

# 基于多竞标评价的自组网功率控制方法研究\*

郭其标<sup>1,2</sup>, 贵向泉<sup>2</sup>

(1. 嘉应学院 计算机学院, 广东 梅州 514015; 2. 兰州理工大学 计算机学院, 兰州 730001)

**摘要:** 由于无线自组网无中心、自组织, 网络中各节点发送信息都无须管理设施, 且可以自由选择各自的发送功率, 这使得功率控制成为无线自组网无线资源管理问题中的重要研究课题。提出了一种基于多竞标评价方法的无线自组网功率控制算法。该方法提出一种带有干扰计价的新型利用率函数, 然后在假设利用率函数仅依赖于信干噪比, 且计价函数与干扰成比例的前提下, 将功率控制问题建模为一种非合作的功率控制博弈模型, 最后证明了这种带干扰计价的非合作模型的纳什均衡的存在性和唯一性。仿真结果表明, 相对现有算法, 所提算法具有更高的收敛速率。

**关键词:** 无线自组网; 功率控制; 非合作博弈; 干扰计价

中图分类号: TP393.09

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2015)05-1483-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2015.05.051

## Study of multi-bid evaluation based power control algorithms for Ad hoc networks

GUO Qi-biao<sup>1,2</sup>, GUI Xiang-quan<sup>2</sup>

(1. School of Computer, Jiaying University, Meizhou Guangdong 514015, China; 2. School of Computer, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730001, China)

**Abstract:** Due to the non-centralization and self-organization of Ad hoc networks, network nodes don't need management infrastructure to transmit information and have the freedom of any management. It makes power control problem an important component of radio resource management in Ad hoc networks. This paper proposed a multi-bid evaluation based power control algorithm. The algorithm firstly proposed a new utility function with pricing of interference, and secondly under the assumption that the utility function only depended on signal to interference plus noise ratio, and that the pricing function was proportional to interference, modeled the power control problem a kind of non-cooperative game, finally proved the existence and uniqueness of the Nash equilibrium of this non-cooperative model with pricing of interference. Simulation results show that compared to existing algorithms, the proposed algorithm has a faster convergence rate.

**Key words:** Ad hoc networks; power control; non-cooperative game; pricing of interference

## 0 引言

无线自组网(Ad hoc)是一种无中心架构、自组织的无线网络<sup>[1,2]</sup>。这种类型网络的特点是基站和节点都随机动态分布、网络自愈自组织。在Ad hoc网络中,每个节点都可以根据当前的无线环境自主地调节各自的发送功率,以获得更高的信干噪比(SINR)<sup>[3]</sup>。由于节点往往相互独立且仅关注自身,设计Ad hoc网络的功率控制算法显得尤其困难<sup>[4]</sup>。

目前在对Ad hoc网络的功率控制问题的研究中,基于博弈论的功率控制算法引起了相当大的关注<sup>[5]</sup>。博弈论在建模仅关注自我节点之间交互以及预测它们的策略选择方面,具有很好的效果<sup>[6]</sup>,因此学者很早就发现可以将博弈论用于研究通信系统,尤其是功率控制问题<sup>[7]</sup>。近期有学者提出将功率控制问题建模为一种非合作博弈,并且博弈者通过计价获得更有效的解决方案,这种博弈模型也称为带计价的非合作功率控制博弈模型(NPGP),其中网络利用率函数定义为吞吐量与发送功率之间的比值<sup>[8]</sup>。也有学者提出使用S形利用率函数建立一个功率控制框架,同时对功率消耗加入惩罚机制<sup>[9]</sup>。另

外一些学者研究了将博弈论的分析方法拓展到链路自适应中,具体分析了调制参数的变化以及功率控制对链路性能的影响<sup>[10]</sup>。本文全面研究了现有工作,考虑了无线自组网中的分布式功率控制算法,使用一种简单的利用率函数,该利用率函数仅与SINR有关,并且假设节点的计价与干扰成比例。

