

无线 Mesh 网络 MAC 性能的博弈分析及优化^{*}

赵锦琳 张国鹏 张海林

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要 将博弈论用于 IEEE 802.11 无线 Mesh 网络媒体接入控制协议的性能分析和优化。通过将节点间的信道竞争过程建模为非完全信息动态博弈,求解博弈的纳什均衡,即各节点的最优分组发送概率,并据此提出改进的 DCF 协议(G-MAC):各节点首先通过监测信道,对当前博弈状态(竞争信道的节点数)进行估计;然后根据估计到的博弈状态调整其均衡策略(最小竞争窗口);最后通过有限次动态博弈获得最佳系统性能。同时,提出了一种能准确估计博弈状态的虚拟帧发送机制(VDCF),使空闲节点在转换为发送状态时可快速调整到均衡策略。仿真研究表明:G-MAC 协议可以显著提高无线 Mesh 网络的系统吞吐量,降低延迟、延迟抖动和丢帧率。

关键词 无线 Mesh 网络,博弈论,MAC,纳什均衡

Game-theoretic Performance Analysis and Optimization of WMNs

ZHAO Jin-lin ZHANG Guo-peng ZHANG Hai-lin

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract A novel concept of incompletely cooperative dynamic game theory was used for performance analysis and optimization of IEEE 802.11 WMNs. The channel contention process was modeled as a dynamic game with incompletely information. According to Nash equilibrium of the game, a novel DCF scheme, called G-MAC, was proposed. Firstly, each node estimates the current state of the game (e. g. , number of competing nodes). Secondly, each node changes its equilibrium strategy by tuning its local contention parameters (e. g. , the minimum contention window) based on the estimated game state. Finally, the game is repeated finitely to get the optimal performance. Besides, a virtual frame scheduling mechanism(VDCF) should be incorporated in G-MAC. Simulation results show G-MAC can increase the system throughput, decrease delay, jitter and packet-loss-rate.

Keywords Wireless mesh networks, Game theory, Medium access control, Nash equilibrium

1 引言

无线 Mesh 网络(WMN, wireless mesh networks)是一种新型 Internet 无线接入解决方案,它融合了无线局域网(WLAN)和 Ad Hoc 网络的优势,支持用户节点和无线接入点(AP)之间的多跳通信。即在 WMN 中,任何用户节点都可以收发自己的数据,以及中继其它节点的数据分组。WMN 作为“最后一英里”宽带接入的解决方案,有效解决了传统 WLAN 中存在的可伸缩性低和健壮性差等问题。

WMN 在媒体接入控制(MAC, Medium Access Control)层采用 IEEE802.11 DCF(Distributed Coordination Function)协议^[1]。DCF 是一种基于载波侦听多路访问/冲突避免(CS-MA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)的多址接入方式,针对单跳网络而设计。网络中各用户节点按照 DCF 设定的竞争参数分布式竞争共享信道。当网络负载较大时,节点只有在经历多次数据帧碰撞后,才能获得理想的竞争窗口 CW,从而导致系统吞吐量、时延以及丢帧率等性能指标急剧下降^[2];而且随着跳数的增多,竞争的开销亦随之增大,网络的整体性能逐渐恶化。可见,DCF 并不适用于 WMN,必须针对 WMN 的应用环境对 DCF 作出改进。

鉴于 WMN 中各节点对共享信道的分布式竞争特性,本文从最大化网络性能指标出发,将节点的竞争式信道接入过程建模为非完全信息动态博弈。通过求解此博弈的纳什均衡(NE, Nash Equilibrium),提出 DCF 的改进协议(G-MAC),以提高 IEEE 802.11 WMN 的性能。

2 博弈论

博弈论是分析竞争与协作的有力工具,是使用严谨的数学模型研究冲突对抗条件下最优决策问题的理论。非协作博弈^[3]是指参与者依据个人喜好作出决定和策略选择的过程,强调个人理性和个人最优。其分析目的是求解各参与者的均衡策略,使得任意参与者不可能通过单方面背离均衡策略而获取更多的效用。依据参与者之间的行动是否同步,非协作博弈论可分为静态博弈和动态博弈。动态博弈包括两个内涵:参与者以异步的方式采取行动,且后行动者能够观察到先行动者所采取的行动;所有参与者以上述共同知识作为各自制定行动策略的依据。完全信息是指每个参与者对所有其他参与者的特征、战略空间和支付函数有准确的知识,否则就是非完全信息。

