第 36 卷 第 4 期 计 算 机 工 程 2010 年 2 月
Vol.36 No.4 Computer Engineering February 2010
·网络与通信· 文章编号：1000—3428(2010)04—0107—03 文献标识码：A 中图分类号：TP393.08

无线自组网中节点协作的纳什均衡研究

徐许亮，董荣胜，刘亮龙
(桂林电子科技大学计算机与控制学院，桂林 541004)

摘 要：根据自私节点的特性，提出节点协作的博弈模型。针对单阶段博弈及采取礼尚往来策略、冷酷策略、单步触发策略的重复博弈，分析并比较实现节点协作的纳什均衡条件。结果表明，单阶段博弈中自私节点的纳什均衡类似于囚徒困境，重复博弈采用礼尚往来策略时，实现最佳纳什均衡的临界值最小，相比其他策略更易实现协作。
关键词：无线自组网；节点协作；博弈论；纳什均衡

Research on Nash Equilibrium of Node Cooperation in Wireless Ad Hoc Network

XU Xu-liang, DONG Rong-sheng, LIU Liang-long
(School of Computer and Control, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

【**Abstract**】According to the properties of selfish nodes, this paper proposes a game model of node cooperation, analyzes and compares Nash equilibrium of achieving node cooperation for single-stage game and repeated game that adopts Tit-For-Tat(TFT), Grim Strategy(GS) and One-step Trigger(OT). The results show that the Nash equilibrium of selfish node in single-stage game is similar to Prisoner’s Dilemma, and threshold value in repeated game using Tit-For-Tat is minimum, which is easier to achieve cooperation than other strategies.
【**Key words**】wireless Ad Hoc network; node cooperation; game theory; Nash equilibrium

1 概述

无线自组网是由一组带有无线收发装置的自主性设备通过无线信道连接而成的自治系统。路由发现及分组转发功能通过普通节点的共同协作来完成。无线自组网包括军事通信网络、传感器网络等。这些网络的共同特点是所有节点拥有共同的目标或任务，并受同一个管理机构控制[1]。这些特点使节点愿意协作，出现自私节点的几率大幅下降，从而大幅降低了对网络性能的危害。而在没有单一管理机构控制的 Ad Hoc 网络，如民用型 Ad Hoc 网络[2-3]，节点协作不能得到保证。因为在这样的网络中，所有节点没有共同的目标或任务，同时协助其他节点要消耗自己有限的资源(如电源能量、CPU 处理时间)，所以一些节点为了保存资源，会拒绝提供路由发现和分组转发服务[4]。

无线自组网中的自私节点对网络性能危害很大。文献[5]对网络中节点的自私行为进行了仿真分析，结果表明，当自私节点数占全网总节点数的 10%~40%时，网络的包传输率、吞吐量会下降 16%~32%。因此，确定自私节点协作所需满足的条件对改善网络性能非常重要。

本文建立了无线自组网自私节点行为的博弈论模型，通过分析确定了单阶段博弈和重复博弈中实现节点协作的纳什均衡条件，并对条件进行了比较和分析。

2 网络基本假设

本文建立的无线自组网基于以下假设：

(1)网络中存在 n 个节点，并且都是理性且自私的。理性且自私是指节点不会自愿提供路由发现和分组转发服务，并始终将能够最大化自身效益的策略作为最佳策略。

(2)时间 t 被分隔成时间槽 $t_1, t_2,\cdots, t_n$，节点在每个时间槽内完成一次会话。

(3)在整个会话过程中，路由没有失效，节点也没有出现故障。

(4)所有会话中分组最终到达目的节点所经过的平均跳数为 m，整个网络的转发负载是均衡分布的。

(5)任何节点在接收和发送(包括转发)分组时都要消耗能量。与之相比，节点在处理分组时的能量消耗可以忽略不计。

(6)所有分组长度相同，节点发送或接收一个分组时所消耗的能量相等。

3 节点协作的博弈模型

本文将网络中节点的交互模拟成为博弈。任一节点 $i\in\{1,2,\cdots,n\}$在每个会话中都会传输一个分组，一个会话为博弈的一个阶段。每个节点 i 在每一阶段的策略空间为 $S_i=\{C_i, NC_i\}$，其中，C 表示协作；NC 表示拒绝协作，即节点不愿意转发其他节点的分组。在博弈的每一阶段，每个节点都会选择一个策略。

