

基于概率博弈的无线自组网信任推荐激励策略的研究

孙玉星^{1,2} 赵燕飞¹ 李 娅¹ 谢 立²

(南京审计学院信息科学学院 南京 211815)¹

(南京大学计算机软件与新技术国家重点实验室 南京 210093)²

摘 要 无线自组网中信任推荐依赖于节点间协作,而信任系统自身无法为该行为提供信任评价。为分析节点间信任推荐交互过程建立了重复概率博弈模型,在此基础上分析了 TFT,GTFT,OT,GT 4 种激励策略对提升节点间信任推荐协作的影响以及各激励策略的均衡边界条件成立的差异。仿真表明,在高突发自私行为比率情况下,GTFT 激励策略能保持较高的有效推荐率,提升自私节点的信任推荐协作性,进而帮助信任系统在联合攻击情况下做出及时准确的信任评价。

关键词 概率博弈,无线自组网,信任推荐,联合攻击
中图分类号 TP393 **文献标识码** A

On Incentive Strategies for Trust Recommendations in Wireless Ad Hoc Networks with Probability Game

SUN Yu-xing^{1,2} ZHAO Yan-fei¹ LI Ya¹ XIE Li²

(School of Information Science, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)¹

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)²

Abstract Trust-recommended behaviors rely on the cooperation among nodes in wireless ad hoc network and trust system itself cannot provide trust evaluations for the behaviors. We proposed a repeated probability game to facilitate the study of the interaction process for trust-recommended behaviors between nodes. Based on the model, we analyzed the INFLUENCE of the four types of incentive strategies, namely TFT,GTFT,OT,GT to motivate the trust-recommended behavior between nodes, as well as the DIFFERENCE of the equilibrium boundary conditions of the four incentives strategies. Simulation results show that, in the high rate of sudden selfish behaviors, GTFT strategy keeps Efficient Recommendation Ratio at a higher level, motivates the cooperation of trust-recommended behaviors and then helps the trust system to make timely and accurate trust evaluations in the case of collusion attacks.

Keywords Probability game, Wireless ad hoc network, Trust recommendation, Collusion attack

1 引言

无线自组网是由一组带无线收发装置的移动终端组成的多跳的、临时性的自治网络。由于缺乏安全可信的基础设施确保协作的实施,出于无线自组网安全性的需要,近来大量的研究工作^[1,2,4-9]关注无线自组网的信任系统的建立,该系统用于评价各个节点提供的一些特定的网络服务,如路由、分布式信息存储和处理、分布式认证、入侵检测等的服务质量。

在任何无线网络信任系统中,每个实体获取信任消息的组件是基础组件之一,这些消息将被收集用于判定各个实体的可信程度。在无线自组网中,一个实体获取信息主要有以下 3 种方法:第一手信息^[2],各个节点直接观测其可触及范围内其他节点,根据不同的行为判断其他节点的可信度;单跳二手信息^[2,9];如果客体超出了主体的触及范围,主体可以向其周围一跳范围内的可信节点请求关于客体的信任度的推荐信

息;多跳二手信息^[5-7]:建立信任链,主体可以向信任链上各节点询问客体的信任度,节点可以繁衍这些问题,直到一个、一些甚至所有知道该客体信任度的节点做出响应^[8]。信任系统建立正确信任评价本身就依赖各个节点能主动传递信任推荐信息,而事实上,由于缺乏集中控制机制来确保协作的实施,节点在享受其他节点提供信任推荐的同时,拒绝耗费自身资源为他人提供同类服务。信任推荐是建立无线自组网信任系统的一部分,即无法依赖信任系统自身衡量各节点在传递信任度推荐行为上的协作性^[11]。

本文针对目前无线自组网中信任推荐行为对节点协作的依赖性而信任系统自身无法为该行为提供信任评价的问题,在重复概率博弈模型上,分析了 TFT,GTFT,OT,GT 4 种激励策略激励边界条件,并分析了各参数对激励边界条件成立以及提升信任推荐协作性的影响。仿真表明,GTFT 激励策略能更有效鼓励自私节点的信任推荐协作性,提高有效推荐

到稿日期:2010-05-27 返修日期:2010-09-04 本文受国家自然科学基金(60673154,60573132),江苏省高校自然科学研究(09KJD520005)资助。
孙玉星(1977-),女,博士生,讲师,主要研究方向为无线网络、网络安全,E-mail:scholar_syx@yahoo.com.cn;赵燕飞(1978-),女,博士生,主要研究方向为网络安全、隐私保护;李 娅(1980-),女,讲师,主要研究方向为安全审计;谢 立(1942-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式计算、网络安全。

率,进而帮助信任系统在联合攻击情况下及时做出准确的信任评价。

本文第2节阐述了网络模型以及推荐重复博弈;第3节描述了4种激励策略以及边界条件;第4节分析了参数对激励边界条件以及信任推荐协作性的影响;第5节通过模拟实验分析了4种激励策略对提升有效推荐以及抵御联合攻击的效果。

2 网络模型与信任推荐重复博弈

首先对无线自组网络环境以及各个节点的行为规范做假设。整个无线自组网络 $G(V, E)$ 由 n 个节点构成, G 为任意连通图, V, E 则分别为节点及链路集合。当且仅当节点 u, v 处于彼此传输范围时,其间链路 $(u, v) \in E$, 且 E 中所有链路均是双向的。假定 G 采用 watchdog^[3] 机制,该机制保证任何一个节点 $u \in V$ 发送一个消息(信任推荐请求或者信任推荐转发),该节点的一跳范围内的所有邻居节点 $N^1(u)$ 都可以监听到该消息。整个系统时间由一系列离散的协作时隙 t 构成。假设一个时隙内网络拓扑保持不变,时隙之间拓扑可随机变化。在任一时隙中,每一网络节点均可完成一次完整 n 跳节点信任推荐,包括接受其他节点的信任推荐的请求并响应其他节点信任推荐请求。

