

文章编号: 1001-0920(2008)09-1077-04

基于演化博弈论的移动 Ad Hoc 网络中继协作机制

张国鹏, 张海林, 赵力强

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 从演化博弈论的角度, 提出一种能有效激励无线 Ad Hoc 网络节点参与数据分组中继协作的纳什均衡策略: G-TFT (Generous Tit for Tat). 以节点中继的分组数与所需的能量开销为均衡点, 建立了中继协作过程的单阶段博弈模型 G , 验证了节点的自私性动机; 将 G 扩展为基于时间序列、策略可转换的演化博弈 R , 并根据 R 的纳什均衡提出了协作激励策略 G-TFT. 仿真结果表明, 通过调整宽容因子 g , G-TFT 能有效地激励节点参与中继协作.

关键词: Ad Hoc 网络; 中继协作; 博弈论; 纳什均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Forwarding cooperation in mobile Ad Hoc networks based on evolution game theory

ZHANG Guo-peng, ZHANG Hai-lin, ZHAO Li-qiang

(National Key Laboratory of Integrated Service Network, Xidian University, Xi'an 710071, China. Correspondent: ZHANG Guo-peng, E-mail: brahms_zgp@163.com)

Abstract: To enhance the packets forwarding cooperation between selfish nodes in mobile Ad Hoc networks, a solution based on evolution game theory is developed. Trading off between energy cost and packets forwarded, the forwarding cooperation is modeled as a single stage game, and the selfish motive of the nodes is testified. Extending the single stage game as an evolution game, a G-TFT (generous Tit for Tat) forwarding strategy is given as the Nash equilibrium for the selfish nodes. Simulation results show that adjusting the generosity factor g under the G-TFT scheme results in effectively stimulated cooperation between the selfish nodes.

Key words: Ad Hoc networks; Forwarding cooperation; Game theory; Nash equilibrium

1 引言

移动 Ad Hoc 网络 (MANET) 中没有集中式管理机制, 网络的系统功能需要由各独立节点进行协作来完成. 比如: 由于无线节点的发送范围有限, MANET 中多跳节点间的数据通信 (即路由功能) 需要节点间的中继协作 (对数据源节点的数据分组进行中继转发) 来完成. 但是移动节点的能量是有限的, 且分组中继需要较大的能量开销, 所以中继节点从节约能量、延长工作时间来考虑, 会拒绝其他节点的中继转发请求. 这被称为节点的不协作或自私行为^[1-4], 它将导致 MANET 的分组路由功能无法实现. 而当前的 MANET 路由协议 (如 DSR, AODV, DSDV 等) 都是基于节点间的完全协作, 并未考虑节点的自私性问题. 因此, 必须在路由协议中嵌入促使

节点参与协作的激励机制, 才能确保 MANET 路由功能的实现.

国内外已提出一些激励节点参与中继协作的方案, 如文献 [2, 3] 使用虚拟货币机制; 文献 [5, 6] 使用经济学的广义 Vickrey 拍卖定理; 文献 [7, 8] 通过建立节点间基于协作状况的声誉机制, 提出了不同的协作激励方案. 这些方案都不同程度地引入了协作控制参数 (如虚拟货币、声誉值等), 这在增加网络计算复杂度的同时, 也增加了节点间的协调和通信开销.

本文从演化博弈论^[9]的角度提出一种激励节点参与协作的中继策略 (G-TFT). 将 MANET 中的所有节点看作一个群体, G-TFT 作为协作激励策略, 在节点之间进行若干次中继交互后, 能被大部分

收稿日期: 2007-06-21; 修回日期: 2007-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60772317); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2006F30).

作者简介: 张国鹏 (1978—), 男, 江苏徐州人, 博士生, 从事无线自组网的研究; 张海林 (1963—), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士生导师, 从事无线 MIMO, OFDM 通信系统的研究.

