

无线 Mesh 网络中激励机制研究

谢霖铨¹, 陈 兵^{1,2}, 乐光学², 刘建生¹, 熊小峰¹

(1 江西理工大学 理学院, 江西 赣州 341000; 2 嘉兴学院 数理与信息工程学院, 浙江 嘉兴 314000)

摘 要: 为了激励无线 Mesh 网络中自私节点转发数据, 通过分析节点自私行为激励的原因和目标, 将适用于无线 Mesh 网络中对节点自私行为的四类激励机制进行比较. 讨论了无线 Mesh 网络博弈模型, 并对无线 Mesh 网络中重复博弈模型进行理论分析. 针对节点的自私行为提出了基于博弈论与信誉相结合的激励方案. 仿真实验表明, 该方案不仅降低了基于信誉的复杂度又能有效激励更多自私节点转发数据, 从而提高了网络的整体性能.

关键词: 无线 Mesh 网络; 自私行为; 激励机制; 博弈论; 信誉

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)09-0116-05

Research on Incentive Mechanism for Wireless Mesh Networks

XIE Lin-quan¹, CHEN Bing^{1,2}, YUE Guang-xue²,
LIU Jiang-sheng¹, XIONG Xiao-feng¹

(1 School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2 School of Mathematics & Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314000, China)

Abstract: In order to motivate selfish nodes to forward data in wireless mesh networks, through analyze the reason and object of the nodes selfish behavior. Comparison four types of incentive mechanism of the nodes selfish behavior in wireless mesh networks. The discussion of game theory in wireless mesh networks and the theoretical analysis of repeated game theory are another emphasis. An incentive mechanism is proposed combined game theory and reputation for the selfish behavior of nodes. The simulation results show that the strategy not only reduces the complex of the reputation but also can effectively motivate more selfish nodes forwarding data which improve the overall performance of the wireless mesh networks.

Key words: wireless mesh networks; selfish behavior; incentive mechanism; game theory; reputation

1 引言

无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Networks, WMN) 融合了 WLAN 和 Ad Hoc 网络的优势, 具有自组织、自修复、多跳级联、节点自我管理、移动带宽、无线定位等特点, 其设计目标是节点即可以是通信的发起者, 也可以是数据分组的中间转发者, 网络中的每个节点都能去发送和接收数据, 每个节点都能通过一个或多个节点接收和转发数据, 从而使用户能够随时随地的获取高质量的无线通信服务^[1]. 然而, 网络中节点的自私行为使得这一目标无法完

全实现. 为了保证自身的性能, 节点一般只愿意接收网络资源而不愿共享自身的资源和计算功能, 这种节点的自私行为会严重影响网络的整体性能. 因此, 激励自私节点进行共享资源和转发信息, 以提高整个网络的性能是目前无线 Mesh 网络研究领域面临的重要挑战之一.

2 激励的原因和目标

虽然无线 Mesh 网络正蓬勃发展, 但是无线 Mesh 网络中节点由于受到自身处理能力、带宽、存储空间、发射功率等各种资源的限制, 节点为了保证

收稿日期: 2012-02-24; 修回日期: 2012-03-29

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY12F02019); 浙江省公益技术应用研究项目 (2011C23130)

自身的性能都会理性的表现出自私的行为^[2]. 假设无线 Mesh 网络中每个数据报文需要转发 n 跳, 则每个节点平均消耗 $n/(n+1)$ 单位的能量为其它节点转发数据报文, 而只消耗 $1/(n+1)$ 单位的能量为自己转发数据报文, 这样采取合作为其它节点传输数据报文所消耗的能量是不合作只为自己传输数据的 n 倍. 图 1 给出自私节点对报文传输率的影响, 由图可知, 即使存在很小一部分的自私节点也会对报文的传输率造成很大的影响. 本文采用基于博弈论与基于信誉相结合的思路, 既降低了基于信誉的激励机制的复杂度又可以更大限度的激励尽可能多的节点转发资源, 通过对无线 Mesh 网络中重复博弈模型进行理论分析, 仿真实验表明该方法能够激励更多的节点采取合作的策略来转发数据.

