

时隙 Aloha 网络中基于演化 博弈论的接入控制研究*

孙栋栋, 董荣胜, 余兴超, 邵 梅

(桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 考虑到时隙 Aloha 网络中的非合作系统行为, 并针对该网络中存在的 unstable 区域及带宽受限问题, 建立基于演化博弈论的时隙 Aloha 网络接入控制模型, 并在该模型的基础上提出 ABEGT 协议。ABEGT 协议在考虑用户有限理性的前提下, 既保证了系统稳定性, 也提高了网络的吞吐量。同时证明了时隙 Aloha 网络的接入控制中存在演化稳定策略。最后使用 MATLAB 仿真, 结果表明 ABEGT 协议不仅减少了用户的冲突, 而且提高了网络资源的利用率和网络整体的稳定性。

关键词: 时隙 Aloha; 演化博弈论; 演化稳定策略; ABEGT 协议; 接入控制

中图分类号: TP914.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1543-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.095

Access control research based on evolutionary game theory in slotted-Aloha network

SUN Dong-dong, DONG Rong-sheng, YU Xing-chao, SHAO Mei

(School of Computer Science & Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Considering the problems of the noncooperation system behavior of slotted-Aloha network, the existing instable areas and the bandwidth-limited of network, this paper established an access control model of slotted-Aloha network which was based on evolutionary game theory, then proposed ABEGT protocol. Under considering bounded rationality of users, ABEGT protocol ensured the stability of the system and improved throughputs of the network. Meanwhile, it proved that there was an evolutionarily stable strategy in the slotted-Aloha network. Finally, by using MATLAB, the results indicate that ABEGT protocol not only reduces the users' interference, but also improves the utilization ratio of network resources and the stability of the whole network.

Key words: slotted-Aloha; evolutionary game theory; evolutionarily stable strategy; Aloha based on evolutionary game theory (ABEGT) protocol; access control

0 引言

随机接入协议(random access protocol, RAP)作为 MAC 层最重要、应用最广泛的信道共享技术,其主要目的是为了减少网络冲突,提高网络资源的利用率,进而保证整个网络体系的高效性和稳定性。

目前应用广泛的随机接入协议是 1968 年由美国夏威夷大学的 Amramson 等人提出的 Aloha 协议。该协议按改进过程可分为纯 Aloha 协议和时隙 Aloha(也称分段 Aloha)协议。但在该领域的研究中存在着以下几点不足:

a) Aloha 类协议都存在一个不稳定区域的问题,即一旦网络负载超过了特定的门限,就会导致网络的整体性能急剧下降,甚至是网络瘫痪,从而影响系统的整体稳定性。

b) Aloha 协议的随机接入技术简单而有效,但是当应用到 W-CDMA 等的综合业务或者有大量数据需要交换时,该接入

方式就会限制信道的吞吐量,即带宽受限。

在无线网络中,设计能够同时满足用户和运营商需求的无线资源管理 RRM(包括接入控制、功率控制和路由策略等)^[1]机制是使网络资源能够得到有效利用的重要途径,而且,合理的资源分配是保证服务质量(QoS)的关键^[2]。目前对无线资源管理的研究与性能评价往往从纯粹工程技术角度出发,如资源利用率、用户公平性等。这些方法虽然从技术上改进和提高了某些性能指标,但却忽略了客观存在的非合作系统行为^[3],这就对无线资源管理提出了严峻的挑战。因此,在研究无线网络的资源管理机制时,就非常有必要引入和借助新的研究理论及方法。随着网络资源竞争的日趋激烈,用户违规行为不断出现,博弈论在解决网络领域的问题中发挥了显著的作用^[4],其重要分支——演化博弈论(evolutionary game theory, EGT)已经应用到无线网络的多个领域,主要包括定价、拥塞控制^[5]和路由策略^[6,7]等。本文针对时隙 Aloha 协议中存在的 not

收稿日期: 2011-07-05; 修回日期: 2011-08-19 基金项目: 广西自然科学基金资助项目(桂科自 0991242)