2.1 单阶段博弈

首先考虑简单的信任推荐场景,节点 i 请求节点 j 向其转发关于节点 k 的信任度推荐消息,节点 j 可理性参考自身条件,自由决定是否响应推荐请求。假定在系统中有如下奖励机制:如果节点 j 执行了转发关于节点 k 的推荐消息,节点 i 将获得收益 b ,同时节点 j 将消耗它的资源 c 完成响应推荐请求行为。在上述场景下,单阶段博弈等价于囚徒困境,每个节点在参与博弈时都以自己的利益最大化为基准,来决定是否采取合作行为即是否转发推荐消息。在这种典型的单阶段囚徒困境中,参与者的最佳策略是无视推荐请求,只有该策略才能使参与者利益最大化。可以证明相互不响应推荐请求是纳什均衡:每个节点选择不响应,收益函数是单调性增加,并且每个节点的最大最小化收益是 b , 所以不响应是每个节点的支配性策略,即,没有任何节点可以通过响应推荐请求获得更多收益。因此无线自组网中,任何节点都倾向于自私的不响应推荐请求行为,但是这对建立正确信任系统是不利的。博弈收益与策略如表1所列。

表1 博弈收益与策略

| | 响应 | 不响应 |
|-----|------------|---------|
| 响应 | $b-c, b-c$ | $-c, b$ |
| 不响应 | $b, -c$ | $0, 0$ |

2.2 重复博弈

如果节点无法预知博弈何时终止,博弈过程视为无限重复,因为当终点无法预测时,局中人将不得不以无限重复的方式来评估当前策略及其对后继局势的影响。例如:参与者1的可选策略如下:

- 1) 响应参与者2的推荐请求;
- 2) 如果参与者2不响应参与者1的推荐请求,则参与者1一直不响应参与者2的推荐请求。

假设 $\mu_1(\cdot)$ 表示在有序参与者序列中参与者1的收益函数。在上述策略中,为消除节点自自动机,必须保证参与者持

续响应推荐请求时的收益大于不响应推荐请求的收益:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \mu_1(C, C) > \mu_1(D, C) + \sum_{t=1}^{\infty} \delta^t \mu_1(D, D) \quad (1)$$

即:

$$\mu_1(C, C) > (1-\delta)\mu_1(D, C) + \delta\mu_1(D, D) \quad (2)$$

δ 为贴现因子,其取值范围为 $(0, 1)$, 反映未来期望收益对现在收益的影响程度。如果该信任推荐博弈是无法预知终止的,即参与者无法准确判断某次惩罚是否会因网络运行中止而得不到正确实施,从而杜绝了其利用这一知识对作弊策略进行逆向推导的可能。在消除节点自自动机条件满足情况下,所有参与者考虑到未来的收益,(响应,响应)就是一个均衡结果,未来的惩罚导致参与者放弃不响应行为。

3 激励策略及其均衡边界条件

在信任推荐博弈激励策略分析过程中,使用具有普遍意义的重复概率博弈模型,假定一个节点响应推荐请求的概率为 f , $f=0$ 意味着不响应任何推荐请求, $f=1$ 表示响应所有的推荐请求。如果 i 表示某节点,那么 $-i$ 表示其博弈对立面,即该节点 i 的一跳范围内的所有邻居节点。若时隙 t_n 收益函数为:

$$\mu_i^n(f_i^n, f_{-i}^n) = f_i^n b - f_{-i}^n c \quad (3)$$

则重复博弈的总收益为:

$$\mu_i = \sum_{n=0}^{\infty} \delta^n \mu_i^n(f_i^n, f_{-i}^n) \quad (4)$$

当所有节点都一直采取合作行为即响应所有的推荐请求时,由式(4)可得节点 i 重复博弈总收益为:

$$\mu_i(1, 1) = (b-c) * \sum_{n=0}^{\infty} \delta^n \quad (5)$$

本节在信任推荐重复概率博弈模型的基础上,分析了4个经典激励策略消除节点自自动机以及产生博弈均衡的均衡边界条件,其中 TFT 和 GTFT 采用匹配机制,OT 和 GT 是触发机制。

3.1 TFT 策略

以牙还牙(Tit for tat)^[12] 是一个用于重复囚徒困境(Repeated Prisoner's Dilemma)的有效策略。该策略步骤如下:第一时隙响应推荐请求;下一时隙是否响应要看上一时隙对方是否响应推荐请求,若对方上一时隙不响应推荐请求,此时隙我亦背叛;若对方上一时隙响应推荐请求,此时隙继续合作。在概率博弈中 TFT 策略如下:

$$f_i^n = \begin{cases} 1, & n=0 \\ f_{-i}^n, & n>0 \end{cases} \quad (6)$$

如果节点 i 在时隙 t_0 单方面降低其响应推荐请求行为概率 $f_i^0 = p$, 节点 $-i$ 在时隙 t_1 将为节点 i 提供响应推荐请求概率为 $f_{-i}^1 = p$ 的服务,即后续时隙出现表2所列状态。

表2 TFT 单次偏离合作博弈状态

| | t_0 | t_1 | t_2 | t_3 | ... |
|----------|-------|-------|-------|-------|-----|
| f_i | p | 1 | p | 1 | ... |
| f_{-i} | 1 | p | 1 | p | ... |

由式(4)可得, TFT 策略下单次偏离合作行为后,节点 i 的最终收益为:

$$\mu_i(p, 1) = \frac{(b-pc) + \delta(pb-c)}{1-\delta^2} \quad (7)$$

在 TFT 激励策略下,博弈达到合作均衡状态的条件是:

$$E_{TFT} = \mu_i(1,1) - \mu_i(p) = (b-c) * \sum_{n=0}^{\infty} \delta^n - \frac{(b-pc) + \delta(pb-c)}{1-\delta^2} > 0 \quad (8)$$

即 $b/c > 1/\delta, 0 < p < 1$ 。

推论 1 在所有节点采取 TFT 激励策略的情况下,如果满足均衡边界条件 $b/c > 1/\delta$, 节点 i 以任意概率 p 采取响应推荐请求行为, $0 < p < 1$, 所得收益都低于采取完全合作行为所得收益, 节点 i 倾向响应而非拒绝, 即信任推荐重复博弈趋于合作均衡状态。