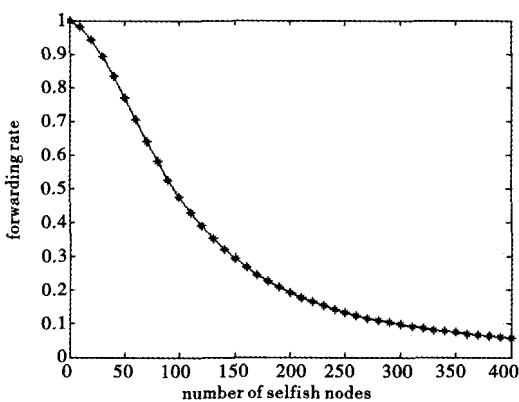


图 1 自私节点对传输率影响

3 适用于 WMN 激励机制研究

目前针对无线 Mesh 网络中节点自私行为的激励机制主要基于信誉、虚拟货币、VCG (Vickery, Clarke, Grove) 以及博弈论^[3]. 这四类机制侧重点也有所不同, 基于信誉的激励机制通常用于检测数据报文转发阶段的节点自私行为, 通过对节点信誉值进行评价, 根据信誉值的高低来判断节点的可信度, 并作为路由和报文转发选择的依据, 该机制可以有效降低报文转发阶段的自私行为; 而基于虚拟货币激励机制用于节点数据报文转发阶段合作行为的支付, 节点提供服务则增加虚拟货币, 获取服务则减少虚拟货币, 该机制一般需要额外的硬件支持; 基于 VCG 激励机制主要用于在路由阶段的合作行为, 可以实现最优策略, 是目前获得最短消耗有效路径的防策略机制; 基于博弈论激励机制用于节点数据报文转发阶段的动机激励, 在节点之间建立数据报文发送与转发的博弈关系, 通过采取对自身收益最大

的策略, 使得能够满足自身通信需要的同时, 必须要为其它节点转发数据, 节点不能通过单方面改变策略提高自身的服务性能. 这四类激励机制区别如表 1 所示.

表 1 几种激励机制比较

激励方案	手段	主要思想	优点	缺点
信誉机制	信誉值	路由的选取和惩罚机制依据信誉值	无需额外硬件	信誉交互算法较复杂, 开销较大
虚拟货币机制	虚拟货币	将虚拟货币作为对节点的奖励	算法简单	需要额外硬件, 扩展性不强
VCG 机制	额外奖励	额外支付来实现占优策略, 回报真实消耗成本	实现防策略性	存在过度支付和预算不平衡, 复杂度高
博弈论机制	付出与回报关联	节点之间建立数据转发的博弈关系	无需额外硬件	边缘节点、位置特权问题

4 WMN 相关研究工作

4.1 WMN 博弈模型

在无线 Mesh 网络环境下, 当节点面对其他节点的服务请求时, 采取何种策略以使自身利益最大化可以认为是一种博弈. 将“囚徒困境”模型的思想应用到复杂网络中, 该模型博弈双方要决定合作 (Cooperate, C) 或者背叛 (Defect, D) 策略^[4]. 在无线 Mesh 网络的博弈模型中, 选择合作带来收益 u 以及相应的成本为 c , 其中 $u > c$. 因此相互合作给每个个体带来实际收益 $R = u - c$, 相反, 如果互相背叛双方都只能得到惩罚 $P = 0$. 如果某一方选择合作而另一方选择背叛, 背叛者获得 $T = u$ 的收益, 而合作者只能付出 $S = -c$ 的损失. 因此, 囚徒困境的支付关系为 $T > R > P > S$, 并且博弈要求 $2R \geq T + S$, 故其合作收益矩阵为:

$$\begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix}$$

在此博弈中, 无论对方选择何种策略, 选择背叛是最好的决定, 因此该模型相互背叛 $\{D, D\}$ 是囚徒困境的唯一纳什均衡^[5]. 在多次重复博弈过程中, 博弈个体则可能会为了长久利益而舍弃短期利益从而选择不同的策略^[6]. 无限次重复博弈理论证明了当

博弈重复无穷多次,存在不同于一次博弈的子博弈精炼均衡策略,此时 $\{C, C'\}$ 是一个子博弈的纳什均衡.因此,在无线 Mesh 网络中对任一对节点 (i, j) 在某一时刻的博弈收益模型如表 2 所示.

