

基于博弈理论建立无线自组网中激励合作机制的研究

李莉^① 董树松^② 温向明^①

^①(北京邮电大学通信网络综合技术研究所 北京 100876)

^②(中国电信集团北京市电信公司信息业务部 北京 100032)

摘要: 该文首先结合 OSI 参考模型, 针对无线自组网中节点具有非合作的特性进行了分析, 阐述建立激励合作机制的重要性。然后根据网络层上的 3 种不同的激励合作机制, 分类总结其设计的核心思想, 并通过具体算法对其有效性进行论证。最后基于博弈理论建立网络模型来描述自组网中节点的行为特征, 提出一种激励节点合作的效用函数, 并从理论上证明其合理性、有效性。

关键词: 无线网络; 合作机制; 自组网; 博弈理论; Nash 平衡

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1299-05

The Analyses of Cooperation Mechanism Based on Game Theory in Wireless Ad hoc Network

Li Li^① Dong Shu-song^② Wen Xiang-ming^①

^①(School of Telecommunication & Network Technology, BUPT, Beijing 100876, China)

^②(Department of Information Service, Beijing Telecom. Company, Beijing 100032, China)

Abstract: According to OSI model, the no-cooperation characteristics of nodes and the importance of cooperation mechanism in wireless Ad hoc network are presented in this paper. The key design ideas of three different cooperation mechanisms in the network layer are also analyzed. Based on game theory and network model, the behavior characteristics of nodes are described in details and the utility function to stimulate cooperate is provide at the end of this paper.

Key words: Wireless network; Cooperation mechanism; Ad hoc network; Game theory; Nash equilibrium

1 引言

近年来, 关于无线自组网中节点具有非合作的特性以及如何有效建立激励合作机制的问题^[1-3]已经引起许多国外研究学者的关注。这种在传统蜂窝无线网络中所不具有的特性, 之所以会在无线自组网中表现出来, 是由无线自组网本身的特性所决定的。在无线自组网中, 节点既是终端又是路由器, 这种双重功能决定了节点既要保证自身的正常通信需求, 又要为网络的其它节点提供转发数据和选路的服务, 即节点之间需要相互合作以补偿基础设施的缺乏, 否则, 整个通信过程无法顺利进行; 然而考虑到自身能量和带宽有限等因素, 尤其当无线自组网络中的节点归属于不同的组织时, 节点往往表现出不合作的自私行为。

无线自组网中的节点分成 3 种不同的类型^[2], 第 1 种节点的行为良好, 无条件地、可靠地为其它节点转发数据; 第 2 种节点并不具有恶意破坏网络的行为, 它们非常理性(rational), 只对与自身有关的数据感兴趣(self interest), 考虑到自身能量和带宽的限制, 不愿为其它节点提供转发数据包的服务; 第 3 种具有恶意破坏网络行为的节点, 这种攻击

甚至以牺牲自身的能量、带宽为代价, 通常涉及网络安全的问题。

仿真分析表明^[3], 当第 2 种类型的节点数目占全网总节点的 10% 至 40% 时, 网络的整体性能会严重地下降 16% 至 32%。因此需要采取相应的机制来改变和阻止这些节点的行为。本文结合当前的研究状况, 对如何有效地建立激励合作机制等相关问题进行全面地研究与分析, 尤其是在网络层节点如何执行数据转发和路由的问题。

2 节点非合作的特征及表现

如果节点是一个理性的网络参与者, 并且以自己的利益为中心, 那么这种非合作特性将会通过不同的行为方式涉及到 OSI 的不同层面。主要表现为: (1)不遵循网络协议的具体规范; (2)以牺牲其它节点的利益来换取自己的最大效用。效用的概念来源于微观经济学里的效用函数, 具体到通信中指带宽、能量等网络资源。

MAC 层: 分布式协调功能是一种分布式的 MAC 协议, 它采用随机访问控制机制, 规定退避过程来减小节点接入信道时产生碰撞概率, 保证所有节点公平地使用网络资源。具有非合作特征的节点通常会表现出贪心的行为: 缩短退避时间如将竞争窗(Contend Window, CW)的范围减小到原来的