作者简介: 孙栋栋(1987-),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络及应用、博弈论(sunddor@163.com);董荣胜(1965-),男,教授,CCF 高级会员,主要研究方向为协议工程;余兴超(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为形式化方法;邵梅(1986-),女,硕士研究生,主要研究方向为无线网络、博弈论。

稳定区域、传统技术忽略的非合作系统行为以及带宽受限等问题,建立基于演化博弈论的时隙 Aloha 网络模型,在该模型的基础上提出 ABEGT 协议。

1 Aloha 网络

1.1 Aloha 网络简介

Aloha 网络(或称 Aloha 协议、Aloha 技术)是为解决夏威夷群岛之间的通信而设计的。纯 Aloha 的基本思想是每个用户可以自由地发送数据,如果有冲突发生,则停止发送,暂缓随机单位个时间后重新发送,即“用户想发就发,冲突后随机重发”。

1972 年,Roberts 提出的时隙 Aloha 是对纯 Aloha 的一种改进,其基本思想是把时间分成若干个相同的时间片,所有用户在时间片开始时刻同步接入网络信道,若发生冲突,则必须等到下一个时间片开始时刻再发送。该方法避免用户发送数据的随意性,减少了数据冲突,提高了信道的利用率,并且其吞吐量可以增加至纯 Aloha 的一倍。

1.2 定量分析纯 Aloha 和时隙 Aloha

假设用户发送数据的开始时间服从参数为 λ 的泊松分布 $\lambda\pi r^2/2$,则可得纯 Aloha 和时隙 Aloha 网络的负载 L 与吞吐量 T 的关系式:纯 Aloha $T = L \times e^{-2L}$,时隙 Aloha $T = L \times e^{-L}$ 。其关系如图 1 所示。

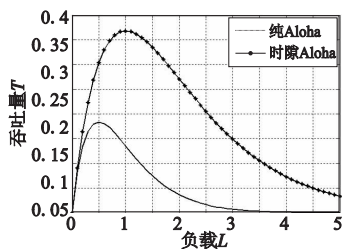


图1 纯Aloha和时隙Aloha的负载与吞吐量关系

从纯 Aloha 和时隙 Aloha 的负载 L 与吞吐量 T 的关系图中可以看出,对于纯 Aloha 而言,当 $L=0.5$ 时, T 达到理论最大值 $\max(T) = 0.5e^{-1} = 0.184$,当 $L>0.5$ 时,随着负载的增大,吞吐量急剧下降,所以系统处于不稳定状态;同理,对于时隙 Aloha 而言,当 $L=1$ 时, T 达到理论最大值 $\max(T) = e^{-1} = 0.368$,当 $L>1$ 时,系统处于不稳定状态。

2 基于演化博弈的 Aloha 网络中接入控制的研究

2.1 演化博弈论

2.1.1 演化博弈论简介

演化博弈论 EGT 是将博弈理论和动态演化过程相结合,从有限理性的参与人群体出发,通过学习、模仿和实验等动态决策机制—复制者动态 RD—对参与人进行大量反复的博弈后选择出演化稳定策略 ESS,以使其收益最大化的一种博弈理论。

2.1.2 演化稳定策略

演化稳定策略^[8](evolutionarily stable strategy, ESS)是指:如果占群体绝大多数的个体选择演化稳定策略,那么小的突变

者群体就不可能侵入到这个群体。换句话说,在自然选择压力下,突变者要么改变策略而选择演化稳定策略,要么退出系统而在进化过程中消失。ESS 的数学定义为^[9]

ESS: $x \in M$ 是一个演化稳定策略,当且仅当如果对任何(突变)策略 $x' \neq x$,存在一个 $\varepsilon' \in (0,1)$,使得式(1)对所有的 $\varepsilon \in (0, \varepsilon')$ 都成立:

$$\begin{aligned} f(x', \varepsilon x' + (1-\varepsilon)x) - \\ f(x, \varepsilon x' + (1-\varepsilon)x) < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: ε' 是一个与突变策略 x' 有关的常数,称之为侵入界限。

