

# 网络路由基于对策论的资源分配策略

董 军, 詹聪明, 舒 静

(华东师范大学软件学院, 上海 200062)

**摘 要:** 对策论提供对独立参与者之间冲突进行建模的框架, 可用以综合考虑路由选择和拥塞控制问题. 经典的对策论不一定直接能应用于网络. 本文在路由选择的多 Agent 系统的基础上, 给出具有“惩恶扬善”行为的基于对策论的路由资源分配策略. 它奖励避免拥塞、惩罚行为不合要求的用户. 在用户都是理性的前提下, 系统能稳定在纳什均衡状态.

**关键词:** 对策论; 路由选择; 拥塞控制; 多 Agent 系统; 资源分配

**中图分类号:** TP393.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 2A-143-05

## Routing Resource Distribution Strategy Based on Game Theory

DONG Jun, ZHAN Cong-min, SHU Jing

(Software Engineering Institute, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Game theory is alternative framework to model confliction between independence players, which can be used to solve the problem. However, classic game theory couldn't be applied to network directly. Game theory based routing approach MPS, which can “encourage merit and punish evil”, is presented. It rewards congestion avoiding users and punishes misbehaving users. A Nash Equilibrium could be reached when players are rational.

**Key words:** multi-agents system; game theory; routing; congestion control; resource distribution

### 1 引言

网络路由选择策略不仅要分配路径, 还要在若干资源中分担负荷, 与此相关的是拥塞<sup>[1]</sup>问题. 拥塞控制有赖于路由选择, 路由选择应该考虑拥塞控制. 例如, 我国长信网中的交换机曾出现因负荷在短时间(除夕晚)内过重而崩溃的情况; 分布式 Web 服务系统被广泛应用于提供有效的因特网服务<sup>[2]</sup>, 但现有的方式几乎没有考虑对主机和服务器的处理过负荷的控制, 这要求能够进行负荷均衡和资源复制, 以图响应时间恰好在允许范围内而预防过早丢弃服务请求.

所以, 宜从路由选择和拥塞控制相结合的角度, 综合考虑路由选择和拥塞控制问题, 以解决网络资源分配问题.

对策论提供对独立参与者 (Player) 之间资源冲突和决策进行建模和分析的框架<sup>[3]</sup>. 每个参与者的回报依赖于其自身的行为和其他参与者的行为. 其自身的行为依赖于三个参数: 活动的策略空间或现有的策略; 包含关于其他参与者信息的信息集合; 确定从结果中获得的满

意度的效用函数. 在“最大最小准则”基础上, 1950 年纳什 (John F. Nash) 介绍了一个对策中解的概念, 即纳什平衡: 在其他参与者的策略已确定的情况下, 没有参与者能通过改变其自身策略而增加效用. 系统的性能只有通过其提供给参与者的满意程度的和来评估. 由于网络不总是处于均衡状态, 就公平而言更好的原则是: 只要参与者能增加其效用, 系统就被认为是公正的.

上世纪 90 年代, 从人工智能出发的对策论研究引起重视<sup>[4]</sup>, 也有将对策论应用于网络资源分配的工作<sup>[5]</sup>. 我们在分析已有方法不足的基础上, 提出了以预测为核心的路由选择的多 Agent 系统方法<sup>[6~8]</sup>. 随之而来的问题是: 若某结点同一时刻的业务 (入呼或中继请求) 多于现有中继线数, 就会出现资源冲突情况. 本文将这个问题一般化为多队列流竞争网络资源问题, 可利用对策论作进一步分析.

### 2 基于对策论的资源分配策略

在对策论中, 通常假定用户和资源供应商独立优化各自的效用函数, 从而使资源分配达到某一特定的对策

均衡解. 对策论的关注点包括研究单个的局中人追求效益最大化行为的决策过程, 系统在大量局中人的作用下是否存在某种均衡或稳定解, 以及局中人采取竞争与合作等不同策略对于系统均衡解的影响等问题.

## 2.1 已有尝试

对策论在网络中的应用已有大量工作. 例如, 发出高等级的业务将增加单个参与者的效用, 但同时会增加支付<sup>[9]</sup>. 进而可假设参与者改变等级对网络有负面影响. 因而每个参与者要努力寻找一种分配, 在高效用和低支付之间获得均衡, 从而形成一种拥塞避免机制, 直到价格不影响带宽分配和链路负载均衡<sup>[10]</sup>.

