

无线传感器网络节点包转发策略重复博弈分析

刘 田¹, 周四清²

(暨南大学 1. 信息科学技术学院; 2. 经济学院, 广东 广州 510632)

[摘 要] 针对无线传感器网络节点影响网络可用性与整体性能的自私行为,建立了一种传感器网络节点包转发策略的重复博弈模型.利用节点与邻居节点的重复博弈过程,理性节点采取合作策略,确保背离的自私节点参与合作;证明了该无限重复博弈模型可达到纳什均衡,能够有效地促进节点自发合作.仿真结果表明,在当前最优包转发概率下,节点之间合作获得增强,节点不愿采取背离策略,网络整体效用接近理想状态.

[关键词] 无线传感器网络; 包转发; 自私节点; 博弈论; 纳什均衡

[中图分类号] TP311.12 [文献标识码] A [文章编号] 1000-9965(2009)05-0514-04

Repeated Game Modeling of Packet Forwarding Strategies in Wireless Sensor Network Nodes

LIU Tian¹, ZHOU Si-qing²

(1. College of Information Science & Technology,

2. College of Economics, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

[Abstract] By analyzing the selfish behavior of the wireless sensor network node which affect the network availability and performance, we propose the repeated game model to solve packet forwarding problem in wireless sensor networks. Through the repeated games process among the node and neighbor node, the rational nodes will take the cooperation strategy to ensure the deviation selfish nodes join in the cooperation, and show that this infinitely repeated game model achieves the Nash equilibrium, and enables the nodes to adopt the spontaneous cooperation strategy. The simulation results verify that the nodes do not want to take the departure from the cooperation strategy at the probability of the optimal packet forwarding, the cooperation greatly enhanced among the nodes, the overall effectiveness of the network close to the ideal state.

[Key words] Wireless Sensor Network(WSN); packet forwarding; selfish node; Game Theory; Nash equilibrium

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量集成传感器、数据处理单元和短距

离无线通信模块的节点组成,它是以数据为中心的无线自组织网络,其中每个节点都具有一定的计算

[收稿日期] 2009-03-17

[基金项目] 广东省软科学资助项目《无线传感器网络关键技术自主创新与产业化战略研究》(2008B070800029);暨南大学引进优秀人才培养启动基金资助项目(51205068)

[作者简介] 刘 田(1984-),男,硕士研究生,研究方向:无线传感器网络

通讯作者:周四清(1964-),男,博士(后),副教授,研究方向:智能信息处理,能源金融

和感知能力、采集和处理网络覆盖区域中目标信息,这个网络可在无人看管环境下开展工作^[1]。

由大量节点组成的无线传感器网络中每个节点的通信范围有限,节点之间需要相互协作来传输数据包,由于自组织网络缺乏集中控制机制,无法确保协作机制的实施,使得网络节点行为呈现出一定的理性化趋势:网络节点为了实现自身利益最大化,拒绝耗费自身有限的能量为其它节点提供转发服务,这种自私性行为严重影响了网络性能^[2]。因此在检测和预防网络中节点自私行为时,必须考虑网络的可用性和整体性能,这也是设计网络的重要因素之一。

P. Michiardi 和 R. Molva 在文献[3]中分析了适用于检测和预防 Ad Hoc 网络节点自私行为的加强合作机制特性,并证明了当使用 CORE 协议时由大量节点组成的 Ad Hoc 网络中节点之间合作是可能的。M. Felegyhazi, L. Buttyan 和 J. P. Hubaux 在文献[4]中提出了一种方案,引导参与节点之间合作,并证明了在网络拓扑的完全信息条件下,所有执行该惩戒机制的节点行为策略构成一个纳什均衡,但没有考虑网络的整体效用。戴沁芸等在文献[5]中证明了基于博弈论的帕累托最优是存在的,偏离这个帕累托区间的节点行为都会导致其它节点的效用下降,但是也未考虑网络的整体效用。

基于以上研究文献,本研究通过建立无线传感器网络节点包转发策略的重复博弈模型,确保网络节点之间相互协作,在给出理论证明的基础上,数值仿真比较在合作和非合作情况下网络整体效益。

1 无线传感网络包转发策略重复博弈分析

为方便分析,我们假设:

(1)整个无线传感器网络运行时间由一系列离散的协作时隙 t 构成,所有传送的数据包长度相同,并且单一时隙长度足以保证每个数据包均能抵达目的地节点。

(2)所有的传输路由是预先设定的,在任一时刻里,每个网络节点均有数据包需要发送,通过中继节点将数据包转发到目的地节点,并且在该时隙内由源节点和中继节点所构成的数据传输路由不发生改变。

(3)在上述(1)、(2)假设下,如果一个中继节点拒绝转发,那么数据传输就失败,则通知源节点,数据包重发。

1.1 构造网络节点的效用函数

在无线传感器网络中,一个网络节点能否与目的地节点连通,方法之一就是检测网络中是否存在自私节点。

(1)假设无线传感器网络中存在 N 个节点 ($N = \{1, \dots, n\}$),源节点与目的节点集合 $\{S_i, D_i\}$, 其中, $i = 1, 2, \dots, M$ 。

(2)设第 k 节点有 N_k 条传输路由,定义路由集合 $R = \{S_i; I_k^1, I_k^2 \dots I_k^{N_k}; D_i\}$, 节点 k 在第 i 条路由上的中继节点集合为 I_R^i 。

(3)假设网络中节点转发接收到数据包的概率为 α_k 。

(4)对每个节点来说,成功地转发一个数据包或者接收到一个数据包的收益为 G , 每转发一个数据包的损耗为 F , B_k 表示其他节点发送给节点 k 传送请求的概率。

(5)假设节点 k 发送数据包到路由的概率为 P_k^i , 则有 $\sum_{i=1}^{N_k} P_k^i = 1$ 。

P. Michiardi 和 R. Molva 在文献[3]中提出了式(1)的效用函数

$$U(b_j) = E_r(1 - b_j) \prod (\alpha_j, j \in I_R^i) = E_j b_j \alpha_k \quad (1)$$

我们通过对式(1)进行分析,综合考虑历史策略空间和网络损耗,并以此来决定网络节点下一阶段的博弈行为,构造网络节点 k 的效用函数 U_k 为

$$U_k = \sum_{i=1}^{N_k} P_k^i G f_i(\Gamma^{k-1}) \prod (\alpha_j, j \in I_R^i) - E f_i(\Gamma^{k-1}) \alpha_k B_k \quad (2)$$

其中, \prod 表示成功传输的概率,这是与路由上网络节点转发包概率相关的一个函数。 $\Gamma^k = (h^0, h^1, h^2, \dots, h^k)$ 表示网络节点 k 过去的行为策略空间,网络节点 k 的选择策略 h_k 可表示为

$$h_k^i = f_i(\Gamma^{k-1}) \quad (3)$$

1.2 重复博弈模型及其纳什均衡分析

重复博弈 (Repeated Games) 是指基本博弈 (也称阶段博弈) 重复进行 (有限次或无限次) 构成的博弈过程,是分阶段有先后次序的一个动态选择过程,属于动态博弈的范畴。基于无线传感器网络的动态特性,以及网络节点当前包转发策略行为选择会影响后继网络节点的策略选择,网络节点之间交互可以被整体视为重复的多阶段动态博弈。根据重复博弈论中基于贴现准则的收益评估方式,有如下定义

定义1^[6]:假设重复博弈具有已知的时间跨度 T ,在每一时隙 t ,网络节点可以观察到时隙 $1, \dots, t-1$ 所有网络节点的行为. 贴现因子 $\delta \in (0, 1)$. 则每个网络节点总的效用表述为:

$$U_{total}(T, \delta) = \sum_{t=0}^T \delta^t U_k(t) \quad (4)$$

其中, $U_k(t)$ 表示节点 k 在时隙 t 进行阶段博弈的收益. δ 可视为对网络节点 k 协作耐心程度的综合度量: δ 越大,表示节点 k 越耐心,也越重视长期利益;反之,则节点 k 越重视眼前利益,其中 δ 的取值一般由无线传感器网络性质与应用场景决定,临时构建的无线传感器网络其值通常要小于长期存在的无线传感器网络,对于应用模式相对稳定的无线传感器网络, δ 则要大于动态的无线传感器网络.