2.1.3 复制者动态

复制者动态(replicator dynamics, RD)是演化博弈论中常用的一种动态决策机制,它能准确描绘出有限理性参与人群体的行为变化趋势,是指使用某一纯策略的人数所占比例的增长率等于使用该策略时所得支付与群体平均支付之差。其动态微分方程如下^[9]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_j(t) = \frac{dx_j(t)}{dt} = \\ x_j(t) [f(j, x(t)) - \sum_{j=1}^N x_j(t) f(j, x(t))] \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 基于演化博弈论的时隙 Aloha 网络建模

Aloha 网络按其协议类型可分为纯 Aloha 网络和时隙 Aloha 网络。考虑到时隙 Aloha 是基于纯 Aloha 的改进和提高,本文重点研究时隙 Aloha 网络。对于纯 Aloha 网络,可作为时隙 Aloha 网络的一种特殊形式。

为了使研究结果更接近实际的情形,有如下约定:

- 在时隙 Aloha 网络中,节点决定传输方式以便试图最大化其收益;
- 节点随机分布在一个平面上;
- 所有的节点使用相同并且固定的传输范围 r ;
- 传输使用的是理想信道,所有的错误归结于冲突;
- 当节点在彼此的传输范围内时,由节点决定是否给接收者传输数据包。

结合演化博弈论的定义和时隙 Aloha 网络的实际情形,对基于演化博弈论的时隙 Aloha 网络建模如下:

ABEGT 模型 = $\{I, S^*, \alpha, \beta, \Phi, \Delta^{\text{ESS}}, \Delta^{\text{RD}}, U\}$ 。其中:

- $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示节点集合($n \in N^+$);
- $S^* = \{A, M\}$ 表示策略集, A 表示纯策略集, M 表示混合策略;
- α 表示成本比率,即传输成本和冲突成本与全局成本和收益的比例;
- β 表示整个系统的吞吐量;
- Φ 表示节点发送数据包成功的概率;
- Δ^{ESS} 表示演化稳定策略 ESS;
- Δ^{RD} 表示复制者动态 RD;
- $U = \{u, f\}$ 表示收益函数集。

在 ABEGT 模型中,两个节点之间的相互影响如图 2 所示。

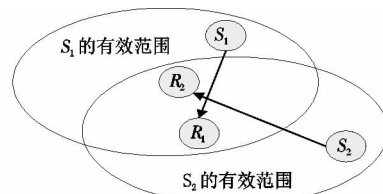


图2 ABEGT模型中两个节点的局部相互作用

2.3 基于 ABEGT 模型的时隙 Aloha 协议——ABEGT 协议

在 ABEGT 模型的基础上,提出 ABEGT 协议,其约定如下:

a) 节点的数目是集合 I 中一个随机变量 K ,它受一个随机选择用户的影响。在节点数量有限的情况下,用 $k_{\max}$ 表示同时与一个用户相互作用的最大用户数量,其值依赖于节点密度和传输范围。当选择一个策略时,节点必须知道 K 的分布。

b) 时隙 Aloha 网络中的节点有两种纯策略:传输策略 T 和静止策略 S ,即 $A = \{T, S\}$ 。

c) 节点 i 向其接收者传输一个数据包,将引发一个传输成本 δ ($\delta \geq 0$),若此时 Aloha 网络中的其他用户没有传输(即选择静止策略 S),认为数据包传输成功;否则,认为是一个冲突,其冲突成本为 ω ($\omega \geq 0$)。

d) 在节点传输数据包的过程中如果没有冲突,则节点 i 从成功传输的数据包中得到一个收益 ρ ,其中 $\rho > \delta$ 。

e) 当节点选择静止策略 S 时,必须支付后悔成本 Θ 。

f) 用 t 表示选择策略 T 的节点比例, s 表示选择策略 S 的节点比例。

为了更清晰地描述 ABEGT 协议中发送者和接收者之间的关系,本文给出两者之间的时序图,如图 3 所示。

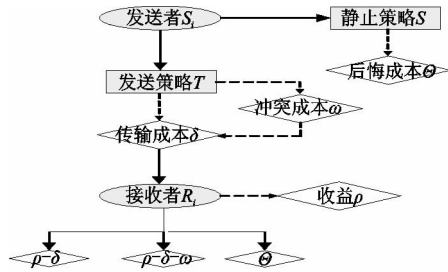


图3 ABEGT协议中发送者和接收者的时序

根据 ABEGT 协议中的相关定义和规定,ABEGT 模型中两个节点的局部相互作用的收益矩阵如下所示:

$$\begin{pmatrix} S_i \backslash S_j & T & S \\ T & -\omega - \delta, -\omega - \delta & \rho - \delta, -\Theta \\ S & -\Theta, \rho - \delta & -\Theta, -\Theta \end{pmatrix}$$

2.3.1 节点的效用函数

当一个选择策略 T 的节点与其他 k 个节点相互冲突时,其收益为

$$f(T, t) = (\rho - \delta)s^k + (-\omega - \delta)(1 - s^k)$$

选择静止策略 S 节点的期望支付为

$$f(S, s) = -\mu\Theta \sum_{k \geq 0} s^k P(K = k)$$

2.3.2 ESS 的存在性和唯一性

从 2.2 节中得知 α 表示传输成本 ($-\delta$) 加冲突成本 ($-\omega$) 与全局成本 ($-\delta - \omega - \Theta$) 加收益 ($-\delta + \rho$) 的比例,即 $\alpha = (\delta + \omega)/(\rho + \omega + \Theta)$ 。

结合演化博弈论和 ABEGT 协议的相关定义,给出关于 ESS 存在性和唯一性的定理。该定理包括以下三个分定理:

定理 1 如果 $P(K=0) < (\delta + \omega)/(\rho + \omega + \Theta)$, 此时博弈有唯一的 ESS, 即 $\Delta_1^{\text{ESS}} = \varphi^{-1}(\alpha)$, 其中

$$\varphi := \sum_{k \geq 0} P(K = k) s^k$$

定理 2 一个没有受到用户干扰的匿名用户收到适当的 $\rho - \delta$ 。如果

$$P(K=0) < ((\omega + \delta)/(\rho + \omega))$$

则此时博弈存在唯一的 ESS

$$\Delta_2^{\text{ESS}} = \varphi^{-1}((\omega + \delta + \Theta P(K=0))/(\rho + \omega + \Theta))$$

定理 3 博弈总是有一个唯一的 ESS, 且这个 ESS 是 $\sum_{k \geq 1} P(K = k) s^k = (\delta + \omega)/(\rho + \omega + \Theta)$ 方程的解。

证明 因为一个严格的混合均衡 s 具有 $f(T, t) = f(S, s)$ 特性, 即 $\varphi(s) = (\delta + \omega)/(\rho + \omega + \Theta)$ 。函数 φ 在 $(0, 1)$ 上是连续并且严格单调递减的, $\varphi(1) = P(K=0)$, $\varphi(0) = 1$ 。所以, 方程 $\varphi(s) = \alpha$ 在区间 $(P(K=0), 1)$ 有唯一的解, 证毕。

3 属性研究

在 ABEGT 协议中, 可以通过改变节点的分布和成本参数达到问题的最优化。Aloha 无线网络系统中, 节点成功发送数据包的概率、系统的吞吐量及稳定性是衡量 Aloha 网络接入控制的几个重要性能指标。本文重点对上述几个属性进行研究。

3.1 节点成功发送数据包的概率

假设节点在平面上的分布服从参数为 λ 的泊松分布。任何一个节点有 k 个相邻节点的概率是^[10]

$$P(K = k) = \frac{(\lambda \pi r^2)^k}{k!} e^{-\lambda \pi r^2}, k \geq 0$$

根据定理 3, 其唯一的演化稳定策略 Δ^{ESS} 为

$$e^{-\lambda \pi r^2 \Delta^{\text{ESS}}} = \alpha$$

解上式, 得出

$$\Delta^{\text{ESS}} = \log(\alpha^{-\frac{1}{\lambda \pi r^2}})$$

从而, 当节点的数量为 k 时, 其成功传输数据包的概率为 $\Phi(k)$, 则

$$\Phi(k) = \mu \Delta^{\text{ESS}} \sum_{k \geq 0} k P(K = k) (1 - \Delta^{\text{ESS}})^k =$$

$$\mu \log(\alpha^{-\frac{1}{\lambda \pi r^2}}) \sum_{k \geq 0} k P(K = k) (1 - \log(\alpha^{-\frac{1}{\lambda \pi r^2}}))^k \quad (3)$$