**理性的选择** 参与者选择的策略所带来的收益相对于其他可以选择的策略而言至少不会更差.

**纳什平衡** 设由参与者、策略和效用函数构成的对策为  $\Gamma = (N, \{S_i\}, \{P_i\})$ , 如果

$$P_i(x^* \parallel x_i) \leq P_i(x^*), \quad \forall i \in N, \forall x_i \in S_i$$

则称  $x^*$  为  $\Gamma$  的一个纳什平衡点. 其中  $x^* \parallel x_i$  表示为  $(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*)$ ,  $P_i(x)$  代表局中人  $i$  的收益.

可以看出, 当达到纳什平衡的时候, 对于任意一个参与者而言, 都无法通过单方面改变自己的策略来获得更多的收益. 纳什平衡的意义在于当博弈的参与者只关心各自利益的时候, 他们能够达成一种妥协(即所谓的平衡点), 并保证在这个平衡点上各自的收益达到最大.

假设用户的效用函数仅与其输出速率有关, 是一个输出速率的增函数. 输入速率向量  $r$  构成一个策略集, 每个用户的效用函数  $U(\gamma)$  是输出速率  $\gamma$  的单调递增函数. 网络中非合作用户竞争资源就可以看成  $n$  人非合作对策:  $n$  个用户 ( $n$  个流) 是参与者; 每个流的输入速率是其策略; 输出速率与输入速率的关系是效用函数.

为了实现给不同的流赋不同的优先级, 通用处理机共享 (Generalized Processor Sharing, GPS)<sup>[11]</sup> 给每个流分配一个固定权重, 确定在每次循环中从该队列发送多少数据量.

设  $n$  个用户共享容量(总带宽)为  $C$  的节点. 用户  $i$  发送数据的速率为  $r_i(t)$ . 由于网络资源限制, 用户可能得不到相同的输出速率. 设稳定状态下数据流  $i$  最终的输出速率为  $\gamma_i(t)$ . 显然输出速率向量  $\gamma(t)$  是所有  $n$  个用户输入速率向量  $r(t)$ 、队列调度规则  $S$  和队列管理策略  $B$  的一个函数  $\gamma(t) = f_{sb}(r(t))$ .

为了最大限度地有效利用资源, GPS 要求网络节点的服务满足以下原则:

$$(1) \text{数据守恒性: } \forall i, r_i(t) \geq \gamma_i(t);$$

$$(2) \text{工作守恒性: } \exists i, s. t. \gamma_i(t) < r_i(t) \Rightarrow \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) = C;$$

$$(3) \text{公平性: } \exists i, s. t. \gamma_i(t) < r_i(t) \Rightarrow \forall j: \frac{\gamma_i(t)}{\phi_i} \leq \frac{\gamma_j(t)}{\phi_j}.$$

此处  $\phi_i$  是流  $i$  的权重.

性质 1 和 2 很好理解, 显然流的输出速率不可能大于其输入速率; 而这个系统采用工作守恒原则, 只有在网络资源耗尽的情况下才发生数据滞留. 就性质 3, 若同时有  $\gamma_i(t) < r_i(t), \gamma_j(t) < r_j(t), \gamma_k(t) = r_k(t)$  成立, 则  $\frac{\gamma_i(t)}{\phi_i} = \frac{\gamma_j(t)}{\phi_j} \geq \frac{\gamma_k(t)}{\phi_k}$ . 也就是说, 若流  $i$  和  $j$  同时有数据滞留的话, 节点对它们的单位权值上提供的服务量是相等的, 且都不小于对无数据滞留的流  $k$  的单位权值上的服务量, 从而体现公平性. 并且, 若  $\phi_i \neq \phi_j$ , 则流  $i$  和  $j$  获得的服务总量是不同的, 这样能隔离不同的业务流, 让不同的流只享用自己可以享用的带宽, 以确保在恶意或者高突发性业务时也不致影响其它的正常流业务.

## 2.2 新的思路

在此基础上, 有很多新的工作, 如递减权重调度 (Diminishing Weight Schedulers, DWS)<sup>[12]</sup>, 能惩罚违规用户和奖励在拥塞避免方面表现好的用户, 考虑了复杂网络系统中的自私用户的存在, 具有保证公平的思想, 但单纯给不同的流赋予一个常值的办法并不能达到区分规范用户和恶意用户、并惩罚后者的目的. 例如, 一个优先级高的流恶意高速率发送数据, 导致节点超载, 它数据被滞留, 它在总权重上获得的服务量仍比优先级低的流要多, 而不管优先级低的流是不是有恶意行为. 应该把流的总权重和输入速率联系起来, 超过一定限度的输入速率将受到惩罚.

