaluation models, the model proposed in this paper can more real-time and accurately reflect the security status in hierarchical Ad hoc networks.

Key words: Hierarchical Ad hoc networks; Dynamic reputation evaluation; Node roles; Correlation

1 引言

移动自组网作为一种无中心、自构建、自组织和自管理的新型网络, 具有组网灵活、展开迅速、分布控制等诸多优点^[1]。但是, 新的网络特性使其安全形势严峻, 安全问题成为制约其发展的一大障碍^[2]。

在 Ad hoc 网络日益呈现复杂化、网络攻击形式也日益多样化和难以预测的情况下, 动态信誉模型较加密、认证等静态信任机制能更好地适应这种安全需求。信誉机制主要利用节点的行为评估其安全状况。目前对信誉研究的核心问题是如何在系统中建立准确的信誉评估机制^[3], 主要从 3 个方面展开: 一是对信誉量化方法的研究, 早期的信誉系统采用累加平均的方法^[4], 但这种方法存在很多缺陷,

当前信誉分布主要采用指数分布、二项分布和 β 分布等概率算法^[5,6]以及迭代计算、遗传算法等^[7]; 二是对信誉计算方式的研究, 常见的方法有集中管理式和分布推荐式, 即需要通过第三方的推荐而建立的信誉关系^[8]; 另外, 还有针对信誉某方面特性的研究, 比如关于抑制节点欺骗行为的信誉度计算^[9]。

随着分布式移动网络应用范围的不断扩大, 规模化是其未来的发展趋势。对大规模网络来讲, 采用分级结构可以获得更好的路由性能。目前 Ad hoc 网络信誉模型大多面向平面网络, 分级结构网络的特点和需求对信誉机制的研究提出了新的挑战^[10]。首先, 相比于平面结构, 分级 Ad hoc 网络中节点间不再是单纯的对等关系, 而是更多地关注以簇为单位的节点表现, 各角色节点间的合作性更强, 因此信誉机制需要体现出节点的关联特性; 其次, 随着系统规模的扩大, 节点移动、规模扩充等问题使得信誉管理变得非常复杂。

针对分级网络的结构特点和安全需求, 本文提出了一种基于节点角色的动态信誉评估模型 (Dynamic Reputation Evaluation Model based on

2009-05-12 收到, 2009-09-28 改回

国家自然科学基金(60802023, 60673159, 70671020), 国家 863 计划项目(2007AA041201), 教育部科学技术研究重点项目(108040), 教育部博士点基金(20070145096, 20070145017, 20060145012)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0095)资助课题

通信作者: 于尧 yuyaosy@163.com; yuyaosy@hotmail.com

node Roles, DREMR)。该模型按照节点角色及其功能划分信誉关系，并根据节点的行为评估节点的可信性，同时充分考虑各角色节点之间的协作关系，借助节点之间的合作提高节点的生存能力和获利能力，并作为动态判定节点可信程度的依据。DREMR 采用簇首管理的方式，缓解了信誉收敛慢的问题。与传统的信誉评估模相比，本文提出的信誉评估模型能更实时地、准确地反映出分级 Ad hoc 网络节点的安全状况。

本文后续部分按如下方式组织：第 2 节描述了 DREMR 的基本思想和构成，第 3 节详细介绍了信誉评估机制，第 4 节仿真分析该模型，最后一节对本文进行了总结。

2 信誉评估模型描述

在分级 Ad hoc 网络中，节点按工作职责被划分为簇首(Cluster Head, CH)、网关(GateWay, GW)和簇成员(Cluster Member, CM)。Ad hoc 网络具有节点合作的本质，相比于节点地位平等的平面网络，分级结构网络相对复杂的组织结构使其内部节点在路由过程中的合作性更强。按照节点的工作范围，将路由划分为簇间通信和簇内通信。在这两种通信形式上，簇结构中各角色节点之间存在着分工与协作的关系。

