

## 基于非合作博弈的无线自组织网络流量控制模型

冯慧斌 张顺颐 刘超 王攀 严军荣

(江苏省通信与网络技术工程研究中心 南京 210003)

(南京邮电大学信息技术研究所 南京 210003)

**摘要:** 该文根据无线自组织网络中流量控制和无线信道的特性, 利用非合作博弈理论构造了基于网络流量速率和时延为参数的流量效用函数, 建立了非合作博弈的无线自组织网络流量控制模型, 证明了流量控制模型的 Nash 均衡解存在性, 给出了模型的 Nash 均衡解的具体形式。数值仿真结果表明该模型存在 Nash 均衡解, 能有效对网络中流量进行控制, 满足不同业务的用户流量 QoS 需求。

**关键词:** 无线自组织网络; 流量控制; 非合作博弈; 效用函数

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0925-04

## Wireless Ad hoc Network Flow Control Model Based on Non-Cooperative Game Theory

Feng Hui-bin Zhang Shun-yi Liu Chao Wang Pan Yan Jun-rong

(Jiangsu Engineering Research Center of Telecommunication & Network Technology, Nanjing 210003, China)

(Institute of Information Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** According to wireless Ad hoc network flow control and wireless channel characteristic, the flow utility function based on network flow rate and delay is constructed by using non-cooperative game theory, then the no-cooperative wireless ad hoc network flow control model is proposed, finally the existence of model's Nash equilibrium is proved and the Nash equilibrium idiographic form is presented. Numeric simulation results show the existence of model's Nash equilibrium, it can control the network flow effectively and satisfies the QoS demand of various user flows in the network.

**Key words:** Wireless Ad hoc network; Flow control; Non-cooperative game; Utility function

### 1 引言

无线自组织网络是由一系列无线移动节点组成的集合, 其通过多跳链路来完成通信<sup>[1]</sup>。由于无线自组织网络的固有特性, 这给在无线自组织网络进行流量控制带来了巨大的挑战。目前无线自组织网络的流量控制策略大部分都是从原来的有线网络中移植过来的, 然而由于无线自组织网络带宽和路由路径是不断变化的, 而且文献[2]仿真结果表明无线自组织网络负载很重或者网络中存在着贪婪的用户流量时, 网络端到端的吞吐量和时延将会剧烈地下降, 所以并不能完全复用有线网络流量控制策略。

国内外对网络流量控制的研究已取得了一些成果, 其主要从控制论的角度来进行研究。文献[3]研究 Internet 中单播和多播通信量共存网络架构中的基于会话信息反馈的流量控制问题, 提出了一种基于单播和多播会话速率之间关系的公平消息策略, 同时针对链路的容量是时变的特点, 证明了

流量控制系统的稳定性。文献[4]提出了一个基于无线自组织网络分布式流量控制框架, 通过利用 MAC 层控制信息来有效地执行网络层的流量控制功能, 提高了流量控制策略效率。文献[5]提出了应用跨层技术来实现无线自组织网络流量控制, 路由层负责通知应用层业务的路由改变并且应用层业务根据路由长度自适应地修改数据包发送速率, 从而提高流量控制策略的效率。文献[6, 7]也分别从控制理论的角度研究了无线自组织网络中能支持不同业务的 QoS 流量控制机制。

近年来博弈论广泛应用于研究有线/无线网络中的流量控制问题<sup>[8-13]</sup>, 文献[8]提出了零和与非零和随机博弈网络流量控制框架并给出两种模型在网络流量控制的应用场景, 但由于流量状态集过于复杂所以很难计算模型的 Nash 均衡解。在文献[9]中, 作者把 Internet 中的 TCP 流间资源竞争模拟成流量演化博弈模型, 在仿真实验中给出了模型演化稳定策略点, 但并没有证明演化模型 Nash 均衡解的存在。文献[10]研究了大规模用户的有线网络中流量控制策略, 并证明了该模型存在着 Nash 均衡。文献[11]在假设网络存在自私流量情况下, 提出了一种基于发送窗口的分布式流量控制博弈模型来最大化网络收益, 但由于无线网络特性, 文献[10, 11]

2007-12-20 收到, 2008-10-14 改回

国家“863”计划项目(2006AA01Z232), 江苏省高技术研究计划(BK2007603), 江苏省青年科技创新人才启动项目(BK2007603)和江苏省研究生科研创新计划(BG2007045)资助课题