博弈论目前已广泛用于分析和改进无线网络的 MAC 协

^{*}国家自然科学基金(60772317)资助项目和陕西省自然科学基金基础研究计划(2006F30)。赵锦琳 硕士研究生,研究方向为无线 Ad Hoc 网络、无线 Mesh 网络;张国鹏 博士研究生,研究方向为无线网络多址接入协议、通信网络博弈论;张海林 教授,博士生导师,主要研究兴趣为带无线通信、多媒体通信、无线高速数据传输等。

议。文献[4]通过调整各节点的最小竞争窗口 CW_{\min} , 实现了 DCF 各项性能指标的提高。文献[5]给出提高 ad hoc 网络公平性的均衡策略。文献[6]将时隙 Aloha 协议建模为非协作博弈过程, 研究使系统吞吐量最大化的均衡策略选择问题。文献[7,8]进一步分析探讨了非协作博弈在无线网络中的应用。

3 WMN 信道竞争的博弈建模及分析

3.1 802.11 DCF 简述

DCF 主要基于 CSMA/CA 协议和时隙制退避策略: 各节点在监测到信道空闲时间大于规定的时间间隔 DIFS 后, 选择退避时间进入退避过程, 退避结束后发送数据帧, 否则延迟接入直至监测到 DIFS。退避时间是时隙长度 aSlotTime 的整数倍, 时隙数是一个均匀分布在 $[0, CW-1]$ 上的随机整数。竞争窗口 CW 是介于最小竞争窗口 CW_{\min} 和最大竞争窗口 CW_{\max} 之间的整数。第一次发送某帧时, $CW = CW_{\min}$ 。如果多个节点同时发送则该帧发生碰撞, 即发送失败; 将 CW 加倍, 重传该帧; 在重传 m 次后, $CW = CW_{\max} = 2^m CW_{\min}$; 如果再发生碰撞, CW 不再增大, 但继续重传; 直到重传次数达到最大重传次数 r 后, 丢弃该帧。

DCF 使用两种机制来传输分组: 基本 DATA/ACK 模式和 RTS/CTS/DATA/ACK 模式。基本模式下, 目的节点正确接收发端传来的分组后立即返回一个肯定的 ACK 帧。

3.2 非完全信息动态博弈

由以上分析, 根据 DCF 协议的随机竞争特性, WMN 中节点竞争信道的过程具有以下三个特征: 1) 信息的非完全性。节点不能实时交换各自的竞争状态信息, 但可以通过监测信道来估计当前的系统信息。2) 动态性。节点随机访问信道, 每个时隙对应一个系统状态。此外, 各节点均需发送多个帧, 信道竞争博弈会进行多次, 是一个实时动态博弈的过程; 同时, 节点可以通过记录、统计其在以前博弈阶段中的竞争结果, 对网络中其它节点的当前状态进行预估, 以调整其在下一博弈阶段中的竞争策略。3) 有限次博弈。经过有限次博弈后, 若数据帧还未成功发送, 便被丢弃。

节点每次新的数据帧发送以最小竞争窗口 CW_{\min} 竞争信道, 希望在确定时间间隔内尽可能多地发送帧, 即自私地最大化其吞吐量。而非协作博弈是在分布式决策环境下探讨博弈参与者为最大化个体效用的最优策略选择问题, 对参与者策略选择的结果及其所导致的系统整体性能进行分析。综上, 节点间自私的信道竞争过程可描述为非完全信息动态博弈。

3.3 博弈建模

文献[9]建立了多跳 Ad Hoc 网络 2 节点竞争信道的博弈模型, 未能针对实际网络多节点的情况进行建模。此外, 所提出均衡策略的实现要求信息的完全性, 即各节点的环境信噪比均能被对方获取, 这在存在大量节点的 WMN 中也是不易实现的。为此, 本文将 DCF 建模为多节点非完全信息动态博弈。

定义 n 个节点的动态博弈为 $G = \{I, S, U\}$ 。其中 $I = \{1, \dots, n\}$ 为参与博弈的节点集合; $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ 为各节点效用函数的集合; $S = \{T(\text{发送}), W(\text{等待})\}$ 为任意节点的行动空间。节点的行为策略是其在行动空间上的概率分布, 即任意节点 $j(1 \leq j \leq n)$ 以 τ_j 的概率选择 T , 以 $1 - \tau_j$ 的概率选择 W 。