在博弈的任一阶段中，每个节点扮演 3 个角色中的一个，即源节点、转发节点或目的节点。节点发送一个分组的费用用 c_s 表示；成功发送分组后得到的利益用 b_s 表示；转发一个分组的费用用 c_f 表示；接收一个分组的费用用 c_r 表示；接收一个分组的利益为 0。因此，节点的博弈模型如图 1 所示。其中，节点只有在自身的通信成功后才能得到利益 b_s。由假设(1)知，网络中共有 n 个节点，假设协作节点占总节点的比例为 λ，那么网络中参与协作的节点数为 $n\lambda$。又由假设(4)可

基金项目：广西自然科学基金资助项目(0991242)；广西研究生教育创新计划基金资助项目(2008105950812M422)
作者简介：徐许亮(1983－)，男，硕士研究生，主研方向：形式化方法，网络安全；董荣胜，教授；刘亮龙，硕士研究生
收稿日期：2009-06-30 **E-mail：**xxliop@yahoo.com.cn

知，平均每个分组经过 mn 跳的接收和 mn 跳的转发才能成功到达目的节点，且整个网络的负载是均衡分布的，因此，在单阶段博弈中，每个协作节点在网络中接收到 $mn/n\lambda=m/\lambda$ 个分组，且 $m/\lambda\geq 1$。而不参与协作的节点没有提供转发服务，因此，没有转发消耗。

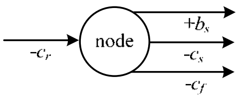

图 1　节点的博弈模型

4　单阶段博弈的纳什均衡

通过以上的模型假设，可以得到任一节点 i 在不同情况下($\lambda=0$ 和 $\lambda=1$ 除外)的效用函数 U_i。其中，效用函数上标 s 表示成功，f 表示失败；下标 c 表示节点愿意协作，d 表示节点拒绝协作。因此，得到

$$U_{ic}^{s}=b_s-(\frac{m}{\lambda})(c_r+c_f-c_s) \tag{1}$$

$$U_{ic}^{f}=-(\frac{m}{\lambda})(c_r+c_f-c_s) \tag{2}$$

$$U_{id}^{s}=b_s-(\frac{m}{\lambda})c_s \tag{3}$$

$$U_{id}^{f}=-(\frac{m}{\lambda})(c_f-c_s) \tag{4}$$

其中，式(1)为节点 i 协作成功的效用函数；式(2)为节点 i 协作失败的效用函数；式(3)为节点 i 拒绝协作成功的效用函数；式(4)为节点拒绝协作失败的效用函数。特殊地，当 $\lambda=0$，即没有节点愿意协作时，以上公式均不成立，这时所有节点的效用都为 0，即 $U_{ic}^{f}=U_{ic}^{s}=U_{id}^{s}=U_{id}^{s}=0$；当 $\lambda=1$，即所有节点都愿意协作时，所有节点的效用都相等，式(2)演变为：$U=b_s-m(c_r+c_f-c_s)$。由于 $m/\lambda\geq 1$，比较式(1)与式(3)可得，当节点发送自己的分组成功后，它不参与协作会比参与协作得到更多的利益；而比较式(2)与式(4)可得，当节点发送自己的分组失败后，它不参与协作也能够比参与协作得到更多的利益，因此在单阶段博弈(即博弈只进行一次)中，无论节点是否将自己的分组发送成功，不协作策略是其最佳策略。所以，单阶段博弈的结局类似于 n 维囚徒困境，所有节点选择不协作策略形成了单阶段博弈唯一的纳什均衡。

