

基于博弈的移动自组网协作策略研究与分析^①

陈丽欣 (广东商学院 信息学院 广东 广州 510320)

摘要: 针对移动自组网中自私节点拒绝转发数据包的服务请求,影响整体网络性能的问题进行研究,基于经济学中提出的博弈理论,描述了节点检测记录相邻节点的协作率而识别自私节点的方法,提出了基于统计信息的节点协作重复博弈策略 LTFT 和 LEpTFT,并提出节点根据不同协作目标进行策略选择的方法,分析表明该策略和方法能够有效激励协作并孤立自私节点,能有效的解决网络性能与节点收益的权衡问题,在一定程度上解决节点的协作问题。

关键词: 博弈;移动自组网;协作意愿;自私节点;LEpTFT 策略

Research and Analysis of Game Theory Based Node Cooperation Strategies in Mobile Ad Hoc Networks

CHEN Li-Xin (Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510320, China)

Abstract: With the aim at solving the problem of a selfish node refusing forward service requests of a mobile Ad hoc network, based on a Game theory in economics, this paper describes the method of identifying selfish nodes through detecting the cooperation rates of neighboring nodes and proposes statistics based on repeated Game strategies LTFT and LEpTFT. Also, the paper proposes a rule of adopting different strategies according to different aims of cooperation. Analysis shows that the strategies and rule can effectively encourage cooperation and punish selfishness to solve network problem and nodes to benefit from tradeoffs.

Keywords: game theory; mobile Ad hoc networks; cooperation intention; selfish node; LEpTFT strategies

1 引言

移动自组网中不存在专门执行网络管理功能的节点,路由和包转发等网络管理功能由构成网络的移动节点自身完成。但节点执行网络服务将消耗一定的自身资源,减少使用寿命,因此某些节点出于自身利益的考虑而趋于不合作,即不执行路由和转发功能。这种自私行为在节点能源有限的情况下,有其存在的必然,但它会对全局网络吞吐量和通信延迟有较大影响,因此,需要采取一种安全策略,能够一方面识别网络中自私节点的存在从而达到一定程度的隔离,另一方面激励节点增加协作的主动性,从而提高网络整体性能。

本文在允许节点在不同范围不同时段移动自组网中可以有不同协作表现的前提下,研究基于博弈的自私节点识别和节点的协作策略选择,提出了按节点协作意愿进行节点类别的划分,对不同个性类型的节点设置不同的行为策略,并在此基础上修正协作意愿,用于激励协作和惩罚自私,从而解决协作转发数据包过程中自私节点拒绝包转发问题。

2 节点协作模型

现阶段,针对移动自组网节点协作激励方面的研究,已提出一些对抗自私行为的方法,主要包括 Nug

^① 基金项目:广东商学院自然科学基金(08YB52004)

收稿时间:2010-02-23;收到修改稿时间:2010-03-28

lets^[1]、Sprite^[2]、CONFIDANT^[3]、CORE^[4]、VCG^[5]、GTFT^[6]等,从外部利益驱动的强迫机制和内部的节点行为趋势决策两方面研究如何对抗节点自私行为。外部利益驱动机制通过引入价格、信誉、令牌等机制,在节点中增加服务报酬传递或对邻居节点的判断检测,从而使节点在路由和转发数据包过程中发生的消耗能够通过其他方式得到补偿。内部决策机制通过引入博弈、拍卖等机制,使节点根据外部环境做出相应的行为决策,激发节点的自身合作动机,从而获得最佳路径或达到收益平衡。

文献[6-8]中提出基于博弈论的激励机制,节点在掌握了对手一定信息的情况下,能够选择相应的策略,典型的采取针锋相对策略,从而寻求一种整体网络性能均衡的机制。当网络中其它节点都实施均衡策略时,节点不能通过单方面背离均衡策略而获得更大收益。