节点安全顺利地按其角色履行路由过程中的职责，需要相关节点的密切配合，任何关系的破裂都可能带来路由不稳定因素，甚至对全网的性能产生负面影响。因此，从加强节点合作性的角度出发，通过分析节点路由过程中存在的协作关系，本文建立了一种动态信誉评估模型 DREMR，以适应分级 Ad hoc 网络的安全需求。在该模型中，信誉是指通过节点的行为以及与不同节点之间的合作质量评估的可信程度，并作为衡量该节点安全与否的重要指标。通过信誉值度量信誉的大小，节点的信誉值越高，其安全程度越高，对相关节点的影响也越可靠。由于不同角色节点在分级结构网络中的功能和职责不同，按节点身份将信誉划分为簇首信誉、网关信誉和簇成员信誉，其关系如图 1 所示。行为序列更新后，各角色节点根据路由性质(簇内或簇间)以及其转发的质量来计算行为信誉。簇成员因对簇首的路由行为具有协作关系，簇首行为的变化势必会带来成员信誉的更新，簇成员对簇首的影响作用会随着簇成员信誉的更新而改变，进而影响簇首信誉的变化。簇首信誉的更新使得其与邻居簇首的信誉差距发生变化，从而对网关信誉的更新产生影响。

3 信誉评估机制

3.1 重要符号定义

定义 1 设 $C_i = \{CH_i \mid \forall i, 1 \leq i \leq d_{ch}\} \cup \{CM_j \mid$

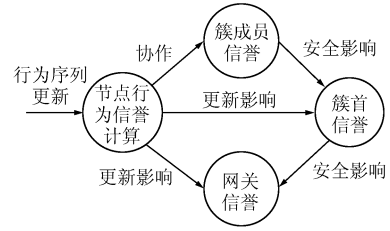


图 1 各角色节点的信誉关系

$\forall j, 1 \leq j \leq d_{cm}\} \cup \{GW_k \mid \forall k, 1 \leq k \leq d_{gw}\}$ 为第 i 个簇的节点集合。其中， d_{ch} ， d_{cm} 和 d_{gw} 分别代表网络中簇首、簇成员和网关的个数。一个簇结构包括一个簇首、一个或多个网关以及若干个簇成员。

定义 2 节点行为信誉是指簇首根据节点自身行为评价的节点信誉集合， C_i 中的节点行为信誉可定义为 $R_{node_i} = \{ \langle N_q, r_{node_iq} \rangle \mid \forall N_q \in C_i, 1 \leq q \leq d_{ch} + d_{cm} + d_{gw} \}$ 。其中， r_{node_iq} 为 CH_i 对 N_q 的节点信誉值， q 的身份可以是簇首、簇成员或者网关。簇首的节点信誉值表示为 r_{node_i} 。

定义 3 成员影响信誉是指从簇成员到簇首的有向信任关系，它反映了簇首在对簇成员进行观察后对成员节点可靠性做出的客观评价。设 R_{imcm_i} 表示第 i 个簇的簇首与该簇中成员的信任关系集合，具体定义为 $R_{imcm_i} = \{ \langle CH_i, CM_j, r_{imcm_ij} \rangle \}$ 。其中， r_{imcm_ij} 为 CM_j 对 CH_i 的影响信誉值，用于评价相邻节点的安全状况对该节点路由行为的影响程度。

定义 4 簇成员信誉是指从成员到簇首的有向信任关系，定义为 $R_{cm_j} = \{ \langle r_{node_i}, r_{node_ij}, r_{cm_ij} \rangle \}$ 。其中， r_{cm_ij} 为 C_i 中 CM_j 的簇成员信誉值。

定义 5 簇首信誉定义为 $R_{ch_i} = \{ \langle r_{node_i}, r_{imcm_ij}, r_{ch_i} \rangle \}$ 。其中， r_{ch_i} 为 CH_i 的簇首信誉值。

定义 6 簇首影响信誉是指从簇首到网关的有向信任关系，定义为 $R_{imch_k} = \{ \langle GW_k, CH_i, r_{imch_ki} \rangle \}$ 。其中， r_{imch_ki} 为 CH_i 对 GW_k 的影响信誉值。

定义 7 网关信誉是指从网关到簇首的有向信任关系，网关信誉定义为 $R_{gw_k} = \{ \langle r_{node_ik}, r_{imch_ki}, r_{gw_k} \rangle \}$ 。其中 r_{gw_k} 为 GW_k 的网关信誉值。

3.2 节点行为信誉计算

节点行为信誉用于评价节点在路由过程中处理报文的合作能力。Ad hoc 网络路由过程中节点主要处理路由控制和数据两类报文。根据节点对报文的攻击手段，可将攻击行为分为自私攻击和恶意攻击。由于 Ad hoc 网络的自组织特性，其节点依靠自愿的原则参与网络活动。节点为节省自身能量，完全或按比例丢弃数据报文，形成自私攻击，造成数据流