群体成员所采用. G-TFT 的实现无需引入额外的协作控制参数, 可有效地减小节点的计算和通信开销, 增强网络的分布式性能.

非协作博弈论^[10,11]是在分布式决策环境下, 分析博弈者为最大化个体效用的最优策略选择问题. 演化博弈是非协作博弈的一个分支, 它进一步分析某种博弈策略在一个博弈群体中的长期稳定性问题. 演化博弈的纳什均衡(所有博弈者的最优策略)具有群体稳定性, 即当其他博弈者都执行均衡策略时, 任意博弈者不可能通过单方面地背离均衡策略而获取更多的效用; 同时, 还可揭示执行均衡策略的个体占群体的比例.

2 中继协作单阶段博弈模型

设某 MANET 中有 N 个节点, 用 i 表示任意节点, N_{-i} 表示除 i 以外的节点集合. 数据源节点 i 产生的分组称为 i 的分组. 数据源和目的节点之间一次完整的数据业务传输过程称为一次会话; 由于节点的移动会导致网络拓扑的变化, 一次会话的完成需要多次建立不同的分组路由路径.

采用离散时间系统模型, 将时间单位定义为时隙. 时隙长度的选取与网络拓扑变化的快慢有关, 应大于一个分组在网络中最长路径上的传输时间, 同时小于任一路径的有效时间. 时隙长度作为演化博弈的一个执行周期, 表明了节点执行中继策略的频度. 为便于博弈分析, 作以下假设:

- 1) 在任一时刻 t 内, 节点 i 仅能作为一个会话的源节点;
- 2) 节点间是充分交互的, 即以较大的概率作为彼此的中继节点;
- 3) 节点 i 在一个时隙内只能发送一个分组, 则 i 在每个时隙的中继策略为 forward (中继) 或 drop (拒绝中继).

定义 1 令每个时隙为一个博弈阶段, 则节点间的单阶段分组中继博弈为 $G = (I, P, U)$. 其中: $I = \{i, N_{-i}\}$ 为博弈者集合; $P = \{s_i(t), f_i(t)\}$ 为博弈者的策略组合; $s_i(t)$ 表示在任意博弈阶段 t , N_{-i} 中继 i 的分组数; $f_i(t)$ 表示 i 中继 N_{-i} 的分组数.

令 $b > \bar{c} > 0$, \bar{c} 是所有由源节点 i 发起会话的中继节点数的平均值, b 是 i 的一个分组被成功发送后 i 所获得的收益, c 是 i 中继任意 $j \in N_{-i}$ 的一个分组的开销, 且 b 和 c 均为常数. 定义 i 在单阶段博弈中的效用函数为: 在任意第 t 时隙, i 从为其提供中继服务的 i 个节点中所获取的收益, 即

$$u_i(t) = bs_i(t) - cf_i(t). \quad (1)$$

由节点自私性, c 的取值与中继一个分组所需的能量开销相关^[11]. 博弈 G 的纳什均衡是给定其他参与

者的最优策略 $s_i^*(t)$, i 选择能最大化其效用函数的中继策略 $f_i^*(t)$, 即

$$f_i^*(t) = \arg \max_{f_i(t) \geq 0} u_i(s_i^*(t), f_i(t)). \quad (2)$$

由式(1)知, $u_i(t)$ 最大化的条件是 $f_i(t) = 0$. 因节点的均衡策略具有对称性, 故 G 的纳什均衡为: 每个节点 $i \in N$ 都选择策略 drop ($f_i(t) = 0$). 然而, 当所有节点都选择此均衡策略时, 对于任意节点 i , 都有 $s_i(t) = 0$, 继而 $u_i(t) = 0$. 可见, 博弈 G 的纳什均衡会导致每个节点的效用为 0, 即吞吐量为 0. 这是典型的囚徒困境问题^[10].