5　重复博弈的纳什均衡

由上文可知，如果节点间的交互只进行一次，博弈的结局与囚徒困境相似，所以，不是一个最佳结局。当博弈重复多次时会有其他的均衡结果出现。博弈论的定理表明，当博弈重复进行 K 次且 K 是确定的数值时，博弈的最终结果只是单阶段博弈的 K 次重复。但是，如果博弈重复进行的次数不确定，且博弈的各参与者依据对其他节点行为的观察来制定自己下一阶段的策略，就可以使各参与者的行为发生改变，他们会从长远利益考虑，放弃不协作策略，选择能为他们带来更大利益的协作策略。

5.1　节点协作的博弈模型的扩展

重复博弈与单阶段博弈不同，它依赖参与者之前的策略选择，即节点必须考虑当前的策略选择对未来利益的影响。本文对模型进行了如下扩展：每个节点在每一时间槽内完成一次会话，即博弈的一个阶段，且在每一阶段都要做出策略选择。假设节点每一阶段采取协作策略的概率为 P，其中，$P=0$ 意味着节点会丢弃所有要转发的分组；$P=1$ 时节点会一直转发分组。根据重复博弈原理，节点的利益会在每一阶段以 $\delta(\delta<1)$的比率进行折扣，它反映了节点过去的行为对以后利益的影响[6]。在任一博弈中，称 i 为节点自身，$-i$ 为除节点 i 以外的其他参与者。如果设 B 为节点在一阶段末尾时的利益所得，R 为节点在一阶段中消耗的资源的总费用，则有 $B=b_s$, $R=c_r+c_f+c_s$。因此，节点在每一阶段(即时间槽 t_n 内)的效用函数为

$$u_i^{t_n}=P_{-i}^{t_n}B-P_i^{t_n}R \tag{5}$$

依据博弈论知识，在整个博弈的最后，每个节点的效用函数为

$$U_i=(1-\delta)\sum_{n=0}^{\infty}\delta^n u_i^{t_n} \tag{6}$$

下面对 3 种能够激励节点协作的经典策略的纳什均衡条件进行分析和比较。

5.2　礼尚往来策略的纳什均衡

礼尚往来(Tit-For-Tat, TFT)策略是促使囚犯从重复囚徒困境中摆脱不合作状况的有效策略[6]。策略的内容为：各节点都以协作策略开始博弈，在以后的每个阶段，节点 i 都会模仿其对手-i 在上一阶段的行为。其概率模型为

$$P_i^{t_n}=\begin{cases}1 & n=0\\ p_{-i}^{t_{n-1}} & n>0\end{cases} \tag{7}$$

TFT 策略能够激励节点协作是因为节点当前的策略选择会对其今后利益产生影响。下面对每个节点都采取 TFT 策略的纳什均衡条件进行分析。

如果所有节点的协作概率都维持为 1，则节点间的协作会一直持续下去。但如果在第 2 阶段，节点 i 单独将自己的协作概率变为 $P_i^{t_1}=\theta$，则其对手会在第 3 阶段设它们的协作概率为 $P_{-i}^{t_2}=\theta$，而 i 在第 3 阶段依然模仿其对手在第 2 阶段的协作概率，因此，$P_i^{t_2}=1$。于是上述过程会在以后的阶段中重复进行，最终产生 2 个交替的序列：

$$\begin{cases}P_i^{t_n}=\{\theta,\ 1,\ \theta,\ 1,\ \theta,\cdots\}\\ P_{-i}^{t_n}=\{1,\ \theta,\ 1,\ \theta,\ 1,\cdots\}\end{cases} \tag{8}$$

将式(8)代入式(5)和式(6)后可得节点 i 采取礼尚往来策略最终所得的利益为

$$\begin{aligned}U_i&=(1-\delta)\sum_{n=0}^{\infty}\delta^n(P_{-i}^{t_n}B-P_i^{t_n}R)=\\&(1-\delta)[(B-\theta R)+\delta(\theta B-R)](1+\delta^2+\delta^4+\cdots)=\\&\frac{(B-\theta R)+\delta(\theta B-R)}{1+\delta}\end{aligned} \tag{9}$$