3 节点转发博弈

3.1 单阶段博弈

博弈模型将移动自组网中的节点建模为著名的纳什均衡中“囚徒困境”情形^[7],将节点接受或拒绝来自邻居节点的转发请求视为一次博弈过程。网络中两个节点发送数据,并请求对方节点进行数据转发,如果两个节点都接受转发请求,则系统的性能达到最优;如果两个节点都拒绝转发请求,则系统性能最低,但对两个节点而言仍是公平的;如果一个节点接受的转发请求,但它发出的请求却被拒绝了,那么从该节点的角度考虑,它就遭受了损失而促成了另一节点的获益,从自身获益上来看还不如拒绝。节点的收益矩阵如图1所示,其中 $a > b > c > d$ 。因此,在不知道对手如何行动的情况下,节点进行是否转发数据的决策,更趋于选择拒绝,因为从个人角度而言拒绝更有利,但从整体的角度来看却牺牲了可能达到的系统最优情形。

	接受	拒绝
接受	b, b	a, d
拒绝	d, a	c, c

图1 单阶段博弈过程

上述的博弈模型中,主要出自节点自身获益考虑,将节点作为“自私”的,但在移动自组网络中,大多数节点都是合作的,转发数据的决策不应盲目,关于

对手的行为特征可以在交互过程中获得。

3.2 重复博弈

假设节点是理性节点,它与邻居之间的交互过程可以视为无限次重复博弈的过程^[6]。将时间视为离散的量,即将整个网络的运作过程分成若干的时间片,节点该时间片内所采取的策略会在下一个时间片作为历史信息为所有节点共知,节点的决策可以依赖于前面若干时间片所获得的知识来进行。将这个移动自组网作为一个系统,可以研究系统均衡,得出一个稳定的网络状态,节点会受到利益驱使而趋于达到这种状态,而背离均衡者就要收到某种惩罚,从而达到激励协作的目的。

在博弈过程中,节点可能实行的策略多种多样,具体算法的定义非常灵活, $f_i(s)$ 表示节点策略函数, i 为当前节点, s 为数据包来源节点的转发行为表现, $f_i(s) \in \{0, 1\}$,其中0和1分别表示拒绝和同意转发,而主要的博弈策略包括以下几种类型:

1) 全部协作(AIIC):节点对转发请求予以接受并执行, $f_i(s)=1$ 。

2) 全部拒绝(AIID):节点对转发请求全部拒绝, $f_i(s)=0$ 。

3) 针锋相对策略(TFT):节点以协作作为策略起点,然后模仿对手在前一时间片的行为, $f_i(s)=s$ 。

4) 怀疑的针锋相对策略(S-TFT)节点以拒绝为起点,然后在后续的时间片中模仿对手在前一时间片的行为, $f_i(s)=s$ 。

5) 反针锋相对策略(Anti-TFT):节点执行与对手相反的做法,当执行完第一阶段的协作后,后续执行对手前一时间段相反策略, $f_i(s)=1-s$ 。

而文献^[6]研究表明,在无限次重复博弈过程中,当节点采取针锋相对(TIT FOR TAT)策略时,它所获得的收益最大,并且不能通过单方面的策略改变而获得更大的收益。实施该策略促使网络整体性能保持均衡,但却牺牲了一定的系统吞吐量。

4 基于博弈的节点协作机制

4.1 基于本地检测的自私节点识别

移动自组网中每个节点创建并保存一个包含所有相邻节点的协作级别信息的信誉表,其中包含信息:节点标识 j 、协作比率 p_{ij} 、最后一次转发请求结果 l_{rij} 、持续时间 t 。在给定的时间片 tk ,节点 i 观察它的邻居节点 j 需要转发的某一部分数据包 $R_{ij}(tk)$,及它有效

地转发的数据包 $F_{ij}(tk)$, 转发率 $u_{ij} = \sum F_{ij}(tk) / \sum R_{ij}(tk)$ 。节点在要求邻居节点转发数据时, 首先向邻居节点发出询问, 获得同意后, 才进行数据传输, 在给定的时间片 tk , 意愿轮询请求次数为 $A_{ij}(tk)$, 请求接受次数为 $Y_{ij}(tk)$, 这种被动检测下节点所表现出的协作意愿采用积极率 v_{ij} 来表示, $v_{ij} = \sum A_{ij}(tk) / \sum Y_{ij}(tk)$ 。综合上述两个因素, 则节点 j 的协作比率 p_{ij} 可表示为: $p_{ij} = u_{ij} \cdot v_{ij}$ 。这些有限信息将作为相邻节点协作级别的判定基准, 设定 p_{high} 和 p_{low} 分别表示划分友邻节点和自私节点的界限比率, 根据邻居节点协作比率 p_j , 判定节点 j 为以下三个类别之一:

$$j \in \begin{cases} \text{友邻节点} & p_{ij} > p_{high} \\ \text{一般节点} & p_{low} < p_{ij} < p_{high} \\ \text{自私节点} & p_{ij} < p_{low} \end{cases} \quad (1)$$