本文介绍了系统模型,公式化描述了所研究问题的博弈模型,证明了该博弈的纳什均衡的存在性,并给出了仿真结果。

## 1 系统模型

本文所研究的系统模型如图1所示。

本文考虑的Ad hoc网络的信道是扩频单信道,网络中有 $L$ 个发送节点和 $L$ 个接收节点。这 $N=\{1, 2, 3, \dots, 2L\}$ 个节点在网络中随机分布,且共享无线信道。如图1所示,链路 $L_i$ 由一个专属发送节点 $T_i$ 和一个专属接收节点 $R_i$ 组成。假设每个发送节点 $T_i$ 在整个网络带宽上发送扩频信号,且在发送时间段每个链路的增益是固定的。据此本文使用一种简单的传播模型刻画路径增益,该传播模型是路损指数的确定函数。发送节点 $T_i$ 和接收节点 $R_i$ 之间的链路 $L_i$ 的增益由式(1)定义。

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-05-04 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2013010013307); 广东省高等学校学科与专业建设专项资金科技创新项目(2013KJCX0171)

作者简介: 郭其标(1982-),男,广东梅县人,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络(guoqbiao1982@163.com); 贵向泉,男,甘肃定西人,博士。

$$h_{ii} = \frac{K}{d_{ii}^\beta} \quad i \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (1)$$

其中:  $d_{ii}$  是链路  $L_i$  中, 发送节点  $T_i$  和接收节点  $R_i$  之间的距离;  $K$  是比例常数;  $\beta$  为路损常数, 取值为 3 ~ 6。在  $R_i$  接收发送节点  $T_i$  的信号的同时, 该节点也接收其他  $L-1$  个链路上的发送节点  $T_j(j \neq i)$  的信号, 这就给接收节点  $R_i$  带来干扰。对于匹配滤波器接收机, 链路  $L_i$  的 SINR 由式 (2) 给出。

$$\gamma_i = G \frac{p_i h_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j h_{ji} + \sigma^2} \quad (2)$$

其中:  $G$  为扩频增益;  $h_{ii}$  和  $p_i$  分别为链路  $L_i$  的信道增益和发送功率;  $h_{ji}$  是链路  $L_j$  上发送节点  $T_j$  到链路  $L_i$  上接收节点  $R_i$  的信道增益;  $p_j$  是发送节点  $T_j$  的发送功率;  $\sigma^2$  是加性高斯白噪声功率<sup>[11]</sup>。

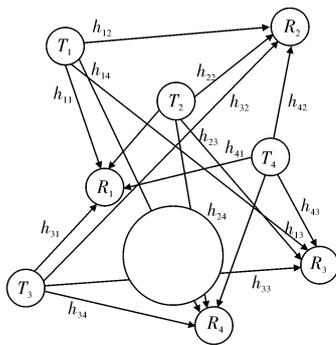


图 1 具有四条链路的 Ad hoc 网络的一个示例

由于无线自组网中的大多数节点是通过电池功能的, 能量效率对延长节点寿命至关重要。如果能量效率是网络性能的主要关注点, 那么显然接收节点的输出端 SINR 更高, 误比特率就会更低, 即吞吐量更高。无线自组网没有任何管理设施, 所有的节点按照各自的行为习惯进行通信, 以最大化它们各自的利用率。然而, 获得更高的 SINR 水平需要更高的发送功率, 这就给其他接收节点造成更严重的干扰。无线自组网的功率控制问题可以描述为一种非合作博弈模型, 本文使用非合作模型方法研究和实现能量效率和吞吐量之间的折中和均衡。

## 2 带有干扰计价的非合作功率控制博弈

### 2.1 博弈理论基础

通常, 博弈模型由三个元素组成: a) 博弈者, 它们是博弈模型中的决策制定者, 每个博弈者从策略集中选择一个单一行为, 以获得最优的输出; b) 策略集, 这是所有可行行为组成的一个集合; c) 收益, 每个博弈者通过一个利用率函数评估当所有的博弈者都选择了它们的行为后, 最后的输出结果。

近年来, 研究者开始使用博弈论来处理无线通信系统中传输资源有限的情况下系统成员的关注内容不同所引起的冲突。因为在大多数策略选择情形下, 无线节点按照一种分布式的方式共享一个公共资源, 本文提出的方法关注于非合作博弈理论。博弈  $G$  的正规形式可写为  $G = \{N, \{s_i\}, \{u_i\}\}$ , 其中  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  是博弈者的集合,  $s_i$  为博弈者  $i$  的所有行为构成的策略集合,  $u_i$  为博弈者  $i$  的利用率函数。