的模型并不能直接应用于无线自组织网络的流量控制。

本文在借鉴文献[9, 11]的思想基础上, 假设无线自组织网络中存在贪婪用户流量的情况下, 从非合作博弈的角度来研究无线自组织网络的流量控制策略, 构造基于网络流量速率和时延为参数的流量效用函数, 使之能满足不同业务用户流量 QoS 需求, 建立了基于非合作博弈的无线自组织网络流量控制模型。

本文具体组织如下: 第2节描述了无线自组织网络流量控制模型; 第3节建立了基于非合作的无线自组织网络流量控制博弈模型; 第4节推导和证明了博弈模型的 Nash 均衡解的存在性和具体形式; 第5节给出了数值仿真结果; 第6节是结束语。

## 2 无线自组织网络流量控制模型

假设无线自组织网络中由  $N$  个结点和  $L$  条链路组成,  $N = \{1, \dots, N\}$  和  $\Gamma = \{1, \dots, L\}$  分别表示网络中结点和链路的集合, 且同时假设网络中有  $M$  个用户流量,  $M = \{1, \dots, M\}$  表示网络中流量集合, 每个用户流量由流量源结点  $s \in N$  和目标结点  $d \in N$  连接。假设网络中每一条链路都有一个固定容量  $C_l > 0$  和一个固定的数据缓冲区  $B_l > 0$ 。第  $i \in M$  个流量连接的路径由无线自组织网络所采用的路由算法来决定, 其路径由连接源结点和目标结点一系列链路集合  $l \in \Gamma$  构成。第  $i$  个用户流量  $x_i$  能顺利通过所有路径必须满足:  $0 \leq x_i \leq x_{i,\max}$ , 其中  $x_{i,\max}$  为用户所要求的流量最大值, 其必须小于经过路径上的链路最小容量即  $\{\min C_l, l \in \Gamma\}$ 。根据上面的定义, 可以定义一个矩阵  $\mathbf{A}$ , 其表示用户流量  $i$  与网络中的链路  $l$  之间的对应关系

$$A_{i,l} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中用户流量  $i$  使用链路  $l$  则  $A_{i,l}$  值为 1, 反之则  $A_{i,l}$  值为 0, 其中  $i \in M, l \in \Gamma$ 。

不失一般性, 假设  $c_1 > c_2 > \dots > c_{l-1} > c_l$  表示用户流量要经过的链路向量, 用  $x_{i,l}$  表示用户流量经过链路  $l$  的速率, 则  $x_i$  表示用户流量经过所有链路  $l$  的流量向量序列。通过使用矩阵  $\mathbf{A}$ , 可以定义出链路容量约束公式

$$\mathbf{A}\mathbf{X} \leq \mathbf{C} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{M-1}, x_M)$  是  $(1 \times M)$  阶的用户流量向量,  $\mathbf{C}$  是  $(1 \times L)$  阶的链路容量向量。

## 3 基于非合作博弈的无线自组织网络流量控制模型

### 3.1 非合作博弈论

博弈论是研究具有理性的不同主体在“策略相互依存”情形下相互作用的数学工具<sup>[14]</sup>。非合作博弈模型可以用  $G = \{I, S, U(\bullet)\}$  描述: 其中  $I$  是博弈参与者的集合,  $S$  是博弈所有参与者的策略空间, 它是一个非空的、紧闭凸集,  $U(\bullet)$

是博弈参与者的效用函数。在非合作博弈模型  $G$  中, 博弈参与者  $i$  采用策略  $s_i^*$  的收益是在其它参与者策略组合  $s_{-i}^* = (s_1^*, s_2^*, s_{i-1}^*, s_{i+1}^*, \dots, s_{m-1}^*, s_m^*)$  确定下获得的, 如果参与者  $i$  的效用函数满足不等式:  $u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*), \forall s_i \in S_i$ , 则称  $s_i^*$  为非合作博弈模型  $G$  的一个 Nash 均衡。

### 3.2 无线自组织网络流量控制非合作博弈模型

用  $G = \{M, \{x_i\}, u\{\bullet\}\}$  来表示由  $N$  个结点和  $L$  条链路组成的无线自组织网络流量控制非合作博弈模型, 其中  $M$  表示网络中用户流量集合  $M = \{1, \dots, M\}$ , 即表示有  $M$  个博弈参与者。  $\{x_i, i \in M\}$  是每个用户流量所采取策略空间的集合, 用  $(x_i, x_{-i})$  为网络中每个用户流量发送数据所采用的速率集合, 因此  $x_i$  取值空间为正实数即  $x_i \in R^+$ , 用  $u(x_i)$  表示用户  $i$  所采取策略  $x_i$  的收益, 定义第  $i$  个用户的效用函数为

$$u(x_i) = \alpha^i \sum_{l \in \Gamma} \log(x_{i,l} + 1) - \beta^i \sum_{l \in \Gamma} \frac{1}{c_l - x_l} \quad (3)$$