的丢失;节点不正常处理路由控制报文,比如伪造、删除或篡改控制报文信息,形成恶意攻击。这些攻击可导致节点无法建立正常的路由,从而影响数据传输以及增加资源开销。因此将节点行为信誉分为自私自信誉子类和恶意信誉子类,分别代表一个节点的路由行为可被信任的不同方面。

设节点每次协作活动都是随机的,那么簇首 CH_i 对节点 N_q 的行为评价序列集合为 $ES_{iq} = \{es_{iq}^1, es_{iq}^2, \dots, es_{iq}^l \mid \forall es_{iq}^t = a, a \in N = \{0, 1, 2, \dots\}\}$, 其中 es_{iq}^t 为第 $t(1 \leq t \leq l)$ 个评价序列, a 代表对节点行为质量的评价程度。设正面评价集合为 $ES_{iq}^+ = \{es_{iq}^t \mid \forall es_{iq}^t \in ES_{iq}, \text{且} es_{iq}^t = a, a = 0\}$, 负面评价集合为 $ES_{iq}^- = \{es_{iq}^t \mid \forall es_{iq}^t \in ES_{iq}, \text{且} es_{iq}^t = a, a \in Z^+\}$, 则 CH_i 对 N_q 的行为信誉评估值为 $r_{\text{node}_{-iq}} = \frac{S_{iq} + 1}{S_{iq} + F_{iq} + 2}$, 其中, S_{iq} 代表正面评价程度, F_{iq} 代表负面评价程度 (S_{iq} 和 F_{iq} 的取值见如下证明)。

证明 由于节点的每次行为都是随机且相互独立的,因此每次合作行为都是独立同分布的。令 CH_i 对 N_q 评价的正面样本 $X^+ = ES_{iq}^+$, $S_{iq} = |X^+| = |ES_{iq}^+|$ 表示正面样本总个数, 负面样本 $X^- = \{1, 1, \dots, 1, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{es_{iq}^2}, \dots, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{es_{iq}^l} \mid es_{iq}^t = a, a \in Z^+\}$, $F_{ij} = |X^-| = \sum es_{iq}^t (es_{iq}^t \in ES_{iq}^-)$ 表示负面样本总个数, 设总体样本共 l' 个, 则总体样本 $X = \{X^+, X^-\}$ 中每个样本 $x_{t'}(1 \leq t' \leq l')$ 满足 $x_{t'} \sim B(1, p)$, 其中 $B(1, p)$ 为二点分布, 其概率密度为 $h(x_{t'}) = \begin{cases} p, & x_{t'} = 0 \\ 1 - p, & x_{t'} = 1 \end{cases}$,

则 $x_1, x_2, \dots, x_{l'}$ 的分布律为 $p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}}$ 。取 p 的先验概率密度 $h(p)$, 则 p 的后验概率密度为

$$h(p \mid x_1, x_2, \dots, x_{l'}) = \frac{h(p)p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}}}{\int_0^1 h(p)p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}} dp}, \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (1)$$

假设每个节点行为成功率 p 在 $[0, 1]$ 上取值是等可能的, 那么 $h(p)$ 在 $[0, 1]$ 上服从均匀分布。式(1)可以转化为

$$\begin{aligned} h(p \mid x_1, x_2, \dots, x_{l'}) &= \frac{p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}}}{\int_0^1 p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}} dp} \\ &= \frac{(S_{iq} + F_{iq} + 1)!}{S_{iq}! F_{iq}!} p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}} \\ &= \frac{\Gamma(S_{iq} + F_{iq} + 2)}{\Gamma(S_{iq} + 1)\Gamma(F_{iq} + 1)} p^{S_{iq}}(1-p)^{F_{iq}} \end{aligned} \quad (2)$$

Beta 分布的函数表达式为 $\text{Beta}(S + 1, F + 1) = \frac{\Gamma(S + F + 2)}{\Gamma(S + 1)\Gamma(F + 1)}$, 则成功转发概率 p 的后验概率服