3.2 GTFT 策略

在 TFT 策略中, 若某节点 i 以概率 p 提供推荐请求响应服务, 则该博弈将无法达到初始的合作状态, 即 TFT 没有提供合作重建机制。GTFT (Generous TFT) 与 TFT 的区别在于, 在处理对手的不响应行为时, 策略中提供了遗忘因子 g 来帮助博弈达到初始合作状态^[12]。GTFT 策略形式化如下:

$$f_i^n = \begin{cases} 1, & n=0 \\ \min(f_i^{n-1} + g, 1), & n>0 \end{cases} \quad (9)$$

如果所有节点都采取 GTFT 策略, 节点 i 采取单方面降低其响应推荐请求行为概率 $f_i^0 = p$, 其对手将根据 GTFT 策略作出响应: 1) 如果偏离行为与合作行为差异较小, 概率 $p \geq 1-g$, 对手将容忍该偏离行为; 2) 如果偏离行为与合作行为差异大, 概率 $p < 1-g$, 将被视为不合作行为, 对手将以概率为 $p+g$ 的方式提供响应服务, 如表 3 所列, 其中 $m = \lceil (1-p)/g \rceil$ 且假设为偶数。

表 3 GTFT 单次偏离合作博弈状态

| | t_0 | t_1 | t_2 | t_3 | ... | t_{m-1} | t_m | ... |
|----------|-------|-------|--------|--------|-----|------------|-------|-----|
| f_i | p | 1 | $p+2g$ | 1 | ... | 1 | 1 | ... |
| f_{-i} | 1 | $p+g$ | 1 | $p+3g$ | ... | $p+(m-1)g$ | 1 | ... |

由式(4)可得, GTFT 策略下单次偏离合作行为后, 节点 i 的最终收益为:

$$\mu_i(p, 1) = [(b-pc) + \delta(pb-c)](1 + \delta^2 + \delta^4 + \dots + \delta^{m-2}) + g\delta(b-2\delta c + 3\delta^2 b \dots - (m-1)\delta^{m-2}c) + (b-c) * \sum_{n=m}^{\infty} \delta^n \quad (10)$$

在 GTFT 激励策略下, 博弈达到合作均衡状态的条件是:

$$E_{GTFT} = \mu_i(1, 1) - \mu_i(p) = (1-p)(b\delta - c) \left(\frac{1-\delta^m}{1-\delta^2} \right) + g \left[(-b) \left(\frac{\delta}{1-\delta^2} + \frac{2(\delta^3 - \delta^{m+1})}{(1-\delta^2)^2} - \frac{(m-1)\delta^{m+1}}{1-\delta^2} \right) + c \left(\frac{2(\delta^2 - \delta^m)}{(1-\delta^2)^2} - \frac{(m-2)\delta^m}{1-\delta^2} \right) \right] > 0 \quad (11)$$

由于 $g > 0$ 且 $0 < \delta < 1$, 因此上式可变成:

$$((1-\delta^2)^2/g) E_{GTFT} \approx b(m\delta - \delta - m\delta^3 + \delta^{m+1} + \delta^{m+3}) - c(m - \delta^2 m - 2\delta^2 + 2\delta^{m+2}) > 0 \quad (12)$$

因为 $m\delta - \delta - m\delta^3 + \delta^{m+1} + \delta^{m+3} > 0$ 且 $m - \delta^2 m - 2\delta^2 + 2\delta^{m+2} > 0$, 所以 GTFT 激励策略达到合作均衡状态的条件为:

$$\frac{b}{c} > \frac{m - \delta^2 m - 2\delta^2 + 2\delta^{m+2}}{m\delta - \delta - m\delta^3 + \delta^{m+1} + \delta^{m+3}} = H \quad (13)$$

推论 2 在所有节点采取 GTFT 激励策略的情况下, 如果满足均衡边界条件 $b/c > H$, 节点 i 以任意概率 p 采取合作行为, $0 < p < 1$, 所得收益将低于采取完全合作行为所得收益, 节点 i 倾向于抑制自私行为, 即推荐请求重复博弈趋于合作均衡状态。

3.3 GT 策略

GT 策略 (Grim Trigger) 是重复博弈中采用触发机制的激励策略^[12]。起初使用 GT 策略的参与者采取响应行为, 一旦对手的拒绝行为达到触发条件后, 参与者将在今后的所有博弈阶段对对手都采取拒绝响应行为, 因为对手的一次拒绝将触发永久性的拒绝响应行为。在概率博弈中 GT 策略形式化如下:

$$f_i^n = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 1, & \forall m < n: f_i^m \geq d \text{ and } n > 0 \\ 0, & \text{all else} \end{cases} \quad (14)$$

式中, d 是触发阈值, 如果 $f < d$, 触发永久性惩罚行为。

如果所有节点都采取 GT 策略, 信任推荐行为将保持直到节点 i 采取单方面降低其响应推荐请求行为概率 $f_i^0 = p$ 。根据节点 i 偏差程度, 其对手将根据 GT 策略做出不同响应: 1) 如果偏离行为与合作行为差异较小, 概率 $p \geq d$, 对手将容忍该偏离行为; 2) 如果偏离行为与合作行为差异大, 概率 $p < d$, 将被视为不合作行为, 对手将不响应节点 i 所有推荐请求, 如表 4 所列。

表 4 GT 单次严重偏离合作博弈状态

| | t_0 | t_1 | t_2 | t_3 | ... |
|----------|-------|-------|-------|-------|-----|
| f_i | p | 1 | 0 | 0 | ... |
| f_{-i} | 1 | 0 | 0 | 0 | ... |