其中  $\sum_{l \in \Gamma} \log(x_{i,l} + 1)$  代表用户  $i$  采用流量发送速率  $x_i$  经过预定路由路径的链路累积收益,  $\alpha^i (0 < \alpha^i < 1)$  表示第  $i$  个用户对流量速度敏感程度,  $x_l = \sum_{i \in M} x_{i,l}$  表示经过链路  $l$  流量速率之和, 假设用户流量经过每一条链路  $l$  的排队模型是  $M/M/1$  模型, 则  $\sum_{l \in \Gamma} \frac{1}{c_l - x_l}$  可表示用户  $i$  采用速度  $x_i$  时经过路由路径的所有链路累积时延,  $\beta^i (0 < \beta^i < 1)$  表示第  $i$  个用户对网络时延的敏感程度, 用户流量  $i$  的累积收益为减去累积成本即为用户  $i$  的实际收益, 即为效用函数的由来。

## 4 无线自组织网络流量控制非合作模型 Nash 均衡

在本博弈模型中, 假设博弈中每个参与者都是理性和自私的且在博弈过程中都试图最大化自己的效用函数, 模型求解可转化为求解如下最优化问题:

$$\text{Max} u(x_i, x_{-i}), \quad i \in M \quad (4)$$

对式(3)求偏导数, 则原式可以进行如下的变换:

$$\frac{\partial u(x_i)}{\partial x_{i,l}} = \frac{\alpha^i}{x_{i,l} + 1} - \beta^i \frac{1}{(c_l - x_l)^2} \quad (5)$$

对可微函数, 一阶优化必要条件为  $\frac{\partial u(x_i)}{\partial x_{i,l}} = 0$ , 解得

$$x_{i,l} = (\alpha^i / \beta^i)(c_l - x_l)^2 - 1 \quad (6)$$

代入式  $x_l = \sum_{i \in M} x_{i,l}$  可得

$$x_l = \gamma(c_l - x_l)^2 - M \quad (7)$$

其中  $\gamma^i = \frac{\alpha^i}{\beta^i}$ ,  $\gamma = \sum_{i \in M} \gamma^i$ 。

整理式(7)可得  $\gamma x_l^2 - 2c_l \gamma x_l - x_l + \gamma c_l^2 - M = 0$ , 解之可得方程两个根为

$$x_l^+ = c_l + \frac{1 + \sqrt{4M\gamma + 4c_l\gamma + 1}}{2\gamma} \quad (8)$$

$$x_l^- = c_l + \frac{1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_l\gamma + 1}}{2\gamma} \quad (9)$$

由于  $0 \leq x_i^+ < c_i$ ，由  $(1 + \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) > 0$ ，可以得不等式左边成立即  $0 \leq c_i + (1 + \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma)$  成立，由于  $(1 + \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) > 0$ ，可以推出  $c_i + (1 + \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) > c_i$ ，即  $c_i + (1 + \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) < c_i$  不成立，由于  $x_i^+$  不能满足式(2)，所以  $x^+$  不是符合条件的最优解。

由于  $0 \leq x_i^- < c_i$ ，由  $M \geq 1, c_i > 0, \gamma > 0$ ，可得  $1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1} < 0$ ，从而可以得出右边不等式  $c_i + (1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) < c_i$  成立。由左边不等式大于等于零可得  $c_i + (1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) \geq 0$ ，整理可得

$$c_i \geq \sqrt{M/\gamma} \tag{10}$$

如果  $c_i \geq \sqrt{M/\gamma}$  条件满足，则  $0 < x_i^- < c_i$ ，又因为  $x_i^-$  是模型的最优解，所以  $x_i^-$  是模型的 Nash 均衡，即

$$x_i^* = x_i^- = c_i + (1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma) \tag{11}$$