表 2 无线 Mesh 网络中博弈模型

实际收益	节点 j 合作	节点 j 不合作
节点 i 合作	$i: U_j - C_i - C'_i$ $j: U_i - C_j - C'_j$	$i: -C_i - C'_i$ $j: U_i - C'_j$
节点 i 不合作	$i: U_j - C'_i$ $j: -C_j - C'_j$	$i: -C'_i$ $j: -C'_j$

表 2 中 C 表示节点合作时转发报文的资源开销; C' 表示节点在网络中计算、更新、存储等运行成本.在一次交易过程中,若两节点互相合作,则实际收益为 $U - C - C'$; 若两节点之间互不合作,则实际收益为 $-C'$; 若一方选择合作另一方选择不合作,合作方的实际收益为 $-C - C'$, 不合作方得实际收益为 $U - C'$. 这是对节点一次博弈的描述,以后节点都将在周期时间 T 内无限次重复该博弈.

4.2 WMN 重复博弈模型理论分析

在实际博弈过程中,采用对未来收益打折扣的方式来计算节点收益,即贴现原则^[7].虽然无线 Mesh 网络中不能预测节点的未来情况,但实际网络中依然存在一个概率 $1 - \delta$, δ 是贴现系数,使得当前节点的相互作用就是最后一次的作用结果.于是节点一直保持合作策略的收益可表述为:

$$(U - C - C') + (U - C - C')\delta + \dots + (U - C - C')\delta^N + \dots = \frac{U - C - C'}{1 - \delta}$$

如果某一节点采用不合作策略,虽然它在该次交易中会获得 $U - C'$ 收益,但随后会受到 N 阶段的惩罚.其收益为:

$$(U - C') + \delta^{N+1}[(U - C - C') + (U - C - C')\delta + \dots] = (U - C') + \frac{(U - C - C')\delta^{N+1}}{1 - \delta}$$

可得: $\frac{(U - C - C')(1 - \delta^{N+1})}{1 - \delta} > U - C'$, 当 δ 固定时, N 越大,对节点的惩罚行为越严厉.因此,在用户理性的情况下,通过有限多次的惩罚可以达到一定效果,但为了激励更多节点采取合作策略 N 取值不能太大.

4.3 基于博弈论和信誉结合的策略

由于节点何时离开无线 Mesh 网络无法预知,因此节点之间的长期行为是无限次重复博弈^[8],记

作 $G(\infty, \delta, \{S_i\}, \{U_i\})$. 其中 ∞ 代表博弈次数,此时为无限多次; δ 代表贴现系数,且 $\delta \in (0, 1)$; S_i 代表节点 i 采取的策略,且 $S_i \in \{C, D\}$; 而采取的策略主要由可信状态 $T_{\text{status}}(i, k) \in [0, 1]$ 和相对贡献度 $Rc_i(i, k) \in [0, 1]$ 进行量化; U_i 代表节点 i 通过此次博弈获得的收益,相关说明如下:

(1) 节点 i 第 k 次交易的可信状态 $T_{\text{status}}(i, k) \in [0, 1]$, 其中 0 表示节点 i 此次交易不可信, 1 表示节点 i 此次交易完全可信.

(2) 节点 i 第 k 次交易的相对贡献度 $Rc_i(i, k) \in [0, 1]$, 其中 0 表示节点 i 在此次交易没有做任何贡献, 1 表示节点 i 在此次交易一直在贡献而没有获取收益.

(3) 在无线 Mesh 网络中,节点之间的作用为无限次重复博弈,节点 i 第 k 次交易所采取的策略 $S_i =$

$$\begin{cases} C, T_{\text{status}}(j, k-1) \geq Th \text{ and } Rc_i(j, k-1) \geq \Gamma \\ D, T_{\text{status}}(j, k-1) \leq Th \text{ or } Rc_i(j, k-1) < \Gamma \end{cases}$$

其中, Th 表示节点的信誉值阈值, Γ 表示相对贡献度的门限值.节点总是希望对方不仅要可信而且要求具有贡献资源的能力,因此节点的策略选择不仅与可信状态有关还与相对贡献度息息相关,而这两个值通常是经验值.