节点在每个时隙进行数据帧发送的过程, 称为一个博弈阶段 $t(t=1, 2, \dots)$ 。 t 博弈阶段开始时, 系统中任意节点 $j \in I$

选择其发送策略: 待发帧的发送概率 $\tau_j^t(T)$ 。节点 j 的效用函数定义为: 在给定其它节点策略选择的条件下, j 选择策略 τ_j^t 所能获得的收益 $u_j^t = u_j(\tau_j^t, \tau_{-j}^t)$ 。 t 博弈阶段, 除 j 外, 所有节点的发送策略组合 $\tau_{-j}^t = (\tau_1^t, \dots, \tau_{j-1}^t, \tau_{j+1}^t, \dots, \tau_n^t)$ 。

此博弈阶段的 NE 解为: 在给定其它节点最优策略组合的条件下, 各节点选择最优发送策略 τ_j^* 以最大化其效用函数: $\tau_j^* \in \operatorname{argmax}_{\tau_j} [u_j(\tau_j^*, \tau_{-j}^*) \geq u_j(\tau_j, \tau_{-j}^*)]$ 。

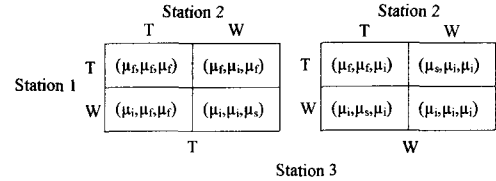


图 1 3 节点的信道竞争博弈模型

3 节点的单阶段博弈模型如图 1 所示。矩阵的每个元素依次表示各节点在当前博弈阶段选择相应的行动后, 节点 1, 2, 3 分别可获取的支付。 $\mu_s, \mu_i, \mu_j (\mu_s > \mu_i > \mu_j)$ 分别表示任意节点在当前时隙发送成功、等待、发送失败所获取的支付, 并假设各节点具有相同的支付取值。

节点 1 的效用函数为其采取相应行动后所获取支付的期望平均值:

$$u_1(\tau_1, \tau_{-1}) = \tau_1 [(\tau_2 \tau_3 + \tau_2(1 - \tau_3) + \tau_3(1 - \tau_2))\mu_f + (1 - \tau_2)(1 - \tau_3)\mu_s] + (1 - \tau_1)\mu_i \quad (1)$$

使效用函数 u_1 最大化的一阶条件为:

$$\frac{\partial U_1}{\partial \tau_1} = [\tau_2 \tau_3 + \tau_2(1 - \tau_3) + \tau_3(1 - \tau_2)]\mu_f + (1 - \tau_2)(1 - \tau_3)\mu_s - \mu_i = 0 \quad (2)$$

假设各节点具有相等的发送概率 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$, 由式(2)有

$$(\mu_s - \mu_f)\tau_j^2 + 2(\mu_f - \mu_s)\tau_j + \mu_s - \mu_i = 0 \quad (3)$$

$$\tau_j^* = 1 - \frac{(\mu_s - \mu_f)}{\mu_s - \mu_i} \frac{1}{2} \quad (4)$$

将上述博弈推广至 n 个节点。为简化分析, 设各节点具有相同的单阶段效用值 (μ_s, μ_i, μ_f) 。此外, 鉴于公平性要求, 假定理想情况下各节点具有对称的发送策略 $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_N = \tau$ 。由于节点均追求效用值的最大化, 则:

$$(1 - \tau_j)^{n-1} \mu_s + \sum_k \binom{n-1}{k} \tau_j^k (1 - \tau_j)^{n-1-k} \mu_f - \mu_i = 0 \quad \forall j \in I \quad (5)$$

任意节点 $j(1 \leq j \leq n)$ 的最优发送策略为:

$$\tau_j^* = 1 - \frac{(\mu_s - \mu_f)}{\mu_s - \mu_i} \frac{1}{n-1} \quad (6)$$

可见, 所有节点的最优策略组合 $\{\tau_j^* | j=1, \dots, n\}$ 就是此 n 参与者单阶段博弈的纳什均衡。在具有相同效用值的前提下, 各节点在每个发送博弈阶段只需获取当前博弈阶段的竞争节点数。借鉴文献[5], 这里将 n 称为博弈状态。

3.4 非完全信息动态博弈的纳什均衡

由于信道竞争是一个动态博弈的过程, 每个博弈阶段开始时, n 并不是节点的先验信息。但是, 节点可通过记录其在前序博弈阶段的历史信息, 如接收到的 ACK 帧、帧发送时延、丢帧率等, 按照博弈论中的贝叶斯法则, 对当前博弈状态 n 进行统计和后验概率计算, 可得节点在博弈中的纳什均衡策略如下。