如果 $T \rightarrow \infty$,上述博弈过程可视为无限重复博弈^[7],此时节点 k 的平均收益可表述为:

$$\bar{U}_k(\infty, \delta) = (1 - \delta) \sum_{i=0}^{\infty} \delta^i U_k(i) \quad (5)$$

标准化因子 $(1 - \delta)$ 用来以统一阶段博弈和重复博弈的收益:每时隙单元效用都标准化为1.

在基于非合作的博弈过程中,单个网络节点并不了解其它网络节点的状态,他们只能以分布式方式从自身利益角度来竞争无线传感器网络的有限资源. 因此,每一时隙网络节点有两种行为策略选择:正常,即转发数据包;或者是表现为自私,即为保存有限电池能量而丢弃接收到的数据包.

当网络节点表现为理性时,所有网络节点调整自己的转发包概率以使自身效用最大化:

$$\max_{0 \leq \alpha_k \leq 1} U_k(\alpha_k, \alpha_{-k}) \quad (6)$$

其中, α_{-k} 表示其它网络节点转发包概率, $\alpha_{-k} = (\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}, \alpha_{k+1}, \dots, \alpha_K)^T$.

为了分析上述博弈模型,我们引入博弈纳什均衡概念,纳什均衡是由所有网络节点的最优策略组成,即在给定其它网络节点策略的情况下,没有节点有足够的理由打破这种均衡.

定义2^[6]:定义 $\Omega \in [0, 1]$,策略组合 $[\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_K]^T$ 为博弈纳什均衡,如果

$$U_k(\hat{\alpha}_k, \alpha_{-k}) \leq U_k(\bar{\alpha}_k, \alpha_{-k}), \forall k, \forall \bar{\alpha}_k \in \Omega, \alpha_{-k} \in \Omega^{K-1} \quad (7)$$

即当其它节点转发包的概率固定时,单个网络节点不能通过改变自身转发包的概率达到增加自身效用的目的.

从式(7)可见,当 $\hat{\alpha}_k = 0, \forall k$ 时,策略为整个博弈的占优策略,即当所有理性节点均采用这一策略

时,博弈将处于纳什均衡. 此时网络节点收益取决于其它节点转发数据包的概率,与自己的行为无关,节点有充分的理由不转发数据包,当所有的节点都不转发数据包时,数据包成功传送的概率为0,网络中将不存在任何协作行为,从而造成整个网络瘫痪. 即当所有节点处于纳什均衡状态时,节点之间互不协作,所有节点收益均为0. 反之,如果节点之间相互协作,成功转发其它节点数据包,则所有节点都将有收益. 因此我们需要建立一个基于合作的重复博弈模型来加强节点之间协作,通过调整最佳包转发策略,使得网络节点的效用严格处于纳什均衡时的效用.

1.3 无限重复的包转发策略博弈分析

给定阶段博弈 $R = \langle \Gamma; h_1, \dots, h_n; u_1, \dots, u_n \rangle$,设 $(\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_n)$ 为纳什均衡 R 的收益, $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ 为任一可行收益. 假定 δ 无限接近于1,在无限重复博弈中,当平均收益 $\alpha_i > \hat{\alpha}_i, \forall i$ 时,存在均衡 $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$,也就是说,如果网络节点有足够的耐心,那么任何可行的网络节点理性收益都能在均衡中得到实现^[7].

假定节点 k 在每一个时隙中所需转发报文数量的平均值为一定值. 考察重复转发博弈过程可以发现,一旦 k 选择背离,那么此刻它将采取持续背离的策略. 这是因为,如果一次背离能够令 k 额外获利,那么在孤立-重入结束之后, k 将再次面临同样的决策场景,即在无限重复的转发博弈过程中,重入网络之后的自私节点所面临的子博弈局势恰好为原博弈本身. 为了消除网络节点背离动机,必须保证网络节点 k 持续合作时的收益不低于重复背离收益. 这一条件可用贴现形式表述为:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \delta^i u_k(t) \geq \sum_{\tau=0}^{t-1} \delta^{\tau} u_k(\tau) + \delta^t u_{devi}(t) + \sum_{\tau=t}^{t+T'} \delta^{\tau} u_{isol}(t) + \sum_{\tau=t+T'+1}^{\infty} \delta^{\tau} u_k(t) \quad (8)$$