从参数为 $(S_{iq} + 1, F_{iq} + 1)$ 的 Beta 分布, 取后验分布的期望值, 即 p 对 $x_1, x_2, \dots, x_{l'}$ 的条件期望 $E(p \mid x_1, x_2, \dots, x_{l'})$ 作为 p 的估计量亦信誉度, 可得

$$\begin{aligned} r_{\text{node}_{-iq}} &= \int_0^1 p \times h(p \mid x_1, x_2, \dots, x_{l'}) dp \\ &= \frac{S_{iq} + 1}{S_{iq} + F_{iq} + 2} \end{aligned} \quad (3)$$

证毕

自私攻击表现为按比例丢包, 通过丢包量的累加体现出攻击的强度; 相反, 恶意攻击是一种突发式的攻击, 当满足该种攻击所需要的条件时, 就会在网络中形成一定规模的攻击。所以在 a 的取值上, 两种信誉子类采取不同的设置方式: 在自私自信誉子类中, 始终设 $a=1$; 在恶意信誉中, a 随攻击的程度变化, 攻击强度越大, a 取值越大。此外, 节点的身份也会对行为信誉的取值产生影响。

3.3 信誉的更新

节点的行为序列更新, 会带来其行为信誉的更新。由于分级结构网络中节点的关联特性, 各角色节点之间存在着分工与协作的关系, 任何角色节点的行为信誉更新都会带来其相关信誉关系的取值变化。

虽然簇成员不参与簇间路由通信过程, 但是它们可以通过攻击簇首等方式影响簇间通信。因此, 簇成员对簇首的路由行为具有协作的关系。簇首行为信誉的更新应带动簇成员信誉的更新, 以鼓励节点间的合作行为。 CM_j 的簇成员信誉计算公式为

$$r_{\text{cm}_{-ij}} = \begin{cases} r_{\text{node}_{-ij}} + 0.6 \times \varepsilon_i \times r_{\text{node}_{-ij}}, & 1 \geq \varepsilon_i \geq 0 \\ r_{\text{node}_{-ij}} + 0.3 \times \varepsilon_i \times r_{\text{node}_{-ij}}, & -1 \leq \varepsilon_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 ε_i 表示簇首 CH_i 的节点行为信誉更新量。簇成员信誉随簇首行为质量的优劣取值不同, 这主要是基于两点考虑: 一是簇首作为簇的领导核心, 需要对簇结构安全负有更加重要的责任; 二是为了缩小簇结构中节点间的信誉差量, 增强节点间的竞争力, 提高节点的合作质量。

簇成员对簇首的协作性还表现在簇成员对簇首信誉的影响作用上, 该作用利用成员影响信誉来表达。设簇 C_i 中共有 d_{cm} 个簇成员, 则 CM_j 的成员影响信誉值计算公式为

$$r_{\text{in cm}_{-ij}} = \frac{u_{\text{cm}_{-ij}} r_{\text{cm}_{-ij}}}{\sum_{j=1}^{d_{\text{cm}}} u_{\text{cm}_{-ij}}} \quad (5)$$

其中 $u_{\text{cm}_{-ij}}$ 代表 CM_j 对 CH_i 的安全影响因子, 它反

映了节点面临的隐形安全威胁的概率, $u_{\text{cm}_{-ij}}$ 越大, 说明该簇成员的安全威胁越大, 越容易破坏簇首的安全。 $u_{\text{cm}_{-ij}}$ 的评估过程如下:

从节点转发行为和自然状况两方面考虑, 选择节点信誉、参与转发次数、恶意转发次数、信誉波动量、节点剩余能量和移动性 6 个参量构成评价因素集, 用来衡量对节点的安全威胁程度。并根据其对信誉的影响, 分为逆向因素和正向因素。逆向因素是指因素越大对信誉影响越小, 正向因素与其相反。比如节点信誉越大, 对簇信誉的安全威胁越小, 所以影响也越小。设有 d_{cm} 个评价对象, 影响因素有 M_{fa} 个。用 x_{mj} 表示评价对象 j 的第 m 个评价因素, 则 d_{cm} 个对象的 M_{fa} 个评价因素组成了矩阵 $(x_{mj})_{M_{\text{fa}} \times d_{\text{cm}}}$ 。为增加因素的可比性及消除不同因素之间的量纲影响, 以“最大最优或最小最优”的原则对 x_{mj} 进行无量纲化处理。正向因素无量纲化的标准函数为 $\gamma_{mj} = \frac{x_{mj}}{\bigvee_j x_{mj} + \bigwedge_j x_{mj}}$, 逆向因素无量纲化的