若节点 j 为自私节点, 则节点 i 在路由选择时, 将包含有节点 j 的路径标记为低优先级路径, 而将友邻节点所在路径标记为高优先级路径, 从而保证所选路由具有较高的数据包传输率, 减少包的丢失。从而提高网络整体性能。

4.2 节点的协作意愿

在一个自组织网络中, 节点各自的能源级别都不相同, 也都可能有各自不同的协作意愿, 类似于人类社会, 某一特定区域的人群具有不同的个性特征, 某些趋于合作, 而某些趋于孤立, 在自组网中, 个别节点有能力专门为其他节点提供服务(包括路由服务和转发服务等), 也有个别节点因为资源限制而只能努力获得服务。因此在系统模型中, 容忍并允许一定程度的自私节点存在, 以便使能量级别较弱的节点仍有获益。

在本文的模型中, 引入节点的主动协作意愿, 采用 m 来表示, 其中 $m \in [0, 1]$, m 越大表示协作意愿程度越高, 也就是转发请求接受率越高, 移动自组网中的节点分为三种类型:

- 1) 协作节点: $m=1$, 采用全部协作策略, 无条件、可靠地为其他节点转发数据的节点;
- 2) 中间节点: $m \in (0, 1)$, 采用某种部分转发的协作策略, 根据一定的规则有选择性的接受或拒绝转发请求, 可能采用针锋相对策略、主动能量制约策略等。
- 3) 耗能节点: $m=0$, 采用全部拒绝策略, 无条件拒绝其他节点转发请求的节点。

节点按其个性的强弱划分为主动节点和被动节点。主动节点, $f_i'(s)=0$, 就是不依赖其他节点的行

为而主动断定包转发行为结果的节点, 包括实施全部拒绝和全部协作策略的节点。设定为全部协作策略节点, 在整体网络中就构成了一个可靠的转发环节; 设定为全部拒绝节点, 仅使用其他节点提供的服务, 而不对其他节点提供转发服务。被动节点, $f_i'(s) \neq 0$, 就是根据相邻节点的行为, 而被动的做出反应, 实施相对策略的节点, 包括实施针锋相对策略、怀疑的针锋相对策略、反针锋相对策略及其他相对策略的节点。实施被动策略的节点, 在掌握相邻节点部分信息的情况下, 有针对性的实施基于既有知识的重复博弈, 既能够有选择性的拒绝转发请求从而节约自身资源, 又能够不失公平性并对节点自私行为有相应的对策。

4.3 策略空间

当节点加入某一范围的移动自组网时, 根据节点的协作目标, 将选择不同的策略, 例如, 趋于合作的节点可以选择全部协作策略。但上述的若干被动策略都基于前一时间片的信息而做出判定, 规则简单, 而在重复博弈中, 节点的表现可能随着自身的能源降低而做出改变, 因此, 本文中引入节点的长期表现作为博弈的基础, 也就是节点进入通信范围开始直到节点离开, 该时间段范围内的累计知识用于计算协作率, 从而产生以下基于统计信息的策略, 以及仅根据能量约束作出判断的主动能量制约策略。

主动能量制约策略(AECS): 引入节点的主动能量制约影响因子 e_i , 并设定限值 E_i , 影响因子包括单位时间转发量、转发能量消耗百分比等, 节点在转发行为判定值未到达限值时趋于协作, 而当判定指标到达限值后则拒绝请求, 直到指标值降低到限值以下时为止, $f_i(s) = (e_i < E_i) ? 1 : 0$ 。

基于统计信息的仿效策略(LTFT): 增加协作率因子, 以一段时间内对相邻节点的本地检测结果为输入, 判定相邻节点协作级别, 设定 p_{high} 和 p_{low} 分别表示划分友邻节点和自私节点的界限比率, 根据邻居节点协作率 p_{ij} , 相应判定为友邻、一般及自私节点, 并以此作为判定接受和拒绝转发请求的依据。

$$f_i(s) = \begin{cases} 1 & p_{ij} \geq p_{low} \\ 0 & p_{ij} < p_{low} \end{cases} \quad (2)$$