其中 $u_{devi}(t)$ 为背离时的收益, $u_{isol}(t)$ 为节点被孤立时的收益, T' 为节点被孤立的时间. 节点被孤立时其收益远小于参与合作时的收益,某时隙背离的收益又大于合作收益, p 表示节点合作收益与背离收益的比值因子,根据上述有 $u_{isol}(t) \ll u_k(t) < u_{devi}(t)$,则得出如下关系,

$$\frac{u_k(t)}{u_{devi}(t)} \leq p \in (0, 1) \Rightarrow \delta \leq \frac{T'}{\sqrt{1/p(T'+1)}} \quad (9)$$

则肯定存在单一时隙 T' 和贴现因子 δ 使得网络节点消除背离动机,保证持续合作的收益不低于重

复背离收益。这意味着网络节点平均协作收益严格大于背离收益,任何理性的网络节点不会从合作状态中背离。图1是贴现因子 δ 与 T' 的关系图。

因此,重复博弈促使网络节点由自私行为调整为合作行为。一旦网络节点在某一时刻表现为恶意背叛行为,在以后相继时隙里,其它网络节点将对这个网络节点采取孤立行动。

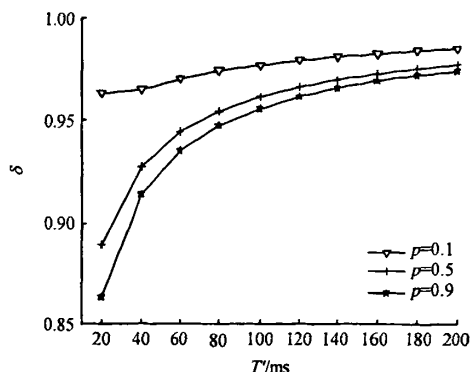


图1 贴现因子 δ 与时隙 T' 的关系

孤立行动使其自私行为获得的短期收益在未来因被其它网络节点孤立的损耗而被抵消,从而迫使网络节点转而采取协作行为。

2 数值仿真与网络性能评估

假设无线传感器网络节点随机分布,通过修正系统达到最佳转发概率,从而改善网络整体性能。仿真时取 $p=0.5$,贴现因子 $\delta=0.95$,假定转发损耗比 $F/G=0.1$,则保证持续合作的收益不低于重复背叛收益。图2显示了网络节点随着时间变化的效用函数值和包转发概率变化。

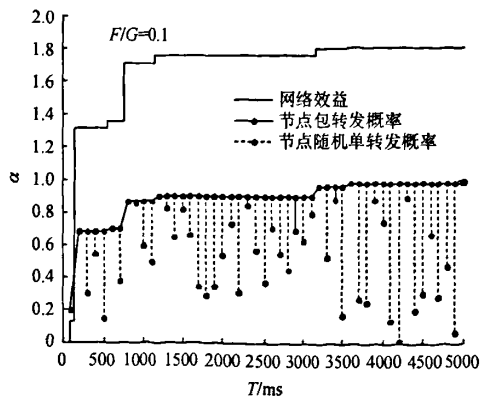


图2 节点随时间变化效用和包转发概率关系

由图2可知,效用函数是一个非递减的函数。

在每个时隙,所有的网络节点观察到自己的性能是否有改善。如果没有,就把 α 的值换为原来的值,否则,节点设置 α 为其转发数据包的概率,并把阈值更新为当前效用。在初始条件下,由于是非协作传输, $\alpha=0$ 。系统试图找到一个更好的包转发率,使所有的节点采用该 α 值。

但是,由于背离时隙 T' 并没有调整到一个最优值,节点将会从背离中收益。在整个阶段, T' 逐渐增加直到所有的节点意识到存在一个足够长的惩戒时隙,从而使节点不能从背离中收益(通过仿真得知 T' 收敛于98)。在系统达到稳定状态时,不断调整节点转发数据包的概率 α 直到找到最优的解决方案。当 α 接近于最优值时,背离收益减少,节点不愿意采取背离策略,整个网络以协作状态运行。

图3显示了网络节点在合作博弈与非合作情况下网络的整体效用情况。由图3可知,在基于合作的重复博弈过程中,网络节点合作时的收益强于非合作状态时的收益,整体效益接近理想状态,任何网络节点不愿从合作机制中背离,网络整体性能得到了明显的改善。