虽然式(10)保证了每一个用户流量所经链路流量速率是最优解，但每一个用户流量在每一条单独链路上的非负性条件并没有得到保证，为了保证每个用户流量在每一条链路速率为非负，即满足不等式  $x_{i,l}^* > 0$ ，把式(11)代入式(6)可得

$$x_{i,l}^* = (\alpha^i / \beta^i)(c_i - x_i^*)^2 - 1, \text{ 解 } x_{i,l}^* \geq 0 \text{ 得}$$

$$x_i^* < c_i - \sqrt{1/\beta^i} = c_i - \sqrt{\beta^i/\alpha^i} \tag{12}$$

再把等式(11)代入式(12)，解之得

$$c_i > \frac{\gamma}{\gamma^i} + \sqrt{\frac{1}{\gamma^i}} - M \tag{13}$$

由于所有的用户流量参数  $\alpha^i > 0, \beta^i > 0$ ，从式(13)可知，如果用户流量参数  $\gamma^i$  越接近则不等式很容易就可以得到满足。

**引理 1** 对于由  $N$  个结点和  $L$  条链路组成无线自组织网络的流量控制博弈模型  $G = \{M, \{x_i\}, u\{\bullet\}\}$ ，假设网络中链路容量为  $c_1 > c_2 > \dots > c_{l-1} > c_l$ ，如果  $c_i > (\gamma/\gamma^i + \sqrt{1/\gamma^i} - M)$  不等式成立，则无线自组织网络流量控制博弈模型中存在着最优解  $x_i^* = c_i + (1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma)$ ，其中  $0 < \gamma^i < +\infty$ ， $\gamma^i = \frac{\alpha^i}{\beta^i}$ ， $\gamma = \sum_{i \in M} \gamma^i$ 。

由于策略空间  $x_i$  在欧基里德空间上是非空的、紧致、凸集，对  $u(x_i)$  求二阶导数可得  $\frac{u(x_i)}{\partial x_{i,l}^2} = -\frac{\alpha^i}{(x_{i,l} + 1)^2} - 2\beta^i \cdot \frac{1}{(c_i - x_i)^3} < 0$ ，由于  $u(x_i)$  的二阶导数是负值，而  $u(x_i)$  的一阶导数是连续可微的，从而可以推出  $u(x_i)$  在策略空间上是连续且是凹的。

**定理 1** 无线自组织网络流量控制模型 Nash 均衡：在由  $N$  个结点和  $L$  条链路组成无线自组织网络博弈模型  $G = \{M, \{x_i\}, u\{\bullet\}\}$  中，假设网络中链路容量为  $c_1 > c_2 > \dots > c_{l-1} > c_l$ ，由于策略空间  $x_i$  在欧基里德空间上是非空

的、紧致、凸集，且  $u(x_i)$  在策略空间上是连续且拟凹的。所以无线自组织网络流量控制博弈模型存在着 Nash 均衡解当且仅当  $c_i > (\gamma/\gamma^i) + \sqrt{1/\gamma^i} - M$ ，其 Nash 均衡解为  $x_{i,l}^* = (\alpha^i / \beta^i)(c_i - x_i^*)^2 - 1$ ， $i \in M, l \in \Gamma$ ，其中  $x_i^* = c_i + (1 - \sqrt{4M\gamma + 4c_i\gamma + 1}) / (2\gamma)$ ， $M \geq 1$ ， $\gamma = \sum_{i \in M} \gamma^i$ ， $0 < \gamma^i < +\infty$ 。

### 5 数值仿真分析

假设无线自组织网络中有 3 个节点  $A, B, C$  和两条数据链路，其带宽值分别为  $c_1 = 5, c_2 = 10$ ，网络中有两个用户流量  $f_1, f_2$ 。其具体示意图 1 如下所示。

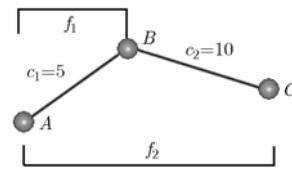


图 1 无线自组织网络流量配置图

通过定理 1 的证明可以得出，无线自组织网络流量控制模型有均衡解的条件是必须满足如下条件： $\{5 > (\gamma/\gamma^i) + \sqrt{1/\gamma^i} - M, \gamma^i < \infty, i = 1, 2\}$ ，利用 Matlab 可以得出系统有均衡解的  $\gamma^1$  和  $\gamma^2$  可行解区域如图 2 所示。