基于统计信息的等概率仿效策略(LEpTFT): 采用协作率因子, 以一段时间内对相邻节点的本地检测结果为输入, 根据节点的长期表现做出决策, 则若节点

在能量充足情况下协作，而在能量制约下降低协作水平时仍可以获得服务，而不会因短期行为而被孤立。策略函数 $f_i(s)$ ，利用检测机制提取协作比率 p_{ij} ，若节点 i 检测表中包含 l 个相邻节点，节点 i 的主动协作意愿比率是 m_i ，则允许 $l \cdot m_i$ 个节点的转发请求，更新策略函数为 $f_i(p_{ij}, m_j)$ ，并以自身的协作意愿 m_i 作为判定接受和拒绝转发请求的比率。

$$f_i(p_{ij}, m_j) = \begin{cases} 1 & \text{Order}(p_{ij}) < l \cdot m_j \\ 0 & \text{Order}(p_{ij}) \geq l \cdot m_j \end{cases} \quad (3)$$

在上述两种策略下，有些节点为了消除其在邻居节点统计信息中的不良记录，可能会更改身份重入网络，为了避免这种问题，在协作率的计算中增加持久性、收益率因子 benefit 。节点 i 的存在时间用 t_i 表示，则节点 j 的协作率 p_{ij} 可以表示为：

$$p_{ij} = \frac{u_{ij} \cdot w_{ij} \cdot t_j}{\text{benefit}_j \cdot t_i} \quad (4)$$

则若该邻居节点 j 的存在时间越长，那么节点的稳定性越高，时间存在比率越高，协作意愿就越强，最长为从该节点进入该区域自组网时节点就一直存在；收益率体现了一个节点获得外部其他节点服务的收益程度，收益率越高，其他节点对其的服务意愿就会降低。

5 模型分析

5.1 协作机制目标

假设网络中存在路由 r ，源节点为 s ，目标节点为 d ，有 l 个转发节点， $S_i(t)$ 表示节点 i 在时间片 t 上发出数据包量， $F_i(t)$ 表示节点 i 已转发的数据包量， $R_i(t)$ 表示 i 接收到的转发请求，转发节点用 j 表示，每转发一单位量数据包需要消耗能量 E_n 。在研究包转发中的协作问题中，假设网络中包丢失的主要原因是节点的不协作行为，而忽略其他因素，节点 i 监测结果显示转发节点 j 在时间 t 上的转发率为 $u_{ij}(t)$ ，则节点 i 在时间片 t 上成功发送数据包的期望收益可表示为：

$$\text{benefit}_i(t) = E_n \cdot S_i(t) \cdot \prod_{j=1}^l u_{ij}(t) \quad (5)$$

考虑节点 i 的能量使用效率，节点 i 的能量消耗主要用于发送自身作为源节点的数据包，以及作为转发节点转发其他节点的数据包，在转发数据包的决策中

考虑主动协作意愿因子，则节点 i 在时间片 t 上能量消耗的期望值可表示为：

$$\text{cost}_i(t) = E_n \cdot S_i(t) + E_n \cdot \sum_{j=1}^n S_j(t) \cdot j_{ji}(t) \cdot m_i \quad (6)$$

其中 i 具有 n 个相邻节点，对于每一个相邻节点 j ，在路由选择时选择 i 作为转发节点的概率为 $\phi_{ji}(t)$ ，而节点 i 具有主动协作意愿 m_i ，则 i 以 m_i 的概率实施接受转发请求，则节点 i 用于发送和转发数据包的能量消耗由上述因子来决定。由此可得节点消耗能量的实际收益率为：

$$\Delta b_i(t) = \frac{\text{benefit}_i(t)}{\text{cost}_i(t)} \quad (7)$$

根据上述表达式分析，当节点以个人利益为目标时，典型的当它以节点收益率最大化为目标时，主要影响因子包括 $u_{ij}(t)$ 、 $\phi_{ji}(t)$ 、 m_i ，由于节点 j 转发率 $u_{ij}(t)$ 越高、节点 i 被选择概率 $\phi_{ji}(t)$ 越低、节点 i 的协作意愿 m_i 越低时，收益率越大。在策略选择时，若节点 j 转发率稳定，则协作意愿越低越有利；若节点 j 采用被动策略，转发率受节点 i 的协作意愿或表现的影响，则节点 i 应提高协作意愿且相应选择被动策略。当节点以整体系统利益为目标时，典型的当它以最大化网络传输量为目标时，主要影响因子 $u_{ij}(t)$ 、 $\phi_{ji}(t)$ ，由于节点 j 转发率 $u_{ij}(t)$ 越高，系统的传输量越高，在策略选择时，协作意愿越高越有利。