定义 1 如果对每个博弈者  $i$  都有

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad \forall s_i \in S_i \quad (3)$$

则称策略组合  $S^*$  构成了一个纳什均衡。

这意味着在一个纳什均衡中, 所有博弈者都不能为了增加

自身的收益而单方面改变自身的策略。换一种说法, 纳什均衡是一组由各个博弈者相互间最好的响应策略组成的策略组合。式 (3) 中  $s_{-i} = \{s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n\}$  表示博弈者  $i$  的对手的策略。

从以上分析可以看出, 解决一个博弈的第一步是研究纳什均衡的存在性。根据现有研究结果, 引入超模性之后的博弈模型具有纳什均衡, 因此引起了研究者的特别关注。如果所有博弈者的利用率函数满足下列两个条件, 则可将这个博弈过程称为超模博弈:

- a) 所有的策略空间是完全集;
- b)  $\frac{\partial^2 U_i}{\partial s_i \partial s_j} \geq 0, \forall j \neq i \in \{1, 2, \dots, L\}$ 。

### 2.2 利用率函数定义及分析

由于频谱和功率是无线自组网中的有限资源, 无线自组网通常会使用能够同时达到合适频谱效率和功率效率的调制方式如多进制正交幅度调制 (MQAM)。考虑加性高斯白噪声中的二进制相移键控、正交相移键控、多进制正交幅度调制方式, 多进制正交幅度调制的误比特率性能可通过式 (4) 进行良好的近似。

$$\text{BER}_{\text{MQAM}} \approx 0.2 e^{-1.5 \frac{\gamma}{M-1}} \quad M = 2^l, l = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 当各个发送节点使用不同的 MQAM 调制模式时, 可以找到满足误比特率要求最小的 SINR, 记为  $\gamma_0$ 。

在无线自组网中, 发送节点可以根据周围的环境选择合适的调制模式。然而, 在 NPGP 博弈中, 效率函数  $f(\gamma_i)$  需要提前进行定义, 且利用率函数可能涉及到复指数的计算。由于服务质量 (QoS) 仅与 SINR 有关, 可以使用简单的利用率函数, 将 SINR 作为函数参数, 如式 (5) 定义。

$$u_i = \frac{\gamma_i - \gamma_0}{\gamma_i} \quad (5)$$

其中:  $\gamma_0$  是满足误比特率要求的最低 SINR;  $\gamma_i$  是链路  $L_i$  上输出节点  $R_i$  的输出 SINR, 它是发送功率  $p_i$  的函数。如果  $\gamma_i > \gamma_0$ , 利用率函数的值为正, 且保持在某个 QoS 等级。

在 NPGP 中, 计价函数由常数乘以发送功率表示, 且所有节点都使用相同的计价机制, 这显然是不公平的。发送节点  $T_i$  对其他链路上的接收节点  $R_j$  造成了干扰。为了避免发送功率的无限制使用, 需要对网络节点施加一个计价函数, 该计价函数与该节点对其他节点造成的干扰成比例。将干扰引入计价函数, 可以得到净利用率函数, 如式 (6) 所示。

$$u_i^c(p) = \frac{\gamma_i - \gamma_0}{\gamma_i} - \frac{c}{\max h(i, j)} \sum_{j \neq i} p_j h_{ij} \quad i \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (6)$$

其中:  $c$  是计价因子;  $h_{ij}$  是链路  $L_i$  上发送节点  $T_i$  到链路  $L_j$  上的接收节点  $R_j$  的路径增益, 计价函数与  $c$  除以  $\max h(i, j)$  的数量级相同。因此带有干扰计价机制的非合作功率控制博弈 (NPGPI) 可以描述为式 (7)。

$$\max_{p_i \in P_i} u_i^c(p) = \frac{\gamma_i - \gamma_0}{\gamma_i} - \frac{c}{\max h(i, j)} \sum_{j \neq i} p_j h_{ij} \quad (7)$$