N 分之一 $[0, CW/M]$; 当发生冲突后不将竞争窗口的范围加倍; 或是在退避计数器未减为 0 时, 就发送请求发送信号 (Ready To Send, RTS), 这种贪心的行为增加了其自身接入信道的机会, 却严重影响了其它节点对于共享资源的使用。

Network 层: 无线自组网中由于节点的传输范围有限, 节点之间的通信很多情况下采取多跳的方式进行, 即依靠中间节点的转发。存在自私行为的节点表现在: (1) 不执行转发功能, 对于目的地不属于自己的数据包采取拒绝或是丢弃的方法来节省自己的资源; (2) 不执行路由功能, 对于其邻居节点的路由信息不予以响应。节点的行为特征会随着自身资源的状况的变化而改变, 当其所具有的能量低于某一特定值时, 节点可能表现出完全不合作的行为, 甚至在不需要收发数据时直接切断与网络的连接。

传输层: 具有非合作特征的节点在发送数据时不遵守规范的拥塞控制算法, 发送数据包的速度过快而超过网络的承载能力, 导致网络流量发生拥塞和丢包现象。严重影响 TCP 的工作机制。

应用层: 无线自组网节点在应用层上的非合作特性, 可以通过分析 P2P 系统了解一些共同的特征^[4]。P2P 中各个对等实体既是服务的使用者又是服务的提供者, 只有互相合作才能共享网络资源。某些存在自私行为的实体, 可能变成 Freeloader, 任意地下载网络上的资源, 而不对其它的节点提供资源共享服务。

3 建立激励合作机制的有效性

研究表明, 存在非合作节点的无线自组网中, 如不采取一定的激励合作的机制, 单靠节点之间的相互作用及影响是无法改善非合作行为, 需要建立一个有效的激励合作机制来加强节点之间的合作动机, 从而改善和提高网络的整体性能。目前主要的研究方向是将实施激励的方法与无线自组网中的路由协议紧密结合起来, 刺激节点之间的相互合作。

假设在无激励的情况下, 某条路径中节点 i 参与转发数据的概率为 $P(e^i) = p$; 实施激励后, 节点 i 参与转发的概率为 $P(e_c^i) = p + \Delta p$, 其中 $\Delta p \in [0, 1 - p]$ 。那么 Δp 表示激励合作机制对于节点 i 的作用效果。如果一条从源端到目的端的路径中存在 n 个中继节点, 而且节点之间彼此独立, 则两种情况下的路径中节点的总转发概率分别为 p^n 和 $(p + \Delta p)^n$ 。设 T 为转发概率的门限值, 令 $p^n = T$ 或 $(p + \Delta p)^n = T$, 两边取对数得到 $n_1 = \ln T / \ln p$; $n_2 = \ln T / \ln(p + \Delta p)$, 令 $\Delta n = (n_2 - n_1) / n_1$ 反映实施激励合作后转发节点增加的个数与原来节点数的比例关系。当 $T=0.6$, p 分别取 0.7, 0.5 和 0.3 时^[5], 得到 Δp 与 Δn 之间变化关系如图 1 所示。从图中可知, 采用激励合作的机制后网络的连通性得到提高, 参与转发的节点数目明显增加, 尤其当满足 $p + \Delta p \geq 0.8$ 时, 即使 Δp 的取值很小, 对提高网络整体连通性和吞吐量的作用也很显著。

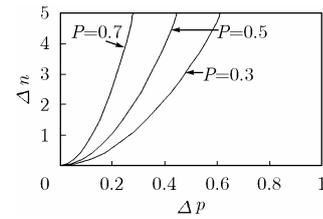


图 1 Δn 随 Δp 的变化曲线

4 网络层的 3 种激励合作机制

根据目前的研究情况, 网络层的激励合作机制主要有 3 种类型: 信誉机制、价格机制和拍卖机制。

4.1 信誉机制 (Reputation based)

这种机制的设计思想是为网络中的节点构造信誉值, 其目的是: (1) 提供用以判定节点是否可信的信息; (2) 鼓励节点的合作行为; (3) 排斥非合作节点获取机制所保护的合作服务。

