

一种基于非合作博弈的均衡路由方法

张惠娟^{1,2}, 周利华¹, 翟鸿鸣³

(1. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071; 2. 同济大学 软件学院, 上海 200062;
3. 交通银行上海总行, 上海 200033)

摘要: 针对路由器路径选择中的资源分配不均衡问题, 提出了基于博弈论思想的解决方案. 将 IPv6 协议中的任意博路由过程看作是多个非合作参与者间的博弈问题, 给出了以单个参与者在各条链路上的速率分配为博弈策略、以该参与者的延迟时间为博弈效用的路由器路由博弈模型, 求解了保证该博弈模型处于均衡状态时的 Nash 均衡解. 在此基础上, 提出了保证多个参与者公平使用网络链路的均衡路由算法. 仿真实验表明, 该算法使得各个参与者在网络中延迟时间少, 且对各个参与者是公平的, 解决了路由器路径选择中资源的均衡性分配问题.

关键词: 资源分配; 非合作博弈; Nash 均衡; 均衡路由

中图分类号: TP393.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)03-0398-04

Balanced route arithmetic based noncooperative game theory

ZHANG Hui-juan^{1,2}, ZHOU Li-hua¹, ZHAI Hong-ming³

(1. School of Computer Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. School of Software Engineering, Tongji Univ., Shanghai 200062, China; 3. Bank of Communication, Shanghai 200033, China)

Abstract: Because of the unbalanced resource distribution in the path choice of the router, a new game-theoretic approach is presented, which regards the anycast route of IPv6 as an uncooperate game in many players. A game model with a player's rate distribution strategy and delay avail in all paths is given. The player's rate distribution which can assure the Nash equilibrium is solved. Based on the Nash Equilibrium, a balanced route arithmetic which assures the best delay and the fair distribution in all players is presented. Simulation results indicate that this arithmetic can solve the balanced resource distribution in the router in effect.

Key Words: resource distribution; noncooperative game; Nash equilibrium; balance route

路由器作为网络资源分配的核心部件, 其路径选择算法是影响网络资源分配公平性和均衡性^[1]的关键问题. 均衡路由算法是指路由器在进行路由选择时, 其目标不再是单纯“最短路径最佳”, 而是整个网络路径效用最佳, 其本质是网络资源的均衡性分配问题, 即网络路径带宽和服务器处理能力等网络资源的均衡性分配问题. 目前, 关于网络均衡路由算法的研究很多, 如基于控制策略、神经网络、遗传算法^[2]、移动 agent 和模拟退火方法等算法. 博弈论是本世纪应用数学最重要理论成果之一, 在网络资源分配研究中有广泛应用. 基于博弈论思想以及博弈解的均衡性来解决网络资源分配的均衡性问题, 是研究网络均衡路由算法的一种新思路.

Nash 均衡^[3]是博弈问题的一种重要解, 是指博弈的任何参与者不能依靠单方面改变自身策略而期望获得更高效益. 文献^[4~9]分别研究了 Nash 均衡的存在性, 网络路由中非合作用户间博弈的 Nash 均衡存在性以及均衡解的惟一性, 具有线性特性的效用函数路由博弈问题, 在网络执行过程中建立非合作用户间的 Nash 均衡方法等问题. 笔者研究了路由器路径选择中的均衡性问题, 提出了基于博弈论思想的解决方案, 即将 IPv6 协议中的任意博路由问题看作是多个非合作参与者间的博弈. 针对该博弈问题, 建立了路由算法的

非合作博弈模型,求得了该博弈的 Nash 均衡点,并在此基础上,提出了一种基于非合作博弈的均衡路由方法.