下面将证明 NPGPI 是一种超模博弈。首先, 将式 (7) 两边对  $p_i$  求导, 得到

$$\frac{\partial u_i^c}{\partial p_i} = \frac{\gamma_0}{\gamma_i^2} \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} - \frac{c}{\max h(i, j)} \sum_{j \neq i} h_{ij} = \frac{\gamma_0}{\gamma_i^2} \frac{\gamma_i}{p_i} \frac{-c}{\max h(i, j)} \sum_{j \neq i} h_{ij} = \frac{\gamma_0}{\gamma_i p_i} \frac{-c}{\max h(i, j)} \sum_{j \neq i} h_{ij} \quad (8)$$

可以看到最后的等式右边第二个式子  $\frac{-c}{\max_{i \neq j} h(i, j)} \sum_{i \neq j} h_{ij}$  与  $p_i$  无关 因此将式 (8) 两边再次对  $p_i$  求导 有式 (9)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_i^c}{\partial p_i \partial p_i} &= \frac{\partial}{\partial p_i} \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_i p_i} \frac{-c}{\max_{i \neq j} h(i, j)} \sum_{i \neq j} h_{ij} \right) = \\ \frac{\partial}{\partial p_i} \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_i p_i} \right) &= \frac{\gamma_0}{p_i} \frac{-1}{\gamma_i^2} \frac{-G p_i h_{ii}}{(\sum_{j \neq i} p_j h_{ji} + \sigma^2)^2} \sum_{i \neq j} h_{ij} = \\ \frac{\gamma_0}{G p_i h_{ii}} \sum_{i \neq j} h_{ij} &\geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

因此可以断定无线自组网中的 NPGPI 模型是一种超模博弈 存在唯一的纳什均衡。

### 2.3 功率控制算法

本文使用分布式功率控制算法 算法过程如下所示:

a) 设置  $k=0$  时的初始发送功率  $p_1(k)$   $p_2(k)$   $\dots$   $p_L(k)$  , 以及计算精确度  $\varepsilon > 0$ 。

b) 计算 SINR  $\gamma_i(k) = G \frac{p_i(k) h_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j(k) h_{ji} + \sigma^2}$  并且将  $\gamma_i(k)$  代入

$$\frac{\partial u_i^c}{\partial p_i(k)} = 0 \text{ , 计算 } p_i(k+1) \text{ 。$$

c) 当所有的发送功率满足计算精确度限制  $|p_i(k) - p_i(k-1)| < \varepsilon$  迭代结束  $\{p_1(k)$   $p_2(k)$   $\dots$   $p_L(k)\}$  是最优的功率; 否则跳回至步骤 b)。

### 3 仿真结果及分析

本文的仿真环境为如图 2 所示的无线自组网。

8 个节点随机分布在  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的区域。专属发送节点只与专属接收节点进行通信 因此这些节点组成了无线自组网中的四条链路。路径增益通过简单路损模型  $h_{ii} = \frac{K}{d_{ii}^4}$  其中  $K = 0.097$  , 为常数。接收机处的加性高斯白噪声功率为  $\sigma^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ W}$ 。这里假设发送节点使用二进制相移键控调制方式  $\gamma_0 = 6 \text{ dB}$ 。

图 3 显示了发送功率的收敛性 计价因子  $c$  为 1。

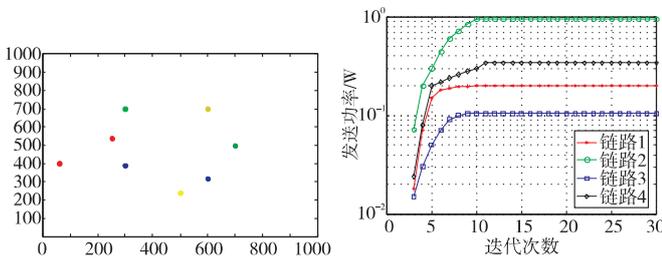


图 2 无线自组网的节点分布

图 3 发送功率的收敛性

当迭代次数为 10 时 链路 1 的发送功率为 0.2 W。由于链路 2 的距离最大 所以它的发送功率最大。尽管链路 3 和 4 具有近似相同的距离 链路 4 必须约束自身的发送功率 以避免对接收机  $R_2$  和  $R_3$  造成干扰。图 3 说明了带有干扰计价的非合作功率控制博弈的纳什均衡的存在性和唯一性。