在节点 i 的单次行为偏离博弈中, 由式(4)可得节点 i 的最终收益为:

$$\mu_i(p, 1) = b - pc - \delta c \quad (15)$$

在 GT 激励策略下, 博弈达到合作均衡状态的条件是, 节点 i 采取持续响应所有推荐请求行为所得收益大于其采取以概率 $0 < p < d$ 响应推荐请求行为所得收益, 即:

$$E_{GT} = \mu_i(1, 1) - \mu_i(p, 1) = (b-c) * \sum_{n=0}^{\infty} \delta^n - (b-pc - \delta c) = (b-c)/(1-\delta) - (b-pc - \delta c) > 0 \quad (16)$$

所以 GT 激励策略达到合作均衡状态的条件为:

$$\frac{b}{c} > \frac{(1-(1-\delta)(p+\delta))}{\delta} = G \quad (17)$$

推论 3 在所有节点采取 GT 激励策略情况下, 如果满足均衡边界条件 $\frac{b}{c} > \frac{(1-(1-\delta)(p+\delta))}{\delta}$, 节点 i 以任意概率 p ($0 < p < d$) 采取合作行为, 所得收益都低于采取完全合作行为所得收益, 节点 i 倾向于以概率 p ($p > d$) 响应推荐请求, 即抑制自私行为, 信任推荐趋于合作均衡状态。

3.4 OT 策略

GT 激励策略没有合作重建机制, 如果节点 i 偶然拒绝响应推荐请求的行为, 则将导致它会持续遭到对手的拒绝响应的惩罚, 从而无法恢复初始全面合作状态。OT (One-step Trigger)^[12] 采用了温和的惩罚措施, 是对 GT 激励策略的一种改进。在概率博弈中 OT 策略形式化如下:

$$f_i^n = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 1, & f_i^{n-1} \geq d \text{ and } n > 0 \\ 0, & \text{all else} \end{cases} \quad (18)$$

式中, d 是触发阈值, 如果 $f < d$, 将触发惩罚行为。

所有节点都采取 OT 策略, 信任推荐行为将维持到节点 i 采取单方面降低其响应推荐请求行为概率 $f_i^0 = p$ 。根据节点 i 行为偏差程度, 其对手将根据 OT 策略做出不同响应: 1)

如果偏离行为与合作行为差异较小, 概率 $p \geq d$, 对手将容忍该偏离行为; 2) 如果偏离行为与合作行为差异大, 概率 $p < d$, 将被视为不合作行为, 在时隙 t_n 对手将立即不响应节点 i 所有推荐请求, 但是与 GT 策略不同的是, 在下一个时隙 t_{n+1} 将恢复合作行为, 如表 5 所列。

表 5 OT 单次严重偏离合作博弈状态

| | t_0 | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | ... |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| f_i | p | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | ... |
| f_{-i} | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | ... |

OT 激励策略中, 节点 i 的单次行为偏离博弈最终收益为:

$$\mu_i(p, 1) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta^n (f_i^n b - f_{-i}^n c) = (b - \delta c) / (1 - \delta^2) - pc \quad (19)$$

OT 激励策略下, 博弈达到合作均衡状态的条件是, 节点 i 采取连续响应推荐请求行为所得收益大于其采取以概率 p ($0 < p < d$) 响应推荐请求行为所得收益, 即:

$$E_{OT} = \mu_i(1, 1) - \mu_i(p, 1) = \delta b / (1 - \delta^2) - (1 / (1 - \delta^2) - p)c > 0 \quad (20)$$

所以 OT 激励策略达到合作均衡状态的条件为:

$$\frac{b}{c} > \frac{(1 - (1 - \delta^2)p)}{\delta} = F \quad (21)$$

推论 4 在所有节点采取 OT 激励策略情况下, 如果满足均衡边界条件 $b/c > (1 - (1 - \delta^2)p) / \delta$, 节点 i 以任意概率 p ($0 < p < d$) 采取合作行为, 所得收益都低于采取完全合作行为所得收益, 节点 i 倾向于以概率 p ($p > d$) 响应推荐请求, 即抑制自私行为, 信任推荐趋于合作均衡状态。

4 参数激励策略的影响

本节中, 首先分析在满足各均衡边界条件下, 各激励策略惩戒机制的参数变化对节点响应推荐请求协作行为的影响, 然后分析了各参数对各激励策略均衡边界条件的影响。

4.1 惩戒机制参数对协作性的影响

命题 1 在 TFT 激励策略中, 在满足其均衡边界条件下, 贴现因子 δ 的增加有助于对自私行为的威慑, 从而促进各节点对响应推荐请求的协作行为。

证明: 对于式(8), 对 E_{TFT} 求 δ 偏导, $\partial E_{TFT} / \partial \delta$ 为正, 因此在给定 b, c, p 等参数的条件下, 增加 δ 导致 E_{TFT} 的增加, 即采取自私行为所受惩戒将增大。

命题 2 在 GTFT 激励策略中, 在满足其均衡边界条件下, 偏差因子 g 的降低以及贴现因子 δ 的增加有助于对自私行为的威慑, 从而促进各节点对响应推荐请求的协作行为。

证明: 对于式(11), 对 E_{GTFT} 求 g 偏导, $\partial E_{GTFT} / \partial g$ 为负, 因此在给定 b, c, p, δ 等参数的条件下, 降低 g 导致 E_{GTFT} 的增加, 即采取自私行为所受惩戒将增大; 对于式(11), 对 E_{GTFT} 求 δ 偏导, $\partial E_{GTFT} / \partial \delta$ 为负, 因此在给定 b, c, p, g 等参数的条件下, 降低 δ 导致 E_{GTFT} 的增加, 即采取自私行为所受惩戒将增大。

命题 1 说明在 TFT 激励策略中, 贴现率 δ 越大, 节点的自私拒绝响应行为所遭受的损失越大, 节点更趋向于合作, 这与直觉相符。命题 2 说明在 GTFT 激励策略中, 除了参数贴现率以外, 偏差因子 g 对自私的拒绝响应行为所遭受的损失

程度有重要影响。因为在 p 固定的情况下, g 的大小间接决定了节点采取自私的拒绝响应行为后系统恢复合作博弈状态所需要的单阶段博弈次数, g 越小, 所需要恢复阶段单阶段博弈次数 $m = \lceil (1-p)/g \rceil$ 就越多, 所受惩罚的时间越长, 即所遭受的损失越大。