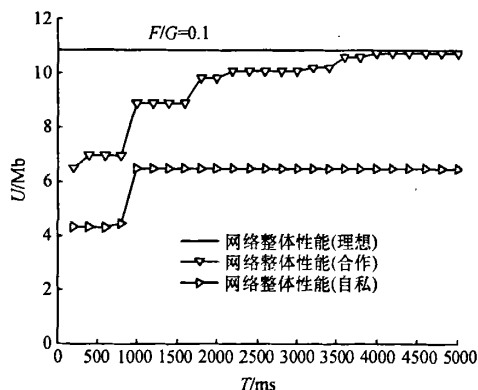


图3 节点在合作博弈与非合作情况下网络的整体效用

3 小结

考虑到无线传感器网络节点自私行为,运用重复博弈理论,我们建立了一种传感器网络节点包转发策略的重复博弈模型。通过网络节点与邻居节点的重复博弈过程,理性节点将采取合作策略,确保背离的自私节点参与合作,使网络节点以最优化转发包概率运行,保证了网络的连通性。从仿真结果可知,节点在当前最优包转发概率下保持合作运行,网络整体效用接近理想状态,节点间的相互合作大大

(下转第522页)

- [9] 孙华君, 刘晓芳, 陈 文, 等. Sr 取代量对 PMNS-PZT 压电陶瓷的影响[J]. 电子元件与材料, 2007, 26(7): 7-10.
- [10] SAKAKI C, NEWALKAR B L, KOMARNENI S, et al. Grain size dependence of high power piezoelectric characteristics in Nb doped lead zirconate titanate oxide ceramics[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(12): 6907-6910.
- [11] YOON S J, KANG H W. Piezoelectric properties of Pb $[\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{Lu}_x(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})_{0.05}] \text{O}_3$ ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(9): 2473-2476.
- [12] 周 飞, 龙纪文, 孟中岩. 铌掺杂 PMS-PZT 三元系压电陶瓷温度稳定性研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(3): 586-594.
- [13] 郭晓波, 陈海龔, 孟中岩. $\text{Pb}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})_x\text{Zr}_b\text{Ti}_c\text{O}_3$ 三元系压电陶瓷的压电和介电性能[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(1): 125-127.
- [14] 侯育冬, 朱满康, 高峰, 等. 不同铅气氛对 0.2PZN-0.8PZT 压电陶瓷性能的影响[J]. 压电与声光, 2005, 27(2): 164-167.
- [15] NIELSEN E R, RINGGAARD E, KOSEC M. Liquid-phase sintering of $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ using PbO-WO_3 additive[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22(11): 1847-1855.
- [16] ZHU Z G, LI B S, LI G R, et al. Microstructure and piezoelectric properties of PMS-PZT ceramics[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 117(2): 216-220.

[责任编辑:刘蔚媛]

(上接第 517 页)

增强,节点从而获得更好的收益. 下一阶段将考虑节点重发或延迟发数据包的问题,以及历史策略对后继转发策略的影响.

[参考文献]

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] URPI A, BONUCCELLI M, GIORDANO S. Modeling cooperation in mobile ad hoc networks: A formal description of selfishness[C]//Proc of the Int'l Symp on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT 2003). Hingham: Kluwer Academic Publishers, 2003: 228-238.
- [3] MICHIARDI P, MOLAV R. A Game Theoretical Approach to Evaluate Cooperation Enforcement Mechanisms in Mobile Ad hoc Network[C]. IEEE/ACM Workshop WiOpt 2003, Sophi Antipolis, France.
- [4] FELEGYHAZI M, BUTTYAN L, HUBAUX J P. Equilibrium Analysis of Packet Forwarding Strategies in Wireless Ad-hoc Networks-the static case[C]. Personal Wireless Communications 2003, Venice, Italy.
- [5] 戴沁芸, 徐 景, 阎毓杰. 无线传感器网络中基于协作的包转发研究[J]. 信息与控制, 2007, 36(5): 551-556.
- [6] 罗云峰. 博弈论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 9.
- [7] JIM RATLIFF, FOLK THOREM SAMPLER. Great introductory notes to the Folk Theorem [N/OL] (1996) <http://www.virtualperfection.com/gametheory/5.3.FolkTheoremSampler.1.0.pdf>.

[责任编辑:刘蔚媛]