在满足式(13)的条件下，用户流量  $f_1$  在链路  $c_1$  上的流量随  $\gamma^1$  和  $\gamma^2$  而变化的示意图如图 3 所示。从图 3 可以看出  $f_1$  小于  $c_1$  的带宽， $f_1$  的流量对  $\gamma^1$  敏感，而对  $\gamma^2$  相对没有这么敏感，从而可以通过调节  $\gamma^1$  来适应不同 QoS 的业务需求来实现对网络的流量进行控制。

### 6 结束语

本文利用非合作博弈研究无线自组织网络中流量控制问题，根据无线自组织网络中流量控制和无线信道的特性，构造了基于网络流量时延和速度为参数的流量效用函数，建立了非合作博弈的无线自组织网络流量控制模型，证明了流量控制模型的 Nash 均衡解存在性，给出了流量控制模型的 Nash 均衡解的具体形式。数值仿真结果表明该模型存在 Nash 均衡解，能有效对网络中流量进行控制，满足不同业务的用户流量 QoS 需求。

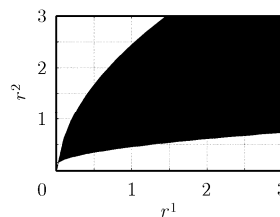


图 2 示例的可行解区域

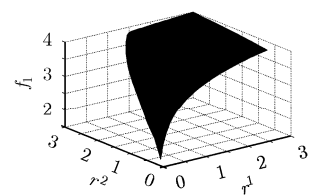


图 3 用户流量  $f_1$  在链路  $c_1$  的流量示意图

## 参 考 文 献

- [1] Scaglione A, Goeckel D L, and Laneman J N. Cooperative communications in mobile Ad hoc networks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(5): 18–29.
- [2] Chen Kai, Nahrstedt K, and Vaidya N. The utility of explicit rate-based flow control in mobile Ad hoc networks[C]. *Wireless Communications and Networking Conference*, Atlanta, GA USA, 21–25, March, 2004, 3: 1921–1926.
- [3] Yang Yue-quan, Cao Zhi-qiang, Tan Min, and Yi Jian-qiang. Fairness and dynamic flow control in both unicast and multicast architecture networks[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, And Cybernetics—Part C: Applications And Reviews*, 2007, 37(2): 206–212.
- [4] Zhai Hong-qiang and Fang Yu-guang. Distributed flow control and medium access in multihop Ad hoc networks[J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006, 5(11): 1503–1514.
- [5] Varshavsky Alex, Li Bao-chun, and Lara E D. Cross-layer flow control in lightly-loaded multi-hop Ad hoc networks[C]. 2004 International Conference on Parallel Processing Workshops, Montreal, Quebec, Canada, 15–18, Aug, 2004: 315–321.
- [6] Roy S D, Bandyopadhyay S, Ueda S, and Tanaka T. A distributed feedback control mechanism for priority-based flow-rate control to support QoS provisioning in Ad hoc wireless networks with directional antenna[C]. 2004 IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 20–24, June, 2004, 7: 4172–4176.
- [7] Qiu Dong-yu and Shroff N B. A predictive flow control scheme for efficient network utilization and QoS[J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004, 12(1): 161–172.
- [8] Sennott L I. Stochastic games and flow control models[C]. *Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control*, San Anlonlo, Texas, USA, December 1993: 3375–3376.
- [9] Zheng You-quan and Feng Zhen-ming. Evolutionary game and resources competition in the Internet[C]. *Modern Communication Technologies, SIBCOM-2001, the IEEE-Siberian Workshop of Students and Young Researchers*, Tomsk, Russia, 28–29 Nov, 2001: 51–54.
- [10] Altman E, Basar T, and Srikant R. Nash equilibria for combined flow control and routing in networks: Asymptotic behavior for a large number of users[J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2002, 47(6): 917–930.
- [11] Jin Youngmi and Kesidis G. Charge sensitive and incentive compatible end-to-end window-based control for selfish users [J]. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2006, 24(5): 952–961.
- [12] Clark J M C and Vinter R B. A differential dynamic games approach to flow control[C]. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii, USA, December 2003: 1228–1231.
- [13] Zhang Hong-gang, Towsley D, and Gong W. TCP connection game a study on the selfish behavior of TCP users. *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Network Protocols*, Boston, Massachusetts, USA, 6–9 November, 2005: 301–310.
- [14] Drew Fudenberg and Jean Tirole. *Game Theory* [M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1991: 10–29.
- 冯慧斌: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为无线资源管理、网络流量控制、P2P激励机制.
- 张顺颐: 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机通信网与IP网络.
- 刘超: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络.