利用率函数的收敛性如图 4 所示 计价因子  $c$  为 1。

链路 2 具有最高的发送功率 但是其利用率却低于链路 1 和 3。这说明链路具有较高的发送功率并不能说明该链路的利用率也较高。

图 5 描述了不同计价因子下的发送功率。

当计价因子  $c$  增加时 惩罚等级也随之升高。当  $c = 0.1$  时 链路 1 的发送功率为 2 W。随着计价因子  $c$  增加到 1 链路

1 的发送功率降低到 0.2 W 功率降低达到 10 倍。图 5 也明显地显示出计价函数可以有效地控制发送功率。

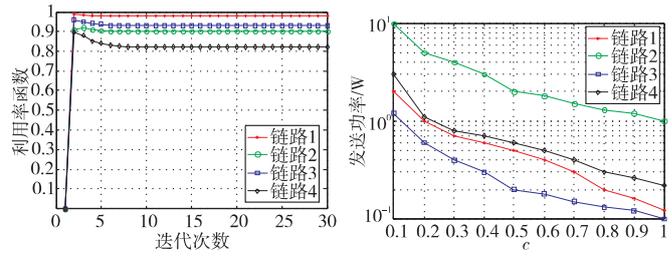


图 4 利用率函数的收敛性

图 5 不同计价因子下的发送功率

### 4 结束语

在无线自组网中 由于大多数节点是靠电池供电的 所以能量效率对延长节点寿命而言尤其重要。无线自组网通常使用兼具较好的功率效率和频谱效率的调制方式 如多进制正交幅度调制方式。尽管现有的研究表明非合作功率控制博弈能应用于无线自组网 博弈的效率函数需要提前定义 且利用率函数会涉及到复指数计算。本文提出了一种更加简单的利用率函数 该利用函数仅与 SINR 有关 并且使用干扰作为计价函数。这种利用率函数和计价函数很适用于与调制模式无关的无线自组网络。其证明了带干扰计价函数的非合作功率控制模型的纳什均衡的存在性和唯一性。仿真结果表明本文所提的分布式算法具有更快的收敛速率。

#### 参考文献:

- [1] 陈辉,巨永锋.无线自组网基于移动预测和能量均衡的拓扑控制算法研究[J].计算机学报,2013,40(4):111-114.
- [2] CHATURVEDI A, TIWARI D, BHADORIA R S, et al. Route discovery protocol for optimizing the power consumption in wireless Ad hoc network [C]//Proc of International Conference on Communications Systems and Network Technologies. 2013: 290-294.
- [3] 吕绍和,王晓东,周兴铭.相继干扰消除的无线自组网基于 SINR 模型的调度[J].计算机工程与科学,2012,34(2):1-8.
- [4] ZHAO Shun-li, YIN Xun-he, WEI Xue-ye, et al. An improved maximum uniform SIR power control in Ad hoc networks [C]//Proc of the 31st Chinese Control Conference. 2002: 5454-5459.
- [5] FENG Da-quan, JIANG Chen-zi, LIM G, et al. A survey of energy-efficient wireless communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 15(1): 167-178.
- [6] 张北伟,胡琨元,朱云龙.基于博弈论的认知无线电频谱分配[J].计算机应用,2012,32(9):2408-2411.
- [7] MACKENZIE A B, WICKER S B. Game theory in communications: motivation, explanation, and application to power control [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2001: 821-826.
- [8] LI Ze, SHEN Hai-yang. Game-theoretic analysis of cooperation incentive strategies in mobile Ad hoc networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2012, 11(8): 1287-1303.
- [9] 李晓鸿,王文艳,王东.一种最大化 Ad hoc 网络生存期的拓扑控制算法[J].计算机研究与发展,2013,50(3):461-471.
- [10] CHAMODRAKAS I, MARTAKOS D. A utility-based fuzzy TOPSIS method for energy efficient network selection in heterogeneous wireless networks [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3734-3743.
- [11] BACCI G, LUISE M. QoS-aware game-theoretic rate & power control for CDMA wireless communication networks [J]. Computer Networks, 2013, 57(8): 1789-1804.