为此, 这里给出恶意用户惩罚调度 (Misbehaving-user Published Scheduling, MPS) 方法, 每个用户的效用函数用输出速率来刻画, 而输出速率和所有用户的输入速率、拥塞发生时自身的表现以及拥塞发生时 CPU 处理能力下降和延迟造成的影响有关. 在拥塞发生时, 能标记出违规和不违规用户, 奖励采用合作者, 惩罚不合作者, 保证公平性. 在用户都是理性的情况下, 系统能稳定在纳什均衡状态. 它在 GPS 基础上作了两个修改:

(1)  $\phi_i(t) = \theta_i W(r_i(t))$ . 这里  $W(\cdot)$  称为惩罚权重函数, 它是一个严格递减的正值函数.  $\theta_i = \phi_i$  是原来 GPS 给这个流的权重, 可以根据价格因素、资源分配策略等而定. 于是修改后的  $\phi_i(t)$  不再恒定不变, 而是一个随时间和用户的输入速率而变动的值.

(2) 工作守恒性改成:

$$\exists i, s. t. \gamma_i(t) < r_i(t) \Rightarrow \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) = U(R(t));$$

其中,  $R(t) = \sum_{i=1}^n r_i(t)$ ,  $U(x)$  称为链路发生拥塞时的吞吐量函数.

这里取  $U(R) = \frac{C^2}{R}$ ,  $R \in [C, +\infty)$ . 同时, 设不区分流的业务, 即  $\theta_i \equiv 1$ ; 且所有用户以恒定速率发送数据 (故而输出速率也恒定不变), 于是  $r_i(t), \gamma_i(t)$  简化为  $r_i, \gamma_i$ . 则  $\varphi_i = 1 \times W(r_i) = W(r_i)$ ,  $R = \sum_{i=1}^n r_i$ . 于是公平性原则重写为: 若  $\gamma_i < r_i, \gamma_j < r_j, \gamma_k = r_k$  同时成立, 则

$$\frac{\gamma_i}{W(r_i)} = \frac{\gamma_j}{W(r_j)} \geq \frac{\gamma_k}{W(r_k)}.$$

在惩罚权重函数确定的情况下, 存在纳什均衡, 整个 MPS 模型可以完全确定. 因篇幅所限, 具体证明过程此处从略.

### 3 仿真

这里取三个典型的函数, 分别为  $W(r) = \frac{1}{r}$ ,  $W(r) = \frac{1}{\ln(r+1)}$  和  $W(r) = \frac{1}{r^4}$ , 从而获得了三个 MPS 的实例算法: LIS, RIS, PIS.

取  $W(r) = \frac{1}{r}$ , 公平性为:

$$\exists i, s. t. \gamma_i < r_i \Rightarrow \forall j: \frac{\gamma_j}{1/\gamma_j} \leq \frac{\gamma_i}{1/\gamma_i}.$$

取  $W(r) = \frac{1}{\ln(r+1)}$  ( $\ln$  的自变量取  $r+1$ , 以满足当  $r < 1$  时  $w(r)$  是正值), 公平性为:

$$\exists i, s. t. \gamma_i < r_i \Rightarrow \forall j: \frac{\gamma_j}{1/\ln(r_j+1)} \leq \frac{\gamma_i}{1/\ln(r_i+1)}.$$

取  $W(r) = \frac{1}{r^4}$ , 公平性为:

$$\exists i, s. t. \gamma_i < r_i \Rightarrow \forall j: \frac{\gamma_j}{1/\gamma_j^4} \leq \frac{\gamma_i}{1/r_i^4}.$$

$W(\cdot)$  所选用的 3 个函数  $\frac{1}{\ln(r+1)}, \frac{1}{r}, \frac{1}{r^4}$  的斜率依次增大 (即 3 个函数的图像依次变的“陡峭”).  $W(\cdot)$  的陡峭程度将决定给不合作用户施加的惩罚程度.

在函数  $W(\cdot), C$  取定的情况下, MPS 模型将保证: 确定的用户数  $n$  和它们的一组输入速率  $r$  对应一组唯一确定的输出速率  $\gamma$ .

当链路发生拥塞时, 非响应流不改变自身输入速率, 而响应流在检测到链路发生拥塞时会自觉降低自身发送速率, 从而造成链路带宽分配不公平.

在 MatLab 6.5 下实现了 LIS, RIS, PIS 的调度函数  $LIS(C, n, \mathbf{R}), RIS(C, n, \mathbf{R}), PIS(C, n, \mathbf{R})$ . 输入参数

中,  $C$  是链路的带宽,  $n$  是共享链路的用户个数,  $\mathbf{R}$  是  $n$  个用户在某一轮调度时的输入速率向量.