步骤 1 新的博弈阶段开始时, 若节点有数据帧待发送, 就根据当前估计的博弈状态 n 调整其均衡策略竞争信道;

步骤2 此博弈阶段结束后,节点将博弈结果累计为历史信息,然后按照贝叶斯法则对博弈状态 n 进行后验概率计算;

步骤3 若当前数据帧发送不成功,或节点继续发送新帧,则 n 的更新结果作为下一博弈阶段的先验信息返回步骤1。

4 协议实现

本文在 DCF 的基础上实现 G-MAC 协议。基于上述纳什均衡策略,要解决的问题是:博弈状态的估计以及相应均衡策略的选择。

4.1 博弈状态的估计算法

用于估计碰撞概率 p 的 ARMA 和 Kalman 滤波方法过于复杂,难于实现。本文利用非完全信息动态博弈的贝叶斯法则,借助节点的发送历史信息,提出一种对当前博弈状态 n 进行估计的改进算法 VDCF(Virtual DCF)。

VDCF 中有两类发送帧: Vf(Virtual frame, 虚拟帧), Rf (Real frame, 实际帧)。相应有两个工作阶段:节点处于空闲状态时不断发送 Vf 的阶段,目的是收集发送历史信息、估计系统中当前竞争节点数 \hat{n} ; 利用 \hat{n} 计算均衡策略、调度发送 Rf 的阶段。按照均衡策略设置相关的 Rf 发送参数,可以减少数据帧碰撞的发生,提高系统的整体性能。利用 Vf 的发送估计当前节点数的原理如下:

不考虑噪声或干扰引起的传输错误时,WMN 中节点数据帧发送的碰撞概率 p 、发送概率 τ 以及当前博弈状态 n 之间有如下关系:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (7)$$

则 n 的估计为:

$$\hat{n} = f(\tau, p) = 1 + \frac{\log(1-p)}{\log(1-\tau)} \quad (8)$$

由文献[10],采用标准 DCF 时,节点在每个时隙的发送概率 τ 与其竞争窗口参数 CW_{\min} 具有固定关系,并可通过相关竞争参数调整如下:

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(CW_{\min}+1) + p \cdot CW_{\min} \cdot (1-(2p)^m)} \quad (9)$$

将上式代入式(8)可得节点的估计数:

$$\hat{n} = f(p) = \log_2 \left(\frac{2(1-2p)}{(1-2p)(CW_{\min}+1) + p \cdot CW_{\min} \cdot (1-(2p)^m)} \right) + 1 \quad (10)$$

可见,只要对发送帧的碰撞概率 p 进行统计分析,即可对当前系统状态 \hat{n} 作出估计。

基本接入模式下,平均发送概率和平均条件碰撞概率可如下获得:

$$\begin{cases} \tau = \frac{\text{TransmittedFragmentCount} + \text{AckFailureCount}}{\text{SlotCount}} \\ p = \frac{\text{AckFailureCount}}{\text{TransmittedFragmentCount} + \text{AckFailureCount}} \end{cases} \quad (11)$$

RTS/CTS 模式下,一旦 RTS/CTS 握手成功建立,则理想信道情况下数据帧会完全发送成功。因此,平均发送概率和平均条件转移概率为:

$$\begin{cases} \tau = \frac{\text{RtsSuccessCount} + \text{RtsFailureCount}}{\text{SlotCount}} \\ p = \frac{\text{RtsFailureCount}}{\text{RtsSuccessCount} + \text{RtsFailureCount}} \end{cases} \quad (12)$$

在 WMN 网卡中,通过设置几个寄存器来实现: Trans-

mittedFragmentCount,用于记录成功发送的数据帧总数; AckFailureCount 记录在给定时间内未收到的 ACK 帧总数; SlotCount 用于记录总的时隙个数。由以上各式即可估计出当前系统状态 \hat{n} 。

为提高估计准确性,节点在空闲状态时应尽量多地收集历史信息,减小 Vf 发送的周期,对 Vf 的设置和发送调度作出如下规定:

① Vf 的时长仅为一个时隙。此外,为减少不必要的能量开销,不对其它节点 Rf 的发送产生影响, Vf 并不被实际发送;