1 系统介绍

1.1 任务模型

网络实际状况任务模型示意图见图 1. 其中 R_1 到 R_m 是路由器,分别以速率 λ_1 到 λ_n 的泊松分布形式向网络发送数据; S_1 到 S_n 是特定任意播的服务器地址,其地址在路由器 R_1 到 R_m 的路由表中用映射入口,各个服务器处理能力分别为 C_1 到 C_n ; μ_1 到 μ_n 是每条路径处理能力;路由器和服务器之间是网络链路, R_1 到各个服务器的链路带宽分别为 D_{11} 到 D_{1n} ,其余路由器到各个服务器的链路带宽定义类似;路由器分别以一定速率转发分组到服务器 S_1 到 S_n 上,并在各个服务器上以 $M/M/1$ 队列方式执行.

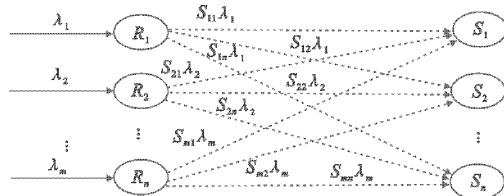


图 1 任意播路由模型

基于图 1 所示任务模型,笔者研究了多个任务流在网络中的均衡路由问题,即根据网络当前链路状态以及服务器处理能力,路由器依照何种路由算法将业务流转发到各链路上,使得链路上任务均衡分配.

1.2 博弈模型

基于博弈论,可将上述任务模型中任意播路由问题看作是多个任务流在网络中的非合作博弈.该博弈中,将路由器看作是网络中多个非合作的参与者,每个参与者在特定服务器和链路上任务流的延迟时间为效用函数,每个参与者总是期望其效用函数最小,且达到网络中资源分配的公平性.

假定 S_{ji} 是参与者 j 沿路径 i 转发任务的流速,矢量 $S_j = (S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jn})$ 表示参与者 j 的策略,矢量 $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$ 表示整个网络博弈中的解.定义任务在每条路径上的延迟时间为

$$F_i(S) = 1 / (\mu_i - \sum_{j=1}^m S_{ji} \lambda_j) \quad (1)$$

则参与者 j 在网络中的总体延迟时间为

$$D_j(S) = \sum_{i=1}^n S_{ji} F_i(s) = \sum_{i=1}^n (S_{ji} / (\mu_i - \sum_{k=1}^m S_{ki} \lambda_k)) \quad (2)$$

根据博弈论可知,每个参与者总是期望自身 $D_j(S)$ 最小,且各个参与者都是自私的,不考虑其他参与者的期望和动机.因此上述博弈问题的 Nash 均衡求解变为:在其他参与者策略确定的情况下,参与者 j 期望延迟时间最小,即

$$\min_{S_j} D_j(S) \quad (3)$$

根据网络路由实际模型可知,式(3)受限条件是:

$$S_{ji} \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^m S_{ki} \lambda_k < \mu_i \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n S_{ji} = 1 \quad (6)$$

2 算法设计

主要通过拉氏函数来求解式(3)的最小值问题.文中给出了该博弈均衡解求解算法,称为 NGRB_j 算法.基于 NGRB_j 算法,给出了完整网络路由均衡算法 NGRB,即基于非合作博弈的均衡路由算法.

定义 1(博弈均衡解) 将博弈模型中的路径处理能力按降序排列^[10],即 $\mu_1^i \geq \mu_2^i \geq \dots \geq \mu_n^i$, μ_1^i 表示在其他参与者路由路径策略确定情况下,参与者 j 可以使用路由路径上的处理能力,其取值为 $\mu_1^i = \mu_i -$

$\sum_{k=1, k \neq j}^m S_{kj} \lambda_k$. 则在该博弈模型中对于参与者 j 的最优解为

$$S_{ji} = \begin{cases} (\mu_i^j - (\mu_{c_j}^j)^{1/2} (\sum_{i=1}^{c_j} \mu_i^j - \lambda_j) / (\sum_{i=1}^{c_j} (\mu_i^j)^{1/2})) / \lambda_j, \\ 0, \end{cases} \tag{7}$$

其中 c_j 是满足不等式(5)的最小取值, $(\mu_{c_j}^j)^{1/2} \leq (\sum_{k=1}^{c_j} \mu_k^j - \lambda_j) / (\sum_{k=1}^{c_j} (\mu_k^j)^{1/2})$.