标准函数为 $\gamma'_{mj} = 1 - \frac{x_{mj}}{\bigvee_j x_{mj} + \bigwedge_j x_{mj}}$ 。 d_{cm} 个对象无量

纲处理后的矩阵为 $\mathbf{R} = (\gamma_{mj})_{M_{\text{fa}} \times d_{\text{cm}}}$ 。

设 M_{fa} 个指标的权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_{M_{\text{fa}}})$, 最优对象 $G = (1, 1, \dots, 1)$, 最劣对象 $B = (0, 0, \dots, 0)$ 。以与最优、最劣对象的距离之和达到最小为目标函数, 进行最优化处理来确定评价对象 j 的相对隶属度 u_j 。评价对象 j 与“优、劣”的广义权距离 d_{jg} , d_{jb} 分别为

$$d_{jg} = \left\{ \sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} [w_m (1 - r_{mj})]^\tau \right\}^{1/\tau} \quad (6)$$

$$d_{jb} = \left\{ \sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} [w_m (r_{mj} - 0)]^\tau \right\}^{1/\tau} \quad (7)$$

式中 τ 为距离系数, $\tau=1$ 为海明距离, $\tau=2$ 为欧氏距离。通常 τ 取 1 或 2 不影响结果。

根据相对隶属度理论, 评价对象 j 对 d_{jg} 越小或对 d_{jb} 越大, 则其越优, 即该对象的影响越大。将广义距离归一化, 构造评价对象 j 对“优”的相对隶属度 u_j , 即为其安全影响因子 $u_{\text{cm}_{-ij}}$, 具体表达式为

$$u_{\text{cm}_{-ij}} = \frac{\left\{ \sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} [w_m r_{mj}]^\tau \right\}^{1/\tau}}{\left\{ \sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} [w_m (1 - r_{mj})]^\tau \right\}^{1/\tau} + \left\{ \sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} [w_m r_{mj}]^\tau \right\}^{1/\tau}} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} (w_m (1 - r_{mj}))^\tau}{\sum_{m=1}^{M_{\text{fa}}} (w_m \times r_{mj})^\tau} \right]^{1/\tau}} \quad (8)$$

簇首行为的更新, 以及簇成员对簇首的影响作用, 使得簇首信誉发生变化。簇首 CH_i 的信誉表达式为 $r_{\text{ch}_{-i}} = r_{\text{node}_{-i}} \oplus r_{\text{imcm}_{-ij}}$ 。

网关是簇间通信的桥梁, 也是路由过程的主要参与者, 簇首和网关作为簇间通信的中继节点具有合作关系, 借助网关的信誉可以传达其所在簇的安全状况, 有利于寻路过程的安全和可靠。网关 GW_k 的信誉表达式为 $r_{\text{gw}_{-k}} = r_{\text{node}_{-ik}} \oplus r_{\text{imch}_{-ki}}$, 其中 $r_{\text{imch}_{-ki}}$ 的计算方法与 $r_{\text{imcm}_{-ij}}$ 相似。

3.4 信誉评估的管理

由于该信誉评估模型中信誉关系比较复杂, 如果按照以往对 Ad hoc 网络完全分布式的评估管理模式, 势必会带来信誉更新收敛慢等一系列问题。考虑到簇首能够监测到簇中各节点的行为更新, 因此本信誉评估模型由簇首集中管理和存储其所在簇的相关信誉信息。

簇首作为簇结构的领导者和组织者, 参与到网络活动中的几率最大。因此, 以簇首行为序列全部更新作为触发信誉更新的条件。当节点加入新簇时, 其节点信誉将传递给新簇首, 以保证节点的历史行为对其信誉始终有影响, 防止恶意节点漫游的问题。当簇首身份发生变更时, 原簇首需将其保存的信誉信息发送给新当选的簇首, 且在新簇结构中, 原簇首的节点行为信誉即为其在新簇中的成员信誉。

4 仿真分析

使用 NS-2 网络模拟软件对动态信誉评估模型进行测试。在仿真场景为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的区域中随机部署 50 个节点, 节点随机移动, 最大移动速度为 3 m/s 。在仿真实验中, 假定初始时各节点信誉均为 0.5, 且已生成相应的簇结构。本文设计了一系列仿真场景, 对信誉评估模型的性能进行测试。