因此，节点只有在它们能从中获得利益即 $U_i\geq 0$ 时才主动采取 TFT 策略。于是得到节点采取礼尚往来策略时最佳纳什均衡的条件为

$$\frac{B}{R}\geq\frac{\theta+\delta}{1+\theta\delta} \tag{10}$$

5.3　冷酷策略的纳什均衡

冷酷策略(Grim Strategy, GS)也是用在重复博弈中的一个触发策略。节点最初都以协作策略开始博弈，并继续保持协作策略，直到某节点 i 的对手在随后的某阶段中采取拒绝策略，则节点 i 在以后的所有阶段中都会采取拒绝策略。这在网络中意味着一旦某个节点实施一次不协作行为，它将被网络永远孤立起来。其概率模型为

$$P_i^{t_n}=\begin{cases}1 & n=0\\ 1 & \forall\upsilon<n,\ P_{-i}^{t_\upsilon}\geq h 且 n>0\\ 0 & 其他\end{cases} \tag{11}$$

其中，h 是节点的容忍度，一旦 $P_i<h$，就会触发其他节点选

择不协作策略。下面对每个节点都采取冷酷策略的纳什均衡条件进行分析。

假定所有节点都采取冷酷策略，那么协作策略会一直持续到某节点 i 在博弈的某阶段将自己的转发概率改为 $P_i^{t_0}=\theta$。根据节点 i 的叛离程度，其对手会作出如下反应：(1)叛离程度较轻，即 $\theta\geq h$，则这个叛离会被其对手忽略，它们会继续采取协作策略。(2)叛离较大，即 $\theta<h$，则会触发其对手在博弈以后的阶段中一直对节点 i 采取拒绝协作的策略，节点 i 则永远被网络孤立起来。如果只考虑最差的情况，即 $\theta<h$，那么协作概率序列为

$$\begin{cases}P_i^{t_n}=\{\theta,\ 1,\ 0,\ 0,\cdots\}\\ P_{-i}^{t_n}=\{1,\ 0,\ 0,\ 0,\cdots\}\end{cases} \tag{12}$$

将式(12)代入式(5)和式(6)后可得节点 i 采取冷酷策略最终所得的利益为

$$U_i=(1-\delta)\sum_{n=0}^{\infty}\delta^n(P_{-i}^{t_n}B-P_i^{t_n}R)=(1-\delta)[(B-\theta R)-\delta R] \tag{13}$$

因此，节点只有在它们能从中获得利益即 $U_i\geq 0$ 时才主动采取 GT 策略。于是得到节点采取冷酷策略时最佳纳什均衡的条件为

$$\frac{B}{R}\geq\theta+\delta \tag{14}$$

5.4 单步触发策略的纳什均衡

单步触发(One-step Trigger, OT)策略是 GT 策略和 TFT 策略的综合。其内容为：节点最初都以协作策略开始博弈，并在随后的每个阶段模仿其对手的行为，直到节点 i 的对手在之后某阶段中采取的协作概率低于某个特定的阈值时，节点 i 将自己的协作概率降为 0，但只降一次，然后又开始模仿其对手的行为。单步触发策略的概率模型为

$$P_i^{t_n}=\begin{cases}1 & n=0\\ p_{-i}^{t_{n-1}} & P_{-i}^{t_{n-1}}\geq h\text{且}n>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{15}$$

其中，h 是节点的容忍度，即特定的阈值。一旦 $P_i<h$，就会触发其他节点选择不协作策略，即 $P_{-i}=0$。下面对每个节点都采取单步触发策略的纳什均衡条件进行分析。

假定所有节点都采取单步触发策略，那么协作策略会一直持续到节点 i 在博弈的某阶段将自己的转发概率改为 $P_i^{t_0}=\theta$。且其对手会根据节点 i 的叛离程度作出如下反应：(1)叛离程度较轻，即 $\theta\geq h$，则这个叛离会被其对手忽略。(2)叛离程度较大，即 $\theta<h$，则会触发其对手在博弈的下一阶段采取拒绝协作的策略，而节点 i 会在下一阶段被孤立起来。但这种状况只维持一个阶段，在此阶段之后，节点 i 的对手会继续模仿它的行为。如果只考虑最差的情况，即 $\theta<h$，那么协作概率序列为

$$\begin{cases}P_i^{t_n}=\{\theta,\ 1,\ 0,\ 1,\ 0,\cdots\}\\ P_{-i}^{t_n}=\{1,\ 0,\ 1,\ 0,\ 1,\cdots\}\end{cases} \tag{16}$$