(4) 当节点 i 初始加入系统时,可设 $T_{\text{status}}(i, 0) = 1$, 相对贡献度 $Rc_i(i, 0) = 1$, 即该节点不仅可信而且贡献能力强.

(5) 当节点 i 在某阶段不合作,它将会受到 N 阶段的惩罚,获得的收益会比一直采取合作的策略要低,但为了激励更多的节点采取合作策略,惩罚时间不应该过长.

(6) 在每一个周期 T 内,节点与其所有邻居节点进行交易,累积交易获得的收益,然后根据更新法则进行策略更新,即以某一概率更新自己的策略,这样有利于节点尽快稳定工作.

(7) 更新策略采用配对比较方式: $W(i \rightarrow j) = \frac{1}{1 + e^{-(W_j - U_i)/\kappa}}$, 参数 κ 为噪音,代表一种非理性行为的可能,一般是一个很小的值,常取 0.1. 当 $\kappa \rightarrow \infty$ 时,表示所有信息都被噪音淹没,策略进行完全更新; 当 $\kappa \rightarrow 0$ 时,表示确定的模仿规则,当 j 累积收益大于 i 时, i 则采取 j 的策略.

5 实验仿真分析

仿真环境: Window7 系统, 采用 Matlab2010b

仿真软件. 设定节点规模 ≤ 2000 , 节点度为 4, 网络结构为小世界网络, 节点设置为随机加入和离开.

实验 1 贡献度与纳什均衡之间的关系, 如图 2 所示.

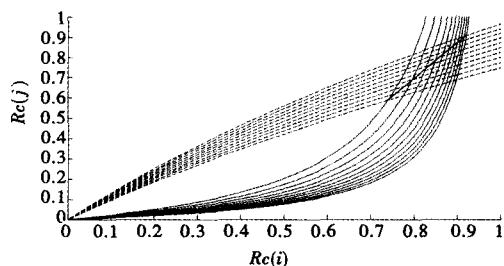


图 2 合作节点间的博弈纳什均衡

环境假设:

(1) 网络中存在大量的合作(可信)节点.

(2) 单节点初始加入均为可信. 即: $T_{\text{status}}(i, 0) = 1$, $R_c(i, 0) = 1$.

实验表明:

节点通过提供数据报文转发而获得较高的信誉评价和贡献度, 当这些节点都为系统做贡献时, 即提供可信的服务, 系统才能达到(C,C)的纳什均衡. 由图可知, R_c 的值不能小于 0.6, 通过采用更新策略方式, 使节点间能够更快速达到稳定状态.

实验 2. 合作节点和自私节点对其信誉值的变化, 如图 3、图 4 所示.

环境假设:

(1) 加入的节点为随机生成的合作节点和自私节点, 初始加入均为可信.

(2) 对自私节点采用激励和惩罚措施.

(3) 每阶段节点进行交易 20 次, 对交易结果进行评价, 连续观测 10 个阶段.

实验表明:

由图 3 可知, 由于受到不合作节点的自私行为影响, 合作节点的信誉值会降低, 这会对整体网络性能造成很大影响, 但经过节点之间的博弈会使整个网络相对稳定在较低水平. 由图 4 可知, 通过对自私节点的一定惩罚, 理性的自私节点会为了长久利益而减少不合作行为, 通过为系统做贡献才能获得收益, 经过相互间的博弈会使整体网络稳定在较高的水平.