(1) DREMR 能更准确地评估节点的安全程度以资源消耗攻击为例, 图 2 描述了不同的信誉评估模式对信誉准确性的影响。在已成簇的网络结构中, 恶意簇成员节点滥发 RREQ 报文, 使其相邻节点忙于处理转发该类报文, 形成资源消耗攻击, 影响网络的正常通信, 使簇首节点由于拥塞造成丢弃报文的可能性明显增大。文献[11]提出的 Reputation based Framework for Sensor Networks (RFSN) 信誉机制采用面向节点行为的信誉评估机制, 这是一种传统的评估方式。从图 2 中可以看到, 采用 RFSN 的簇首由于其自身的丢包行为直接导致其信誉的降低。而本文提出的 DREMR 能够根据节点的实际工作性质对其信誉进行评价, 在该仿真场景中簇首节点的丢包行为是由于恶意节点滥发控制报文所致,

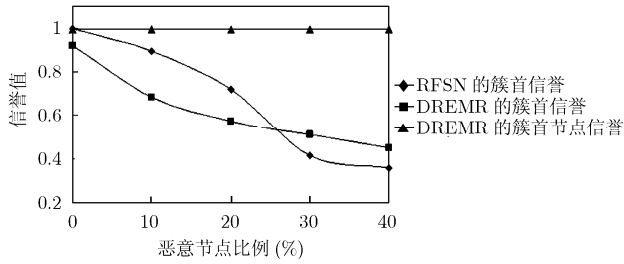


图2 信誉随恶意节点比例变化

所以恶意簇成员的信誉会随着簇首的丢包量增加而降低，簇首的节点信誉保持不变。由于簇首信誉综合考虑了簇结构中各节点的行为，因此簇首信誉会随着恶意簇成员信誉下降而成下降趋势。可见，与传统的评估方式相比，本文提出的信誉模型能够更准确地反映节点当前的安全状况。

(2)DREMR 能更快速地反映信誉变化 以簇首信誉呈增长趋势为例，图3反映了节点关联性对信誉的影响。结合不考虑节点关联性的信誉评估思想^[6,11]，建立未考虑节点关联性的动态信誉评估模型(Dynamic Reputation Evaluation Model without node correlation, DREMWC)，与DREMR进行比较。由于在仿真中针对节点的行为采用相同的信誉评估机制，因此这两种情况下的信誉值评估标准是一致的。在成员节点的协作性能良好时，如图3所示，采用DREMR机制时，簇首连续合作使其信誉变化趋势明显加快，比如，簇首信誉只需经过3个时段就可到达0.9，8个时段即可到达0.95；而在DREMWC中，簇首信誉分别需要8个和20个时段才能到达0.9和0.95。可见，节点之间的关联性对簇首具有协作影响，考虑了分级Ad hoc节点合作本质的动态信誉模型能够保证信誉更新更迅速。

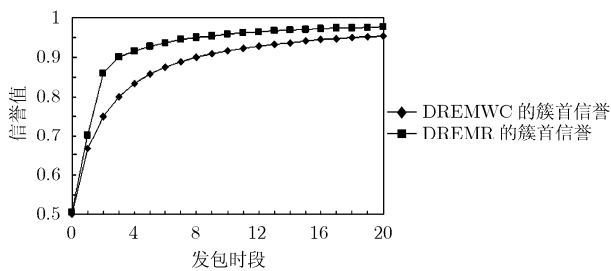


图3 簇首信誉随发包时段变化

(3)动态信誉模型更适合分级网络群组特性的需求 图4反映了簇成员信誉随簇首信誉的变化情况。从图中可见，当簇首信誉增加时，簇成员信誉随之增加，且增幅略小于簇首信誉的增幅，这是对簇成员在簇首良好行为时协作性的鼓励。当簇首信

誉下降时，簇成员信誉随之降低，但是降幅明显小于簇首信誉的降幅，这是因为评估模型认为簇首是簇结构的绝对领导核心，对簇结构的安全问题负有主要责任，当未能确定簇首发生不良行为的根源所在时，簇首信誉的降幅较大，簇成员身在该簇中负有次要责任，因此其信誉也会有小幅波动。另外，对簇首和簇成员信誉降幅的考虑，也有助于缩小两者的差距，提升簇成员参与簇重构中选举簇首的竞争力。