SORI^[6]通过邻居节点观察的方式来计算本地节点的信誉值, 并利用局部传播的方式建立全局信誉值, 以便公正合理地对待行为自私的节点进行惩罚。首先节点 N 通过邻居发现将 X 节点存储在相邻节点表 NNL_N 中, 在通信过程中通过观察请求 X 转发的数据包数目 $RF_N(x)$ 和 X 已经转发的数据包数目 $HF_N(x)$ 来计算 X 的本地信誉值, 即

$$G_N(x) = \frac{RF_N(x)}{HF_N(x)} \quad (1)$$

通过该方法, 节点 N 构造了邻居节点本地信誉值表 $LRF_N(x)$, 为保证信誉值的公正和便于对自私节点在全网范围内进行惩罚, 通过接收其它节点的广播消息对本地信誉值进行更新并建立全局信誉值 $OER_N(x)$, 即

$$OER_N(x) = \frac{\sum_{i \in NNL_N \cup \{N\}, i \neq x} \lambda_N(i) C_i(x) G_i(x)}{\sum_{k \in NNL_N \cup \{N\}, k \neq x} \lambda_N(k) C_k(x)} \quad (2)$$

其中 i 是 NNL_N 中节点的邻居节点; $C_i(x)$ 表示 i 对计算节点 x 信誉值准确性的把握度, $\lambda_N(i)$ 表示节点 N 对 i 的可信度, 这主要是为防止不合作节点传播虚假的信誉值消息, 如果 i 自身的信誉值很低, 则其所提供的信誉值信息的可信度也低。在构建好全局信誉值以后, 通过引入丢弃概率 P 对信誉值较低的节点进行惩罚, 当其向邻居节点发送数据时, 数据包将被邻居节点以概率 P 丢弃。如果节点比较自私以至于信誉值降低到某一门限, 则该节点的请求和数据包都会被拒绝或作丢弃处理。采用信誉机制在一定程度上促进了全网节点之间的合作。

4.2 价格机制 (Price based)

这种机制的设计思想借助于微观经济学的理论, 将整个网络看作一个交易市场。初始时, 每个节点拥有相同的虚拟货币数 (称 Nuglet), 如果节点愿意为其它节点提供转发服务则可以获得一定量的货币, 而如果节点接受服务就要付出相

应的货币, 节点可允许进行的通信次数是由自身所具有的货币数目决定。因此, 如果节点不断地进行通信, 就需要有足够的虚拟货币, 通过为其它节点提供服务以赚取更多的货币来满足自身通信需求。在价格机制的激励作用下, 节点之间会逐渐形成一种合作关系^[7], 但是这种价格机制实施过程中需要借助硬件支持, 或是建立可信任的第三方对虚拟货币进行分配和管理。

4.3 拍卖机制(Auction-based)

这种机制的设计思想是在无线自组网常用路由的场景下, 每个转发节点对于转发分组有自己的评价(转发分组的开销), 系统的目标是希望在考虑节点自私性的情况下, 选择出费用最优的路由。

TEAM^[8]是一种较新的结合拍卖机制的路由协议, 假设无线网络用带有权值的有向图 $G(V, E, W)$ 表示, V 表示节点, E 表示边, 如果节点 V_j 在 V_i 的传输范围内, 则 (V_i, V_j) 形成一条边, 权值 W 表示从 V_i 到 V_j 发送数据所消耗费用记为 P_{V_i, V_j} , 大小与无线传播环境和节点之间的距离有关。首先通过路由协议确定从源节点 S 到目的节点 D 的第一次路由, 要求从源端到目的端所经历的总跳数 L 最少, 确定路径后形成节点标识集合 $\sigma_{S, D} = \{S = \sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_i = V_i, \sigma_{i+1} = V_j, \dots, D = \sigma_L\}$, 并计算这条路径上的总权值:

$$W_{S, D} = \sum_{i=0}^{L-1} P_{\sigma_i, \sigma_{i+1}} \quad (3)$$

为选出从 S 到 D 费用最优的路径, 保证目标函数 $W_{S, D}$ 的值最小, 引入拍卖机制。如果 V_i 与 V_j 之间存在中间节点且满足 $p_{V_i, V_j} < p_{V_i, V_i} + p_{V_i, V_j}$, 节点有资格为自己提供的转发服务出价, 最终拍卖的获胜者满足 $p_{V_i, V_i} + p_{V_i, V_j}$ 与 P_{V_i, V_j} 之间形成的差值最大, 即通过该节点提供转发服务后, 可使从 V_i 到 V_j 消耗的发射功率最小, 拍卖过程依次进行, 最后形成一条费用最低的新路由。

为激励节点的合作意识, 拍卖的获胜者将获得一定的能量补偿作为参与转发的代价; 如果通过拍卖机制没有选出费用最优的路由, 则继续使用第一次确定的路由。TEAM虽然不能保证在任何时刻费用最优, 但在一定程度上降低了整体费用。

5 基于博弈理论建立激励合作机制

在运用博弈理论分析通信网络时, 参与者 Player 就是网络中的节点, 策略 Strategy 就是节点采取的行为方式, 而效用函数是节点采取该行为后所得到的回报值。基于博弈理论建立无线自组网的激励合作机制, 其核心思想就是通过寻求一种对所有节点都有利的策略, 使得既能满足节点自我通信的需要, 又能为其它节点提供转发服务, 最终整个网络能够达到一种 Nash 均衡状态, 而且保证帕累托有效(Pareto efficiency)。

Nash 平衡是一个策略轮廓, 其中没有一个参与者能够

通过单方面的改变策略来进一步提高效用; 而如果一个策略轮廓不可能提高任何一个用户的效用, 而不损害其它用户的效用, 则是 Pareto 有效的。本文首先对网络中节点的行为策略进行理论分析, 根据分析的结果建立一个合理的效用函数, 使之能够激励节点之间的合作。

5.1 节点行为策略的理论分析

假设无线自组网络中共有 N 个节点分布在 K 种不同的能量等级, 每种能量等级的上限值为 E_i , 在 i 等级上节点的生存时间为 L_i , 平均能量为 $\rho_i = E_i / L_i$, 节点作为收发端点或中间节点的概率是随机为 $1/N$, 某条路径上需要参与转发的节点数目为 t , 概率为 $q(t)$ 。定义从源端到目的端的一次通信称作一个会话。在通信过程中, 节点发送、接收和处理数据都需要消耗能量, 其中发送所耗的能量占主导, 为简化起见, 这里只考虑发送所消耗的能量并定义该值为常量 1。下面分别讨论在会话 j 中, 节点 P 作为源点和转发节点所消耗的平均能量(忽略接收所消耗的能量)。

如果 P 为源节点, 消耗的能量记为 $e_{pj}^{(s)}$, 则有

$$e_{pj}^{(s)} = \frac{1}{N} \times \alpha \times 1 = \frac{1}{N} \sum_t q(t) \theta(t, h_1, \dots, h_j) \phi_{1j}^{h_1} \dots \phi_{jj}^{h_j} \quad (4)$$

其中 α 表示在一次会话中节点的吞吐量, 即 $\alpha = \frac{\text{成功发送的数据包数目}}{\text{需要发送的数据包总数}}$, $\theta(t, h_1, \dots, h_j)$ 是一个多元函数, 表示在参与转发的 t 个节点中, 能量等级为 i 的节点数目为 h_i 的概率; $\phi_{1j}^{h_1} \dots \phi_{jj}^{h_j}$ 表示节点愿意提供转发服务的概率, 简称转发概率。

同样, 如果 P 作为转发节点, 消耗的平均能量记为 $e_{pj}^{(r)}$, 则有

$$e_{pj}^{(r)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^M t q(t) \sum_{h_1 \dots h_j} \theta(t-1, h_1, \dots, h_j) \phi_{1j}^{h_1} \dots \phi_{jj}^{h_j} \phi_{\text{class}(p)j} \quad (5)$$