仿真网络拓扑如图 1 所示, 两个结点  $n_6$  和  $n_7$  之间为瓶颈链路, 其带宽容量为 80Mbps, 延迟为 2ms. 5 个链路接入这个瓶颈链路, 它们的带宽容量都为 100Mbps, 延迟都为 30ms.

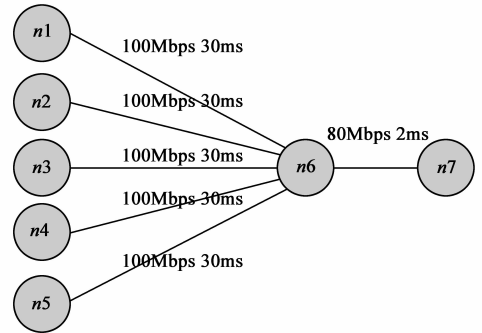


图1 5个链路接入同1个瓶颈链路的网络拓扑结构

前 4 个用户的输入速率都恒定为 32Mbps, 第 5 个用户的输入速率从 0 逐步增加到 57.6Mbps. 瓶颈链路路由器选用 FCFS, WF2Q, RED, FRED, DWS, LIS, RIS, PIS 等经典的拥塞控制算法进行仿真. 图 2 给出仿真结果: 不同的算法下用户 5 输出速率和它的输入速率的关系曲线图.

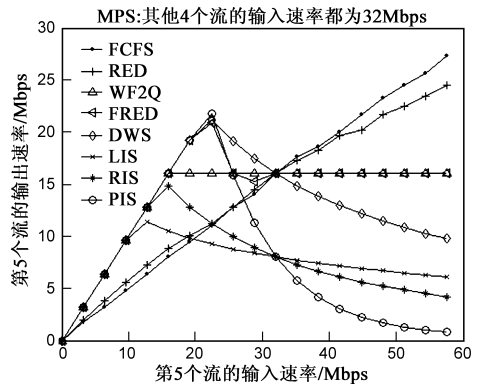


图2 在“存在不合作的非响应流”下的拥塞控制对比

这时, 网络从开始就一直处于拥塞状态, 5 个用户都是不合作的非响应流, 不同算法下第 5 个用户的表现和它所能得到的效用就表现得大不相同了.

对于 FCFS, RED, 输出速率始终随着输入速率的增加而增加, 但增加的速率缓慢, 在第 5 个用户输入速率超过 7Mbps 时, 它获得的输出速率还不到 28Mbps. 对于 WF2Q, FRED 来说, 在输入速率不断增加的情况下, 最后的输出速率将稳定在 16Mbps 的位置. 只有 MPS 的三个实例算法 LIS, RIS, PIS 对第 5 个用户的表现进行了“奖惩”: 第 5 个用户的输出速率起初随着其输入速率的增大而增大, 但增到其公平速率后, 它开始受到惩罚, 得不到完全的输出, 违规用户输入速率越大, 受到得惩罚越厉害. 但是在拥塞发生时, 由于可允许的延迟原因,

能被成功递交的分组急剧减少, DWS 没有考虑这点对每个用户的效用影响, 所有用户的效用总和仍然为总带宽, 如图 3 所示. 这和实际不符合. 而 MPS 的三个算法都考虑了这点, 拥塞时, 所有用户的效用总和有所下降, 符合实际情况. 对于同一输入速率而言, 惩罚的量取决于惩罚权重函数  $W(\cdot)$ . LIS 受到的惩罚量比较小, RIS 中等, PIS 比较大.

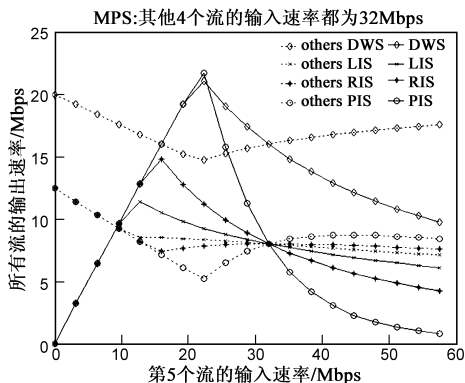


图3 在拥塞发生时所有用户的效用对比

仿真表明, 不同的惩罚权重函数影响对用户的奖惩力度, 达到了预期目的.