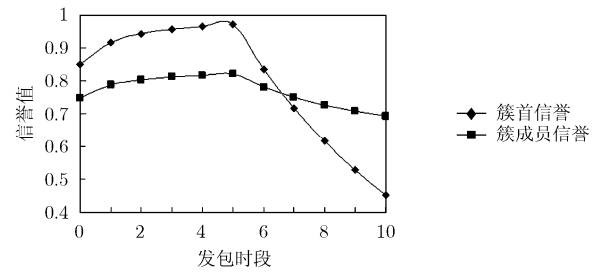


图4 簇成员信誉随簇首信誉的变化

5 结束语

考虑到分级结构网络节点关系不对等、信誉计算收敛慢等问题，本文提出了一种基于节点角色的动态信誉评估模型。该模型的主要贡献在于：通过节点行为以及路由过程中节点合作关系，建立信誉关系网络，使得安全性评估更加准确和合理；奖励簇成员对簇首良好的协作行为，增强簇成员参与网络活动的几率，适应分级结构Ad hoc网络中节点关联性的要求；采用簇首管理机制，缓解复杂计算带来的信誉收敛慢的问题，适合网络扩展需求。仿真结果表明，与传统的信誉评估模相比，该信誉模型能够更加实时地、准确地反映节点当前的安全状态，更适合分级结构Ad hoc网络。

参考文献

- [1] Sung Sul-yun, Seo Yuh-wa, and Shin Yong-tae. Hierarchical clustering algorithm based on mobility in mobile Ad hoc networks [C]. 2006 International Conference on Computational Science and its Applications (ICCSA'2006), Scotland, UK, 2006: 954-963.
- [2] Elhdhili M E, Azzouz L B, and Kamoun F. CASAN: Clustering algorithm for security in Ad hoc networks [J]. *Computer Communication*, 2008, 31(13): 2972-2980.
- [3] 胡华平, 胡光明, 董攀, 等. 大规模移动自组网络安全技术综述[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(4): 545-552.

Hu Hua-ping, Hu Guang-ming, and Dong Pan, et al. Survey of security technology for large scale MANET[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2007, 44(4): 545-552.

- [4] 李小勇, 桂小林. 大规模分布式环境下动态信任模型研究[J]. 软件学报, 2007, 16(6): 1510-1521.
Li Xiao-yong and Gui Xiao-lin. Research on dynamic trust model for large scale distributed environment[J]. *Journal of Software*, 2007, 16(6): 1510-1521.
- [5] Mundinger J and Boudec J L. Analysis of a reputation system for mobile Ad-hoc networks with liars[J]. *Performance Evaluation*, 2008, 65(3/4): 212-226.
- [6] 肖德琴, 冯健昭, 周权, 等. 基于高斯分布的传感器网络信誉模型[J]. 通信学报, 2008, 29(3): 47-53.
Xiao De-qin, Feng Jian-zhao, and Zhou Quan, *et al.* Gauss reputation framework for sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(3): 47-53.
- [7] Otrók H, Mohammed N, and Wang Ling-yu, *et al.* A game-theoretic intrusion detection model for mobile Ad hoc networks [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(4): 708-721.
- [8] 钱海, 马建辉, 王旭法. 一种新的免疫协同多 Agent 模型及其仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3436-3439.
Qian Hai, Ma Jian-hui, and Wang Xu-fa. Novel immune cooperative multi-agent model and its simulation analyses[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(13): 3436-3439.
- [9] 鲍宇, 曾国荪, 曾连荪, 等. P2P 网络中防止欺骗行为的一种信任度计算方法[J]. 通信学报, 2008, 29(10): 215-222.
Bao Yu, Zeng Guo-sun, and Zeng Lian-sun, *et al.* Reputation based on new metric in P2P network[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(10): 215-222.
- [10] Yu Yao, Guo Lei, and Wang Xing-wei, *et al.* A new node role-based reputation model in hierarchical Ad hoc networks[C]. International Joint Conference on INC, IMS and IDC, Seoul, Korea, 2009: 457-461.
- [11] Ganeriwala S and Srivastava M B. Reputation-based framework for high integrity sensor networks [C]. Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Security of Ad hoc and Sensor Networks, Washington, DC, USA, 2004: 66-77.
- 于尧: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线网络路由安全.
郭磊: 男, 1980年生, 教授, 博士生导师, 从事无线网状网、光通信等研究工作.