3.2 系统的总吞吐量

为了使得研究的结果更接近实际情况, 假定 n 个节点中的每个节点具有同样数目的干扰用户 $n - 1$ 。由演化稳定策略 ESS 和定理 3 可知, 在时隙 Aloha 网络的局部交互作用中, 节点成功传输数据包的概率与节点数量和成本比率有关, 且 $\Delta^{\text{ESS}} = 1 - \alpha^{1/(n-1)}$ 。一个节点成功传输数据包的概率 Φ 为

$$\Phi = \Delta^{\text{ESS}} (1 - \Delta^{\text{ESS}})^{n-1} = \alpha (1 - \alpha^{\frac{1}{n-1}}) \quad (4)$$

其中: α 为成本比率, n 为局部交互作用中节点的总数量。

在局部的交互作用中, 设时隙 Aloha 网络的总吞吐量为单位 1, 采用演化博弈论的时隙 Aloha 网络总吞吐量为 β , 由式(4)可知 $\beta = (\mu, n, \alpha) = \mu n \Phi$, 即

$$\beta = (\mu, n, \alpha) = \mu n (1 - \alpha^{\frac{1}{n-1}}) \alpha \quad (5)$$

其中: μ 表示一个节点在其接收范围内有自己接收者的概率。

3.3 基于演化博弈动态的 ESS 稳定性

复制者动态是基于模仿复制机制的。在时隙 Aloha 的接入控制中, 认为观察种群中节点的演化是采用策略发送 (T) 和静止 (S)。

由式(2)可得复制者动态收敛性的延迟对 ESS 稳定性的影响, 其中每个纯策略与自身的延迟有关系。设 τ_T (τ_S) 是策

略 $T(S)$ 的延迟,则复制者动态微分方程式(2)变为^[11]

$$\dot{s}(t) = \mu s(t)(1-s(t)) [f(T, s(t-\tau_T)) - f(S, s(t-\tau_S))] \quad (6)$$

其中: $f(T, s(t)) = -\mu(\omega + \delta)(1 - (1-s(t))^{n-1}) + \mu(\rho - \delta)(1-s(t))^{n-1}$, $f(S, s(t)) = -\mu\theta(1-s(t))^{n-1}$ 。

4 实验与分析

本文的实验仿真采用数学软件——MATLAB。其中,节点成功发送数据包的概率根据式(3)计算,选取三个具有代表性的参数分别为 $\lambda = 10, \lambda = 2, \lambda = 0.9$; 时隙 Aloha 网络的总吞吐量根据式(5)计算,在仿真吞吐量 β 时假设其最大值为单位 1,然后在成本比率 α 和用户数量 n 的共同影响下研究吞吐量 β 的变化;系统的稳定性由式(6)计算,在这个仿真中需要将式(6)编写成一个 MATLAB 中的脚本 M 文件,然后在命令行调用这个脚本文件。

4.1 节点成功发送数据包概率

在泊松分布的密度参数 λ 一定的情况下,对成本比率 α 与节点成功发送数据包的概率 Φ 进行仿真。图 4 表明,给出三个具有代表性的 λ 值,当成本比率 $\alpha \in [0.4, 0.5]$ 时,节点发送数据包成功的概率达到最大;而且 λ 值的变化表明节点的分布密度越大,发送数据包成功的概率也越大,从而说明演化博弈的引入可适用于节点密度大的场合。