现将图 3 中结点  $n_6$  和  $n_7$  之间的瓶颈链路的带宽容量设为 20Mbps, 其余参数不变. 设前 4 个用户的输入速率恒定为 4Mbps, 第 5 个用户的输入速率从 0 逐步增

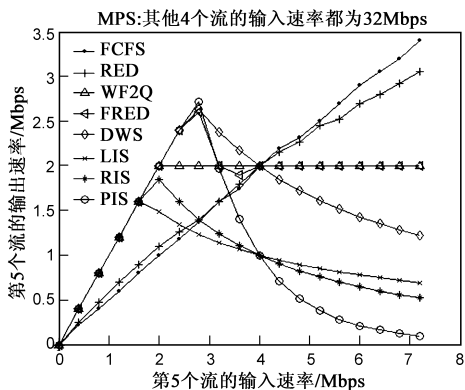


图4 在“存在不合作的非响应流”下的拥塞控制对比

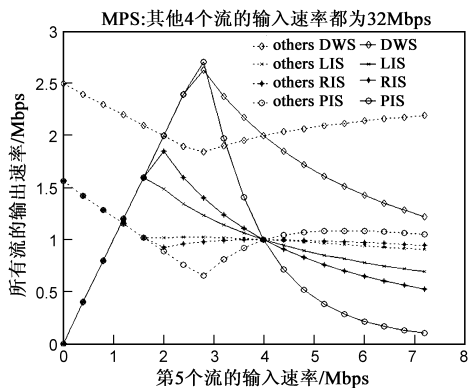


图5 在拥塞发生时所有用户的效用对比

到 7.2Mbps. 图 4 给出对不同的算法用户 5 输出速率和其输入速率的关系曲线图. 图 5 给出了 DWS 和 MPS 在拥塞发生时所有用户效用对比.

除了数据量小以外, 这两个仿真与前两个仿真的条件和结果均类似, 说明了算法具有稳定性.

#### 4 小结

本文所述方法能对“合作用户”进行“嘉奖”, 而“不合作用户”获得的资源会减少, 从而有效地奖励避免拥塞的用户, 惩罚导致拥塞的用户. 同时, 只要用户是理性的, 即使是最自私的用户也会努力估算自己的公平速率, 并把输入速率保持在合适水平, 使系统最终可稳定在纳什均衡状态. 使得“用户合作”不是一种自愿的假设, 而是一种必须的手段.

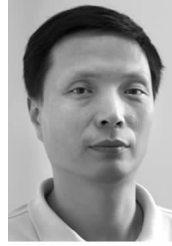
#### 参考文献:

- [1] Glaughe Ingmar, KRAUSE Wolfram, SOLLACHER Rudolf and GREINER Martin. Distributive Routing and Congestion Control in Wireless Multihop Ad hoc Communication Networks [J]. Physica A, 2004, 341: 671 - 701.
- [2] Liu Liming, Lu Yumao. Dynamic traffic controls for web-server networks [J]. Computer Networks, 2004, 45: 523 - 536.
- [3] 张开盛, 张亚东. 关于对策问题 [J]. 科学通报, 2002, 47 (3): 161 - 166.  
Zhang Kaisheng, Zhang Yadong. On game theory [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(3): 161 - 166. (in Chinese)
- [4] Koller Daphne, Pfeffer Avi. Representations and solutions for game-theoretic problems [J]. Artificial Intelligence, 1997, 94: 167 - 215.
- [5] 陶军, 吴清亮, 吴强. 基于非合作竞价博弈的网络资源分配算法的应用研究. 电子学报, 2006, 34(2): 242 - 246.  
Tao Jun, Wu Qing-liang, Wu Qiang. Application research of network resource allocation algorithm based on non-cooperative bidding game [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 242 - 246.
- [6] Dong Jun, He Ji-feng, Pan Yun-he. Predication-based intelligence routing on telecommunications [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 13(2): 233 - 239.
- [7] 董军. 网络路由与智能模拟 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
Dong Jun. Network Routing and Intelligence Simulation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [8] 董军, 潘云鹤. 用神经网络预测负荷的路由选择方法 [J]. 电子学报, 2001, 29(2): 257 - 259.  
Dong Jun, Pan Yun-he. A routing approach based on load prediction using neural network [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(2): 257 - 259.
- [9] Marbach Peter. Priority service and max-min fairness [J].

IEEE/ACM Trans. Networking, 2003, 11(5): 733 – 746.

- [10] Marbach Peter. Analysis of a static pricing scheme for priority service[J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 2004, 12(2): 312 – 325.
- [11] Parekh A K, Gallager R G. A generalized processor sharing approach to flow control: the single-node case [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 1993, 1(3): 344 – 357.
- [12] Garg R, Kamra A, Khurana V. A game-theoretic approach towards congestion control in communication networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2002, 32(3): 47 – 61.

#### 作者简介:



董 军 男, 1964 年 11 月出生于江苏省苏州市, 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究兴趣为思维模拟、人工智能等.

E-mail: jdog@sei.ecnu.edu.cn