② 为减少碰撞检测的时间, Vf 采用与标准 DCF 不同的碰撞检测模式:标准 DCF 中,若计时器在指定时间间隔内未收到发送帧被正确接收的确认 ACK 帧,节点就判决发送帧碰撞;而 VDCF 中,节点在 Vf 发送时隙过后立即检测信道状态,若没有其它节点的帧发送,则判决 Vf 发送成功,否则判决发生碰撞。

4.2 均衡策略

由节点的效用值关系 $\mu_f(\mu_s > \mu_i > \mu_f)$, 可得 $0 < \frac{\mu_i - \mu_f}{\mu_s - \mu_f} < 1$ 。将其代入式(6),并求一阶微分则有:

$$\frac{d\tau^*}{dn} = \ln \frac{\mu_i - \mu_f}{\mu_s - \mu_f} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \left(\frac{\mu_i - \mu_f}{\mu_s - \mu_f} \right)^{\frac{1}{n-1}} < 0 \quad (13)$$

可见,在节点效用函数值确定的情况下,均衡发送策略 τ^* 应与当前博弈阶段的节点数 n 一一对应,且随 n 的增加单调递减。

根据在 Vf 发送阶段所估计的当前信道竞争状态值 $\hat{n}(t)$, 给出节点在发送 Rf 时的纳什均衡策略、发送概率 $\tau(t)$, 即竞争窗口 $CW(t)$, 为简化实现,本文只调整节点最小竞争窗口 CW_{\min} 。

由式(8)和(13)可知, τ 随 CW_{\min} 的增加单调递减,同时又随 n 的增加而单调递减,故 CW_{\min} 是 \hat{n} 的单调递增函数。则在 G-MAC 中,节点基于博弈状态 \hat{n} 的均衡策略为:

$$CW_{\min}(t) = \min(\lceil \hat{n}(t) \times \text{rand}(7, 8) \rceil, CW_{\max}) \quad (14)$$

其中 $\text{rand}(x, y)$ 指均匀分布在 (x, y) 之间的随机数, $\lceil z \rceil$ 指取整。

5 仿真分析

本文采用 NS-2 仿真 G-MAC 协议的性能。相关参数服从 IEEE 802.11b 协议,使用 RTS/CTS/DATA/ACK 接入机制,未考虑传播时延并假定无隐藏终端。

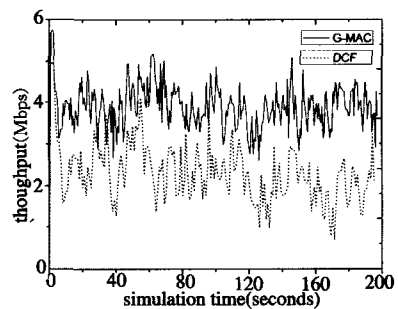


图2 吞吐量

设定信道速率为 11Mb/s,用户节点均匀地分布在 500m × 500m 的范围内。此范围内设有一个无线接入点(AP),用户数据经一跳或多跳到达此 AP,路由协议使用 AODV。每

个用户节点发送速率为 2Mb/s 的 CBR(constant bit rate)数据流,帧长为 1024bytes。仿真开始时刻网络中有 10 个节点,此后每 40s 节点增加 10 个。各节点始终有数据发送,即系统处于业务上的饱和状态。

与 DCF 相比,G-MAC 协议可以提高 WMN 系统吞吐量,降低数据帧的时延,时延抖动和丢帧率,如图 2—图 5 所示。

图 2 表明,由于节点数增多,导致碰撞概率增加,路由开销增多,DCF 的饱和吞吐量不断下降,而 G-MAC 的基本保持不变,始终高于 DCF。这是因为在 G-MAC 中,节点能够根据当前博弈状态 n 调整其策略,选择最优的竞争窗口大小。