命题 3 在 GT 激励策略中, 在满足其均衡边界条件且 $b/c \geq 1$ 下, 贴现因子 δ 的增加有助于对自私行为的威慑, 从而促进各节点对响应推荐请求的协作行为。

证明: 对于式(16), 当 $b/c \geq 1$ 时, 对 E_{GT} 求 δ 偏导可知 $\partial E_{GT} / \partial \delta$ 为正, 因此在给定 b, c, p 等参数的条件下, 增加 δ 导致 E_{GT} 的增加, 即采取自私行为所受惩戒将增大。

命题 4 在 OT 激励策略中, 在满足其均衡边界条件且 $b/c \geq 1$ 时, 贴现因子 δ 的增加有助于对自私行为的威慑, 从而促进各节点对响应推荐请求的协作行为。

证明: 对于式(20), 当 $b/c \geq 1$ 时, 对 E_{OT} 求 δ 偏导为正, 因此在给定 b, c, p 等参数的条件下, 增加 δ 导致 E_{OT} 的增加, 即采取自私行为所受惩戒将增大。

命题 3、4 都说明在 GT 和 OT 激励策略中, 当 $b/c \geq 1$, δ 越大, 节点因为自私的拒绝响应行为所遭受的损失越大, 节点便更趋向于合作。当 $b/c < 1$, 也可能满足 GT 和 OT 激励策略博弈均衡边界条件, 但由于每次合作收益总少于支出, δ 越大意味着持续合作所带来的损失越大, 即 E_{OT} 越小, 节点将更趋于自私行为。

图 1 反映了参数为 $b/c = 4, g = 0.01, d = 0.9, 0 \leq p \leq 0.8, 0.1 \leq \delta \leq 0.95$ 时分别使用激励策略 TFT, GTFT, GT, OT 条件下, 采取不响应行为造成惩罚度变化的情况。从图 1 可以看出策略 TFT、GTFT 惩罚度受参数 p 的影响较为明显, p 越小惩罚绝对值越大; 而策略 GT、OT 惩罚度基本不受参数 p 的影响。因为 4 种策略分属两类机制: 策略 TFT, GTFT 是匹配机制, 节点行为策略是受对手的影响, 即主体节点的合作概率一定程度上影响了对对手对部分不合作行为实施的惩罚程度; 策略 GT、OT 是触发机制, 节点不合作行为没有达到触发条件不会受到惩罚, 但是一旦达到触发条件, 对手节点的惩罚机制为最简单的完全不合作行为, 因此主体节点的合作概率对将受到的惩罚程度几乎没有影响。

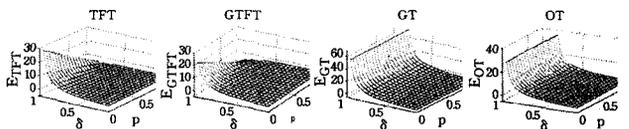


图 1 惩罚度与参数 δ, p 的关系图

图 2 反映了参数为 $b/c = 4, p = 0.4, g = 0.01, 0.1 \leq \delta \leq 0.99$ 时分别使用激励策略 TFT, GTFT, GT, OT 条件下, 采取不合作行为造成惩罚度变化的情况。从图 2 可以看出激励策略 GT、OT 中, 采取不合作行为引发的惩罚程度严厉, GT 策略尤甚; 而激励策略 TFT、GTFT 中, 采取不合作行为引发的惩罚程度较为缓和, 当 $\delta < 0.8$ 时, 激励策略 TFT、GTFT 提供的惩罚程度基本一致。当贴现率 δ 趋近于 1 时, 即未来收益与损失地位越重要时, GTFT 策略比 TFT 策略惩罚度的缓和性体现越加明显。通过该节分析可得激励策略 GTFT 与其他 3 种激励策略相比有更多的参数调控机制, 激励方式更灵活, 惩罚度在 4 种激励策略中最缓和。

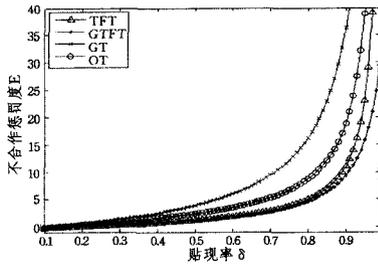


图2 惩罚度与参数 δ 的关系图

4.2 惩戒机制参数对均衡边界条件影响

命题5 在GTFT策略中, m 的增加将导致均衡边界条件要求降低, 即 g 的减少将导致均衡边界条件要求降低。

证明: 对于式(13), 对 H 求 m 偏导可知 $\partial H/\partial m$ 为负, 因此在给定 δ 参数的条件下, 增加 m 导致 H 的减少, 即 b/c 的均衡边界条件降低。由于 $m = \lceil (1-p)/g \rceil$, 因此在给定参数 p 的条件下, 减少 g 将导致参数 m 的增加即降低均衡边界条件。

命题6 在GTFT策略中, m 趋近于无穷大时, GTFT策略与TFT策略的均衡边界条件等效。证明:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{m - \delta^2 m - 2\delta^2 + 2\delta^{m+2}}{m\delta - \delta - m\delta^3 - \delta^3 + \delta^{m+1} + \delta^{m+3}}$$

$$= \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1 - \delta^2}{\delta - \delta^3} = \frac{1}{\delta}$$