基于上述求解, 针对图 1 任务模型给出了求解单个参与者 j 均衡点的方法——NGRB_{*j*} 算法.

NGRB_{*j*} 算法:

(1) 将每条路径上用于处理参与者 j 处理能力降序排列: $\mu_1^j \geq \mu_2^j \geq \dots \geq \mu_n^j$.

(2) $t \leftarrow (\sum_{i=1}^n \mu_i^j - \lambda_j) / (\sum_{i=1}^n (\mu_i^j)^{1/2})$.

(3) while ($t > (\mu_n^j)^{1/2}$) do

$$s_m \leftarrow 0, n \leftarrow n - 1, t \leftarrow (\sum_{i=1}^n \mu_i^j - \lambda_j) / (\sum_{i=1}^n (\mu_i^j)^{1/2}).$$

(4) for $i = 1, \dots, n$ do

$$s_{ji} \leftarrow (\mu_i^j - t(\mu_i^j)^{1/2}) / \lambda_j.$$

基于 NGRB_{*j*} 算法, 构建了完整均衡路由算法——NGRB 算法:

(1) 初始化: 使得每个参与者在各条路径上的策略 $S_j = (S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jm})$ 为 0, 定义参数 l , l 表示算法得到最优解需要执行的次数.

(2) 根据 NGRB_{*j*} 算法计算参与者 j 的策略, 并计算在该策略下的 $D_j(S)$ 值. 求得 $n = n + |D_j^{-1}(S) - D_j^j|$ 并将 n 传递给下一个参与者.

(3) 重复执行第(2)步, 直到所有参与者的策略分配都计算完成. 此刻, 重新回到第一个参与者的策略计算. 首先判定 n 取值是否满足误差需要, 如果满足则结束算法, 得到了各个参与者的策略分配. 如果不满足需求, 则重复执行(2), 直到满足需求.

NGRB 算法的核心是算法 NGRB_{*j*}, 因此根据该算法求得的策略分配是 Nash 均衡的.

3 仿真实验

3.1 实验设计

假定该路由系统有 3 个参与者, 3 个目标服务器. 每个参与者到每个服务器之间都有特定路径, 每条路径的传输性能由该条路径上的链路带宽和服务器处理能力确定. u_1 至 u_3 路由器到各个目标服务器之间的路径处理能力通常由链路带宽以及目标服务器处理能力确定.

在这里用 u_i 表示相应链路处理能力. 该实验中, 取 $u_1 = 40$ Mbit/s, $u_2 = 60$ Mbit/s, $u_3 = 100$ Mbit/s. 业务流分别以 λ_1 到 λ_3 速率发送到网络中, $\lambda = \sum_{i=1}^3 \lambda_i$ 表示路由器业务总速率, 取值从 20 Mbit/s 变化到 200 Mbit/s, 变化间隔为 20 Mbit/s, 其取值反映了整个网络系统负载程度. 为分析问题方便, 取 $\lambda_1 = 0.3\lambda$, $\lambda_2 = 0.2\lambda$, $\lambda_3 = 0.5\lambda$. 其中系统负载程度通过参数 $\rho = \lambda / \sum_{i=1}^3 u_i$ 来度量, 一般来说, ρ 为 10% ~ 40% 认为是轻负载系统, ρ 为 40% ~ 60% 是中度负载系统, ρ 为 60% 以上是重负载系统.

为了更好地比较 NGRB 算法的性能, 实验中比较了该算法和典型的 PS 算法^[10].

3.2 实验结果

实验 1 比较 NGRB 与 PS 算法平均延迟时间.

每个参与者延迟时间为 $D_j(S) = \sum_{i=1}^n S_{ji} F_i(S) = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ji}}{\mu_i - \sum_{k=1}^m S_{ki} \lambda_k}$, 参与者在网络中的延迟时间之和为

$D = \sum_{j=1}^m D_j(S)$, 由此可计算出平均延迟时间.