3 中继协作的演化博弈模型

实际的 MANET 具有下述性质: 1) 节点具有移动性, 且源节点可随机地发起或结束会话, 因此网络中路由路径的持续时间具有随机性, 在任一路径的有效期内, 节点之间将进行多次单阶段博弈 G , 但各节点并不能确定博弈将在哪一阶段结束; 2) 路由协议端到端的接收反馈机制, 使每个源节点能监测到其分组是否被其他节点成功中继, 即源节点能获取其分组发送成功与否的历史信息. 因此, 上述 MANET 节点的中继协作问题可用演化博弈论进行精确建模.

在演化博弈论中, 博弈者可根据新的信息改进其策略, 具有“过程理性”. 具体说, 演化博弈是一种基于时间序列、多阶段的策略可转换博弈: 1) 同一博弈被周期性地重复执行; 2) 在每个博弈阶段结束时, 任意博弈者所采取的策略作为历史信息能被其他博弈者所共知; 3) 各博弈者据此历史信息制定其在下一博弈阶段所采取的策略. 演化博弈的纳什均衡称为进化稳定性策略 (ESS). 文献[9]证明: 当同一博弈被执行无限次, 或博弈依概率 1 结束, 但博弈者不能确定博弈在哪一阶段结束时, 为获取全部博弈阶段效用之和(或单阶段平均效用)的最大化, 所有参与者在每个博弈阶段都选择 TFT 策略, 是此演化博弈的 ESS.

定义 2 MANET 节点间中继协作的演化博弈 R 是对单阶段博弈 G 的多阶段无限次扩展:

- 1) 在任意博弈阶段 t , 博弈者 i 的策略选择空间为 $\{f_i(t) \mid f_i(t) \geq 0\}$; 博弈者在 t 阶段的效用值取决于此阶段所有博弈者的策略组合 $P(t) = (s_i(t), f_i(t))$.

2) t 阶段开始时, i 所获取的历史信息 $h_i(t)$ 是 $(P(1), P(2), \dots, P(t-1))$ 的函数. 令

$$\Phi_i(t-1) = \begin{matrix} t-1 \\ k=1 \end{matrix} s_i(k), \quad i(t-1) = \begin{matrix} t-1 \\ k=1 \end{matrix} f_i(k),$$

则 $h_i(t) = \phi(t-1) / i(t-1)$. i 在博弈阶段 t 选择的策略为 $f_i(t) = f_i(h_i(t))$, 其中 f_i 为 i 在 t 阶段的决策函数. 则有:

当 $t = 1$ 时, 随机选择策略 forward 或 drop.

当 $t > 1$ 时, 如果 $h_i(t) > 1/\bar{l} - g_i$, 则选择策略 forward; 否则, 选择 drop. 其中 g_i 为常数, 且 $g_i > 0$. g_i 的取值体现了各种策略的协作性质, 具体定义如下文和表 1.

3) 节点 i 的全局效用函数定义为博弈进行到 t 阶段时, i 在以前各单阶段博弈中效用的平均值, 即

$$\tilde{u}_i(t) = [b\phi_i(t) - c_i(t)] / t. \quad (3)$$

定义节点 i 的多阶段策略为各单阶段策略的时间序列 $f_i = (f_i(0), f_i(1), \dots)$, 则演化博弈 R 的 ESS 为任意节点 i 都选择最优多阶段中继策略 $f_i^* = \{f_i^*(1), f_i^*(2), \dots\}$, 以最大化其平均效用期望值

$$f_i^* = \arg \max_{\{f_i(t) \mid t=0,1,2,\dots\}} \{\lim_{t \rightarrow \infty} E[\tilde{u}_i(t)]\}. \quad (4)$$

由文献[9]知, 演化博弈 R 的 ESS 策略 TFT 可描述为: 在各博弈者策略历史可监测的条件下, 某博弈者在 $t = 1$ 阶段选择协作; 在 $t > 1$ 阶段选择对手在 $t - 1$ 阶段的策略. TFT 策略的这种复制动态特性 (即通过复制对手在上一阶段的策略, 对其协作 (非协作) 行为进行回报 (惩罚)), 可有效地激励所有博弈者参与协作^[9,10]. 因此, 本文提出用 TFT 策略作为博弈 R 的纳什均衡, 不仅能使 MANET 系统中的中继协作具有群体稳定性, 而且可有效地激励非协作节点参与中继协作.