5.2 策略影响分析

重复博弈策略下，将时间视为离散的量，即将整个网络的运作过程分成若干的时间片，节点该时间片内所采取的策略会在下一个时间片作为历史信息为所有节点共知，节点的决策依赖于前面若干时间片所获得的知识来进行。若相邻节点 j 是主动节点， $f_j'(s) = 0$ ，则该节点策略选择具有主动性，不需要依赖节点 j 的表现而变化；若相邻节点 j 是被动节点， $f_j'(s) \neq 0$ ，则该节点策略选择具有被动性，节点的表现将被对方所了解，节点收益受自身协作意愿的影响而变化。当 $f_j'(s) = 0$ ，则节点 i 采取 AIID 策略节点收益最高；采取 AIIC 系统收益最高，系统状态均衡。当 $f_j'(s) = 1$ ，则节点 i 采取 AIID 策略节点无收益；采取 AIIC 系统收益最高，系统状态均衡；采用 TFT 策略时，系统状态均衡。

对于本文中所提出的 LTFT 策略和 LEpTFT 策略，基于统计信息，识别节点长期行为特征从而做出决策，采用协作率因子，以一段时间内对相邻节点的本地检测结果为输入，根据节点的长期表现做出决策，则若

节点在能量充足情况下协作,而在能量制约下降低协作水平时仍可以获得服务,而不会因短期行为而被孤立。

6 结语

移动自组网中节点的协作与否是直接影响其网络整体性能和其他节点收益的重要因素,因此,本文描述了基于长期累计信息的节点协作率识别方法,在一段时间的博弈过程后,根据协作率将节点的划分为若干类型,针对不同类型的实施不同的协作策略。本文将移动自组网中的节点视为有个性的群体成员,允许具有一定的自主性,能够设定协作意愿,在能源允许的范围内或按协作意愿比例执行转发请求。提出根据协作率而决策转发与否的 LTFT、LEpTFT 策略,从而激励协作并惩罚自私,并在此基础上在协作率的计算中增加持久性和收益率因子,解决节点摒弃不良记录,更改身份重入网络的问题。通过该机制一定程度上解决自私节点弱化整体网络性能的影响问题。

参考文献

- 1 Buttyan L, Hubaux J. Stimulating cooperation in self-organizing mobile ad hoc networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications*, 2003,8(5):579 – 592.
- 2 Zhong S, Chen J, Yang YR. Sprite: A simple cheat-proof credit-based system for mobile ad hoc networks. *Proc. of the IEEE INFOCOM 2003*. Washington: IEEE Computer Society, 2003,3: 1987 – 1997.
- 3 Buchegger S, Boudec JYL. Performance Analysis of the CONFIDANT Protocol. *Proceedings of MobiHoc 2002*.
- 4 Michiardi P, Molva R. Core: A Collaborative REputation mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks. *Proceedings of IFIP Communication and Multimedia Security Conference 2002*.
- 5 Anderegg L, Eidenbenz S. Ad hoc-VCG: a truthful and cost-efficient routing protocol for mobile Ad hoc networks with selfish agents. *Proc. of ACM MobiCom*. 2003.
- 6 Srinivasan V, Nuggehalli P. Cooperation in wireless ad hoc networks. *Proc. of the IEEE INFOCOM 2003*. Washington: IEEE Computer Society, 2003.808 – 817.
- 7 Michiardi P, Molva R. Game Theoretic Analysis of Security in Mobile Ad Hoc Networks. *Institut Eurecom Research Report RR – 02 – 070*, April 2002.
- 8 Felegyhazi M, Hubaux JP, Buttyan L. Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. On Mobile Computing*, 2006,5(5):463 – 476.