命题7 在GTFT策略中, δ 的增加将导致均衡边界条件要求降低, 均衡边界条件下限为 $b/c > m + 2/m$ 。

证明: 对于式(13), 对 H 求 δ 偏导可知 $\partial H/\partial \delta$ 为负, 因此在给定 p, g 参数的条件下, 增加 δ 导致 H 的减少, 即 b/c 的均衡边界条件降低。

$$\lim_{\delta \rightarrow 1} \frac{m\delta - \delta - m\delta^3 - \delta^3 + \delta^{m+1} + \delta^{m+3}}{m - \delta^2 m - 2\delta^2 + 2\delta^{m+2}}$$

$$= 1 + \frac{(\delta^2 - 1)(1 - \delta^m)}{m - \delta^2 m - 2\delta^2 + 2\delta^{m+2}}$$

$$= 1 + \frac{-2m}{m^2 + 2m} = \frac{m}{m+2}$$

命题8 在GT策略中, p 的降低将导致均衡边界条件要求提高; 如果 $0 < p < 1 - \delta^2$, 则 δ 的增加将导致均衡边界条件要求降低, 否则 δ 的增加将导致均衡边界条件要求增加。

证明: 对式(17)右式 G 求 p 偏导, $\partial G/\partial p$ 结果为负, 因此减少 p 导致 G 增大, 即提高均衡边界条件下限。对式(17)右式 G 求 δ 偏导 $\partial G/\partial \delta$, 得 G 式与 δ 变化关系取决于 p 。如果 $0 < p < 1 - \delta^2$, $\partial G/\partial \delta$ 为负, 如果 $1 - \delta^2 < p < 1$, $\partial G/\partial \delta$ 为正。

命题9 在OT策略中, p 的降低将导致均衡边界条件要求提高; 如果 $0 < \delta < \sqrt{(1-p)/p}$, 则 δ 的增加将导致均衡边界条件要求降低, 否则 δ 的增加将导致均衡边界条件要求增加。

证明: 对式(21)右式 F 求 p 偏导, $\partial F/\partial p$ 结果为负, 因此减少 p 导致 F 增大, 即提高均衡边界条件下限。对式(21)右式 F 求 δ 偏导 $\partial F/\partial \delta$, 得 F 式与 δ 变化关系取决于 p 。如果 $0 < \delta < \sqrt{(1-p)/p}$, $\partial F/\partial \delta$ 为负。

已知TFT策略中, 均衡边界条件为 $b/c > 1/\delta$, 由命题5、6可以看出, 当 m 趋近于无穷大时, GTFT策略与TFT策略的均衡边界条件等效, GTFT策略的均衡边界条件要比TFT的均衡边界条件高。GTFT和TFT策略均衡边界条件中参

数 p 效用不大, 而GT、OT策略均衡边界条件都与参数 p 有关, p 不仅影响均衡边界条件的高低, 还影响边界条件随参数 δ 变化的情况, 因此在设定参数时要综合考虑参数 $b/c, p, \delta$ 之间的关系。GT、OT策略均衡边界条件的上限是 $1/\delta$, 可见GT、OT策略均衡边界条件要比TFT的均衡边界条件低。

5 仿真实证

在实际无线自组网中, 来自拓扑、流量及信道的随机性令节点的信任推荐行为变得复杂化。为验证基于重复博弈的4种激励策略的信任推荐协作的提升效果, 并考察其稳定程度, 本文使用Matlab来模拟一个无线自组网仿真环境。本文采用Watts和Strogatz所提出的WS模型^[14]的Small World模拟网络拓扑结构, 其中节点数目为100, 平均入度为5, 最高入度为7~8。

5.1 激励策略对有效推荐率的影响

为评价激励策略对提升节点间信任推荐的合作程度, 引入了评价标准: 有效推荐率(Efficient Recommendation Ratio, ERR), 所有节点成功接受到推荐响应的报文与实际发送推荐请求的比值。首先, 我们将系统中的节点分为合作节点和自私节点两类, 当没有激励策略时, 系统将变成单阶段博弈, 各节点根据自己的角色选择自己的行为, 图3中带*的线条给出了该情况下有效推荐率随自私节点比例变化的仿真结果。

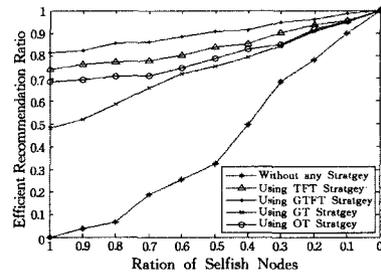


图3 自私节点比率与有效推荐率

采用激励策略后自私节点迫于未来惩罚的压力, 采取合作响应行为, 但是也不可避免产生自私节点的突发自私行为。图3上其他4根线条分别仿真了 $b/c=4, g=0.01, \delta=0.6$ 时, 采用TFT, GTFT, GT, OT策略条件下, 有40%自私节点发生了以概率 $p=0.4$ 响应推荐请求的突发自私行为后, 系统所达到的有效推荐率。可以看出4种策略中, GTFT策略抵抗突发自私行为效果最好, 即使突发自私行为的节点数目达到40%, 仍可以保持较高的有效推荐率, TFT、OT次之, GT最弱。这与惩罚策略有关, TFT、GTFT基本采用匹配式的缓和策略, 只要响应推荐请求的概率不等于0, 系统仍可响应部分推荐请求, 因此即便突发自私行为增加, 全局有效推荐率也能保持较高水平。而GT策略采用苛刻的惩罚措施, 节点的突发自私行为将导致其永久被隔离, 甚至突发自私行为节点的增加导致部分推荐请求链路中断, 因此有效推荐率将会急剧下降。

在无线自组网中, 各个节点在一段时间内都有可能发生突发自私行为, 图4仿真了突发自私行为节点占80%, $b/c=4, g=0.01, \delta=0.6$, GT与OT的惩罚策略触发条件为 $d=0.7$ 条件下, 有效推荐率随突发自私行为的响应推荐比率 p 变化的情况。从图4可知, TFT策略和GTFT策略中, 推荐率随 p 的增加而明显提高, 说明采用匹配策略, 自私节点的

部分合作行为对提升整个信任系统中的有效推荐率是有益的。当 p 趋近于 0 时,GTFT 策略明显优于其他策略,因为针对突发自私行为,GTFT 策略比其他策略有较好的修复机制。当 p 趋近于 0 时,TFT 策略、OT 策略表现近似,因为节点的响应推荐比率下降到 0 时,本质上 TFT 策略退化为 OT 策略。图 4 表明当响应推荐比率下降到 0.7 以下时因触发惩罚策略使用 GT、OT 策略使得网络中的有效推荐率将急剧下降,由于 GT、OT 策略的惩罚策略使对手响应推荐比率降低为 0,因此响应推荐比率 p 对全局有效推荐率没有太大影响。