其中 $\text{class}(p)$ 表示 p 所属的能量等级。根据式(4)与式(5)得出不等式(6)

$$\sum_{j=1}^K (e_{pj}^{(s)} + e_{pj}^{(r)}) \leq \rho_{\text{class}(p)}, \quad 1 \leq p \leq N \quad (6)$$

$$\phi_{\text{class}(p)j} \in [0, 1], \quad 1 \leq j \leq K; \quad 1 \leq p \leq N \quad (7)$$

如果要保证 Pareto 有效, 在式(7)的限定下可以对转发概率的取值进行优化; 如果给定一组转发概率 ϕ_{ij} , 根据式(4)和式(6)可以求得节点的吞吐量。 ϕ_{ij} 与节点的吞吐量 α 之间的变化关系通过一个简单的网络模型进一步说明。

假设节点 A 与 B 组成一个自组网, 它们同属于一个能量等级, 平均能量为 ρ , 如果 A 和 B 其中之一要与外部接入点进行通信, 则另外一个节点必须提供转发服务, 因此, 转发节点数目为 $t=1$, 概率 $q(1)=1$ 。由式(4), 式(5), 求得节点 A 所消耗的能量为

$$e_A^{(s)} + e_A^{(r)} \leq \rho, \quad \frac{1}{2} \phi_B + \frac{1}{2} \phi_A \leq \rho \quad (8)$$

同理, 节点 B 所消耗的能量

$$e_B^{(s)} + e_B^{(r)} \leq \rho, \quad \frac{1}{2}\phi_A + \frac{1}{2}\phi_B \leq \rho \quad (9)$$

联合式(8)与式(9)得到

$$\phi_A = \phi_B, \quad \alpha_A = \alpha_B = \rho \quad (10)$$

通过 A 与 B 吞吐量取值变化图, 更容易了解 A 与 B 之间博弈的过程。如图 2 中横轴为 A 的 α_A 大小, 纵轴表示 B 的 α_B 取值, 如果节点 A 想要提高自己的吞吐量, 则 B 的吞吐量就要被迫降低; 但由于两个节点都是理性的, 从追求自身效用值最大化的角度上, B 不会允许自身的吞吐量降低, 因此, 两者在博弈中最理想的取值应该在 (ρ, ρ) 点, 因为在追求效用函数最大化的角度上讲, 两者在该点上不存在改变策略的动机, 双方都是有利的。在这种情况下两节点的转发概率相同, 网络达到 Nash 平衡状态, 并且 Pareto 有效。

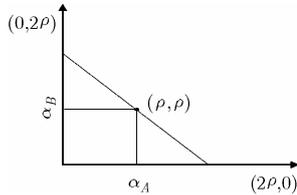


图 2 A, B 节点的吞吐量变化

综上, 在博弈的过程中, 节点的行为策略存在相互影响和制约的关系, 如果网络中的节点具有自私特性, 即使存在少量合作的节点, 也因不能获得合理的效用值而不愿继续合作, 无激励条件的合作是很难达到的。反之, 如果运用激励机制, 刺激节点采取合作的行为, 不合作的节点虽然可能在短期获得较高的效用值, 但是最终会改变行为策略趋于合作。

5.2 建立合理的效用函数

在运用博弈理论建立激励合作机制时, 建立一个合理的效用函数非常重要, 通过上节的分析可知, 节点消耗的能量一部分用于自己通信需求 $e_{ij}^{(s)}$, 另一部分贡献在为其它节点服务 $e_{ij}^{(r)}$ (主要包括路由的建立和数据包的转发), 通过两部分的能耗关系可以反映节点在网络中采取的行为策略, 据此建立能量效用函数^[9]如下:

$$U_p(S_p) = e_{ij}^{(s)} \cdot S_p - e_{ij}^{(r)} \cdot (1 - S_p) \quad (11)$$

效用函数 U 是一个从策略集合 S 到实数集合 R 的映射即 $U: S \rightarrow R$, 当且仅当 $U(S_1) > U(S_2)$ 时, 策略 S_1 比策略 S_2 的满意度高。 S_p 表示节点 P 采取的行为策略。 S_p 的取值范围为 $[0, 1]$, 为追求效用最大化, 每个节点都会选取较大的 S 值, 当采取不合作行为的节点趋于多数时, 网络的整体性能就会受到严重的影响。因此, 通过为每个节点建立信誉值 R 对效用函数表达式进行修正:

$$U'_p(S_p) = e_{ij}^{(s)} S_p - e_{ij}^{(r)} (1 - S_p) \cdot (1/R_p) \quad (12)$$