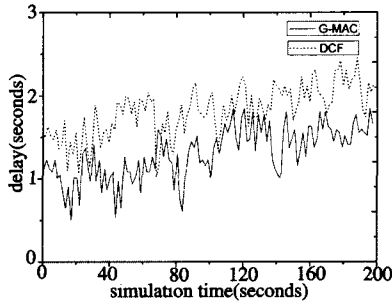


图 3 时延

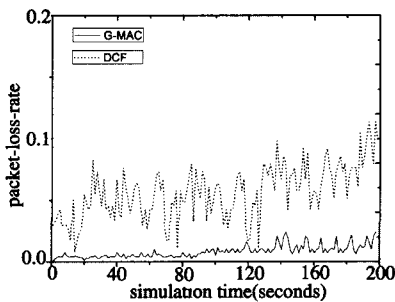


图 4 丢帧率

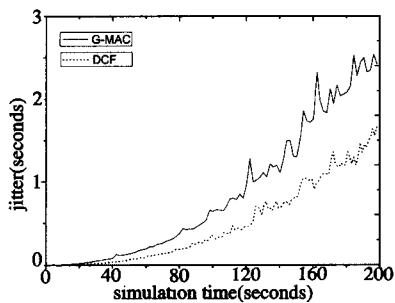


图 5 抖动

图 3 表明,G-MAC 协议的时延始终低于 DCF,主要降低了以下 3 种延迟:1)发端节点监听信道时引入了载波监听延迟,其大小和竞争窗口值有关;2)节点在检测到信道有分组传送或冲突时会导致监听失败,引起退避延迟;3)分组碰撞后重新传送时引入了重传延迟。

图 4 和图 5 表明,G-MAC 协议的丢帧率和时延抖动都远低于 DCF。

综上,基于博弈理论的 G-MAC 协议优于传统 DCF 的原因是:在 DCF 中,1)节点每次成功发送后立即将其当前竞争窗口值 CW 降为 CW_{min} ,由式(14)可知 CW_{min} 并不是适合当前博弈状态 n 的均衡策略。2)节点每次竞争信道失败后, CW

采用二进制指数退避机制增加,同样没有根据当前博弈状态 n 调整其均衡策略。3)系统处于饱和状态时信道竞争较为激烈,节点在经过多次碰撞后才能够获取信道竞争的最优策略,导致系统中碰撞加剧,吞吐量降低,帧发送时延与丢帧率增加。在 G-MAC 协议时,节点能够快速将其初始竞争窗口调整为均衡策略,避免过多碰撞的发生,提高数据帧的成功发送率,最终使系统各项性能指标得以提升。

结束语 本文在综合考虑博弈论和 WMN 的特点后,针对 802.11 DCF 机制在多跳高负荷 WMN 中性能下降的问题,提出了一种基于博弈论纳什均衡的自适应 G-MAC 协议。仿真研究表明:G-MAC 能够获取比 DCF 更高的无线资源利用率,使 WMN 的多项性能指标得到优化。

WMN 主要承载因特网业务,且节点移动性较低,更注重 QoS 保证,现有 Ad Hoc 网络的路由协议不完全适用于 WMN。因此下一步研究重点是:实现网络吞吐量、延时、抖动、链路稳定性等一系列 QoS 保证路由协议,并进行跨层设计。

参考文献

- [1] Matthew Gast, 802.11 Wireless Networks The Definitive Guide, Second Edition. ISBN: 0-596-10052-3, Published by O'Reilly Media, Inc., April 2005
- [2] Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. IEEE Journal of Selected Areas in Telecommunications, Wireless Series, 2000, 18(3): 535-547
- [3] Fudenberg D, Tirole J. Game theory [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1991
- [4] Zhao Liqiang, Zhang Jie, Yang Kun, et al. Using Incompletely Cooperative Game Theory in Mobile Ad Hoc Networks // Proceeding of IEEE International Conference on Communications (ICC 2007). Glasgow, Scotland, UK, June 2007
- [5] Jin Y, Kesidis G. Equilibria of a Non-cooperative Game for Heterogeneous Users of an Aloha Network. IEEE Commun. Letters, 2002, 6(7): 282-284
- [6] Altman E, Azouzi R E, Jimenez T. Slotted Aloha as a Stochastic Game with Partial Information // Proc. 1st Wksp. Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Net. 2003
- [7] Felegyhazi M, Hubaux J - P. Game Theory in Wireless Networks; A Tutorial. EPFL Technical Report, LCA-REPORT-2006-002. Revised version, April 2006
- [8] Altman E, Boulogne T, Azouzi R E, et al. A survey on networking games in telecommunications. Computers and Operations Research, 2006, 33(2): 286-311
- [9] Xiao Yongkang, Shan Xiuming, Ren Yong. Game Theory Models for IEEE 802.11 DCF in Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Radio Communications, March 2005; S22-S26
- [10] Kyasanur P, Vaidya N H. Selfish MAC Layer Misbehavior in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(5): 502-516
- [11] Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network // MOBICOM'05. MIT
- [12] Design and Evaluation of a New MAC Protocol for Long-Distance 802.11 Mesh Networks // Mobicom'05. Indian
- [13] Tsai T-J, Chen Ju-wei. IEEE 802.11 MAC protocol over wireless mesh networks: problems and perspectives [C] // 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2005: 260-263