将式(16)代入式(5)和式(6)后可得节点 i 采取单步触发策略最终所得的利益为

$$U_i=(1-\delta)\sum_{n=0}^{\infty}\delta^n(P_{-i}^{t_n}B-P_i^{t_n}R)=$$
$$(1-\delta)[(B-\delta R)(1+\delta^2+\delta^4+\cdots)-\theta R] \tag{17}$$

同理，节点只有在它们能从中获得利益即 $U_i\geq 0$ 时才会主动采取 OT 策略。于是得到节点采取单步触发策略时最佳纳什均衡的条件为

$$\frac{B}{R}\geq\theta+\delta-\theta\delta^2 \tag{18}$$

5.5 策略比较及结果分析

由以上分析可知，3 种策略中哪个策略在相同情况(即 θ, δ 值相同)下的临界值越小，那么此策略实现最佳纳什均衡的条件就越宽松，会比其他策略更容易实现最佳纳什均衡。

图 2 为 TFT 策略、GS 策略及 OT 策略达到最佳纳什均衡的临界值对比。可以看出，3 种策略的临界值明显分成 3 层，其中，最上层为 GS 策略；中间层为 OT 策略；最下层为 TFT 策略，因此，TFT 策略实现最佳纳什均衡的临界值最小，而 GS 策略的临界值最大。所以，TFT 策略是其中最优的策略，是理性节点在重复博弈中的首选策略，而 GS 是最差的策略。

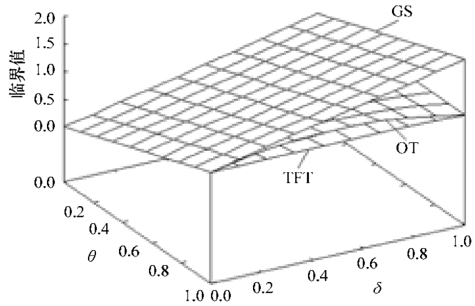

图 2　3 种策略实现最佳纳什均衡的临界值比较

6　结束语

无线自组网中的路由发现和分组转发等基本功能需要节点的相互协作才能完成。但是节点资源受限，自私节点为了保存资源会不参与协作，这将严重影响网络的性能。本文根据自私节点的特点，建立了节点协作的博弈论模型，分析并比较了单阶段博弈和不同策略下重复博弈的纳什均衡条件。结果表明，在单阶段博弈中，自私节点交互的结果类似于囚徒困境；而在重复博弈中，节点采取礼尚往来策略会比其他策略更容易实现协作。

参考文献

[1] Buttyan L, Hubaux J P. Stimulating Cooperation in Self-organizing Mobile Ad Hoc Networks[J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications, 2003, 8(5): 579-592.

[2] Nadeem T, Dashtinezhad S, Liao Chunyuan, et al. TrafficView: Traffic Data Dissemination Using Car-to-car Communication[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computer and Communication Review, 2004, 8(3): 6-19.

[3] 陈立家, 江　昊. 车用自组织网络传输控制研究[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1477-1490.

[4] Soltanali S, Pirahesh S, Niksefat S, et al. An Efficient Scheme to Motivate Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proc. of ICN'07. Athens, Greece: [s. n.], 2007.

[5] Marti S, Giuli T, Lai Kevin, et al. Mitigating Routing Misbehavior in Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proc. of IEEE Int'l Conference on Mobile Computing and Networking. [S. l.]: IEEE Press, 2000.

[6] DaSilva L A, Srivastava V. Node Participation in Peer-to-Peer and Ad Hoc Networks: A Game Theoretic Formulation[C]//Proc. of the 1st Workshop on Games and Emergent Behavior in Distributed Computing Environments. Birmingham, UK: [s. n.], 2004.

编辑　张　帆