6 结束语

本文提出将基于博弈论与基于信誉的激励机制相结合的思路, 既降低了基于信誉的激励机制的复

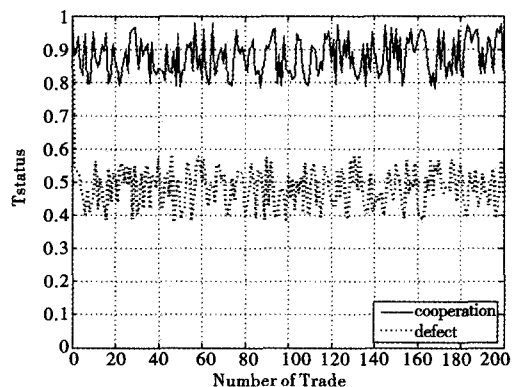


图 3 节点之间交易与 T_{status} 的关系

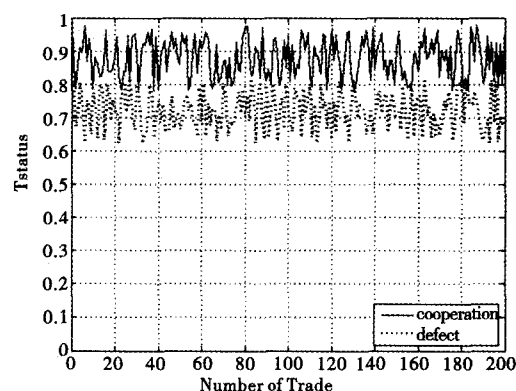


图 4 惩罚策略对节点交易的 T_{status} 影响

杂度又可以更大限度的激励尽可能多的节点转发资源. 目前提出的各类无线网络激励机制都有其局限性, 关键技术有待进一步研究和完善. 博弈论机制是最接近网络的实际情况, 应从降低边缘效应着手, 让更多的节点参与共享资源, 还可通过对各种机制的结合使用, 充分考虑实际网络中存在的干扰因素和影响因子.

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks [J]. IEEE Radio Communications, 2005, 24 (9): 23-30.
- [2] 崔华力, 钱德沛, 刘轶, 等. 无线 Mesh 网 QoS 研究 [J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4): 173-175.
- [3] 王东滨. 无线自组织网络合作增强技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 22-36.
- [4] 杨阳, 荣智海, 李翔. 复杂网络演化博弈理论研究综述 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(4): 47-50.
- [5] Felegyhazi M, Hubaux J P, BuRyan L. Nash equilibrium of packet forwarding strategies in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing,

2006, 5(5): 463-476.

- [6] 杜春梅, 蹇强, 王怀民, 等. 虚拟计算机环境中基于重复博弈的惩罚激励机制[J]. 软件学报, 2010, 21(12): 3043-3047.
- [7] Mailath G J, Samuelson L. Repeated games and reputations: long-run relationships [M]. New York: Oxford University Press, 2006.
- [8] 徐丽俊, 费敏锐. 合作博弈的自私网络负载均衡的建模和仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2588-2590.

作者简介:



谢霖铨 (1962-), 男, 博士, 教授. 研究方向为粗糙集理论及其应用、数据挖掘.



陈兵 (1986-), 男, 硕士研究生. 研究方向为网络安全与智能计算.



乐光学 (1963-), 男, 博士, 教授. 研究方向为网络安全与嵌入式系统.

刘建生 (1959-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为智能计算与信息安全.

熊小峰 (1965-), 男, 硕士, 副教授. 研究方向为建模及应用软件, 数理统计.

(上接第 115 页)

对于超长距离和节点较多的环网来说, 需在 APS 协议基础上进行优化设计, 如充分利用硬件和专用信道传递复用段告警检测、告警信息等, 避免软件处理的限制, 缩短倒换时间, 提高倒换可靠性.

参考文献:

- [1] 吴彦文, 郑大力, 仲肇伟. 光网络的生存性技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003.
- [2] YD/T 1078-2000. SDH 传输网技术要求-网络保护结构间的互通[S]. 2001.
- [3] ITU-T Recommendation G. 841. Types and characteristics of SDH network protection architectures [S]. 1998.
- [4] 刁碧, 甘忠平, 杨一荔. K1、K2 字节原理及应用探讨

[J]. 通信技术, 2008, 41(10): 80-82.

- [5] 白静茹. SDH 自愈环的设计与改进[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.

作者简介:



冯健女, (1973-), 博士, 副教授. 研究方向为对等网络及网络管理.