根据分析, 假设网络中存在 3 类节点: 1) 采用 TFT 策略的节点; 2) 持续不协作 (CDN) 节点; 3) 持续协作 (CFN) 节点. 表 1 定义了各类节点的决策函数 f_i .

表 1 节点协作类型定义

节点类型	$t = 1$ 博弈阶段策略	g_i
CFN	forward	0
CDN	drop	
TFT	forward	$1/\bar{l}$

在演化博弈中, 为进一步激励群体协作, 包括对抗随机干扰以及某博弈者的失误策略, ESS 在对个体的不协作行为进行惩罚的同时, 还应具有一定的宽容度, 即以一定的概率不报复对方的不协作行为. 定义 g_i ($g_i > 0$) 为节点 i 的宽容因子, 进一步定义协作激励的中继策略 G-TFT (宽容的 TFT) 如下:

Step1: The data-source node i originate a traffic **flow** to the destination node d , $d \in N - i$;

Step2: establish a **session** from i to d ;

```

Step3: while (this session is not completed ) {
    establish a routing path from  $s$  to  $d$ ;
     $t = 1$ ;
    while (this path is available ) {
        if ( $t = 1$ ) forward;
        else {  $h_i(t) = \phi(t-1) / i(t-1)$ ;
              if ( $h_i(t) > 1/\bar{l} - g_i$ ) forward;
              else drop; }
         $t = t + 1$ ; } }

```

Step4: if (node i originate other traffic flows) go to Step 1; else quit.

4 仿真验证与分析

使用仿真软件 ns-2.30 对所提出的中继协作策略 G-TFT 进行模拟实验. 仿真采用路由协议 (DSR). 定义节点的协作水平指数 NAR 为网络中任意节点实际中继的分组数量与需要其中继的分组数量之比. $NAR \in [0, 1]$, 某节点的 NAR 值越大, 说明其参与中继协作的程度越高.

仿真场景设置为: 网络节点数 $N = 50$, 每个节点的移动速度在 $10 \sim 20$ m/s 内呈均匀分布, 移动范围为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$, 每个节点在一个会话结束后立刻发起另一次会话, 且每次会话的持续时间在 $5 \sim 10$ s 内呈均匀分布. 以上设置可确保网络中各节点间有较高的中继交互概率. 每个会话都传输固定速率为 1 Mb/s 的数据流, 分组大小为 512 byte . 每次仿真持续 900 s , 在执行 50 次后求其统计平均值.

宽容因子对节点协作水平的影响如图 1 所示. 其中所有的节点均为 G-TFT 节点, 每个节点的宽容因子相同且均为 g . 仿真结果表明, 只有当 $g > 0.1$ 时, 才能有效地促成网络中节点间的协作 (每个 G-TFT 节点的 $NAR > 0.9$).