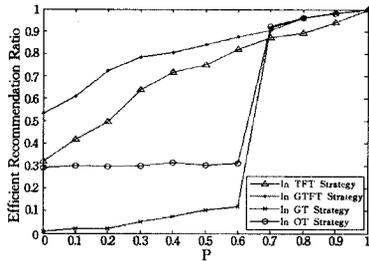


图 4 突发自私行为比率与有效推荐率

5.2 有效推荐率对抵御联合攻击的影响

在模拟环境中,对基于推荐激励机制的信任模型为报文正常转发行为建立正确的信任评价的准确度进行实验。为了能够反映基于推荐激励机制的信任模型对联合攻击的抵御能力,我们对节点进行如下分类:1)不可信节点:采用虚假推荐攻击行为,即对不可信节点、恶意服务节点给予好评,对正常节点给予恶评,推荐偏差度 1;提供正常的报文转发行为。2)恶意服务节点:采用偏见式攻击行为,即对不可信节点、恶意服务节点提供良好的报文转发服务,而对某些正常节点不提供报文转发服务,通过该方法试图模糊正常节点对不可信节点虚假推荐的判断;在信任机制方面提供正确信任推荐。3)正常节点:提供积极的报文转发服务,同时在信任机制方面提供正确的信任推荐。各类型节点比率如表 6 所列。

表 6 模拟环境参数

| Parameter | | Value |
|-----------|----------|--------|
| 网络中节点总数 | | 100 |
| 正常节点比率 | | 0~100% |
| 节点类型 | 不可信节点比率 | 0~50% |
| | 恶意服务节点比率 | 0~50% |
| | 推荐偏差度 | 1 |

为了评价信任推荐激励机制的信任系统对抵御联合攻击的效果,引入了一种评价标准信任评估正确率 $P_{correct}^{[15]}$ 。假设 ρ_{ij} 表示使用 OTMF 信任模型^[16]所计算出的节点 i 认为节点 j 进行可靠传递的信任度, μ_j 表示节点 j 在实际工作中可靠服务的频率。 M_i 表示节点 i 利用信任模型计算了的其他节点信任度所有节点的集合。 $P_{correct}^i$ 表示节点 i 的信任评估正确率,如式(22):

$$P_{correct}^i = \frac{\sum_{j \in M_i} (1 - |\rho_{ij} - \mu_j|)}{|M_i|} \quad (22)$$

$P_{correct}$ 为整个系统的信任评价正确率:

$$P_{correct} = \frac{\sum_{i \in N} P_{correct}^i}{|N|} \quad (23)$$

图 5 仿真了有效推荐率分别为 0.2,0.4,0.6,0.8,1 时,全网一次推荐请求响应后,信任评估正确率 $P_{correct}$ 随正常节点比率的变化情况,非正常节点包括不可信节点和恶意服

务节点,各占非正常节点的 50%。由于网络拓扑结构中节点平均入度为 5,因此有效推荐率为 0.2 时,近似模拟单路间接推荐效果。从图 5 可以看出,随着有效推荐率的提高,信任评估正确率 $P_{correct}$ 越大,在极端情况正常节点为 0 的情况下,由于占 50%的恶意服务节点提供真实信任推荐服务以及高有效推荐率利于将真实推荐做最广泛的传播,因此当有效推荐率为 1 时,恶意服务节点所提供的真实推荐为提升信任评估正确率 $P_{correct}$ 起到重要的作用。该仿真实验表明在联合攻击情况下,高有效推荐率使得信任模型能在一次推荐请求响应后达到较好的信任评估正确率,为及时真实反映网络中各节点信任度以及进一步应对联合攻击打下了基础。

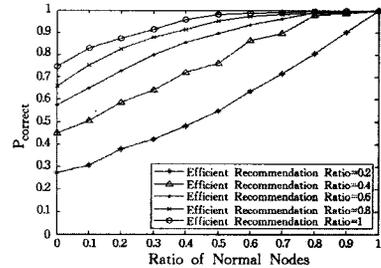


图 5 正常节点比率与信任评估正确率

结束语 针对现有无线自组网中无法依赖信任系统本身来确保信任推荐协作实施,本文采用重复概率博弈模型分析比较 4 种激励策略的均衡边界条件以及各参数对协作性和均衡条件的影响。仿真实验表明在高突发自私行为比率情况下,GTFT 策略具有最好的有效推荐率,同时 GTFT 具有较灵活的参数调节机制,但对比其他 3 种策略,GTFT 的均衡边界条件对参数要求更苛刻。提高有效推荐率有助于信任系统在联合攻击情况下快速建立正确信任评价。但信任推荐激励策略的使用会大大增加无线自组网通讯量负担,如何降低通讯量并不造成博弈误判,保持高有效推荐率,将是我们今后的研究重点。

参考文献

- [1] Buchegger S, Boudec J-Y L. Self-policing mobile ad hoc networks by reputation systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(7): 101-107
- [2] Buchegger S, Boudec J-Y L. A Robust Reputation System for P2P and Mobile Ad-Hoc Networks[C]// Proc. P2PEcon 2004. Harvard Univ., Cambridge, MA, June 2004
- [3] Marti S, Giuli T J, Lai K, et al. Mitigating routing misbehavior in mobile ad hoc networks[C]// Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM) 2000. Boston: ACM Press, 2000: 255-265
- [4] Virendra M, Krishnamurthy A, Narayanan K, et al. Environment-Aware Trusted Data Delivery in Multipath Wireless Protocols[A]// Communications in Computer and Information Science (CCIS) 2007[C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 396-401
- [5] Theodorakopoulos G, Baras J S. On trust models and trust evaluation metrics for ad-hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(2): 318-328
- [6] Theodorakopoulos G. Distributed trust evaluation in ad-hoc networks[D]. Maryland: University of Maryland, 2004
- [7] Sun Y, Yu W, Han Z. Information theoretic framework of trust modeling and evaluation for ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(2): 674-679