式(12)中将节点的信誉值与节点用于提供转发服务所消耗的能量紧密接合起来, 限制了节点的自私行为, 如果节点 P 的信誉值 R_p 变小, $U'_p(S_p)$ 的值也会减小。这样通过采用效

用函数与信誉机制相结合的方法, 加强了节点合作的意识。一方面通过对效用函数的修正, 信誉值较高的节点将拥有较高的效用值, 而信誉值较低的节点即使在短时间内可以采取自私的行为, 但随着时间的推移, 效用函数值将会不断降低。另一方面, 节点的信誉值可为路由发现和数据转发提供参考, 信誉值低的节点由于得不到其它节点的信任, 将失去使用网络资源的机会。从追求效用最大化的角度出发, 每个节点应该采取合作的方式使信誉值保持在一个较高的位置, 这样才能获得较满意的效用值, 根据节点行为策略的理论分析, 可以证明采用激励合作机制后, 当网络达到 Nash 平衡后, 节点的策略值 S 应该在保持在一个稳定的范围内, 形成一种节点之间互相合作的网络。

6 结束语

一种有效的激励合作机制, 可以防止和克服节点自私行为的发生, 保证网络的基本功能的正常执行; 结合当前对于激励合作机制的研究, 提出了一种新的基于博弈理论与信誉机制的激励合作方法, 通过理论分析证明该方法可以使网络达到 Nash 平衡状态, 并保证 Pareto 有效, 下一步将根据该方法建立网络模型, 通过实验仿真对于该方法的性能进行验证。

参考文献

- [1] Srinivasan V, Nuggeshalli P, and Chiasserini F C. Cooperation in wireless Ad hoc networks. In Proceedings of IEEE INFOCOM, San Francisco, CA, April 2003: 808-817.
- [2] Conti M, Gregori E, and Maselli G. Cooperation issues in mobile Ad hoc network. In the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Tokyo, Japan, March 2004: 803-808.
- [3] Marti S, Giulì T, Lai K, and Baker M. Mitigating routing misbehavior in mobile Ad hoc networks. In IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, BA Massachusetts, Aug. 2000: 255-265.
- [4] Anagnostakis G K and Greenwald B M. Exchange-based incentive mechanisms for peer-to-peer file sharing. In Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems, Tokyo, Japan, March 2004: 524-533.
- [5] Lamparter B, Plaggemeier M, and Westhoff D. About the impact of co-operation approaches for Ad hoc networks. In Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing, Annapolis, Maryland, USA.2003: 41-42.
- [6] Hei Q, Wu D, and Khosla P. SORI: A Secure and Objective Reputation-based Incentive scheme for Ad-hoc networks. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Atlanta, GA, USA, March 2004: 825-830.

- [7] Buttyan L and Hubaux P J. Stimulating cooperation in self-organizing mobile Ad hoc networks. *ACM Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2003, 8: 579–592.
- [8] Cai F J and Pooch U. Play alone or together-truthful and efficient routing in wireless Ad hoc networks with selfish nodes. In *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, Fort Lauderdale, USA, October 24-27, 2004: 457–465.
- [9] Michiardi P and Molva R. A game theoretical approach to evaluate cooperation enforcement mechanisms in mobile Ad hoc networks In *Proceedings of Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc and Wireless Networks*, Sophia-Antipolis, France, March, 2003: 54–58.
- 李莉: 女, 1978年生, 博士生, 研究方向为下一代无线网络.
- 董树松: 男, 1977年生, 硕士, 助理工程师, 研究方向为无线网络.
- 温向明: 男, 1959年生, 博士生导师, 研究方向为宽带无线通信技术、光网络.