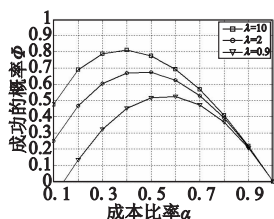


图4 节点成功发送数据包的概率

4.2 系统的吞吐量

在局部的交互作用中,假设用户的数量是 50 个。图 5 表明,当成本比率 $\alpha \in [0.4, 0.5]$ 时,时隙 Aloha 网络的总吞吐量最大近似可以达到 0.7,比图 1 中的 0.368 高出近一倍。可见 ABEGT 协议可有效解决时隙 Aloha 网络中的带宽受限问题。

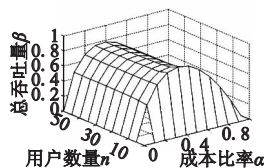


图5 时隙Aloha网络的总吞吐量

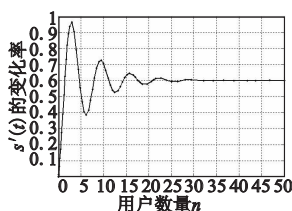


图6 时隙Aloha网络的稳定性

4.3 系统的稳定性

研究 ABEGT 协议中的复制者动态对时隙 Aloha 网络稳定性的影响。在局部的交互作用中,假设用户的数量是 50 个。

图 6 表明,当用户数量很少时, $\dot{s}(t)$ 的变化很不稳定;但随着用户数量的增加, $\dot{s}(t)$ 逐渐趋于稳定。可见 ABEGT 协议可以减少时隙 Aloha 网络中存在的不稳定区域,并适用于节点密度大的场合。

5 结束语

本文的创新在于将演化博弈论引入到时隙 Aloha 网络的接入控制中。建立 ABEGT 模型,并在该模型的基础上提出 ABEGT 协议,而且证明了时隙 Aloha 网络的接入控制中存在演化稳定策略。最后,仿真结果表明,ABEGT 协议不仅解决了传统技术忽略的非合作系统行为,而且减少了 Aloha 网络中存在的不稳定区域及带宽受限问题,从而提高了网络资源的利用率和网络整体的稳定性。但接入控制只是无线资源管理 RRM 的一部分,RRM 还包括功率控制和路由策略等,这些都是需要进一步研究的问题。在下一步的工作中,笔者试图将演化博弈论应用到无线网络的功率控制中,以期实现对无线资源的合理分配和有效管理。

参考文献:

- [1] NIYATO D, HOSSAIN E. A noncooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks[J]. *IEEE Trans on MobiCom*, 2008, 7(3): 332-345.
- [2] 韩冰青, 张宏, 刘凤玉, 等. 无线 Ad hoc 网络中 QoS 感知的跨层资源分配算法[J]. *软件学报*, 2010, 21(12): 3138-3150.
- [3] 李明欣, 陈山枝, 谢东亮, 等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. *软件学报*, 2010, 21(8): 2037-2049.
- [4] ALTMAN E, BOULOGNE T, EL-AZOUZI R, et al. A survey on networking games in telecommunications[J]. *Computers Operations Research*, 2006, 33(2): 286-311.
- [5] GARG R, KAMRA A, KHURANA V. A game-theoretic approach towards congestion control in communication networks[J]. *SIGCOMM Computer Communication Review Archive*, 2002, 32(3): 47-61.
- [6] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RACHAVENDRA C. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multi-copy case[J]. *ACM/IEEE Trans on Networking*, 2008, 16(1): 63-76.
- [7] KANNAN R, COTTIS P G. Adaptive routing strategies in IEEE 802.16 multi-hop wireless backhaul networks based on evolutionary game theory[J]. *Selected Areas in Communications*, 2008, 26(7): 1218-1225.
- [8] WEIBULL J W. *Evolutionary game theory*[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1995.
- [9] HAMIDOU T, EITAN A, RACHID E-A, et al. Evolutionary games with random number of interacting players applied to access control[C]//Proc of the 8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc and Wireless Networks (WiOpt). 2008.
- [10] NIYATO D, HOSSAIN E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2009, 58(4): 2008-2017.
- [11] TEMBINE H, ALTMAN E, ACHID E A. Delayed evolutionary game dynamics applied to medium access control[C]//Proc of International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. 2007: 1-6.