- [8] Ma A, Sm E-K, Awf H, et al. A survey on trust and reputation schemes in ad hoc networks[C]//Proc. of the 2008 3rd Int'l Conf. on Availability, Reliability and Security. USA: IEEE Computer Society Press, 2008; 881-886
- [9] Li Rui-dong, Li Jie, Liu Peng, et al. An Objective Trust Management Framework for Mobile Ad Hoc Networks[A]//Vehicular Technology Conference 2007[C]. VTC 007-Spring, April 2007; 56-60
- [10] Mejia M, Pena N, Munoz J L, et al. A review of trust modeling in ad hoc networks[J]. Internet Research, 2009, 19(01): 88-104
- [11] 孙玉星, 黄松华, 等. 自治网络中信任/信誉模型的安全现状的研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(04): 5-12
- [12] Mailath G, Samuelson L. Repeated games and reputations; long-run relationships[M]. xford University Press, 2006
- [13] Srivastava V, Neel J, Mackenzie A B. Using game theory to analyze wireless ad hoc networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE In Communications Surveys & Tutorials, 2005, 7(04): 46-56
- [14] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [15] Sun Yu-xing, Huang Song-hua, et al. Bayesian Decision-Making Based Recommendation Trust Revision Model in Ad Hoc Networks [J]. 软件学报, 2009, 20(9): 2574-2586
- [16] Li Jie, Li Rui-dong. Future Trust Management Framework for Mobile Ad Hoc Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 108-114

(上接第 24 页)

- [8] Pu Shi, Vosselman G. Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning[A]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences[C], vol. 36, Dresden, Germany, September 2006, part 5
- [9] Rabbani T, Heuvel F V d, Vosselman G. Segmentation of point clouds using smoothness constraints [C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006, 36: 248-253
- [10] Jiang X Y, Bunke H. Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping[J]. Machine Vision and Applications, 1994, 7: 115-122
- [11] Pavlidis T. Segmentation of pictures and maps through functional approximation[J]. Comput Graphics Image Processing, 1976, 1: 360-372
- [12] Sithole G, Vosselman G. Automatic Structure Detection in a Point Cloud of an Urban Landscape[C]// Proceedings of 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. 2003: 67-71
- [13] Khalifa I, Moussa M, Kamel M. Range image segmentation using local approximation of scan lines with application to CAD model acquisition[J]. Machine Vision Applications, 2003, 13: 263-274
- [14] Roggero, Marco. Airborne laser scanning: clustering in raw data [C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing. 2001, 34: 227-232
- [15] Filin S. Surface clustering from airborne laser scanning data[C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2002, 34: 117-124
- [16] Dorninger P, Nothegger C. 3 D Segmentation of unstructured point clouds for building modelling[C]// Stilla U, et al. eds. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences
- [17] Biosca J M, Lerma J L. Unsupervised robust planar segmentation of terrestrial laser scanner point clouds based on fuzzy clustering methods[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008, 63: 84-98
- [18] Chehata, David N, Nicolas, et al. LIDAR data classification using hierarchical K-means clustering[C]// ISPRS Congress. Beijing, 2008, 37: 325-330
- [19] Sampath A, Shan Jie. Building Roof Segmentation and Reconstruction from Lidar Point Clouds Using Clustering Techniques [C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII, 2008, Part B3a
- [20] Kim T-J, Muller J-P. Development of a graph-based approach for building detection[J]. Image and Vision Computing, 1999, 17: 3-14
- [21] Fuchs F. Building reconstruction in urban environment; a graph-based approach, automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III) [M]// Baltsavias E P, Gruen A, Gool L V, eds. Taylor & Francis, 2001: 205-215
- [22] Wang Lu, Chu H. Graph theoretic segmentation of airborne Lidar data[C]// Proceedings of SPIE. 2008: 69-79
- [23] Golovinskiy A, Funkhouser T. Min-Cut Based Segmentation of Point Clouds[C]// IEEE Workshop on Search in 3D and Video (S3DV) at ICCV. September 2009
- [24] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation[C]// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000, 22: 888-905
- [25] Haxhimusa Y, Kropatsch W G. Hierarchy of partitions with dual-graph contraction[C]// Proceedings of German Pattern Recognition Symposium. LNCS 2871. 2003: 338-345
- [26] Chung F R. Spectral Graph Theory, CBMS Conference on Recent Advances in Spectral Graph Theory[M]. AMS Bookstore, 1997
- [27] Zhana Qingming, Liangb Yubin, Xiao Yubin. Color-based segmentation of point clouds[C]// International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2009, 38: 248-252
- [28] Bucksch A H, van Wageningen A. Skeletonization and segmentation of point clouds using cotrees and graph theory[C]// Commission V Symposium. 2006
- [29] Dai Ming-rui, Zhang Xiaopeng, Zhang Yi-kuan, et al. Segmentation of Point Cloud Scanned from Trees[C]// Proceedings of Workshop on 3D Content and Applications with ACCV, Xi'an, China, September 2009
- [30] XU Wen-xue. A Segmentation Approach for Terrestrial Point Clouds Based on the Integration of Graph Theory and Region Growing[C]// 2009 Urban Remote Sensing Joint Event
- [31] Wang Jun, Shan Jie. Segmentation of lidar point clouds for building extraction [C]// ASPRS 2009 Annual Conference. Baltimore, Maryland, March 2009; 9-13
- [32] Richtsfeld M, Vincze M. Point Cloud Segmentation Based on Radial Reflection[M]. Lecture Notes In Computer Science. Vol. 5702, Springer Berlin/Heidelberg, 2009: 955-962
- [33] Heath M, Sarkar S, Sanocki T, et al. Comparison of edge detectors a methodology and initial study[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69: 38-54
- [34] Shapiro L G, Stockman G C, et al. Computer Vision[M]. Prentice Hall, 2008