实验2 比较 NGRB 与 PS 算法的公平性.

该实验研究了输入速率 $\lambda=120$ Mbit/s 时每个参与者的执行时间分配公平性问题.

从图2看出,在较低系统负载下,路由延迟时间均较低,算法 NGRB 延迟时间最小,PS 算法较高.在网络处于中度负载情况下,延迟时间增加,尤其是网络处于重负载情况下,延迟时间增加很快.当输入速率大于网络处理能力后,网络处于拥挤状态,延迟时间将会大大增大.

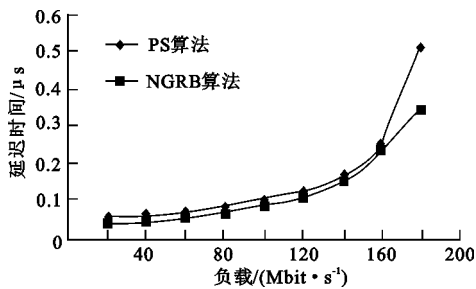


图2 延迟时间

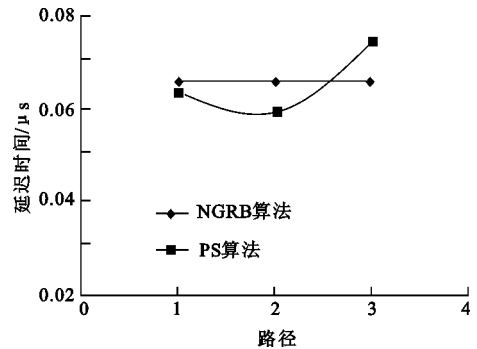


图3 $\lambda=120$ Mbit/s 每个参与者在网络的延迟时间

从图3看出,对于网络路由中的每个参与者来说,NGRB 延迟时间相同,而 PS 延迟时间变化比较大.这表明在 NGRB 均衡路由算法中,参与者在网络中的资源分配是均衡的,PS 算法的路由均衡性较差,且速率较大的参与者往往延迟时间也比较大.

根据实验1和实验2仿真结果可知,基于算法 NGRB 的路由均衡算法,既保证任务在网络传递时延迟较小,也保证了网络路由算法具有公平性,从而具有均衡性.该方法同样适用于业务流数目比较大的情况.

参考文献:

- [1] Cankaya H C. A Survivability Assessment Tool for Restorable Networks[C]//3rd IEEE Symposium on Application-Specific Systems and Software Engineering Technology. Washington:IEEE Computer Society,2000: 319-324.
- [2] Liu Ying, Liu Sanyang. A Real-time Multicast Routing Algorithm Based on the Genetic Algorithm[J]. Journal of Xidian University, 2000, 27(2): 215-218.
- [3] Nash J F. The Bargaining Problem[J]. Econometrica,1950, 18(2): 155-162.
- [4] Nash J F. Noncooperative Games[J]. Annals of Mathematics, 1951, 54(2): 289-295.
- [5] Shenker S, Weinrib A. The Optimal Control of Heterogeneous Queueing Systems; a Paradigm for Load-sharing and Routing[J]. IEEE Trans on Comput,1989, 38(12): 1724-1735.
- [6] Orad A, Rom R. Competitive Routing in Multiuser Communication Networks[J]. IEEE/ACM Trans Networking, 1993, 1(5): 510-521.
- [7] Altman E, Basar T. Routing in Two Parallel Links; Game-theoretic Distributed Algorithms[J]. Parallel and Distributed Computing, 2001, 61(9): 1367-1381.
- [8] Korilis Y A, Lazar A A. Achieving Network Optima Using Stackelberg Routing Strategies[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1997, 5(1):161-173.
- [9] Economides A A. A Unified Game-theoretic Methodology for the Joint Load Sharing, Routing and Congestion Control Problem[D]. California: University of Southern,1990.
- [10] 张惠娟. 基于博弈论的可生存网络资源管理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

(编辑: 郭 华)