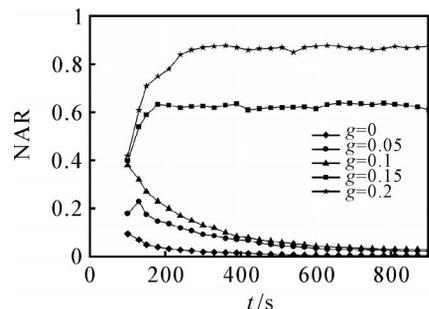


图 1 宽容因子对节点协作水平的影响

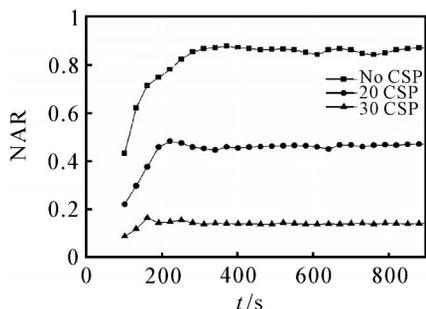


图2 G-TFT策略对节点参与协作的激励

图2给出了网络中CSN节点数分别为0,20,30时,G-TFT节点($g = 0.2$)的协作状况.随着系统中不协作节点比例的增加,G-TFT节点可以自适应地降低其协作水平指数NAR.这样一方面减小了中继能量开销,另一方面有效地惩罚CSN节点的不协作行为,以激励希望获取中继服务的不协作站点产生参与协作的动机.

5 结 论

移动Ad Hoc网络(MANET)最初被用于军事、抢险救灾等节点间完全协作的场合,而在当前许多基于MANET技术的商业网络(如提供Internet无线接入的Mesh网络)中,就不得不考虑自私用户的协作动机.本文应用演化博弈论对MANET的分组中继协作问题进行博弈建模和均衡分析,并根据演化博弈的纳什均衡提出了能有效激励节点参与网络协作的中继策略G-TFT,给出了利用博弈论解决MANET中继协作问题的理论框架和方案.

参考文献(References)

- [1] Srinivasan V, Nuggehalli P, Chiasserini F C. Cooperation in wireless Ad Hoc networks[C]. Proc of IEEE INFOCOM. San Francisco: IEEE Press, 2003: 808-817.
- [2] Mark Felegyhazi, Jean-Pierre Hubaux, Levente Buttyan. Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless Ad Hoc networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(5): 463-476.
- [3] Buchegger S, Boudec J YL. Performance analysis of the CONFIDANT protocol: Cooperation of nodes fairness in

distributed Ad Hoc networks[C]. Proc of IEEE/ACM Workshop on MobiHOC. Dallas: ACM Press, 2002: 9-23.

- [4] 李莉,董树松,温向明.基于博弈理论建立无线自组网中激励合作机制的研究[J].电子与信息学报,2007,29(6):1329-1304.
(Li L, Dong S S, Wen X M. The analyses of cooperation mechanism based on game theory in wireless Ad Hoc network[J]. J of Electronics and Information Technology, 2007, 29(6): 1329-1304.)
- [5] Anderegg L, Eidenbenz S. Ad Hoc-VCG: A truthful and cost efficient routing protocol for mobile Ad Hoc networks with selfish agents[C]. Proc of the ACM MobiCom '03. Brisbane: ACM Press, 2003: 245-259.
- [6] 王玉峰,王文东,袁刚,等. Ad Hoc网络中基于 Vickrey 拍卖的协作激励机制的研究[J].北京邮电大学学报,2005,28(4):50-53.
(Wang Y F, Wang W D, Yuan G, et al. Study on cooperation incentive mechanism based on vickrey auction in Ad Hoc networks[J]. J of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(4): 50-53.)
- [7] Michiardi P, Molva P. Core: A collaborative reputation mechanism to enforce node cooperation in mobile Ad Hoc networks[C]. Proc of the IFIP TC6/TC11 JWC on CAMS. Paris: Kluwer Publisher, 2002: 107-121.
- [8] Hei Q, Khosla P. SORI: A secure and objective reputation-based incentive scheme for Ad-hoc networks [C]. Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Atlanta: IEEE Press, 2004: 825-830.
- [9] Axelrod R. The evolution of cooperation [M]. New York: Basic Books, 1984.
- [10] Fudenberg D, Tirole J. Game theory[M]. Cambridge: MIT Press, 1991.
- [11] 徐心和,郑新颖.棋牌游戏与事件对策[J].控制与决策,2007,22(7):787-790.
(Xu X H, Zheng X Y. Card and board games and event game theory [J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 787-790.)